Störgeräuschreduktion bei Hörsystemen der Gegenwart

V. Hamacher, E. Fischer
Siemens Audiologische Technik GmbH

Einleitung

Das Sprachverstehen in störschallerfüllter Umgebung ist ein häufig genanntes Problem von Schwerhörigen, die hier ein bis zu ca. 10 dB höheres Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) benötigen, um die gleiche Sprachverständlichkeit zu erreichen wie Normalhörende (Dillon, 2001). Überdies geht bei Versorgung mit Hinter-dem-Ohr(HdO)-Geräten die natürliche Richtwirkung des Außenohrs verloren. Somit sollte die Rehabilitation mit Hörgeräten nicht nur die individuelle Kompensation des Hörverlustes durch Verstärkung und Dynamikkompression sondern auch die Reduktion von Störgeräuschen umfassen, um in Situationen mit Störschall eine signifikante Verbesserung des Sprachverstehens zu bewirken. Moderne digitale Hörgeräte haben inzwischen einen Entwicklungsstand erreicht, der die Realisierung von Algorithmen zur Störgeräuschreduktion gestattet, die den hörgerätespezifischen Anforderungen in Bezug auf Wirksamkeit, Klangqualität und Artefaktfreiheit genügen. In diesem Beitrag wird ein Überblick über die Störgeräuschreduktionsverfahren gegeben, die in heutigen digitalen Hörgeräten der oberen Leistungsklasse zum Einsatz kommen.

Richtmikrofonsysteme

Differentielles System 1. Ordnung

Richtmikrofone zählen in Hörgeräten seit einigen Jahren zu den etablierten Methoden der Störgeräuschreduktion und führen nachweislich zur Verbesserung der Sprachverständlichkeit in Hörsituationen, in denen das Nutzsignal und die Störsignale aus unterschiedlichen Raumrichtungen einfallen (Valente et al., 1995). In modernen Hörgeräten wird die Richtwirkung durch die in Abbildung 1a dargestellte differentielle Verarbeitung zweier benachbarter Mikrofone (typischer Abstand 10-15 mm) mit omnidirektionaler Charakteristik erzeugt. Die Verarbeitung dieses Systems erster Ordnung besteht im Wesentlichen aus der Subtraktion des um die Zeit T_i verzögerten hinteren Mikrofonsignals vom vorderen. Dadurch entsteht eine richtungsabhängige Empfindlichkeit, deren Charakteristik, wie in Abbildung 1b skizziert, durch T_i eingestellt werden kann.

