



universität
wien

MASTERARBEIT

Titel der Masterarbeit

„Infraschall“

Physiologische und psychologische Auswirkungen auf den Menschen

Verfasser

Jörg Helmut MÜHLHANS, BA

angestrebter akademischer Grad

Master of Arts (MA)

Wien, 2013

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 066 836

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Musikwissenschaft

Betreuer

Univ.-Prof. Dr. Christoph REUTER

Danksagung

In erster Linie gilt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dr. Christoph Reuter, der mir den entscheidenden Input für die Themenfindung gab, die Arbeit betreute und meinen Fortschritt stets mit Interesse verfolgte und mit neuer Literatur vorantrieb. Ihm möchte ich auch danken für die langjährige Begleitung im Studium und die Möglichkeit zur Mitarbeit an Forschungsprojekten, durch die ich wertvolle Erfahrung sammeln konnte.

Herrn Dr. Dr. Arnold Esper danke ich für die vielen Diskussionen, Informationen und auch Experimente, die für meine Arbeit von unschätzbarem Wert waren und wichtige Erkenntnisse über die physikalischen Eigenschaften niederfrequenten Schalls lieferten.

Auch gilt mein Dank Herrn Dipl. Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz, der mir grundlegendes Wissen über akustische Messtechnik vermittelte und in raumakustischen und messtechnischen Fragen mit Rat und Tat zur Seite stand.

Meinen Eltern Helmut und Verena möchte ich für die Möglichkeit eines Studiums und die langjährige Unterstützung danken, meiner Mutter zusätzlich für die langwierige Arbeit des Korrekturlesens.

Zuletzt gilt ein besonderer Dank meiner Freundin Claire für die fortwährende seelische Unterstützung und Entlastung, vor allem im Zuge dieser Masterarbeit.

Inhaltsverzeichnis:

Einleitung.....	1
Liste der Abkürzungen.....	3
1. Schall.....	4
1.1. Physikalische Definition von Schall.....	4
1.2. Reflexion, Beugung, Brechung und Absorption.....	11
1.3. Mitschwingen und Resonanz.....	14
1.4. Sinuston, Klang, Geräusch und Impuls	16
1.5. Hörbarer Schall, Infraschall, Ultraschall und Hyperschall	18
1.6. Natürliche und künstliche Infraschall-Quellen	21
2. Wahrnehmung von (Infra-)Schall	24
2.1. Auditive Wahrnehmung.....	24
2.2. Unterschiede in der Wahrnehmung von niederfrequentem Schall	24
2.3. Vibroakustische und vibrotaktile Wahrnehmung	26
2.4. Unbewusste oder indirekte Wahrnehmung.....	26
2.5. Hörschwelle, Schädigungsgrenze und Schmerzgrenze	29
3. Geschichte der Infraschall-Forschung.....	32
3.1. Vorgeschichte	32
3.2. Frühgeschichte (1914 bis 1945).....	33
3.3. Vladimir Gavreau und die Pionierarbeit in der experimentellen Forschung der 1960er Jahre.....	37
3.4. Vom ersten Infraschall-Kongress bis zur Jahrtausendwende (1973 bis 2000)	40
3.5. Neueste Entwicklungen im Bereich der Infraschall-Forschung	43
3.5.1. Vic Tandy, Die Spuktheorie	43
3.5.2. „Infrasonic Concert“, „Haunt Project“ und TV	48
3.5.3. Infraschall von Windkraftanlagen	53
4. Systematisierung der experimentellen Forschung	56
4.1. Einteilung der Experimente nach Art	58
4.2. Die Zonen-Einteilungen nach Schalldruck.....	60
5. Zusammenfassung der dokumentierten psychologischen Auswirkungen von Infraschall.....	64
6. Vorausblick.....	69
6.1. Forschungsbedarf.....	69
6.2. Erzeugung von Infraschall.....	70
6.3. Messung und Bewertung von Infraschall	73
6.4. Hypothesenbildung und Versuchsanordnung	83
Conclusio	86
Abstract	87
Literaturverzeichnis	89
Anhang	

Einleitung:

Infraschall-Forschung ist ein interdisziplinäres Gebiet, das sich mit niederfrequenten Schwingungen, deren Eigenschaften und den Auswirkungen auf den Körper befasst. Seine Wurzeln kommen aus der klassischen Physik / Akustik, das grundlegendste Wissen über diese „tiefsten Töne“ ist bereits Anfang des 19. Jahrhunderts bekannt. Bis in die 1960er Jahre bleibt das Forschungsgebiet im Bereich der Physik, bis die NASA im Zuge der Raumfahrtprojekte erkennt, dass Infraschall sich schädigend auf das Wohlbefinden und die Gesundheit des Menschen auswirken könnte. Diese Erkenntnis rückt die Infraschall-Forschung auch in das Interesse der Medizin. Seit zwei bis drei Jahrzehnten beteiligen sich auch die Psychologie und Musikwissenschaft an der Forschung und gehen intensiv der Frage nach, ob Infraschall auch psychische Auswirkungen mit sich bringen könnte. Experimente auf diesem Gebiet sind heikel und fehleranfällig, die Meinungen der Experten verschiedener Fachrichtungen gehen weit auseinander. Während die offensichtlichen, temporären Auswirkungen von starkem Infraschall auf Körper, Konzentrationsfähigkeit etc. gut dokumentiert sind, fehlen zu den subtileren Auswirkungen von schwachem oder gar unbemerkbarem Infraschall auf das Wohlbefinden noch etliche Erkenntnisse. Die wenigen wissenschaftlichen Studien, die sich bisher mit den Auswirkungen auf die Psyche befassen, sind schwer vergleichbar und aufgrund mangelnder Dokumentation von Versuchsdurchführungen auch meist nicht replizierbar.

Im Zeitalter fortschreitender Industrialisierung und gleichzeitiger Urbanisierung sind immer mehr Menschen in ihrem Alltag Infraschall ausgesetzt. Die zunehmende Vernetzung von Straßen und Schienenverkehr, die Besiedelung von Industriegebieten und die Automatisierung in der Produktion sind unter vielen anderen Faktoren schuld daran, dass die Menschen immer größeren Intensitäten an Schall und somit auch Infraschall ausgesetzt sind. Deswegen ist es essentiell wichtig, potentielle Gefährdungen des Wohlbefindens ernst zu nehmen, zu analysieren und ihnen gegebenenfalls durch angebrachte Lärmschutzmaßnahmen entgegenzuwirken. Bloße Pegelmessungen im Sinne der Lärmschutzrichtlinien sind dafür nicht ausreichend, es ist nötig, experimentelle Nachweise über mögliche Beeinträchtigungen durch Infraschall wie Unwohlsein, Angst, Schlafstörungen etc. zu liefern. Nur durch präzise Erkenntnisse können angebrachte Maßnahmen getroffen werden, um die Lebensqualität der Menschen zu sichern. Das aktuelle Beispiel der Frage, ob sich die Infraschall-Emission

von Windkraftanlagen negativ auf die umliegende Bevölkerung auswirken könnte, zeigt, dass es noch viel Forschungsbedarf in diesem Bereich gibt.

Die vorliegende Arbeit erläutert einleitend die grundlegenden physikalischen Eigenschaften von Schall unter Berücksichtigung der Besonderheiten von Infraschall. Sie gibt einen historischen Einblick in die Entwicklung und Strömungen der Infraschall-Forschung. Im Kern widmet sie sich der Frage nach dem aktuellen Erkenntnisstand rund um Infraschall und die Möglichkeiten zur Systematisierung und Verbesserung der Infraschall-Experimente und probaten Mitteln zur Messung und Bewertung von niederfrequenten Schwingungen.

Liste der Abkürzungen und verwendeten Zeichen:

Abb.	Abb.
c/s, cps	Frequenz („cycles per second“)
dB	Dezibel
EMF	Elektromagnetische Felder
(F)FT	(Fast) Fourier Transformation
Hz	Hertz (Frequenz)
IS	Infraschall
ISO	Norm der International Organisation of Standardisation
m/s	Meter pro Sekunde
μBar, mBar	Mikrobar, Millibar
NASA	National Aeronautics and Space Administration
Pa, μPa, mPa	Pascal, Mikropascal, Millipascal
sin, cos	Sinus, Cosinus (Winkelfunktion)
SPL, L	Schalldruckpegel („sound pressure level“)
Vpn	Versuchsperson(en)
W/m ²	Watt pro Quadratmeter
WKA	Windkraftanlage

Anmerkung:

Einige der verwendeten Abbildungen aus bestehender Literatur wurden aus Gründen der Bildqualität mit einem Bildbearbeitungsprogramm in Helligkeit, Kontrast und Farbe verändert, verkleinert oder vergrößert und gegebenenfalls mit sichtbarer Beschriftung versehen. Der Inhalt wurde in keinem Bild verändert.

Die Übersetzungen der zitierten Textpassagen in englischer Sprache, sowie die englische Version des Abstracts wurden vom Verfasser selbst erstellt.

Aufgrund der häufigen Verwendung der Worte Infraschall und Versuchsperson werden diese im Folgenden nicht mehr ausgeschrieben, sondern mit IS und Vpn abgekürzt.

1. Schall

1.1. Physikalische Definition von Schall

Zum besseren Verständnis der Eigenschaften und des Verhaltens von Schall werden in diesem Kapitel einige Definitionen aus der physikalischen Akustik vorangestellt. Unterstützend zu den Ausführungen werden die Begriffe möglichst anschaulich anhand graphischer Darstellungen erläutert, da die immer wiederkehrenden Größen für ein allgemeines Verständnis essentiell wichtig sind. Da es sich grundsätzlich um eine psychoakustische Arbeit handelt, wird auf den Einsatz von komplizierten mathematischen Formeln weitgehend verzichtet.

Der Begriff „Akustik“ kommt vom griechischen Wort „ἀκούειν“ („hören“) und bezeichnet allgemein die Lehre oder Wissenschaft vom Schall (aus dem Althochdeutschen „scal“ – GRIMM 1984, Bd.14, Sp.2087). Verwendet wird er erstmals 1693 von Samuel Reyher in seiner Abhandlung „*De natura et jure auditus soni*“ (EBERLEIN 1994, Sp.367; SUPPER 2010, S. 29). Rein physikalisch gesehen bezeichnet Schall die mechanische Schwingung von Teilchen in einem elastischen Medium um ihren Ruhepol (siehe Abb. 1).

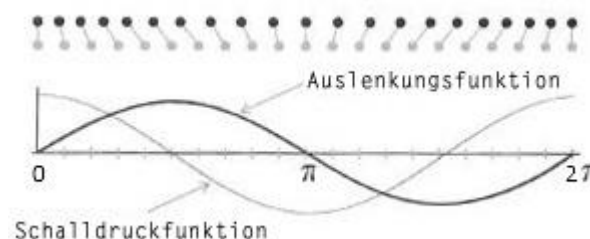


Abb. 1 – Teilchenbewegung mit der daraus resultierenden Sinusfunktion (BARKOWSKY 2009, S.26)

Schwingende Teilchen (z.B. Luftmoleküle) bewegen sich um ihre Ruhelage längs oder quer zur Ausbreitungsrichtung des Schalls und wieder zurück. Dabei stoßen sie ihre Nachbarpartikel an und regen diese zum Mitschwingen an, welche wiederum deren Nachbarpartikel anregen usw. Nach maximaler Auslenkung nehmen die Teilchen aufgrund der Trägheits- und Elastizitätskräften automatisch ihre ursprüngliche Position nach einer Pendelbewegung (Ausschlagen) wieder ein (VEIT 1974, S.2). Es entsteht ein Schallfeld, in dem aber keine Teilchen transportiert werden, sondern lediglich Energie. Durch das Schwingverhalten der Teilchen entstehen (periodische) Druckschwankungen, die wahrnehmbar und messbar sind. Die nun nachfolgenden

physikalischen Größen werden der Einfachheit halber am Beispiel des Luftschalls erklärt, sind aber allgemein für Schall gültig.

Amplitude

Die Intensität der Druckschwankungen resultiert aus der maximalen Auslenkung (Schallausschlag) eines Teilchens und wird als die **Amplitude (A)** bezeichnet (siehe Abb. 2).

Die Amplitude bestimmt die Stärke des Schalls und somit auch die wahrgenommene Lautstärke. Luftdruckschwankungen werden allgemein in Pascal (Pa)¹ gemessen, für die geläufigere Bezeichnung von Tönen, Klängen oder Geräuschen wird aber der **Schalldruckpegel (L)** in Dezibel (dB) angegeben. Da Luftdruckschwankungen allgemein auch in dB umgerechnet werden können, diese aber nicht mit dem Schalldruckpegel verwechselt werden dürfen, wird jener auch oft eindeutiger mit dB SPL gekennzeichnet. In der vorliegenden Arbeit wird, wenn nicht ausdrücklich anders erwähnt, mit dB immer der Schalldruckpegel angegeben, auf den Zusatz der Abkürzung SPL wird deshalb verzichtet. Die dB-Skala ist logarithmisch und kann einfach umgerechnet werden. Eine Erhöhung eines Schalldruckpegels um +6 dB entspricht einer Verdopplung der Luftdruckschwankung (VEIT 1974, S.14). Das subjektive Empfinden von Lautstärke ist frequenz- und pegelabhängig (MÖSER 2010, S.57, 609). Zur Angabe der Leistung von Stereoanlagen (Lautsprechern) wird oftmals eine weitere Größe, nämlich die der akustischen Leistung oder Schallleistung angegeben. Sie drückt sich in Watt pro Quadratmeter (W/m²) aus, eine Erhöhung des Schalldruckpegels um +3 dB entspricht einer Verdopplung der akustischen Leistung.

Eine weitere Größe im Zusammenhang mit der Teilchenbewegung ist die Schallschnelle (v), die angibt, mit welcher Geschwindigkeit sich das Molekül um seine Ruheposition bewegt (nicht zu verwechseln mit der Schallgeschwindigkeit!). Aus der einfachen Multiplikation von **Schallschnelle (v)** * **Schalldruck (p)** resultiert die **Schallintensität (I)** (STANI 1993, S.32)², „*worunter man – bei sich ausbreitenden Wellen – die pro Zeiteinheit durch eine zur Schallausbreitungsrichtung senkrecht stehende Fläche, hindurch gehende Energie versteht*“ (REEFF 1982, S.4). Bei IS-Quellen, die kugelförmig abstrahlen, entsteht in der Nähe der Schallquelle eine Phasenverschiebung zwischen Druck und Schnelle von etwa 90°, die erst in der Entfernung von einer

¹ Das ist vor allem in den Geowissenschaften, der Meteorologie und Physik gebräuchlich. Hier werden Luftdruckschwankungen auch in Mikrobar (µbar) ausgedrückt.

² Sie wird wie die Schallleistung in W/m² ausgedrückt.

Wellenlänge zur Quelle wieder verschwindet. Dadurch ist die Schallintensität und somit auch die Schallenergie in Nähe der Quelle gleich null ($\cos 90^\circ = 0$, REEFF 1982, S.34). Das ist ein wesentlicher Punkt, der bei Experimenten oft übersehen wird. Die Druckschwankung ist zwar vorhanden, aber die Schallenergie fehlt, dadurch entsteht die Gefahr falscher Rückschlüsse. Hier ist Vorsicht geboten, bei Behauptungen darüber, ob die Schallenergie oder Luftdruckschwankung für auftretende Effekte verantwortlich sei. Ein ähnliches Problem herrscht in Druckkammern, auch dort kommt es zu keiner Wellenausbreitung. Das Ohr funktioniert aber ohnehin als Druckempfänger, also sollte diese Tatsache die Ergebnisse von Experimenten zur Perzeption nicht relevant beeinflussen.

Da das menschliche Gehör nicht auf alle Frequenzen gleich empfindlich reagiert, wurden weitere Skalen unter Berücksichtigung der Hörschwelle erstellt, um das Lautheitsempfinden besser abbilden zu können (Phon- und Sone-Skala, Kurven gleicher Lautheit, siehe 1.5, Abb. 19). Im IS-Bereich trifft man auf relativ hohe Amplituden, wenn es um die bewusste Wahrnehmung geht. Mit sinkender Frequenz steigt die Amplitude, die nötig ist, damit eine Frequenz im wahrnehmbaren Bereich liegt (siehe Hörschwelle, 2.5).

Periode / Frequenz:

Hat ein angeregtes Luftmolekül die maximale Auslenkung erreicht, wird es durch die wirkenden Kräfte wieder in Richtung der Ausgangsposition gezwungen, bewegt sich aber aufgrund der Trägheit über diesen Punkt hinaus in die Gegenrichtung, wiederum bis zur maximalen Auslenkung. Von dort schwingt das Molekül wieder zurück. Ist der Ausgangspunkt wiederum erreicht, hat das Teilchen eine **Periode (T)** durchlaufen.

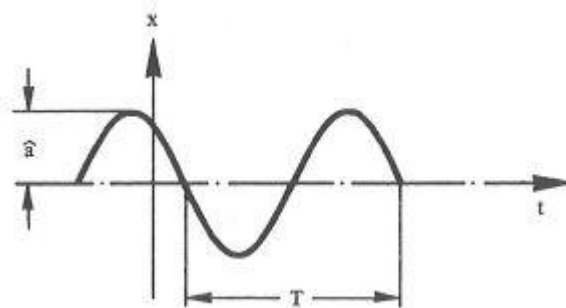


Abb. 2 – Periodendurchlauf (T) in der Sinusfunktion mit Amplitude ($\hat{a}$), (DICKREITER 2008, S.46)

Nach Durchlaufen einer Periode beginnt der Vorgang erneut. Wird keine weitere Energie (Anregung von Nachbarpartikeln) zugeführt, schwingt das Molekül aus und verharrt in der Ruheposition³. Wird weitere Energie zugeführt, wiederholt sich der Vorgang immer wieder. Es entsteht eine periodische Schwingung. Aus der Zeit, die eine Periode in Anspruch nimmt, resultiert die **Frequenz (f)**. Sie errechnet sich aus der Anzahl an Schwingungen (Perioden), die in einer Sekunde durchlaufen werden und wird in Hertz (Hz) angegeben. In älterer Literatur findet sich gelegentlich die Bezeichnung „c/s“ oder „cps“ (= „cycles per second“). Wenn sich eine Periode in einer Sekunde 100 Mal wiederholt, resultiert das in einer Schallwelle mit der Frequenz 100 Hz. Die Frequenz ist die Bezugsgröße für die Tonhöhenempfindung. Im Grenzbereich⁴ zwischen 60 und 30 Hz nimmt die Fähigkeit zur Tonhöhenbestimmung stark ab, sodass im IS-Bereich zwar Schall wahrgenommen, aber keine Tonhöhe zugeordnet werden kann (KUTTRUFF 2004, S.235, HESSE 2011, S.117).

Wellenlänge:

Der Weg, den eine Schallwelle während dem Durchlaufen einer Periode zurücklegt, ist die **Wellenlänge (λ)**. Bei gleichbleibender Periode und somit Frequenz ist sie eine variable Größe, weil sie von der **Schallgeschwindigkeit (c)** abhängig ist. In der Luft ($c = 343 \text{ m/s}$) hat eine Schallwelle mit einer Frequenz von 10 Hz eine Wellenlänge von 34,3 m. Von der Ausgangsamplitude und der Wellenlänge hängt ab, wie weit sich eine Schallwelle unter Berücksichtigung des Mediums fortpflanzen kann. Da die Kenntnis der Wellenlänge wichtig ist für die Berechnung von Raumresonanzen aller Ordnungen, spielt sie in der IS-Forschung immer wieder eine gravierende Rolle. Phänomene wie die Beugung (siehe 1.2) oder die Resonanz (siehe 1.3) sind maßgeblich von der Wellenlänge anhängig. Im IS-Bereich betragen die Wellenlängen zwischen ungefähr 17 Meter bei 20 Hz und mehreren hundert Meter unter 1 Hz.

³ Dieses „Verharren“ in Ruhe ist metaphorisch zu betrachten, tatsächlich sind Luftmoleküle stets in Bewegung

⁴ Im oberen Grenzbereich verschlechtert sich die Tonhöhenwahrnehmung ab etwa 5 kHz, darüber nimmt das Gehör eher Helligkeitsunterschiede wahr (HESSE 2011, S.117)

Phase:

Der Schwingungszustand eines Teilchens zu einem bestimmten Zeitpunkt definiert die Phase. Verdeutlicht man die Phase mit Hilfe der Kreisfrequenz, so liegt der Ausgangspunkt bei 0° (Nullphase) und wird bei 180° wieder durchlaufen. Die maximale Auslenkung erreicht das Teilchen zuerst bei 90° und dann wieder bei 270° . 360° entspricht wieder 0° , die gesamte Periode wurde durchlaufen (Abb. 3). Der momentane Schwingungszustand des Teilchens wird durch die Angabe des **Phasenwinkels (ϕ)** dargestellt.

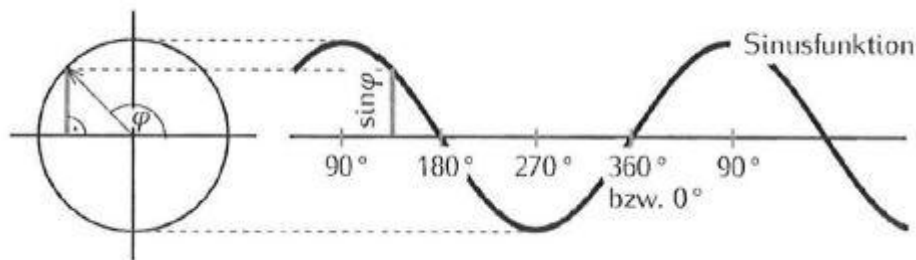


Abb. 3 – Der Sinus des Winkels ϕ wird für fortlaufende Werte von ϕ zur Sinusfunktion $\sin \phi$. (BARKOWSKY 2009, S.21)

Wenn sich Reflexionen einer Welle mit gleicher Phase überlagern, führt das zu einer Verstärkung der Amplitude, sind sie um 180° phasenverschoben, führt das zur Auslöschung (VEIT 1974, S.55). Dieses Phänomen ist relevant bei der Bildung von stehenden Wellen, auch genannt (Raum-) Moden und wird an späterer Stelle eingehender erklärt.

Schallausbreitung:

Die Definitionen von Schall und Vibration lassen sich nur schwer trennen. Üblicherweise spricht man bei Schall eher vom Luftschall (akustische Schwingung), er kann aber auch als Körperschall existieren. Aus physikalischer Sicht sind Körperschall und Vibration dasselbe (mechanische Schwingung). Der Hauptunterschied liegt lediglich im Ausbreitungsmedium und damit verbunden auch in der Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Die Ausbreitung der Schallenergie ist an ein Medium gebunden, im Vakuum kann sich Schall nicht ausbreiten. Die Dichte, Elastizität und Temperatur des Mediums wiederum bestimmen hauptsächlich die Ausbreitungs- oder Schallgeschwindigkeit (c). Diese darf nicht mit der Schallschnelle (v) verwechselt werden, die angibt, mit welcher Geschwindigkeit sich ein Teilchen um seine Ruheposition bewegt.

In gasförmigen Medien schwingen die Moleküle immer in und entgegen der Ausbreitungsrichtung, es entstehen Längs- oder Longitudinalwellen (MEYER & NEUMANN 1979, S.1).

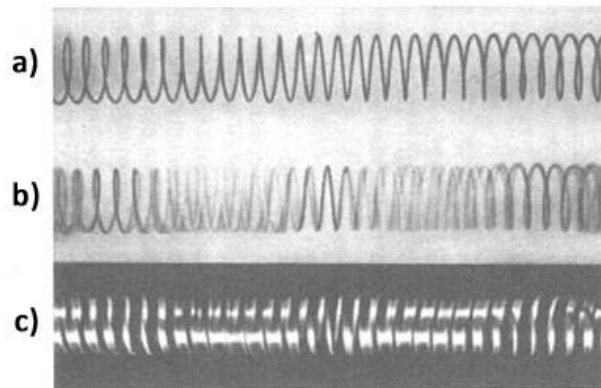


Abb. 4 – Longitudinalwellen einer Schraubenfeder mit 10 cm Wellenlänge, a) Ruhezustand, b) vor hellem und c) vor dunklem Hintergrund (BERGMANN & SCHAEFER 2008, S.495)

Das wichtigste, im Alltag omnipräsente Medium zur Ausbreitung von Schall ist die Luft, weshalb diese Ausbreitungsform auch „Luftschaall“ genannt wird. Bei 20° Celsius breitet sich Schall in der Luft mit ungefähr 343 m/s aus. Die Schallgeschwindigkeit in der Luft steigt linear mit ungefähr 0,6 m/s pro 1° Celsius Temperaturerhöhung (DICKREITER 2008, S.2). Auch in anderen Gasen breitet sich Schall in Longitudinalwellenform aus. Im Fall einer punktförmigen Anregung breitet sich die Welle (theoretisch) perfekt kugelförmig aus, man spricht auch von der Kugelwelle (BERGMANN & SCHAEFER 2008, S.484). Sie zeichnet sich dadurch aus, dass alle Teilchen mit gleichem Abstand zur Quelle sich im selben Erregungszustand befinden, das heißt gleichphasig schwingen (siehe Phase, 1.4). Wird diese Ausbreitung durch Hindernisse beeinflusst, entsteht eine Richtcharakteristik, das heißt, die Energie wird in eine Richtung stärker abgestrahlt, als in eine andere. Die Abstrahlrichtung oder Richtcharakteristik ist unter anderem frequenzabhängig und spielt bei der Emission von IS eine ganz wesentliche Rolle.

Auch in Flüssigkeiten breitet sich Schall überwiegend in Longitudinalwellenform⁵ aus, allerdings mit einer viel höheren Geschwindigkeit als in der Luft. In Wasser breitet sich Schall bei 20° Celsius mit ungefähr 1484 m/s fort (BERGMANN & SCHAEFER 2008, S.526, KUTRUFF 2004, S.53.). Die Dämpfung im Wasser ist sehr gering, deshalb kann

⁵ Hier gilt zu differenzieren: Im Wasser kommen ausschließlich Longitudinalwellen vor, während sich an der Wasseroberfläche „Wasserwellen“ – eine Mischform aus Transversal- und Longitudinalwellen – ausbilden.

sich Schall über große Entfernungen fortpflanzen. Das ermöglicht die Echolotung oder auch Kommunikation von Meerestieren über große Distanzen (DICKREITER 2008, S.4). Da auch Wasser (z.B. im Meer) die Schallquelle meist umgibt, entsteht eine annähernd kugelförmige Welle.

Lediglich in Feststoffen breitet sich Schall neben der Longitudinalwellenform auch transversaler Form aus, d.h. die Auslenkungsrichtung der Teilchen verläuft quer zur Ausbreitungsrichtung der Welle (Abb. 5).

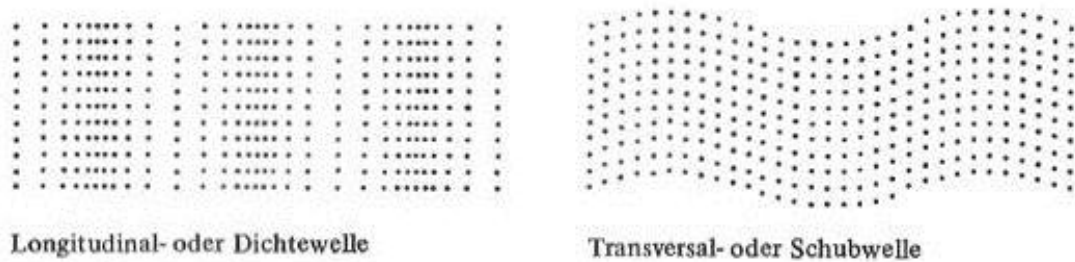


Abb. 5 – Teilchenbewegung von Longitudinal- und Transversalwellen (MEYER & NEUMANN 1979, S.16)

Durch die Vereinigung beider Wellenformen bilden sich auch Oberflächen-, Biege- und Dehnwellen aus (siehe Abb. 6). Dehnwellen werden oft auch als „Quasi-Longitudinale Wellen“ bezeichnet.

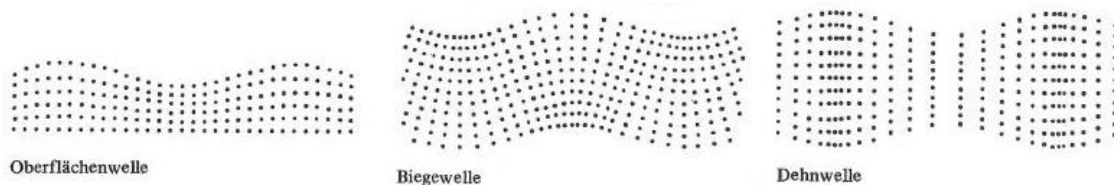


Abb. 6 – Mischformen aus der Kombination von Transversal- und Longitudinalwellen: Oberflächenwelle, Biegewelle und Dehnwelle (MEYER & NEUMANN 1979, S.16)

Es können sich alle möglichen Wellenformen gleichzeitig mit unterschiedlichen Intensitäten ausbilden, die Ausbreitungsgeschwindigkeit kann dabei unter den möglichen Formen sehr unterschiedlich sein. Beeinflusst werden diese beiden Faktoren (Intensität und Geschwindigkeit) hauptsächlich von den räumlichen Begrenzungen des Festkörpers. Dünne Platten begünstigen eine starke Ausbildung von Biegewellen, während Stäbe eher Torsionswellen - eine Spezialform der Transversalwelle - begünstigen (MAYER & NEUMANN 1979, S.17f). Eine besondere Eigenschaft der Biegewelle ist, dass ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Wellenlänge abhängt. (BERGMANN & SCHAEFER 2008, S.531)

Zusätzlich hängt die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Feststoffen aufgrund deren Viskosität von der Frequenz ab. Unterschiedliche Ausbreitungsformen haben ebenfalls unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten, so breiten sich longitudinale oder quasi-longitudinale Wellen mit einer höheren Geschwindigkeit aus als transversale Wellen. Diese Unterschiede führen zum als „Dispersion“ bezeichneten Auseinanderlaufen der Signalgestalt (MÖSER 2009, S.151). Im niederfrequenten Bereich ist der Effekt jedoch vernachlässigbar. In Feststoffen ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit durchschnittlich am größten⁶, weshalb die Wellenlängen auch viel größer sind. Deshalb kann man einen herannahenden Zug durch das Klirren an den Schienen bereits hören, lange bevor man ihn sieht. Niederfrequente Anteile können sich aufgrund der hohen Wellenlängen im Erdboden über mehrere tausend Kilometer fortpflanzen, was im Zusammenhang mit IS von essentieller Wichtigkeit ist.

Die Ausbreitung von Schall ist begrenzt, bei der Energieübertragung benachbarter Teilchen, sowie der Reflexion oder Absorption an Hindernissen und auch dem Übergang in ein anderes Medium, geht Energie verloren.

1.2. Reflexion, Beugung, Brechung und Absorption

Trifft eine Schallwelle innerhalb ihres Mediums auf Grenzen oder Hindernisse, wird ein Teil der Energie zurückgeworfen, d.h. reflektiert. Für die Reflexion an einer ebenen Fläche gilt das Gesetz, wie auch in der Optik, Einfallswinkel = Ausfallswinkel. (VEIT 1974, S.57)

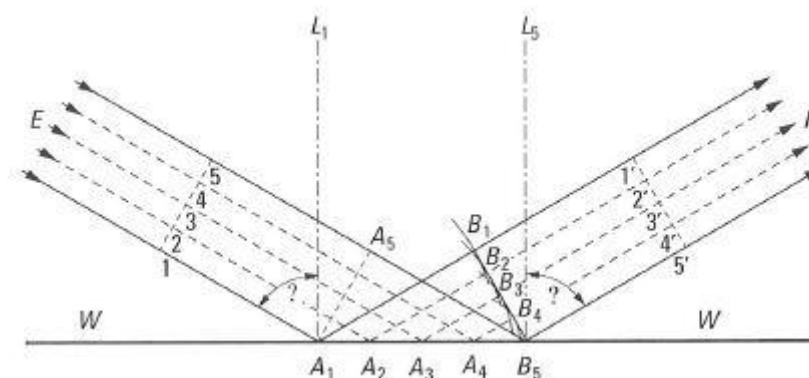


Abb. 7 – Reflexionen einer ebenen Welle an einer ebenen Wand (BERGMANN & SCHAEFER 2008, S.511)

⁶ Besonders die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Longitudinal- und Dehnwellen (=quasi-longitudinal) sind in Feststoffen besonders hoch

An konkaven Flächen kommt es zur Brennpunktbildung, Schallwellen werden gebündelt, was die Amplitude im Brennpunkt verstärkt. Konvexe Flächen zerstreuen den Schall, das Schallfeld wird breiter, jedoch die Amplitude nimmt ab. Unregelmäßig geformte Oberflächen reflektieren in unterschiedlichste Richtung, es entsteht ein diffuses Schallfeld. In der Kriegszeit wurde versucht, IS durch große Parabolspiegel zu bündeln, um ihn als Waffe einzusetzen (siehe 3.2). Abgesehen davon haben diese Effekte keine Relevanz in der IS-Forschung.

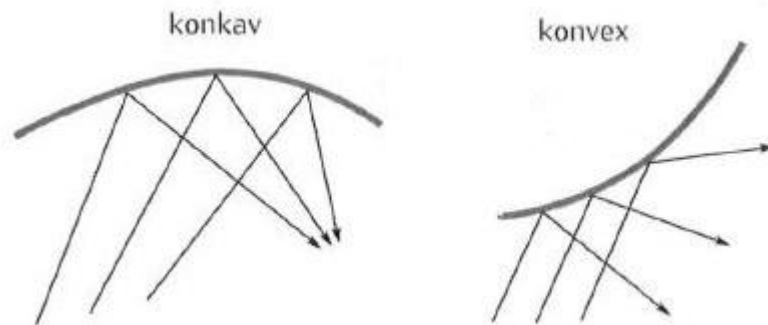


Abb. 8 – Eine konkave Flächenform führt zur Schallkonzentration (links), eine konvexe zur Schalldiffusion (rechts) (BARKOWSKY 2009, S.175)

Ist die Oberfläche eines Hindernisses gleich groß oder verhältnismäßig klein zur Wellenlänge, kommt es zur **Beugung**. Man versteht darunter das „Umlaufen“ eines Hindernisses. Ist das Hindernis im Durchmesser größer als die Wellenlänge, kommt es zur Schattenwirkung (siehe Abb. 9). Im IS-Bereich treten Schwingungen mit Wellenlängen von etwa 20 bis mehreren hundert Metern auf. Da die Oberflächen von Hindernissen in diesem Bereich meist klein zur Wellenlänge sind, tritt dieses Phänomen sehr häufig auf. Beugung begünstigt zusätzlich eine weite und direkte Ausbreitung von Schall. Besonders im niederfrequenten Bereich macht die Beugung von Schall meist jegliche Lärmschutzmaßnahme unwirksam, worauf an späterer Stelle noch genauer eingegangen werden soll.

Die gegenteilige Beugungserscheinung tritt auf, wenn eine ebene Welle auf eine schallreflektierende Wand mit einer Öffnung trifft. Ist die Wellenlänge gleich groß oder kleiner als die Öffnung, tritt die Welle hindurch und breitet sich von der Öffnung weg wieder kugelförmig aus (BERGMANN & SCHAEFER 2008, S.506). Diese Variante ist für die Betrachtung von IS aber von keiner Bedeutung.

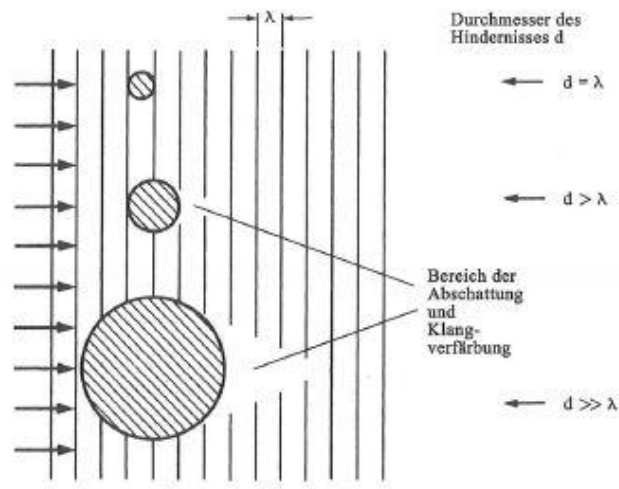


Abb. 9 – Schallbeugung und Schattenwirkung an zylindrischen Hindernissen für verschiedene Verhältnisse von Wellenlänge (λ) zum Zylinderdurchmesser (d) (DICKREITER 2008, S.13)

Trifft eine Schwingung auf ein anderes Medium, geht Energie auf das Medium über. Die Schallwelle kann sich, wenn auch stark verlustbehaftet, weiter fortpflanzen. Dabei ändert die Schwingung ihre Ausbreitungsrichtung. Diesen Effekt nennt man **Brechung** (Abb. 10). Meist ändert sich dann auch seine Ausbreitungsform (z.B. Longitudinalwellen gehen in Transversalwellen über).

