



**Simulation von
Line-Array-Lautsprechersystemen
mit der CAAD Software Ulysses**

Volker Holtmeyer

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	7
2 Grundlagen	8
2.1 Wellenausbreitung	8
2.1.1 Die ebene Welle	8
2.1.2 Die Zylinderwelle	8
2.1.3 Die Kugelwelle	9
2.2 Interferenzerscheinungen	10
2.3 Theoretische Grundlagen von Line-Arrays	11
3 Raumakustische Modelle	14
3.1 Wellentheoretische Raumakustik	14
3.2 Geometrische Raumakustik	15
3.3 Akustische Simulationstechnik	16
4 Die Software Ulysses	17
4.1 Ulysses Design Engine	17
4.1.1 Nachhallzeit	17
4.1.2 Pegel- und Zeitberechnung	18
4.1.3 Reflektogramme	20
4.1.4 Auralisation	21
4.2 Absorber Base	21
4.3 Speaker Builder	22
4.4 Viewer	23
5 Beschallung großer Auditorien	24
5.1 Konventionelle Lautsprecher-Cluster	24
5.2 Moderne Line-Arrays	25
5.2.1 Waveguides	26
5.2.1.1 Koerzitiv-Waveguides	27
5.2.1.2 Schallführung in Kanälen	27
5.2.1.3 DOSC-Waveguide	28

5.2.1.4 Parabolischer Reflektor	29
5.2.1.5 Bändchenhohtöner	29
5.2.2 Abstrahlverhalten	30
5.2.3 Computergestützte Array-Berechnung	32
6 Simulation realer Line-Arrays	34
6.1 Daten für die Simulation	34
6.1.1 Ulysses Nativ Format	35
6.1.2 Aufbereitung der Daten	40
6.2 Substitution des gemessenen Balloon	41
6.2.1 Abstand der substituierenden Quellen	42
6.2.2 Anzahl der substituierenden Quellen	43
6.2.3 Balloon der substituierenden Quellen	43
6.3 Verifikation	46
6.3.1 Verifikation mit Kugelschallquelle	46
6.3.2 Verifikation mit Line-Array-Element	47
6.3.3 Verifikation mit Line-Array-Konfigurationen	48
7 Schlusswort	51
7.1 Zusammenfassung	51
7.2 Anmerkungen	52
8 Literaturverzeichnis	53
9 Anhang	54
A Simulation vom Line-Array Geo805	54
B Öffnungswinkel	57
Vergleich von Messung und Simulation	58
dV-DOOSC Balloon-Daten	60
C Datenblätter	62

1 Einleitung

Die grundlegenden Faktoren einer hochwertigen Beschallung sind ein ausreichender Schalldruckpegel und ein ausgeglichenes Frequenzspektrum. Diese Bedingungen sollten für alle Punkte der zu beschallenden Fläche gleichermaßen erfüllt werden. Einzelne Lautsprecher kommen hier sehr bald an ihre Grenzen, so dass man zu einer Gruppierung von Lautsprechern übergeht. Bei der Verwendung von konventionellen Lautsprechern, die den Schall sphärisch abstrahlen, entstehen dabei aber durch destruktive Interferenzen Nachteile.

Diese Nachteile versucht man durch den Einsatz von Line-Array-Lautsprechersystemen zu vermeiden, wo die einzelnen Elemente vertikal untereinander angeordnet werden. Durch den hinreichend geringen Abstand der einzelnen Treiber und spezielle Schallführungen im Hochtonbereich erzeugt ein Line-Array eine zusammenhängende Wellenfront ohne destruktive Interferenzen. Eine solche Anordnung strahlt den Schall weitgehend zylinderförmig ab - sie agiert gleichsam als Linienquelle. Es entsteht so eine in vertikaler Richtung sehr stark gebündelte Richtcharakteristik, die es ermöglicht gezielt bestimmte Bereiche zu beschallen.

Die CAAD-Software¹ Ulysses ist derzeit ausschließlich für Simulationen mit Lautsprechern, die durch Punktschallquellen beschrieben werden können, ausgelegt. In der vorliegenden Arbeit soll untersucht werden, in wie weit es möglich ist, auch Simulationen von Line-Array-Lautsprechersystemen durchzuführen.

¹ CAAD: Computer Aided Acoustic Design

2 Grundlagen

2.1 Wellenausbreitung

Befindet sich ein Sender (schwingendes System, von dem sich Wellen ausbreiten) in einem unendlich ausgedehnten Medium und ist zudem relativ zu ihm in Ruhe, so herrschen nach allen Seiten die gleichen Ausbreitungsbedingungen und es gibt durch eventuelle Reflexionen an den Grenzflächen keine Rückwirkungen auf den Sender. In diesem Fall hat man je nach Form des Senders drei verschiedene Formen der Wellenausbreitung, die von besonderem Interesse sind:

1. Die ebene Welle (flächenförmiger Sender)
2. Die Zylinderwelle (linienförmiger Sender)
3. Die Kugelwelle (punktförmiger Sender)

2.1.1 Die ebene Welle

Der Ausgangsort einer ebenen Welle ist definitionsgemäß eine Ebene, d.h. die Strahlerfläche ist als unendlich ausgedehnte und homogen schwingende Fläche zu betrachten. Alle geometrischen Orte gleicher Phasenlage der ebenen Welle sind Parallelebenen zu der Ursprungsebene. Die Ausbreitungsrichtung steht auf ihr senkrecht. Die ebene Welle ist also ihrem Charakter nach eine eindimensionale Welle.

Die Besonderheit der ebenen Welle lässt sich unter anderem darin sehen, dass die Energiedichte überall gleich groß ist. Unabhängig von Entfernung und Position ist der Schalldruck überall konstant. Es kommt also zu keinem Pegelabfall mit der Entfernung.

2.1.2 Die Zylinderwelle

Wegen der senkrecht zum linienförmig angeordneten Sender überall gleichen Ausbreitungsbedingungen sind Flächen gleicher Schwingungsphase Zylinderflächen, in deren Zentrum der Sender liegt. Die Energiedichte nimmt mit zunehmenden Abstand vom Zentrum ab.

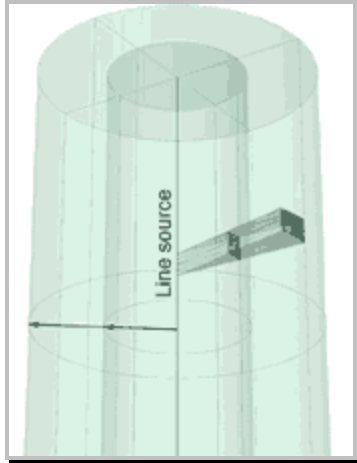


Abbildung 2.1
Modell einer Linienquelle

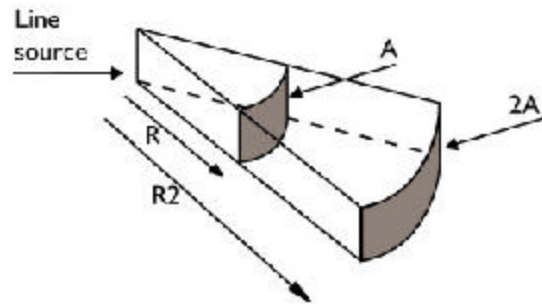


Abbildung 2.2
Ausbreitungscharakteristik einer Zylinderwelle

Die insgesamt abgestrahlte Leistung verteilt sich hier bei einer Verdoppelung der Entfernung vom Sender auf die zweifache Fläche. Damit reduziert sich die Leistungsdichte auf die Hälfte (-3 dB) und der Schalldruckpegel um den Faktor 0,707 (-3 dB).

2.1.3 Die Kugelwelle

Ist der Ausgangsort einer Welle (Sender) als punktförmig anzusehen, so breitet sich die Welle in einem homogenen isotropen Medium als Kugelwelle aus, d.h. die Flächen gleicher Phasen sind konzentrisch zum Sender gelegene Kugelflächen, die gleiche Abstände voneinander haben.

Wie man leicht einsieht, verteilt sich bei der Kugelwelle die Energiedichte auf immer größere Flächen, d.h. sie nimmt mit $1/r^2$ ab. Daraus ergibt sich eine Abnahme der Wellenamplitude mit $1/r$. Diese mit dem reziproken Abstandsquadrat gegebene Abnahme der Energiedichte einer Kugelwelle wird auch als das Quadratisches Abstandsgesetz bezeichnet.

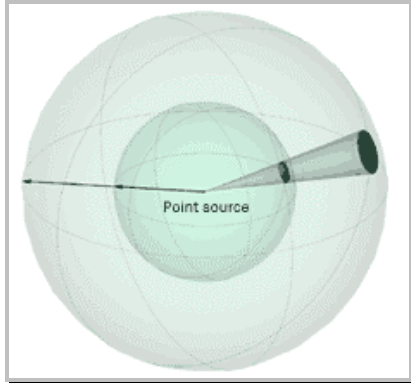


Abbildung 2.3
Modell einer Punktquelle

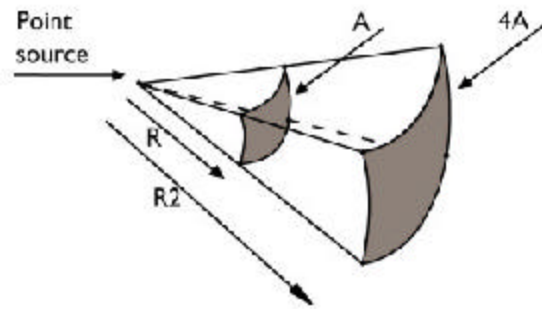


Abbildung 2.4
Ausbreitungscharakteristik einer Kugelwelle

Anders ausgedrückt könnte man auch sagen, dass sich durch die Vervierfachung der Fläche bei Verdopplung der Entfernung zum Sender die Leistungsdichte auf ein Viertel (-6 dB) und der Schalldruckpegel auf die Hälfte (-6 dB) reduziert.

2.2 Interferenzenerscheinungen

Wellen können sich wie Schwingungen überlagern. Das Ergebnis der Interferenz hängt von den Amplituden der Einzelwellen und der Phasendifferenz im Punkt der Überlagerung ab, ist also räumlich und zeitlich veränderlich.

Besitzen die Wellen jedoch die gleiche Wellenlänge (respektive Frequenz) und gehen von zwei Sendern aus, die mit einer zeitlich konstanten Phasendifferenz arbeiten, dann ergeben sich raumfeste Flächen gleicher Phasendifferenz beider Wellen, also im Raum lokalisierte Interferenzfiguren.

Die Kurven die alle Punkte gleicher Phasendifferenz miteinander verbinden, sind konfokale Hyperbeln (Brennpunkte sind die beiden Punktschallquellen), denn diese sind mathematisch definiert als geometrische Orte aller Punkte, deren Abstandsunterschied zu zwei Festpunkten (Brennpunkten) gleich groß ist.

Alle Punkte auf der Hörfläche, an denen die beiden Wellen mit der Phasendifferenz 2π oder Vielfachen davon eintreffen, lassen eine Verstärkung der dort lokalisierten Schwingung erkennen, wogegen alle Punkte, die durch eine Phasendifferenz π oder ungeradzahligem Vielfachen davon ausgezeichnet sind, praktisch Auslöschung zeigen.

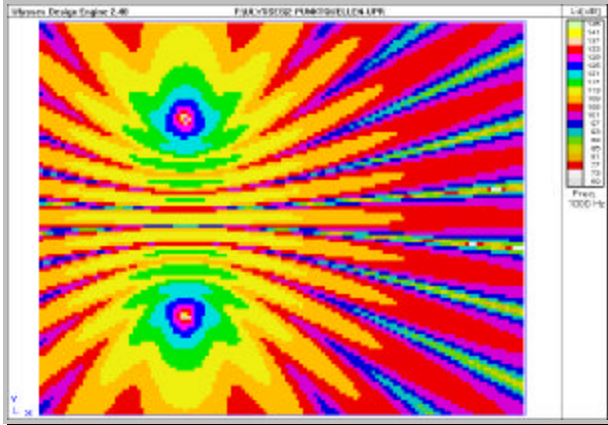


Abbildung 2.5

Zur Veranschaulichung wurde in der Abbildung ein solches Interferenzmuster mit der Software Ulysses visualisiert. Die von den Punktquellen ausgehenden Kugelwellen haben die gleiche Amplitude und ihre Phasendifferenz ist gleich 0. Betrachtet wird die Frequenz $f = 1000$ Hz; beide Sender emittieren also ein Signal der gleichen Wellenlänge.

Überträgt man die Beobachtungen in der zweidimensionalen Ebene auf den dreidimensionalen Raum, erhält man als Orte maximaler Wellenerzeugung oder vollständiger Auslöschung Rotationshyperbolide, die wiederum die beiden Erregungszentren als gemeinsame Brennpunkte haben.

Ein Sonderfall der Überlagerung von Wellen liegt vor, wenn die Wellenlänge groß gegenüber dem Abstand der Quellen ist. Dabei überlagern sich die von einer geraden Reihe punktförmiger Quellen ausgehenden Kugelwellen und bilden in einer gewissen Entfernung praktisch eine Zylinderwelle. Die Zylinderwelle kann man sich also durch eine Reihe unendlich dicht zusammenliegender Punktquellen entstanden denken.

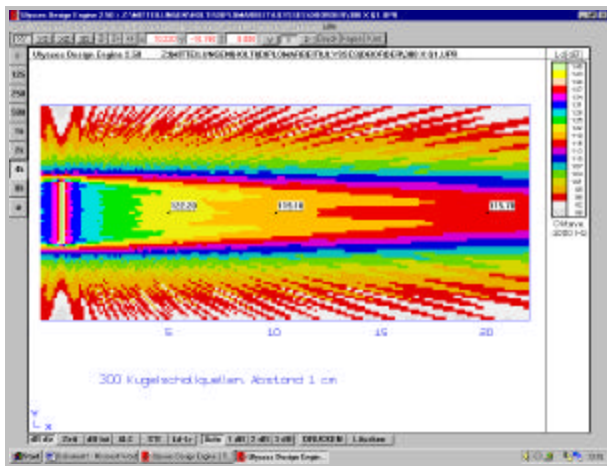


Abbildung 2.6

In der Abbildung ist das Abstrahlverhalten einer Anordnung von 300 linienförmig angeordneten Kugelschallquellen mit einem Abstand von 1 cm zueinander zu sehen.

Bei der betrachteten Frequenz von 4 kHz ist sehr deutlich das Verhalten einer Linienquelle mit einem Pegelabfall von 3 dB pro Entfernungsverdoppelung zu erkennen. Zu beachten ist die im Berechnungsalgorithmus fest implementierte Luftabsorption, die zu höheren Frequenzen zunehmend in Erscheinung tritt.

2.3 Theoretische Grundlagen von Line-Arrays

Grundsätzlich besitzt ein modernes Line-Array - eine kohärente Kopplung aller Elemente vorausgesetzt - ein Zylinderwellenverhalten. Durch die endliche Länge ist

dieses Verhalten aber nur bis zu einer gewissen räumlichen Ausdehnung gültig. Es gibt dabei einen kontinuierlichen Übergang von einem Nahfeld mit zylindrischer Wellenausbreitung in ein Fernfeld mit sphärischer Wellenausbreitung. Dieser Übergang lässt sich näherungsweise mit folgender Formel errechnen:

$$d_{\text{Border}} = \frac{3}{2} h^2 f \sqrt{1 - \left(\frac{1}{3hf}\right)^2}$$

wobei h die Höhe des Arrays in m und f die Frequenz in kHz ist.

Für übliche Frequenzen und Höhen des Arrays wird der Wurzel-Ausdruck näherungsweise zu 1. Daraus ergibt sich die häufig benutzte überschlägige Formel:

$$d_{\text{Border}} = \frac{h^2 f}{2c}$$

wobei h die Höhe des Arrays in m, f die Frequenz in Hz und c die Schallgeschwindigkeit ist.

Wie man erkennt, ist der Übergang sehr stark von der Länge des Arrays abhängig und auch von der Frequenz, was im folgenden Diagramm dargestellt ist.

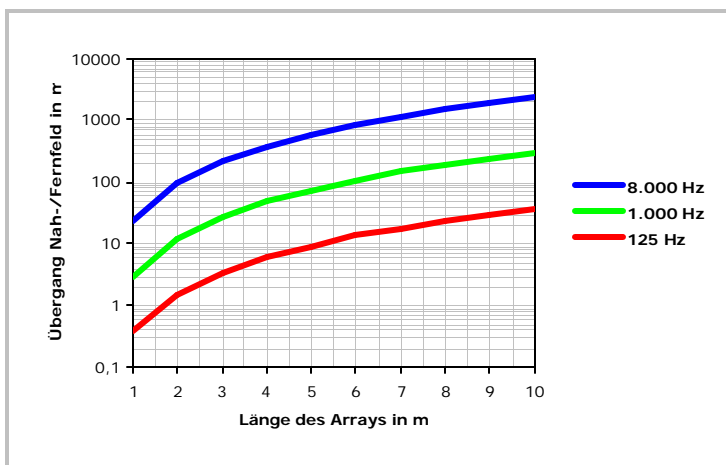


Abbildung 2.7
Übergang vom Nahfeld zum Fernfeld

Das Nahfeld, welches gelegentlich auch als Fresnel-Region bezeichnet wird, zeichnet sich durch den günstigen Umstand einer Reduzierung des Schalldruckpegels von nur

3 dB pro Entfernungsverdoppelung aus. Für das Fernfeld bzw. die Fraunhofer-Region nimmt der Schalldruckegel wieder wie beim gewöhnlichen Lautsprecher mit 6 dB pro Entfernungsverdoppelung ab.

