Theoretische Grundlagen und die praktische Anwendung von Line-Arrays in der Beschallungstechnik und ihre Berücksichtigung in Simulationsprogrammen

Anselm Goertz Audio & Acoustics Consulting Aachen

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 Beitrag soll 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:

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

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

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

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.

Für die 2 kHz Oktave nimmt das Richtverhalten erwartungsgemäß zu und das Hauptmaximum wird schmaler 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.

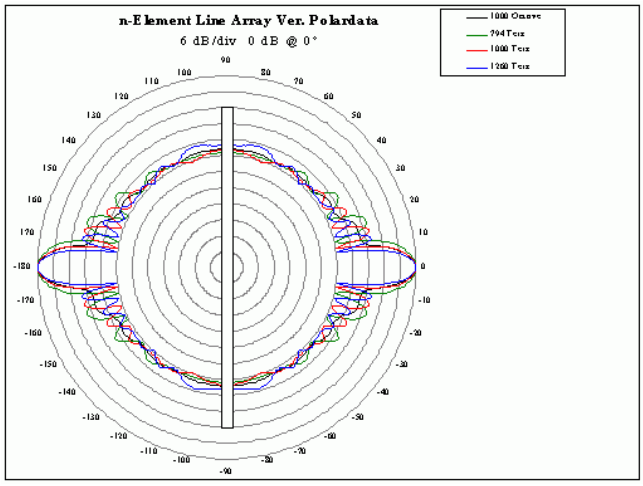

Abb.1: Richtverhalten eines 2m langen Line-Arrays aus diskreten Kugelstrahlern unterhalb der kritischen Frequenz. Kurven gemittelt in der 1 kHz Oktave sowie den drei zugehörigen Terzbändern

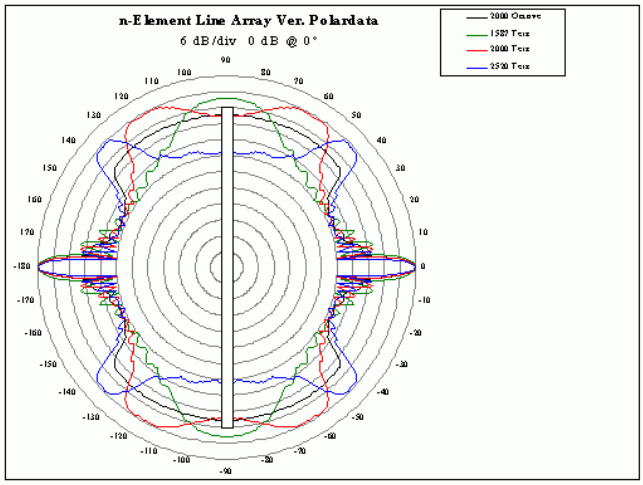

Abb.2: Richtverhalten eines 2m langen Line-Arrays aus diskreten Kugelstrahlern oberhalb der kritischen Frequenz. Kurven gemittelt in der 2 kHz Oktave sowie den drei zugehörigen Terzbändern

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 Linienquelle 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.

