# Sind kohärenzbasierte Störgeräuschreduktionsverfahren für elektronische Hörhilfen geeignet? – Modelle zur Beschreibung der Kohärenzeigenschaften kopfbezogener Mikrofonsignale

Matthias Dörbecker

Institut für Nachrichtengeräte und Datenverarbeitung,
RWTH Aachen, Templergraben 55, 52056 Aachen
Tel.: +49 241 806979, Fax: +49 241 8888186,
e-mail: matthias@ind.rwth-aachen.de http://www.ind.rwth-aachen.de/~matthias

## Übersicht

Mehrkanalige, auf der Auswertung der Kohärenzeigenschaften der Mikrofonsignale basierende Störgeräuschreduktionsverfahren haben sich in den letzten Jahren als ein wirkungsvoller Ansatz zur Verbesserung akustisch gestörter Sprachsignale erwiesen (z.B. [1, 2, 3, 4]). Durch die Verwendung mehrerer Mikrofone sind diese Verfahren im Gegensatz zu einkanaligen Ansätzen in der Lage, auch Störgeräusche mit geringer Stationarität, wie z.B. konkurrierende Sprachsignale, zu reduzieren. Damit die Kohärenz der Mikrofonsignale in dem für Sprache relevanten Frequenzbereich ein geeignetes Merkmal zur Unterscheidung zwischen Nutzsignal und Störgeräuschkomponenten darstellt, darf der Abstand der Mikrofone jedoch nicht zu klein gewählt werden. Da bei Anbringung der Mikrofone am Kopf eines Hörgeräteträgers der maximal realisierbare Mikrofonabstand beschränkt ist, erscheint bei oberflächlicher Betrachtung der Einsatz kohärenzbasierter Störreduktionsverfahren in elektronischen Hörhilfen zunächst als problematisch.

In diesem Beitrag werden verbesserte Modelle zur Vorhersage der Kohärenzeigenschaften kopfbezogener Mikrofonsignale entwickelt, welche u.a. die durch den Kopf verursachte Schallbeugung berücksichtigen. Die Kernaussage dieser Modelle lautet, daß bei Anbringung der Mikrofone am Kopf eines Hörgeräteträgers die Kohärenz oberhalb von etwa 300 Hz ein geeignetes Merkmal zur Trennung von Nutzsignal und Störungen darstellt. Dieses Ergebnis wird anhand von Messungen untermauert.

## 1 Einleitung

Träger elektronischer Hörhilfen werden in akustisch gestörter Umgebung in ihrem Sprachverstehen in weitaus größerem Umfang beeinträchtigt, als dies bei Normalhörenden der Fall ist. Als schwierig erweisen sich insbesondere Situationen, wie sie beispielsweise in Cafeterien oder bei Zusammenkünften mehrerer Menschen angetroffen werden können und in denen die Störgeräusche durch mehrere, räumlich verteilte konkurrierende Sprecher hervorgerufen werden. Während Normalhörende sich in derartigen Situationen problemlos durch alleinige Änderung ihrer Aufmerksamkeit auf einzelne Sprecher konzentrieren können und sich damit eine Fähigkeit des menschlichen Gehörs zunutze machen, die als *Cocktail-Party-Effekt* bezeichnet wird, ist diese Fähigkeit bei Hörgeschädigten meist stark eingeschränkt. Es ist daher wünschenswert, mit Hilfe von Verfahren zur Reduktion akustischer Störungen Hörgeräteträgern in derartigen Umgebungen ein verbessertes Sprachverstehen zu ermöglichen.

