Richtmikrofone und Störgeräuschreduktion

Henning Puder

Sivantos GmbH, Erlangen

Schlüsselwörter: Richtmikrofone, Geräuschreduktion, binaurale Audioverarbeitung, binaurale Audioübertragung

Einleitung

Es ist bekannt, z.B. durch die verschiedenen Kochkin Studien, dass Schwerhörende in Umgebungen mit Hintergrundgeräuschen und auch in großen Gruppen nach wie vor Probleme mit dem Sprachverstehen und auch der Höranstrengung beklagen. Nach einem kurzen Überblick über die klassische Audioverarbeitung in Hörgeräten, wird in diesem Beitrag auf Verfahren eingegangen, die hierzu nachgewiesenermaßen Verbesserungen erreichen können. Dies sind Richtmikrofonverfahren, sowohl monaural als auch binaural, sowie Verfahren zur zusätzlichen Geräuschreduktion. Erstere können klare Verbesserungen der Verständlichkeit erreichen, währen letztere v.a. im Bereich Präferenz und Höranstrengung gute Ergebnisse liefern. Bei den hier vorgestellten binauralen Verfahren werden komplette Audiosignale zwischen den Hörgeräten ausgetauscht. Das ist die Grundvoraussetzung zur wesentlichen Verbesserung der Ergebnisse im Vergleich zu den monauralen Verfahren.

Überblick über Audiosignalverarbeitung in Hörgeräten

In Abb. 1 ist ein Blockschaltbild der Hauptkomponenten der Signalverarbeitung dargestellt, die üblicherweise in Hörgeräten realisiert wird.

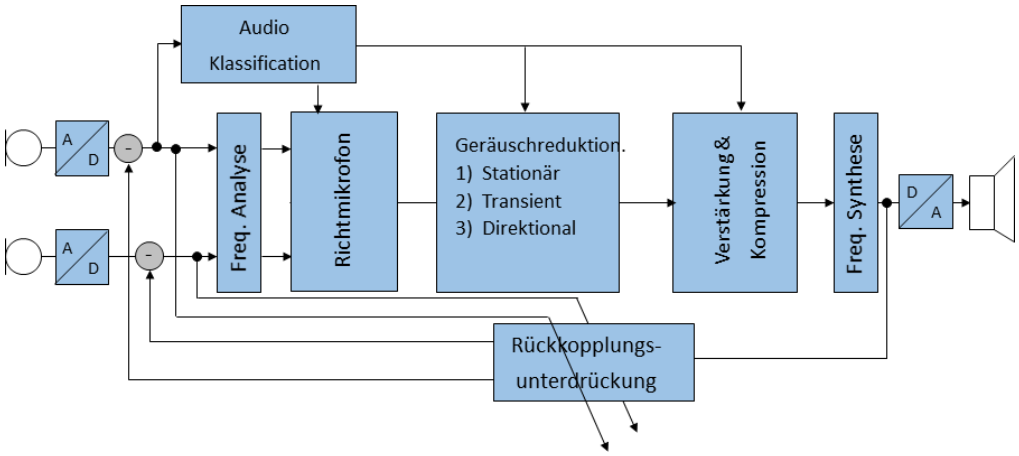

Abbildung 1: Blockschaltbild der üblichen Signalverarbeitung eines 2-Mikrofon-Hörgerätes.