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

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

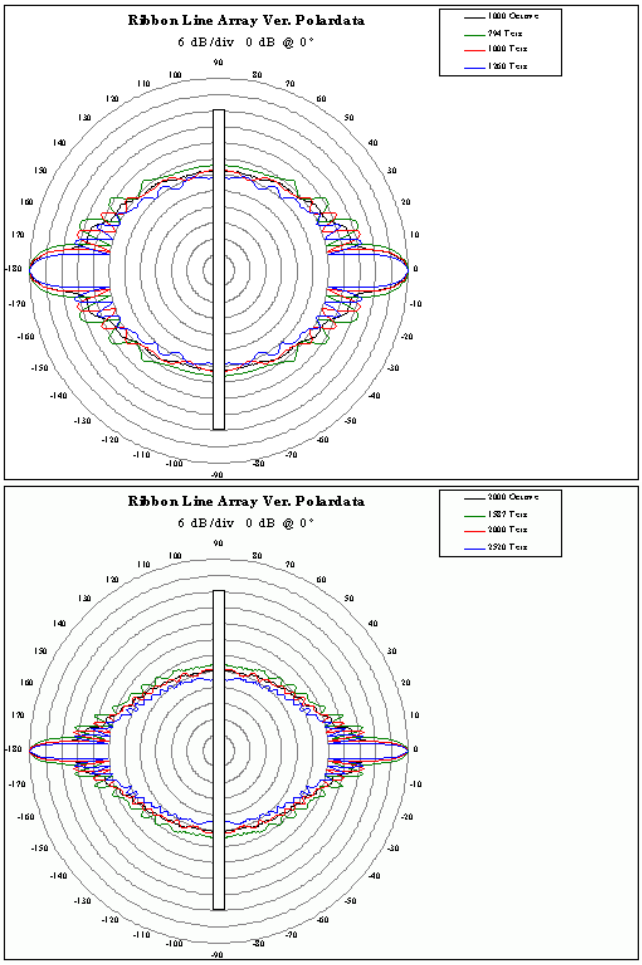

Abb.3,4: Zum Vergleich: Richtverhalten eines 2m langen kontinuierlichen Line-Arrays mit kohärenter Wellenfront für die 1 kHz (oben) und 2 kHz (unten) Oktav- und Terzbänder

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 bei 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.

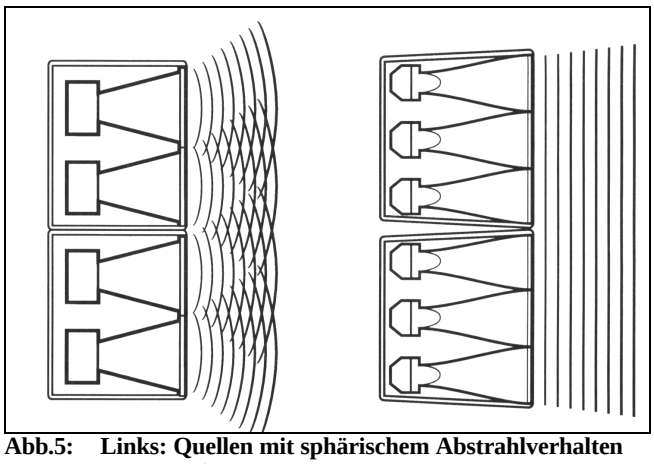

Abb.5: Links: Quellen mit sphärischem Abstrahlverhalten und Interferenzbereichen ; Rechts: Quellen, die über Waveformer eine kohärente Wellenfront abstrahlen

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 Liniestrahler wäre das für r > 43m bei 1 kHz und entsprechend bei 100 Hz für r > 4,3m.

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_{-6dB} sich berechnet als:

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

Für das Beispiel mit 5,4m Länge wären das bei 1 kHz ca. 4,4°. In nahezu perfekter Form erfüllen große Bändchen-Lautsprecher die Anforderungen einer Liniequelle 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.

Line-Arrays in der Praxis

Line-Arrays für die Beschallungstechnik werden heute von verschiedenen Herstellern in den unterschiedlichsten Ausführungen vom Breitband-Bändchenlautsprecher bis zum 4-Wege PA-System angeboten. Im nächsten Absatz zeigt dieser Beitrag einige Messergebnisse von Line-Arrays, die sich mit der Ausbreitung von Zylinderwellen und deren Nachweis befassen. In einem weiteren Teil soll ein besonderes Augenmerk auf die Problematik der Berücksichtigung von Line-Arrays respektive Zylinderwellenstrahlern in Simulationsprogrammen gelegt werden, ohne hier jedoch eine endgültige Lösung anbieten zu können.

