

Mikrofonarrays in der professionellen Audioproduktion (*Microphone Arrays for professional audio production*)

Bernfried Runow¹, Oliver Curdt²

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

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

Abstract

Die Idee, mehrere Mikrofone zusammenzuschalten und einen Mehrertrag daraus zu ziehen, ist sehr alt und kann bis in die Dreißigerjahre des 20. Jahrhunderts zurückverfolgt werden. Damals experimentierte Harry Ferdinand Olson mit seinem 1933 eingeführten, einseitig gerichteten Bändchenmikrofon. Dieses kombinierte er mit einem omnidirektionalen Druckempfänger, um verschiedene Richtcharakteristiken zu erzeugen [12][13]. Die Erforschung von Mikrofonarrays, die Olson damals begann, dauert bis heute an. Der Grund: Die Möglichkeiten sind für eine Vielzahl von Anwendungen interessant. In Mobiltelefonen, Hörgeräten, Automobilen und der Messtechnik – um nur einige zu nennen – sind Mikrofonarrays jetzt schon ein fester Bestandteil.

In der professionellen Audioproduktion trifft man bis jetzt allerdings eher selten auf Mikrofonarrays. Es stellt sich also die Frage, warum das so ist? Welche Schwierigkeiten bestehen noch, und welche Möglichkeiten bieten Mikrofonarrays zukünftig?

The idea of a hook-up of several microphones to get an excess profit is an old idea and goes back to the thirties of the 20th century. The potentiality microphone arrays feature in comparison to a single microphone makes them useful for a multitude of applications. For example, today they are already used in mobile phones, hearing aid devices, hands-free equipment and in the technique of measurement.

However, you can only find a very few microphone arrays at professional audio productions. This paper will explicate the most popular types of microphone arrays, the reason for use or not use, the drawbacks and the advantages.

1. Einführung

Es gibt eine ganze Reihe verschiedener Typen und Klassen von Mikrofonarrays, die sich in ihrem Aufbau, ihrer Signalverarbeitung und ihren Eigenschaften unterscheiden. Es sind im Wesentlichen zwei Gründe, warum Mikrofone zu einem Array zusammengeschaltet werden. Zum einen ist es möglich, durch die Analyse der Ausgangssignale die Richtung einer Schallquelle zu bestimmen, zum anderen kann eine richtungsabhängige Dämpfung – also eine virtuelle Richtcharakteristik – ausgebildet werden. Dieser Vorgang wird Beamforming genannt und ermöglicht Richtcharakteristiken, die es bei konventionellen Mikrofonen bisher nicht gibt. Darüber hinaus besteht bei einigen Typen die Möglichkeit, die Richtcharakteristik den gegebenen Anforderungen dynamisch anzupassen.

Für Anwendungen in der professionellen Audioproduktion sind vor allem die erweiterten Möglichkeiten beim Beamforming von Interesse.

Ein Mikrofonarray besteht aus mindestens zwei Mikrofonen. Hinsichtlich der Anordnung unterscheidet man generell zwei Array-Grundtypen: die Räumlichen Mikrofonarrays und die Koinzidenten Mikrofonarrays.

2. Räumliche Mikrofonarrays

Bei räumlichen Mikrofonarrays sind die Mikrofone in einem definierten räumlichen Abstand zueinander angeordnet und nehmen eine diskrete Schallfeldabtastung vor.



Abb. 1: Räumliches, lineares Mikrofonarray, bei dem die Mikrofone in einer Reihe angeordnet sind.

Die räumliche Information über eine Schallquelle wird dabei aus den unterschiedlichen Laufzeiten des Schalls zu den einzelnen Mikrofonen abgeleitet. Dabei gibt es viele Möglichkeiten, die Mikrofone anzuordnen: Lineare Arrays, bei denen die Mikrofone beispielsweise äquidistant in einer Reihe, im Quadrat oder würfelförmig aufgestellt sind. Es gibt zirkuläre Arrays, zylindrische, spiral- und kugelförmige sowie quasi zufallsverteilte Anordnungen. Ausschlaggebend für die Anordnung und den Abstand der Mikrofone sind der zu übertragende Frequenzbereich, die gewünschte Richtcharakteristik sowie die weitere Signalverarbeitung.

Bei räumlichen Mikrofonarrays existieren zwei grundlegend unterschiedliche Ansätze, was die Signalverarbeitung betrifft: Die additive und die differentielle Signalverarbeitung.

2.1. Additive Signalverarbeitung

Bei der additiven Signalverarbeitung werden die einzelnen Ausgangssignale der Mikrofone nach einer optionalen Filterung addiert, wie in Abb. 2 dargestellt. Durch diese additive Signalverarbeitung reagiert das Mikrofonarray auf den Schalldruck.