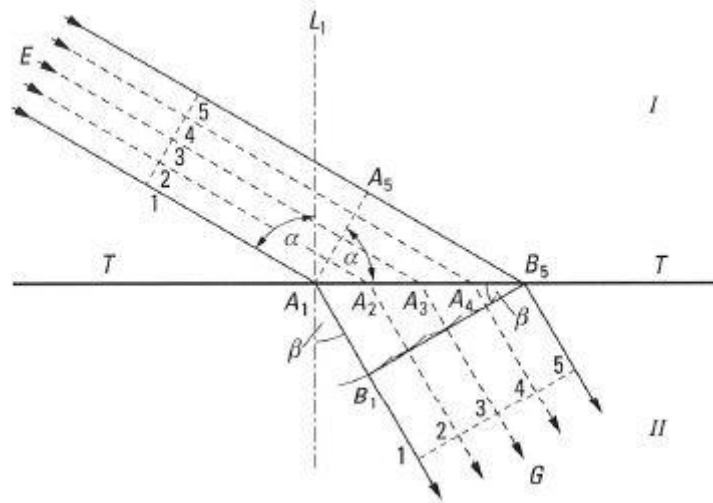


Abb. 10 – Brechung einer ebenen Welle (BERGMANN & SCHAEFER 2008, S.513)

Die Reflektion von Schallenergie geht immer einher mit der Absorption. Ein Teil der Energie geht an der Fläche des Hindernisses oder der Grenze des Mediums verloren. Trifft Luftschall auf eine Wand, reiben sich die Luftteilchen an den Wänden der feinen Poren in der Wand. Ein Teil der Schallenergie (=Bewegungsenergie) wird in Wärmeenergie umgewandelt und geht verloren. Zu welchem Teil die Energie reflektiert und absorbiert wird, hängt von der Materialbeschaffenheit des Hindernisses ab. Dichte

Oberflächen begünstigen starke Reflexionen und absorbieren nur schwach, wohingegen poröse Oberflächen kaum reflektieren und stark absorbieren. Der Absorptionsgrad eines Materials ist frequenzabhängig. Je größer die Wellenlänge ist, die absorbiert werden soll, desto dicker muss das Dämmmaterial sein. Diese Eigenschaft spielt wiederum bei der Absorption von IS eine wesentliche Rolle, da IS durch die enormen Wellenlängen kaum gedämmt werden kann.

1.3. Mitschwingen und Resonanz:

Trifft Schall auf ein anderes schwingungsfähiges System, kann das System zum Mitschwingen angeregt werden. Unter Berücksichtigung des Dämpfungsgrades schwingt das System erzwungenermaßen, nach einem kurzen Einschwingvorgang von wenigen Millisekunden, in derselben Frequenz mit. Kennzeichnend ist, dass die Amplitude beim Mitschwingen zur Erregerschwingung relativ schwach und konstant ist (REEFF 1982, S.8).

Jedes schwingungsfähige System besitzt eine oder mehrere Frequenzen, in denen es frei schwingt. In dieser Eigenfrequenz (f_0), auch genannt Eigenresonanz, ist der Dämpfungsgrad wesentlich geringer als in anderen Frequenzen. Wird ein System in dieser Eigenfrequenz angeregt, d.h. in Resonanz versetzt, verstärkt sich die Amplitude mit jeder erneuten Anregung, also bei jeder Periode der Schwingung. Überschreitet die so entstehende Resonanz die Grenzen der Materialfestigkeit, kommt es zur Resonanzkatastrophe und damit verbunden zur Zerstörung des Systems (KNERR 1995, S.473). Da in der populärwissenschaftlichen Literatur immer wieder die ‚zerstörerische Kraft von IS‘ erwähnt wird, sollte die Resonanz im weiteren Verlauf immer im Hinterkopf behalten werden. Außerdem ist die Resonanz von niederfrequentem Schall oft wichtig für die Wahrnehmbarkeit und wird in den nachfolgenden Studien und Experimenten einige Male zum dominierenden Faktor. Kommt es in einem schwingungsfähigen System zur Resonanz, bilden sich **stehende Wellen** aus. In Räumen nennt man diese auch (Raum-)Moden. Überlagert sich eine Schallwelle mit ihren Reflexionen von parallelen Wänden, weil die Wellenlänge dem Raummaß oder ganzzahligen Vielfachen davon entspricht, bilden sich Druckmaxima und –minima, die nicht fortschreiten.

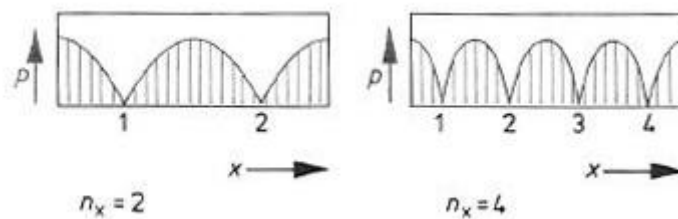


Abb. 11 – Stehende Wellen mit einem Verhältnis Wellenlänge zu Raumlänge von 1:2 bzw. 1:4 (VEIT 1974, S.65)

Die stärksten stehenden Wellen sind axiale (eindimensionale) Moden, die sich an gegenüberliegenden, parallelen Wänden ausbilden. Jede einzelne Reflexion überlagert sich immer wieder mit der Erregerwelle und nachfolgenden Reflexionen, bis sämtliche Energie der jeweiligen Reflexion verloren geht. Dadurch kommt es im Bereich der Druckmaxima zu einer starken Anhebung der Amplitude. Die niederfrequenteste stehende Welle, die sich in einem Raum ausbilden kann, errechnet sich aus $L = \lambda/2$, wobei „L“ der Länge zwischen zwei parallelen Wänden entspricht (HENTSCHEL 2008, S.24f). Weitere vom Raum „begünstigte“ Moden sind die ganzzahligen Vielfachen der ersten Mode.

Es gibt auch tangentialer (zweidimensionale) und oblique (dreidimensionale) Moden. Diese Moden entstehen gleich, jedoch durch Reflexionen an vier bzw. allen sechs Wänden eines Raumes und daher auch schwächer.

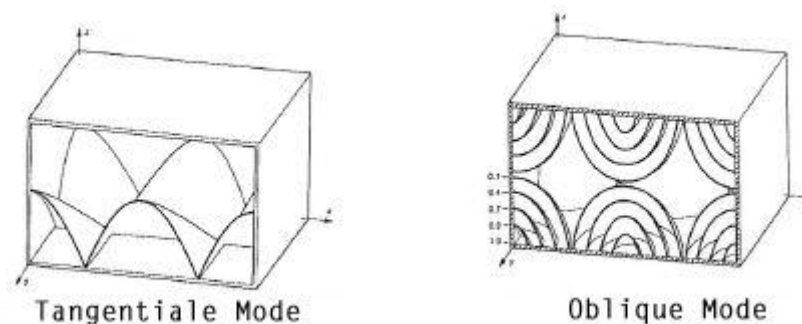


Abb. 12 – Darstellung stehender Wellen tangentialer und obliquer Raummoden (HENTSCHEL 2008, S.25)

Ein Wandabstand von etwa 8,5 Metern kann eine stehende Welle mit einer minimalen Frequenz von 20 Hz begünstigen. In Räumen, in denen diese Dimension an zumindest 2 gegenüberliegenden Wänden überschritten wird, können sich stehende Wellen im IS-Bereich ausbilden. Da die Wellenlänge λ von der Schallgeschwindigkeit c abhängt, muss für eine präzise Berechnung der stehenden Wellen auch die Raumtemperatur berücksichtigt werden.

1.4. Sinuston, Klang, Geräusch und Impuls

Schall ist ein Überbegriff für die Gesamtheit aller hörbarer und unhörbarer, periodischer und nichtperiodischer Schwingungen, jeglicher Frequenz(en) und Komplexität. Sprechen wir von einem Ton, meinen wir physikalisch gesehen meist einen Klang. Die Mehrheit aller Schallereignisse setzt sich aus einer Vielzahl an Frequenzen unterschiedlicher Amplituden zusammen und ist analytisch und messtechnisch sehr komplex.

Anmerkung: Die in diesem Kapitel gezeigten Abbildungen 13 bis 17 wurden vom Verfasser unter Verwendung des Programms Adobe Audition 3.0 erstellt und dienen lediglich der Veranschaulichung.

Besteht Schall aus nur einer einzigen Frequenz, spricht man vom **Sinuston**. Obwohl er in der Natur so gut wie gar nicht vorkommt und auch technisch nur schwer (in Reinform) zu erzeugen ist, spielt er die gewichtigste Rolle in den IS-Untersuchungen. Aufgrund der langen Distanzen, über die sich IS fortpflanzt, werden höhere Frequenzanteile oft früher absorbiert oder verlieren einfach schneller an Energie. Durch Resonanz kommt es zu einer stärkeren Ausbildung einzelner Frequenzen. Wenn Klänge kaum oder nur schwach ausgebildete Obertöne besitzen oder diese und auch der Geräuschanteil sich nicht vom Hintergrundlärm abheben, spricht man auch oft von Sinustönen, oder zumindest annähernd sinusförmigen Tönen. Wichtig ist die Erzeugung annähernd sinusförmigen IS für die experimentelle Forschung, um die Effekte einzelner Frequenzen auf den Menschen beobachten zu können. Die Erzeugung annähernd sinusförmiger Schallwellen für die Experimentalforschung ist besonders im IS-Bereich sehr schwierig.

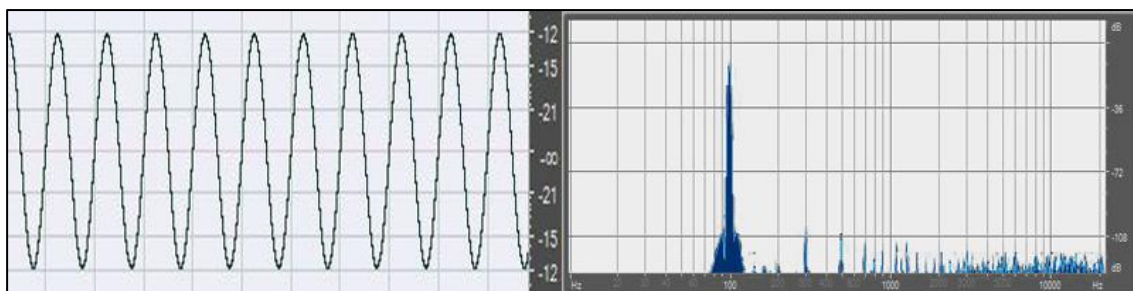


Abb. 13 – Reine Sinuswellenform (100 Hz) und Fourier-Transformation (Screenshot Audition)

Als **Klang** bezeichnet man Schall, der sich aus mehreren Frequenzen zusammensetzt. Solche Klänge folgen Gesetzmäßigkeiten, wie der Naturtonreihe. Zusätzlich zu der tiefsten Frequenz, dem Grundton, bilden sich Frequenzen ganzzahliger Vielfacher der Grundfrequenz (die Obertöne, Harmonische oder Teiltöne) aus. Liegt die Frequenz des Grundtons bei 10 Hz, bilden sich Obertöne in den Frequenzen 20 Hz, 30 Hz, 40 Hz usw. aus. Nicht alle Teiltöne haben die gleiche Amplitude, es müssen auch nicht immer alle Teiltöne ausgebildet werden. Ausbildung und Stärke der Teiltöne verändert wesentlich die Klangfarbe. Diese Art der Klänge kommt häufig vor und begegnet uns vor allem in Musik, Sprache oder generell allem, dem wir eine Tonhöhe zuschreiben. Klänge haben auch immer einen Geräuschanteil, der ebenfalls die Wahrnehmung beeinflusst.

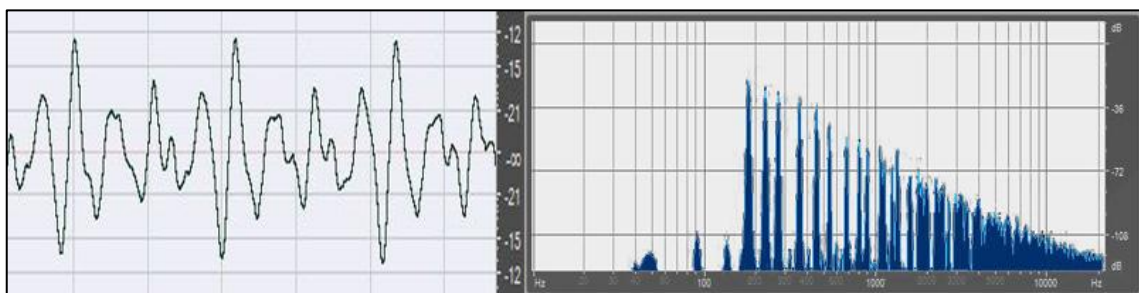


Abb. 14 – Klavierakkord f-Moll, Wellenform und Fourier-Transformation (Screenshot, Audition)

Geräusche zeichnen sich entweder durch fehlende Teiltonausprägungen, breitbandige Frequenzbeteiligung oder mangelnde Periodizität aus. Letzteres erschwert das Feststellen einer genauen Frequenz. In der Natur kommen überwiegend akustische Ereignisse vor, deren Geräuschanteil hoch ist. Bekannte künstlich erzeugte Geräusche sind weißes oder rosa Rauschen (Abb. 15), welche zu Messzwecken verwendet werden können. Beim weißen Rauschen sind alle Frequenzen über die gesamte Bandbreite statistisch gleich stark (Amplitude) verteilt. Wird zusätzlich ein Filter verwendet, sodass die Schallenergie mit -3 dB pro Oktave abnimmt, entsteht rosa Rauschen (DICKREITER 2008, S.44).

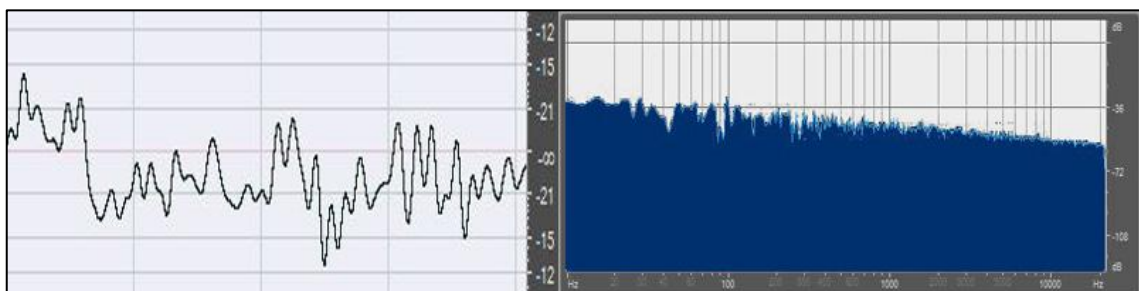


Abb. 15 – Rosa Rauschen, Wellenform und Fourier-Transformation (Screenshot Audition)

Eine einzige Anregung in eine Richtung (mechanisch) ist ein **Impuls**. Wenn eine Lautsprechermembran lediglich in eine Richtung aussteuert und wieder die Ruheposition einnimmt, ohne dabei gegen- oder nachzuschwingen, entsteht ein akustischer Impuls, theoretisch eine halbe Periode. Die Zeit, die dieser Vorgang in Anspruch nimmt, bestimmt die Impulsbreite. Mangels an Periodizität kann einem Impuls keine Frequenz und Tonhöhe zugesprochen werden. Ein theoretisch perfekter Impuls (Abb. 16) beinhaltet alle Frequenzen mit gleicher Amplitude.

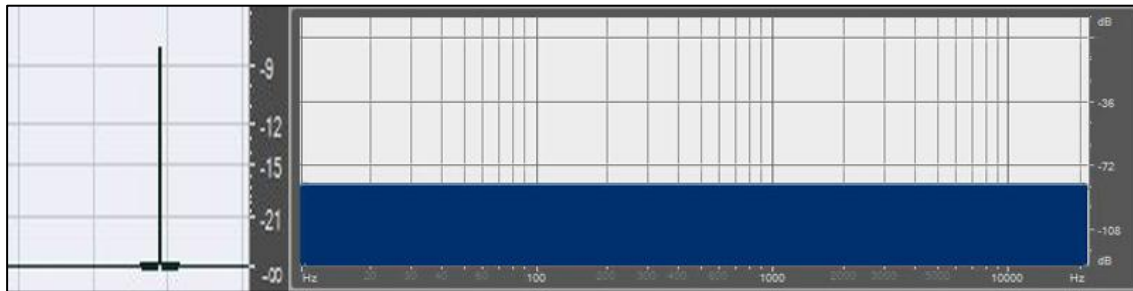


Abb. 16 – Generierter Einzelimpuls mit Fourier-Transformation (Screenshot Audition)

Dem Impuls in seiner Eigenschaft sehr nahe kommt der **Knall**, zum Beispiel eines platzenden Luftballons (Abb. 17). Auch der Überschallknall von Flugzeugen [engl. „*sonic boom*“] besitzt dieselben Eigenschaften. Wie ein Knall empfunden wird, hängt größtenteils vom Nachhallverhalten der Umgebung (Impulsantwort) ab.

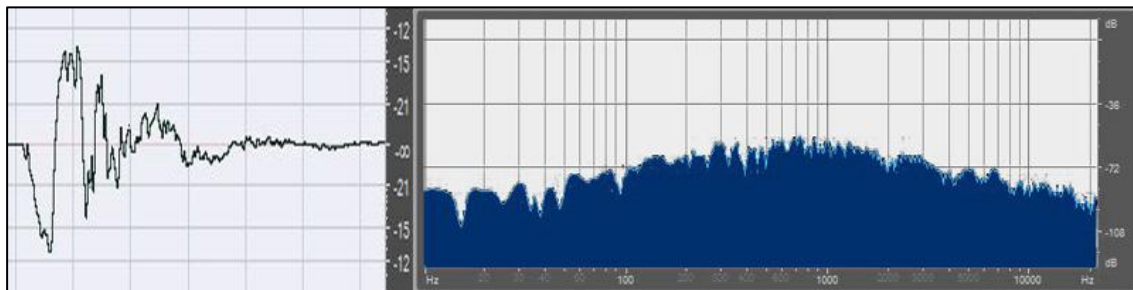


Abb. 17 – realer Impuls eines platzenden Luftballons mit Fourier-Transformation (Screenshot Audition)

1.5. Hörbarer Schall, Infraschall, Ultraschall und Hyperschall

Um das menschliche Gehör im Frequenzspektrum verständlich zu berücksichtigen, wird es in mehrere Bereiche unterteilt. IS stellt den Bereich unterhalb der Hörgrenze dar, hörbarer Schall ist der Bereich, der ungefähr vom durchschnittlichen menschlichen Ohr wahrgenommen werden kann und Ultraschall sind all jene Frequenzen, die oberhalb der Hörgrenze liegen. Dieser höchste Bereich wird ab 1000 MHz = 1 GHz noch einmal abgeteilt und auch Hyperschall genannt und ist an dieser Stelle nicht relevant.

Mitte des 19. Jahrhunderts geben einige Forscher noch eine relativ hohe obere Hörgrenze an, zwischen 72.000 und 96.000 Hz (ZELLNER 1892, S.219). Zellner selbst gibt 1892 die Obergrenze mit etwa 35.000 Hz an. Man weiß bereits seit der Entdeckung des Corti'schen Organs 1851 (ZELLNER 1892, S.94), dass die Tonhöhenwahrnehmung durch die Feuerrate der Haarzellen im Innenohr festgestellt wird. Seit 1907 „[...] *nach vielfachen Beobachtungen von F.A. Schulze* [...]“ (HELMHOLTZ 1913, Vorwort IX)“ ist bekannt, dass diese Obergrenze bei ungefähr 20.000 Hz liegt. Nach einer gängigen Faustregel nimmt sie jedoch um circa 1.000 Hz pro Lebensdekade ab. Unter Berücksichtigung dieser Abnahme wird in der neueren wissenschaftlichen Standardliteratur die Grenze für einen durchschnittlichen Erwachsenen mit 16.000 Hz angegeben (vgl. VEIT 1974 S.118; KUTRUFF 2004, S.240; FASTL & ZWICKER 2006, S.4f; DICKREITER 2008, S.99;). Die Obergrenze resultiert aus einer physiologischen Limitierung. Die höchsten Frequenzen regen die Basilarmembran ganz am vorderen Ende an (RANKE & LULLIES 1953, S.79, 91). Diese Problematik betrifft die untere Hörgrenze jedoch nicht, weshalb ihre Definition aus physikalischer Sicht auch wenig Sinn macht. Für niederfrequente Schwingungen wird lediglich die Tonhöhenempfindung immer schlechter bzw. das Ohr unempfindlicher, was aber eine Wahrnehmung nicht ausschließt. Für die Lehre ist die Bereichsangabe aber wichtig und durchaus sinnvoll, um die Empfindlichkeit des Gehörs besser zeigen zu können.

Die Untergrenze ist viel früher erforscht. 1700 geht Sauveur durch Versuche mit einer 40-Fuß Orgelpfeife von 12,5 Hz als Untergrenze aus (PREYER 1876, S.1). Erstaunlicherweise schrieb Chladni schon vor über 200 Jahren, was heute noch als Stand der Dinge gilt. Er spannte eine Saite und verkürzte sie, sodass er die sichtbaren Schwingungen zählen konnte. Er selbst berichtet, erst ab 16 Schwingungen eine Wirkung auf das Gehör zu bemerken, aber führt gleichzeitig an, dass er vielleicht darunter nichts höre, weil nur die Schwingungen zu gering seien. Er vermutet auch, dass einige Tiere vielleicht niedrigere Schwingungen wahrnehmen könnten (CHLADNI 1802, S.2, 36). Dieser bemerkenswerten Feststellung von 1802 kann bis heute in keiner Weise widersprochen werden.

Georg von Békésy ist 1936 der erste, der eine graphische Darstellung des menschlichen Hörbereichs publiziert, in der man den Verlauf der Hörkurve erkennt (BEKESY 1936b, S.555).

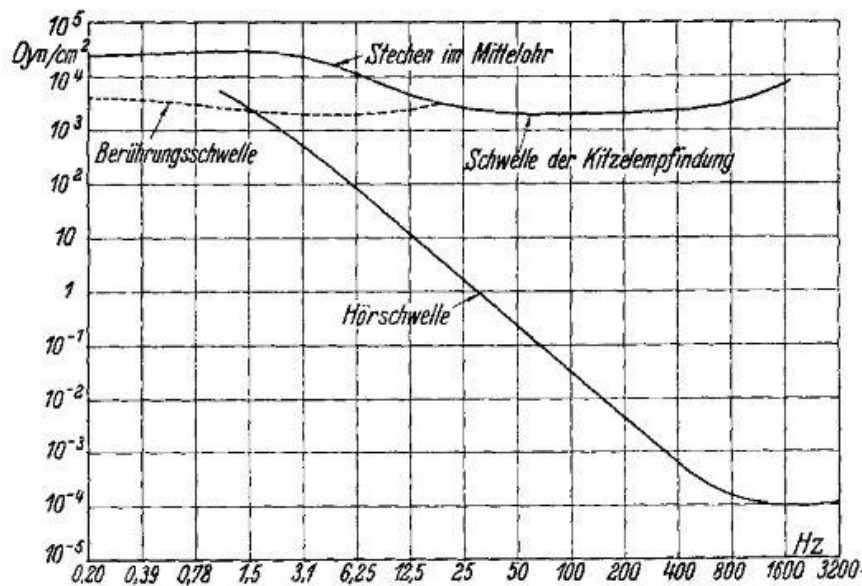


Abb. 18 – „Die Reizschwelle der im Ohr durch Luftdruckschwankungen auslösbaren verschiedenen Empfindungen“ (BEKESY 1936b, S.555)

In mehreren Darstellungen deckt er hauptsächlich den Bereich von 1 – 6400 Hz ab, erst später folgen Darstellungen über den gesamten Hörbereich. 1933 stellen Harvey Fletcher und Wilden A. Munson die berühmten Kurven gleicher Lautheit vor, die nicht nur eine Relation zwischen Lautheit, akustischer Leistung und Schalldruck zeigen, sondern auch die unterschiedliche Empfindlichkeit des Gehörs nach Frequenzen übersichtlich darstellen (FLETCHER & MUNSON 1933).

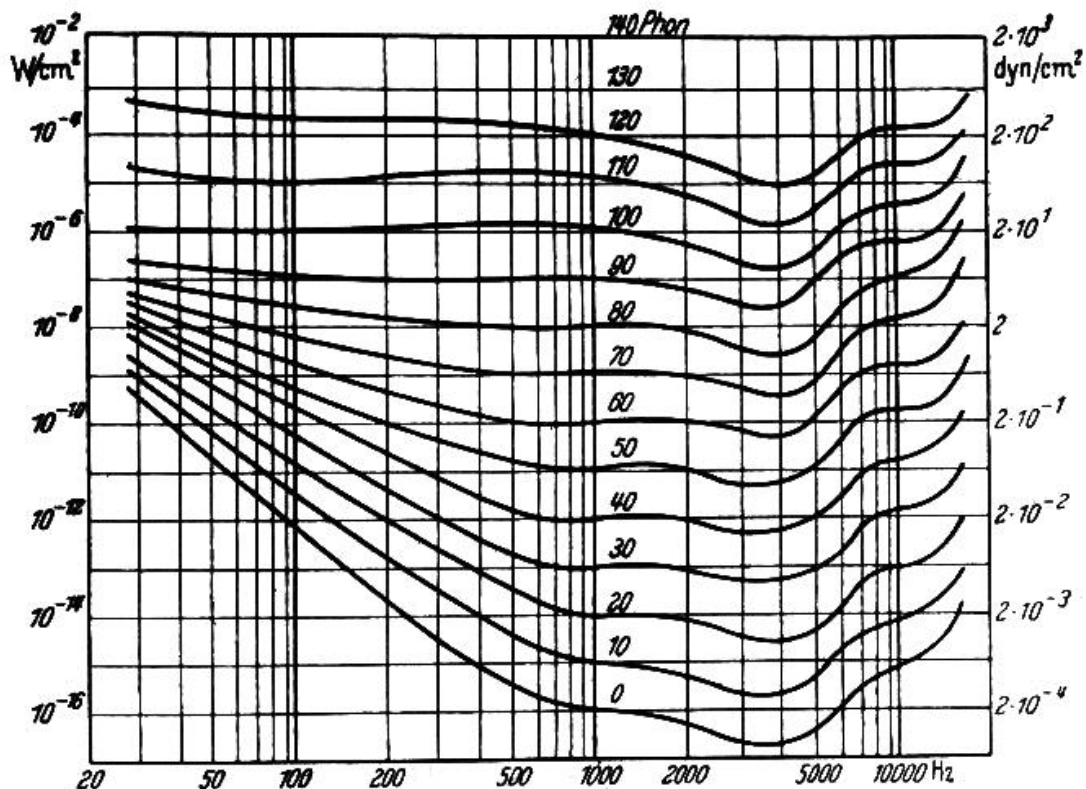


Abb. 19 – Kurven gleicher Lautheit nach Fletcher & Munson (RANKE & LULLIES 1953, S.13)

Aufgrund der Tatsache, dass Schwingungen unterhalb von 16 bzw. 20 Hz in der Natur kaum in hörbarer Intensität vorkommen und auch künstlich nur schwer zu erzeugen sind wird dieser Bereich als die untere Hörgrenze angegeben. Die meisten Diagramme in den Lehrbüchern zeichnen Hörkurven für einen Bereich von 16 (20) Hz bis 16.000 (20.000) Hz.

An dieser Stelle soll noch einmal ausdrücklich erwähnt werden, dass Einigkeit darüber herrscht, dass Frequenzen unterhalb von 20 Hz bei ausreichend hohem Schalldruck wahrnehmbar sind. Der nötige Schalldruck steigt mit sinkender Frequenz an. Je niedriger die Frequenz, desto kritischer wird die künstliche Erzeugung von sinusartigen Schallwellen. Leventhall beschreibt die Hörgrenze bis 1,5 Hz und stützt sich dabei auf eine Studie von Yeowart 1967 (LEVENTHALL 2007, S.131). Ob es technisch möglich ist mit Kopfhörern derartig niedrige Frequenzen mit ausreichender Amplitude zu erzeugen wird in Abschnitt 6.2 genauer beschrieben.

1.6. Natürliche und künstliche Infraschall-Quellen

Für die Emission von IS gibt es eine Reihe natürlicher und künstlicher Quellen. Letztere sind im experimentellen Bereich von größerer Relevanz, dennoch sollen auch die natürlichen hier kurz aufgeführt werden, weil sie für andere Wissenschaften wie die Geoseismik von größerer Bedeutung sind.

Die Explosionen bei **Vulkanausbrüchen** sind vermutlich die stärksten natürlichen IS-Quellen. Sie produzieren Schall über das gesamte Frequenzspektrum, aber nur die tiefsten Anteile können sich aufgrund ihrer Wellenlängen über mehrere tausend Kilometer ausbreiten. Das wird benutzt, um mit „Infrasound-Arrays“ und Mikrobarometern Vulkanausbrüche weltweit registrieren, lokalisieren und bewerten zu können. Das „International Monitoring System (IMS)“ verfügt über ca. 60 Stationen weltweit und registriert Schallereignisse unter einem „Butterworth-Filter“ mit Grenzfrequenzen von 0,3 Hz bis 4 Hz (EVERS & HAAK 2005, S.261). **Erdbeben** senden ähnliche Frequenzen mit etwas schwächeren Amplituden aus, werden vom IMS aber auch erfasst.

Auch **Gewitterdonner** senden IS-Anteile aus. Im Zentrum des Blitzkanals entsteht kurzzeitig große Hitze, die umliegende Luftmoleküle rasant erhitzt. Die Luft dehnt sich derart stark aus, dass es zu einer Druckwelle ähnlich der von Explosionen kommt. Diese Druckwelle breitet sich mit Schallgeschwindigkeit aus, je größer die Entfernung zum

Blitz, desto tiefer die Schallanteile, die sich noch weiter fortpflanzen (UMAN 1987, S.282ff).

Größere **Meteoriten** mit einer TNT-Äquivalenz von ca. 20 Kilotonnen⁷ erzeugen nicht nur beim Einschlag IS, sondern bereits beim Eintritt in die Erdatmosphäre (ENS et al. 2012, S.208). Sie erzeugen eine Schockwelle, die sich sofort in Form einer Schallwelle fortpflanzt, und über große Entfernungen als IS noch messbar ist. Über 70 Meteoriten wurden von Kanadischen Forschern registriert und untersucht, was eine durchschnittliche Frequenz dieser Ereignisse von 0,2 Hz – 3 Hz ergab. Weitere Quellen, die nicht im Detail erläutert werden, sind zum Beispiel Wind, Wasserfälle, Meereswellen usw.

Als erste künstliche Quelle sollten **Explosionen** genannt werden. Bereits zwischen den Weltkriegen wurde der IS aus Kanonenschüssen zur Lokalisation verwendet. Während des Kalten Krieges wurden IS-Messstationen weltweit verwendet, um nukleare Explosionen aus Waffentests zu überwachen (siehe 3.2). Gemessen werden diese Erschütterungen gleich wie Vulkanausbrüche.

Raketenmotoren und **Düsentriebwerke** erzeugen kontinuierlicheren IS, dafür in schwächerer Intensität⁸. Er breitet sich auch nur über wenige Kilometer aus. Auch Eisenbahnzüge oder Schiffe erzeugen IS, wobei sich jener von Schiffen im Wasser etwas schneller und somit auch weiter ausbreitet. Im Nahfeld produzieren auch die Motoren von Lastkraftwagen und sogar Personenkraftwagen nicht unerhebliche Pegel im IS-Bereich. Im Bereich des Transportwesens gibt es eine Vielzahl an Studien, die von Belästigung der Fahrgäste bis zur Gefährdung/Beeinträchtigung des Fahrers reichen (HOOD et al. 1971; STEPHENS 1971; TEMPEST & EVANS 1972).

Viel interessanter scheinen die IS-Quellen aus der Industrie zu sein, im Wesentlichen niedertourige **Maschinen** aller Art (GAVREAU 1966; TEMPEST 1973; TANDY 1998). Maschinen, die sich mit einer Häufigkeit von weniger als 20 Mal in der Sekunde drehen, können, wenn sie groß genug sind, IS als mechanische Schwingung auf die Gebäudesubstanz übertragen. Das können Antriebsmotoren für Förderbänder, Lüfter oder ähnliche und kreisrund bzw. elliptisch schwingende Geräte selbst sein (BORGSMANN 2005, S.6). Die Frequenz hängt von der Drehzahl pro Sekunde ab und kann auch ganzzahlige Vielfache davon ergeben, wie etwa bei den Rotorblättern von Windkraftanlagen. Im Zusammenspiel mit den Raumeigenschaften kann es zu

⁷ Das entspricht Meteoriten von durchschnittlich mehreren Metern Durchmesser

⁸ Relevant sind diese Schallereignisse im Nahfeld, wo der Schalldruck verhältnismäßig doch sehr hoch ist.

Resonanzen kommen, bei denen die Erregerfrequenz gar nicht stark sein muss. Genau dieses Phänomen soll an anderer Stelle ausführlicher diskutiert werden (siehe 3.5.1).

Zuletzt müssen selbstverständlich auch **Lautsprecher** als mögliche Quellen genannt werden. Sie sind in der experimentellen Forschung sogar die wichtigste Quelle, da in der Versuchsumgebung kontrolliert IS produziert werden muss. Das ist in der Theorie sehr einfach und kann mit jeglicher Audiosoftware am Computer gesteuert werden. In der Praxis bringt es jedoch Probleme mit sich. Im IS-Bereich strahlen Lautsprecher annähernd kugelförmig ab, denn für eine Richtwirkung müsste der Durchmesser der Lautsprechermembran im Verhältnis zur Wellenlänge sehr groß sein. Ab einem Membrandurchmesser von $\frac{\lambda}{2}$ strahlt die Quelle zunehmend gerichtet ab (VEIT 1974, S.51), d.h. für einen gerichteten 10 Hz Ton (Wellenlänge 34,3 m bei 20° Raumtemperatur) würde eine Membran von ca. 17 m Durchmesser benötigt werden. Das ist für IS-Experimente jedoch so gut wie irrelevant. Das größere Problem ist der Wirkungsgrad der Lautsprecher im niederfrequenten Bereich. Überdimensionale Membranen sind zwar nicht von Nöten, jedoch brauchen kleine Membranen für einen hohen Wirkungsgrad einen sehr großen Membranhub. Mit wachsendem Membranhub steigt auch die Bewegungsgeschwindigkeit der Membran, was ab einem Wert von 0,5% der Schallgeschwindigkeit schon zu hörbaren Dopplerverzerrungen führt (WASSER 1978, S.78). Zudem macht bei größeren Membranen die Biegesteifigkeit des Materials Probleme, da sich auf der Membranoberfläche unerwünschte Oberwellen ausbilden können. Ein weiteres Problem ist das wachsende Gewicht, d.h. der Anteil der bewegten Masse bei größeren Membranen, worunter die Impulstreue leidet. Je verfälschter ein errechnetes Signal vom Lautsprecher wiedergegeben wird, desto mehr unerwünschte Frequenzanteile bilden sich aus. Um (reinen) IS mit hoher Amplitude zu produzieren, benötigt es also ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Membrangröße und –hub, sowie zwischen Membrangewicht und Biegesteifigkeit, oder sehr kleine, luftdicht abgeschlossene Kammern. Gerade Studien, die Effekte einzelner Frequenzen nachzuweisen versuchen, sind mit möglichst sauberer Produktion sinusförmiger IS-Wellen konfrontiert.

2. Wahrnehmung von (Infra-)Schall

Innerhalb der IS-Forschung herrscht rege Diskussion über die Arten der Wahrnehmung und die Schwellenbereiche für niederfrequenten Schall. Die Frage nach der Wahrnehmbarkeit besser zu erforschen ist immer noch aktuell, denn bis heute besteht Uneinigkeit über dieses heikle Thema. IS kann zu einem Teil über den Gehörsinn, aber auch über den Tastsinn wahrgenommen werden. Beide Sinne haben unterschiedliche Wahrnehmungsschwellen, zusätzlich sind alle Menschen individuell unterschiedlich empfindlich. In diesem Kapitel werden die aktuellen Erkenntnisse über die Wahrnehmungsarten und –schwellen, vor allem den IS-Bereich betreffend, zusammengefasst.

2.1. Auditive Wahrnehmung

Wird ein Schallereignis nur über das Gehör wahrgenommen, spricht man von auditiver, akustischer oder auraler Wahrnehmung. Grob vereinfacht dringt Luftschall durch den Gehörgang im Außenohr ein, wird am Trommelfell in eine mechanische Schwingung gewandelt und an das Innenohr als Wasserwelle weitergeleitet. Die sich in der Cochlea ausbreitende Welle wird dann von den Haarzellen in Nervenimpulse umgewandelt. Diese werden in verschiedenen Knotenpunkten der afferenten Hörbahn verarbeitet, bis sie letztlich im auditorischen Cortex ankommen (YOST 2007, S.83ff). Dieser äußerst komplexe Vorgang soll an dieser Stelle nicht näher erläutert werden. Festgehalten sei nur, dass die eigentliche Wahrnehmung nicht im Ohr stattfindet, sondern im Gehirn. Das Gehör dient nur der Reizverarbeitung und es ist nicht das einzige Sinnesorgan, das eine Wahrnehmung akustischer Reize möglich macht.

2.2. Unterschiede in der Wahrnehmung von hoch- und niederfrequentem Schall

Im Cortischen Organ finden sich rund 3.500 innere und 12.000 äußere Haarzellen (RANKE & LULLIES 1953, S.109). Die inneren Haarzellen sind jeweils mit mehreren Nervenfasern verbunden, reagieren auf größere Intensitäten und sind frequenzselektiv. Die äußeren Haarzellen hingegen sind jeweils mit nur einer Nervenfaser verbunden, weshalb sie auch in der Lage sind, geringere Schalldrücke zu registrieren. Die inneren Haarzellen sind durch ihre langen Fortsätze, die Stereozilien, mit der Perilymphe in der

Gehörschnecke verbunden. Sie reagieren auf den mechanischen Stimulus der Wanderwelle in der Cochlea. Das heißt, ihre Reizantwort hängt maßgeblich von der Geschwindigkeit des Stimulus ab, die Empfindlichkeit nimmt in tiefen Frequenzen ab. Die äußeren Haarzellen sind direkt mit der Tektorialmembran verbunden und reagieren auf die Bewegung. Die sind somit empfindlicher für niedrige Frequenzen. Ihre Aufgabe ist es, die Bewegung der inneren Haarzellen an der Resonanzstelle zu verstärken und an allen anderen Stellen zu blockieren, um so die Frequenzselektivität des Gehörs zu verbessern. In den tiefsten Frequenzbereichen werden die äußeren Haarzellen schon weit unterhalb der Hörschwelle stimuliert (SALT & HULLAR 2010, S.12).