Zylinderwellenausbreitung

Bei herkömmlichen Lautsprechern, sei es als Direktstrahler oder Hornsystem, geht man im Fernfeld von einer sphärischen Form der Wellenausbreitung aus. Messungen unter Freifeldbedingungen ergeben für diesen Fall einen von der Messentfernung unabhängigen Verlauf der Frequenzganges, der pro Entfernungsverdopplung um 6 dB abfällt ohne sich in seiner Form zu ändern. Die Fernfeldbedingung ist für eine typische Messentfernung von 4m bereits klar erfüllt. Anders sieht es dagegen bei Lautsprechern großer Ausdehnung in einer Richtung oder Ebene aus. Linienquellen oder Flächenstrahler verfügen über ein ausgedehntes Nahfeld, dass weit in den Nutzbereich des Lautsprechers hinein reicht. Eine Linienquelle endlicher Ausdehnung strahlt im Nahfeld zunächst eine Zylinderwelle ab, die im Fernfeld in eine sphärische Wellenfront übergeht. Für den Bereich der Zylinderwelle fällt der Pegel in einer idealisierten Betrachtungsweise nur mit 3 dB pro Entfernungsverdopplung ab. Da dieser Übergang in einer frequenzabhängigen Entfernung erfolgt, ändert sich folglich der Frequenzgang eines solchen System mit der Messentfernung.
An einem Beispielsystem wurden zwei Messreihen ausgeführt, die in Abbildung 6 und 7 dargestellt sind. Im ersten Fall wurde im Freifeld ein aus sechs Elementen zusammengesetztes Array in 4m Entfernung mittig zum Array gemessen (obere rote Kurve in Abb.1).

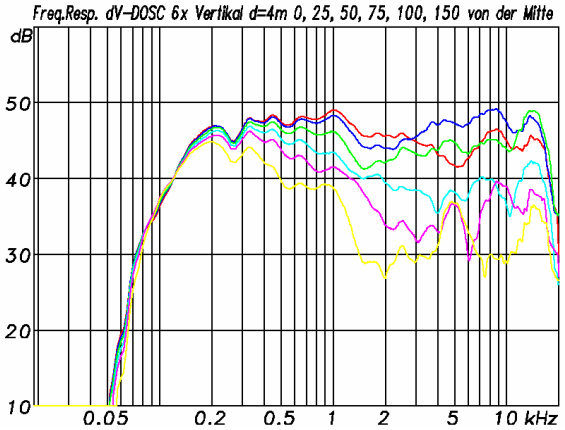

Abb.6: 1,38m Line-Array im Freifeld gemessen in 4m Entfernung ; die oberen 3 Kurven im Bereich der Zylinderwelle ; weitere Kurven außerhalb der Zylinderwelle

Die weiteren Kurven entstanden dadurch, dass das Messmikrophon in 4m Abstand parallel zur ebenen Front des Arrays von dessen Mitte zum Rand hin bewegt wurde. Bei einer Gesamtlänge des Arrays von 1,38m liegt die Messung 50cm außerhalb der Mitte (grüne Kurve, dritte von oben) noch innerhalb des Einzugsbereiches der Zylinderwelle, wogegen die Messung bei 75cm (hell blaue Kurve, vierte von oben) schon außerhalb liegt. Recht deutlich ist an den insgesamt 6 Kurven zu erkennen, wie außerhalb der Zylinderwellenzone der Pegel oberhalb von 1 kHz zügig abfällt.

