

# ALGORITHMEN ZUR STÖRGERÄUSCHUNTERDRÜCKUNG FÜR DIFFERENTIELLE MIKROFONANORDNUNGEN

Thomas Fehér, Rüdiger Hoffmann

*Professur für Systemtheorie und Sprachtechnologie, Technische Universität Dresden  
thomas.fehér@tu-dresden.de*

**Kurzfassung:** Differentielle Mikrofonanordnungen (DMA) sind klein gegenüber der Wellenlänge der Signale, zu deren Verarbeitung sie vorgesehen sind. Dagegen sind konventionelle Mikrofonanordnungen (KMA) möglichst groß gegenüber der Wellenlänge. DMA bieten neue Möglichkeiten Störgeräusche effektiv zu unterdrücken und erlauben gleichzeitig eine sehr kompakte Bauweise.

Dieser Artikel beschreibt Verfahren zur Einstellung der Richtcharakteristik durch DMA erster und zweiter Ordnung und deren adaptive Regelung mit Hilfe der Analyse unabhängiger Komponenten (eng.: independent component analysis, ICA). Weiterhin werden leistungsfähigere Algorithmen aus der Gruppe der binären Maskierung vorgestellt, welche es erlauben, die Richtwirkung der DMA weiter zu erhöhen sowie Störquellen entfernungsabhängig zu filtern. Ebenfalls gezeigt wird die Anwendbarkeit der ICA für konvolutive Mischungen.

Anhand von Experimenten mit gemessenen Sprachsignalen in einem realen Raum, ergab sich dabei eine Störgeräuschunterdrückung von mehr als 40 dB bei einer Gesamtlänge der Mikrofonanordnung von ca. 2 cm.

## 1 Einleitung

Mehrmikrofonanordnungen, sogenannte Mikrofonarrays, nutzen Laufzeitunterschiede der eintreffenden Signale an den verschiedenen Mikrofonen um eine Richtwirkung zu erzielen. Daher benötigen sie einen bestimmten Abstand, der von der Wellenlänge des Signals abhängig ist, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Superdirektive Beamformer erreichen zusätzlich hohe Richtwirkungen für sehr hohe Wellenlängen im Verhältnis zum Mikrofonabstand [1]. Dabei wird allerdings das unkorrelierte Rauschen sehr stark erhöht.

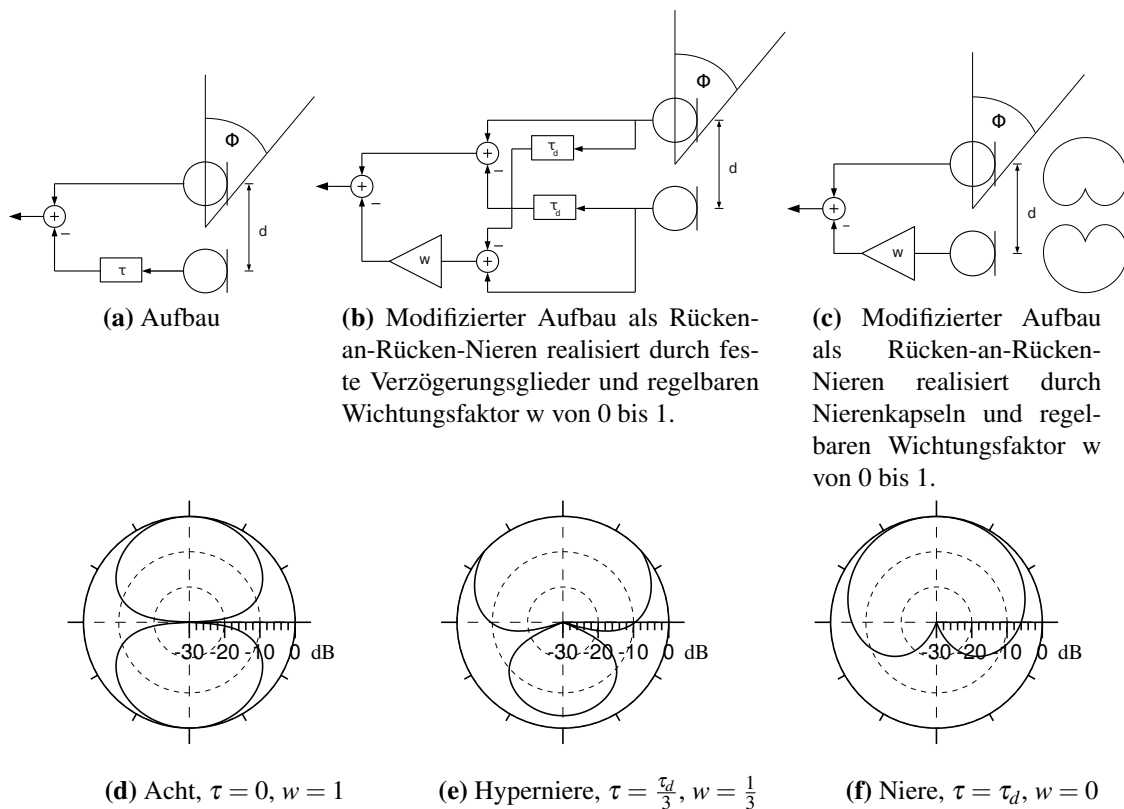
In dieser Arbeit soll eine weitere Möglichkeit gezeigt werden, wie mit Hilfe von mehreren Mikrofonen eine Richtwirkung erzeugt und adaptiv zum Eingangssignal verändert werden kann. Dabei werden nicht die Laufzeiten zwischen den Mikrofonen ausgewertet, sondern es werden zwei Mikrofone benutzt um aus einem differentiellen Schalldruckunterschied die Schallschnelle zu schätzen. Durch den Vergleich des ungerichteten Schalldrucks mit der gerichteten Schallschnelle ergeben sich neue Möglichkeiten der adaptiven Signalverarbeitung.

