NACHBILDUNG VON STÖRUNGEN DER HÖR- UND DER SEHBAHN FÜR STUDIEN AN TECHNISCHEN KOMMUNIKATIONSHILFEN

Sermed Al-Hamdani, Hans-Heinrich Bothe

Technische Universität Dänemarks, Zentrum für Angewandte Hörforschung, Lyngby
hhb@elektro.dtu.dk

Kurzfassung: Diese Arbeit stellt ein Projekt vor, das unter einer gemeinsamen Benutzerschnittstelle die häufigsten Hör- und Sehstörungen auf einem PC nachbilden und normal hörenden und sehenden Benutzern die Illusion einer entsprechenden Störung vermitteln kann. Dazu werden das Audio- und Videosignal von beliebig auswählbaren Videofilmen so verfremdet, dass sie der Benutzer mit der festgelegten vermeintlichen auditorischen oder visuellen Störung perzipiert.

Zu den implementierten virtuellen Hörstörungen gehören typische Ausformungen von Schallleitungsproblemen im Mittelohr wie Otosklerose sowie neurologisch bedingte Ausformungen von Altersschwerhörigkeit oder durch bestimmte Umgebungsgeräusche hervorgerufene Einbrüche im Audiogramm. Zu den implementierten Sehschädigungen gehören Retinitis Pigmentosa, altersbedingte Makula-Degeneration sowie Glaukom.

Momentan werden das Audiosignal über Kopfhörer und das Videosignal auf einem Computerbildschirm dargestellt. Zukünftig soll das Videosignal über eine TFT-bestückte Brille präsentiert werden, um das Problem eines durch den Bildschirm reduzierten visuellen Sehfeldes zu umgehen.

1 Einleitung

Für Forscher, die sich mit hör- oder sehgeschädigten oder mit der Rehabilitation älterer Personen beschäftigen, ist es sehr wichtig, sich die Konsequenzen der veränderten Perzeption und des reduzierten Informationsflusses ihrer Patienten vorstellen zu können. Daher besteht schon lange der Wunsch nach einer Simulations-Software, die entsprechende Störungen annäherungsweise für normal hörende und sehende Personen aufzeigen kann. Das vorliegende Projekt kommt diesem Bedarf nach und ermöglicht es, beliebige Audio- oder Videosequenzen nach Vorgabe entsprechender Hör- oder Sehverluste beziehungsweise der ihnen zugrunde liegenden Krankheiten unter einer gemeinsamen Benutzerschnittstelle zu verfremden und somit für einen weiten Kreis von Interessierten perzipierbar zu machen. In einer Computersimulation werden dabei das Audiosignal und/oder die Einzelbilder der Videosequenz manipuliert.

Im Bereich der visuellen Störungen sind Simulationen nur in sehr beschränktem Masse verfügbar. Psychoakustik sind Demoversionen bestimmter Hörverluste verfügbar, allerdings verwenden sie festgelegte Audiosequenzen und lassen keine beliebigen Sprach-, Musik- und Geräuschsignale zu. Dies schränkt ihre Verwendbarkeit stark ein. Ein auf CD erhältlicher Kurs [1] stellt eine Sammlung ausgewählter Signale für Forschungslabore zur Verfügung; Bregman's CD [2] präsentiert 41 Übungen zu räumlichen Effekten in der Geräuschperzeption; Duda's CD [3] über Schallortung und binaurale Effekte zeigt eine Sammlung typischer Beispiele wie beispielsweise den Fransen-Effekt; Moore's CD [4] über perzeptuelle Konsequenzen von simulierten Schädigungen der Cochlea zur Verfügung, die aufzeigen, wie

sich entsprechende Hörstörungen ‘anhören’. Weitere Informationen über Simulationen von Hörstörungen können auf der sehr guten Webseite von Ellis [5] gefunden werden.

