Reziproke Messung des akustischen Feedbackpfades bei Hörgeräten

Tobias Sankowsky-Rothe[1], Henning Schepker[2], Matthias Blau[1]
[1] *Institut für Hörtechnik und Audiologie, Jade Hochschule, 26121 Oldenburg, Deutschland,*
Email: tobias.sankowsky@jade-hs.de
[2] *Universität Oldenburg, Department of Medical Physics and Acoustics und Exzellenzcluster Hearing4All,*
Signal Processing Group, 26129 Oldenburg, Deutschland

Einleitung

Das Auftreten von Feedback bei Hörgeräten ist ein Problem, das eine Beeinträchtigung des Signals bzw. eine Verminderung der möglichen Verstärkung zur Folge hat. Die Feedbackneigung steht insbesondere mit den Vorteilen einer offenen Versorgung (Minimierung des Okklusionseffektes) in Konflikt. Algorithmen zur Feedbackunterdruckung können die zur Verfügung stehende Verstärkung deutlich erhöhen, siehe zum Beispiel [1]. Die vielversprechendsten dieser Verfahren nutzen adaptive Filter, um den akustischen Feedbackpfad zu schätzen. Die Entwicklung und Optimierung solcher Verfahren setzen daher eine Messung des Feedbackpfades voraus. Die Messung des akustischen Feedbackpfades bei Hörgeräten erfordert die Erzeugung von Schalldruckpegeln im Gehörgang, die am Hörgerätemikrofon außen am Ohr aufgenommen werden. Dies führt zum Teil dazu, dass entweder der Schalldruckpegel am Trommelfell des Hörgeräteträgers extrem hoch ist, oder aber der Feedbackpfad nicht sicher bestimmt werden kann. Um dieses Problem zumindest unter Laborbedingungen zu lösen, wurde untersucht, ob der akustische Feedbackpfad auch reziprok gemessen werden kann. Hierbei wurden nach dem Reziprozitätsprinzip [2] die Positionen von Quelle und Empfänger getauscht. Die reziprok gemessenen Feedbackpfade wurden mit direkten Feedbackpfadmessungen verglichen.

Methodik

Der Feedbackpfad H_{FBP} ist definiert als

$$H_{\mathrm{FBP}} = \frac{u_{\mathrm{mic}}}{u_{\mathrm{rec}}} \tag{1}$$

mit der Mikrofonspannung u_{mic} und der Receiverspannung u_{rec}. Zum Vergleich von reziproker und direkter Feedbackpfadmessung wurden Messungen an einem Kunstkopf mit variabler Gehörgangsgeometrie (DADEC nach [3]) durchgeführt. Bei diesem Kunstkopf können Röhrchen mit unterschiedlichen Durchmessern als Gehörgang eingesetzt werden und die Gehörgangslänge kann variiert werden. Darüber hinaus verfügt der DADEC über einen Gehörgangsabschluß, der die akustische Impedanz eines realen Trommelfells (inkl. Mittelohr) nachbildet. Es wurde ein Hinter-dem-Ohr-Hörderätedummy mit zwei Mikrofonen (vorne und hinten) verwendet, siehe Abbildung 1. Um mechanisches Feedback möglichst auszuschließen wurde ein externer Hörgerätereceiver (Typ Knowles TWFK-23991) mit einem Schlauch von ca. 8 cm Länge und einem Innendurchmesser von 1 mm verwendet. Es wurden unterschiedliche Otoplastiken gefertigt: Zum einen war es erforderlich, die Otoplastiken passend zum Gehörgangsdurchmesser zu fertigen, zum anderen sollte der Einfluss verschiedener Belüftungen untersucht werden. Für die Belüftung wurde zwischen sogenannten offenen Otoplastiken, die nur eine fixe Position des Schallschlauches gewährleisten, den Gehörgang sonst aber offen lassen, und Otoplastiken mit Vent (ca. 2 mm Durchmesser) unterschieden. Die untersuchten Kombinationen von Gehörgangsgeometrien und Belüftungen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

