

Ultraschallhören und der hypersonische Effekt

Es ist generell akzeptiert, daß der Frequenzbereich, den Menschen bei normalen Schalldrücken unterhalb von 80 dB SPL wahrnehmen, bei 20 Hz - 20 kHz liegt. Die absoluten Hörschwellen zeigen einen abrupten Anstieg oberhalb von 15 kHz und erreichen ca. 80 dB SPL bei 20 kHz. Bei 24 kHz und darüber liegen die Werte oberhalb von 90 dB SPL. Einige Versuchspersonen können Töne von bis zu 28 kHz wahrnehmen, bei Pegeln oberhalb von 100 dB SPL.

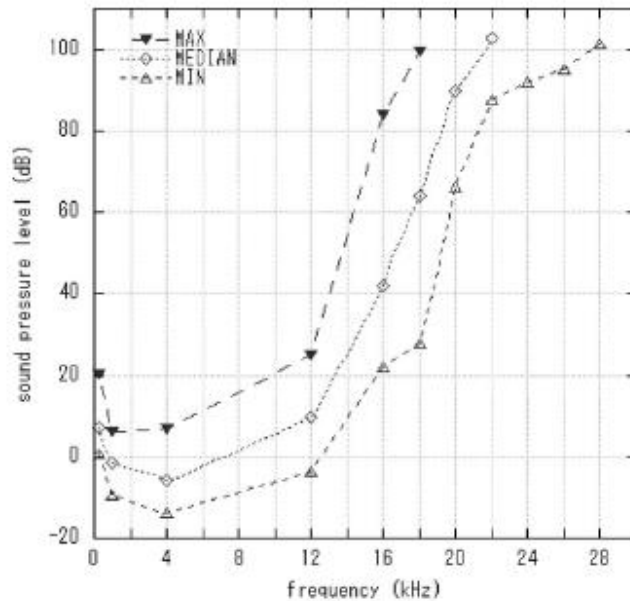


Fig. 3 aus Ashihara “**Hearing thresholds for pure tones above 16 kHz**”, The Journal of the Acoustical Society of America 2007, Vol. 122, No. 3, S. EL52-EL57

Ultraschall bis zu 120 kHz kann mittels Leitung über die Schädelknochen wahrgenommen werden. Jedoch ist dafür eine Ultraschallquelle nötig, z.B. ein keramischer Vibrator, welcher direkt am Schädelknochen befestigt ist (Nishimura et al., “**Ultrasonic masker clarifies ultrasonic perception in man**”, Hearing Research 2003, Vol. 175, S.171-177)

Hochauflösende Audioformate wie SACD oder DVD-A haben einen Frequenzumfang von bis zu 100 bzw. 96 kHz. Diese Formate sind bis heute auf dem Massenmarkt nicht akzeptiert, sodaß wissenschaftliche Untersuchungen bzgl. Ultraschallwahrnehmung anscheinend aus ausschliesslich medizinischen Gründen (z.B. Behandlung von Tinnitus, Taubheitsdiagnose, Meniere-Krankheit, lärmbedingter Gehörverlust, Hörgeräte) durchgeführt werden (Nishimura et al. 2003).

Einige Untersuchungen sind jedoch speziell im Kontext der Musikwiedergabe durchgeführt worden, sodaß es interessant ist, sich diese Untersuchungen näher anzuschauen. Im weiteren wird nur auf die physiologischen Experimente eingegangen, nicht auf psychologische oder Verhaltensexperimente. Diese hatten als Ergebnis, daß der Klang mit Ultraschallanteilen als angenehmer und ein höherer

Lautstärkepegel als komfortabel empfunden wurde. Einige diese Experimente wurden als Blindversuch durchgeführt und die Versuchspersonen wurden über den Zweck des Versuchs nicht informiert.

Muraoka et al., **“Examination of audio-bandwidth requirements for optimum sound signal transmission”**, Journal of the Audio Engineering Society 1981, S.2

Im Zusammenhang mit der oberen Grenze der Bandbreite von Audiokomponenten wurden zwei Fragen gestellt:

1. Ist 20 kHz ausreichend, um die originale Klangqualität zu gewährleisten
2. Wo liegt der Schwellenwert für einen Tiefpass?

Experiment 1 (Frage 1):

Anlage: Tonbandgerät, Endverstärker, Lautsprecher (nicht näher spezifiziert).

Testsignal: Rockmusik: Zerosen “asphalt” (1976), 1. Kopie vom Masterband , JVC SJX-10146, A-Seite, Titel 1-4

„Es stellte sich heraus, daß es nicht so sehr darauf ankam, welches Signal verwendet wurde (Musik (live oder aufgenommen), Rauschen), als vielmehr darauf, wie hoch der Anteil an hochfrequenten Signalkomponenten war. In Folge wurde ausschliesslich Musik verwendet.“

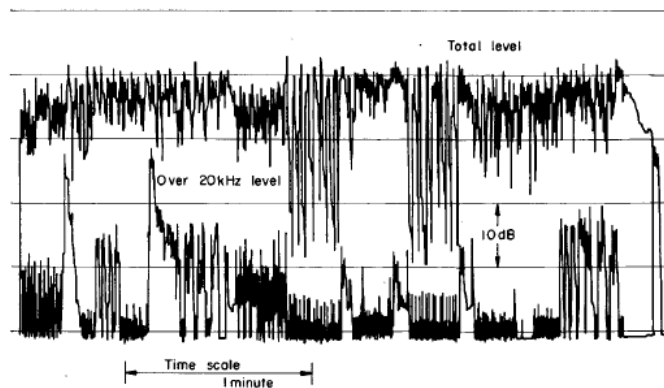


Fig. 4. Level variation of program source.

Die Hörtests wurden in einem hinsichtlich der Raummoden optimierten Raum durchgeführt, Nachhallzeit war 0.4 s, Schallpegel ca. 90 dB

„Die Ergebnisse deuten darauf hin, daß die kritische Frequenz bei 15 kHz liegt, wodurch die die Ergebnisse der Arbeiten von Snow und Plenge bestätigt werden.“

Snow, **„Audible frequency ranges of music, speech and noise“**, Journal of the Acoustical Society of America 1931, Vol. 3, S.155

Plenge et al., "Which bandwidth is necessary for optimal sound transmission", 62. Audio Engineering Society Convention 1979, Preprint No. 1449

“Bei den Toningenieuren unter den Versuchspersonen lagen die kritische Frequenz bei 18 bzw. 20 kHz, was jedoch nicht garantiert, daß alle Toningenieure derart aussergewöhnliche Werte erreichen.“

Experiment 2 (Frage 2):

Anlage: RC-Oszillator, Endverstärker, Lautsprecher aus Experiment 1
Testsignal: Gleitender Sinuston

Die Versuche wurden im schalltoten Raum durchgeführt, Pegel waren 70, 80, 90 dB.