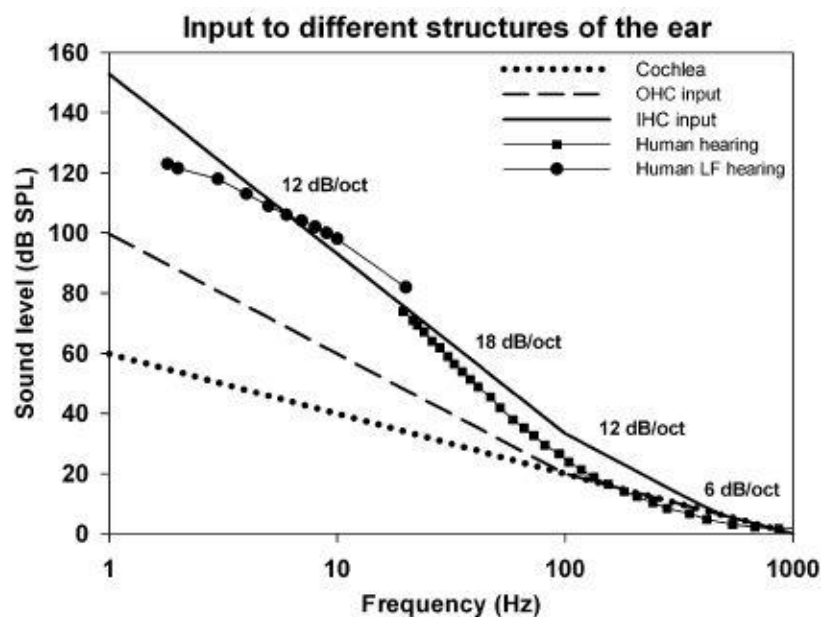


Abb. 20 – Reizschwelle von Cochlea, inneren (IHC) und äußeren (OHC) Haarzellen in Gegenüberstellung mit der menschlichen Hörschwelle nach Møller und Pedersen 2004 (SALT & HULLAR 2010, S.15)

Das Wissen, dass die äußeren Haarzellen auf Reize bis zu 25 dB unterhalb der Hörschwelle reagieren, beeinflusste die Diskussion um die Wahrnehmbarkeit von IS stark, vor allem in der Debatte um IS von Windkraftanlagen.

Nur 5% der Dendriten der Hörnerven zur afferenten Hörbahn sind mit äußeren Haarzellen verbunden, hingegen 90% jener zur efferenten Hörbahn (ASHMORE 2008, S.175). Aus diesem Grund kann mit Recht bezweifelt werden, dass eine bloße minimale Anregung der äußeren Haarzellen zu einer Hörwahrnehmung führt. Da die Frequenzauflösung, die durch die Reizantwort der inneren Haarzellen erzeugt wird, in tiefen Frequenzen zunehmend schlechter wird, kann man jedoch davon ausgehen, dass die Wahrnehmung im nahen IS-Bereich stark von der Motilität der äußeren Haarzellen abhängt.

2.3. Vibroakustische und Vibrotaktile Wahrnehmung

Schallereignisse können zusätzlich über den Tastsinn wahrgenommen werden. Im einfacheren Fall kann eine mechanische Schwingung (Körperschall) auf den Körper übertragen werden und diesen in Vibration versetzen. Ist Schall jedoch vorwiegend als Luftschall vorhanden, bietet die Haut eine große Fläche, um ihn in Körperschall umzuwandeln (BELLMANN 2002, S.42ff). Das Funktionsprinzip ist ähnlich wie am Trommelfell, nur viel schwächer. Der äußere Gehörgang hat nur eine kleine Öffnung in der Ohrmuschel und wird nach innen vom Trommelfell begrenzt. Dadurch wirkt er wie eine Druckkammer, was eine sehr gute Übertragung begünstigt⁹. An der Haut hingegen kann der Luftdruck nach allen Seiten entweichen und zudem stellt die mehrere Millimeter dicke Haut mit ihrer darunterliegenden Fettschicht einen starken Widerstand dar. Aufgrund ihrer hohen Wellenlängen können tiefe Frequenzen besser eindringen und werden von der Haut und der Fettschicht schlechter absorbiert, weshalb man tiefe Frequenzen mit hohen Amplituden eher über die Haut als Vibration wahrnehmen kann als hohe. Dieser Effekt kann leicht in Diskotheken beobachtet werden, wo es möglich ist, tiefe Bässe über die Vibration der Haut oder sogar Resonanz der Bauch- und Brusthöhle wahrzunehmen. Für Musik und Sprache spielt diese Wahrnehmungsart, abgesehen von Diskotheken oder Rock-Konzerten, aber eine untergeordnete Rolle. In der IS-Forschung spielt sie hingegen eine ganz wesentliche Rolle, da die Wahrnehmung über den Tastsinn meist sehr ausgeprägt ist. Vor allem die stark wahrnehmbaren Resonanzen spezifischer Körperregionen bestimmen ganz maßgeblich die physiologischen, aber auch psychischen Reaktionen des Körpers auf IS. Es ist lediglich schwer, bei gleichzeitigem Vorhandensein von Luft- und Körperschall die jeweiligen Wahrnehmungsarten auseinanderzuhalten.

2.4. Unbewusste oder indirekte Wahrnehmung, falsche Wahrnehmung

Eine Variante der unbewussten Wahrnehmung von IS tritt durch spektrale oder zeitliche Verdeckungseffekte in Erscheinung (FASTL & ZWICKER 2007, S.61ff). Da tiefe Frequenzen hohe besser verdecken als umgekehrt, ist es denkbar, dass durch IS auch Teile am unteren hörbaren Spektrum so verdeckt werden, dass es zu einer veränderten

⁹ Im Fall sehr hoher Amplituden kann es zu einer „vibrotaktilen“ Empfindung, einer Art „Berührungsreizung“, im Ohr kommen. Man nimmt diese als Kitzeln am Trommelfell wahr.

Wahrnehmung kommt¹⁰. Ebenfalls denkbar wäre, dass es durch hohe Druckschwankungen im niederfrequenten Bereich zwar noch nicht zu einer Hörwahrnehmung kommt, jedoch durch die starke Auslenkung des Trommelfells der am Steigbügel ansetzende „*musculus stapedius*“ und der am Hammer ansetzende „*musculus tensor tympani*“ durch Kontraktion die Übertragung am ovalen Fenster teilweise blockieren (KUTRUFF 2004, S.228, RÖTTER 2005, S.33). Dieser Vorgang schwächt die Übertragung der mechanischen Schwingung über die Mittelohrknöchel und dient eigentlich dem Schutz vor übermäßig lauten akustischen Signalen und der Desensibilisierung des Gehörs während der eigenen Sprachproduktion (STICKEL 2003, S.66f). Durch diesen Mechanismus könnte es unter IS-Einwirkung ebenfalls zu einer veränderten Wahrnehmung kommen.

Wenn von einem schwach ausgeprägten Schallereignis unterhalb der Hörschwelle dennoch eine Übertragung im Ohr stattfindet und Nervenimpulse an das Gehirn weitergeleitet werden, ohne dass eine bewusste Wahrnehmung stattfindet, könnten diese Impulse dennoch vom Gehirn in irgendeiner Weise verarbeitet werden. Vermutungen darüber anzustellen, in welcher Weise das passieren könnte, wäre aber höchst spekulativ. Befürworter der skurrilen Theorien um die „*Subliminal Messages*“ behaupten zwar, dass dieser Effekt ganz gezielt genutzt werden kann, um Botschaften zu vermitteln (MIEHLING 2006, S.426), was aber mit Recht bezweifelt werden darf. Die Existenz eines Effekts muss aber deswegen nicht von vornherein bestritten werden. Er könnte zumindest minimale Auswirkungen auf den Organismus haben.

Eine in der Forschung viel diskutierte Form der unbewussten Wahrnehmung passiert über die bereits erwähnten Resonanzen spezifischer Körperregionen, vor allem Organe. Niederfrequente und somit langwellige Schwingungen durchdringen den menschlichen Körper gut, weil sie von Haut, Muskeln oder Fett weniger stark absorbiert werden, als hohe. So können diese Wellen gewisse Körperbereiche in Schwingung versetzen. Stimmt die Erregerfrequenz mit der Eigenfrequenz eines Bereichs überein, kommt es zur Resonanz. Eine Resonanz der Bauch- und Brusthöhle wurde bereits erwähnt und ist Diskobesuchern gut bekannt. Aber auch viel spezifischere Körperregionen wie Augenhöhlen, Nasenhöhle, Rachen, Innenohr uvm. können in Resonanz versetzt werden. Daraus resultiert eine Reihe an Effekten, besser gesagt Beschwerden wie z.B. Konzentrationsstörungen, optische Verzerrungen, Gleichgewichtsstörungen, Brechreiz

¹⁰ Gavreau spricht auch von „indirekter Wahrnehmung“ durch Modulation der Hintergrundgeräusche (GRAVREAU 1966, S.8)

(KRYTER 1984, S.457ff), Sprachschwierigkeiten (RASMUSSEN 1982, S.12ff) und vieles mehr. Denkbar ist auch, dass Organe, deren Funktion die Produktion von Botenstoffen, Hormonen und ähnlichem ist, ihre Tätigkeit durch diese Einwirkung verstärken oder beschränken¹¹. Der Effekt wäre aber vermutlich gering und schwer messbar, da eine Vielzahl an anderen Ursachen ausgeschlossen werden müsste.

Mit „falscher Wahrnehmung“ soll jener Fall bezeichnet werden, in dem zwar eine tatsächliche Hörwahrnehmung stattfindet, jedoch nicht in der prognostizierten Frequenz. Entstehen während eines Experiments ungewollte Oberwellen, die möglicherweise im hörbaren Bereich liegen, kann es zu falschen Rückschlüssen über die Schwelle für den eigentlichen Grundton kommen. Da im niederfrequenten Bereich (<50Hz) die Tonhöhenwahrnehmung immer schlechter funktioniert, können Vpn auch kaum selbst erkennen, dass es sich beispielsweise nicht um einen 10 Hz Ton handelt, sondern einen 20 Hz Ton. Bei mehreren Harmonischen kann schließlich auch die Illusion eines tieferen Tons durch Residualtonwahrnehmung entstehen. Diese falsche Wahrnehmung kann zwei Gründe haben: Entweder erzeugt der verwendete IS-Generator die unerwünschten Oberwellen, da rein sinusförmige Schwingungen sehr schwer zu erzeugen sind, oder es entstehen Oberwellen durch nicht-lineare Verzerrungen im Gehörgang oder Mittelohr (JOHNSON 1980, S.2)

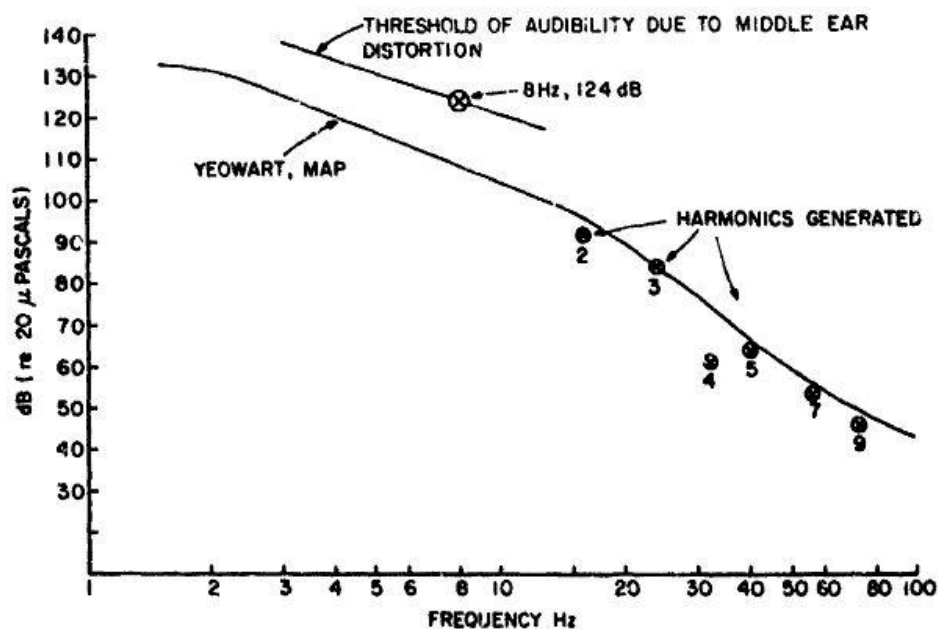


Abb. 21 – Harmonische Oberwelle eines 8 Hz Tons durch nicht-lineare Verzerrungen im Mittelohr (DANIELSON 1980, S.2)

Zu guter Letzt muss noch unterschieden werden zwischen der tatsächlichen Wahrnehmung von Schall (d.h. es findet eine Wellenausbreitung statt) und der

¹¹ An dieser Stelle sei ausdrücklich vor der Überschätzung solcher Effekte gewarnt!

Wahrnehmung bloßer statischer Luftdruckschwankungen (es findet keine Wellenausbreitung statt). Einige der Experimente, vor allem jene mit sehr starken Druckschwankungen, wurden in abgedichteten Druckkammern durchgeführt, in denen ein großer Kolben das Luftvolumen periodisch in gegebener Frequenz komprimiert. Da das Ohr Luftdruckschwankungen verarbeitet, gibt es im Effekt keinen Unterschied, jedoch handelt es sich bei bloßen statischen Druckschwankungen genau genommen nicht um Schall.

2.5. Hörschwelle, Schädigungsgrenze und Schmerzgrenze

Die **Hörschwelle** gibt in Abhängigkeit der Frequenz an, ab welchem Schalldruck der durchschnittliche Mensch in der Lage ist, ein Schallereignis wahrzunehmen. In den beiden Grenzbereichen zum Infra- bzw. Ultraschall ist das Ohr am unempfindlichsten, im Bereich zwischen 2 und 4 – 5 kHz am empfindlichsten (vgl. YOST 2007, S.146f; FASTL & ZWICKER 2006, S.18). Während das Ohr in diesem Bereich Druckschwankungen von 20 μPa (Mikropascal) – oder in der bekannteren Dezibel-Skala ausgedrückt 0 dB – wahrnehmen kann, benötigt es im unteren Grenzbereich bei 20 Hz schon 0,2 Pa oder 80 dB, das entspricht dem zehntausendfachen Schalldruck. Um 10 Hz wahrzunehmen, müsste der Schalldruck schon 2 – 3 Pa (105 dB) betragen und für 5 Hz 10 – 12 Pa (115 dB). Im IS-Bereich wird der Unterschied zwischen Hörschwelle und Gefährdungsgrenze immer geringer. Die Feststellung der rein auditiven Wahrnehmungsschwelle (Hörschwelle) ist grundlegend auf zwei Arten möglich. Bei der **MAP-Methode** (**M**inimal **A**udible **S**ound **P**ressure) wird die kleinste wahrnehmbare Druckschwankung im Ohr gemessen. Diese Schwelle wird über reine Kopfhörerbeschallung gemessen und nimmt keine Rücksicht auf Wellenausbreitung. Die **MAF-Methode** (**M**inimal **A**udible **S**ound **F**ield) hingegen wird das kleinste wahrnehmbare Schallfeld über Lautsprecherbeschallung gemessen. Im niederfrequenten Bereich ist das Ohr für die MAF-Methode um durchschnittlich 5 bis 10 dB empfindlicher (vgl. 3.3, Abb. 22). Was die Hörschwelle im unteren Grenzbereich angeht, macht bereits Bekesy genaue Angaben (vgl. BEKESY 1936b, Abb. 18). Ein Vergleich einiger Forschungen zur Hörschwelle vor 1960 zeigt, dass es auch andere Forscher gab, die Angaben bis zu 10 Hz und darunter veröffentlichten (Abb. 22).

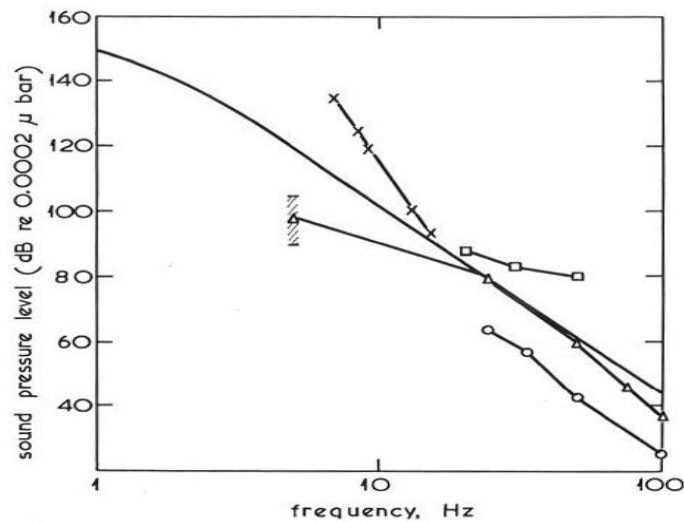


Abb. 22 – Hörschwelle nach Brecher (x) 1934; Bekesy (—) 1936; Corso (Δ) 1958 (YEOWART 1976, S.40)

Yeowart betreibt seit 1967 intensive Forschungen im Bereich der Hörschwelle (Vergleich seiner Forschung mit Evans und Whittle in Abb. 23).

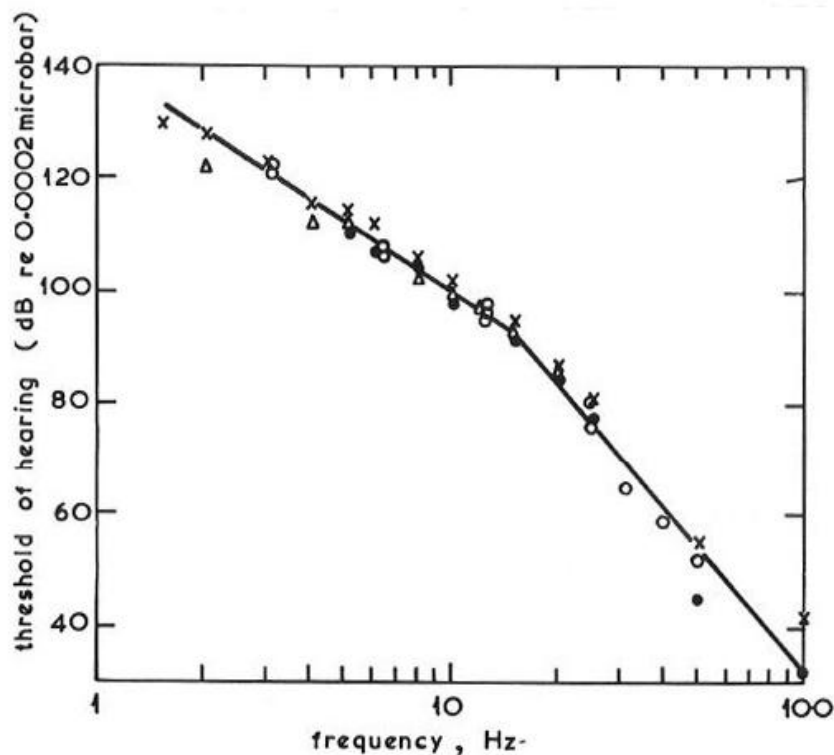


Abb. 23 – Ermittelte Hörschwellen nach Yeowart et al. (x) monaural, 1967; Yeowart (•) binaural Kopfhörer, 1972; Yeowart & Evans (Δ) binaural Druckkammer, 1974; Whittle (○) binaural Druckkammer, 1972; (YEOWART 1976, S.58)

In späterer Literatur und bis heute werden die Forschungsergebnisse von Watanabe & Moller 1990 häufig zitiert, die eine Beschreibung der Hörschwelle zwar nur bis 4 Hz geben, was aber für die meisten Anwendungen ausreichend ist. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse dieser und mehr als 30 anderer Forschungen zwischen 1934 und 2001 befindet sich im Anhang an diese Arbeit.

Der **Grenzwert für Gefährdung** bei Dauerbelastung liegt im empfindlichsten Hörbereich zwischen 90 und 100 dB, wo auch Musik und Sprache stattfinden. Das Bundesministerium für Umwelt nimmt den Normwert 93 dB auch als generelle Obergrenze für akustische Ereignisse an, beispielsweise für Konzerte, bei denen ohne Gehörschutz längere Beschallungsdauern für die Besucher noch zumutbar sind (VERANSTALTUNGSGESETZ 2010, §21a(3)). In den tiefsten Frequenzbereichen liegt diese Gefährdungsgrenze deutlich höher. Bei 50 Hz sind es 120 dB und bei 20 Hz schon annähernd 140 dB. Angaben in diesem Frequenzbereich sind jedoch mit Vorsicht zu genießen, da Gehörschädigungen durch starke Einwirkung im Grenz- und IS-Bereich nicht ausreichend dokumentiert sind. Bei kurzen Beschallungsdauern von wenigen Minuten liegt diese Grenze im IS-Bereich ebenfalls deutlich höher. In etlichen Experimenten mit hauptsächlich Sinustönen zwischen 150 und 160 dB können keinerlei Schäden festgestellt werden (VON GIERKE & NIXON 1976, S.127f, 137f). Der einzig beobachtbare Effekt ist eine vorübergehende Verschiebung der Hörschwelle in höheren Frequenzen um wenige dB, die aber meist schon nach 30 Minuten nicht mehr nachweisbar ist. Allgemein niedriger liegt die Gefährdungsgrenze für impulsartige Schallereignisse. Der *musculus stapedius* bzw. der Trommelfellspanner *musculus tensor tympani*, die das Ohr vor zu lautem Schall schützen, haben eine frequenzabhängige Reaktionszeit von bis zu 35 bis 150 Millisekunden und können eine Dämpfung um -10 bis -20 dB bewirken (STICKEL 2003, S.66). Bei Schallereignissen ohne Einschwingvorgang können sie somit dieser Schutzfunktion nicht nachkommen, weshalb die Gefährdungsgrenze bei ca. 130 dB anzusetzen ist. Der „*Stapediusreflex*“ dämpft lediglich die Übertragung von Frequenzen < 2.000 Hz (RANKE & LULLIES 1953, S.53).

Die **Schmerzgrenze** gibt an, ab welchem Schalldruck bzw. Schalldruckpegel eine Person subjektiv Schmerz empfindet. In aller Regel liegt diese Grenze zwischen 20 und 200 Pa, also 120 und 140 dB und ist annähernd frequenzunabhängig. Der entstehende Schmerz hat weniger mit der Hörwahrnehmung zu tun als vielmehr mit der Auslenkung des Mittelohrsystems über eine erträgliche Grenze (LEVENTAHL 2007, S.133). Im IS-Bereich liegen Hörschwelle und Gefährdungsschwelle einander relative nahe. Die Schmerzschwelle liegt vermutlich etwas höher, da das Mittelohrsystem weniger Beanspruchungen pro Zeiteinheit wahrscheinlich leichter ertragen kann. Experimente im IS-Bereich sind deswegen schwierig, weil Amplituden im hörbaren Bereich die Gefährdungsgrenze überschreiten können. Gerade bei IS-Exposition mit hohen

Amplituden könnten ab 150 dB sogar Schädigungen – zumindest aber negative Beeinträchtigungen – anderer Organe eintreten, da Haut und Fettschicht keine ausreichende Absorption für tiefe Frequenzen bieten. Ein Pegel von 180 dB kann bei sehr tiefen Frequenzen sogar zum Tod führen (BRONER, 1976, S.495), bei höheren Frequenzen auf jeden Fall zum Reißen des Trommelfells (LEVENTHALL, 2007, S.133), ein tödlicher Effekt ist bei derart hohen Amplituden ungeachtet der Frequenz nicht auszuschließen.

Die meisten bekannten Darstellungen der Hörschwelle berücksichtigen die Bereiche unterhalb von 20 Hz bzw. oberhalb von 20.000 Hz gar nicht. Im niederfrequenten Bereich sind die Aussagen über den Schwellenwert auch widersprüchlich und weichen bis zu 20 dB (!) voneinander ab.

3. Geschichte der Infraschall-Forschung

3.1. Vorgeschichte

„Der Knall des Kanonenschusses erschüttert meilenweit die unorganische Erde.“

(Johann Joseph Ritter von Kausch, 1782, S.34)

Es ist nicht möglich, ein Kapitel wie die Geschichte der IS-Forschung mit einem konkreten Ereignis einzuleiten, viel mehr ist sie das Resultat einer langsamen Entwicklung neuer Erkenntnisse. Was Johann Joseph Ritter von Kausch 1782 im obigen Zitat zum Ausdruck bringt, beschreibt eine physikalische Eigenschaft von Schall mit großen Wellenlängen, also auch IS. Ob das im ausgehenden 18. Jahrhundert der Forschung bekannt war ist aber fraglich. Im Lauf der nächsten 150 Jahre liefern berühmte Persönlichkeiten wie Ernst Florens Chladni, Hermann von Helmholtz, Carl Stumpf und Georg von Békésy – um nur wenige zu nennen – grundlegende Erkenntnisse über Schallausbreitung, Resonanz, Absorption und Wahrnehmungsschwellen, die später in der IS-Forschung im 20. Jahrhundert immer wieder als Grundlage dienen.

Die frühesten belegten Aufzeichnungen von IS sind Barometeraufzeichnungen der Vulkaneruption auf der indonesischen Insel Krakatoa [dt. „Krakatau“] zwischen Java und Sumatra vom Juli und August 1883 (LE PICHON et al. 2010, S.9f). Die Druckwelle der letzten und stärksten Explosion, die Krakatoa fast vollständig vernichtet, umrundet den Globus bis zu sieben Mal und ist weltweit messbar. Die

niederländische Regierung gibt eine Studie in Auftrag, in der die Ereignisse aus geologischer und geophysischer Sicht dokumentiert werden sollen. In dem 546 Seiten umfassenden Dokument widmet sich ein ganzes Kapitel, „*den Luftwellen und dem Schall, verursacht durch die Eruption von Krakatoa*“, geschrieben von Sir Richard Strachey, dem Vorsitzenden des meteorologischen Rats (STRACHEY 1888, S.57-79, 88ff). 53 Barometeraufzeichnungen von überall auf der Welt werden ausgewertet. Es ist bis heute der wahrscheinlich eindrucksvollste Beleg für die enorme Ausbreitung von starkem IS, nicht nur als mechanische Welle, sondern auch über die Luft. Berichten zufolge pflanzt sich auch niederfrequenter hörbarer Schall bis zu 4.800 km weit fort (STRACHEY 1888, S.80ff)¹². Von diesem Ereignis an entwickelt sich bereits ein weltweites Monitoring von Eruptionen und Erdbeben. Die Geschichte der Erkenntnisse und Entwicklungen in diesem Bereich sind jedoch ausschließlich von geoseismischem und meteorologischem Interesse, behandeln IS nicht aus akustischer Sicht und werden deshalb in der vorliegenden Arbeit nicht weiter beachtet.

3.2. Frühgeschichte (1914 bis 1945)

Die Geschichte der tatsächlichen IS-Forschung beginnt etwa mit dem Anfang des ersten Weltkriegs 1914. Die ersten Arbeiten sind rein physikalischer und messtechnischer Natur. Man kennt bereits mehrere Verfahren zur Erkennung von IS; es gibt Detektoren mit sensiblen Flammen, Heißdrahtdetektoren und einen überaus sensiblen Detektor, entworfen von Professor François Canac nach der Poggendorff-Methode (GAVREAU 1966, S.2). Dieser Detektor besteht aus einem offenen Fass, das durch eine Gummimembran einseitig verschlossen ist. Mit der Membran ist ein kleines Stück Spiegel auf einem Stativ verbunden, das bei Schwingungen der Membran periodisch mitzuschwingen beginnt. Sichtbar wird der Schall durch einen Lichtstrahl, der von dem Spiegelstück an eine entfernte Wand geworfen wird. Einer der ersten Erfolge ist es, mit diesem Verfahren in mehreren Kilometern Entfernung vorbeifahrende Züge durch IS zu registrieren (GAVREAU 1968, S.35).

Die wichtigste akustische Errungenschaft im Krieg ist die Schallortung, die von französischen, britischen und US-amerikanischen Forschern entwickelt wird. Die Methode macht sich die Tatsache zu Nutze, dass Schall sich in alle Richtungen mit

¹² hier werden Berichte von Bewohnern aus hunderten Städten über ganz Süd- Ostasien und Australien verteilt angeführt, die die Explosionen deutlich hören konnten. Die Berichte reichen bis zu Entfernungen von ca. 3000 Meilen (~4800 km) von Krakatoa.

annähernd gleicher Geschwindigkeit ausbreitet. So kann über die Auswertung der Laufzeitdifferenz an mindestens 2 Messpunkten die Position feindlicher Geschütze innerhalb von 1 bis 2 Minuten genau bestimmt werden (ESCLANGON 1925). Bis zu sechs Mikrofone werden mit einem mehrkanaligen Spiegelgalvanometer verbunden, der ähnlich wie Canacs Detektor einen Lichtstrahl reflektiert. Dieser wird auf eine Filmrolle aufgenommen, entwickelt, und manuell ausgewertet. Die Messungengenauigkeit in diesem Verfahren liegt während des ersten Weltkriegs bei ungefähr 50 Yards auf 10.000 Yards Entfernung der Quelle. Das Verfahren stellt eine Gegenmaßnahme zur feindlichen Tarnung dar, ist unabhängig von Wetter oder Sichtverhältnissen und somit sehr zuverlässig, bedarf jedoch mehrerer tausend Yards an Mikrofonkabeln. Das Verfahren findet bis in die späten 1970er Jahre vor allem in den USA Anwendung und wird durch Auswertungsautomatismen noch wesentlich verbessert. Das Galvanometer wird schon im zweiten Weltkrieg vom Oszillografen (LUSAR 1964, S.250) abgelöst und später wird auch die Filmrolle durch bedrucktes Papier ersetzt, was die Auswertung beschleunigt.

Erste Studien in Österreich über IS-Ausbreitung, ebenfalls mit dem Ziel der Quellortung, werden 1912 und 1917 durchgeführt und beschäftigen sich mit der Ausbreitung des Luftschalls bei Explosionen von Munitionslagern im Wiener Becken (LE PICHON et al. 2010, S.16).

Noch in den 1930er Jahren versuchen US-Forscher erstmals, IS künstlich zu erzeugen. Sie verwenden eine sehr lange Orgelpfeife, die von einem Dampfkessel betrieben wird. Es ist aber zweifelhaft, ob diese Orgelpfeife jemals tatsächlich IS (zumindest in starker Intensität) abstrahlte, denn ohne besondere Vorkehrungen schwingen lange Rohre stärker in harmonischen Oberwellen als im Grundton (GAVREAU 1966, S.2). Tatsächlich bringen die größten Pfeifen eines vollständig ausgebauten und nicht nur akustisch realisierten 64-Fuß Registers einen Ton mit einer Frequenz von 8,2 Hz hervor (Sub-Sub Contra C). Davon gibt es weltweit aber nur zwei, doch auch das Subcontra C, das viele Orgeln erzeugen können, liegt mit 16,4 Hz bereits im IS-Bereich. Ein Mythos um die Wirkung der tiefsten Orgeltöne ist jener der „Demutstaste“ oder „Demutspfeife“ (ZEIT 1993¹³, GUPFINGER 2009, S.2). Nach besonders mahnenden Worten soll der Prediger dem Organisten ein Zeichen gegeben haben, den tiefsten möglichen Ton zu spielen, sodass die Kirchenbesucher erschrocken und demütig großzügigere Spenden

¹³ Im Internet kursiert das Gerücht, der Mythos „Demutspfeife“ sei durch einen schlecht recherchierten Onlineartikel vor einigen Jahren im Internet entstanden. Der Zeitungsartikel in „Die Zeit“ von 1993 zeigt, dass der Mythos zumindest nicht aus dem Internet stammen kann.

gaben, wenn der Klingelbeutel gereicht wurde. Dieser Mythos entbehrt jedoch jeglichen Belegs.

1936 publiziert Georg von Békésy zwei Kapitel in den Annalen der Physik (BEKESY 1936a und 1936b), die maßgeblich zum Verständnis über die Herstellung und Messung von niederfrequenten Sinusschwingungen einerseits und die Wahrnehmung andererseits beitragen. Mit dem noch relativ neuen Verständnis über die Funktion des Innenohrs und die Wanderwellentheorie betreibt Békésy Grundlagenforschung im Bereich der Wahrnehmungsschwelle vor allem bei niederfrequenten Sinustönen. Er gelangt schon zu der Erkenntnis, dass es wichtig ist, Sinustöne für experimentelle Forschung möglichst frei von Obertönen zu halten, da diese Ergebnisse erheblich verfälschen könnten.

Während des zweiten Weltkriegs forschen mehrere Länder an der Waffentauglichkeit von Schall, besonders von niederfrequentem und IS. Britische und japanische Forscher sollen an der Möglichkeit (niederfrequenter) Waffen geforscht haben (BRONER 1978, S.490)¹⁴. Broner stellt Berechnungen an, dass eine Schallwaffe, die in einer Entfernung von 250 m tödliche Wirkung haben soll, einen unvorstellbaren Schalldruckpegel von ~233 dB abstrahlen müsste, was dem tausendfachen einer startenden Saturn-5-Rakete entspricht. Diese Berechnung wird in einem späteren Bericht von Altmann bestätigt, der noch hinzufügt, der Schallaufwand könne zwar durch Richtcharakteristik minimiert werden, jedoch müsse das „Gerät“ dann mehrere hundert Meter groß sein (ALTMANN 1999, S.19f).

Zur selben Zeit versucht auch Richard Wallauschek in Österreich¹⁵ eine Schallwaffe zu konstruieren (LUSAR 1964, S.345). In eine Brennkammer, die einer gedackten Pfeife ähnelt¹⁶, wird ein Gemisch aus Sauerstoff und Methan zu einer kontinuierlichen Explosion gebracht. Durch zwei Parabolspiegel mit mehr als 3 Metern Durchmesser versucht Wallauschek den Explosionsschall in 60 Metern Entfernung zu bündeln, wo der Schalldruck etwa 1000 Microbar¹⁷ [sic] beträgt. Man vermutete, dass dieser

¹⁴ Broner zitiert selbst J.F.J Johnston – Infrasound, a short survey (Royal Military College of Science, England, 1971), genaue Angaben zu dieser Forschung existieren scheinbar nicht.

¹⁵ In einem experimentellen Forschungszentrum in Lofer, Tirol/Salzburg

¹⁶ Es kann nur spekuliert werden, dass die Wellenlänge der abgestrahlten Frequenz dem vierfachen der Länge der Brennkammer entsprach, das wäre der Grundton einer gedackten Pfeife. Genaue Angaben über die Abstrahlfrequenz werden nicht gemacht.

¹⁷ Dieser Betrag, falls richtig überliefert, entspricht einen Schalldruckpegel von 134 dB und liegt im Bereich der Schmerzgrenze, ist aber auf keinen Fall tödlich. Waren anstatt der angegebenen Mikrobar jedoch Millibar gemeint, entspräche das 194 dB, in diesem Fall müsste der Schalldruck an der Quelle (vor dem Parabolspiegel) über 230 dB betragen haben, was durch Broner und Altmann bereits als unmöglich beschrieben wurde.

Schalldruck einen Menschen in wenigen Sekunden töten und in größerer Entfernung noch immer kampfunfähig machen könne. Diese Schallkanone kommt jedoch nie zum Einsatz, es existieren auch nur mehr Bilder davon.

Eine niemals versiegende Quelle für Verschwörungstheorien aller Art sind die „geheimen Waffen der Nazis“ im dritten Reich. Es gibt zahlreiche Mythen und Spekulationen über akustische Waffen der Deutschen im zweiten Weltkrieg, von denen aber nur wenige belegbar sind, da geheime Dokumente über Waffen zu Ende des Krieges tatsächlich vernichtet wurden. Der bekannte Physiker und Musikwissenschaftler Karl Erich Schumann, dem von 1932 bis 1944 die Leitung der Wissenschaftsabteilung des Heereswaffenamtes (HWA) obliegt, forschte angeblich ebenfalls an der Umsetzung von akustischen Waffen (NAGEL 2012, S.385ff). Ähnliche Waffen, einige davon entwickelt in Lofer in Österreich, werden oft in einem Atemzug mit den akustischen Waffen erwähnt, obwohl sie im eigentlichen Sinne keine sind, sondern eher Impuls Waffen. Dazu zählen die „Windkanone“ einer Stuttgarter Firma und die in Lofer entwickelte „Luftwirbel- oder Vortex-Kanone“ (LUSAR 1964, S.345).

Die ersten zufällig beobachteten physiologischen Effekte, die auch nicht aus bewusster IS-Erzeugung resultieren, sind Gehörschäden durch Langzeitexposition bei Besatzungsmitgliedern von deutschen U-Booten. Die gesammelten Beobachtungen und Erklärungsversuche werden einige Jahre nach dem Krieg auch publiziert (TONNENDORF 1950).

