

Diplomarbeit

"Kompakte Line Arrays und ihre Entwicklung"

Ausgeführt im Rahmen des Diplomandenseminars
am Fachhochschul-Masterstudiengang
„Telekommunikation und Medientechnik“ der FH St. Pölten

Unter der Leitung von

DI Andreas Büchele

Ausgeführt von

René Rainer

tm071050

St. Pölten, am

Unterschrift

Für meine Eltern

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich versichere, dass

- ich diese Diplomarbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.

- ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im Inland noch im Ausland einem Begutachter oder einer Begutachterin zur Beurteilung oder in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachter/inne/n beurteilten Arbeit überein.

Ort, Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit den Grundlagen und den Anforderungen, die heutzutage an professionelle möglichst kompakte Beschallungssysteme beziehungsweise Line Arrays gestellt werden.

Über die Betrachtung wichtiger akustischer Messgrößen, Lautsprecher-Wandler und Lautsprecher-Gehäusen wird versucht, die Einflüsse, welche einzelne Komponenten auf Lautsprechersysteme und ihr Abstrahlverhalten ausüben, aufzuzeigen. Darüber hinaus werden technische Grundsätze angeführt, die es erlauben professionelle kompakte Line Array-Systeme zu bauen. Es wird anhand von Beispielen gezeigt, in welchen Bereichen bereits Optimierung zu Gunsten des Abstrahlverhaltens und der Abmessungen der Systeme stattgefunden hat und in welchen Bereichen es noch Potential für Verbesserungen gibt.

Anhand der zugrundeliegenden Physik und dem Einsatz von Simulations Software wird erklärt, wie es die Hersteller möglich machen, durch den Einsatz spezieller Technologien, ihre Line Array-Systeme für eine Vielzahl von Anwendungen zu optimieren. Weiters wird Einblick in neue, technische Entwicklungen, wie *beam steering* oder Kardioide Basslautsprecher gegeben, welche vor allem für kompakte Line Array-Systeme von Bedeutung sind. Vorteile und Probleme der kompakten Line Array-Technik werden mit Erfahrungen aus der Praxis verglichen und bisherige Lösungsansätze angeführt.

Abstract

This diploma thesis examines fundamentals and focuses on demands that professional compact public address systems and accordingly line array systems have to meet these days.

This work intends to point out the influences that components exert to the directional characteristics of public address systems, with regard of important acoustic measurement categories, acoustoelectric transducers as well as speaker cabinets. It mentions technical fundamentals that are essential to create professional compact line array systems. Exactly what domains already take advantage concerning optimized directional behavior and compact measurements is explained on the basis of examples. Furthermore these examples also point out the domains that still got range for optimization.

The assistance of software for simulation and prediction and the underlying physical fundamentals approve how the manufacturers are able to adapt their systems for a wide range of different purposes with the initiation of special technologies. In addition future prospects such as beam steering or cardioids subwoofers are covered regarding their importance for compact line array-systems. Advantages and disadvantages of compact line array-systems have been identified with relations to practical experience and possible workarounds are mentioned.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	1
Abstract.....	2
Einleitung	5
1 BESCHALLUNGSSYSTEME FÜR PUBLIC ADDRESS.....	6
1.1 Grundlagen	6
1.1.1 Grundlegende Anforderungen an ein Beschallungssystem	8
1.1.2 Anforderungsprofile	9
1.2 Messgrößen.....	12
1.2.1 Speech Transmission Index - STI	12
1.2.2 STI - Messung.....	12
1.2.3 Nichtlineare Verzerrungen	19
1.2.4 Klirrfaktor.....	22
2 LAUTSPRECHER.....	27
2.1 Wandlerprinzipien	28
2.1.1 Der elektrodynamische Wandler	28
2.1.2 Elektromagnetisch planare Wandler	31
2.1.3 Elektrostatische Wandler	33
2.2 Gehäuse Bauformen	36
2.2.1 Geschlossenes Gehäuse	37
2.2.2 Bassreflex - Gehäuse	38
2.2.3 Bandpass - Gehäuse	39
2.2.4 Hornlautsprecher	39
3 LINE ARRAYS	42
3.1 Die Anfänge	42
3.2 Grundlagen	44

3.3 Physikalische Fundamente.....	46
3.3.1 Abstrahlwinkel.....	48
3.3.2 Idealisierung der Schallquellen	50
3.3.3 Nahfeld - Fernfeld.....	52
3.3.4 Schallbeugung.....	54
3.4 Simulation	55
3.4.1 Testreihe Meyer Sound M´elodie Einzellautsprecher.....	56
3.4.2 Testreihe Meyer Sound M´elodie aus acht Elementen.....	59
3.4.3 Fazit	62
3.5 Technologie Meyer Sound M´elodie	64
3.5.1 REM Waveguide	64
3.6 Ansätze im Tieftonbereich	67
3.7 Steuerung der Abstrahlcharakteristik über DSP	70
3.7.1 <i>Beam Steering</i>	71
4 PRAKTISCHE ERFAHRUNG.....	76
4.1 ORF SKI Challenge WM ´09	76
4.1.1 Zur Erklärung	76
4.1.2 Der Veranstaltungsort	77
4.1.3 Der Aufbau.....	77
4.1.4 Technologie Contour Array	82
5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	84
6 LITERATURVERZEICHNIS	87
7 DIGITALE QUELLEN.....	87
8 INTERNET QUELLEN	88
9 ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	89

Einleitung

In der professionellen Beschallungstechnik geht der Trend heutzutage in Richtung immer kompakter- und anwendungsfreundlicher werdender Systeme. Selbst bei Großveranstaltungen im freien Feld werden übergroße Beschallungscluster wie sie noch vor 10 Jahren die Regel waren, immer mehr zur Ausnahme. Wände, bestehend aus scheinbar wahllos aneinander und übereinander gestapelten Lautsprechern, werden immer mehr durch das Bild von strukturierten und im Vergleich dazu unauffälligeren Beschallungslösungen ersetzt. Diese Entwicklung nennt sich Line Array und ist längst kein Fremdwort mehr in der professionellen Beschallungstechnik.

Die Line Array Technologie versucht durch spezielle akustische Elementarstrahler und physikalisch-akustischen Gesetzmäßigkeiten die Anpassungsfähigkeit, Leistung und Qualität moderner Beschallungssysteme weiter zu steigern.

In dieser Diplomarbeit wird versucht einen Überblick von allgemeinen Aufgaben der Beschallungssysteme und den dafür akustisch relevanten Messgrößen und deren Anforderungen zu geben, um in weiterer Folge schließlich über Lautsprechergrundlagen bis hin zu den immer kompakter werdenden Line Array Systemen, den momentanen Entwicklungsstand kompakter Systeme und mögliche zukünftige Entwicklungen aufzuzeigen.

Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der technischen Entwicklung und den physikalischen Grundprinzipien, die moderne kompakte Line Array Systeme nützen, um eine den höchsten akustischen Ansprüchen gerecht werdende, gleichzeitig gut im Voraus planbare, wie auch gezielte und anpassungsfähige Beschallungssituation zu realisieren. Es soll gezeigt werden inwieweit moderne kompakte Line Array-Systeme diese Anforderungen bereits erfüllen und in welchen Bereichen dies bisher noch nicht oder nur unzufriedenstellend gelungen ist.

1 Beschallungssysteme für Public Address

1.1 Grundlagen

Einem professionellen Beschallungssystem, auch *PA (Public Address) – System* oder kurz *PA* genannt, zugrundeliegende Aufgabe ist es, Audiosignale unterschiedlichster Formen, unabhängig davon ob es sich dabei um Musik, Sprache oder auch Geräusche jeglicher Art handelt, von einer Signalquelle wiederzugeben. Beschallungssysteme werden in erster Linie dazu benutzt, verschiedene Signalquellen (Tonträger, Sprecher, Instrumente, Computer...) einer großen Anzahl von Personen zugänglich zu machen.

Als „ideale“ Beschallungsanlage für Veranstalter wie Publikum gilt allgemein, eine Anlage, die optisch nicht auffällt und einen der Signalquelle angemessenen Schalldruckpegel erzeugt. Im theoretischen Idealfall sind das möglichst kleine Systeme, die mit hohem Wirkungsgrad und geringem Gewicht eine saubere, natürliche Wiedergabe gewährleisten, darüberhinaus auch noch einfach zu installieren und auch einfach zu bedienen sind. Es werden somit viele Anforderungen an ein modernes PA-System gestellt. Die Hersteller haben das Ziel, Lautsprecher aus mehreren Komponenten so aufzubauen und aufeinander abzustimmen, dass der Eindruck eines einzigen „großen“ Lautsprechers, der die zu beschallende Fläche beziehungsweise den zu beschallenden Raum, an jeder Abhörposition mit konstantem Schalldruckpegel beschallt.

Die Forschungs- und Entwicklungsabteilungen der Hersteller arbeiten daran sich diesen idealen Systemen anzunähern, um immer bessere Lautsprechersysteme herzustellen.

In der professionellen Beschallungstechnik existieren jedoch schon Beschallungssysteme, die zumindest einigen dieser Anforderungen nachkommen. Kompakte Lautsprechersysteme in *Array-* Form, „geflogen“* oder „gestacked“*, auch **Line Arrays** genannt, versuchen den hohen Erwartungen der Anwender gerecht zu werden. Diese Generation von Beschallungssystemen hat mittlerweile den konventionellen „Cluster“ in dem die Lautsprecher horizontal aufgereiht wurden mehr oder minder abgelöst.