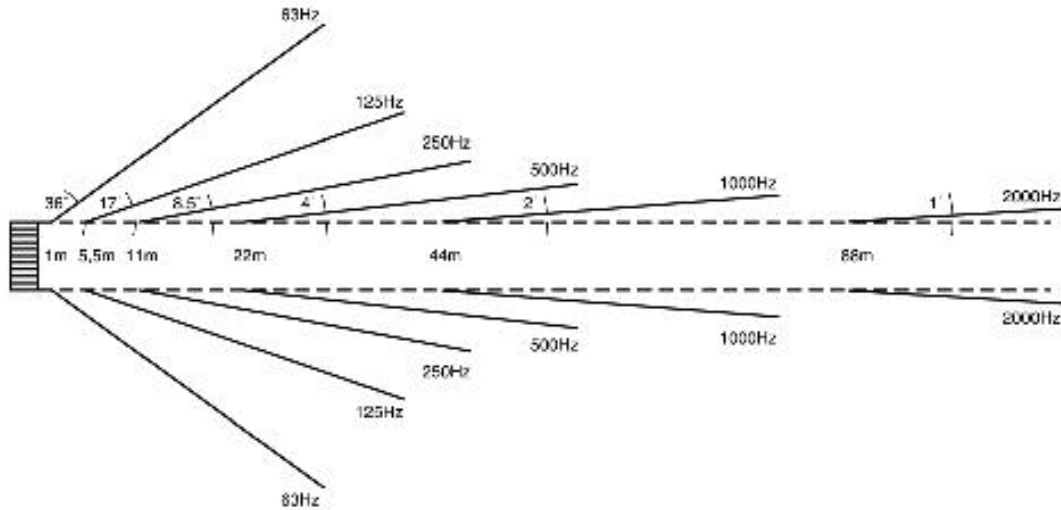


Abbildung 2.8
Vertikaler Öffnungswinkel einer 4 m langen Linienquelle mit Übergang vom Nah- zum Fernfeld

Die vertikale Richtcharakteristik eines gerade Linienstrahlers ist gekennzeichnet durch den -6 dB-Öffnungswinkel des Hauptmaximums, der sich berechnet als:

$$D_v = 2 \sin^{-1} \left(\frac{0,6}{3hf} \right)$$

wobei h die Höhe des Arrays in m und f die Frequenz in kHz ist.

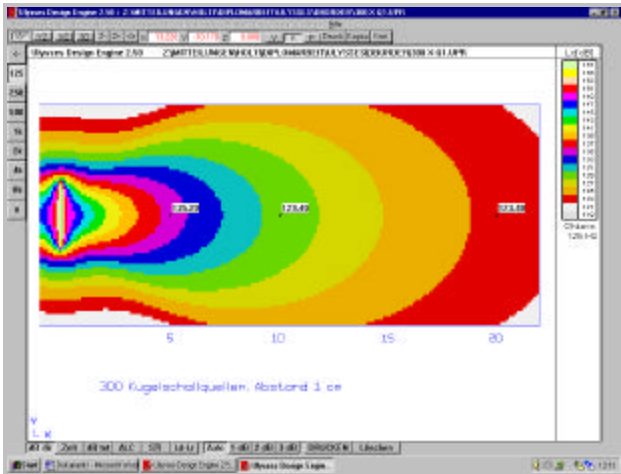


Abbildung 2.9
In der Abbildung ist das Abstrahlverhalten einer Anordnung von 300 linienförmig angeordneten Kugelschallquellen mit einem Abstand von 1 cm zueinander zu sehen. Bei der betrachteten Frequenz von 125 Hz befinden sich die angeklickten Pegelwerte im Fernfeld, was durch den Pegelabfall von 6 dB pro Entfernungsverdoppelung zu erkennen ist.

3 Raumakustische Modelle

Die Bestimmung der räumlichen und zeitlichen Verteilung des Schalldruckes in einem Raum ist im allgemeinen eine schwierige Aufgabe. Zu ihrer Lösung bedient man sich verschiedener Methoden.

Nach den jeweils verwendeten Methoden unterteilt man die Raumakustik in eine wellentheoretische, eine geometrische und eine statistische Raumakustik. Streng genommen gibt es aber nur zwei verschiedene Methoden zur Analyse von Schallvorgängen in Räumen:

1. Die Lösung der Wellengleichung unter Berücksichtigung der Randbedingungen an den Raumgrenzen (wellentheoretische Raumakustik)
2. Die Untersuchung der mehrfachen Reflexion von Schallstrahlen zwischen den Raumgrenzen (geometrische Raumakustik).

Wenn die Zahl der möglichen Eigenschwingungen bzw. die Zahl der aufeinander folgenden Reflexionen eines Strahles sehr groß sind, müssen bei beiden Methoden statistische Verfahren angewandt werden.

3.1 Wellentheoretische Raumakustik

Wenn die Raumabmessungen wenige Wellenlängen betragen, muss man die Schallausbreitung als Wellenvorgang ansehen; die Raumresonanzen spielen eine wesentliche Rolle.

Die Wellenausbreitung in einem akustischen System ist (unter Vernachlässigung der bei hohen Schallpegeln typischen nichtlinearen Effekte, der strömungs-mechanisch bedingten Reibungseffekte und von Inhomogenitäten im Ausbreitungsmedium) vollständig durch eine partielle Differentialgleichung beschrieben, die sogenannte Wellengleichung.

Wenn man die Zahl der abhängigen Variablen in der Wellengleichung mittels Fourier-Transformation reduziert, erhält man die sogenannte Helmholtz-Gleichung, deren Lösung unter Beachtung von (linearen) Randbedingungen möglich ist. Eine

analytische oder auch nur numerische Lösung dieser Gleichung ist aber nur für sehr einfache Fälle praktikabel, da die Eigenlösungen nur für sehr einfache Raumgeometrien analytisch bestimmt werden können.

Hierzu bietet sich besonders die *Methode der finiten Elemente (FEM)* an, wobei das Feldgebiet in eine große Anzahl von Einzelgebieten (meist Tetraeder oder Hexaeder) zerlegt wird. Die Helmholtzsche Differentialgleichung wird in ein lineares Gleichungssystem überführt, das wiederum numerisch gelöst werden kann.

3.2 Geometrische Raumakustik

Die geometrische Raumakustik betrachtet den Frequenzbereich in einem Raum, in dem Schall durch seinen Teilchencharakter beschrieben werden kann, die Wellenlänge also sehr klein zu den Raumdimensionen ist. Der Wellencharakter des Schalls wird bei diesem Ansatz vernachlässigt.

Es bewährt sich die Vorstellung von Schallstrahlen, die von der Schallquelle ausgehend sich geradlinig ausbreiten und an den Raumbegrenzungsflächen gespiegelt bzw. gestreut werden.

Man kann sich zur Veranschaulichung eine Schallquelle als Sender von (unendlich vielen) Schallteilchen mit einer gewissen Energie vorstellen. Das Richtverhalten der Schallquelle wird durch die richtungsabhängige Dichte der Schallteilchen beschrieben. Vom Sender gelangen die Schallteilchen als Direktschall auf direktem Wege oder durch einfache oder mehrfache Reflexion (respektive Streuung) an den Raumbegrenzungsflächen zum Empfänger. Durch eine frequenzabhängige Verminderung der Energie kann die Absorption auf den Flächen und auch die Luftdämpfung beschrieben werden. Das Schallfeld berechnet sich nun aus der Energie der auftreffenden Schallteilchen.

Wenn die Anzahl der sich überlagernden direkten und reflektierten Strahlen sehr groß wird, lassen sich die Wege der einzelnen Strahlen nicht mehr verfolgen; es sind nur noch statistische Aussagen über das Schallfeld möglich. In diesem Fall ist auch die Anzahl der Eigenfrequenzen des Raumes überaus groß.

3.3 Akustische Simulationstechnik

In vielen Bereichen der Technik sind leistungsfähige Simulationswerkzeuge zum unverzichtbaren Hilfsmittel bei der Planung, Entwicklung und Evaluierung komplexer Systeme geworden. Auch bei der Planung von Raum- und Elektroakustik ist es heutzutage üblich mit Hilfe von Simulationen, im Vorfeld konkrete Aussagen über die zu erwartenden Ergebnisse machen zu können.

Als es noch keine Computerprogramme zur akustischen Simulation gab, wurde häufig die Modellmesstechnik angewandt. Dazu hat man zumeist Modelle im Maßstab 1:20 gebaut und man benutzte Signale, die ebenfalls um den Faktor 20 transformiert wurden.

Heute bietet die computergestützte akustische Simulationstechnik die Möglichkeit der Visualisierung von Schallfeldern und auch der Auralisation akustischer Signale, also gleichsam des Hineinhörens in virtuelle Räume.

Dazu werden die geometrischen Parameter der Raumbegrenzungsflächen des zu simulierenden Raumes und die frequenzabhängigen Absorptionskoeffizienten (ggf. auch Diffusionskoeffizienten) der entsprechenden Flächen eingegeben. Schallquellen werden in der Regel als Punktschallquellen eingebracht, deren räumliches Abstrahlverhalten durch sogenannte Daten-Balloons beschrieben wird. Direktschallverteilungen können dabei geometrisch ermittelt werden, während für Raumeinflüsse statistische Verfahren und Verfahren der geometrischen Raumakustik genutzt werden.

4 Die Software Ulysses

Die Software Ulysses ist ein Simulationsprogramm aus dem Bereich des Computer Aided Acoustic Design (CAAD). Es unterstützt also den Anwender bei der Planung von Raum- und Elektroakustik. Das Software-Paket besteht im wesentlichen aus vier Modulen, die im Folgenden näher beschrieben werden sollen.



Abbildung 4.1
Die vier Ulysses-Module

4.1 Ulysses Design Engine

Die Design Engine ist das Kern-Programm, in dem die Modelle gezeichnet werden. Hier werden auch den Flächen die Materialien zugewiesen und die Lautsprecher eingebracht. In der Design Engine werden letztlich auch alle Berechnungen durchgeführt.

4.1.1 Nachhallzeit

Ausgehend vom Volumen, den Flächen und den jeweiligen Absorptionskoeffizienten können zunächst Nachhallzeiten (RT_{60}) nach den bekannten Verfahren (Sabine, Eyring, Fitzroy) berechnet werden. Die Darstellung erfolgt für die 7 Oktav-Mittelfrequenzen von 125 bis 8000 Hz grafisch mit und ohne Luftabsorption.

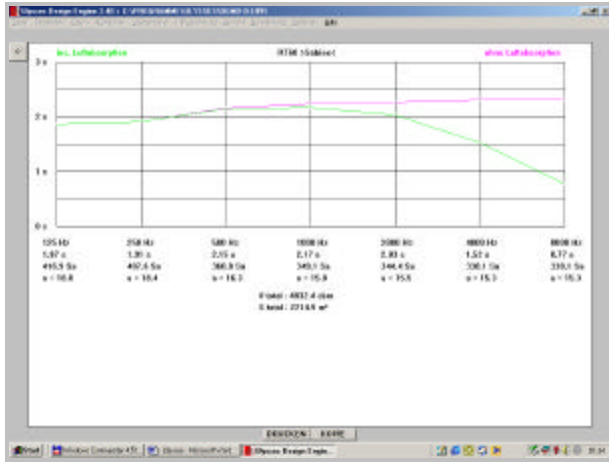


Abbildung 4.2
Screenshot, Nachhallzeitendiagramm

4.1.2 Pegel- und Zeitberechnung

Aufgrund der so berechneten Nachhallzeiten und statistischer Aussagen über das Schallfeld kann eine sogenannte Pegel- und Zeit-Berechnung durchgeführt werden. Deren Ergebnisse werden als farbige Bereiche auf der Hörfläche dargestellt. Dabei liegen alle Werte für die 7 Oktav-Bänder von 125 bis 8000 Hz in einem Berechnungsvorgang vor.

Mit den jeweiligen Schaltflächen am linken Bildrand lässt sich einfach zwischen den gewünschten Frequenzbereichen umschalten. Mit einem Klick auf die Hörfläche kann der numerische Wert an der entsprechenden Position eingeblendet werden. Die Resultate lassen sich auch direkt ausdrucken oder in andere Grafik- oder Textverarbeitungsprogramme kopieren.

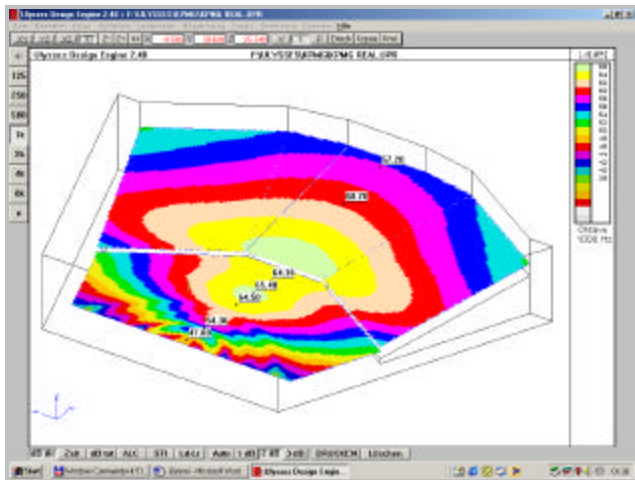


Abbildung 4.3
Screenshot, Pegeldarstellung

Die folgenden Ergebnisse der Pegel- und Zeit-Berechnung können mit den entsprechenden Schaltflächen am unteren Bildrand angezeigt werden:

dB dir - Direktschallschalldruckpegel (wahlweise mit frühen Reflexionen)

Zeit - Ankunftszeit des ersten Schallimpulses

dB tot - Summe aus Direkt - und Diffusschallschalldruckpegel

ALC - Artikulationsverlust von Konsonanten (%Alcons)

STI - Speech Transmission Index

Ld-Lr - Differenz aus Direkt - und Diffusschallschalldruckpegel

Die Pegelsummation kann betragsweise oder amplituden- und phasenrichtig (komplexe Summation) erfolgen, wobei entweder die Phasenbeziehung der Oktav-Mittenfrequenz oder die Phasenbeziehungen der jeweiligen drei Terzbänder in Oktavmitte berücksichtigt werden.

4.1.3 Reflektogramme

Ein Raytracing bis 40. Ordnung kann an beliebigen Punkten im Raum durchgeführt werden. Dabei werden die Laufzeiten, Richtungen und Schalldruckpegel einzelner Reflexionen bis zu vorgegebener Ordnung bestimmt. Die daraus folgenden Pfade der Strahlen können im dreidimensionalen Modell dargestellt werden. Die Impulsantwort oder allgemeiner der zugehörige Verlauf der Energie wird im Pegel-Zeit-Diagramm (engl. ETC – Energie Time Curve) grafisch abgebildet.

Es wird mit einer Kombination aus den beiden Verfahren der geometrischen Akustik mit Spiegelquellen bzw. Strahlenverfolgung gearbeitet. Da das Spiegelquellenverfahren zwar zu 100% genau ist, aber der Rechenaufwand mit höherer Ordnungszahl zu groß wird, arbeitet Ulysses bei der Berechnung zunächst mit dem Spiegelquellenverfahren und wechselt bei höherer Ordnung zur Strahlenverfolgung.

Spiegelquellenverfahren

Bei der Reflexion erster Ordnung wird zunächst jede Quelle an jeder von ihr aus sichtbaren Begrenzungsfläche gespiegelt. Für die Reflexion zweiter Ordnung werden die nun entstandenen Spiegelquellen wiederum an allen von ihnen aus sichtbaren Begrenzungsflächen gespiegelt. Die möglichen Pfade werden über die dazwischen zustande gekommenen Schnittpunkte mit den Begrenzungsflächen ermittelt.

Die Anzahl der Quellen steigt dabei exponentiell an. Für einen einfachen Raum mit 40 Flächen und zwei Quellen sind somit für den Direktschall zwei Quellen, für die erste Reflexion 80 Quellen, für die Reflexion 2. Ordnung immerhin schon 3.200 Quellen und für die Reflexion 3. Ordnung gar 128.000 Quellen zu berücksichtigen. Wie man sieht, steigt der Rechenaufwand damit sehr schnell - näherungsweise mit der Anzahl der Flächen potenziert mit der gewählten Ordnung der Reflexion.

Strahlenverfolgung

Es werden kugelförmig um die Schallquelle(n) herum im 1-Grad-Raster ca. 65.000 Strahlen ausgesandt. Es wird berechnet, ob ein solcher Strahl nach Reflexion an den Raumbegrenzungsflächen den Empfängerpunkt trifft bzw. nahe genug am Empfängerpunkt liegt um als Treffer gewertet werden zu können.

Bei der Strahlenverfolgung steigt der Rechenaufwand nur linear – näherungsweise mit der Anzahl der Flächen mal der gewählten Ordnung der Reflexion. Da die Anzahl der ausgesandten Strahlen aber nicht unendlich sein kann, wird nicht unbedingt jeder mögliche Pfad gefunden. Die mögliche Präzision ist linear abhängig von der Anzahl verfolgter Strahlen. Da die Strahlen mit zunehmender Laufzeit auseinanderstreben, ist die Trefferchance bei diesem Verfahren zusätzlich abhängig von Zeit bzw. zurückgelegter Wegstrecke. Sie ist hoch für kurze Laufzeiten und nimmt mit zunehmender Laufzeit kontinuierlich ab.

4.1.4 Auralisation

Mit den Daten aus dem Energie-Zeit-Diagramm kann ein Transformationsschema gewonnen und als Transformationsdatei (*.UAP) gespeichert werden, welche im wesentlichen der Raumimpulsantwort entspricht. Durch Faltung eines beliebigen Anregungssignals (Wave-Datei) mit der berechneten Raumimpulsantwort entsteht ein Zeitsignal. Dieses beschreibt die akustischen Einflüsse des Raumes bei der Übertragung von dem gegebenen Sender zum Empfänger auf das Eingangssignal, was dem Hörerlebnis an entsprechender Stelle im Raum entspricht. Somit kann also eine beliebige Audiodatei (*.WAV) transformiert und angehört werden.

Der hierbei verwendete Algorithmus benutzt keinerlei Vereinfachungen, um den Rechenprozess zu verkürzen. Jeder einzelne Impuls wird für alle 7 Oktaven zur Berechnung benutzt und es werden keine statistischen Methoden zur Auffüllung des Ergebnisses verwendet.

Daher gibt es noch eine weitere Möglichkeit der Auralisation. Dazu kann durch Anklicken eines gewünschten Punktes auf der Hörfläche (mit einer zuvor ausgewählten beliebigen Wave-Datei) eine sogenannte Echtzeit-Auralisation mit einem vereinfachten Algorithmus gestartet werden. Hier wird je nach Komplexität des Raummodells bis maximal zur 3. Reflexionsordnung gerechnet und der Rest als statistischer Nachhall angehängt. Dieser Nachhall wird aus geditherten Einzelimpulsen gemäß der theoretischen Schröder-Rückwärtsintegrationskurve gebildet.

Bedingt durch die geringe Rechentiefe, ist diese Art der Auralisation natürlich kompromissbehaftet und kann starke Artefakte aufweisen. Sie vermittelt aber häufig sehr schnell einen ersten Höreindruck vom Ergebnis am gewählten Hörerplatz.

