

Richtrohrmikrofone versus Mikrofonarrays (Shotgun-Microphones versus Microphone Arrays)

B. Runow¹, O. Curdt², A. Schilling³

¹ *Wilhelm-Schickard Institut, Eberhard Karls Universität, Tübingen, Email: bernfried@runow.info*

² *Hochschule der Medien Stuttgart, Email: curdt@hdm-stuttgart.de*

³ *Wilhelm-Schickard Institut, Eberhard Karls Universität, Tübingen, Email: schilling@uni-tuebingen.de*

Abstract

Um eine höhere Richtwirkung als bei Richtcharakteristiken erster Ordnung zu erzielen, verwendet man bisher überwiegend Richtrohrmikrofone, sogenannte Shotguns. Doch mit dem Aufkommen leistungsfähiger digitaler Audio-signalverarbeitung kann eine höhere Richtwirkung auch mit einem Mikrofonarray erzielt werden. Dabei zeichnen sich insbesondere koinzidente Mikrofonarrays auf Grund ihrer geringen Abmessungen aus.

Neben einer Einführung in die prinzipiellen Unterschiede der verschiedenen bekannten Verfahren, wird ein neu entwickeltes Verfahren zur Erhöhung der Richtwirkung mit koinzidenten Mikrofonarrays vorgestellt.

1. Einführung

Es gibt eine ganze Reihe von Gründen, die eine Erhöhung der Richtwirkung gegenüber herkömmlichen Mikrofonen mit einer Richtcharakteristik erster Ordnung erstrebenswert machen. Sicherlich sollte zuerst versucht werden, die Aufnahmesituation in bewährter Weise mit den uns heute zur Verfügung stehenden, sehr hochwertigen Druckgradientenempfängern oder sogar Druckempfängern zu meistern.

Dies ist allerdings nicht immer möglich, und wir sind gezwungen zu Mikrofonen zu greifen, die eine stärkere Bündelung als Richtcharakteristiken erster Ordnung erreichen. Bisher waren das in der Regel Richtrohrmikrofone. Aber auch mit Mikrofonarrays ist es möglich, die Richtwirkung zu erhöhen und Richtcharakteristiken höherer Ordnung zu bilden. Entscheidend für die Anwendung in der professionellen Audioproduktion sind dabei deren Übertragungseigenschaften, wie beispielsweise die Frequenzinvarianz und ein großer Dynamikumfang. Aber auch die Baugröße und damit ein praktikabler Aufbau kann darüber entscheiden, welches System zum Einsatz kommt.

2. Richtrohrmikrofone

Richtrohrmikrofone, auch Interferenzempfänger genannt, sind bewährte Schallwandler mit hohem Bündelungsgrad, die dann zum Einsatz kommen, wenn die Richtwirkung von Druckgradientenempfängern erster Ordnung nicht mehr ausreicht.

Vor die Membran des Schallwandlers wird dabei ein Rohr mit seitlichen Interferenzöffnungen gebaut. Schall, der von vorne auf das Rohr trifft, gelangt annähernd ungehindert zur Membran. Dabei kann es zu einem Druckstauereffekt kommen, durch den insbesondere bei hohen Frequenzen eine zusätzliche Richtwirkung entsteht [3]. Seitlich einfallender Schall erfährt durch die Interferenzöffnungen eine Laufzeitverzögerung und damit eine Phasenänderung. Dieser Interferenzeffekt führt zu einer destruktiven Schalladdition vor der Membran und dämpft damit seitlich einfallenden Schall. Die Höhe der Dämpfung ist dabei abhängig von der Länge des Rohrs, der Frequenz und dem Einfallswinkel. Um ein erhöhtes Bündelungsmaß zu erreichen, muss die Länge des Rohrs gleich der Wellenlänge

der zu übertragenden Frequenz sein. Das bedeutet, dass die Rohrlänge mit steigender Frequenz abnehmen muss [15]. In der Praxis wird dies durch Dämpfungsmaterial realisiert, das im Rohr an den Interferenzöffnungen, abhängig von der Entfernung zur Membran, angebracht wird. So wird auch verhindert, dass es zu stehenden Wellen kommt.

Schwieriger wird die Realisierung bei tiefen Frequenzen, da beispielsweise für die Frequenz $f = 100 \text{ Hz}$ ein etwa $3,40 \text{ m}$ langes Richtrohr notwendig wäre. Daher werden bei Richtrohrmikrofonen meistens Druckgradientenempfänger mit hohem Bündelungsgrad verwendet, also beispielsweise eine ‚Hyper-niere‘. Für Frequenzen, deren Wellenlänge größer als die Rohrlänge ist, entsteht eine Richtcharakteristik, die der des Gradientenempfängers entspricht. Für höhere Frequenzen wird mit dem Interferenzeffekt im Richtrohr eine ‚Keulen‘-Charakteristik erreicht.

Dies bedeutet jedoch, dass die Richtcharakteristik abhängig von der Frequenz ist und seitlich einfallender Schall klanglich verfärbt wird.

Richtrohrmikrofone werden in Längen zwischen 15 und 55 cm gebaut, üblich sind Rohrlängen von etwa 25 bis 30 cm.

3. Mikrofonarrays

Ein Mikrofonarray ist ein Zusammenschluss mehrerer Mikrofone mit dem Ziel, einen Mehrgewinn daraus zu ziehen. Zum einen ermöglicht diese Technik, die Richtung einer Schallquelle zu bestimmen, zum anderen können Richtcharakteristiken höherer Ordnung erzeugt werden, beispielsweise mit einer stärkeren Richtwirkung oder mehreren Nullstellen. Dieser Vorgang wird Beamforming genannt.

Es gibt eine ganze Reihe verschiedener Mikrofonarrays, die sich in ihrem Aufbau, ihrer Signalverarbeitung und ihren Eigenschaften unterscheiden. Hinsichtlich der Anordnung der Mikrofone unterscheidet man generell zwischen zwei Array-Grundtypen: den räumlichen Mikrofonarrays und den koinzidenten Mikrofonarrays [13].

3.1. Räumliche Mikrofonarrays

Bei räumlichen Mikrofonarrays werden zwei Varianten der Signalverarbeitung unterschieden, nämlich die der additiven und die der differentiellen Signalverarbeitung. Die beiden Verfahren haben unterschiedliche Anforderungen an die Anordnung der Mikrofone, so dass sich auch andere Arraygeometrien ergeben.