Zielmarkt dieser Anlagen sind in erster Linie Anwender in der Medien und- oder der Eventtechnik. Bei möglichst geringem Gewicht und kleinen Abmessungen versucht man mit diesen Systemen sowohl Veranstaltungen kleineren Rahmens als auch Großveranstaltungen, bei welchen ebenfalls eine möglichst unauffällige Beschallungsanlage gewünscht wird, gezielt zu beschallen.

Allerdings sind Line Array-Systeme definitiv nicht für jeden Anwendungsfall als geeignet oder sinnvoll anzusehen. Die der Line Array Technologie zugrundeliegenden physikalischen Prinzipien wurden bisher noch nicht zufriedenstellend umgesetzt und lassen noch Raum für weitere Optimierungen, sodass man noch einige Zeit an dieser Entwicklung weiterarbeiten wird, um ihr Potential voll ausschöpfen zu können. Mit dem Forschungsfortschritt in diesem Sektor, wächst auch die Zahl der möglichen Anwendungen.

In dieser Arbeit soll das Fortschreiten der Entwicklungen untersucht und zukünftige Aussichten dargestellt werden. Dazu bedarf es der Bearbeitung von allgemeinen Grundlagen im Bereich der Beschallungssysteme, akustischen Messwerten und dem Lautsprecherbau.

1.1.1 Grundlegende Anforderungen an ein Beschallungssystem

Im Allgemeinen können Beschallungssysteme in folgende Komponenten oder Gruppen unterteilt werden:

- **Signalquellen**
- **Signalbearbeitung**
- **Signalübertragung**
- **Leistungsverstärker**
- **Lautsprecher**
- **Peripherie**

(Weinzierl 2008, S.494)

Lautsprecher und Leistungsverstärker bilden im professionellen Anwendungsbereich in den meisten Fällen eine zusammengehörende Einheit. In dieser Arbeit wird sich die genauere Betrachtung hauptsächlich auf die Gruppe der Lautsprecher und Leistungsverstärker beschränken, es werden allerdings auch andere Komponenten, sofern diese ausreichende Relevanz für das Thema haben, bearbeitet.

Der allgemeine Trend im professionellen Lautsprecherbau geht in Richtung der aktiven Systeme d.h.: Leistungsverstärker werden direkt in die Lautsprechergehäuse integriert.

Zum Unterschied dazu gibt es außerdem noch Lautsprecher Mehrweg-Systeme, mit integrierten passiven Frequenzweichen, gegenüber Systemen mit aktiven und - oder passiven, digital oder analog ausgeführten Weichen. Manche Hersteller bauen einen eigenen Leistungsverstärker pro Lautsprecher-Weg in ihre Systeme ein.

Diese Fälle dienen nur als Beispiel, um die vielen unterschiedlichen Ausgangsformen in der Lautsprecherkonzeption zu erwähnen. Bei den später im Kapitel Line Arrays angeführten Lautsprechersystemen handelt es sich ausschließlich um aktive Systeme.

Leistungsverstärker weisen heutzutage ein Leistungs-/Gewicht Verhältnis von ungefähr 1000 W/kg auf, im Gegensatz dazu waren es zu den Anfängen der PA-Systeme noch 30 W/kg.

Die Verbesserung des Wirkungsgrades kommt natürlich den Abmessungen und dem Gewicht moderner Lautsprecher entgegen, wodurch es möglich wird immer kleinere und leichtere Lautsprechersysteme bei gleich bleibend hoher Leistung zu bauen. (vgl. Weinzierl 2008, S.495)

1.1.2 Anforderungsprofile

Welche Beschallungsanlage für eine Veranstaltung benötigt wird, hängt von der Art, der Größe und dem Ort der Veranstaltung ab. Es ist bekannt, dass die Anforderungen eines Pop/Rock Konzertes mit tausenden von Besuchern von jenen eines Vortrages in einem Auditorium abweichen. Unterschiedliche Rahmenbedingung erfordern somit unterschiedliche Lösungen. Zur Planung einer professionellen Beschallungsanlage und ihrer Werkzeuge wird wie folgt zitiert (Weinzierl 2008, S.516):

„Eine Beschallungsanlage muss immer im Hinblick auf ihren spezifischen Anwendungsfall hin geplant werden. Daher ist nicht nur ein adäquates elektroakustisches Equipment erforderlich,..., sondern eine dezidierte technische Planung. Diese sollte das Nutzungsprofil der Anlage berücksichtigen (von Sprach- und Kommandodurchsagen bis zu aufwändiger Musikbeschallung), aber auch die raumakustischen Gegebenheiten. Wenn letztere nicht bereits im Vorfeld bekannt sind, müssen sie im Rahmen einer akustischen Messung selbst untersucht oder – bei noch in der Planungsphase befindlichen Objekten – durch eine Computersimulation prognostiziert werden.“

Die Planungsphase ist ein wichtiger Teil eines jeden Projekts in der Beschallungstechnik. Mittlerweile gibt es eine Vielzahl an Simulationsprogrammen der Hersteller, mit denen der Anwender in der Lage ist eine spezifische Beschallungssituation vorhersagen zu können. Diese Programme sind derart leistungsfähig geworden, dass selbst raumakustische Parameter des geplanten Veranstaltungs- oder Installationsort miteinbezogen werden können.

Um den Anforderungen von Veranstaltern oder öffentlichen Räumen, wie Bahnhöfe, Krankenhäuser, Flughäfen gerecht zu werden, wurden so genannte Anforderungsprofile für Beschallungsanlagen erarbeitet.

Tabelle mit einer Übersicht von Anforderungsprofilen für Beschallungsanlagen:

Anforderungsprofile von Beschallungsanlagen					
Signale	Anwendung	Frequenzgang ($\pm X$ dB)	Schalldruck* (0..50 ms)	Verzer- rungen	Sprachverständ- lichkeit (STI)
Alarmtöne	Fabrikhallen, Tunnel, Schiffe, Rettungsfahrzeuge etc.	schmalbandig (je nach Signalform)	100 dB und mehr	relativ unwichtig	–
Sprache (einfach)	Bahnhöfe, Tunnel, kleine Sportstätten, etc.	300 Hz bis 3 kHz	75 bis 105 dB	unter 10 %	0,45 oder besser
Sprache (hoher Anspruch)	Stadien, Kongresshallen, etc..	100 Hz bis 10 kHz	75 bis 105 dB	unter 10 %	0,5...0,7
Musik (einfach)	Hintergrundbeschallung	100 Hz bis 10 kHz	60 bis 80 dB	unter 10 %	–
Musik (hoher Anspruch)	Konzertbeschallung, Filmtone, Stadien, etc.	20 Hz bis max. 20 kHz	85 bis 105 dB	unter 10 %	–
Geräusche	Klanginstallationen	–**	–**	–**	–**

* Schalldruck in dB bei den Hörern
 ** je nach Anwendung sehr unterschiedlich

Abbildung 1: Übersicht von Anforderungsprofilen (Weinzierl 2008, S.497)

Neben den für die Leistung und Qualität einer Beschallungsanlage aussagekräftigen Eckdaten über Schalldruck, Frequenzgang und Verzerrungen, werden in solchen Profilen auch Werte für den **STI (Speech Transmission Index)** angegeben. Dieser Index gehört zu den wichtigsten Messgrößen in der Beschallungstechnik, da er Auskunft über das Maß der Sprachverständlichkeit, eines von einem Beschallungssystem ausgestrahlten Sprachsignals, in Bezug auf den jeweilig beschallten Raum gibt. Auf die Bedeutung des *STI*, für Beschallungssysteme und ihre Anwendung sowie auf seine genaue mathematische Zusammensetzung und Berechnung, wird im nächsten Punkt ausführlich eingegangen.

1.2 Messgrößen

1.2.1 Speech Transmission Index - STI

Der **STI** (Speech Transmisson Index) gibt Auskunft über das Ausmaß der Sprachverständlichkeit eines Beschallungssystems bezogen auf einen bestimmten Raum. Bei der Ermittlung von dieser in der Beschallungstechnik wichtigen Messgröße, müssen folgende relevante Einflussgrößen für den „**STI** nach **Houtgast** und **Steneken**“ berücksichtigt werden:

- Einflussgrößen Raumakustischer Natur : Echos und Nachhall...
- Eigenschaften der Beschallungsanlage selbst : Dynamik, Bandbreite, Verzerrungen...
- psychoakustische Effekte der menschlichen Schallwahrnehmung : Hörschwelle und Verdeckungseffekt
- Jeglicher Einfluss von diversen anderen Störgeräuschen

All dies Aspekte fließen in die Berechnung des **STI** mit ein. Angegeben wird der **STI** in Zehnerdezimalschritten von 0,0 – 1,0 wobei der Wert 1 für optimale Sprachverständlichkeit steht und 0 für absolut unverständlich. (vgl. Weinzierl 2008, S.536)

1.1.2 STI - Messung

Als Testsignal zur **STI** Messung dient Oktavbandrauschen, in den für die menschliche Sprache relevanten sieben Frequenzbändern von 125 Hz bis 8kHz, mit der typischen spracheigenen Modulation. Nach der Übertragung des Testsignals werden die Modulationsverluste ausgewertet.