“Die mit 70 dB Pegel ermittelten Schwellenwerte wurden als ausreichend akkurat erachtet. Bei 80 und 90 dB jedoch deuteten einige Versuchspersonen an, daß die Beurteilung weniger auf dem Testsignal selbst basierte, als vielmehr auf Phänomenen wie Druckgefühl, Kopfschmerzen, Ohrklingeln, sodaß die Gültigkeit der Resultate dieser Versuche zweifelhaft erscheint. Dies führte zu der Schlussfolgerung, daß die Hörschwelle im allgemeinen bei ca. 16 kHz liegt, und daß die oberste Hörschwelle bei ca. 20 kHz liegt.“

“Zusammenfassend sind die Anforderungen bzgl. Bandbreite von Audiokomponenten wie folgt:

- 1) Eine obere Frequenz von 15 kHz kann im allgemeinen als ausreichend erachtet werden
- 2) Das Erkennen eines 20 kHz-Tiefpasses ist nicht einfach, selbst nicht für geübte Hörer, dies trotz der Tatsache, daß die Hörschwellen für reine Sinustöne bei ca. 20 kHz liegt.“

Ashihara et al., "Detection threshold for tones about 22 kHz", 110. Audio Engineering Society Convention 2001, Preprint No. 5401

Anlage: Victor SX-V05 Lautsprecher, Luxman L-507s, Accuphase E-406
Testsignal: 1. Experiment: Komplexer Ton aus ungeraden harmonischen Obertönen (3. -19. Ordnung) eines 2 kHz Grundtons, die Obertöne 3.-9. Ordnung werden als Grundkomponente, die Obertöne 11.-19. Ordnung als Zielkomponenten bezeichnet

Das Referenzsignal wurde präsentiert, gefolgt von 2 Testsignalen. Die Aufgabe war es zu beurteilen, welches der beiden Testsignale mit der Referenz identisch war.

1. Experiment: Mono

- a) Einzellautsprecher: Grundkomponente + Zielkomponenten aus LS 1
- b) 6 Lautsprecher, Grundkomponente via LS 1, Zielkomponenten getrennt via LS 2-6

Im Fall a) waren 80% , im Fall b) 0%. der Antworten korrekt. Als Ursache wurden Intermodulationsverzerrungen im hörbaren Bereich festgestellt, die nur dann

vorhanden waren, wenn Grundkomponente + Zielkomponenten über einen einzigen Lautsprecher wiedergegeben wurden (siehe Fig. 3).

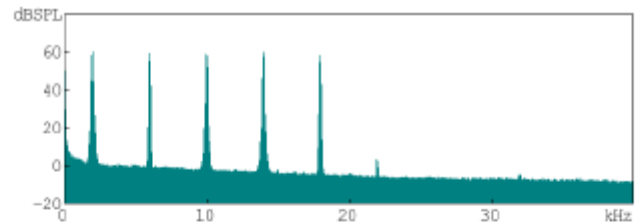


Fig. 2 Power-spectrum of the stimuli without target components

Fig.2 zeigt das Spektrum der Grundkomponente, Fig.3 und Fig.4 das Spektrum des Testsignals inklusive der Zielkomponenten für Fall a) bzw. Fall b),

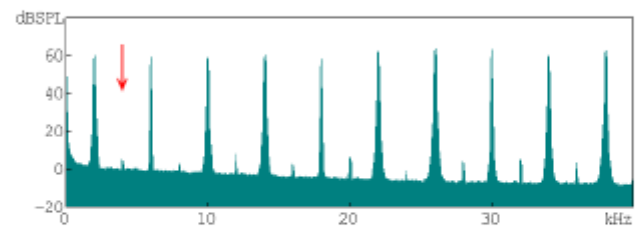


Fig. 3 Stimuli with the target components in the single-loudspeaker condition

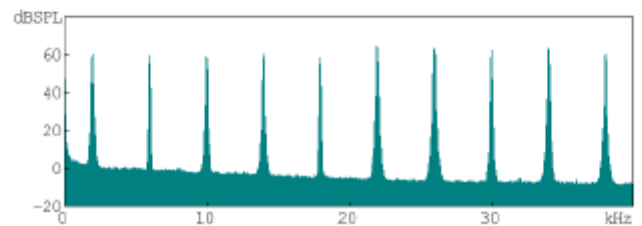


Fig. 4 Stimuli with the target components in the 6-loudspeaker condition

2. Experiment : Stereo

- a) Grundkomponente aus beiden LS, Zielkomponenten nur aus rechtem LS
- b) Grundkomponenten aus beiden LS, Zielkomponenten getrennt aus 4 zusätzlichen LS

Im Fall a) konnten alle Testpersonen die Stimuli mit bzw. ohne Zielkomponenten unterscheiden. Im Fall b), wo keine Intermodulationsverzerrungen auftreten konnten, konnte niemand die Stimuli unterscheiden.

“Es wurde gezeigt, daß es in den Fällen, wo experimentelle Artefakte eliminiert werden, extrem schwierig sein würde, Ultraschall wahrzunehmen. Ultraschall hat vermutlich geringen Einfluss auf Abbildung und Lokalisation“.

D. Griesinger, “**Perception of mid frequency and high frequency intermodulation distortion in loudspeakers and its relationship to high-definition audio**”, 24. International Audio Engineering Society Conference 2003, Banff, Canada

www.davidgriesinger.com/intermod.ppt

In diesem Vortrag diskutiert Griesinger obenstehendes paper von Ashihara.

“Die Auswahl der Testsignale hat maximale (mögliche) Wahrnehmbarkeit eines Ultraschallsignals zur Folge,“

“Der Pegel der Ultraschallanteile war genau so hoch wie der Pegel der Grundkomponente. Bei nahezu allen gewöhnlichen Schallquellen ist der Pegel der Ultraschallanteile niedriger.“

Griesinger führte selber einige Experimente durch: “Ergebnis: nichts signifikantes wird wahrgenommen. Kein Unterschied wurde wahrgenommen zw. Signalen mit und ohne Ultraschallanteil. Als ausschliesslich Ultraschallsignale mit hohem Pegel gespielt wurden, wurde Intermodulationsverzerrung wahrgenommen bei Pegeln, die mit Verstärkerklirr übereinstimmen.“

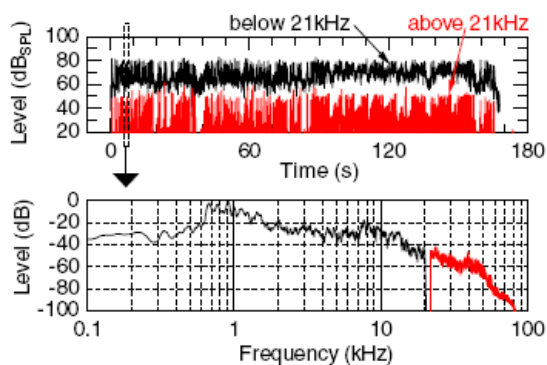
Nishiguchi et al., “**Perceptual discrimination between music sounds with and without very high frequency components**”, 115. Audio Engineering Society Convention 2003, Preprint No. 5876

Anlage:

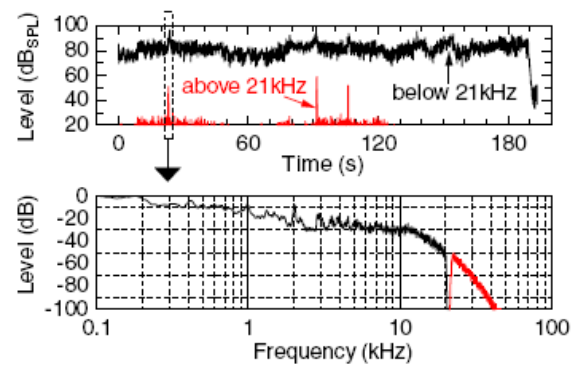
20Hz-21kHz: D/A-Wandler dcs 954, Marantz PA02, B&W 801

>21 kHz: D/A-Wandler dcs 954, Sony FA777ES, Pioneer Super Tweeter

Stimulus: 20 verschiedenen Passagen mit verschiedenen Instrumenten (Schlagzeug, Saxophon, Gitarre, Flöte, Pikkolo, Cello, Geige, Gesang)



(a) No.1 - “Satsuma-Biwa”



(b) No. 15 - Full orchestra

Es wurde die Duo-Trio Methode benutzt:

Referenz R mit Ultraschallanteil

A, B: mit bzw. ohne Ultraschallanteil

Aufgabe war festzustellen, ob A und B mit R identisch waren.