All diese frühen Forschungen bilden das erste Glied einer langen Erkenntniskette, die letztendlich bis zu den Hypothesen moderner Forschung über IS führt. Obwohl die Waffen nie in gewünschtem Ausmaß funktionieren und auch nie zum Einsatz kommen, zeigen die Versuche dennoch, dass niederfrequenter und IS starke körperliche Auswirkungen haben kann. Nach dem zweiten Weltkrieg kehrt, mit Ausnahme der geoseismischen Anwendungen, Ruhe in der IS-Forschung ein. Aus den 1950er Jahren sind dem Verfasser lediglich vier Studien¹⁸ bekannt, die sich mit IS beschäftigen. Lediglich die weltweite Überwachung von nuklearen Waffentests bleibt während des Kalten Krieges stets aktuell. Die Waffentauglichkeit von IS scheint vorerst widerlegt und es besteht mitunter durch die Nachkriegswehen bedingt auch wenig Bedarf an solcher Forschung.

¹⁸ Tonnendorf 1950, Guignard & Cole 1956, Corso 1958 und von Gierke 1959, vom ersten liegt dem Verfasser nur ein Abstract vor, letztere drei konnten gar nicht eingesehen werden und werden daher auch nicht angeführt.

3.3. Vladimir Gavreau und die Pionierarbeit in der experimentellen Forschung der 1960er Jahre

Erst in den 1960er Jahren gerät die IS-Forschung wieder in den Fokus der Wissenschaft. Am meisten Aufsehen erregt der französische Forscher Vladimir Gavreau. Seine größte Entdeckung passiert 1963 oder 1964¹⁹ durch einen Zufall, als Gavreau eigentlich noch im Auftrag der französischen Regierung für das Militär an der Entwicklung von ferngesteuerten Automaten und Robotern arbeitet. Mit seinem Forscherteam, darunter Marcel Miane, Henri Saul und Raymond Comdat, wird er in einem großen Betongebäude untergebracht, um an der Entwicklung verschiedener Roboter für den Industrie- aber auch Kampfeinsatz zu forschen (VASSILATOS 1997, S.209). Schon beim Einzug in das Gebäude machen er und sein Team ungewöhnliche Erfahrungen. Mehrere Mitarbeiter klagen über Unwohlsein bis hin zu Übelkeit. Weder sie noch eigens beauftragte Gebäudeinspektoren können die Ursache für die Plage ausfindig machen. Weder die Suche nach giftigen Gasen noch nach radioaktiven Strahlungen ist erfolgreich. Gavreau beschreibt, dass der entscheidende Hinweis auf die Quelle durch die stark wahrnehmbaren Vibrationen im Labor kam. Versuche, die Frequenz und Amplitude dieser Vibration zu messen schlagen fehl, als dem Forscherteam bewusst wird, dass es sich um eine Schwingung im IS-Bereich handelt. Ein in seiner Verankerung zu locker befestigter Belüftungsmotor emittiert über mehrere Stockwerke eine mechanische Schwingung mit einer Frequenz von 7 Hz. Diese Entdeckung bzw. die damit verbundene Veröffentlichung Gavreaus ist bis heute der meist zitierte Beleg in der IS-Forschung.

Neben den bekannten Detektoren ist das 1940 von Baird und Barwell entwickelte Kondensatormikrofon²⁰ die einzig erschwingliche Möglichkeit, um IS zu messen (LEVENTHALL 1976, S.2). Es musste jedoch zusätzlich modifiziert werden um Frequenzen bis zu 1Hz und darunter registrieren zu können. Gavreau berichtet jedoch, dass sein speziell für niederfrequente Schwingungen angefertigtes Kondensatormikrofon die 7 Hz im Labor nicht erfassen konnte. Zwischen 1964 und 1970 wird eine Reihe an neuen Mikrofonen entwickelt, die sich ebenfalls für IS-Messungen als geeignet erweisen. Das Drehspulenmikrofon (Vakhitov, 1964) eignet sich für

¹⁹ Einziger Hinweis ist der von Gavreau selbst verfasste Artikel in der Jänner-Ausgabe des Science Magazine 1968, in dem er selbst über den Vorfall schreibt „*four years ago my colleagues and I were [...]*“

²⁰ Anm.: Das erste Kondensatormikrofon wurde 1916 entwickelt

Frequenzen zwischen 6 und 100 Hz, das Solion-Infraschall-Mikrofon²¹ (Collins et al., 1964) für 0,0001 bis 30 Hz, der optische Detektor²² (Gavreau et al., 1966) für 0,1 bis 40 Hz und das Thermistor Mikrofon (Fehr, 1970) für 0,001 bis 22 Hz (LEVENTHALL & KYRIAKIDES 1976, S2f). Auch piezo-elektrische Mikrofone konnten modifiziert werden (HOOD & LEVENTHALL 1971), um Schall bis zu 0,1 Hz zu registrieren. Vielleicht ist es besonders die rasante Entwicklung geeigneter Messtechnik, die der IS-Forschung in den 1960er Jahren den nötigen Antrieb gibt. Die Firma Sennheiser entwickelt gegen Ende des Jahrzehnts mit dem MKH 110 eines der ersten kommerziellen Messmikrofone, mit einem linearen Frequenzgang von 1 Hz bis 20 kHz (siehe 6.3, Abb. 38).

1960 erscheint das Werk „Experiments in Hearing“ von Georg von Békésy, das neue Erkenntnisse über Hörschwelle, Signalverarbeitung, Wahrnehmung über die Haut etc. liefert und schon im Laufe der 1960er Jahre zu einem vielzitierten Standardwerk der IS-Forschung wird (BEKESY 1960).

Neben einigen kleineren Berichten stammt die erste große Studie über die physiologischen Auswirkungen von der NASA (MOHR et al.1965). Im Zuge des Raumfahrtprogramms entsteht die Notwendigkeit einer solchen Untersuchung wegen der möglichen Gefährdung von Astronauten und Bodenpersonal durch die starke IS-Emission von Raketen. Mohr et al. verwenden 1965 eine luftdicht verschlossene Kammer, in der durch hydraulische Lautsprecher ein Schalldruck von bis zu 155 dB erzeugt werden kann. Experimente werden mit Ganzkörperbeschallung durch Sinustöne zwischen 2 und 40 Hz durchgeführt, bei Schalldruckpegeln zwischen 135 und 152 dB (VON GIERKE & NIXON 1976, S.140). Die Expositionsdauer beträgt maximal 2 Minuten, im Bereich über 20 Hz wird Gehörschutz verwendet. Die wichtigste Erkenntnis aus den Versuchen ist, dass IS großer Intensität die Körperorgane anregt, zu Gleichgewichtsstörungen, negativen Auswirkungen auf die Atmung, Leistungseinbußen und sogar zu Modifikationen der Alpha-Wellen im Gehirn führen kann (VON GIERKE & NIXON 1976, S.115). Als bedenklich oder gefährlich wird aber keine der Auswirkungen beschrieben, denn Nachwirkungen konnten nicht beobachtet werden.

1966, zwei Jahre nach seiner Entdeckung, schreibt Gavreau in einem Artikel von diversen IS-Generatoren und –Detektoren, die sein Labor entwickelte.

²¹ Solion kommt von „Ions in Solution“. Es handelt sich um einen elektrochemischen Detektor.

²² Gavreaus Detektor leitet sich von F. Canacs Detektor (siehe GAVREAU 1966, S.2) ab, die Filmrolle zur Aufzeichnung wurde durch eine Photozelle ersetzt.

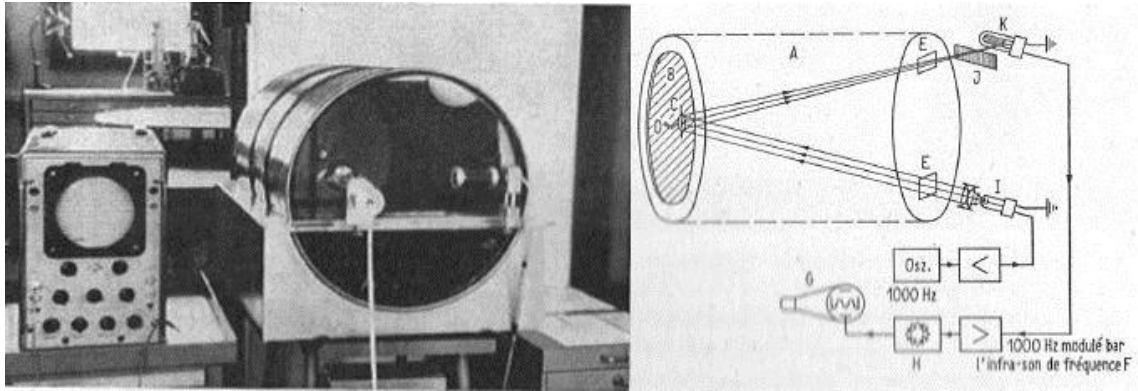


Abb. 24 – Bild mit schematischem Bauplan des IS-Detektors (GAVREAU 1966)

Er beschreibt auch die beobachteten physiologischen Auswirkungen aus verschiedenen Tests wie Schwindel, „Seekrankheit“, starke Kopfschmerzen, nervöse Müdigkeit und zusätzlich veränderte Wahrnehmung durch Verdeckungseffekte (GAVREAU 1966). Weitere zwei Jahre später folgt noch ein Artikel von Gavreau im Science Magazine. Er beschreibt hauptsächlich die bereits erwähnte Entdeckung des 7-Hz Tons, sowie eine Reihe an diversen Schallgeneratoren. Wieder erwähnt er Auswirkungen von (schwachem) IS auf den Körper wie Müdigkeit, Schwindel, Verwirrung und Übelkeit. Er sei auch schuld an „alltäglichen Beschwerden“ wie Allergien oder Nervenzusammenbrüchen (GAVREAU 1968). Diese Behauptungen müssen jedoch in höchstem Maße als spekulativ betrachtet werden, denn G. gibt keinerlei Belege dafür an.

Gavreaus Forschungen wirken skurril, aber durchaus ernst zu nehmend. Dennoch ranken sich um seine Person die schauerlichsten Mythen. Mehrere unseriöse Berichte erzählen von der schrecklichen Macht und tödlichen Wirkung seiner „Schallwaffen“ (VASSILATOS 1997, S.210; WATSON 1973, S.92f). Diese Mythen überschatten unglücklicherweise seine seriöse Forschung. Wenn man heute im Internet nach seinem Namen sucht, erscheinen sofort unzählige Artikel, betitelt „*The Sound of Death*“, „*The Sonic Weapon of Vladimir Gavreau*“ oder „*Deadly Sounds – Dr. Gavreau*“. In der Wissenschaft gehören seine Artikel jedoch zu den meist zitierten Belegen.

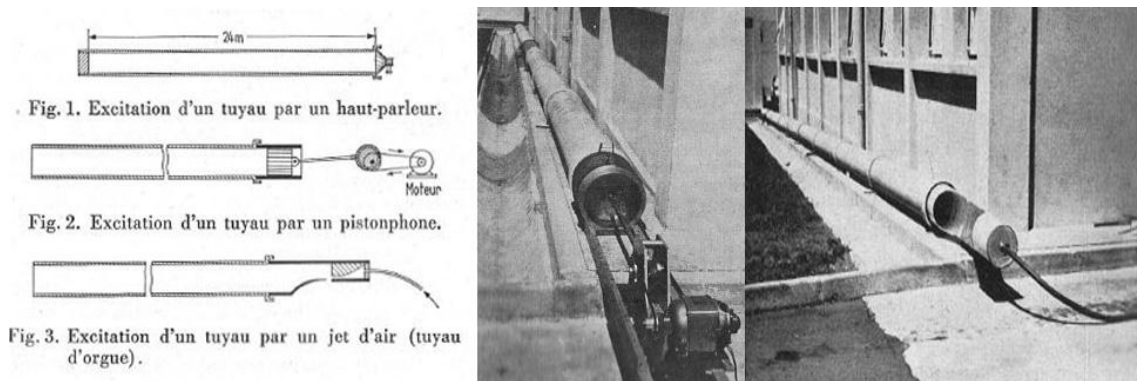


Abb. 25 – Bauplan und Bilder vom IS-Pistophon (Mitte) und der IS-Pfeife (rechts), (GAVREAU 1966)

Norman Yeowart, der ebenfalls seit 1964 über IS forscht, führt 1967 als erster ein Experiment mit reiner Ohr-Beschallung durch, um die damals noch unpräzise beschriebene Hörschwelle im niederfrequenten Bereich besser zu definieren (YEOWART et al. 1967). Seine erweiterte Darstellung der Hörschwelle im IS-Bereich wird in späterer Literatur häufig zitiert (Abb. 26, Vergleich mit den Angaben von Bekesy 1936)

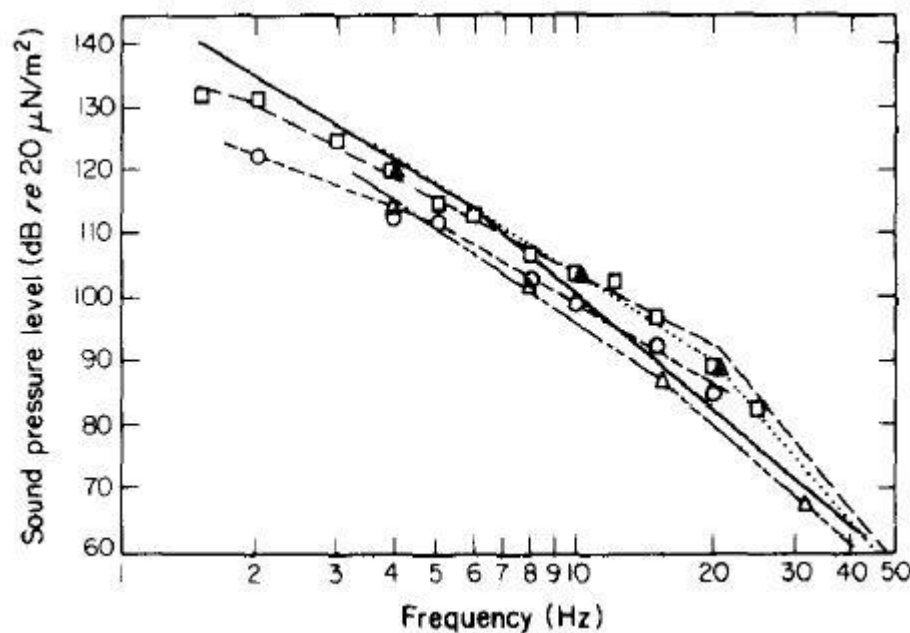


Abb. 26 – Hörschwelle zwischen 1,5 und 50 Hz für Minimal Audible Pressure (MAP) und Minimal Audible Field (MAF). — Bekesy MAP; □ Yeowart MAP; ○ Yeowart MAF; ▲ Yeowart Tone Threshold; △ Yeowart Noise Threshold (BRONER 1978, S.486)

3.4. Vom ersten Infraschall-Kongress bis zur Jahrtausendwende (1973 bis 1998)

Zwischen der ersten großen NASA Studie 1965 und dem ersten internationalen IS-Kongress in Paris 1973 entstehen über 50 Studien und Berichte über IS. Die Teilnehmer des „Colloque International sur les Infra-sons“ definieren die Untergrenze von IS auf

0,1 Hz²³ und einigen sich zur Systematisierung verschiedener verwendeter Schalldruckpegel in Experimenten auf die 4-Bereichs Einteilung (siehe Kapitel 4.2). Die Beiträge zur Tagung werden auch im Tagungsband veröffentlicht (PIMONOW, 1973). Anfang der 1970er Jahre wird noch intensiver die Hörbarkeit von IS untersucht (YEOWART 1971; WHITTLE, COLLINS & ROBINSON 1972; NIXON & JOHNSON 1973; JOHNSON & VON GIERKE 1974; YEOWART & EVANS 1974), doch vielmehr noch die allgemeinen physiologischen oder physiopathologischen Auswirkungen auf den menschlichen Organismus (KARPOVA et al. 1970; EVANS 1971; FECCI et al. 1971; BORREDON 1972; VON GIERKE 1973; HARRIS et al. 1974; HOOD, LEVENTHALL & KYRIAKIDES 1974; LEIBER 1974, JOHNSON 1975; EVANS 1976; NIXON & VON GIERKE 1976...) ²⁴. Ein bisher noch neuer Forschungsansatz ist der IS-Einfluss auf den Fahrer in Kraftfahrzeugen (EVANS & TEMPEST 1972; TEMPEST 1975).

In Bezug auf die Hörschwelle ist vorrangig Yeowart zu nennen. Durch seine Versuche liegen uns mehrere Hörkurven für verschiedene Beschallungsarten²⁵ vor, mit genauen Aufschlüsselungen über Abweichungen und vieles mehr, bis zu einer Grenzfrequenz von ca. 1,5 Hz. Was die physiologischen Auswirkungen betrifft, liefern uns die Experimente eine Reihe verschiedener Symptome bei diversen Frequenzen und Schalldruckpegeln. Karpova (1970) berichtet von Einflüssen durch IS auf das Herz-Kreislauf- und Respirations-System (Puls, Atmung und Blutdruck). Fecci (1971) stellte Verkürzungen der Schlaf-Phasen bereits bei geringen Intensitäten zwischen 50 und 65 dB fest und Hood (1973) Augenzittern (Nystagmus).

Die wichtigsten Beiträge aus der Zeit werden 1976 in „*Infrasound and low Frequency Vibration*“ (TEMPEST 1976) zusammengefasst, was sich auch schnell zum Standardwerk etabliert. Diese rege Tätigkeit in der ersten Hälfte der 1970er Jahre führt auch zu einem verstärkten medialen Interesse, dem der IS vermutlich seinen populär schlechten Ruf verdankt. In Tageszeitungen erscheinen Artikel in mit Titeln wie „*Brain tumors 'caused by noise'*“ (TIMES 1973), „*The silent Killer all around us*“ (EVENING NEWS 1974), „*The low pitched killer – can the sound of silence be driving us silly?*“ (SUNDAY PRESS 1975), „*Hounded by this nagging noise*“ (SUNDAY PRESS 1977a)

²³ IS kann aus physikalischer Sicht keine Untergrenze haben, jedoch sind Periodendauern von mehreren Sekunden oder Minuten akustisch irrelevant. Eine untere Grenze von 1 Hz würde für akustische Forschung genügen, denn 0.1 Hz hat eine Periodendauer von 10 Sekunden.

²⁴ Die genannten Forschungen stellen keinen Gesamtüberblick sondern lediglich eine subjektive Auswahl an repräsentativen Studien dar.

²⁵ Hier muss zwischen Ganzkörper- und Kopfhörerbeschallung unterschieden werden, bzw. weiter zwischen monauraler und binauraler.

oder *“Hum – that mystery noise that drives sobbing wife out of the house”* (SUNDAY PRESS 1977b). 1973 erscheint Lyall Watsons Buch mit dem bezeichnenden Titel *“Supernature”*, in dem völlig unwissenschaftlich und gespickt mit falschen Tatsachen Gavreaus IS-Forschung dazu benutzt wird, ein Mysterium der Gefahren rund um dieses Forschungsthema zu kreieren (WATSON 1973). Dieses allgemein von der Wissenschaft abgelehnte Buch hat sich im Lauf der Zeit jedoch so in den Köpfen der Verschwörungstheoretiker manifestiert und bis heute überall im Internet für dubiose Beiträge über IS gesorgt, dass die negative Konnotation mit dem bloßen Wort irreparabel scheint.

1976 erscheint von Margaret Evans erstmals ein Beitrag, der sich mit den psychischen Auswirkungen von moderatem Schalldruck auseinandersetzt (EVANS 1976). Ausgangspunkt ihrer Untersuchung waren Berichte von Büroangestellten in der Nähe einer Teststätte für Concorde-Triebwerke, die wegen Übelkeit, Konzentrationsstörungen, Schwindelgefühl und Lethargie die Arbeit verweigerten, sowie die allgemein etablierte Annahme, IS könnte das Gleichgewichtsorgan beeinflussen. Die Testverfahren adaptiert Evans von Hood et al. (1972)²⁶, die ebenfalls schon psychische Auswirkungen – jedoch bei hohen Schalldruckpegeln – untersuchten. 86% der Vpn zeigen signifikant schlechtere Ergebnisse bei einem Geschicklichkeitstest unter IS-Einfluss mit 110 dB. Eine Verschlechterung der Reaktionszeit oder Merkfähigkeit kann nicht festgestellt werden. In einem Gleichgewichtstest kann eine signifikante Verschlechterung bei 20% der Vpn unter IS-Einfluss festgestellt werden. Ein Vergleichstest zeigt, dass die Änderungen der Leistungsfähigkeit im Geschicklichkeitstest unter IS-Einfluss ähnlich sind wie unter Alkoholeinfluss, was auch schon von Hood et al. (1972) festgestellt wird.

Gegen Ende der 1970er Jahre wird immer stärker der IS-Einfluss im alltäglichen Arbeitsleben untersucht (KYRIAKIDES & LEVENTHALL 1976, HOCKEY 1978, LEVENTHALL 1980). Die Ergebnisse bestätigen Evans Versuche und zeigen zudem, dass die Wirkung von IS und hörbarem Schall gegenläufig sein können, denn Lärm im hörbaren Bereich wirkt sich teilweise sogar leistungssteigernd aus. Eine Belastung von 70 bis 80 dB, wie sie in Büroräumen häufig messbar ist, wirkt sich entgegen Evans Resultate aber doch auf kognitive Fähigkeiten (Lern- und Merkfähigkeit etc.) aus. Da die Experimente aber sehr unterschiedliche Aufgabenstellungen beinhalten, sind die Ergebnisse nicht direkt vergleichbar.

²⁶ Handgeschicklichkeitstest, Reaktionszeit, Zahlen-Merkfähigkeit und ähnliche Tests

Die Experimente zu den psychologischen Auswirkungen von IS häufen sich zunehmend, da dieser Bereich noch relativ unerforscht ist (BUNSEL & LEHMANN 1978; SCHICK 1979; MØLLER 1980 und 1984; ISING 1980 und 1983). Møller experimentiert mit 3-stündiger Expositionsdauer, von Ising stammt die vermutlich erste Studie zur Langzeitexposition (10 Tage lang je 8 Stunden/Tag). Bunsel und Lehmann experimentieren mit tauben Tieren und versuchen auf diesem Weg, Effekte auditiver von jenen vibroakustischer Wahrnehmung zu trennen.

Nach einer letzten größeren Welle an Publikationen 1980²⁷ wird es wieder ruhiger in der IS-Forschung. Der Verdacht drängt sich auf, die interessantesten Rätsel seien wohl gelöst. In den wenigen Studien während der 1980er Jahre stehen auf jeden Fall die psychischen Auswirkungen im Vordergrund. Über das Jahrzehnt dominieren zwei Themen die Forschung, einerseits Belästigung („*Annoyance*“) durch IS (GAMBERALE et al. 1982; ISING 1983; PERSSON & RYLANDER 1988) und andererseits die medizinischen Auswirkungen (LANDSTRÖM et al. 1983; DANIELSSON & LANDSTRÖM 1985; NISHIMURA et al. 1987). In den 1990er Jahren scheint das Interesse weiter abzunehmen, bis am Ende des Jahrzehnts – gewissermaßen durch Beteiligung der Parapsychologie – ein neuer Hype um das Thema IS entsteht, der in eine völlig andere Richtung lenkt. Zum ersten Mal werden konkrete Behauptungen zu den psychischen Auswirkungen von IS unterhalb der Hörgrenze getroffen (TANDY & LAWRENCE 1998).

3.5. Neueste Entwicklungen in der Infraschall-Forschung von 1998 bis 2012

3.5.1. Vic Tandy, Die Spuktheorie

Vic Tandy sei aufgrund seiner Pionierarbeit und Bekanntheit ein eigener Abschnitt gewidmet. Mit seinem Bericht „*The Ghost in the Machine*“ von 1998 im Journal of the Society for Psychical Research ist er der Erste, der IS in Verbindung mit „paranormalen Phänomenen“ bringt [TANDY & LAWRENCE 1998]. IS als ein Erklärungsmodell für Spuk und Geister-Sichtungen garantiert Tandy die höchste Aufmerksamkeit sämtlicher Printmedien, was ihm letztendlich zu seiner Bekanntheit verhilft. Dieser Bericht kann als der Grundstein einer ganzen Reihe weiterer Experimente und Studien zum Thema IS und Angst betrachtet werden. Nach dem nachfolgenden Bericht „*Something in the Cellar*“, ebenfalls im Journal of the Society for Psychical Research [TANDY 2000] und

²⁷ In diesem Jahr sind es zumindest noch mehr als 10 Veröffentlichungen

einigen kleineren Messungen an „mystischen Orten“ ernennen die Medien Tandy zum „Ghostbuster“ [DUDMAN 2003] und sichern ihm seinen Platz in einem ohne Zweifel amüsanten Kapitel der IS-Forschung, das aber gleichzeitig mit gegebener Vorsicht betrachtet werden muss. Durch das neu entfachte Interesse an den psychischen Effekten gewinnt die IS-Forschung nun auch für Disziplinen wie (Para-)Psychologie und Psychoakustik an Bedeutung. Der Grund für die neue Attraktivität des Themas wird bereits im ersten Satz des Abstracts von 1998 ersichtlich:

„In this paper we outline an as yet undocumented natural cause for some cases of ostensible haunting”

(TANDY & LAWRENCE 1998)

[Übers.: „In diesem Bericht grenzen wir eine bislang noch unerforschte natürliche Begründung für einige Fälle von vermeintlichem Spuk ab.“]

An dieser Stelle sei erwähnt, dass so genannten „Geisterjägern“ Vibration als natürliche Ursache für „paranormale Aktivitäten“ durchaus bekannt ist. Hierbei geht es aber darum, dass durch niederfrequente Vibrationen Gegenstände in einem Raum „wie von Geisterhand“ bewegt werden können, da diese Vibrationen nicht zwingend spürbar sein müssen. Von einer direkten Einwirkung des (Luft-)Schalls auf den Körper wurde aber in diesem Zusammenhang noch nicht berichtet.

The Ghost in the Machine, 1998:

Vic Tandy, damals ein Ingenieur für medizinisches Zubehör, hat eigentlich beruflich nichts mit IS zu tun. Sein Interesse für dieses Gebiet ist das Resultat einer Reihe an Zufällen. In einem kleinen Labor aus zwei Garagen (ca. 30 ft. Länge und 10 ft. Breite, entspricht ungefähr 10 x 3 Metern) wird von Mitarbeitern und dem Reinigungspersonal berichtet, es würde spuken. Tandy arbeitet selbst in dem Labor und bemerkt die unerklärlichen Phänomene wie „das Gefühl, beobachtet zu werden“, „Gänsehaut“ oder „schattenhafte Erscheinungen“. An einer im Schraubstock eingespannten Fechtwaffe, bemerkt er eine starke Vibration am freien Ende der Klingenspitze. Als er einen Rollwagen mit der eingespannten Klinge im Raum umherschleibt, wird die Vibration am einen Ende des Labors immer stärker bzw. am anderen Ende schwächer.

Tandy hatte eine niederfrequente, stehende Welle, eine axiale Raum-Mode (vgl. 1.3) mit einer Frequenz von ungefähr 19 Hz entdeckt. Die Quelle ist ein neu installierter Lüfter im Nebenraum, der eine mechanische Schwingung von 19 Hz über die Gebäudesubstanz überträgt. An der Vibration der Fechtklinge wurde diese sichtbar. Begünstigt durch die Raummaße auch in der Luft als stehende Welle ausgebildet, führte sie vermutlich auch zu den rätselhaften Erscheinungen. Für die Erklärung der Angstzustände und „geisterhaften Erscheinungen“ zieht Tandy eine Studie von Evans heran, in der einige der beobachteten Reaktionen auf IS-Exposition (Gänsehaut, Angstzustände) mit denen im Labor übereinstimmen (EVANS 1976, S.107ff). Kroemer (KROEMER et al. 1994, S.287f) und ein NASA-Report (OHLBAUM 1977) bestätigen optische Beeinflussung durch Vibration der Augäpfel bei ähnlichen Frequenzen. Evans berichtet jedoch von diesen Reaktionen ausschließlich bei verhältnismäßig großem Schalldruck zwischen 125 und 137,5 dB und verweist auf eigene Vorstudien worin sie schreibt:

„No level or frequency of infrasound in the 1 – 20 Hz region caused any visual disturbance [...]“.

(EVANS & TEMPEST 1972, S.23)

[Übers.: Kein Pegel und keine Frequenz von Infraschall im Bereich 1 bis 20 Hz verursachte irgendeine visuelle Beeinträchtigung ...]

Die NASA experimentiert mit noch höherem Schalldruck, wohingegen in Tandys Labor kein Schalldruck gemessen wurde. Ein großer Kritikpunkt an der Wissenschaftlichkeit von Tandys Studie ist auch, dass weder Messdaten noch verwendete Messgeräte jemals erwähnt werden, was die Studie nicht nachvollziehbar macht.

Es soll auch angemerkt sein, dass Tandy selbst das Labor als „gespenstisch“ beschreibt, die Beobachtungen am stärksten Nachts waren, mit umherstreunenden Katzen; Faktoren, die abseits des IS auch die Fantasie anregen und zu seltsamen Erlebnissen führen könnten. Dagegen spricht wiederum, dass der „Spuk“ nach einer Modifikation an der Befestigung des Ventilators, welche die mechanische Übertragung unterbindet, schlagartig verschwunden war.

Somit gilt zumindest in Betracht zu ziehen, dass IS auch mit schwachen Intensitäten Einflüsse auf die psychischen Befindlichkeiten des Menschen haben könnte.

Something in the Cellar, 2000

“An investigation into the link between infrasound and the perception of apparitions was performed in the 14th Century cellar beneath the Tourist Information Centre in Coventry.”

(TANDY 2000, Abstract)

[Übers.: Eine Untersuchung der Verbindung von IS und der Wahrnehmung von Erscheinungen wurde im Keller aus dem 14. Jahrhundert nahe der Touristeninformation in Coventry durchgeführt.]

Auch bei dieser Studie führt vermutlich der schlagkräftige Anfangssatz des Abstracts mit der „Wahrnehmung von Erscheinungen“ zu einem regen Medieninteresse. Der Ausgangspunkt ist ganz ähnlich dem 1998 beschriebenen Labor, mit dem Unterschied, dass Tandy bereits vom Vorhandensein von IS ausgeht. Die dort gelegene Touristeninformation berichtet von einigen vermeintlichen „Geister-Sichtungen“. Die Maße des Kellers sind denen des Labors ähnlich, wenn auch viel komplexer im Aufbau. Somit ist die Vermutung, es könne sich auch in dem Keller um IS handeln, der den vermeintlichen Spuk hervorruft, nicht weit her geholt. In diesem Bericht gibt Tandy sogar das verwendete messtechnische Equipment an: Ein Bruel & Kjaer Type 2209 Sound Level Meter mit einem passenden Mikrofon, das bis zu einer Grenzfrequenz von 1 Hz messen kann, sowie einen Zonic A&D Type 2535 Dual Channel FFT Analyzer. Die Messung bestätigt Tandys Vermutung über einen vorhandenen 19 Hz Ton (Abb. 27 und 28).

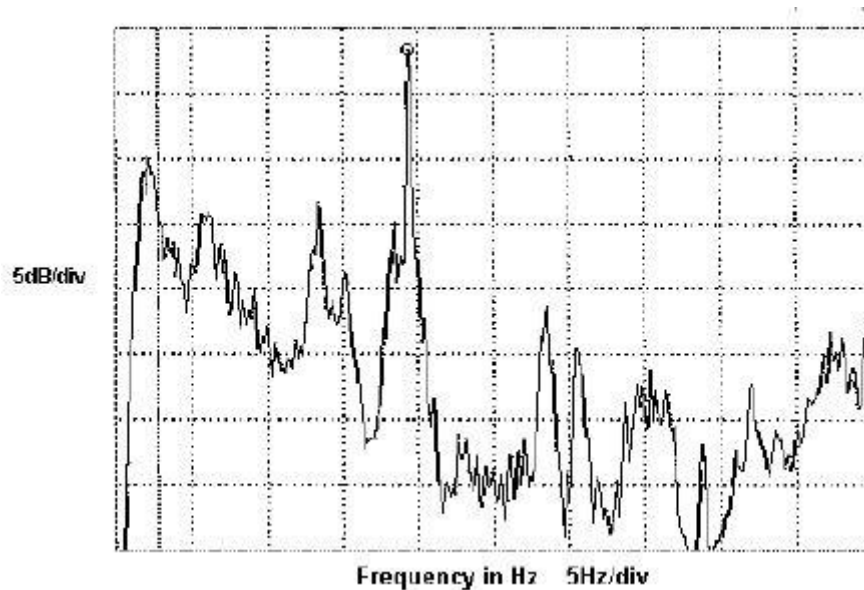


Abb. 27 – FFT Analyse des 20 Sekunden-Samples aus dem Keller [TANDY 2000, S.5]

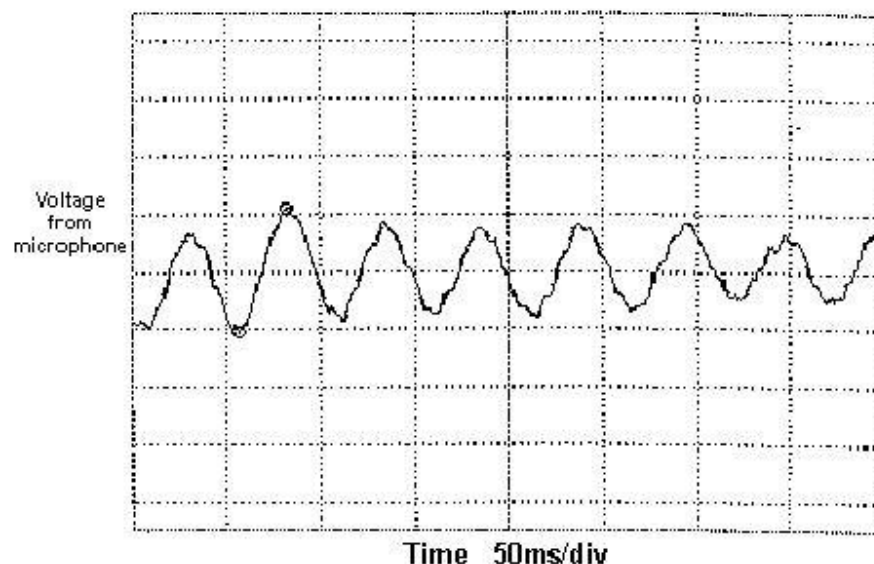


Abb. 28 – Die Wellenform der Messung des annähernd sinusförmigen Signals (TANDY 2000, S.6)

In der FFT Analyse ist die herausragende Spitze eines relativ schmalbandigen, nahezu sinusförmigen 19 Hz Tons deutlich zu erkennen. Lediglich liegt der Spitzenwert bei nur 38 dB, die Hörgrenze in diesem Bereich aber bei rund 80 dB (bei 20 Hz, WATANABE & MØLLER1990). Bei diesem Schalldruckpegel scheint es auf den ersten Blick ausgeschlossen, dass er sich auf die Wahrnehmung auswirkt. Betrachtet man jedoch den Rest des angezeigten Spektrums, könnte man auf einen Messfehler schließen. Es ist genau so unwahrscheinlich, dass der durchschnittliche Pegel zwischen 30 und 50 Hz bei circa 10 dB liegt. Das deutet auf die Verwendung eines Frequenzbewertungsfilters hin, worüber V.T. jedoch keine Angaben macht. Das verwendete B&K Sound Level Meter verfügt über die gängigen Bewertungsfiler A, B, C und D. Die Verwendung des dB(A)

kann ausgeschlossen werden. Wenn man den gemessenen Schalldruck mit der Filterkurve gegenrechnet, käme ein Schalldruck deutlich über der Hörgrenze heraus. Einer der drei anderen Filter scheint plausibel, es kann aber nicht mit Sicherheit festgestellt werden, welcher möglicherweise verwendet wurde. Es besteht auch die Möglichkeit, dass kein Filter verwendet wurde, was seitens des B & K Geräts möglich ist, und die Untergrenze der X-Achse nicht 0 dB entspricht, sondern einem anderen, höheren Wert.

Die Quelle des 19 Hz Tons kann nicht ausfindig gemacht werden. Der Versuch, Tandys Messergebnisse zu replizieren, bleibt erfolglos (PARSONS 2006, 165f). Weder können signifikante Spitzen bei 19 Hz, noch der Raumresonanz von 23 Hz oder irgendeiner anderen Frequenz im IS-Bereich festgestellt werden. Parsons merkt weiter an, dass Tandys 19 Hz in dem kurzen 20 Sekunden Sample auch der Mittelwert eines kürzeren IS-Ereignisses außerhalb, wie einem vorbeifahrenden Bus sein könnte. Tandy berichtet jedoch von mehreren Testdurchläufen über insgesamt drei Stunden, in denen sich der gemessene 19 Hz Ton nie verändert. Es muss auch die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, dass die Quelle für den 19-Hz-Ton nach sechs Jahren verschwunden sein kann. Tandy wird mittlerweile in der Wissenschaft kontrovers betrachtet und teilweise aufgrund der Vorgehensweise sogar belächelt. Dennoch werden immer wieder Versuche gestartet, Tandys Behauptungen zu replizieren. Einige davon werden im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

3.5.2. „Infrasonic Concert“, „Haunt Project“ und TV

Einer der frühesten Replikationsversuche²⁸ wird öffentlich bekannt unter dem Namen „Infrasonic Concert“ (WISEMAN & LORD 2003).