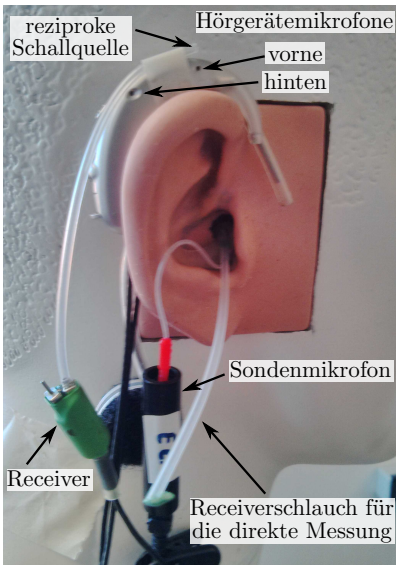

Abbildung 1: Foto des Hörgerätes am Ohr mit Anschluss des externen Receivers und des Sondenmikrofons für die reziproke Messung des Feedbackpfades.

Tabelle 1: Untersuchte Kombinationen von Gehörgangsgeometrien und Belüftungen

Länge Gehörgang	Durchmesser Gehörgang		
	6 mm	7 mm	8 mm
15 mm		offen, Vent	offen, Vent
20 mm	offen	offen, Vent	offen, Vent

Für die reziproke Messung des Feedbackpfades wurde der selbe externe Receiver mit einem weiteren 8 cm langen Schlauch verwendet, wobei das Ende des Schlauches am Hörgerät über dem vorderen Hörgerätemikrofon befestigt war, siehe Abbildung 1. Der Receiverschlauch in der Otoplastik wurde für die reziproke Messung von außen ver-

schlossen. Als Mikrofon wurde ein Sondenmikrofon (Typ Etymotic ER7c) verwendet, dessen Schlauch durch eine zusätzliche Bohrung durch die Otoplastik geführt wurde.

Zusätzlich zu den Mikrofonsignalen wurde auch das Receiversignal gemessen, somit konnte die Übertragungsfunktion der direkt gemessenen Feedbackpfade bestimmt werden. Für die reziproke Messung wurde das Signal des Mikrofons im Gehörgang auf die Empfindlichkeit des vorderen Hörgerätemikrofons kalibriert nach

$$H_{\mathrm{FBP,reziprok}} = \frac{u_{\mathrm{mic}}}{u_{\mathrm{rec}}} \frac{B_{\mathrm{mic,front}}}{B_{\mathrm{mic,probe}}} \tag{2}$$

wobei der Quotient der Mikrofonempfindlichkeiten von forderem Hörgerätemikrofon relativ zum Sondenmikrofon $B_{\mathrm{mic,front}}/B_{\mathrm{mic,probe}}$ zuvor einmal durch eine weitere Messung im Freifeld bestimmt wurde. Alle Messungen wurden mit weißem Rauschen durchgeführt. Die Übertragungsfunktionen wurden mit standard FFT-basierten Methoden bestimmt (H_1-Schätzer, FFT-Länge 16384, 50 % overlap, Hann-Fenster).

Bei dem beschriebenen Vorgehen bestanden potentielle Fehlerquellen einerseits in der Reproduzierbarkeit durch Positionierungsunterschiede, die bei wiederholtem Einsetzen der Otoplastik und für die reziproke Messung zusätzlich beim Anbringen des Receiverschlauches außen am Hörgerät auftreten können. Andererseits wurden die Positionen von Receiver und Mikrofon für die reziproke Messung nicht exakt vertauscht, stattdessen wurden sie aus praktischen Gründen nur in unmittelbarer Nähe angebracht. Die Schallquelle außen am Hörgerät wurde über dem vorderen Mikrofon positioniert und das Sondenmikrofon befand sich an der Innenseite der Otoplastik neben dem Receiverschlauch, wodurch systematische Fehler zu erwarten waren.