3.1.1. Räumliche Mikrofonarrays mit additiver Signalverarbeitung

Die einfachste Form eines räumlichen Mikrofonarrays ist das sogenannte Zeilenarray. Hier werden mehrere Mikrofone auf einer Achse angeordnet. Die Länge des Arrays ist von der tiefsten zu bündelnden Frequenz abhängig, sie muss größer als deren Wellenlänge sein. Auf der anderen Seite muss der Abstand der einzelnen Mikrofone kleiner als die Wellenlänge der höchsten zu bündelnden Frequenz sein. Es entsteht also ein sehr langes Mikrofonarray mit vielen Mikrofonen [4].

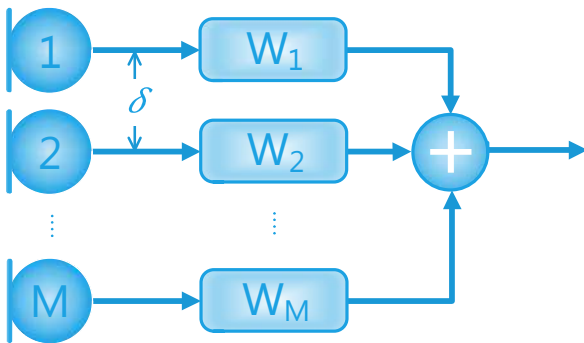


Abb. 1: Räumliches Mikrofonarray mit additiver Signalverarbeitung, bestehend aus M Mikrofonen, dem Mikrofonabstand δ sowie den Filterkoeffizienten W_m .

Wie in Abb. 1 dargestellt, werden die Ausgangssignale der einzelnen Mikrofone mit einem komplexen Filterkoeffizienten bearbeitet und anschließend summiert. Der komplexe Filterkoeffizient kann dabei auch eine zeitliche Verschiebung (engl.: delay) beinhalten.

Verwendet man bei einem senkrecht nach oben aufgestellten Zeilenarray Druckempfänger mit einer ‚Kugel‘-Charakteristik, so ist die resultierende, dreidimensionale Richtcharakteristik ein Toroid, eine in der Vertikalen abgeplattete Kugel [14]. Werden Mikrofone mit ‚Nieren‘-Charakteristik eingesetzt, entsteht eine vertikal abgeplattete Niere. In der Horizontalebene bleibt also die ‚Nieren‘-Charakteristik erhalten, in der Vertikalebene entsteht eine ‚Keulen‘-Charakteristik [8][9]. Das am Institut für Rundfunktechnik (IRT) entwickelte ‚Kardiod-Ebenen-Mikrofon‘ (KEM) ist ein solches Zeilenarray mit ‚Nieren‘-Kapseln.

Neben dem Zeilenarray gibt es auch zwei- und dreidimensionale Anordnungen, welche eine größere Richtwirkung auch in der Horizontalebene entwickeln können. Erst mit einer dreidimensionalen Anordnung kann der Beam im Raum völlig flexibel ausgerichtet werden.

3.1.2. Räumliche Mikrofonarrays mit differentieller Signalverarbeitung

Bei der differentiellen Signalverarbeitung werden die Mikrofonensignale paarweise voneinander abgezogen. Differentielle Mikrofonarrays reagieren also auf die räumliche Ableitung des Schalldrucks und sind vom Prinzip her Druckgradientenempfänger. Daher ist es notwendig, dass der Abstand der Mikrofone deutlich geringer ist als die Wellenlänge der höchsten zu übertragenden Frequenz [1].

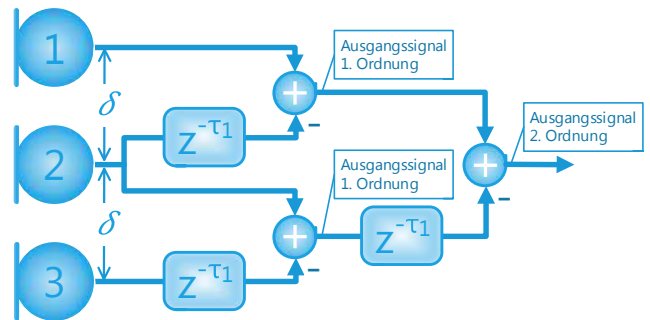


Abb. 2: Räumliches Mikrofonarray mit differentieller Signalverarbeitung, bestehend aus 3 Mikrofonen, dem Mikrofonabstand δ sowie den komplexen Filterkoeffizienten $z^{-\tau_1}$.

Mit steigender Anzahl der verwendeten Mikrofone kann eine umso höhere Ordnung bei der Richtcharakteristik erreicht werden. Dabei gilt: Mit M Mikrofonen kann maximal eine Richtcharakteristik der Ordnung $M - 1$ erzielt werden.

3.2. Koinzidente Mikrofonarrays

In der Akustik bedeutet Koinzidenz ein zeitliches wie räumliches Zusammentreffen von Schallsignalen. Bei einem koinzidenten Mikrofonarray werden daher alle Mikrofone an einem Punkt im Raum platziert, so dass keine Laufzeit- und Phasenunterschiede entstehen. Die Informationen über das Schallfeld werden aus den bekannten Richtcharakteristiken und der Ausrichtung der verwendeten Mikrofone abgeleitet. Eine tatsächlich koinzidente Anordnung der Mikrofone ist in der Praxis nicht möglich. Beschränkt man sich jedoch auf eine Ebene, beispielsweise die Horizontalebene, so können die Mikrofone übereinander angeordnet werden. Für Schallquellen im Bereich der Horizontalebene ist dann die Koinzidenz zumindest im hörbaren Frequenzbereich gegeben. Matriziert man die Ausgangssignale der Mikrofone, so ist es mit der Gradientensynthese möglich, Richtcharakteristiken erster Ordnung zu bilden. Die daraus entstehenden sogenannten virtuellen Mikrofone können darüber hinaus beliebig ausgerichtet werden. Dazu werden ein reiner Druckempfänger und pro Raumdimension jeweils ein reiner Druckgradientenempfänger benötigt, wie in Abb. 3 zu sehen ist [6] [7] [13].