Für die zweite Messreihe in Abbildung 7 wurde zu einem Trick gegriffen, um das Array virtuell durch eine akustische Spiegelfläche zu vergrößern. Das geradlinige 6er Array wurde dazu senkrecht auf den schallharten Granitboden des Messraumes gestellt, so dass durch die akustische Spiegelung eine wirksame Gesamtlänge von jetzt 2,76m entstand. Das ebenfalls auf dem Boden platzierte Messmikrophon befand sich damit auf der Mittelachse des virtuellen 12er Arrays. Anschließend wurden drei Frequenzgänge gemessen in 1m, 2m und 4m Entfernung vom Array. Bei dieser schon recht großen Länge des Arrays verschiebt sich die Grenzfrequenz der Zylinderwellenausbreitung für 1m auf 90 Hz, für 2m auf 180 Hz und für 4m auf 360 Hz. Genau dieser Verlauf ist auch in den drei Kurven von Abb.7 zu erkennen, die zur besseren Übersicht mit Oktavbreite geglättet wurden. Oberhalb von 400 Hz liegen recht genau 6 dB Differenz zwischen den Kurven für 1m (rot, oben) und 4m (grün, unten) Entfernung. Unterhalb von 400 Hz beginnen die Kurven dann zusehends weiter auf den typischen 12dB Wert hin auseinander zu driften. Die Theorie bestätigt sich damit erfreulich gut.

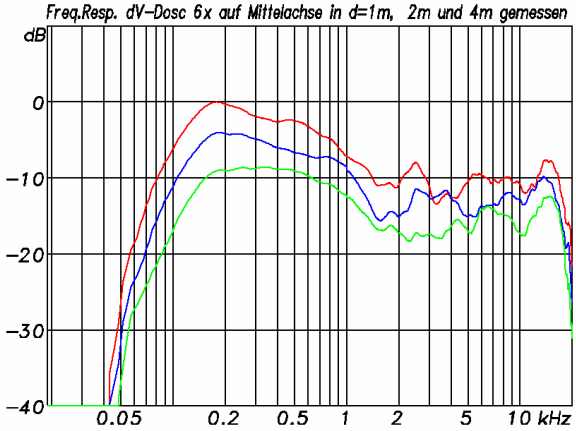

Abb.7: Frequenzgang eines Line-Arrays der Länge 1,38m auf schallhartem Boden gemessen in 1m, 2m und in 4m Entfernung

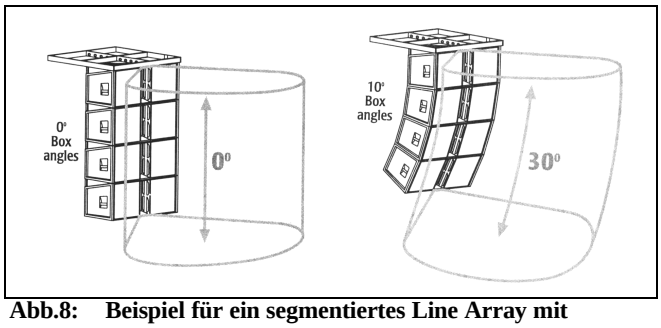

Abb.8: Beispiel für ein segmentiertes Line Array mit 0°(links) und 30°(rechts) Öffnungswinkel

Danach wurden noch zwei Messreihen zum vertikalen Verhalten mit einem geraden 4er Array und einem um je 7,5° gecurvten 4er Array aufgenommen. Die Messung auf einer Kreisbahn in 4m Abstand um den Lautsprecher sollte für den Frequenzbereich mit Zylinderwellencharakteristik dazu führen, dass sich das Richtverhalten auf einen extrem schmalen Bereich einschnürt. Dieser Effekt lässt sich für nur ein einzelnes Element erst bei sehr hohen Frequenzen beobachten und in Abbildung 9 für ein gerades 4er Array ab ca. 1,5 kHz. Für tiefere Frequenzen geht das Abstrahlverhalten dann kontinuierlich in eine sphärische Form mit abnehmender Bündelung für tiefe Frequenzen über. Für die Messung in Abbildung 10 wurde das Array insgesamt auf 3x 7,5° = 21,5° gecurvt. Durch die Verbiegung des Linienstrahlers öffnet sich die abgestrahlte Zylinderwelle auch in der vertikalen Ebene mit eben diesem Winkel, wie sich sehr schön beobachten lässt. Optimal angepasst geht dieser Bereich bei tieferen Frequenzen in den sich kontinuierlich öffnenden Verlauf der sphärischen Welle über. Für

die ganz hohen Frequenzen oberhalb von 12 kHz bricht die Wellenfront auf und erzeugt ein Interferenzmuster.

