

Vibrotaktile Wahrnehmungsschwelle für Vibrationen im Kinnbereich im Kontext von Violinen

Friedrich Beyer, M. Ercan Altinsoy

Institut für Akustik und Sprachkommunikation, Lehrstuhl für Akustik und Haptik, TU Dresden

E-Mail: friedrich.beyer@tu-dresden.de, ercan.altinsoy@tu-dresden.de

Einleitung

Beim Spielen von Instrumenten handelt es sich im Allgemeinen um multi-modale Wahrnehmungsvorgänge. Das bedeutet, Musikerinnen und Musiker nehmen das Instrument nicht nur über den akustischen Weg, sondern auch über andere Sinne wahr. Insbesondere der taktile Reiz kann dabei wichtige Informationen über den Zustand des Instruments liefern.

Zum Beispiel konnte für Qualitäts- und Präferenzbeurteilungen von Violinen durch Maskierungsexperimente gezeigt werden, dass Vibrationen in ähnlichem Maße wichtig für die Bewertung sind, wie der Klang [1]. Des Weiteren wurde beim Vergleich von reinen Hörversuchen mit audio-taktilen Wahrnehmungsexperimenten gezeigt, dass eine Violine lauter wahrgenommen wird, wenn zusätzlich zum auditiven auch der taktile Reiz stimuliert wird [2]. Ähnliche Ergebnisse wurden auch für andere Instrumente ermittelt (z.B. in [3],[4]).

Die bisherigen Studien beschränkten sich dabei zumeist auf die Unterscheidung zwischen vorhandenem und fehlendem taktilen Feedback [5]. In einem geplanten Projekt sollen diese Untersuchungen ausgeweitet und der Einfluss konkreter Signaleigenschaften des Vibrationssignals an Violinen untersucht werden. Dies soll im multi-modalen Kontext durchgeführt werden, wozu im ersten Schritt ein „virtueller Prototyp“ einer Violine entwickelt werden muss. Mit Hilfe dieses Prototyps soll es möglich sein Vibrationen und Schall unabhängig voneinander zu manipulieren und somit deren Eigenschaften systematisch zu untersuchen. Dabei sollte die Ergonomie des Instruments, der von herkömmlichen Violinen entsprechen.

Als Grundlage für diesen Prototyp ist es zunächst wichtig zu wissen, welche Signalanteile wahrnehmbar sind. Dies ist für die Hörschwelle hinlänglich bekannt (vgl. z.B. [6]), wobei der hörbare Frequenzbereich zwischen 20 Hz und 20 kHz liegt. Ähnliche Untersuchungen wurden bereits für die Fühlschwelle von Vibrationen durchgeführt, wobei der Fokus besonders auf den Schwellen in der Hand und in den Fingern lag. Der wahrnehmbare Frequenzbereich liegt hierbei zwischen 1 Hz und 1 kHz (Abb. 1 – grün)[7]. Die unter Laborbedingungen ermittelte Fühlschwellenkurve verschiebt sich im Anwendungskontext beim Spielen von Violinen etwas nach unten, wie in [8] beschrieben wird (Abb. 1 – blau). Das lässt sich mit der größeren Kontaktfläche zwischen linker Hand und Violine und einer höheren Druckkraft begründen.

Auch zu Vibrationsfühlschwellen im Gesichtsbereich (Wange und Kinn) wurden Studien durchgeführt, deren Ergebnisse ebenfalls in Abbildung 1 angegeben sind (rot, gelb, violett)[7][9].

Zusätzlich ist in der Abbildung eine Kurve mit zu erwartenden Vibrationspegeln am Kinnhalter einer Violine angegeben (schwarz)[10]. Offensichtlich liegen die Fühlschwellen aus [7] und [9] deutlich über den zu erwartenden Amplituden. Es ist jedoch anzunehmen, dass diese Schwellen auch im Gesichtsbereich absinken, wenn sich die Kontaktfläche und der Druck erhöhen. Aus diesem Grund soll im Folgenden eine Vibrationsschwellenmessung im Kinnbereich im Anwendungskontext vorgestellt werden.

