

## Computersimulation von Line-Array-Lautsprechersystemen

Volker Holtmeyer, Dieter Michel

Mit der steigenden Verbreitung von Line-Array-Lautsprechersystemen im Zuge der letzten Jahre stellt sich zunehmend auch die Frage nach der Möglichkeit von Computersimulationen, wie sie mit konventionellen Lautsprechern speziell in der Festinstallation an der Tagesordnung sind. Dabei geht es nicht nur darum, die optimale Konfiguration des Line-Arrays in einer Anwendung, bei der man sich bereits für den Line-Array-Einsatz entschieden hat. Vielmehr geht es auch darum, bereits im Vorfeld Kriterien an die Hand zu bekommen, die die Entscheidung für den Einsatz eines Line-Arrays bzw. eines konventionellen Lautsprechersystems erleichtern können. Leider sind die Methoden der Computersimulation nicht ohne eine Erweiterung des Simulationskonzepts auf Line-Arrays zu erweitern. Wie man dennoch zu validen Simulationsergebnissen kommen kann, soll der folgende Bericht aufzeigen.

Konventionelle Lautsprechersysteme wurden und werden in der Regel mit der Zielvorstellung konstruiert, dem Ideal einer punktförmigen Schallquelle möglichst nahe zu kommen. Das funktioniert besonders gut, wenn die Abmessungen des Lautsprechers klein gegen die betrachtete Schallwellenlänge sind. Die gängigen Computersimulationsprogramme gehen - bzw. gingen bis vor kurzem - bei ihren Simulationsberechnungen von genau dieser Idealvorstellung einer punktförmigen Schallquelle aus. Insbesondere werden Schalldruckpegel auf den Hörerflächen durch Anwendung des Abstandsgesetzes ermittelt, das von einem Pegelabfall von 6dB pro Verdopplung des Abstands von der Schallquelle ausgeht. Bei den meisten gängigen Lautsprechern kommt man mit der Anwendung dieses Abstandsgesetzes gut zurecht, lediglich im Nahfeld des Lautsprechers gibt es merkliche Abweichungen.

Das Problem bei der Anwendung konventioneller Simulationstechniken auf Line-Arrays besteht nun darin, daß Line-Arrays dafür konstruiert sind, zumindest in einer Ebene (der vertikalen) wegen ihrer großen Längenausdehnung ein sehr ausgeprägtes Nahfeld aufzuweisen. Daher gilt bei Line-Arrays die in Simulationsprogrammen stillschweigend genutzte Näherung einer punktförmigen Schallabstrahlung nicht mehr. Bei einem unendlich langen Line-Array - also einem idealen Linienstrahler - fände man anstelle der bekannten 6dB nur einen Pegelabfall von 3dB pro Abstandsverdopplung. Bei allen realen Line-Arrays liegen die praktischen Werte dazwischen, und zwar - entscheidend ist das Verhältnis Lautsprecherabmessung zu Wellenlänge - abhängig von der Frequenz und der Länge des Line-Arrays.

Weil nun dieser Effekt gewünscht und sozusagen der Hauptgrund für die Existenz der Line-Arrays ist, kann man ihn in der Simulation nicht einfach unter den Tisch fallen lassen.

Selbstverständlich besteht die Möglichkeit, mit entsprechendem Meßaufwand einfach die Abstrahldaten eines kompletten Line-Arrays zu messen und diese Daten in einer Simulation zu verwenden. Dabei kommen aber falsche Ergebnisse heraus, weil praktisch alle gängigen Simulationsprogramme mit der Fernfeldnäherung rechnen. Das einzige Simulationsprogramm, das auch im Nahbereich rechnet (CARA), erfordert Lautsprecherdaten für vier verschiedene Abstände und wird fast ausschließlich im HiFi-Bereich eingesetzt, so daß - abgesehen von dem ohnehin hohen Meßaufwand - die entsprechenden Lautsprecherdaten für Line-Arrays schlicht nicht verfügbar sind. Bei allen Programmen mit Fernfeldnäherung wird insbesondere die Pegelverteilung in die Tiefe des Raums (bzw. der Hörfläche) falsch und zu schlecht wiedergegeben.

Solche Simulationen hätten nur Gültigkeit, solange das Line-Array nur im Fernfeld betrachtet wird, es also klein gegen die vorkommenden Wellenlängen ist. In der Praxis versucht man allerdings, die Line-Arrays so zu betreiben, daß sich möglichst ein Großteil des Publikums im Nahfeld des Arrays befindet.