Die Ergebnisse zeigten keinen signifikanten Unterschied zw. den einzelnen Stimuli, die Zahl der korrekten Antworten war für 3 Stimuli nahe an den festgelegten 66% Vertrauenswahrscheinlichkeit (5% Signifikanzniveau). Eine der Versuchspersonen erzielte eine Rate von 75% korrekter Antworten. Mit dieser Person wurden zusätzliche Tests durchgeführt, wobei keine statistisch signifikanten Resultate erzielt wurden.

„Auf Basis dieser Ergebnisse können wir die Möglichkeit, daß einige Versuchspersonen zw. Musikstimuli mit und ohne Ultraschallanteilen unterscheiden konnten, weder bestätigen noch verneinen.“

Hamasaki et al., “**Perceptual Discrimination of Very High Frequency Components in Musical Sound Recorded with a Newly Developed Wide Frequency Range Microphone**”, 117. Audio Engineering Society Convention 2004, Preprint No. 6298

Anlage:

20Hz-21kHz: D/A-Wandler dcs 954, Verstärker, B&W 801

>21 kHz: D/A-Wandler dcs 954, Amplifier, Pioneer Super Tweeter

Stimulus:

Streichquartett

Chikuzen-Biwa + weiblicher Erzähler

Harpsichord

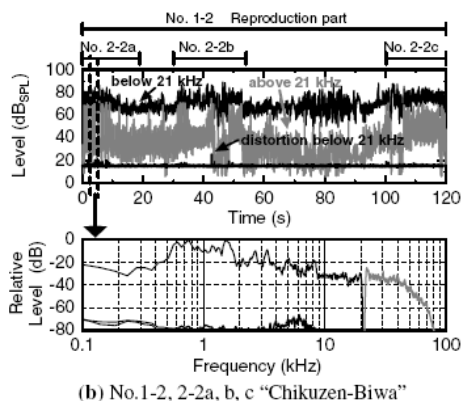
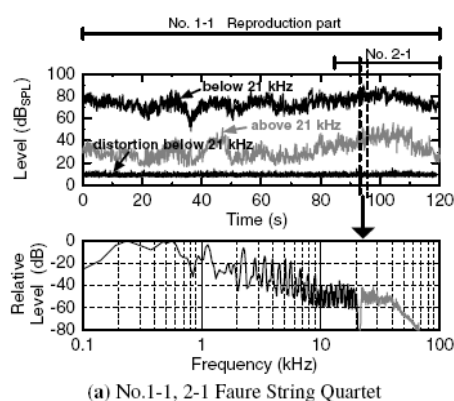
Alle Stücke mit 100 kHz Mikrophon aufgezeichnet.

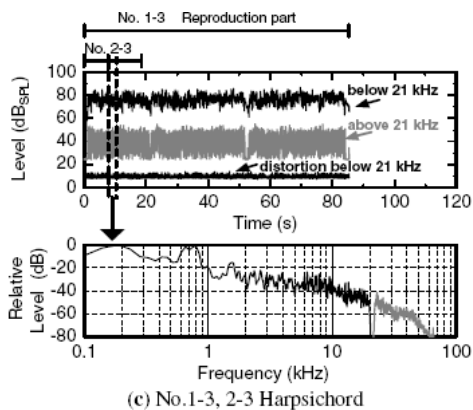
Es wurde die Paar-Methode benutzt:

1. ein Stück des Paares hatte den Ultraschallanteil, das andere nicht.

2. keines der beiden Stücke des Paares hatte einen Ultraschallanteil

Aufgabe war festzustellen, ob die beiden Stücke eines Paares gleich waren oder nicht.





Experiment 1: Zwei der Versuchspersonen erzielten eine Rate von über 70% korrekter Antworten mit Chikuzen-Biwa als Stimulus.

Experiment 2: Stimulus war ausschliesslich Chikuzen-Biwa, die Signaldauer war 20 s anstelle von 90-120 s in Experiment 1.

Kein signifikantes Resultat wurde erzielt. Dies deutet darauf hin, daß die Länge des Stimulus einen Einfluss haben könnte.

Die beiden Versuchspersonen wurden audiometrisch getestet: bei 22 kHz lag die Wahrnehmungsschwelle oberhalb von 90 dB. Nichtlineare Verzerrungen wurden gemessen und konnten als mögliche Quelle ausgeschlossen werden.

“Zwei Versuchspersonen, welche reine Sinustöne oberhalb von 22 kHz nicht mehr hören konnten, konnten zw. den Teststimuli mit und ohne Ultraschallanteilen unterscheiden, jedoch nur für den Stimulus mit dem höchsten Anteil an Ultraschall und nur für die längere Signaldauer. Wir haben keine Hypothese oder wissenschaftliche Erklärung für dieses Ergebnis: zusätzliche genaue Studien sind notwendig für weitere Diskussionen.“

Sugimoto et al, “**Human perception model for ultrasonic difference tones**”, Proceedings of the 24th IASTED International Conference, 16.-18. Feb. 2005, Innsbruck, Österreich

Es ist bekannt, daß Menschen den von zwei Ultraschalltönen erzeugten Differenzton wahrnehmen können [Ishiuchi et al., “Difference tone produced by two ultrasonic components”, Proceedings of the 11th International Symposium on Biotelemetry, Sept. 1990, Yokohama, Japan].

Wenn Sinustöne von 40 und 42 kHz erzeugt werden, wird eine 2-kHz-Komponente wahrgenommen, welche wahrscheinlich direkt am Trommelfell erzeugt wird.

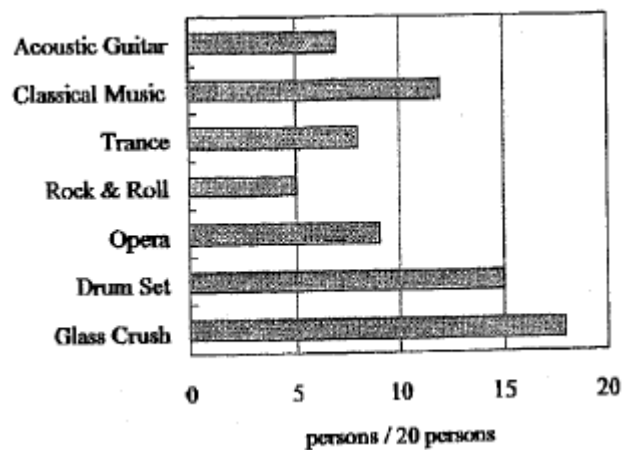
Anlage:

Fluency Audio System (D/A-Wandlersystem auf CD-Basis (Übertragungsbereich bis weit über 30 kHz))

Stimulus: Zerstoßen von Glas, Schlagzeug, Oper, Rock n'Roll, Trance, Klassik, akustische Gitarre

Aufgabe war, das Fluency-System mit einem herkömmlichen zu vergleichen und hinsichtlich verschiedener subjektiver Aspekte, insbesondere der Realitätsnähe, zu beurteilen.

Bei den Signalen, die einen hohen Anteil an Ultraschall haben, nämlich Zerstoßen von Glas und Schlagzeug, wurde das Fluency-System deutlich als realitätsnäher beurteilt.



“Es konnte deutlich beobachtet werden, daß das Hinzufügen von Ultraschallanteilen einen Unterschied macht. Es hat keinen Sinn, zu sagen, daß Menschen Ultraschall an sich hören können, Dennoch, die Autoren sind der Meinung, daß wir den durch zwei Ultraschalltöne erzeugten Differenzton wahrnehmen können, und dies ist einer der Gründe, warum Ultraschallanteile benötigt werden.”