Das umfassendste *STI* - Verfahren verwendet 14 Modulationsfrequenzen, zwischen 0,63 und 12,5 Hz, mit denen die jeweiligen Modulationsverluste in den sieben Oktavbändern bestimmt werden. In diesem Fall ergibt sich aus den Daten eine Matrix mit 98 Indizes, welche schlussendlich durch unterschiedliche Gewichtung den Wert des *STI* bestimmen.

In der Beschallungstechnik werden zumeist jedoch einfachere Verfahren, wie der ***RASTI*** (***R*apid *S*peech *T*ransmission *I*ndex**) oder ***STI - PA*** (für *Public Address*) der im Vergleich mit nur 14 Indizes ermittelt wird, verwendet. Möglich wird das durch moderne Akustik-Messgeräte oder *Analyzer* (wie den *Acoustilyzer* von *NTI*), die alle 14 Indizes des *STI-PA* mithilfe eines komplexen Testsignals aus nur einer Messung errechnen. Solche Messgeräte schicken einen Test-Ton über den angeschlossenen Lautsprecher an ein vor dem Lautsprecher aufgestelltes Messmikrofon, welches ebenfalls an den Analyzer angeschlossen ist. Danach wird ein Test-Ton vom Gerät selber generiert, über den Lautsprecher geschickt, von dem Mikrofon aufgezeichnet und wieder über das Gerät ausgewertet.

Um eine Aussagekräftige *STI* -Messung zu bekommen, muss auch noch der Signal Störabstand ***SNR*** (***s*ignal-*t*o-*n*oise *r*atio**), der um ein optimales Ergebnis zu erzielen - getrennt gemessen werden sollte, miteinbezogen werden. Der Signal Rauschabstand gibt an, in welchem Verhältnis Rauschleistung und Nutzleistung zueinander stehen.

Diese Gleichung stellt den *SNR* in einem logarithmischen Maßstab in Dezibel dar:

$$\text{SNR}|_{\text{dB}} = 10 \lg \left(\frac{\text{Nutzsignalleistung}}{\text{Rauschleistung}} \right) = 10 \lg \left(\frac{P_{v,S}}{P_{v,N}} \right) \quad (\text{http://de.wikipedia.org/wiki/Signal-Rausch-Verhältnis})$$

Der *SNR* wird als Pegeldifferenz zwischen Nutz- und Störsignal in die Indizes der gemessenen Oktavbänder eingerechnet. Rauschabstände über 15 dB wirken sich auf den *STI* nicht aus. Für Rauschabstände kleiner 15 dB gilt das jedoch nicht. Zum Beispiel kann bei einem *SNR* von +9 dB unter optimalen Bedingungen nurmehr ein *STI* Wert von 0,8 erreicht werden.

Das nachfolgende Diagramm veranschaulicht die Auswirkung des SNR auf den STI im Bereich von +15 -(-15)dB.

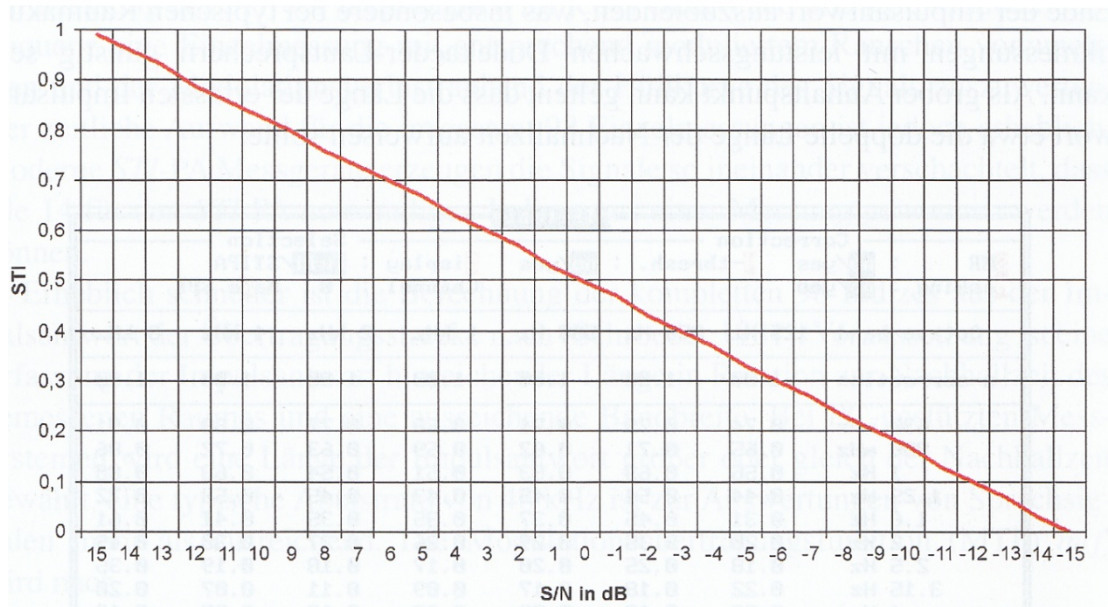


Abbildung 2: (Weinzierl 2008, S.540)

Gemessen wurde: Nutzsignal - Sprecher mit 65 dBA Pegel und ein Störsignal: Noise mit Sprachspektrum.

Für die Berechnung des STI werden, wie bereits erwähnt, in weiterer Folge auch psychoakustische Effekte der Schallwahrnehmung miteinbezogen. Zum Beispiel der Selbstverdeckungs- oder Maskierungseffekt und der Hörschwellenfaktor. Diese Effekte beeinflussen die Sprachverständlichkeit und geben an welcher STI - Wert bestenfalls, in Abhängigkeit vom Pegel des Sprachsignals, unter darüber hinaus optimalen Bedingungen noch zu erreichen ist.

Grafik - Auswirkung der Hörschwelle auf die Sprachverständlichkeit

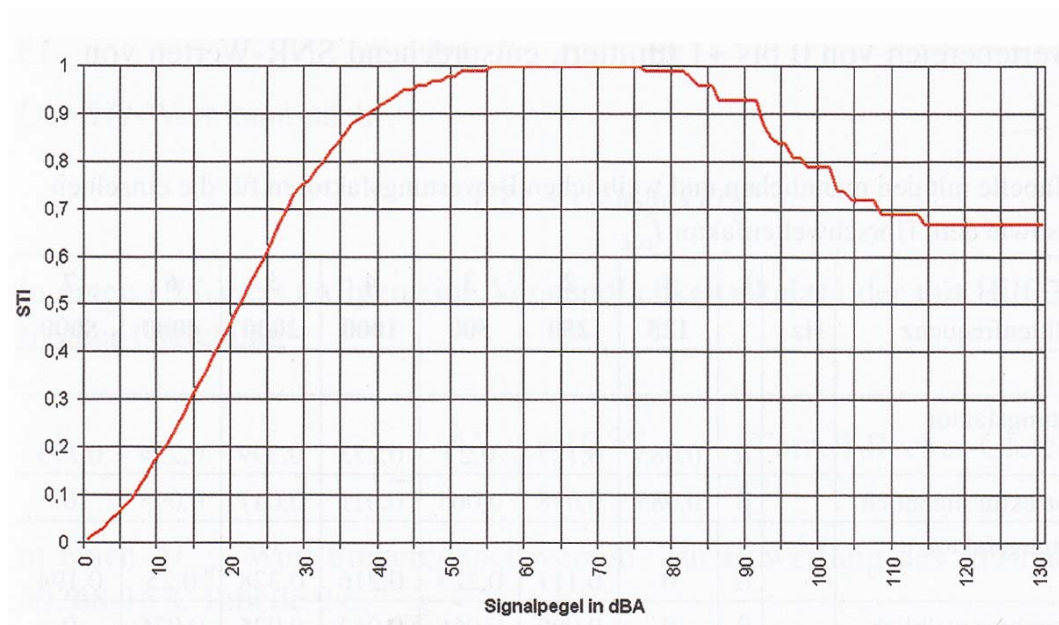


Abbildung 3: (Weinzierl 2008, S.541)

Aus dieser Grafik wird deutlich ersichtlich, dass der beste *STI*-Wert im Bereich von 55 dBA bis ungefähr 75 dBA erreicht wird. Diese Werte wurden ohne Berücksichtigung von Störsignalen erreicht. Im Bereich unter 55 dBA kommt es zu einer Verschlechterung des *STI*, da aufgrund des geringeren Sprachsignalpegels bereits erste Oktavbandfrequenzen unter die menschliche Hörschwelle fallen.

Des Weiteren tritt ab 75 dBA Sprachsignalpegel aufgrund des hohen Pegels und der daraus folgenden Selbstmaskierung - Verdeckung von Sprache (lautere tieffrequente Anteile verdecken wichtige hochfrequente Anteile) ebenso eine Verschlechterung des *STI* ein. Dieser Effekt sollte in der Praxis berücksichtigt werden, da es bei einem hohen Störsignalaufkommen nicht mehr ausreicht einfach den Signalpegel beliebig zu erhöhen und dadurch den *STI* zu verbessern.

