

Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau

Projektarbeit

Infraschallwirkung auf biologische Systeme

vorgelegt von: Tobias Schmidt
geboren am: 02.04.1980
Studiengang: Mechatronik
Studienrichtung: Biomechatronik

Verantwortlicher Professor: Univ- Prof. Dipl- Ing. Dr. med. (habil) Hartmut Witte

Betreuer wiss.: Dipl- Ing. Alexander Müller

Beginn der Arbeit: 01.05. 2005
Abgabe der Arbeit: 17.10. 2005

Ilmenau, den 14.10. 2005

Erklärung:

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Verwendung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Werken wörtlich oder sinngemäß übernommenen Gedanken sind unter Angabe der Quellen gekennzeichnet. Ich versichere, dass ich bisher keine Prüfungsarbeit mit gleichem oder ähnlichem Thema bei einer Prüfungsbehörde oder anderen Hochschule vorgelegt habe.

.....

Ort, Datum	Unterschrift
------------	--------------

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Grundlagen	7
2.1	Schall	7
3	Entstehung von Infraschall	11
3.1.1	Natürliche Infraschallquellen	11
3.1.2	Künstliche Infraschallquellen	12
3.2	Gehör	13
4	Experimentelle Untersuchungen	18
4.1	Tierversuche	18
4.1.1	Aural	18
4.1.2	Extraaural	19
4.2	Untersuchungen am Menschen	23
4.2.1	Extraaural	23
4.2.2	Aural	30
5	Biokommunikation	33
5.1	Infraschall als Kommunikationsmittel	34
5.1.1	Sensorik zur Erfassung von Infraschall	41
5.1.2	Möglichkeiten der Übertragung des Infraschalls in den Hörbereich des Menschen	44
6	Zusammenfassung	48
7	Literatur	49
8	Beispielprogramm	54

Glossar :

Psychoakustik: Beschreibung des Zusammenhangs zwischen dem akustischen Reiz, und der Empfindung die dieser Reiz auslöst

TTS: temporary threshold shift, zeitweilige Verschiebung der Hörschwelle nach Exposition in lauter Umgebung im Gegensatz zu permanenten Hörschwellenverschiebung (PTS) bei der eine bleibende Schwerhörigkeit auftritt

systolischer Blutdruck: Blutdruck in der Kontraktionsphase (Systole) des Herzmuskels, Spitzenwert

diastolischer Blutdruck: Blutdruck in der Erschlaffungsphase des Herzens (diastole), Maß für die Dauerbelastung der Gefäße

Nystagmus: auch als „Augenzittern“ bezeichnet / unkontrollierbar rhythmische Bewegung der Augen

Alveole: Lungenbläschen

Audiogramm: mit einem Audiogramm kann das subjektive Hörvermögen eines Menschen beurteilt werden
über verschiedene Frequenzen wird die Hörschwelle aufgenommen und mit dem Normal verglichen

Musculus tensor tympani: einer der Mittelohrmuskeln

1 Einleitung

Im Gegensatz zu anderen Sinnesorganen, wie beispielsweise den Augen, kann man die Ohren nicht „schließen“. Jederzeit sind wir den Reizen der Umgebung ausgesetzt. Bei einer zu starken Belastung des Ohrs, kann es zu krankhaften Erscheinungen kommen. Durch die Exposition in einem Schallfeld, mit sehr hohen Schallpegeln, ist es möglich, dass eine Lärmschwerhörigkeit bei der betroffenen Person auftritt. Aber auch Schall, welcher vorwiegend als unangenehm empfunden wird kann krank machen. Diese Erscheinung beruht eher auf psychologischen (Psychoakustik) Erscheinungen, als auf Schädigungen bestimmter Organe. Der Bereich der Lärmschwerhörigkeit ist relativ gut erforscht durch Tierexperimente, Feldstudien (siehe 3.1/3.2) und Ähnlichem. Allerdings wurden hierbei meist nur die Schallwellen betrachtet, welche im Hörspektrum des Menschen liegen. Das Ohr ist ein Organ, welches Luftschwingungen in ein für den Menschen verständliches Signal wandelt. Das Trommelfell als Grenze zwischen Außen- und Mittelohr wird durch Druckschwankungen zum Schwingen angeregt. Die Schallwellen, welche außerhalb des menschlichen Wahrnehmungsvermögen liegen, also Ultra- und Infraschall, sind ebenso Luftdruckschwankungen und üben genauso eine Kraft auf das Trommelfell und den dahinter liegenden Hörapparat aus. Da sie allerdings nicht bewusst wahrgenommen werden können, ging man in der Vergangenheit davon aus, sie würden auch keinen merklichen Einfluss ausüben. Heute weiß man, dass gerade Infraschall durchaus einen Einfluss auf den Körper (aural wie extraaural) hat. In den letzten Jahren wurden einige Debatten geführt in Bezug auf Windkraftanlagen, welche starke Emittenten von Infraschall sind. Grund hierfür waren zum Einen die optische Beeinträchtigungen der Anwohner neben einer solchen Anlage, aber zum Anderen auch eine Reihe von unerklärlichen Krankheitserscheinungen die mit Infraschall in Verbindung gebracht wurden. Leider sind die Daten dazu nicht ernsthaft zu verwerten, da diese Debatte sehr subjektiv geführt wird. Ziel dieser Projektarbeit ist es, einen Überblick über die vorhandenen Studien zu diesem Thema zu schaffen. Weiterhin soll die Bedeutung von Infraschallwellen in der Biokommunikation verdeutlicht, und zum Abschluss eine Möglichkeit zur Hörbarmachung

(Auralisation) von tieffrequenten Schwingungen gegeben werden.

2 Grundlagen

2.1 Schall

Allgemein werden Schwingungen elastischer Medien als Schall bezeichnet. Dabei werden die Moleküle durch eine äußere Kraft aus ihrer Ruhelage ausgelenkt. Im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen, ist Schall immer an ein Ausbreitungsmedium gebunden. Man kann zwischen Luft- Körper- und Flüssigkeitsschall unterscheiden. Beim Luftschall kommt es zu Schwankungen der Luftdichte, wobei die Schwingung der Moleküle in Ausbreitungsrichtung der Schallwelle erfolgt (Longitudinalwelle). Eine kurzzeitige, einmalige Änderung des Luftdrucks bezeichnet man als Knall. Ist die Luftdruckänderung periodisch spricht man von Klang oder Ton, wobei der Klang ein Frequenzgemisch darstellt und der Ton streng genommen eine Sinusschwingung ist. Longitudinalwellen treten in allen drei Aggregatzuständen auf. Beim Körperschall kommt es durch die Querkontraktion des Materials zusätzlich noch zu einer so genannten Schubwelle, bei der die Schwingungsrichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung verläuft (Transversalwelle).

Der Raum in dem sich Schallwellen ausbreiten wird als Schallfeld, die Größen, welche die Ausbreitung des Schalls beschreiben dementsprechend als Schallfeldgrößen, bezeichnet. Die wichtigste Schallfeldgröße ist der Schalldruck. Er ist eine Wechselgröße die dem atmosphärischen Druck überlagert ist.

$$\text{Schalldruck: } p = \hat{p}(\cos \omega t - \varphi) \quad 2-1$$

Das Verhältnis des Schalldrucks eines Ereignisses zu einem Bezugsschalldruck, wird durch den Schalldruckpegel beschrieben. Die Bezugsgröße ist der Schalldruck, bei dem ein Sinuston von 1000 Hz gerade noch wahrnehmbar ist.

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$$

$$\text{Schalldruckpegel: } L_p = 10 \log(p^2 / p_0^2) \text{ dB} \quad 2-2$$

Der Schalldruckpegel wird in dB gemessen.

Eine weitere wichtige Schallfeldgröße ist die Schallschnelle v . Sie beschreibt, mit welcher Geschwindigkeit sich die Moleküle hin- und herbewegen. Angegeben wird meistens der Schallschnellepegel L_v .

$$\text{Schallschnellepegel: } L_v = 10 \log(v^2/v_0^2) \text{ dB} \quad 2-3$$

Der Bezugswert v_0 beträgt $5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$. Dies gilt allerdings nur für Deutschland.

Der Bezugswert nach ISO beträgt $v_0 = 10^{-9} \text{ m/s}$. Aus der Schallschnelle kann man sofort den Ausschlag und die Beschleunigung ermitteln.

$$\text{Ausschlag: } \xi(t) = \int v(t) dt \quad 2-4$$

$$\text{Beschleunigung: } a(t) = \frac{d}{dt} v(t) \quad 2-5$$

Schall ist im Gegensatz zu Licht eine Materiewelle. Da Schall zu seiner Ausbreitung ein materielles Medium benötigt, ist er im Vakuum nicht existent.

Man kann ebenso die Schalleistung, welche durch eine, senkrecht zur Ausbreitungsrichtung gehende, Einheitsfläche tritt, errechnen. Eine wichtige Größe ist hierbei die Intensität.

$$\text{Intensität: } I = \overline{p(t) \cdot v(t)} \quad 2-6$$

Schalleistung:

$$P = \int_S I dS = \int_S \overline{p(v) \cdot v(t)} dS \quad 2-7$$

Üblicherweise verwendet man die Zeigerschreibweise, d.h. alle Zeitverläufe werden in rein periodische Vorgänge mit der Kreisfrequenz ω .

Funktion des Drucks:

$$p(t) = p \cdot \cos(\omega t) \quad 2-8$$

Funktion der Schallschnelle:

$$v(t) = v \cdot \sin(\omega t) \quad 2-9$$

in Zeigerschreibweise:

$$p(t) = \Re \left\{ \hat{p} \cdot e^{j\omega t} \right\} \quad 2-10$$

$$v(t) = \Re \left\{ \hat{v} \cdot e^{j\omega t} \right\} \quad 2-11$$

Eine weitere wichtige Größe des Schallfelds ist die akustische Impedanz.

$$Z'' = \frac{\hat{p}}{\hat{v}} \text{ (Ns/m}^3\text{)} \quad 2-12$$

Die akustische Impedanz ist komplex. Unter Verwendung von 2-10 und 2-11 ergibt sich die Intensität zu:

$$I = \frac{1}{2} |\hat{p}|^2 \Re\{1/Z''\} = \frac{1}{2} |\hat{v}|^2 \Re\{Z''\} \quad 2-13$$

Bei Schallausbreitung im freien Feld vereinfacht sich die Formel der Impedanz zu:

$$Z'' = \rho \frac{c}{\cos \vartheta} \quad 2-14$$

ρ ist die Dichte des umgebenden Mediums, c die Schallausbreitungsgeschwindigkeit und ϑ der Winkel zwischen Ausbreitungsrichtung und Schnellekomponente. Die Schalleistung ergibt sich nun zu:

$$P = \frac{1}{2\rho c} \int_S |\hat{p}|^2 \cos \vartheta dS = \frac{1}{\rho c} \int_S |\tilde{p}|^2 \cos \vartheta dS \quad 2-15$$

dS ist ein Flächenelement und ϑ der Winkel zwischen der Senkrechten dieses Flächenelements und der Schallausbreitungsrichtung. Wenn diese Fläche S die Schallquelle vollständig umgibt (Hüllfläche), kann man die gesamte abgestrahlte Leistung ermitteln.

$$P_{ges} = \frac{1}{\rho c} \oint_{SH} |\tilde{p}_H|^2 \cos \vartheta dS = \frac{1}{\rho c} \oint_{SH} \tilde{p}_H^2 S_H \cos \vartheta d \frac{S}{S_H} \quad 2-16$$

Ebenso wie der Schalldruck, wird auch die Schalleistung als Pegel angegeben.

Schalleistungspegel:

$$L_w = 10 \log\left(\frac{P}{P_0}\right) \text{ dB} \quad 2-17$$

Der Bezugswert für Luftschallquellen beträgt $P_0 = 10^{-12} \text{ W}$.

Der Schall, den unser Ohr wahrnehmen kann stellt nur einen Ausschnitt aus dem Luftschallspektrum dar (ca. 20 Hz-20000 Hz).