Im Folgenden wird eine Auswahl von auditorisch-visuellen Perzeptionsstörungen vorgestellt, die in unserem Simulationssystem zur Verfügung stehen.

2 Die Höhrbahn

Die Hörbahn des Menschen umfasst das Ohr (siehe Abbildung 1) mit Aussen-, Mittel- und Innenohr, einer grösseren Anzahl von neuronalen Verarbeitungszentren im Hirnstamm und Mittelhirn, dem auditorischen Cortex im Grosshirn sowie den verbindenden Nervensträngen. Wir konzentrieren uns auf das Ohr und, zusammenfassend, auf bestimmte psychoakustische Effekte, die in höheren Verarbeitungszentren entstehen.

Das Aussenohr besteht aus der Ohrmuschel und dem Ohrkanal und dient im Wesentlichen der Schallrezeption und passiven Verstärkung durch Resonanz. Hörstörungen können durch erhebliche Deformation der Ohrmuschel oder durch Verstopfung des Ohrkanals entstehen. Das Aussenohr ist mit dem Mittelohr durch das Trommelfell verbunden. Verhärtungen oder Löcher im Trommelfell führen zu charakteristischen Hörstörungen mit frequenzabhängigen Veränderungen der Hörschwelle.

Das Mittelohr besteht aus drei miteinander verbundenen Knöchelchen, welche durch Hebelwirkung die Vibrationen des Trommelfells auf die Membran im ‘ovalen Fenster’ übertragen; es funktioniert als Impedanzwandler und verbindet Aussen- mit Innenohr.

Das Innenohr besteht wesentlich aus der Cochlea und aus dem Gleichgewichtsorgan. Die Cochlea mit der Basilarmembran und dem Corti-Organ führt eine Frequenzanalyse des Schallsignals durch und wandelt Schalldruckintensitäten in den verschiedenen Frequenzbändern in pulsfrequenzmodulierte Signale um, die dann im Gehirn weiterverarbeitet werden. Die Sensoren sind die inneren Haarzellen entlang der Basilarmembran; sie werden selektiv von bestimmten Frequenzen des Schallducksignals aktiviert und leiten ihre Signale über die Fasern des auditorischen Nervs an die Zellen des *nucleus cochlearis* weiter. Die benachbarten äusseren Haarzellen dienen als Servoverstärker für niedrige Schalldruckpegel. Sie sind in neuronaler Rückkopplung mit den inneren Haarzellen und Neuronen des Hirnstamms verbunden und vergrössern den Dynamikbereich perzipierbarer Schalldruckpegel erheblich. Störungen im Bereich der Cochlea oder des auditorischen Nervs führen zu sehr komplexen Perzeptionsfehlleistungen, die sich auch in Veränderungen beim Auftreten psychoakustischer Effekte äussern ([6], [7]).

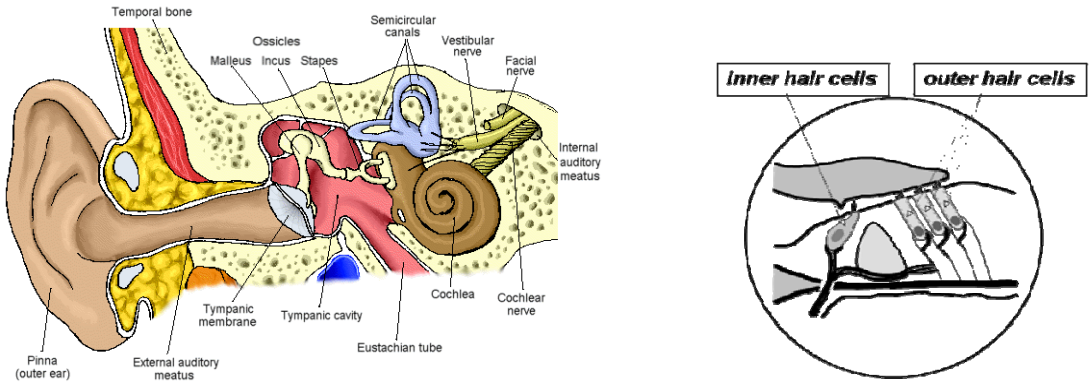

Abbildung 1 – Die Anatomie des Ohrs; links: die wesentlichen Komponenten Aussen- Mittel- und Innenohr; rechts: eine Reihe innerer und drei Reihen äusserer Haarzellen unterhalb der schwingenden Basilarmembran in der Cochlea.

