



Fachhochschule Wiesbaden
University of Applied Sciences



Diplomarbeit

zum Thema:

„Praxisnahe Simulation von Line-Array- Lautsprechersystemen mittels Directivity-Balloons“

Vorgelegt von: Benjamin Lampert

Referent: Prof. Dr.-Ing. Christof Ricken

Korreferent: Dipl. Phys.-Ing. Volker Löwer

Datum: 29. März 2006



Fachbereich 03
Elektrotechnik
Studiengang
Fernsehtchnik und
elektronische Medien

Erklärung

Ich versichere hiermit, diese Diplomarbeit selbständig angefertigt zu haben sowie, dass alle verwendeten Quellen und Hilfsmittel in der Arbeit angegeben sind.

Der Einsicht in diese Diplomarbeit und der Ausleihe eines Exemplares stimme ich zu / stimme ich nicht zu*.

(Ort / Datum)

(Unterschrift Studentin / Student)

Nur von der Betreuerin / von dem Betreuer auszufüllen :

Gegen die Einsicht in diese Diplomarbeit und gegen die Ausleihe eines Exemplars wird / kein* Einspruch erhoben

(Unterschrift Betreuerin / Betreuer)

Begründung (bei Einspruch):

* : Nichtzutreffendes bitte streichen.

INHALT

1	Einleitung	4
2	Grundlagen.....	5
2.1	Was ist ein Line-Array?	5
2.2	Die Punktschallquelle.....	7
2.3	Die Linienschallquelle	9
2.4	Nachbilden einer Linienquelle durch Aufreihung von Punktschallquellen	11
3	Line Arrays in der Praxis.....	15
4	Simulation von Line-Array-Systemen	22
4.1	Simulationsprogramme für Raumakustik	22
4.1.1	Balloon Daten	24
4.1.2	Dynamic Link Library (DLL).....	26
4.2	Herstellerspezifische Simulationstools.....	29
5	Simulation von Line-Array-Systemen mittels Balloon-Daten	31
5.1	Anmerkungen zur Gültigkeit.....	31
5.2	Simulation mit Elementar-Balloons	32
5.3	Substitution eines Elementar-Balloons	36
5.4	Verifikation	39
6	Vergleich von Simulation und Messung anhand einer realen Beschallungssituation.....	42
6.1	Messverfahren	42
6.2	Auswerten der Impulsantworten	43
6.3	Vergleich von Messung und Simulation.....	44
7	Fazit	49
8	Anhang	50
9	Quellenverzeichnis	55
10	Abbildungsverzeichnis.....	56
11	Schlusswort	58

1 Einleitung

Im Bereich der Beschallungstechnik hat sich in den letzten Jahren ein Wandel vollzogen. Wo bis vor kurzem zur Beschallung größerer Zuhörerbereiche noch Lautsprecher mehr oder minder zufällig neben- oder übereinander gestapelt wurden, so hat heutzutage landläufig die Line-Array-Technologie Einzug gehalten.

Rechnergestützte Simulation von Raumakustik sowie von Lautsprechern und deren Abstrahlcharakteristik ist dabei nach wie vor ein unerlässliches Hilfsmittel bei der Installation von Beschallungssystemen.

Installateuren und Planern bietet sich hiermit ein Werkzeug, mit dem sie Vorhersagen über das akustische Verhalten einer Beschallungsanlage treffen können, ohne unter Umständen jemals den betreffenden Raum betreten zu haben.

Durch das Populärwerden von Line-Array-Lautsprechern erhöht sich auch der Bedarf an Simulationssoftware, da es hier auf ein besonders exaktes Ausrichten der Lautsprecher ankommt. Die veränderbaren Parameter bei der Installation sind wesentlich umfangreicher als bei konventionellen Lautsprecher-Clustern und kaum ohne Computerprogramme zu überschauen.

Die Notwendigkeit der Simulations-, bzw. Vorhersage-Software haben auch die Hersteller von Line-Array-Systemen erkannt. So gibt es neben den wenigen herstellerunabhängigen Programmen auch eine Reihe von Berechnungshilfen, die der jeweilige Hersteller für die eigenen Systeme entwickelt hat und dem Käufer bzw. Anwender zur Verfügung stellt.

Ziel dieser Arbeit soll es sein, die Simulation von Line-Array-Lautsprechersystemen auf der Basis von dreidimensionalen Lautsprecherdaten (so genannten *Directivity-Balloons*) zu untersuchen und möglicherweise geeignete Methoden zu finden, um diese praxisnah und ressourcenschonend zu optimieren.

2 Grundlagen

2.1 Was ist ein Line-Array?

Unter dem Begriff *Line-Array* versteht man im Allgemeinen die linienförmige Anordnung von Lautsprechern. Mehrere vertikal dicht aneinander gereihte Einzellautsprecher (*Line-Array-Elemente*) ergänzen sich dabei in ihrer Abstrahlcharakteristik zu einem homogenen Gesamtsystem. Aufgrund der vertikalen Aufreihung wird auch gelegentlich von *Schallzeilen* gesprochen. Ein Line-Array steht damit im Gegensatz zu einem konventionellen Lautsprecher-*Cluster*, bei dem Lautsprecher über- sowie nebeneinander platziert werden. In beiden Fällen jedoch möchte man eine Erweiterung des Abstrahlverhaltens gegenüber Einzellautsprechern erreichen, die zur Beschallung großer Auditorien nicht genügend Leistung liefern würden. Aufgrund der feineren Skalierbarkeit des Systems besteht insbesondere beim Line-Array die Möglichkeit, eine exakt auf die Zuhörerbereiche gerichtete Abstrahlung der Lautsprecher zu erzielen.

Wo immer auch mehr als ein einzelner Lautsprecher zur Beschallung benutzt wird. Ist mit Interferenzen zwischen den Systemen zu rechnen. Die Vermeidung größerer Überlappungsbereiche zwischen den Einzellautsprechern und der Umstand der konstruktiven Interferenz kommen Line-Array-Systemen bei der Erweiterung des Abstrahlverhaltens zu Gute.

Moderne Line-Array-Systeme werden oftmals auch als Linienstrahler bezeichnet. Dass dies allenfalls als theoretisches Modell Gültigkeit findet liegt auf der Hand, denn die Bedingungen eines perfekten Linienstrahlers werden in der Praxis von keinem Line-Array erfüllt.

Theoretisch könnte man sich ein Line-Array als vertikale Aufreihung von Punktschallquellen vorstellen. Vorausgesetzt, der Quellenabstand wäre hinreichend klein und die Ausdehnung der gesamten Konstruktion

unendlich, so würde daraus die Charakteristik eines Linienstrahlers resultieren.

Demnach ist es auch verständlich, dass lediglich das vertikale Aufreihen mehrerer Lautsprecher nicht ausreicht, um aus einem beliebigen Lautsprechersystem ein Line-Array zu machen, vielmehr gibt es verschiedene Kriterien, die eingehalten werden müssen, damit ein Line-Array als solches funktioniert.

Im folgenden soll erläutert werden, welche Vorteile respektive Nutzen ein Line-Array gegenüber konventionellen Clustern hat, welche Bedingungen eingehalten werden müssen und wie diese in aktuellen am Markt befindlichen Systemen umgesetzt werden.

Der Einsatz von Line-Array-Systemen ist in den letzten Jahren zu hoher Popularität herangewachsen, allerdings sind die dabei wirksamen physikalischen Gesetzmäßigkeiten schon seit längerer Zeit bekannt. Erste Ansätze verfasste Harry F. Olson 1957 in seinem Werk „Acoustical Engineering“ [3]. Er beschreibt darin die Richtwirkung der Abstrahlcharakteristik, die durch das dichte vertikale Aufreihen einzelner Schallquellen entsteht.



**Abb. 2-1 Line-Array-System
bei der Installation**

2.2 Die Punktschallquelle

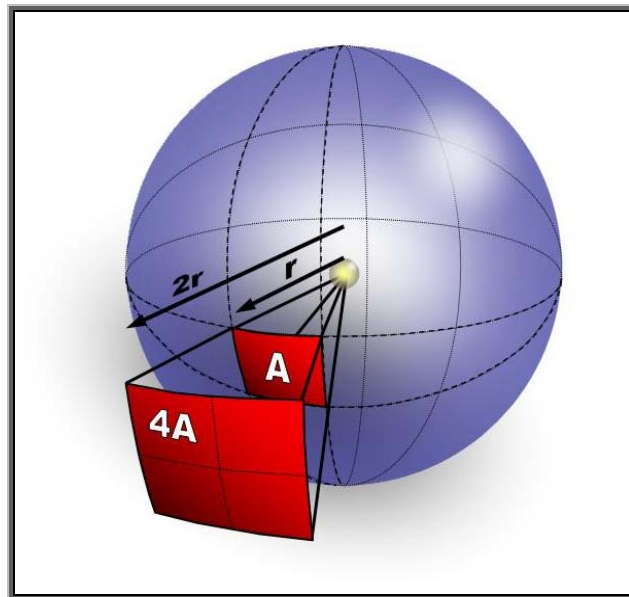


Abb. 2-2 Kugelschallquelle

Als Punktschallquelle wird eine Schallquelle bezeichnet, deren räumliche Ausdehnung von einem infinitesimal kleinen Punkt beschrieben wird. Befinden sich Punkte gleicher Amplitude und Phasenlage auf Mantelflächen konzentrischer Kugeln mit der Quelle als Mittelpunkt, so spricht man auch von einer Kugelschallquelle mit sphärischer Abstrahlcharakteristik.

Über die mathematische Bestimmung der Mantelfläche einer Kugel (Gl. 2-1) lässt sich eine Abstandsbeziehung zwischen Schallintensität und Abstand zur Quelle herleiten (Gl. 2-3).

Durch Einsetzen von

$$A_K = 4 \cdot \pi \cdot r^2$$

(Gl. 2-1)

in die Beziehung für die akustische Leistung

$$P_{ak} = \int_A \vec{I} \cdot \vec{dA}$$

(Gl. 2-2)

ergibt für die Schallintensität als Funktion des Abstands zur Quelle

$$I_Z(r) = \frac{P_{ak}}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

(Gl. 2-3)

Daraus folgt für die Pegeldifferenz zweier Entfernungen in logarithmischer Schreibweise

$$\Delta L_K = 10 \cdot \log_{10} \frac{I_2}{I_1} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

(Gl. 2-4)

Aus Abbildung 2-2 ist zu entnehmen, dass durch den quadratischen Einfluss des Abstands r die Fläche bei Abstandsverdopplung vervierfacht wird. Dadurch ergibt sich eine Schallintensitätsabnahme mit dem Faktor $\frac{1}{r^2}$, denn die gesamte akustische Schallenergie wird auf ein Vierfaches der Fläche verteilt. Anders ausgedrückt: die Energiedichte nimmt um ein Viertel ab. In logarithmischer Schreibweise entspricht diese Abnahme um den Faktor 4 einer Reduktion um 6dB (Gl. 2-4).

Diese Beziehung wird auch als *Abstandsgesetz* bezeichnet und findet auch bei der rechnergestützten Raumakustik-Simulation Verwendung. Vereinfacht werden hier Lautsprecher als Punktschallquellen dargestellt, deren Abstrahlcharakteristik (*Directivity*) durch einen *Directivity-Balloon* beschrieben wird (siehe Kap. 4).

2.3 Die Linienschallquelle

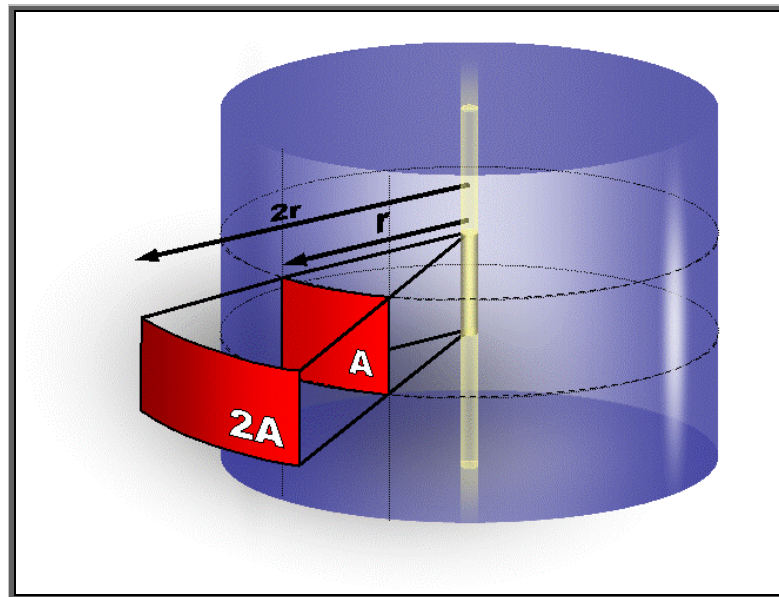


Abb. 2-3 Linienschallquelle

Eine unendlich lange, pulsierende Linie wird als Linienquelle bezeichnet. Es werden dabei zylinderförmige Schallwellen emittiert. Punkte gleicher Amplitude und Phasenlage liegen auf konzentrischen Kreisen um die Schallquelle. Im Gegensatz zur Punktschallquelle erfahren die Schallwellen eine Ausdehnung in nur einer Ebene, senkrecht zur Ausdehnung der Linienquelle.

Aus der Gleichung für die Mantelfläche eines Zylinders (Gl. 2-5) kann auch hier das geltende Abstandsgesetz hergeleitet werden (vgl. Kap. 2.2).

Durch Einsetzen von

$$A_z = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l$$

(Gl. 2-5)

in die Beziehung für die akustische Leistung (Gl. 2-2) ergibt hier für die Schallintensität als Funktion des Abstands zur Quelle

$$I_Z(r) = \frac{P_{ak}}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot l} \quad (\text{Gl. 2-6})$$

Da hier der Abstand nicht quadratisch sondern linear eingeht, verteilt sich die akustische Energie im Vergleich zur Kugelschallquelle bei Verdopplung des Abstandes auf nur das Doppelte der Fläche. Hieraus folgt eine Schallintensitätsabnahme um 3dB je Abstandsverdopplung.

$$\Delta L_Z = 10 \cdot \log_{10} \frac{I_2}{I_1} = \frac{r_2}{r_1} \quad (\text{Gl. 2-7})$$

Dabei ist die Schallintensität stets als Produkt aus Schalldruck und Schallschnelle zu betrachten

$$\vec{I} = p \cdot \vec{v} \quad (\text{Gl. 2-8})$$

Die Schallschnelle verhält sich dabei proportional zur Kennimpedanz der Luft. Aus der Beziehung

$$v = \frac{p}{\rho_0 \cdot c} \quad \text{mit } \rho_0 \cdot c = 400 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^3} \quad (\text{Gl. 2-9})$$

folgt

$$I \sim p^2 \quad (\text{Gl. 2-10})$$

2.4 Nachbilden einer Linienquelle durch Aufreihung von Punktschallquellen

Theoretisch lässt sich eine Linienschallquelle in viele unendlich kleine vertikal aufgereichte Punktschallquellen zerteilen, respektive ist es möglich, durch Aufreihung von Punktschallquellen das Verhalten eines Linienstrahlers nachzubilden. Das nach Christian Huygens benannte *Huygenssche Prinzip* liefert hierfür den physikalischen Hintergrund und besagt, dass eine beliebige Wellenfront aus einer entsprechend geformten Anordnung von Elementarwellen rekonstruierbar ist.