4.2 Absorber Base

Die Absorber Base ist ein eigenständiges Modul, das die Materialien verwaltet, mit denen die Raumbegrenzungsflächen belegt werden können. Die Absorptionsgrade der Materialien werden in Oktaven von 125 bis 8000 Hz angegeben.

The screenshot shows a window titled 'Ulysses Lautsprecher Datenblatt' with a menu bar containing 'Datei' and 'Hilfe'. The main content is a data table with the following structure:

Ulysses Lautsprecher Datenblatt							
Hersteller	L-ACOUSTICS						
Typ	19ER DV						
Datenherkunft	Volker Holtmeyer						
dto.	IFB						
Importformat							
Frequenz [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Nennleistung(AES)[W]	300	300	300	79	84	120	502
Schalldruck 1W/1m [dB]	73.4	73.4	73.4	83.2	80.0	81.2	75.0
Nennimpedanz [Ohm]	8	8	8	8	8	8	8
Bündelungsfaktor	1.5	2.1	3.6	4.7	4.2	5.1	13.7
Bündelungsmaß [dB]	1.8	3.2	5.6	6.7	6.2	7.1	11.4
Wirkungsgrad [%]	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
Kommentar	19ter Teil eines dV-DOSC						

Abbildung 4.5
Screenshot, Speaker Builder

Die Datenbank ist ausdrücklich nicht offen gestaltet, so dass sich Herstellerangaben nicht ändern lassen. So lässt sich vermeiden, dass Lautsprecher vom gleichen Typ unterschiedliche Daten aufweisen. Daten für alle gängigen Lautsprecher von zahlreichen Herstellern befinden sich ebenfalls auf der IFB-Homepage.

4.4 Viewer

Der Viewer dient ausschließlich der Darstellung von Berechnungen und er entspricht im wesentlichen dem Aufbau der Design Engine, wobei die Editiermöglichkeiten eingeschränkt sind. So besteht beispielsweise die Möglichkeit, einem Kunden Arbeitsergebnisse zusammen mit dem Viewer als E-Mail zu schicken.

5 Beschallung großer Auditorien

5.1 Konventionelle Lautsprecher-Cluster

Eines der bedeutenden Kriterien für moderne Beschallungsanlagen ist ein hoher Schalldruckpegel für den gesamten hörbaren Frequenzbereich. Mit einem einzigen Lautsprecher stößt man da sehr bald an Grenzen. Darum bildet man üblicherweise sogenannte Cluster; man gruppiert also eine gewisse Anzahl an Lautsprechern. Im einfachsten Fall kann das die simple Aufstellung von zwei Lautsprechern nebeneinander sein.

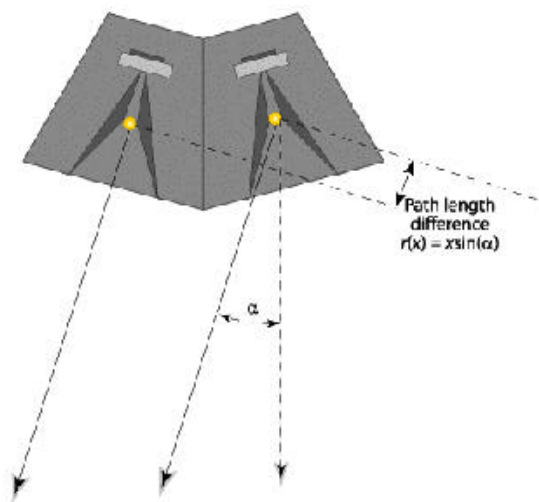


Abbildung 5.1
Wegunterschied zweier Lautsprecher

Wie leicht nachzuvollziehen ist, treffen von beiden Quellen zeitgleich ausgesandte Signale für die meisten Punkte im Raum mit einem zeitlichen Versatz ein. Dadurch entstehen Interferenzen, die im Raum ein Interferenzmuster bilden, wie schon zuvor beschrieben. Lediglich für tiefe Frequenzen, wo die Wellenlänge größer als der Abstand der Quellen ist, koppeln beide Quellen und wirken wie eine einzige.

Darum versucht man bei der konventionellen Cluster-Bildung im Tieftonbereich eine Kopplung der Tieftontreiber zu erreichen. Für den Hochtonbereich ist dies nicht möglich und man verwendet stark bündelnde Hornsysteme mit einem möglichst konstanten Richtverhalten. Diese sind jeweils auf unterschiedliche Bereiche des Auditoriums gerichtet und man versucht die Überlappungsbereiche möglichst klein zu halten.



Abbildung 5.2
Überlappungsbereiche bei der
konventionellen Cluster-Bildung

Solche Array-Lautsprecher haben aufgrund ihres hohen Bündelungsfaktors eine höhere Sensitivity, vermögen also in Hauptabstrahlrichtung mehr Schalldruck zu erzeugen, als Lautsprecher mit geringerer Bündelung. Die insgesamt abgestrahlte Energie ist hingegen gleich.

Mit dieser Art der Anordnung von Lautsprechern gelingt es durchaus für viele Zuhörer eine breitbandige Schalldruckpegelerhöhung zu erzielen. Allerdings sind die räumlichen Übernahmehbereiche der einzelnen Lautsprecher äußerst kritisch zu betrachten. Hier kommt es zu Einbrüchen im Frequenzgang, die sich - da durch destruktive Interferenzen verursacht - auch nicht etwa durch einen Equalizer ausgleichen lassen.

5.2 Moderne Line-Arrays

Hier setzt nun der Grundgedanke moderner Line-Array-Lautsprechersysteme an. Ziel ist es, für den gesamten Frequenzbereich eine kohärente Wellenfront zu erzeugen; ein Line-Array soll also quasi als ein einziger großer Lautsprecher agieren.

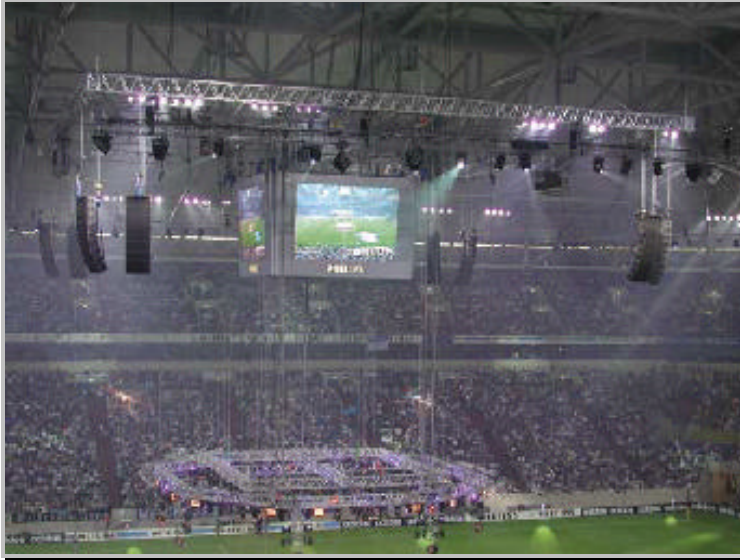


Abbildung 5.3
Beschallung einer Arena mit Line-Arrays

Um das System leichter handhabbar zu machen und um es für verschiedene Anforderungen konfigurieren zu können, ist es modular aufgebaut. Das bedeutet, dass es in mehrere Elemente unterteilt ist, die in der Regel als Mehrwegesystem aufgebaut sind. Dieses beinhaltet wiederum neben konventionellen Konuslautsprechern sogenannte Waveguides für den Hochtonanteil.

5.2.1 Waveguides

Bei einem Line-Array ist es von erheblicher Bedeutung, dass eine zusammenhängende Wellenfront erzeugt wird. Dazu bedarf es einer kohärenten Kopplung der einzelnen schallabstrahlenden Systeme, was einen maximalen Abstand der akustischen Zentren von der halben Wellenlänge zueinander voraussetzt. Für den Tief- und Mitteltonbereich, wo die Wellenlänge groß ist, ist das noch kein Problem und es kann mit herkömmlichen Konus-Treibern gearbeitet werden.

Schwierig wird es allerdings am oberen Ende des menschlichen Hörbereichs. Möchte man für eine hochwertige Musikdarbietung als höchste Frequenz beispielsweise 16 kHz übertragen, entspricht das einer Wellenlänge von etwa 21 mm. Demzufolge müsste ein Treiberabstand von ca. 10 mm eingehalten werden. Mit gewöhnlichen Treibern ist das nicht mehr zu realisieren, woraus ersichtlich wird, dass dem Problem durch eine schlichte Aufreihung von Quellen nicht begegnet werden kann.

Um nun auch im Hochtonbereich eine kohärente Wellenfront über die gesamte Höhe des Line-Array-Elementes - und damit über die Höhe des gesamten Arrays - zu bilden, gibt es von den verschiedenen Herstellern die unterschiedlichsten Ansätze, die im Folgenden kurz erläutert werden sollen.

5.2.1.1 Koerzitiv-Waveguides

Die wohl einfachste Lösung ist die Verwendung eines konventionellen Kompressionstreibers mit einem langen Horn, das eine im Verhältnis zur Länge kleine schlitzartige Schallaustrittsöffnung hat. Durch die lange Schallführung wird erreicht, dass ein geringer Laufzeitunterschied der aus der Hornmündung austretenden Schallanteile besteht.

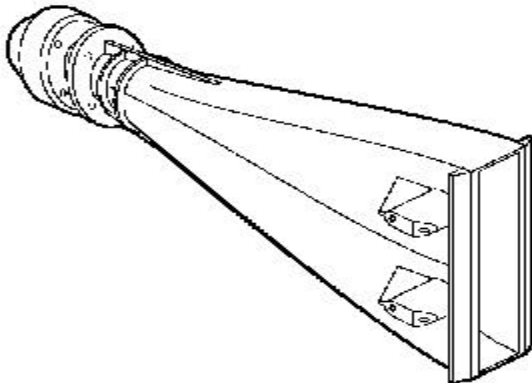


Abbildung 5.4
WaveFormer™ der Firma JBL

Die dennoch gekrümmte Wellenfront darf eine Phasendifferenz von einer viertel Wellenlänge nicht überschreiten, um mit dem darüber bzw. darunter anschließenden Waveguide kohärent zu koppeln.

5.2.1.2 Schallführung in Kanälen

Häufig anzutreffen ist auch die Schallführung mittels unterschiedlicher Kanäle. Diese Kanäle werden von einem konventionellen Kompressionstreiber angetrieben und leiten den Schall zu mehreren übereinander angeordneten Austrittsöffnungen. Diese Öffnungen emittieren den Schall weitgehend sphärisch, weisen aber aufgrund ihres geringen Abstandes eine kohärente Kopplung auf.

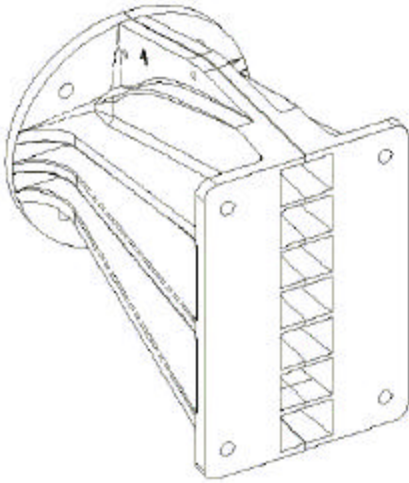


Abbildung 5.5
Hydra™ der Firma ElectroVoice

Die einzelnen Kanäle haben zumeist eine unterschiedliche Länge und beinhalten bei einigen Herstellern zusätzlich Materialien (Schaumstoff o.ä.), welche die Geschwindigkeit des Schalls mindern sollen. So kann auch bei einer solchen Konstruktion eine zusammenhängende Wellenfront erzielt werden.

5.2.1.3 DOSC-Waveguide

Von der Firma L-Acoustics patentiert ist eine Schallführung nach der sogenannten Wavefront Sculpture Technology™ (WST™). Dabei wird ein konventioneller Kompressionstreiber an eine Schallführung angeschlossen, die alle Schallanteile kontinuierlich derart umlenkt, dass sie aus der spaltförmigen Mündung phasengleich austreten.

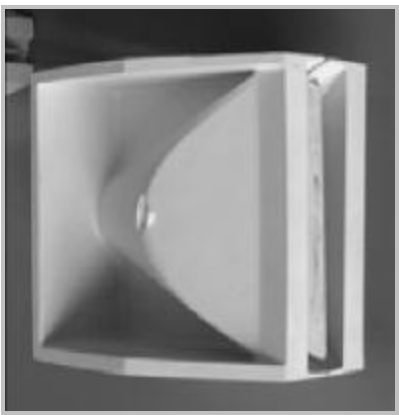


Abbildung 5.6
DOSC-Waveguide

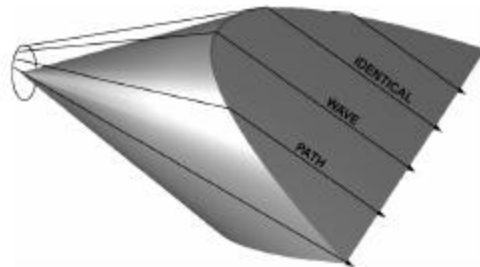


Abbildung 5.7
Pfade im DOSC-Waveguide

Dazu wurde gewissermaßen ein eingehüllter Phaseplug entwickelt, um den herum alle Pfade vom Treiberanschluss bis zur Austrittsöffnung eine konstante Länge aufweisen.

5.2.1.4 Parabolischer Reflektor

Ein neuer und innovativer Ansatz wurde von der Firma NEXO in den Modellen der GEO-Serie verwirklicht. Unter Verwendung eines parabolisch geformten akustischen Spiegels wird der Schall, der von einem konventionellen Kompressionstreiber erzeugt wird, umgelenkt. Durch die Reflexion haben alle Schallanteile beim Erreichen der Austrittsöffnung die gleiche Laufzeit und sind damit phasengleich.



Abbildung 5.8
Parabolischer Reflektor

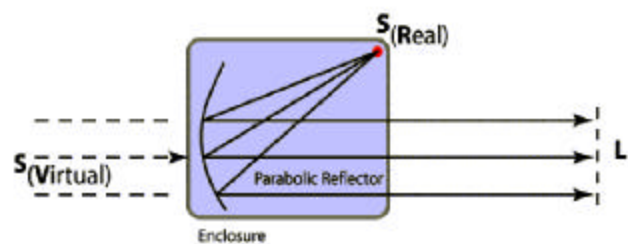


Abbildung 5.9
Prinzipieller Aufbau des parabolischen Reflektors

Als interessante Varianten gibt es auch noch elliptisch und hyperbolisch geformte Reflektoren. Der elliptische Reflektor hat die Eigenschaft, eine konkav gekrümmte Wellenfront zu bilden und so den Schall in einem Brennpunkt zu fokussieren. Mit dem hyperbolischen Reflektor, der eine konvex gekrümmte Wellenfront erzeugt, gelingt es mehrere Treiber als Punktschallquelle agieren zu lassen, indem man die virtuellen Brennpunkte überein bringt.

5.2.1.5 Bändchenhochtöner

Bei Großbeschallungslautsprechern selten anzutreffen sind Bändchenhochtöner. Bei einem klassischen Bändchenlautsprecher ist zwischen zwei entgegengesetzt gepolten Magnetplatten ein hauchdünnes, extrem massearmes Aluminiumbändchen gespannt. Es handelt sich um das gleiche Antriebsprinzip, wie bei einem Tauchspulenwandler, jedoch mit dem Vorteil, dass Spule und Membran identisch sind.

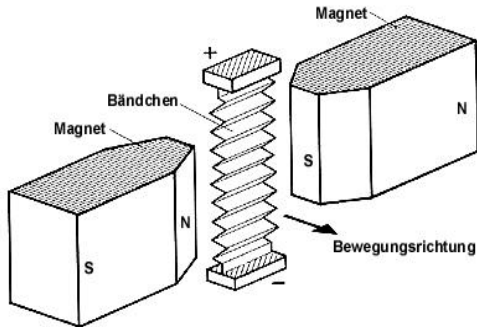


Abbildung 5.10
Prinzipieller Aufbau eines Bändchen-
lautsprechers



Abbildung 5.11
Line-Array mit Bändchenhochtönern

So kann eine sehr langes zusammenhängendes Band erreicht werden, dass auf der gesamten Länge isophasisch arbeitet. Aufgrund des geringen Wirkungsgrades ist diese Technik lediglich für den Hochtonbereich Interessant.

5.2.2 Abstrahlverhalten

Durch die Winklung der übereinander angeordneten Elemente zueinander – dem sogenannten Curving – kann eine Aufweitung des vertikalen Abstrahlverhaltens in gewissen Grenzen erreicht werden. Ein geringer Öffnungswinkel der vertikalen Abstrahlcharakteristik und zumeist ein trapezförmiger Querschnitt des Gehäuses wirken dabei einem Aufreißen der Wellenfront entgegen. So lässt sich gewissermaßen der vertikale Abstrahlwinkel skalieren.

Die horizontalen Abstrahleigenschaften bleiben dabei weitgehend unbeeinflusst und sind nicht veränderlich. Line-Array-Elemente besitzen häufig einen definierten horizontalen Abstrahlwinkel zwischen 70° und 120° . Der Abstrahlwinkel wird dabei so definiert, dass der Winkel angegeben wird, bei dem der Pegel um 6 dB gegenüber der Hauptabstrahlachse abgesunken ist. Bei einem konventionellen Cluster überlappen die Bereiche der einzelnen Lautsprecher bei -6 dB, wodurch an Punkten konstruktiver Interferenz der Pegel zu 0 wird, um ein möglichst gleichmäßiges Schallfeld zu erzeugen.

Durch das Curving kann auch die Energieverteilung für unterschiedliche Raumwinkel beeinflusst werden. So kann z.B. durch geringe Winkel zwischen den Elementen im oberen Bereich des Arrays ein höherer Schalldruckpegel für weit entfernte Zuhörerbereiche erzielt werden.