Es ist aber auch zu erwähnen, dass sich der *STI* oberhalb einer sehr deutlichen Pegel Erhöhung (>110 dBA) wieder stabilisiert und konstant auf einem *STI* Wert knapp unter 0,7 bleibt. (vgl. Weinzierl 2008, S.541)

In welchem Ausmaß sich dieser Effekt tatsächlich in der Praxis auswirkt kann aus dieser Grafik nicht eindeutig geschlossen werden. Das Beispiel zeigt aber deutlich, welchen großen Einfluss allein der Pegel eines Sprachsignals selbst auf den *STI* hat.

Liegen alle benötigten Messwerte für *SNR*, Maskierung und Hörschwelle vor, werden sämtliche gemessenen Faktoren in ein *SNR* umgewandelt und in den Übertragungsindex – *TI* eingetragen. Aus den Werten der Übertragungsindizes werden darauffolgend die Modulations-Übertragungsindizes – *MIT* berechnet, abschließend werden die Indizes noch nach männlichen oder weiblichen Bewertungsfaktoren gewichtet und mittels zusätzlicher Redundanzkorrektur wird schließlich der *STI* Wert errechnet.

$$STI = \sum_{n=1}^7 \alpha_n \cdot MIT_n - \sum_{n=1}^6 \beta_n \sqrt{MIT_n \cdot MIT_{n+1}}$$

In der Beschallungstechnik existieren neben der *STI* Skala noch weitere, häufig gebräuchliche Skalen die Auskunft über die Sprachverständlichkeit einer Beschallungsanlage geben.

Der *STI* kann zum Beispiel durch eine einfache Gleichung in die **CIS** Skala (**Common Intelligibility Scale**) überführt werden. Gleich dem *STI* Index benutzt auch die *CIS* den Wertebereich von 0 – 1 zur Bewertung der Sprachverständlichkeit, wobei ebenfalls 0 für absolut unverständlich und 1 als sehr gut verständlich angesehen wird.

$$CIS = 1 + \log(STI)$$

Zur Bewertung des *STI* nach der Norm DIN EN 60268-16 kann der *STI* noch über die *Farrell-Becker Gleichung* in den **ALcons** (**Articulation Loss of consonants**), der in % angegeben wird, umgerechnet werden. (vgl. Weinzierl 2008, S.542f)

Gleichung für die Umwandlung von **STI** nach **ALcons**

$$Al_{\text{cons}} = 10^{\frac{1-STI}{0,45}}$$

Nachfolgende Tabelle veranschaulicht die Zusammenhänge der verschiedenen Sprachverständlichkeitsskalen inklusive der Verständlichkeitsangaben für Silben, Worte und Sätze und deren Einstufung nach DIN EN 60268-16.

<i>STI</i> -Wert	<i>CIS</i> -Wert	<i>Al</i> _{cons} in %	Einstufung DIN EN 60268-16	Silbenverständ- lichkeit in %	Wortverständ- lichkeit in %	Satzverständ- lichkeit in %
0...0,3	0...0,48	100...36	schlecht	0...32	0...37	0...75
0,3...0,45	0,48...0,65	36...17	schwach	32...61	37...68	75...93
0,45...0,6	0,65...0,78	17...8	angemessen	61...85	68...88	93...98
0,6...0,75	0,78...0,87	8...3,6	gut	85...98	88...98	98...100
0,75...1	0,87...1	3,6...1	ausgezeichnet	98...100	98...100	100

Abbildung 4:Übersicht-Sprachverständlichkeitsskalen (Weinzierl 2008,S.543)

Durchgeführt werden *STI* Messungen meist im Vorfeld einer Veranstaltung und daher ohne das „signaldämpfende“ Publikum. Durch das nichtvorhandene Publikum verändert sich die Raumakustik des Veranstaltungsorts. So verlängert sich zum Beispiel die Nachhallzeit in einem leeren Raum durch Reflexionen an der Einrichtung und verschlechtert dadurch die Sprachverständlichkeit. Es gibt genau aus diesem Grund auch spezielle, akustisch angepasste Sitzgelegenheiten z.B.: in Theatern, die im aufgeklappten Zustand das Absorptionsverhalten von Personen simulieren können.

Sprachverständlichkeitsskalen oder Indizes wie der *STI* liefern eine gute Grundlage zur Bewertung der Sprachverständlichkeit einer Beschallungsanlage ab. Jedoch sollte immer auch Bezug, auf den jeweiligen Veranstaltungsort oder den Typ der Veranstaltung, genommen werden.

Für kleinere Örtlichkeiten werden meist höhere bzw. bessere *STI* – Werte gefordert als es bei Großveranstaltungen, oder in weitläufigeren Örtlichkeiten (z.B.: Stadien) der Fall ist. Werte die für Stadien bereits angemessen sind, können für einen Hörsaal wiederum als unangemessen angesehen werden, da die allgemeinen Anforderungen aufgrund der schwierigeren technischen Realisierung, an die Art und Dimension der Veranstaltung angepasst werden.

Bei der Messung selbst sollte auch der Arbeitsaufwand, der für die Messung (abhängig von der Anzahl an Messpunkten) von Nöten ist, berücksichtigt werden um ein ausgewogenes Verhältnis von Aufwand zur Qualität gewährleisten zu können.

In der Praxis zeigt sich oft trotz raffinierter Messmethoden, dass ausgewiesene Grenzwerte und Normen nicht immer als Garantien für gute oder schlechte Sprachverständlichkeit gesehen werden können. Vielmehr passiert es auch, dass Beschallungsanlagen mit vermeintlich „schlechten“ *STI*-Werten, die unter 0,5 liegen, subjektiv als sehr gut eingestuft werden und offensichtlich gute Anlagen mit *STI*-Messwerten über 0,6 trotzdem mit schlechter subjektiv wahrgenommener Sprachverständlichkeit aufwarten.

Solche Ergebnisse relativieren die Verlässlichkeit der Messwerte und lassen durchaus Platz für Kritik an den Methoden. In dieser Situation erfordert es im Zweifelsfall immer noch der subjektiven Meinung eines Toningenieurs oder ähnlich qualifizierten Experten, welche in der Lage sind, eine professionelle Einschätzung der Sprachverständlichkeit abzugeben.

Im Allgemeinfall sollte aber eine gewissenhafte *STI* Messung eine solide Grundlage für die Bewertung der Sprachverständlichkeit einer Beschallungsanlage, bezogen auf den jeweils zu beschallenden Raum, bieten.

1.2.3 Nichtlineare Verzerrungen

Im Anforderungsprofil für Beschallungssysteme (siehe Abbildung 1) werden neben den Richtwerten für *STI*, Schalldruck und Frequenzgang eines Systems auch Richtwerte für das Ausmaß von Verzerrungen angeführt.

„Abweichungen des Signals von seiner ursprünglichen Form nach der Umwandlung in einem System werden Verzerrungen genannt...“ (Raffaseder 2002, S.45)

Unterschieden werden dabei lineare- von nichtlinearen Verzerrungen. Allgemein kann zur Unterscheidung folgendes Zitat verwendet werden:

„Können diese Fehler beispielsweise durch ein nachgeschaltetes Korrektursystem wieder rückgängig gemacht werden, so wird von linearen, andernfalls von nichtlinearen Verzerrungen bzw. Systemen gesprochen.“ (Raffaseder 2002, S.45)

Kommt es zu linearen Verzerrungen sind vor allem die Amplituden einzelner Signalteile betroffen, es werden im Gegensatz zu nichtlinearen Verzerrungen, neue Teiltöne dem Gesamtsignal hinzugefügt. Dadurch werden lineare Verzerrungen in geringerem Ausmaß wahrgenommen und sind leichter elektronisch zu korrigieren.

Verzerrungen prägen unabhängig von ihrer Erscheinungsform, mehr oder minder das Klangbild beziehungsweise die Linearität eines jeden Lautsprechersignals. Somit prägen sie auch den gesamten übertragenen Frequenzbereich eines Lautsprechers und damit in weiterer Folge auch den „Sound“ eines Beschallungssystems, das ist in erster Linie auf, von der Bauform der Lautsprecher abhängige Resonanzen, zurückzuführen. Mehr noch als andere Komponenten eines Beschallungssystems, neigen Lautsprecher dazu, Signale nichtlinear zu verzerren. Je nach Anwendungsbereich beziehungsweise der Nutzung eines Lautsprechers, kann sich dies in unterschiedlichen Ausprägungen äußern.

Man kann jedoch definitiv von einer allgemeinen Zunahme der Verzerrungen mit erhöhter Belastung eines Lautsprechers ausgehen. Wird die Belastungsgrenze eines Lautsprechers überschritten, treten dadurch in verstärktem Maße Verzerrungen auf, in diesem Fall spricht man auch von einer *Übersteuerung* des Lautsprechers.

Die subjektive Wahrnehmung nichtlinearer Verzerrungen wird schon alleine durch die Anatomie des menschlichen Ohres selbst beeinflusst. Unser Hörorgan verursacht seinerseits Verzerrungen die mit steigender Lautstärke zunehmen. Eine große Rolle in der Wahrnehmung von Verzerrungen spielt ebenso der Verdeckungseffekt. Verzerrungen, verursacht von unserem Hörapparat, können auch die von Lautsprechern verursachten Verzerrungen verdecken. Somit ist, neben den Messergebnissen akustischer Messgeräte, auch der subjektive Höreindruck nach wie vor relevant bei der Beurteilung der Klangqualität.

