

# **Multimodal Sensor and Actuator System for Hearing Instruments**

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by  
**BERND TESSENDORF**

Dipl.-Ing., RWTH Aachen University, Germany  
Dipl.-Kfm., FernUniversität in Hagen, Germany  
Date of birth April 25th, 1981  
Citizen of Germany

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Gerhard Tröster, examiner  
Prof. Dr. Matjaz Debevc, co-examiner  
Prof. Dr. Volker Hohmann, co-examiner

# Abstract

Hearing impairment is increasingly affecting people worldwide. The World Health Organization estimates that the number of people in the world with hearing impairments exceeded 278 million in 2005, or about 4.3% of the world's population. It is estimated that almost a fifth of the hearing impaired population in developed countries uses hearing instruments (HIs).

Hearing instruments have become context-aware devices that analyze the acoustic environment in order to automatically adapt the sound processing to the user's estimated current hearing wish. However, in the same acoustic environment different hearing wishes might be possible requiring different behaviors of the HI. In these cases the audio signal alone contains too little contextual information to determine the user's hearing wish.

In this work, we developed and evaluated a system to improve automatic hearing program selection and head-gesture-based control of HIs. We consider the user's body movements and location, as opposed to the state-of-the-art approach of using sound processing only.

With experiments in an office scenario and in outdoor real-life settings we were able to show that our proposed system is especially useful in the case of the acoustic ambiguity problem, i.e. when different hearing wishes are possible in the same acoustic environment. For the study with 11 normal-hearing participants (6 male, 5 female, age 24–59) considering an office scenario we improved the hearing wish recognition accuracy of 77% using solely sound to an accuracy of 84% considering head movements using a subject-independent support vector machine (SVM) classifier.

We developed a graphical method to explore the correlation between the user's hearing wish and cues such as the user's location, mode of locomotion and gestures. We found correlations between combinations of cues and the user's hearing wish, which could be used for a-priori-distributions to refine the automatic hearing program selection. E.g., for the user sitting we observed a lower hearing wish change rate (0.67 changes per minute) compared to walking (1.29 changes per minute). Thus, the recognition of the mode of locomotion could be used to optimize the HI's ability to adapt to the user's current hearing situation.

We developed a head-gesture-based control for HIs and achieved a precision of 96% and a recall of 97% for spotting the two head gestures used in the study: tilting the head to the left and right side. In a study with 12 hearing-impaired HI users (8 men, 4 women, age 27–77) we compared the head-gesture-based control to existing HI interaction solutions: HI buttons and HI remote control. The results showed that head gesture control was the fastest way to perform a single volume adjustment (taking about 2 seconds compared to HI buttons, and remote control with about 3.5 seconds). All participating HI users would appreciate head gesture control to complement the existing HI interaction solutions, especially in scenarios, in which the HI user's hands are busy, dirty, or when wearing gloves.

We developed vibrotactile-enhanced HIs, which provided haptic feedback behind the user's ears to support him with localizing sound sources. To investigate which

kind of vibration patterns were most suitable in HIs and to compare different encoding schemes with respect to resolution, response time, intuitiveness and user dependency a user study with 16 participants (7 males, 9 females, age 23–61) was conducted. We identified a trade-off between the minimal quantization error due to the encoding and the number of user errors due to misinterpretation of presented patterns, and a trade-off between response time and minimum lateralization error.

In a study with 9 participants (4 female, 5 male, 4 HI users, age 26–45) we investigated the benefit of the bilateral vibrotactile feedback for accessible gaming. HI users could not benefit from the stereo game sound for localization like normal-hearing participants. With our system the HI users achieved a gaming performance closer to that of normal-hearing participants.

We concluded that introducing additional modalities to sound –HI-integrated accelerometers, the user’s smartphone and bilateral vibrotactile feedback in particular– to further enhance HIs rendered a promising approach and might allow HI users a further step towards compensating their impairment.

# Zusammenfassung

Weltweit ist ein steigender Anteil an Hörgeschädigten zu beobachten. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) schätzt, dass die Zahl der Hörgeschädigten in der Welt im Jahr 2005 mehr als 278 Millionen betrug. Dies entspricht rund 4,3% der Weltbevölkerung. Es wird geschätzt, dass fast ein Fünftel der hörgeschädigten Bevölkerung in den entwickelten Ländern Hörgeräte verwendet.

Hörgeräte haben sich zu kontext-sensitiven Geräten entwickelt, welche das akustische Umfeld des Nutzers analysieren, um die Schallverarbeitung automatisch an seinen aktuellen Hörwunsch anzupassen. Jedoch kann der Nutzer in der gleichen akustischen Umgebung unterschiedliche Hörwünsche aufweisen, die unterschiedliches Verhalten des Hörgeräts erfordern. In diesen Fällen enthält das Audiosignal allein zu wenig Information, um den Hörwunsch eindeutig zu bestimmen.

In dieser Arbeit wurde ein System zur Verbesserung der automatischen Hörprogrammauswahl und zur Steuerung des Hörgeräts mit Kopfgesten entwickelt und evaluiert. Zusätzlich zu der Analyse der akustischen Umgebung, wie sie in Hörgeräten mit Stand der Technik stattfindet, wurden Körperbewegungen und der Ort des Nutzers miteinbezogen.