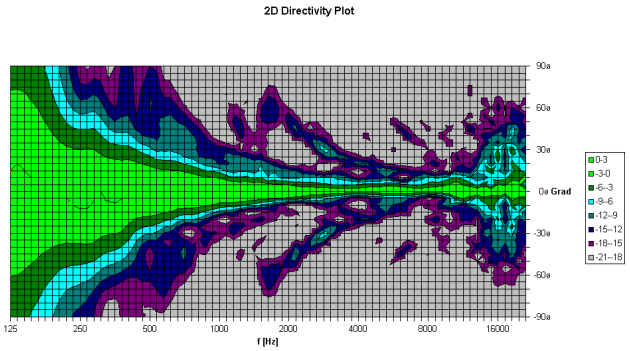

Abb.9: Isobaren des Arrays mit 0° Öffnungswinkel

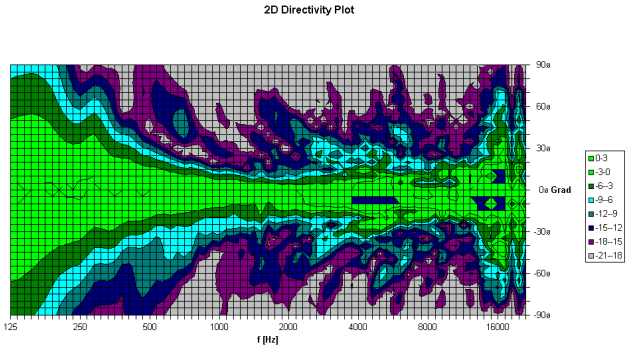

Abb.10: Isobaren des Arrays mit 30° Öffnungswinkel ab ca. 12 kHz beginnt die Wellenfront aufzureißen

Simulationsprogramme

Die Hersteller von Line-Arrays befinden sich meist noch in der schwierigen Situation, dass die Berechnung ihrer neuen Lautsprecher nicht in den handelsüblichen Simulationsprogrammen, wie EASE oder Ulysses möglich ist. Dass in den reichhaltigen Lautsprecher-Bibliotheken diese Komponenten trotz ihrer weiten Verbreitung noch nicht zu finden sind, hängt mit einer Eigenschaft der Line-Arrays zusammen, die nicht kompatibel zur Funktionsweise der Simulationsprogramme ist. Grundsätzlich gehen diese bei den akustischen Quellen von einer sphärischen Wellenfront aus, die im Idealfall eine völlig entfernungsunabhängige Richtcharakteristik aufweist. Auf herkömmliche Lautsprecher trifft das weitgehend zu, so dass ein in 4m gemessener Directivity Balloon auch in 10m und in 20m Gültigkeit hat. Diese Voraussetzung wird immer dann erfüllt, wenn man sich im Fernfeld einer Quelle aufhält, was bei „normalen“ Lautsprechern für alle Frequenzen im Audiobereich in 4m Entfernung gut erfüllt ist. Den Übergang vom Nah- ins Fernfeld darf man sich dabei nicht als Sprungstelle vorstellen, sondern als kontinuierlichen Übergang von einem mit lokalen Minima und Maxima geprägtem Nahfeld in ein Fernfeld mit kontinuierlichem 1/r Pegelabfall. Für die Messung eines Balloons sollte man sich daher sicher im Fernfeld befinden und eine Messentfernung

größer als: $r_{Fern} = \frac{l^2 \cdot f}{340\,{}^{m}\!/_{s}}$ wählen. Gl. 1

Die Länge l ist die größte Ausdehnung des Strahlers in einer Richtung, die bei Direktstrahlern dem Membrandurchmesser entspricht. Für ein 4m langes Line-Array würde das bei 1 kHz eine Entfernung für die Messung von 47m verlangen. Entsprechend bei 5 kHz schon 235m. Und erst ab dieser Entfernung würden auch die klassischen Simulationsprogramme verwertbare Ergebnisse für ein Line-Array liefern. Im Nahfeld und im Übergangsbereich gestaltet sich die Lage dagegen sehr diffizil.