Da Line-Arrays in der Beschallungspraxis zunehmend eingesetzt werden, stellt sich die Frage, wie ein solches Line-Array mit einem CAAD-Programm realitätsnah simuliert werden kann.

Ein erster Ansatz wäre zum Beispiel, das Line-Array nicht als Ganzes, sondern die Line-Array-Elemente als Einzelstrahler zu betrachten. Das Line-Array bestünde für die Simulation dann aus entsprechend vielen Einzelstrahlern. Auf dieser Basis lassen sich tatsächlich Simulationen erstellen, die im Fernfeld im Rahmen der Simulationsgenauigkeit auch korrekte Ergebnisse liefern.

Falsch wäre es jedoch, Simulationen mit mehrerer dieser Quellen in Line-Array-üblicher Anordnung für das Nahfeld des Gesamtstrahlers bzw. Line-Arrays durchzuführen. Im mittel- und hochfrequenten Bereich würde es hier zu Fehlern kommen, da die akustische Kopplung der im Mittel- und Hochtonbereich ein-

gesetzten Waveguides nicht berücksichtigt wird. Es gilt also insbesondere, das Verhalten der Waveguides nachzubilden, welche bereits als Einzelstrahler schon eine kleine Linienschallquelle darstellen.

Der Ansatz für eine korrekte Simulation ist nun, diese kleine Linienquelle in hinreichend viele Punktquellen zu separieren. Zu diesem Zweck nutzt man das Prinzip der Elementarstrahlersynthese und faßt den gemessenen 3D-Abstrahl Datensatz (Balloon) als Ergebnis mehrerer Einzelstrahler mit jeweils eigenem Abstrahlverhalten auf.

Ziel dieses ersten Schrittes ist es demnach, die Wirkung einer linienförmig angeordneten Anzahl von Quellen (unsere Elementarstrahler) rechnerisch so zusammzusetzen, daß sie in der Summe gleich dem Verhalten eines vorgegebenen und ausgemessenen Strahlers - eben des einzelnen Line-Array-Elementes - wird. Dazu sind die Balloon-Daten der einzelnen Quellen sowie deren An-

zahl und genaue Position zu bestimmen. Die Position der Quellen ist weitestgehend dadurch bestimmt, daß sie äquidistant auf einer Linie anzuordnen sind, deren Länge gleich der Höhe des Waveguides des einzelnen Line-Array-Elementes ist.

Zunächst muß geklärt werden, welcher Abstand zwischen den Elementarquellen anzustreben ist. Damit in Richtung der Aufreihung überhaupt ein Pegel erzeugt werden kann, muß der Abstand der Quellen kleiner als die Hälfte der kürzesten in der Simulation vorkommenden Wellenlänge sein. In der Abbildung 6.10 wurden experimentell zwei Punktschallquellen in einem Abstand von 34 cm zueinander angeordnet. Wie man in der 1 kHz-Berechnung erkennt, ist in y-Richtung eine ausgeprägte Pegelverminderung zu verzeichnen. Daraus läßt sich schließen, daß für eine globale Kopplung der Quellen der Abstand kleiner sein muß, als die halbe Wellenlänge.

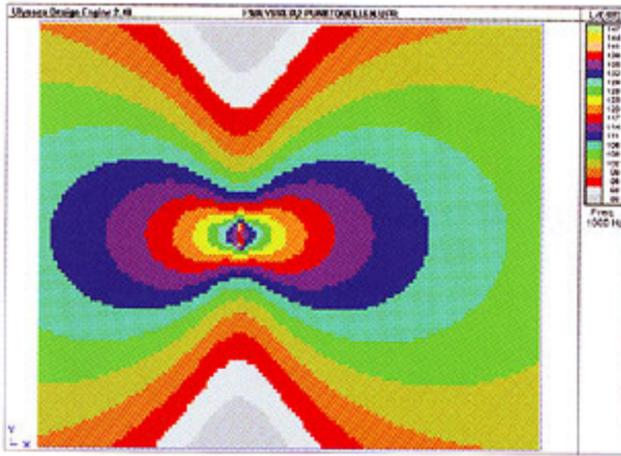


Bild 1: Simulationsergebnis für zwei Kugelschallquellen, Abstand beider Quellen  $\lambda/2$

Für die folgenden Untersuchungen ein Quellenabstand von 10 mm festgelegt. Für die höchste in der Simulation betrachtete Frequenz von 10kHz beträgt die halbe Wellenlänge etwa 17mm, womit der gewählte Abstand ausreichend erscheint.