Hörstörungen können durch Veränderungen oder Defekte entlang der Hörbahn hervorgerufen werden und führen je nach Ort dieses Artefakts zu typischen Veränderungen der auditorischen Perzeption. Im Folgenden werden einige typische Hörstörungen detaillierter beschrieben, die auch in unserer Simulationssoftware implementiert sind.

2.1 Schallleitungsbedingte Hörstörung

Schallleitungsbedingte Hörstörungen werden durch Blockierungen im Ohrkanal oder im Mittelohr hervorgerufen, was zu einer frequenzabhängigen Dämpfung des Schalldruckpegel im Innenohr und in der Cochlea führt. Ihre Ursache sind meistens die Akkumulation von Ohrwachs im Ohrkanal, die Ausformung gehärteter Platten von Ohrwachs auf dem Trommelfell oder die teilweise oder vollständige Verknöcherung (Otosklerose) im Mittelohr. Ferner können eine Mittelohrentzündung eine Sammlung von Flüssigkeit im Mittelohr mit typischer frequenzabhängiger Dämpfung bedingen oder eine Wucherung von Knorpelzellen, welche ebenfalls die Schallleitung behindert. Schallleitungsbedingte Hörstörungen äussern sich in typischen frequenzabhängigen Mustern der Luft- und Knochenleitung, wie sie in einem Audiogramm aufgenommen werden können [7].

2.2 Sensorisch-neurologische Hörstörung

Sensorisch-neurologische Hörstörungen betreffen meistens die Cochlea oder die auditorischen Nerven. Sie werden oft durch einen Verlust von Haarzellen auf der Basilarmembran im Innenohr hervorgerufen und führen zu einer Verringerung der Frequenzauflösung und einer Anhebung der Hörschwelle für höhere Frequenzen ([7], [10]) Zahlreiche Krankheiten können zu sensorisch-neurologischen Hörstörungen führen. Zwei wichtige Arten werden im Folgenden beschrieben.

2.2.1 Altersbedingte Hörstörungen (ABH)

Altersbedingte Hörstörungen (Presbyakuse) stellen sehr komplizierte sensoneurale Behinderungen mit einem Verlust von äusseren Haarzellen dar, manchmal begleitet von einem Zerfall der inneren Haarzellen; sie sind insbesondere in der Altersgruppe ab 60 Jahren sehr verbreitet. Zunächst sind nur höhere Frequenzen über 10 [kHz] beeinträchtigt, aber mit fortschreitender Ausprägung werden auch die zur Sprachperzeption wichtigen Frequenzbänder unterhalb von 5 [kHz] betroffen.

Altersbedingte Hörverluste führen typischerweise i) zu einer mit dem Alter progressiven, verminderten Empfindlichkeit im Bereich höherer Frequenzen, ii) zu einer verminderten Dynamik mit reduziertem Bereich zwischen Hör- und Schmerzschwelle, iii) zu verminderter Frequenzselektivität mit verbreiterten Filterkurven und verstärkter Maskierung anderer Frequenzbereiche sowie iv) zu einer verminderten zeitlichen Auflösung sequentieller akustischer Ereignisse, die durch erhöhte zeitliche Maskierung hervorgerufen wird. Gleichzeitig entstehen durch reduzierte binaurale Verarbeitung speziell bei höheren Frequenzen oder durch asymmetrische Verarbeitung auf beiden Seiten auch Schallortungsprobleme, insbesondere bei lauten Hintergrundgeräuschen.