Diese sogenannte differentielle Mikrofonanordnung (DMA) wird in Kapitel 2 in ihrer grundsätzlichen Wirkungsweise kurz dargestellt. Es wird ebenfalls gezeigt, wie mit DMAs höherer Ordnung noch bessere Ergebnisse erzielt werden können. Im Kapitel 3 werden einige der von den Autoren getesteten und, im Fall des Automatischen Findens der besten Richtcharakteristik (3.1) und der binären Maskierung (3.2), selbst entwickelten Algorithmen für die DMA vorgestellt. Weiterhin zeigt Kapitel 4 einige Ergebnisse, welche mit diesen Algorithmen und einer DMA erster Ordnung in realen Umgebungen erzielt wurden.

## 2 Differentielle Mikrofonanordnungen

### 2.1 DMA erster Ordnung

DMA beruhen auf dem Prinzip der Mehrmikrofonanordnung mit differentiellem Abstand zwischen den Mikrofonen. Durch ein Verzögerungsglied am Ausgang eines der Mikrofone (siehe Abb. 1(a)) kann die Richtcharakteristik variiert werden. Die Verzögerungszeit  $\tau$  umfasst den Bereich  $[0, \tau_d]$ .  $\tau_d$  ist dabei die Verzögerungszeit, die sich aus der Laufzeit einer akustischen Welle zwischen den beiden Mikrofonen mit  $\tau_d = \frac{d}{c}$  ergibt.  $d$  ist der Abstand der Mikrofone und  $c$  ist die Schallgeschwindigkeit. Bei  $\tau = 0$  erfolgt die Messung des Schalldruckgradienten in Richtung  $\phi = 0$ . Diese ist proportional zur Schallschnelle in die gleiche Richtung. Folglich ergibt sich die bekannte Richtcharakteristik eines Gradientenmikrofons, die Acht (Abb. 1(d)). Bei einer Verzögerung von  $\tau_d$  ergibt sich hingegen die Richtcharakteristik Niere (Abb. 1(f)). Das heißt, die Veränderung von  $\tau$  erlaubt die Verschiebung der Nullstelle im Richtdiagramm zwischen  $90^\circ$  und  $180^\circ$  (Abb. 1(d-f)).