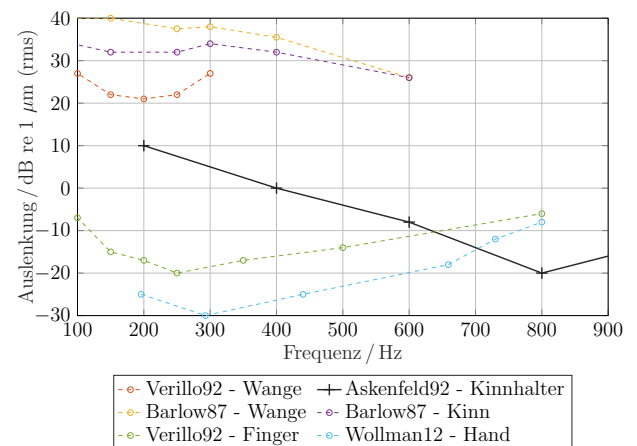


Abbildung 1: Verschiedene Vibrationsfühlschwellen für Finger (Labor- und Anwendungsbedingungen – grün bzw. blau) und Gesichtspartien (rot, gelb, violett). Zusätzlich sind zu erwartende Vibrationspegeln am Kinnhalter einer Violine angegeben (schwarz).

Methode

Setup

Um eine Fühlschwelle im Anwendungskontext zu ermitteln, muss die Ergonomie einer herkömmlichen Violine gegeben sein, weshalb eine E-Violine (*Harley Beton*) als Grundlage verwendet wurde. Der Vorteil einer E-Violine besteht darin, dass sie die Ergonomie einer akustischen Violine besitzt, dabei aber einen geringeren Eigenklang aufweist. Des Weiteren bietet sie unter dem Kinnhalter genügend Platz für einen elektrodynamischen Shaker. Ein solcher Shaker (*Dayton Audio DAEX 19CT-4*) wurde mit doppelseitigem Klebeband direkt auf die Unterseite des vorhandenen Kinnhalters geklebt.

Die Ansteuerung des Shakers erfolgte von einem PC aus mit *Psylab*¹-Skripten, die für den aktuellen Versuch so

¹ *MATLAB*-Skriptsammlung für Psychoakustische Versuche: <https://github.com/TGM-Oldenburg/Psylab>

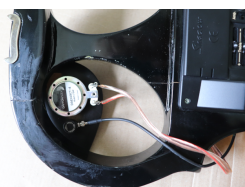


Abbildung 2: Auf der Unterseite des Kinnhalters wurde ein Shaker *Dayton Audio DAEX 19CT-4* und ein Beschleunigungssensor *MMF KS95B.100* angebracht.

modifiziert wurden, dass ein ASIO-Treiber unterstützt wurde. Damit wurde eine *RME Fireface UC*-Soundkarte betrieben, welche den Shaker über einen *t.amp 100mk II*-Verstärker ansteuerte. Zusätzlich wurde über die gleiche Soundkarte ein Kopfhörer (*Sennheiser HDA 200*) angesteuert, der für die Maskierung des abgestrahlten Luftschalls genutzt wurde. Zur Kalibrierung des Systems und zur Überprüfung der Messdaten wurde außerdem ein Beschleunigungssensor (*MMF KS95B.100*) am Kinnhalter angebracht, dessen Daten über eine *HEAD Acoustics Octobox* mit *HEAD Recorder* aufgezeichnet wurden. Um die Aufzeichnung automatisch zu starten, wurde ein Triggersignal vom PC über die Soundkarte direkt an das *HEAD*-Interface gegeben, welches dann eine Aufnahme mit definierter Länge ausführte. Diese Messungen dienten als zusätzliche Möglichkeit zur Verifizierung der Ergebnisse, sollen hier jedoch im Folgenden nicht weiter berücksichtigt werden.

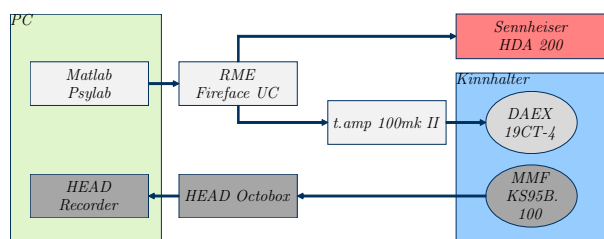


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Signalverlaufs.