Studien zeigen, dass altersbedingte Hörstörungen bei männlichen Personen stärker ausgeprägt sind als bei weiblichen, was von unterschiedlichen Arbeitsbedingungen herrühren mag. Abbildung 2 zeigt typische Verläufe für männliche und weibliche Personen, wie sie im ISO-7029-Standard für grössere Bevölkerungsgruppen beschrieben sind. Diese Kurven sowie ihre perzeptionellen Konsequenzen sind in unserem Simulationsprogramm implementiert.

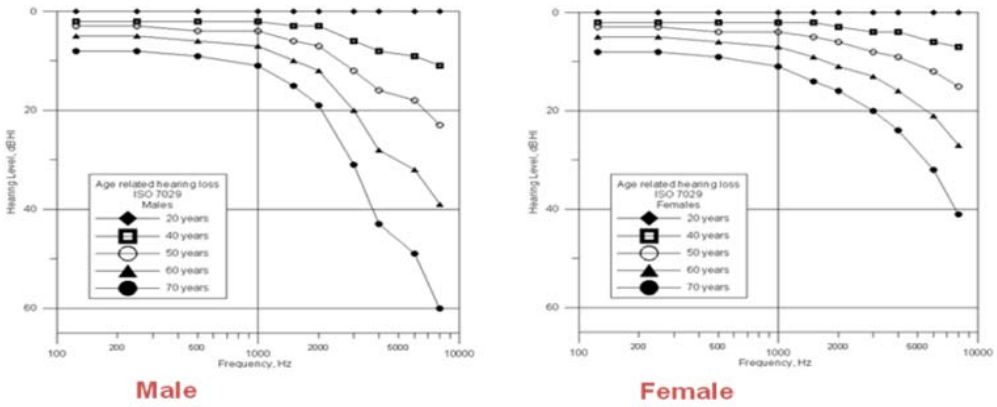

Abbildung 2 – Typische Veränderung der Hörschwellen bei altersbedingten Hörstörungen in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht; links: männlich, rechts: weiblich. Die Veränderungen sind signifikanter bei grösseren Gruppen männlicher als weiblicher Personen (ISO 7029).

2.2.2 Geräusch-induzierte Hörstörungen

Geräusch-induzierte Hörstörungen werden durch Exposition mit sehr hohen Schalldruckpegeln ausgelöst. Sie können nach plötzlichen, kurzzeitigen Schallereignissen, einem akustischen Trauma oder auch bei lange andauernder Beschallung mit niedrigen Schallpegeln auftreten. Beispiele dafür sind Hintergrundgeräusche am Arbeitsplatz, laute Musik, aber auch Ventilatorgeräusche im Büro ([7], [8], [9], Jansen et al. 2009, NIDCD 2008). Abbildung 3 zeigt typische Verläufe der Hörkurven mit zunehmender Dauer lang anhaltender Beschallung. Das im Bereich zwischen 4-5 [kHz] liegende Spektrum des Dauerschalls beeinflusst progressiv auch benachbarte Frequenzbänder.