**Abbildung 1:** Prinzip eines DMA erster Ordnung. Die Varianten a bis c sind äquivalent.

Für  $kd \ll \pi$  und  $\tau \ll 1/(2f)$  kann die richtungsabhängige Empfindlichkeit  $R$  als

$$R(\phi) = 2\pi f (\tau + \tau_d \cos \phi) \quad (1)$$

angenähert werden [7]. Man erkennt deutlich, dass sich die Richtwirkung aus der Addition eines ungerichteten Terms  $\tau$  und eines Dipolterms  $\frac{d}{c} \cos \phi$  entsteht. Beide Terme sind frequenzunabhängig. Zusätzlich ergibt sich eine frequenzabhängige Skalierung der Empfindlichkeit mit  $2\pi f$ , diese kann durch einen nachgeschalteten Tiefpass erster Ordnung wieder ausgeglichen werden. Damit ergibt sich insgesamt eine frequenzunabhängige Richtcharakteristik, was vor allem für breitbandige Signale, zum Beispiel Sprache, vorteilhaft ist. Abb. 1(b, c) zeigen modifizierte Varianten, bei denen ein regelbarer Wichtungsfaktor die Richtcharakteristik bestimmt.

Die Verzögerungsglieder arbeiten mit der festen Verzögerung  $\tau_d$ . Das Ausgangssignal ist identisch mit dem von Abb. 1(a).

Für das Richtdiagramm ergibt sich aus Gl. (1)

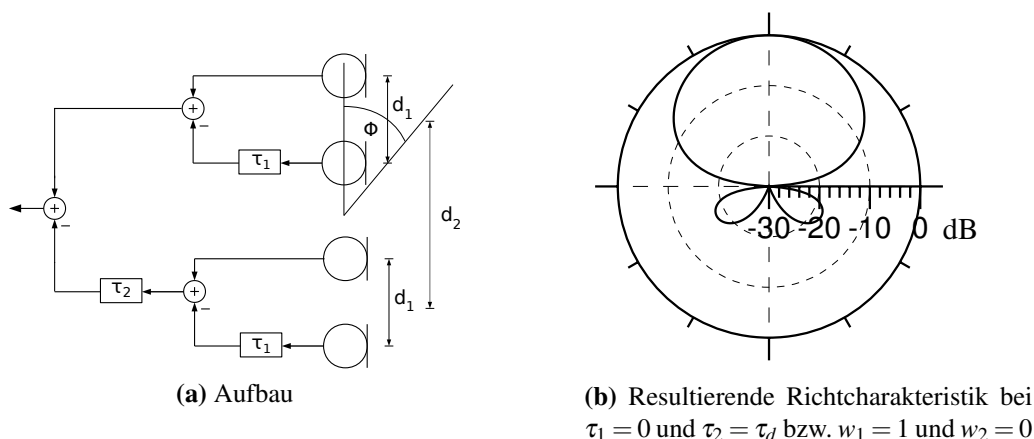
$$R(\phi) = 2\pi f(1 - w + (1 + w)\cos(\phi)). \quad (2)$$

Für einen Wichtungsfaktor von  $0 \leq w \leq 1$  ergeben sich wieder die in den Abb. 1(d-f) dargestellten Richtcharakteristiken.

Da alle 3 Varianten in Abb. 1(a-c) das gleiche Resultat liefern, bietet es sich an, sich für eine der Varianten mit dem Wichtungsfaktor  $w$  zu entscheiden. Der Vorteil ist, dass ein Wichtungsfaktor mathematisch einfacher handhabbar ist als ein Verzögerungsglied. Zum Beispiel ermöglichen diese Varianten die Nutzung der ICA, für das automatische Finden der besten Richtcharakteristik, wie im nächsten Abschnitt beschrieben.

## 2.2 DMA zweiter Ordnung

Zur Erzeugung einer DMA zweiter Ordnung werden 4 omnidirektionale Mikrofonkapseln benötigt. Die Anordnung und Verschaltung ist Abb. 2(a) zu entnehmen. Analog zur DMA erster Ordnung können die Verzögerungsglieder wieder durch Wichtungsfaktoren ersetzt werden. Eine mögliche resultierende Richtcharakteristik wird in Abb. 2(b) gezeigt.



