

Frequenzwahrnehmung von Ganzkörperschwingungen im Vergleich zur auditiven Wahrnehmung II

M. Ercan Altinsoy, Maik Stamm, Sebastian Merchel

Lehrstuhl für Kommunikationsakustik, Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 18, 01062 Dresden
E-Mail: ercan.altinsoy@tu-dresden.de

Einleitung

Der Mensch ist im Alltag vielfältigen Ganzkörperschwingungen ausgesetzt, die vorwiegend in Fahrzeugen, Flugzeugen, Schiffen und musikalischen Vorstellungen (Konzertsaal) auftreten. Die spektralen und zeitlichen Strukturen der Schwingungssignale spielen eine wichtige Rolle für die Beurteilung von Ganzkörperschwingungen. Dazu gehört an erster Stelle die Wahrnehmung der Frequenz.

Das Gehör verhält sich wie ein zeitvarianter Fourieranalysator. Durch die Arbeiten der Psychoakustiker kennt man heute grundlegende Zusammenhänge über die auditive Frequenzwahrnehmung und die Frequenzselektivität. Der Begriff Frequenzselektivität bezeichnet die Fähigkeit des auditorischen Systems, die Komponenten eines komplexen Klanges zu separieren. Es gibt unterschiedliche Ansätze zur Ermittlung der Form der auditorischen Filter, z.B. Power-Spektrum-Model, Tuningskurven oder Notched-Noise-Methode.

In dieser Arbeit, ausgehend von diesen Kenntnissen, wurde die Wahrnehmung von Ganzkörperschwingungsfrequenzen untersucht. Aus den Untersuchungen konnte eine Vielzahl von Erkenntnissen gewonnen werden (z.B. JNDF, Frequenzselektivität und Maskierungseffekte). In diesem Beitrag werden diese neuen Erkenntnisse aus dem Ganzkörperschwingungsbereich vorgestellt und mit den Erkenntnissen aus der auditiven Wahrnehmung verglichen.

Physik: Schall vs. Schwingung

Schall wird im Alltag gewöhnlich von Körperschwingungen erzeugt. Viele dieser Schwingungen werden von uns sowohl auditiv als auch taktil wahrgenommen [1].

In den Abbildungen 1 und 2 sind eine Luft- und Körperschallaufnahme in einem Konzertsaal „Audimax - Ruhr Universität Bochum“ dargestellt. Der Luftschall wurde an einem Zuhörerplatz mit einem Kunstkopf aufgenommen. Das Triaxial Deltatron Seat accelerometer Type 4515B von Brüel & Kjør wurde zum Ermitteln der Ganzkörperschwingungen, welche durch den Sitz in den Körper eingeleitet werden, verwendet. Als Aufnahmeort wurde der gleiche Zuhörerplatz ausgewählt.

Die starke Korrelation zwischen vibratorischem und akustischem Signal ist im Frequenz- aber auch im Zeitbereich gut erkennbar. Vor diesem Hintergrund stehen folgende Fragen im Raum: Besitzt die auditive und taktile Wahrnehmung Ähnlichkeiten bezüglich der Frequenz, wenn Schall und Schwingungen in der physikalischen Ebene so stark korrelieren? Welche Ähnlichkeiten sind das? Können wir die Erkenntnisse der Psychoakustik für die taktile (GKS) Wahrnehmung nutzen?

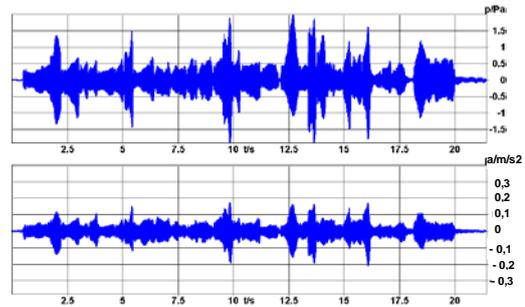


Abbildung 1: oben: zeitliche Sequenz einer Luftschallaufnahme von einem Orgelstück; unten: zeitliche Sequenz der Schwingungsaufnahme.