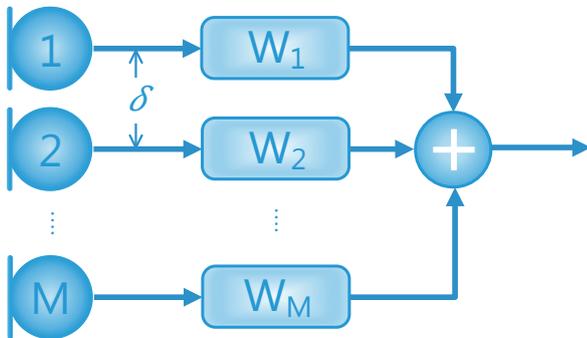


Abb. 2: Räumliches Mikrofonarray mit additiver Signalverarbeitung, bestehend aus M Mikrofonen, dem Mikrofonabstand δ sowie den Filterkoeffizienten W_m .

Ist der Abstand der Mikrofone größer als die halbe Wellenlänge der höchsten, zu übertragenden Frequenz, so kommt es zu einer räumlichen Unterabtastung. Die Folge sind Nebenkeulen beim Beamforming, also Bereiche hoher Empfindlichkeit, die neben der Hauptkeule entstehen und in den meisten Fällen unerwünscht sind. Um dies zu vermeiden, muss bei der Anordnung der Mikrofone das räumliche Samplingtheorem eingehalten werden [17]:

$$\delta < \lambda_{\min} / 2 \quad [\text{m}] \quad (1)$$

Liegen die Mikrofone allerdings sehr dicht beieinander, so kann es für niedrige Frequenzen ebenfalls zu einer unzureichenden Abtastung kommen. Und zwar dann, wenn auf Grund der großen Wellenlänge an allen Mikrofonpositionen eine ähnliche Amplitude abgenommen wird. Für niedrige Frequenzen ist bei der additiven Signalverarbeitung also eine Mindestgröße des Mikrofonarrays notwendig.

Auch wenn Mikrofonarrays mit additiver Signalverarbeitung mit Abstand am weitesten verbreitet sind, so machen es die beiden genannten Eigenschaften dennoch nahezu unmöglich, über einen größeren Frequenzbereich eine frequenzinvariante Richtcharakteristik zu erzeugen. Besonders zu tiefen Frequenzen hin verliert sich bei den meisten Beamformern die Richtwirkung, weil die für tiefe Frequenzen notwendigen, großen Mikrofonabstände in der Praxis nicht realisiert werden können. [5]

2.1.1. Analoge additive Signalverarbeitung

Eine Methode, um die Frequenzabhängigkeit der Richtcharakteristik räumlicher, additiver Mikrofonarrays einzuschränken, ist die Verwendung eines harmonischen Arrays. Sie bedient sich der Möglichkeit, den zu übertragenden Frequenzbereich aufzuteilen und jeden der unterteilten Bereiche mit einem eigenen Mikrofonarray abzunehmen. Diese einzelnen Teilarrays werden Sub-Arrays genannt, wobei ein Mikrofon auch von

mehreren Sub-Arrays verwendet werden kann, wie Abb. 3 zeigt.

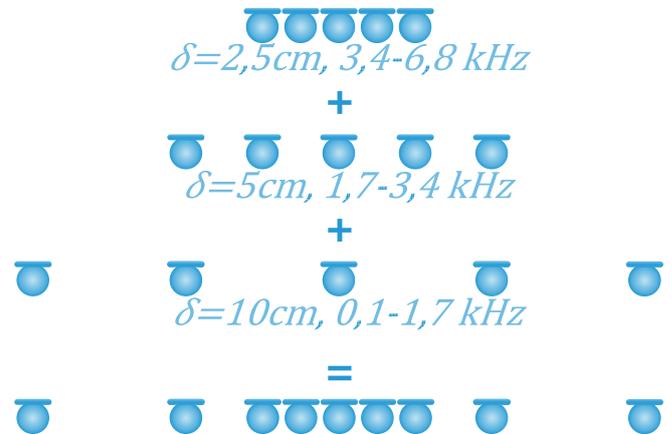


Abb. 3: Harmonisches Mikrofonarray, bestehend aus drei Sub-Arrays für die Frequenzbereiche 0,1-1,7 kHz, 1,7-3,4 kHz sowie 3,4-6,8kHz, jeweils mit dem Mikrofonabstand δ .

Die Abstände der Mikrofone δ werden für den jeweiligen Frequenzbereich unter Anwendung von (1) bestimmt. Daraus entstehen mit steigender Frequenz immer kleinere Mikrofonabstände für die Sub-Arrays.

Eine weitere Optimierung wird erreicht, wenn die Ausgangssignale der einzelnen Sub-Arrays einem Bandpassfilter unterzogen werden. Diese Filter müssen so ausgelegt sein, dass nur der Frequenzbereich, für den das Sub-Array entworfen ist, den Filter passiert. Außerdem werden die Bandpassfilter aufeinander abgestimmt, um einen konstanten Amplitudengang und eine lineare Phase in der Gesamtübertragungsfunktion des Beamformers zu erreichen. Ein Mikrofonarray mit solch einer Signalverarbeitung wird Subbandarray genannt.

Beide Arraytypen, das harmonische und das Subbandarray, lassen sich mit einer analogen Signalverarbeitung realisieren, so dass keine Zeitverzögerung bei der Verarbeitung auftritt.

2.1.2. Digitale additive Signalverarbeitung

Viele Mikrofonarrays bedienen sich hingegen der Möglichkeiten, die durch die digitale Signalverarbeitung entstehen, wie beispielsweise die Transformation in den Frequenzbereich.