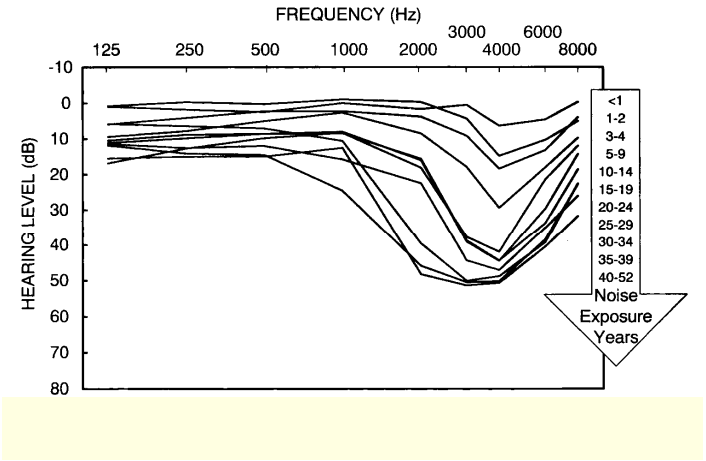

Abbildung 3 – Typische Beispiele von geräuschinduzierten Hörverlusten (ISO 7029). Mit zunehmender Dauer der Beschallung wird die Perzeption entsprechender Frequenzbereiche reduziert und auch die Perzeption benachbarter Frequenzbereiche beeinträchtigt.

Bei plötzlichem akustischem Trauma sind vornehmlich die inneren Haarzellen betroffen, was zu einem sofortigen, manchmal dauerhaften Hörverlust führt. Dieser wird oft von Schwindel oder Tinnitus begleitet. Die dauerhafte Beschallung mit leisen Geräuschen resultiert dagegen eher in einem Verlust der äusseren Haarzellen und damit in einer erhöhten Hörschwelle für

höhere Frequenzen und einer Verringerung des perzipierbaren Schalldruckbereichs. Die Symptome können temporär oder dauerhaft sein [9].

3 Die Sehbahn

Die Sehbahn beginnt bei den Photorezeptoren in der äusseren Oberfläche der Netzhaut oder *Retina* und verläuft weiter über die Zellen in der Retina und den optischen Nerv, der entweder im *superior colliculus* oder im *nucleus geniculatis* endet. Letzterer liefert die Eingangssignale für den visuellen Cortex in der Grosshirnrinde (siehe Abbildung 5). Viele Krankheiten können die Hörbahn schädigen und bis zu vollständiger Blindheit führen. Die am häufigsten betroffenen Bereiche sind die Retina und der optische Nerv.

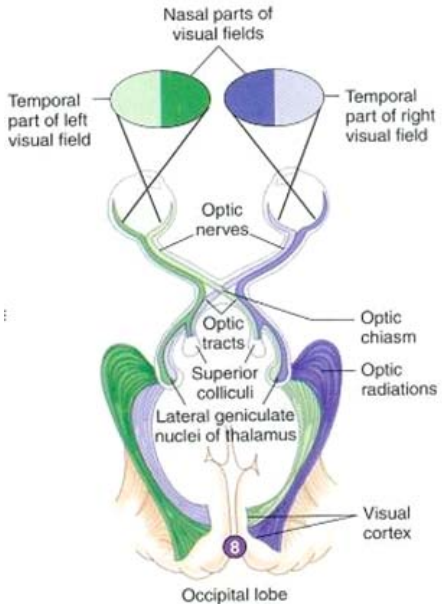

Abbildung 5 – Die Sehbahn von der Netzhaut (Retina) bis zum visuellen Cortex in der Grosshirnrinde.

3.1 Auge und Netzhaut

Der innere Teil des Augapfels ist entsprechend Abbildung 6 von den Zellen der Netzhaut ausgefüllt. Das durch die Linse einfallende Licht erreicht die Rezeptorzellen der Netzhaut durch den mit einer Gel-artigen Masse ausgefüllten Innenraum. Der gesamte Innenraum des Auges mit der Linse ist von einer durchsichtigen Hornhaut (*cornea*) geschützt.