Bei ersten Tests fiel auf, dass die abgegebenen Vibrationen deutlich stärker über die linke Hand und die Schulter, als über das Kinn wahrgenommen wurden, wenn die Violine in typischer Spielhaltung gehalten wurde. Aus diesem Grund wurde nach einer Möglichkeit gesucht, die Körperschallkopplung an der Hand und an der Schulter zu unterbinden. Versuche mit Dämmmaterial scheiterten, weshalb entschieden wurde, die Violine auf einem Stativ zu befestigen. Auf diesem Stativ war das Instrument in 4 Freiheitsgraden (3 Drehachsen & hoch und runter) einstellbar. Somit konnte die Violine exakt so platziert werden, wie es typischerweise beim Spielen der Fall ist. Nach erfolgter Einstellung konnten die linke Hand und die Schulterstütze entfernt werden. Als einziger Berührungspunkt blieb damit der Kontakt am Kinn bestehen (s. Abb. 4).

Versuchsablauf und Stimuli

Die verwendete Versuchsmethode orientierte sich an der Arbeit von Wollman et. al [8], die eine ähnliche Studie für die Fühlschwelle in der linken Hand durchgeführt ha-

ben. In dieser Studie wurden Sinussignale mit den Grundfrequenzen der vier leeren Saiten einer Violine (196 Hz, 293 Hz, 440 Hz, 659 Hz), sowie zwei weitere Frequenzen (730 Hz und 800 Hz) als Stimuli genutzt. Diese Töne werden auch in dem hier beschriebenen Versuch verwendet. Für jede dieser Frequenzen wurde die Wahrnehmungsschwelle für jede Versuchsperson ermittelt. Dazu wurde das *3-Alternative-Forced-Choice*-Verfahren [11] verwendet, bei dem den Versuchspersonen in jedem Stimulus drei Intervalle dargeboten werden, wobei nur ein Intervall das zu detektierende Vibrationssignal enthält. Nachdem alle drei Intervalle abgespielt wurden, müssen die Versuchspersonen eine Antwort geben. Nach jedem Stimulus wird die Amplitude des nächsten Vibrationssignals angepasst. Das geschieht mit einem adaptiven *Weighted Up-Down*-Algorithmus [12][13]. Der Algorithmus konvergierte dabei zu einem Pegel, bei dem 75% der Antworten richtig sind (vgl. [12]).

Die Stimuli bestehen jeweils aus den drei Intervallen, die jeweils 500 ms lang sind und durch Pausen mit einer Länge von 200 ms getrennt werden. Vor und nach den Intervallen wurden ebenfalls 200 ms Stille eingefügt. In allen drei Intervallen wird dasselbe Maskierungsgeräusch über den Kopfhörerkanal abgespielt. Dieses setzt sich aus 6 Sinustönen, die den Testsignalen entsprechen, und einem weißen Rauschen zusammen. In einem der Intervalle, welches zufällig ausgewählt wird, wird zusätzlich das Testsignal (Sinuston mit Frequenz des aktuellen Durchgangs und durch die adaptive Methode bestimmte Amplitude, sowie 10 ms lineares Fade In / Out) über einen separaten Kanal ausgegeben. In einem weiteren Kanal wird vor dem ersten Intervall ein Triggersignal an die *HEAD Octobox* gegeben.

Nach Beendigung eines Durchgangs wird von *Psylab* der Schwellwert berechnet und in dBFS abgespeichert. Im Post-Processing wurden diese Werte mithilfe eines vorher festgelegten Kalibrierwertes (s. u.) in Beschleunigungsspiegel umgerechnet. Diese können anschließend durch Integration als Auslenkungsspiegel angegeben werden.

Kalibrierung

Da die Übertragungsfunktion des Systems aus Shaker und Kinnhalter nicht linear ist, bedurfte es für jede der zu testenden Frequenzen einer Kalibrierung. Diese wurde manuell ausgeführt, wobei mit einem *MATLAB*-Tool der Ausgangspegel so angepasst wurde, dass vom Beschleunigungssensor ein Kalibrierwert von 20 dB[1 m/s²] gemessen wurde. Die aufgenommene Kalibrierkurve wurde anschließend direkt vom *Psylab*-Skript eingelesen und berücksichtigt, sodass eine kalibrierte Wiedergabe für alle Frequenzen möglich war.

Versuchspersonen

Der Versuch wurde insgesamt mit 11 Versuchspersonen im Alter zwischen 25 und 38 Jahren durchgeführt. Darunter waren 5 erfahrene Violinistinnen und Violinisten und 6 Personen, die keine Erfahrung mit dem Instrument hatten. Grundsätzlich war die Annahme, dass die Fühlschwelle sich nicht durch das Spielen einer Geige trainieren lässt, weshalb sowohl erfahrene als auch unerfahrene Menschen berücksichtigt wurden. Der Vorteil, den erfahrene Versuchspersonen mitbringen, ist, dass die-

se Personen wissen, wie eine Violine gehalten werden muss. Mit entsprechender Anleitung war das jedoch auch für nicht-erfahrene Menschen möglich.