Ergebnisse

Abbildung 2 zeigt exemplarische für einen 20 mm langen Gehörgang mit 7 mm Durchmesser und einer offenen Otoplastik die direkt gemessenen Feedbackpfade (vorderes und hinteres Hörgerätemikrofon) und den reziprok gemessenen Feedbackpfad für die vordere Mikrofonposition. In diesem Fall konnte der Feedbackpfad für Frequenzen ab etwa 700 Hz bestimmt werden. Im Frequenzbereich bis etwa 5 kHz zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen der direkten Messung mit dem vorderen Mikrofon und der reziproken Messung. Bei höheren Frequenzen tritt ein Minimum im Feedbackpfad auf, das im wesentlichen durch die Länge des Gehörgangs bestimmt ist. Die Position des Minimums ist bei der reziproken Messung zu tieferen Frequenzen verschoben, weshalb in diesem Frequenzbereich recht große Unterschiede zwischen direkter und reziproker Messung zu beobachten sind. Bei etwa 3,3 kHz ist im reziprok gemessenen Feedbackpfad ein schwach ausgeprägtes lokales Minimum zu erkennen, das beim direkt gemessenen Feedbackpfad nicht auftritt. Hier besteht die Vermutung, dass dieses Minimum durch den ungenutzten Receiverschlauch in der Otoplastik hervorgerufen wurde.

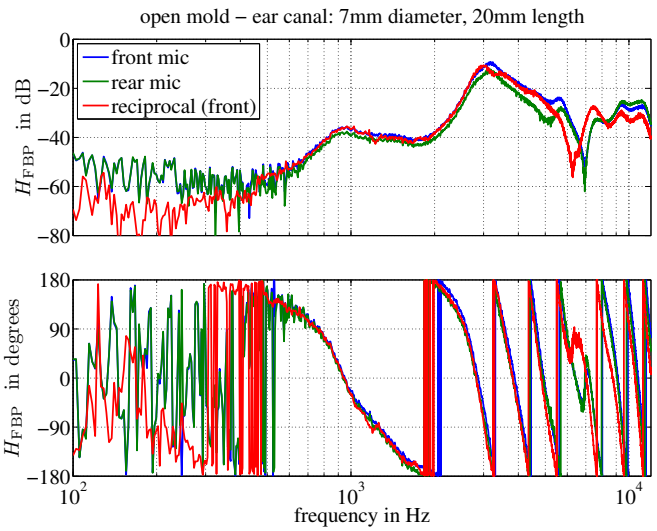

Abbildung 2: Feedbackpfade direkt gemessen mit vorderem und hinterem Hörgerätemikrofon und reziprok gemessen, an einem Gehörgang mit 7 mm Durchmesser und 20 mm Länge mit offener Otoplastik.

Der Vergleich zwischen den mit dem vorderen und dem hinteren Hörgerätemikrofon gemessenen Feedbackpfaden zeigt einen geringen Unterschied (1 dB bis 2 dB) im Frequenzbereich bis etwa 3 kHz. Zwischen 3 kHz und 6 kHz ist der Unterschied mit maximal 7 dB etwas größer. Ein verschobenes Schalldruckminimum ist hier nicht zu beobachten.