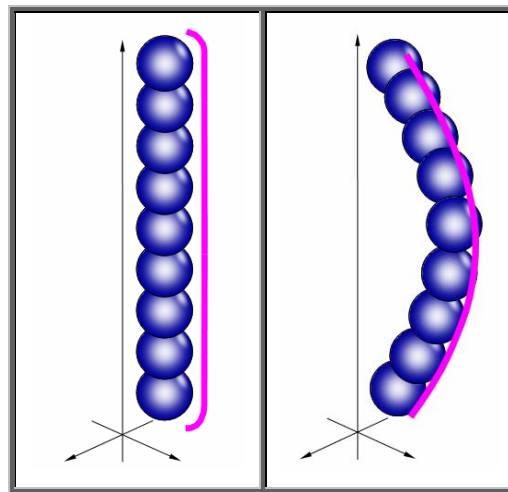


Abb. 2-4 Beispiele zur Rekonstruktion einer Wellenfront nach dem Huygensschen Prinzip

Hierbei gilt es, besondere Gesetzmäßigkeiten und Einschränkungen zu beachten. Im Wesentlichen handelt es sich um eine Approximation, deren Genauigkeit von folgenden Faktoren abhängt:

- Abstand der einzelnen Punktschallquellen zueinander
- Länge der Aufreihung insgesamt
- Größe der wirksamen strahlenden Fläche
- Betrachtete Wellenlänge
- Betrachtungsabstand

Durch das vertikale Aufreihen einzelner Punktschallquellen entsteht eine frequenzabhängige Bündelung der Abstrahlcharakteristik in der vertikalen Ebene. Dies ist auf die kohärente Kopplung (phasen- und amplitudengleiche Überlagerung) der Schallwellen zurückzuführen. Zugleich stellt sich in Anordnungsrichtung der Schallquellen eine Pegelverminderung ein, welche von destruktiven Interferenzen in jenem Bereich herrührt. Das beschriebene frequenzabhängige Phänomen hängt unmittelbar mit dem gewählten Quellenabstand zusammen. Dieser muss kleiner sein als die Hälfte der kleinsten betrachteten Wellenlänge.

$$d_{\max} < \frac{\lambda_{\min}}{2}$$

(Gl. 2-11)

Exemplarisch soll dies an einer Aufreihung von zehn idealen Kugelschallquellen mit einem Abstand von jeweils 10cm gezeigt werden

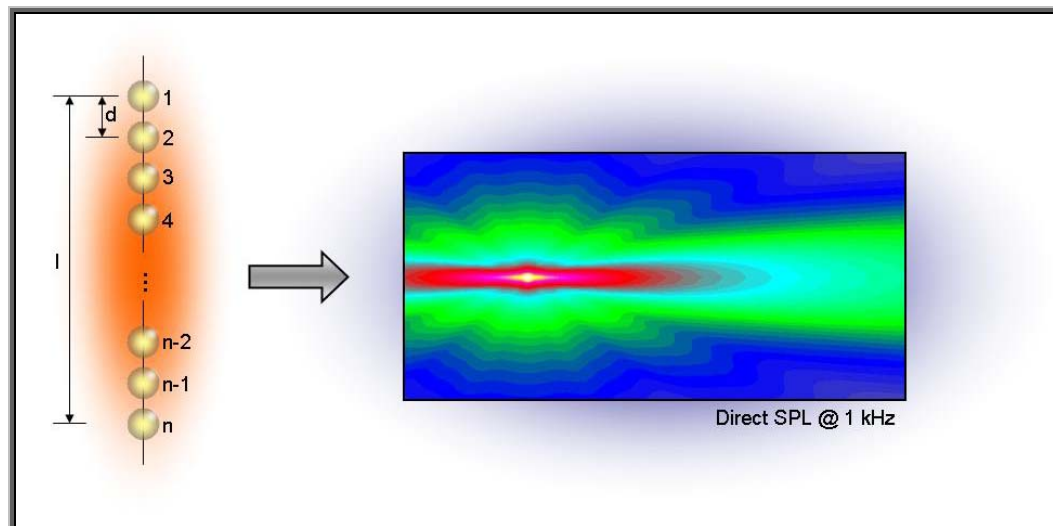


Abb. 2-5 Vertikale Aufreihung von n Kugelschallquellen ($n=10$, $d=10\text{cm}$) bei 1 kHz

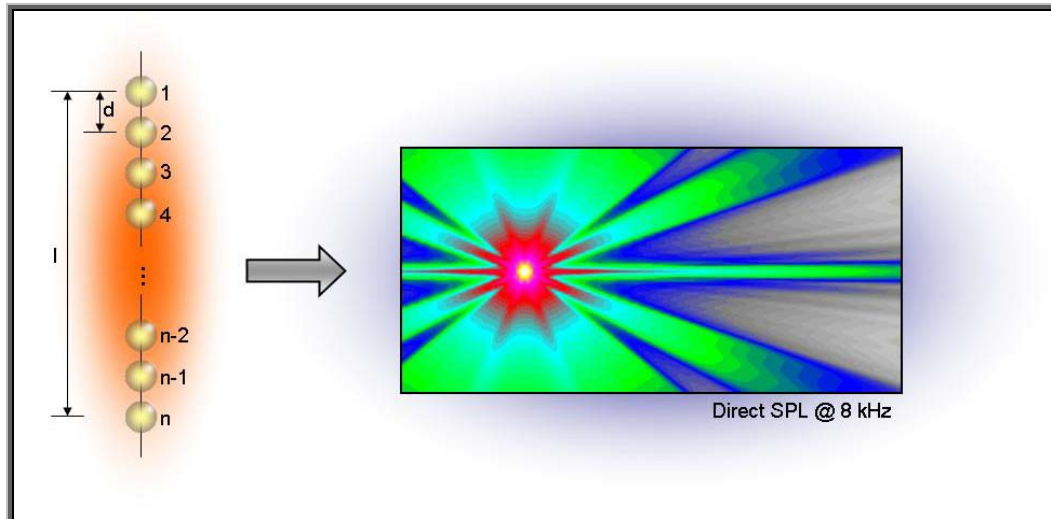


Abb. 2-6 Vertikale Aufreihung von n Kugelschallquellen ($n=10$, $d=10\text{cm}$) bei 8 kHz

Trifft die Abstandsbedingung wie in Abbildung 2-5 zu, so bildet sich durch die Bündelung ein erweitertes Nahfeld aus, in dem der Pegelabfall entsprechend dem eines Linienstrahlers 3dB je Abstandsverdopplung beträgt. Bei größer werdender Entfernung ist die Anordnung von Schallquellen aufgrund ihrer begrenzten vertikalen Ausdehnung als Punktschallquelle zu betrachten. Dies tritt ein, wenn der Betrachtungsabstand groß gegenüber der Länge des Arrays wird. Hier findet der Übergang in ein Fernfeld mit 6 dB Pegelabnahme statt. Dessen Lage hängt wiederum von der Array-Länge und der betrachteten Frequenz ab und lässt sich mit folgender Formel ermitteln:

$$r_{\text{üb}} \approx \frac{3}{2} F \cdot H^2 \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{(3 \cdot F \cdot H)^2}} \quad (\text{Gl. 2-12})$$

Entfernung des Übergangs zum Fernfeld [4]
(H = Länge des Arrays in Metern, F = Frequenz in kHz)

Der Wurzelausdruck in Gleichung 2-12 zeigt, dass es für Frequenzen kleiner $\frac{1}{3H}$ kein Nahfeld gibt und die Anordnung der Strahler lediglich ein Fernfeld mit 6dB Pegelabnahme ausbildet. Für hohe Frequenzen wird der Wurzelfaktor annähernd zu 1, was unter der Annahme $\lambda = \frac{1}{3F}$ zur häufiger verwendeten Formel nach Ureda führt.

$$r_{\text{üb}} \approx \frac{l^2 \cdot f_g}{700 \cdot \frac{m}{s}}$$

(Gl. 2-13)

Entfernung des Übergangs zum Fernfeld [5]
(l = Länge des Arrays in Metern, f = Frequenz in Hz)

Der Winkel, unter dem sich die Wellenfront im Fernfeld weiter ausbreitet ist ebenfalls abhängig von Frequenz und Array-Länge. Für vertikalen Öffnungswinkel ab dem Fernfeld-Übergang gilt die Berechnungsformel

$$BW_{-6dB} = 2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{1,9 \cdot \lambda}{L \cdot \pi} \right)$$

(Gl. 2-14)

Mittels der Gleichungen 2-13 und 2-14 wurde exemplarisch für ein 5,4m langes Array der Fernfeldübergang mit entsprechendem Öffnungswinkel errechnet und in Abb. 2-7 schematisch dargestellt.

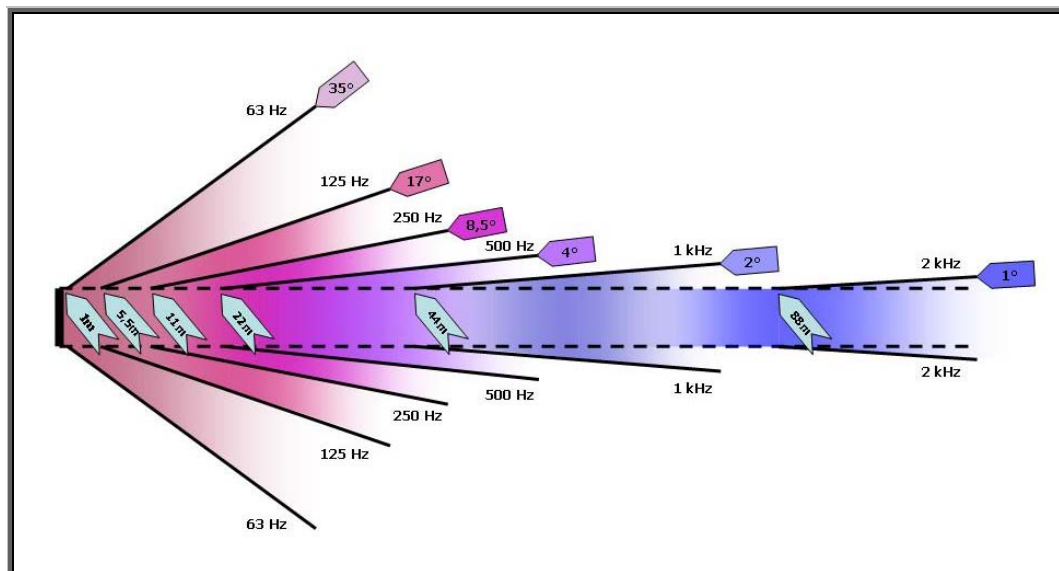


Abb. 2-7 Entfernung zum Fernfeld und Öffnungswinkel für eine Array-Länge von 5,4m

3 Line Arrays in der Praxis

Ein Line-Array-System besteht aus mehreren Einzellautsprechern, die vertikal angeordnet als ein homogen abstrahlendes Gesamtlautsprechersystem agieren. Das üblicherweise praktizierte Abhängen von der Bühnenkonstruktion oder der Saaldecke (das in der Fachsprache so genannte „*Fliegen*“) und die Möglichkeit zum individuellen Einstellen der Zwischenwinkel zu einer bogenförmigen Krümmung (dem so genannten *Curving*) charakterisieren Line-Arrays unter den Lautsprecher-Systemen.

Zumeist sind die einzelnen Elemente als Mehrweg-System mit breiter horizontaler, aber dafür umso engerer vertikaler Abstrahlcharakteristik konstruiert. Typische Directivity-Werte liegen um 90° bis 120° in der Horizontalen und bei 5° bis 15° in der Vertikalen. Besonderer praktischer Nutzen in der Beschallungstechnik liegt in der Skalierbarkeit des Gesamtsystems, welche sich durch die Anzahl der verwendeten Elemente und deren einstellbaren Zwischenwinkel manifestiert. Somit lässt sich die Abstrahlcharakteristik individuell an die Erfordernisse der Beschallungssituation anpassen, mit dem Ziel einen möglichst großen Anteil der Zuhörerbereiche mit Direktschall zu versorgen und gleichzeitig unerwünschte bzw. akustisch kritische Bereiche ausblenden.

Die Entwicklung hin zu mehreren eng bündelnden Lautsprecherelementen kann quasi als konsequente Weiterentwicklung eines klassischen Lautsprecher-*Clusters* betrachtet werden. Im Folgenden soll verdeutlicht werden, worin Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen Line-Array und Lautsprecher-*Cluster* bestehen.

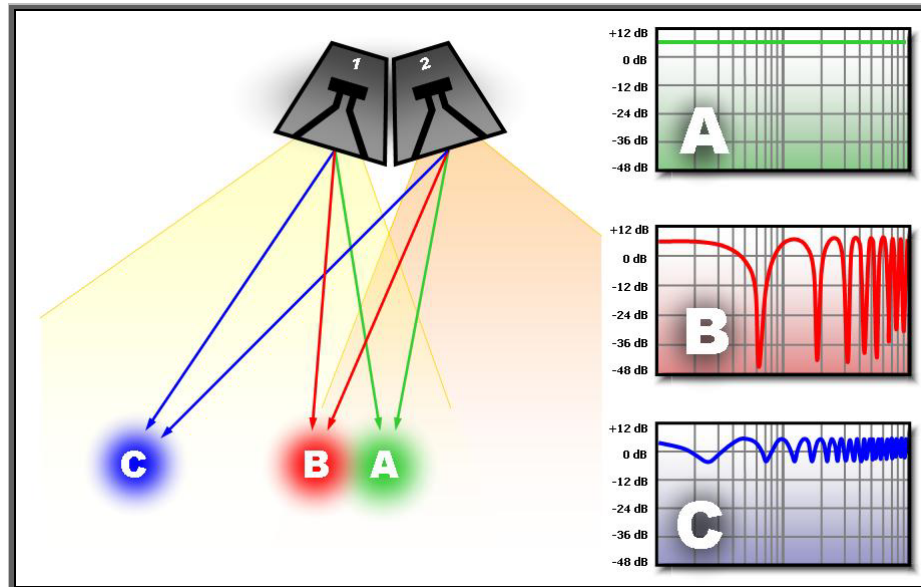


Abb. 3-1 Interferenzerscheinung durch Clusterbildung von Lautsprechern

Abbildung 3-1 zeigt eine typische Anordnung zweier konventioneller Lautsprecher mit nominellem horizontalem Abstrahlwinkel von etwa 80° , die Wegstrecken des Schalls zu den Zuhörerplätzen A, B und C, sowie schematisch den resultierenden Frequenzgang

In Punkt A ergibt sich eine Pegelerhöhung um 6 dB, da hier Pegel und Laufzeit beider Lautsprecher identisch sind. Einbrüche im Frequenzgang stellen sich erst in Punkt B ein, da ein geringer Phasenunterschied bei ähnlichen Pegelverhältnissen zum Tragen kommt. Es stellt sich ein kammfilterartiges Interferenzmuster ein, dessen Überhöhungen aus der Überlagerung von Wellenlängen aus ganzzahligen Vielfachen der Weglängendifferenz herrührt. Für dazwischen liegende Frequenzen ergibt sich eine mehr oder minder starke Auslöschung, abhängig vom vorliegenden Pegelunterschied.

Beim gezeigten Beispiel ist die Pegeldifferenz der beiden Lautsprecher in C kleiner als in B, da Punkt C weit außerhalb des Abstrahlwinkels von Lautsprecher 2 liegt. Der Schallpegel in dieser Richtung ist wesentlich niedriger, was dementsprechend zu weniger großen Auslöschungen führt.

Dieser Umstand wurde bei der Entwicklung von Line-Array-Systemen aufgegriffen und die Abstrahlcharakteristik der einzelnen Lautsprecher so klein gewählt, dass Überlappungsbereiche weitestgehend minimiert werden. Wie viele Parameter bei der Lautsprecher-Entwicklung muss dies jedoch als Kompromiss angesehen werden, denn aufgrund der vielen möglichen Curving-Varianten eines Line-Arrays kann niemals ein für alle wählbaren Zwischenwinkel optimaler Öffnungswinkel gefunden werden. Außerdem ist die Frequenzabhängigkeit der Directivity zu beachten, welche im besten Fall im Hochtonbereich eine scharfe Trennung der Einzelsysteme zulässt.

Oftmals werden die Begriffe Line-Array und Linienstrahler synonym verwendet. Tatsächlich gelingt es aber keinem am Markt befindlichen Line-Array-System exakte Zylinderwellen über den gesamten nutzbaren Frequenzbereich zu bilden. Berücksichtigt man die für die Theorie geltenden Bedingungen in der Praxis, so leuchtet der Grund hierfür ein. Die Abstrahlcharakteristik eines Line-Array-Elements entspricht nicht der eines Kugelstrahlers.

Wie es trotzdem möglich ist die entscheidenden Vorteile der Zylinderwelle in Abstrahlcharakteristik und Reichweite gegenüber der sphärischen Ausbreitung einer konventionellen Lautsprecherbox für die Beschallungstechnik nutzbar zu machen, soll im Folgenden erläutert werden.

Andeutungsweise wurde bereits zu verstehen gegeben, dass durch simples Aneinanderreihen von Lautsprechern keine Linienstrahler-Charakteristik erreicht werden kann. Eine kohärente Kopplung der Schallwellen aufgrund eines hinreichend kleinen Abstands der Lautsprecherelemente kann lediglich im Tieftonbereich stattfinden, da die Abstrahlcharakteristik weitgehend ungerichtet erfolgt und die Abstandsbedingung nach Gleichung 2-11 für die Lautsprecher erfüllt werden kann. Für Wellenlängen im Hochtonbereich wäre demnach ein Quellenabstand von nur 1-2 cm notwendig, was aber konstruktionsbedingt mit herkömmlichen Hochton-Treibern kaum zu praktizieren ist.