Wiseman & Lord stellen zusammen mit der Musikerin und Komponistin Sarah Angliss den ersten Großversuch mit über 700 Vpn an. Sie entscheiden sich für einen 17 Hz Sinuston, um die Hypothese zu überprüfen, IS könne paranormale Wahrnehmungen auslösen. Um dieses Vorhaben technisch zu realisieren, entwerfen die Mitarbeiter eine große Röhre von etwa 7 Metern Länge, die nach dem Prinzip einer Orgelpfeife funktioniert und testen diese vorher gründlich auf ungewollte Oberschwingungen (Abb. 29).

²⁸ Dieser Versuch wird nicht explizit als Replikationsstudie ausgewiesen, jedoch deutet die Angabe von Tandys Artikel [1998] als einzige Referenz zu IS doch stark darauf hin.



Abb. 29 – IS-Generator für den 17 Hz Sinuston im Test (LORD & SIMMONS)

Geteilt in zwei Gruppen werden den Vpn 4 Konzertstücke live dargeboten, von denen in Gruppe 1 die Stücke B und D mit einem 17 Hz Sinuston bei 90 dB SPL unterlegt werden und in Gruppe 2 die Stücke A und C. Nach jeder Darbietung muss ein kurzer Fragebogen ausgefüllt werden, in dem unter anderem ungewöhnliche Erfahrungen beschrieben werden müssen. Bei zumindest 3 der 4 Stücke konnte ein signifikanter Unterschied zwischen den Stücken festgestellt werden, denn im Fall der Unterlegung mit IS berichteten die Konzertbesucher zu 6 – 9 % öfter von ungewöhnlichen Erlebnissen während der Darbietung. Da in diesem Frequenzbereich ein Schalldruck von 90 dB schon sehr knapp an der Hörgrenze liegt, könnte der 17 Hz Ton für einige Vpn wahrnehmbar gewesen sein. Die ungewöhnlichen Ereignisse könnten auch über eine veränderte Wahrnehmung durch Verdeckungseffekte statt direktem Einfluss auf den Körper erklärt werden. Das würde zwar die These nicht untermauern, IS-Einwirkung führe zu Angst und Geister-Sichtungen, aber dennoch belegen, dass durch IS eine negative Beeinträchtigung entstehen kann. Abb. 30 zeigt den deutlich sichtbaren 17 Hz Sinuston während einer Durchführung mit IS in der FFT Analyse.

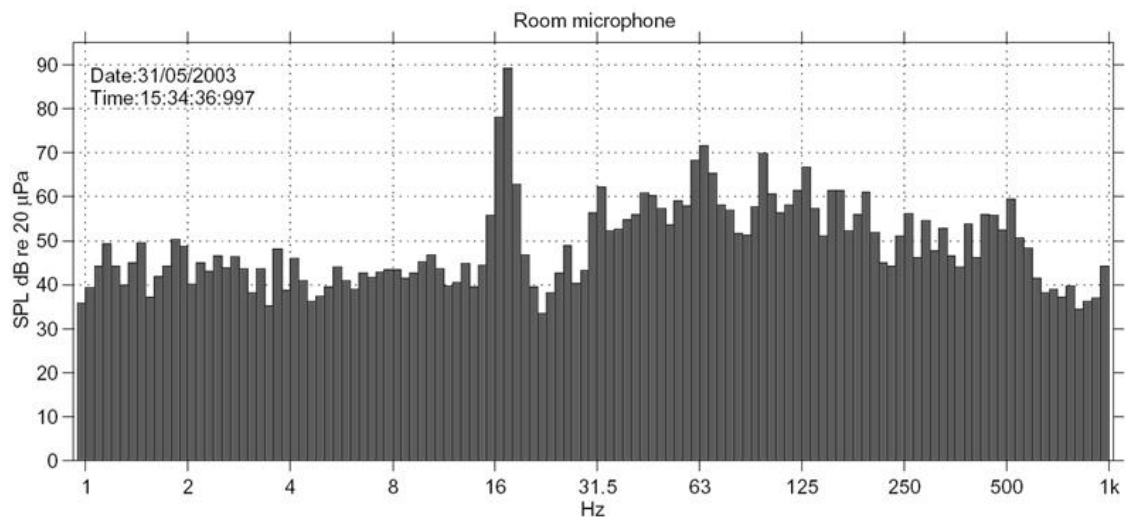


Abb. 30 – FFT Analyse einer mit IS (17 Hz) unterlegten Darbietung (LORD & SIMMONS 2003)

Trotz der scheinbar guten Ergebnisse des Experiments bleiben einige Fragen offen, zum Beispiel, warum die Studie niemals wissenschaftlich veröffentlicht wurde. Bis heute, fast 10 Jahre nach der Durchführung kann man lediglich im Internet darüber lesen.

Ein weiterer Versuch, das 19 Hz Experiment Tandys zu replizieren, wird mit ca. 440 Vpn im Mary Kings Close in Schottland 2007 im Zuge des „*Mary King’s Ghost Fest*“ durchgeführt (PARSONS 2012, S.164f). Bei Führungen durch das Gebäude werden Vpn-Gruppen entweder einem 19 Hz Ton mit über 100 dB SPL²⁹ ausgesetzt oder keinerlei zusätzlichem Schall (Kontrollgruppe). Es handelt sich um einen Doppelblindversuch, denn weder Vpn noch Versuchsleiter wissen, ob IS vorhanden ist oder nicht. Die Teilnehmer werden an sieben aufeinanderfolgenden Tagen in 31 Gruppen zu je 10 bis 15 Personen getestet. 17 der Gruppen (249 Vpn) werden IS ausgesetzt, die 14 Kontrollgruppen (190 Vpn) nicht. Verwendet werden zwei Generatoren mit gleicher Bauweise wie im vorher beschriebenen Experiment. Diese werden unsichtbar hinter Wänden in den Versuchsräumen platziert. Nach der Führung durch die Räumlichkeiten werden die Vpn gebeten, einen Fragebogen auszufüllen. Die Ergebnisse weisen deutlich in die Richtung, dass IS bei der Wahrnehmung von „paranormalen Aktivitäten“ eine große Rolle spielen kann. Zwar geben in beiden Gruppen etwa gleich viele Personen eine ungewöhnliche Wahrnehmung an, jedoch sind es in der IS-Gruppe 36% der Vpn, die mehrere solcher Wahrnehmungen angeben, gegen 16,4% aus der Kontrollgruppe. Dass in beiden Gruppen ein großer Teil der Vpn (ungefähr 35%) überhaupt

²⁹ Dieser Pegel liegt deutlich über der Hörgrenze, man könnte eigentlich kaum von einem Blindversuch sprechen, wenn er im Bereich der Vpn gemessen wurde. Wahrscheinlicher ist, dass dieser Schalldruck direkt im Bereich der Quelle gemessen wurde.

ungewöhnliche Wahrnehmungen angibt, ist wenig verwunderlich. Schließlich werden die Vpn geschlossen aus dem vorher erwähnten „*Ghostfest*“ rekrutiert, einem jährlichen Unterhaltungs-Festival, das viele zu „*paranormalen Aktivitäten*“ affine Menschen anzieht. Die am häufigsten berichteten Gefühle sind Ängstlichkeit, Unwohlsein und Übelkeit. Parsons bestätigt, dass sich ähnliche Berichte auch in zwei weiteren IS-Experimenten häufen, die ähnlich Wiseman & Lords Studie bei öffentlichen Konzerten 2006 und 2010³⁰ durchgeführt werden. Verwendet wird ein 19 Hz Sinuston mit einem Schalldruckpegel von ca. 90 dB. Die Teilnehmer berichten auch in diesen Versuchen von Unwohlsein, Ängstlichkeit, Übelkeit und leichten Kopfschmerzen. Zudem berichten auch die Musiker von Schwierigkeiten, ihr Instrument zu spielen (PARSONS 2010, S.166f).

In einem weiteren Experiment 2006 sollen die Ergebnisse von Tandy und Wiseman & Lord überprüft werden (FRENCH et al. 2009). Im Zuge des „*Haunt Project*“ werden neben elektromagnetischen Feldern (EMF) gleich mehrere Frequenzen im IS-Bereich mit 79 Vpn getestet. In einem Pilotversuch mit 15 Personen werden vorab die Schalldruckpegel für die einzelnen Frequenzen ermittelt, damit der IS im Experiment unterhalb der Hörschwelle bleibt. Für die Durchführung wird eine Raum-in-Raum Konstruktion entworfen (Abb. 31), hinter deren runder Wand die Generatoren für IS und EMF versteckt werden.

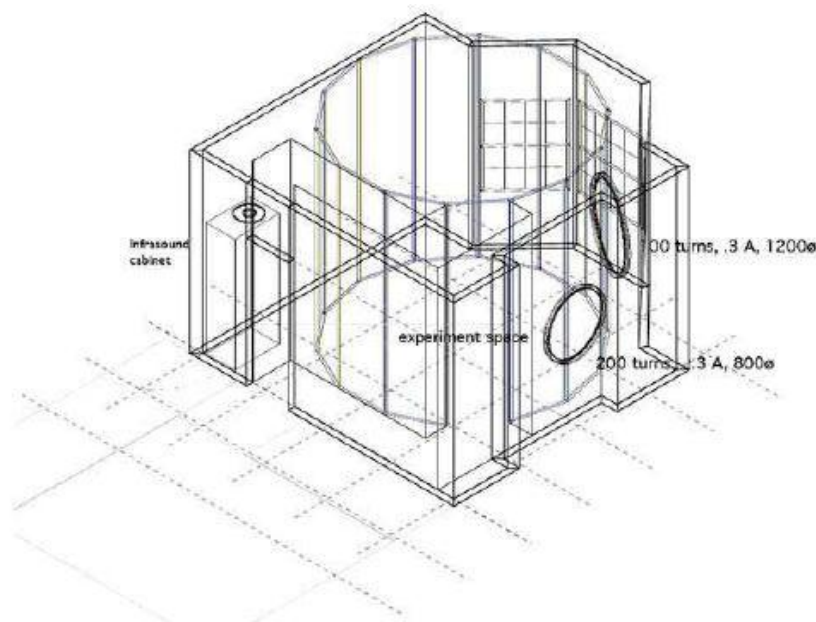


Abb. 31 – Konstruktionsplan der Testkammer für das „*Haunt Project*“ (FRENCH et al. 2009, S.624)

³⁰ 2006 fand ein Experiment in der St. Georges Hall (Liverpool) statt und 2010 in Middlesbrough

Die Vpn verbringen alleine 50 Minuten in der Testkammer und werden gebeten, im Raum herumzugehen und gegebenenfalls ungewöhnliche Wahrnehmungen mit der genauen Position und Uhrzeit in einem Plan zu notieren. Sie werden vorher darüber informiert, während des Versuchs IS, EMF, beidem oder keinem ausgesetzt zu sein. Abschließend werden sie gebeten, noch einen Fragebogen auszufüllen. Nur 6% berichten von gar keinem ungewöhnlichen Ereignis, 70% von drei oder mehr. Am häufigsten werden Ereignisse am Plan erfasst, wenn IS vorhanden ist, EMF jedoch nicht. Unter den erfassten Wahrnehmungen sind häufig (>30%) Schwindelgefühl oder Kitzeln im Ohr und weniger häufig (<10 %) Angstgefühl oder Traurigkeit (FRENCH et al. 2009, S.624f). Die Angaben mit Häufigkeiten zwischen 10 und 30% spiegeln keine psychologischen Auswirkungen wider.

Einen interessanten Gegenpart zu den bisherigen Experimenten stellt der 2010 von Toija Riggins durchgeführte Versuch „*Gravesend Inn(-frasound)*“ dar. Die Ergebnisse sind bis dato noch nicht veröffentlicht und können lediglich im Internet eingesehen werden. Die Auswertung der Studie, die mit über 200 Vpn durchgeführt wird, kann in einer Analyse keine statistisch signifikanten Ergebnisse zwischen den Gruppen mit IS und jenen ohne liefern (RIGGINS 2011). Der Versuch wird in einem äußerst aufwendigen Setup durchgeführt mit speziell „schauerhaft“ dekorierten Räumen, einer Mordgeschichte via Videobeamer und einem inszenierten Stromausfall. Danach sollen die Vpn ihre Empfindungen während des Versuchs anhand einer 5-stufigen Likert-Skala beschreiben. Es ist denkbar, dass die Ergebnisse derart ausfielen, weil durch das aufwendige Versuchsdesign und den erzeugten psychischen Stress der Teilnehmer die eher geringen Auswirkungen von IS überdeckt worden sind.

Die US-amerikanische Fernsehsendung „*MythBusters*“ versucht ebenfalls mit einer kleinen Gruppe von 10 Vpn das 19-Hz-Experiment zu replizieren (MYTHBUSTERS 2012). Die Vpn verweilen in vier Räumen, von denen nur in einem ein 19 Hz Sinuston vorhanden ist, jeweils mehrere Minuten. Bei einer anschließenden Befragung über das allgemeine Befinden bzw. ungewöhnliche Erfahrungen kann kein besonderer Effekt im „19-Hz-Raum“ beobachtet werden. Die Versuchsanordnung berücksichtigt jedoch Raumresonanzen nicht und die vier Räume sind stark unterschiedlich, sodass man nicht von einer kontrollierten Versuchsumgebung sprechen kann. Dem Experiment darf daher auch keine Relevanz zugesprochen werden. Es zeigt aber dennoch, dass auch 15 Jahre

nach Tandys erstem Bericht noch reges Interesse an den Mythen um IS und Angst bzw. Geistern besteht.

Im vergangenen Jahrzehnt zeigt sich ein starker Trend zu Blindversuchen in der IS-Forschung. Für die Aufdeckung schwacher psychischer Effekte scheint dies auch ein probates Mittel zu sein. Die Tatsache, dass einzelne Replikationsstudien keine signifikanten Ergebnisse liefern, ist aber kein Grund, die Annahme über den Einfluss von IS generell zu verwerfen. Um Fehler weitgehend auszuschließen, sind eine größere Menge an replizierbaren Studien, sowie stärkere interdisziplinäre Zusammenarbeit nötig. Ziel der Forschung sollte auf keinen Fall sein, skurrile Geistertheorien zu bestärken, sondern vielmehr Erklärungsmodelle für mögliche bislang unbekannte Auswirkungen von niederfrequentem und IS zu liefern. Der von Tandy 1998 ausgelöste Hype führt möglicherweise in eine falsche Richtung. Wer sich am Nachweis solcher Wahrnehmungsphänomene bedingt durch IS versucht, sollte sich nicht allzu sehr auf die Geistersichtung und den 19 Hz Ton festsetzen. Gerade im Arbeitsalltag vieler Menschen könnten unterschiedlichste (weniger medienwirksame) Auswirkungen zum Störfaktor werden. Es wäre dringend nötig, den Horizont wieder zu erweitern und eine Vielzahl an Frequenzen mit unterschiedlichsten Schalldruckpegeln im IS-Bereich auf mögliche Auswirkungen zu untersuchen.

3.5.3. Infraschall von Windkraftanlagen

Eines der aktuellsten und gleichzeitig umstrittensten Themen innerhalb des Forschungsgebiets ist die IS-Emission von Windkraftanlagen (WKA). Die seit vielen Jahren voranschreitende globale Energiereform führt zu einem Umdenken in Richtung erneuerbarer Energieformen. Auch einzelne Vorfälle, wie der nukleare Unfall in Fukushima 2011 durch eine Flutwelle verstärken den Trend zu solchen Energieformen und damit auch den vermehrten Bau von WKA. Immer häufiger werden ganze Windparks mit dutzenden Windrädern gebaut, nicht selten in geringer Entfernung zu bewohntem Gebiet. Neben ästhetischen und umweltbezogenen Bedenken werden vor allem von der nahen Anwohnerschaft auch immer wieder die mögliche Lärmbelästigung und besonders der negative Einfluss durch IS beanstandet. Lärmemission im Hörbereich ist seit den 1970er Jahren schon hinreichend bekannt (vgl. CERANNA et al. 2012, S.2), doch im IS-Bereich rückt sie erst seit einigen Jahren stärker in den Mittelpunkt. Da die

aufzudeckenden Effekte jedoch verhältnismäßig klein oder selten sind, ist deren Untersuchung durch verlässliche Studien auch schwierig.

Auf der einen Seite steht die Windindustrie, die verständlicherweise versucht, die Argumente gegen Windkraft zu entschärfen. Auf der anderen Seite stehen die Bürgerinitiativen betroffener Anwohner, in deren Lebensraum WKA hergestellt werden sollen. Beide Seiten versuchen, ihren Standpunkt durch Studien zu untermauern und unterstellen der jeweils anderen Seite, gezielt zu manipulativ vorzugehen.

Die Windkraftgegner berichten von einer Vielzahl an negativen Auswirkungen, die der IS-Emission von WKA zuzuschreiben sei. Die vermeintlichen Symptome sind Schlafstörungen, Kopfschmerzen, Konzentrationsprobleme, Reizbarkeit, Ermüdungserscheinungen, Benommenheit, Übelkeit, verschwommenes Sehvermögen, Herzrasen und Panikattacken, aber auch eine Reihe an otologischen³¹ Symptomen wie Schwindelgefühl, Tinnitus oder Druck- und Schmerzgefühl in den Ohren. Die zusammengefassten Symptome werden auch „*Wind Turbine Syndrome*“ (dt. „Windturbinensyndrom“) genannt (PIERPONT 2009). Pierponts Buch stößt jedoch in der Wissenschaft auf einigen Widerstand. Ihr wird zur Last gelegt, unwissenschaftlich zu arbeiten, wenig Kenntnis über die Eigenschaften von Schall zu haben und den politisch angespannten Umstand zu nutzen, um den Verkauf ihres eigenen Buches voranzutreiben (LEVENTHALL 2011). Trotzdem findet ihr Buch in der Öffentlichkeit Anklang. In unzähligen Bürgerinitiativen werden gesetzlich festgelegte Mindestabstände von 1.500 Metern oder der 10-fachen Anlagenhöhe gefordert. Betrachtet man einen Überblick des Bundesumwelt-ministeriums in Deutschland für die Abstandsempfehlungen einzelner Bundesländer, sieht man, dass es erstens keine gesetzlich einheitliche Verpflichtung gibt und zweitens einzelne Bundesländer sogar in Wohngebieten lediglich einen Mindestabstand von 300 bis 500 Meter vorschlagen (BMU 2012). Hauptproblem in der Abstandsdebatte sind die immer größer werdenden Anlagenhöhen (Nabenhöhen) und Rotordurchmesser. Von 1990 bis 2011 hat sich die durchschnittliche Nennleistung der WKA mehr als verzehnfacht, die Anlagenhöhen wuchsen von ungefähr durchschnittlich 50 Metern auf bis zu 140 Meter an. Beide Faktoren, sowie auch die Umdrehungsgeschwindigkeit, spielen eine wesentliche Rolle beim Abstrahlverhalten einer WKA (VAN DEN BERG 2006, S.16; CERANNA et al. 2012, S.5). Mit steigender

³¹ Otologie ist das medizinische Spezialgebiet, das sich mit dem Ohr und dessen Erkrankungen beschäftigt. Schwindelgefühl zählt zu diesen Erkrankungen, weil das Innenohr wesentlich für den Gleichgewichtssinn verantwortlich ist.

Rotationsgeschwindigkeit erhöhen sich die Frequenz und die abgestrahlte Amplitude (Abb. 26).

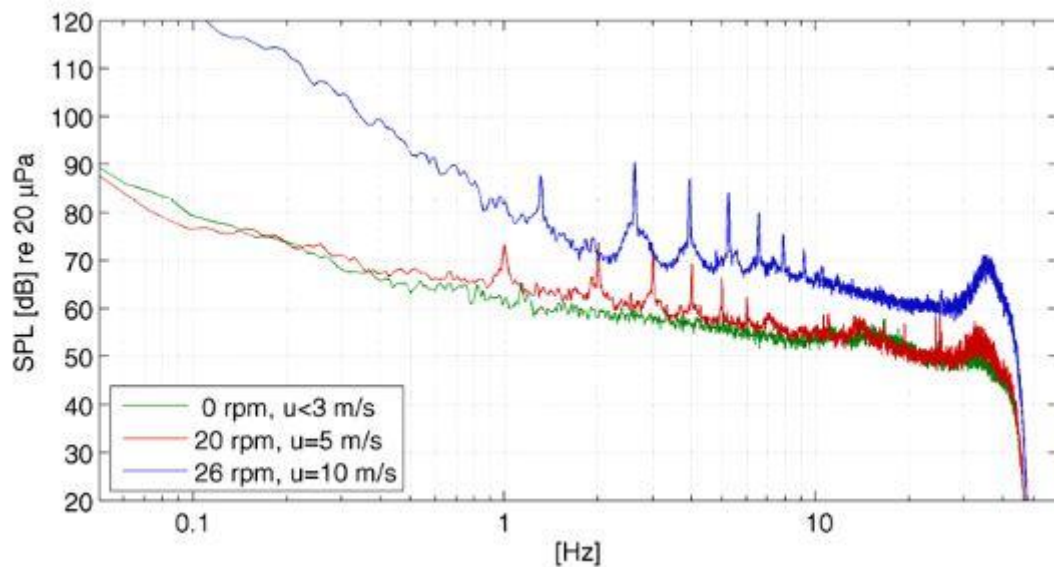


Abb. 32 – Messergebnisse der Schalldruckpegel bei verschiedener Umdrehungs- bzw. Windgeschwindigkeit einer WKA in 200m Entfernung (CERANNA et al. 2012, S.5)

Der einzige gesetzliche Schutz, auf den sich Anwohner im Umkreis von WKA berufen können, sind momentan die im Bundeslärmschutzgesetz vorgeschriebenen maximalen Immissionspegel in Wohngebieten. Einziger Haken ist jedoch, dass erlaubte Pegel immer mit dem dB(A) Frequenzbewertungsfilter angegeben werden, der für die Bewertung niederfrequenten Schalls jedoch völlig ungeeignet ist.

Ferner wird behauptet, dass eine Lärmbelästigung von WKA bei viel geringerem Pegel einsetzt, als jene von Verkehrs- oder Industrielärm (SALT & HULLER 2010, S.12). Das liegt vermutlich an der Kontinuität oder Monotonie. Dem entgegen steht die Windindustrie mit der Behauptung, IS von WKA sei absolut unbedenklich, solange er unterhalb der Hörschwelle bleibt. Die äußeren Haarzellen im Innenohr reagieren jedoch auf niederfrequente Einwirkung unterhalb der Hörschwelle (SALT & HULLER 2010, S.15f)³². Das belegt zwar nicht zwingend sofort einen möglichen Wahrnehmungseffekt, zeigt aber doch, dass die Behauptungen bezüglich der Wahrnehmbarkeit von IS, die sich meist auf die Hörkurven und somit die Reizantwort der inneren Haarzellen stützen, nicht ausreichend für die Betrachtung möglicher Auswirkungen von niederfrequentem und IS sind. Außerdem stützen sich die Argumente der Windkraftindustrie neben der Hörschwelle auf die Pegelabnahme im Freifeld, die allgemein mit -6 dB / Abstandsverdopplung definiert ist. Den Berechnungen mit dieser Formel zufolge sollten

³² Dass die äußeren Haarzellen auf geringere Reize reagieren, als die inneren, ist bereits seit den 1950er Jahren eine bekannte Tatsache (vgl. RANKE & LULLIES 1953, S.109)

WKA im Umkreis von 250 Metern bereits völlig unbedenklich sein. Dies mag für eine auditive Wahrnehmung im Freifeld auch zutreffend sein, schließt aber nicht automatisch eine Beeinträchtigung innerhalb naher Gebäude aus. Resonanz bzw. stehende Wellen, wie sie in den 19-Hz-Experimenten beschrieben wurden, können bei derart langen Wellenlängen ausgeschlossen werden. Eine Luftschallmessung im Freifeld vernachlässigt aber die mögliche Übertragung einer mechanischen Schwingung auf die Gebäudesubstanz gänzlich.

Die Anzahl an Studien zum IS-Einfluss von WKA ist bis zum aktuellen Stand noch sehr gering. Eine wertfreie Betrachtung des Forschungsstandes ist momentan schwierig, denn von den Energiekonzernen einerseits oder den Bürgerinitiativen andererseits beauftragte Studien sind von geringem wissenschaftlichen Wert, da beide Seiten offensichtlich versuchen, eigene Interessen durchzusetzen. Während die Gegner von Windenergie immer wieder allgemeine Auswirkungen von IS zitieren, ohne dabei auf die vorhandenen Pegel Rücksicht zu nehmen (vgl. PIERPONT 2009), wehren die Energiekonzerne sämtliche Vorwürfe entweder durch dB(A) – Messungen und Hörkurven ab, oder zitieren veraltete Studien, die die Unbedenklichkeit von WKA für Schallemissionen bestätigen. Die wenigen vorhandenen Studien behaupten einheitlich, dass sämtliche Probleme durch IS-Einfluss mit gesetzlich festgelegten Mindestabständen zu bewohnten Gebieten einfach beseitigt werden könnten. Richtige Aufklärung und passende Gesetze könnten WKA zu einer größeren Akzeptanz in der Bevölkerung verhelfen. Zu diesem Zweck bedarf es vermutlich noch einer Vielzahl seriöser Studien, die mögliche Auswirkungen von IS durch WKA belegen können.

4. Systematisierung von Infraschall-Experimenten

Gestützt durch die ersten Erkenntnisse über IS von Mohr, von Gierke, Gavreau, Yeowart und vielen anderen wurden in den 70er Jahren weitere Experimente über den Einfluss von IS auf den Körper durchgeführt. Alleine zwischen 1970 und 1980 werden mehr als 50 Studien über die Einflüsse von IS auf Menschen und Tiere publiziert.

Kritikpunkt ist die fehlende Systematik in der experimentellen Forschung des vergangenen Jahrzehnts. Die einzige Errungenschaft in diesem Bereich ist die „4-Zonen-Einteilung“ des ersten IS-Kongresses 1973 in Paris, die wenigstens versucht, Kategorien für die verwendeten Schalldrücke zu etablieren (REEFF 1982, S.29).

Die 1. Zone (>185 dB) ist jene der tödlichen Wirkung von IS. Die 2. Zone (172 dB – 140 dB) stellt einen Bereich dar, in dem IS durch kurze Exposition (<3 min) oder mit angemessenem Gehörschutz gerade noch erträglich ist, in der aber kurzzeitige Schädigungen auftreten können. Im dritten Bereich (140 dB – 120 dB) sollen Experimente auch mit Langzeitexposition und geringen Nachwirkungen möglich sein und letztlich stellt die 4. Zone (< 120 dB) die „Unbedenklichkeitsgrenze“ dar und einen Bereich, in dem auch subtilere bzw. unbewusste Effekte gemessen werden sollen.

Diese Zonen werden nach etlichen Versuchserkenntnissen jedoch neu definiert (siehe 4.2, Abb. 33).

Schallpegel > 170 dB können über längere Dauer experimentell bestätigt (PIEMONOV 1976) zum Tod führen³³. 160 dB können auch bei kurzer Expositionsdauer ohne Gehörschutz zu einer mechanischen Beschädigung von Trommelfell, Mittel- und Innenohr führen. Pegel zwischen 140 und 155 dB sind von gesunden Menschen gerade noch erträglich, führen aber zu kurzfristigen Beschwerden wie Gleichgewichtsstörungen, Übelkeit, „Seekrankheit“, Atemnot, Kopfschmerzen, Müdigkeit, Schläfrigkeit, Benommenheit, Blutdruckanstieg, Leistungsminderung, Stress und Tinnitus (GONO 1978; BORGMANN 2005, EL NOUNOU 2006). Im Bereich zwischen 120 dB und der Hörschwelle³⁴ treten eben genannte Symptome nur schwach und vereinzelt auf (EL NOUNOU 2006), jedoch können zusätzlich an der Wahrnehmungsschwelle eine Reihe von psychologischen Auswirkungen auftreten - Unsicherheit, Angst, Sensibilisierung und Fixierung auf das Geräusch (EVANS 1976; YAMADA et al. 1980; ISING & SCHWARZE 1982, BORGMANN 2005) und Beeinflussung der Schlafstadien (KUBICEK, 1989). Da diese Bereiche aber subjektiv unterschiedlich sind, können sie nur als ungefähre Richtwert dienen.

³³ Die Exposition führte zum Reißen der Zellwände und damit zum Tod durch innere Blutungen

³⁴ Nach Frequenz unterschiedlich, zwischen 80 dB bei 20 Hz und 120 dB bei 5 Hz

4.1. Einteilung der Experimente nach Art

Reeff unterteilt die IS-Experimente in vier grobe Überkategorien (REEFF 1982, S.19).

Tierversuche vs. Humanversuche

Gerade im Bereich über 150 dB weichen die Forscher auf Mäuse, Ratten, Meerschweinchen oder Hunde aus, weil die hohen Schalldrücke für Menschen zu gefährlich sind. Solche Experimente sollen die Maximalbelastung von Lebewesen durch IS untersuchen. Die Tiere werden dadurch schwer verletzt und kommen nicht selten zu Tode. Solche moralisch bedenklichen Experimente werden in späteren Jahrzehnten nicht mehr durchgeführt. Für derart eindeutige Erkenntnisse besteht aber auch Bedarf nach Replikation. Andererseits sind Tierversuche, durch die mit geringerem Schalldruck das Konditionierungsverhalten oder harmlose physische Reaktionen getestet werden, nicht einfach auf den Menschen übertragbar und aus psychologischer/psychoakustischer Sicht wertlos. Speziell wenn es um die Eigenresonanzen von Organen geht, kann es auch bei Tieren gleicher Größe und gleichen Gewichts zu starken Abweichungen kommen. Da es in Zukunft verstärkt die psychologischen Auswirkungen zu erforschen gilt, sollte in der IS-Forschung auf Tierversuche ganz verzichtet werden. Aus diversen Tierversuchen stammen mitunter auch einige wichtige Erkenntnisse, die als Anhaltspunkte für weitere Humanexperimente verwendet werden. Beispiele dafür sind ein verlangsamtes Konditionierungsverhalten unter IS-Einfluss, die unterschiedliche motorische Aktivierung durch verschiedene Frequenzen oder der Nachweis einer nicht-auditiven Beeinflussung von IS durch taube Versuchstiere (REEFF 1982, S.22ff). Die Experimente zu diesen Erkenntnissen wurden methodisch besser durchgeführt und dokumentiert, als die meisten Humanversuche und bilden deshalb eine solide Wissensgrundlage. Trotzdem können sie nur als Anhaltspunkt dienen, aber nicht direkt auf den Menschen übertragen werden.

Langzeit- vs. Kurzzeitexposition

Während die Kurzzeitexpositionen vor allem bei extrem hohem Schalldruck Ergebnisse liefern und auch verhältnismäßig besser belegt sind, mangelt es bis heute eher an guten Langzeitstudien. Gerade in der aktuellen Diskussion um die IS-Emission von Windkraftanlagen oder ähnlichem niederfrequentem Industrie- und Verkehrslärm wären Langzeitstudien dringend nötig. Psychische Effekte können vermutlich durch

Experimente mittlerer bis längerer Dauer fundiert belegt werden. Werden Studien mit Kurzzeitexpositionen für die Bewertung der Problematik bei Langzeitexposition herangezogen, kommt es unweigerlich zu einer Unterbewertung potentieller Lärmbelästigung. Der Beginn der experimentellen IS-Forschung ist geprägt von Kurzzeitversuchen mit hohen bis sehr hohen Schalldruckpegeln (MOHR et al. 1965; GAVREAU et al. 1966). Für Pegel jenseits von 150 dB sind Langzeitexpositionen undenkbar. Bei mittel- bis langfristigen Beschallungen scheitert es zudem oft an der technischen Durchführung. Erst seit den 1980er Jahren sind Langzeitversuche durch die Konstruktion spezieller Versuchsräume möglich (MØLLER 1980, ISING 1980). Die Idee der Aufstellung einer Grenze für den kritischen Schalldruck in Abhängigkeit von Frequenz und Beschallungsdauer ist zwar wesentlich älter (NIXON 1973), steht aber bis heute für den IS-Bereich aus. Zur Beschreibung der Auswirkungen von IS im Alltag mit Pegeln nahe der Wahrnehmungsschwelle sind Langzeitstudien über Monate, wenn nicht Jahre nötig. Die größte Schwierigkeit in solchen Experimenten sind die vielen Störfaktoren, die zu filtern es vermutlich einer enormen Schnittmenge von tausenden Personen bedarf.

Hoher Schalldruck vs. niedriger Schalldruck

Wirkdauer und Schalldruck laufen experimentell gesehen meist umgekehrt proportional zueinander, da hoher Schalldruck mit langer Wirkdauer zu gefährlich ist und geringer Schalldruck mit sehr kurzer Dauer meist keine Effekte erzielt. Die Dynamikauflösung des menschlichen Gehörs ist sehr fein, weshalb Versuche mit auch nur geringfügig unterschiedlichem Schalldruck auf keinen Fall miteinander verglichen werden sollten. Eine problematische Fehlerquelle in der IS-Forschung ist die Bewertung niedriger Schalldruckpegel durch die Ergebnisse von Experimenten mit hohem Schalldruckpegel. Hier kommt es dann zu einer Überbewertung des Problems. Das sollte in der Hypothesenbildung bei Experimenten dringend beachtet werden. Sämtliche Auswirkungen hoher Schalldruckpegel auf den Menschen sind physiologischer Natur und wesentlich besser dokumentiert als jene geringer Schalldruckpegel. Aus heutiger Sicht sind die Probleme durch hohe Pegel auch nicht mehr interessant, da sie in der Natur kaum vorkommen, aus psychologischer Sicht irrelevant sind und mechanische Schäden am Gehör durch sie mit angemessenem Gehörschutz in den wenigen Fällen (Raketenstart, Sprengungen etc.) gut vermieden werden können.

Kopfhörer vs. Ganzkörperbeschallung

Die reine Kopfhörerbeschallung eignet sich zwar besser, um eventuell auftretende Effekte mit einiger Sicherheit der auditiven Wahrnehmung zuzuschreiben, schließt jedoch wiederum andere Wirkmechanismen gänzlich aus. Ist das erwünscht, ist eine Kopfhörerbeschallung vorzuziehen. Vibroakustische Effekte benötigen zusätzlich die Hautoberfläche als Organ für den Tastsinn. Die beiden Beschallungsarten sind nicht vergleichbar, da unterschiedliche Sinnesorgane zum Tragen kommen. Effekte, die während einer Ganzkörperbeschallung auftreten, müssen nicht zwingend bei gleicher Frequenz und gleichem Schalldruckpegel auch während einer Kopfhörerbeschallung auftreten. Für beide Beschallungsarten sei erwähnt, dass die technische Erzeugung nieder-frequenten und IS mit einigen Problemen verbunden ist (siehe 7.2). In Experimenten muss auch die unterschiedliche Empfindlichkeit des Ohrs für die beiden Beschallungsarten berücksichtigt werden (siehe 2.5).

4.2. Die Zonen-Einteilungen nach Schalldruck

Paris 1973, Infraschall-Kongress

Die erste Idee einer „4-Bereichs-Einteilung“ wurde von den Teilnehmern des ersten internationalen IS-Kongress in Paris 1973 realisiert (PIEMONOV 1973).

- 1. Bereich: Tödliche Wirkung von IS (> 185 dB)

Bestärkt durch die Voraussagen Gavreaus, sowie älterer Berechnungen zu Schallwaffen aus dem zweiten Weltkrieg, wird eine absurd hohe Grenze angenommen, oberhalb derer IS auf jeden Fall zum Tode führen kann. 185 dB entsprechen einer Druckschwankung von 35 Kilopascal, oder 35% des atmosphärischen Luftdrucks. Die Erzeugung eines derartigen Drucks ist nur in einer Druckkammer überhaupt denkbar. Konkrete Belege³⁵ für tödliche Wirkung gibt es zu diesem Zeitpunkt aber nicht.

- 2. Bereich: Schwere Gesundheitsschädigung (140 – 172 dB)

In diesem Bereich ist eine kurze Expositionsdauer von weniger als 3 Minuten mit angemessenem Gehörschutz gerade noch erträglich. Ohne Schutz überschreitet der Bereich nicht nur die Schmerzgrenze, sondern kann auch bei kurzer Dauer zu schweren

³⁵ Gavreau und andere Forscher berichten lediglich von der Tödlichkeit höher Schalldrücke, experimentell nachgewiesen wird die Behauptung aber erst einige Jahre später.

Nachwirkungen und auch ernsthaften, bleibenden Schäden am Gehör führen (JOHNSON 1973). An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Bereichsabgrenzung viel zu groß ist, denn die Unterschiede zwischen 140 und 172 dB sind gravierend. Die Obergrenze entspricht dem 40-fachen Schalldruck der Untergrenze.

- 3. Bereich: Belästigung bei Langzeitexposition (120 – 140 dB)

Auch bei Langzeitexposition ohne Gehörschutz ist nur mit geringfügigen Nachwirkungen oder temporären Hörschwellenverschiebungen zu rechnen. Belästigung und geringfügige körperliche Effekte können aber nicht ausgeschlossen werden.

- 4. Bereich: Unbedenklichkeitsgrenze (< 120 dB)

Schalldruckpegel unter 120 dB haben schwache bis gar keine Auswirkungen und führen in keinem Fall zu Schäden oder Nachwirkungen, Experimente in diesem Bereich sind somit gänzlich unbedenklich.