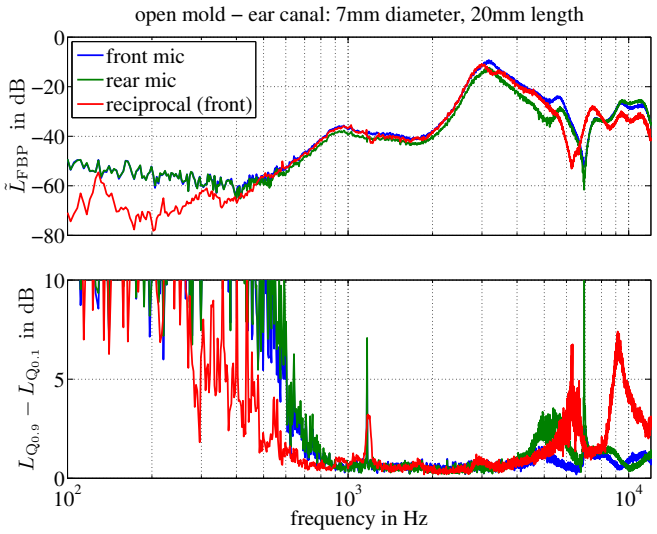

Abbildung 3: Oben: Mediane der Pegel der Feedbackpfade von direkten Messungen (mit vorderem und hinterem Hörgerätemikrofon) und reziproken Messungen und unten: Quantilabstand ($Q_{0,9} - Q_{0.1}$) der Pegel aus je 10 Messungen von direkt und reziprok gemessenen Feedbackpfaden bei einem Gehörgang mit 7 mm Durchmesser und 20 mm Länge mit offener Otoplastik.

Um eine Aussage über die Reproduzierbarkeit der Messungen zu bekommen, wurden sowohl die direkten als auch reziproken Messungen jeweils 10 mal durchgeführt. Zwischen den Wiederholungen der direkten Feedbackpfadmessungen wurde das Hörgerät einmal vom Ohr ge-

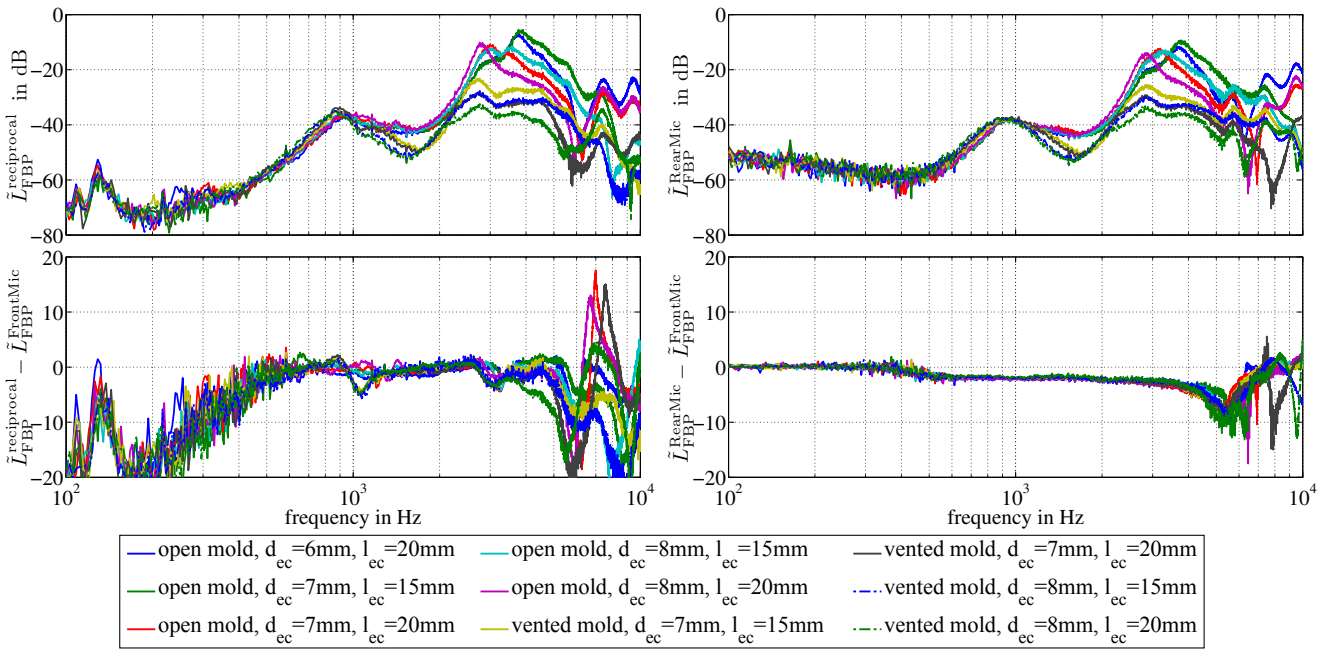

Abbildung 4: Oben: Mediane der Pegel der Feedbackpfade aller gemessenen Kombinationen von Gehörgangsabmessungen und Belüftung für die reziproke Messung links und die direkte Messung mit dem hinteren Hörgerätemikrofon rechts. Unten: Pegeldifferenz der Mediane von reziproker Messung und direkter Messung mit dem vorderen Mikrofon (links) und von direkter Messung mit dem hinteren und dem vorderen Mikrofon (rechts).

nommen und wieder aufgesetzt. Für die Reziproke Messuung wurde der Receiverschlauch außen am Gerät abgenommen und erneut befestigt. Abbildung 3 zeigt oben die Mediane des Pegels der Feedbackpfade und unten den Quantilabstand der 0,9 und 0,1 Quantile.