In Experimenten in einem Büroszenario und im Freien wurde gezeigt, dass das vorgeschlagene System die automatische Hörprogrammwahl insbesondere im Falle der akustischen Mehrdeutigkeit verbessert, bei der unterschiedliche Hörwünsche in der gleichen akustischen Umgebung auftreten können. Für die Studie im Büroszenario mit 11 normalhörenden Teilnehmern (6 Männer, 5 Frauen, Alter 24 bis 59) wurde die Erkennungsgenauigkeit des Hörwunsches von 77% unter ausschliesslicher Verwendung von Audiosignalen auf eine Genauigkeit von 84% unter Berücksichtigung von Kopfbewegungen verbessert. Zur Klassifizierung wurde ein personenunabhängiger Support Vector Machine (SVM)-Klassifikator verwendet.

Im Rahmen der Arbeit wurde eine grafische Methode entwickelt, um die Korrelation zwischen dem Hörwunsch des Nutzers und Indikatoren wie dem Standort des Benutzers, der Art seiner Fortbewegung und vollzogenen Gesten zu explorieren. Es zeigte sich, dass Kombinationen von derartigen Indikatoren mit dem Hörwunsch des Nutzers korrelierten und damit für das Aufstellen von a-priori-Verteilungen für eine verfeinerte automatische Hörprogrammauswahl geeignet sind. Beispielsweise wurde für sitzende Nutzer eine niedrigere Hörwunsch-Wechselrate (0,67 Änderungen pro Minute) als für laufende Nutzer (1,29 Änderungen pro Minute) beobachtet. Somit könnte das Einbeziehen der Art der Fortbewegung für eine verbesserte Anpassung des Hörgeräts an den Hörwunsch des Nutzers verwendet werden.

Es wurde eine kopfgesten-basierte Steuerung für Hörgeräte entwickelt, die eine Genauigkeit von 96% und eine Trefferquote von 97% für die Erkennung der beiden verwendeten Kopfgesten, das Neigen des Kopfes nach links und rechts, in der Studie erreichte. In einer Studie mit 12 hörgeschädigten Teilnehmern (8 Männer, 4 Frauen, Alter 27 bis 77) wurde die kopfgesten-basierte Steuerung mit bereits existierenden Steuerungsmöglichkeiten des Hörgeräts verglichen: Hörgeräteknöpfe und Hörgeräte-Fernbedienungen. Die Ergebnisse zeigten, dass die Steuerung mit Kopfgesten die

schnellste Möglichkeit ist (rund zwei Sekunden im Vergleich zu über drei Sekunden für Hörgeräteknöpfe und -fernbedienung), um eine einzelne Lautstärkeänderung durchzuführen. Alle Teilnehmer der Studie würden eine kopfgesten-basierte Steuerung als Ergänzung zu den bestehenden Lösungen begrüßen, insbesondere in Anwendungsfällen, in denen die Hände des Nutzers beschäftigt oder schmutzig sind oder Handschuhe getragen werden.

Es wurden Hörgeräte entwickelt, die dem Nutzer haptische Rückmeldung hinter den Ohren geben, um ihn bei der Lokalisierung von Schallquellen zu unterstützen. Um zu untersuchen, welche Art von vibrotaktilen Mustern am besten für Anwendungen in Hörgeräten geeignet sind und um diese in Bezug auf Auflösung, Reaktionszeit, Einfachheit für den Nutzer und Nutzerabhängigkeit zu vergleichen, wurde eine Studie mit 16 Teilnehmern (7 Männer, 9 Frauen, Alter 23 bis 61) durchgeführt. Es wurde eine Austauschbeziehung zwischen dem minimalen Quantisierungsfehler des Zielwinkels aufgrund der Kodierung und der Anzahl der Benutzerfehler aufgrund von Fehlinterpretationen der Muster identifiziert. Weiterhin wurde eine Austauschbeziehung zwischen Antwortzeit und minimalem Lateralisierungsfehler festgestellt.

In einer Studie mit 9 Teilnehmern (4 Frauen, 5 Männer, 4 Hörgerätenutzer, Alter 26 bis 45) wurde der Nutzen von bilateralem vibrotaktilen Feedback in einer Computerspieleanwendung untersucht. Die Hörgerätenutzer konnten nicht im gleichen Masse wie die normalhörenden Teilnehmer vom Stereo-Sound im Spiel für die Lokalisierung profitieren. Mit vibrotaktilen Feedback erzielten die Hörgerätenutzer eine Spieleperformance, die näher an die der normalhörenden Teilnehmer heranreichte.

Insgesamt stellt die Einführung zusätzlicher Modalitäten zu Schall –insbesondere in Hörgeräte integrierte Beschleunigungssensoren, das Smartphone des Nutzers und bilaterales vibrotaktilen Feedback– einen vielversprechenden Ansatz zur weiteren Verbesserung von Hörgeräten dar und könnte Hörgerätenutzern einen weiteren Schritt zur Kompensation ihrer Hörbeeinträchtigung ermöglichen.