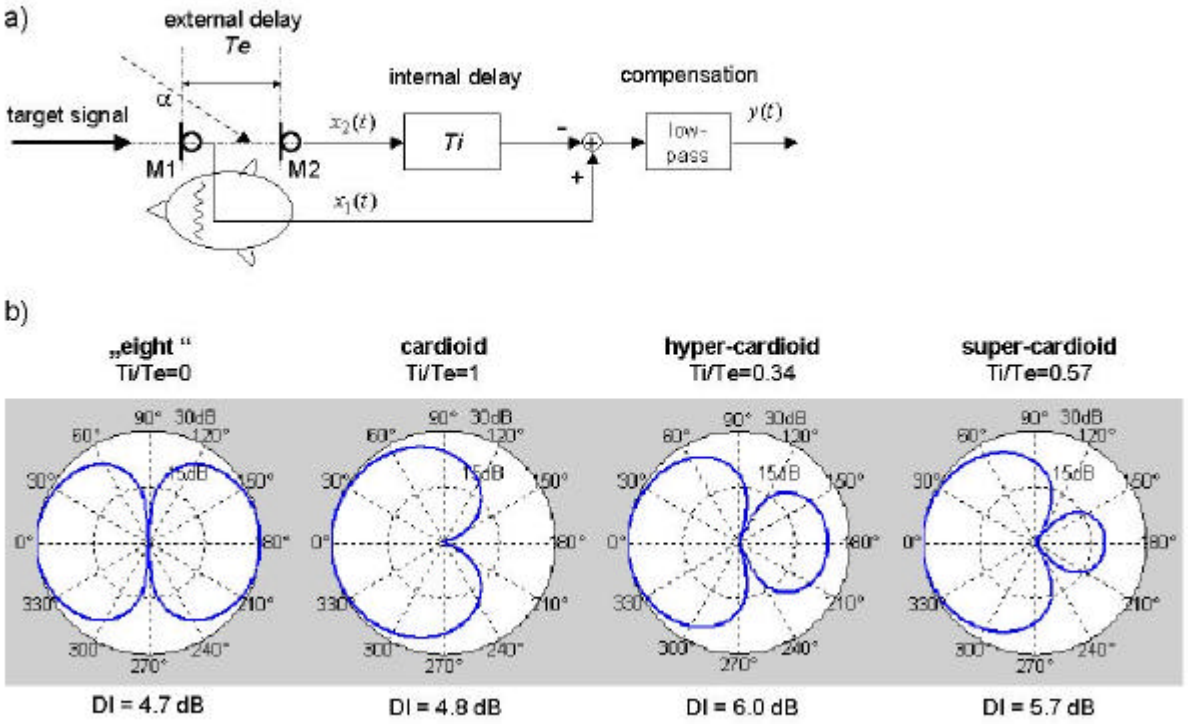

Abb. 1: a) Differentielles Richtmikrofon, b) Richtcharakteristik in Abhängigkeit des Verhältnisses von interner zu externer Verzögerung Ti/Te.

Die durch die Subtraktion entstehende ebenfalls richtungsabhängige Hochpasscharakteristik wird für die 0°-Vornerichtung durch ein geeignetes Tiefpassfilter ausgeglichen. Es wird also implizit die Annahme getroffen, dass das gewünschte Signal von vorne einfällt und die Störsignale seitlich bzw. von hinten. Darüber hinaus sind keine weiteren einschränkenden Bedingungen an das Störschallfeld oder die Signalstatistik erforderlich.

Die Stärke des Richtwirkungseffekts wird durch den Directivity Index (DI) quantifiziert, der im Falle eines diffusen Störschallfelds und Nutzschalleinfalls aus der 0°-Vorne-Richtung die SNR-Verbesserung gegenüber einer omnidirektionalen Charakteristik angibt. Mit einem System erster Ordnung kann theoretisch ein DI von 6 dB (Hyperkardioid, $T_i/T_e = 0.34$) erzielt werden. In der Praxis wird dieser Wert jedoch nicht erreicht, da sowohl die unvermeidbaren Unterschiede in den als identisch vorausgesetzten Amplituden- und Phasengänge der Mikrofone, als auch Beugungs- und Abschattungseffekte durch den Kopf des Hörgeräteträgers negativen Einfluss auf die Richtcharakteristik nehmen. Die für die Verbesserung der Sprachverständlichkeit relevante Größe ist der AI-DI, der als eine gewichtete Mittelung des DI über der Frequenz definiert ist. Als Wichtungsfunktion dient die aus der Theorie des Artikulationsindex (AI) entnommene Importance Function, die den relativen Beitrag eines Frequenzbandes zur Sprachverständlichkeit angibt. Der AI-DI eines Richtmikrofons entspricht daher ungefähr der in Sprachverständlichkeitstests erzielbaren Verbesserung des kritischen SNR und liegt bei Hörgeräten mit Systemen 1. Ordnung typischerweise im Bereich von 4-5 dB.

System mit adaptiver Richtcharakteristik

In einigen digitalen Hörgeräten werden neuerdings auch adaptive Richtmikrofonsysteme angeboten, die ihre Richtcharakteristik zur Maximierung des SNR-Gewinns in Hörsituationen mit gerichtetem Störschalleinfall kontinuierlich an das aktuelle Störschallfeld anpassen. Diese Systeme schätzen permanent die Einfallsrichtung der dominanten Störschallquelle und stellen, wie in Abbildung 2 skizziert, ihre Richtcharakteristik durch Variation von T_i automatisch so ein, dass die Richtung geringster Empfindlichkeit der Störschall-Einfallsrichtung entspricht. Die Adaption erfolgt mit Zeitkonstanten im Bereich von 100 ms sehr schnell und wird so realisiert, dass sich die Übertragungsfunktion in die Vorne-Richtung nicht merklich ändert.

Es muss allerdings betont werden, dass ein adaptives Richtmikrofon in Situationen mit überwiegend diffusem, d.h. ungerichtetem Störschall (z.B. Cafeteria) keinen nennenswerten Vorteil gegenüber der in Abschnitt 2.1 erläuterten klassischen statischen Variante bietet.