Allgemein zeigt sich eine gute Reproduzierbarkeit (Quantilabstand < 1 dB) mit Ausnahme der Bereiche, an denen Schalldruckminima auftreten. Darüber hinaus entsteht durch die Positionierung der reziproken Schallquelle eine erhöhte Unsicherheit bei für Hörgeräte sehr hohen Frequenzen (9 kHz).

Abbildung 4 zeigt oben die Mediane der Pegel der Feedbackpfade aller gemessenen Kombinationen von Gehörgangsabmessungen und Belüftung auf der linken Seite für die reziproke Messung und auf der rechten Seite für die Messung mit dem hinteren Hörgerätemikrofon. Hier sind verschiedene Einflussfaktoren auf den Feedbackpfad zu erkennen. In den Frequenzbereichen zwischen 1 kHz und 2 kHz und auch zwischen 2,5 kHz und 5 kHz ist der Einfluss durch die Belüftung gut zu sehen, bei den offenen Otoplastiken ist der Pegel des Feedbackpfades deutlich höher als bei den Otoplastiken mit Vent. Des weiteren ist aber auch ein Einfluss der Gehörgangsabmessungen auf den Feedbackpfad zu erkennen, zum einen ist der Pegel des Feedbackpfades im Frequenzbereich von 2 kHz bis 6 kHz höher, je kleiner das Volumen des Gehörgangs ist. Zum anderen lässt sich hier der Zusammenhang von Schalldruckminimum mit der Gehörgangslänge erkennen.

In der unteren Reihe von Abbildung 4 sind die Differenzen der Mediane der Feedbackpfade, links für die reziproke Messung relativ zur direkten Messung mit dem vorderen Hörgerätemikrofon und rechts für die Messung mit dem hinteren relativ zum vorderen Hörgerätemikrofon, dargestellt. Für die reziproke Messung zeigt sich im Frequenzbereich zwischen 700 Hz bis etwa 5 kHz eine recht gute Übereinstimmung mit dem direkt gemessenen Feedbackpfad wobei bei etwa 1,1 kHz und 3,3 kHz etwas größere Abweichungen auftreten. Wie oben erwähnt wird hier vermutet, das dieser Effekt durch den bei der reziproken Messung ungenutzten Receiverschlauch in der Otoplastik verursacht wurde. Bei höheren Frequenzen treten sehr deutliche Unterschiede zwischen reziprok und direkt gemessenem Feedbackpfad auf, die zum großen Teil auf Verschiebungen des Schalldruckminimums zurückgeführt werden können.

Der Vergleich der Feedbackpfade zwischen hinterem und vorderem Hörgerätemikrofon (siehe Abbildung 4 rechts unten) zeigt bis 3 kHz Unterschiede bis zu 2 dB, zwischen 3 kHz und 6 kHz treten die größten Unterschiede auf, die Abweichungen betragen hier etwa 8 dB. Unmittelbar im Schalldruckminimum sind zum Teil größere Pegeldifferenzen zu sehen.