Gerne wird der anschauliche und weit verbreitete Delay&Sum-Beamformer digital umgesetzt. Bei diesem Ansatz werden die Mikrofonsignale zeitlich so verzögert, dass sich die Signanteile der Nutzschallquelle bei der Addition konstruktiv überlagern. Dadurch richtet sich die Richtcharakteristik auf die Richtung der Nutzsignalquelle aus. Signale aus anderen Richtungen erfahren bei der Addition hingegen eine Dämpfung oder sogar eine Auslöschung, da diese Signanteile bei der Addition nicht phasengleich sind. Dieser Vorgang ist in Abb. 4 grafisch dargestellt.

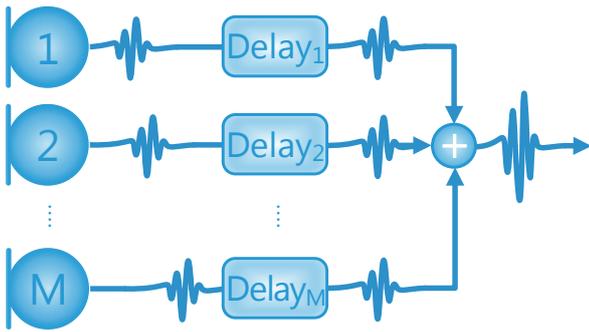


Abb. 4: Mikrofonarray mit Delay&Sum-Beamformer, der üblicherweise mit digitaler Signalverarbeitung realisiert wird, bestehend aus M Mikrofonen und den Verzögerungsgliedern Delay_1 bis Delay_M .

Vergleicht man Abb. 4 mit der Grundstruktur additiver Signalverarbeitung in Abb. 2, so fällt auf, dass lediglich die Filterkoeffizienten durch die Verzögerungsglieder ersetzt wurden. Tatsächlich kann ein komplexer Filterkoeffizient eine Zeitverzögerung beinhalten. Somit gilt für den Filterkoeffizienten eines Delay&Sum Beamformers:

$$W_m(\omega) = e^{-j\omega\tau_m}, \quad (2)$$

wobei τ_m die Verzögerungszeit des Mikrofons m ist.

Der Delay&Sum-Beamformer hat ein gutes Dämpfungsverhalten gegenüber unkorreliertem Rauschen, dem allerdings ein äußerst schlechtes Dämpfungsverhalten von korrelierten Störgeräuschen entgegensteht. Hinzu kommt, dass die Richtcharakteristik stark frequenzabhängig ist und die Hauptkeule mit sinkender Frequenz immer breiter wird, bis schließlich für tiefe Frequenzen, abhängig von der Größe des Arrays, kaum eine Richtwirkung erzielbar ist. Dies bewirkt am Ausgang des Beamformers eine Verzerrung des ursprünglichen Spektrums der Nutzsignale und macht den Einsatz für breitbandige Signale wie beispielsweise Sprache nahezu unbrauchbar. [5]

Ein Beamformer ist natürlich nicht nur darauf beschränkt, die Ausgangssignale der Mikrofone zu verzögern. Mit dem Filterkoeffizient W_m kann für jedes Frequenzband ein individueller Filter entworfen werden. Diese Klasse der Signalverarbeitung räumlicher Mikrofonarrays wird Filter&Sum-Beamformer genannt. Der Delay&Sum-Beamformer ist letztlich eine Variante davon.

Weitere Varianten sind beispielweise der Superdirektive Beamformer [7] und adaptive Verfahren, wie der Generalized Sidelobe Canceller [11], der Frost- [9] und der Linear Constrained Minimum Variance-Beamformer [4].

2.2. Differentielle Signalverarbeitung

Im Gegensatz zur additiven Signalverarbeitung werden die Mikrofonsignale bei der differentiellen Signalverarbeitung paarweise voneinander abgezogen. Somit reagieren differentielle Mikrofonarrays auf die räumliche Ableitung des Schalldrucks und sind im Prinzip Druckgradientenempfänger. Abb. 5 zeigt, wie mit einer linearen und äquidistanten Mikrofonanordnung sowie einer differentiellen Signalverarbeitung

Ausgangssignale 1. und 2. Ordnung realisiert werden können. Generell ist festzuhalten: ein Ausgangssignal n-ter Ordnung benötigt mindestens n+1 Mikrofone. [1]

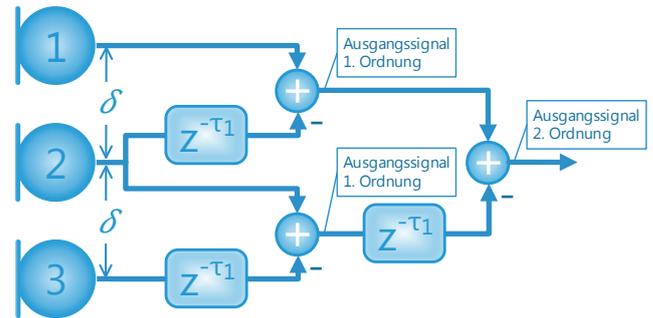


Abb. 5: Mikrofonarray mit differentieller Signalverarbeitung, bestehend aus 3 Mikrofonen, dem Mikrofonabstand δ sowie den komplexen Filterkoeffizienten $z^{-\tau_1}$.