Vorgänge, der akustischen Wahrnehmung sind sehr komplex, so dass daraus keine allgemeinen, verlässlichen Beschreibungen über die Störwirkung von Verzerrungen gewonnen werden können. Teilweise jedoch können Verzerrungen, subjektiv als Zunahme der Lautstärke wahrgenommen werden. Dem Zugrunde liegt die Tatsache, dass Verzerrungen von Tönen und deren Obertönen zusammenfallen und sich verstärken. (vgl. Dickreiter 1997b, S.440)

Als nichtlineare Verzerrungen werden in der Elektrotechnik allgemein, „...*Veränderungen der Kurvenform eines Signals, verursacht durch amplitudenabhängige Verstärkung oder Dämpfung eines Übertragungsgliedes*“ bezeichnet. (Dickreiter 1997b S.439)

Als Übertragungsglieder gelten sämtliche elektroakustische und auch elektrische Bauteile- oder Gruppen. In der Beschallungstechnik weisen Lautsprecher baubedingt die größten Verzerrungen bei der Signalübertragung auf. Natürlich wird von den Herstellern versucht, das Verzerrungsverhalten von Lautsprechern, wie auch anderer Systemkomponenten so gering wie möglich zu halten.

Herstellerangaben über das Verzerrungsverhalten eines Lautsprechers haben aber meist, zumindest im Consumer Bereich, eine nur sehr geringe Aussagekraft. Angegeben wird vorwiegend der Maximalpegel ohne jeglichen Bezug auf einen Frequenzbereich. Der Maximalpegel mit dem ein Lautsprecher betrieben werden kann, lässt aber keinerlei Rückschlüsse auf die tatsächlich auftretenden Verzerrungen im Betrieb zu.

Im professionellen Bereich wird das Verzerrungsverhalten eines Lautsprechers oder eines Beschallungssystems wesentlich genauer behandelt. In Labortests von Fachzeitschriften aber auch in den Spezifikationen von professionellen PA Systemen, wird das Verzerrungsverhalten eines Lautsprechers meist unter Zuhilfenahme einer grafischen Darstellung des Klirrfaktors und seines Frequenzganges beschrieben. Der Klirrfaktor stellt somit ein weiteres Attribut zur Bewertung der Qualität einer professionellen Beschallungsanlage dar und sollte an dieser Stelle genauer betrachtet werden.

1.2.4 Klirrfaktor

Nichtlineare Verzerrungen lassen sich messtechnisch durch drei Faktoren beschreiben:

- Differenztonfaktor
- Intermodulationstonfaktor
- Klirrfaktor

Da im Zusammenhang mit *PA-Systemen* in den meisten Fällen der Klirrfaktor zur Beschreibung des Verzerrungsverhaltens eines Systems angegeben wird, werden Intermodulation- und Differenztonfaktor an dieser Stelle nicht näher behandelt. Der Vollständigkeit wegen sei jedoch erwähnt, dass der Klirrfaktor nur den Anteil der harmonischen Verzerrungen eines Tonsignals beschreibt und Verzerrungen die durch Summen- und Differenztöne entstehen dabei nicht berücksichtigt werden. Um solche Verzerrungen darzustellen und zu beschreiben werden in weiterer Folge der Intermodulationsfaktor oder der Differenztonfaktor gemessen.

Der Klirrfaktor gibt an, wie sich durch die Verzerrung eines Sinusförmigen Signals entstandene Oberschwingungen oder Harmonische, im Verhältnis zu dem Gesamtsignal verhalten. (vgl. Dickreiter 1997b, S.444)

$$k = \frac{\sqrt{U_{2f}^2 + U_{3f}^2 + U_{4f}^2 + \dots}}{U_{\text{ges}}}$$

k = Klirrfaktor [dimensionslos]

$U_{2f}, U_{3f}, U_{4f} \dots$ = Spannung der neu entstandenen Harmonischen in Effektivwerten [V]

f = Frequenz des Meßtons [Hz]

U_{ges} = Spannung des verzerrten Gesamtsignals als Effektivwert [V]

Abbildung 5: Berechnung - Klirrfaktor (Dickreiter 1997b, S.444)

Um das Verzerrungsverhalten eines Lautsprechers mittels Klirrfaktor zu messen, werden Sinusbursts als Testsignale über den Lautsprecher geschickt und im Anschluss daran mit der FFT (Fast Fourier Transform) – Analyse auf Klirranteile geprüft. Dazu wird die gewünschte konstante Eingangsspannung eingespeist, welche über die Nennimpedanz des Lautsprechers die resultierende (Ausgangs-)Leistung bestimmt. Über einen Sinusburst in $1/12$ Oktavschritten werden danach die Verzerrungswerte für die angelegte Eingangsspannung ermittelt. Die Größe der Eingangsspannung hängt von der angestrebten Abhörentfernung und dem gewünschten Pegel ab.

Für PA-Beschallungssysteme wird eine spezielle, aussagekräftigere Form der Darstellung verwendet. Diese gibt den maximal erreichbaren Pegel eines Systems unter vorgegeben Klirrfaktor Werten an. Als Klirrfaktorgrenzwerte werden 1%, 3% und 10% *THD* angewendet. **THD** steht für **T**otal **H**armonic **D**istortion und gibt respektive den harmonischen Gesamtklirrfaktor an. Der *THD* steht somit für die Summe sämtlicher Verzerrungskomponenten im Verhältnis zum verzerrten Gesamtsignal.

Aufgrund der, im Vergleich zu älteren Systemen, relativ niedrigen Verzerrungen gibt man den *THD* mittlerweile in zeitgemäßen **dB** an.

Die Angaben in % und dB lassen sich durch folgende Formeln umrechnen:

$$THD[\%] = 100 \cdot 10^{\frac{THD[dB]}{20}} = 10^{\frac{THD[dB]+40}{20}}$$

Abbildung 6: Formel-Umrechnung-THD von % in dB (Weinzierl 2008, S.1146)

$$THD[dB] = 20 \cdot \log \frac{THD[\%]}{100} = 20 \cdot \log(THD[\%]) - 40$$

Abbildung 7: Formel-Umrechnung-THD von dB in % (Weinzierl 2008, S.1146)

Eine Orientierungshilfe für die Bereiche in denen sich die Prozentangaben des THD in dB umgerechnet befinden bietet folgende Tabelle:

THD [dB]	-20	-40	-60	-80	-100	-120
Klirr [%]	10	1	0,1	0,01	0,001	0,0001

Abbildung 8: Übersicht THD [dB] und Klirrfaktor [%] (Weinzierl 2008, S.1146)

Der Nachteil des *THD* ist, dass er sich lediglich auf die harmonischen Verzerrungen, welche jedoch in der Praxis nicht so stark wahrgenommen werden, bezieht. Auf Grund dessen, hat man mittlerweile den **THD+N** eingeführt, der neben der Angabe des Klirrfaktors auch das Rauschen, also breitbandige Störgeräusche miteinbezieht. Diese als **N-„Noise“** bezeichneten Störgeräusche werden eher wahrgenommen als der *THD* alleine. (vgl. Weinzierl 2008, S.1146)

Gemessen werden die *THD* Grenzwerte durch ein Gerät (z.B.: *NTI AL1 Acoustilyzer*) welches die Ausgangsspannung zum Lautsprecher steuert. Mit diesem Gerät wird die Eingangsspannung so lange gesteigert, bis der *THD* Grenzwert oder die maximale Verstärkerleistung für eine Frequenz aus dem vordefinierten Frequenzbereich erreicht ist.

Die Grafik zeigt über der Frequenz aufgetragene Verzerrungskurven in $1/12$ Oktavschritten für eine konstante Spannung an den Lautsprecherklemmen.

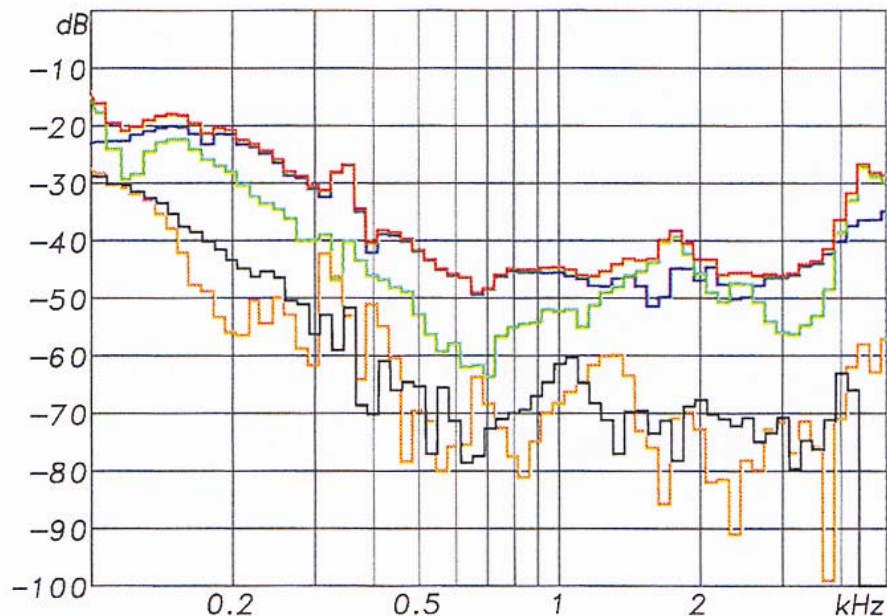


Abbildung 9: Der rote Graph repräsentiert die Summe aller Verzerrungskomponenten = THD, Blau steht für k2, Grün für k3, Orange für k4 und Schwarz für k5. (Weinzierl 2008, S.480)

„Die Kurven Stellen den THD-Wert (Summe aller harmonischen Verzerrungen) und die einzelnen harmonischen Komponenten von k2 bis k5 dar.“ (Weinzierl 2008, S.479)

Im professionellen Bereich, wird vor allem dem Verzerrungsverhalten tiefer Frequenzen des Bassbereiches und dem Frequenzbereich der menschlichen Stimme besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Viele Lautsprecher und Beschallungssysteme haben genau in diesen Bereichen ihre Schwachstellen. Diese Schwächen, die oft aufgrund der Konstruktion auftreten, machen sich vor allem bei hohen Gesamtpegeln bemerkbar. Daraus folgt ein vermehrtes Auftreten von nichtlineare Verzerrungen, welche zwar durch den Einsatz von *Controllern* kompensiert werden können, wodurch sich die Leistung des Gesamtsystems jedoch verringert.