**Abbildung 2:** Prinzip einer DMA zweiter Ordnung

Die Richtcharakteristik beträgt für den Fall  $kd_2 \ll \pi$  und  $\tau_1, \tau_2 \ll 1/(2f)$

$$R(\phi) = (2\pi f)^2 (\tau_2 + \tau_{d2}\cos\phi) (\tau_1 + \tau_{d1}\cos\phi), \quad (3)$$

mit  $\tau_{d1} = \frac{d_1}{c}$  und  $\tau_{d2} = \frac{d_2}{c}$ . Der nachgeschaltete Hochpass zum Ausgleich des frequenzabhängigen Terms muss in diesem Fall zweiter Ordnung sein. Die Herausforderung bei dieser Anordnung, sowie DMAs höherer Ordnung, besteht in der Notwendigkeit, dass der Gesamtabstand sehr klein gegenüber der Wellenlänge bleibt. Ein Vorteil neben der steigenden Richtwirkung ist die ebenfalls steigende Anzahl an Nullstellen im Richtdiagramm. Dadurch können gleichzeitig mehrere Störquellen ausgeblendet werden.

## 3 Algorithmen

Nachfolgend werden einige der von den Autoren genutzten Algorithmen kurz vorgestellt. Ausführliche Herleitungen können den jeweiligen Literaturstellen entnommen werden.

### 3.1 Automatisches Finden der besten Richtcharakteristik

Die gewichtete Addition der zwei gegensätzlich ausgerichteten Nieren erlaubt die Nutzung von Quellentrennungsalgorithmen für additive Mischungen um die optimale Richtcharakteristik automatisch zu finden. Das Ziel ist, die Richtcharakteristik so einzustellen, dass das Signal-Störsignal-Verhältnis größt möglich wird. Bei einzelnen Störgeräuschen und unter der Bedingung einer Reflexionsfreien Umgebung entspricht das Optimum einer Richtcharakteristik mit der Nullstelle in Richtung des Störgeräusches.

Der hier vorgestellte Ansatz basiert auf der von Hyvärinen et al. entwickelten FastICA [3]. Sie basiert auf der Entmischung mehrerer Signale in ihre statistisch unabhängigen Komponenten mit Hilfe von statistischen Momenten höherer Ordnung als zwei.

Der FastICA-Algorithmus liefert bei zwei Eingangssignalen ebenfalls zwei Ausgangssignale mit maximaler statistischer Unabhängigkeit. Unter der Bedingung, dass Nutz- und Störsignal unabhängig voneinander sind, kann davon ausgegangen werden, dass ein Ausgangssignal die Störquelle und das zweite Ausgangssignal die Nutzquelle ausblendet. Zur Lösung des Problems, welches der Ausgangssignale das Nutzsignal erhält, wird hier vorausgesetzt, dass der Einfallswinkel der Störquelle größer oder gleich  $90^\circ$  ist. Mit dieser Voraussetzung kann anhand der Entmischungsmatrix das korrekte Signal gefunden werden.

### 3.2 Binäre Maskierung

Zusätzlich zur gezielten Platzierung der Nullstelle können noch weitere Algorithmen die Störgeräuschunterdrückung verbessern. Eine Möglichkeit ist der Vergleich der Signalanteile des ungerichteten Signals mit den Anteilen der DMA im Frequenzbereich. Anteile die durch die DMA abgesenkt werden, können komplett entfernt werden, indem diese im Spektrum zu Null gesetzt werden. Voraussetzung dafür ist ein Signalmodell der dünn besetzten Zeit-Frequenz-Repräsentation (Spektrogramm) der zu entstörenden Signale. Dass dieses Modell für Sprachsignale angenommen werden kann, wird in [5] gezeigt. Beide hier vorgestellten Algorithmen teilen das Signal in überlappende Fenster, welche mit Hilfe einer Kurzzeit-Fouriertransformation in den Frequenzbereich überführt werden.

Zur Unterscheidung von frontal einfallenden Signalen und allen anderen Signalen wird der Quotient aus den Beträgen des ungerichteten Signals  $S_{Kugel}$  und der nierenförmig gerichteten DMA  $S_{Niere}$  für jeden Frequenzpunkt  $k$  gebildet.