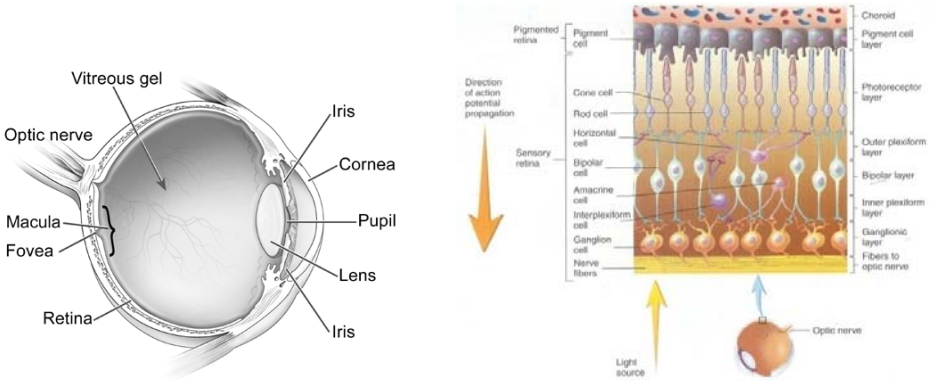

Abbildung 6 – Links: Augapfel mit Cornea, Pupille, Linse, Gel-artigem Innenraum und Netzhaut; rechts: neuronale Schichten der Netzhaut mit Rezeptoren, Bipolarzellen, horizontalen Zellen und Ganglionzellen [6].

Der Durchmesser der Pupille ist steuerbar und regelt die auf die Netzhaut auftreffende Lichtmenge. In der Netzhaupt gibt es zwei Typen von Photorezeptoren, die Zapfen und die Stäbchen. Die Stäbchen erfassen die grundsätzliche Helligkeit und erzeugen auch im Dämmerlicht noch Nutzsignale, während die Zapfen das Farbsehen und eine höhere räumliche Bildauflösung ermöglichen. Die nachfolgenden Zellschichten der Bipolarzellen, der horizontalen Zellen und der Ganglionzellen führen eine zeitlich-räumliche Differentiation der auf die Netzhaut projizierten Bildsignale aus und schicken diese vorverarbeiteten Signale weiter bis zum visuellen Cortex.

Das Gebiet der Netzhaut um die optische Achse ist die Makula, der innerer Bereich Fovea heisst. Durch eine hohe Rezeptorenkonzentration ist dieser Bereich besonders empfindlich und hochauflösend, seine Zellen projizieren ihre Signale auf einen verhältnismässig grossen Bereich des visuellen Cortex. Wir können nur solche Objekte im Detail erkennen, die von der Linse auf die Makula mit Fovea projiziert werden [6].

3.2 Sehstörungen

Sehstörungen oder Blindheit werden durch den Verlust oder krankhafte Veränderungen der Neuronen in der Sehbahn hervorgerufen. Drei häufige Ursachen werden im Folgenden detaillierter beschrieben. Entsprechende Symptome sind in unserem Projekt implementiert.

3.2.1 Retinitis pigmentosa (RP)

Retinitis Pigmentosa stellt eine Gruppe von genetischen Defekten dar, die zu einer Degeneration der Netzhaut führen. Sie ist einen progressiven Verlust an Photorezeptoren gekennzeichnet und kann zu vollständiger Blindheit führen. Die aktuellen Symptome hängen davon ab, ob zuerst die Zapfen oder Stäbchen befallen waren. Meistens sind zuerst die Stäbchen beschädigt. Da die Stäbchen besonders in der Peripherie der Netzhaut konzentriert sind, also weiter von der Makula oder Fovea entfernt, leidet zunächst die periphäre Sicht bei dunkler Beleuchtung. Bei fortschreitender Erkrankung werden auch die Zapfen angegriffen, so dass dann die Farbperzeption sowie zentrale Sicht schwächer werden und möglicherweise ganz verschwinden. In den seltenen Fällen, wo RP mit einer Degeneration der Zapfen beginnt, verläuft das Krankheitsbild umgekehrt.