In der Bild 2 ist für einen Quellenabstand von 10mm die Berechnung bei 8kHz dargestellt, da die höchste Frequenz von 10kHz nur intern bei der Oktav-Mittelung auftritt. Zu erkennen ist aber eine deutliche Kopplung, die auch ein akkurates Ergebnis bei 10kHz vermuten läßt.

**Substituierende Quellen**

Die Anzahl der Quellen n ist abhängig von der Höhe des Waveguides und dem Abstand der einzelnen Quellen und läßt sich zu

$$n = h/d + 1$$

wobei h die Höhe des Waveguides in m und d der Quellenabstand in m ist. Für den untersuchten Waveguide mit der Länge von 180 mm und dem Quellenabstand von 10 mm ergibt sich eine Quellenanzahl von 19.

Den Balloon der substituierenden Quellen zu bestimmen ist, wie zunächst scheint, keine leichte Aufgabe. Daher soll zunächst als einfacherer Fall untersucht werden, wie sich 19 Kugelschallquellen an den zuvor hergeleiteten Positionen verhalten würden. Dazu wurde mit Hilfe der für die hier beschriebenen Simulationen verwendeten Software Ulysses die folgende Hilfssimulation erstellt:

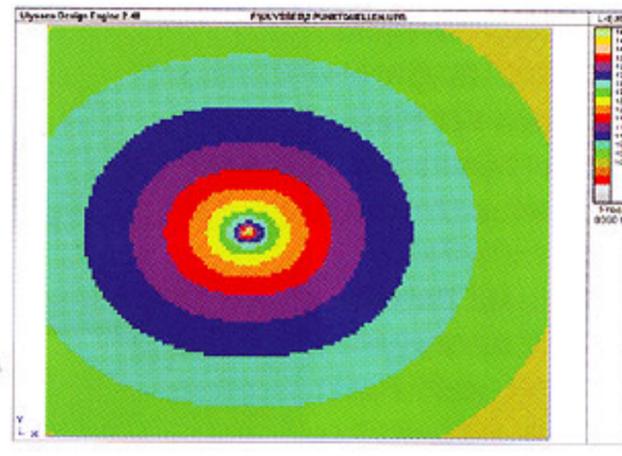


Bild 2: Simulationsergebnis für zwei Kugelschallquellen, Abstand beider Quellen ca.  $\lambda/3$

Um einen Mittelpunkt herum sind mit einem Radius von 4m in 5°-Schritten kleine Hörflächen gruppiert (Bild 3). Im Zentrum dieser Anordnung befinden sich die 19 Kugelschallquellen mit einem Abstand von 10 mm zueinander, und zwar ebenso wie die Hörflächen in der x/y-Ebene. Auf den Hörflächen läßt sich nun der Schalldruckpegel, der sich aus der komplexen bzw. betrags- und phasenweisen Summation der 19 Kugelschallquellen ergibt, ablesen.

Die so gewonnenen Daten lassen sich zu einer Matrix zusammenfassen, und zwar dergestalt, daß jede Zeile ein Oktavband beschreibt, und in den Spalten umlaufend die Schalldruckpegel (als Ergebnis der Simulationsberechnung) enthalten sind.

Genauso ist eine zweite Matrix zu erzeugen, die das Verhalten eines einzelnen Kugelstrahlers in 4m Entfernung beschreibt. Das ist trivial, denn alle Positionen der zweiten Matrix haben wegen der Kugelcharakteristik der Quelle den gleichen Wert, der mit der Kenntnis der Sensitivity und dem Abstandsgesetz leicht rechnerisch zu ermitteln ist. Für die Abstandskorrektur muß von der vorgegebenen Sensitivity der einzelnen Kugelschallquelle ein Pegel von  $20 \log 4 = 12$  dB subtrahiert werden.