## 2 Kohärenzeigenschaften der Mikrofonsignale

Durch die räumliche Verteilung der Störschallquellen hat man es in einer derartigen *Cocktail-Party-Situation* mit einem vorwiegend ungerichteten Störschallfeld zu tun. Im Gegensatz dazu kann man hinsichtlich des Nutzsignals von einem hohen Direktschallanteil ausgehen, da sich der Hörgeräteträger in der Regel in der Nähe seines Gesprächspartners aufhalten wird. Das mit hohem Direktschallanteil in die Mikrofone einfallende Nutzsignal führt dazu, daß die Mikrofonsignale gegenseitig stark korreliert sind, so daß für die Kohärenz, bzw. für deren Betragsquadrat (*Magnitude Squared Coherence, MSC*)

$$MSC(f) = \frac{|\Phi_{x_1,x_2}(f)|^2}{\Phi_{x_1,x_1}(f)\,\Phi_{x_2,x_2}(f)} \approx 1 \qquad (1)$$

folgt. Hierbei sind $\Phi_{x_1,x_1}(f)$, $\Phi_{x_2,x_2}(f)$ und $\Phi_{x_1,x_2}(f)$ die Auto- und Kreuzleistungsdichtespektren der Mikrofonsignale in Abhängigkeit der Frequenz $f$. Im Gegensatz zum Nutzschall hat ein Störschallfeld ohne ausgeprägte Vorzugsrichtung – mit der Ausnahme bei niedrigen Frequenzen – eine deutlich geringere Kohärenz zur Folge (siehe z.B. [5, 6]).

Um anhand der Kohärenz in dem für Sprachsignale relevanten Frequenzbereich zwischen Nutzsignal und Störkomponenten unterscheiden zu können, darf der Abstand der Mikrofone nicht zu klein gewählt werden. Eine Abschätzung, wie der Mikrofonabstand $d_{\mathrm{mic}}$ zu wählen ist, kann aus der MSC bei diffusem Schalleinfall, freier Schallausbreitung und omnidirektionaler Mikrofoncharakteristik

$$MSC(f) = \left(\frac{\sin(f\,d_{\mathrm{mic}}/c)}{f\,d_{\mathrm{mic}}/c}\right)^2 \qquad (2)$$

abgeleitet werden, wobei $c = 340\,\mathrm{m/s}$ die Schallgeschwindigkeit darstellt. Aus der durchgezogenen Kurve in Bild 1 a) kann abgelesen werden, daß bei einem

In: Proc. 5. ITG Fachtagung „Sprachkommunikation", Dresden
S. 53-56, 1998

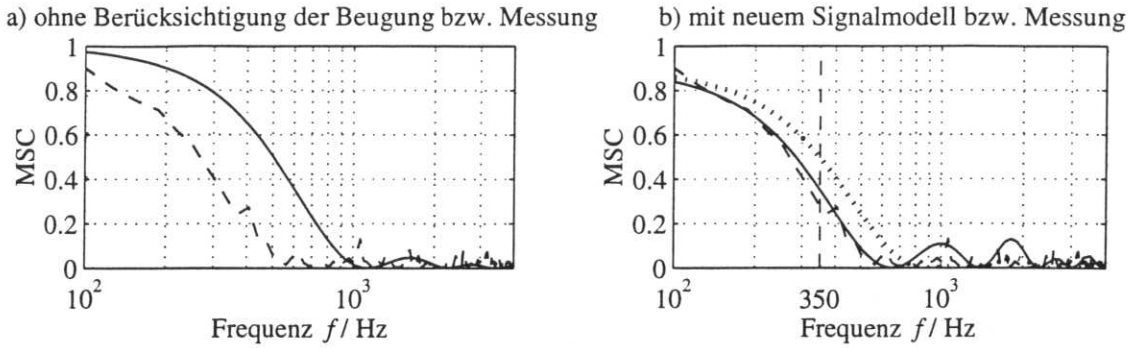


Bild 1: Kohärenz der Mikrofonsignale für eine Anordnung mit zwei omnidir. Mikrofonen im Abstand von 15 cm
a) ——— berechnete MSC nach Gl. (2) bei diffusem Schalleinfall und freier Schallausbreitung
– – – gemessene MSC (Cafeteria) bei Anbringung der Mikrofone an einem Kunstkopf in Ohrnähe
b) ····· berechnete MSC bei Berücksichtigung der Schallbeugung bei diffusem Schalleinfall
——— berechnete MSC bei Berücksichtigung der Beugung bei zweidimensional-diffusem Schalleinfall
– – – gemessene MSC (Cafeteria) bei Anbringung der Mikrofone an einem Kunstkopf in Ohrnähe