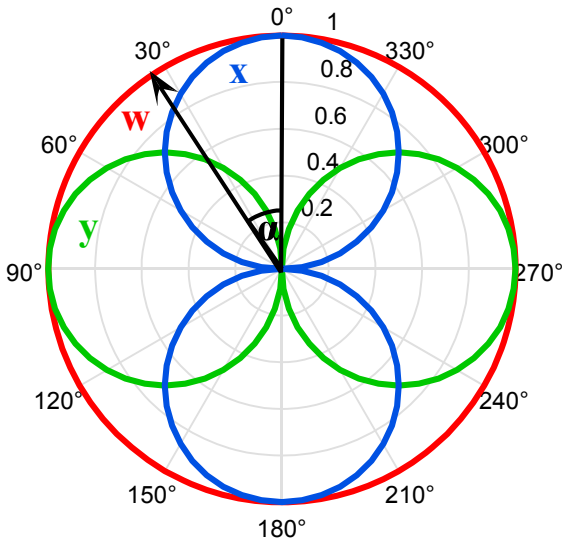


Abb. 3: Richtcharakteristiken der Mikrofone einer koinzidenten, zweidimensionalen Ambisonics-Aufstellung aus einer ‚Kugel‘ und zwei ‚Achten‘. Der Winkel α bestimmt die Ausrichtung des virtuellen Mikrofon.

Für das Ausgangssignal des resultierenden virtuellen Mikrofon gilt:

$$\begin{aligned}
 v(t) &= A \cdot v_{druck}(t) + (1 - A) \cdot v_{grad}(t) \\
 &= A \cdot w(t) + (1 - A) \cdot (k_x \cdot x(t) + k_y \cdot y(t)) \\
 &= A \cdot w(t) + (1 - A) \cdot (\cos(\alpha) \cdot x(t) + \sin(\alpha) \cdot y(t)),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

wobei $v_{druck}(t)$ der Signalanteil der Druckkomponente, $v_{grad}(t)$ der Signalanteil der Gradientenkomponente, $w(t)$ das Ausgangssignal des Druckempfänger und $x(t)$ sowie $y(t)$ die Ausgangssignale der beiden Gradientenempfänger sind. Der Winkel α bestimmt die Ausrichtung des virtuellen Mikrofon.

4. Vergleich bekannter Verfahren

Räumliche Mikrofonarrays mit additiver Signalverarbeitung und Richtrohrmikrofone weisen einige sehr ähnliche Eigenschaften auf. So ist die Gesamtlänge des Arrays bzw. des Richtrohrs von der tiefsten zu bündelnden Frequenz abhängig. Zu hohen Frequenzen hin kann die Array- und Rohrlänge mit der Wellenlänge kürzer werden. Tatsächlich kann ein Richtrohr als akustisches Array betrachtet werden. Ersetzt man nämlich die Interferenzöffnungen mit Mikrofonen und filtert deren Ausgangssignale gemäß der akustischen Beeinflussung samt Laufzeitverzögerung im Rohr, so sollte man das gleiche Ausgangssignal erhalten.

	Richtrohrmikrofone	Räumliche Mikrofonarrays mit additiver Signalverarbeitung	Räumliche Mikrofonarrays mit differentieller Signalverarbeitung	Koinzidente Mikrofonarrays
Frequenzinvarianz	Nein	Mit erhöhtem Realisierungsaufwand, jedoch nur mit Abstrichen	Theoretisch möglich, praktisch besteht ein gewisser Realisierungsaufwand	Theoretisch möglich für Richtcharakteristiken 1. Ordnung
Kompakte Baugröße	Bedingt	Nein	Ja	Ja
Variable Richtcharakteristik	Analog: Nein, mit DSP ist theoretisch eine Veränderung möglich	Mit DSP realisierbar	Ja	Ja
Variable Ausrichtung	Nein	Mit dreidimensionalem Array und DSP realisierbar	Nein, führt zu einer Veränderung der Richtcharakteristik	Ja
Bündelungsmaß	Analog: ~ 7dB, mit DSP: bis zu 15dB	Analog bis zu ~11dB, mit DSP sehr hohe Werte möglich	Je nach Ordnung steigend, eine Charakteristik 3. Ordnung erreicht bis zu 12dB	Richtcharakteristiken 1. Ordnung: Bester Wert liefert die Hyper-Niere mit ~6dB
Ortungsfähigkeit	Nein	Sehr gut	Sehr gut	Zufriedenstellend
Latenz	Analog: Nein, mit DSP: Ja, abhängig von Algorithmus und Implementierung	Analog: Nein, mit DSP: Ja, abhängig von Algorithmus und Implementierung	Analog: Nein, mit DSP: Ja, abhängig von Algorithmus und Implementierung	Analog: Nein, mit DSP: Ja, abhängig von Algorithmus und Implementierung

Tab. 1: Vergleich von Richtrohrmikrofonen mit verschiedenen Mikrofonarrays und Signalverarbeitungsverfahren hinsichtlich den Anforderungskriterien bei der professionellen Audioproduktion. [13]

Räumliche Mikrofonarrays mit differentieller Signalverarbeitung können eher mit Druckgradientenempfängern verglichen werden. Dabei ist die Verzögerung der Laufzeitglieder frei einstell- und veränderbar. Die Form der Richtcharakteristik hängt allerdings auch von der Aufstellung der Mikrofone ab, so dass sich bei einer Veränderung der Ausrichtung auch die Form der Richtcharakteristik ändert.

Hier zeichnen sich koinzidente Mikrofonarrays aus, die mit der Gradientensynthese Richtcharakteristiken 1. Ordnung beliebig ausrichten können. Hinzu kommt die zumindest theoretische Frequenzinvarianz, die gerade räumliche Mikrofonarrays mit additiver Signalverarbeitung und Richtrohrmikrofone nicht erreichen. Der einzige Nachteil ist das relativ geringe Bündelungsmaß.

Generell kann festgehalten werden: Bei der Schallrichtungsbestimmung sowie der Erzeugung variabler Richtcharakteristiken mit beliebiger Ausrichtung sind Mikrofonarrays Richtrohrmikrofonen klar überlegen, wie Tab. 1 zu entnehmen ist. Richtrohrmikrofone dürften dagegen geringere Produktionskosten verursachen, da – zumindest im analogen Fall – nur eine Mikrofonkapsel verbaut wird.

5. Verfahren zur Erhöhung der Richtwirkung bei koinzidenten Mikrofonarrays

Koinzidente Mikrofonarrays hatten bisher den Nachteil, mit Richtcharakteristiken erster Ordnung kein besonders hohes Bündelungsmaß zu erreichen. Damit schienen sie weitgehend uninteressant, trotz der sonstigen, sehr guten Eigenschaften, die gerade für anspruchsvolle Anwendungen im professionellen Tonbereich besonders geeignet erscheinen: Neben der kompakten Baugröße, einer variablen Richtcharakteristik und deren freien Ausrichtung, ist es vor allem das vergleichsweise hohe Maß der Frequenzinvarianz, das diesen Arraytyp auszeichnet.