Als Infraschall bezeichnet man Schallwellen, deren Frequenz unterhalb der menschlichen Hörschwelle liegen. Diese wird mit 16 bzw. 20 Hz angegeben. Unterhalb dieser Frequenz ist ein Hören nicht mehr möglich, wobei die

Aussagen hierbei auseinander gehen. Nach Überschreitung eines bestimmten Schalldrucks soll das Ohr ebenfalls in der Lage sein Druckschwankungen wahrzunehmen. Da man aber davon ausgehen kann, dass diese Wahrnehmung wenig mit Hören zu tun hat, wird diese Grenze angenommen. Infraschallwellen haben aufgrund ihrer großen Wellenlänge eine sehr hohe Reichweite. Bei Vulkanausbrüchen beispielsweise kann es vorkommen, dass Infraschallwellen mehrmals um den Globus wandern, bevor sie stark genug gedämpft werden, um sich nicht mehr ausbreiten zu können.[Quellen: **VEIT, HARTMANN**]

3 Entstehung von Infraschall

3.1.1 Natürliche Infraschallquellen

Niederfrequente Schwingungen treten in der Natur vornehmlich an Stellen mit großer Massebewegung auf. Dies kann Wind, die Plattenbewegungen der Erdkruste (Seismik) oder die Meeresbrandung sein. Wenn Wind an einem Hindernis vorbei strömt wird ein Geräusch erzeugt. Dies hängt damit zusammen, dass sich vornehmlich an scharfkantigen Hindernissen periodisch Wirbel ablösen. Die Frequenz der Schwingung lässt sich durch eine allgemeine Formel beschreiben.

$$f = \text{const.} \cdot \frac{v_L}{d} \qquad 2-18$$

v_L ist die Geschwindigkeit, mit der die Luft auf das Hindernis trifft und d der Abstand des Hindernisses von der Luftquelle (z.B. Düse). Dies bedeutet, dass an jedem Hindernis prinzipiell Infraschall entstehen kann. Die Schallintensität wächst hierbei mit der siebten Potenz der Relativgeschwindigkeit zwischen Hindernis und Luftstrom. Eine weitere natürlich Infraschallquelle ist Donner. Ursache hierfür ist eine Erwärmung der Luft entlang des Blitzkanals (ca. 30000°C). Der Druck, der durch die Ausdehnung der Luft entsteht kann bis zu 100mal höher sein als der Normaldruck. Die entstehende Schockwelle, die vom Beobachter wahrgenommen wird, enthält einen großen Anteil an tiefen Frequenzen, da diese durch die Luft weniger stark gedämpft werden.

Weiterhin ist bekannt, dass sich einige Tiere mit Hilfe von Infraschall verständigen (Elefanten, Tiger, Wale) (vgl. LANGBAUER).

3.1.2 Künstliche Infrasschallquellen

Bei künstlichen Infrasschallquellen gilt das gleiche wie beim natürlichen. Überall dort wo große Massen in Bewegung sind, entsteht Infrasschall. Ein gutes Beispiel hierfür sind Windräder oder große Generatoren in Kraftwerken. Auch Häuserschluchten, durch die der Wind hindurch streicht, sind eine Quelle für Infrasschall. Bekannt ist allerdings, dass Infrasschall sehr wohl eine Auswirkung auf den Organismus hat. Weitere Quellen für Infrasschall sind Großmaschinen wie Walzen, Rammen, Pressen etc. Anlagen wie Verdichter (bsp. Straßenbau) übertragen die Schwingungen vornehmlich in den Boden (Körperschwingung). Kompressor, Walzen Rammen, Pressen etc.

3.2 Gehör

Das menschliche Gehör dient der Aufnahme und Verarbeitung von Luftschwingungen. Es lässt sich in drei Teile einteilen, Außenohr, Mittelohr und Innenohr. Die ankommenden Schallwellen werden vom Außenohr an eine Mechanik im Mittelohr weitergeleitet. Diese Mechanik stellt ein Getriebe dar. Diese so bearbeitete Schwingung tritt nun in das Innenohr ein, wo die neuronale Umsetzung und letztendlich die Weiterleitung ins Gehirn erfolgt. Das Außenohr besteht aus der Ohrmuschel und dem äußeren Gehörgang. Die Ohrmuschel übernimmt hierbei die Aufgabe eines Filters. Die Hauptaufgabe des Außenohres besteht darin, den Schall zu konzentrieren, weiterzuleiten und die Hörorgane zu schützen.

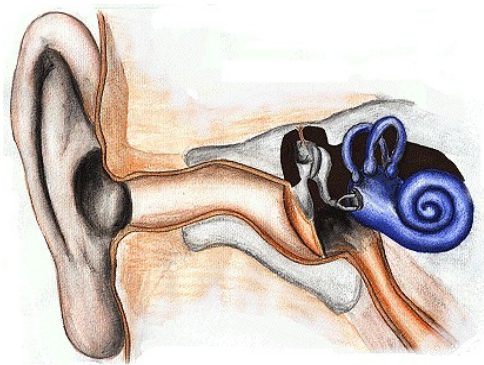


Abbildung 3- 1: Querschnitt durch das menschliche Ohr [Quelle: www.dasp.uni-wuppertal.de]

An der Grenze zwischen Mittelohr und Außenohr befindet sich das Trommelfell. An dieses schließt sich die Paukenhöhle an, in der sich die Gehörknöchelchen befinden. Weiterhin ist die Paukenhöhle über die Eustachische Röhre mit dem Rachenraum verbunden. Diese dient dem Druckausgleich zwischen Mittelohr und Umwelt. Eine Verbindung zwischen Außenohr bzw. Trommelfell und Innenohr wird durch die drei Gehörknöchelchen hergestellt. Diese bestehen aus Hammer, Amboss und Steigbügel. Der Hammer liegt am Trommelfell an und nimmt die Schallschwingungen auf. Der Amboss übernimmt diese, und gibt sie über den Steigbügel an das ovale Fenster der Gehörschnecke (Cochlea) weiter. Das Außenohr und die Paukenhöhle sind mit Luft, und das Innenohr

(Gehörschnecke) mit Lymphe gefüllt. Die akustischen Impedanzen dieser beiden Stoffe sind unterschiedlich. Gemeint ist hierbei die akustische Feldimpedanz die von den Eigenschaften des Ausbreitungsmediums abhängt.

akustische Feldimpedanz im freien Schallfeld (allgemein):

$$Z_F = \rho \cdot c$$

2-19

ρ ist die Dichte und c die Schallausbreitungsgeschwindigkeit des Mediums.

Beim Übergang von Schallwellen zwischen zwei Medien entstehen Reflexionsverluste. Diese sind umso größer, je größer der Unterschied zwischen den akustischen Impedanzen ist. Im Falle des Übergangs zwischen Luft und der Lympheflüssigkeit des Innenohrs beträgt der Reflexionsverlust 98%. Die Aufgabe des Gehörknöchelchens besteht darin, eine Impedanzanpassung vorzunehmen, also Schallwellen mit niedrigem Schalldruck und hoher Schallschnelle in Schallwellen hohen Drucks und niedriger Schallschnelle umzusetzen. Dieser Zusammenhang wird deutlich wenn man die Oberflächen von Trommelfell und ovalem Fenster betrachtet.

l_1, l_2 : Wirksame Länge der Gehörknöchelchen

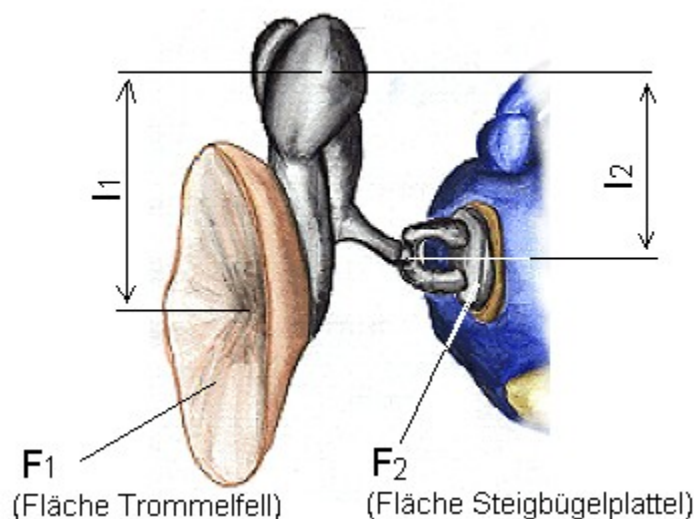


Abbildung 3-2: Trommelfell und ovales Fenster
[Quelle: www.dasp.uni-wuppertal.de]

Damit das Kräftegleichgewicht ($F_1=F_2$) zwischen Trommelfell und Steigbügelplatte besteht, muss der Druck am ovalen Fenster höher sein als am Trommelfell. Die Übertragung folgt aus dem Verhältnis der Flächen von Trommelfell und Steigbügelplatte und beträgt ca. 17. Dies gilt aber nur für die direkte Übertragung ohne Berücksichtigung der Hebellängen der Gehörknöchelchen. Unter Berücksichtigung dieser, beträgt die Verstärkung ca. 22. Das bedeutet, dass am ovalen Fenster ein um den Faktor 22 höherer Druck herrscht als am Trommelfell.

Weiterhin verfügt das Mittelohr noch über zwei Mittelohrmuskeln, den Musculus tensor tympani, welcher am Trommelfell angreift und den Musculus stapedius welcher mit der Steigbügelplatte verbunden ist. Die Aufgabe dieser Muskeln besteht darin, die Übertragungseigenschaften des Mittelohrs zu ändern. Durch diesen Mechanismus können zwei Funktionen erfüllt werden. Zum einen der Schutz, und zum Anderen eine Vergrößerung des Arbeitsbereiches des Innenohrs. Wenn die eintreffenden Schallwellen einen bestimmten Pegel überschreiten, wird das Trommelfell durch den Musculus tensor tympani gespannt, und somit eine zu starke Auslenkung des Trommelfells verhindert, was wiederum zu einer Druckminderung am ovalen Fenster führt (Stapediusreflex).

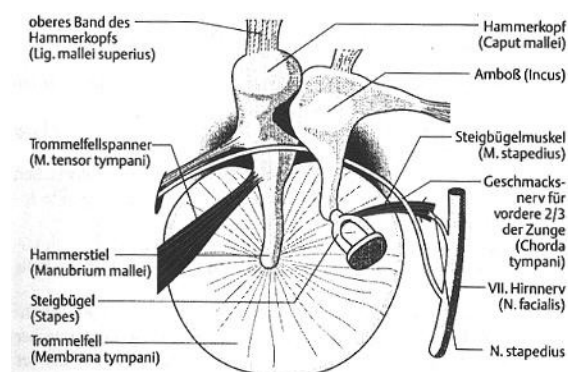


Abbildung 3-3: Mittelohr mit Mittelohrmuskeln [Quelle: Faller „Der Körper des Menschen“]

Bis es jedoch zum Auslösen dieser Schutzfunktion kommt vergeht eine bestimmte Zeit (sog. Latenzzeit ca. 35-150 ms). Bei einem lauten Knall (Explosion etc.) wird die Schallenergie vor Auslösen des Stapediusreflexes an das Innenohr weitergegeben und kann dort zu Schädigungen führen (Knalltrauma). Durch die Mittelohrmuskeln wird der Arbeitsbereich des Ohrs vergrößert, da die Empfindlichkeit bei gleichzeitigem Schutz des Innenohrs gewährleistet werden kann.

An das Mittelohr schließt sich das Innenohr an. Dieses besteht aus der Gehörschnecke und dem Gleichgewichtsorgan. Die Hörschnecke ist ein aus drei übereinander liegenden Windungen bestehender Hohlraum und liegt im Felsenbein des Schädels. Schwingungen werden von der Steigbügelplatte über das ovale Fenster in die Hörschnecke eingeleitet. Dadurch wird die in der Hörschnecke befindliche Lymphe ebenfalls in Schwingung versetzt. Ein Druckausgleich erfolgt durch eine Dehnung des runden Fensters.

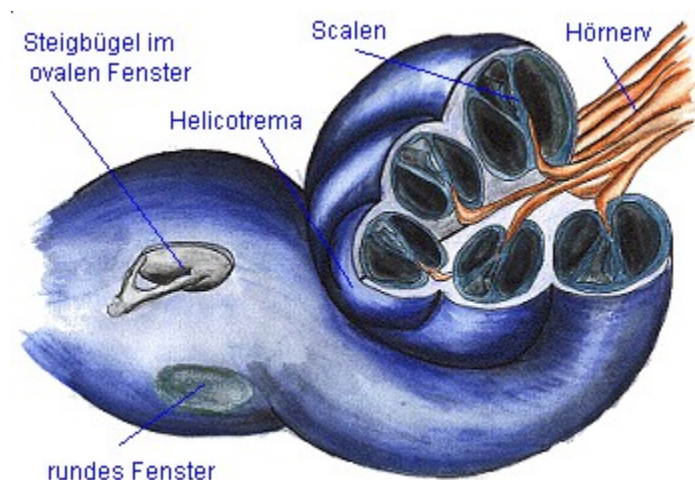


Abbildung 3-4: Innenohr (Cochlea) [Quelle: www.dasp.uni-wuppertal.de]

Die entstehende Wanderwelle hat, je nach Frequenz, an einer bestimmten Stelle ein Auslenkungsmaximum. Das eigentliche Hörorgan, das Cortische Organ kann somit in Bereiche verschiedener Tonhöhenempfindung eingeteilt werden. Langwellige Schallwellen haben ihre Amplitude am oberen Ende der Hörschnecke (Helicotrema), kurzwellige am unteren (Stapes).