Um den Druckgradienten im Raum abtasten zu können, muss der Abstand der Mikrofone deutlich geringer sein als die kleinste zu übertragende Wellenlänge [1]:

$$\delta \ll \lambda_{\min} \quad [m] \quad (3)$$

Das ist der Grund, warum differentielle Mikrofonarrays im Vergleich zu additiven mit deutlich geringeren Abmessungen auskommen.

Der grundlegende Unterschied zu additiven Beamformern liegt jedoch im angestrebten Ergebnis hinsichtlich der Richtcharakteristik. Werden bei der additiven Verarbeitung die einzelnen Ausgangssignale der Mikrofone mit dem Ziel bearbeitet, eine optimale Hauptkeule zu erreichen, so werden bei der differentiellen Verarbeitung die einzelnen Ausgangssignale dahingehend gefiltert, eine oder mehrere definierte Nullstellen in der Richtcharakteristik auszubilden.[6]

Das kleinstmögliche differentielle Mikrofonarray kann mit zwei Mikrofonen realisiert werden und ermöglicht maximal zwei Bedingungen hinsichtlich der Richtwirkung. Die erste Bedingung ist, dass akustische Signale aus der Richtung der Nutzsignalquelle verzerrungsfrei übertragen werden. Mit der zweiten Bedingung wird gefordert, Störschall aus einer beliebigen anderen Richtung $\alpha_{1,1}$ zu unterdrücken.

Ein lineares und äquidistantes Array, bei dem alle Mikrofone auf einer Achse liegen, hat die Eigenschaft, dass die Richtwirkung spiegelsymmetrisch zur Achse ist, auf der die Mikrofone angeordnet sind. Für die Bedingungen müssen also nur Winkel bis 180° berücksichtigt werden. Damit lassen sich die relevanten Richtungen in den Bereich $0^\circ \leq \alpha_{1,1} \leq 180^\circ$ eingrenzen. In Tab. 1 sind die Winkel α für typische Richtcharakteristiken aufgeführt.

Um eine Richtcharakteristik 2. Ordnung zu bilden, wird mindestens ein drittes Mikrofon benötigt, so dass zwei Nullstellen in den Richtungen $\alpha_{2,1}$ und $\alpha_{2,2}$ bedingt werden können.

| Richtcharakteristik | 1. Ordnung | | 2. Ordnung | |
|---------------------|----------------|----------------|----------------|--|
| | $\alpha_{1,1}$ | $\alpha_{2,1}$ | $\alpha_{2,2}$ | |
| Niere | 180° | 180° | 90° | |
| Superniere | 135° | ~ 152,87° | ~ 106,26° | |
| Hyperniere | 120° | ~ 144,1° | ~ 71,94° | |
| Acht / Vierpol | 90° | 135° | 45° | |

Tab. 1: Typische Richtcharakteristiken 1. und 2. Ordnung und die zugehörigen Dämpfungswinkel α für den Fall, dass das Mikrofonarray auf eine Nuttschallquelle in der Richtung 0° ausgerichtet ist.

Damit ist es theoretisch möglich, mit geringen Arrayabmessungen eine frequenzinvariante Richtcharakteristik bis hin zu niedrigen Frequenzen zu erzielen und für eine definierte Anzahl von Mikrofonen ein maximales Bündelungsmaß. Darüber hinaus können durch weitere Mikrofone Richtcharakteristiken höherer Ordnung realisiert werden.

Allerdings steigt pro Ordnung die verarbeitungsbedingte Hochpassfilterwirkung um 6dB, welche ausgeglichen werden muss. [1]

3. Koinzidente Mikrofonarrays

Koinzidenz bezeichnet in der Akustik ein zeitliches wie räumliches Zusammentreffen von Schallsignalen. Die Abtastung des Schallfelds wird also nur an einem Punkt im Raum vorgenommen. Alle Mikrofone müssen daher genau an derselben Stelle platziert werden, so dass keine Laufzeit- und Phasenunterschiede entstehen. Die räumliche Information wird aus den bekannten Richtcharakteristiken der verwendeten Mikrofone und deren Ausrichtung abgeleitet.



Abb. 6: Das koinzidente Mikrofonarray aus einer Kugel (DPA 4006) und zwei Achten (MKH30) zeigt, dass es in der Praxis unmöglich ist, alle Mikrofonkapseln genau an derselben Stelle zu platzieren.

In der Praxis ist eine koinzidente Anordnung der Mikrofone nie ideal. Die Folge ist Aliasing ab einer bestimmten Frequenz. Diese Frequenz wird obere Grenzfrequenz der Koinzidenz genannt.

Außerdem müssen – auf Grund der bei koinzidenten Mikrofonarrays notwendigen Richtcharakteristiken – Druckgradientenempfänger verwendet werden, deren Empfindlichkeit in Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Schalls und der Frequenz ebenfalls nicht ideal ist. Hochwertige Kondensatorkapseln haben jedoch bei tiefen Frequenzen ein nahezu ideales Polardiagramm.