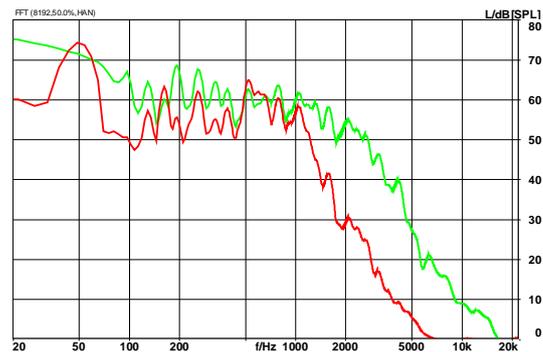


Abbildung 2: Korrelation zwischen akustischem und vibratorischem Signal am Sitz (FFT-Analyse, FFT-Länge 8192).

Physiologie: Auditiv vs. Taktile

Haarzellen gehören zur Klasse der Mechanorezeptoren. Sie reagieren auf die Auslenkung ihrer Stereozilien mit einer Veränderung ihres Membranpotentials. Tritt ein Schallsignal in das Innenohr ein, erzeugt es dort eine wandernde Welle. Diese Wanderwelle bestimmter Frequenz kann nur eine gewisse Stelle der Basilarmembran erregen. An den erregten Stellen der Basilarmembran kommt es durch die Auslenkungen zur Reizung spezialisierter Haarzellen. Innerhalb bestimmter Längenabschnitte der Membran, den sogenannten Frequenzgruppen oder auditorischen Filtern, werden diese Reize gemeinsam ausgewertet und in entsprechende Nervenimpulse codiert. Im Innenohr findet eine Frequenz-Orts-Transformation statt.

Über das somatosensorische System werden Vibrationen im Frequenzbereich von 0.4-1000 Hz wahrgenommen. Der Haut stehen vier Typen unterschiedlicher Sinneszellen zur Verfügung. Sie dienen als Sensoren für Intensität, Ge-

schwindigkeit oder Beschleunigung und befähigen den Menschen dadurch, zwischen Druck, Berührung und Vibration zu unterscheiden. Es gibt folgende Mechanorezeptoren in der Haut: die Merkel-Zellen, die Ruffini-Körperchen, die Meißner-Körperchen und die Pacini-Körperchen. Die Frequenzbereiche der Mechanorezeptoren sind in der Tabelle 1 gelistet.

Tabelle 1: Die Mechanorezeptoren.

Frequenzbereich	Mechanorezeptoren			
	Slowly adapting		Rapidly adapting	
	Ruffini ending (SA-II)	Merkel disks (SA-I)	Meissner corpuscle (RA)	Pacinian corpuscle (PC)
	0.4 - 100 Hz	5-15 Hz	10-60 Hz	50-1000 Hz

Psychophysik: Auditiv vs. Taktil

Die Hörschwelle ist frequenzabhängig. Besonders empfindlich ist das menschliche Gehör bei den Frequenzen zwischen 1000 und 3000 Hz (Abbildung 3).

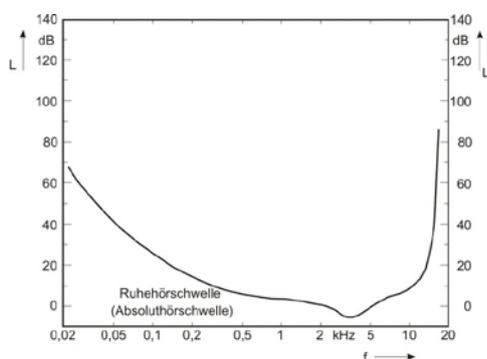


Abbildung 3: Hörschwelle (nach Stevens 1975).

Die Wahrnehmungsschwelle von Ganzkörpervibrationen ist frequenzabhängig, genauso wie die Hörschwelle (Abbildung 4).

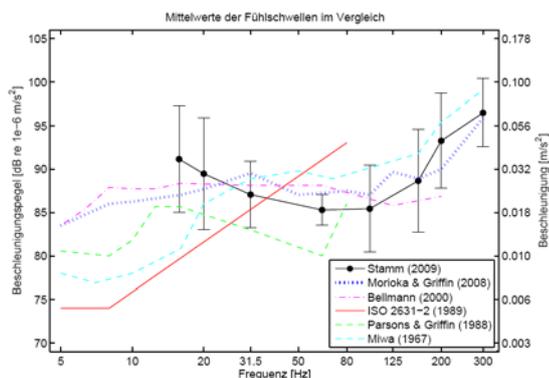


Abbildung 4: Fühlschwellen für Sinussignale (Ganzkörperschwingungen).