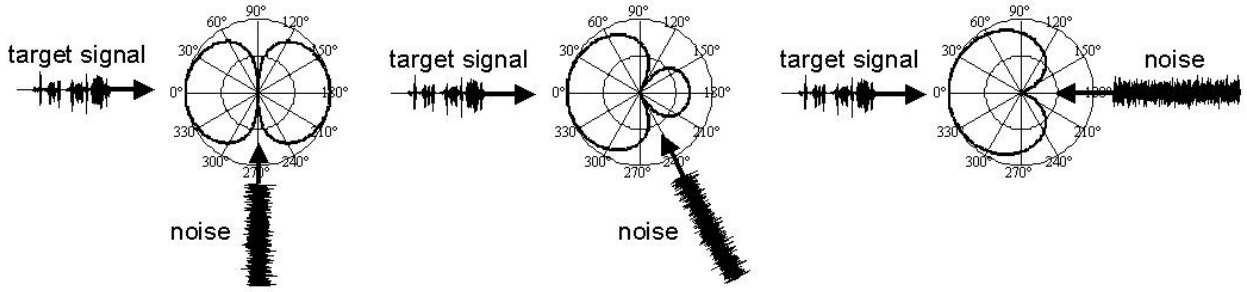

Abb. 2: Prinzip des adaptiven Richtmikrofons

Differentielles System zweiter Ordnung

Die neueste Entwicklung im Richtmikrofonbereich stellt ein auf drei Einzelmikrofonen basierendes System dar. Das differentielle Richtmikrofonprinzip lässt sich gemäß Abbildung 3a auf drei Mikrofone (System zweiter Ordnung) übertragen, was zu einer Erhöhung der Direktivität (DI maximal 9 dB) führt, wie in Abbildung 3b zu erkennen ist.

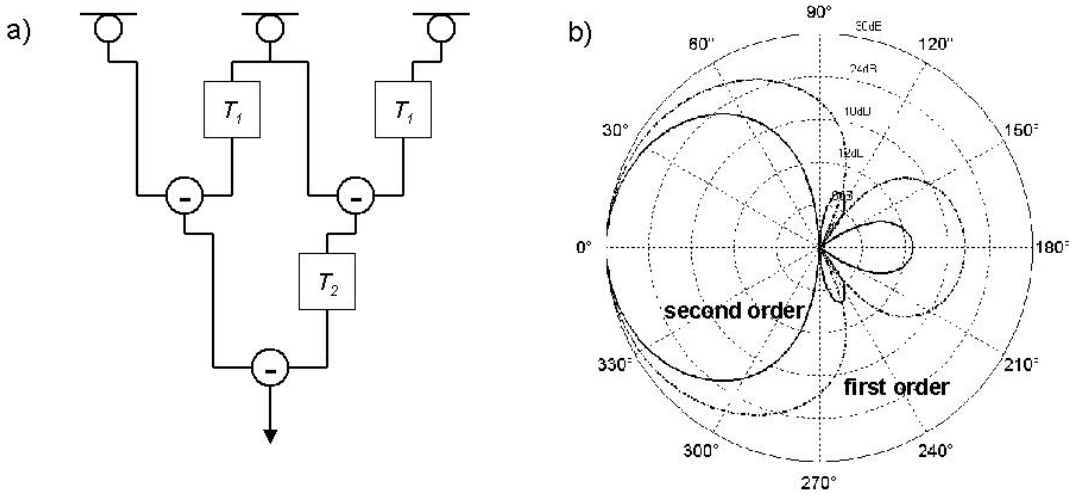

Abb. 3: Differentielles Richtmikrofon zweiter Ordnung: a) Signalverarbeitung und b) Richtdiagramm.