3.1. Gradientensynthese

Durch die Kombination von reinen Druck- und Druckgradientenempfängern können mit Hilfe der Gradientensynthese beliebige Richtcharakteristiken erster Ordnung gebildet werden, wie in Abb. 7 grafisch aufbereitet ist. Die Richtcharakteristik eines reinen Druckempfängers entspricht der einer Kugel, des Druckgradientenempfängers der einer Acht. Das Signal des resultierenden Mikrofons:

$$u(t) = A \cdot w(t) + (1 - A) \cdot x(t) \tag{4}$$

setzt sich aus dem Signal des Druckempfängers $w(t)$ und dem des Druckgradientenempfängers $x(t)$ zusammen, wobei der reelle Koeffizient $0 \leq A \leq 1$ diese beiden Anteile gewichtet.

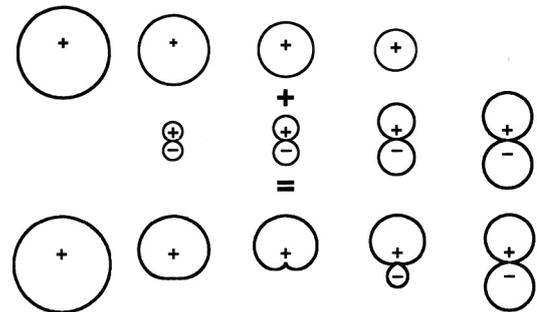


Abb. 7: Richtcharakteristiken 1. Ordnung als gewichtete Summen einer Kugel und einer Acht.

Erweitert man das koinzidente Mikrofonarray aus Kugel und Acht um eine weitere Acht, die orthogonal zur bereits vorhandenen Acht ausgerichtet wird, so ist es möglich ein virtuelles Mikrofon mit einer beliebigen Richtcharakteristik 1. Ordnung zu generieren, das variabel in der von den beiden Achten aufgespannten Ebene ausgerichtet werden kann.

Möglich macht das die Tatsache, dass aus zwei koinzident und orthogonal zueinander liegenden Achten eine nach Belieben in der Ebene der beiden Achten ausgerichtete, virtuelle Acht matriziert werden kann. Diese Acht entspricht dem Druckgradientenanteil des virtuellen Mikrofons:

$$v_{grad}(t) = \cos(\theta_0) \cdot x(t) + \sin(\theta_0) \cdot y(t) \tag{5}$$

Dabei ist θ_0 der Ausrichtungswinkel. $x(t)$ sowie $y(t)$ sind die Ausgangssignale der beiden Achten. Mit Hilfe von (4) und (5) lässt sich das Ausgangssignal des virtuellen Mikrofons berechnen, wobei der Druckanteil $v_{druck}(t)$ immer das Ausgangssignal des Druckempfängers $w(t)$ ist:

$$v(t) = A \cdot v_{druck}(t) + (1 - A) \cdot v_{grad}(t) \tag{6}$$

$$= A \cdot w(t) + (1 - A) \cdot \cos(\theta_0) \cdot x(t) + (1 - A) \cdot \sin(\theta_0) \cdot y(t)$$

Es ist gleichzeitig die Definition des auf eine Ebene reduzierten Ambisonics B-Formats. Das von Gerzon entwickelte Format zur Aufnahme und Wiedergabe eines Klangfeldes sieht neben der Druckkomponente $w(t)$ für jede Raumachse eine Druckgradientenkomponente $x(t)$, $y(t)$ und

$z(t)$ vor, also insgesamt vier Signale. Mit dieser dritten Druckgradientenkomponente kann dann ein virtuelles Mikrofon im gesamten Raum ausgerichtet werden. [2]

Es gibt eine ganze Reihe koinzidenter Mikrofonanordnungen, die sich bei ihrer Signalverarbeitung die Gradientensynthese und das B-Format zu Nutze machen. Dazu zählen die Soundfieldmikrofone wie auch Doppel-MS Anordnungen. Die Beispiele zeigen, dass die Empfänger auch aus Mikrofonen anderer Richtcharakteristik – beispielsweise aus Nieren – und anschließender Matrizierung gebildet werden können. [16][18]

Weitere Optimierungsmöglichkeiten bieten feststehende und adaptive Filter in den Ausgangssignalen der Mikrofone und der Summe.

Die Matrizierung und Filterung für die Gradientensynthese lässt sich analog realisieren. Ist allerdings eine stufenlos variierbare Richtcharakteristik und flexible Ausrichtung gewünscht, bietet sich eine digitale Signalverarbeitung an.

4. Anforderungen in der professionellen Audioproduktion

Die professionelle Audioproduktion stellt hohe Ansprüche an die zum Einsatz kommenden Mikrofone. Eben diese Ansprüche werden auch an ein Mikrofonarray gestellt, das in einer Produktionsumgebung schließlich wie ein konventionelles Mikrofon verwendet wird. Im Folgenden werden die wichtigsten Anforderungsmerkmale aufgeführt und erläutert.