Des Weiteren ist es nicht mehr möglich tiefe Frequenzbereiche, Stimmen oder Instrumente hervorzuheben, da in diesen Bereichen, die dafür nötigen Leistungsreserven fehlen. Daraus resultiert dann bei hohen Pegeln wiederum eine „*Undifferenzierbarkeit*“ der Signalanteile beziehungsweise eine noch stärkere Verzerrung von Signalen.

An diesem Beispiel zeigt sich schon in Ansätzen die Problematik, die klein konstruierte Beschallungssysteme bei hohen Gesamtpegeln mit sich bringen können. Je kleiner die Lautsprechermembranen im Verhältnis zu der von ihnen zu übertragenden Wellenlänge sind, desto eher werden nicht lineare Verzerrungen auftreten. Diesem und weiteren Problemen und den daraus resultierenden Verbesserungsansätzen diverser Hersteller, wird im Kapitel Line Arrays noch genauer nachgegangen.

Zunächst werden aber die, für die Qualität der Signalübertragung ungemein wichtige Komponente der Lautsprecher, mit ihren unterschiedlichen elektroakustischen-Wandlerprinzipien und Gehäusebauformen, beleuchtet.

2 Lautsprecher

Lautsprecher kommen im Allgemeinen in sehr vielen unterschiedlichen Größen und Formen vor. Attribute wie Abstrahlcharakteristik, akustische Qualität oder Leistung des Lautsprechers bestimmen seinen Einsatzbereich.

- Hi-Fi Lautsprecher (Für Heimanwender, Heimbereich von Low - High End)
- Studiomonitore (Für professionellen Produktionsbereich, sehr hoher Anspruch akustische Qualität)
- ELA (Elektroakustische Anlagen) meist im öffentlichen Bereich verwendet (hohe Empfindlichkeit im Frequenzbereich menschlicher Sprache gefragt)
- PA – Anlagen, Beschallungssysteme für Veranstalter (sowohl Leistung, Abstrahlcharakteristik und auch akustische Qualität abhängig von Verwendung wichtig)

In diesem Kapitel werden überblicksartig die verschiedenen, in der heutigen Lautsprecherkonstruktion am häufigsten angewandten Wandlerprinzipien erläutert. Es wird dabei auch noch genauer auf die in Line Array-Systemen verwendeten Technologien hingewiesen und eingegangen.

2.1 Wandlerprinzipien

Neben dem am weitesten verbreiteten Prinzip des elektrodynamischen Wandlers, trifft man im Lautsprecherbau außerdem noch auf andere häufig eingesetzte Prinzipien wie die elektromagnetisch planaren Wandler, die elektrostatischen Wandler und diverse exotische Sonderformen wie z.B.: den piezoelektrischen Wandler und den Manger Wandler.

2.1.1 Der elektrodynamische Wandler

Ein Vorteil von elektrodynamischen Wandlern ist, dass hohe Schallpegel innerhalb eines breitbandigen Übertragungsbereichs mit relativ geringen Verzerrungen und im Verhältnis dazu geringer aufgewendeter Energie erzeugt werden können.

Diese Eigenschaft macht den dynamischen Wandler zu dem in den letzten Jahren am meisten eingesetzten Wandler im Bereich der Musik- und Sprachübertragung. Aus wirtschaftlicher Sicht, kann kein anderes Wandler-System in diesem Bereich mithalten.

Funktionsweise

Durch das Magnetfeld eines Permanentmagneten welches auf eine stromdurchflossene Schwingspule einwirkt, wird durch die dabei auftretende Lorentzkraft in weiterer Folge die Membran des Schallwandlers angetrieben und die Luft in Schwingung versetzt.

Früher wurden Aluminium-Nickel-Kobalt Magnete eingesetzt, heute verwendet man hauptsächlich Ferrit und leichtere Neodym Magnete, die trotz geringerem Gewicht annähernd gleiche Leistungen erzielen.

Die Membranen von elektrodynamischen Wandlern werden entweder in Konus- oder Kalottenform gefertigt. Je nach Membrantyp spricht man deshalb auch von Konus- oder Kalottenlautsprechern.

Konuslautsprecher werden häufig als Tiefton- und auch Mitteltonlautsprecher eingesetzt und finden aufgrund ihres dafür weniger geeigneten Schwingungsverhaltens (Auftreten von Partialschwingungen bei breitbandiger Übertragung) sehr selten Verwendung als Hochtonlautsprecher. (vgl. Dickreiter 1997a, S.205ff)

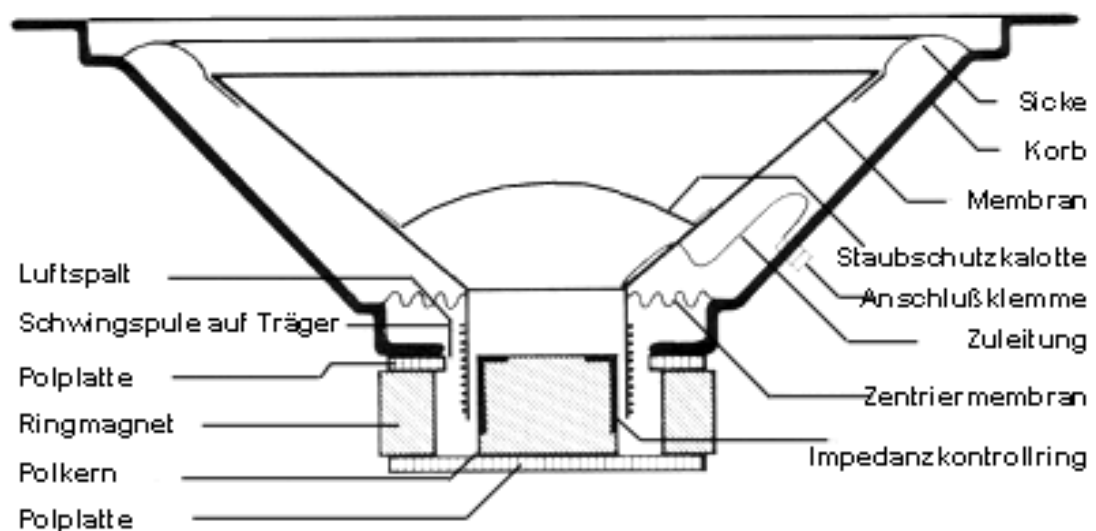


Abbildung 10: Querschnitt des Aufbaus eines Konuslautsprechers (http://www.visaton.com/bilder/sonstige/lexikon_konuslautsprecher.gif)

Kalottenlautsprecher werden im professionellen Lautsprecherbau häufiger als Hochton- oder Mitteltonlautsprecher in Größen von etwas unter 1" bis ungefähr 2,5" verwendet. Ein Grund dafür liegt daran, dass diese Membranform in der Lage ist das Audiosignal auch im Mittel- und Hochtonbereich gleichmäßig und in eher breitem Winkel abzustrahlen.

In Kalottenlautsprechern müssen konstruktionsbedingt stärkere Permanentmagnete eingesetzt werden um einen mit Konuslautsprechern vergleichbaren Wirkungsgrad zu erreichen.