Anstelle dessen nutzen Line-Array-Lautsprecher spezielle Schallführungen, die eine weitgehend ebene Wellenfront an der Austrittsöffnung erzeugen. Diese so genannten *Waveguides* (Abb. 3-2) passen die Laufzeiten der Schallwellen über der gesamten Öffnungshöhe an und ermöglichen so eine stark gerichtete Abstrahlung einer weitgehend ebenen, kohärenten Wellenfront. Dies ermöglicht beim Aneinanderreihen mehrerer Lautsprecher eine schärfere Trennung und zugleich das Minimieren destruktiver Interferenzen in den Überlappungsbereichen.

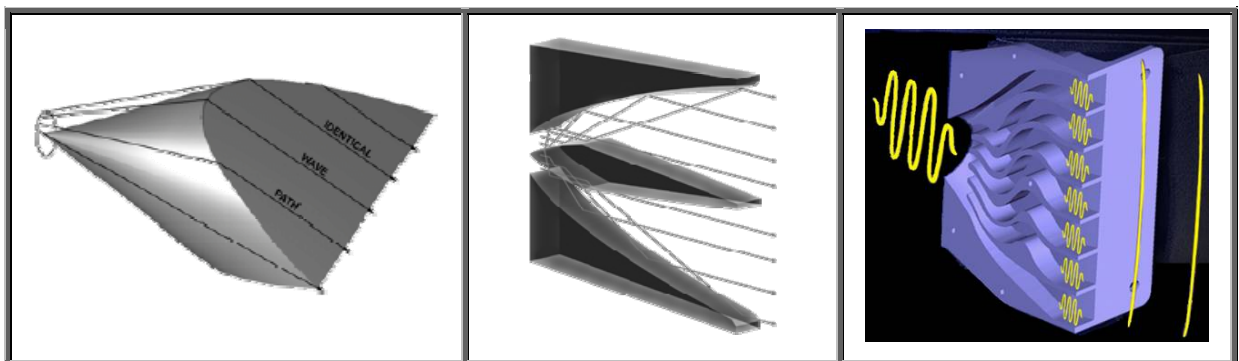


Abb. 3-2 Technische Umsetzung von Schallführungen für Hochtoneinheiten in Line-Array-Lautsprechern. *DOSC-Waveguide* (L'Acoustics), *DPRWG* (Outline), *Hydra* (E-Voice)

Die scharfe Trennung einzelner Lautsprecherelemente wird oftmals als akustische Kopplung missverstanden und als Erklärung für das Ausbilden einer Zylinderwelle gebraucht. Tatsächlich besagen aber die Gesetzmäßigkeiten der Wellenlehre, dass sich Wellen mehrerer Erregungszentren durch Überlagerung nicht gegenseitig beeinflussen können, sich also so ausbreiteten, als wären die anderen nicht vorhanden. Daher sind Schallwellen nicht in der Lage durch Überlagerung eine neue Wellenform zu bilden. [1] [12]

Der Grund dafür, dass Line-Array-Systeme trotzdem als solche auch im Hochtonbereich funktionieren, ist darin zu sehen, dass es aufgrund der weitgehend ebenen Wellenfront bei enger vertikaler Directivity der Einzel-elemente eine kohärente Wellenfront des gesamten Arrays resultiert. Für die maximale zulässige Krümmung der am Waveguide austretenden Wellenfront ist die Bedingung $d < \frac{\lambda_{\min}}{4}$ einzuhalten. [4]

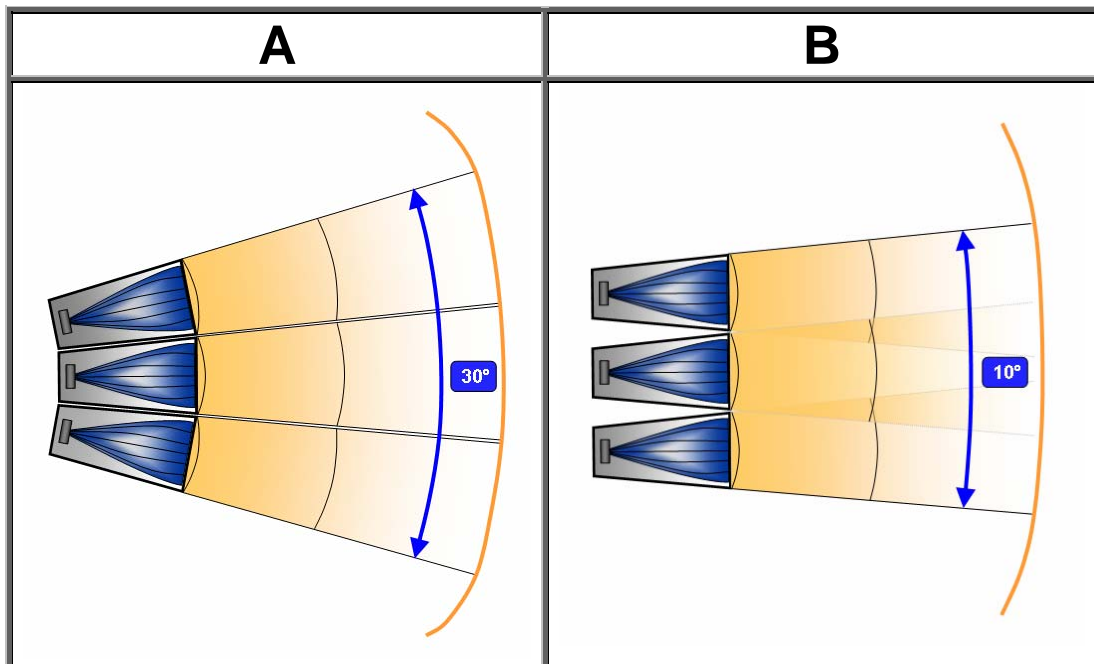


Abb. 3-3 Öffnungswinkel und resultierende Wellenfront eines Line-Arrays aus drei Elementen mit jeweils 10° (A) und 0° Zwischenwinkel (B)

Wie man Abbildung 3-3 entnehmen kann, kommt es aufgrund der in B skizzierten vertikalen Directivity von ca. 10° und des Zwischenwinkels der Elemente von 0° immer noch zur Überlappung des Abstrahlbereichs. Dass diese aber kaum Einfluss auf den resultierenden Frequenzgang hat, soll am Beispiel einer typischen Beschallungssituation gezeigt werden (Abb. 3-4).

Schematisch dargestellt, wird hier die gegenseitige Beeinflussung der Line-Array-Elemente an einem Punkt im Publikumsbereich. Die Abbildung verdeutlicht, dass die auf den Bereich des Zuhörers ausgerichteten oberen drei Elemente untereinander nur geringe Laufzeitunterschiede aufweisen und daher keine Interferenzerscheinungen zu erwarten sind. Die unteren drei Elemente zeigen ebenfalls kaum Einfluss am Platz des Zuhörers, da deren Wellenfront aufgrund von Directivity und gewähltem Curving nur mit vermindertem Pegel eintrifft. Der umgekehrte Sachverhalt entsteht, wenn sich die Position des Zuhörers weiter in die Nähe des Arrays rückt.

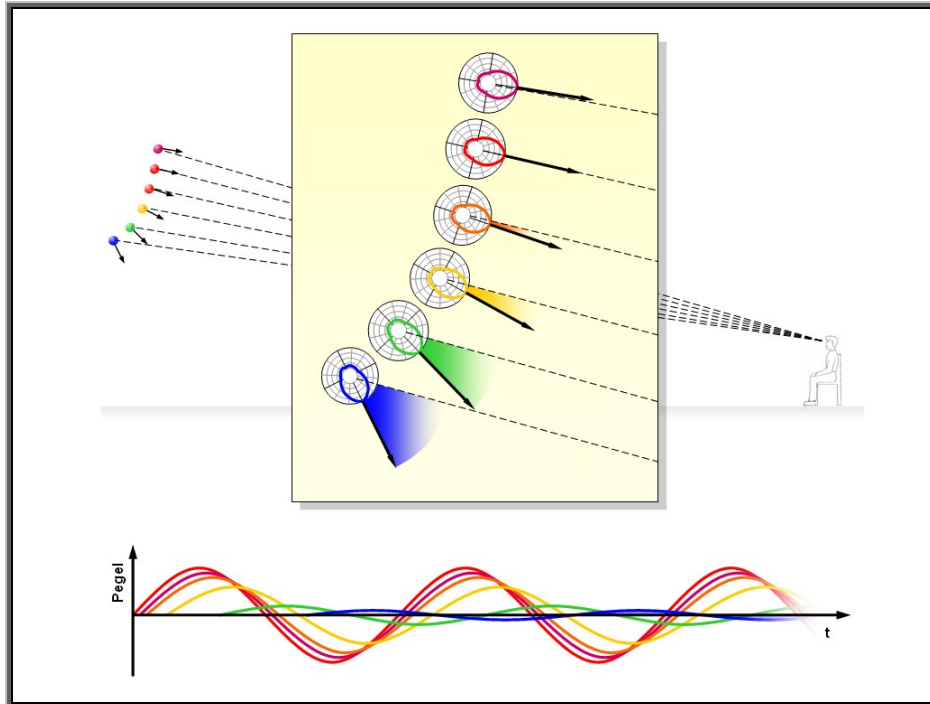


Abb. 3-4 Schematische Darstellung einer typischen Line-Array-Konfiguration mit Pegel- und Phasenbezug. Die beim Zuhörer resultierende Pegelbeziehung der Lautsprecher-Elemente ist den angedeuteten vertikalen Polar-Darstellungen zu entnehmen, der Phasenversatz ergibt sich durch den Abstand zum Zuhörer.

Mit der Tatsache, dass direkt unter dem Array nur noch ein einziges Element den Hauptanteil des Schalldrucks liefert und die anderen lediglich einen geringen Beitrag zur Interferenz leisten, lässt sich auch die oftmals missverstandene Abstandsbeziehung beim Line-Array erläutern.

Die Aussage „3dB Pegelabfall pro Entfernungsverdopplung“ gibt oftmals Anlass zur Annahme, dass Line-Array-Systeme mehr Schalldruck in der Ferne liefern als gewöhnliche Horn- bzw. Konuslautsprecher. Kehrt man die Betrachtungsweise allerdings um, und bewegt sich aus großer Entfernung auf das Array zu, so herrscht eine Pegelzunahme pro Entfernungshalbierung von 6dB analog zu dem für eine Punktschallquelle geltenden Abstandsgesetz. Mit dem einzigen Unterschied, dass jedes Line-Array-Element lediglich nur einen Teil der gesamten akustischen Energie liefern muss. Rückt die Hörposition in das Nahfeld, so ist die Pegelzunahme geringer gegenüber der eines konventionellen Lautsprechers, da hier nur noch ein Bruchteil der Schallleistung wirkt.

Dies wiederum unterstreicht den Vorteil von Line-Array-Systemen bei der gleichmäßigen Pegelverteilung über der gesamten Hörfläche. Es gelingt, viel Energie in die Ferne zu transportieren, ohne dabei die vorderen Publikumsbereiche unnötig laut zu beschallen.

Um dieses zu erreichen ist ein präzises Anpassen an die jeweilige Beschallungssituation unabdingbar. Position, Curving, Frequenz- und Pegelabstimmung des Arrays müssen sorgfältig gewählt werden, um die Vorteile der Line-Array-Technik nutzbar zu machen. Unterstützend kann dabei die Verwendung von Simulationsprogrammen sein, welche in Kapitel 4 näher erläutert werden sollen.

4 Simulation von Line-Array-Systemen

Die Vielzahl der zu beachtenden Parameter bei der Installation von Line-Array-Systemen macht eine Vorhersage des zu erwartenden Abstrahlverhaltens unabdingbar. Durch die rechnergestützte Simulation wird es möglich, Ausrichtung, Pegelverteilung sowie Pegel- und Frequenzeinstellungen zu optimieren, sowie das System an die jeweilige Beschallungssituation anzupassen, wie es durch bloßes Abschätzen kaum möglich sein dürfte.

Die folgenden Kapitel sollen einen Überblick über gängige Simulationsprogramme und den zugrunde liegenden Berechnungsmodellen schaffen.

4.1 Simulationsprogramme für Raumakustik

Die Simulationsprogramme *EASE* und *Ulysses* gelten als weit verbreitete Software zur Raumakustik-Simulation. Mittels internen CAD-Werkzeugen werden die räumlichen Gegebenheiten und somit die Begrenzungsflächen der Schallausbreitung konstruiert. Durch die Angabe des Materials werden Begrenzungsflächen mit einem Absorptionskoeffizienten belegt und geben zugleich die Reflexionseigenschaften des Raumes vor.

Die Software basiert dabei auf einem Modell, das Schallquellen als Punktstrahler mit einer definierten Abstrahlcharakteristik ansieht. Vereinfacht wird also davon ausgegangen, dass sich der Schall sphärisch ausbreitet. Mit Hilfe von Verfahren der geometrischen Akustik wird eine Strahlenverfolgung vorgenommen bzw. an den Begrenzungsflächen das Spiegelquellenmodell angewendet und so der Schalldruckpegel an jedem einzelnen Punkt des Raums ermittelt werden. Dabei lässt sich noch differenzieren, ob nur Direktschall, Direkt- und Nachhall oder andere

raumakustisch relevante Parameter wie Nachhallzeit oder Sprachverständlichkeit (*STI*, *Alcons*) ermittelt werden sollen.

Als Berechnungsgrundlage dienen Balloon-Daten, die den Lautsprecher als Punktschallquelle mit einer charakteristischen Directivity in der Simulation repräsentieren. Aus den Angaben von Sensitivity und der maximalen elektrischen Leistung wird mittels Abstandsgesetz (siehe Gl. 2-3) der an jedem einzelnen Punkt der Hörfläche herrschenden Direktschallpegel für eine bestimmte Frequenz ermittelt.

$$L_{dir} = L_K + 10 \log(P_{el})dB - 20 \log(r_{LH})dB + 20 \log(\Gamma_L(\vartheta_H))dB \quad (\text{Gl. 4-1})$$

Direktschallpegel-Berechnung eines Lautsprechers in EASE

L_{dir} - Direktschallpegel
 L_K - Sensitivity (1m,1W) dB
 P_{el} - maximale Leistung
 r_{LH} - Entfernung Lautsprecher-Hörer
 $\Gamma_L(\vartheta_H)$ - Richtungsfaktor

Bei Überlagerung mehrerer Quellen wird für jeden Punkt eine phasenrichtige Addition der Quellen bei einer bestimmten Frequenz vorgenommen.

$$A_{Ges} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n A_i \cdot \sin(\omega_i t) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n A_i \cdot \cos(\omega_i t) \right)^2} \quad (\text{Gl. 4-2})$$

Für Punkte mit größerem Abstand zur Quelle wird außerdem die der Schallenergie widerfahrende Luftabsorption mit einer entfernungs- und frequenzabhängigen Funktion berücksichtigt.

4.1.1 Balloon Daten

Dreidimensionale Balloon-Daten (*Directivity-Balloons*) dienen zur modellhaften Beschreibung des räumlichen Abstrahlverhaltens eines Lautsprechers. Gewonnen werden die Daten, in dem an jedem Punkt eines den Lautsprecher umspannenden Kugelrasters die Impulsantwort gemessen und daraus Schalldruck sowie Phaseninformation ermittelt wird. Optimalerweise geschieht die Messung unter Freifeldbedingungen sowie im Fernfeld des Lautsprechers. Der Abstand r zum Lautsprecher gilt dann als hinreichend groß, sobald sich dessen Abstrahlcharakteristik bei größer werdender Entfernung nicht mehr ändert. Dazu müssen die Bedingungen $(r \gg d)$ und $(r \gg \frac{d_{str}}{\lambda})$ erfüllt sein [6], wobei d für die Abmessungen des Lautsprechers und d_{str} für die Größe der strahlenden Fläche steht. Zur genauen Bestimmung des Fernfeld-Übergangs kann zudem Gleichung 2-13 angewandt werden.

