

Theoretische Grundlagen zur Anwendung von Line-Arrays in der modernen Beschallungstechnik (Teil1)

Anselm Goertz Audio & Acoustics Consulting Aachen www.anselmgoertz.de

Line-Arrays haben in der modernen Beschallungstechnik seit einigen Jahren eine zunehmende Bedeutung erhalten. Auf der Basis einer Linienquelle agieren diese Systeme in bestimmten Frequenzbereichen als Zylinderwellenstrahler und erlauben es so, auch in akustisch schwieriger Umgebung sehr gezielt bestimmte Bereiche zu beschallen bzw. auszublenden. Dieser und ein zweiter folgender Beitrag sollen aufzeigen, auf welchen theoretischen Grundlage das Verfahren basiert und wie weit Berechnungen und Messungen des Abstrahlverhaltens übereinstimmen bzw. durch Simulationsprogramme vorhergesagt werden können.

Berechnung von diskreten Line-Arrays

Ein Line-Array wird in klassischer Form aus einer Aufreihung von einzelnen Strahlern zusammengesetzt. Jede dieser Quellen strahlt eine Welle mit einer sphärischen Front ab, die sich dann im Schallfeld überlagern. Zu Unterscheiden ist zwischen dem Nahfeld und dem Fernfeld einer solchen Anordnung, deren Übergang in einer Entfernung in Abhängigkeit von der Wellenlänge zur Länge der Strahleranordnung geschieht. Eine einfache Formel berechnet diese Entfernung zu:

$$r_{Nah} = \frac{l^2 \cdot f}{2 \cdot 340 \frac{m}{s}} \quad l \text{ in m und } f \text{ in Hz} \quad \text{Gl. 1}$$

Die Länge l ist hier die Gesamtlänge der Anordnung aus n Einzellelementen, die sich zueinander im Abstand d befinden. Für das Fernfeld ergibt sich folgende Gleichung für die Richtfunktion eines solchen Line Arrays:

$$R(\mathbf{a}) = \frac{1}{n} \left| \frac{\sin\left(\frac{\mathbf{p}}{c} \cdot l \cdot f \cdot \sin \mathbf{a}\right)}{\sin\left(\frac{1}{n} \cdot \frac{\mathbf{p}}{c} \cdot l \cdot f \cdot \sin \mathbf{a}\right)} \right| \quad \text{Gl. 2}$$

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen das Richtverhalten einer Anordnung aus 10 Einzelstrahlern im äquidistanten Abstand auf einer Länge von 2m. Für den einzelnen Strahler wird hier vereinfachend von einer Kugelcharakteristik ausgegangen.

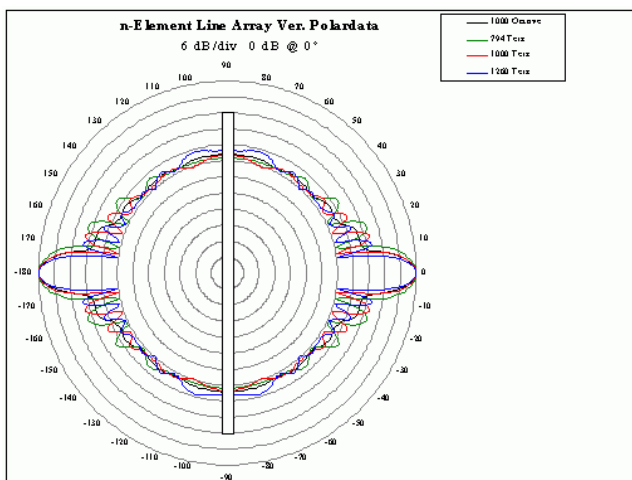


Abb.1: Richtverhalten eines 2m langen Line-Arrays aus diskreten Kugelstrahlern unterhalb der kritischen Frequenz. Kurven gemittelt in der 1 kHz Oktave sowie den drei zugehörigen Terzbändern