Higuchi et al, “**Ultrasound influence on impression evaluation of music**”, IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing, 2009

Für die Experimente benutzt wurde ein spezieller D/A-Wandler (F-DAC), der dem von Sugimoto et al. (2005) benutzten vermutlich identisch ist. Dieser Wandler fügt die bei Compact Disc verlorengegangenen Ultraschallanteile wieder hinzu.

Auch in diesem Artikel wird die Tatsache, daß Töne im Ultraschallbereich Differenzöne im hörbaren Bereich erzeugen, als Grund für die Wahrnehmbarkeit für Ultraschall genannt.

Im Hörtest wird das vom CD-Spieler (Luxman DU-10) kommende Signal durch einen normalen Wandler (S-DAC) oder durch den speziellen Wandler (F-DAC) geleitet, und dann den aktiven Lautsprechern (Genelec 1038A) zugeführt. Als Testsignale wurde klassische Musik und Schlagzeug verwendet, getestet wurde in einem Studio des NHK mit konzertsaalähnlicher Akustik. Die Frequenzgänge der beiden Wandler im Bereich bis 20 KHz waren leicht unterschiedlich! Nichtlineares Verhalten von Endverstärker und Lautsprecher wurde nicht berücksichtigt.

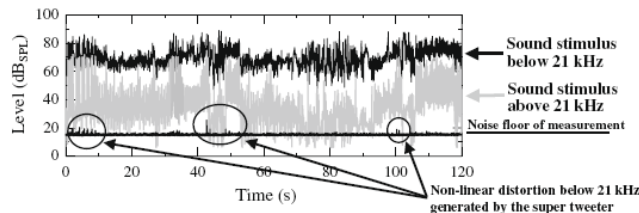
Zur Beurteilung des Unterschiedes wurden 16 Paare klangbeschreibender Adjektive wie z.B. sacht – hart, scharf - flach, natürlich - künstlich benutzt, mit einer Einstufung auf einer Skala von -2 bis 2.

Bei Schlagzeug konnten die beiden Wandler gut (89%) unterschieden werden, bei klassischer Musik weniger gut (76%).

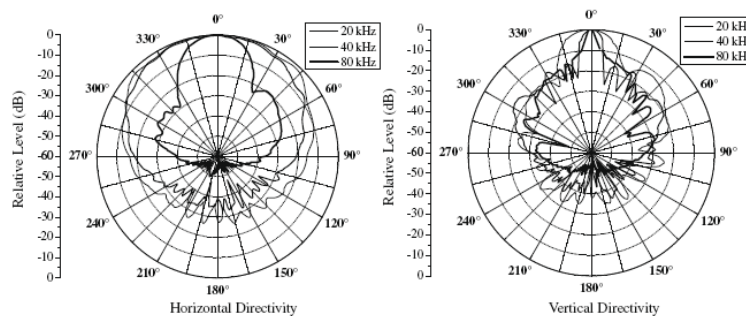
Nishiguchi et al., „**Perceptual discrimination of very high frequency components in wide frequency range musical sound**“, Applied Acoustics 2009, Vol. 70, S.921

Dieser Artikel kombiniert die Inhalte von Nishiguchi et al. 2003 und Hamaski et al. 2004.

Zusätzlich wurden Intermodulationsverzerrungen und Abstrahlverhalten des Pioneer Supertweeter bestimmt.



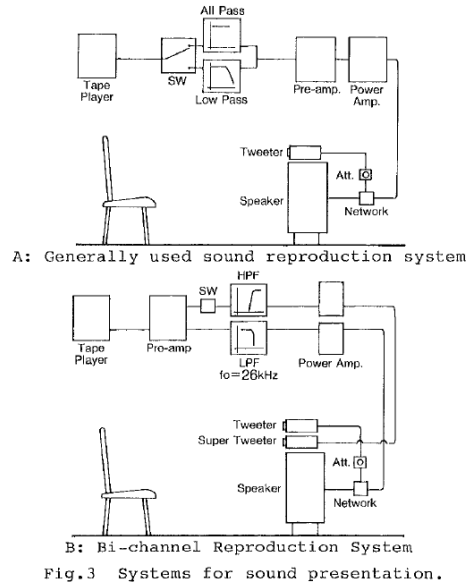
Der Verzerrungspegel am Hörplatz war 20-25 dB SPL und wurde als vernachlässigbar eingestuft.



Während das horizontale Abstrahlverhalten recht weit ist (bei 20 kHz ca. $\pm 50^\circ$, -3dB, bei 80 kHz ca. $\pm 8^\circ$, -3dB), bündelt der Treiber in vertikaler Richtung recht stark (bei 20 kHz ca. $\pm 2^\circ$, -3 dB).

Hypersonischer Effekt

Oohashi et al., “**High frequency sound above the audible range affects brain electric activity and sound perception**”, 91. Audio Engineering Society Convention 1991, Preprint No. 3207

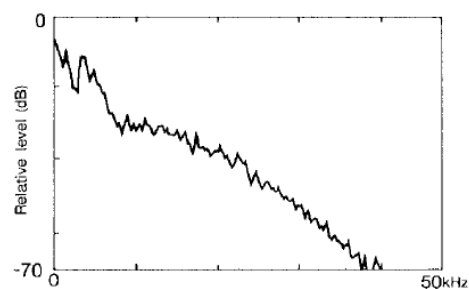


Anlage:

Zwei-Kanal, Frequenzweiche 170 dB/Oktave bei 26 kHz

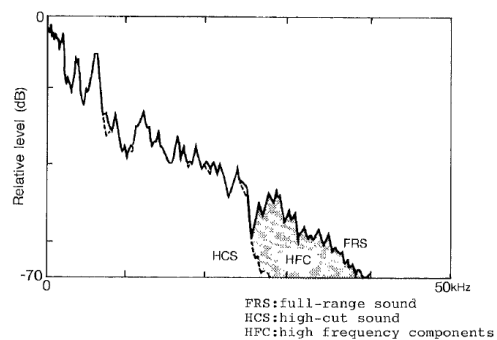
Stimulus: Gamelan-Musik “Gambang Kuta” (Bali), Ausschnitt von 205 Sekunden
Dauer, aufgenommen mit 100 kHz B&K-Mikrophon.

Gemitteltetes Spektrum des Ausschnitts



Gemitteltetes Spektrum des Ausschnitts
an der Hörposition

FRS: kompletter Frequenzbereich
LFC: Frequenzbereich bis 26 kHz (=HCS)
HFC: Frequenzbereich oberhalb von 26 kHz



Aufgenommen wurde ein EEG (Elektroencephalogramm) an 12 Schädelpunkten (10-20 Elektrodensystem), drahtloser Datentransfer, alpha-EEG im Frequenzbereich 8-13 Hz. Die Versuche wurden blind durchgeführt.

1. Bei FRS wurde bei 13 der 16 Versuchspersonen deutlich erhöhte alpha-Aktivität gemessen, bei LFC sank die Aktivität. Bei allen Versuchspersonen wurde eine Anfangszeitspanne von etwa 20 Sekunden beobachtet, bevor messbare alpha-Aktivität auftrat.

2. Bei HFC alleine zeigten 6 der 16 Versuchspersonen deutlich erhöhte alpha-Aktivität.

3. Bei simuliertem HFC (Weisses Rauschen mit 26 kHz Tiefpass) zeigten 2 der 16 Versuchspersonen deutlich erhöhte alpha-Aktivität.