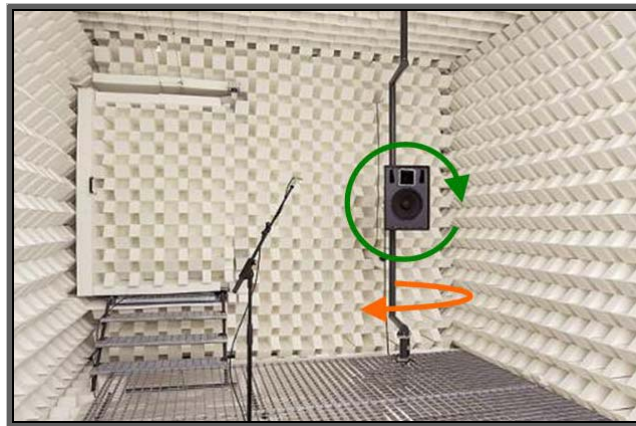


Abb. 4-1 Reflexionsarmer Raum mit Drehvorrichtung zur Erfassung von Balloon-Daten

Die in Abbildung 4-1 gezeigte Drehvorrichtung im reflexionsarmen Raum verdeutlicht das Messverfahren. Der in zwei Achsen drehbare Schwenkarm ermöglicht ein exaktes Anfahren der Kugelrasterpunkte bei gleichzeitig konstant bleibendem Messabstand. Voraussetzung ist dabei allerdings das präzise Positionieren der Schallzentren des Lautsprechers auf den Drehachsen.

Die Messung der Balloon-Daten erfolgt zunächst unabhängig von der späteren Verwendung in einer Simulationssoftware. Wie in der Lautsprecher-Messtechnik üblich, wird in einem Meter Abstand bei einem Watt Leistung gemessen, bzw. auf diese Messentfernung zurückgerechnet wenn größere Abstände nötig sind. Die am Lautsprecher angelegte Spannung errechnet sich aus dessen Nennimpedanz.

$$U_m = \sqrt{1W \cdot Z_N}$$

(Gl. 4-3)

Für die Verwendung in Simulationsprogrammen existieren mehrere unterschiedliche Datenformate, als gängigste Auflösung hat sich allerdings das 5°-Raster mit einer Frequenzeinteilung von 1/3-Oktave etabliert. Die Messung einer Vollkugel macht somit 2522 Messpunkte notwendig,¹ was einen zeitlichen Aufwand von mehreren Stunden mit sich bringt. Weist der Lautsprecher Symmetrieachsen auf, so lassen sich diese zur Vereinfachung nutzen, indem nur eine Halb- oder Viertelkugel vermessen wird.

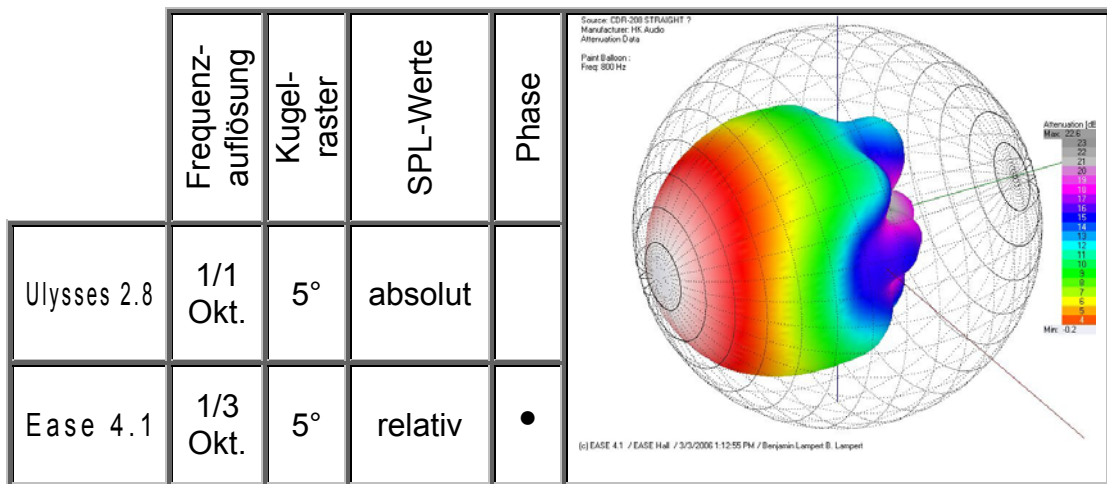


Abb. 4-2 Directivity-Balloons eines Line-Array-Elements

¹ Bei einer Vollkugel ergibt sich aus einem Raster von 5° und 72 Horizontalschwenks mit jeweils 36 Messpunkten eine Summe von 2664 Messpunkten. Genau genommen muss an den beiden Polstellen kein kompletter Umlauf durchgeführt werden, da dieser lediglich einen einzigen Punkt des Kugelrasters beschreibt. Die Anzahl der Messpunkte reduziert sich somit auf 2522.

4.1.2 Dynamic Link Library (DLL)

Ein erweiterter Ansatz zur Simulation komplexer Lautsprechersysteme wie Line Arrays ist mit der Implementierung so genannter DLLs (*Dynamic Link Library*) gegeben. DLL ist eine Funktionsgruppe des Microsoft Windows Betriebssystems und tritt als eine aus dem Programmkern einer Anwendung ausgelagerte Datei mit der Endung *.dll* auf. Diese enthält Funktionen oder Algorithmen, die nach Bedarf vom Hauptprogramm (im betrachteten Fall die Simulationssoftware) aufgerufen werden kann.

Die verwendeten Rechenvorschriften werden zumeist vom Hersteller des Line-Arrays entwickelt. Dabei muss kein Standard eingehalten werden, vielmehr gibt es unterschiedliche Ansätze, wie das Verhalten eines Line-Arrays –im besondern das Verhalten im Nahfeld– nachgebildet wird.

Zunächst hilft die DLL bei der Eingabe und der Verwaltung der Line-Array-Parameter (Anzahl der Elemente, Curving, Pegel etc.), so dass sich auf einfache Weise Veränderungen an der Gesamtkonfiguration vornehmen lassen. Das Handhaben eines Line-Arrays in der Simulationssoftware mittels DLL gestaltet sich durch die grafische Benutzeroberfläche besonders anwenderfreundlich. Über die Eingabemaske kann die gewünschte Array-Konfiguration eingestellt werden, die selbstverständlich mit den realen Gegebenheiten übereinstimmen muss. So ist es z.B. nicht möglich, größere Zwischenwinkel zu wählen, als dies tatsächlich durch die gegebene Gehäuseform möglich wäre.

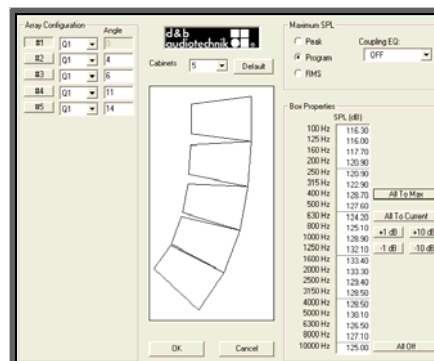


Abb. 4-3 Grafische Benutzeroberfläche einer DLL

Zur Berechnung der Schallpegelverteilung über einem Zuhörerbereich ruft die Simulation die DLL auf und meldet die Koordinaten des jeweiligen Empfangspunkts auf der Hörfläche. Die Berechnungsvorschrift der DLL ermittelt daraus den resultierenden Schalldruckpegel und übergibt das Ergebnis an das Hauptprogramm. Außerdem kann je nach Anwendungsfall (entweder vom der Simulation oder dem Anwender selbst) entschieden werden, welche Auflösung für Frequenz und Directivity benötigt wird, respektive in Anbetracht des Rechenaufwands sinnvoll ist.

Mit Hilfe dieses Verfahrens kann der entfernungsabhängigen Directivity eines Line-Arrays Rechnung getragen werden. Das Resultat und somit die Genauigkeit der Übereinstimmung mit der Realität hängt daher letzten Endes vom implementierten Algorithmus der DLL ab. Die Raumakustik-Software CATT-Acoustic nutzte als erste die Technik der DII in einem eigenen, DDI^2 genannten Verfahren, welches mit entfernungsabhängigen Balloon-Daten arbeitet. Das Abstrahlverhalten eines Lautsprechers wird dabei durch mehrere Directivity-Balloons in unterschiedlichen Messabständen beschrieben und vom Algorithmus innerhalb der DII interpoliert. Als Grundlage der Berechnungsmethode können unter anderem folgende Modelle Verwendung finden:

- Jedes Line-Array-Element wird durch *einen* Daten-Balloon beschrieben
- Modell mittels Interpolation aus entfernungsabhängigen Balloon-Daten
- Substitution der Schallzentren eines Line-Array-Elements
- Substitution der Wellenfront eines Line-Array-Elements durch eine Anzahl Punktschallquellen
- Modell mit rein mathematischer Berechnungsvorschrift

² DDI: DII Directivity Interface.

- Modell mit mathematischer Berechnungsvorschrift und Korrektur durch Messreihen

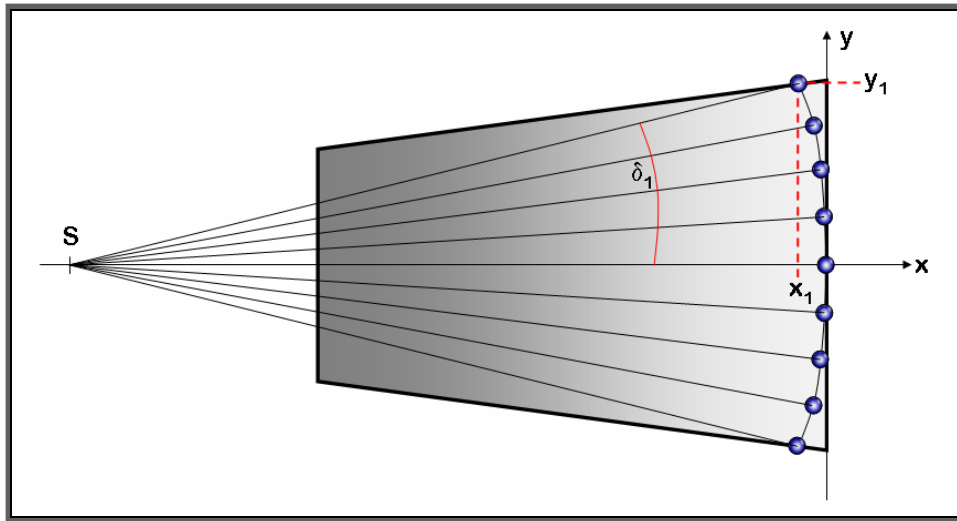


Abb. 4-4 Beispiel eines DLL-Berechnungsmodells für Line-Array-Elemente mittels Substitution durch Punktschallquellen

4.2 Herstellerspezifische Simulationstools

Die meisten Hersteller von Line-Array-Systemen bieten neben den Datensätzen für die gängigen Raumakustik-Simulationsprogramme auch Werkzeuge in Form von Vorhersage-Software für Line-Arrays aus ihrer eigenen Produktreihe an.

Im meist auf das Wesentliche reduzierten Funktionsumfang findet sich hier in der Regel nur eine zweidimensionale Darstellung der Zuhörerbereiche, was eine Beschränkung auf die Schallpegelverteilung des Direktschalls in der Hauptabstrahlebene bedeutet. Dies hat wiederum zum Vorteil, alle für die Konfiguration des Arrays relevanten Parameter wie Ausrichtung, Curving und Pegelanpassung auf einen Blick sichtbar und veränderbar sind. Ein solches Programm soll keine Raumakustik-Simulation ersetzen sondern lediglich einen Anhaltspunkt bei der Planung, vor oder während dem Installieren des Line-Arrays dienen. Als Berechnungsalgorithmen finden die in Kapitel 4.1.2 genannten Ansätze der DLL Verwendung. Auch hier variiert das Verfahren von Hersteller zu Hersteller.

Eine herstellerübergreifende Vorhersage speziell für Line-Array-Systeme bietet die Software *EASE Focus*. Basierend auf der *EASE* wurde hier eine offene Programm-Plattform geschaffen, deren Funktionsumfang auf die Verwendung von Line-Arrays zu geschnitten ist.

Als Besonderheit sei abschließend *MAPPOnline* der Firma *Meyer Sound* erwähnt. Das Konzept basiert auf einer Java-Anwendung, die dem Benutzer mit einer grafischen Oberfläche die Eingabe der Array-Parameter ermöglicht. Zur Berechnung der Schallpegelverteilung wird dann eine Online-Anfrage an einen Berechnungsserver gestellt, und das Ergebnis an die Applikation zurückgeliefert. *Meyer Sound* verwendet als Berechnungsgrundlage komplexe Balloon-Daten (Amplituden- sowie Phaseninformation) ihrer Line-Array-Elemente mit einer Kugelraster-Auflösung von nur einem Grad. Für Frequenzen unter 125 Hz wird zudem

das BEM-Verfahren³ angewandt. *MAPPOnline* kann zudem auch Begrenzungsflächen mit unterschiedlichen Materialien sowie Umgebungsparameter wie Temperatur und Luftdruck in die Kalkulation einbeziehen.

Screenshots einiger Simulationstools:

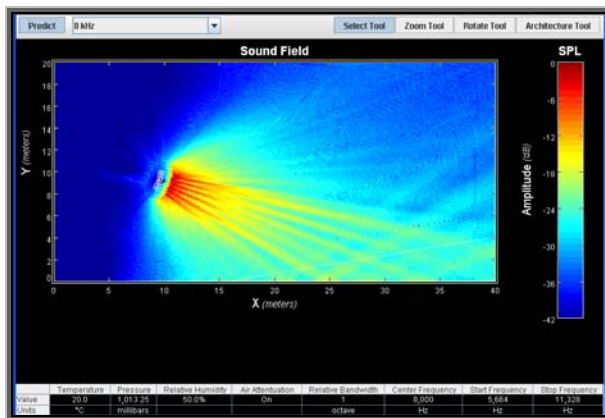


Abb. 4-5 MAPPOnline Vorhersage-Software

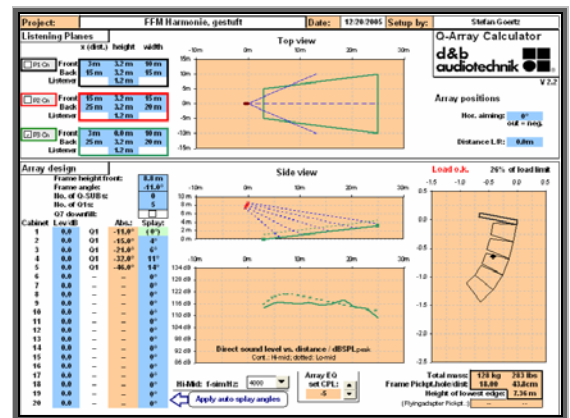


Abb. 4-6 Auf MS Excel basierendes Spreadsheet für die Vorhersage des Q1-Line-Array-Systems (d&b)

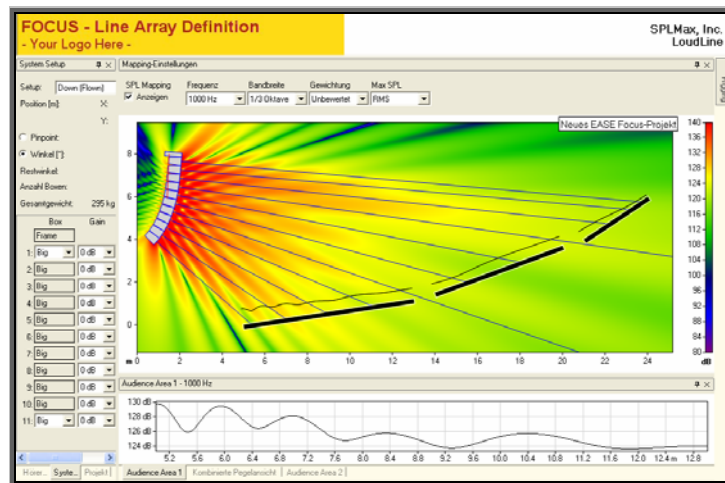


Abb. 4-7 EASE Focus

³ BEM: Boundary Element Method, rechnergestütztes Verfahren zur Bestimmung der Ausbreitung von Wellenfronten mittels Segmentierung von Grenzflächen.

5 Simulation von Line-Array-Systemen mittels Balloon-Daten

5.1 Anmerkungen zur Gültigkeit

Das gängige Verfahren zum Erzeugen von Balloon-Daten (vgl. Kap 4.1.1) bringt Einschränkungen bei der Verwendung in Simulationsprogrammen mit sich. Zum einen ist die Auflösung für das Kugelraster stets ein Kompromiss aus Genauigkeit und Zeitaufwand der Messung, zum anderen muss mit Fehlern aus der Interpolation der Frequenzbänder gerechnet werden.

Der gewählte Messabstand hingegen stellt quasi eine Momentaufnahme *einer* bestimmten Distanz zum Lautsprecher bzw. Cluster dar und lässt nicht auf Messwerte aus anderen Entfernungen schließen. Wie bereits diskutiert, tragen Balloon-Daten der entfernungsabhängigen Directivity eines Lautsprechers keine Rechnung.