Zwischen Mikrofonen und Hörer, dem Lautsprecher der Hörgeräte, findet die Verarbeitung mit digitalen Signalen statt. Beide Mikrofonsignale werden in Frequenzbänder zerlegt und getrennt voneinander weiterverarbeitet. Nach kombinierter Filterung durch das Richtmikrofon, folgen Verfahren zur weiteren Unterdrückung von akustischen Störungen und zur Verbesserung der Signalqualität. Schließlich sorgt die kompressive Verstärkung für den individuellen Hörverlustausgleich. Durch die meist hohe Verstärkung neigen Hörgeräte zu Rückkopplungen mit verbundenem Pfeifen. Rückkopplungen entstehen, falls die Hörgeräte-Verstärkung größer als die akustische Dämpfung zwischen Hörer und Mikrofonen ist und damit eine geschlossene Schleifenverstärkung größer als 0 dB entsteht. An den Frequenzen, bei denen zusätzlich noch eine konstruktive Phasenbedingung erfüllt ist, entstehen tonale Artefakte, das Rückkopplungspfeifen. Um die Verstärkung nicht reduzieren zu müssen, wählt man einen Kompensationsansatz. Dazu wird das Rückkopplungssignal, das sich akustisch dem gewünschten Eingangssignal überlagert, mit adaptiven Filtern so modelliert, dass es von den Mikrofonsignalen subtrahiert werden kann. Die notwendige Schätzung der für jedes Mikrofon getrennt realisierten Filter ist komplex und aufwändig. Insbesondere bei Musik oder anderen Arten von tonalen Signalen weisen diese Verfahren ein hohes Potential von Fehladaptionen auf, mit dem verbundenen Risiko von Signalverzerrungen. Um die verschiedenen Algorithmen optimal an die jeweilige akustische Umgebung anzupassen, werden akustische Klassifikationsverfahren benutzt. Diese aktivieren und parametrieren die Algorithmen so, dass sie jeweils optimal an die akustische Situation angepasst sind. Beispielhaft ist in einer Cocktail-Party-Situation die Aktivierung von Richtmikrofonen zur Erhöhung der Verständlichkeit hilfreich, jedoch nicht in einer Konzertumgebung zur Wahrnehmung des gesamten Raumklangs.

Richtmikrofone

Zur Realisierung von Richtmikrofonen weisen differentielle Verfahren bei kleinen Abständen gute Eigenschaften auf, v.a. können damit Richtwirkungen bis zu tiefen Frequenzen erreicht werden. Allerdings muss man mit guten Steuerungsverfahren hörbare Verstärkungen des Mikrofonrauschens verhindern. Diese entstehen durch den Tiefpass, mit dem der Frequenzgang des Nutzsignals entzerrt wird. Prinzip des Verfahrens ist, das Signal des hinteren vom vorderen Mikrofon nach angepasster Verzögerung zu subtrahieren. Wählt man beispielhaft die Verzögerung entsprechend der Schalllaufzeit zwischen den Mikrofonen, erhält man die Auslöschung der Signale, die aus der hinteren Richtung auf die Hörgeräte eintreffen. Es entsteht eine sog. Cardioid-Charakteristik, wie im Richtdiagramm in Abb. 2, rechts, dargestellt.

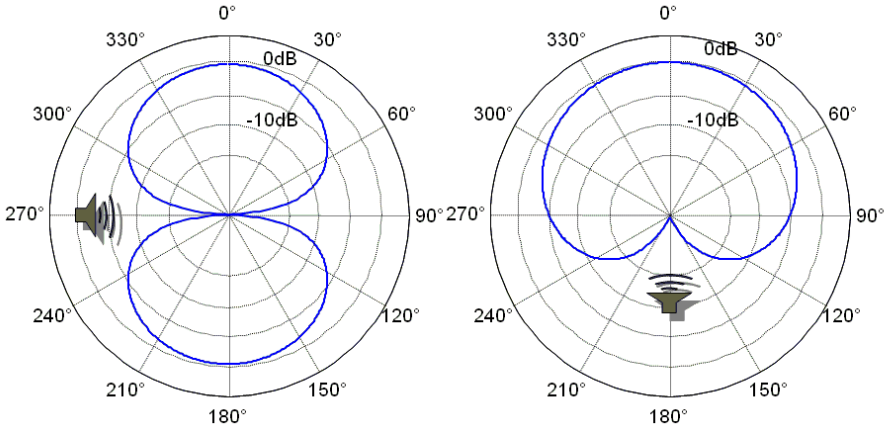

Abbildung 2: Zwei verschiedene Richtdiagramme (Acht: links, Cardioid: rechts) eines differentiellen Richtmikrofons.