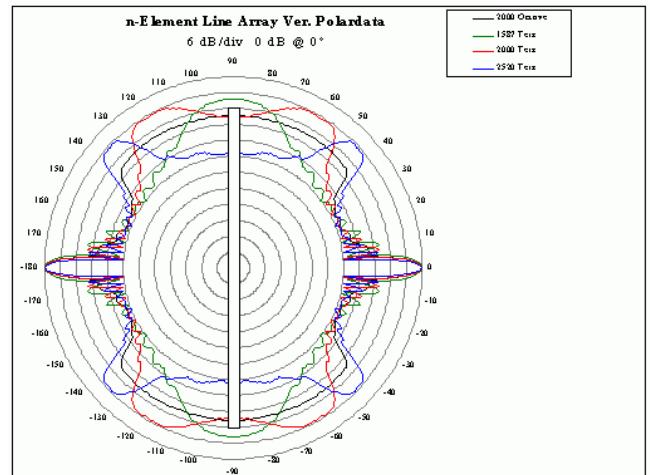


Abb.2: Richtverhalten eines 2m langen Line-Arrays aus diskreten Kugelstrahlern oberhalb der kritischen Frequenz. Kurven gemittelt in der 2 kHz Oktave sowie den drei zugehörigen Terzbändern

Für die 2 kHz Oktave nimmt das Richtverhalten erwartungsgemäß zu und das Hauptmaximum wird schmäler im Vergleich zur 1 kHz Oktave. Interessant ist an diesen beiden Abbildungen vor allem das Auftreten der kräftigen Nebenmaxima in der 2 kHz Oktave, von denen in der 1 kHz Darstellung noch nichts zu erkennen war. Die Ursache liegt in der Überschreitung der kritischen Frequenz, deren Wellenlänge dem Abstand zwischen zwei Quellen des Line-Arrays entspricht. Für den hier gewählten Abstand von 20cm liegt die kritische Frequenz bei 1700 Hz. Oberhalb von dieser Frequenz beginnt ein Line-Array aus diskreten Quellen ausgeprägte Nebenmaxima zu erzeugen und wird damit für Beschallungsaufgaben weitgehend unbrauchbar. Mit zunehmender Frequenz erhöht sich die Anzahl dieser Nebenmaxima weiter und sie rücken näher an das Hauptmaximum heran. Dieser Effekt tritt prinzipiell bei allen Line-Arrays aus diskreten Quellen auf, auch wenn diese aus stark bündelnden Hörnern zusammengesetzt werden. Dem aus Kugelstrahlern berechneten Richtverhalten der Gesamtanordnung überlagert sich dann das Richtverhalten eines Einzelsystem.

Wird also ein Line-Array aus normalen Hornsystemen zusammengesetzt, so wie es bislang häufig angewendet wurde, dann wird zwar das enge Abstrahlverhalten im Hauptmaximum auf Achse erzielt, aber die ausgeprägten Nebenmaxima werden lediglich im Rahmen der Möglichkeiten eines einzelnen Hornes unterdrückt, was folglich meist zu eher kompromissbehafteten Ergebnissen führt.

Linienquellen

Moderne Line-Arrays, wie das V-DOSC (L-Acoustics), VerTec (JBL) oder X-Line (Electro Voice) System unterscheiden sich von den vorab besprochenen diskreten Line-Arrays durch ihren "echten" Zylinderwellencharakter, der über den gesamten Frequenzbereich nur mit einer Linienquelle und nicht mit diskreten Strahlern erzeugt werden kann.

Unter einer Linienquellen versteht man grundsätzlich zunächst einmal eine kontinuierliche unendlich lange und rundum gleichmäßig strahlende Quelle. Solche Linienquellen strahlen eine zylinderförmige Wellenfront ab, die auf Grund der unendlichen Ausdehnung der Linie unabhängig von der Entfernung diese Ausdehnungsform beibehält. In der Realität gibt es dagegen einige Einschränkungen. Durch die endliche Länge einer realen Linienquelle muss die Form der Wellenausbreitung ebenfalls in ein Nahfeld und in ein Fernfeld unterteilt werden. Die Gleichung für

den Übergang entspricht derjenigen für das diskrete Array. Unterschiede gibt es jedoch bei der Gleichung der Richtfunktion für das Fernfeld eines Line Arrays, das als echte Linienquelle der Länge l agiert.

$$R(\mathbf{a}) = \frac{\sin\left(\frac{p \cdot l \cdot f \cdot \sin \mathbf{a}}{c}\right)}{\frac{p \cdot l \cdot f \cdot \sin \mathbf{a}}{c}} \quad \text{Gl. 3}$$

Die beiden folgenden Polardiagramme zeigen das daraus resultierende Richtverhalten für eine 2m lange Linienquelle ebenfalls für die 1 kHz und 2 kHz Oktave.