Das menschliche Ohr ist in der Lage Frequenzen zwischen 20 Hz und 20 kHz wahrzunehmen. Die empfundene Lautheit eines Ereignisses, und damit auch die Empfindlichkeit des Ohr, sind frequenzabhängig. Dieser Zusammenhang wird durch die Hörkurve (Abbildung 3-5) verdeutlicht.

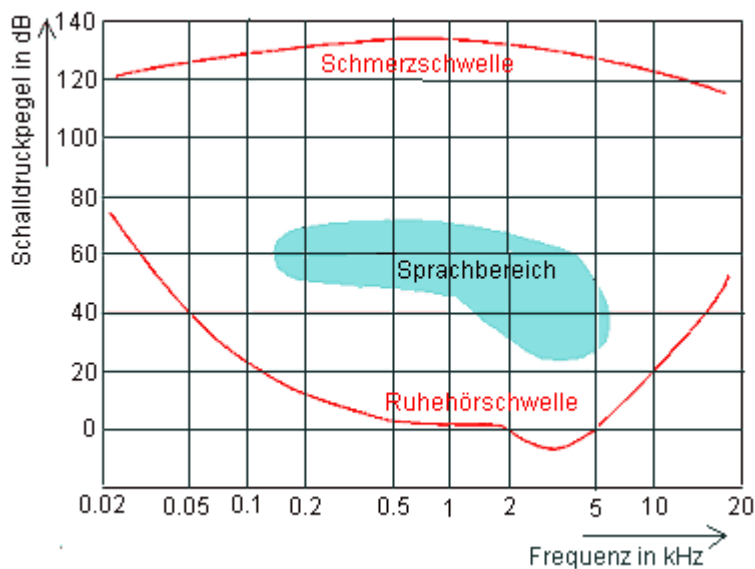


Abbildung 3-5- : Hörkurve des Menschen [Quelle: www.dasp.uni-wuppertal.de]

An der Kurve der Ruhehörschwelle kann man ablesen, welcher Schalldruck bei einer bestimmten Frequenz notwendig ist um etwas zu hören. Man erkennt, dass das Ohr bei ca. 2000 bis 5000 Hz die größte Empfindlichkeit hat. Bei Frequenzen außerhalb dieses Bereichs ist eine deutliche Schalldruckpegelerhöhung notwendig. Die Schmerzschwelle gibt an, ab welchem Schalldruckpegel mit einer Schädigung des Innenohrs zu rechnen ist. [Quelle: www.dasp.uni-wuppertal.de]

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Tierversuche

4.1.1 Aural

LIM (1982) untersuchte 28 Chinchillas die einem Infraschall von einem, zehn und 20 Hz bei Pegeln von 150, 160 und 170 dB für jeweils zehn Minuten ausgesetzt waren. Die Belastung erfolgte dabei entweder kontinuierlich oder in Intervallen. Die Versuchstiere wurden in einem Zeitraum von ein paar Stunden bis zu zwei Tagen nach dem Experiment getötet und untersucht. Er konnte bei allen Tieren eine Schädigung des Trommelfells feststellen. Hinweise auf einen Nystagmus, Gleichgewichtsstörungen, Schmerzen oder Schwindelanfälle wurden nicht gefunden. Die Trommelfelle waren durchweg perforiert. Hierbei gab es Zonen mit einer Ausdünnung, Blutungen und schlitzähnliche Löcher. Die Schädigungen des Mittel- und Innenohrs reichten von leicht bis schwer. Dabei waren es im Mittelohr Blutungen der Schleimhaut und des tensor tympani und im Innenohr Hydrops (gestörte Flüssigkeitsregulierung im Innenohr). Die Veränderungen waren stärker wenn das Geräusch kontinuierlich wirkte (78,5% bei kontinuierlicher Beschallung zu 65% bei Intervallbeschallung). Alle Tiere die einer Frequenz von einem Hertz ausgesetzt waren, hatten Schädigungen im Innenohr. Weiterhin war zu beobachten, dass die Tiere die 20 Hertz ausgesetzt waren mehr Schädigungen hatten als diejenigen die mit zehn Hertz beschallt wurden. Die Autoren nehmen an, dass Infraschall bei hohen Pegeln zu Schädigungen des Innen- und Mittelohrs, bei einigen Labortieren, führen kann.

[Quelle: **SCHUST**]

4.1.2 Extraaural

ALEKSEEV (1987) untersuchte Weiße Ratten. Er setzte sie einem Schalldruck größer 120 dB aus. Es konnten pathologische Veränderungen der Leberzellen beobachtet werden. Diese Veränderungen waren am ausgeprägtestem bei acht bzw. 16 Hz. [Quelle: **SCHUST**]

Bei einem Versuch von **GRABOVITCH (1979)** wurden Ratten einem Schalldruck von 110 dB bei einer Frequenz von 8 Hz ausgesetzt. Die Expositionszeit betrug zwei Stunden täglich über zehn Wochen. In dieser Zeit konnte eine Verzögerung des Wachstums um 11%-13% beobachtet werden. Die Ratten zeigten auch eine verminderte Leistungsfähigkeit, einen zeitweise erhöhten Sauerstoffbedarf und eine beginnende Herausbildung autoallergischer Prozesse. [Quelle: **SCHUST**]

Ein Jahr später (1980) untersuchte er wiederum Ratten. Diese wurden zwei Stunden täglich mit Pegeln von 90, 115, 135 dB bei einer Frequenz von acht Hz über vier Monate beschallt. Es wurden Veränderungen der adrenalen Enzyme, des Plasmas, der Herz- und Leberzellen. Weiterhin wurde ein Schwellenwert für das Einsetzen der Symptome bei 90 dB festgestellt. [Quelle: **SCHUST**]

GORDELADZE (1988) stellte eine massive Änderung des Muskelgewebes (Myokard) und der mikrozellularen Prozesse bei acht Hz und 120 dB Schalldruck fest. Die Leistungsfähigkeit von Ratten wurde von **YAMAMURA (1980)** untersucht. Hier stellte sich heraus, dass sich bei Schallpegeln über 85 dB die Leistungsfähigkeit verringert. [Quelle: **SCHUST**]

Eine frequenzabhängige Magenschleimhautdurchblutung stellte **KURIYAMA** bei Ratten fest. Der Grund hierfür lag in der Stimulation des sympathischen Nervensystems. Dieses Nervensystem ist Teil des so genannten vegetativen Nervensystems der Wirbeltiere. Der Sympathikus versetzt den Körper in einen Zustand höherer Leistungsfähigkeit. Man kann also davon ausgehen, dass der Körper auf die niederfrequenten Wellen in gewisser Weise reagiert, zumal auch noch eine Frequenzabhängigkeit festgestellt wurde. [Quelle: **SCHUST**]

1992 untersuchte **NEKOROSHEV** Ratten und Meerschweinchen die mit 120 und 140 dB bei acht und 16 Hz. Dabei wurden morphologische und histochemische

Veränderungen festgestellt. Allerdings setzten nach 40 Tagen Regenerationseffekte ein. [Quelle: **SCHUST**]

KARPOVA (1970) stellte bei Mäusen, Kaninchen und Meerschweinchen eine Veränderungen der bioelektrischen Aktivität einzelner Gehirnstrukturen fest. Weiterhin kam es zu Störungen der Reduktions- Oxidations- Prozesse der Skelettmuskulatur und zu einer Veränderung der Volumina der Hörkerne. Im Herzmuskel von Kaninchen wurden von **SAFONOV (1978)** Veränderungen des ventrikulären Myokards festgestellt. Die Expositionsdauer betrug 6 Stunden täglich für 24 Tage. [Quelle: **SCHUST**]

Zu einer Zerstörung der Lunge bzw. ein Zerreißen der Alveolen und größerer Gefäße kam es bei weißen Mäusen in einer Untersuchung von **SVIDOVYI (1987)**. Dabei wurden die Tiere mit zwei, vier, acht und 16 Hz bei Pegeln von 90 und 140 dB beschallt. [Quelle: **SCHUST**]

Eine interessante Studie wurde von **PURDEY (2002)** durchgeführt. Er untersuchte den Zusammenhang zwischen dem Auftreten von BSE in „infraschallreichen“ Regionen. Demnach gibt es mehrere Faktoren, die das Auftreten von BSE (Bovine Spongiforme Enzephalopathie) begünstigen. BSE gehört zur Gruppe der TSE (Transmissible Spongiforme Enzephalopathie). Auslöser dieser Krankheit sind nach momentaner Lehrmeinung die sog. Eiweißprionen (engl. Proteinous Infectible Particle). Diese krankhaft veränderten Eiweiße haben eine zerstörerische Wirkung auf das Gehirn. Die eigentlichen Vorgänge, bzw. welche Wirkung die gesunden Eiweiße im Körper haben ist noch nicht vollständig geklärt. Das Maganion Mn_3^+ spielt eine wesentliche Rolle bei der Bildung von Eiweißprionen. **PURDEY** fand heraus, dass eine Infraschallschockwelle die Struktur des Moleküls ändern kann. Diese so genannte ferromagnetische Form des Manganions scheint die Bildung von schadhaften Eiweißprionen zu begünstigen.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der extraauralen Wirkung auf Tiere

Autor	Durchführung	Frequenzen	Schalldruckpegel	Versuchstiere	Ergebnis
ALEKSEEV			>120dB	weiße Ratten	Pathologische Veränderung der Leberzellen
GRABOVITCH	10 Wochen täglich. 2 h Exposition	8 Hz	110 dB	Ratten	Verzögerung des Wachstums um 11%-13% verminderte Leistungsfähigkeit beginnende Herausbildung autoallergischer Prozesse
GRABOVITCH	4 Monate täglich 2h Exposition	8 Hz	90, 115, 135 dB	Ratten	Veränderungen der adrenalen Enzyme von Plasma, Herz und Leberzellen Schwellenwert für Einsetzen der Symptome bei 90 dB
GORDELADZE		8 Hz	120 dB	Ratten, Meerschweinchen	Änderungen des Myokards und der mikrozellulären Prozesse
KARPOVA				Mäuse, Kaninchen, Meerschweinchen	Veränderung der bioelektrischen Aktivität einzelner Gehirnstrukturen Störungen der Reduktions-Oxidationsprozesse der Skelettmuskulatur
SVIDOVYI		2,4,8,16 Hz	90, 140 dB	weiße Mäuse	Zerreißen von Alveolen und größeren Gefäßen
YAMAMURA				Ratten	Über 85 dB nimmt die Leistungsfähigkeit ab
KURIYAMA				Ratten	frequenzabhängige Magenschleimhautdurchblutung
PURDEY	Auswertung von BSE-Fällen und Bezug zu Infraschallvorkommen			Rinder	Infraschall begünstigt die Herausbildung von TSE

Es zeigt sich, dass Infraschall eine massive Wirkung auf die untersuchten Tiere hatte. Es waren Schädigungen an verschiedenen inneren Organen zu bis hin zu einer verringerten Leistungsfähigkeit zu verzeichnen. Infraschall scheint demnach die Zellen verschiedener Organe zu verändern. Der Grund dafür ist nicht ganz ersichtlich. Bei höheren Schallpegeln kommt es zu mechanischen Zerstörungen im mikrozellularen Bereich (vgl. **SIDOVYI**). **GRABOVITCH** stellte eine Schwelle für das Einsetzen der Symptome (90dB). In der Studie von **KUIYAMA** wird von einer Erregbarkeit des Gleichgewichtsorgans gesprochen. Betrachtet man die Funktionsweise des Gleichgewichtsorgans wird auch klar warum es hier zu einem Einfluss kommen kann. Die Sinneshärchen sind in einer Gallertmasse eingebettet. Auf dieser Gallertmasse befinden sich die so genannten Otolithen (Gehörsteinchen). Diese wirken wie eine seismische Masse. Tritt nun eine Beschleunigung auf, bewegen sich die Otolithen und verbiegen die Sinneshärchen was nun einen Nervenimpuls auslöst. Es ist denkbar, dass eine Infraschallwelle ebenso eine Bewegung der Otolithen hervorruft was nun zu einer Fehlinformation über den aktuellen Beschleunigungszustand des Körpers führen kann.