Nakamura et al., **“Analysis of music-brain interaction with simultaneous measurement of regional cerebral blood flow and electroencephalogram beta rhythm in human subjects”**, Neuroscience Letters 275 (1999), S.222-226

Teststimulus: Indonesische Gamelan-Musik

Durchgeführt wurden PET-scans (Positron-Emissionstomographie zur Ermittlung des cerebralen Blutflusses rCBF) und EEG (10-20 Elektrodensystem), alpha- und beta-Frequenzbereiche.(8-13 bzw 13-30 Hz).

Beta-Aktivität war deutlich höher beim Abspielen der Musik. Keine deutliche Änderung der alpha-Aktivität.

Verglichen mit der Ruhestellung (keine Musik) verursachte das Abspielen von Musik eine Erhöhung des Blutflusses im Hörzentrum der beiden Schläfenlappen. Diese Erhöhung ist wahrscheinlich auf die Verarbeitung von Schallsignalen zurückzuführen.

Es wurde eine positive Korrelation zw. Blutfluss und beta-Aktivität im prämotorischen Kortex, Präfrontalkortex, in den vorderen und mittleren Bereichen des Präcuneus, sowie im vorderen gürtelförmigen Kortex gefunden, aber die Aktivierung dieser Bereiche beim Abspielen der Musik war nicht bedeutend. Beta-Aktivität ist ein Mass für kognitive Funktionen, eine Erhöhung der Aktivität kann somit auf eine Wechselwirkung zw. Musik und kognitiven Prozessen hindeuten.

Beim Abspielen von Musik reichten die Areale, in denen eine positive Korrelation zw. Blutfluss und beta-Aktivität beobachtet wurde, bis in den hinteren Bereich des Präcuneus, nahe der zw. Parietal- und Okzipitallappen liegenden Grosshirnfurche.

Oohashi et al., **“Inaudible high-frequency sounds affect brain activity: hypersonic effect”**, Journal of Neurophysiology 83 (2000), S. 3548-3558

Anlage

Zwei-Kanal, Frequenzweiche 170 dB/Oktave bei 26 kHz bzw. 80 dB/Oktave bei 22 kHz; Accuphase P-800/P-300L, Pioneer Lautsprecher

Stimulus: Gamelan Musik “Gambang Kuta” (Bali), Ausschnitt von 200 Sekunden
Dauer

Experimente:

1. kompletter Frequenzbereich (FRS), Frequenzbereich bis 26 kHz (LFC), kein Stimulus (Stille), Versuchspersonen hatten die Augen geschlossen

Alpha-Aktivität war im EEG war deutlich höher bei FRS als bei LFC oder Stille.

2. kompletter Frequenzbereich (FRS), Frequenzbereich bis 22 kHz (LFC), Frequenzbereich oberhalb 22 kHz (HFC), kein Stimulus (Stille), Versuchspersonen hatten die Augen geöffnet

Alpha-Aktivität war EEG war deutlich höher bei FRS als bei LFC, HFC oder Stille.

Bei allen Versuchspersonen stieg die alpha-Aktivität innerhalb der ersten 20-30 Sekunden allmählich an, bis nach 40-70 Sekunden der Höchstwert erreicht wurde.

Es wurden ebenfalls PET-Messungen durchgeführt, aber später als ungeeignet für diese Art von Untersuchungen befunden (die Geräte selber erzeugen Geräusche mit Ultraschallanteilen, die maskierend oder störend wirken können).

Der Artikel aus J. Neurophysiology wurde im Audio Asylum diskutiert und Kal Rubinson, selber Neurologe, hatte einige kritische Anmerkungen:

1. Der FRS-Stimulus war eine akustische und keine elektronische Kombination der einzelnen Frequenzbereiche, sodaß Differenztonbildung möglich ist (Kal bezieht sich hierbei auf den Artikel von Sugimoto et al., 2005)

2. Es bestand eine zeitliche Verzögerung zw. der Präsentation des Stimulus und der gemessenen Reaktion im EEG. Eine bessere zeitliche Korrelation zw. Stimulus und Reaktion wäre wünschenswert. Ist die spektrale Verteilung der Gamelan-Musik in zeitliche Hinsicht gleichmässig ?

3. Die statistischen Daten von Thalamus und Hirnstamm sind einseitig und asymmetrisch, wohingegen es bekannt ist, daß das Gehör bilateral auf Hirnstamm, Thalamus und Audio-Kortex projiziert, wie man aus PET-Daten der Kortex-Aktivität sehen kann. Lt. Oohashi jedoch wurde nur im linken Thalamus Aktivität beobachtet.

<http://www.audioasylum.com/audio/general/messages/459943.html>

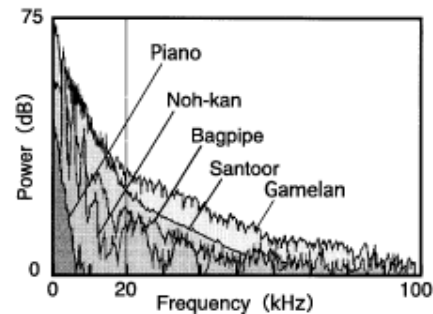
Oohashi et al., “**Multidisciplinary study on the hypersonic effect**”, International Congress Series 1226 (2002), S.27-42

Anlage

Zweikanal, Frequenzweiche bei 22/26 kHz

Stimulus: Gamelan-Musik (Bali)

“Fig.3B zeigt das über 10 Sekunden gemittelte Spektrum verschiedener Instrumente. Obwohl Klavier sehr wenig hochfrequente Anteile hat, weisen Instrumente wie das Gamelan (Bali, Indonesien) einen bedeutenden Anteil oberhalb von 20 kHz auf“.



Vier verschiedene Stimuli wurden präsentiert:

- 1) FRS = kompletter Frequenzbereich = HFC + LFC
- 2) LFC = Frequenzbereich unterhalb von 22 kHz
- 3) HFC = Frequenzbereich oberhalb von 22 kHz
- 4) Stille = kein Stimulus

“Im Blindversuch konnte keine der Versuchspersonen HFC von Stille unterscheiden.”

PET-Messungen des regionalen zerebralen Blutflusses rCBF

Bei FRS wurden tiefliegende Gehirnbereiche (Hirnstamm, seitlicher Teil des linken Thalamus) deutlich mehr aktiviert als bei LFC. Dieselben Bereiche zeigten ebenfalls erhöhten Blutfluss verglichen mit HFC oder Stille. Bei LFC zeigten diese Bereiche allerdings eine Abnahme des Blutflusses. Bei Vergleich von FRS und LFC mit HFC und Stille zeigten die primären und sekundären Bereiche des Audio-Kortex deutlich erhöhten Blutfluss. Bei Vergleich von HFC mit Stille wurde in keinem Hirnbereich ein signifikanter Unterschied festgestellt.

EEG

Bei FRS wurde erhöhtes alpha-EEG in den Okzipital- und Parietalbereichen festgestellt. Alpha-EEG im Okzipitalbereich war bei FRS signifikant höher als bei LFC oder Stille und zeigte einen allmählichen Anstieg während der ersten 10-30 Sekunden. Die Aktivität dauerte bis ungefähr 100 Sekunden nach Abschalten der Ultraschallanteile HFC an.

Die Autoren ziehen folgenden Schluss:

Obwohl Ultraschallanteile HFC nicht als solche vom Gehör wahrgenommen wurden, wurden bei Hörern verschiedene Reaktionen (alpha-EEG, zerebraler Blutfluss) festgestellt, wenn der Stimulus solche Schallanteile enthielt.

Obwohl die diesen Reaktionen zugrundeliegenden Mechanismen noch unbekannt sind, müssen wir mindestens zwei mögliche Erklärungen berücksichtigen: Ultraschallanteile ändern möglicherweise die Reaktionscharakteristik des Trommelfells und erzeugen eine realistischere Wahrnehmung (Klang wurde als angenehmer empfunden).