Besonders bei der Simulation von Line-Array-Systemen ist dies aber von entscheidender Bedeutung, zumal sich die Entfernungsabhängigkeit durch die Anzahl der Array-Elemente und deren Zwischenwinkel ergibt.

Ebenso ist es auch möglich, einen Balloon von mehreren Lautsprechern im Verbund zu messen, um so verschiedene Line-Array-Konfigurationen zu erfassen. Als Bedingung für die Messentfernung muss hier wiederum das Fernfeld des Arrays gelten. Somit wird aber lediglich das Abstrahlverhalten im Fernfeld als Balloon erfasst. Bei der Verwendung eines solchen Array-Balloons in der Simulationssoftware muss dann beachtet werden, dass sich die Directivity stets auf nur eine Entfernung – und zwar auf die verwendete Messentfernung – bezieht. Durch das Einsetzen in die Simulation wird das Array als Punktschallquelle betrachtet und hat somit nur im Fernfeld Gültigkeit.

5.2 Simulation mit Elementar-Balloons ⁴

Zunächst soll untersucht werden, mit welcher Genauigkeit die Simulation eines Line-Array-Systems mit Balloon-Daten einzelner Line-Array-Elemente möglich ist. Zu Vergleichs- und Simulationszwecken wurden Balloon-Daten des *Cohedra* Line-Array-Systems der Firma *HK Audio* herangezogen (siehe Anhang A). Diese lagen zum einen von einem einzelnen Lautsprecher-Element, als auch von drei Elementen in Array-Konfiguration mit einem Zwischenwinkel von zweimal 4,5 Grad vor.

Die Daten wurden im reflexionsarmen Vollraum mit einem Messabstand von 4 Metern erfasst. Die Gültigkeit der Messwerte für das Array kann aus der Fernfeld-Bedingung (Gl. 2-13) ermittelt werden. Die höchste Frequenz, bei der die Messentfernung von 4m bei 78cm Arraylänge noch im Fernfeld liegt errechnet sich zu

$$f_g = \frac{r_{üb} \cdot 700 \cdot \frac{m}{s}}{l^2} = 4978 \text{ Hz}$$

(Gl. 5-1)

Im folgenden Vergleich wird ein Line-Array in der Simulationssoftware aus drei Elementen zusammengesetzt und dabei jeweils der Elementar-Balloon des gemessenen Einzel-Elements verwendet. Als Referenz gilt dabei der Daten-Balloon der entsprechenden Array-Konfiguration. Unter dem Vorbehalt, dass sich dieser Vergleich ausschließlich auf eine dem Messabstand entsprechenden Entfernung von 4m bezieht, können auch höhere Frequenzen als die oben berechnete Grenzfrequenz betrachtet werden. Im Simulationsprogramm *EASE 4.1* wurde dazu eine Publikums-Fläche (*Audience Area*) in die vertikale Ebene des Arrays gelegt, um die vertikale Abstrahlcharakteristik der zu untersuchenden Lautsprecher darzustellen. In zwei Durchgängen wurde dabei jeweils die

⁴ Der Begriff *Elementar-Balloon* ist eine Wortschöpfung des Autors und wird im weiteren Verlauf synonym mit der Begrifflichkeit des *Directivity-Balloons* eines einzelnen Lautsprecher-Elements innerhalb eines Arrays verwandt.

Schallpegelverteilung (*Mapping*) des aus drei Elementar-Balloons zusammengesetzte simulierte Array, sowie des gemessenen Array-Balloons erzeugt. Laufzeitunterschiede der Lautsprecher untereinander werden mit Berechnungsverfahren *Interference Sum* berücksichtigt. [8]
 Zur Verifikation wurden in der Simulation zum einen der Frequenzgang auf der Hauptabstrahlachse in vier Metern Abstand, sowie der Mittelwert (*Average*) aller Werte auf der 60x40 Meter großen Hörfläche ermittelt. Die Simulation des Line-Arrays zeigt dabei große Übereinstimmung mit den Werten des gemessenen Ballons, es kann daher von einem energetischen Gleichgewicht ausgegangen werden.

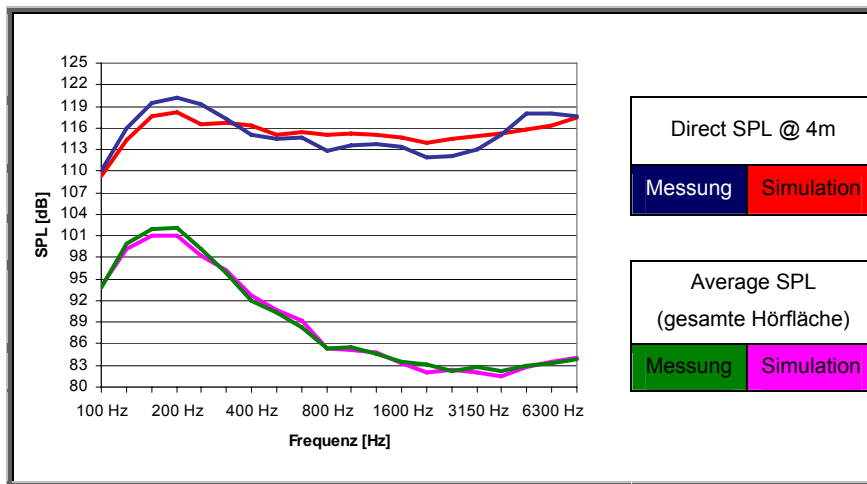


Abb. 5-1 Vergleich der simulierten Direktschall-Pegelverteilung eines Line-Arrays aus 3 Elementen (9° Curving) und der entsprechenden Referenzmessung

Wie aus Kapitel 2.4 hervorgeht, handelt es sich bei diesem Experiment um eine Aufreihung von Punktschallquellen mit einem definierten Abstand. Da aber das Waveguide des Line-Array-Elements eine weitgehend ebene Wellenfront erzeugt, die sich über die gesamte Höhe des Lautsprechers erstreckt und daher nur unter besonderen Bedingungen als Punktschallquelle anzusehen ist, muss mit Fehlern der Simulation gerechnet werden. Die Lambda-Halbe-Bedingung aus Gleichung 2-11 sagt für einen Quellenabstand von 25cm eine interferenzfreie Kopplung

bis ca. 680Hz voraus. Dies ließe genaue Ergebnisse ohne Interferenzerscheinung bis einschließlich zur 500 Hz-Oktave erwarten.

Die in Abbildung 5-2 gezeigte Gegenüberstellung der oktavgemittelten Pegelverteilung von simulierter und gemessener Directivity bestätigt eindeutig die erwartete Divergenz zu hohen Frequenzen.

Wobei zu erkennen ist, dass entgegen der Annahme eine hohe Übereinstimmung bis zur 1kHz-Oktave gegeben ist –in der Hauptabstrahlrichtung sogar bis 2kHz. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Abstandsbedingung nicht das einzige Kriterium für die akustische Kopplung von Schallquellen ist. Vielmehr liegt die Vermutung nahe, dass das frequenzabhängige Bündelungsmaß der Lautsprecher ebenso Einfluss nimmt. Der dargestellte Vergleich zeigt: der Öffnungswinkel des Arrays wird auch in den oberen Oktaven weitgehend korrekt simuliert, was auf die zunehmende Direktivität zu hohen Frequenzen zurückzuführen ist. Man könnte auch sagen, dass in diesem Frequenzbereich die Directivity der einzelnen Line-Array-Elemente bereits zu hoch ist um Interferenzerscheinungen so ausgeprägt zu zeigen, wie sie für Kugelschallquellen typisch wären. Dass sich allerdings in den oberen Oktaven innerhalb des Öffnungswinkels Unregelmäßigkeiten in der Abstrahlcharakteristik zeigen, ist jedoch eine Folge des Abstands der Schallquellen. Es ist offensichtlich, dass hier das Modell der Punktschallquelle an seine Grenzen stößt, da das Line-Array-Element im Hochtonbereich nicht als über seine gesamte Höhe abstrahlendes System repräsentiert wird. Um auch für die oberen Oktaven zu realitätsnahen Simulationsergebnissen zu gelangen, muss ein Verfahren gefunden werden, das die Wellenfront des Waveguides für die Anwendung in der Simulationssoftware nutzbar nachbildet.

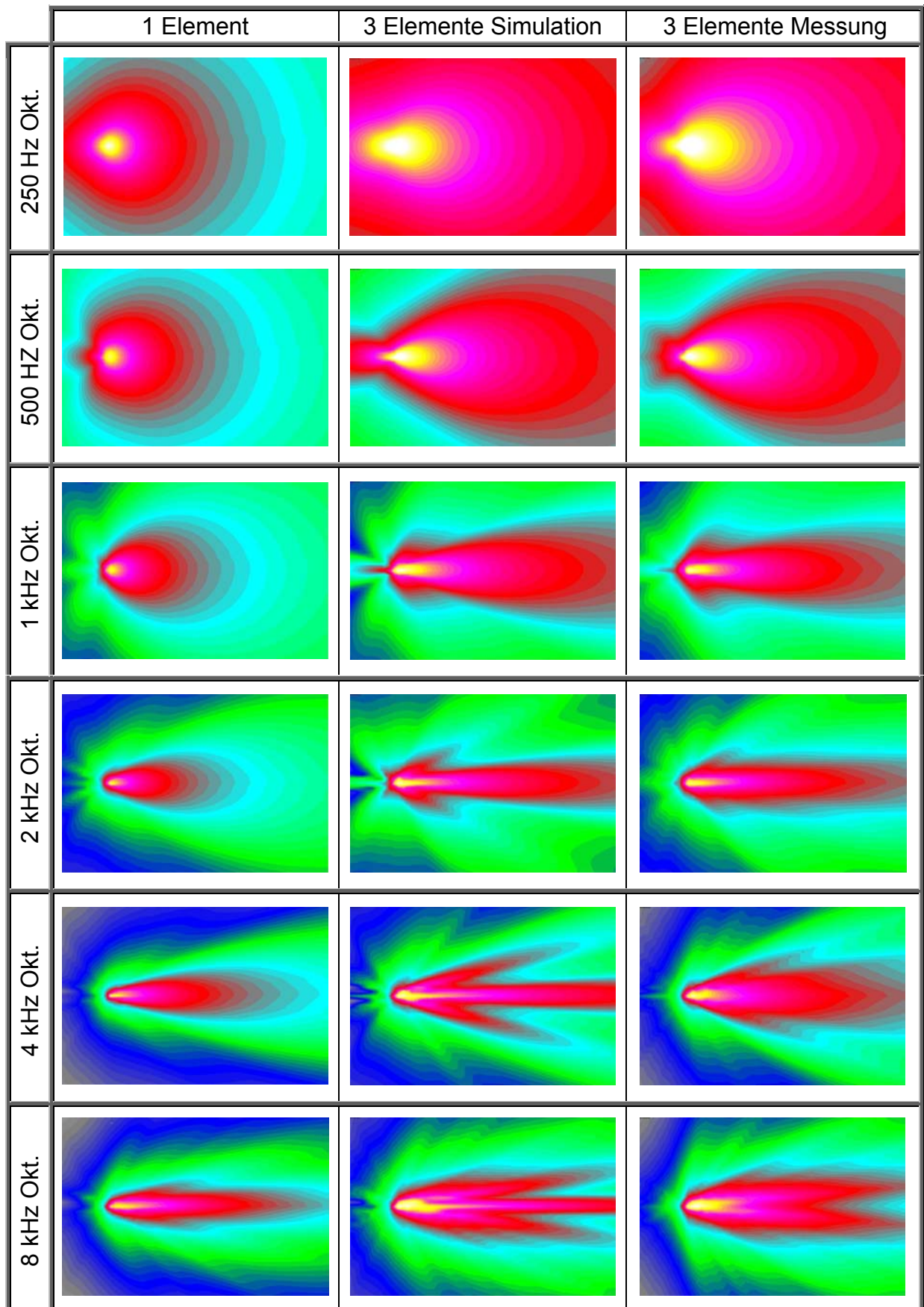


Abb. 5-2 Vergleich zwischen Simulation und Messung des vertikalen Abstrahlverhaltens einer Line-Array-Konfiguration aus drei Elementen mit 9° Curving.

5.3 Substitution eines Elementar-Balloons

Die auf dem Punktschallquellen-Modell basierende Simulation eines Line-Array-Systems mittels Balloon-Daten einzelner Lautsprecher-Elemente bedarf einer weiteren Behandlung der Rohdaten. Wie aus Kapitel 5.2 ersichtlich, ist es für den Hochtonbereich unzureichend, die Line-Array-Konfiguration mit Elementar-Balloons nachzubilden. Um der Abstrahlcharakteristik typischer Waveguides gerecht zu werden, empfiehlt sich eine Substitution in eine vertikale Anordnung mehrerer Einzelquellen [2] nach dem Huygensschen Prinzip. Dabei müssen die Daten des Elementar-Balloons dahingehend bearbeitet werden, dass durch das vertikale Aufreihen der Substitute keine Veränderung der ursprünglichen Directivity erfolgt. Damit wäre es gelungen, ein einzelnes Lautsprecher-Element durch eine vertikale Anordnung von Schallquellen zu beschreiben, was einer Annäherung an das Verhalten gängiger Waveguides entspräche. Der im Folgenden beschriebene Ansatz zur Substitution soll auf ein beliebiges Line-Array-Element anwendbar sein. Zunächst wird das Verfahren jedoch allgemeingültig anhand von Kugelschallquellen gezeigt.

Gesucht wird folglich nach der Modifikation einer Kugelschallquelle, welche durch vertikale Aufreihung die gleiche Directivity zeigt, wie die ursprüngliche Kugelschallquelle selbst. Das vertikale Anordnen von Schallquellen in hinreichend kleinem Abstand führt zu einer frequenzabhängigen Bündelung der Abstrahlcharakteristik in der vertikalen Ebene (vgl. Kap. 2.4)

Unter Berücksichtigung und Anpassung der Pegelverhältnisse zwischen einer und n aufgereihten Quellen (Reduktion des Pegels um jeweils $20 \cdot \log(n)$) ergibt sich in Abb. 5-3 gezeigter Directivity-Balloon.

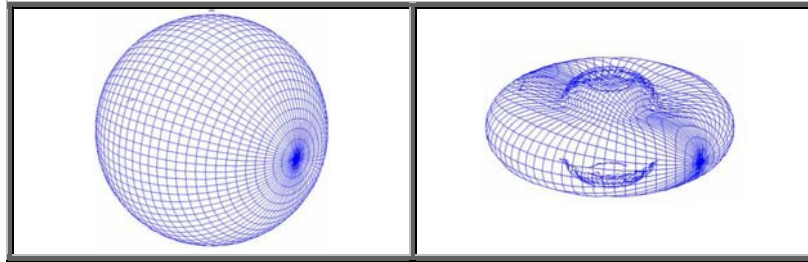


Abb. 5-3 Directivity-Balloon einer Kugelschallquelle (links) und entstandene Bündelung durch vertikales Aufreihen (rechts)

Der Ansatz zur Substitution einer Kugelschallquelle durch eine Anzahl n vertikal aufgereihter Quellen lautet wie folgt:

Die durch die vertikale Aufreihung von Punktschallquellen entstandene Bündelung gilt es durch geeignete Maßnahmen auszugleichen. Dies soll durch Überlagerung der Anordnung mit einem Korrektur-Balloon erfolgen. Als Berechnungshilfe soll hierzu die Funktion zur Fernfeld-Berechnung in der Simulationssoftware Anwendung finden.

Dabei wird in zwei Schritten verfahren:

- A) Erzeugung eines Korrektur-Balloons
- B) Resynthese des Elementar-Balloons

In Schritt A wird ein Balloon erzeugt, der gewissermaßen die Differenz aus einem Elementar-Balloon und dessen n -fachen vertikalen Aufreihung bildet. Dazu wird in der Simulationssoftware ein dementsprechendes Array mit Lautsprechern des Typs *Sphere* (Vollkugel, $Q=1$) konstruiert. Aus der Polarität ergibt sich die Differenzbeziehung.