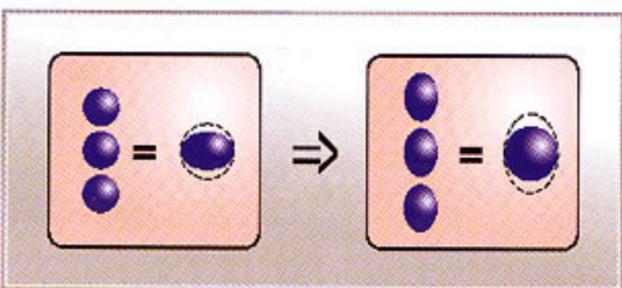


Bild 4: Auswirkung der Differenzmatrix

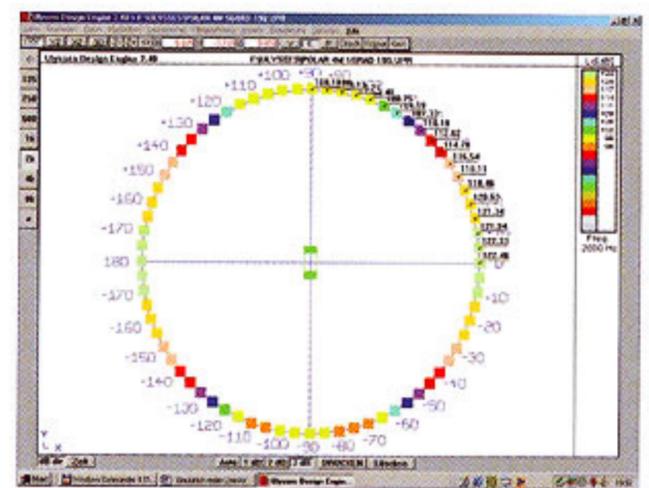


Bild 3: Simulationsergebnis für das Verhalten von 19 linear aufgereihten Kugelschallquellen

Durch Subtraktion der zweiten Matrix von der ersten erhält man nun in einem nächsten Schritt gewissermaßen eine vertikale Differenzmatrix, die das unterschiedliche vertikale Verhalten von 19 Kugelschallquellen im Vergleich zu einer einzelnen Kugelschallquelle beschreibt, und zwar im vorliegenden Fall für eine Entfernung von 4m.

Für das horizontale Abstrahlverhalten ist die entsprechende Differenzmatrix relativ leicht zu bestimmen, da hier keine destruktiven Interferenzen auftreten. Dadurch lassen sich die Schalldruckpegelwerte für 19 Kugelschallquellen berechnen, indem sie lediglich betragsweise addiert werden. Es muß also ein Pegel von  $20 \times \log 19 = 25,6$  dB zum Pegel der einzelnen Kugelschallquelle addiert werden. Diese Ergebnisse werden wieder in Form der oben beschriebenen Matrix ausgedrückt.

Um die horizontale Differenzmatrix zu erhalten, wird wiederum die Matrix der einzelnen Kugelschallquelle subtrahiert, die sowohl für die Vertikale wie für die Horizontale die gleichen Werte enthält. So erhält man die horizontale Differenzmatrix, die das unterschiedliche horizontale Verhalten von 19 Kugelschallquellen im Vergleich zu einer einfachen Kugelschallquelle in einer Entfernung von 4 m beschreibt.

Die vertikale und die horizontale Differenzmatrix bilden nun die Grundlage für die Erzeugung eines Balloons einer substituierenden Quelle (Ersatzquelle), die später die Simulation eines Line-Arrays ermöglicht.

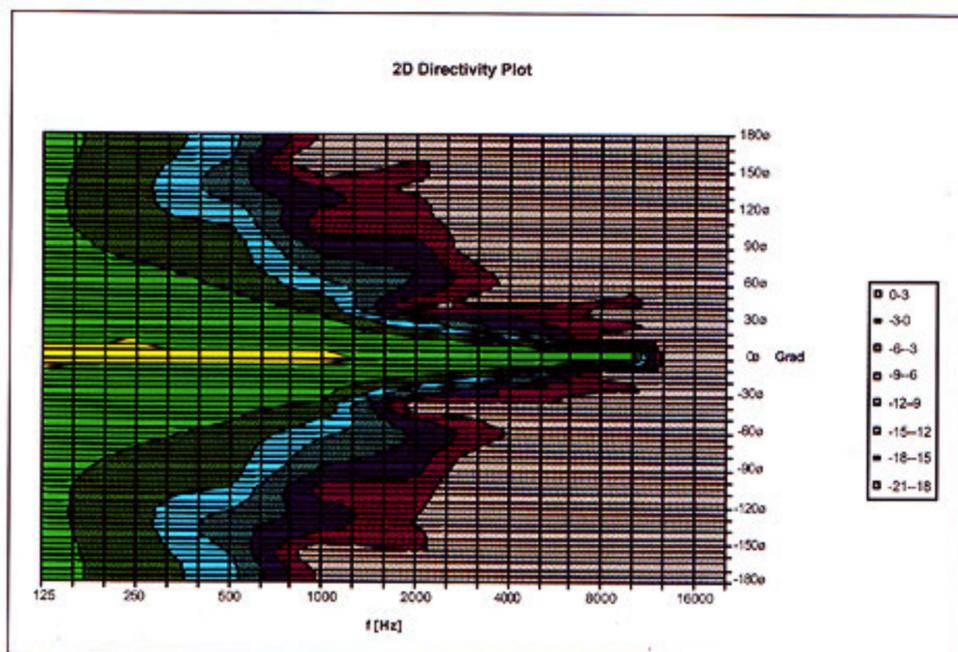


Bild 5: Gemessenes vertikales Abstrahlverhalten eines dV-DOSC-Elementes in 4m Entfernung. Zum besseren Vergleich wurden die Daten zwischen den Oktaven interpoliert.