Spiegelt man die differentielle Stufe und summiert deren Anteil gewichtet mit einem Parameter, erhält man die in Abb. 3 darstellte Struktur nach [1]. Man kann mit der Wahl des Parameters β zwischen den Werten 0 und 1 eine beliebige Einstellung der Richtwirkung zwischen einer Cardioid- und eine Acht-Charakteristik (s. Abb. 2, links) erreichen. Mit adaptiven Verfahren lässt sich der Gewichtungswert automatisch an die Umgebungsstörung anpassen.

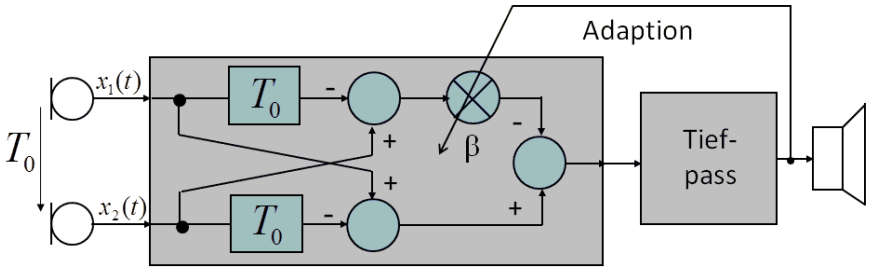

Abbildung 3: Differentielles Richtmikrofon mit über den Gewichtungsfaktor β einstellbarer Richtcharakteristik.

In realen Umgebungen und insbesondere durch die Kopfabschattung am Ohr des Hörgeräte-Trägers sind die Richtcharakteristiken nicht ideal ausgeprägt, sondern weisen frequenzabhängige Eigenschaften auf. Bei unabhängiger Realisierung der differentiellen Verfahren jeweils in einzelnen Frequenzbändern kann man trotzdem eine gute und an die jeweilige Störung angepasste Richtwirkung erreichen. Mit SRT (Speech Reception Threshold) Messungen [2] kann die Verbesserung der Sprachverständlichkeit durch Richtmikrofone objektiv nachgewiesen werden. Das dabei genutzte Mess-Setup ist in Abb. 4 dargestellt. Neben der Nutzquelle von vorne, sind drei Störsprecher bei gleichem Pegel aktiv und zwar von 90°, 180° und 225°. Im Vergleich zur omni-direktionalen Einstellung erhält man eine Verbesserung von, im Median, knapp 6 dB.

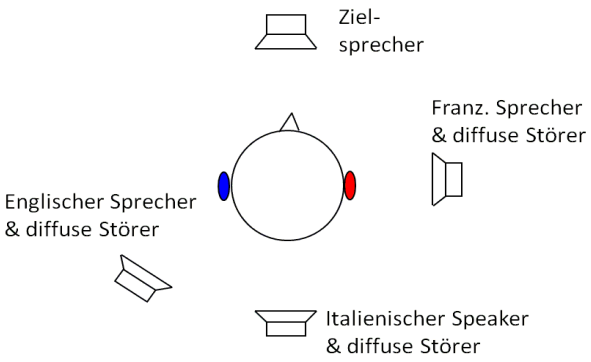

Abbildung 4: Genutzte Anordnung zur Messung der Verbesserung der Sprachverständlichkeit von monauralen differentiellen Richtmikrofonen.

Geräuschreduktion

Geräuschreduktionsverfahren haben das Ziel, akustische Störungen weiter zu unterdrücken, z.B. auch Störungen aus Richtung der Nutzschallquelle, die von Richtmikrofonen nicht adressiert werden können. Mit Geräuschreduktionsverfahren, die nur ein gestörtes Signal zur Verfügung haben, kann keine weitere objektiv messbare Verbesserung der Sprachverständlichkeit erreicht werden, allerdings eine Verringerung der Höranstrengung und eine subjektiv wahrgenommene Verbesserung der Sprachqualität [3].

Durch verschiedene Arten von Störunterdrückungsverfahren erreicht man eine große Bandbreite von Störungen. Kriterien zur Unterscheidung von gewünschten Signalen sind einerseits Stationaritätseigenschaften, d.h. Signale die stationärer oder transienter als Sprache sind, und andererseits auch Richtungsinformationen. Stationäre Störungen werden typischerweise mit Methoden der Wiener-Filterung [4] adressiert. Dazu wird das Signal blockweise (Blocklängen von etwa 20-30 ms) in einzelne Frequenzkomponenten zerlegt und diese nach dem individuellen SNR gewichtet. Aufgabe hierbei ist, die als Geräuschteppich im Spektrogramm erkennbaren stationären Störungen zu reduzieren.