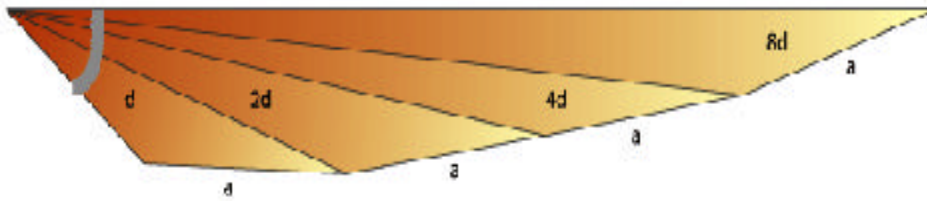


Abbildung 5.12
Prinzip des sogenannten Divergence Shading

Für einen konstanten Schalldruckpegel vom vorderen zum hinteren Bereich des Auditoriums, ist ein konstantes Verhältnis von der Länge der Hauptabstrahlachse jedes Elementes bis zur Hörfläche und dem Winkel zwischen dem jeweiligen Element und dem nächsten Element anzustreben. Als Formel ausgedrückt lautet das:

$$\frac{a_1}{a_1} = \frac{a_2}{a_2} = \dots = \frac{a_n}{a_n}$$

wobei a die Länge der Hauptabstrahlachse des Elementes bis zur Hörfläche ist und α der Winkel ist der vom jeweiligen Element und dem nächsten eingeschlossen wird. Verfahren dieser Art werden von den Herstellern auch Divergence Shading oder Constant Spacing genannt.



Abbildung 5.13
Curving am Beispiel Monarc MLA5

gewissermaßen passiv, was bedeutet, dass diese Größen zuvor vom Benutzer vorgegeben werden müssen und mithilfe des Programms gleichsam verifiziert werden.

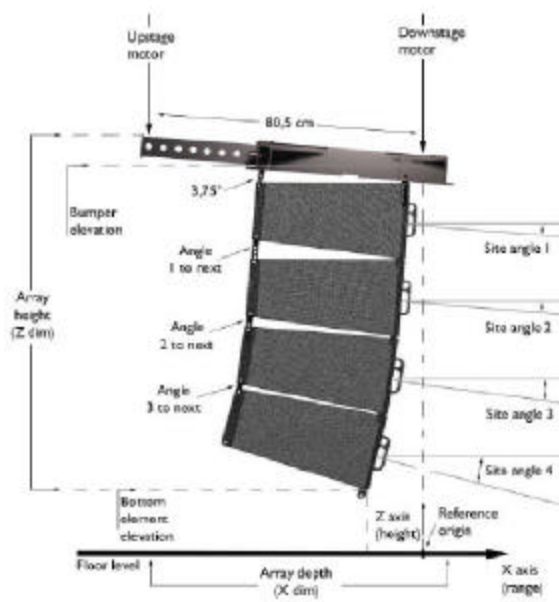


Abbildung 5.15
Parameter beim dV-DOSC-Array

Es wird auch eine einfache Berechnung des zu erwartenden Schalldruckpegels angezeigt. Diese Angabe ist jedoch nur als Richtwert anzusehen und nicht etwa gleichzusetzen mit Ergebnissen einer Simulation mit CAAD-Programmen. Auch wird hier lediglich der Direktschall betrachtet; die Raumakustik und die Interaktion mehrerer Lautsprecher findet keine Berücksichtigung.

6 Simulation realer Line-Arrays

Wie bereits im zweiten Kapitel nachgewiesen, ist es grundsätzlich möglich, mit der Software Ulysses ein Zylinderwellenverhalten zu simulieren. Die prinzipielle Simulation eines Linienstrahlers ist nun aber von geringerem Interesse. Vielmehr möchte man in den meisten Fällen natürlich keinen fiktiven diskreten Linienstrahler, sondern ein reales Line-Array simulieren – woraus sich ein praktischer Nutzen ergibt.

Aufbauend auf dem physikalischen Gesetz, dass sich eine Reihe von Kugelwellen zu einer Zylinderwelle überlagern respektive sich eine Linienquelle durch eine Reihe von Punktquellen ersetzen lässt, ließe sich hier mit der Überlegung ansetzen, ein reales Line-Array in hinreichend viele Quellen zu separieren. Jedoch bleibt die Frage, wie diese Quellen zu beschreiben sind. Vor allem, wie müssen die Balloon-Daten dieser Quellen aussehen? Diese Daten lassen sich naturgemäß nicht etwa durch eine Messung bestimmen.

6.1 Daten für die Simulation

Messbar ist beispielsweise lediglich das Verhalten eines einzelnen Line-Array-Elementes. Hier hatte der Autor die Gelegenheit, auf Daten eines dV-DOSC-Systems des Herstellers L-Acoustics (siehe Anhang) zugreifen zu können. Die Daten bestehen aus absoluten Schalldruckpegelwerten, die unter simulierten Freifeldbedingungen horizontal und vertikal in 5°-Schritten um ein einzelnes Element in einem Abstand von 4 m aufgenommen wurden.

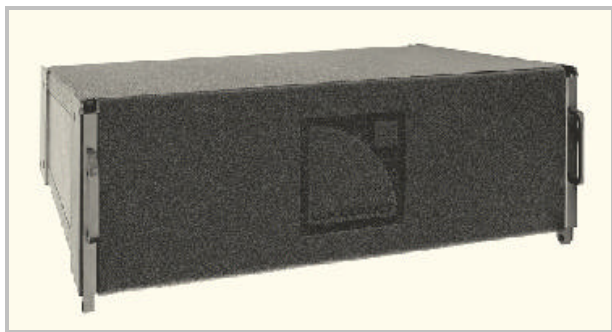


Abbildung 6.1
Line-Array-Element, L-Acoustics dV-DOSC

Wichtig für die Aufnahme von Schalldruckpegeln für einen Daten-Balloon ist, dass die Messung im Fernfeld des Lautsprechers geschieht. Nur im Fernfeld hat die verein-

fachte Betrachtung eines Lautsprechers als Punktquelle mittels Balloon-Daten Gültigkeit. Die Messpunkte müssen sich also in einem hinreichend großen Abstand zur Quelle befinden.

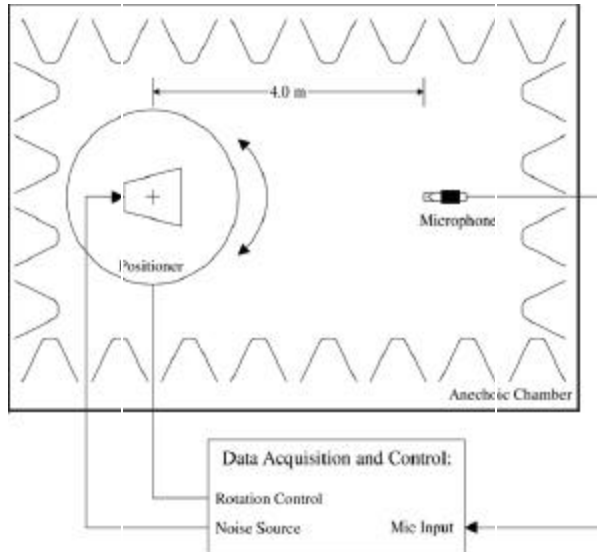


Abbildung 6.2
Prinzipieller Aufbau zur Messung des Abstrahlverhaltens von Lautsprechern

Für das vorliegende Line-Array-Element mit einer Höhe $l = 229 \text{ mm}$ und einer maximal betrachteten Frequenz² von $f = 10.000 \text{ Hz}$ berechnet sich der Übergang zum Fernfeld wie folgt:

$$r_{\text{Fern}} = \frac{(0,229\text{m})^2 \cdot 10.000\text{Hz}}{340\text{m/s}} = 1,54\text{m}$$

Damit ist die beschriebene Bedingung für eine Messentfernung von 4 m erfüllt.

6.1.1 Ulysses Native Format

Das Ulysses Native Format (*.UNF) ist eine Datei in der die Daten erfasst werden, die das räumliche Abstrahlverhalten von Lautsprechern beschreiben. Diese Dateien sind Grundlage für die Berechnungen in Ulysses und werden im Speaker Builder verwaltet. Zur Zeit werden nur Schalldruckpegelwerte erfasst; Phasenbeziehungen finden noch keine Berücksichtigung.

² Die höchste Frequenz mit der in Ulysses gerechnet wird ist 10.000 Hz, da die Mittenfrequenz des höchsten Terzbandes der 8 kHz-Oktave 10.000 Hz ist.

Für die durch das Ulysses Native Format beschriebenen Daten wird auch häufig der bereits verwendete Begriff „Balloon“ gebraucht, was deutlich wird, wenn man im Speaker Builder die entsprechende Darstellungsform wählt.

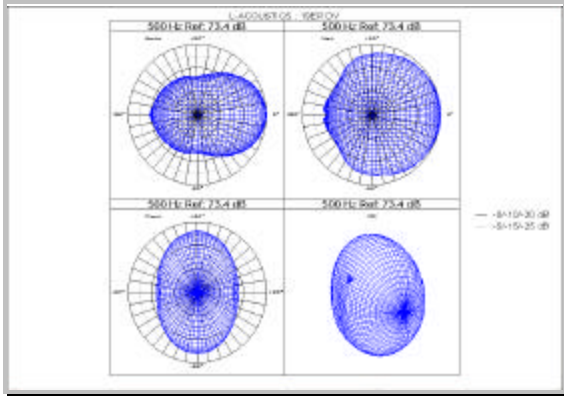


Abbildung 6.3
Balloon-Darstellung im Speaker Builder

Die Werte für das UNF werden in einem Kuglerraster in 5°- oder 10°-Schritten um den Lautsprecher herum aufgenommen. Das so zustande kommende Rasternetz kann man sich anschaulich vorstellen als Längengrade eines Globus, wobei es bei der 5°-Auflösung folglich 74 Längengrade mit je 37 Messpunkten gibt. Die Hauptabstrahlachse des Lautsprechers zeigt dabei quasi zum Nordpol.

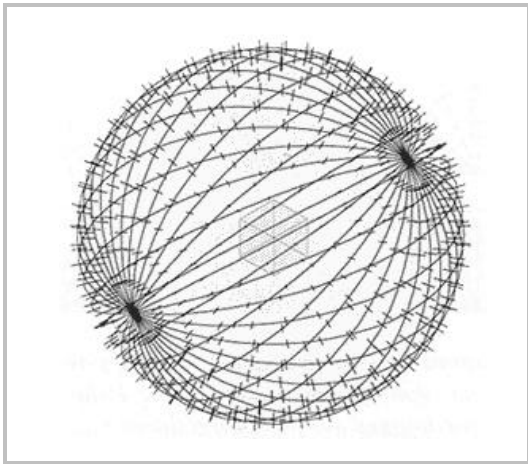


Abbildung 6.4
Messpunkte im Ulysses Native Format

Die UNF-Datei wird angeführt von einem vierzeiligen Header mit Bemerkungen. Danach folgen für jedes der 7 Oktav-Bänder von 125 bis 8.000 Hz ein Block in dem die absoluten Werte der Schalldruckpegel in dB angegeben werden, wobei die Messpunkte jeder Zeile aus einem 180°-Horizontalschwenk um den Lautsprecher

herum entstehen. Die erste Zeile beinhaltet also einen 180°-Horizontalschwenk bei 0° Rotation, die zweite einen 180°-Horizontalschwenk bei 5° (bzw. 10°) Rotation und so fort.

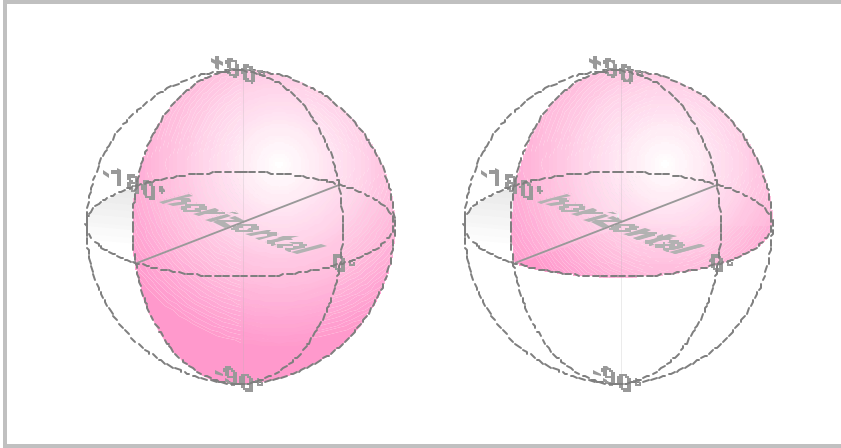


Abbildung 6.5
Erfasster Bereich beim Half- und Quarter-Format

Falls die Anordnung der Treiber des Lautsprechers symmetrisch ist, können bei der Aufnahme der Messpunkte Vereinfachungen gemacht werden. Ist der Lautsprecher beispielsweise symmetrisch zu seiner vertikalen Mittelachse, genügt es nur eine Hälfte des Lautsprechers im Half-Format zu vermessen. Bei einer Symmetrie zur vertikalen und horizontalen Mittelachse - etwa bei einem coaxialen Lautsprecher - ist es ausreichend, nur eine Viertelkugel für das Quarter-Format zu betrachten. Bei einem rotationssymmetrischen Deckenlautsprecher wären sogar noch weitere Simplifikationen denkbar.

Die Anzahl der Zeilen pro Oktav-Block ist abhängig vom Format und Subformat:

5° Full: 72 Zeilen á 37 Spalten

5° Half: 37 Zeilen á 37 Spalten

5° Quarter: 19 Zeilen á 37 Spalten

10° Full: 36 Zeilen á 19 Spalten

10° Half: 19 Zeilen á 19 Spalten

10° Quarter: 10 Zeilen á 19 Spalten

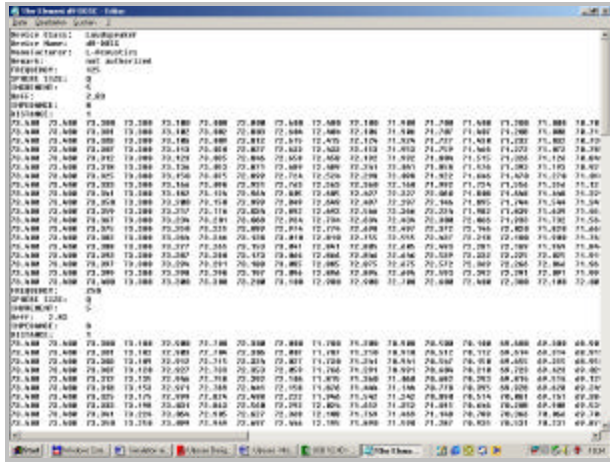


Abbildung 6.6
Screenshot, Ulysses Native Format (5° Quarter)

Zur Erstellung einer UNF-Datei können die Daten in eine gewöhnliche Textdatei kopiert werden, deren Endung *.TXT dann einfach durch die Endung *.UNF ersetzt wird. Im Spekaer Builder kann diese Datei importiert und ggf. zusammen mit einer Gehäusezeichnung in einer Lautsprecherdatenbank hinterlegt werden.

Zur Veranschaulichung ist im Folgenden für das 5°-Quarter-Format die räumliche Position eines Messpunktes dargestellt, der sich auf dem 16. Horizontalschwenk (Magenta 70°) befindet und welcher der 6. Messwert dieses Umlaufs (Blau 25°) ist.

	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	40°
Device Class:	Loudspeaker							
Device Name:	dV-DOSC							
Manufacturer:	L-Acoustics							
Remark:	nothing							
FREQUENCY:	125							
SPHERE SIZE:	Q							
INCREMENT:	5							
Ueff:	2.83							
IMPEDANCE:	8							
DISTANCE:	1							
0°	73.400	73.400	73.300	73.300	73.100	73.000	72.800	72.600
5°	73.400	73.400	73.301	73.300	73.102	73.002	72.803	72.604
10°	73.400	73.400	73.303	73.300	73.106	73.009	72.812	72.615
15°	73.400	73.400	73.307	73.300	73.113	73.020	72.827	72.633
20°	73.400	73.400	73.312	73.300	73.123	73.035	72.846	72.658
25°	73.400	73.400	73.318	73.300	73.136	73.053	72.871	72.689
30°	73.400	73.400	73.325	73.300	73.150	73.075	72.899	72.724
35°	73.400	73.400	73.333	73.300	73.166	73.098	72.931	72.763
40°	73.400	73.400	73.341	73.300	73.182	73.124	72.964	72.805
45°	73.400	73.400	73.350	73.300	73.200	73.150	72.999	72.849
50°	73.400	73.400	73.359	73.300	73.217	73.176	73.034	72.892
55°	73.400	73.400	73.367	73.300	73.234	73.201	73.068	72.934
60°	73.400	73.400	73.375	73.300	73.250	73.225	73.099	72.974
65°	73.400	73.400	73.382	73.300	73.264	73.246	73.128	73.010
70°	73.400	73.400	73.393	73.300	73.287	73.280	73.173	73.066
75°	73.400	73.400	73.388	73.300	73.277	73.265	73.153	73.041
85°	73.400	73.400	73.399	73.300	73.298	73.298	73.197	73.096
90°	73.400	73.400	73.400	73.300	73.300	73.300	73.200	73.100
FREQUENCY:	250							
SPHERE SIZE:	Q							
INCREMENT:	5							
Ueff:	2.83							
IMPEDANCE:	8							
DISTANCE:	1							
0°	73.400	73.400	73.300	73.100	72.900	72.700	72.300	72.000
5°	73.400	73.400	73.301	73.102	72.903	72.704	72.306	72.007
10°	73.400	73.400	73.303	73.109	72.912	72.715	72.324	72.027
15°	73.400	73.400	73.307	73.120

Abbildung 6.7 Beispiel-Messwert in der Ulysses-Nativ-Format-Datei

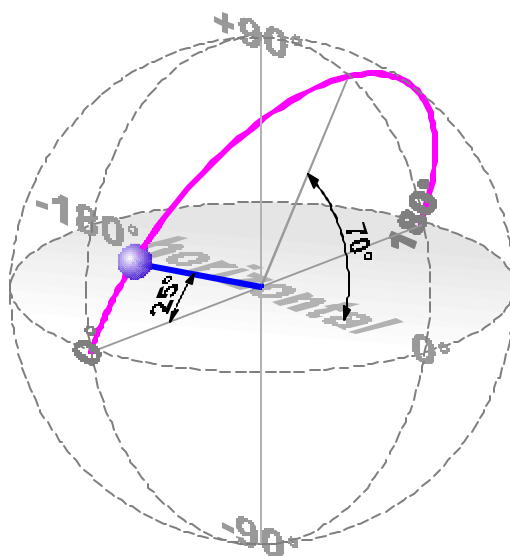


Abbildung 6.8 Position des Beispiel-Messwertes

6.1.2 Aufbereitung der Daten

Da die vorliegenden Daten des betrachteten Line-Array-Elementes nur aus horizontalen und vertikalen Plots bestehen, liegt noch kein vollständiger Daten-Balloon vor.