Es stellt sich also die Frage: Ist es möglich, die Richtwirkung eines koinzidenten Mikrofonarrays weiter zu erhöhen? Mit einer stärkeren Richtwirkung möchte man in aller Regel erreichen, ein Nutzsignal mit einem möglichst geringen Störanteil einzufangen.

Ein koinzidentes Mikrofonarray erlaubt es, beliebig viele virtuelle Mikrofone zu bilden. Diese können, wie bereits erwähnt, in Ausrichtung und Richtcharakteristik erster Ordnung variieren. Wählt man die Ausrichtung und Richtcharakteristik geschickt, so kann das akustische Umfeld des Arrays abgetastet und Informationen über das Schallfeld gesammelt werden. Diese Informationen geben sowohl Hinweise auf die im Schallfeld befindlichen Störsignale als auch auf das Nutzsignal.

Befindet sich beispielsweise die Nutzschaquelle in der Richtung $\theta = 0^\circ$, so kann das Nutzsignal mit bisherigen Mitteln am besten mit einer in diese Richtung ausgerichteten Hyperniere eingefangen werden.

Um ein Signal zu erhalten, das möglichst genau die im Schallfeld vorhandenen Störsignale einfängt und gleichzeitig keine Nutzsignalanteile enthält, kann beispielsweise eine

„Niere“ in die entgegengesetzte Richtung gebildet werden, wie in Abb. 4 zu sehen ist.

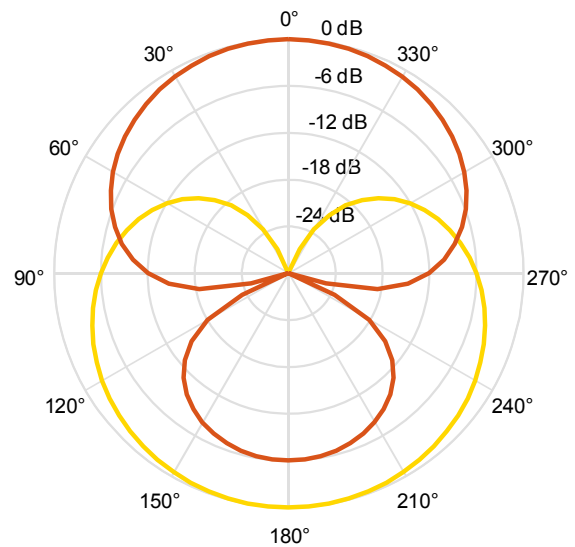


Abb. 4: Richtcharakteristiken einer ‚Hyperniere‘, ausgerichtet in Richtung $\theta = 0^\circ$ (rot), und einer ‚Niere‘, ausgerichtet in Richtung $\theta = 180^\circ$ (gelb).

Das Ausgangssignal des auf die Nutzschaquelle gerichteten virtuellen Mikrofons sei $x_{util}(t)$. Das Ausgangssignal des zweiten virtuellen Mikrofons, mit dem die Störsignale eingefangen werden sollen, sei $x_{ambi}(t)$.

Im ersten Moment ist man möglicherweise geneigt, die beiden Signale voneinander abzuziehen, um den Störanteil in $x_{util}(t)$ zu reduzieren. Dies führt jedoch nicht zum gewünschten Erfolg, da es einer Matrizierung entspricht, die zwar die Richtcharakteristik ändert, aber nicht zu einer Erhöhung der Richtwirkung beiträgt, wie in Abb. 5 zu sehen ist.

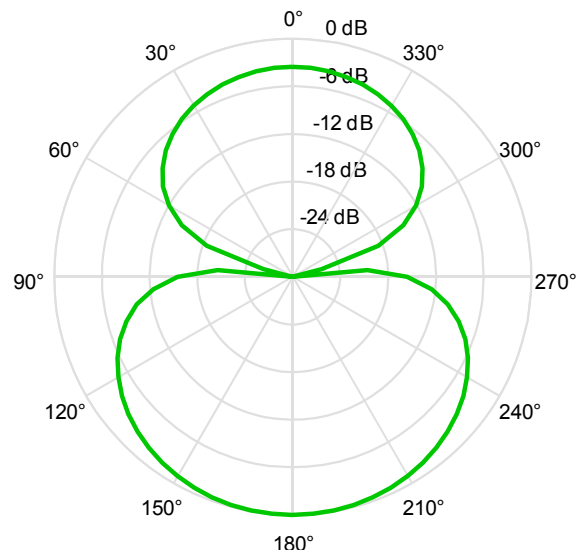


Abb. 5: Richtcharakteristik eines virtuellen Mikrofons, gebildet aus der Differenz der Ausgangssignale einer ‚Hyperniere‘, ausgerichtet in Richtung $\theta = 0^\circ$, und einer ‚Niere‘, ausgerichtet in Richtung $\theta = 180^\circ$.

Führt man jedoch diese Subtraktion nicht im Zeitbereich, sondern im Spektralbereich durch, so handelt es sich nicht mehr um eine Matrizierung der Signale, sondern um eine

frequenzselektive Trennung der Nutzsignalanteile von den Störsignalanteilen. Man spricht bei dem Vorgang auch von einer spektralen Subtraktion.

Die beiden Signale $x_{util}(t)$ und $x_{ambi}(t)$ werden dazu abgetastet und quantisiert, also digitalisiert, und schließlich mit Hilfe der diskreten Fouriertransformation DFT in den Spektralbereich überführt:

$$X_{util}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_{util}(n) \cdot e^{j2\pi kn/N} , \quad (2)$$

$$X_{ambi}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_{ambi}(n) \cdot e^{j2\pi kn/N} .$$

Dabei sind $x_{util}(n)$ und $x_{ambi}(n)$ für $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ zeit- und wertdiskrete Signale und $X_{util}(k)$ sowie $X_{ambi}(k)$ deren diskrete Fouriertransformierte, auch DFT-Koeffizienten oder bins genannt, mit dem DFT-Koeffizienten-Index $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.

Bei der spektralen Subtraktion werden die DFT-Koeffizienten voneinander abgezogen: [2]

$$|Y(k)| = |X_{util}(k)| - |X_{ambi}(k)| \cdot w(k, p = 1) , \quad (3)$$

wobei $w(k, p)$ ein reeller Gewichtungsfaktor ist, der den Subtrahenden $|X_{ambi}(k)|$ gewichtet und reguliert, so dass $Y(k)$ nicht negativ werden kann:

$$w(k, p) = \begin{cases} 1 \cdot \iota & \text{für } |X_{ambi}(k)| \leq |X_{util}(k)| \\ \frac{|X_{util}(k)|^p}{|X_{ambi}(k)|^p} \cdot \iota & \text{für } |X_{ambi}(k)| > |X_{util}(k)| . \end{cases} \quad (4)$$

Die Gewichtung übernimmt dabei der reelle Faktor $0 \leq \iota \leq 1$. Ist $\iota = 0$, so findet keine Subtraktion statt, mit $\iota = 1$ wird sie maximal. Der Quotient aus $|X_{util}(k)|$ und $|X_{ambi}(k)|$ verhindert für den unwahrscheinlichen, zweiten Fall, in welchem der Betrag von $X_{ambi}(k)$ größer als der von $X_{util}(k)$ ist, dass es zu einem negativen Ergebnis für $|Y(k)|$ kommt.