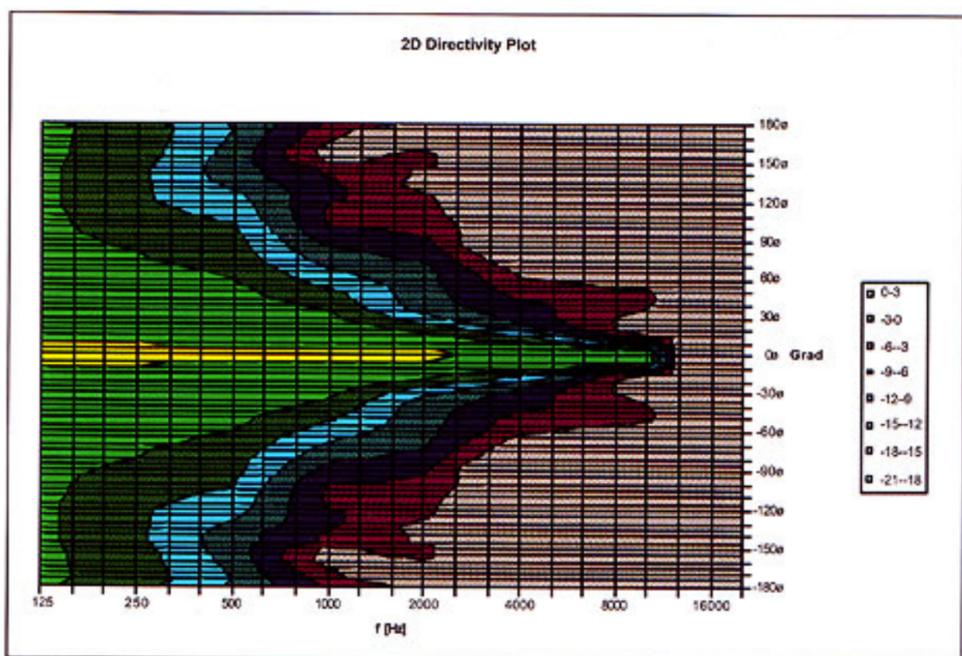
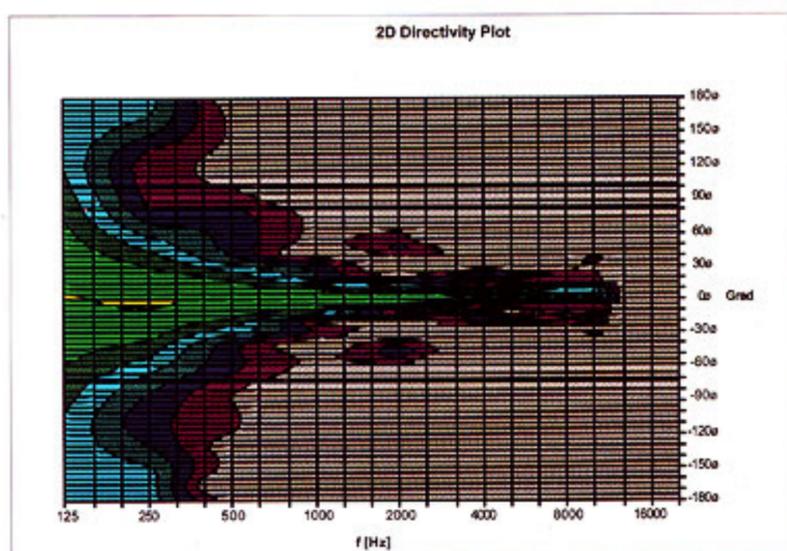