Transiente Störungen, z.B. Geschirrklappern, Zeitungsrascheln, o.ä. werden von Schwerhörenden als sehr unangenehm wahrgenommen, insbesondere durch die sehr harten und lauten Onsets. Diese zu verringern ist Aufgabe der transienten Störunterdrückung. Deren Prinzip ist, die Signaleinhüllende zu bestimmen und im Fall eines sehr starken Anstiegs, Dämpfungen zu applizieren. Wie in Abb. 5 dargestellt, kann man dadurch diese Störungen dämpfen, ohne Sprache zu beeinflussen, eine entscheidende Voraussetzung, um keine Verringerung der Sprachverständlichkeit zu riskieren. Dies kann durch Studien [5] gezeigt werden, die auch die gewünschte Präferenz des Verfahrens im Fall transienter Störungen aufzeigen.

Um zusätzlich Störer zu unterdrücken, deren Stationaritätseigenschaften ähnlich zu Sprache sind, kann kein Verfahren genutzt werden, das auf Unterschiede der Stationarität zwischen Störung und Nutzsprecher zielt. Ein mögliches Kriterium ist hierzu die Einfallsrichtung der Signale. Das Verfahren zur richtungsabhängigen Geräuschreduktion nutzt dazu parallel zum Richtmikrofon im Signalpfad eine zweite Realisierung eines Richtmikrofons, das Signale aus der Richtung des Nutzsignals auslöscht. Die Spektren der Ausgänge dieser beiden Richtmikrofone können nachfolgend zur Berechnung von Leistungsdichtespektren verwendet werden, aus denen danach ein Wiener-Filter realisiert wird. Dieses dämpft alle Signalkomponenten, die nicht aus der Nutzsignalrichtung eintreffen. Damit können auch interferierende Störsprecher gedämpft werden.

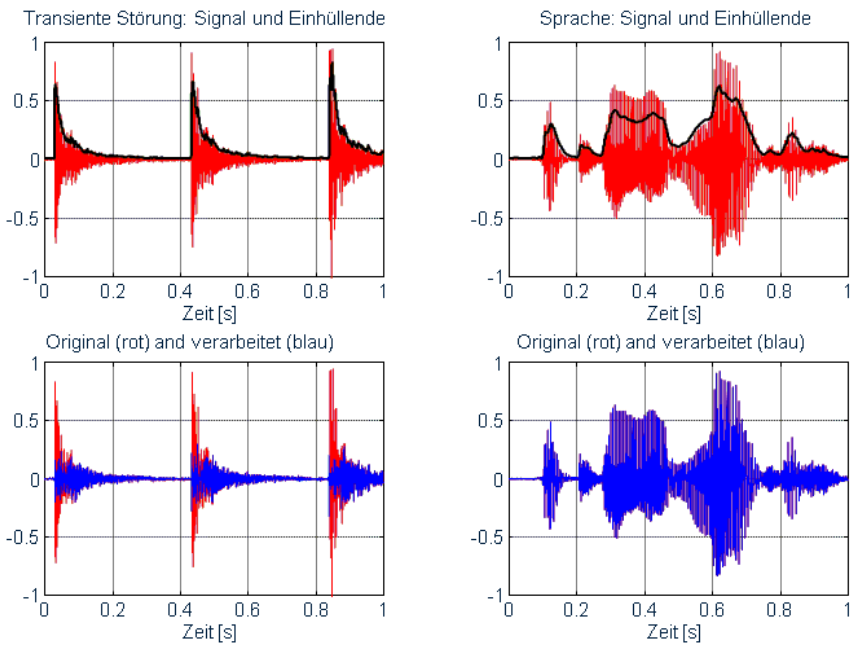

Abbildung 5: Darstellung des Prinzips der transienten Störunterdrückung: Auf Basis der Einhüllenden der Signale (oben, schwarz) werden Dämpfungen berechnet. Nach Anwendung wird deutlich, dass transiente Störer unterdrückt werden, Sprache aber unbeeinflusst bleibt.