Bliebe man für ein Line-Array bei der Darstellungsform mit Balloon Daten, so wären eine ganze Reihe von Ballons für unterschiedliche Entfernungen in Rasterschritten zu messen und das Simulationsprogramm müsste nach der Berechnung des Auftreffpunktes zunächst dessen Entfernung von der Quelle berechnen, um dann die Daten aus dem für diese Entfernung passenden Balloon zu beziehen. Insgesamt also ein sehr komplizierter Vorgang, der zudem dadurch erschwert wird, dass der Balloon-Datensatz für jede mögliche Konfiguration des Line-Arrays ermittelt werden müsste, womit diese Art der Berechnung für frei konfigurierbare Line-Arrays aller V-DOSC, VerTec oder X-Line ausfällt. Ein einzelnes Element dieser Systeme in herkömmlicher Weise zu vermessen und dann ein Line-Array aus entsprechend vielen Einzelsegmenten zusammenzusetzen, führt hier ebenfalls nicht zum Ziel. Das Einzelelement würde mit sphärischem Abstrahlcharakter in die Berechnung eingehen, so dass ein komplettes Array bestenfalls bis zur einer Frequenz, deren Wellenlänge dem Abstand der Mittelpunkte zweier Elemente entspricht, richtig berechnet würde. Darüber hinaus würden Artefacte in Form von in der Realität nicht vorhandener Nebenmaxima auftreten, da diese Berechnungsmethode das Array nicht als Linienquelle berücksichtigt.

Eine alternative Möglichkeit ist die Diskretisierung des Arrays in so kleine Elemente, dass diese in einer komplexen Berechnung die Line-Array Funktion exakt nachbilden. Die Elemente dürfen dabei nicht als Cluster zusammengefasst werden, sondern müssen als einzelne Quellen komplex aufaddiert werden. Möchte man für die oberste 8 kHz Oktave noch korrekte Ergebnisse erhalten, so muss die Diskretisierung in Abständen kleiner als die Wellenlänge der höchsten zu betrachtenden Frequenzen erfolgen. Für die 8 kHz Oktave würde das ca. 3cm bedeuten. Ein 4m Line-Array wäre somit aus mindesten 133 Einzelelementen zusammenzusetzen. Dieses Verfahren lässt beliebige Konfiguration und Krümmungswinkel auf Basis eines einzigen Datensatzes zu. Es bedürfte somit lediglich einer komfortablen Form der Eingabe eines Line-Arrays in das Simulationsprogramm. Die Erprobung dieser Art der Berechnung eines segmentierten Line-Arrays steht noch aus, so dass zu einem späteren Zeitpunkt weitere Ergebnisse veröffentlicht werden sollten. Einer der Hauptproblempunkte dürfte es allerdings sein, dass für eine Berechnung über die reine Direktschallverteilung hinausgehend jedes einzelne Element als Schallquelle zu berücksichtigen ist und sich die Rechenzeit damit drastisch verlängert.

Fazit

Line-Arrays, die sich aus Einzelelementen zusammensetzen lassen und die Voraussetzung einer kohärenten Wellenfront über den gesamten Frequenzbereich erfüllen, bieten in der Beschallungstechnik die Möglichkeit, ein sehr sauber skalierbares Richtverhalten zu erzeugen, das weitgehend frei von den sonst üblichen Interferenzeffekten mit Auslöschungen und ungewollten Nebenmaxima ist. Durch ein unterschiedliches Curving innerhalb der Line kann sowohl der Abstrahlwinkel wie auch der Schalldruckpegel eingestellt werden, woraus sich viele Anwendungsmöglichkeiten ergeben.

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

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