Abbildung 4: Ein Proband am Versuchsaufbau. Nachdem die Violine korrekt positioniert war, wurde die Schulterstütze entfernt und die linke Hand an einem zusätzlichen Ständer, statt am Hals der Violine platziert.

Anweisungen

Neben der Einweisung, wie eine Geige gehalten wird, wurden alle Versuchspersonen instruiert, das Instrument möglichst so einzustellen, wie es beim normalen Spielen der Fall wäre. Außerdem wurden sie gebeten, den Auflagepunkt möglichst im vorderen Kinnbereich zu wählen. Grundsätzlich unterscheiden sich die von verschiedenen ViolinistInnen gewählten Auflagepunkte des Kinns auf dem Kinnhalter stark. Die gegebene Einschränkung widerspricht somit dem anwendungsnahen Ansatz etwas, ist aber nötig, um Knochenschalleitung zu vermeiden, die zunimmt, je weiter der Auflagepunkt in Richtung Ohr gewählt wird. Die gewählte Position, sowie der ausgeübte Druck, sollten möglichst über den gesamten Versuch konstant gehalten werden. Außerdem wurden alle Teilnehmenden angewiesen, die Zähne nicht zusammenzubeißen, da ansonsten ebenfalls Knochenschalleitung auftreten kann. Schließlich stand es den Versuchspersonen frei, die linke Hand an einem zusätzlichen Ständer festzuhalten, um die ungefähre Position der linken Hand beim normalen Spiel einzunehmen.

Bevor der Versuch startete, konnten die Versuchspersonen selbst die Kopfhörerlautstärke einstellen. Dabei sollten sie eine möglichst laute Einstellung wählen, die jedoch unter der Schmerzgrenze lag.

Ergebnisse und Diskussion

Für jede Versuchsperson und jedes Testsignal wurde ein Schwellwert ermittelt. Bei der Analyse und beim Vergleich der erhobenen Daten gab es zwei Datensätze, in denen bei mindestens einer Frequenz Ausreißer² auftraten. Mündliche Erfahrungsberichte über gehörte Töne bei hohen Frequenzen, lassen auf eine falsche Ausführung des Experiments schließen (falsche Positionierung), weshalb diese Datensätze im Folgenden ausgeschlossen werden.

In Abbildung 5 ist die über alle Versuchspersonen gemittelte Fühlschwelle für Vibrationen im Kinnbereich im Kontext von Violinen als Auslenkungspegel relativ zu einer Auslenkung von $1\ \mu\text{m}$ dargestellt (inkl. 95% Konfidenzintervall). Offensichtlich liegt die gemittelte Schwelle für tiefe Frequenzen am niedrigsten und hat ihr Maximum bei ca. 440 Hz. Zu hohen Frequenzen scheint sie

²Der Wert war kleiner als der Wert des ersten Quartils minus $1,5 \times$ Inter-Quartile-Range

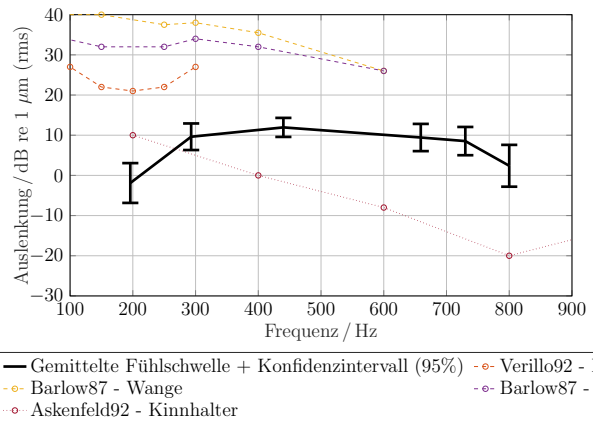


Abbildung 5: Ermittelte Fühlschwelle für Vibrationen am Kinn im Kontext der Violine.

wieder leicht abzufallen.

Im Vergleich mit der Literatur (ebenfalls dargestellt) lässt sich erkennen, dass die hier gefundene Schwelle deutlich unter diesen publizierten Werten liegt, was auf die deutlich größere Kontaktfläche zwischen Kinn und Kinnhalter zurückzuführen ist. Außerdem scheint die Kurve dem Trend zu folgen, der in den Daten von Barlow [9] (violett und gelb) erkennbar ist, wonach die Schwelle zu hohen Frequenzen etwas abfällt.