Ob der horizontalen und vertikalen Symmetrie der Treiberanordnung, genügt es ein UNF im Quarter-Format zu erzeugen. Dazu kann jeweils die horizontale Messreihe in die erste Zeile und die vertikale Messreihe in die letzte Zeile des jeweiligen Oktav-Blocks kopiert werden. Die 35 dazwischenliegenden Zeilen müssen nun interpoliert werden. Ein lineares Auffüllen, wie es beispielsweise in einem Spreadsheet-Programm recht einfach zu realisieren ist, führt hier nicht zum gewünschten Ergebnis, wie der Autor feststellen musste.

Eine elliptische Form des Balloons scheint näher an der vermutlichen Realität. Ausgehend von der allgemeinen Gleichung einer Ellipse

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

und den Substitutionen

$$x = r \cdot \cos \mathbf{a} \quad \text{und} \quad y = r \cdot \sin \mathbf{a}$$

lässt sich der Ellipsen-Radius zu

$$r = \sqrt{\frac{1}{\frac{\cos^2 \mathbf{a}}{a^2} + \frac{\sin^2 \mathbf{a}}{b^2}}}$$

berechnen, was im vorliegenden Fall dem gesuchten Pegel entspricht. Die variablen a und b sind durch den Pegel in der jeweiligen ersten und letzten Zeile zu ersetzen und α ist der Winkel des jeweiligen Umlaufs. Diese Formel ist demnach in die betreffenden Zellen der Spreadsheet-Datei einzutragen.

Abbildung 6.9
Der Screenshot zeigt die Excel-Datei für die UNF-Erstellung. In den gelb markierten Zeilen befinden sich die Werte eines horizontalen Umlaufs. In den grün markierten Zeilen befinden sich die Werte eines vertikalen Umlaufs. Die Werte der dazwischenliegenden Zeilen wurden elliptisch interpoliert.

6.2 Substitution des gemessenen Balloon

Der nun vorliegende Balloon beschreibt das Line-Array-Element als Punktschallquelle. Grundsätzlich ließen sich mit diesem Balloon Simulationen mit Ulysses erstellen, die auch Gültigkeit haben, solange nur das Fernfeld (zur Erinnerung $r_{\text{Fern}} = 1,54 \text{ m}$) betrachtet wird. Falsch wäre es jedoch, Simulationen mit mehrerer dieser Quellen in Line-Array-üblicher Anordnung durchzuführen. Im mittel- und hochfrequenten Bereich würde es hier zu Fehlern kommen, da die akustische Kopplung der Waveguides nicht berücksichtigt wird.

Es gilt also insbesondere das Verhalten der Waveguides nachzubilden, welche als solche schon eine kleine Linienschallquelle darstellen. Wie bereits beschrieben, ist der Ansatz, die Linienquelle in hinreichend viele Punktquellen zu separieren. Dieser Ansatz wird nun konkret, indem es einen gemessenen Balloon gibt, der durch eine gewisse Anzahl von Balloons ersetzt werden soll.

Ziel ist es demnach das Verhalten einer linienförmig angeordneten Anzahl von Quellen gleich dem Verhalten eines vorgegebenen Balloon zu machen. Dazu sind die Balloon-Daten der einzelnen Quellen sowie deren Anzahl 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 ist.

6.2.1 Abstand der substituierenden Quellen

Zunächst soll untersucht werden, welcher Abstand zwischen den Quellen anzustreben ist. Damit in Richtung der Aufreihung überhaupt ein Pegel erzeugt werden kann muss der Abstand der Quellen kleiner als die halbe Wellenlänge sein, wobei die kleinste vorkommende Wellenlänge zu berücksichtigen ist.

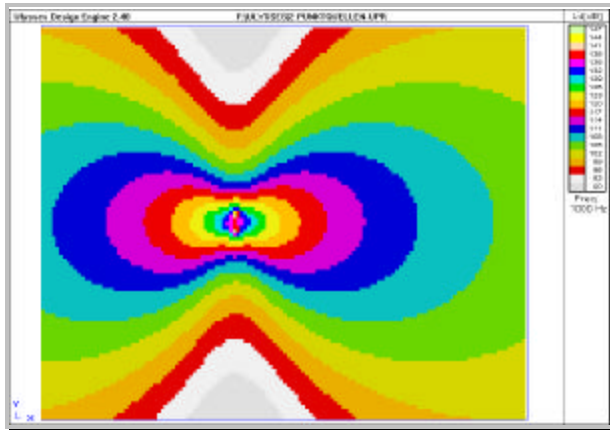


Abbildung 6.10
Abstand zweier Quellen gleich der halben Wellenlänge

In der Abbildung 6.10 wurden experimentell zwei Punktquellen 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.

Konstruktiv wurde für die folgenden Untersuchungen ein Quellenabstand von 10 mm festgelegt. Für die höchste in Ulysses betrachtete Frequenz von 10.000 Hz beträgt die halbe Wellenlänge etwa 17 mm, womit der gewählte Abstand ausreichend erscheint.

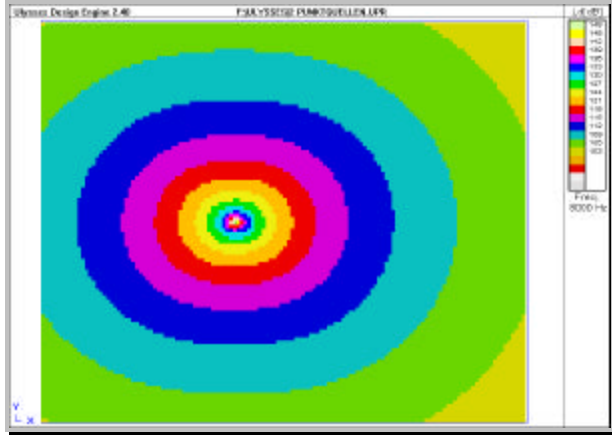


Abbildung 6.11
Abstand zweier Quellen gleich etwa einem Drittel
der Wellenlänge

In der Abbildung 6.11 ist für einen Quellenabstand von 10 mm die Berechnung bei 8.000 Hz dargestellt, da die höchste Frequenz von 10.000 Hz nur intern bei der Oktav-Mittelung auftritt. Zu erkennen ist aber eine deutliche Kopplung, die auch ein akkurates Ergebnis bei 10.000 Hz vermuten lässt.

6.2.2 Anzahl der substituierenden Quellen

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

$$n = \frac{h}{d} + 1$$

berechnen, 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.

6.2.3 Balloon der substituierenden Quellen

Den Balloon der substituierenden Quellen zu bestimmen ist, wie zunächst scheint, keine leichte Aufgabe. Daher soll als erstes untersucht werden, wie sich 19

Kugelschallquellen³ an den zuvor hergeleiteten Positionen verhalten. Dazu wurde mit Ulysses das folgende - zugegeben pragmatische - Konstrukt erstellt:

Um einen Mittelpunkt herum sind mit einem Radius von 4 m in 5°-Schritten kleine Hörflächen gruppiert. Im Zentrum dieser Anordnung befinden sich die 19 Kugelschallquellen mit einem Abstand von 10 mm zueinander, ebenfalls 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.⁴

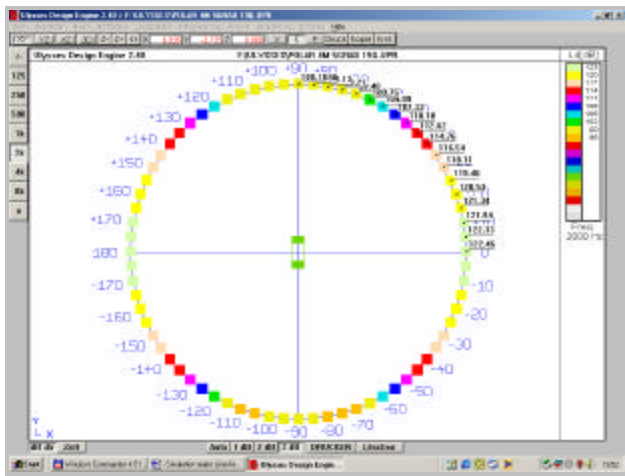


Abbildung 6.12
Screenshot, Verhalten von 19 Kugelschallquellen

Die so gewonnenen Daten lassen sich zu einer Matrix zusammenfassen, in der Form, dass jede Zeile ein Oktavband beschreibt, in deren Spalten umlaufend die Schalldruckpegel enthalten sind.

Genau so ist eine zweite Matrix zu erzeugen, die das Verhalten eines einzelnen Kugelstrahlers in 4 m Entfernung beschreibt. Alle Positionen der zweiten Matrix haben also den gleichen Wert, der mit der Kenntnis der Sensitivity und dem quadratischen Abstandsgesetz natürlich auch sehr leicht rechnerisch zu ermitteln ist. Dabei lässt sich der Pegel, der von der Sensitivity der einzelnen Kugelschallquelle zu subtrahieren ist, zu

$$20 \cdot \log 4 = 12 \text{ dB}$$

³ Kugelschallquelle: Punktschallquelle mit dem Bündlungsfaktor $Q = 1$

⁴ Wie bereits bewiesen, befinden sich bei dieser Geometrie alle „Messwerte“ im Fernfeld.

berechnen, wodurch die 4-fache Entfernung berücksichtigt wird.

Durch Subtraktion der zweiten Matrix von der ersten erhält man gewissermaßen eine vertikale Differenzmatrix, die das unterschiedliche vertikale Verhalten von 19 Kugelschallquellen zu einer einzelnen Kugelschallquelle in einer Entfernung von 4 m beschreibt.

Für das horizontale Verhalten ist die Differenzmatrix relativ leicht zu bestimmen, da hier annähernd keine destruktiven Interferenzen auftreten. Dadurch lassen sich die Schalldruckpegelwerte für 19 Kugelschallquellen berechnen, indem sie lediglich betragsweise addiert werden, was bedeutet, dass ein Pegel von

$$20 \cdot \log 19 = 25,6 \text{ dB}$$

zum Pegel der einzelnen Kugelschallquelle addiert werden muss.

Diese Werte werden wieder in Form der oben beschriebenen Matrix ausgedrückt. Um die horizontale Differenzmatrix zu erhalten wird wiederum die Matrix der einzelnen Kugelschallquelle subtrahiert, da selbige sowohl für die Vertikale wie für die Horizontale die gleichen Werte aufweist. So erhält man die horizontale Differenzmatrix, die das unterschiedliche horizontale Verhalten von 19 Kugelschallquellen zu einer einfachen Kugelschallquelle in einer Entfernung von 4 m beschreibt.

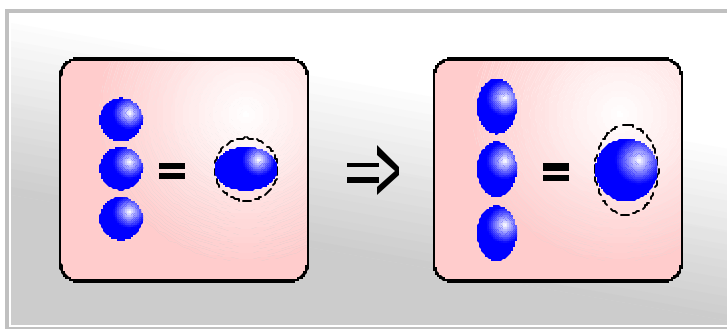


Abbildung 6.13
Schaubild zur Differenzmatrix

Die vertikale und die horizontale Differenzmatrix bilden nun die Grundlage für die Erzeugung eines Balloons einer substituierenden Quelle. Dazu werden quasi die 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. Die Erstellung der UNF-Datei kann nach dem zuvor bereits beschriebenen Verfahren durchgeführt werden, womit der Balloon einer substituierenden Quelle erzeugt wird.

6.3 Verifikation

Die sich anschließende These ist nun, dass sich basierend auf einen beliebigen Balloon die Aufreihung von 19 dieser Balloons, von denen jeweils die aus dem Kugelschallquellenversuch gewonnenen Differenzmatrizen subtrahiert wurden, in 4 m so verhält wie der einzelne ursprüngliche Balloon.

6.3.1 Verifikation mit Kugelschallquelle

Um dies sehr einfach und anschaulich zu verifizieren, wird zunächst wieder eine Untersuchung mit einer Kugelschallquelle angestellt. Dazu werden 19 Punktschallquellen erzeugt, die aus Kugelschallquellen bestehen, von denen die Differenzmatrizen subtrahiert wurden. Diese 19 Punktschallquellen werden nun mit 10 mm Abstand zueinander in der Mitte des zuvor beschriebenen Konstruktes aufgereiht.

Die durch eine komplexe Pegelsummation auf den Hörflächen in 4 m Entfernung simulierten Schalldruckpegel weisen eine hohe Konvergenz zu den Werten mit der Simulation mit einer einzelnen Kugelschallquelle auf. Die Differenzen betragen weniger als 1 dB, was mit der 1 dB-Auflösung sehr deutlich wird, wo alle Hörflächen die gleiche Farbe aufweisen.

Die 19 aufgereihten Punktschallquellen, die mit den Differenzmatrizen überlagert wurden, bilden also in 4 m Entfernung exakt das Verhalten einer Kugelschallquelle nach. Demnach lässt sich eine Kugelschallquelle durch eine bestimmte Anzahl von Punktschallquellen, deren Balloons sich aus der Kugelschallquelle ableiten, ersetzen.

6.3.2 Verifikation mit Line-Array-Element

Laut These sollte es aber möglich sein, einen beliebigen Balloon als Ausgangspunkt zu wählen. Daher wird im nächsten Schritt der Balloon, der mit den am dV-DOSC-Element gemessenen Daten erzeugt wurde, mit den Differenzmatrizen, die im Kugelschallquellenversuch ermittelt wurden, überlagert und 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.

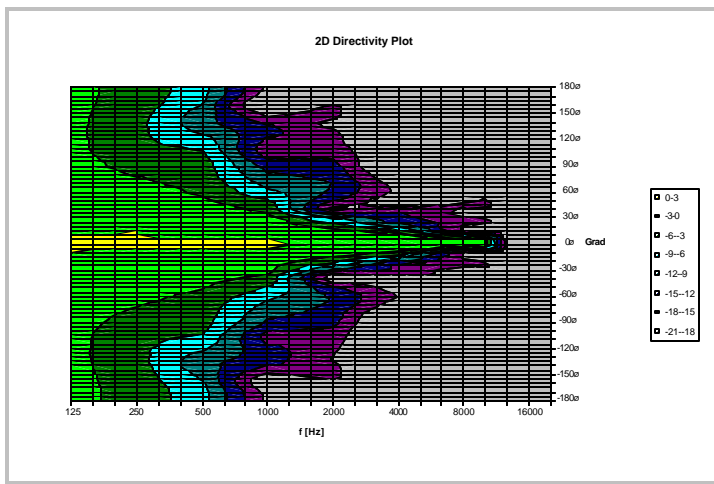


Abbildung 6.14
Das Diagramm zeigt das gemessene vertikale Verhalten eines dV-DOSC-Elementes in 4 m Entfernung. Zum besseren Vergleich wurden die Daten zwischen den Oktaven interpoliert.

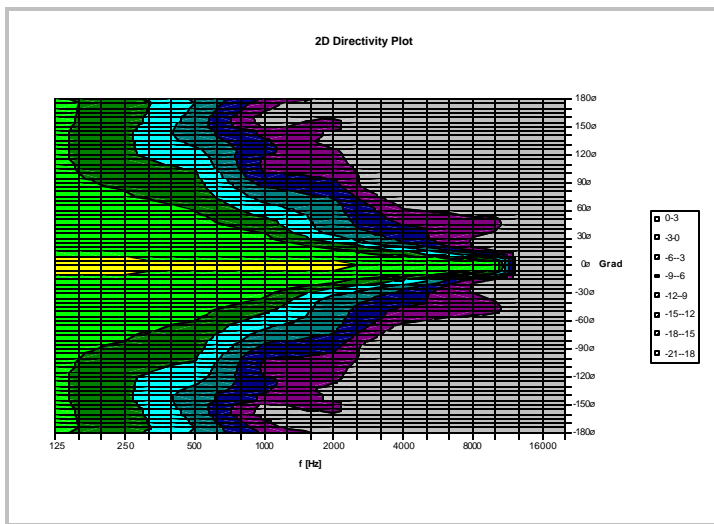


Abbildung 6.15
Das Diagramm zeigt das simulierte vertikale Verhalten eines dV-DOSC-Elementes in 4 m Entfernung, wobei die Daten aus der Simulation mit 19 substituierenden Einzelquellen stammen.

Auch dieser Vergleich zeigt eine sehr große Übereinstimmung der simulierten und der vorgegebenen Daten. Somit ist nachgewiesen, dass ein simuliertes Line-Array-Element, welches in einer Simulation durch eine bestimmte Anzahl von Quellen substituiert wurde, in 4 m mit hoher Akkuratess das gleiche Verhalten zeigt wie das reale Line-Array-Element.

6.3.3 Verifikation mit Line-Array-Konfigurationen

Da das Line-Array-Element nun nicht mehr als einzelner Punktstrahler, sondern gewissermaßen als eine Quelle mit einer räumlichen Ausdehnung beschrieben wird, sollte es möglich sein, bei einer Line-Array-üblichen Anordnung 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 $7,5^\circ$ zwischen den Elementen besteht.

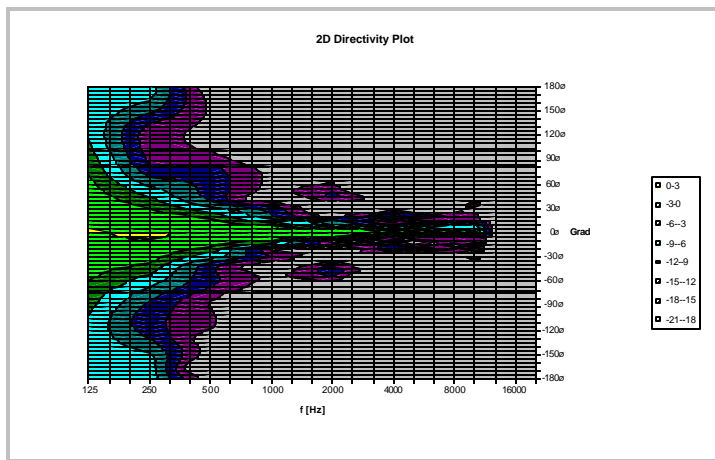


Abbildung 6.16
Das Diagramm zeigt das gemessene vertikale Verhalten eines dV-DOSC-Arrays in 4m Entfernung mit einem Winkel von je 0° zwischen den Elementen. Zum besseren Vergleich wurden die Daten zwischen den Oktaven interpoliert.