Möchte man nicht die Amplituden sondern deren Leistung subtrahieren, so folgt für die Ausgangsamplitude $|Y(k)|$:

$$|Y(k)| = \sqrt{|X_{util}(k)|^2 - |X_{ambi}(k)|^2 \cdot w(k, p = 2)} . \quad (5)$$

Eine verallgemeinerte Form kann definiert werden als:

$$|Y(k)| = (|X_{util}(k)|^p - |X_{ambi}(k)|^p \cdot w(k, p))^{1/p} . \quad (6)$$

Diese sogenannte parametrische spektrale Subtraktion [5] lässt den Exponenten p offen. Mit $p = 1$ entsteht die spektrale Subtraktion der Amplituden wie in (3) und mit $p = 2$ die spektrale Subtraktion der Leistung wie in (5).

Schließlich bekommt das Ausgangssignal den Phasenwinkel $\angle X_{util}(k)$ vom Eingangssignal $X_{util}(k)$:

$$Y(k) = |Y(k)| \cdot e^{j\angle X_{util}(k)} . \quad (7)$$

Dieser Vorgang ist gewissermaßen eine Behelfsmaßnahme, denn es muss angenommen werden, dass nach der Subtrak-

tion der beiden Eingangssignale der eigentlich ‚richtige Phasenwinkel‘ für das Ausgangssignal $Y(k)$ nicht dem vom Eingangssignal $X_{util}(k)$ entspricht. Jens Groh stellte 2010 fest, dass dieser ‚richtige Phasenwinkel‘ in vielen Fällen nicht bestimmt werden kann, also nicht ableitbar und damit unbekannt ist [11].

Untersuchungen ergaben aber, dass ein Fehler bei der Phasenlage im Spektralbereich als wesentlich weniger störend empfunden wird, als ein Fehler beim Betrag, also bei der Amplitude im Spektralbereich [16]. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine Änderung des Phasenwinkels im Spektralbereich nicht zu dem Effekt im Zeitbereich führt, der gemeinhin als Änderung der Phase bekannt ist. Nämlich die geringfügige zeitliche Änderung zweier kohärenter Signale, was in einem stereophonen Signal einen akustischen Kammfiltereffekt auslöst und in einem Monosignal einen elektrischen Kammfiltereffekt erzeugt.

Diese Subtraktion im Spektralbereich vom Ausgangssignal $x_{util}(t)$ des virtuellen Mikrofons mit Hypernierencharakteristik, das auf die Nutzsignalschallquelle ausgerichtet ist, und vom Ausgangssignal $x_{ambi}(t)$ des virtuellen Mikrofons mit Nierencharakteristik, das in die entgegengesetzte Richtung zeigt, ermöglicht die gewünschte Verstärkung der Richtwirkung. Abb. 6 zeigt die daraus entstehende, theoretische Richtcharakteristik mit einem deutlich höheren Bündelungsmaß.

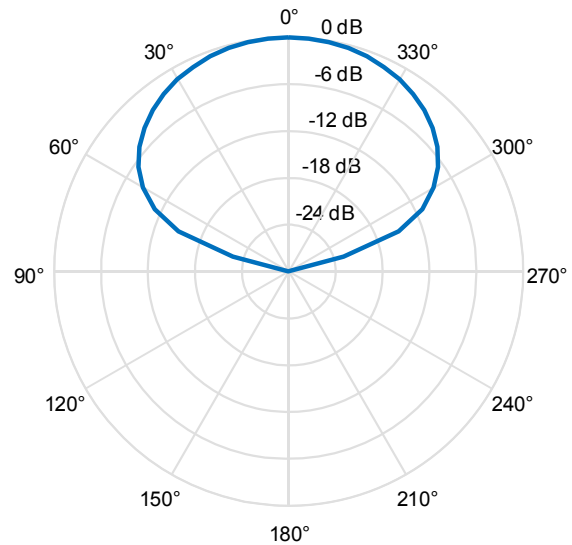


Abb. 6: Theoretische Richtcharakteristik eines durch spektrale Subtraktion gebildeten virtuellen Mikrofons, unter Verwendung einer ‚Hyperniere‘ für das Signal $x_{util}(t)$, ausgerichtet in Richtung $\theta = 0^\circ$, und einer ‚Niere‘ für das Signal $x_{ambi}(t)$, ausgerichtet in Richtung $\theta = 180^\circ$.

Der große Vorteil dieses Verfahrens ist, dass sich die Richtfunktion zumindest theoretisch für alle Frequenzen gleich verhält und damit eine weitgehend frequenzunabhängige Richtcharakteristik verspricht.

Die Bedingungen für diese beiden virtuellen Mikrofone können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Das virtuelle Mikrofon mit dem Ausgangssignal $x_{util}(t)$ muss mit möglichst großem Bündelungsmaß auf die Nutzschallquelle ausgerichtet sein.

- Das virtuelle Mikrofon mit dem Ausgangssignal $x_{ambi}(t)$ sollte dagegen ein möglichst geringes Bündelungsmaß und eine Nullstelle in Richtung der Nutzschallquelle aufweisen.

Das Ausgangssignal $x_{ambi}(t)$ soll also möglichst alle an der Position des koinzidenten Mikrofonarrays auftretenden Stör-signale enthalten und darüber hinaus möglichst keine Signal-anteile des Nutzsignals.

Diese Bedingungen legen nahe, auch andere Kombinationen virtueller Mikrofone zur Maximierung der Richtwirkung zu verwenden.

Die Richtfunktion einer ‚Acht‘ zeichnet sich beispielsweise durch eine besonders hohe Steigung vor und nach den Null-durchgängen aus, also den beiden Punkten mit maximaler Dämpfung. Verwendet man ein um 90° gedrehtes virtuelles Mikrofon mit einer ‚Acht‘-Charakteristik für $x_{ambi}(t)$, wie in Abb. 7 zu sehen ist, so nimmt dieses auch Stör-signale im näheren Umgebungsbereich der Nutzsignalschallquelle auf. Dies führt zu einer stärkeren Bündelung der Richtcharakteristik.