In Abbildung 5 sind zudem Werte für zu erwartende Auslenkungspegel am Kinnhalter dargestellt, die von Askenfeld und Jansson [10] ermittelt wurden. Diese Werte liegen für tiefe Frequenzen deutlich über der gemessenen Fühlschwelle, sodass eine Wahrnehmung der Vibrationen am Kinnhalter über das Kinn – mindestens auf der tiefsten Saite – anzunehmen ist.

Einordnung

Die hier ermittelte Schwelle muss als eine erste Annäherung gewertet werden. Der Natur einer Pilotstudie nach, gab es jedoch einige Unzulänglichkeiten im Versuchsaufbau. Zunächst war es mit dem verwendeten Aufbau schwierig, die genaue Position, die Fläche und den Druck zwischen Kinn und Kinnhalter zu kontrollieren. Diese Schwierigkeit ergab sich aus der Forderung, den Anwendungskontext abzubilden. Das Konstanthalten des Kontakts am Kinn, musste somit den Versuchspersonen überlassen werden. In einer zusätzlichen Messreihe wurde für jede Versuchsperson geprüft, wie reproduzierbar die gewählte Position ist, indem jeweils fünf Transferfunktionen zwischen dem Shaker und dem Sensor am Kinnhalter, bei aufgelegtem Kinn, gemessen wurden. Zwischen jedem Messdurchlauf mussten die Teilnehmenden vom Versuchsstand zurücktreten und anschließend das Kinn neu positionieren. Die Abweichungen zwischen den einzelnen Transferfunktionen dienen als Indikator für die erreichte Güte der Reproduzierbarkeit. Dabei gelang es verschiedenen Versuchspersonen unterschiedlich gut die Positionierung zu reproduzieren. Abgesehen von zwei Teilnehmenden konnte für die meisten Versuchspersonen jedoch eine sehr gute Reproduzierbarkeit erreicht werden. Insbesondere bei der Bewertung von Unterschieden zwischen mehreren Frequenzen muss bei diesen zwei

Versuchspersonen die schlechte Reproduzierbarkeit der Positionierung als Fehlerquelle berücksichtigt werden. Innerhalb eines Versuchsdurchlaufs haben sich die Versuchspersonen jedoch kaum bewegt, weshalb hierbei deutlich weniger Abweichungen zu erwarten sind.

Eine weitere Schwierigkeit war, dass es Positionen am Kinn gab, bei denen die Töne (vor allem hohe Frequenzen) durch Knochenschalleitung hörbar waren. Gleiches gilt wenn die Zähne zusammengebissen wurden. Auch das ließ sich nicht direkt kontrollieren, sondern wurde in den Anweisungen vor dem Versuch den Teilnehmenden erklärt. Die Kontrolle darüber lag demnach ebenfalls bei den Versuchspersonen selbst. Die Schwelle für hohe Frequenzen ist somit möglicherweise mit zusätzlichen Unsicherheiten belegt und der Abfall der Schwelle zu hohen Frequenzen möglicherweise auf gehörte Töne zurückzuführen. Allerdings gibt der Trend aus [9] dem Abfall gewisse Plausibilität.

Hinzukommt die fehlende Kontrolle über das Kopfhörersignal. Auch hier unterschieden sich die Einstellungen zwischen den Versuchspersonen. Ziel war es, von vornherein schmerzhaft und schädliche Lautstärken zu vermeiden, weshalb die Verantwortung darüber an die Personen selbst gegeben wurde. Allerdings lässt das keine direkte Kontrolle mehr darüber zu, wie laut die Einstellungen sind, was möglicherweise zu Einschränkungen in der Maskierungsleistung bei hohen Frequenzen führte, und somit ebenfalls die Hörbarkeit bei hohen Tönen förderte.

Schließlich ist auch die Personenzahl im Versuch relativ gering, was dem Pilotcharakter der Studie geschuldet ist und für relative große Konfidenzintervalle sorgt.

Ausblick

In zukünftigen Versuchen sollten die genannten Unzulänglichkeiten abgeschwächt werden. Insbesondere sollte eine größere Stichprobe gewählt werden, um so die Konfidenzintervalle zu verkleinern.