Darstellung der Directivity von Line-Arrays

Die Diagramme vermögen nicht die Directivity, also das Richtverhalten eines Line-Arrays, korrekt darzustellen. Es ist zu beachten, dass die Directivity von Linienquellen stark entfernungsabhängig ist. Ein solches Diagramm hat demnach immer nur für eine bestimmte Entfernung zum Array Gültigkeit.

Ferner führen Messungen im Nahfeld des Arrays zu Ergebnissen, die sich nicht mit denen von Punktschallquellen vergleichen lassen, da der Öffnungswinkel im Nahfeld von Linienquellen gleich Null ist.

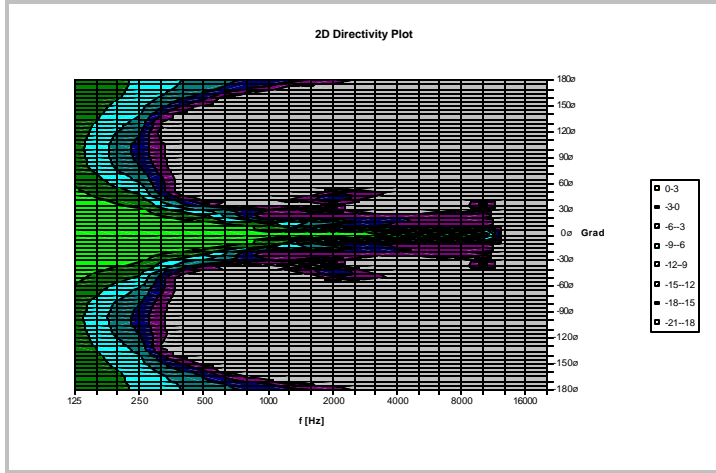


Abbildung 6.17
Das Diagramm zeigt das simulierte vertikale Verhalten eines dV-DOSC-Arrays in 4 m Entfernung mit einem Winkel von je 0° zwischen den Elementen, wobei die Daten aus der Simulation mit insgesamt 76 substituierenden Einzelquellen stammen.

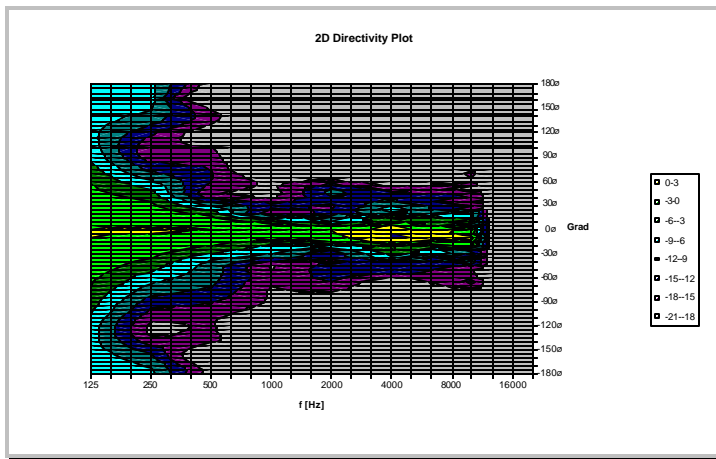


Abbildung 6.18
Das Diagramm zeigt das gemessene vertikale Verhalten eines dV-DOSC-Arrays in 4 m Entfernung mit einem Winkel von je $7,5^\circ$ zwischen den Elementen. Zum besseren Vergleich wurden die Daten zwischen den Oktaven interpoliert.

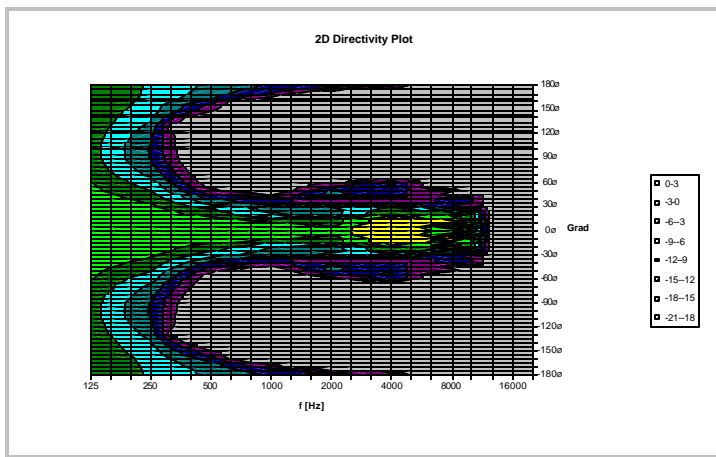


Abbildung 6.19
Das Diagramm zeigt das simulierte vertikale Verhalten eines dV-DOSC-Arrays in 4 m Entfernung mit einem Winkel von je $7,5^\circ$ zwischen den Elementen, wobei die Daten aus der Simulation mit insgesamt 76 substituierenden Einzelquellen stammen.

Auch bei diesen Vergleichen lässt sich wiederum eine große Übereinstimmung der simulierten und gemessenen Werte erkennen. 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° bei den simulierten Ergebnissen, was sich in den Messergebnissen der realen Arrays nicht so widerspiegelt. Dieses ist vom Autor ohne weiteres nicht zu erklären aber dahingehend zu deuten, dass in der Realität bei niedrigen Frequenzen die Lautsprechergehäuse Einfluss nehmen, was als Fehler der Simulation anzusehen wäre.

Durch Untersuchungen an verschiedenen langen Arrays könnte es möglich sein, Vorfilterungen mit Hochpasscharakteristik für entsprechende Array-Längen zu ermitteln, was aber den Rahmen dieser Arbeit übersteigt.

Eine andere Möglichkeit zur Erklärung der Differenzen der simulierten und der gemessenen Ergebnisse könnte in dem Zusammenhang zu sehen sein, dass die Messpunkte für eine vorliegende Array-Länge von etwa 90 cm für tiefe und mittlere Frequenzen bereits im Nahfeld liegen. Aber auch hier wären genauere Untersuchungen vonnöten.

Dennoch ließen auch so Simulationen der Direktschallausbreitung hinreichend akkurate Ergebnisse erwarten, da in üblichen Simulationen die 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.

7 Schlusswort

7.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde untersucht, in wie weit es möglich ist, mit der CAAD-Software Ulysses moderne Line-Array-Lautsprechersysteme zu simulieren. Dabei wurde der Ansatz aufgegriffen, das Line-Array in hinreichend viele Punktschallquellen zu separieren.

Experimentelle Untersuchungen zeigten, dass es grundsätzlich möglich ist aufgrund dieses Ansatzes mit Ulysses Linienschallquellen nachzubilden. Die Konvergenz von Theorie und Simulation war stets gegeben.

Ferner wurde ein Verfahren entwickelt mit dem es möglich ist reale Line-Arrays zu simulieren. Basierend auf gemessenen Balloon-Daten eines einzelnen Line-Array-Elementes wurden Quellen erzeugt, die linienförmig aufgereiht das gleiche Verhalten wie das Line-Array-Element selbst zeigten.

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

7.2 Anmerkungen

Zur weiterführenden Verifikation wurden Messungen mehrerer Line-Array-Konfigurationen unter freiem Himmel mit einem Schalldruckpegelmesser sowie Messungen an einer temporären Installation in einer Halle mit dem Messsystem MLSSA durchgeführt. Leider lieferten beide Untersuchungen keine aussagekräftigen Ergebnisse, die einen Vergleich mit der entsprechenden Simulation der Line-Arrays zuließen.

Bedanken möchte ich mich ganz herzlich bei Dr. Anselm Goertz für die Messergebnisse der untersuchten Lautsprecher sowie den Herren Joachim Birner und Jakob Kraft für die Unterstützung bei der Verifikation der Ergebnisse.

Abschließend bedanke ich mich natürlich beim Ingenieurbüro für Beschallungstechnik IFB für die begleitende Unterstützung der gesamten Arbeit.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Crawford, S. Jr.: Schwingungen und Wellen. Vieweg-Verlag
- [2] Meyer, E. & Neumann, E.-G.: Physikalische und technische Akustik. Vieweg-Verlag
- [3] Goertz, A.: L-Acoustics dV-DOSC. Production Partner 2/2001, S. 126-136
- [4] Ureda, M.: Line Arrays: Theory and Application. 110th AES Convention Amsterdam 2001
- [5] Ureda, M.: „J“ and „Spiral“ Line Arrays. 111th AES Convention New York 2001
- [6] Engebretson, M.: Directional Radiation Characteristics of Articulating Line Array Loudspeaker Systems. 111th AES Convention New York 2001
- [7] Urban, M.; Heil, C.; Bauman, P.: Wavefront Sculpture Technologie. 111th AES Convention New York 2001
- [8] Goertz, A.: Theoretische Grundlagen und die praktische Anwendung von Line-Arrays in der Beschallungstechnik und ihre Berücksichtigung in Simulationsprogrammen. CAVIS 2002

Quellennachweis der Abbildungen

Electro Voice	5.5
IFB	4.1
JBL	5.4
L-Acoustics	2.2, 2.4, 2.8, 5.6, 5.7, 5.15, 6.1
LLW Insider	2.1, 2.3
McCauley	Titel, 5.13
Meyer Sound	6.2
NEXO	5.1, 5.2, 5.8, 5.9, 5.12
Pat Brown	6.4
SLS Loudspeakers	5.11
Trius	5.3
Visaton	5.10

Anhang A

Simulation vom Line-Array Geo S805

Zusätzlich zu den Messwerten des L-Acoustics dV-DOSC bot sich kurzfristig die Möglichkeit ähnliche Verifikationen mit dem Line-Array Geo S805 der Firma NEXO durchzuführen, deren Ergebnisse im Folgenden dargestellt sind.

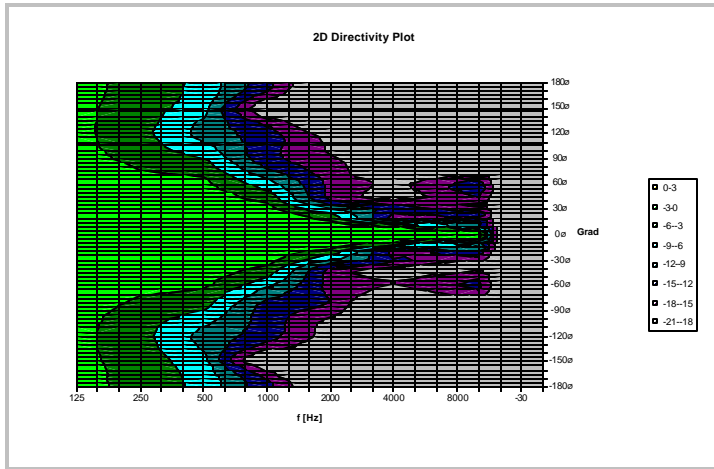


Abbildung A1

Das Diagramm zeigt das gemessene vertikale Verhalten eines Geo S805-Elementes in 4 m Entfernung. Zum besseren Vergleich wurden die Daten zwischen den Oktaven interpoliert.

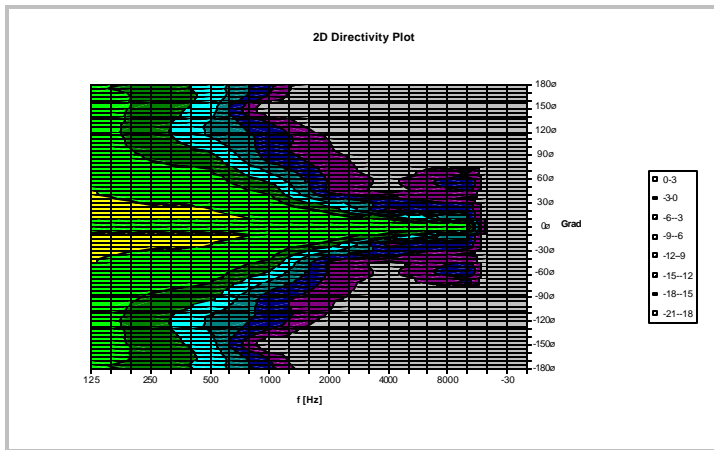


Abbildung A2

Das Diagramm zeigt das simulierte vertikale Verhalten eines Geo S805-Elementes in 4 m Entfernung, wobei die Daten aus der Simulation mit 19 substituierenden Einzelquellen stammen.

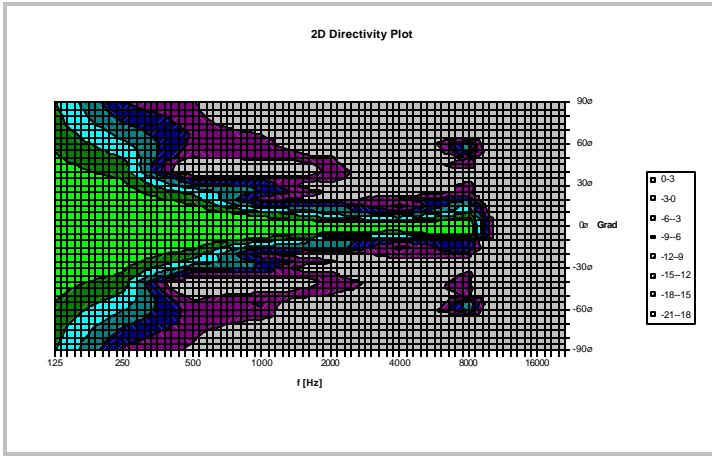


Abbildung A3

Das Diagramm zeigt das gemessene vertikale Verhalten eines Geo S805-Arrays in 4m Entfernung mit einem Winkel von je 0° zwischen den Elementen. Zum besseren Vergleich wurden die Daten zwischen den Oktaven interpoliert.

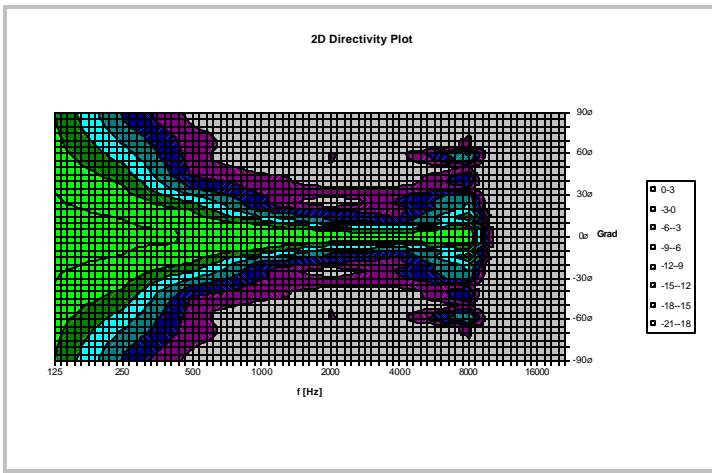


Abbildung A4

Das Diagramm zeigt das simulierte vertikale Verhalten eines Geo S805-Arrays in 4m Entfernung mit einem Winkel von je 0° zwischen den Elementen, wobei die Daten aus der Simulation mit insgesamt 76 substituierenden Einzelquellen stammen.

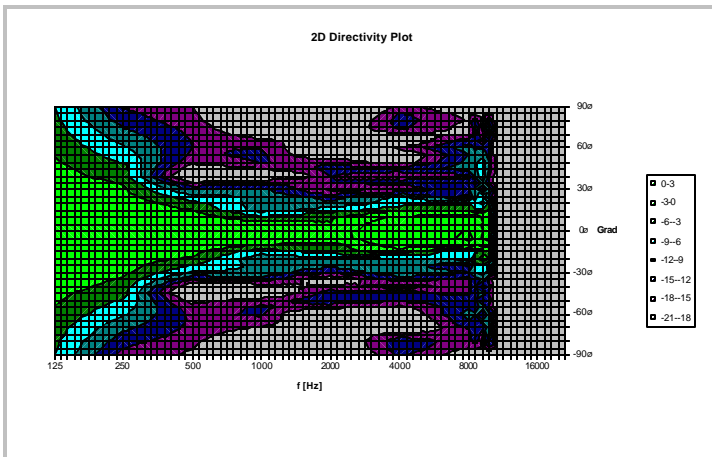
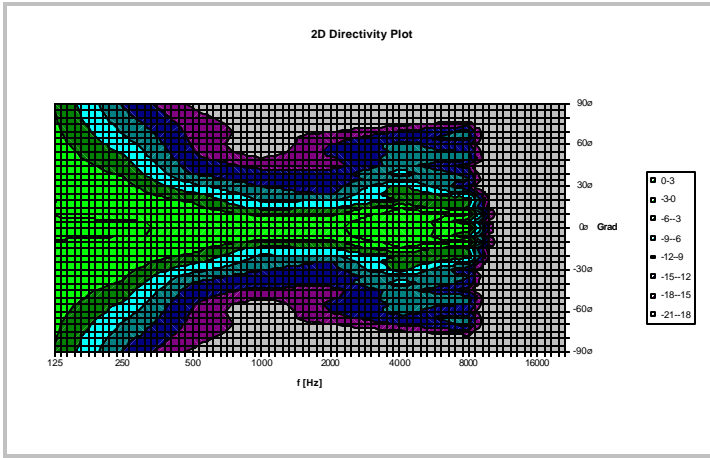


Abbildung A5

Das Diagramm zeigt das gemessene vertikale Verhalten eines Geo S805-Arrays in 4m Entfernung mit einem Winkel von je 5° zwischen den Elementen. Zum besseren Vergleich wurden die Daten zwischen den Oktaven interpoliert.