Binaurale Richtmikrofone

Ziel der binauralen Richtmikrofone ist, die Sprachverständlichkeit durch einen stärkeren räumlichen Fokus auf den Zielsprecher zu verbessern, d.h. eine engere Richtkeule zu realisieren. Binaurale Verfahren können so umgesetzt werden, dass zunächst in jedem Hörgerät getrennt voneinander ein monaurales Richtmikrofon berechnet wird und diese Signale dann zwischen den Hörgeräten zur nachfolgenden binauralen Verarbeitung ausgetauscht werden.

Eine Möglichkeit, das binaurale Richtmikrofon zu realisieren, ist durch Subtraktion der beiden ausgetauschten Signale eine Auslöschung des Zielsprechers und damit eine Referenz für die Störung zu erreichen (s. Abb. 6). Durch die Subtraktion der binauralen Signale wird ein enges räumliches Kerbfilter in Richtung der Nutzquelle erreicht.

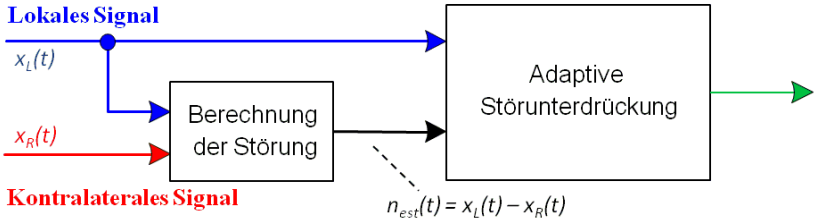

Abbildung 6: Prinzip einer möglichen binauralen Richtmikrofonverarbeitung: Die monaural vorverarbeiteten Signale werden nach binauralem Austausch voneinander subtrahiert, um eine gute Referenz aller Störer, d.h. von Signalen außerhalb der Blickrichtung des Hörgeräteträgers zu erhalten. Mit dieser Referenz können nachfolgend adaptive Verfahren genutzt werden, um die Störung aus dem Nutzsignal zu entfernen.

Damit werden in der Störreferenz Signale aus Winkelbereichen enger neben der Blickrichtung, als bei monauraler Verarbeitung, erfasst, die nachfolgend ausgelöscht werden können. In jedem der beiden Hörgeräte wird das Ausgangssignal des monauralen Richtmikrofons und die Störreferenz mit einem adaptiven Störunterdrückungsverfahren verrechnet. Das Verfahren kann sich z.B. an GSC (generalized sidelobe canceller) [6] oder LCMV (linear constrained minimum variance) [7] Richtmikrofonverfahren orientieren. Ergebnisse sind in Abb. 7 dargestellt.