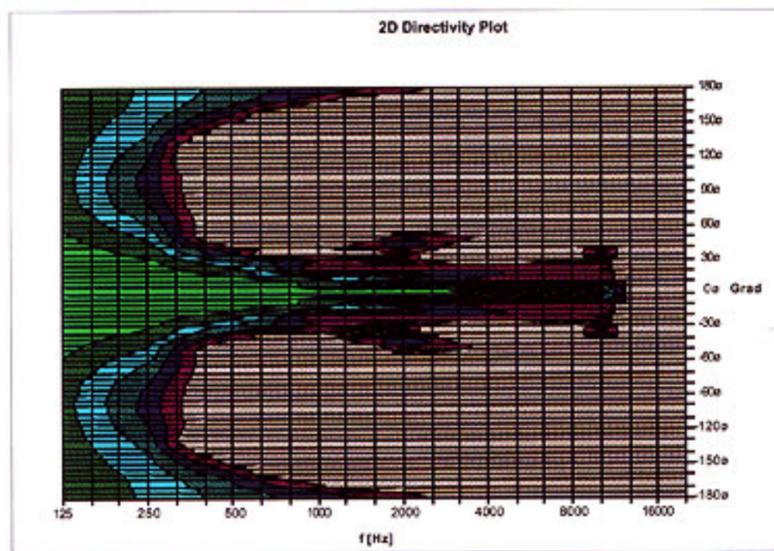
Bild 6: Simuliertes vertikales Abstrahlverhalten eines dV-DOSC-Elementes in 4m Entfernung. Die Daten stammen aus der Simulation mit 19 substituierenden Einzelquellen.

Dazu werden die zuvor berechneten Differenzmatrizen vom gemessenen Balloon subtrahiert. Das heißt, daß die horizontale Differenzmatrix von den gemessenen horizontalen Umläufen und die vertikale Differenzmatrix von den gemessenen vertikalen Umläufen subtrahiert werden. Für die Erstellung der kompletten UNF-Datei (Importformat für Lautsprecherdaten) können aus der horizontalen und vertikalen Differenzmatrix die Zwischenwerte für andere Winkel interpoliert werden, womit letztendlich der Balloon einer substituierenden Quelle erzeugt wird.

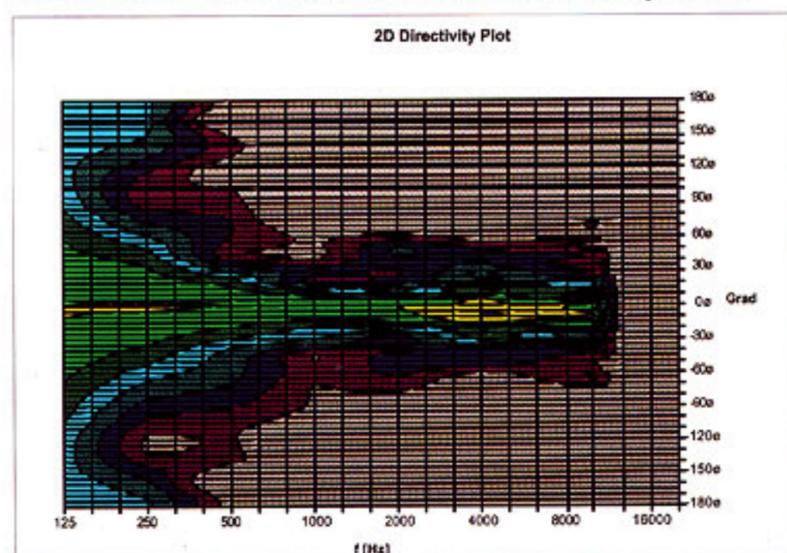
Das Abstrahlverhalten einer solchen substituierenden Quelle besteht also aus den gemessenen Abstrahldaten eines einzelnen Array-Elementes sowie einem winkelabhängigen Korrekturfaktor (Korrekturballoon). Dieser Korrekturballoon beschreibt den Unterschied zwischen der Simulation mit einer Einzelquelle und einer Simulation mit einer linearen Anordnung von mehreren (substituierenden) Quellen gleicher Abstrahlcharakteristik. Umgekehrt formuliert: Mit Hilfe der Daten des