Mikrofonabstand von $d_{\mathrm{mic}} = 15\,\mathrm{cm}$, wie er mit einer am Kopf eines Hörgeräteträgers angebrachten Mikrofonanordnung realisiert werden kann, die MSC für die Störung erst oberhalb von etwa 700 Hz kleinere Werte als beispielsweise 0.3 annimmt, so daß die Leistungsfähigkeit eines kohärenzbasierten Störgeräuschreduktionsverfahrens unterhalb von 700 Hz sehr begrenzt sein wird. Beispielsweise wäre bei einem auf Wiener-Filtern basierenden Störreduktionsverfahren (z.B. [2]) die günstigenfalls zu erreichende Störreduktion für Frequenzen unterhalb von 700 Hz auf $-10 \cdot \log_{10} 0.3\,\mathrm{dB} \approx 5\,\mathrm{dB}$ beschränkt. Da selbst bei Beschränkung auf Telefon-Sprachsignalqualität bereits oberhalb von etwa 300 Hz eine wirkungsvolle Störgeräuschreduktion zu fordern ist, könnte aus dieser Abschätzung der Schluß gezogen werden, daß kohärenzbasierte Störgeräuschreduktionsverfahren für die Anwendung in elektronischen Hörhilfen nicht geeignet sind.

Dieser Einschätzung widerspricht jedoch die in Bild 1 a) gestrichelt dargestellte MSC zweier Mikrofonsignale, die mit zwei an einem Kunstkopf in Ohrnähe entsprechend Bild 2 a) angeordneten Mikrofonen in einer belebten Cafeteria aufgenommen wurden. Demnach nimmt die gemessene MSC bereits oberhalb von 350 Hz kleinere Werte als 0.3 an. Aus dieser Beobachtung kann die wichtige Konsequenz abgeleitet werden, daß für die Anwendung in elektronischen Hörhilfen trotz des geringen realisierbaren Mikrofonabstandes kohärenzbasierte Störgeräuschreduktionsverfahren prinzipiell geeignet sind. Im folgenden wird ein verbessertes Signalmodell vorgestellt, daß eine Begründung der in Bild 1 a) wiedergegebenen Messung ermöglicht.

## 3 Berücksichtigung der Beugung

Bei dem betrachteten Anwendungsbeispiel einer binauralen Hörhilfe ist bereits aus der Anschauung erkennbar, daß der Kopf als Hindernis zwischen den Mikrofonen für seitlich einfallende Schallwellen zu einer Vergrößerung der effektiven Laufzeitdifferenz zwischen den beiden Mikrofonen führt und die Mikrofonsignale damit bereits bei niedrigeren Frequenzen als unkorreliert erscheinen, als nach Gl. (2) zu erwarten wäre. Eine quantitative Beschreibung eines Schallfeldes, das bei Beugung an einem Hindernis entsteht, ist mit Hilfe des Helmholtz-Kirchhoffschen Integraltheorems (siehe z.B. [7, 8]) möglich.

Hierzu ist es zweckmäßig, die komplizierte Geometrie des Kopfes durch eine vereinfachte Anordnung nach Bild 2 zu ersetzen, bei der die Funktion des Hindernisses von zwei kreisförmigen Scheiben S1 und S2 übernommen wird. Die MSC der in den Mikrofonsignalen enthaltenen Störsignalanteile bei diffusem Störschalleinfall berechnet sich wie in Gl. (3) angegeben durch Integration über alle Einfallsrichtungen des Raumes. In Gl. (3) stellen $H_1(f,\theta,\varphi)$ und $H_2(f,\theta,\varphi)$ die Frequenzgänge der akustischen Übertragungsstrecken zwischen einer punktförmigen Störschallquelle Q an der Position $\underline{r}_{\mathrm{q}}$ und den beiden Mikrofonen M1 und M2 dar. Für den Abstand $||\underline{r}_{\mathrm{q}}||$ der Schallquelle Q wird angenommen, daß dieser groß im Vergleich zu den Abmessungen der Mikrofonanodnung ist. Im folgenden wird ein