Es besagt, dass die Lautstärkewahrnehmung eines Schallsignals von dessen Bandbreite abhängt: Wenn die Gesamtenergie eines komplexen Signals über mehrere kritische Bandbreiten verteilt ist und damit die einzelnen Komponenten von verschiedenen auditorischen Filtern wahrgenommen werden, wird die Gesamtlautstärke als höher wahrgenommen. Sie resultiert dann aus der Summe der Lautheiten der einzelnen Komponenten. Würden nun beispielsweise zwei Sinustöne mit gleichem Pegel dargeboten werden, die weiter als eine kritische Bandbreite auseinander liegen, so wird der Zusammenklang der Töne als dop-

pelt so laut empfunden. Ist für die Wahrnehmung der Töne allerdings nur ein auditorischer Filter verantwortlich, addieren sich lediglich die einzelnen Schallintensitäten der beiden Töne. Der Eindruck der Gesamtlautstärke des Zusammenklanges ist damit erheblich geringer als im ersten Fall [2]. Dieses Phänomen wird als Spektrale Lautheitssummation bezeichnet.

Unsere Untersuchungen [3] zeigen, dass es Maskierungseffekte bei der Wahrnehmung von Ganzkörpervibrationen ähnlich wie bei der auditiven Wahrnehmung gibt (siehe Abbildung 5). Die Frequenzselektivität bzw. die Maskierungsverläufe lassen sich nun wie folgt beschreiben: Das Schmalbandrauschen mit $f_c=31.5$ Hz kann sowohl die tiefen als auch die hohen Testsignalfrequenzen maskieren. Die Rauschsignale mit $f_c=63$ und 160 Hz sind jedoch nur für die effiziente Verdeckung der höheren Frequenzen geeignet.

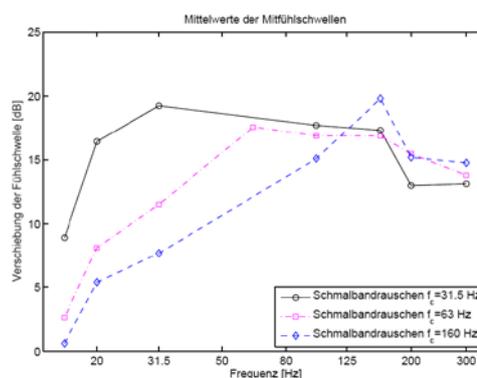


Abbildung 5: Mittelwerte der Mitfühlschwellen für Sinussignale unterschiedlicher Frequenzen bei Maskierung durch ein Schmalbandrauschen mit $f_c=31.5$ Hz, 63 Hz und 160 Hz.

Zusammenfassung

Diese Ergebnisse zeigen, dass im Arbeitsbereich der Pacini-Körperchen Frequenzgruppen existieren. In weiteren wissenschaftliche Arbeiten [4,5] wurde die Hypothese aufgestellt, dass Pacini-Körperchen zur spektralen Intensitätsummation fähig sind (wie bei der auditiven Lautheitssummation). Die von uns ermittelten Frequenzgruppen unterstützen diese Vermutung.

Literatur

- [1] Altinsoy, M.E.: Audiotactile interaction in Virtual Environments. Shaker Verlag, Aachen. 2006.
- [2] Terhardt, E.: Akustische Kommunikation. Springer, Berlin. 1998.
- [3] Stamm, M., Altinsoy, M.E. & Merchel, S.: Frequenzwahrnehmung von Ganzkörperschwingungen im Vergleich zur auditiven Wahrnehmung I. Fortschritte der Akustik. DAGA 2010. Berlin. 2010.
- [4] Bensmäia, S. J., Hollins M. & J. Yau: Vibrotactile intensity and frequency information in the Pacinian system. Percept. & Psychophy., 67-5, 828-841. 2005.
- [5] Gescheider GA, Bolanowski SJ & Verrillo RT.: Some characteristics of tactile channels. Behav. Brain Res. 148: 35-40. 2004.