4.2 Untersuchungen am Menschen

4.2.1 Extraaural

EVANS (1972) setzte 20 männliche und fünf weibliche Probanden einer Frequenz von einem bis 20 Hz bei einem Pegel von 115dB - 146 dB aus. Es wurde ein vertikaler Nystagmus und ein subjektiv empfundenenes Schwingungsgefühl. Diese Effekte waren bei einer Frequenz von sieben Hz am ausgeprägtesten. Außerdem verlängerte sich die Reaktionszeit um 30%-40% bei Pegeln von 115 dB - 120 dB. Es wurden keine genauen Angaben über die Art der Reaktionstests gemacht.

[Quelle: **SCHUST**]

KARPOVA (1970) setzte männliche Probanden industriellem Infraschall (fünf, zehn Hz / 100, 135 dB) aus. Dabei wurden Müdigkeit, Benommenheit, Apathie, Depressionen, Konzentrationseinbußen und Schwingungen der inneren Organe festgestellt. Weiterhin war die Leistung der Herzmuskelkontraktion verringert.

[Quelle: **SCHUST**]

SLARVE (1975) stellte bei den Probanden eine Modulation der Stimme und ein Gefühl der Schwingung des Körpers fest.

Erstaunlicherweise ergaben sich bei den Untersuchungen von **HARRIS (1980)** keine Auswirkungen. Er kombinierte Infraschall einer Frequenz von 7 Hz bei 25, 132 und 142 dB mit Umgebungsgeräuschen bei einem Pegel von 65 dB.

[Quelle: **SCHUST**]

1979 wurden von **ISING** 40 Personen über acht Stunden einem Schalldruck von 70dB und 80 dB bei sieben Hz und 100dB- 125 dB ausgesetzt. Zusätzlich wurden über Kopfhörer ein Terzrauschen von 12,5 , 16 und 20 Hz bei 70 und 80 dB und Einzeltöne von fünf bis 15 Hz bei 100dB- 140 dB, eingespielt. Am stärksten war bei den Probanden die Konzentration beeinflusst. Es konnte auch ein leichter Anstieg des systolischen Blutdrucks und ein Anstieg der Herzratenveränderung beobachtet werden.[Quelle: **SCHUST**]

ISING führte **1982** eine ähnliche Untersuchung durch. Er setzte 28 Probanden über zehn Arbeitstage für acht Stunden einem Oktavrauschen verschiedener Frequenzen (drei bis 24 Hz bei 110 dB) und/oder Verkehrslärm bei 75 dB(A) aus. Hier wurde eine teilweise frequenzabhängige Veränderung physiologischer und biochemischer Größen (Puls, Adrenalinausschüttung, Blutdruck)

beobachtet. Weiterhin konnte eine frequenzabhängige Änderung der Atemfrequenz und des systolischen und diastolischen Blutdrucks festgestellt werden. Die Adrenalinausschüttung hingegen war unabhängig von der Frequenz konstant erhöht.[Quelle: **SCHUST**]

FAUSTOV (1993) stellte nach einer Exposition im Schallfeld bei zehn Hz und 100 dB über 24 Tage vier bis sechs Stunden täglich, eine anfängliche Aktivierung des vegetativen Nervensystems und eine verringerte Gerinnungsfähigkeit des Blutes fest.[Quelle: **SCHUST**]

Eine weitergehende Untersuchung des Einflusses auf Blutdruck und Herzfrequenz führte **DANIELLSON (1985)** durch. Er setzte männliche Probanden zwischen 20 und 30 Jahren für 20 Minuten einem Schalldruck von 95, 110 und 125dB bei Frequenzen von sechs, 12 und 16 Hz aus. Bei einem zweiten Versuch betrug die Expositionsdauer eine Stunde wobei entweder mit 16 Hz und 125 dB, oder mit 50 Hz und 50 dB beschallt wurde. Die Infraschalleinwirkung rief eine Erhöhung des diastolischen und eine Verringerung des systolischen Blutdrucks hervor. Dieser Effekt war für den diastolischen Blutdruck am größten. Interessant ist, dass während des Versuchs die Herzfrequenz bei allen Probanden signifikant niedrig war.[Quelle: **SCHUST**]

LANDSTRÖM (1983) untersuchte zehn normal hörende und 10 taube Menschen. Die Expositionsdauer betrug 20 Minuten bei sechs Hz und 110dB. Bei den Normalhörenden kam es zu einer Verminderung der Aufmerksamkeit, des Blutdrucks und der Herzfrequenz. Bei den Tauben traten diese Effekte nicht auf. [Quelle: **SCHUST**]

1988 wurden von **TAKIGAWA** 34 Personen für fünf Minuten einem breitbandigen Rauschen von 0,1 bis zehn Hz, fünf Hz und 16 Hz bei 95 dB (C). Hierbei wurde festgestellt, dass beim Schließen der Augen die konfusen Körperschwingungen verringert wurden. Daraus ergab sich die Annahme, dass sich die Erregbarkeit des Vestibulums (Gleichgewichtsorgan) durch Infraschall erhöht.[Quelle: **SCHUST**]

Wyrsocki untersuchte **1980** 40 Probanden. Sie wurden für 40 Minuten einer Frequenz von 2,4Hz- 30Hz bei einem Schallpegel von 75dB- 85dB ausgesetzt. Hier wurden nun sinkende Tendenzen bei der Herzfrequenz, der elektrischen Leitfähigkeit der peripheren Gefäße, der Hauttemperatur und der Leistung bei der Lösung serieller Wahlreaktionsaufgaben beobachtet. Die Ausgangswerte dieser Kenngrößen wurden nach der vierzigminütigen Exposition nicht wieder erreicht.[Quelle: **SCHUST**]

Von **DOROSHENKO (1983)** wurde eine Querschnittsstudie mit 216 Arbeitern durchgeführt. Diese waren dabei über einem Zeitraum von einem bis zu zwanzig Jahren für 6,5 Stunden täglich tieffrequentem Lärm ausgesetzt. Das Frequenzspektrum reichte dabei von Infraschall bis hin zu tieffrequentem Lärm im Hörbereich bei Pegeln von 93- 106 dB. Das Alter der Untersuchten lag zwischen 20 und 50 Jahren. Es wurden Beeinträchtigungen der Haltungs- und Bewegungskoordination, anormale Befunde bei kalorischen Tests und bei der Dreh- Pendel- Prüfung festgestellt. Weiterhin klagten die Untersuchten über Schwindelanfälle, Müdigkeit, Schlafstörungen, Schmerzen in der Herzgegend und Atembeschwerden.[Quelle: **SCHUST**]

Zusätzlich wurde noch eine Kontrollgruppe von 220 Arbeitern untersucht. Diese Gruppe war ebenfalls dem tieffrequentem Industrielärm (93dB-106dB), jedoch nicht dem Infraschall ausgesetzt. Die Auswertung ergab nun, dass es eine signifikante Verschlechterung des Hörvermögens bei der Gruppe die dem Infraschall ausgesetzt war, gab. Die Differenz zur Kontrollgruppe stieg mit der Anzahl der Expositionsjahre.

[Quelle: **SCHUST**]

LJUNGBERG (2003) untersuchte die Auswirkungen eines Hubschraubergeräuschs (21Hz) auf jeweils 27 männliche und weibliche Probanden. Es wurden drei Gruppen gebildet. Die erste erhielt Schall mit einem Pegel von 77 dB(A), die zweite 81 dB(A) und die dritte 86 dB(A). In einer Reihe von Tests wurde nun die Reaktionszeit der Probanden untersucht. Hierbei stellte sich heraus, dass kein direkter Zusammenhang zwischen der Intensität des wirkenden Schalls und der Beeinträchtigung der Reaktionszeit besteht.

NOPPEN (2004) untersuchte die Möglichkeit des Reißens von Lungenbläschen durch hohe Schalldrücke. Er untersuchte Patienten, bei denen ein sog. Pneumothorax aufgetreten ist. Dieses Zusammenfallen der Lunge wird durch ein Eindringen von Luft zwischen Rippen- und Lungenfell hervorgerufen. Die untersuchten Personen waren sehr hohen Schalldrücken ausgesetzt (Konzert- bzw. Discobesuche). Es wird angenommen, dass es einen Zusammenhang zwischen dem aufgetretenem Pneumothorax und den hohen Schalldruckpegeln gibt. Dabei scheint es drei Mechanismen zu geben, die mit diesem Effekt in Zusammenhang stehen. Durch starke Kompression und anschließende Dekompression (Schockwelle), von in Organen enthaltener Luft kann es zum Reißen der Wände kommen. Bei Atemwegsentzündungen ist der Luftaustausch beeinträchtigt. Dadurch kann es nun schon bei geringeren Schalldrücken zu einer Schädigung kommen. In diesem Zusammenhang wird von einem Sicherheitsventileffekt gesprochen, da Druckunterschiede langsamer ausgeglichen werden als in einer gesunden Lunge, und somit die mechanische Belastung steigt. Die Schädigungen scheinen ebenso von der Frequenz abhängig zu sein. Die menschliche Lunge verhält sich wie ein Tiefpass für Frequenzen zwischen 100Hz und 300Hz. Da die untersuchten Personen Musik gehört hatten, bei der gerade dieser Frequenzbereich besonders hohe Schalldrücke ausweist, wird angenommen, dass gerade hier die Belastung der Lunge besonders hoch ist.

Die Untersuchung bezog sich nicht direkt auf Infraschalleinwirkung. Die Wirkung die Luftschall auf das betreffende Organ (hier: Lunge) hat , hängt sowohl vom Schalldruckpegel, als auch von der Frequenz ab. Es ist anzunehmen, dass Infraschall eine ähnliche Wirkung hat. Jedes Organ absorbiert einen Teil der Energie, die auf es einwirkt. Hier besteht die Möglichkeit, dass es im mikroskopischen Bereich zu Schädigungen kommt.

Tabelle 4.2: Zusammenfassung der extraauralen Wirkung auf den Menschen

Autor	Durchführung	Frequenzen	Schalldruckpegel	Probanden	Ergebnis
EVANS	Exposition im Schallfeld	1- 20 Hz	115- 146 dB	5 Frauen/20 Männer	Vertikaler Nystagmus subjektiv empfundenes Schwingungsgefühl
KARPOVA		5, 10 Hz industrieller Infraschall	100, 135 dB		Müdigkeit, Benommenheit, Apathie, Depressionen, Konzentrationseinbußen Schwingungen der Inneren Organe
SLARVE					Modulation der Stimme Gefühl einer Schwingung des Körpers
HARRIS	Kombination von Infraschall und Umgebungsgeräuschen	7 Hz	25, 132, 142 dB		keine Auswirkungen
ISING	Exposition im Schallfeld und zusätzliche Beschallung mit Terzrauschen über Kopfhörer und Einspielen von Einzeltönen über 8 h	7 Hz 12.5, 16, 20 Hz 5- 15 Hz	70, 80 dB 70, 80 dB 100- 140 dB	40	Konzentrationseinbußen Anstieg des systolischen Blutdrucks Anstieg der Herzratenveränderung
ISING	10 Arbeitstage 8 h Oktavrauschen und/oder Verkehrslärm	3- 24 Hz Verkehrslärm	110 dB 75 dB(A)	28	
FAUSTOV	24 h, 4- 6 h Exposition im Schallfeld	10 Hz	100 dB		Anfängliche Aktivierung des vegetativen Nervensystems und verringerte Gerinnungsfähigkeit des Blutes