Allerdings ist ein solches System zweiter Ordnung, wie in Abbildung 4a zu erkennen ist, durch eine starke Hochpasscharakteristik (12 dB/Oktave) gekennzeichnet, so dass sich die Empfindlichkeit im Vergleich zum System erster Ordnung unterhalb von 1 kHz deutlich verschlechtert und folglich der Einfluss des Mikrofonrauschens drastisch zunimmt. Die Ursache hierfür ist, dass das Rauschen der Mikrofone unkorreliert ist und daher durch die differentielle Verarbeitung nicht hochpassgefiltert, sondern breitbandig um 6 dB verstärkt wird. Problematisch ist ebenfalls die gegenüber Systemen erster Ordnung im unteren Frequenzbereich deutlich erhöhte Empfindlichkeit gegenüber einem Fehlabgleich der Mikrofoncharakteristiken. Diese gravierenden Nachteile können durch ein kombiniertes System vermieden werden. Im oberen Frequenzbereich, der, wie die in Abbildung 4b aufgetragene Importance Function zeigt, für das Sprachverstehen entscheidend ist, wirkt ein Drei-Mikrofonsystem, während im bezüglich Mikrofonrauschen und -fehlabgleich kritischen aber bezüglich Sprachverständlichkeit weniger wichtigen unteren Frequenzbereich ein robustes Zwei-Mikrofonsystem aktiv ist. In Abbildung 4c ist die in einem aktuellen digitalen Hörgerät zu findende Realisierung eines solchen kombinierten Systems mittels einer Frequenzweiche skizziert. Der AI-DI-Wert der Kombination liegt mit ca. 6-7 dB um etwa 2 dB höher als bei Systemen erster Ordnung.

Abbildung 4: a) Frequenzgänge von Richtmikrofonen erster und zweiter Ordnung, b) Importance Function aus der Theorie des Artikulationsindex, c) Realisierung eines kombinierten Systems erster und zweiter Ordnung in einem aktuellen Hörgerät der oberen Leistungsklasse.

Figure 4: a) High-pass frequency response of first and second order directional microphones, b) Importance function used in articulation index theory, and c) Realisation of a combined first and second order system in a high-end digital hearing instrument.

Signalstatistische Verfahren zur Störgeräuschreduktion

In kleinen Im-Ohr-Hörgeräten können Richtmikrofone aufgrund der räumlichen Beschränkung nicht realisiert werden. Zudem würde das in Abschnitt 2 beschriebene differentielle Richtmikrofonprinzip im Ohrkanal wenig wirksam, da die erforderliche freie Ausbreitung des Schallfelds nicht gegeben ist. Folglich sind Ein-Mikrofon-Störreduktionsverfahren in vielen digitalen Hörgeräten ein wesentlicher Bestandteil der Signalverarbeitung. Aufgrund der fehlenden räumlichen Informationen basieren diese Verfahren auf charakteristischen Unterschieden der statistischen Eigenschaften von Sprach- und Störsignalen.

Modulationsbasierte Filterung

Die in digitalen Hörgeräten häufig implementierte Methode der modulationsbasierten Filterung (z.B. Holube et al., 1999) beruht auf der kontinuierlichen und frequenzselektiven Analyse der Hüllkurvenmodulationen in typischerweise 3-20 Frequenzbändern. Fehlen in einem Frequenzkanal die für Sprache typischen Modulationsanteile im Bereich von 2-8 Hz, wird angenommen, dass es sich um Störgeräusche handelt und folglich die Verstärkung des jeweiligen Frequenzkanals mit Zeitkonstanten im Bereich von 5-30 sec reduziert. Da das Kurzzeit-SNR in den einzelnen Frequenzkanälen hierdurch nicht verbessert wird, beruhen mögliche Verbesserungen der Sprachverständlichkeit hauptsächlich auf der Reduktion von Frequenzmaskierungseffekten.

Adaptive Wiener Optimalfilter

Wirkungsvoller sind hier Wiener Optimalfilter (z.B. Wiener, 1949, Vary et al., 1998), die bereits in aktuellen digitalen Hörgeräten angeboten werden. Angenommen wird zunächst, dass sich das Mikrofonsignal x(t) additiv aus einem Sprachsignal s(t) und einer Störung n(t) zusammensetzt. Das auf das Mikrofonsignal angewendete Wiener Filter hat nun zum Ziel, die Leis-

tung des Differenzsignals zwischen dem Filterausgangssignal und dem Sprachsignal zu minimieren, d.h. das SNR zu maximieren. Die Frequenzbereichslösung dieses Optimierungsproblems lautet:

$$W(f) = \frac{\Phi_{xx}(f) - \Phi_{nn}(f)}{\Phi_{xx}(f)},$$

und setzt damit die Berechnung der Leistungsdichtespektren des Mikrofonsignals $\phi_{xx}(f)$ und des Störsignals $\phi_{nn}(f)$ voraus. $\phi_{nn}(f)$ kann im Gegensatz zu $\phi_{xx}(f)$ nicht direkt bestimmt werden, sondern muss aus dem Mikrofonsignal mit geeigneten Methoden laufend geschätzt werden. Hierzu existieren eine Reihe von Ansätzen, die allesamt voraussetzen, dass das Störsignal deutlich stationärer als das Sprachsignal ist, um dann das Störleistungsdichtespektrum beispielsweise mittels Sprachpausendetektion oder auf Minimumtracking beruhenden Methoden (Martin, 1994) zu schätzen. Abbildung 5 zeigt das Blockschaltbild der Implementierung eines adaptiven Wiener Filters in einem aktuellen digitalen Hörgerät. Die Frequenzzerlegung erfolgt bei dieser Realisierung mit einer 16-kanaligen im Zeitbereich implementierten Filterbank. Zur Reduktion von Verarbeitungsartefakten (z.B. musical tones) werden die für jeden Abtastzeitpunkt neu adaptierten Koeffizienten des Wiener Filters noch einer Nachbearbeitung unterzogen.

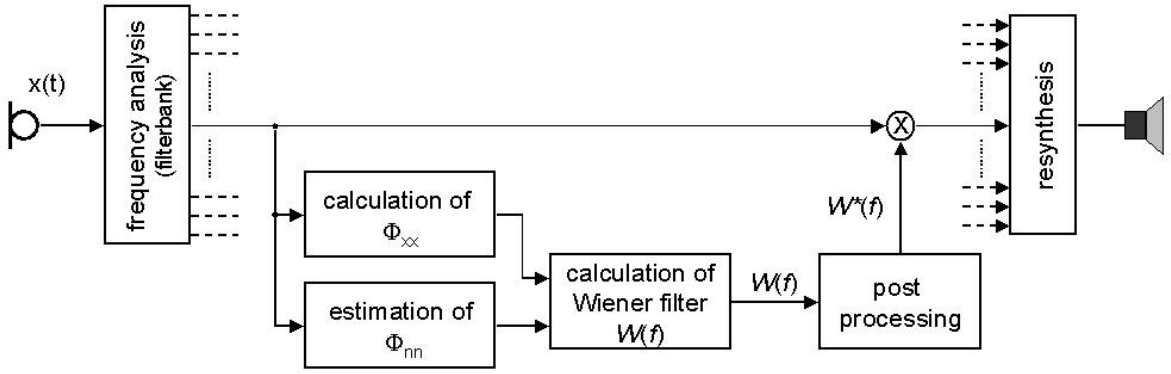

Abb. 5: Realisierung eines adaptiven Wiener Optimalfilters in einem digitalen Hörgerät.

Windgeräuschreduktion

Eine besondere Art von Störgeräuschen stellen Windgeräusche dar, die trotz konstruktiver Gegenmaßnahmen vor allem bei HdO-Geräten auftreten. Windgeräusche können relativ hohe Pegel erreichen und werden daher von Hörgeräteträgern meist als sehr lästig empfunden, so dass entsprechende Algorithmen zur Windgeräuschreduktion notwendig sind. Windgeräusche entstehen in der Hauptsache durch Turbulenzen an den Einlassöffnungen der Mikrofone. Sie tragen somit keine Richtungsinformation und sind zudem meist hochgradig instationär, so dass die oben genannten Ansätze wirkungslos bleiben. In leistungsfähigen digitalen Hörgeräten mit Mehr-Mikrofonsystemen werden daher auch spezielle Algorithmen zur Windgeräuschreduktion angeboten, die auf unterschiedlichen Korrelationseigenschaften der Mikrofonsignale bei Windgeräuschen und bei normalen Schallsignalen beruhen. Wie Abbildung 6 beispielhaft zeigt, sind normale Schallsignale aufgrund des geringen Mikrofonabstands stark korreliert, während Windgeräusche infolge ihrer quasi unabhängigen Entstehung an den Mikrofoneinlassöffnungen weitgehend unkorreliert auftreten.