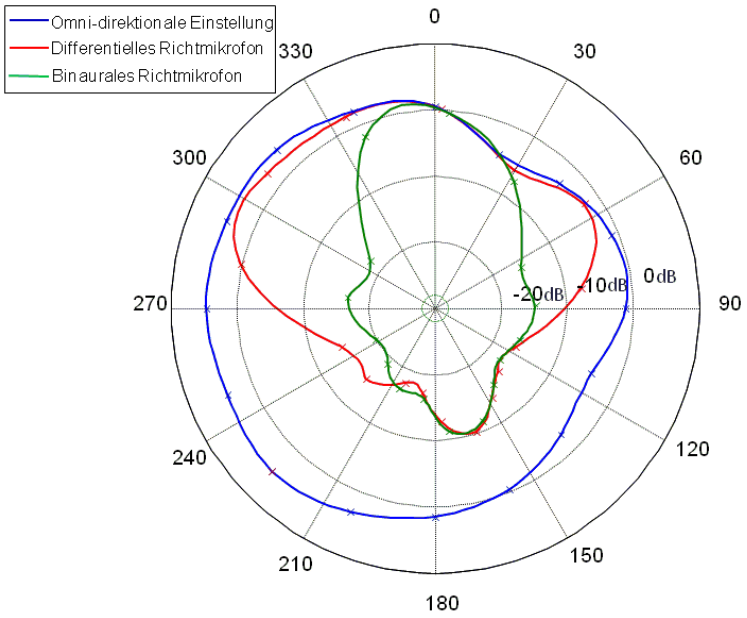

Abbildung 7: Maximal erreichbare Dämpfung durch Richtmikrofone bei aktiver Sprachquelle von vorne, nach [8] für ein linkes Hörgerät bei 1 kHz. Man erkennt für den omni-direktionalen Setup die Kopfabschattung von rechts. Die Richtkeule im monauralen Setup ist mit +/- 70° sehr breit. Durch die enge Richtwirkung können beim binauralen Richtmikrofon auch seitliche Störer, z.B. aus +/- 45° unterdrückt werden.

Im Vergleich zur Richtungsabhängigkeit eines Mikrofons im Hörgerät am Kopf bei 1 kHz sind hier die maximalen Dämpfungen dargestellt, die mit monauralen und binauralen Richtmikrofonen bei aktivem Zielsprecher erreichbar sind. Man erkennt zunächst im omni-direktionalen Setup die Abschattung als leichte Dämpfung von rechts für das genutzte linke Hörgerät am Kopf (blau). Monaurale Richtmikrofone erreichen gute Dämpfungen für Signale aus dem hinteren Bereich und von der Seite. Allerdings ist die Richtkeule im Bereich von etwa +/- 70° recht breit (rot). Mit dem binauralen Richtmikrofon werden durch die engere Richtkeule auch seitliche Sprecher, z.B. aus +/- 45° gut unterdrückt (grün).

In Sprachverständlichkeitstest können die Verbesserungen durch SRT-Messungen gezeigt werden. In diesem Fall wurde eine spezielle Hypothese getestet. Diese besteht darin festzustellen, ob es möglich ist, dass Schwerhörende mit Hörgeräten und binauraler Verarbeitung in gestörter Umgebung ein besseres Sprachverstehen erreichen, als Normalhörende ohne Hörgeräte. Die für die Tests genutzte Anordnung bestand aus acht Quellen im gleichen Winkelabstand von je 45°, davon eine Nutzquelle aus der Blickrichtung des Hörgeräteträgers. Aus allen sieben Störrichtungen wurden Störsprecher ohne Pause und zusätzlich auch "speech babble" mit einem SNR von 15 dB wiedergegeben. Mit dieser Anordnung wurden dann in zwei Standorten unabhängig voneinander SRT Messungen durchgeführt [9]. Beide Tests, der OLSA [10] der am Hörzentrum in Oldenburg und der HINT [11], der an der University of Northern Colorado durchgeführt wurde, zeigen mit im Mittel 2 bis 2,5 dB SRT bessere Ergebnisse für versorgte Schwerhörende mit der binauralen Verarbeitung im Vergleich zu Normalhörenden ohne Hörgeräte.

Mit der binauralen Verarbeitung sind weitere Anwendungen zur Verbesserung der Sprachverständlichkeit möglich. Eine davon ist, die Richtkeule in andere Richtungen als die Blickrichtung des Hörgeräteträgers auszurichten. Aktuell werden hier z.B. vier Richtungen realisiert, neben der Blickrichtung auch nach hinten und zu beiden Seiten. Letztere erfordern den binauralen Austausch der Audiosignale. Diese Anwendungen sind interessant für Fälle, in denen der Hörgeräteträger den Blick dem Gesprächspartner nicht zuwenden kann, z.B. als Fahrer im Auto. Der Fokus wird automatisch in die Richtung gelenkt, aus der die Signale mit den stärksten Sprachanteilen eintreffen.

Auch Windgeräuschreduktionsverfahren können von der binauralen Signalübertragung profitieren. In Situationen, in denen der Wind nicht direkt von vorne oder hinten eintrifft, sind Windgeräusche auf einer Seite klar stärker als auf der anderen. Detektiert man die Leistung der Windgeräusche selektiv in den einzelnen Frequenzbändern, kann man gezielt die stärker gestörten durch die äquivalenten Frequenzbänder des Hörgerätesignals der anderen Seite ersetzen. Zum Erhalt des räumlichen Eindrucks ist gerade das selektive Ersetzen entscheidend.