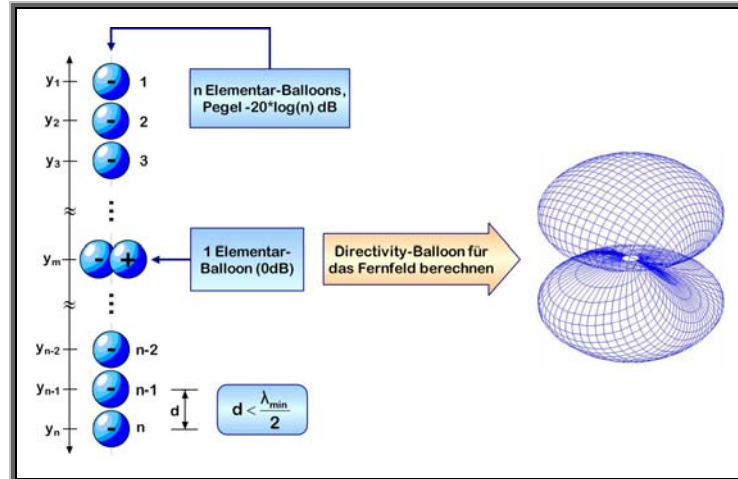


Abb. 5-4 Schritt A: Erzeugen eines Korrektur-Balloons

Die Fernfeld-Berechnung führt eine phasenrichtige Pegeladdition aller Schallquellen in 100m Entfernung durch. Der so erzeugte Korrektur-Balloon kann nun für die Resynthese des ursprünglichen Elementar-Balloons (Schritt B) verwendet werden.

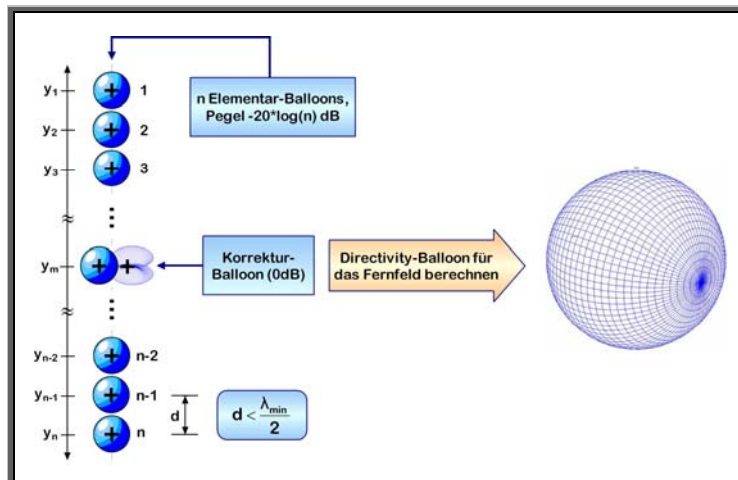


Abb. 5-5 Schritt B: Resynthese des Elementar-Balloons

5.4 Verifikation

Exemplarisch wurde die beschriebene Substitution mit 19 Kugelschallquellen in einem Abstand von je einem Zentimeter durchgeführt. Diese Anordnung erweist sich als praktikabel in Hinsicht auf eine maximal zu betrachtende Frequenz von 10 kHz und übliche Größen von Line-Array-Elementen (vgl. [2]). In Abbildung 5-6 ist ein Vergleich der vertikalen Abstrahlcharakteristik in den oberen Oktavbändern dargestellt.

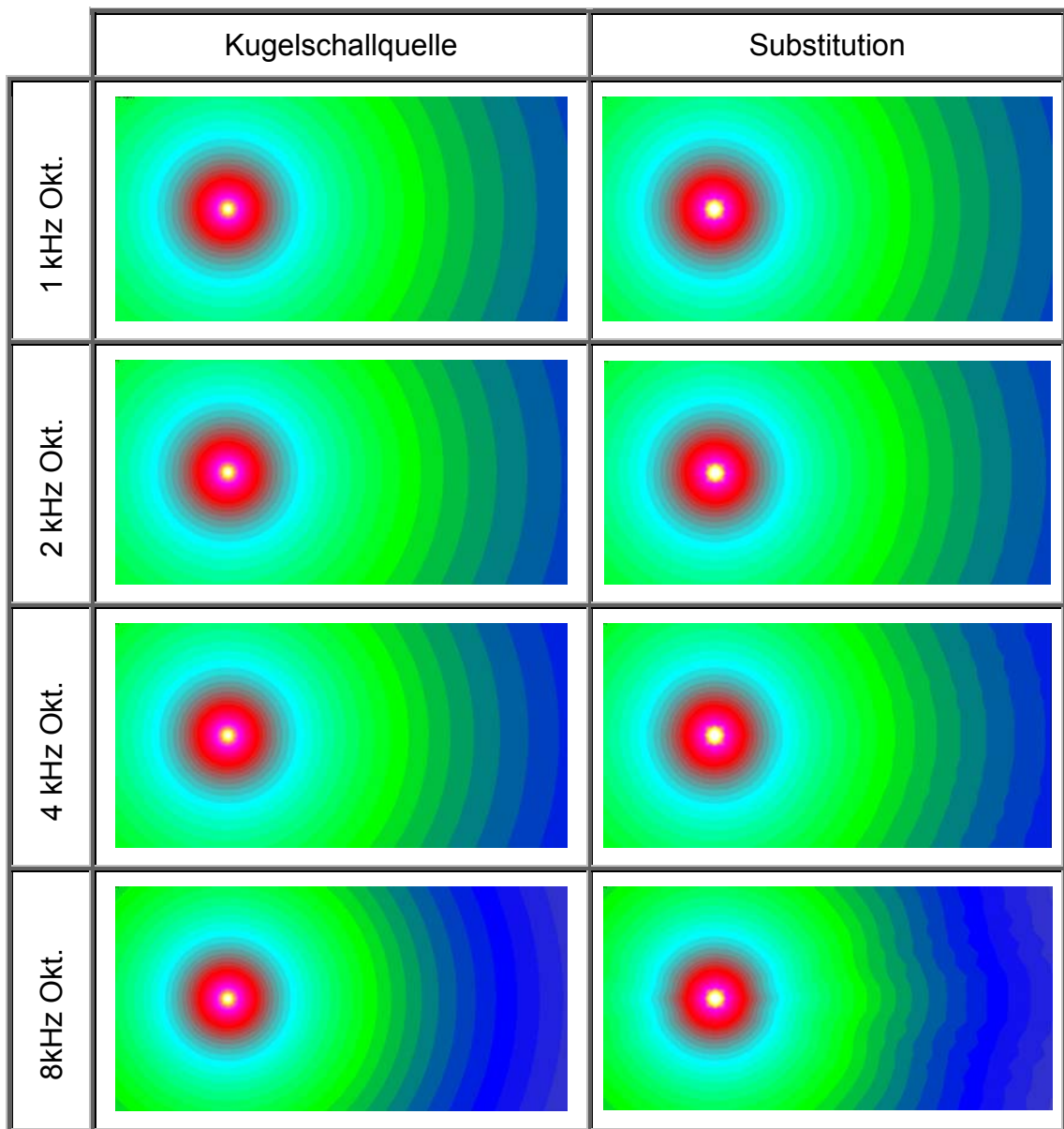


Abb. 5-6 Vergleich zwischen einer reinen Kugelschallquelle und der Substitution (Direktschallpegel in der Vertikalen, oktavgemittelt)

Das Ergebnis zeigt deutlich, dass die Resynthese der Kugelschallquelle erfolgreich war, lediglich in der 8kHz-Oktave treten leichte Ungenauigkeiten auf, welche prinzipbedingt auf Laufzeitunterschiede aufgrund der gewählten Anordnung zurückzuführen sind.

Das gezeigte Substitutionsverfahren zeigt, dass es damit möglich ist, eine beliebige Punktschallquelle durch eine vertikale Anordnung von Schallquellen zu ersetzen. Demnach sollte sich bei der Konstruktion eines Arrays aus mehreren Elementar-Balloon-Substituten das Abstrahlverhalten einer der Array-Länge entsprechende Linie aus äquidistant angeordneten Punktschallquellen ergeben. Das Ergebnis sollte ein erweitertes Nahfeld mit geringerem Pegelabfall aufweisen, sowie je nach gewähltem Quellenabstand bis zu einer bestimmten Frequenz frei von Interferenzeinbrüchen sein (siehe Kap. 2.4).

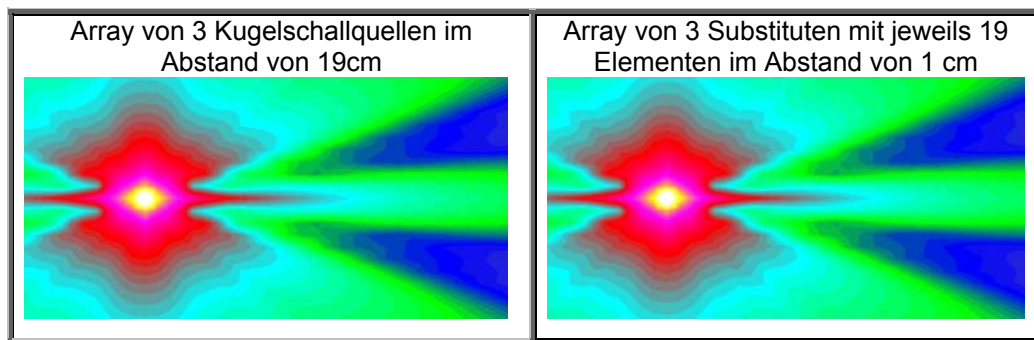


Abb. 5-7 Verifikation mittels 3er-Array (Direktschallpegel in der 4kHz-Oktave)

Wie Abbildung 5-7 zu entnehmen ist, stellt sich das erwartete Verhalten nicht ein. Dadurch wird jedoch die Substitution an sich um ein weiteres mal verifiziert, da selbst bei der Pegeladdition mehrerer Substitute sich exakt dasselbe Verhalten zu beobachten ist, wie bei Verwendung von Elementar-Balloons.

Für die Simulation von Line-Array-Systemen bringt das gezeigte Verfahren der Substitution eines Elementar-Balloons allerdings keinen weiterführenden Vorteil. Denn hierzu müsste die kohärente Kopplung der Substitute bis in den Hochton-Bereich gegeben sein.

Abhilfe könnte dahingehend ein Verfahren schaffen, das die gezeigte Methode mittels Korrektur-Balloon aufgreift, diesen jedoch für jede einzelne der substituierten Punktschallquellen vorsieht.

6 Vergleich von Simulation und Messung anhand einer realen Beschallungssituation

Im Rahmen dieser Diplomarbeit bestand die Möglichkeit, Messdaten mehrerer verschiedener Line-Array-Systeme zu erfassen. Hierzu stand ein Veranstaltungssaal der Messe Frankfurt zur Verfügung. Es wurden dazu die Line-Array-Systeme Q1 der Firma *d&b*, das C-Line genannte Array der Firma *KS* sowie ein dVdosc-System von *L'Acoustics* messtechnisch erfasst. Die aus jeweils 5 bzw. 6 Elementen bestehenden Systeme wurden temporär an aufeinander folgenden Tagen jeweils an derselben Stelle im Raum installiert.

Zur Auswertung kommt mangels vollständiger Datensätze für die Simulation lediglich das System von *d&b* (siehe Anhang B).

6.1 Messverfahren

Zunächst wurden anhand des Grundrisses und den örtlichen Gegebenheiten 21 Messpunkte ausgemacht und im Raum markiert. Zwölf der Messpunkte befanden sich dabei auf Achse in Hauptabstrahlrichtung des Arrays, einer direkt unter und vier weitere hinter dem Array. Außerdem wurden vier zusätzliche Messpunkte außerhalb der Hauptabstrahlrichtung festgelegt.⁵

Mittels Schallpegelmessers⁶ fand zunächst eine Schallpegel-Messung mit Rosa Rauschen statt. Um die spätere Auswertung zu vereinfachen, wurde an Messpunkt #6 der Referenzpegel von 80 dB(A) eingestellt und danach der Schalldruckpegel an sämtlichen anderen Messpunkten erfasst.

⁵ Die genauen Daten des Aufbaus sind Anhang C zu entnehmen.

⁶ Schallpegelmessers nach IEC 651, A-bewertet, Zeitkonstante: Fast, 125ms.

Anschließend erfolgte die Messung von Impulsantworten mittels des Messsystems MLSSA. Verwendet wurde das MLS-Verfahren mit einer Messdauer von 1,8 Sekunden. Auch hier wurde der Referenzpegel von 80 dB(A) an Messpunkt #6 festgelegt und dann fortlaufend alle anderen Messpunkte erfasst.

6.2 Auswerten der Impulsantworten

Die gewonnenen Impulsantworten sollen per FFT (Fast Fourier Transformation) in den Frequenzbereich überführt und dabei mittels Fensterung der Direktschallanteil des Signals freigestellt werden. Hierbei gibt es allerdings einige Einschränkungen zu beachten.

Wird nur der Bereich vom Eintreffen der ersten Wellenfront bis zur ersten Reflexion betrachtet, so hat die Dauer dieses Bereichs der Impulsantwort unmittelbaren Einfluss auf den gültigen Frequenzbereich in der FFT. Unter der Bedingung, dass sich ein ganzzahliges Vielfaches der Schwingung einer bestimmten Frequenz im Bereich des Fensters befindet, gilt für die untere Grenzfrequenz

$$f_{gu} = \frac{1}{T_F}$$

(Gl. 6-1)

Eine weitere Einschränkung ergibt sich durch die räumliche Ausdehnung des Arrays. Durch den damit einhergehenden Laufzeitunterschied trifft das Schallereignis je nach Messpunkt nicht von allen Array-Elementen zum selben Zeitpunkt am Messmikrofon ein. Im Fall der Messung direkt unter dem Array (Arraylänge l_A) würde dies einen Laufzeitunterschied von

$$\Delta t_{\min} = \frac{l_A}{c}$$

(Gl. 6-2)

bedeuten, der zur Fensterlänge addiert werden muss, um die Impulsantworten aller Elemente des Arrays zu erfassen.

Unter Beachtung oben genannter Bedingung mussten Fensterlängen zwischen 3 und 10 Millisekunden gewählt werden, was dazu veranlasst, die Auswertung auf die oberen Frequenzbereiche ab der 500Hz-Oktave zu beschränken.

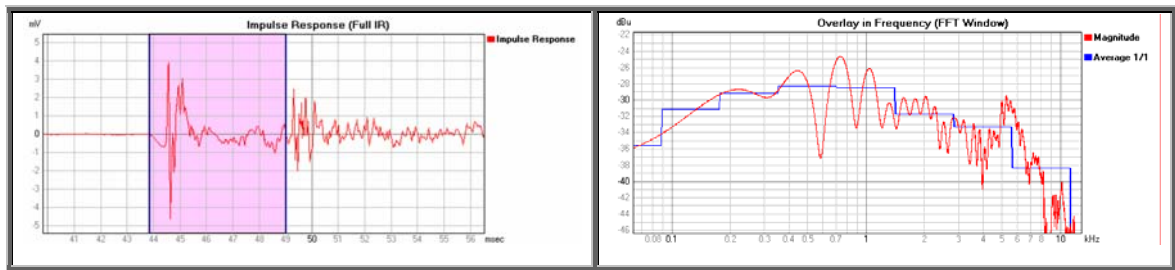


Abb. 6-1 Auswertung der Impulsantworten. Links: gesamte Impulsantwort und Zeitfenster für den Direktschallanteil (Markierung). Rechts: Frequenzgang des Direktschallanteils nach Durchführung der FFT (rot) und Oktav-Mittelung (blau)

6.3 Vergleich von Messung und Simulation

Unter Verwendung eines Maßstabsgetreuen CAD-Modells des Veranstaltungssaals wurde in der Simulations-Software *Ulysses 2.8* die Beschallungssituation rekonstruiert (siehe Anhang C). Die eingefügten Hörflächen in 120cm, bzw. 180cm Höhe im Bühnenbereich berücksichtigen dabei die Position des Messmikrofons.

Die Parameter der Array-Konfiguration (Höhe, Neigungswinkel, Zwischenwinkel der Elemente) wurden genauestens in die Simulation übertragen und die Schallpegelverteilung errechnet. Der Direktschallpegel der Oktavbänder kann dann an den konkreten Messpunkten abgelesen werden.