Ultraschallanteile werden möglicherweise über andere Wege als dem normalen (Luftleitung – Gehör) dem Zentralnervensystem zugeleitet. Es wurde berichtet, daß auf Ultraschall aufmodulierte menschliche Stimme den primären Audio-Kortex aktiviert und von normalhörenden und tauben Versuchspersonen wahrgenommen wird (Schallleitung über den Schädelknochen, keramischer Vibrator). Obwohl wir nicht den Schluss ziehen können, daß die Mechanismen des Ultraschallhörens für den hypersonischen Effekt (erhöhtes alpha-EEG, erhöhter zerebraler Blutfluss, angenehmere Klangempfindung) verantwortlich sind, ist es bemerkenswert, daß Ultraschall das Zentralnervensystem erreicht.

Yagi et al., **“Auditory display for deep brain activation: hypersonic effect”**, Proceedings of the 2002 International Conference on Auditory Display, Kyoto, Japan, 2.-5. Juli 2002

Den Autoren zufolge enthalten natürliche Umgebungen wie tropischer Regenwald Schalle mit Anteilen oberhalb von 100 kHz. Vom anthropogenetischen Standpunkt aus gesehen scheint es logisch, daß der Mensch eine bestimmte Sensibilität für Ultraschall entwickelt.

Der Artikel beschreibt im weiteren ein auf SACD basiertes System zur Erzeugung des hypersonischen Effekts.

Yagi et al., **“Modulatory effect of inaudible high-frequency sounds on human acoustic perception”**, Neuroscience Letters 351 (2003), S.191-195

Anlage

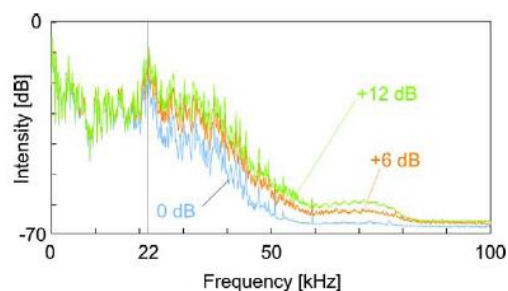
Zweikanal, Frequenzweiche 80 dB/Oktave bei 22 kHz

Stimulus: Gamelan Musik “Gambang Kuta” (Bali), Ausschnitt von 205 Sekunden

Dauer

Der Pegel des Ultraschallanteils HFC wurde am Vorverstärker auf 0, +6, +12 dB eingestellt, Pegel des Anteils unterhalb 22 kHz war konstant.

Gemitteltetes Spektrum am Hörplatz



Bei +6 dB wurde erhöhtes alpha-EEG festgestellt. Der Unterschied zw. +6 und +12 dB war statistisch nicht signifikant. Die gemittelten Werte im Okzipitalbereich nahmen bei +12 dB ab.

Die Resultate zeigen, daß ein höherer Ultraschallanteil den als angenehm empfundenen absoluten Schallpegel erhöht, der subjektive Eindruck wird verbessert, in Einklang mit einer Zunahme des alpha-EEGs. Die Resultate deuten darauf hin, daß der Effekt nicht linear mit dem Pegel des Ultraschallanteils ansteigt, sondern einen optimalen Wert hat.

Oohashi et al., “The role of biological systems other than auditory air-conduction in the emergence of the hypersonic effect”, Brain Research 1073-1074 (2006), S. 339-347

Anlage

Zweikanal, Frequenzweche 80 dB/Oktave bei 22 kHz, die Ultraschallteile HFC wurden entweder separat über Ohrhörer oder zusammen mit LFC über Lautsprecher wiedergegeben.

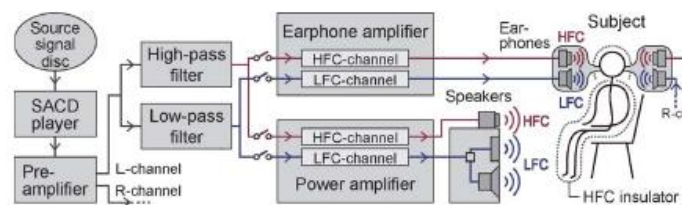


Fig. 2 - The experimental setup employed for this study. Using high-pass and low-pass filters with a crossover frequency of 22 kHz and a cut-off attenuation of 80 dB/octave, each of the source stereo signals was divided into LFC and HFC, and the two signals were independently amplified. They were presented either separately or simultaneously through speakers or earphones.

Stimulus: Gamelan Musik “Gambang Kuta” (Bali), Ausschnitt von 400 Sekunden

Die Versuchspersonen hatten mehr als 5 Jahre Erfahrung mit Ultraschall-Experimenten. Die Versuche wurden blind durchgeführt.

EEG-Messungen

1. LFC und HFC wurden über Lautsprecher wiedergegeben, alpha-EEG war deutlich erhöht als wenn nur LFC wiedergegeben wurde. Die Erhöhung der Hirnaktivität war insbesondere im letzteren Teil des 400 Sekunden dauernden Ausschnitts festzustellen.
2. Präsentation ausschliesslich über Ohrhörer, kein Unterschied zw. LFC+HFC und LFC alleine.
3. LFC über Ohrhörer, HFC über Lautsprecher, deutliche Unterschiede in Aktivität zw. LFC+HFC und LFC alleine.

4. HFC über Lautsprecher, Körper und Kopf schallisoliert (Kleidung + Helm), Anstieg der Aktivität deutlich unterdrückt.

„Diese Daten zeigen deutlich, daß der hypersonische Effekt nur dann beobachtet wurde, wenn Körper und Kopf dem Ultraschall ausgesetzt waren. Das Konzept der vorliegenden Experimente war auf die Tatsache gerichtet, daß der Effekt nicht durch Ultraschall allein bewirkt wird, sondern nur dann, wenn Ultraschall und hörbarer Schall zusammen wiedergegeben wurde. Die Tatsache, daß bei Präsentation von LFC und HFC durch Ohrhörer kein hypersonischer Effekt beobachtet wurde, zeigt, daß das auf Luftschall reagierende auditive System nicht auf Ultraschall reagiert.“

Die Autoren ziehen den Schluss, daß die Resultate nicht durch das luftschallempfindliche Gehör erklärt werden kann, sondern eher durch einen bisher noch unbekanntem Mechanismus.

Omata et al., “A psychoacoustic measurement and ABR for the sound signals in the frequency range between 10 kHz and 24 kHz”, 125th Audio Engineering Society Convention 2008, Preprint No. 7566

Gemessen wurden die Wahrnehmungsschwellen eines Testsignals (Sinustöne 10-30 kHz in 2 kHz-Schritten), mit 2 Hz amplitudenmoduliert) in Anwesenheit eines maskierenden Signals (Rosa Rauschen).