<i>Autor</i>	<i>Durchführung</i>	<i>Frequenzen</i>	<i>Schalldruckpegel</i>	<i>Probanden</i>	<i>Ergebnis</i>
DANIELLSON	20 min. bzw. 1 h Exposition im Schallfeld	6, 12, 16 Hz 16 Hz 50 Hz	95, 110, 125 dB 125 dB 50 dB	Männliche Probanden 20-30 Jahre alt	Erhöhung des diastolischen und Verringerung des systolischen Blutdrucks Herzfrequenz bei allen Probanden auffällig niedrig
LANDSTRÖM	20 min. Exposition im Schallfeld	6 Hz	110 dB	10 Normalhörende 10 Taube	Verminderung der Aufmerksamkeit, des Blutdrucks und der Herzfrequenz bei den Normalhörenden
TAKIGAWA	Breitbandiges Rauschen	0.1- 10, 5, 16 Hz	95 dB (C)	34	Bei Schließen der Augen konfuse Körperschwingungen verringert
WYSOCKI	40 min. Exposition im Schallfeld	2.4- 30 Hz	75- 85 dB	40	Sinkende Tendenz bei der Herzfrequenz, peripheren Gefäße, Hauttemperatur Leistungsverringern bei Wahlreaktionsaufgaben
DOROSHENKO	über Zeitraum von einem bis zwanzig Jahren tieffrequentem Lärm ausgesetzt eine Gruppe zusätzlich Infraschall	Infraschall bis tieffrequenter Lärm im Infraschallbereich	93- 106 dB	216 Arbeiter 20- 50 Jahre alt	Beeinträchtigungen der Haltungs- und Bewegungskoordination anomale Befunde bei kalorischen Tests und der Dreh-Pendel- Prüfung Schwindelanfälle, Müdigkeit, Schlafstörungen, Schmerzen in der Herzgend und Atembeschwerden
LJUNGBERG	Auswirkungen von Hubschraubergeräuschen untersucht 3 Versuchsgruppen	21 Hz	77, 81, 86 dB(A)	27 Männer 27 Frauen	kein direkter Zusammenhang zwischen Intensität des Schalls und Beeinträchtigung der Reaktionszeit

<i>Autor</i>	<i>Durchführung</i>	<i>Frequenzen</i>	<i>Schalldruckpegel</i>	<i>Probanden</i>	<i>Ergebnis</i>
NOPPEN	Untersuchung von Pneumothoraxpatienten	Probanden waren Konzertlautstärke ausgesetzt		4 Männer	Laute Musik kann Entstehung von Pneumothorax begünstigen mechanische Zerstörung von Lungenbläschen

Die Studien geben einen Hinweis darauf, dass die Auswirkungen von Infraschall durchweg negativ sind. Die Schädigungen hängen allerdings sehr stark vom Schallpegel ab. Problematisch ist hierbei, dass die Messverfahren nicht einheitlich waren. Man kann somit keine eindeutige Aussage über Schwellwerte oder Frequenzen treffen. Anhand der vorliegenden Daten kann man jedoch sagen, dass Infraschall bei Pegeln unter 90 dB wahrscheinlich keine extraaurale Wirkung hat.

Eines der häufigsten Symptome ist ein Schwindelgefühl bei den Probanden. Der Grund hierfür, könnte eine Anregung der Gehörsteinchen (Otholithen) im Gleichgewichtsorgan sein (vgl. **SAND**). Weiterhin wurden Veränderungen der Atemfrequenz, des Blutdrucks und der Konzentrationsfähigkeit beobachtet. Die genauen Zusammenhänge sind scheinbar noch nicht geklärt worden.

4.2.2 Aural

KARPOVA (1970) setzte männliche Probanden für 15 Minuten einem Schalldruck von 100dB und 135dB bei einer Frequenz von fünf und zehn Hertz aus. Es wurde von einem Druck in den Ohren berichtet.

Zu einem ähnlichen Ergebnis kam **SLARVE (1975)**. Er beschallte Probanden mit 144 dB bei einer Frequenz von einem bis 20 Hz für acht Minuten. Das Ergebnis war ebenfalls ein schmerzloser Druck auf den Ohren.

MOHR (1965) stellte eine Stunde nach einer zweiminütigen Beschallung mit zehn bzw. 20Hz bei Pegeln von 150dB- 154dB, keine TTS fest.

Zum gleichen Ergebnis wie **MOHR (1965)** kam **JOHNSON (1980)**. Er beschallte die Personen für 15 Minuten bei sieben Hz und einem Schallpegel von 142dB.

Bei dem Versuch von **JERGER (1966)** wurden bei 12 von 19 Probanden eine TTS von zehn bis 22dB in einem Frequenzbereich von drei bis sechs kHz festgestellt. Die Expositionsdauer betrug hier drei Minuten bei sieben bis 12Hz und Schallpegeln von 119dB- 144dB.

NIXON (1973) stellte ebenfalls eine TTS nach fünf bis 30 minütiger Beschallung bei 14 Hz und einem Schallpegel von 140dB fest.

JOHNSON (1973) beschallte die Probanden fünf bis 30 Minuten bei vier, sieben und 12Hz und 140dB. Im Gegensatz zu seinem Versuch von 1980 stellte er hier jedoch eine TTS bei zwei bis sechs kHz fest.

VINOKUR (2004) untersuchte die Wirkung von Lärm als eine nicht tödliche Waffe. Es wurde davon ausgegangen, dass sich Infraschall besonders eigne, da man nur sehr begrenzte Möglichkeiten hat ihn zu dämmen und weil er eine enorme Wirkung auf menschliche Organe habe. Gestützt werden die Aussagen auf die Ergebnisse von **VLADIMIR GRAVEAU**. Ein falsch installierter Lüfter, rief in seinem Labor eine Resonanz im Infraschallbereich hervor. Weiterhin stellten sie fest, dass man die Resonanzeigenschaften des Raumes durch Öffnen und Schließen des Fensters beeinflussen kann (Helmholtz- Resonator).

Ein mit Gas gefüllter Behälter, welcher an einer Seite offen ist (Gebäude, Flasche etc.) stellt einen Helmholtz- Resonator dar. Die Helmholtz- Frequenz errechnet

sich nach der Formel:

$$f_H = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{V(h + 0,8\sqrt{S})}}$$

h ist die Länge des Halses, S die Fläche der Eintrittsöffnung, V das eingeschlossene Volumen und c die Schallgeschwindigkeit. Im Falle eines Raumes wäre h beispielsweise die Stärke der Wand in der das Fenster sitzt. und S die Fensterfläche.

Es stellte sich jedoch heraus, dass es Probleme bei der gerichteten Abstrahlung von Infraschall gibt. Weiterhin ist die Reichweite durch die Luftdämpfung begrenzt.

Tabelle 4.3: Zusammenfassung der auralen Wirkung auf den Menschen

Autor	Durchführung	Frequenz	Schalldruck pegel	Probanden	Ergebnis
KARPOVA	15 min. Exposition im Schallfeld	5- 10 Hz	100- 135 dB	Männliche Probanden	Druck in Ohren
SLARVE	8 min. Exposition im Schallfeld	1- 20 Hz	144 dB	Männliche Probanden	Schmerzloser Druck im Ohr
MOHR	2 min. Beschallung	10- 20 Hz	150- 154 Hz		keine TTS
JOHNSON	15 min. Beschallung	7 Hz	142 dB	männliche Probanden	Keine TTS
JERGER	3 min. Beschallung	7- 12 Hz	119- 144 dB	19 Probanden	Bei 12 Probanden TTS von 10- 22 dB bei 3- 6kHz
NIXON	5- 30 min. Beschallung	14 Hz	140 dB		TTS
JOHNSON	5- 30 min.	4,7,12 Hz	140 dB		TTS bei 2- 6 kHz
VINOKUR	Entdeckung der „schädlichen“ Wirkung von Infraschall durch Zufall			Mitarbeiter	Übelkeit und Erbrechen durch Infraschall Schwierigkeit hohe Schalldrücke über große Entfernungen aufrecht zu erhalten

Die aurale Wirkung von Infraschall besteht nach den oben genannten Studien in einer temporären Hörschwellenverschiebung. Der schmerzlose Druck in den Ohren von dem bei **KARPOVA** die Rede ist, ist wahrscheinlich einem Druckunterschied zwischen Mittel- und Außenohr vergleichbar. Es ist anzunehmen, dass auch hier eine TTS auftrat, nur ist nicht klar ob auch hier entsprechende Untersuchungen durchgeführt wurden. Der Grund, warum bei **MOHR** keine TTS festgestellt wurde ist nicht ganz ersichtlich. Eine zu kurze Expositionsdauer kann als Grund ausgeschlossen werden, da **JERGER** mit vergleichbaren Werten operierte und eine TTS feststellte. Um hier eine Klärung zu erhalten müssten weitere Studien herangezogen werden. Allerdings kann man anhand der Feldstudie von **DOROSHENKO** ablesen, dass Infraschall bei hohen Pegeln die Lärmschwerhörigkeit beschleunigt. Eine genaue Aussage über die Grenzwerte ist auch hier nicht möglich, da die Untersuchungen keine einheitlichen Ergebnisse brachten. Es wäre wünschenswert auch hier, soweit möglich, einen Grenzwert festlegen zu können, ähnlich der Schmerzschwelle beim hörbaren Schall.

5 Biokommunikation

Als Biokommunikation könnte man alle Möglichkeiten zusammenfassen mit denen Lebewesen Informationen erhalten oder austauschen können. Der Informationsträger (z.B. chemischer Stoff) muss dabei einen Reiz auf das Lebewesen ausüben können. Welche Bedeutung ein Reiz dabei hat ist vom Lebewesen und Lebensraum abhängig. So ist für den Menschen das Auge zweifellos das wichtigste Sinnesorgan, um sich in der Umwelt zurechtzufinden. Der Geruchssinn wiederum spielt für den Menschen eine eher untergeordnete Rolle. Genauso verhält es sich mit dem Gehör. Für einige Lebewesen ist ein Frequenzbereich des Luftschalls wichtig um sich orientieren zu können (z.B. Fledermäuse) der für den Menschen nicht (bewusst) wahrnehmbar ist.

Die Verständigung unter Lebewesen ist eine Notwendigkeit, um das Fortbestehen einer Art über einen längeren Zeitraum zu sichern. Die übertragenen Signale beinhalten Informationen über eventuelle Gefahren, über neue Futterplätze, u.v.m.

Über die Zeit hat sich eine Vielzahl an Möglichkeiten der Signalübermittlung zwischen biologischen Systemen entwickelt. Hierbei kann man sagen, dass die Art der Informationsträger stark vom Lebensraum abhängt. Die Verständigung z.B. durch chemische Botenstoffe ist an der Luft viel schneller als im Wasser. Im Gegenzug ist die Schallgeschwindigkeit im Wasser wesentlich höher als an der Luft und es können größere Strecken überbrückt werden, da die Dämpfung im Wasser kleiner ist (siehe akustische Impedanz).

5.1 Infraschall als Kommunikationsmittel

Es gibt bestimmte Tiergruppen, die sich mit Hilfe von Infraschall verständigen oder ihn als Orientierungsmittel gezielt nutzen.

HAGSTRUM (2000) untersuchte die Reiserouten von Tauben. Diese können ohne Orientierungspunkte sicher ihren Weg finden. Hier stellt sich die Frage, welche „Sensoren“ die Tauben besitzen, um diese Fähigkeiten zu erhalten. Untersuchungen haben gezeigt, dass Tauben sich an der Sonne und dem Erdmagnetfeld orientieren. Der „Kompass“ wird dabei nach der Sonne kalibriert. Weiterhin besitzen sie die Fähigkeit extrem tieffrequente Geräusche wahrzunehmen (bis 0,05 Hz) (**KREITHEN/QUINE 1979**, **KLINKE 1990**). Es ist davon auszugehen, dass diese Schwingungen für die Orientierung der Tiere notwendig ist. Er beobachtete, dass Gruppen von Tauben die Orientierung verloren haben, nachdem sie von einer Infraschallwelle eines Flugzeugs getroffen wurden.

GRIFFIN (1969) vermutete, dass Luftinfraschall für Zugvögel wesentliche Informationen über die Route beinhaltet. Infraschall wird nur in geringem Maße gedämpft und kann somit hunderte von Kilometern zurücklegen. Es wird angenommen, dass Zugvögel diese Infraschallquellen gezielt orten, und somit als Orientierungspunkte ähnlich einem Leuchtturm verwenden können. Hierbei wird gewissermaßen eine interne Karte zur Orientierung angelegt. Wie wichtig die Orientierung durch Infraschall ist, zeigte eine Untersuchung bei Tauben deren Trommelfelle perforiert wurden, was zur Folge hatte, dass sie sich nur schwer orientieren konnten. Dies lag offensichtlich daran, dass die Hörempfindlichkeit im Infraschallbereich abnahm.