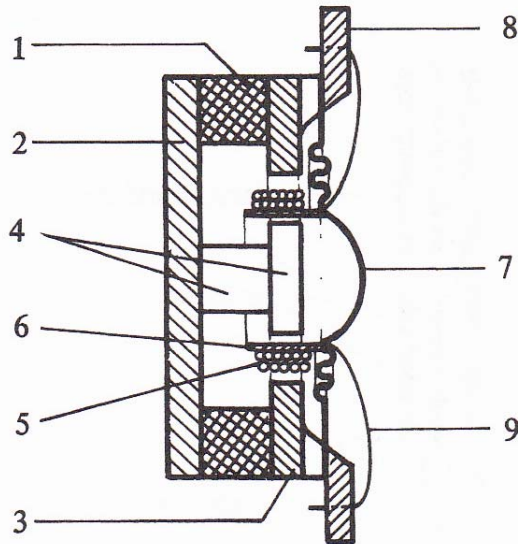


Abbildung 11: zeigt den Querschnitt eines Kalottenlautsprechers. 1 = Ringmagnet; 2 = Magnetplatte; 3 = Polplatte; 4 = Polkern; 5 = Schwingspule; 6 = Schwingspulenträger; 7 = Kalotte mit Sicken; 8 = Montageplatte; 9 = Zuführungslitzen. (Dickreiter 1997a, S.207)

Die Membranen der Wandler werden in Abhängigkeit von Preis und Einsatzbereich aus Papier, Pappe, Plastik, Aluminium, Keramik, Karbon oder anderen Verbundmaterialien gefertigt. Der eher geringe Wirkungsgrad eines dynamischen Wandlers kann durch den Einsatz eines Druckkammersystems verbessert werden. (vgl. Dickreiter 1997a, S. 205ff)

Am häufigsten findet man Kalottenlautsprecher in Mehrwegsystemen als Hochtontreiber wieder. In modernen und kompakten Line Array-Systemen greift man jedoch wegen der geringen Leistung von Kalottenlautsprechern eher zu speziell angepassten- effizienter arbeitenden Horntreibern wie den *Waveguides*. (Mehr dazu im Kapitel Line Arrays).

2.1.2 Elektromagnetisch planare Wandler

Elektromagnetisch planare Wandler arbeiten nach demselben Antriebsprinzip wie elektrodynamische Wandler mit dem Unterschied, dass sich der stromdurchflossene Leiter direkt auf der Membran (dem so genannten Bändchen) befindet und nicht davor (in Form einer Schwingspule) wie es bei den elektrodynamischen Wandlern der Fall ist.

Innerhalb eines elektromagnetischen Wandlers oder Bändchenlautsprechers befindet sich eine Membran vor einem oder zwischen zwei gegenüberliegenden Permanentmagneten. Direkt auf das dünne Membranbändchen aufgetragene, von Strom durchflossenen Leiterbahnen, bewegen durch die Lorentzkraft die Membran. Die entstehenden Antriebskräfte wirken gleichmäßig über die gesamte Membranfläche verteilt, wodurch störende Partialschwingungen, die vor allem bei elektrodynamischen Wandlern auftreten, verringert werden. Die Bändchenmembran verhält sich nahezu ideal und strahlt eine Zylinderwelle (siehe Line Arrays – Idealisierung von Schallquellen), welche der Größe der Membranlänge entspricht, ab.

Durch die gleichmäßig auf der Membran verteilte Antriebskraft repräsentiert ein Bändchenlautsprecher die nahezu *ideale Linienquelle*. Erst bei sehr hohen Frequenzen kommt es zu einer Schallbündelung in Abhängigkeit von der Breite des Bändchens.

Grafik Bändchen-Membran

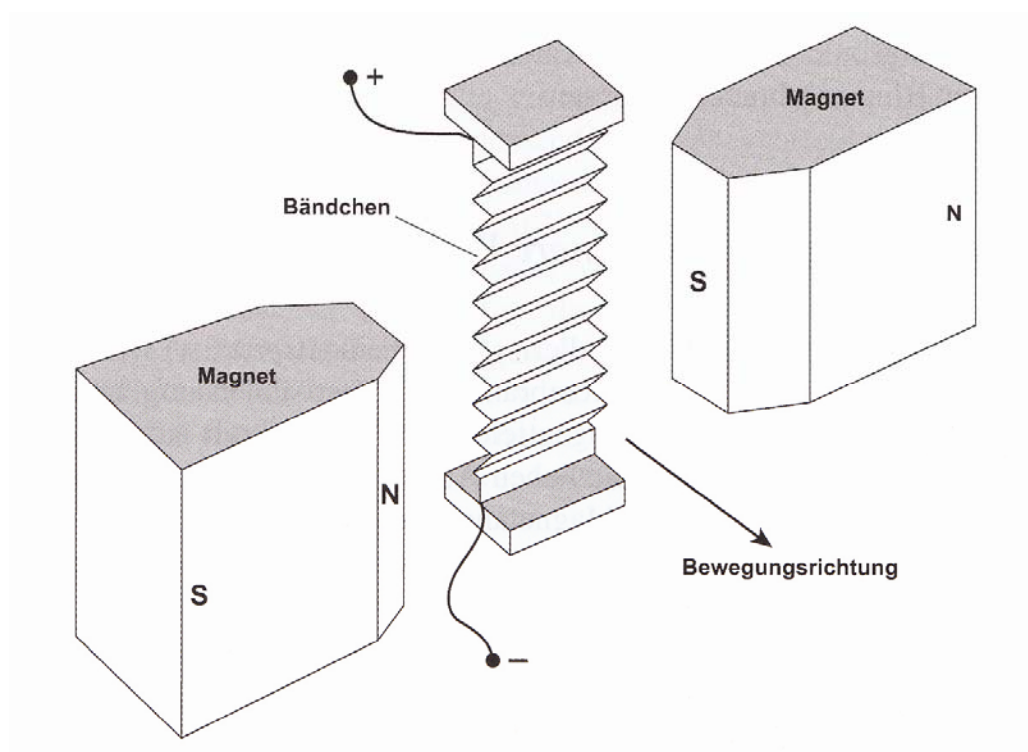


Abbildung 12: Prinzip eines elektromagnetisch planar aufgebauten Bändchenlautsprechers (Weinzierl 2008, S.426)

Der **Air Motion Transformer** auch **Accelerated Ribbon** Technologie genannt ist als eine kompakte Weiterentwicklung des herkömmlichen Bändchenlautsprechers zu sehen.

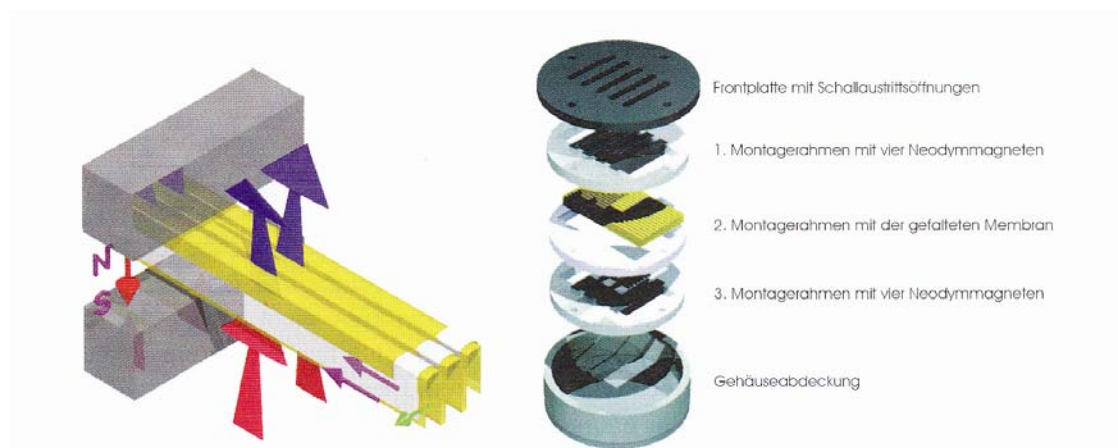


Abbildung 13: Grafik eines *Air Motion Transformers*, die Lamellen der Membran ziehen sich abhängig vom Signalstrom zusammen oder bewegen sich auseinander. (vgl. Weinzierl 2008, S.427)

Der Antrieb des *Air Motion Transformers* funktioniert nach demselben Prinzip wie ein Bändchenlautsprecher. Der einzige Unterschied besteht in der Form der Bändchenmembran, diese wird gefaltet wodurch gegenüberliegende Leiterbahnen vom Strom in entgegengesetzter Richtung durchflossen werden, so dass sich gegenüberliegende Falten je nach Signalfuss abstoßen oder anziehen. Dadurch presst die gefaltete Bändchenmembran entweder die Luft aus den Zwischenräumen hinaus oder saugt sie an. Durch diese spezielle Methode wird der Wirkungsgrad der Membran erheblich verbessert. Durch das Einwirken einer großen Membranfläche auf eine, im Verhältnis kleine akustische Strahlerfläche, wird der Wirkungsgrad und die Abstrahlcharakteristik positiv beeinflusst. Es kommt dadurch in weiterer Folge erst bei höheren Frequenzen zu einer Richtwirkung. (vgl. Weinzierl 2008, S427. ff)

2.1.3 Elektrostatische Wandler

Die dünne Membranfläche befindet sich inmitten zweier oder gegenüber einer einzelnen Elektrode. Durch die Wechselwirkung der elektrischen Ladungen wird das elektrische Signal in ein akustisches gewandelt. Vom Prinzip her ähnelt der Lautsprecher einem Kondensator.

„Der Abstand der Elektroden, der zur Vermeidung eines Aufschlagens der Membran und... wegen der quadratischen Abhängigkeit der Antriebskraft vom Abstand der Elektroden relativ groß gewählt werden muss, fordert eine große Signalspannung bis zu einigen 100 V. Nur so ist eine ausreichende Kraftwirkung zu erzeugen.“ (Dickreiter 1997a S.208)

Demnach kommt ein elektrostatischer Wandler dem „idealen“ Wandler zumindest betreffend der Theorie sehr nahe. Konstruktionsbedingt verfügen sie durch die dünne und leichte Membran über sehr gutes Ein- und Ausschwingverhalten, also gute Impulstreue, und sind zum anderen verzerrungsarm bei der Übertragung.