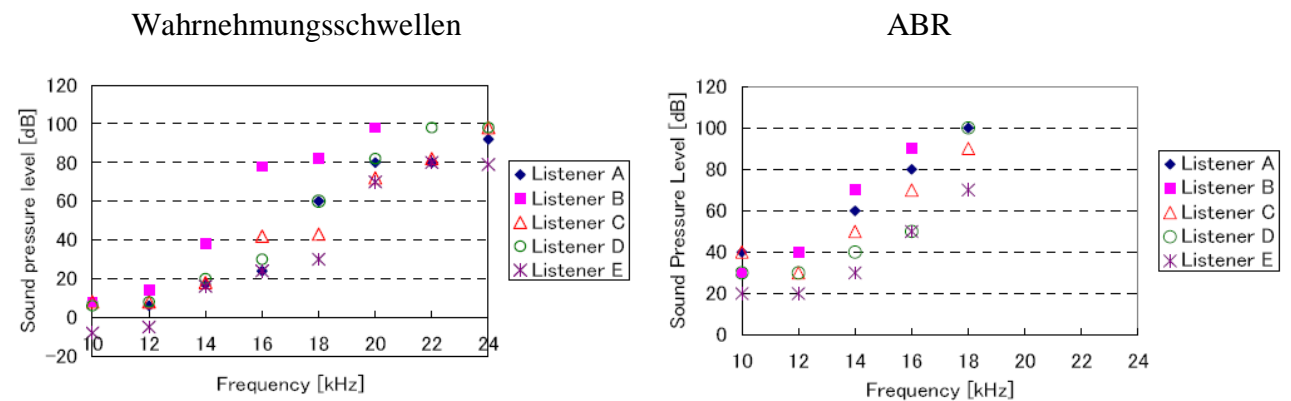
Gemessen wurde weiterhin die auditive Hirnstammantwort ABR eines anderen Testsignals (moduliertes Klicken mit einer Bandbreite von ca. 4 kHz) mit Elektroden an Positionen Cz, A, Fpz des 10-20 Systems. ABR misst im Hirnstamm durch das Testsignal erzeugte elektrische Potentiale.

Anlage

Testsignal: Pioneer RT-R100 Lautsprecher, Audio Technica Pro 700 Kopfhörer
Rauschen: Denon SC-A33-M Lautsprecher , Audio Technica Pro 700 Kopfhörer

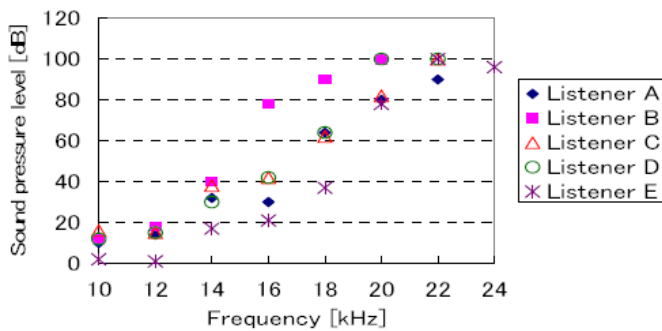
Abstand des Lautsprechers vom Ohr: 50 cm

Test mit Lautsprecher

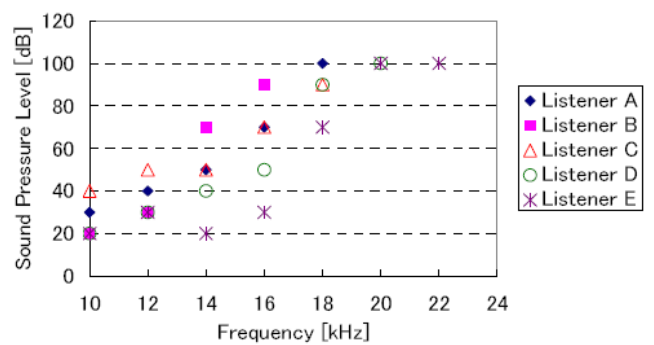


Test mit Kopfhörer

Wahrnehmungsschwellen



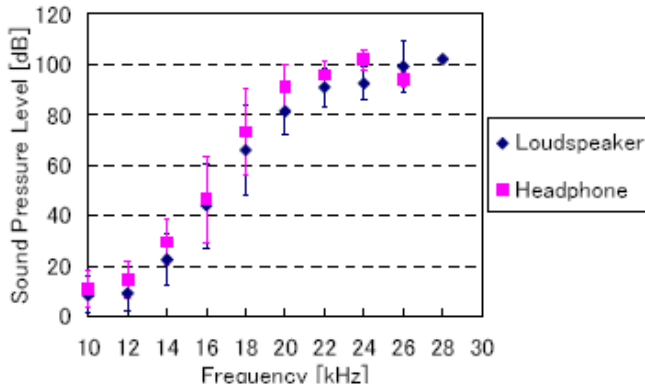
ABR



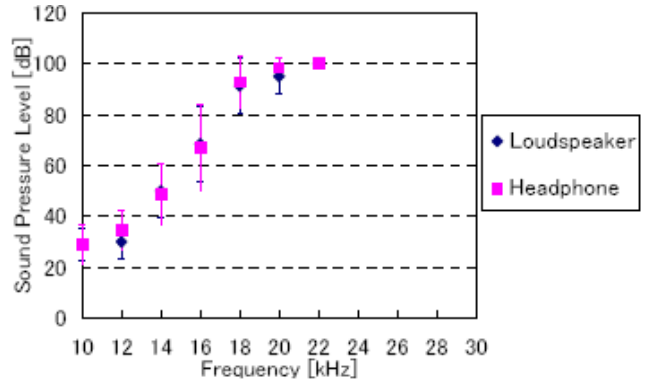
Koubon et al, “**Psychoacoustic measurement and auditory brainstem response in the frequency range between 10 kHz and 30 kHz**”, 129th Audio Engineering Society Convention 2010, Preprint No. 8294

Der Testaufbau war der gleiche wie in Omata et al. (2008), der getestete Frequenzbereich war größer, die Zahl der Testpersonen war 20 statt 5.

Wahrnehmungsschwellen



ABR



Bei Wiedergabe des Testsignals über Lautsprecher konnte im ersten Test (bis 24 kHz) oberhalb von 18 kHz, im zweiten Test (bis 30 kHz) oberhalb von 20 kHz keine Hirnstammreaktion gemessen werden, bei Wiedergabe über Kopfhörer war die Grenze in beiden Tests bei 22 kHz. Um oberhalb von 20 kHz eine Reaktion messen zu können, waren Pegel von 90 dB SPL (Kopfhörer) und höher (Lautsprecher in 50 cm Abstand vom Ohr) notwendig.

Fukushima et al., “**Frequencies of inaudible high-frequency sounds differentially affect brain activity: positive and negative hypersonic effects**”, PLOS ONE 2014, Vol. 9, No. 4, e95464

Ein Ausschnitt von 200 Sekunden von Gamelan Musik wurde über eine 2-Kanal-Anlage, die auf der von Oohashi 2000 basiert, wiedergegeben, wobei bei 16 kHz mit 80 dB/Oktave getrennt wurde.

EEG-Messungen wurden in derselben Weise durchgeführt wie in Oohashi 2000, Yagi 2003, Oohashi 2006.

Experiment 1: der Frequenzbereich oberhalb von 16 kHz (HFC) wurde bei 48 khz zusätzlich aufgetrennt, die beiden Bereiche LFC + HFC₁₆₋₄₈ und LFC + HFC₄₈₊ wurden mit dem Grundbereich ohne Hochtonanteil (LFC) verglichen.

Bei 6 von 11 Testpersonen wurde für LFC + HFC₁₆₋₄₈ eine niedrigere alpha-Aktivität festgestellt als für den Grundbereich LFC. Bei 7 von 11 Testpersonen wurde für LFC + HFC₄₈₊ eine höhere alpha-Aktivität festgestellt als für den Grundbereich LFC.

Experiment 2: der Frequenzbereich oberhalb von 16 kHz wurde in 10 Bereiche von je 8 kHz, der Bereich oberhalb von 96 kHz bei 112 kHz in 2 weitere Bereiche aufgetrennt. Die einzelnen Bereiche LFC + HFC wurden mit dem Grundbereich ohne Hochtonanteil (LFC) verglichen.