4.1. Frequenzinvarianz

Eine der wichtigsten Voraussetzungen für eine professionelle Audioproduktion – wenn nicht sogar die wichtigste – ist die unverfälschte Abnahme eines breitbandigen Nutzsignals, wie beispielsweise der menschlichen Sprache. Der ausschlaggebende Faktor ist dabei die Frequenzinvarianz des Systems in dem für den Menschen wahrnehmbaren Frequenzbereich.

Für ein Mikrofonarray bedeutet dies, dass die Richtcharakteristik frequenzunabhängig bleibt und somit über alle Frequenzen gleich ist.

Eine absolute Frequenzinvarianz ist in der Praxis nicht möglich, da es beispielsweise schon durch Beugungen am Mikrofonkörper zu frequenzabhängigen Beeinträchtigungen der Richtcharakteristik kommt. Dennoch ist ein möglichst hohes Maß an Frequenzinvarianz anzustreben.

4.2. Dynamikumfang

Der Dynamikumfang ist eines der wichtigsten Kriterien zur Beurteilung von tontechnischen Geräten sowie Signalwandlungs- und Signalverarbeitungsverfahren. Die untere Grenze markiert das Grundrauschen. Signale, die unterhalb dieser Grenze ausgesteuert sind, werden vom Rauschen maskiert und können nicht mehr wahrgenommen werden. Die obere Grenze liegt bei dem maximalen Aussteuerungspegel, ohne den das Signal verzerrt wird.

In Bezug auf Mikrofonarrays sind die dafür entscheidenden Bereiche die Schallwandler, also die Mikrofone, deren Vorverstärker, gegebenenfalls die AD- und DA-Wandler

und das Signalverarbeitungsverfahren.

Egal welche Mikrofonanordnung und welches Signalverarbeitungsverfahren gewählt werden, der Dynamikumfang hängt im Wesentlichen von den verwendeten Bauteilen ab. Auch wenn der Dynamikumfang ein sehr wichtiges Anforderungsmerkmal eines Mikrofonarrays ist, so ist er kein Unterscheidungsmerkmal der einzelnen Mikrofonanordnungen und Verarbeitungsverfahren und ist daher in Tab. 2 nicht aufgeführt.

4.3. Baugröße

Neben den technischen Anforderungen ist in der Praxis die Arraygröße oft ein ebenso ausschlaggebendes Kriterium. Je nach Anwendungsgebiet sind nur kleine Ausdehnungen möglich oder erwünscht. So lässt sich beispielsweise in einem kleinen Studio oder auf einer Konzertbühne kein meterlanges Mikrofonarray installieren.

4.4. Variable Richtcharakteristik und Ausrichtung

Eine besondere Eigenschaft von Mikrofonarrays gegenüber konventionellen Mikrofonen ist, dass unter bestimmten Voraussetzungen die Richtcharakteristik frei variiert und auch während des Betriebs geändert werden kann. Außerdem besteht mit einigen Arraytypen die Möglichkeit, die Ausrichtung der Richtcharakteristik jederzeit zu ändern. Es entsteht also eine frei bewegliche und veränderbare Richtcharakteristik, mit der bewegte Schallereignisse verfolgt werden können.

Letztlich macht dies die digitale Signalverarbeitung möglich, wobei sich nicht jede Mikrofonanordnung und Signalverarbeitung gleichermaßen dafür eignet. Bei einem linearen und äquidistanten Mikrofonarray mit differentieller Signalverarbeitung verändert sich beispielsweise die Richtcharakteristik bei einer Änderung der Ausrichtung.

4.5. Bündelungsmaß

Das Bündelungsmaß – im Englischen Directivity Index genannt – gibt Auskunft über die Größe der Störschallunterdrückung. Setzt man die Energie, die ein Mikrofonarray mit Hilfe seines Beamformers aus der Richtung θ_0, φ_0 empfängt, also auf welche die Richtcharakteristik ausgerichtet ist, in das Verhältnis zur insgesamt aus allen Richtungen empfangenen Energie, so erhält man den Bündelungsgrad oder engl. Directivity Factor:

$$\gamma(e^{j\omega}, \theta_0, \varphi_0) = \frac{|\Gamma(e^{j\omega}, \theta_0, \varphi_0)|^2}{\frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\pi} |\Gamma(e^{j\omega}, \theta, \varphi)|^2 \sin(\theta) d\varphi d\theta} \quad (7)$$

Der Azimutalwinkel θ ist die Auslenkung in der Horizontalebene, φ ist der Elevationswinkel, der die vertikale Auslenkung beschreibt. Die richtungsabhängige Empfindlichkeit $\Gamma(e^{j\omega}, \theta, \varphi)$ definiert die Richtcharakteristik des Mikrofonarrays. In den meisten Fällen ist diese auf die Richtung der Bezugsachse normiert, also in Richtung der Ausrichtung θ_0, φ_0 . Damit ist:

$$\Gamma(e^{j\omega}, \theta_0, \varphi_0) = 1. \quad (8)$$

Für rotationssymmetrische Richtcharakteristiken vereinfacht sich (7) unter Berücksichtigung von (8) zu:

$$\gamma(e^{j\omega}, \theta_0) = \frac{1}{\frac{1}{2} \int_0^\pi |\Gamma(e^{j\omega}, \theta)|^2 \sin(\theta) d\theta} \quad (9)$$