GARSTANG (1994) untersuchte den Einfluss des Wetters auf die Infraschallausbreitung und die Auswirkung auf das Verhalten von Elefanten die, sich durch diese niederfrequenten Wellen verständigen. Hierbei wird gezeigt, dass der typische Lebensraum des afrikanischen Elefanten (Savanne) günstig für die Ausbreitung der Infraschallwellen ist. Der Vorgang der Schalleitung über der Erdoberfläche ist kompliziert und hängt von verschiedenen Faktoren wie der

Dichte des Bodens (Reflexion der Wellen), den Luftschichten und der Windbewegung ab. Hinzu kommt, dass die Erdoberfläche generell tieffrequente Wellen besser reflektiert als höherfrequente. Weiterhin hat die Vegetation einen Einfluss auf die Dämpfung der Schallwellen. So kann es beispielsweise vorkommen, dass Schall im hörbaren Bereich nach 100 m um 40 dB gedämpft wird, Schall unter 30 Hertz jedoch nur um ein dB, bei idealen Bedingungen sogar erst nach einem Kilometer.

Es wurden Messgrößen wie z.B. Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Sonneneinstrahlung erfasst. Das Ergebnis war, dass die Kommunikation über Infraschall stark wetterabhängig ist. Die Bedingungen sind demnach nachts in der Trockenzeit optimal. Dies hängt scheinbar damit zusammen, dass sich die Luft nachts stark abkühlt und somit eine andere Temperaturschichtung vorliegt. Durch die geringe Wärmekapazität des Bodens entsteht nachts eine Luftschicht, in der in nur geringem Maße Wärme ausgetauscht wird. In dieser Luftschicht sind nun nach **GARSTANG** die Bedingungen zur Ausbreitung von Infraschall, d.h. geringe Windbewegung, geringe Luftfeuchtigkeit, gleichmäßige Temperaturverteilung, optimal. Erreicht werden diese Bedingungen ca. zwei Stunden nach Sonnenuntergang.

LANGBAUER (2000) untersuchte die Bedeutung der Infraschallsignale näher. Ein Großteil der Schallkommunikation zwischen Elefanten spielt sich im tieffrequenten Bereich ab. Die erreichten Schallpegel betragen ca. 117 dB SPL, was sehr nah an der Schmerzschwelle liegt. Der Grund für diese tieffrequente Kommunikation könnte neben der höheren Reichweite auch sein, dass diese Schwingungen für Feinde nicht hörbar ist, und die Tiere somit nicht auf sich aufmerksam machen. Elefanten haben unter den Säugetieren das beste Hörvermögen für tiefe Frequenzen. Allerdings sind die Bedeutungen der Laute bis jetzt noch nicht geklärt worden. Jedes Tier hat sein ganz spezifisches Spektrum an Lauten, was allerdings ohne aufwändige Technik nicht zu analysieren ist. Gerade die Brunftlaute haben einen hohen Schalldruckpegel und Reichweite. Sie beginnen bei 15 Hz, steigern sich bis 35 Hz und fallen danach wieder auf 15 Hz zurück. Diese hohe Reichweite könnte damit

zusammenhängen, dass bei Elefanten die Paarung nur alle 4 Jahre stattfindet, und es umso wichtiger für die Tiere ist, auf sich aufmerksam zu machen. Durch die Veränderung der Frequenz erreicht das Tier, dass es sich von den Hintergrundgeräuschen abhebt, und für den Empfänger somit leichter zu lokalisieren ist. Weiterhin sind Elefanten in der Lage seismische Schwingungen wahrzunehmen. Wie dies geschieht ist ebenfalls noch nicht ganz geklärt, denn die Schallgeschwindigkeit im Boden ist höher, was wiederum bedeutet dass beispielsweise ein 20 Hz Signal eine Wellenlänge von 87- 175 m hat.

SENEVIRATNE nutzt die von den Elefanten ausgesandten Infraschallwellen zur Lokalisation der Tiere. Ziel dieses Projekts war es, eine Art „Frühwarnsystem“ zu realisieren um zu verhindern, dass Elefanten in Kulturlandschaften eindringen und diese zerstören, was wiederum der Arterhaltung dient, da die Elefanten andernfalls getötet worden wären. Das System besteht aus 4 Infraschallsensoren (Mikrofonen), einem Signalprozessor und einem Laptop für die Analyse. Bei ersten Tests arbeite das System zuverlässig, für die Zukunft ist angedacht, dass ein Rechnerprogramm aus einer Menge von Signalen die elefantspezifischen heraus filtert und somit die Detektion erleichtert. Weiterhin ist eine Aufnahme und Speicherung von Lauten im Infraschallbereich geplant. Aus diesen Daten soll später ein Archiv angelegt werden.

McCOMB (2002) zeigte mit Hilfe von Playback- Experimenten, dass Afrikanische Elefanten mit Hilfe von tieffrequenten Schallwellen ihre Herde über Distanzen von ca. 2,5 km identifizieren können. Die Laute der Tiere wurden aufgezeichnet und anschließend den Tieren vorgespielt. Dabei stellte sich heraus, dass die zur Bestimmung der Herde notwendigen Schallwellen Frequenzen über 20 Hz haben, also noch im Hörbereich des Menschen liegen. Die durchschnittliche Entfernung ab der die Tiere durch Laute (wahrscheinlich Rufe) reagierten lag bei einem Kilometer. Diese Studie zeigt, dass Elefanten eine geringere Wahrnehmungsschwelle für tieffrequente Schallwellen haben als andere Landsäugetiere (z.B. 60dB bei 17Hz).

PAYNE (2004) beobachtete Meeressäuger, die ohne Blickkontakt zu haben die selbe Schwimmgeschwindigkeit und Richtung aufrechterhalten. Scheinbar tauschen Wale und Delfine Informationen über Nahrungsquellen aus. Dies geschieht nach **PAYNE** mit Hilfe von Infraschall über tausende von Kilometern.

SAND (2000) untersuchte die Fähigkeit von Fischen Infraschall wahrzunehmen. Er fand heraus, dass Fische (Dorsch, Scholle, Barsch) sehr empfindlich gegenüber Infraschallwellen sind. Fische besitzen Gehörsteine, sog. Otolithen. Sie dienen dem Gleichgewichtsorgan als seismische Masse um somit die Lage im Raum bestimmen zu können. Im Laufe der Untersuchung stellte sich heraus, dass das Gleichgewichtsorgan bei der Wahrnehmung von Infraschallwellen die entscheidende Rolle spielt. Diese Empfindlichkeit gegenüber Infraschall legt die Vermutung nahe, dass Fische sehr viel Information aus dem sie umgebenden Schallfeld beziehen. Eine Barschart beispielsweise, kann in völliger Dunkelheit Beute orten und fangen. Eine wichtige Rolle spielen hierbei auch noch die Seitenlinien der Fische. Wie dieses Organ mit dem Ohr zusammenwirkt ist allerdings noch nicht geklärt. Weiterhin wäre es denkbar, dass die Fische ähnlich den Tauben (vgl. **GRIFFIN**) Infraschall zur Navigation nutzen.

DØVING untersuchte die Frage, wie es Lachsen gelingt, aus dem offenen Ozean wieder in ihr Laichgewässer zurück zu finden. Die Möglichkeit Infraschall wahrzunehmen spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Das Wasser der Ozeane liegt geschichtet vor. Die Schichten unterscheiden sich dabei vor allem in Bezug auf Salzgehalt und Temperatur. Die Lachse nutzen die stetige Scherbewegung zwischen den einzelnen Wasserschichten um die Flussrichtung erfassen zu können. Dies geschieht mit Hilfe des Hörorgans (vgl. **SAND**). Dabei können die Tiere Wasserströme kleiner 0,1 mm/s wahrnehmen, was unter der normalen Wasserbewegung liegt. Eine weitere interessante Fähigkeit der Fische ist es, während der Vorwärtsbewegung die Abweichung von einer geraden Linie wahrzunehmen. Die Reizschwelle der Zentrifugalbeschleunigung beträgt 10^{-4}m/s^2 . Bei einer Schwimmgeschwindigkeit von einem Meter pro Sekunde weicht das Tier somit nach einer Minute lediglich 36 cm vom Kurs ab. Diese

Fähigkeit lässt sich wahrscheinlich auf die von **SAND** untersuchten Otolithen (Gehörsteinchen), im Gleichgewichtsorgan der Fische, zurückführen.

KARLSEN (2004) beobachtete das durch Infraschall ausgelöste Fluchtverhalten junger Plötzen. Der eingesetzte Testapparat ist ein schwingungsfähiges System. Dieses besteht aus einem, mit 12 l Wasser gefüllten, Behälter welcher an 4 Stahlseilen aufgehängt ist. Der Behälter wurde nun mit einer Rüttelplatte zum Schwingen angeregt. Um die Reaktionen der Tiere zu analysieren wurde diese mit einer Videokamera aufgezeichnet. Für gewöhnlich befanden sich acht Fische im Testbehälter. In einigen Versuchen wurden durch Chemikalien die Seitenlinien der Fische blockiert. Die Frequenz der Rüttelplatte betrug 6,7 Hz bei einem Pegel von 15 dB über der Reizschwelle der Fische. Die Bewegungen der Fische wurden aufgezeichnet und die Trajektorien mit Hilfe eines Computerprogramms sichtbar gemacht.

Zu Beginn des Experiments schwammen die Tiere ruhig durchs Wasser (Geschwindigkeit ca. ein cm/s). Nachdem der Behälter mit 6,7 Hz in Schwingung versetzt wurde begannen die Tiere schlagartig ein Fluchtverhalten aufzuzeigen (Beschleunigung von 1 cm/s auf 63 cm/s). Interessant ist hierbei, dass die Phasenlage zu Beginn der Schwingung offensichtlich eine Auswirkung auf die Fluchtrichtung hat (Abbildung 5-1). Im Bild sind die Trajektorien der einzelnen Fische als Linien dargestellt. Man sieht deutlich, dass wenn sich der Behälter am Anfang vom Aktor weg bewegt, bewegen sich die Tiere genau entgegengesetzt (Fall A). Im Fall B wird der Behälter am Anfang zum Aktor hin gezogen. Die Tiere reagierten auch hier mit der Flucht entgegen der anfänglichen Bewegungsrichtung.

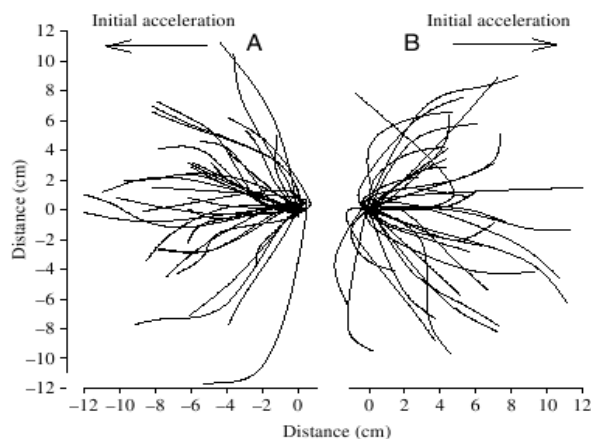


Abbildung 5- 1: Fluchrichtung in Abhängigkeit von der Phasenlage [Quelle: Karlsen&Sand 2004]

Um einen Einfluss anderer Sinneseindrücke auszuschließen wurden durch Zugabe von Kobaltverbindungen [vgl. Sand&Karlsen 1987] die Seitenlinien der Fische blockiert. Anschließend wurde das Experiment wiederholt. Die Tiere zeigten keine signifikanten Veränderungen im Verhalten (Abbildung5- 2)

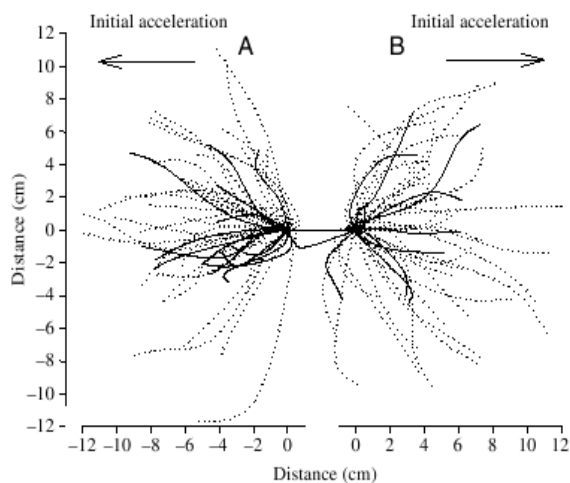


Abbildung 5- 2: Fluchrichtungen der Tiere nach Blockierung der Seitenlinien, zum Vergleich sind die Fluchrichtungen vom vorhergehenden Experiment (gepunktet) mit eingezeichnet [Quelle: Karlsen&Sand 2004]

Es scheint so zu sein, dass die Sinnesorgane von Tieren die Infraschall wahrnehmen können, alle nach dem Prinzip der seismischen Massen funktionieren (Gehörsteine/Gleichgewichtsorgan). Dabei wird durch den Infraschall eine Masse zum Schwingen angeregt. Diese Massen befinden sich auf einer gallertartigen Masse in der Sinneshärchen eingebettet sind, die durch

die Bewegung verbogen werden und so Informationen an das Gehirn weiterleiten. Bei Elefanten war nicht eindeutig ersichtlich ob sie in der Lage sind Infraschall direkt zu hören. Es gibt aber Hinweise darauf, dass sie Bodenschwingungen über die Füße aufnehmen können.