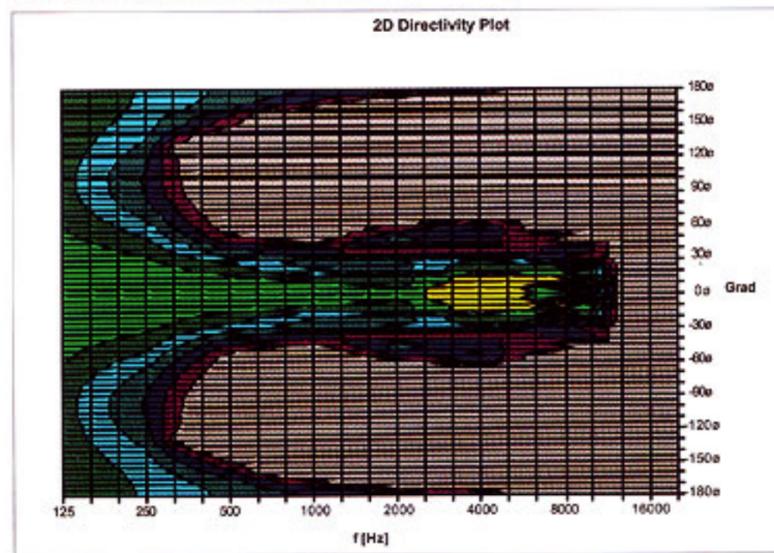
**Bild 7:** Gemessenes vertikales Abstrahlverhalten eines dV-DOSC-Arrays in 4m Entfernung mit einer Anwinkelung von 0° zwischen den Elementen. Zum besseren Vergleich wurden die Daten zwischen den Oktaven interpoliert.



**Bild 8:** Simuliertes vertikales Abstrahlverhalten eines dV-DOSC-Arrays in 4m Entfernung mit einer Anwinkelung von 0° zwischen den Elementen. Die Daten stammen aus einer Simulation mit insgesamt 76 substituierenden Quellen.



**Bild 9:** Gemessenes vertikales Abstrahlverhalten eines dV-DOSC-Arrays in 4m Entfernung mit einer Anwinkelung von 5° zwischen den Elementen. Zum besseren Vergleich wurden die Daten zwischen den Oktaven interpoliert.



**Bild 10:** Simuliertes vertikales Abstrahlverhalten eines dV-DOSC-Arrays in 4m Entfernung mit einer Anwinkelung von 5° zwischen den Elementen. Die Daten stammen aus einer Simulation mit insgesamt 76 substituierenden Quellen.

Korrekturballoon kann man für die Simulation eine einzelne Schallquelle in viele Teilschallquellen aufspalten, ohne daß dadurch im Simulationsergebnis ein Fehler entsteht.

Warum ist das wichtig? Gemäß dem Prinzip der Elementarstrahlersynthese kann man die Abstrahlcharakteristik eines kompliziert aufgebauten Schallstrahlers durch eine Anordnung von Elementarstrahlern ersetzen, die eng benachbart sind, also untereinander weniger als eine halbe Wellenlänge Abstand haben. Normalerweise geht das Konzept der Elementarstrahlersynthese von Kugelschallquellen aus.

Um den Simulationsaufwand zu reduzieren, verleiht man diesen Elementarstrahlern nun ebenfalls eine Richtcharakteristik, wodurch man mit (deutlich) weniger Elementarstrahlern auskommt.

Diese Richtcharakteristik ist aber nicht bekannt und auch nicht direkt meßbar. Eine Messung ist nur indirekt möglich, indem man einen Lautsprecher (hier: ein einzelnes Array-Element) ausmißt, der bereits aus einer Anzahl dieser gedachten substituierenden Quellen zusammengesetzt ist. Mit Hilfe des anhand einer kurzen Linienschallquelle berechneten Korrekturballoons kann man nun auf die Richtcharakteristik der einzelnen substituierenden Quelle zurückrechnen. Sobald diese bekannt ist, kann man aus diesen substituierenden Quellen in der Simulation auch größere Konstruktionen wie etwa komplette Line-Arrays berechnen, und zwar ohne dabei einen Fehler im Nahfeld zu machen.

In unserem Beispiel könnte man also ein Line-Array aus zehn Einzelsystemen mit Hilfe einer Anordnung aus  $10 \times 19 = 190$  substituierenden Quellen simulieren.

Der Vergleich der aus Messung und Simulation gewonnenen Ergebnisse zeigt eine sehr gute Übereinstimmung (Bild 5 und 6). Ein simuliertes Line-Array-Element, welches in einer Simulation durch eine bestimmte Anzahl von Quellen substituiert wurde, zeigt in 4m Entfernung mit hoher Genauigkeit das gleiche Verhalten, wie das reale Line-Array-Element in der Messung. Da selbst das einzelne Line-Array-Element nun nicht mehr als einzelner Punktstrahler, sondern bereits als eine Quelle mit räumlicher Ausdehnung beschrieben wird, sollte es möglich sein, bei einer Line-Array-üblichen Anordnung in der Simulation eine kohärente Kopplung der Elemente zu erhalten. Dazu werden Line-Array-Konfigurationen mit vier dV-DOSC-Elementen untersucht, wobei einmal ein Winkel von 0° und einmal ein Winkel von je 7,5° zwischen den Elementen besteht.