**Abbildung A6**

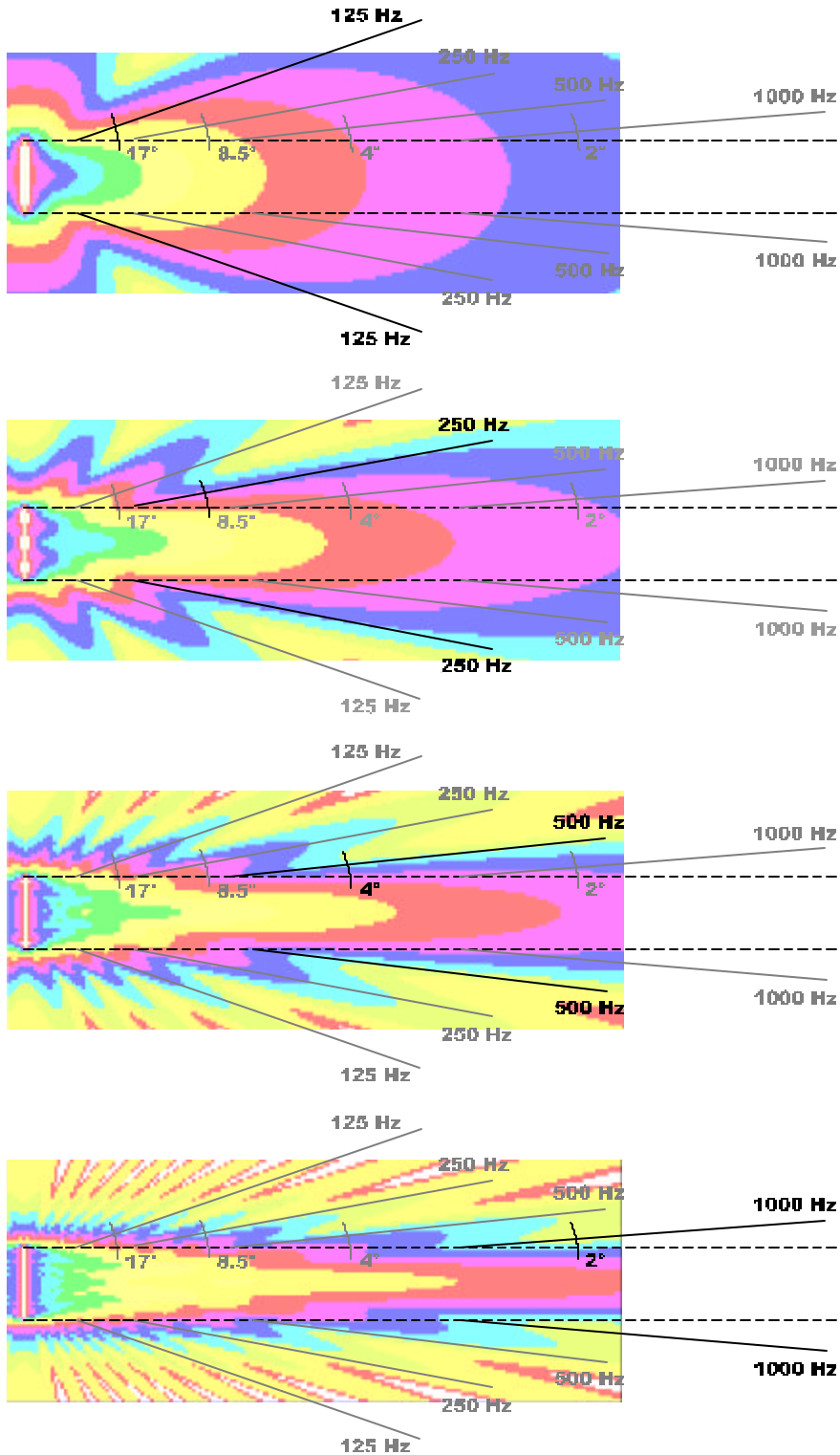
Das Diagramm zeigt das simulierte vertikale Verhalten eines Geo S805-Arrays in 4 m Entfernung mit einem Winkel von je 5° zwischen den Elementen, wobei die Daten aus der Simulation mit insgesamt 76 substituierenden Einzelquellen stammen.

Die Diagramme zeigen im Wesentlichen ähnliche Ergebnisse wie die Untersuchungen am dV-DOSC-System. Auffällig in der Darstellung des einzelnen simulierten Elementes ist lediglich eine scheinbare Unstimmigkeit im tieffrequenten Bereich leicht außerhalb der Hauptachse. Durch eine leichte Pegelerhöhung bis maximal 0,35 dB gegenüber 0 Grad, kommt es hier bereits zur Darstellung mit dem nächst höheren Farbwert.

Anhang B

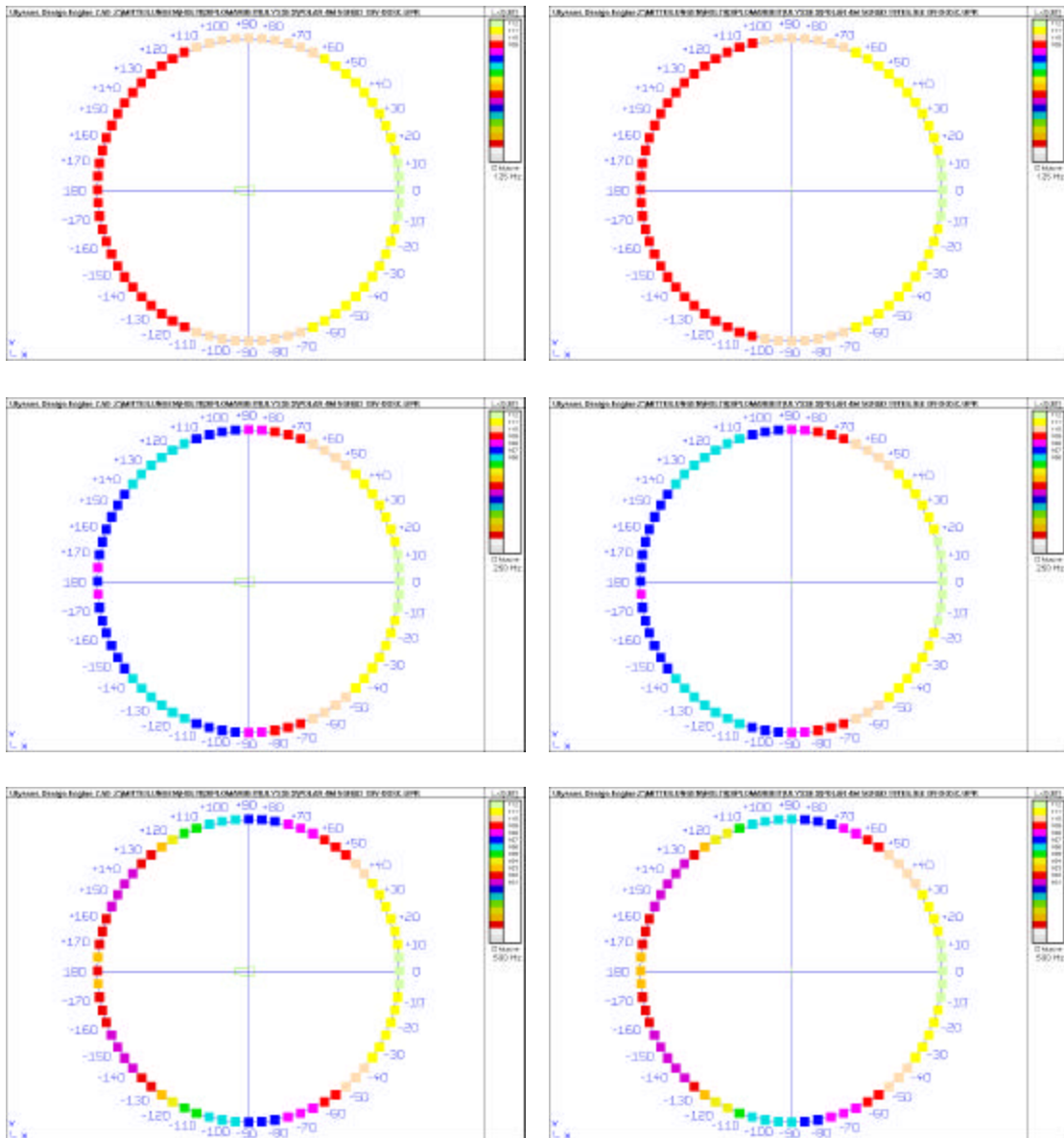
Öffnungswinkel

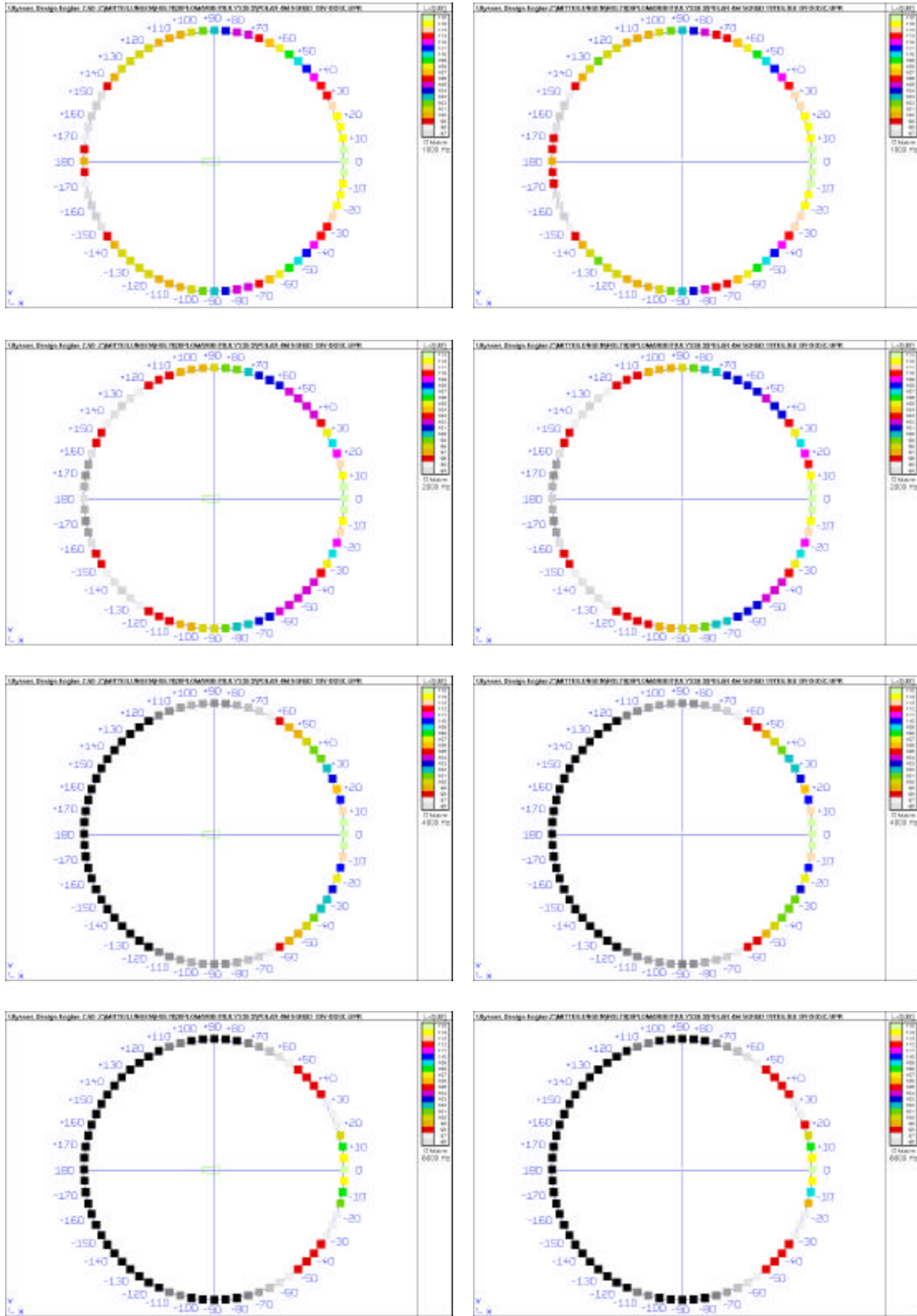
Im Folgenden ist die Simulation einer 4 m langen Linienquelle dargestellt, wobei jeweils eine Oktave mit dem zugehörigen Öffnungswinkel abgebildet ist.



Vergleich von Messung und Simulation

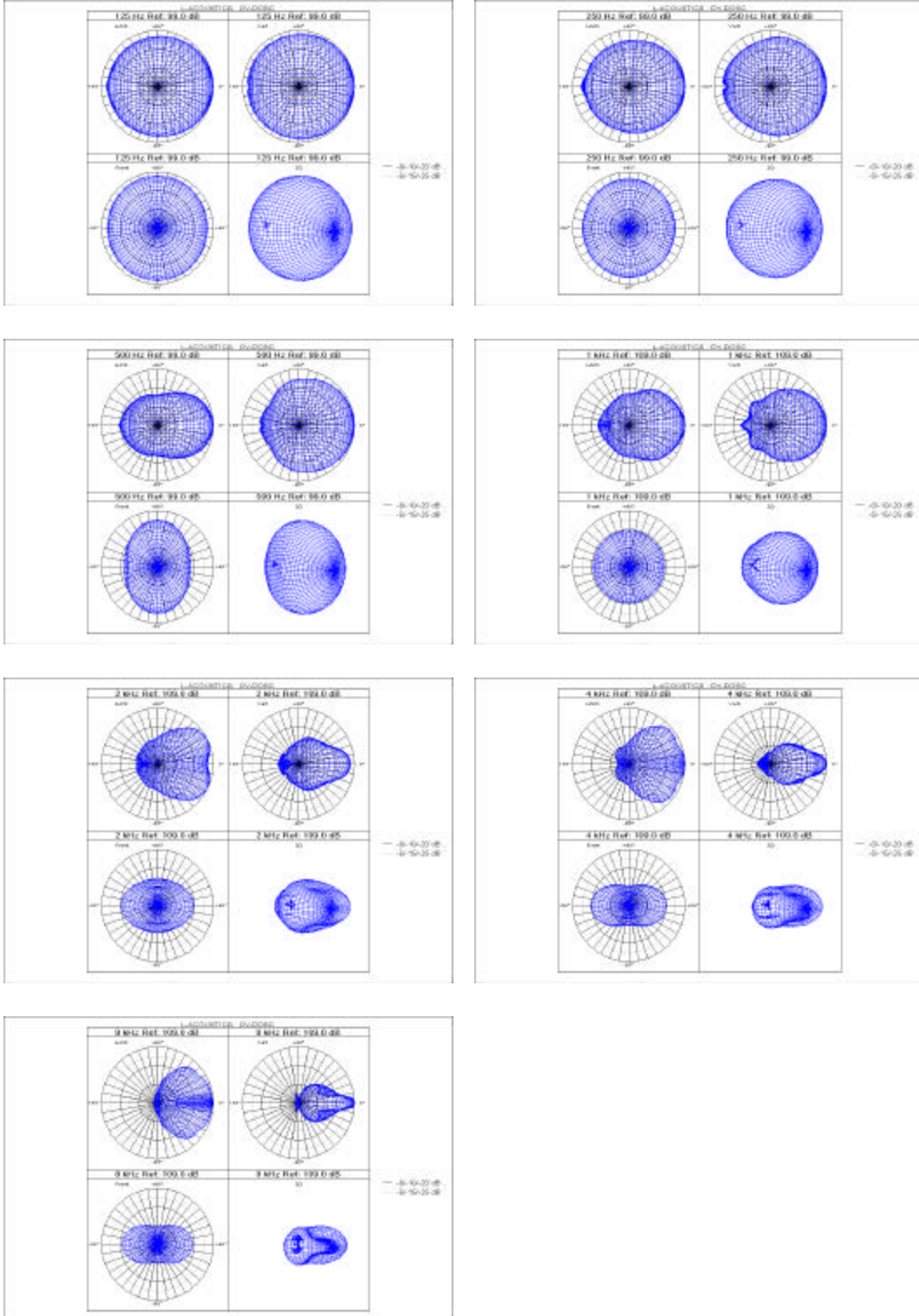
In den folgenden Simulationen ist das Verhalten eines einzelnen gemessenen und eines substituierten dV-DOSC-Elementes dargestellt. Dazu sind in 4 m Entfernung in 5°-Schritten die Schalldruckpegel in 1 dB-Auflösung farblich kodiert abgebildet. In der linken Spalte sind die Werte der 7 Oktaven für den gemessenen Balloon zu sehen und jeweils rechts daneben die Werte für die Simulation mit 19 substituiierenden Quellen.



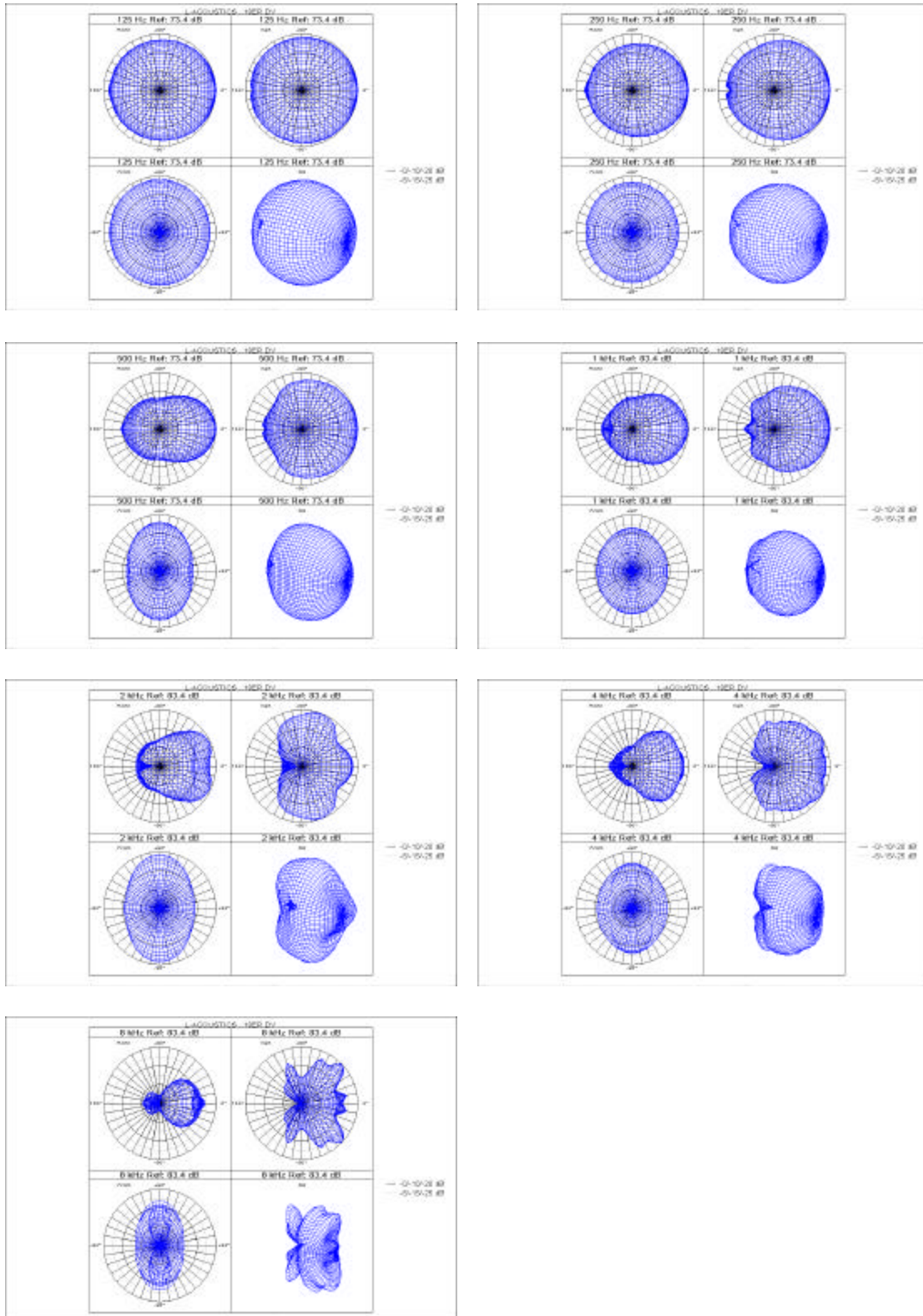


dV-DOSC Ballon-Daten

In den folgenden Darstellungen sind für die 7 Oktaven die Balloons eines dV-DOSC-Elementes dargestellt, die direkt aus den Messwerten erzeugt wurden.