3.2.2 Altersbedingte Makula-Degeneration (AMD)

Die altersbedingte Makula-Degeneration ist eine Augenkrankheit, die wie RP zu vollständiger Blindheit führen kann. Dabei bilden sich die neuronalen Strukturen der Makula mit Fovea in der optischen Achse des Auges um, bis dort keine strukturierte Signalaufnahme und –verarbeitung mehr möglich ist. AMD betrifft also besonders die zentrale Sicht, ohne die keine detaillierte Bilderkennung möglicht ist. Patienten mit AMD erfahren zuerst eine Verwaschung der zentralen Sicht, beispielsweise beim Lesen; gerade Linien erscheinen verbogen oder verwaschen. Im Verlaufe der Erkrankung treten dann meistens vollständig blinde Bereiche im zentralen Sichtfeld auf, was zu erheblichen visuellen, kognitiven und sozialen Problemen führen kann [11]. So können ältere Personen mit AMD und Hörstörungen beispielsweise nur noch bedingt das Sprachsignal eines Gesprächspartners absehen.

Es gibt zwei verschiedene Typen von AMD, die nasse oder trockene AMD. Die trockene AMD betrifft etwa 90% aller AMD-Fälle und wird durch Akkumulation bestimmter Proteine an den Photorezeptoren hervorgerufen. Sie verläuft in drei typischen Stadien und kann bei Erreichen des dritten Stadiums nicht mehr durch Therapie gestoppt werden. Die nasse AMD tritt durch Erweiterung der Blutgefässe und Ansammlung von Blut an oder in den Photorezeptoren auf; es gibt nur ein Stadium, das Krankheitsbild verschlimmert sich schnell.

3.2.3 Glaukom

Ein Glaukom wird durch Erkrankung des optischen Nervs hervorgerufen und beschreibt eine Gruppe von visuellen Problemen, welche zu einem steten Verlust der visuellen Perzeption führen. Diese sind durch Einschränkung des Informationsflusses zwischen Netzhaut und visuellem Cortex bedingt. Obwohl das Glaukom mit einem erhöhten Augeninnendruck in Verbindung gebracht wird, legen doch mehrere Studien nahe, dass sich auch bei normalem Augeninnendruck ein Glaukom entwickeln kann ([12], [13]). Sie weisen auf weitere Risikofaktoren hin.

4 Graphical User Interface (GUI)

Zur Darstellung der beschriebenen auditorisch-visuellen Störungen wurde eine grafische Benutzerschnittstelle entwickelt. Sie umfasst fünf Fenster (*composer, general settings, auditory settings, visual settings, presentation*).

Im *composer*-Fenster kann der Benutzer grundsätzliche Einstellungen über die Art der Perzeptionsstörungen vornehmen und Kombinationen von auditiven und visuellen Störungen vorgeben. Das *general-settings*–Fenster wird vom Composer-Fenster aus geöffnet; man beispielsweise Alter und Geschlecht des virtuellen Patienten bestimmen und festlegen, ob man prototypische oder individuell einstellbare Störungen nachbilden möchte. Im *auditory-settings*-Fenster legt der Benutzer im Frequenzbereich zwischen 100-8000 [Hz] das Audiogramm des Patienten mit Schalldruckpegeln für die Hörschwelle zwischen 0-120 [dB] fest. Für den Fall einer Geräusch-Induzierten Hörstörung kann der Benutzer auch festlegen, ob es sich typischerweise um ein akustisches Trauma durch ein plötzliches lautes Hörereignis oder durch lange anhaltende Hintergrundgeräusche handeln soll. Zusätzlich können Rauschen und Tinnitusgeräusche eingeblendet werden. Im *visual-settings*-Fenster legt der Benutzer den Ort der Sehstörung innerhalb der Sehbahn sowie die Art und zahlreiche prägende Parameter fest. Im *presentation*-Fenster werden das verfremdete Video wiedergegeben, wobei das verfremdete Audiosignal auf den Kopfhörer- oder Lautsprecherausgang gelegt sind.

Abbildung 7 – *Auditory-settings* –Fenster.