5.1.1 Sensorik zur Erfassung von Infraschall

HEINZEL (1987) untersuchte die „Antennen“ von Wanderheuschrecken, welche zur Wahrnehmung von Luftströmungen verwendet werden, nach ihren mechanischen Eigenschaften. Die Vibrationen entstehen auf zwei Arten, durch Bewegungen des Kopfes und durch Luftströmungen die sich wieder in mehrere Klassen unterteilen lassen. Um die Schwingungen die durch die Kopfbewegungen hervorgerufen werden zu messen, wurde der Kopf eines getöteten Tieres auf einem Vibrationstisch fixiert, und die Amplitude der Spitze der Antenne mit einem Mikroskop gemessen. Die Resonanzfrequenz der Antennen liegt demnach bei 70- 132 Hz. Die Verstärkung der Antenne ist vom Winkel zum Kopf, die Lage der Resonanzfrequenz von der Länge der Antenne, abhängig.

Für die Messung der Vibrationen durch Luftströmungen wurde ein Windkanal verwendet in dem zusätzlich ein Lautsprecher zur Modulation der Luftströmung angebracht war. Um nun die Bewegung der Antenne aufnehmen zu können, wurde ein Stück vom Silberfilm eines Spiegels an der Antenne befestigt. Über einen Laserstrahl, welcher von dem Spiegelfragment reflektiert und auf eine Fotodiode (positionsabhängig) trifft, kann nun die Geschwindigkeit der Antenne ermittelt werden. Als erstes wurde getestet, ob eine Luftströmung, und die daraus resultierenden Karman- Wirbel, Schwingungen der Antennen hervorrufen können. Da aber diese Wirbel bei Umströmung dieser kleinen Zylinder, Frequenzen von 1,6 bis sechs kHz haben liegen sie weit außerhalb der Resonanz und deshalb konnte auch keine Auswirkung beobachtet werden. Bei höheren Luftgeschwindigkeiten entstehen turbulente Strömungen im Windkanal. Sie rufen eine Auslenkung der Antenne von $0,04^\circ$ - $0,05^\circ$ hervor. Im nächsten Test wurde eine modulierte Luftschwingung verwendet, um den Einfluss von tieffrequenten Wellen (z.B.: Flügelschlag) zu untersuchen. Um dies zu simulieren wurde das Versuchstier, zusätzlich zum konstanten Luftstrom, noch mit einem Lautsprecher beschallt (Sinusschwingung). Das Ergebnis war, dass sich qualitativ ähnliche Resonanzkurven zum ersten Versuch einstellen (Kopfbewegungen). Hier liegen die Resonanzfrequenzen jedoch bei 120Hz- 180Hz.

Die Messwerte hängen stark von der Methode der Erregung der Schwingung, dem Alter und dem Geschlecht des Tieres, ab. So ist die Resonanzfrequenz durch Kopfbewegungen bei Männchen kleiner als bei Weibchen. Dies hängt mit der Länge der Antennen zusammen. So beträgt diese bei Männchen ca. 13,5 mm und bei Weibchen ca. 14,5 mm.

Die Antennen der Wanderheuschrecke werden von den Tieren benutzt um Informationen über ihren aktuellen Flugzustand zu erhalten.

FLEISCHER, KETTEN LEATHERWOOD und **NORRIS** vermuten, dass Bartenwale durch ihre Innenohranatomie in der Lage sind tiefe Frequenzen zu hören. Demnach ist die Basilarmembran der Tiere größer, dünner und weniger steif als bei anderen Spezies. **HOUSER et al. (2001)** errechnete ein Audiogramm für Buckelwale aus einem Ohrmodell. Es wurden das menschliche und das Katzenohr als Vergleich herangezogen. Auf Grund der Ähnlichkeit der Organe kann man unter Berücksichtigung der anatomischen Daten (Dicke der Basilarmembran usw.) ein Modell des Walohres errechnen. Das Ergebnis war ein für Säugetiere typisches Audiogramm. Die höchste Empfindlichkeit lag hier bei zwei bis acht kHz.

Aus diesen Ergebnissen könnte man nun einige Prinzipien für die Gestaltung eines Infraschallsensors ableiten. Man kann sagen, dass bei niederfrequenten Wellen, und hier insbesondere bei Körperschall, das Prinzip der seismischen Massen sinnvoll ist. Es wäre denkbar, einen Infraschallaufnehmer zu konstruieren, der ähnlicher Weise funktioniert. Die Anordnung würde wahrscheinlich einem Beschleunigungssensor ähneln. Allerdings mit dem Unterschied, dass hier Luftschall aufgenommen wird.

Wenn man die Antennen der Wanderheuschrecke betrachtet, dann erkennt man funktionelle Ähnlichkeiten. Die Empfindlichkeit dieser Einrichtung hängt von der Eigenfrequenz der Antenne ab. Diese wiederum kann man durch die Antennengeometrie und Material verändern.

Das Problem bei einer Membran besteht darin, dass die Membranfläche einen sehr großen Einfluss auf die damit aufzuzeichnenden Frequenzen hat. Die Bewegung der Membran wird in ein elektrisches Signal gewandelt. Demnach muss die Membran in der Lage sein die auftreffenden Schallwellen in eine

mechanische Bewegung umzuformen. Für Infraschallwellen sollte diese Membran relativ dünn sein und eine größere Fläche haben als bei normalen Mikrofonen. Die Analogie dazu findet man bei den Bartenwalen (vgl. **FLEISCHER** et. al). Die Basilarmembran der Tiere ist größer und dünner als bei anderen Säugetieren. Allerdings kann man dieses Vorbild wahrscheinlich nicht ohne weiteres auf Luftschall übertragen, da die Voraussetzungen für die Schallausbreitung unter Wasser ganz andere sind (akustische Impedanz).

5.1.2 Möglichkeiten der Übertragung des Infraschalls in den Hörbereich des Menschen

Die Grundgleichungen zur Beschreibung des Schallfelds in einem homogenen, ruhenden Medium ergeben sich aus dem Newtonschen Gesetz.

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho \frac{\partial v_x}{\partial t}; -\frac{\partial p}{\partial y} = \rho \frac{\partial v_y}{\partial t}; -\frac{\partial p}{\partial z} = \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} \quad 4-1$$

Aus dem Zusammenhang zwischen Druckerhöhung und Volumenänderung ergibt sich:

$$p = -K \left(\frac{\partial \xi_x}{\partial x} + \frac{\partial \xi_y}{\partial y} + \frac{\partial \xi_z}{\partial z} \right); \frac{\partial p}{\partial t} = -K \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad 4-2$$

K ist das Kompressionsmodul des umgebenden Mediums.

$$K = c_0^2 \rho \quad 4-3$$

Nach Differentiation der Gleichungen 4-1 und 4-2 erhält man die Wellengleichung:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \Delta p = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad 4-4$$

Mit Hilfe der Fouriertransformation lässt sich jeder Zeitverlauf $p(t)$ in einen Frequenzverlauf $\check{p}(\omega)$ umwandeln.

$$\check{p}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(t) e^{-j\omega t} dt \quad 4-5$$

Angewendet auf die vorhergehenden Formeln:

$$\Delta \check{p}(\omega) + \frac{\omega^2}{c_0^2} \check{p}(\omega) = 0 \quad 4-6$$

Mit Hilfe des Greenschen Satzes lässt sich diese Differentialgleichung in eine Integralgleichung umformen.

$$\check{p}(x, y, z, \omega) = \frac{1}{4\pi} \int \left(j\omega \rho \check{v}_s(\omega) e^{-j\omega r/c} + \check{p}_s(\omega) \frac{\partial}{\partial n} \frac{e^{-j\omega r/c}}{r} \right) dS \quad 4-7$$

Mit dieser Gleichung kann man den Schalldruck an jedem beliebigen „Aufpunkt“ mit den Koordinaten x,y,z ausrechnen. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass man den Wechseldruck p_s und die Normalkomponente der Schnelle v_s eines jeden Elementes dS der Randfläche kennt. r ist der Abstand vom

jeweiligen Aufpunkt zum Flächenelement dS . Nachdem man diese Gleichung gelöst hat, kann man durch Rücktransformation den Zeitverlauf errechnen.

$$p(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \check{p}(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad 4-8$$

Schallmessgeräte:

Um Schallwellen aufzunehmen ist es notwendig, die Schallenergie (mechanische Energie) in elektrische Energie zu wandeln. Bei Mikrofonen wird die Relativbewegung, die der einwirkende Schalldruck zwischen zwei elastisch verbundenen Körpern hervorruft, genutzt. Die Schallwellen regen eine im Mikrophon eingebaute Membran zum Schwingen an. Bei einem Kondensatormikrophon bewegt sich eine Elektrode, welche mit der Membran verbunden ist, relativ zu einer Gegenelektrode (Kondensatormikrophon). Das elektrodynamische Mikrophon beruht auf dem Induktionsgesetz. Hier ist eine Spule welche in einem Magnetfeld schwingt mit der Membran verbunden. Eine weitere Möglichkeit Luftschall in elektrische Schwingungen umzuwandeln sind Piezomikrophone. Hier wird durch den einwirkenden Schall eine Platte aus piezoelektrischem Material verformt. Die auftretenden Ladungsverschiebungen im Kristall werden durch Elektroden abgegriffen.

Spektralanalyse:

Für viele technische Aufgabenstellung ist es hilfreich bzw. unerlässlich die Frequenzzusammensetzung des betrachteten Signals zu kennen. Meist kommen hierbei Terz- oder Oktavfilter zum Einsatz. Für viele Aufgaben ist diese Unterteilung in Terzen und Oktaven ausreichend. Manchmal ist jedoch eine Erhöhung der Auflösung nötig um eine gezieltere Aussage über die vorkommenden Frequenzen machen zu können.

Fourieranalyse:

Die Fourieranalyse bietet die Möglichkeit ein Zeitsignal in den Frequenzbereich zu überführen. Hierbei wird ein Eingangssignal als die Summe aus unendlich vielen

harmonischen Einzelfunktionen dargestellt. Dieser Zusammenhang wird durch

das Fourierintegral wiedergegeben.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2\pi f t} dt \quad 4-9$$

Als Summe:

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi n k / N} \quad (k=0,1,\dots,N-1) \quad 4-10$$

Das Eingangssignal wird

$X(k)$ ist das finite Fourierspektrum der Funktion $x(n)$, welches N-mal abgetastet wurde. Die diskrete Fouriertransformation (DFT) und die Fast-Fourier-Transformation (FFT) sind leistungsfähige Werkzeuge zur Frequenzanalyse. Die Rückrechnung auf das Ursprungssignal erfolgt dann durch die inverse Fouriertransformation (IFT).

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{j2\pi f t} df \quad 4-11$$

Wirkleistungsspektrum:

Das Wirkleistungsspektrum errechnet sich, indem man das Spektrum mit seiner konjugiert Komplexen.

$$S_{xx}(f) = X^{konj}(f) \cdot X(f) \quad \text{bzw.} \quad 4-12$$

$$S_{yy}(f) = Y^{konj}(f) \cdot Y(f) \quad 4-13$$

Durch die Multiplikation mit der konjugiert Komplexen verschwindet der Imaginärteil. Mit dem Autoleistungsspektrum kann eine Aussage über den Frequenzgehalt der betrachteten Signale getroffen werden.

Bei der Fouriertransformation von tieffrequenten Signalen gibt es mehrere Probleme. Um eine Aussage über die zeitliche Frequenzverteilung treffen zu können ist es notwendig das Signal in so genannten Fenstern abzutasten. Dabei muss mindestens ein Wellenzug, also eine Periode, abgetastet werde. Da nun aber bei tieffrequenten Signalen die Periodendauer in den Bereich von einer Sekunde und mehr gibt, würde man bei aneinandergesetzten Fenstern immer die volle Periode abwarten müssen bevor ein neuer Abtastwert hinzukommt.