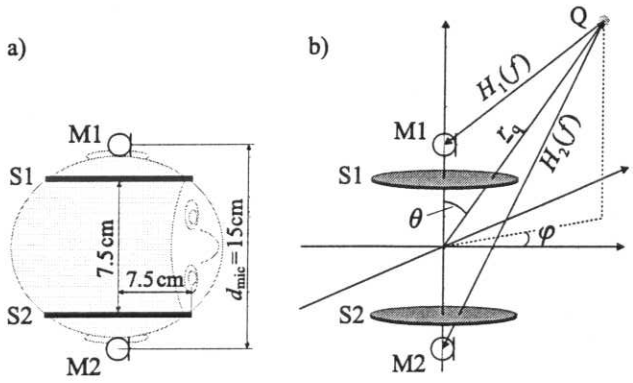


Bild 2: a) Vereinfachte Anordnung zur Modellierung der durch den Kopf verursachten Beugung bei binauraler Mikrofonanordnung
b) verwendetes Koordinatensystem

$$MSC(f) = \frac{|\Phi_{x_1,x_2}(f)|^2}{\Phi_{x_1,x_1}(f)\,\Phi_{x_2,x_2}(f)} = \frac{\left|\int\limits_{\varphi=0}^{2\pi}\int\limits_{\theta=0}^{\pi} H_1(f,\theta,\varphi)\,H_2^*(f,\theta,\varphi)\,\sin\theta\,d\theta\,d\varphi\right|^2}{\left(\int\limits_0^{2\pi}\int\limits_0^{\pi}|H_1(f,\theta,\varphi)|^2\sin\theta\,d\theta\,d\varphi\right)\left(\int\limits_0^{2\pi}\int\limits_0^{\pi}|H_2(f,\theta,\varphi)|^2\sin\theta\,d\theta\,d\varphi\right)} \tag{3}$$

Weg skizziert, mit dem der Frequenzgang $H_1(f,\theta,\varphi)$ berechnet werden kann. Wegen der Symmetrie der Anordnung kann der Frequenzgang $H_2(f,\theta,\varphi)$ analog bestimmt und damit die MSC mit Hilfe von Gl. (3) berechnet werden. Eine ausführliche Beschreibung dieses Modells findet sich in [4].

Ausgangspunkt ist das Geschwindigkeitspotential $\tilde{\phi}(\underline{r},t)$ des Schallfeldes, aus dem die physikalischen Größen des Schallfeldes – Schalldruck und Schallschnelle – durch Differentiation nach der Zeit bzw. durch Gradientenbildung abgeleitet werden können (siehe z.B. [9]). Im Fall einer harmonischen Kugelwelle der Frequenz $f$, die von einer punktförmigen Schallquelle im Punkt $\underline{r}_\mathrm{q}$ angeregt wird, lautet dieses Potential im Punkt $\underline{r}$ zum Zeitpunkt $t$:

$$\tilde{\phi}(\underline{r},t) = \underbrace{C\cdot\frac{e^{-j\beta||\underline{r}-\underline{r}_\mathrm{q}||}}{||\underline{r}-\underline{r}_\mathrm{q}||}}_{\phi(\underline{r})}\cdot e^{j2\pi ft}, \tag{4}$$

wobei $C$ eine Konstante und $\beta = \frac{2\pi f}{c}$ die Wellenzahl darstellt. Im folgenden wird lediglich der ortsabhängige Teil des Potentials $\phi(\underline{r})$ betrachtet, aus dem das zeitabhängige Potential $\tilde{\phi}(\underline{r},t)$ durch komplexwertige Modulation wiedergewonnen werden kann.

Vereinfachend wird angenommen, daß das Hindernis vollständig schallabsorbierend ist. Für Einfallswinkel $0 \le \theta \le \pi/2$ hat nach Bild 2 b) das Hindernis damit keinen Einfluß auf das Schallfeld am Ort des Mikrofons M1. Das Potential im Punkt des Mikrofons entspricht somit dem Potential $\phi_0$ bei freier Schallausbreitung, d.h. es ist

$$\phi(\underline{r}_\mathrm{m1}) = \phi_0(\underline{r}_\mathrm{m1}) = C\cdot\frac{e^{-j\beta||\underline{r}_\mathrm{m1}-\underline{r}_\mathrm{q}||}}{||\underline{r}_\mathrm{m1}-\underline{r}_\mathrm{q}||}. \tag{5}$$