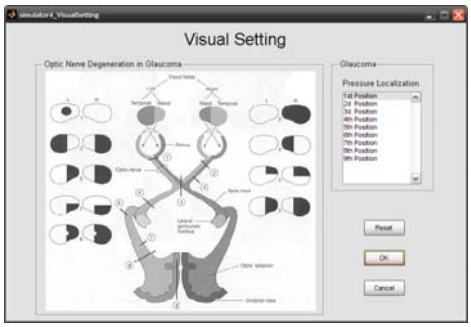

Abbildung 8 – *Visual-settings*-Fenster.

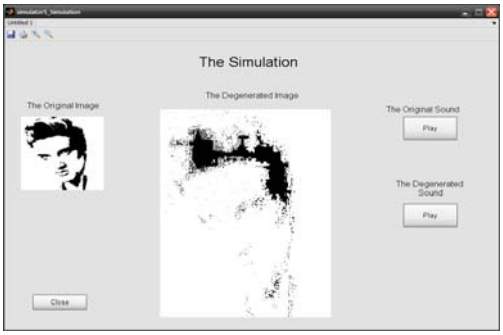

Abbildung 7 - *Presentation*-Fenster; Video und Ton werden nach dem Drücken des Play-Knopfs abgespielt; über den Load-Knopf wird eine audio-video-Datei vom Speichermedium geladen.

5 Perspektiven

Zukünftige Arbeiten in diesem Projekt umfassen die Projektion des visuellen Signals auf eine das gesamte Gesichtsfeld ausfüllenden TFT-Brille sowie die Implementation weiterer Möglichkeiten, Hör- und Sehstörungen zu simulieren. Es sollen auch Methoden erarbeitet werden, den Realismus der vorgestellten Simulationen zu beurteilen. Ferner mag das Projekt dazu dienen, die Sensibilität der Gesellschaft für Probleme hör- und sehgeschädigter Menschen zu schärfen.

Literatur

[1] Houtsma, A.J.M., T.D. Rossing, and W.M. Wagenaars (1984). CD *Auditory Demonstrations*, Acoustical Society of America and Institute for Perception Research, Eindhoven/NL, http://asa.aip.org/discs.html.

[2] Bregman, A.S. and P.A. Ahad (1994). CD *Demonstrations of Auditory Scene Analysis*, McGill University, http://www.psych.mcgill.ca/labs/auditory/bregmancd.html.

[3] Duda, R.O. (1996). CD *Binaural Demonstrations*, distributed with Acustica united with Acta Acustica, vol. 82.

[4] Moore, B.C.J. (1995). CD *Audio demonstrations to accompany perceptual consequences of cochlear damage*, University of Cambridge/UK, http://hearing.psychol.cam.ac.uk/Biogs/cd.html.

[5] Ellis, D. (2009). CD *Auditory Demonstration*, International Computer Science Institute (ICSI), Berkeley/CA, http://www.auditory.org.

[6] Stephens, T.D., R.R. Seeley, and P. Tate (2003). *Anatomy and Physiology* (6th ed.).

[7] Widex (2007). *Sound and Hearing* (3rd ed), Vaerloese/Danmark, widex@widex.com.

[8] Jansen, E.J.M., H.W. Helleman, W.A. Dreschler, and J.A.P.M. Laat (2009). Noise-induced hearing loss and other hearing complaints among musicians of symphony orchestras, Int. Arch. Occup. Environ. Health, vol. 82(2), pp. 153-64.

[9] NIDCD (2008). *NIDCD Fact Sheet Noise-Induced Hearing Loss,* National Institute on Deafness and other Communication Disorders, Department of Health and Human Services, Bethesda, MD.

[10] Holley, M.C. (2005). The auditory system, hearing loss and potential targets for drug development, Drug Discovery Today, vol. 10(19), pp. 1269-1282.

[11] Foundation Fighting the Blindness (2009), http://www.blindness.org/.

[12] DGF (2009). Dansk Glaukom Forening, http://www.glaukom.dk/glaukom-fakta.htm.

[13] GRF (2009). Glaucoma Research Foundation, http://www.glaucoma.org/learn/are_you_at_risk.php.