Diese Einteilung genügt vorerst, um die Experimente grob in Kategorien zu betrachten, jedoch waren die oberen Bereiche abstrakt hoch angenommen und wurden im Lauf der Zeit neu definiert (BORGSMANN 1996 und 2005)

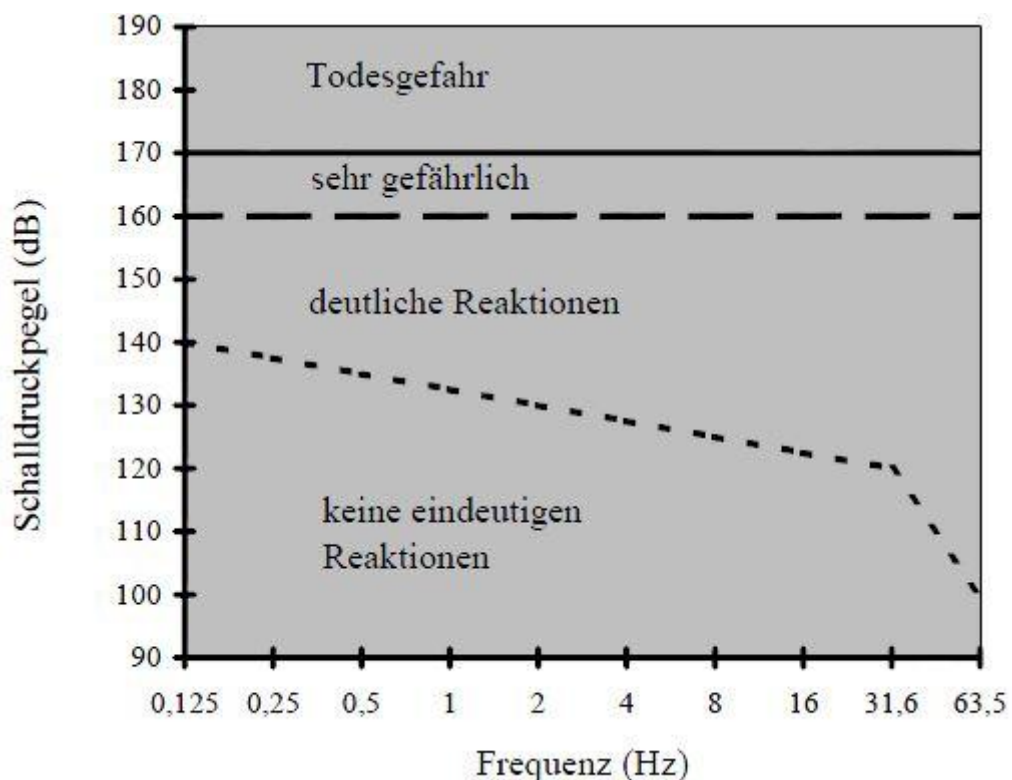


Abb. 33 – Überarbeitete 4-Bereichs-Einteilung (BORGSMANN 2005, S.11)

- 1. Bereich: Todesgefahr (> 170 dB)

Experimente mit Hunden zeigen, dass bei den Tieren während 10-minütiger Exposition die Alveolar Hüllen (Lungenbläschen) reißen, was zum Tod durch innere Blutungen führt. (PIEMONOV 1976; JOHNSON 1976)

- 2. Bereich: Sehr gefährlich (160 bis 170 dB)

IS ab 160 dB kann auch bei kurzer Expositionsdauer ohne Gehörschutz zu einer mechanischen Beschädigung von Trommelfell, Mittel- und Innenohr führen (JOHNSON 1980). Außerdem treten die im Bereich 3 genannten spezifischen Effekte in verstärktem Maße auf.

- 3. Bereich: Deutliche Reaktion (frequenzabhängig 120/140 dB bis 160 dB)

Zwischen 140 und 155 dB ist mit folgenden Auswirkungen zu rechnen:

- ◆ Gleichgewichtsstörung, Übelkeit, „Seekrankheit“ (Nausea)
- ◆ Atembeschwerden, Kopfschmerzen
- ◆ Änderung der Puls- und Atemfrequenz
- ◆ Ermüdung, Schläfrigkeit, Benommenheit
- ◆ Abnahme der Konzentrations- und Leitungsfähigkeit
- ◆ Verlängerung der Reaktionszeit
- ◆ Anstieg des diastolischen Blutdrucks
- ◆ Allgemeine Stressreaktionen
- ◆ Unkontrolliertes Augenzittern (Nystagmus)
- ◆ Tinnitus

(BORGSMANN 1996 und 2005)

- 4. Bereich: Keine eindeutigen Reaktionen (< frequenzabhängig zwischen 120 und 140 dB)

Die im Bereich 3 aufgelisteten Auswirkungen können vereinzelt und schwach auch bei Exposition mit 120 dB auftreten, sind aber nicht eindeutig als Resultat der Schalleinwirkung prognostizierbar. Es kommt jedoch zu temporären Verschiebungen der Hörschwelle um 10 bis 12 dB. Maskierungseffekte im unteren und mittleren Frequenzbereich sind ebenfalls zu beobachten.

Zumindest zeigt die Definition nach Borgmann bereits einen frequenzabhängigen Unterschied im Grenzbereich zwischen 1 und 2. Für die aktuelleren Studien zu den Themen Belästigung durch IS von Windkraftwerken oder IS-Belastung am Arbeitsplatz sind weitere, engere Bereichsdefinitionen von Nöten. Diese könnten noch differenzierter im Frequenz/Amplitudenverhältnis sein und in Anlehnung an ISO 7196 den Bereich von 2 bis 20 Hz folgendermaßen definieren:

- 1. Bereich: IS im hörbaren Bereich (> Hörgrenze)

In diesem Bereich sind physiologische Reaktionen (siehe oben, 3. Bereich) bekannt und auch diverse psychische Auswirkungen dokumentiert: Belästigung, Unsicherheit, Angstgefühl, Sensibilisierung oder Fixierung auf das Geräusch (LEVENTHALL 1973, ISING & SCHWARZE 1982)

- 2. Bereich: IS im Grenzbereich, Auswirkungen denkbar (Hörgrenze bis -12 dB)

Jüngere Studien berichten von statistisch signifikanten Resultaten bei einer IS-Exposition an oder knapp unter der Hörgrenze (WISEMAN et al. 2003, FRENCH et al. 2009, PARSONS 2011). Dieser Bereich könnte vor allem interessant sein, um eine bessere Trennung von Hörschwelle und Wahrnehmungsschwelle zu erreichen. Der Bereich zwischen den beiden Grenzen könnte eine Art „Auswirkungsbereich“ darstellen.

- 3. Bereich: Grenzbereich möglicher subtiler Auswirkung (12 bis 24 dB unter der Hörgrenze)

In diesem Bereich ist Vorsicht geboten, denn Ergebnisse von Expositionen weit unterhalb der Hörgrenze könnten sich als Scheinkorrelationen oder Messfehler (vor allem Frequenzbewertungsfilter) herausstellen. Dennoch existieren Berichte über vor allem psychische Auswirkungen von IS (TANDY 1998). In dieser Reichweite unterhalb der Hörschwelle befinden sich auch die meisten gemessenen Luftschallemissionen von WKA, vor allem des Bereichs 10 und 20 Hz. Vermutlich ist dieser Frequenzbereich auch am interessantesten für Experimente oder Messungen.

- 4. Bereich: Effekte mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen (< Hörgrenze -24 dB)

Eine „tatsächliche Unbedenklichkeitsgrenze“ könnte dieser Bereich darstellen, in dem es keine belegbaren Hinweise auf Auswirkungen jeglicher Art gibt. So lange es keine Grundlagenforschung zu derart schwachen Schallpegeln gibt, ist die Bereichsgrenze auch nicht genau definierbar.

Es existieren aus der Vergangenheit ausreichend Belege über die Auswirkung von IS mit Pegeln deutlich über der Hörgrenze. Für die Forschung an subtileren Auswirkungen auf den menschlichen Organismus, unter anderem durch Dauerexposition, sind diese Bereiche somit von geringer Relevanz. Es muss auch festgehalten werden, dass Pegel im IS-Bereich über 140 dB sowohl künstlicher als auch natürlicher Quellen selten vorkommen. Für die Untersuchung von psychologischen Effekten ist es sinnvoll, wesentlich kleinere Bereiche auch deutlich unterhalb der Hörgrenze für die IS-Forschung anzunehmen.

5. Zusammenfassung der dokumentierten psychologischen Auswirkungen von Infraschall

Zusammenfassungen über die physiologischen Auswirkungen von IS existieren bereits zur Genüge (PIEMONOV 1973; TEMPEST 1976; REEFF 1982, BORGMANN 1996 und 2005). Es konnte bereits festgestellt werden, dass die psychischen Auswirkungen nicht nur wesentlich schlechter dokumentiert sind, sondern auch für künftige Forschungen von größerer Relevanz sind. Deshalb werden die bisher belegten psychischen Auswirkungen nun so gut wie möglich zusammengefasst.

Angst:

Die frühesten erwähnten Auswirkungen von IS auf den Menschen sind Unwohlsein, Ängstlichkeit, Angstgefühl, Angst, Panik. Wie sich die Unterschiede ausdrücken ist - abgesehen von subjektiven Angaben - oft unklar, deshalb werden die gesammelten Erwähnungen als Angst zusammengefasst.

Bei den Druckkammerversuchen der NASA wird erstmals Angst („anxiety“) bei den subjektiven Empfindungen von Vpn erwähnt (MOHR et al. 1965). Angstzustände treten bei Frequenzen von 20 Hz und knapp darunter bei Schalldruckpegeln von ungefähr 130

dB auf. Auch bei Gavreau wird Angst im Zusammenhang mit IS erwähnt, jedoch ohne Angabe von Frequenz, Schalldruck oder einer Quelle:

„German scientists studying the effects of low frequency oscillations have found out [...] But the psychological effects are also important: they range from a simple feeling of discomfort to fright and panic, according to the intensity of oscillations”

(GAVREAU 1968, S.37)

[Übers.: Deutsche Forscher, die Auswirkungen von niederfrequenten Schwingungen untersuchen, haben herausgefunden [...] Aber die psychologischen Auswirkungen sind auch wichtig: Sie reichen von einfachem Unwohlsein zu Schrecken und Panik, abhängig von der Intensität der Schwingung]

Evans berichtet bei einer 15 bis 20 Hz Beschallung bei 125 bis 137,5 dB bei allen Vpn von Angstgefühl („*sensations of fear*“, EVANS 1976, S.107). Eine weitere Studie kann zeigen, dass die allgemeine Ängstlichkeit von Vpn (erhoben durch Fragebogen) in direktem Zusammenhang mit der Akzeptanz niederfrequenter Schallexposition steht (VERZINI et al. 1999). Bei einer 30-minütigen Beschallung mit einem 10 Hz Sinuston bei 110 dB, zeigt die Versuchsgruppe zur Kontrollgruppe statistisch signifikante Unterschiede im Angstverhalten. Auch aus den jüngeren IS-Experimenten gibt es etliche Berichte von subjektiven Aussagen der Vpn über Angstgefühl und Unsicherheit (WISEMAN & LORD 2003, PARSONS 2011).

Ab der Wahrnehmbarkeitsschwelle können psychologische Auswirkungen, wie Unsicherheit oder Angstgefühl, auf jeden Fall eintreten (BORGSMANN 2005).

Benommenheit, Lethargie, Gleichgültigkeit, verlängerte Reaktionszeit:

All diese Auswirkungen scheinen miteinander verbunden zu sein, wenn man die Studien betrachtet. Diese durch IS ausgelösten Effekte werden als potentielle Gefahr für Fahrzeuglenker und Piloten angesehen und deshalb eingehend untersucht. Auch die Leistungsminderung bei alltäglichen Tätigkeiten durch IS wird als potentielles Problem in Betracht gezogen. Bei Personenkraftwagen und Lastkraftwagen liegen die höchsten Schalldruckpegel in der Kabine zwischen 2 und 16 Hz, bei geöffnetem Fenster können sie bis zu 120 dB erreichen (EVANS & TEMPEST 1972, S.19). Bei Helikoptern können die Rotor-Blatt-Frequenzen zwischen 11,5 Hz und 28 Hz ebenfalls 120 dB im Inneren erreichen und bei Fahren die Motoren durch ihre niedrige Drehzahl 7 bis 13 Hz

mit sogar bis zu 130 dB (TEMPEST 1976, S.33). Bei 120 dB tritt eine Verlängerung der Reaktionszeit um 30 bis 40% im Vergleich zu Pegeln unter 100 dB ein. Einzelne Vpn berichten auch von einem Gefühl von Lethargie oder Gleichgültigkeit. Auch eine Verschlechterung der Geschicklichkeit und Merkfähigkeit um etwa 10% kann in Versuchen nachgewiesen werden, was ungefähr der Verschlechterung unter Alkoholeinfluss entspricht, weswegen IS-Exposition und Alkoholeinfluss in einigen Studien miteinander verglichen werden (EVANS 1976, S.112). Unter Verwendung eines breitbandigen Geräuschs von 2 bis 15 Hz mit 115 dB können nur schwache Einbußen in der Leistungsfähigkeit festgestellt werden, jedoch eine signifikante Abnahme über längere Zeit (KYRIAKIDES & LEVENTHALL 1977). Auch jene Ergebnisse werden mit Ergebnissen unter Alkoholeinfluss verglichen, vielleicht führt dieser Umstand zu der öfters durch IS postulierten Benommenheit. Für verschiedenste Leistungs- und Befindlichkeitsparameter kann zwischen 5 und 11 Hz bei einem Schalldruck von 100 dB kein Einfluss im Vergleich zur Kontrollgruppe festgestellt werden (REEFF 1982, S.97ff). Aus dem „*Haunt Project*“ Experiment hingegen gibt es sogar ungewöhnlich viele Berichte der Vpn von Benommenheit bei einem Schalldruckpegel von lediglich 75 dB, jedoch ist Benommenheit ein vorgegebenes Item auf dem Fragebogen (FRENCH et al. 2009).

Belästigung („*Annoyance*“) und Stress

Die Belästigung durch Schallereignisse tritt vermutlich ein, sobald diese in den hörbaren Bereich gelangen. Das trifft für IS genauso zu wie für Schall in höheren Frequenzbereichen. Es gibt aber unterschiedliche Grenzwerte für Belästigung bei Sinustönen und breitbandigen Geräuschen (JOHNSON 1976, S.6). Die Schwierigkeit bei der Bewertung von Belästigung liegt in der Zeitdimension. Von Gierke stellt in einem Versuch, Zeit mit Frequenz und Pegel zu vereinen, eine Formel für die Belästigungsgrenze im IS-Bereich auf:

0,1 bis 5 Hz maximal 120 dB

5 bis 20 Hz maximal $120 \text{ dB} - 30 \log \frac{f}{5}$

Bei $t > 1$ Minute: reduzieren um $(10 \log t) \text{ dB}$... $t = 1$ bis 100

Über 100 Minuten gilt der Wert für 100 Minuten

(JOHNSON 1980, S.7)

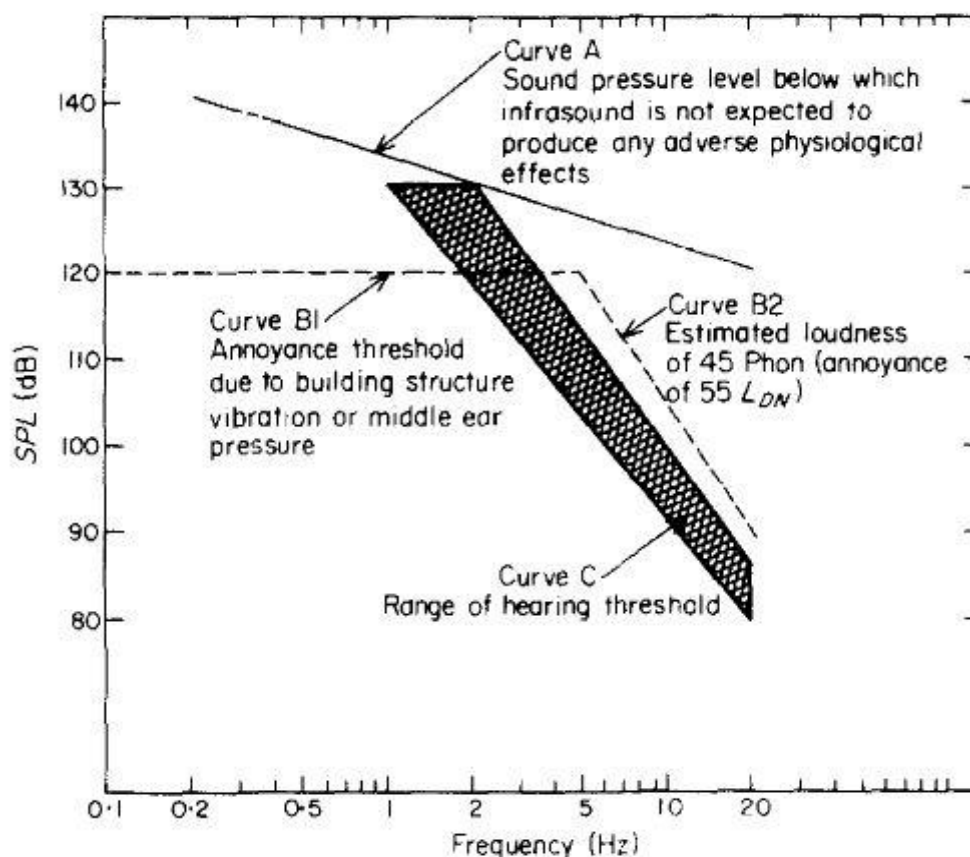


Abb. 34 – Erweiterte Kriterien zur Bestimmung der Belästigungs-Grenze (JOHNSON 1980, S.9)

Da die Belästigungen niederfrequenter Schwingungen nicht rein auditiver Natur sind und schon bei 110 dB zu einem Problem werden können, das nicht mit Gehörschutz zu beseitigen ist, reicht eine bloße Limitierung durch Luftschallmessungen nicht aus (STEPHENS 1969, S.34). Die vibroakustische Wahrnehmungsschwelle über die Haut ist gut erforscht (vgl. BELLMAN 2002, S.22ff), wird jedoch in solchen Belangen wenig beachtet.

Eine Zusammenstellung der Ergebnisse einiger Studien zur Belästigung nach Frequenzen und Schalldruckpegel geordnet, wurde von der NASA publiziert (FIDELL et al. 2010, S.145f). Eine Stressreaktion durch Dauerbelastung tritt im IS-Bereich ebenfalls auf und kann durch Pegel zwischen 70 und 120 dB in Frequenzen zwischen 3 und 20 Hz bei einwöchiger Versuchsdauer (8 Stunden pro Tag) nachgewiesen werden (ISING 1983).

Placebo-Effekt:

In vielen Experimenten werden die Vpn nicht nur darüber informiert, dass sie IS ausgesetzt würden, sondern auch über die möglichen Auswirkungen dadurch. Gerade

bei Experimenten knapp an oder unterhalb der Hörschwelle kann es zu einem Placebo-Effekt kommen. Dieser Effekt, der die Ergebnisse von Studien aller Wissensgebiete verfälschen kann, wird in letzter Zeit immer stärker in der experimentellen Forschung berücksichtigt. Für den reinen Effekt von IS reichen eine Versuchsgruppe und eine Kontrollgruppe. Soll der Placebo-Effekt miterforscht werden, ist jeweils eine zusätzliche Kontrollgruppe nötig. Um diesen Mehraufwand zu beseitigen, bietet sich die Möglichkeit eines Blindversuchs an. Wenn die Vpn keine Ahnung haben, was in dem Versuch eigentlich erforscht wird, kann sich kaum ein Placebo-Effekt einstellen. In der Diskussion um die IS-Belastung von WKA spielt der Placebo-Effekt wahrscheinlich die gravierendste Rolle. Man könnte in diesem Fall sogar von einer Negativ-Konditionierung sprechen.

“Infrasound now occupies a special place in the communal psyche of various groups of people, who have willingly accepted the suggestion that there is something ‘creepy’ or even ‘dangerous’ about infrasound [...] There is genuine concern about infrasound, but only because people have been repeatedly told that it will harm them. [...] Once antagonisms been developed, even the slightest perception of a noise may lead to stress and, in its turn, long term stress may lead to somatic effects.”

(LEVENTHALL 2011, S.2,4,5)

[Übers.: Infraschall nimmt nun einen besonderen Platz im gemeinschaftlichen Verständnis verschiedener Gruppen von Menschen ein, die bereitwillig den Vorschlag angenommen haben, es sei etwas ‚Unheimliches‘ oder gar ‚Gefährliches‘ an Infraschall [...] Es gibt echten Grund zur Sorge über Infraschall, aber nur, weil den Menschen immer wieder gesagt wurde, dass er ihnen schadet [...] Wo einmal eine Abwehrhaltung entwickelt wurde, führt sogar die geringste Wahrnehmung eines Geräuschs zu Stress, und Dauerbelastung von Stress kann seinerseits zu körperlichen Effekten führen]

6. Vorausblick

Im abschließenden Kapitel soll zusammenfassend als Blick in die Zukunft der Forschung erörtert werden, in welche Richtung sich die IS-Forschung entwickeln könnte und welche wichtigen Voraussetzungen bei der Planung von Experimenten und der Messung von IS zu erfüllen sind.

6.1. Forschungsbedarf

Die Experimente vergangener Jahrzehnte mit sehr hohen Schalldruckpegeln jenseits von 150 dB bei verschiedenen - hauptsächlich sinusförmigen - Schwingungen sind gut dokumentiert und liefern eine gute Grundlage für Forschungen von aktuellerem Interesse. Auf diesem Gebiet selbst scheint jedoch wenig Bedarf zu herrschen. Die subtileren psychologischen Auswirkungen bei wesentlich geringeren Schalldruckpegeln hingegen müssen durch eine größere Zahl vergleichbarer Studien noch manifestiert werden. Das Interesse der Parawissenschaften an dem Forschungsgebiet ist verständlich, jedoch ist deren Einbezug aus naturwissenschaftlicher Sicht eher irreführend. Scurrile Studien um Geistergeschichten erregen zwar enormes mediales Interesse, sind aber für ernsthafte Forschung wertlos.

Das aktuell interessanteste Gebiet, in dem IS-Forschung wesentlich zur Verbesserung beitragen könnte, ist die so genannte „akustische Ökologie“ (engl. „*Acoustic Ecology* **oder** *Ecoacoustic*“), ein wenig beachtetes Teilgebiet, welches sich mit dem Menschen und der Akustik in seinem Lebensraum beschäftigt. Da sich der Lebensraum ständig verändert, sind auch immer neue Anforderungen an Lärmschutzmaßnahmen gestellt. In der Debatte um die IS-Belastung von Windkraftanlagen ist noch nicht das letzte Wort gesprochen, eine größere Zahl wissenschaftlich fundierter Studien wäre dringend von Nöten. Besonders in diesem Bereich wäre es möglicherweise sinnvoller, Studien zur Aufklärung der betroffenen Bevölkerung und einem besseren allgemeinen Verständnis zu fördern, als - parteiergreifend für jedwede Seite - bestehende Thesen zu untermauern. Ferner gibt es in Städten und Industriegebieten mit naher Anwohnerschaft viel mehr und teilweise schwerwiegendere Probleme, deren Lärmemission es entgegenzuwirken gilt (Schwertransport, Schienenverkehr, Industriemaschinen, usw.). Da gerade im niederfrequenten und IS-Bereich Lärmschutz ein schwieriges Thema ist, stellt es sich

vermutlich auch als zukunftsweisend dar, probate Mittel zur besseren Schalldämmung auf Emissions- und Immissionsebene zu erforschen.

6.2. Erzeugung von Infraschall

Die experimentelle Forschung kann sich nicht auf vorhandene IS-Quellen verlassen, sondern muss unter Laborbedingungen die Möglichkeit zur künstlichen Erzeugung haben. Die Probleme bei der Erzeugung langsamer sinusförmiger Schwingungen sind seit Jahrzehnten hinreichend bekannt und dennoch werden sie nicht immer beachtet.

Kopfhörerbeschallung:

Handelsübliche Kopfhörer sind nicht in der Lage, Frequenzen im IS-Bereich mit den erforderlichen Pegeln abzustrahlen. Zwar geben die Hersteller immer wieder untere Grenzfrequenzen von 12 oder gar 8 Hz an, was aber nicht heißt, dass sie in diesem Bereich auch noch nennenswert abstrahlen. Dennoch ist der Kopfhörer eine gute Variante um die auditive Reizantwort auf IS zu testen, da es in einem geschlossenen System einfacher ist, Druckschwankungen zu erzeugen. 1967 wird von Yeowart ein spezieller Kopfhörer für die Forschung im IS-Bereich entworfen. Zwei Lautsprecher mit 30 cm Durchmesser werden mit 0,6 cm dicken Aluminiumplatten verschlossen, sodass im Inneren ein Luftvolumen von etwa einem Liter bleibt. Am unteren Ende werden die Lautsprecher durch jeweils ein Loch mit 2,5 cm Durchmesser mit einer Ohrmuschel verbunden. Ein möglichst luftdichtes Abschließen am Kopf wird durch einen 3 cm dicken Gummiring gewährleistet.



Abb. 35 – IS-Kopfhörer von Yeowart et al. 1967 (YEOWART 1976, S.44)

Die beiden Teile können getrennt angesteuert werden, sodass monaurale und binaurale Beschallung möglich ist. Direkt an der Ohrmuschel (im Bild auf der rechten Seite gut sichtbar) ist beidseitig ein Messmikrofon integriert, sodass innerhalb des Systems Frequenz und Schalldruckpegel überwacht werden können. Die gute Eignung des Kopfhörers für IS-Experimente zeigt sich in der Linearität für Frequenzen unterhalb von 100 Hz (Abb. 36).

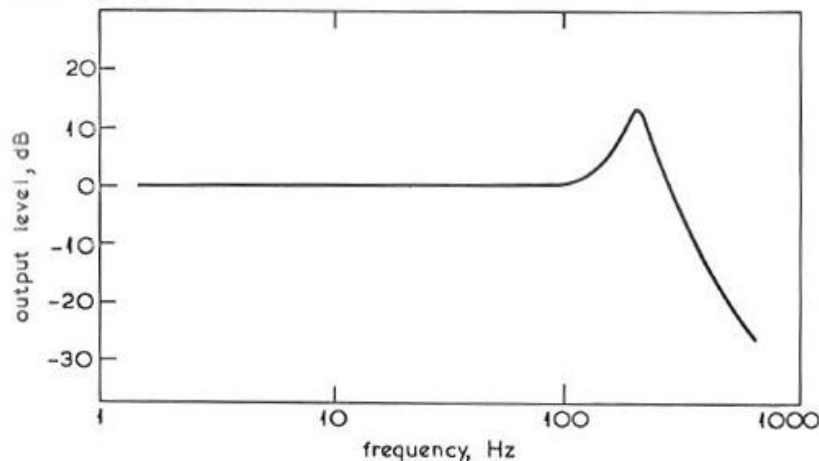


Abb. 36 – Frequenzgang von Yeowart's IS-kopfhörer (YEOWART 1976, S.45)

Ganzkörperbeschallung:

Eine wesentlich größere Schwierigkeit stellt die Erzeugung verzerrungsfreien IS mit Lautsprechern dar. Das zu bewegendes Luftvolumen entspricht sogar in kleinen Räumen dem Zehn- bis Hunderttausendfachen von jenem im Kopfhörer. In normalen Räumen kann die Luft zusätzlich über Türen und Fenster entweichen, bzw. produzieren schwingfähige Flächen unerwünschte Oberwellen, wenn sie angeregt werden. Man braucht also eine Druckkammer mit möglichst stabilen (= schalltoten) Wänden, aus der keine Luft entweichen kann. Nur so ist es möglich, im IS-Bereich mit handelsüblichen Lautsprechertreibern Schalldruckpegel jenseits von 100 dB zu erzeugen. Der oder die Lautsprecher werden entweder in die Wand der Druckkammer eingebaut, oder ähnlich wie bei den IS-Kopfhörern durch ein Rohr mit der Kammer verbunden. In beiden Fällen werden so Membranvorder- und -rückseite voneinander getrennt, um einen akustischen Kurzschluss, auch genannt Massekurzschluss, zu vermeiden (MÖSER 2009, S.81). Je größer die Abstrahlfläche ist, desto weniger Membranhub ist nötig, um hohe Amplituden zu erzeugen. So können unerwünschte Dopplerverzerrungen vermieden werden (vgl. 1.6). Yeowart & Evans konstruieren für die Hörschwellenversuche eine

solche Kammer mit einem ähnlichen Frequenzgang unterhalb von 100 Hz, wie jene der Kopfhörer. Die Kammer verfügt über 6 Lautsprecher mit einem Membrandurchmesser von 46 cm.

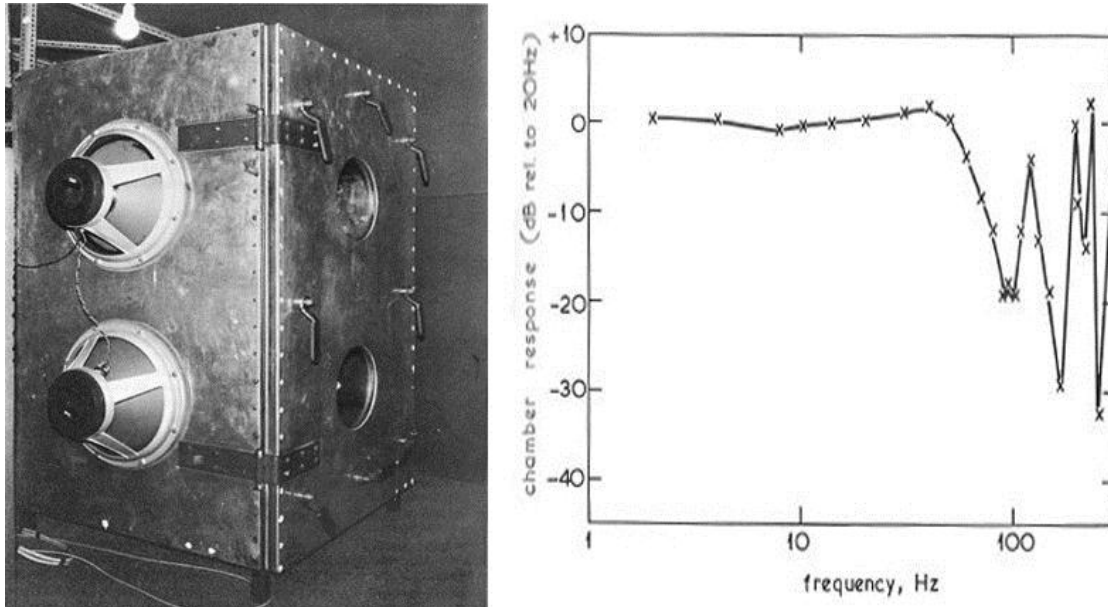


Abb. 37 – Druckkammer mit Frequenzantwort von Evans & Yeowart 1974 (YEOWART 1976, S.54f)

Ein wesentlicher Nachteil solcher kleiner Druckkammern ist die fehlende Belüftung. Es wäre nicht möglich, die Kammer dauerhaft zu belüften, da Luft entweichen könnte und dann der Druck in der Kammer nicht erzeugt werden kann. Nach wenigen Minuten erreicht das Verhältnis von Sauerstoff zu Kohlendioxid ein kritisches Niveau und die Kammer muss zur Belüftung geöffnet werden. Für länger dauernde Experimente wird in solchen Kammern ein Beatmungssystem für die Vpn integriert (REEFF 1982). Eine geschlossene Kammer mit künstlicher Beatmung löst jedoch bei Vpn enormen Stress und Angst aus, die keineswegs auf die Auswirkungen von IS zurückzuführen sind (vgl. REEFF 1982, S.76). In den NASA-Versuchen werden spezielle Druckkammern verwendet, in denen die Luftdruckschwankung zuerst durch hydraulische Lautsprecher (MOHR et al. 1965) und später durch einen Kolben mit 1,8 Metern Durchmesser erzeugt wird (JOHNSON 1973). Auf diese Weise lassen sich durch periodische Kompression des Raumvolumens enorme Druckschwankungen jenseits von 170 dB erzeugen, was 8% des atmosphärischen Luftdrucks entspricht. In solchen Kammern ist guter Gehörschutz unerlässlich, sie eignen sich daher eher zur Erforschung vibroakustischer Auswirkungen von IS. Die Problematik der Schall- bzw. Wellenausbreitung in solchen Kammern ist in den Abschnitten 1.1.1 und 2.4

beschrieben. Für die Ganzkörperbeschallung kann die Erzeugung des IS auch ohne Druckkammer oder außerhalb einer belüfteten Kammer stattfinden. In diesem Fall muss die Abstrahlfläche wesentlich größer sein und mehr Acht auf Verzerrungen und unerwünschte Resonanzen gelegt werden.

Neben Lautsprechern gibt es noch andere Generatoren für IS, mit denen die Erzeugung sinusförmiger Wellen sogar einfacher ist, breitbandigere Geräusche jedoch nicht möglich sind. Eine Variante sind große Orgelpfeifen. Bei offenen Pfeifen entspricht die Rohrlänge zur Grundfrequenz $L = \frac{\lambda}{2}$, bei gedackten Pfeifen $L = \frac{\lambda}{4}$. Da herkömmliche Orgelpfeifen sehr weich sind, schwingen sie auch in mehreren Oberwellen. Je größer der Querschnitt des Resonanzrohrs ist, desto eher dominiert der Grundton (MEYER & NEUMANN 1979, S.337). Statt der Luftverwirbelung kann auch ein Lautsprechertreiber verwendet werden, der mit einem Ende eines Rohrs luftdicht verbunden wird. Auf diese Weise wird ein akustischer Kurzschluss ausgeschlossen. Die Erregerfrequenz muss mit der Eigenfrequenz des Rohrs übereinstimmen, die dann durch die Rohreigenresonanz verstärkt wird. Resultat ist eine annähernd sinusförmige Schwingung in der Resonanzfrequenz (GAVREAU 1968, S.35). Statt dem Lautsprecher kann als Erreger auch ein Kolben verwendet werden. Das Wirkprinzip ist gleich wie bei den Druckkammern, Kolben können nur eine Frequenz erzeugen.

Ungeachtet der Methode zur Erzeugung von IS sollten die vorhandenen Frequenzen und Amplituden immer durch gleichzeitige Messung bestätigt werden. Ein Überblick über einige der Möglichkeiten wird im folgenden Abschnitt geboten.

6.3. Messung und Bewertung von IS

Messverfahren und Messtechnik sind im IS-Bereich neben der Erzeugung weitere empfindliche Gebiete. Um niederfrequenten Schall, d.h. langsame Luftdruckschwankungen korrekt messen und bewerten zu können, muss nicht nur auf geeignete Detektoren und Messverfahren geachtet werden, sondern auch auf die Messumgebung. Am problematischsten ist eine Messung im Freien, da am luftumströmten Mikrofon immer „Pseudoschall“ entsteht (BETKE & REMMERS 1998). Ein Verfahren zur Vermeidung dieses Effekts ist das Versenken von Mikrofonen in Erdlöchern mit einer Abdeckung aus schalldurchlässigem Material. Dieses Verfahren eignet sich besonders für die IS-Messung in der Nähe von Windkraftanlagen. Auch in der Laborumgebung müssen viele wichtige Faktoren beachtet werden. Die gesamte Messkette ist eine

additive bzw. multiplikative Verkettung, d.h. jedes Glied der Kette (Mikrofon, Adapter, Vorverstärker, A/D-Wandler, Analyseverfahren) kann durch seine Eigenschaften modifizierend oder begrenzend wirken. Deshalb ist es wichtig, möglichst akribisch auf diese Eigenschaften zu achten und nur geeignete Geräte zu verwenden.

Anforderungen an Messmikrofone:

Ein Messmikrofon ist nur dann geeignet, wenn der Frequenzgang in dem zu messenden Bereich linear³⁶ ist. Herkömmliche Mikrofone haben meist einen starken Pegelabfall unterhalb von 50 Hz, Studiomikrofone hingegen erst unter 20 Hz. Messmikrofone verschiedener Typen sind zumindest bis etwa 10 Hz linear und werden meist mit einer Darstellung des Frequenzgangs ausgeliefert, durch die es möglich ist, Abweichungen gegenzurechnen. Für eine ernstzunehmende IS-Messung benötigt es ein Mikrofon, das zwischen 1 und 20 Hz so linear wie möglich ist. Unterhalb von 1 Hz sind Messungen von Luftschall wenig sinnvoll, da die Schallwellen in diesem Bereich stark von Luftverwirbelungen aus der Umgebung verfälscht werden³⁷. Messmikrofone werden nach ihrem Einsatzbereich konstruiert, so gibt es Freifeld-, Diffusfeld- und Druckfeldmikrofone. Sie unterscheiden sich durch verschiedene Filter zur Entzerrung. Diese Filter wirken den linearen Abweichungen im hochfrequenten Bereich entgegen. Für Messungen im IS-Bereich sind diese Filter von keiner Relevanz. Trotzdem haben auch IS-Mikrofone diese Filter je nach Einsatzbereich, denn sie eignen sich meist auch für Messungen im Hochfrequenzbereich bis 20 und mitunter 100 kHz. Am geeignetsten für IS-Messungen sind Kondensatormikrofone in der Nieder- und Hochfrequenz-Schaltungsvariante (MÖSER 2010, S.15). Einige der gängigsten und häufig verwendeten Mikrofone zur Messung von IS sollen nun vorgestellt werden. Die Auswahl ist subjektiv und stellt in keiner Weise eine Reihung nach Qualitätsmerkmalen dar.

Bereits in den 1960er Jahren wurde von **Sennheiser** das **MKH 110** und das **MKH 110-1** entwickelt, mit einer unteren Grenzfrequenz von 1 Hz bzw. 0,1 Hz und 15 dB Eigenrauschen (MÖSER 2010, S.50). Dieses Mikrofon erfreute sich Jahrzehnte lang

³⁶ Linearität bei Mikrofonen bedeutet, alle Frequenzen nahezu gleich stark zu bewerten. Im Idealfall ist eine möglichst geringe Abweichung von unter +/- 1 dB wünschenswert. An der unteren Grenzfrequenz findet meist ein Pegelabfall mit X dB/Oktave statt (X ist meist kondensatorbedingt 6 dB/Oktave = 1.Ordnung).