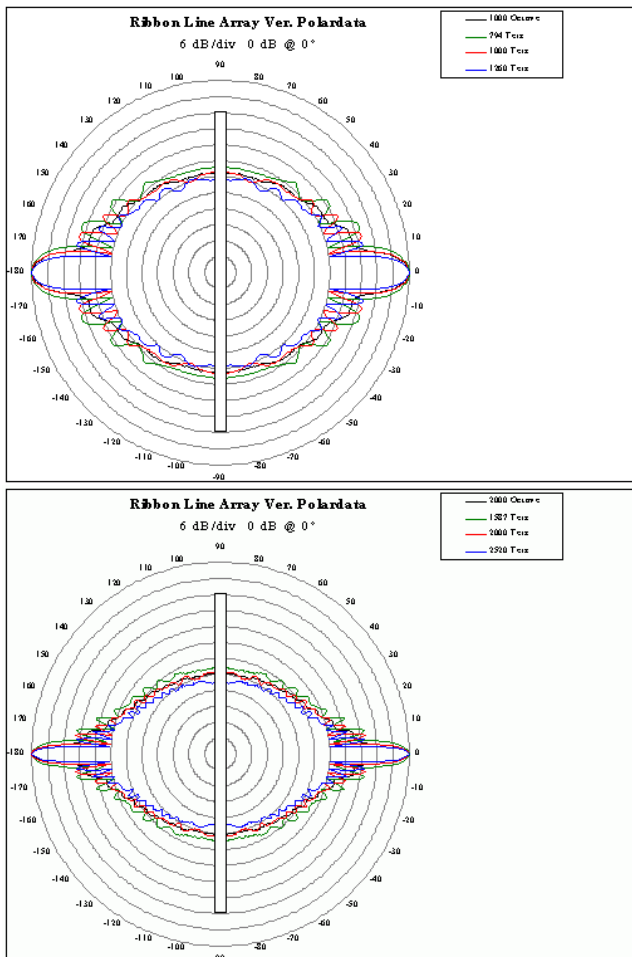


Abb.3.4: Zum Vergleich: Richtverhalten eines 2m langen kontinuierlichen Line-Arrays mit kohärenter Wellenfront für die 1 kHz (oben) und 2 kHz (unten) Oktav- und Terzbänder

Die Form des Hauptmaximums auf der Mittelachse bei 0° ist identisch zum diskreten Array. Nebenmaxima treten hier jedoch nicht auf, worin der entscheidende Unterschied liegt. Zusammenfassend wäre somit festzuhalten, dass ein diskretes Line-Array aus Einzelquellen unterhalb der kritischen Frequenzen sich nahezu genau so verhält wie eine echte Linienquelle. Signifikante Unterschiede treten erst ab der kritischen Frequenz auf, wo sich dann die unschönen Nebenmaxima ausbilden. Soweit zu der schon seit langem bekannte Theorie der Berechnung von Line-Arrays [1][2][3].

Die Kunst ein im gesamten Audiobereich gut zu verwendendes Line-Array aufzubauen liegt also darin, auch für hohe Frequenzen eine kohärente Wellenfront zu erzeugen [4]. Bei tieferen Frequenzen gelingt das mit linienförmig angeordneten Treibern ohne Probleme. Wie das Beispiel gezeigt hat, können für den Frequenzbereich bis ca. 1500 Hz normale 8"-Treiber dicht aneinander angeordnet diese Bedingung noch gut erfüllen. Genau so wird es auch in allen bekannten Line-Array Systemen gemacht, wo in

jeder Box jeweils ein oder zwei 8"-Treiber so nahe wie möglich zusammengebracht werden. Bei einer Trennfrequenz zwischen 1000 und 1500 Hz zum Hochtöner befindet man sich somit auf der sicheren Seite. Für die höheren Frequenzen genügt es dann aber nicht mehr, die Treiber lediglich übereinander aufzureihen, da sich ansonsten die Quellen separieren und damit die Nebenmaxima verursachen würden. Um diese kohärente Wellenfront mit „normalen Treibern“ zu erzeugen werden sogenannte Waveguides eingesetzt, die sich je nach Hersteller WaveFormer (JBL), Hydra (EV) oder auch Wavefront Sculpture Technology (L-Acoustics) nennen.