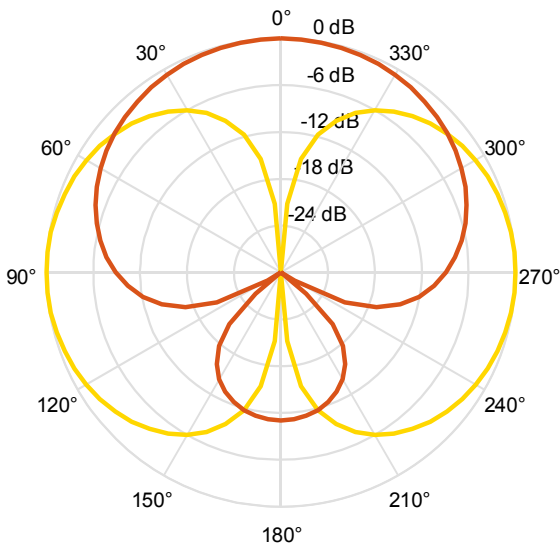


Abb. 7: Richtcharakteristiken einer ‚Superniere‘, ausgerichtet in Richtung $\theta = 0^\circ$ (rot), und einer ‚Acht‘, ausgerichtet in Richtung $\theta = 90^\circ$ (gelb).

Für das virtuelle Mikrofon in Richtung der Nutzschallquelle bietet sich in diesem Fall eine ‚Superniere‘ an. Im Gegensatz zu ‚Hypernieren‘ ist deren rückwärtige Empfindlichkeit geringer. Da in dieser Richtung die ‚Acht‘ ihren zweiten Bereich maximaler Dämpfung aufweist und somit keine Stör-signale abnehmen kann, ist es wichtig die rückwärtige Empfindlichkeit möglichst gering zu halten.

Der Abb. 8, welche die theoretische Richtcharakteristik aus der Kombination von ‚Superniere‘ und ‚Acht‘ zeigt, kann nochmals eine Steigerung des Bündelungsmaßes entnommen werden.

Allerdings muss beachtet werden, dass Abb. 8 die Richtcharakteristik in der Horizontalebene zeigt. Betrachtet man die entstehende Richtcharakteristik dreidimensional, so entsteht keine rotationssymmetrische Charakteristik. In der Vertikal-ebene (Medianebene) bleibt die ‚Supernieren‘-Charakteristik weitgehend erhalten. Im Gegensatz zu einer nach hinten

gerichteten ‚Niere‘ bildet eine in der Horizontalebene um 90° gedrehte ‚Acht‘ ihre Empfindlichkeit nach links und rechts aus, jedoch nicht nach oben und unten, was zu der nicht rotationssymmetrischen Charakteristik führt.

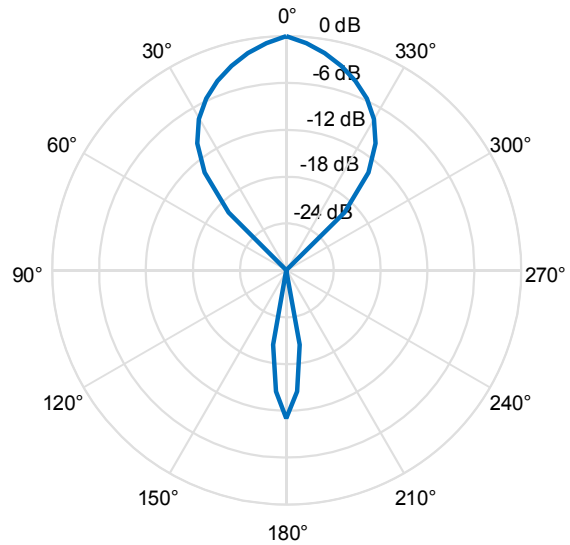


Abb. 8: Theoretische Richtcharakteristik eines durch spektrale Subtraktion gebildeten virtuellen Mikrofans, unter Verwendung einer ‚Superniere‘ für das Signal $x_{util}(t)$, ausgerichtet in Richtung $\theta = 0^\circ$, und einer ‚Acht‘ für das Signal $x_{ambi}(t)$, ausgerichtet in Richtung $\theta = 90^\circ$.

Auch andere Kombinationen, welche die genannten Bedingungen erfüllen, sind für das Verfahren denkbar. Werden ‚Hypernieren‘ oder gar ‚Supernieren‘ für das Ambi-Signal verwendet, verschlechtert sich aber das Bündelungsmaß in der dreidimensionalen Betrachtung.

6. Evaluation der theoretischen Ergebnisse

Zur Evaluation der vorangegangenen theoretischen Ausführungen wurde im reflexionsarmen Raum des Fraunhofer Instituts in Illmenau ein koinzidentes Mikrofonarray mit Sinustönen aus verschiedenen Richtungen in der Horizontalebene beschallt. Als koinzidentes Mikrofonarray wurde eine Doppel-MS-Anordnung des Mikrofonherstellers Schoeps verwendet. Diese besteht aus zwei Mikrofonen CCM 4V mit ‚Nieren‘-Charakteristik, einem CCM 8 mit ‚Acht‘-Charakteristik und der dazugehörigen Doppel-MS-Aufhängung.

Über einen Genelec-Lautsprecher vom Typ 2029B wurden Sinustöne der Frequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz und 16 kHz aus 24 gleichmäßig verteilten Raumrichtungen in der Horizontalebene zugespielt. Dies entspricht einer Richtungsauflösung von 15° .

Mit dem Ergebnis kann nun die in der Praxis wirksame, richtungsbezogene Empfindlichkeit des vorgestellten Verfahrens für einzelne Schallquellen unterschiedlicher Frequenz und Richtung ermittelt werden. Abb. 9 zeigt die resultierende Richtcharakteristik, wobei für das Signal $x_{util}(t)$ ein virtuelles Mikrofon mit ‚Supernieren‘-Charakteristik, für das Signal $x_{ambi}(t)$ eine ‚Acht‘ sowie eine spektrale Subtraktion der Amplituden wie in (3) verwendet wurde.

Die in grau dargestellte theoretische Richtcharakteristik wird zwar von den meisten Frequenzen näherungsweise einge-

halten, auffällig ist jedoch, dass die Richtcharakteristik nicht über alle Frequenzen stabil bleibt. Dabei fallen vor allem die Charakteristiken für 8 kHz und 16 kHz auf. Diese weisen sowohl eine verbreiterte Keule nach vorne, als auch eine zerrissene rückwärtige Keule auf. Die Form der Charakteristik bei 16 kHz zeigt im vorderen Bereich drei Maxima, wobei die beiden äußeren ein wenig an die Form von Nebenkeulen erinnern. Im hinteren Bereich entstehen sogar drei Nullstellen.