³⁷ Luftverwirbelungen können durch Körperwärme oder Hitzeabstrahlung von elektronischen Geräten entstehen oder vom Luftzug der Klimaanlage erzeugt werden.

nicht nur in der Messtechnik, sondern auch in der Tonstudioteknik großer Beliebtheit und wird bis heute noch verwendet.

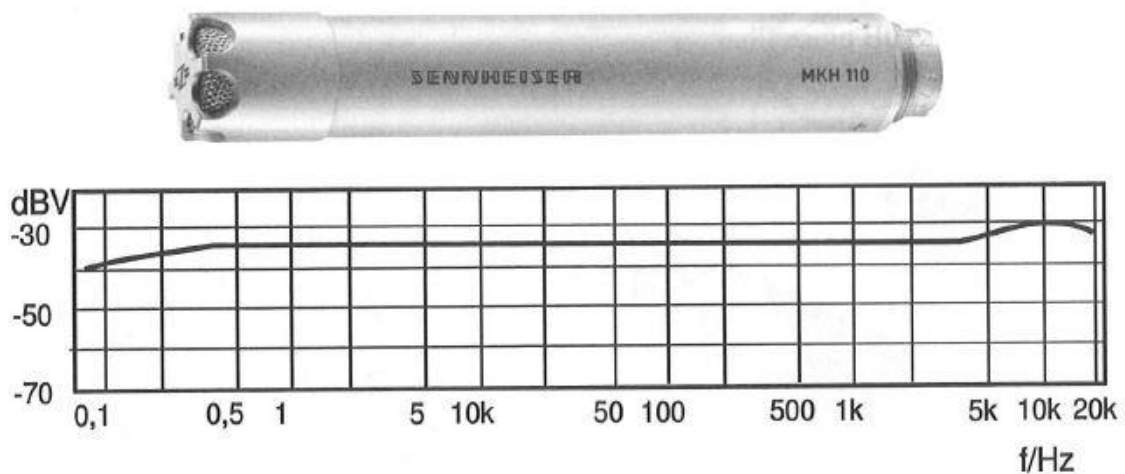


Abb. 38 – Sennheiser MKH 110 mit Frequenzgang (MÖSER 2010, S.50)

Technische Entwicklungen über die Jahrzehnte sollen an dieser Stelle nicht erläutert werden. Die folgenden beschriebenen Mikrofone stellen einen kleinen Ausschnitt des aktuellen Stands der Messtechnik im IS-Bereich dar.

Die Mikrofonkapseln der Firma **Brüel und Kjaer (B & K)** zählen zum Standardequipment in der Messtechnik und werden in allen erdenklichen Bereichen vom staatlichen Lärmschutz bis hin zu den Labors der NASA eingesetzt.

Speziell für die IS-Messung wurde das Modell **B & K 4193** entwickelt. Es ist ein ½-Zoll Kondensatormikrofon mit einem Frequenzgang von 0,07 Hz bis 20 kHz und einer dynamischen Auflösung von 19 – 162 dB (B&K 2013). Es eignet sich besonders für Messungen im Druckfeld und ist in der experimentellen Forschung sehr verbreitet.

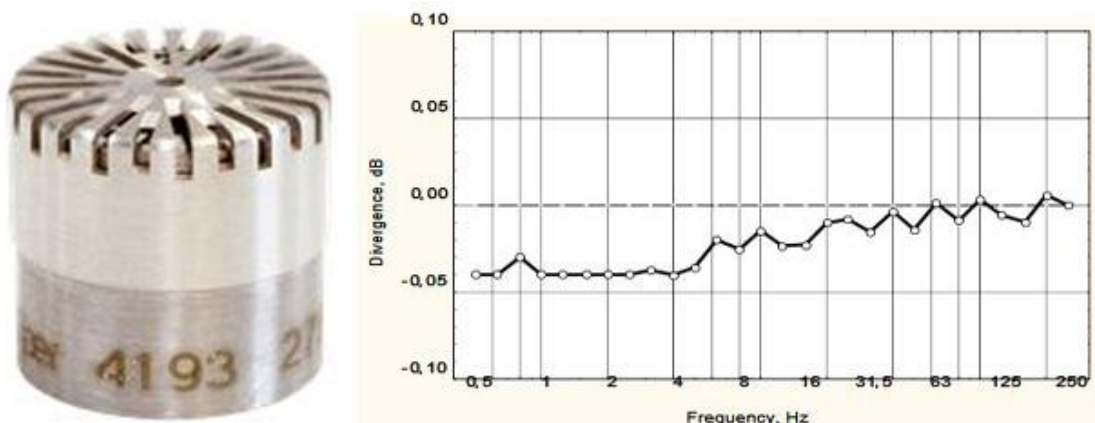


Abb. 39 – B&K 4194 Mikrofonkapsel links (B&K 2013) mit Frequenzgang rechts (DOBROWOLSKA 2008)

Speziell für Laboranwendungen wurden das Modell **B & K 4160** 1-Zoll Kondensatormikrofon (Frequenzgang 2 Hz bis 8 kHz, Dynamikumumfang 10 – 146 dB)

und das Modell B & K 4180 ½-Zoll Kondensatormikrofon (Frequenzgang 1 Hz – 20 kHz, Dynamikumfang 18 – 160 dB) entwickelt.

Ein weiteres häufig verwendetes Mikrofon ist das **G.R.A.S. Type 40AZ**. Es ist ein freifeldentzerrtes ½-Zoll Kondensatormikrofon mit einem Frequenzgang von 0,5 Hz bis 20 kHz und einer Dynamikreichweite von 14 – 146 dB (GRAS 2013).

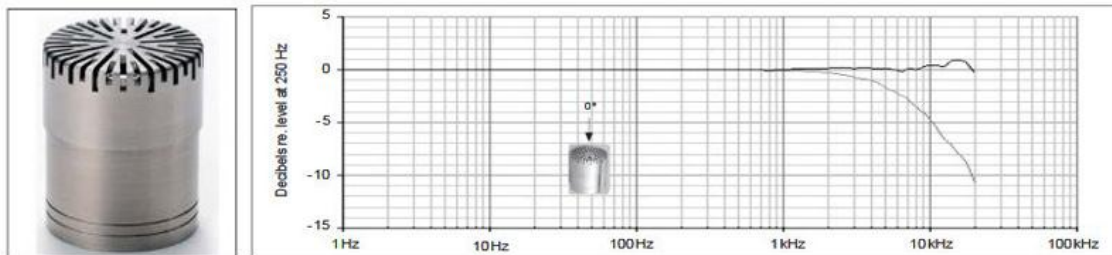


Abb. 40 – G.R.A.S. Type 40 AN Kapsel links und Frequenzgang rechts (GRAS 2013)

Ein Beispiel für die neuesten Entwicklungen von IS-Mikrofonen ist der Prototyp von **PCB Piezotronics Modell M77306** 3-Zoll Kondensatormikrofon mit einem Frequenzgang von dc bis 1200 Hz und einer enormen Sensibilität von 700 mV/Pa (SHAMS et al. 2008, S.2). Derartige Mikrofone werden in den Labors der NASA verwendet und entsprechen wesentlich höheren Anforderungen, als in der Forschung über die physiologischen und psychologischen Auswirkungen von IS. Eine Messung des Frequenzgangs liegt dem Verfasser nicht vor, es ist jedoch davon auszugehen, dass das Mikrofon bis unter 1 Hz ultralinear misst.

Bei völligem Verzicht auf den Audibereich können auch spezielle Tieftonmikrofone mit einem erheblich größeren Membrandurchmesser verwendet werden. Das **Model 50** von **Chaparral Physics** hat einen Übertragungsbereich von 0,02 bis 50 Hz durch einen Membrandurchmesser von annähernd 20 cm.

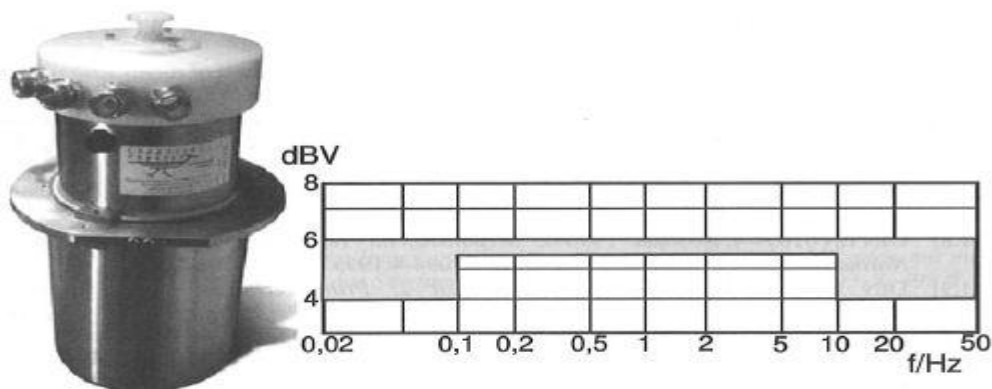


Abb. 41 – Chaparral Physics Model 50 Tieftonmikrofon mit Toleranzkurve (MÖSER 2010, S.51)

Neben den genannten gibt es eine Vielzahl an Mikrofonen diverser Hersteller, die zumindest bis 3,5 Hz mit einer Abweichung von maximal +/- 1 dB sehr linear sind. Für die Messung von Schallereignissen an oder knapp unter oder Hörgrenze erfüllen die meisten gängigen Messmikrofone bereits die Anforderungen, da ihr Frequenzgang zumindest bis 10 Hz linear ist.

Für präzise Messungen ist ein möglichst geringes Eigenrauschen, d.h. äquivalenter Eingangs-Schalldruckpegel, von Vorteil. Es stellt den unteren Grenzbereich im Dynamikumfang des Mikrofons dar, da Signale bis zu diesem Wert von Eigenrauschen überlagert werden. Es ist zwar möglich, Signale trotz dieser Überlagerung noch zu erkennen, aber schwierig, sie vom Eigenrauschen zu isolieren. Bei Messung von IS mit sehr hohem Schalldruck (>140 dB SPL) muss auch auf die Obergrenze des Dynamikumfangs geachtet werden, denn der Klirrfaktor wird an bzw. über der Grenze immer größer, Verzerrungen können dann das Messergebnis verfälschen.

Messmikrofone müssen ferner kalibriert werden, um präzise Ergebnisse zu liefern. Das erleichtert die Standards der Kapselgrößen von ¼ Zoll, ½ Zoll und 1 Zoll, sodass alle gängigen Fabrikate genau in die Öffnungen der Kalibratoren passen. Das Innere des Kalibrators oder Pistophons muss eine Druckkammer sein, deshalb ist Passgenauigkeit und luftdichter Verschluss ein wichtiger Faktor.

Hochpass in der RC-Schaltung

Die Membran eines Kondensatormikrofons wird durch die Luftdruckschwankungen zu einer mechanischen Schwingung angeregt, die in eine elektrische Schwingung umgewandelt werden muss. Am häufigsten wird dafür die Niederfrequenzschaltung verwendet, daneben gibt es noch die Hochfrequenzschaltung und die kombinierte Hoch- und Niederfrequenzschaltung.

„Bei der Niederfrequenzschaltung wird die Mikrofonkapsel über einen Widerstand (R) auf eine feste Gleichspannung, die zwischen 40 und 200 V liegen kann, aufgeladen. Trifft eine Schallwelle auf die Membran, so ändert sich die Kapazität des Kondensators im Rhythmus der Schallschwingungen.“

(DICKREITER 2008, S.141)

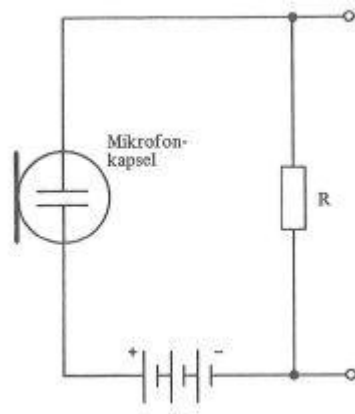


Abb. 42 – Prinzipschaltbild des Kondensatormikrofons in der Niederfrequenzschaltung (DICKREITER 2008, S.141)

Unter einem RC-Glied versteht man in der Elektrotechnik eine einfache Schaltung aus einem Ohm'schen Widerstand (R, „resistor“) und einem Kondensator (C, „capacitor“). Der RC-Hochpass ist ein Filter, das hohe Frequenzen unverändert überträgt aber tiefe Frequenzen in der Amplitude abschwächt. Vertauscht man in der Schaltung Widerstand und Kondensator, erhält man den gegenteiligen Effekt, ein Tiefpass-Filter (STINY 2000, S.253). Die Frequenz, in der der Hochpass bereits mit einer Amplitudenschwächung von 3 dB wirkt, stellt die Grenzfrequenz (engl. „cut-off frequency“) dar. Der Frequenzbereich unter der Grenzfrequenz kommt am Ausgangssignal zusätzlich um bis zu 90° phasenverschoben an. Das ideale Filter hätte keinen Grenzbereich und somit auch keine Phasenverschiebung, das reelle Filter 1. Ordnung dämpft das Signal um 20 dB/Dekade, das entspricht 6 dB/Oktave. Dieser Wert wird auch „Flankensteilheit“ genannt.

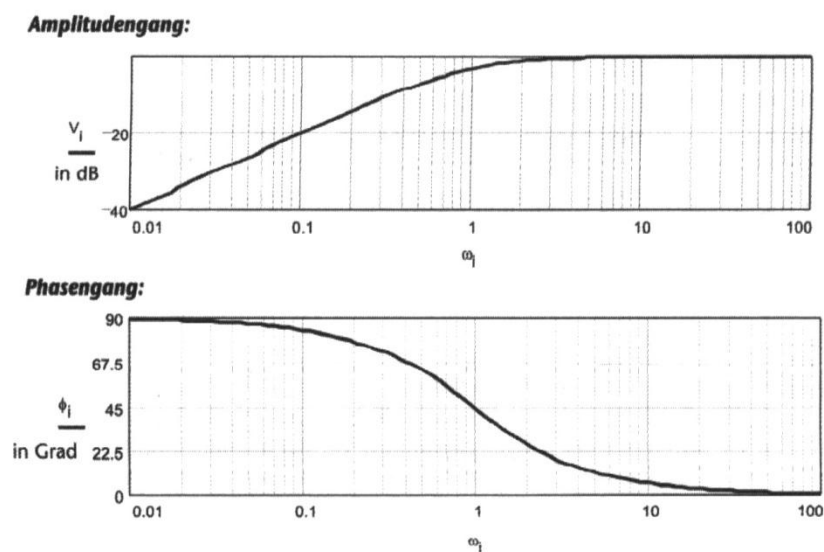


Abb. 43 – Amplitudengang und Phasengang des RC-Hochpass (STINY 2000, S.254)

Jedes Kondensatormikrofon wirkt also durch seinen Aufbau als Hochpassfilter (MÖSER 2010, S.371). Der Frequenzgang eines Mikrofons ist weniger Ausschlaggebend als der lineare Frequenzgang, denn Hersteller geben gerne den gesamten Frequenzbereich an, in dem das Mikrofon überhaupt eine Frequenzantwort liefert. Im IS-Bereich sind Mikrofone wenig hilfreich, wenn der gemessene Pegel einer bestimmten Frequenz dann -20 dB unter dem realen Pegel liegt. Bei teuren Messmikrofonen sollte dieser Fall auszuschließen sein, dennoch empfiehlt es sich für präzise Messungen, immer den Frequenzgang zu berücksichtigen.

Die Grenzfrequenz in der Mikrofonkapsel alleine ist meist unproblematisch, jedoch erhöht die Hintereinanderschaltung mehrerer Hochpässe deren Ordnung. Zwei Hochpässe erster Ordnung (Flankensteilheit 20 dB/Dekade oder 6 dB/Oktave) ergeben einen Hochpass 2. Ordnung (40 dB/Dekade oder 12 dB/Oktave) usw. Die gesamte Messkette stellt die Gefahr dar, denn mitunter befinden sich Glieder in der Kette, deren Grenzfrequenz wesentlich höher liegt, als jene des für IS-Messungen tauglichen Mikrofons. Zwei dieser Geräte werden nun kurz beschrieben.

Vorverstärker

Viele der oben genannten Mikrofone bestehen nur aus einer Kapsel und benötigen einen zusätzlichen Vorverstärker. Die meisten Mikrofone können mit einer Vielzahl an Vorverstärkern kombiniert werden, auch oft von anderen Herstellern. Sie stellen jedoch ein weiteres Glied in der Messkette dar und können auf die Ergebnisse Einfluss haben. Um die Ergebnisse nicht zusätzlich zu verfälschen, ist es sinnvoll, keinen Vorverstärker zu benutzen, da dieser ebenfalls einen RC-Hochpass 1. Ordnung hinzufügt. Manche Hersteller liefern bereits in den Mikrofonbeschreibungen Informationen darüber, welche Vorverstärker die Grenzfrequenz der IS-Mikrofone wie weit anheben (vgl. B&K 2013). Messmikrofone sollten im Idealfall mit direkter Phantomspannung von einem Oszillator betrieben werden.

A/D-Wandler³⁸/Interface/Soundkarte

Für eine Messaufzeichnung und Analyse am Computer muss das Signal von Analog auf Digital umgewandelt werden. Durch die rasante Entwicklung im Bereich der Wandlertechnik sind heute präzise A/D-Wandler sehr kostengünstig, dennoch ist gerade

³⁸ A/D-Wandler = Analog zu Digital Wandler, er wandelt eine analoge (d.h. elektrische) Spannung in ein digitales (binäres) Signal um

bei IS-Messungen auf die Eignung der Wandler zu achten, da diese auch wieder ein RC-Hochpassfilter zur Messkette hinzufügen. Diese Interfaces sind je nach Preiskategorie hauptsächlich für Homerecording oder Studioanwendungen gedacht und haben meist eine untere Grenzfrequenz von 20 Hz, da der tiefste Bereich für Musikanwendungen keinen Nutzen, sondern nur zerstörte Lautsprecher bringt. Die Kombination aller dieser Geräte bringt ein Hochpassfilter 3. Ordnung und eine enorme Erhöhung der Grenzfrequenz mit sich, sodass die Messeinheit für IS nicht mehr tauglich ist.

Oszilloskop

Jedes Messmikrofon kann auch mit einem Oszilloskop betrieben werden. Das stellt zwar im Vergleich zum Computer mit dem A/D-Wandler eine teurere Variante dar, ist aber für IS-Messung geeigneter. Der Verarbeitungsbereich ist viel größer, da sie Messmikrofone direkt mit der nötigen Spannung versorgen können und wahlweise nur die Gleichspannungsanteile (DC) messen können, d.h. im Prinzip keine Frequenzbegrenzung nach unten hin haben.

Analyse/Frequenzbewertung:

Besondere Vorsicht ist bei der Verwendung von Frequenzbewertungsfiltren geboten. Die gebräuchlichste Wertungskurve dB(A) bildet das menschliche Gehör nach und schwächt Frequenzen unter 1000 Hz ab, bei 100 Hz um -20 dB, bei 30 Hz schon um -40 dB und bei 10 Hz um -70 dB. Unterhalb von 10 Hz findet gar keine Erfassung mehr statt (BETKE & REMMERS 1998).

Dieses Wertungsfilter dient dazu, einen Dezibel-Wert angeben zu können, der relativ frequenzunabhängig verständlich ist. Das heißt, ein 200 Hz Ton mit 50 dB(A) wird subjektiv ungefähr gleich laut empfunden wie ein 50 dB(A) 500 Hz oder 2000 Hz Ton. Nicht jede Bewertungskurve eignet sich für die Betrachtung des gesamten Spektrums gleich gut. Für Frequenzen zwischen 1 und 10 kHz bildet die dB(D) Kurve das menschliche Gehör wiederum besser ab. Die dB(C) Kurve wird oft als „unbewertet“ bezeichnet, obgleich das nur für Frequenzen zwischen 100 und 2000 Hz zutrifft.

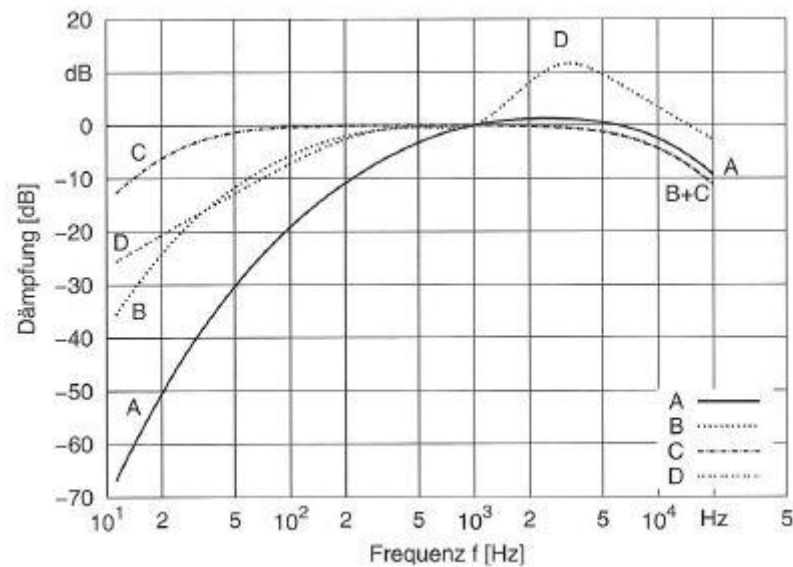


Abb. 44 – Dämpfungsgrad der Frequenzbewertungskurven dB(A), dB(B), dB(C) und dB(D) (MÖSER 2009, S.12)

Für eine tatsächlich unbewertete Messung wurde der Begriff „Z-Bewertung“ eingeführt. Für die Bewertung niederfrequenten und IS ist das dB(A) Wertungsfilter nicht geeignet, da es um ca. 10 bis 15 dB zu niedrig bewertet (BORGSMANN 2005, S.19). Eine Verbesserung der Messung kann in diesem Bereich durch die G-Bewertung (ISO 7196, 1995) erreicht werden, die unter Messtechnikern längst zum Standard gehört.

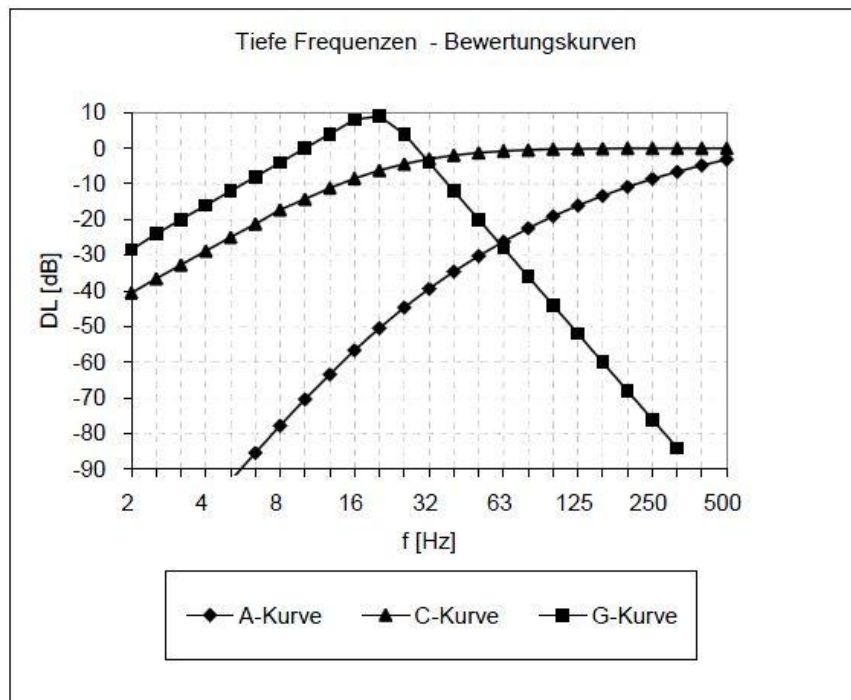


Abb. 45 – Vergleich von Filterkurven der Bewertungsfilter A, C und G nach DIN 7196 (BORGSMANN 2005, S.13)

Der Vorteil der dB(G)-Bewertung ist ihre Einfachheit und Vergleichbarkeit, jedoch ist dieses Filter nur für den Bereich zwischen 1 – 20 Hz geeignet. Ein weiteres Bewertungsverfahren der gemessenen Schalldruckpegel von niederfrequentem Schall nach der DIN 45680³⁹ hat ähnliche Vorteile, trifft jedoch gar keine Aussage über Frequenzen unterhalb von 10 Hz und setzt möglicherweise die menschliche Hörschwelle zu unempfindlich an (BETKE & REMMERS 1998). Wünschenswert wäre eine Erweiterung der Zwicker-Lautheit auf den IS-Bereich, dazu besteht aber noch einiges an Forschungsbedarf. In der reinen IS-Messung ist das G-Filter längst Standard und in allen speziell dafür geeigneten Sound Level Metern integriert.

„Acoustic Analyzer“/„Sound Meter“/„Vibration Meter“

Eine gute und gängige Alternative zu den eigens zusammengestellten Messsystemen sind die mobilen Messgeräte, die so genannten „Acoustic Analyzer“, auch genannt „Sound (Level) Meter“. Diese Geräte sind klein und handlich und dennoch sehr präzise. Das aufgesteckte Messmikrofon kann bei den meisten Geräten ausgetauscht werden. Auch bei diesen Geräten gibt es Modelle, die speziell für den Einsatz im IS-Bereich konzipiert sind. Ihre Verarbeitungsreichweite geht meist bis zu einer unteren Grenzfrequenz von 0,5 oder 1 Hz, wohingegen herkömmliche Modelle oft nur bis 20 Hz verarbeiten. Standardmäßig verfügen sie über Funktionen wie FFT-Analyse, Oktavband und 1/3-Oktavband Analyse, mehrere wählbare Frequenzbewertungsfiler (A, B, C, Z, G) sowie verschiedenste Aufzeichnungs- und Speicherfunktionen. Die aufgenommenen Messungen werden im *.wave Format gespeichert und können auch am Computer analysiert werden (MÖSER 2009, S.72ff).

Speziell für niederfrequenten und IS-Bereich gebaute Geräte sind beispielsweise die **RION** Modelle NA-18A und XN-1G oder das ACO Type 6238L, sie haben die dB(G)-Bewertung integriert. Andere vom Frequenzbereich geeignete Acoustic Analyzer sind der **SVANTEC** (SVAN) 957, der **NORSONIC** (NOR) 121 oder der **NTi** Acoustilyzer AL1. Möchte man nach ÖNORM oder EN akzeptierte Messungen durchführen, muss sichergestellt sein, dass die Geräte auch mit den jeweiligen Normen konform sind⁴⁰.

IS wird oft über lange Distanzen als mechanische Schwingung über Boden und Gebäudesubstanz übertragen und kommt dann neben Luftschall auch als Vibration (Körperschall) vor. Es empfiehlt sich, die Luftschallmessungen auch durch

³⁹ Ein entsprechendes Beispiel einer ÖNORM konnte nicht gefunden werden

⁴⁰ Genaue Gerätespezifikationen können auf den Herstellerseiten im Internet einfach gefunden werden und werden deshalb hier nicht gesondert angeführt.

Körperschallmessungen zu unterstützen, um ein Gesamtbild der Lärmbelastung zu bekommen. Die meisten der im Verlauf des Kapitels genannten Hersteller bieten auch so genannte „Vibration Meter“ an, die bis zu einer unteren Grenzfrequenz von 1 Hz operieren. Auf Geräte zur Messung von Vibrationen wird in der Arbeit nicht gesondert eingegangen.

Ort der Messung:

Im Experiment sollte der Schall an der Stelle gemessen werden, an der er relevant ist. Ist die Versuchsumgebung ein Raum, in dem sich Personen frei bewegen, sollte an mehreren Positionen im Raum gemessen werden. Verweilen einzelne Vpn an einem Platz, sollte der Schall an der Kopfposition, nahe dem Ohr gemessen werden. Es empfiehlt sich auch, einen Kunstkopf für die Messung zu verwenden, um die Modifikationen der Ohrkanals beurteilen zu können.

Wenn der Verdacht auf eine physiologische oder psychologische Beeinflussung durch Schall im Sinne des Lärmschutzes besteht, ist unbedingt an jenem Ort zu messen, an dem die Auswirkung entdeckt wurde. Gerade im niederfrequenten und IS-Bereich kann ohne genaue Untersuchung die Mitwirkung der Räumlichkeit an dem Phänomen nicht ausgeschlossen werden (siehe Resonanz, 1.3). Soll eine mögliche Schlafstörung durch Schall untersucht werden, so ist es sinnvoll, dort zu messen, wo jene Person tatsächlich schläft, an der Position des Kopfes etwa. Es ist möglich, dass eine als mechanische Schwingung übertragene Welle von der Gebäudesubstanz und mit ihr verbundenen Gegenständen (Bettgestell, Kästen o.ä.) sehr schwach, jedoch wahrnehmbar, abgestrahlt wird, oder die übertragene Vibration selbst das Problem ist. Irgendwo in der Raummitte bei einer Standardmesshöhe von 1,60 Metern⁴¹ ist diese schwache Abstrahlung vielleicht nicht mehr als Luftschall messbar oder nur noch weit unterhalb der Hörschwelle. Auch Luftschallmessungen außerhalb dieser betroffenen Gebäude sind wenig sinnvoll.

6.4. Hypothesenbildung und Versuchsanordnung

Für zukünftige Experimente mit IS gilt es, einige Faktoren zu beachten. Die durch TV und Internet wesentlich bekannteren Experimente zum Thema IS-Einfluss sind zwar schon durch ihre Hypothesen medienwirksam, ihre Ergebnisse werden jedoch allesamt

⁴¹ Das entspricht ungefähr der durchschnittlichen Ohrhöhe von erwachsenen Menschen

von nicht unerheblichen Fehlern in der Erzeugung und Messung von Schall und den Versuchsabläufen getrübt (vgl. PARSONS 2012, S.160ff). Davon sind nicht alle gleichermaßen betroffen, doch scheint die gesteigerte Interdisziplinarität zu einer leichten Unterbewertung technischer Aspekte von Schall zu führen. Ein verstärktes öffentliches Interesse an dieser Forschung führt auch dazu, dass TV-Sender oder populäre Wissenschaftsmagazine Forschungen falsch zitieren oder gar auf eigene Faust Experimente durchführen, deren Ergebnisse nicht im Ansatz ernst zu nehmend sind. Sich rasend schnell verbreitende Gerüchte in Blogs und Foren im Internet führen wahrscheinlich zu den verheerendsten Mythen und Theorien über IS. Bei der Formulierung einer Hypothese müssen die bisher veröffentlichten wissenschaftlichen Studien stärker einbezogen werden. Es nützt nichts, das Rad immer wieder neu zu erfinden. Die starken Pegeldifferenzen und auch die Frequenzunterschiede müssen in die Hypothesen besser eingearbeitet werden. Bereits in den 1970er Jahren wird IS auf die einzelnen Intensitäten und Frequenzen hin untersucht (vgl. EVANS 1976, VON GIERKE & NIXON 1976 etc.). Künftige Experimente sollten noch wesentlich differenzierter durchgeführt werden. Es sollten Hypothesen über sehr spezifische Reaktionen auf bestimmte Frequenzen mit mehreren Schalldruckpegeln oder spezifische Schalldruckpegel mit mehreren Frequenzen aufgestellt werden. Auch die Versuchsumgebung muss in der Hypothesenbildung berücksichtigt werden. Zwar besteht berechtigter Grund zu der Annahme, dass IS Unwohlsein und mit gesteigerter Intensität sogar Angst auslösen kann. Eine Versuchsumgebung, die bei jedem normalen Menschen ohne jedwede Beschallung schon Angst hervorrufen kann, bringt die Gefahr einer Scheinkorrelation mit sich.

Es besteht auch die Gefahr völlig falscher Rückschlüsse, wenn Erkenntnisse aus der Literatur falsch interpretiert werden und in neue Hypothesen dann eingearbeitet werden (vgl. TANDY 1998).

Die Literatur zur IS-Forschung ist teilweise schwierig zu beschaffen und langwierig zu selektieren, doch für die Bildung von sinnvollen Hypothesen in zukünftiger Forschung ist das unerlässlich. Dem Verfasser dieser Arbeit lagen über 150 Berichte und Studien aus der IS-Forschung vor, aus denen gerade in der Forschung der letzten 15 Jahre immer weniger zitiert wurde. In manchen Artikeln zum Thema erschienen gar nur eine oder zwei davon in den Referenzen. Was die Versuchsanordnung betrifft, haben die Psychologen vermutlich einen strategischen Vorteil, der wiederum für eine stärkere interdisziplinäre Zusammenarbeit spricht. Sämtliche wichtigen Variablen der modernen

Statistik müssen auch in der experimentellen IS-Forschung zumindest grundlegend bedacht werden. In den 1960er und 1970er Jahren wurden Experimente häufig mit 5 oder 10 Vpn durchgeführt, nötige Schnittmengen wurden nicht bedacht, Effektstärken nicht berechnet etc. Ferner waren die rekrutierten Vpn meist Männer zwischen 20 und 30 Jahren⁴². Der allgemein schlechte Ruf von IS lässt Blind- und Doppelblindversuche als probates Mittel erscheinen, vor allem, um einen Placebo-Effekt auszuschließen (siehe 5). Was die Vpn-Zahl betrifft, sind die Forschungen aus den letzten Jahren mit einigen Hundert zur Aufdeckung geringerer Effektstärken auf dem richtigen Weg. Über ein einheitlicheres Versuchsdesign, hat die Wissenschaft noch zu entscheiden, um künftige Versuchsergebnisse vergleichbarer zu machen.

⁴² Etliche der Studien wurden von der NASA gefördert bzw. finanziert. Wahrscheinlich wurden die Vpn dann aus jungen Männern des US-amerikanischen Heers rekrutiert, was diese Tatsache erklären könnte.

Conclusio

Die Geschichte der dokumentierten Infraschall-Forschung ist nun beinahe 100 Jahre alt. Die frühesten Nutzen von Infraschall waren messtechnischer Natur, wurden später von kriegerischen Absichten abgelöst, bis der Mensch begann, Infraschall selbst im friedlichen Umfeld als Bedrohung anzusehen. Seit rund 50 Jahren wird IS gleichermaßen von Faszination und Angst begleitet. Ansätze zur positiven Nutzung wurden, abgesehen von Anwendungen in den Geowissenschaften, nie ernsthaft verfolgt. Bis heute hat sich Infraschall unweigerlich in den Köpfen als störendes Nebenprodukt von Energie, Produktion und Logistik manifestiert. Der Ruf, den Infraschall allgemein genießt, ist vermutlich wesentlich schlechter als nötig. Infraschall als Feindbild ist ein Resultat übertriebener Panikmache der Medien. Der unterste Teil des Frequenzspektrums ist wesentlich weniger gefährlich oder störend als jener, in dem die meiste Lärmbelastigung des Alltags stattfindet. Und doch gibt es vielleicht noch einige subtile Effekte in den Grenzbereichen, die zu erforschen wohl noch einige Zeit in Anspruch nehmen wird. Die Experimente zur Erforschung der Auswirkung von IS auf den Menschen müssen noch erheblich verbessert und möglichst auch standardisiert werden, um den Wissenstand qualitativ zu verbessern und zu erweitern. In einer Zeit immer größerer Maschinen, Fahrzeuge und Kraftwerke werden auch die emittierten Schalle mitunter immer niederfrequenter. Es ist möglich, dass an gewissen Orten auch Infraschall zu einem Störfaktor für den Menschen wird. Genau an diesen Orten gilt es durch Aufklärung und Erforschung geeigneter Schutzmechanismen unterstützend zu wirken. Lärmschutzmaßnahmen sind bis zum heutigen Stand im niederfrequenten und Infraschall-Bereich nahezu wirkungslos oder sehr teuer. Es liegt auch an der Forschung, mit Hilfe des gesammelten Wissens an der Verbesserung der Lärmprävention zu arbeiten, um die Maßnahmen wirksamer und flexibler zu gestalten. Zuletzt liegt es an den Forscherinnen und Forschern selbst, ein fächerübergreifendes Verständnis zu entwickeln und interdisziplinär miteinander statt gegeneinander zu arbeiten, um in der Zukunft der Infraschall-Forschung möglicherweise noch unentdeckte Seiten zu enthüllen und neue Anwendungsgebiete der Forschung zu finden.

Abstract (Deutsch):

Eine einleitende Definition der physikalischen Eigenschaften von Schall führt zu besonderen Eigenheiten niederfrequenten Schalls, besonders Infraschall. Erkenntnisse zu Wahrnehmungsarten und –schwellen werden für niederfrequenten und Infraschall beschrieben. In einem Exkurs in die ungefähr 100-jährige Geschichte der Infraschall-Forschung werden Anwendungsbereiche, technische Entwicklungen und Ziele vorgestellt. Aus der experimentellen Forschung über die physischen Auswirkungen von Infraschall der letzten 50 Jahre werden Methoden und Ergebnisse zusammengefasst. Eine Beschreibung der jüngsten Forschungen um die psychischen Auswirkungen von Infraschall berücksichtigt auch aktuelle Fragen zur Infraschall-Belastung von Windkraftanlagen. Das Problem der wenig vorangeschrittenen Systematisierung der Infraschall-Forschung wird aufgegriffen und neue Ideen in die Diskussion eingebracht. Neben eingehender Erhebung von Fehlern in vergangenen Forschungen werden probate Mittel zur Messung, Erzeugung und Bewertung von niederfrequentem Schall vorgestellt, sowie der Forschungsbedarf für die Zukunft eingeschätzt. Die methodischen Probleme der experimentellen Forschung werden erläutert und Verbesserungen diskutiert. Nach hundert Jahren ist die Infraschall-Forschung noch keineswegs am Ende angelangt, da sich durch den schnell verändernden Lebensraum immer neue Anforderungen stellen. Die Arbeit kommt zu der Schlussfolgerung, dass die Forschung nach Infraschall und niederfrequentem Lärm künftig ihre Haupteinsatzgebiete in der Aufklärung und Lärmprävention sieht.