$$S(t, f) = \frac{|S(t, f)_{Kugel}|}{|S(t, f)_{Niere}|} \quad (4)$$

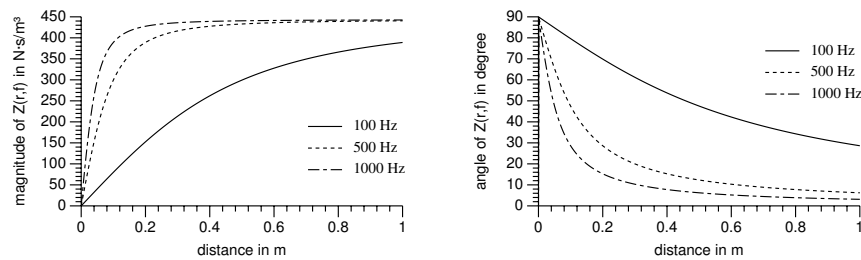
Nun wird für jeden Frequenzpunkt entschieden, ob dieser Anteil maskiert werden soll oder nicht. Maskiert werden jene Anteile, die nicht aus der bevorzugten Einsprechrichtung stammen. Der dafür notwendige Schwellwert  $u$  ergibt sich aus der Richtcharakteristik der DMA, in diesem Fall mit:

$$u = \frac{1}{2} + \frac{\cos(\phi_u/2)}{2}. \quad (5)$$

Wobei  $\phi_u$  dem gewünschten Öffnungswinkel der DMA entspricht. Die Regel für die Entscheidung lässt sich wie folgt formulieren:

$$m(k) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } S(t, f) > u \\ 0 & \text{wenn } S(t, f) \leq u \end{cases} \quad (6)$$

Es ergibt sich die binäre Maske  $m(t, f)$  welche elementweise mit  $S(t, f)_{Niere}$  multipliziert wird. Das resultierende Spektrum wird wieder in den Zeitbereich überführt und die Zeitfenster wieder zusammengesetzt.



**Abbildung 3:** Verlauf des Betrags (links) und der Phase (rechts) der spezifischen akustischen Impedanz im Nahfeld einer Schallquelle

Die entfernungsabhängige Selektierung von Signalen erfolgt nach einem ähnlichen Prinzip [2]. Dabei wird der unterschiedliche Verlauf von Schalldruck und Schallschnelle im Nahfeld einer Schallquelle ausgenutzt. Das Verhältnis aus Schalldruck und Schallschnelle, die spezifische akustische Impedanz, zeigt dieses Verhalten deutlich, wie in Abb. 3 zu sehen ist.

Mit der DMA können beide Größen Schallschnelle und Schalldruck ausgewertet werden. Genau wie bei der winkelabhängigen Selektierung können die Beträge von Schalldruck und Schallschnelle im Kurzzeitspektrum für jeden Frequenzpunkt verglichen werden und auf dieser Basis eine binäre Maske generiert werden.

Wie man aus Abb. 3 ablesen kann, funktioniert dieses Prinzip nur für tiefe Frequenzen. In den hier vorgestellten Versuchen wurden lediglich die Spektralanteile bis 800 Hz bearbeitet.

### 3.3 Independent Component Analysis

Die Analyse unabhängiger Komponenten (engl. independent component analysis, ICA) [3] versucht aus mehreren Mischungen unabhängiger Signal, diese zugrundeliegenden Signale wieder herzustellen. In [6] wird beschrieben, wie dieser Algorithmus zur Entmischung gefalteter Signale eingesetzt werden kann. In [4] werden Lösungen für die beiden Unsicherheiten der ICA, die Reihenfolge und die Varianz der gefundenen unabhängigen Komponenten, erarbeitet. Dieser Ansatz funktioniert nicht nur für normale Mikrofonarrays mit Abständen im Bereich der Wellenlänge und mehr, sondern auch für die hier vorgestellten DMA mit sehr kleinen Abständen.

## 4 Experimente

Alle hier vorgestellten Algorithmen wurden mit dem Twin-Mikrofon von Microtech Gefell durchgeführt. Dieses Mikrofon besteht aus zwei Kapseln mit der Richtcharakteristik Niere. Die beiden Nieren sind in der Rücken-an-Rücken-Anordnung platziert (siehe Abb. 1(c)).

Zur Durchführung aller hier vorgestellten Experimente, wurden in einem realen Raum mit einer Nachhallzeit von ca. 250 ms Impulsantworten aus verschiedenen Winkeln und Entfernungen aufgezeichnet. Die Winkel wurden von  $0^\circ$  bis  $345^\circ$  in  $15^\circ$ -Schritten ausgewählt. Die Abstände zur DMA betragen jeweils 0.05 m, 0.1 m, 0.15 m, 0.2 m, 0.3 m, 0.4 m, 0.5 m, 0.75 m und 1 m.