Für Einfallsrichtungen $\pi/2 \le \theta \le \pi$, für die sich das Hindernis zwischen Quelle und Mikrofon M1 befindet, kann das Potential mit Hilfe des Helmholtz-Kirchhoffschen-Integraltheorems bestimmt werden. Das Potential in einem Punkt $\underline{r}_\mathrm{m1}$ ist demnach berechenbar, wenn das Potential und dessen Normalenableitung auf einer geschlossenen Hüllfläche $F$ um diesen Punkt bekannt ist (siehe z.B. [7, 9, 10]):

$$\phi(\underline{r}_\mathrm{m1}) = \frac{1}{4\pi}\int\limits_F\left[\phi(\underline{r})\frac{\partial}{\partial u}\left(\frac{e^{-j\beta l_\mathrm{m1}}}{l_\mathrm{m1}}\right) - \frac{e^{-j\beta l_\mathrm{m1}}}{l_\mathrm{m1}}\frac{\partial\phi(\underline{r})}{\partial u}\right]dF. \tag{6}$$

Dabei bezeichnet $\int_F \ldots dF$ die Integration über die geschlossene Hüllfläche um den Punkt $\underline{r}_\mathrm{m1}$ und $\frac{\partial}{\partial u}$ die Differentiation nach der Flächennormalen, d.h. nach einem Einheitsvektor, der jeweils senkrecht auf dem infinitesimalen Flächenelement $dF$ steht. Der Normalenvektor $\underline{u}$ sei dabei derart orientiert, daß er in das Innere der Hüllfläche zeigt. $l_\mathrm{m1}$ ist der Abstand des Flächenelementes $dF$ von dem Punkt $\underline{r}_\mathrm{m1}$ (vgl. Bild 3 a).

Die Problematik, daß zur Berechnung des Potentials im Punkt M1 nach Gl. (6) das Potential und dessen Normalenableitung auf einer geschlossenen Hüllfläche um den Punkt M1 bekannt sein müssen, kann mit Hilfe des Babinetschen Prinzips umgangen werden (siehe z.B. [7, 8]). Demnach ergibt sich das Potential $\phi_0(\underline{r}_\mathrm{m1})$ bei freier Schallausbreitung durch Überlagerung der Anordnung nach Bild 3 a) und der inversen Anordnung nach Bild 3 b), bei der zwischen Schallquelle und dem Mikrofon M1 eine absorbierende Wand angeordnet ist, in der sich eine Lochblende mit den Abmessungen des Hindernisses aus Bild 3 a) befindet. Aus der Überlagerung

$$\phi_0(\underline{r}_\mathrm{m1}) = \phi_\mathrm{a}(\underline{r}_\mathrm{m1}) + \phi_\mathrm{b}(\underline{r}_\mathrm{m1}) \tag{7}$$

und dem Potential $\phi_0(\underline{r}_\mathrm{m1})$ bei ungestörter, kugelförmiger Schallausbreitung nach Gl. (5) kann somit das Potential $\phi_\mathrm{a}(\underline{r}_\mathrm{m1})$ im Punkt M1 bestimmt werden, sofern man das Potential $\phi_\mathrm{b}(\underline{r}_\mathrm{m1})$ der inversen Anordnung kennt. Das Potential der inversen Anordnung wird im folgenden unter Verwendung der in Bild 3 b) eingezeichneten Hüllfläche, die sich aus den drei Teilflächen $F_1$, $F_2$ und $F_3$ zusammensetzt, berechnet.

Für die Teilfläche $F_1$ geht man davon aus, daß der Einfluß des Blendenrands vernachlässigt werden kann und damit im Inneren der Blende das gleiche Potential wie im freien Schallfeld existiert.