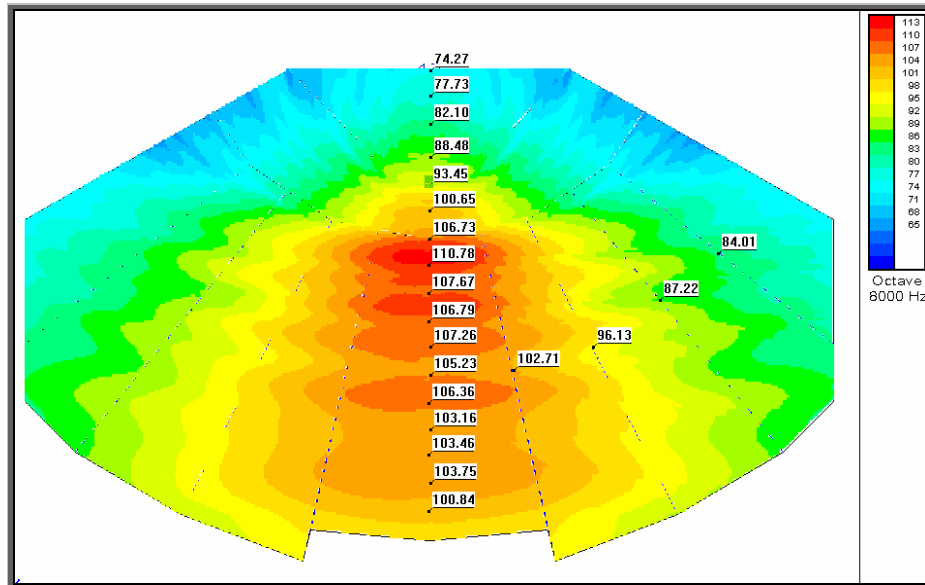


Abb. 6-2 Schallpegelverteilung in der Simulation (Direktschallpegel bei 8kHz, Berechnungsmethode *Oktavband*)

Bei den folgenden Vergleichen von Messung und Simulation soll stets die relative Pegelabweichung zu einem Bezugspunkt betrachtet werden.

Um zunächst einen Überblick über die Pegelverteilung von Simulation und Messung im gesamten Frequenzspektrum zu erhalten, wurde an allen Messpunkten jeweils die energetische Summe über der Dauer des Direktschallfensters der Impulsantworten gebildet. Für einen Vergleich mit der Simulation wurde in selbiger eine energetische Pegelberechnung mit Frequenzmittelung durchgeführt. Beide Datenreihen können nun zu denen mit dem Schallpegelmessgerät aufgenommenen Werten ins Verhältnis gesetzt werden. Dabei gilt der gemessene SPL-Wert am Referenzpunkt als Bezug –auf diesen werden die anderen beiden Messreihen normiert.

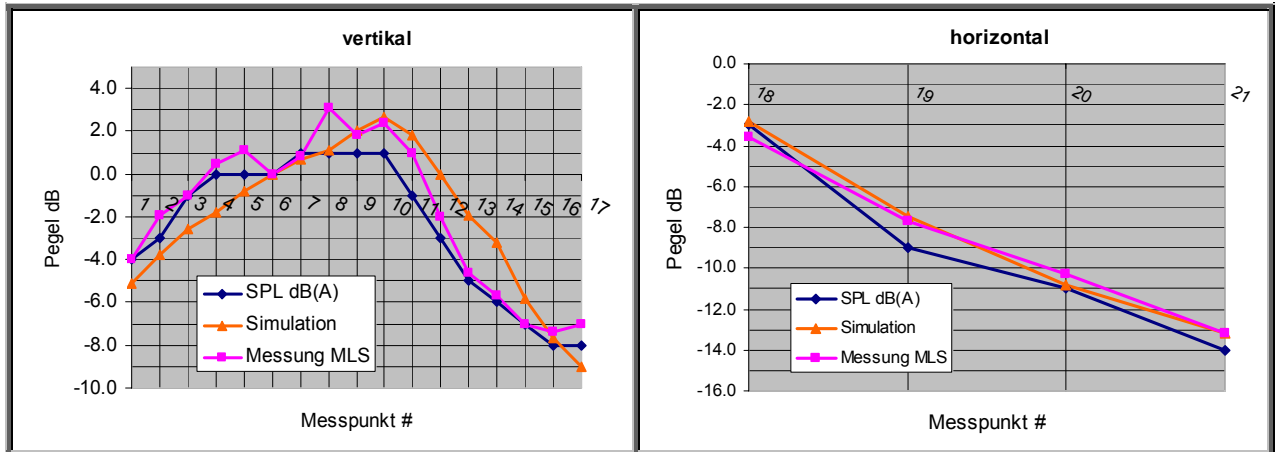


Abb. 6-3 Pegelverteilung im Bezug zum Referenzpunkt (#6)

Bei der in Abbildung 6-3 gezeigten Pegelverteilung ist eine weitgehende Übereinstimmung von Messung und Simulation zu erkennen, wobei anzumerken ist, dass sich die Datenreihe aus der Simulation ausschließlich auf den errechneten Direktschall bezieht. Es wurde daher auch davon abgesehen, Vergleiche mit absoluten Schallpegelwerten anzustellen.

Für einen Vergleich mit frequenzabhängiger Darstellung musste eine andere Methode zur Normierung der Messreihen gefunden werden, die die Pegelabweichung der einzelnen Oktavbänder untereinander sowie das Verhältnis zwischen den Messpunkten berücksichtigt.

Aus den gemessenen Impulsantworten wurde unter den in Kapitel 6.2 beschriebenen Bedingungen der Direktschallanteil für 5 Oktavbänder (500Hz-8kHz) ermittelt. Diese lagen bereits als relative Pegel vor und wurden anschließend auf einen Referenzpegel normiert. Dazu diente wiederum energetische Summe über der Dauer des Direktschallfensters an Messpunkt #6.

Der Referenzpegel für die Werte aus der Simulation wurde aus dem breitbandigen Durchschnitt einer energetischen Pegelberechnung an Messpunkt #6 entnommen, auf den die absoluten Werte normiert wurden. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass sich die Werte sowohl der Messung als auch die der Simulation auf einen repräsentativen, frequenzmäßig gleich gewichteten Referenzpegel beziehen.

Der Vergleich beider Datenreihen wird aus der Differenz der normierten relativen Pegelwerte von Simulation und Messung gezogen.

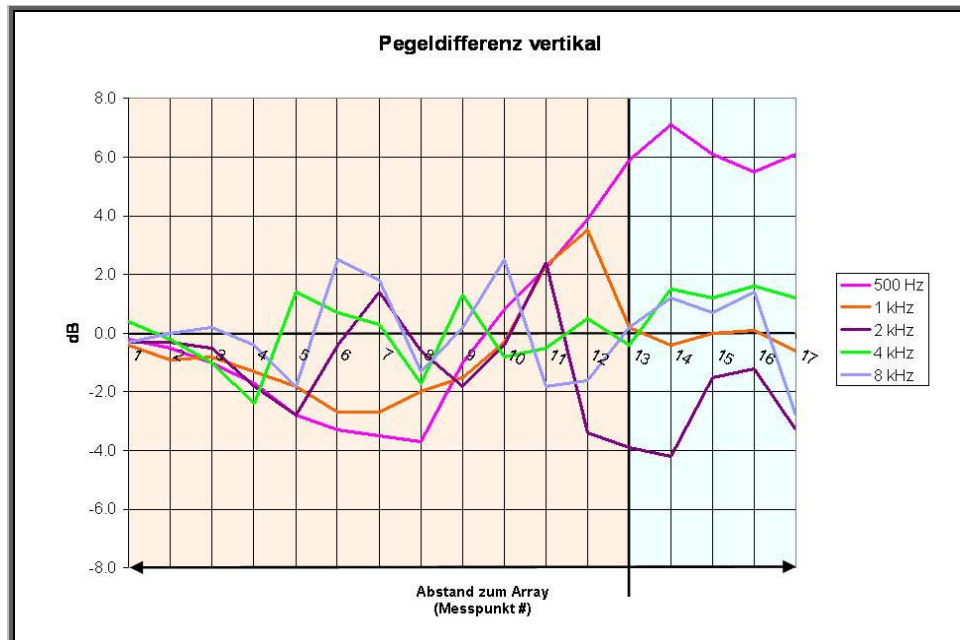


Abb. 6-4 Vertikale Pegeldifferenz aus Simulationsergebnissen und Messung

Die dargestellte Pegeldifferenz zeigt vor allem in Hauptabstrahlrichtung eine hohe Übereinstimmung mit der Simulation. Tendenziell lässt sich eine Zunahme der Übereinstimmung mit größer werdender Entfernung zum Array entnehmen. Diese Tatsache war durchaus zu erwarten, da die Messpunkte 1-4 bereits für Frequenzen unter 6,8 kHz im Fernfeld liegen.⁷ Im Nahfeld-Bereich (5-10) divergiert die Abweichung, wobei hier besonders die oberen Oktaven zu beachten sind, bei denen wesentlich höhere Differenzen zu erwarten gewesen wären (vgl. Kap 5.2).

Die zu erkennende hohe Übereinstimmung an Messpunkt 10 ließe sich durch die in Kapitel 3 beschriebenen Einflüsse von Curving und Directivity erklären. Messpunkt 10 liegt genau auf der Hauptabstrahlachse des unteren Line-Array-Elements, was einen geringeren Einfluss der anderen Elemente zur Folge haben sollte.

⁷ Berechnet nach Gleichung 2-13 mit einer Messentfernung von 18,90 m an Messpunkt 4.

Für die hohen Abweichungen in der 500Hz- und 2kHz- Oktave im Bereich unter und hinter dem Array (13-17) gibt es eine bereits in Kapitel 5.2 diskutierte Erklärung. Scheinbar bilden sich hier durch die Aufreihung der Elementar-Balloons Nebenkeulen aus, die derart in der Realität nicht entstehen. Wie Abbildung 5-2 zeigt, tritt in den genannten Frequenzbereichen eine starke rückwärtige Pegelerhöhung in Erscheinung. Zwar kann hieraus nicht direkt auf das Line-Array-System in der Beschallungssituation geschlossen werden, da es sich um unterschiedliche Lautsprechertypen handelt, die Vermutung liegt aber nahe, dass der Fehler aufgrund eines Nebenproduktes der Simulation mit Elementar-Balloons entstanden ist.

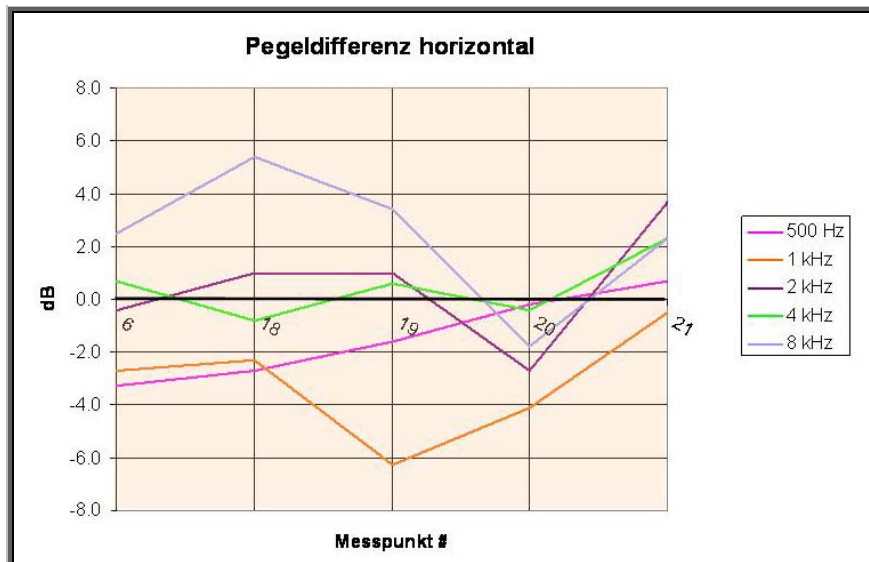


Abb. 6-5 horizontale Pegeldifferenz aus Simulationsergebnissen und Messung

Die in der Vertikalen festgestellte Konvergenz zwischen Simulation und Messung lässt sich bedingt auch auf die horizontale Pegelverteilung übertragen. Allerdings ist hier die gewählte Anzahl der Messpunkte zu gering um aussagekräftigere Ergebnisse abzuleiten. Vermutet wird jedoch auch hier ein Anstieg in der Übereinstimmung mit größeren Entfernungen vom Array.

7 Fazit

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden gängige Verfahren zur Simulation von Line-Array-Lautsprechersystemen vorgestellt und darin verwendete Berechnungsverfahren erläutert. Die Simulation mittels Directivity-Balloons wurde im Hinblick auf das Erreichen praxisnaher Ergebnisse genauer untersucht.

Das der Simulation zugrunde liegende Punktschallquellen-Modell hat Grenzen in Bezug auf die realitätsnahe Abbildung eines Line-Array-Systems. Es konnte eine zunehmende Divergenz zu höheren Frequenzen festgestellt werden, deren Auswirkungen auf die Genauigkeit der Simulation allerdings weniger ausgeprägt ausfiel, als zunächst vermutet.

Generell lässt sich aus der gezeigten Gegenüberstellung von Simulation und Messung erkennen, dass die Simulation eines Line-Array-Systems mittels Elementar-Balloons auch für hohe Frequenzen realitätsnahe Ergebnisse erbringen kann.

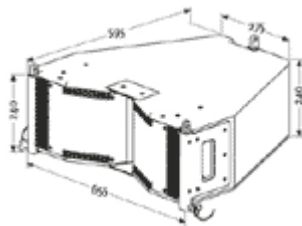
Unabdingbare Voraussetzung hierfür ist es, die Konfiguration des Line-Arrays präzise in der Simulation nachbilden zu können. Die genaue Kenntnis über Geometrie und gewählten Zwischenwinkel der Elemente ist ebenso von Bedeutung wie das verwendete Messverfahren zum Erzeugen der Balloon-Daten. Zusätzlich muss bei der Verwendung von Lautsprecher-Controllern die Möglichkeit gegeben sein, Einstellungen des Systems in der Simulation zu berücksichtigen.

Bei der Auswertung der Simulationsergebnisse ist dem Umstand der Interferenzbildung zwischen den einzelnen Elementen unbedingt Rechnung zu tragen. Da eine feinere Frequenzauflösung hierbei zwar zu genaueren Ergebnissen führt, aber gleichzeitig zu Lasten der Übersichtlichkeit gehen kann, ist zumindest die Darstellung in Oktavbändern zu empfehlen.

8 Anhang

Anhang A

Spezifikation des Line-Array-Elements HK Audio Cohedra CDR 208



Technische Daten	CDR 208 S/T
Belastbarkeit Nominal:	500 W RMS, 1000 W Prog.
Übertragungsbereich +/- 3dB:	88 Hz – 16 kHz
Schalldruck, 1W@1m*:	108 dB
Schalldruck, max. SPL@1m*:	139 dB @ 10% THD ***
Nominale Impedanz:	8 Ohm
Lautsprecher:	2 x 8"
Hochtontreiber:	1,4"
Horn:	80° CD-Horn
Trennfrequenz:	800 Hz, 12db/Oktave
Anschlüsse:	2 x Speakon NL 4
Gehäuse:	15/19 mm (3/4") 13-fach Birkensperrholz
Gehäuseoberfläche:	Acryllack, schwarz
Schutzgitter:	Schlagsicheres Stahlschutzgitter
Flughardware:	Voll integrierte Flughardware
Gewicht:	30 kg (66lbs)
Abmessungen (BxHxT):	65 x 25,5 x 60 cm (CDR 208T) 65 x 24 x 60 cm (CDR 208S) 25-5/8" x 10-1/16" x 23-5/8"
* Half Space	*** gemessen mit 4 x CDR 208 S

Anhang B

Spezifikation des Line-Array-Elements d&b Q1

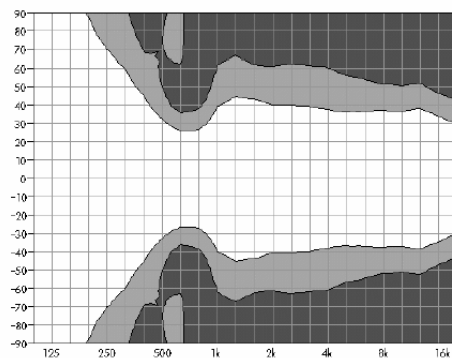
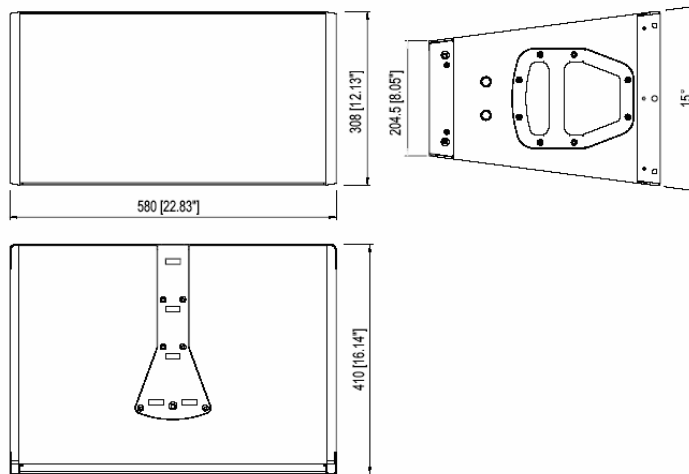
Technical specifications