Das Bündelungsmaß in [dB] ist schließlich definiert als:

$$DI(e^{j\omega}, \theta_0, \varphi_0) = 10 \cdot \log_{10} \cdot \gamma(e^{j\omega}, \theta_0, \varphi_0) \quad (10)$$

und beschreibt damit, wie stark die Richtwirkung gebündelt ist. Eine Kugel hat beispielsweise ein Bündelungsmaß von 0 dB, eine Niere von 4,8 dB und den höchsten Wert unter den bekannten Richtcharakteristiken 1. Ordnung erreicht die Hyperniere mit 5,7 dB. [3] [14][15]

4.6. Ortungsfähigkeit

Die Ortungsfähigkeit beschreibt die Eignung eines Mikrofonarrays, eine Schallquelle zu orten. Dabei ist eine wirkliche Ortung, also die Bestimmung der Richtung und der Entfernung einer Schallquelle, eigentlich nur im Nahfeld möglich. Im Fernfeld beschränkt sich die Ortungsfähigkeit meist auf die Bestimmung der Richtung, was jedoch in vielen Fällen, zum Beispiel zur Ausrichtung der Richtcharakteristik, vollkommen ausreichend ist. Wie exakt die Richtung bestimmt werden kann, hängt dabei letzten Endes von der Anordnung der Mikrofone

ab. In diesem Punkt sind koinzidente Anordnungen benachteiligt, wengleich Freiberger und Sontacchi zeigen, dass es durchaus möglich ist, mit einem koinzidenten Mikrofonarray die Richtung einer Schallquelle zu bestimmen. [5] [8]

4.7. Latenz in der digitalen Signalverarbeitung

Eine Hürde, die bisher nicht erwähnt wurde, ergibt sich im praktischen Einsatz eines Mikrofonarrays mit digitaler Signalverarbeitung. Es ist das Problem der Latenz. Im Vergleich zur analogen Signalverarbeitung benötigt die digitale Signalverarbeitung Zeit – auch wenn diese selbst bei rechenintensiven Algorithmen sehr gering ist. Bei der Anwendung in einer Aufnahmesituation mit Polymikrofonierung, also einer Kombination mit konventionellen Mikrofonen, kann dies zu Interferenzen und damit zu einer Beeinträchtigung der Klangfarbe führen. In einem solchen Falle müssen alle anderen, analog arbeitenden Mikrofone um die Zeit der Latenz verzögert werden, was mit heutigen Mischpulten möglich ist.

Das beschriebene Szenario ist eines von vielen denkbaren Anwendungsmöglichkeiten. In den meisten Fällen – wie beispielsweise in der Konferenztechnik – ist das Mikrofonarray der einzige verwendete Schallwandler, beziehungsweise die anderen Mikrofone sind in einem so großen räumlichen Abstand aufgestellt, dass Beeinträchtigungen des Tons nach der Mischung ausgeschlossen werden können.

| | Räumliche Mikrofonarrays mit additiver, analoger Signalverarbeitung | Räumliche Mikrofonarrays mit additiver, digitaler Signalverarbeitung | Räumliche Mikrofonarrays mit differentieller Signalverarbeitung | Koinzidente Mikrofonarrays |
|-------------------------------------|---|--|---|--|
| Frequenzinvarianz | Nur mit Hilfe mehrerer Arrays für verschiedene Frequenzbereiche | Mit erhöhtem Realisierungsaufwand, jedoch nur mit Abstrichen | Theoretisch möglich, praktisch besteht ein gewisser Realisierungsaufwand | Weitgehend möglich für Richtcharakteristiken 1. Ordnung |
| Kompakte Baugröße | Nein | Schwierig, für tiefe Frequenzen werden größere Mikrofonabstände benötigt | Ja | Ja |
| Variable Richtcharakteristik | Nein, da abhängig von der Anordnung der einzelnen Mikrofone | Realisierbar | Ja | Ja |
| Variable Ausrichtung | Nein | Realisierbar | Führt zu einer Veränderung der Richtcharakteristik | Ja |
| Bündelungsmaß | Bis zu ~11dB | Hohe Werte möglich, je nach Algorithmus und Frequenzbereich | Je nach Ordnung steigend, eine Charakteristik 3. Ordnung erreicht bis zu 12dB | Richtcharakteristiken 1. Ordnung: Bester Wert liefert die Hyper-Niere mit ~6dB |
| Ortungsfähigkeit | Wird analog nicht realisiert | Sehr gut | Sehr gut | Zufriedenstellend |
| Latenz | Nein | Ja, die Länge ist abhängig vom Algorithmus und dessen Implementierung | Analog: Nein, Digital: Ja, abhängig von Algorithmus und Implementierung | Analog: Nein, Digital: Ja, abhängig von Algorithmus und Implementierung |

Tab. 2: Vergleich der verschiedenen Mikrofonarrays und Signalverarbeitungsverfahren hinsichtlich den Anforderungskriterien bei der professionellen Audioproduktion.