Außerdem muss der Versuch besser kontrollierbar sein, was jedoch mit der Forderung nach Anwendungsnähe konkurriert. Beispielsweise könnte in einem neuen Versuch auf die Violine verzichtet werden. An deren Stelle könnte eine Vorrichtung treten, die einen konstanten Druckpunkt am Kinn ermöglicht. Somit wäre jedoch der Anwendungskontext nicht mehr gegeben.

Des Weiteren muss der Pegel des Maskierungsgeräuschs fest vorgegeben sein und vorher auf seine Wirksamkeit geprüft werden.

Insgesamt müssen für die besonders unsicheren hohen Frequenzen gegebenenfalls neue Teststrategien entwickelt werden, wobei insbesondere die Hörbarkeit der Töne berücksichtigt werden muss. Da die zu erwartenden Vibrationspegel in diesem Frequenzbereich jedoch weit unter der ermittelten Schwelle liegen, sollte die Relevanz dieser Frequenzbereiche für bestimmte Anwendungen zuvor abgewogen werden.

Zusammenfassung

Alles in allem konnte eine Fühlschwelle für Vibrationen am Kinn im Kontext von Violinen für 6 verschiedene Frequenzen ermittelt werden. Diese liegt bei niedrigen Fre-

quenzen deutlich unter den am Kinnhalter einer Violine zu erwartenden Vibrationspegeln, die in der Literatur vorgestellt wurden. Hinzukommt, dass für breitbandigere Signale eine weitere Absenkung der Schwelle angenommen werden kann. Somit ist eine Berücksichtigung der Vibrationen am Kinnhalter beim Entwurf eines virtuellen Prototyps einer Violine empfehlenswert, wenn ein möglichst genaues Abbild von akustischen Violinen angestrebt wird.

Literatur

- [1] Wollman, Indiana, Claudia Fritz, Jacques Poitevineau, und Stephen McAdams. „Investigating the Role of Auditory and Tactile Modalities in Violin Quality Evaluation“. PLOS ONE 9, Nr. 12 (4. Dezember 2014).
- [2] Wollman, Indiana, Claudia Fritz, und Jacques Poitevineau. „Influence of vibrotactile feedback on some perceptual features of violins“. The Journal of the Acoustical Society of America 136, Nr. 2 (1. August 2014).
- [3] F. Fontana, H. Jarvelainen, S. Papetti, F. Avanzini, G. Klauer, und L. Malavolta, „Rendering and Subjective Evaluation of Real vs. Synthetic Vibrotactile Cues on a digital Piano Keyboard“, 2015.
- [4] Altinsoy, M. E., Blauert, J., So, R. H., „Effect of loudness on the haptic force-feedback perception in virtual environments“. The Journal of the Acoustical Society of America, 114(4), 2330-2331, 2003.
- [5] Altinsoy, M. E., Merchel, S., Tilsch, S., „Perceptual evaluation of violin vibrations and audio-tactile interaction“ In Proceedings of Meetings on Acoustics ICA2013 (Vol. 19, No. 1, p. 015026). Acoustical Society of America.
- [6] Fastl, Hugo, und Eberhard Zwicker. „Psychoacoustics: Facts and Models“. 3. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [7] Verrillo, Ronald T. „Vibration Sensation in Humans“. Music Perception 9, Nr. 3 (1. April 1992).
- [8] I. Wollman, C. Fritz, und J. Frelat, „Vibrotactile feedback in the left hand of violinists“, 2012
- [9] Barlow, Steven M. „Mechanical Frequency Detection Thresholds in the Human Face“. Experimental Neurology 96, Nr. 2 (1. Mai 1987).
- [10] Askenfelt, Anders, und Erik V. Jansson. „On Vibration Sensation and Finger Touch in Stringed Instrument Playing“. Music Perception 9, Nr. 3 (1. April 1992).
- [11] Schlauch, Robert S., und Richard M. Rose. „Two-, Three-, and Four-interval Forced-choice Staircase Procedures: Estimator Bias and Efficiency“. The Journal of the Acoustical Society of America 88, Nr. 2 (August 1990).
- [12] Kaernbach, Christian. „Simple Adaptive Testing with the Weighted Up-down Method“. Perception & Psychophysics 49, Nr. 3 (Mai 1991).
- [13] Levitt, H. „Transformed Up-Down Methods in Psychoacoustics“. The Journal of the Acoustical Society of America 49, Nr. 2B (Februar 1971).