Als Testsignale dienten Radioaufnahmen mit einer Länge von 10 Sekunden. Das Nutzsignal ist eine Interviewsituation mit zwei männlichen Sprechern und das Störsignal besteht aus einer Sprecherin.

### 4.1 Automatisches Finden der besten Richtcharakteristik

Tabellen 1(a,b) zeigen die erzielte Verbesserung des SNR in zwei verschiedenen Umgebungen. Zusätzlich zum realen Raum, wurde ein vergleichendes Experiment in einem reflexionsarmen Raum durchgeführt. In diesem Experiment wurden auch Störgeräuscheinfallswinkel von

weniger als  $90^\circ$  zugelassen. Das richtige Ausgangssignal wurde manuell anhand des besseren SNR-Gewinns ermittelt.

Winkel	SNR Niere in dB	SNR adaptiert in dB	SNR Diff. in dB
$30^\circ$	1.5	0.2	-1.3
$60^\circ$	3.5	14,6	11.1
$90^\circ$	6.7	33,1	26.4
$120^\circ$	11.2	22.4	11.2
$150^\circ$	16.3	21.5	5.2
$180^\circ$	18	21.5	3.5

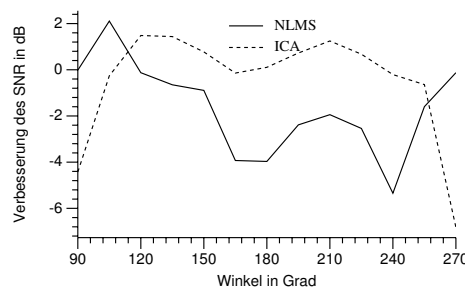
(a) Reflexionsarmer Raum.

Winkel	SNR Niere in dB	SNR adaptiert in dB	SNR Diff. in dB
$30^\circ$	1.2	1.4	0.2
$60^\circ$	2.4	3.5	1.1
$90^\circ$	4.6	9.3	4.7
$120^\circ$	6.5	10.2	3.7
$150^\circ$	7.9	9.5	1.6
$180^\circ$	8.6	9.5	0.9

(b) Realer Raum.

**Tabelle 1:** Gemessener SNR in verschiedenen Räumen.

In einem weiteren Versuch wurde der hier präsentierte Algorithmus mit einem NLMS-Algorithmus (normalized least-mean-square), vorgestellt in [7], verglichen. Beide Algorithmen finden die Störquelle zuverlässig, unter der Bedingung, dass diese sich in einem Winkel von mehr als  $90^\circ$  befindet. Das Ergebnis zeigt Abb. 4.



**Abbildung 4:** Verbesserung des SNR in dB durch das automatische Finden der besten Richtcharakteristik. 0dB entsprechen der manuellen Ausrichtung der Nullstelle in Richtung der Störquelle.

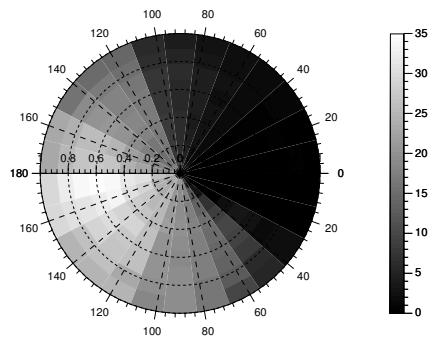
Es zeigt sich, dass die ICA die Störgeräuschunterdrückung in den meisten Fällen verbessert. Das lässt sich damit begründen, dass das gezielte Ausrichten der Nullstelle in Richtung der Störquelle nicht die optimale Lösung darstellt, weil die Reflexionen beider Quellen dabei außer Acht gelassen werden. Der NLMS-Algorithmus erreicht die manuelle Einstellung nicht immer.

## 4.2 Binäre Maskierung

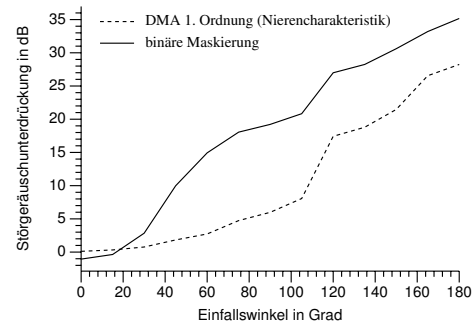
Der Schwellwert der winkelabhängigen binären Maskierung wurde nach Gl. (5) so gewählt, dass ein Öffnungswinkel  $\phi_u$  von  $60^\circ$  entsteht. Abb. 5 zeigt die verbesserte Richtwirkung.