Abstract (English):

The initiatory description of the physical nature of sound leads to the specific characteristics of low-frequency and especially infrasound. Findings about perception and threshold are discussed for low-frequency and infrasound. In an excursus on the almost 100 year old history of infrasound research the range of applications, technical developments and aims are presented. Methods and results of the experimental research on the physiological effects of infrasound are summarized for the last 50 years. A description of the latest investigations on the psychological effects of infrasound also includes the discussion about the possible infrasound pollution by wind turbines. The problem of lacking systematization in infrasound research is taken on and enriched with some progressive ideas. In addition to evaluation of the scientific errors in research effective methods for production, measurement and weighting of very low-frequency sound as well as the need for further research are presented. Furthermore methodical problems of experimental research are illustrated and proposals on improvement made. Even after a hundred years infrasound research has by no means come to an end as it constantly has to deal with new needs in the steadily changing living environment. In the bottom line of this paper the future of research on infrasound and low frequency noise is seen in education and prevention of noise pollution.

Literaturverzeichnis:

- ALTMANN, JÜRGEN: *Acoustic Weapons – A Prospective Assessment: Sources, Propagation and Effects of Strong Sound*; Cornell University, Occasional Paper #22, 1999
- ASHMORE, JONATHAN: *Cochlea Outer Hair Cell Motility*; In: *Physiological Reviews*, Vol. 88(1), 2008
- BÉKÉSY, GEORG VON: *Experiments in Hearing*; New York [u.a.] : McGraw Hill, 1960
- BÉKÉSY, GEORG VON: *Über die Herstellung und Messung langsamer sinusförmiger Luftdruckschwankungen*; In: *Annalen der Physik*, 5. Folge, Band 25; Leipzig 1936, S.554-566 (Bekesy 1936a)
- BÉKÉSY, GEORG VON: *Über die Hörschwelle und Fühlgrenze langsamer sinusförmiger Luftdruckschwankungen*; In: *Annalen der Physik*, 5. Folge, Band 26; Leipzig 1936, S.554-566 (Bekesy 1936b)
- BELLMANN, MICHAEL A.: *Perception of whole body vibrations*; Oldenburg, Univ.-Diss., 2012
- BERGMANN, LUDWIG; SCHAEFER, CLEMENS: *Lehrbuch der Experimentalphysik – Mechanik, Akustik, Wärme*; Berlin, New York : Walter de Gruyter 2008
- BETKE, KLAUS; REMMERS, HERMANN: *Messung und Bewertung von niederfrequentem Schall*; In: *Fortschritte der Akustik. Plenarvorträge der 24. Deutschen Jahrestagung für Akustik*, 1998, S.472-473
- BORGMANN, RÜDIGER: *IS. Leitfaden „Nichtionisierende Strahlung“*; Fachverbund für Strahlenschutz, FS-05-136-AKNIR, 2005 (Überarbeitung der Version von 1996)
- BORREDON, P.: *Réaction physiologiques des sujets humains exposés à des infrasons*; Report 3713, Centre de Recherches de Médecine Aeronatique 1972
- BRONER, NORMAN: *The effects of low frequency noise on people*; In: *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 58(4), 1978, S.483-500
- BRÜEL & KJAER: *4193 ½-inch infrasound microphone, Specifications*; Firmenwebsite B&K, 2013 [UNVERÖFFENTLICHT]
<http://www.bksv.com/Products/transducers/acoustic/microphones/microphone-cartridges/4193.aspx?tab=specifications>
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT (BMU) DEUTSCHLAND: *Überblick zu den landesplanerischen Abstandsempfehlungen für die Regionalplanung zur Ausweisung von Windenergiegebieten*; BMU, Stand Jänner 2012

- BUNSEL, R.-G.; LEHMANN A.-G.: *Infrasound and Sound: Differentiation of their Psychophysical Effects through Use of Genetically Deaf Animals*; In: Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 63(3), 1978, S.974-977
- CERANNA, LARS [ET AL.]: *Der unhörbare Lärm von Windkraftanlagen*; Hannover : Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2012
- CHLADNI, ERNST FLORENS FRIEDRICH: *Die Akustik*; Leipzig 1802 [Nachdruck: Hildesheim : Georg Olms Verlag 2004]
- DANIELSSON, A.; LANDSTRÖM, U.: *Blood pressure changes in man during infrasonic exposure. An experimental study*; In: Acta Medica Scandinavica, Vol. 217, 1985, S.531-535
- DICKREITER, MICHAEL [ET AL.]: *Handbuch der Tonstudiotechnik Bd. 1*; München : G.K. Saur 2008
- DOBROWOLSKA, D.: *Low frequency pressure chamber system for determination of low-frequency response of acoustic measuring equipment*; Warschau : Mechanic and Acoustic Division Report CCAUV/08-35, 2008
- DUDMAN, SIMON: Zeitungsartikel “Who ya gonna call? Vic Tandy!” In: Coventry Evening Telegraph; Ausgabe 11. März 2003
- EBERLEIN, ROLAND: Artikel „Akustik“; In: FINSCHER, LUDWIG [Hrsg.]: *Die Musik in Geschichte und Gegenwart Sachteil 1*; Kassel [u.a.] : Bärenreiter 1994, Sp. 366-367
- EL NOUNOU, MICHAEL: *Messung und Bewertung von niederfrequenten Luftdruckschwankungen und IS in Personenkraftwagen bei unterschiedlichen Fahrbedingungen*; München, Univ.-Diss., 2006
- ENS, T.A.; BROWN, P.G.; EDWARDS, W.N.; SILBER, E.A.: *Infrasound production by bolides: A global statistic study*; In: Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 80, 2012, S.208-229
- ESCLANGON, ERNEST BENJAMIN: *L’acoustique des canons et des projectiles*; Paris, 1925
- EVANS, MARGARET J.: *Infrasonic effects on the human organs of equilibrium*; In: Proceedings of the Autumn Meeting of the British Acoustical Society, 1971, S.71-104
- EVANS, MARGARET J.: *Physiological and Psychological Effects of Infrasound at Moderate Intensities*; In: TEMPEST, W. [Hrsg.]: *Infrasound and Low Frequency Vibration*; London : Academic Press, 1976, S.97-109
- EVANS, MARGARET J.; TEMPEST, WILLIAM: *Some Effects of infrasonic Noise in Transportation*; In: Journal of Sound and Vibration, Vol. 22(1), 1972, S.19-24

- EVENING NEWS: Zeitungsartikel “*The silent Killer all around us*”; Evening News, 25. Mai 1974
- EVERS, L.G.; HAAK, H.W.: *The detectability of infrasound in the Netherlands from the Italian volcano Mt. Etna*; In: Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 67, 2005, S.259-268
- FASTL, HUGO; ZWICKER, EBERHARD: *Psychoacoustics, Facts and Models*; Berlin, Heidelberg : Springer Verlag 2007
- FECCI, R.; BARTHELEMY, R.; BOURGOIN, J.; MATHIAS, A.; EBERLE, H.; MOUTEL, A.; JULLIEN, G.: *The effects of infrasound on the body*; In: Medicina del Lavoro, Vol.62, 1971, S.130-150
- FIDELL, SANFORD; HORONJEFF, RICHARD D.; SCHMITZ, FREDRIC H.: *Research Plans for Improving Understanding of Effects of Very Low-Frequency Noise of Heavy Lift Rotorcraft*; Report NASA/CR-2010-216203, Hampton : Langley Research Center, 2010
- FLETCHER, HARVEY; MUNSON, WILDEN A.: *Loudness, its definition, measurement and calculation*; In: Journal of the Acoustic Society of America, Vol.5, 1933, S.82-108
- FRENCH, CHRISTOPHER C.; HAQUE, USMAN; BUNTON-STASYSHYN, ROSIE; DAVID, ROB: *The “Haunt” Project: An attempt to build a “haunted” room by manipulation complex electromagnetic fields and infrasound*; In: Cortex, Vol. 45, 2009, S.619-629
- GAMBERALE, F.; GOLDSTEIN, M.; KJELLBERG, A.; LISZKA, L.; LOFSTEST, P.: *Perceived Loudness and Annoyance of Low-Frequency Noise*; Stockholm : Arbete & Halsa 1982
- GAVREAU, VLADIMIR: *Infrasound*; In: Science Journal, Vol. 4(1), 1968, S.33-37
- GAVREAU, VLADIMIR; CONDAT, R.; SAUL, HENRY: *Infra-sons: Générateurs, Détecteurs, Propriétés physiques, Effet biologique*; In: Acoustica, Vol.17(1), 1966, S.1-10
- GONO, F.: *Infraschall und seine Wirkung auf Menschen*; In: Arbeitsmedizin, Sozialmedizin, Präventivmedizin, Vol. 13, 1978, S.137-142
- GRAS Sound and Vibration: ½ “ *Free field microphone Type 40AZ – Infra-sound*; G.R.A.S. Firmenwebsite, 2013 [UNVERÖFFENTLICHT]
<http://www.gras.dk/00012/00013/00028/00440/>
- GRIMM, JAKOB; GRIMM, WILHELM: *Deutsches Wörterbuch Bd. 14* (Nachdruck der Erstausgabe von 1893); München : Deutscher Taschenbuchverlag 1984
- GUPFINGER, REINHARD: *Interactive Infrasonic Environment*; In: 6th SMC Proceedings; Porto 2009
- HARRIS, C.S.; SOMMER, H.C.; JOHNSON, DANIEL L.: *The Effects of Infrasound on Man*; Bericht AMRL-TR-74-7, Ohio : Wright Patterson Air Force Base, 1974

- HELMHOLTZ, HERMANN VON: *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*; Braunschweig : Friedrich Vieweg & Sohn 1913
- HESSE, HORST-PETER: *Theorien und Experimente zur Tonhöhenwahrnehmung*; In: AUHAGEN, WOLFGANG, BUSCH, VERONIKA; HEMMING, JAN [Hrsg.]: *Kompendium Systematische Musikwissenschaft*; Laaber : Laaber 2011, S.114-120
- HOOD, ROBERT .A.; LEVENTHALL, GEOFF H.; KYRIAKIDES, K.: *Some subjective effects of infrasound*; In: *Proceedings of the Autumn Meeting of the British Acoustical Society*, November 1971, S.71-107
- ISING, HARTMUT, SCHWARZE, CHRISTIANE: *Infraschallwirkung auf den Menschen*; In: *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, Vol.29, 1982, S.79-82
- ISING, HARTMUT: *Effects of 8 h Exposure to Infrasound in Man*; In: *Proceedings of the 4th International Congress on Noise as a Public Health Problem*, Turin 1983, S.593-604
- ISING, HARTMUT: *Psychological, Ergonomical and Physiological Effects of Long-term Exposure to Infrasound and Audiosound*; In: *Proceedings of the Conference on Low Frequency Noise and Hearing*, Aalborg : Aalborg University Press, 1980
- ISO 7196: *Acoustics – Frequency Weighting Characteristics for Infrasound Measurement*; International Organisation for Standardisation, 3.1995
- JOHNSON, DANIEL L.: *Auditory and physiological Effects of Infrasound*; In: *Inter-Noise 75 Proceedings*, Sendai 1975, S.475-482
- JOHNSON, DANIEL L.: *Various Aspects of Infrasound*; In: *Proceedings of the Colloquium on Infrasound*; Paris 1973
- JOHNSON, DANIEL L.; VON GIERKE, HENNING E.: *The Audibility of Infrasound*; In: *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 56, 1974, S.37
- KARPOVA, N. I.; ALEKSEEV, S. V.; EROHKIN, V.; KAYSKINA, E. N.; REUTOV, R. P.: *Early response of the organism to low-frequency acoustic oscillations*; In: *Noise and Vibration Bulletin*, Vol. 11, 1970, S.100-103
- KAUSCH, JOHANN JOSEPH RITTER VON: *Psychologische Abhandlung über den Einfluss der Töne und insbesondere der Musik auf die Seele*; Breslau : Korn 1782
- KNERR, RICHARD [HRSG.]: *Bertelsmann Lexikon Physik*; München : Bertelsmann 1995
- KROEMER, K.H.E. [at al.]: *How to design for ease and efficiency*; London : Prentice Hall, 1994
- KRYTER, KARL D.: *Physiological, Psychological and Social effects of Noise*, Washington D.C. : NASA Reference Publication 1984

- KUBICEK, R.: *Vorkommen, Messung , Wirkung und Bewertung von extrem tieffrequentem Schall einschließlich IS in der kommunalen Wohnumwelt*; TH Zwickau, Univ.-Diss., 1989
- KUTRUFF, HEINRICH: *Akustik, Eine Einführung*; Stuttgart, Leipzig : Hirzel Verlag 2004
- LANDESGESETZBLATT: *Veranstaltungsgesetz Wien*, I 580-000, Novelle 21.12.2012
- LANDSTRÖM, U.; LUNDSTRÖM, R.; BYSTRÖM, M.: *Exposure to infrasound perception and changes in wakefulness*; In: *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, Vol. 2, 1983, S.1-11
- LEIBER, C.O.: *Physiologische Auswirkungen des Infraschalls*; Bonn : CTI 1974
- LEVENTHALL, GEOFF H.: *The Occurrence, Measurement and Analysis of Low Frequency Noise*; In: *Conference on Low Frequency Noise and Hearing*, Aalborg 1980, S.15-30
- LEVENTHALL, GEOFF H.: *What is Infrasound?*; In: *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, Vol. 93, 2007, S.131-137
- LEVENTHALL, GEOFF H.; KYRIAKIDES, K.: *Environmental Infrasound : Its Occurrence and Measurement*; In: TEMPEST, W. [Hrsg.]: *Infrasound and Low Frequency Vibration*; London : Academic Press, 1976, S.1-15
- LEVENTHALL, GEOFF: *Submission to the Senate Community Committee Affairs 'Inquiry into the social and economic impacts of rural wind farms'*; 8. März 2011
- LORD, RICHARD; SIMMONS, DAN: *Infrasonic Examples of Acoustic Data collected during the Concert*; UK : National Physical Laboratory [UNVERÖFFENTLICHT]
<http://www.spacedog.biz/extras/Infrasonic/infrasonicindex.htm>
- LUSAR, RUDOLF: *Die deutschen Waffen und Geheimwaffen des 2. Weltkrieges und ihre Weiterentwicklung*; München : J.F. Lehmann 1964
- MELBOURNE SUNDAY PRESS: *Hounded by this nagging noise*; Melbourne Sunday Press, 26. Juni 1977
- MELBOURNE SUNDAY PRESS: *Hum – that mystery noise that drives sobbing wife out of the House*; Melbourne Sunday Press, 3. Juli 1977
- MELBOURNE SUNDAY PRESS: *The low pitched Killer – can the Sound of Silence be driving us silly?*; Melbourne Sunday Press, 7. September 1975
- MIEHLING, KLAUS: *Gewaltnmusik – Musikgewalt. Populäre Musik und ihre Folgen*; Würzburg : Königshausen & Neumann 2006

- MOHR, C.G.; COLE, J.N.; GUILD, E.; GIERKE, HENNING E. VON: *Effects of low frequency and Infrasound on Man*; NASA Report 19660038366; In: Aerospace Medicine, Vol. 36, 1965, S.817-824
- MØLLER, HENRIK.: *The Influence of Infrasound on Task Performance*; In: Proceedings of the Conference on Low Frequency Noise and Hearing, Aalborg : Aalborg University Press, 1980
- MØLLER, HENRIK; PEDERSEN, CHRISTIAN SCHACK: *Hearing at low and infrasonic frequencies*; In: Noise & Health, Vol. 6(23), 2004, S.37-57
- MÖSER, MICHAEL: *Messtechnik der Akustik*; Heidelberg [u.a.] : Springer Verlag 2010
- MÖSER, MICHAEL: *Technische Akustik*; Heidelberg : Springer Verlag 2009
- MYTHBUSTERS (TV-SENDUNG): *Fright Night*; MythBusters Season 13, Episode 4; USA : Beyond Entertainment, 28. Oktober 2012
- NAGEL, GÜNTHER: *Wissenschaft für den Krieg*; Wiesbaden : Franz Steiner, 2012
- NISHIMURA, K.; KUDODA, M.; YOSHIDA, Y.: *The pituitary adrenocortical response in rats and human subjects exposed to infrasound*; In: Journal of Low Frequency Noise and Vibration, Vol. 6, 1987, S.18-28
- NIXON, C.W.; JOHNSON, DANIEL L.: *Infrasound and Hearing*; In: Proceedings of the international Congress on Noise as a Public Health Problem; Dubrovnik 1973, S.329-347
- OHLBAUM, MORTON K.: *Mechanical Resonant Frequencies of the Human Eye in Vivo* [Doctoral Thesis]; In: NASA Technical Report 19870046176; Aerospace Medicine Research Laboratory, 1977
- PARSONS, STEVEN T.: *Infrasound and the Paranormal*; In: Journal of the Society of Psychical Research, Vol 76.3, No. 908, 2012
- PERSSON, K.; RYLANDER, R.: *Disturbance from Low-Frequency Noise in the Environment*; In: Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 121(2), 1988, S.339-345
- PICHON, ALEXIS LE; BLANC, ELISABETH; HAUCHECORNE, ALAIN: *Infrasonic Monitoring for Atmospheric Studies*; Dordrecht [u.a.] : Springer 2010
- PIEMONOV, L. [Hrsg.]: *Colloque International sur les Infra-Sons Editions du CRNS*; Paris 1973
- PIEMONOV, L.: *Les infra-sons*; Paris : CNRS, 1976
- PIERPONT, NINA: *Wind Turbine Syndrome*; K-Selected Books, 2009

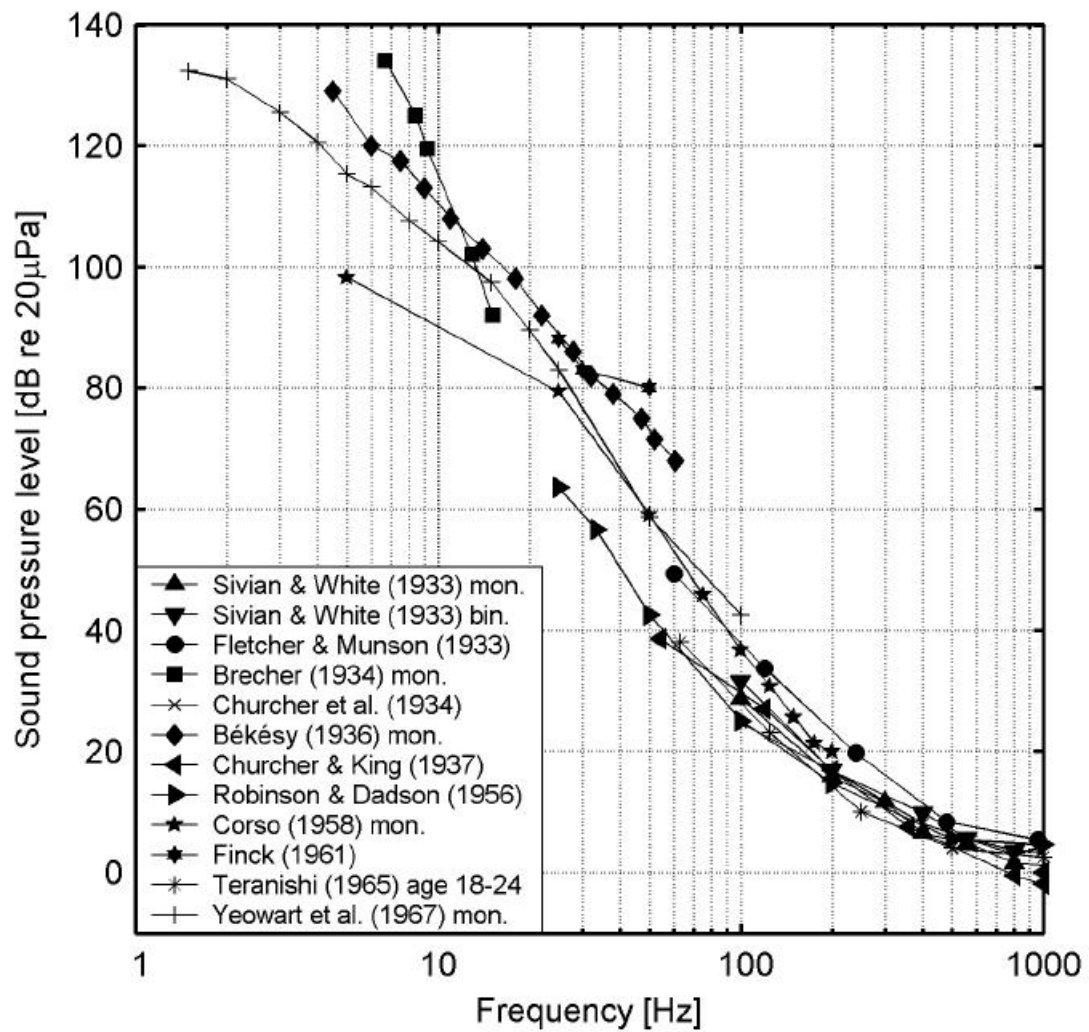
- PREYER, WILHELM: *Über die Grenzen der Tonwahrnehmung*; Jena : Verlag von Hermann Dufft, 1876
- RANKE, OTTO F., LULLIES, HANS: *Gehör – Stimme – Sprache*; In: TRENDELENBURG, WILHELM; SCHÜTZ, ERICH [Hrsg.]: *Lehrbuch der Physiologie*, Berlin [u.a.] : Springer Verlag 1953
- RASMUSSEN, G.: *Human Body Vibration and its Measurement*; In: *Technical Review*, No.1(1982); Brüel & Kjaer 1982
- RIGGINS, TOIJA: *Results from Gravesend Inn(-frasound), Estimated marginal means*; **[UNVERÖFFENTLICHT]**
<http://controlgeek.net/blog/2010/11/8/gravesend-inn-frasound-science.html>
- RÖTTER, GÜNTHER: *Anatomie und Physiologie des Ohrs*; In: MOTTE-HABER, HELGA DE LA [HRSG.]: *Handbuch der systematischen Musikwissenschaft, Band 3 Musikpsychologie*; Laaber : Laaber, 2005
- SALT, ALEC N.; HULLAR, TIMOTHY E.: *Response of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines*; In: *Hearing Research*, Vol. 268, 2010, S.12-21
- SCHICK, AUGUST: *Schallwirkung aus Psychologischer Sicht*; Stuttgart : E. Klett, 1979
- SHAMS, Q.A.; BURKETT, C.G.; ZUCKERWAR, A.J.; LAWRENSON, C.C.; MASTERMAN, M.: *A Portable Infrasonic Detection System*; NASA Langley Research Center, 2008
- STANI, MATHIAS [Hrsg.]: *Psychoakustik : gehörsbezogene Lärmbewertung*; Wien : Bundesministerium für Umwelt, Jugend u. Familie 1993
- STEPHENS, RAY B.W.: *Very low frequency vibrations and their mechanical and biological effects*; In: *Proceedings of the 7th International Congress on Acoustics*; Budapest : 1971
- STICKEL, ANDREA: *Faszination Gehör*; Bergkirchen : PPVMedien 2003
- STINY, LEONHARD: *Grundwissen Elektrotechnik*; Poing : Franzis Verlag, 2000
- STRACHEY, SIR RICHARD: *On the airwaves*; In: SYMONS, GEORGE JAMES [Hrsg.]: *The Eruption of Krakatoa and subsequent Phenomena [Commission Report]*; London : Harrison and Sons, 1888
- SUPPER, MARTIN: *Akustik / Psychoakustik*; In: MOTTE-HABER, HELGA DE LA [Hrsg.], ET AL.: *Lexikon der systematischen Musikwissenschaft*; Laaber : Laaber Verlag 2010, S.29-32
- TANDY, VIC: *Something in the Cellar*; In: *Journal of the Society for Psychical Research* Vol. 64.3, No.860, 2000

- TANDY, VIC; LAWRENCE, TONY R.: *The Ghost in the Machine*; In: Journal of the Society for Psychical Research Vol.62, No.851, 1998
- TEMPEST, W. [Hrsg.]: *Infrasound and Low Frequency Vibration*; London : Academic Press, 1976
- TEMPEST, W.: *Loudness and annoyance due to low frequency sound*; In: Acoustica, Vol. 29, 1973, S.205-209
- TEMPEST, W.; EVANS, MARGARET J.: *Some effects of infrasonic noise in transportation*; In: Journal of Sound and Vibration, Vol. 22(1), 1972, S.19-24
- TIMES, THE: Zeitungsartikel "*Brain tumors 'caused by Noise'*"; The Times, 29. September 1973
- TONNENDORF, JÜRGEN.: *The Influence of Service on Submarines on the Auditory Organ*, Chap. DII; In: Appendix to German Aviation Medicine in World War II; Department of the Air Force, 1950
- UMAN, MARTIN A.: *The Lightning Discharge*; Orlando [u.a.] : Academic Press 1987; bes. Kapitel 15: "*Thunder*", S.281-312
- VAN DEN BERG, G.P.: *The Beat is getting stronger: The Effect of Atmospheric Stability on Low Frequency Modulated Sound of Wind Turbines*; In: Noise Notes, Vol. 4(4), 2006
- VASSILATOS, GERRY: *Lost Science*; Kalifornien : BSR Foundation 1997
- VEIT, IVAR: *Technische Akustik*; Würzburg : Vogel Verlag 1974
- VERZINI, A.M.; ORTIZ SKARP, A.H.; NITARDI, H. FUCHS, G.L.: *A laboratory experiment on very low frequency sound effects*; In: Applied Acoustic, Vol. 57, 1999, S.67-77
- VON GIERKE, HENNING E.: *Effects of Infrasound on Man*; In: Proceedings of the Colloquium on Infrasound; Paris 1973, S.419-435
- VON GIERKE, HENNING E.; NIXON, C.W.: *Effects of Intense Infrasound on Man*; In: TEMPEST, W. [Hrsg.]: *Infrasound and Low Frequency Vibration*; London : Academic Press, 1976, S.115-147
- WASSER, GUIDO J.: *Ein Tiefton-Referenzsystem*; In: Funkschau, Sonderausgabe „High Fidelity 2“, 1978
- WATANABE, T.; MØLLER, HENRIK.: *Low frequency hearing thresholds in pressure field and free field*; In: Journal of Low Frequency Noise Vibration, Vol. 9(3), S. 106-115
- WATSON, LYALL: *Supernature. The Natural History of the Supernatural*; London [u.a.] : Hodder & Stoughton 1973

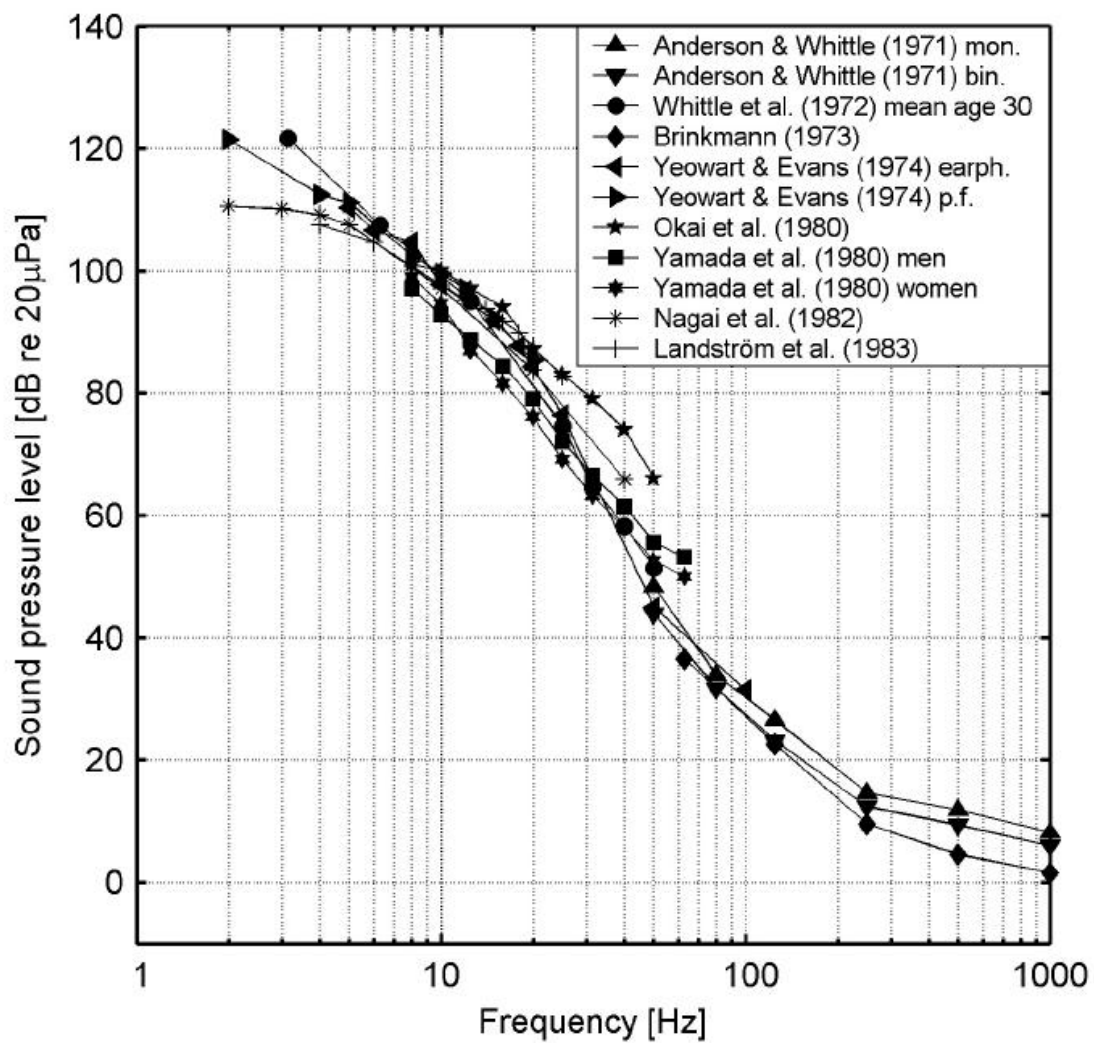
- WHITTLE, L.S.; COLLINS, S.J.; ROBINSON D.W.: *The Audibility of Low Frequency Sounds*; In: Journal of Sound and Vibration, Vol.21(4), 1972
- WISEMAN, RICHARD; LORD, RICHARD: *Infrasonic – Summary of Results (Purcell Room London, 31. May 2003)*; [UNVERÖFFENTLICHT]
<http://www.spacedog.biz/extras/Infrasonic/infrasonicResults.htm>
- YAMADA, S.; KOSAKA, T.; BUNYA, K.; AMEMIYA, T.: *Hearing of low frequency sound and influence on human body*; In: Proceedings of the Conference on Low Frequency Noise and Hearing, Aalborg : Aalborg University Press, 1980, S.95-102
- YEOWART, NORMAN S.: *Low frequency threshold effects*; In: Proceedings of the Autumn Meeting of the British Acoustical Society, 1971, S.71-103
- Yeowart, Norman S.: *Thresholds of Hearing and Loudness for Very Low Frequencies*; In: TEMPEST, W. [Hrsg.]: *Infrasound and Low Frequency Vibration*; London : Academic Press, 1976, S.37-63
- YEOWART, NORMAN S.; EVANS, MARGARET J.: *Threshold of audibility for very low frequency pure tones*; In: Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 55, 1974, S.814-818
- YOST, WILLIAM A.: *Fundamentals of Hearing*; San Diego [u.a.] : Elsevier 2007
- ZEIT, DIE: Zeitungsartikel “Zutiefst erschütternd”; Die Zeit, Ausgabe 22, 28.Mai 1993
- ZELLNER, LEOPOLD ALEXANDER: *Vorträge über Akustik, Erster Band*; Wien [u.a.] : A. Hartleben Verlag 1892

Anhang 1:

Hörschwellenmessungen zwischen 1934 und 1967 (MØLLER & PEDERSEN 2004)

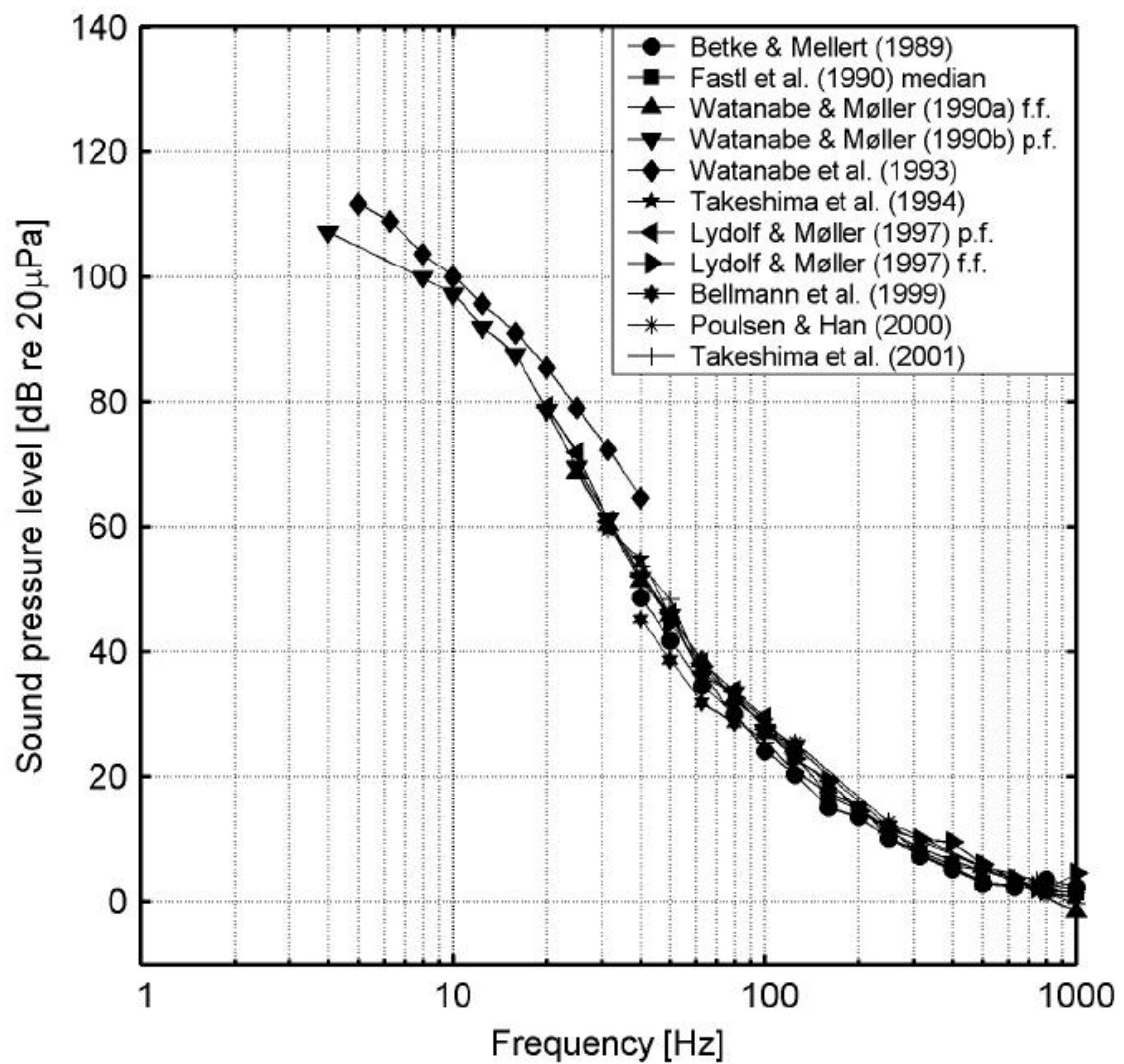


Hörschwellenmessungen zwischen 1971 und 1983 (MØLLER & PEDERSEN 2004)



Anhang 3:

Hörschwellenmessungen zwischen 1989 und 2001 (MØLLER & PEDERSEN 2004)



Curriculum Vitae

Schulbildung:

1989-1993	VS I Leoben Stadt
1993-2001	AHS BG/BRG I Leoben

Studium:

2002-2003	Studium der Wirtschaftswissenschaft, WU Wien
2003-2008	Studium der Informatik, TU Wien
2008-2013	Studium der Musikwissenschaft, Universität Wien
2012	Abschluss Bachelorstudium mit Arbeiten in historischer und systematischer Musikwissenschaft
2013	Abschluss Masterstudium mit Schwerpunkt systematische Musikwissenschaft Spezialisierung: Akustik, akustische Messtechnik und Psychoakustik

Tätigkeit:

2011	Projektmitarbeit an der ÖAW (KfM), Handschriftenprojekt
2012-2013	Anstellung als Studienassistent am Institut für Musikwissenschaft

Forschungsprojekte und Vorträge:

2012	„Psychologische und physiologische Effekte unangenehmer Klänge“ (mit Christoph Reuter und Michael Oehler). Präsentation auf der DGM-Tagung 2012 in Bremen
2012	Effective Course Design in Practical Room Acoustics for Students of Musicology: Conception, Didactics, Procedure (mit Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz, Christoph Reuter und Olivia Vrabl). Vortrag auf der AIA-DAGA 2013 in Meran