Abhilfe kann hier die Abtastung mit überlappenden Fenstern schaffen. Hier werden die Fenster in einem bestimmten zeitlichen Abstand nebeneinander gelegt damit eine quasikontinuierliche Abtastung des Signals möglich wird.

Das hier gezeigte Beispiel ist wesentlich einfacher. Es soll auch nur eine Möglichkeit zeigen wie man ein Eingangssignal in einen anderen Frequenzbereich umsetzen kann.

Ausgangspunkt ist eine gestörte Schwingung (Sinus). Diese wird transformiert, und das Leistungsspektrum ermittelt. In diesem Leistungsspektrum könnte man nun die beiden Peaks in den gewünschten Frequenzbereich verschieben und rücktransformieren.

6 Zusammenfassung

Diese Projektarbeit gibt einen Überblick über die vorhandenen Studien zum Thema Infraschall und seine biologische Bedeutung. Dabei stellte sich heraus, dass es auf diesem Gebiet zwar viele Studien gibt, aber man trotzdem keine einheitliche Aussage treffen kann. Es scheint aber so zu sein, dass Infraschall erst ab Schalldruckpegeln von ca. 90 dB eine schädigende Wirkung hat. Es fällt auf, dass bis jetzt keine Einigkeit über Schmerzschwellen gibt. Wahrscheinlich liegt es daran, dass man die Infraschallwellen eben nicht hört. Sinnvoller wäre es, von einer Unverträglichkeitsschwelle zu sprechen. Um diese festzulegen wäre es aber notwendig ein Verfahren festzulegen, nach dem man diese Schwelle ermitteln kann. Ein Ansatz wären die Forschungen von LEUNG. Er beschallte, mit Helium gefüllte, Schweinelungen und ermittelte deren Resonanzfrequenz. Man könnte dieses Verfahren verwenden um herauszufinden bei welchen Frequenzen die Organe die meiste Schallenergie absorbieren. In diesen Frequenzbereichen wären dann die größten Schäden zu erwarten. Weiterhin könnte man aus den Experimenten, bei denen die Probanden Schwindelgefühle und Erscheinungen wie Nystagmus hatten, eine hinreichend genaue Schwelle des Schalldruckpegels herausfinden. Diese Maßnahmen wären nötig, da gerade in Bezug auf die Windkraftanlagen das Thema Infraschall genannt wird. Mit genauen Grenzwerten, und Wissen über die Auswirkungen von Infraschall, wäre es wesentlich einfacher eine Aussage über die eventuelle schädigende Wirkung einer solchen Anlage zu machen. Im Moment ist es meistens noch so, dass laut den Windkraftbefürwortern die Schalldruckpegel einer solchen Anlage zu gering sind um einen Einfluß ausüben zu können.

Im Bereich der Biokommunikation scheint Infraschall durchaus eine bedeutende Rolle zu spielen. Die Studien geben Hinweise darauf, dass einige Tiergruppen diesen Schall einsetzen um sich zu verständigen. Wie diese Mechanismen genau funktionieren ist noch nicht ausreichend erforscht. Besonders im Bereich des Hörens von Infraschall gibt es noch viele Fragen. Es ist immer noch nicht geklärt, ob diese Wahrnehmung direkt mit Hören in unserem Verständnis vergleichbar ist, oder ob es schlicht eine Wahrnehmung von Schwingungen ist.

Infraschallwellen hörbar zu machen ist mit einigen Problemen verbunden. Die Wellenlänge ist hier so lang, dass die Abtastung, Transformation und Umsetzung in ein anderes Frequenzband schwierig wird. Im hier gezeigten Beispiel wird eine Fouriertransformation über den gesamten Zeitbereich angewendet. Anschließend wird die Grundfrequenz der Schwingung (in den hörbaren Bereich) verschoben und dann rücktransformiert. Dieses Verfahren wäre für die Praxis wahrscheinlich untauglich, aber es zeigt wie man prinzipiell bei der Lösung dieses Problems vorgehen müsste. Man könnte diesen Ansatz dahin gehend weiterverfolgen, dass man ein Gerät entwickelt, welches die Infraschallwellen aufzeichnet, eine Frequenzumsetzung durchführt und das Ergebnis anschließend auf einen Audioausgang ausgibt. Bei der Frequenzumsetzung wären auch verschiedene Funktionen nach denen der betrachtete Frequenzbereich bewertet wird denkbar. So könnte man sich gezielt Frequenzbereiche bestimmen, die in einem breiteren Spektrum abgebildet werden. Mit dieser Einrichtung könnte man beispielsweise die tieffrequenten Wellen seiner Umgebung direkt hörbar machen und sich somit einen subjektiven Eindruck verschaffen. Ob ein solches Gerät sinnvoll ist, wäre zu diskutieren.

7Literatur

Aiken Leung, Sepe Sehati, J. Duncan Young and Chris McLeod: „Sound transmission between 50 and 600 Hz in excised pig lungs filled with air and helium“
Journal of Applied Physiology 89:2472- 2482, 2000

Alex Davies: „Acoustic Trauma: Bioeffects of Sound“

Chen Yuan Huang Qibai, Hanmin Shi: „An Investigation on the Physiological and Psychological Effects of Infrasound on Persons“
Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control Pages 71- 76
March 2004

D. R. Ketten: „Whale ears: Structural analyses and implications for acoustic trauma“
The Journal of the Acoustical Society of America November 1994
Volume 96, Issue 5, pp. 3269- 3270

D.S. Houser, D.A. Helweg and P.W.B. Moore. 2001: „A bandpass filter- bank model of auditory sensitivity in the humpback whale“
Aquatic Mammals 27:82- 91.

David Larom, Katharine Payne et al.: „The influence of surface atmospheric conditions on the range and area reached by animal vocalisations“
The Journal of Experimental Biology 200, 421?431 (1997)
The Company of Biologists Limited 1997 JEB0497

Eberhard Zwicker Richard Feldtkeller: „Das Ohr als Nachrichtenempfänger“
S. Hirzel Verlag Stuttgart 1967

Elizabeth von Muggenthaler, Paul Reinhart et al.: „Songlike vocalizations from the Sumatran Rhinoceros (*Dicerorhinus sumatrensis*)“

2003 Acoustical Society of America

PACS numbers: 43.80. Ka, 43.28. Dm

Date Received: November 02, 2002 Date Accepted: March 19, 2003

Fleischer, G. 1976: „Hearing in extinct cetaceans as determined by cochlear structure“

Journal of Paleontology 50(1):133- 152.

Günther Hartmann: „Praktische Akustik / Band1 Einführung“

R. Oldenbourg, München 1964

Hans E. Karlsen, Robert W. Piddington, Per S. Enger, Olav Sand: „Infrasound initiates directional fast- start escape responses in juvenile roach“

The Journal of Experimental Biology 207, 4185- 4193 Published by The Company of Biologists 2004 doi:10.1242/jeb.01274

Ivar Veit: „Technische Akustik / Grundlagen der physikalischen, physiologischen und Elektroakustik“

6. Aufl. Vogel- Buchverlag 2005

J.C. Norris, and S. Leatherwood. 1981: „Hearing in bowhead whales, *Balaena mysticetus*, as estimated by cochlear morphology.“

Pp. 745- 787 in: T.F. Albert (ed.), Tissue structural studies and other investigations on the biology of endangered whales in the Beaufort Sea, Vol. II. Rep. from Dep. Vet. Sci., Univ. Maryland, College Park, MD, for U.S. Bur. Land Management, Anchorage, AK. NTIS PB86- 153566.

Jessica Ljungberg, Gregory Neely, Ronnie Lundström: „Effects on Spatial Skills after Exposure to Low Frequency Noise“
Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control November 2003

Jonathan T. Hagstrum: „Infrasound and the avian navigational map“
The Journal of Experimental Biology 203, 1103- 1111 (2000)
Printed in Great Britain © The Company of Biologists Limited 2000 JEB2466

Jürgen Leichsenring: „Technische Akustik“
1. Aufl. Verlag- Mainz, Wissenschaftsverlag, Aachen 1996

Kjell B. Doving, Ole B. Stabell: „Trails in open waters: Sensory cues in salmon migraton“
In: Sensory Processing in Aquatic Environmnets. Eds. S.P. Collin and N.J. Marshall. Springer- Verlag. New York, Inc. p39- 52.

K.M. Leong, A. Ortolani et al.: „The use of low- frequency vocalizations in African elephant (*Loxodonta africana*) reproductive strategies“
Hormones and Behavior 43 (2003) 433- 443 2002
www.sciencedirect.de

Lalith Senerivatne, G. Rossel, W.D.C. Gunasekera, H.L.P.A. Madanayake, Y.M.M.S. Yapa, G. Doluwera: “Elephant Infrasound Calls as a Method for Electronic Elephant Detection,,

Leopold Mathelitsch, Ivo Verovnik: Akustische „Phänomene“
Aulis Verlag- Deubner Köln 2004

M. Noppen, S Verbanck, J. Harvey, R van Herreweghe, M. Meysman, W Vincken, M. Paiva: „Music: a new cause of primary spontaneous pneumothorax“
Thorax 2004; 59:722- 724. doi 10.11.36/thx.2003.007385

M. Schust: „Biologische Wirkung von vorwiegend luftgeleitetem Infraschall“
Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH 1997

Manfred Heckl, Helmut A. Müller: „Taschenbuch der technischen Akustik“
2. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

Manfred T. Kalivoda: „Taschenbuch der angewandten Psychoakustik“
Springer-Verlag Wien 1998

Mardi C. Hastings, Arthur N. Popper: „Effects of sound on fish“
Subconsultants to Jones & Stokes Under California Department of
Transportation Contract No. 43A0139, Task Order 1 Funding Provided
by the California Department of Transportation Prime Contractor: Jones &
Stokes 2600 V Street Sacramento, CA 95818 January 28, 2005

Mark Purdey: „Does an infrasonic acoustic shock wave resonance of the
manganese 3+loaded/copper depleted prion protein initiate the
pathogenesis of TSE?“
Medical Hypotheses (2003) 60(6), 797- 820 2003 Elsevier Science Ltd. All
rights reserved doi:10.1016/S0306- 9877(03)00007- 0

Michael Garstang, David Larom, Richard Raspet, Malan Lindeque: „Atmospheric
control on Elephant communication“
The Journal of Experimental Biology 198, 939- 951 (1995)
Printed in Great Britain © The Company of Biologists Limited 1995

Olav Sand, Hans E. Karlsen: „Detection of infrasound and linear acceleration in
fishes“
Phil. Trans. R. Soc. Lond. B (2000) 355, 1295 - 1298
© 2000 The Royal Society

R. Payne: „The role of infrasounds in maintaining whale herds“

The Journal of the Acoustical Society of America May 2004 Volume 115,
Issue 5, p. 2554

Roman Vinokur: „Acoustic Noise as a Non- Lethal Weapon“

Sound and Vibration October 2004

Ronald P. Larkin: „Effects of military noise on wildlife: a literature review“

W.R. Langbauer: „Elephant communication“

Zoo Biology 19:425-445 (2000)

© 2000 Wiley- Liss, Inc.

8 Beispielprogramm

```
%Erzeugung einer Schwingung
t=0;
i=1;
%Frequenz
fq=5;
S=zeros(2000,1);%Fuellen der Matrix mit Nullen
%Erzeugen einer gestoerten Schwingung mit 5 Hz
while t<=2
    a=rand(2001,1);
    S(i)=a(i)*sin(2*pi*fq*t);
    i=i+1;
    t=t+0.001;
end
figure(1)
plot(S)
axis([0 2001 -1 1])
grid on
figure(2)
%Fouriertransformation
f=1000*(0:1000)/2000;
F=fft(S);
plot(F)
%Leistungsspektrum
P=F.*conj(F)/2000;
figure(3)
plot(f,P(1:1001))
axis([0 2*fq 0 200])
%Peak verschieben
%Peak bei 11 -> gewuenschte Frequenz
%das selbe am anderen Ende der Tabelle
T=P;
k=P(11); %Auslesen Peak
l=P(500);
```

```
m=P(1992); %Auslesen Peak
n=P(1500);
%Peak verschieben. bzw austauschen
T(11)=i;
T(500)=k;
T(1992)=l;
T(1500)=k;
%inverse Fouriertransformation
TT=ifft(T);
figure(4);
plot(TT);
```