Kombiniert man die entfernungsabhängige mit der winkelabhängigen binären Maskierung, so ergeben sich die in Abb. 6 gezeigten Resultate. Der Schwellwert für den Entfernungsfiler liegt bei 1, 1.

Man sieht für Störsignale aus der gleichen Richtung wie das Nutzsignal eine verbesserte Unterdrückung bei einem Abstand größer dem Abstand der Nutzsignalquelle von 5 cm. Die Unterdrückung erreicht Werte von mehr als 4 dB bei einem Abstand größer als 0.5 m zum Mikrofon. Seitlich einfallende Signale werden mit mehr als 25 dB unterdrückt und bei rückwärtigen Signalen erreicht das Signal-Störsignalverhältnis Werte im Bereich von 40 dB.

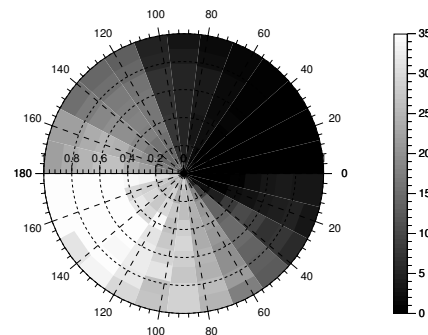


(a) Störgeräuschunterdrückung in dB.

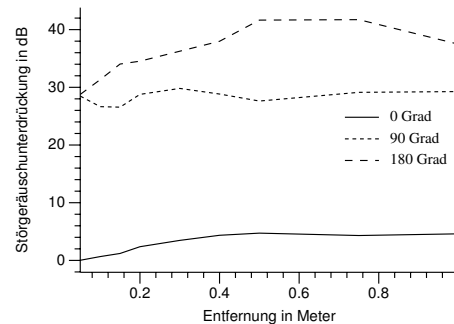


(b) Messwerte bei einem Abstand von 40 cm.

**Abbildung 5:** SNR bei einer Störquelle aus verschiedenen Richtungen und Entfernungen. Die Nutzsignalquelle befindet sich immer bei  $0^\circ$  und einem Abstand von 1 m. Die obere Hälfte des Polardiagramms (links) zeigt die Ergebnisse für eine DMA mit Nierencharakteristik und ohne weitere Bearbeitung. Die untere Hälfte zeigt eine DMA mit winkelabhängiger binärer Maskierung. Rechts sind exemplarisch die Werte für einen Abstand von 40 cm aufgetragen.



(a) Störgeräuschunterdrückung in dB.



(b) Messwerte bei verschiedenen Winkeln.

**Abbildung 6:** Verbesserung des SNR gegenüber der einfachen DMA mit Nierencharakteristik (links, obere Hälfte) bei der Kombination von winkel- und entfernungsabhängigen Filtern (links, untere Hälfte und rechts). Die Nutzquelle befindet sich stets bei einer Entfernung von 0.05 m, während die Entfernung und der Winkel der Störquelle variiert wird.

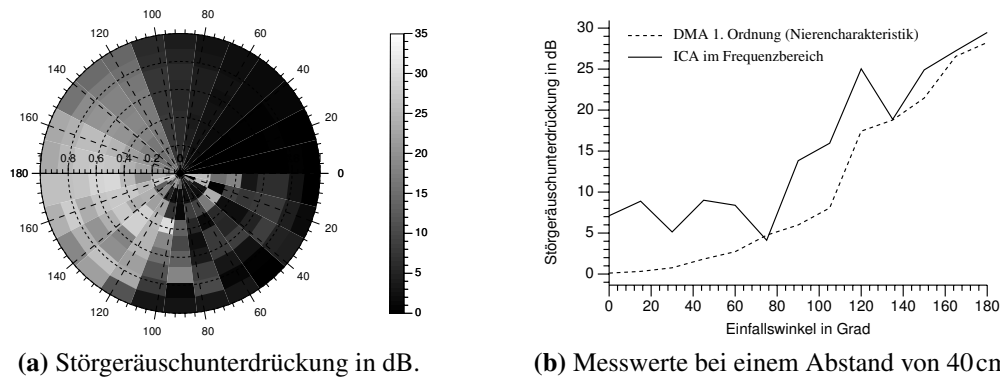
### 4.3 ICA

Abb. 7 zeigt die Ergebnisse der Störgeräuschunterdrückung mit Hilfe der ICA im Frequenzbereich. Die Unsicherheit, welches der beiden rekonstruierten Signale das gewünschte ist, wurde manuell durch Auswahl des Signals mit dem besseren Signal-Störsignalverhältnis beseitigt. Prinzipiell bietet sich hier ein ähnliches Vorgehen wie bei dem Finden der besten Richtcharakteristik (Kap. 3.1) an.