Für die beiden unteren Bereich LFC + HFC₁₆₋₂₄, LFC + HFC₂₄₋₃₂ wurde eine niedrigere, für die restlichen Bereiche oberhalb 32 kHz eine höhere alpha-Aktivität festgestellt als für den Grundbereich LFC (bei 8 von 10 bzw. 8 von 9 Testpersonen), mit einem Maximum für den Bereich LFC + HFC₈₀₋₈₈ (bei 8 von 9 Testpersonen) Die Effekte werden in folgenden negativer bzw. positiver hypersonischer Effekt genannt,

Lenhardt, “**Ultrasonic hearing in humans: applications for tinnitus treatment**”, Int. Tinnitus Journal 2003, Vol.9, No.2, S.69-75

Menschen können Ultraschall wahrnehmen, aber nur über Knochenleitung. Aus magnetoenzephalographischen Studien ist bekannt, daß bei Ultraschall Bereiche des Audio-Kortex aktiviert werden: Hosoi et al., “**Activation of the auditory cortex by ultrasound**”, The Lancet, Vol. 351, 14. Febr. 1998, S.496

Lenhardt: “Drei durch Beweise belegte Ansätze deuten darauf hin, daß Gehirnresonanz kritisch für die Wahrnehmung von Ultraschall ist. Unterstützung für eine Demodulationstheorie stammt aus sphärischen Hirnmodellen und psychoakustischen Messungen der Maskierung von hörbaren Frequenzen durch Ultraschall-Rauschen sowie Abgleichen der Tonhöhe von hörbarem Ultraschall mit gewöhnlichem Luftschall“.

“Ultraschall versetzt das Gehirn in erzwungene Schwingungen, und diese Schwingungen werden bei normalhörenden in der Hörschnecke wahrgenommen. Bei Hörverlust ist mehr Ultraschallenergie notwendig, um die Bewegung der Basilmembran bis in Bereiche mit intakten Haarzellen auszubreiten. Bei kompletter Taubheit bewegt die erhöhte Ultraschallenergie wahrscheinlich die Otolithenorgane, wobei das Sacculus stimuliert wird.

Lenhardt, **“Eyes as fenestrations to the ears: a novel mechanism for high-frequency and ultrasound hearing”**, Int. Tinnitus Journal 2007, Vol.13, No.1, S.3-10

“Direkt am Schädel (Schläfenbein, Hinterhauptbein, Stirn) aufgebrachtes Breitbandrauschen (5-70 kHz) erzeugt Vibrationen im Auge, mit einem Frequenzgang von 25-60 kHz. Wurde ein entsprechendes Rauschen (25-60 kHz) als Luftschall direkt auf das Auge aufgebracht, wurden im selben Frequenzband Vibrationen von Gehirn und Schädel gemessen.”

„Direkte Vibration des Gehirns kann durch Hirnflüssigkeit zur Hörschnecke geleitet werden. Leitung von Luftschall im Ultraschallbereich durch das Auge via Hirnflüssigkeit zum Ohr hilft uns, zwei Geheimnisse des erweiterten Hörbereiches des Menschen zu erklären.“

“Es gibt Argumente für einen separaten Weg für luftübertragenen Ultraschall, aber das letzte Stück des Weges ist dasselbe, da Ultraschall sowohl bei normalhörenden als auch bei tauben Hörern den Audio-Kortex aktiviert. Das Auge, mit seinem Übertragungsbereich von 25-60 kHz könnte Energie von Instrumenten, die im Ultraschallbereich abstrahlen (z.B. Becken) zum Ohr leiten und würde den auditiven Thalamus und andere Kernbereiche des Hörsinns aktivieren.

Lenhardt zieht den Schluss, daß die Deutung des Auges als Zugangstür des Ohrs für Ultraschall mit den vorliegenden Erkenntnissen übereinstimmt, und daß es nicht notwendig sei, nach bisher unbekanntem Zugangswegen zu suchen.

Zusammenfassend sind folgende Punkte anzumerken:

1. Einige Versuchspersonen können Töne bis zu 28 kHz wahrnehmen, bei sehr hohen Schallpegeln.
2. Ultraschall bis zu 120 kHz kann mittels Leitung über die Schädelknochen wahrgenommen werden. Dafür ist eine Ultraschallquelle nötig, z.B. ein keramischer Vibrator, welcher direkt am Schädelknochen befestigt ist. Wie beim luftübertragenen Schall, wird auch beim knochengeleiteten Ultraschall der Audio-Kortex aktiviert.
3. In den psychoakustischen Experimenten zum Hören von Ultraschall nahmen insgesamt 69 Versuchspersonen teil. In einem Fall erzielte eine Person in einem

ersten Experiment eine Quote richtiger Antworten von 75%, konnte jedoch in einem Folgeexperiment keine statistisch signifikante Trefferquote erreichen.

In einem zweiten Fall erzielten zwei Personen bei einer Stimulusdauer von 90-120 Sekunden eine Trefferquote oberhalb von 70%, konnten jedoch bei einer Stimulusdauer von 20 Sekunden keine statistisch signifikante Quote erreichen.

4. Wenn Ultraschallanteile über einen einzelnen Supertweeter wiedergegeben werden, können Intermodulationsverzerrungen im hörbaren Bereich erzeugt werden.

5. Supertweeter können sehr stark bündeln, die genaue Ausrichtung der akustischen Achse des Treibers auf Kopf/Ohr/Auge ist also kritisch.

6. Bei den Untersuchungen zum hypersonischen Effekt wurde nur japanische Versuchspersonen eingesetzt sowie ausschliesslich Gamelan-Musik als Stimulus verwendet, welche einen deutlich höheren Ultraschallanteil aufweist als z.B. Klavier.

7. Bei den EEG-Messungen wurde beobachtet, daß das alpha-EEG innerhalb der ersten 10-30 Sekunden allmählich zunahm, und nach Beendigung der Wiedergabe ca. 100 Sekunden anhielt. Oohashi gibt als einen der Gründe die relative lange Verweilzeit der Neurotransmitter an den synaptischen Knoten an.

8. Wird der Ultraschallanteil (Gamelan-Musik bzw. weisses Rauschen) alleine wiedergegeben, zeigt nur ein geringer Teil der Versuchspersonen deutlich erhöhte alpha-Aktivität.

9. Wird der Ultraschallanteil über Ohrhörer wiedergegeben oder werden bei Wiedergabe über Lautsprecher Körper und Kopf schallisoliert, ist keine erhöhte Aktivität im EEG zu beobachten. Eine Erklärung dafür könnten die Untersuchungen von Lenhardt liefern dahingehend, daß luftübertragener Ultraschall möglicherweise über das Auge und Hirnflüssigkeit zum Ohr geleitet wird.

Man kann aus den vorliegenden psychoakustischen Untersuchungen und der Messungen der Hirnaktivität im Grunde nur den Schluss ziehen, daß die Wahrnehmung luftübertragenen Ultraschalls weder bestätigt noch verneint werden kann. Martin Colloms zieht den Schluss, daß es nicht bewiesen sei, daß für Audiosysteme eine grössere Bandbreite notwendig sei (Colloms, "**Do we need an ultrasonic bandwidth for higher fidelity sound reproduction**", Proceedings of the Institute of Acoustics 2006, Vol. 28, Pt. 8).

Bei einigen Untersuchungen wurde der Pioneer PT-R9 Supertweeter benutzt. Obwohl bei 20 kHz das vertikale Fenster (0 bis -3 dB) bei typischen Hörabständen ca. 20-30 cm gross ist, ist nicht bekannt, ob ausserhalb der akustischen Achse des Tweeters Effekte wahrgenommen bzw. gemessen werden.

<http://www.pioneer.eu/eur/products/archive/PT-R9/index.html>