Diskussion

Die größten Unterschiede zwischen den reziprok gemessenen und den direkt gemessenen Feedbackpfaden treten durch eine Verschiebung des Schalldruckminimums auf. Dies lässt sich auf die Mikrofonposition bei der reziproken Messung zurückführen. In dieser Studie wurde nicht die Position gewählt, an der sich normalerweise der Receiver befindet, sondern eine Position neben der eigentlichen Receiverposition. Unglücklicherweise kann gerade in diesem Bereich des Gehörgangs jedoch nicht von einem ebenen Schallfeld ausgegangen werden, beispielsweise wur-

de in [4] gezeigt, dass an der Innenseite der Otoplastik große Unteschiede im Schalldruckpegel auftreten, insbesondere bei Otoplastiken mit großem Vent. Für alle untersuchten Kombinationen von Gehörgangsabmessungen und Belüftung führt die reziproke Messung zu einer Verschiebung des Schalldruckminimums zu tieferen Frequenzen, was einem scheinbar verlängerten Gehörgang entspricht. Somit lässt sich sagen, dass die reziprok gemessenen Feedbackpfade in diesem Bereich nicht den wahren Feedbackpfaden entsprechen, die Methode aber trotzdem plausible Ergebnisse liefert.

Für Verfahren zur Feedbackauslöschung sind besonders die Frequenzbereiche des Feedbackpfades von Interesse, bei denen der Feedbackpfad einen hohen Pegel aufweist. In Abbildung 2 zeigte sich genau beim Maximum des Feedbackpfades ein Unterschied zwischen reziproker und direkter Messung, der durch den bei der reziproken Messung ungenutzten Receiverschlauch in der Otoplastik verursacht wird. Dieser Effekt ließe sich vermutlich vermeiden, indem der Receiverschlauch nicht wie hier von außen, sondern von innen an der Otoplastik verschlossen wird.

Der eigentliche Vorteil einer reziproken Feedbackpfadmessung liegt im deutlich geringeren Schalldruckpegel im Gehörgang eines Probanden. Bei den hier durchgeführten Messungen lagen die Schalldruckpegel im Gehörgang des Kunstkopfes bei der direkten Messung des Feedbackpfades im Bereich von 110 dB SPL bis 116 dB SPL, bei der reziproken Messung dagegen betrugen die Schalldruckpegel 64 dB SPL bis 81 dB SPL. Der Receiver wurde bei allen Messungen mit der gleichen Spannung betrieben. Somit lässt sich sagen, dass der Feedbackpfad am Probanden bei einer dann erforderlichen Begrenzung des maximalen Schalldruckpegels im Gehörgang durch die reziproke Messung besser bestimmt werden kann.

Fazit und Ausblick

Die vorgestellte Methode zur Messung des akustischen Feedbackpfades scheint gut geeignet zu sein, um plausible Daten für das Feedbackverhalten von Hörgeräten an Probanden zu gewinnen. Durch die reziproke Messung resultiert bei den hier verwendeten Otoplastiken (offen und mit großem Vent) ein etwa 40 dB geringerer Schalldruckpegel im Gehörgang.

Bei der Anwendung dieser Methode zur Messung von akustischen Feedbackpfaden an Probanden gilt es in weiteren Studien zu untersuchen, inwieweit sich Geräusche im Gehörgang (z.B. durch Atmung, Blutzirkulation) auf die Genauigkeit der reziproken Messmethode auswirken.

Danksagung

Diese Arbeit wurde gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG Forschergruppe FOR 1732 Individualisierte Hörakustik).

Literatur

[1] Spriet, A.; Doclo, S.; Moonen, M.; Wouters, J.: Feedback Control in Hearing Aids, in Benesty, J.; Sondhi, M.; Huang, Y. (Eds.) Springer Handbook of Speech Processing, Springer Berlin Heidelberg, pp. 979-1000, (2008)

[2] Strutt (Lord Rayleigh), J. W. Some general theorems relating to vibrations. Proceedings of the London Mathematical Society, vol. s1-4, no. 1, pp. 357-368, (1873)

[3] Hiipakka, M.; Tikander, M. , Karjalainen, M.: Modeling the External Ear Acoustics for Insert Headphone Usage. J. Audio Eng. Soc., vol. 58, no. 4, pp. 269-281, (2010)

[4] Stinson, M. R., Daigle, G. A.: Transverse pressure distributions in a simple model ear canal occluded by a hearing aid test fixture. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 121, no. 6, pp. 3689-3702, (2007)