### Verifikation

Für die experimentelle Verifikation werden Abstrahlverhalten herangezogen, die an einem einzelnen dV-DOSC-Element gemessen wurden. Diese wurden mit den Differenzmatrizen aus dem Kugelschallquellenversuch überlagert und anschließend in der Simulation aufgereiht. Die resultierenden Schalldruckpegel sind in den folgenden Diagrammen dargestellt. Da die Simulation lediglich Oktav-Werte liefert und um so einen besseren Vergleich zwischen den Messwerten und den simulierten Ergebnissen zu erhalten, wurden die Darstellungen zwischen den Oktaven interpoliert.

Auch bei diesen Vergleichen läßt sich wiederum eine große Übereinstimmung der simulierten und gemessenen Werte erkennen (Bild 7...10). Dabei ist die kohärente Kopplung der einzelnen Elemente besonders zu beachten, wo es in den simulierten Ergebnissen gelingt die zusammenhängende Wellenfront des realen Arrays naturgetreu nachzubilden. Auffällig ist indes bei der im tief- und mittelfrequenten Bereich zunehmende Pegel zu größeren Winkeln über  $+90^\circ$  bzw. unter  $-90^\circ$  bei den simulierten Ergebnissen, was sich in den Meßergebnissen der realen Arrays nicht so widerspiegelt. Dieses ist nicht so ohne weiteres zu erklären, aber dahingehend zu deuten, daß in der Realität bei niedrigen Frequenzen die Lautsprechergehäuse Einfluß nehmen, was als Fehler der Simulation anzusehen wäre. Für eine Verbesserung der Simulationsergebnisse wäre es z.B. denkbar, auf der Basis von Untersuchungen an verschieden langen Arrays Vorfilterungen mit Hochpaßcharakteristik für entsprechende Array-Längen zu ermitteln.

Eine andere Möglichkeit zur Erklärung der Differenzen der simulierten und der gemessenen Ergebnisse könnte in dem Zusammenhang zu sehen sein, daß die Mikrofonpositionen bei der vorliegenden Array-Länge von etwa 90 cm für tiefe und mittlere Frequenzen bereits im Nahfeld liegen.

Nichtsdestotrotz lassen Simulationen auf Basis des hier vorgestellten Verfahrens bei der Direktschallausbreitung hinreichend akkurate Ergebnisse erwarten, da in üblichen Simulationen die einzelnen Lautsprecher mit der Hauptabstrahlachse auf die Hörfläche ausgerichtet sind. Die rückwärtig emittierte Energie findet allenfalls bei Betrachtungen mit Relevanz des Diffusschalldruckpegels und bei Raytracings Berücksichtigung.

### Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde untersucht, inwieweit es möglich ist, mit Hilfe von CAAD-Planungssoftware moderne Line-Array-Lautsprechersysteme zu simulieren. Dabei wurde der Ansatz aufgegriffen, das Line-Array in hinreichend

viele Punktschallquellen zu separieren. Experimentelle Untersuchungen zeigen, daß es grundsätzlich möglich ist, mit Hilfe dieses Ansatzes Linienschallquellen mit guter Genauigkeit nachzubilden.

Basierend auf gemessenen Balloon-Daten eines einzelnen Line-Array-Elementes können Schallquellen erzeugt werden, die - linienförmig aufgereiht - das gleiche Verhalten wie das Line-Array-Element selbst zeigen.

*Dieser Beitrag basiert auf der Diplomarbeit von Dipl.-Ing. Volker Holtmeyer, die zum Download bereitsteht unter: [www.ifbsoft.de/texte/diplom\\_d.pdf](http://www.ifbsoft.de/texte/diplom_d.pdf) bzw. [www.ifbsoft.de/texte/diplom\\_e.pdf](http://www.ifbsoft.de/texte/diplom_e.pdf)  
Der Autor ist per Email erreichbar unter: [v.holtmeyer@ifbsoft.de](mailto:v.holtmeyer@ifbsoft.de)*

Durch die linienförmige Substitution des einzelnen Line-Array-Elementes ist es durch Fortführung dieser Linie möglich, ganze Line-Arrays zu simulieren, wobei die Simulationen mit den gemessenen Werten weitestgehend überein stimmten. Mit diesem Verfahren sollte es möglich sein, die unterschiedlichsten Line-Array-Konfigurationen mit beliebigen Längen und Winkeln zwischen den Elementen zu simulieren. 