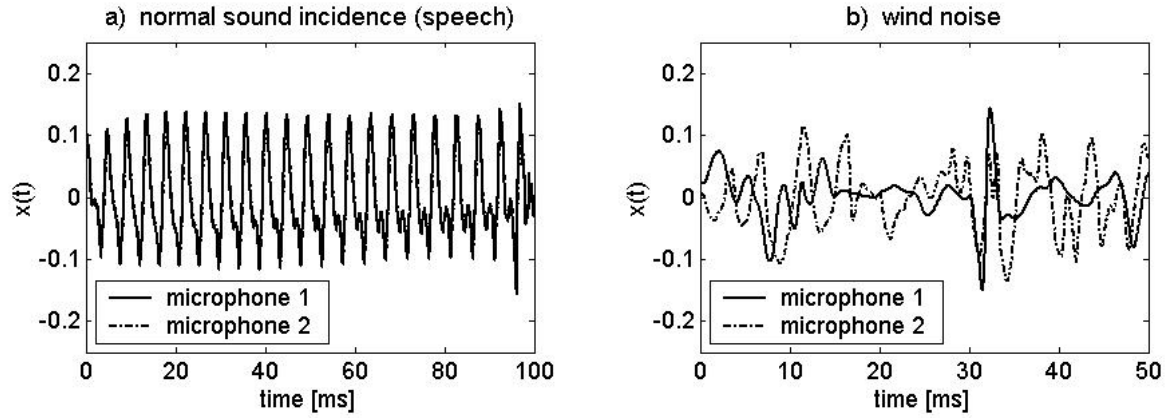

Abb. 6: Eingangssignalausschnitte eines Hörgerätes mit zwei Mikrofonen (1.5 cm Abstand) im Fall von a) normalen Schallsignalen und b) Windgeräuschen.

Durch laufende Berechnung der Korrelation der Mikrofonsignale lassen sich Windgeräusche daher sicher detektieren und durch Reduktion der Verstärkungen in den betroffenen Frequenzbändern deutlich abschwächen. Wenn sich das Hörgerät im Richtmikrofonbetrieb befindet, wird bei Detektion von Windgeräuschen zusätzlich automatisch auf die omnidirektionale Charakteristik umgeschaltet, da die differentielle Richtmikrofonverarbeitung die Windgeräusche aufgrund ihrer Unkorreliertheit noch zusätzlich verstärkt.

Zusammenfassung

Moderne digitale Hörgeräte bieten eine Reihe von Verfahren zur Störgeräuschreduktion an, die sich in die Gruppe der Richtmikrofontechniken und der signalstatistischen Verfahren aufteilen lassen. Aktuelle Richtmikrofonsysteme basieren auf der differentiellen Verrechnung mehrerer Mikrofonsignale und führen zu SNR-Verbesserungen im Bereich von 4.5-6.5 dB. Neueste Entwicklungen sind Drei-Mikrofonansätze sowie adaptive Richtcharakteristiken, die sich automatisch an das jeweilige Störschallfeld anpassen. Die in heutigen digitalen Hörgeräten zur Verfügung stehende Rechenleistung ermöglicht die Implementierung effizienter signalstatistischer Störgeräuschreduktionsansätze, wie beispielsweise dem Wiener Optimalfilter und neuartiger korrelationsbasierter Verfahren zur Reduktion von Windgeräuschen.

Literatur

Dillon H (2001), Hearing aids, Thieme Verlag, New York, Stuttgart

Holube I, Hamacher V, Wesselkamp M (1999), „Hearing instruments – noise reduction strategies“, in: Auditory Models and Non-linear Hearing Instruments, herausgegeben von Arne Norby Rasmussen, Paul Aabo Osterhammel, Ture Andersen und Torben Poulsen, 359-377.

Martin R (1994), „Spectral Subtraction based on Minimum Statistics”, Proceedings EUSIPCO-94, Lausanne, Switzerland.

Valente M, Fabry D, Potts L (1995), „Recognition of speech in noise with hearing aids using dual microphones”, J. Am. Acad. Audiol., Vol. 6, 440-9.

Vary P, Heute U, Hess W (1998), „Digitale Sprachsignalverarbeitung“, Teubner Verlag, Stuttgart.

Wiener N (1949), „Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series with engineering applications“, Wiley, New York