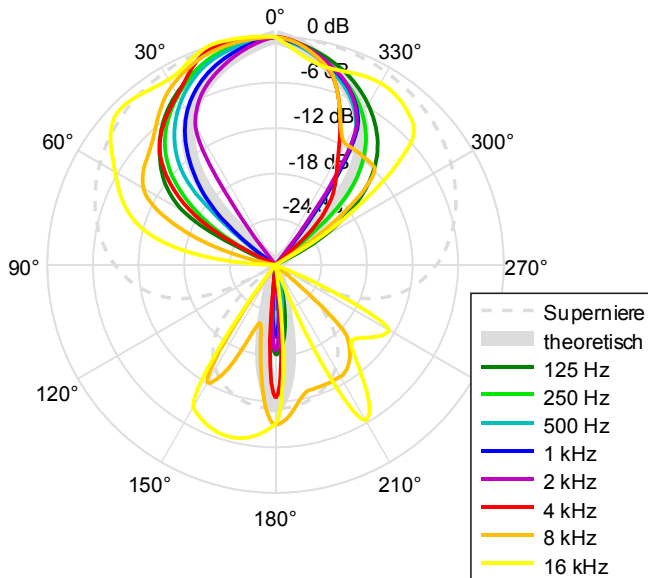


Abb. 9: Richtcharakteristiken des vorgestellten Verfahrens für die Frequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz und 16 kHz.

Außerdem ist auffällig, dass die Richtcharakteristiken ein wenig nach links verschoben sind, ungefähr in die Richtung $\theta = 7,5^\circ$. Dieser Effekt wird zu hohen Frequenzen deutlicher und zeigt sich dort auch bei der rückwärtigen Keule.

Die Abbildungen 10, 11 und 12 zeigen die gemessenen Richtcharakteristiken der verwendeten Mikrofone und geben einen Hinweis auf die Ursachen für die nicht stabile Richtcharakteristik in Abb. 9.

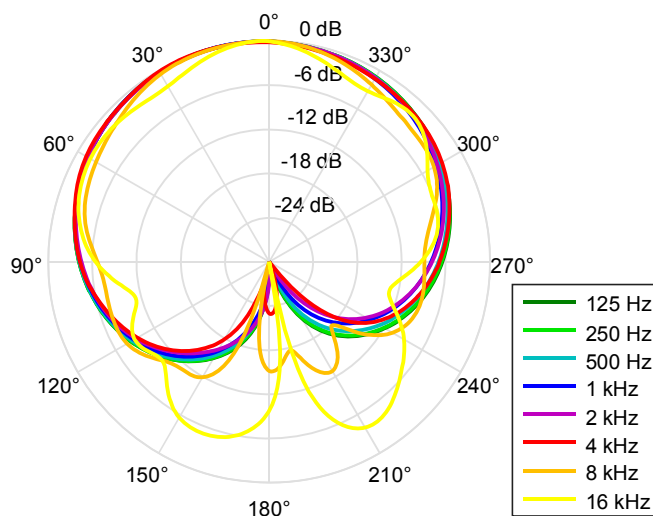


Abb. 10: Gemessene Richtcharakteristiken der vorderen ‚Niere‘ CCM 4V in der Doppel-MS-Anordnung für die Frequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz und 16 kHz.

Bei der vorderen ‚Niere‘ verliert die Richtcharakteristik ebenfalls ab 8 kHz ihre Stabilität. Die nach hinten gerichtete ‚Niere‘ zeigt diesen Effekt noch deutlicher und bereits bei 4 kHz. Als Ursache kann die Doppel-MS-Aufhängung herangezogen werden. Offensichtlich kommt es durch die für die Aufhängung notwendigen Aufbauten zu Schallabschattungen bei Frequenzen ab etwa 4 kHz. Diese treten durch das hinten angebrachte, flächenmäßig größte Bauteil, dem Verbindungsstück für Stative und Angeln, bei der rückwärtigen ‚Niere‘ am stärksten auf.

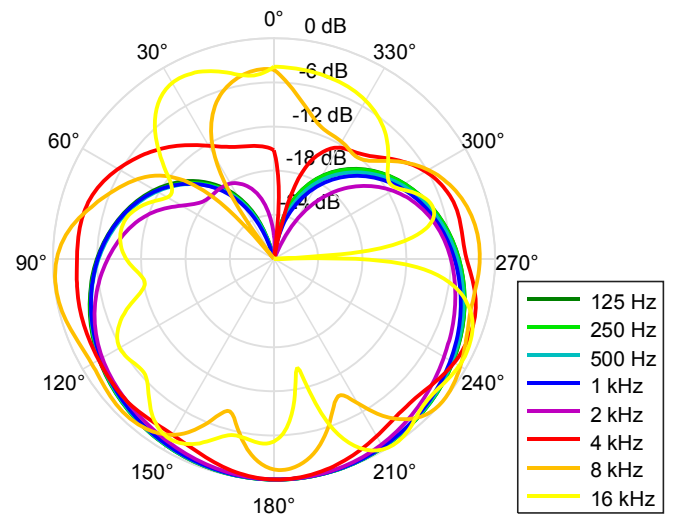


Abb. 11: Gemessene Richtcharakteristiken der hinteren ‚Niere‘ CCM 4V in der Doppel-MS-Anordnung für die Frequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz und 16 kHz.

Im Gegensatz zur hinteren ‚Niere‘ ist die vordere ‚Niere‘ bei der Versuchsmessung offensichtlich nicht exakt ausgerichtet gewesen. Sie zeigt ebenfalls eine etwa um $7,5^\circ$ nach links verschobene Richtcharakteristik.

In Abb. 12, der gemessenen Richtcharakteristik der verwendeten ‚Acht‘, ist ebenso eine nicht korrekte Ausrichtung des Mikrofons festzustellen. Darüber hinaus zeigt die Schallabschattung bei höheren Frequenzen auch hier Wirkung.