Bei diesen binauralen Verfahren ist eine automatische Aktivierung und Steuerung der Algorithmen entscheidend für die Akzeptanz. Die Unterstützung der Verständlichkeit in gestörten Umgebungen sollte durch Zuschalten der binauralen Verarbeitung graduell mit stärkerer Störung und unmerklich erhöht werden. Als Steuerungsgrößen

können dazu, neben der akustischen Klassifikation, z.B. auch Eingangspegel, Störpegel und Signal-Stör-Verhältnisse genutzt werden. In ruhigen Umgebungen kann die binaurale Verarbeitung auch komplett deaktiviert werden, um die Batterielaufzeit zu verlängern. Effiziente Systeme benötigen für die binaurale Audiodatenübertragung etwa 10-15 % des gesamten Leistungsverbrauchs.

Zusammenfassung

In diesem Artikel wurden Richtmikrofonverfahren – monaural und binaural – sowie Geräuschreduktionsverfahren vorgestellt. Wie dargelegt, ist es mit diesen möglich, die Sprachverständlichkeit und die Präferenz des Hörgeräteträgers zu verbessern. Mit binauralen Verfahren, die eine Audio-Übertragung zwischen den beiden Hörgeräten nutzen, ist eine zusätzliche Fokussierung auf die Gesprächspartner möglich und damit eine weitere Verbesserung der Kommunikation in stark gestörten Umgebungen. Weiterhin können mit binauralen Verfahren auch Sprecher von der Seite hervorgehoben werden oder Windgeräusche zusätzlich unterdrückt werden. Die Verbesserungen konnten jeweils durch referenzierte Studien wissenschaftlich nachgewiesen werden.

Referenzen

[1] G.W. Elko and A.N. Pong: ''A steerable and variable first-order differential microphone array,'' IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Munich, 1997, pp. 223-226 vol.1.

[2] R. Plomp and A.M. Mimpen: ''Improving the reliability of testing the speech reception threshold for sentences,'' Audiology 18.1 (1979): 43-52. APA.

[3] T.A. Ricketts and B.W.Y. Hornsby: ''Sound Quality Measures for Speech in Noise through a Commercial Hearing Aid Implementing “Digital Noise Reduction'' in Journal American Academic Audiology, 16:270–277 (2005).

[4] E. Hänsler and G. Schmidt: Acoustic Echo and Noise Control: A Practical Approach, Wiley, 2004.

[5] A.R. Hernandez, J. Chalupper, and T.A. Powers: ''An assessment of everyday noises and their annoyance'', The Hearing Review, 2006, 13(7), 16–20.

[6] W. Herbordt and W. Kellermann: ''Frequency-domain integration of acoustic echo cancellation and a generalized sidelobe canceller with improved robustness.'' European Transactions on Telecommunications 13.2 (2002): 123-132.

[7] H. Cox, R.M. Zeskind, and M.M. Owen: ''Robust adaptive beamforming''. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 35(10):1365–1376, October 1987.

[8] M. Aubreville and S. Petrausch: ''Directionality assessment of adaptive binaural beamforming with noise suppression in hearing aids.'' Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2015 IEEE International Conference on. IEEE, 2015.

[9] T.A. Powers and M. Fröhlich: ''Clinical Results with a New Wireless Binaural Directional Hearing System.'' Hearing Review, 21(11), 32-34 (2014).

[10] B. Kollmeier and M. Wesselkamp: ''Development and evaluation of a German sentence test for objective and subjective speech intelligibility assessment.'' J. Acoust. Soc. Am.,102(4), 2412-21 (1997).

[11] M. Nilsson, S.D. Sol, and J.A. Sullivan: ''Development of the Hearing in Noise Test for the measurement of speech reception thresholds in quiet and noise.'' J. Acoust. Soc. Am., 95(2),1085-1099 (1994).