Da die Trennwand zwischen Lautsprecher und Mikrofon als ideal absorbierend angenommen wird, verschwindet auf der Fläche $F_2$ das Potential und dessen Ableitung, d.h. es gilt $\phi_\mathrm{b}(\underline{r}) = 0$ und $\frac{\partial\phi_\mathrm{b}(\underline{r})}{\partial u} = 0$. Geht man für die Teilfläche $F_3$ von einer Kugel mit unbegrenztem Radius aus, so wird auch das Integral über den kugelförmigen Abschnitt $F_3$ der Hüllfläche zu Null [7]. Zur Berechnung des Potentials $\phi_\mathrm{b}(\underline{r})$ der inversen Anordnung ist die Integration in Gl. (6) somit lediglich über die Teilfläche $F_1$ auszuführen. Das Potential und dessen Ableitung nach der Flächennormalen ist auf $F_1$ gegeben durch

$$\phi_\mathrm{b}(\underline{r}) = \phi_0(\underline{r}) = C\,\frac{e^{-j\beta l_\mathrm{q}}}{l_\mathrm{q}} \tag{8}$$

$$\frac{\partial\phi_\mathrm{b}(\underline{r})}{\partial u} = C\,\frac{e^{-j\beta l_\mathrm{q}}}{l_\mathrm{q}}\left(-j\beta - \frac{1}{l_\mathrm{q}}\right)\cos\varphi_\mathrm{u,q}. \tag{9}$$

Anschließend ergibt sich das Potential der betrachteten Anordnung mit dem Babinetschen Prinzip zu

$$\phi_\mathrm{a}(\underline{r}_\mathrm{m1}) = \phi_0(\underline{r}_\mathrm{m1}) - \phi_\mathrm{b}(\underline{r}_\mathrm{m1}). \tag{10}$$

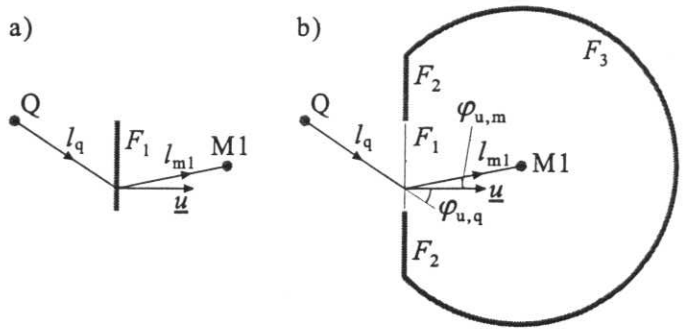


Bild 3: Anordnung zur Erläuterung des Helmholtz-Kirchhoffschen Integraltheorems

Mit dem nach Gl. (5) (für $0 \leq \theta \leq \pi/2$) bzw. nach Gl. (6)-(10) (für $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$) bestimmten Potential kann nun der Frequenzgang $H_1(f)$ der akustischen Übertragungsstrecke berechnet werden. Dieser geht aus dem Potential durch eine Normierung hervor [8]:

$$H_1(f) = C' \cdot \phi(\underline{r}_{m1}) \,. \tag{11}$$

Der Wert der hierbei auftretenden Normierungskonstanten $C'$ ist in diesem Zusammenhang nicht von Interesse, da diese sich bei der Berechnung der MSC nach Gl. (3) herauskürzt.

Die mit diesem Modell berechnete MSC der beiden Mikrofonsignale bei omnidirektionalem Störschalleinfall ist in Bild 1 b) als gepunktete Kurve dargestellt. Wie ein Vergleich mit der gestrichelt dargestellten MSC der in der Cafeteria aufgenommenen Mikrofonsignale zeigt, ermöglicht dieses Modell bereits eine bessere Vorhersage der Kohärenzeigenschaften für diese Mikrofonanordnung, als dies bei Annahme eines freien, diffusen Schallfeldes möglich ist.