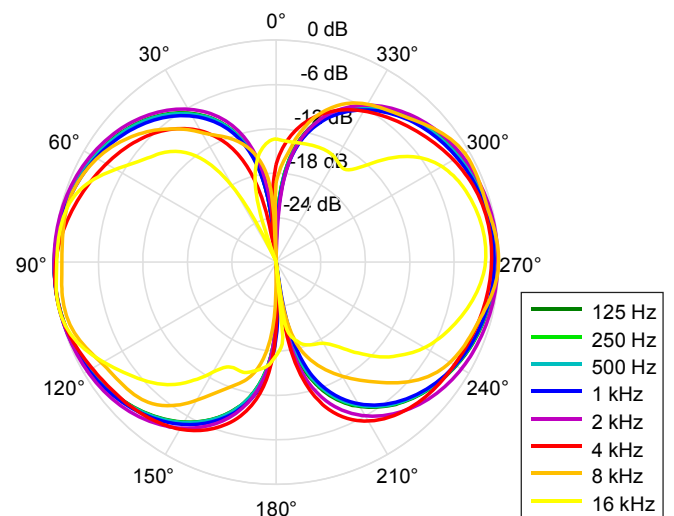


Abb. 12: Gemessene Richtcharakteristiken der ‚Acht‘ CCM 8 in der Doppel-MS-Anordnung für die Frequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz und 16 kHz.

Für das angewendete Verfahren zur Erhöhung der Richtwirkung bedeutet dies, dass die nicht stabile Richtcharakteristik für Frequenzen über 4 kHz auf Schallabschattungen durch die Aufhängung zurückgeführt werden können. Die Ursache für die nach links verschobene Hauptkeule liegt in der unsauberen Ausrichtung der Mikrofone bei der Messung.

Sieht man von diesen Schönheitsfehlern ab, so wird mit dem vorgestellten Verfahren eine deutliche Steigerung der Richtwirkung erzielt. Auch wenn die Richtcharakteristiken für 125 Hz und 250 Hz nicht exakt den theoretischen Vorgaben standhalten, so wird doch auch dort im Vergleich zu räumlichen Mikrofonarrays oder dem Richtrohrverfahren eine außerordentlich starke Bündelung erreicht.

7. Schlussfolgerung

Neben Richtrohrmikrofonen sind es Mikrofonarrays, denen es möglich ist, eine stärkere Richtwirkung auszubilden als die bekannten Richtcharakteristiken erster Ordnung. In der Praxis ist die Richtwirkung von Richtrohrmikrofonen frequenzabhängig. Zu tiefen Frequenzen hin, deren Wellenlänge länger als das Rohr ist, verliert der Interferenzeffekt seine Wirkung und die Richtcharakteristik geht von der ‚Keulen‘-Form in die Charakteristik des verwendeten Schallwandlers über.

Auch räumliche Mikrofonarrays mit additiver Signalverarbeitung haben dieses Problem, so dass auch hier eine von der Frequenz abhängige Richtwirkung entsteht. Optimierungsansätze mit einer geschickten Anordnung der Mikrofone oder einer entsprechenden Signalverarbeitung können das Problem nur bedingt kompensieren. Entscheidend bleiben die Abstände der Mikrofone und die Gesamtlänge des Arrays, so dass verhältnismäßig große Aufbauten entstehen.

Bei räumlichen Mikrofonarrays mit differentieller Signalverarbeitung wird hingegen der Druckgradient abgetastet. Dadurch bleibt der Arrayaufbau kompakt, genauso wie bei koinzidenten Mikrofonarrays. Diese zeichnen sich mit einer zumindest theoretischen Frequenzinvarianz bei der Richtcharakteristik aus. Mit dem vorgestellten Verfahren kann darüber hinaus auch eine höhere Richtwirkung als mit Richtcharakteristiken erster Ordnung erzielt werden, die auch bei tiefen Frequenzen ihre Wirksamkeit nicht verliert. Damit stellen koinzidente Mikrofonarrays eine kompakte Alternative zu Richtrohrmikrofonen dar.

Der durch die digitale Signalverarbeitung auftretenden Latenz sowie den entstehenden Artefakten steht der Vorteil gegenüber, die Richtcharakteristik beliebig ausrichten und verändern zu können.

7. Literatur

- [1] Benesty, J., Chen, J.: Study and Design of Differential Microphone Arrays. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [2] Boll, S. F.: Suppression of Acoustic Noise in Speech Using Spectral Subtraction. IEEE Tran. on Acoustics, Speech and Signal Processing ASSP-27, 2, 1979, S. 113-120.
- [3] Boré, G., Peus, S.: Mikrofone - Arbeitsweise und Ausführungsbeispiele. Firmenschrift, Georg Neumann GmbH, Berlin, 1999.
- [4] Brandstein, M., Ward, D. E.: Microphone Arrays - Signal Processing Techniques and Applications. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2001.
- [5] Etter, W., Moschytz, G. S.: Noise reduction by noise-adaptive spectral magnitude expansion. Journal of the Audio Engineering Society 42 (1994), S. 341-349.
- [6] Gerzon, M. A.: Periphony - With-Height Sound Reproduction. Journal of the Audio Engineering Society 21 (1973), 2-10.
- [7] Gerzon, M. A.: The Design of Precisely Coincident Microphone Arrays for Stereo and Surround Sound. 50th Convention of the Audio Engineering Society (1975), London, Preprint L-20.
- [8] Goossens, S., Wollherr, H.: Das KEM als neuartiges Gestaltungsmittel in der Hand des Tonmeisters. Tagungsbericht 19. Tonmeistertagung (1996), Verlag K. G. Saur, München, 1997, S. 435-441.
- [9] Goossens, S., Wollherr, H.: KEM das ganz andere Mikrofon. Fernseh- und Kino-Technik 51 (1997), S. 186-191.
- [10] Goossens, S.: Verbesserung der tieffrequenten Richtwirkung von Mikrofonarrays. Tagungsbericht 27. Tonmeistertagung (2012), S. 431-442.
- [11] Groh, J.: Verringerung von Kammfilterverzerrungen bei Multimikrofonaufnahmen. Tagungsbericht 26. Tonmeistertagung (2010), S. 616-625.
- [12] Kammeyer, K.-D., Kroschel, K.: Digitale Signalverarbeitung (8. Ausg.). Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2012.
- [13] Runow, B., Curdt, O.: Mikrofonarrays in der professionellen Audioproduktion. Tagungsbericht 28. Tonmeistertagung (2014), S. 263-269.
- [14] Sank, J. R.: Microphones. Journal of the Audio Engineering Society 33 (1985), S. 514-547.
- [15] Tamm, K., Kurtze, G.: Ein neuartiges Mikrofon großer Richtungsselektivität. Acustica No. 5/4, Beiheft 1, 1954, S. 469-470.
- [16] Vary, P.: Noise suppression by spectral magnitude estimation-mechanism and theoretical limits. Signal Processing 8 (1985), S. 387-400