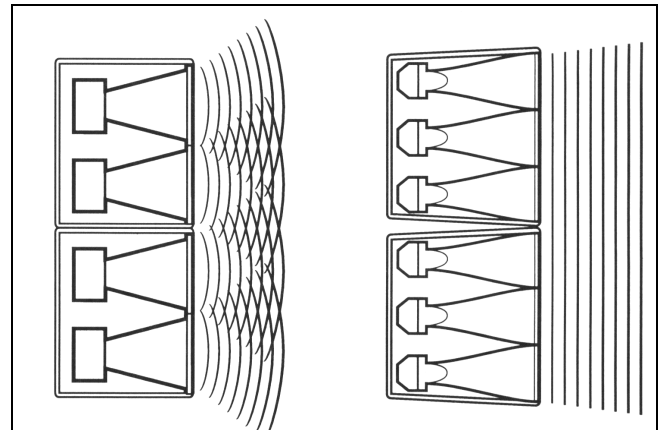


Abb.5: Links: Quellen mit sphärischem Abstrahlverhalten und Interferenzbereichen ; Rechts: Quellen, die über Waveformer eine kohärente Wellenfront abstrahlen

Im je nach Länge des Arrays ausgedehnten Nahfeld breitet sich die kohärente Wellenfront zunächst als Ausschnitt einer Zylinderoberfläche mit einem sehr sauberen Richtverhalten ohne seitliche Maxima aus. Verbunden ist das mit der nützlichen Eigenschaft, dass der Schalldruckpegel bei einer Entfernungsverdopplung nicht um 6 dB sondern nur um 3 dB abfällt. Betrachtet man das Abstrahlverhalten im Fernfeld, so geht die Wellenfront hier auch für einen Linienstrahler in eine sphärischer Form über. Für einen 5,4m langen Linienstrahler wäre das für $r > 43\text{m}$ bei 1 kHz und entsprechend bei 100 Hz für $r > 4,3\text{m}$.

Für die Berechnung des Öffnungswinkels des Hauptmaximums im Fernfeld kommt eine weitere kleine Formel ins Spiel, die besagt, dass der -6 dB Öffnungswinkel des Hauptmaximums $BW_{-6\text{dB}}$ sich berechnet als:

$$BW_{-6\text{dB}} \approx 2 \cdot \sin^{-1}\left(\frac{1.9 \cdot l}{L \cdot p}\right) \quad \text{Gl. 4}$$

Für das Beispiel mit 5,4m Länge wären das bei 1 kHz ca. $4,4^\circ$. In nahezu perfekter Form erfüllen große Bändchen-Lautsprecher die Anforderungen einer Linienquelle mit kohärenter Wellenfront im gesamten Audio-Frequenzbereich. Möchte man ein leichtes Curving des Line-Arrays ermöglichen, um einen größeren Bereich abzudecken, so müssen die Line-Arrays aus kleinen Einheiten skalierbar sein, ohne dass die Wellenfront aufgerissen wird. Trapezförmige Gehäuse und ein kleiner vertikaler Öffnungswinkel in der einzelnen Einheit unterstützen diese Anwendung.

Literatur

- [1] Wolfe, I. & Malter L. ; Directional Radiation of Sound JASA Vol.2 No.2 p.201 (1930)
- [2] Olson, Harry F. ; Acoustical Engineering D. Van Nostrand Company 1957
- [3] Beranek, Leo ; Acoustics ; McGraw Hill, New York 1954
- [4] Heil, Chr. & Urban, M. ; Sound Fields Radiated By Multiple Sound Sources Arrays ; 92nd AES Convention Wien Preprint No. 3269

Weitere Informationen sowie ein Download dieses Textes und des zugehörigen Vortrages als PDF-Files finden sich auf der Homepage unter: www.anselngoertz.de