In den folgenden Darstellungen sind für die 7 Oktaven die Balloons einer substituierenden Quelle eines dV-DOSC-Elementes dargestellt.



Anhang C



dV-DOSC™

THE INCREDIBLE INNOVATION OF
WAVEFRONT
SCULPTURE
TECHNOLOGY®

APPLICATIONS

L-ACOUSTICS® dV-DOSC™ provides the same performance benefits as V-DOSC® and ARCS® in an extremely compact format suitable for both fixed installation and touring applications. The 120° horizontal coverage of dV-DOSC combined with the power of Wavefront Sculpture Technology® in adapting vertical system directivity to match the audience area results in well-defined, predictable coverage combined with exceptionally even frequency response and SPL.

As a full-range, two-way system, dV-DOSC can be used for speech reinforcement in corporate applications or as a voice-only system for television and theatrical productions. The compact profile of dV-DOSC is ideal for installations where visually unobtrusive sound design is an important issue.

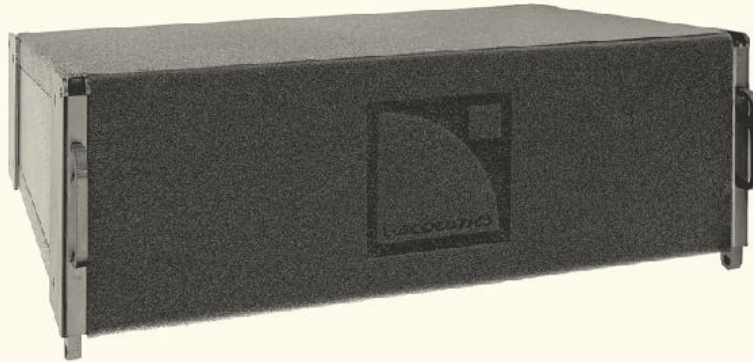
dV-DOSC is also well-suited to large-scale fixed installations such as single or multiple distributed arrays for stadium and arena sound reinforcement. For these applications, the generous 120° horizontal pattern combined with the seamless transition between short- to long-throw zones obtained using Wavefront Sculpture principles allows the sound designer to achieve excellent intelligibility and cost-effective coverage even under difficult, highly reverberant acoustic conditions.

When combined with subwoofers for extended bandwidth applications, dV-DOSC can be used as a front-of-house system for small, medium and large venues. For these applications, the 120° horizontal coverage pattern provides excellent stereo imaging in the standard left-right format while the flexibility provided by Wavefront Sculpture allows the sound designer to cover virtually any room geometry.

For touring applications, dV-DOSC can be used as a down-fill enclosure for flying underneath V-DOSC arrays or as a long-throw extension of the system when stacked on top of the flying bumper. Other applications include flown dV-DOSC arrays for center cluster or offstage fill, and stacked configurations for stereo front-fill. When operated in conjunction with subwoofers, dV-DOSC can also be used for stage monitoring applications.

Given all these possibilities, that's why the "dV" in dV-DOSC stands for "Definitely Versatile".

L-ACOUSTICS PROFESSIONAL SOUND SYSTEM



- **WST-based active two-way enclosure**
- **Perfect coupling, predictable coverage**
- **Ergonomic, fast, secure rigging system**
- **Medium- and long-throw applications**
- **Excellent speech intelligibility**
- **Extremely compact**
- **Trapezoidal design for curved vertical arrays**
- **Highly versatile for both installation and touring**
- **Perfect for corporate, theatre, club and concert reinforcement**

SPECIFICATIONS

L-ACOUSTICS specifications are based on measurement procedures which produce unbiased results and allow for realistic performance prediction and simulations. Some of these specifications will appear very conservative when compared with other manufacturer's specifications. All measurements are conducted under free field conditions and scaled to a 1 m reference distance unless otherwise indicated.

Frequency Response			
Frequency response	160 - 18k Hz (±3dB)	single unit	
	100 - 18k Hz (±3dB)	coupled array	
Full system bandwidth ¹	25 - 18k Hz (±3dB)		
Sensitivity ²			
LF (2.83 Vrms @ 1m)	99 dB SPL	100 - 800 Hz	
HF (2.83 Vrms @ 1m)	109 dB SPL	800 - 18k Hz	
Power Rating ³		Amplification	Impedance
(Long Term)		(Recommended)	(Nominal)
LF 49 Vrms	300 Wrms	1200 Wpeak	600 W
HF 25 Vrms	75 Wrms	300 Wpeak	300 W
			8 ohms
			8 ohms
Nominal Directivity (-6dB) ⁴			
Horizontal	symmetrical		120°
Vertical	defined by the array		
Array ⁵		Continuous SPL (flat array)	Continuous SPL (maximum curvature array)
One enclosure		128 dB	128 dB
Two enclosures		134 dB	132 dB
Four enclosures		140 dB	136 dB
			15° vertical coverage
			30° vertical coverage
Components			
LF	2 x 8" weather-resistant loudspeaker (2" voice coil)		
HF	1 x 1.4" neodymium compression driver mounted on custom DOSC waveguide and acoustic lens		

¹ Full system bandwidth with SB218 subwoofer
² Sensitivity is the average SPL measured over the component's rated bandwidth
³ Power rating displays the long term RMS voltage handling capacity using pink noise with a 6 dB crest factor over the component's rated bandwidth

⁴ Directivity is averaged over the 1-10 kHz range
⁵ Array data gives the continuous unweighted SPL output of the system referenced to 1 m, including preset equalization and band-leveling adjustment using pink noise with a 6 dB crest factor over the system's rated bandwidth

Enclosure		
• Width	695 mm	27.4 in
• Front height	257 mm	10.1 in
• Rear height	171 mm	6.7 in
• Depth	476 mm	18.7 in
• Trap angle	2 x 3.75°	
• Shipping dims	800 x 360 x 560 mm	
	31.5 x 14.2 x 22 in	
• Weight (net)	31.8 kg	70.1 lbs
• Shipping weight	35 kg	77.2 lbs
• Connectors	2x 4-pin Neutrik speakon	
• Material	Baltic birch plywood, aluminum top and bottom plates	
• Finish	Maroon-gray™	
• Grill	Black epoxy-coated perforated steel with acoustically-transparent foam	
• Rigging	Integrated flying hardware and handles	

- Additional Equipment**
- L-ACOUSTICS approved digital crossover with custom presets
 - L-ACOUSTICS SB218 subwoofer
 - L-ACOUSTICS LA 24 or LA 48 power amplifier

L-ACOUSTICS®, ARCS®, V-DOSC™ and Wavefront Sculpture Technology® are registered trademarks

ARCHITECT SPECIFICATIONS

The loudspeaker shall be a full-range active two-way enclosure covering the frequency range of 160 Hz - 18 kHz (± 3 dB). For coupled arrays of more than six elements, low-frequency response shall extend to 75 Hz / 100 Hz depending on preset. The loudspeaker shall be used with an approved digital crossover and dedicated software presets. The loudspeaker shall function as either a standalonesystem for speech reinforcement applications or be used in conjunction with subwoofers for extended bandwidth operation.

The loudspeaker enclosure shall consist of two high-efficiency, high power- handling 8-inch speakers mounted in V-shaped configuration combined with a 1.4-inch neodymium compression driver coupled to a waveguide. The waveguide employed in the loudspeaker system shall generate a flat isophasic wavefront. Components shall be configured in a coplanar symmetrical arrangement and provide stable 120-degree horizontal coverage independent of the number of vertically arrayed elements.

When vertically arrayed, multiple enclosures shall function according to the principles of Wavefront Sculpture Technology, whereby the distance of separation between acoustic centers of individual sound sources shall be less than the size of half the wavelength at the highest frequency of its operating bandwidth, or the sum of the individual areas of the isophasic radiating elements shall be greater than 80 percent of the target radiating area.

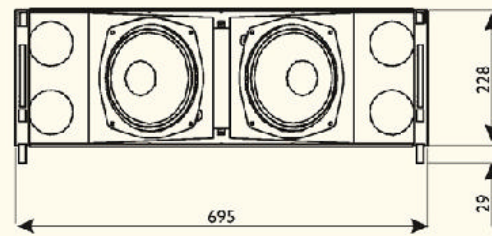
When multiple loudspeakers are arrayed vertically, they shall radiate a wavefront that varies from flat to a maximum of 7.5 degrees of curvature per element with optimized high-frequency coupling performance that is free of destructive interference effects. When installed according to Wavefront Sculpture Technology principles, the combination of cylindrical wavefront generation produced by the waveguide and proper focus of the arrayelements shall allow the system to produce 1/R attenuation properties(-3 dB per doubling of distance).

The loudspeaker shall have low profile, trapezoidal cabinet construction and an integral rigging system that allows arrays to be assembled with variable angles between enclosures up to a maximum of 7.5 degrees. Cabinet finish shall be maroon-gray, high-resilience paint and all external hardware shall be stainless steel or black powder-coated to protect against rust. The front of the enclosure shall be covered with open-cell, acoustically-transparent foam.

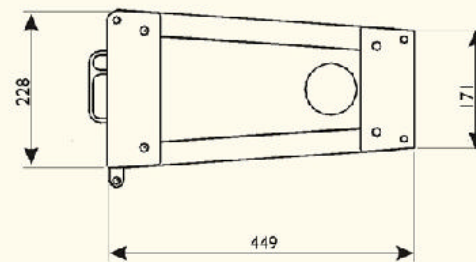
The loudspeaker system shall be the L-ACOUSTICS dV-DOSC.

ACCESSORIES

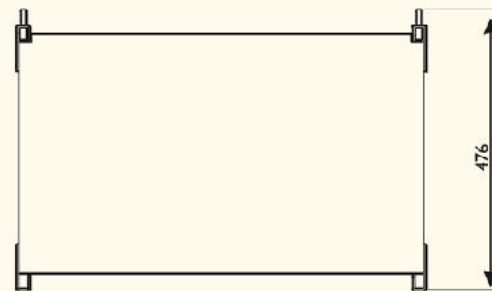
- dV-PIN25** Locking quick release pin (25 mm grip length) for dV-DOSC enclosure interconnection and connection to dV-BUMP
- dV-PIN81** Locking quick release pin (81 mm grip length) for attaching dV-DOSC to dV-DOWN
- dV-ANGLEP** Rear angle bar for varying vertical angle between dV-DOSC enclosures to form convex arrays (positive curvature)
dV-ANGLEP1 values: 0, 2, 3.75, 5.5, 7.5 degrees
dV-ANGLEP2 values: 1, 3, 4.5, 6.5 degrees
- dV-ANGLEN** Rear angle bar for varying vertical angle between dV-DOSC enclosures to form concave arrays (negative curvature)
- dV-BUMP** Flying bumper for standalone rigging or flying on top of V-DOSC
- dV-DOWN** Flying bars (two) for rigging dV-DOSC under V-DOSC for down-fill applications
- dV-FLIGHT** Flight case for three dV-DOSC.



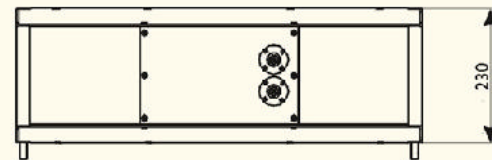
FRONT



SIDE



TOP



REAR

Features & Specifications for GEO S8-Series and CD12 Sub



SYSTEM SPECIFICATIONS	GEO S805 / S830 with NX241 TDcontroller	CD12 Sub with NX241 TDcontroller
Frequency Response (a)	67 Hz – 19 kHz ± 3 dB	42 Hz – 20 kHz
Usable Range @-6dB (a)	69 Hz – 29 kHz	59 Hz – 25 kHz
Sensitivity 1W @ 1m (b)	99 dB SPL Nominal – 97 dB SPL Wideband	102 dB SPL Nominal
Peak SPL @ 1m (b)	115 to 128 dB Peak for a single cabinet. Configuration Dependent when arrayed (d)	131 to 134 dB Peak (500 to 1200 W RMS Amp)
Dispersion (c)	GEO S805: Coupling Plane: Not useable as a single cabinet. Configuration Dependent (d) Non Coupling Plane: 120° (Configurable to 80°) GEO S830: Coupling Plane: 30° for a single cabinet. Configuration Dependent when arrayed (d) Non Coupling Plane: 120° (Configurable to 80°)	SuperCardioid pattern 129°x120° over the entire useable bandwidth. Directivity Control is achieved through DSP algorithms in the NX241 (two channels of NX241 are dedicated to the process).
Directivity Index (c)	GEO S805: Not useable as a single cabinet. Configuration Dependent (d) GEO S830: DI = 12 Nominal if > 1.5 kHz for a single cabinet. Configuration dependent when arrayed. (d)	DI=3.73 DI = 5.7dB over the entire useable bandwidth
Crossover Frequency	1.8kHz Passive	15k Hz Active through NX241 TDcontroller
Nominal Impedance	16 Ohms	6 Ohms
Recommended Amplifiers	1500 to 3000 W into 4 Ohms / 4 cabinets per channel. Up to 6 cabinets per channel may be connected to large amplifiers capable of operating into low loads.	2 amplifier channels required for SuperCardioid operation. Same amplifier model as for the GEO S8 main system. Up to two complete CD12 can be connected on a 2-channel amplifier.
PRODUCT FEATURES	GEO S805 / S830	CD12 Sub
Components	LF: 1 x 8" (20cm) Neodymium Hi-Flux 16 Ohms Driver HF: 1 x 1" Thread ND Driver + HRW™	2 x 12" (30 cm) Long Excursion 6 Ohms Neodymium Drivers
Height x Width x Depth	406 x 250 x 239 mm (16" x 9 7/8" x 9 3/8")	400 x 600 x 754 mm (15 3/4" x 23 3/4" x 29 11/16")
Shape	GEO S805: 5" Trapezoid GEO S830: 30" Trapezoid	Rectangular
Weight - Net	GEO S8-Series: 10.5 kg (23 lb) GEO S8-Series with flying hardware: 14.5 kg (32 lb)	36 kg (79 lb)
Connectors	2 x NLAMP SPEAKON 4 poles (In & Through)	2 x NLAMP SPEAKON 4 poles (In & Through)
Construction	Baltic Birch Ply finish with structured black coating. Dark gray carpet finish also available	Baltic Birch Ply finish with structured black coating. Dark gray carpet finish also available
Front Finish	Perforated Steel Grille	-
Flying points	Integral flying system. Intercabinet Angle Adjustments= 0 to 5° (step 0.5°), 17.5° & 30°	Integral flying system.
SYSTEM OPERATION		
Electronic Controller	The NX241 TDcontroller presets are precisely matched to the GEO S8-Series cabinets, and include sophisticated protection systems. Using GEO S8-Series without a properly connected NX241 TDcontroller will result in poor sound quality and can damage components.	
HF Dispersion Configuration	After quick release of the front grille from its fittings, the HF Waveguide can be configured for 80° or 120° dispersion in the non-coupling plane.	
Array design	Arrays of less than 4 GEO S805 will provide poor dispersion control and are not recommended. S815 and S830 Wavefront being tangent, they can be mixed within the same array. Please refer to the user manual. Correct understanding, design and implementation of GEO arrays is paramount to ensure even coverage over the audience area.	
Sub-bass	The GEO S805 & S830 can be used without optional CD12-Sub. In this case the NX241 can be used in stereo. With the CD12 SuperCardioid Sub each Sub channel will require two NX241 outputs and the NX241 will operate in mono.	
Speaker Cables	GEO S805 & S830 are wired L- & L+ on Speakon connectors. 2+ & 2- are not connected. The front loudspeaker of the CD12-Sub is wired 1+ & 2- while the back loudspeaker is wired on 1- & 1+ GEO S8-Series cabinets and CD12 must use separate cables.	
Rigging system	Please refer to the GEO User Manual before any operation	
<p>As part of a policy of continual improvement, NEXO reserves the right to change specifications without notice.</p> <p>(a) Response Curves and Data - Anechoic Far Field above 210 Hz, Half-space Anechoic below 200 Hz. Usable Range Data - Frequency Response Capability with TD crossover phase removed.</p> <p>(b) Sensitivity & Peak SPL - will depend on spectral distribution. Measured with band limited Pink Noise. Refers to the specified +/- 3 dB range. Data also for Speaker + Processor + recommended amplifier combinations.</p> <p>(c) Directivity Curves and Data - 1/3 octave smoothed frequency response, normalized to On-Axis response. Data obtained by computer processing on off-axis response curves.</p> <p>(d) Please refer to GEO User Manual.</p>		

NEXO S.A.
154 allée des Erables
ZAC de PARIS NORD II B.P. 50107
F-95950 Roissy CDG CEDEX
France

Tel: +33 1 48 63 19 14
Fax: +33 1 48 63 24 61
E-mail: info@nexo.fr

NEXO Limited
9 Lyon Road
Wilton on Thames
Surrey
KT12 3PU
United Kingdom

Tel: +44 1932 886 007
Fax: +33 149 381 499
E-mail: info@nexo-sa.com

NEXO USA, Inc.
2165 Francisco Blvd.
Suite E2
San Rafael, CA 94901

Phone: 1-415-482-6600
Fax: 1-415-482-6110
E-mail: info@nexo.us

NEXO for East Pte Ltd
101 Lorong, 23 Geylang
#04-04 Pasopok House
Singapore 388399

Tel: +65 742 5668
Fax: +65 742 8850
E-mail: info@nexo.sg.com