## 4 Berücksichtigung der räumlichen Verteilung der Störschallquellen

Das Modell kann weiter verbessert werden, wenn man berücksichtigt, daß sich in der betrachteten Cafeteria ein großer Teil der Störschallquellen in gleicher Höhe wie die Mikrofonanordnung befindet, so daß der überwiegende Anteil des Störschalls aus horizontalen Richtungen in die Mikrofonanordnung einfällt. Da die betrachtete Cafeteria mit einer schallabsorbierenden Decke und einem Teppichboden ausgestattet ist, können zudem von oben oder von unten einfallende, reflektierte Schallanteile vernachlässigt werden. Näherungsweise kann das Störschallfeld daher als *zweidimensional-diffuses* Schallfeld modelliert werden, bei dem Schallkomponenten nur aus der horizontalen Ebene in die Mikrofone einfallen. Die MSC für ein derartiges Schallfeld ergibt sich analog zu Gl. (3), wobei die Integration nun jedoch nicht über alle Einfallsrichtungen des dreidimensionalen Raumes, sondern nur über alle Winkel $\theta$ ausgeführt wird, wobei der Term $\sin\theta$ in allen Integranden entfällt. Die Frequenzgänge $H_1(f)$ und $H_2(f)$ berechnen sich wie zuvor.

Wie die durchgezogene Kurve in Bild 1 b) beweist, gelangt man durch die Berücksichtigung der Beugung und des vorwiegend horizontal ausgerichteten Störschallfeldes zu einem Signalmodell, das die in der realen Umgebung gemessene Kohärenz mit hoher Genauigkeit vorhersagt.

## 5 Schlußfolgerung

Das in diesem Beitrag vorgestellte Modell ermöglicht eine zuverlässige Vorhersage der Kohärenzeigenschaften realer Mikrofonanordnungen, bei denen akustische Hindernisse in unmittelbarer Umgebung der Mikrofone eine freie Schallausbreitung unterbinden, und stellt somit ein hervorragend geeignetes Instrumentarium zum Entwurf von Mikrofonanordnungen für kohärenzbasierte Störgeräuschreduktionsverfahren dar.

Mit diesem Signalmodell konnte nachgewiesen werden, daß sich akustische Hindernisse, die sich innerhalb einer Mikrofonanordnung befinden, zu einer Verringerung der Kohärenz bei ungerichtetem Störschalleinfall führen. Für das Anwendungsbeispiel in elektronischen Hörhilfen folgt hieraus die wichtige Konsequenz, daß mit kohärenzbasierten Störgeräuschreduktionsverfahren trotz des geringen realisierbaren Mikrofonabstandes bereits oberhalb von 350 Hz, d.h. in dem für Sprache relevanten Frequenzbereich eine Verbesserung eines durch räumlich verteilte Störschallquellen gestörten Sprachsignals zu erzielen ist.

## Literatur


[1] R. Zelinski, "Noise Reduction Based on Microphone Array with LMS Adaptive Post-Filtering", *IEE Electronic Letters*, Band 26, Nr. 24, Seiten 2036–2037, Nov. 1990.

[2] R. Martin, "Design and Optimization of a Two Microphone Speech Enhancement System", in *Proc. Eurospeech*, Sept. 1995, Seiten 2009–2012.

[3] M. Dörbecker und S. Ernst, "Combination of Two-Channel Spectral Subtraction and Adaptive Wiener Post-Filtering for Noise Reduction and Dereverberation", in *Proc. EUSIPCO*, Sept. 1996, Seiten 995–998.

[4] M. Dörbecker, *Mehrkanalige Signalverarbeitung zur Verbesserung akustisch gestörter Sprachsignale am Beispiel elektronischer Hörhilfen*, Dissertation, Aachener Beiträge zu Digitalen Nachrichtensystemen, Band 10, P. Vary (Hrsg.). Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen, 1998.

[5] H. Kuttruff, *Room Acoustics*, Elsevier Applied Science, London, New York, 1991.

[6] R. Martin, *Freisprecheinrichtungen mit mehrkanaliger Echokompensation und Störgeräuschreduktion*, Dissertation, Aachener Beiträge zu Digitalen Nachrichtensystemen, Band 3, P. Vary (Hrsg.). Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen, 1995.

[7] M. Born und E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergamon Press, Oxford, 6. Auflage, 1980.

[8] J. Marx, *Akustische Aspekte der Echokompensation in Freisprecheinrichtungen*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996.

[9] E. Meyer und E.G. Neumann, *Physikalische und Technische Akustik*, Vieweg, Braunschweig, 1967.

[10] E. Skudrzyk, *The Foundation of Acoustics*, Springer-Verlag, Wien, New York, 1971.