Q1 system data

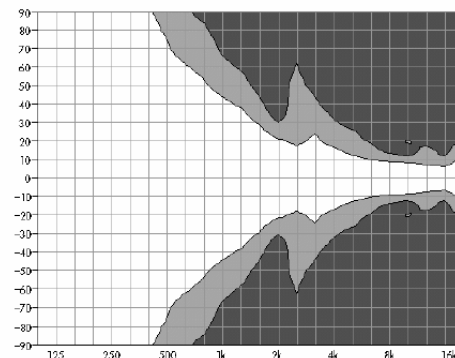
Frequency response (-5 dB standard).....	60 Hz ... 17 kHz
Frequency response (-5 dB CUT mode).....	100 Hz ... 17 kHz
Max. sound pressure (single cabinet, 1 m, free field) with D12	139 dB
Max. sound pressure (single cabinet, 1 m, free field) with E-PAC	135 dB
(SPLmax peak, pink noise test signal with crest factor of 4)	
Input level (100 dB-SPL/1 m).....	-18 dBu
Polarity to controller INPUT (XLR pin 2: +/3: -).....	LF: -/HF: +

Q1 loudspeaker

Nominal impedance.....	8 ohms
Power handling capacity (RMS / peak 10 ms).....	400/1600 W
Nominal dispersion angle (hor. x vert.).....	75° x 15°
Components.....	2 x 10" driver
.....	1.3" compression driver
.....	Passive crossover network
Connections.....	2 x EP5
.....	(optional 2 x NL4)
Pin assignments.....	EP5: 1/2
.....	NL4: 1+/1-
Weight.....	22 kg (49 lb)



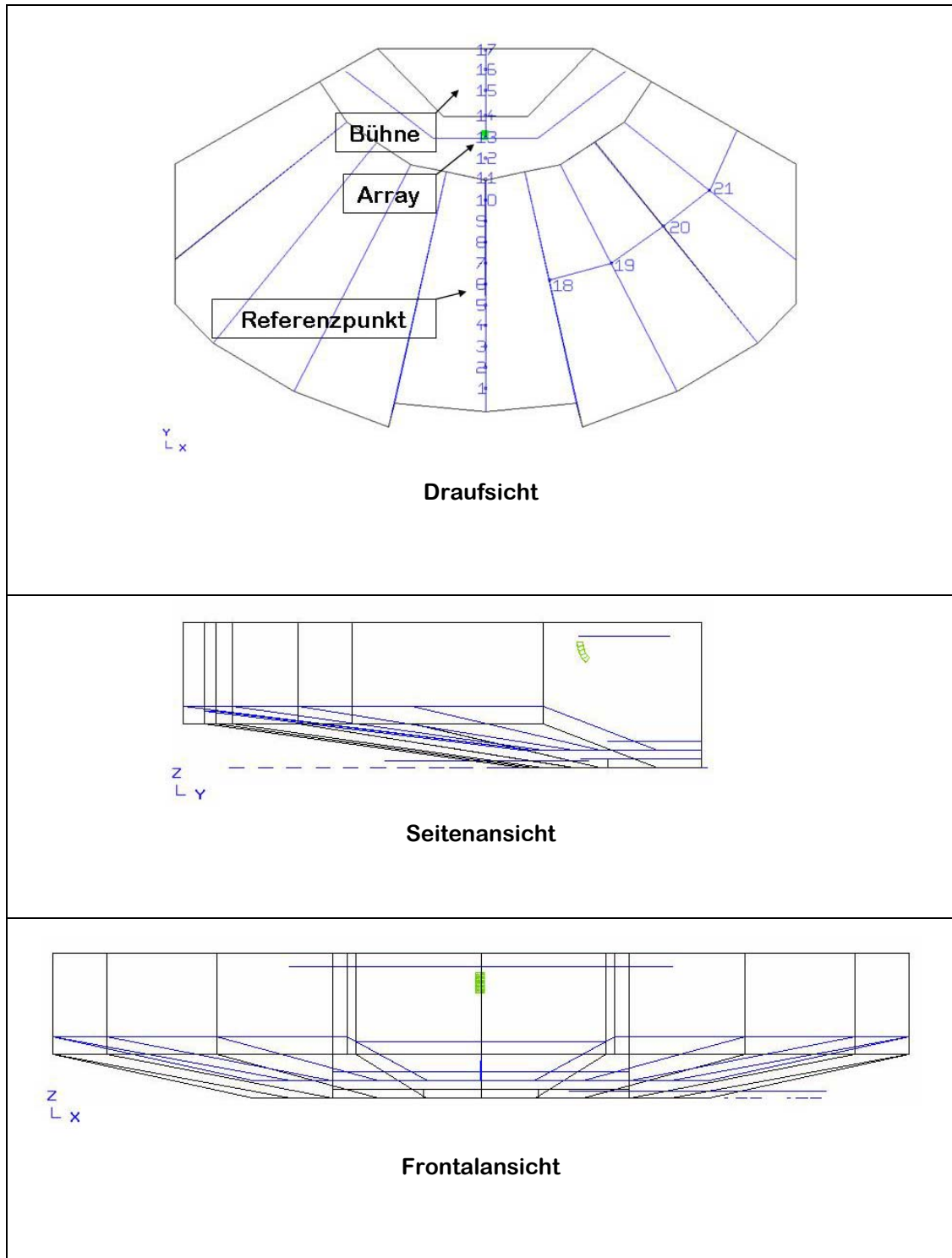
Abstrahlcharakteristik Q1 horizontal

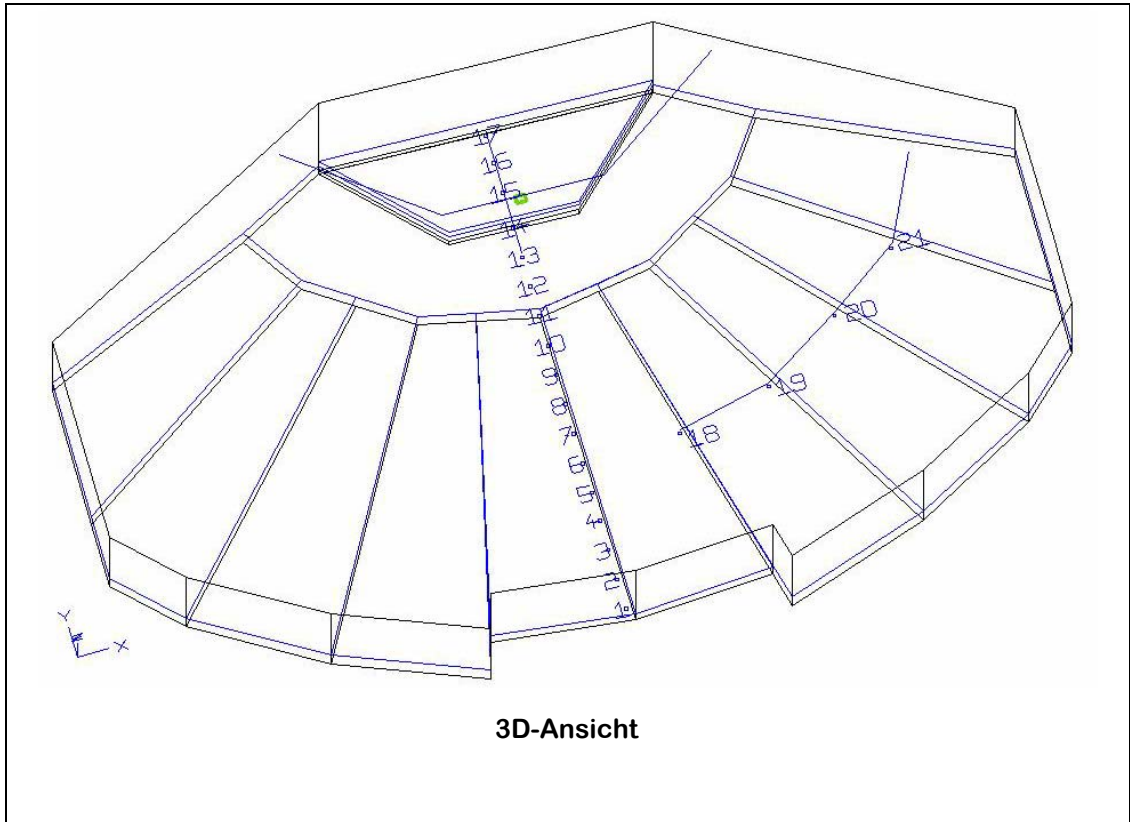


Abstrahlcharakteristik Q1 vertikal

Anhang C

CAD-Modell des Veranstaltungssaals mit eingefügten Hörflächen und markierten Messpunkten (Draufsicht, Seiten-, Frontal- und 3D-Ansicht)





Anhang D

Messdaten

Hersteller:		d&b			
Typ:		Q1	Höhe [m]:		7.2 (Unterkante)
Element	1	2	3	4	5
Zwischen-Winkel:	11°	4°	6°	11°	14°
Controller Setting	coupling -5	coupling -5	coupling -5	coupling -5	coupling -5
		Messung Array			
Messpunkt #	Entfernung zu MP #13 [m]	SPL (MLS) [dBA]	SPL (Pink Noise) [dBA]	Bemerkung	
01	23.9	77.0	76.0	→ Referenz	
02	21.9	77.0	77.0		
03	19.9	79.0	79.0		
04	17.9	81.0	80.0		
05	15.9	80.0	80.0		
06	14.0	80.0	80.0		
07	12.0	80.0	81.0		
08	10.0	82.0	81.0		
09	8.0	81.0	81.0		
10	6.0	82.0	81.0		
11	4.1	81.0	79.0		
12	2.0	77.0	77.0		
13	0.0	75.0	75.0	unter Array	
14	2.0	73.0	74.0	hinter Array	
15	4.3	71.0	73.0		
16	6.5	70.0	72.0		
17	8.4	70.0	72.0		
18	13.9	76.0	77.0		
19	16.6	72.0	71.0	horizontal	
20	18.6	68.0	69.0		
21	22.1	65.0	66.0		

9 Quellenverzeichnis

- [1] Meyer Sound: *Technical Report Line Arrays: Theory, Fact and Myth*. Meyer Sound: Berkley, CA, 2002.
- [2] Holtmeyer, Volker: *Simulation von Line-Array- Lautsprecher-systemen mit der CAAD Software Ulysses*. Wiesbaden, 2002.
- [3] Olson, H.F.: *Acoustical Engineering*. Van Nostrand, Princeton, NJ, 1957.
- [4] Urban, Heil, Bauman: *Wavefront Sculpture Technology*. AES Convention Paper, New York, NY, USA, 2001.
- [5] Ureda, Mark S.: *Line Arrays: Theory and Applications*. AES Convention Paper, Amsterdam, Niederlande, 2001.
- [6] Brown, Pat: *What´s a DLL? Part 1*. Syn-Aud-Con Newsletter (2005) Vol. 33 No.4.
- [7] Brown, Pat: *What´s a DLL? Part 2*. Syn-Aud-Con Newsletter (2006) Vol. 34 No.5.
- [8] EASE Online-Hilfe, Appendix A, EASE Version 4.1, ADA Acoustic Design Ahnert, 1990-2003.
- [9] CATT-Acoustic: *CATT DII Directivity Interface (DDI) v 1.0*, DDI White Paper, CATT, 1998.
- [9] Hirzel, Ahnert: *Beschallungstechnik Grundlagen und Praxis*. S. Leipzig: Hirzel Verlag Stuttgart, 1993.
- [10] Fasold, Kraak, Schirmer: *Taschenbuch der Akustik Teil 1*. Erste Auflage, Berlin: VEB Verlag Technik, 1984.
- [11] Veit, I.: *Technische Akustik*. 5. Auflage, Würzburg: Vogel, 1996.
- [12] Borucki, Hans: *Einführung in die Akustik*. 2. Auflage, Mannheim Wien Zürich: Bibliographisches Institut, 1980.
- [13] Müller, G.; Möser, M.: *Taschenbuch der technischen Akustik*. 3. Auflage, Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag 2004.
- [14] Davis, C.&D.: *Sound System Engineering*. 2nd Edition, Boston Oxford: Focal Press / Butterworth Heinemann, 1997.

10 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1	Line-Array-System bei der Installation.....	6
Abb. 2-2	Kugelschallquelle	7
Abb. 2-3	Linien-schallquelle	9
Abb. 2-4	Beispiele zur Rekonstruktion einer Wellenfront nach dem Huygensschen Prinzip	11
Abb. 2-5	Vertikale Aufreihung von n Kugelschallquellen (n=10, d=10cm) bei 1 kHz	12
Abb. 2-6	Vertikale Aufreihung von n Kugelschallquellen (n=10, d=10cm) bei 8 kHz	13
Abb. 2-7	Entfernung zum Fernfeld und Öffnungswinkel für eine Array-Länge von 5,4m	14
Abb. 3-1	Interferenzerscheinung durch Clusterbildung von Lautsprechern	16
Abb. 3-2	Technische Umsetzung von Schallführungen für Hochtoneinheiten in Line-Array-Lautsprechern.....	18
Abb. 3-3	Öffnungswinkel und resultierende Wellenfront eines Line-Arrays aus drei Elementen	19
Abb. 3-4	Schematische Darstellung einer typischen Line-Array-Konfiguration mit Pegel- und Phasenbezug.	20
Abb. 4-1	Reflexionsarmer Raum mit Drehvorrichtung zur Erfassung von Balloon-Daten	24
Abb. 4-2	Directivity-Balloons eines Line-Array-Elements.....	25
Abb. 4-3	Grafische Benutzeroberfläche einer DLL.....	26
Abb. 4-4	Beispiel eines DLL-Berechnungsmodells für Line-Array-Elemente mittels Substitution durch Punktschallquellen	28
Abb. 4-5	MAPPOnline Vorhersage-Software	30
Abb. 4-6	Auf MS Excel basierendes Spreadsheet für die Vorhersage des Q1-Line-Array-Systems (d&b)	30
Abb. 4-7	EASE Focus	30
Abb. 5-1	Vergleich der simulierten Direktschall-Pegelverteilung eines Line-Arrays aus 3 Elementen (9° Curving) und der entsprechenden Referenzmessung	33
Abb. 5-2	Vergleich zwischen Simulation und Messung des vertikalen Abstrahl-verhaltens einer Line-Array-Konfiguration aus drei Elementen mit 9° Curving.	35

Abb. 5-3 Directivity-Balloon einer Kugelschallquelle und entstandene Bündelung durch vertikales Aufreihen.....	37
Abb. 5-4 Schritt A: Erzeugen eines Korrektur-Balloons	38
Abb. 5-5 Schritt B: Resynthese des Elementar-Balloons	38
Abb. 5-6 Vergleich zwischen einer reinen Kugelschallquelle und der Substitution (Direktschallpegel in der Vertikalen, oktavgemittelt).....	39
Abb. 5-7 Verifikation mittels 3er-Array (Direktschallpegel in der 4kHz-Oktave).....	40
Abb. 6-1 Auswertung der Impulsantworten.....	44
Abb. 6-2 Schallpegelverteilung in der Simulation (Direktschallpegel bei 8kHz).....	45
Abb. 6-3 Pegelverteilung im Bezug zum Referenzpunkt (#6)	46
Abb. 6-4 Vertikale Pegeldifferenz aus Simulationsergebnissen und Messung.....	47
Abb. 6-5 horizontale Pegeldifferenz aus Simulationsergebnissen und Messung.....	48

11 Schlusswort

Mein besonderer Dank gilt allen, die mich bei beim Verwirklichen dieser Arbeit unterstützt haben, dem Referenten Prof. Dr.-Ing. Christof Ricken, meinem Betreuer der Firma IFBcon Dipl. Phys.-Ing. Volker Löwer, sowie allen Mitarbeitern von IFBcon für die fachliche Beratung.

Für die Bereitstellung von Messdaten und Software möchte ich mich bedanken bei: Herrn Karsten Ballhorn und Herrn Jörg Knieschewski (Stamer Musikanlagen), Herrn Boris Rehders (d&b), Dr. Wolfgang Ahnert und Frank Siegmann (SDA).

Meiner Familie möchte ich meinen besonderen Dank für die uneingeschränkte Unterstützung und die aufgebrachte Geduld aussprechen.

Benjamin Lampert