Es ist deutlich zu sehen, dass der Algorithmus in den meisten Fällen deutlich bessere Ergebnisse liefert als die DMA allein. Allerdings gibt es auch einige Fälle, in denen die ICA nicht zur einer besseren Lösung konvergiert.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellten Algorithmen zeigen das enorme Potential der DMA für die Störgeräuschunterdrückung. Der Vorteil gegenüber konventionellen Mehrmikrofonanordnungen ist der geringe Platzbedarf und die geringe Anzahl an Mikrofonen und Signalverarbeitungskanälen. Der Vorteil gegenüber einem einzigen Mikrofon ist die bessere Schätzbarkeit der Störgeräusche, da mehr Informationen über das Schallfeld vorhanden sind, bei gleichzeitig geringem Mehraufwand: statt einem Mikrofon werden zwei sehr nah beieinanderliegende Mikrofone sowie eine



**Abbildung 7:** SNR bei Störquellen aus verschiedenen Richtungen und Entfernungen. Die Nutzsignalquelle befindet sich immer bei  $0^\circ$  und einem Abstand von 1 m. Die obere Hälfte des Polardiagramms (links) zeigt die Ergebnisse für eine DMA mit Nierencharakteristik und ohne weitere Bearbeitung. Die untere Hälfte zeigt das Ergebnis einer ICA im Frequenzbereich mit den Eingangssignalen aus der DMA als Niere nach vorn und der DMA als Niere nach hinten. Rechts sind exemplarisch die Werte für einen Abstand von 40cm aufgetragen.

nachfolgende Signalbearbeitung benötigt.

Die vorgestellten Algorithmen basierend auf der binären Maskierung setzen keine zeitlich langsam verändernden Störsignale voraus, wie es bei einkanaligen Verfahren der Fall ist, sondern funktionieren auch mit einem zweiten Sprecher als Störsignal. Dabei konnte eine Absenkung der Störquelle aus seitlicher Richtung im Bereich von 20 dB und aus rückwärtiger Richtung im Bereich von 40 dB gemessen werden.

Weitere Szenarien mit mehreren Störsignalen werden in Zukunft von den Autoren untersucht werden. Die Anwendung der Algorithmen für DMAs höherer Ordnung bietet mehr Freiheitsgrade beim Ausrichten der Nullstellen im Richtdiagramm.

## Literatur

- [1] BITZER, J. und K. SIMMER: *Superdirective Microphone Arrays*. Microphone arrays: Signal processing techniques and applications, S. 19, 2001.
- [2] FEHÉR, T., D. RICHTER, O. JOKISCH und R. HOFFMANN: *Distance-Dependent Noise Reduction for Two-Channel Microphones*. In: *Interspeech 2012*, Bd. (in print), 2012.
- [3] HYVÄRINEN, A., J. KARHUNEN und E. OJA: *Independent component analysis*, Bd. 26. Wiley-interscience, 2001.
- [4] IKEDA, S. und N. MURATA: *A Method Of ICA In Time-Frequency Domain*. In: *in Proc. ICA*, S. 365–371, 1999.
- [5] RICKARD, S. und O. YILMAZ: *On the approximate W-disjoint orthogonality of speech*. In: *Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), 2002 IEEE International Conference on*, Bd. 1, S. I-529 –I-532, may 2002.
- [6] SMARAGDIS, P. et al.: *Blind separation of convolved mixtures in the frequency domain*. *Neurocomputing*, 22(1):21–34, 1998.
- [7] TEUTSCH, H. und G. ELKO: *First-and second-order adaptive differential microphone arrays*. In: *Proc. Int. Workshop on Acoustic Echo and Noise Control (IWAENC)*, S. 35–38, 2001.