5. Schlussfolgerungen

Die vorangegangenen Kapitel zeigen: Es gibt eine ganze Reihe verschiedener Mikrofonarrays, die sich im äußeren Erscheinungsbild, der Mikrofonanordnung und der Signalverarbeitung unterscheiden. Dies führt zu unterschiedlichen Eigenschaften bei der Abnahme und Übertragung eines Nutzsignals, welche die Mikrofonarraytypen mehr oder eben auch weniger geeignet für Anwendungen in der professionellen Audioproduktion machen.

In Tab. 2 sind die Ergebnisse des Vergleichs der verschiedenen Mikrofonarrays und Signalverarbeitungsverfahren hinsichtlich der wichtigsten Anforderungskriterien zusammengestellt. Es zeigt sich, dass gerade die räumlichen Mikrofonarrays mit additiver Signalverarbeitung bei der Realisierung von frequenzinvarianten Richtcharakteristiken und einer kompakten Baugröße problematisch sind.

An dieser Stelle drängt sich die differentielle Signalverarbeitung geradezu auf: Sie bietet bessere Voraussetzungen bezüglich der Frequenzinvarianz sowie Richtcharakteristiken höherer Ordnung bei einer äußerst kompakten Mikrofonanordnung. Möglich wird dies durch die Abtastung des Druckgradienten. Ungeeignet ist dieses Verfahren lediglich für Anwendungen, bei denen eine variable Ausrichtung der virtuellen Richtcharakteristik notwendig ist, da sich die Richtcharakteristik bei einer Änderung des Ausrichtungswinkels systembedingt verformt.

Damit haben koinzidente Mikrofonarrays hingegen kein Problem. Liefert die Mikrofonanordnung die vier Signale des B-Formats, kann eine beliebige Richtcharakteristik 1. Ordnung in alle Raumrichtungen ausgerichtet werden. Der Nachteil im Vergleich zu den anderen Verfahren ist das geringere Bündelungsmaß. Ist dies jedoch ausreichend und sind entsprechend hochwertige Mikrofone im Einsatz, bei deren Anordnung die Grenzfrequenz der Koinzidenz berücksichtigt wird, können hinsichtlich der verzerrungsfreien Übertragung breitbandiger Signale sehr gute Ergebnisse erzielt werden.

Es gibt also durchaus Mikrofonarrays, die sich in einer professionellen Produktionsumgebung nicht verstecken müssen. Vor allem differentielle und koinzidente Arrays bieten die Basis, den gehobenen Ansprüchen in vollem Umfang zu genügen.

6. Literatur

- [1] Benesty, J., Chen, J.: Study and Design of Differential Microphone Arrays. Berlin, Heidelberg (2013)
- [2] Benjamin, E., Chen, T.: The native B-format Microphone, Part I. 119th AES Convention, New York (2005), Preprint No. 6621.
- [3] Beranek, L. L.: Acoustical Measurements. Cambridge, Massachusetts (1988)
- [4] Bourgeois, J., Minker, W.: Time-Domain Beamforming and Blind Source Separation. Dordrecht, Heidelberg, London, New York (2009)
- [5] Brandstein, M., Ward, D.: Microphone Arrays - Signal Processing Techniques and Applications. Berlin, Heidelberg, New York (2010)
- [6] Buck, M.: Aspects of first-order differential microphone arrays in the presence of sensor imperfections. European Trans. Telecommunications, vol. 13 (2002), S. 115 - 122.
- [7] Elko, G. W.: Superdirectional microphone arrays. In Gay, S. L. & Benesty, J.: Acoustic Signal Processing for Telecommunication. Norwell, Dordrecht (2000), S. 181 - 235.
- [8] Freiberger, K., Sontacchi, A.: Similarity-based sound source localization with coincident microphone array. Proc. of the 14th International Conference on Digital Audio Effects, Paris (2011).
- [9] Frost, O. L.: An algorithm for linearly constrained adaptive array processing. Proceedings of the IEEE (08/1972), S. 926 - 935.
- [10] Goossens, S.: Verbesserung der tieffrequenten Richtwirkung von Mikrofonarrays. 27. Tonmeistertagung, Köln (2012).
- [11] Griffiths, L. J., Jim, C. W.: An alternative approach to linearly constrained adaptive Beamforming. IEEE Transactions on Antennas and Propagation (01/1982), S. 27 - 34.
- [12] Olson, H. F.: A Uni-Directional Ribbon Microphone. Journal of the Acoustical Society of America, Volume 5/2 (1933), S. 139 - 147.
- [13] Olson, H. F.: Gradient microphones. Journal of the Acoustical Society of America , Volume 17/3 (1946), S. 192 - 198.
- [14] Olson, H. F.: Acoustical Engineering. Princeton, New York (1957)
- [15] Sengpiel, : Bündelungsgrad und Bündelungsmaß der Mikrofone. UdK Berlin (1994)
URL: <http://www.sengpielaudio.com/BuendelungsgradBuendelungsmassMikro.pdf> (2014).
- [16] Soundfield-Webseite, URL: <http://www.soundfield.com>, (2014).
- [17] Van Trees, H. L.: Optimum Array Processing, Detection, Estimation, and Modulation Theory (Part IV). New York (2002)
- [18] Wittek, Haut, Keinath: Doppel-MS – eine Surround-Aufnahmetechnik unter der Lupe. 24. Tonmeistertagung, Leipzig (2006).