Funktionsprinzip elektrostatischer Lautsprecher

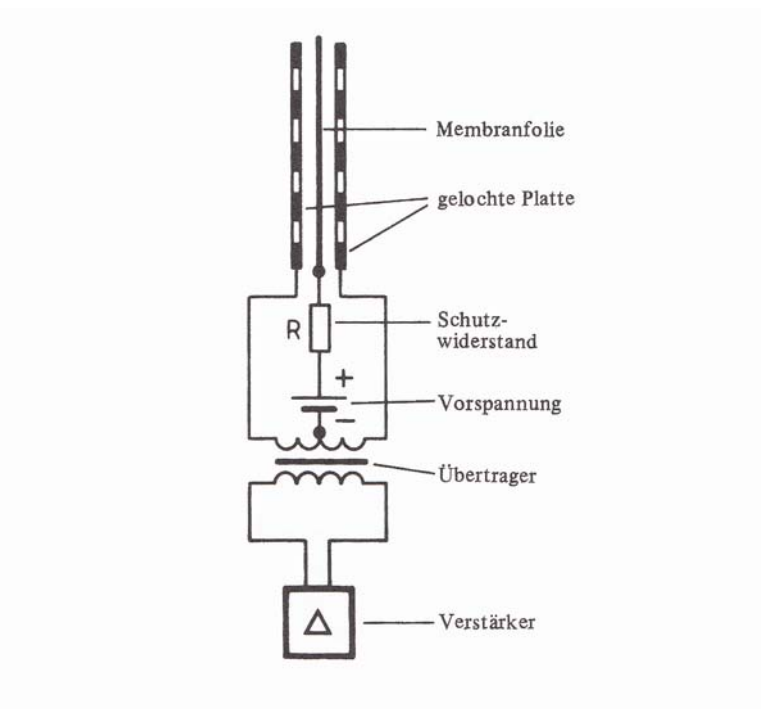


Abbildung 14: Skizze eines elektrostatischen Wandlers (Dickreiter 1997a, S.208)

Durch die platzsparende Konstruktion (flach und leicht) und die hohe Richtwirkung eignen sich elektrostatische Lautsprecherkonzepte zumindest vom Papier her für die Verwendung in kompakten Line Array Systemen. Lediglich die sehr hohe Vorspannung, die für einen möglichst verzerrungsarmen Betrieb erforderlich ist, ist als Nachteil zu sehen, da sie mehrere kV betragen kann und somit eine aufwendige Betriebsschaltung erforderlich macht. In der Praxis konnte sich das Wandlerprinzip aber für den Tieftonbereich nicht durchsetzen, da aufgrund des Zusammenhangs von Wellenlänge und Membranfläche übergroße Membranflächen und noch größere Vor- und Signalspannungen notwendig werden, um einen leistungsstarken Tieftonlautsprecher herzustellen.

Jedoch werden diese Wandler sehr wohl im Hochtonbereich eingesetzt, da für diesen keine übergroßen Membranflächen benötigt werden und der elektrostatische Wandler seine Vorteile, wie Impulstreue und Richtwirkung bei geringer Verzerrung einsetzen kann. Unter der Voraussetzung, dass der Abstand der Elektroden(platten) auch groß genug gewählt wird.

In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass der Wirkungsgrad des Wandlers mit steigendem Abstand der Elektroden(platten) abnimmt. Womit eine möglichst lineare Übertragung bei diesem Prinzip immer zulasten des Wirkungsgrades geht. Wenn auch der mechanisch akustische Wirkungsgrad der Membran sehr gut ist, wird dieser durch die schwierige Leistungsanpassung an den Leistungsverstärkern wieder relativiert. (vgl. Weinzierl 2008, S.428)

„Elektrostatische Wandler sind als Flächenstrahler aufgebaut und werden bei geringen Abmessungen als Hochtöner oder in sehr großen Konstellationen mit Membranflächen von 1-2 m² auch als Vollbereichslautsprecher eingesetzt. Die große strahlende Fläche bewirkt ein weit ausgedehntes Nahfeld und eine stark ausgeprägte Richtwirkung, die man sich insbesondere unter schwierigen raumakustischen Verhältnissen zunutze machen kann. Ist die starke Richtwirkung nicht gewünscht, so besteht auch die Möglichkeit, anstelle einer großen Strahlerfläche mehrere kleine zusammenzusetzen, wobei im Hochtonbereich nur ein Element arbeitet und zu den tiefen Frequenzen hin immer mehr Elemente aktiv werden.“ (Weinzierl 2008, S. 428)

Diese grundlegenden Eigenschaften machen elektrostatische Wandler durchaus attraktiv für die Verwendung in modernen Line Array Systemen. Teilweise werden sie auch von bestimmten Herstellern zumindest für den Einsatz als Mittel- oder Hochtontreiber ihrer Systeme verwendet.

Eher exotische Schallwandler wie der piezoelektrische Wandler, Ionen- oder Plasma Wandler und der Manger- Wandler finden im PA-Lautsprecherbereich zumindest zurzeit, meist aus Kosten-Nutzen Faktoren (frühe Entwicklungsstadien - teuer) selten bis gar keine Verwendung und deswegen werden sie an dieser Stelle aufgrund der Vollständigkeit nur erwähnt, jedoch wird nicht genauer darauf eingegangen.

2.2 Gehäuse Bauformen

Aufgrund der Vielzahl an Bauformen im Lautsprecherbau werden an dieser Stelle nur ausgewählte Konzepte, welche eine entsprechende Verbreitung im professionellen Lautsprecherbau besitzen, behandelt. Dazu zählen der Horn-, Bassreflex-, Bandpass- und der geschlossene Gehäusotyp.

Ein Überblick der grundsätzlich heute möglichen Gehäusotypen:

- *Geschlossene Gehäuse*
- *Bassreflex-Gehäuse*
- *Bandpass-Gehäuse*
- *Transmission-Line-Gehäuse*
- *Hornlautsprecher*
- *Offene Dipolstrahler*

(Weinzierl 2008, S.431)

Nicht jede Gehäuse-Bauform ist auch für jede Art von Lautsprecher gleich gut geeignet. Hornlautsprecher die den Schall auch im tiefen Frequenzbereich akkurat wiedergeben sollen, fallen bauartbedingt sehr groß aus und eignen sich somit nicht für hochwertige kompakte Systeme. Trotzdem werden Hörner beziehungsweise sogenannte Basshörner im Tieftonbereich eingesetzt, jedoch bilden sie wegen der erforderlichen Größen eher die Ausnahme.

Am häufigsten kommen Bassreflex oder auch Bandpassgehäuse, in denen ein elektrodynamischer Wandler arbeitet, in Lautsprechern die für die Tieftonwiedergabe bestimmt sind, zum Einsatz. (vgl. Weinzierl 2008, S.431)

„Im Grundsatz unterscheiden sich die verschiedenen Gehäusetypen dadurch, dass das geschlossene Gehäuse nur über die Membran des Lautsprechers Schall abstrahlt, das Bandgehäuse nur über die Öffnungen der Resonatoren und das Bassreflexgehäuse über beide Flächen.“
(Weinzierl 2008, S.431)

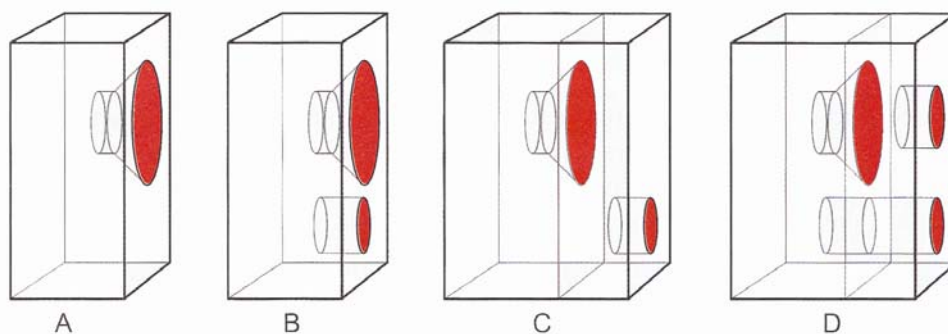


Abbildung 15: Verschiedene Tieftonlautsprecher Gehäusetypen. A: Geschlossenes Gehäuse; B: Bassreflex-Gehäuse; C: Bandpassgehäuse Typ 1; D: Bandpassgehäuse Typ 2 (Weinzierl 2008, S. 432)

2.2.1 Geschlossenes Gehäuse

Um hohe Schalldrücke zu erzeugen, bedarf es einer wesentlich höheren Membranauslenkung als dies bei anderen Gehäusetypen der Fall ist. Daraus folgt, dass geschlossene Gehäuse über einen geringeren Wirkungsgrad verfügen als zum Beispiel Bassreflex-Gehäuse. Darüber hinaus profitiert das geschlossen Gehäuse jedoch von geringeren Phasendrehungen und einem besseren Impulsverhalten. Aufgrund des Masse–Feder Prinzips wirkt das Gehäusevolumen hinter dem Wandler wie eine Feder und verhindert durch die Federsteifigkeit der Luft ein übermäßiges Auslenken der Membran.

Geschlossene Gehäuse werden hauptsächlich im Consumer Hi-Fi Bereich, für Studiomonitore, aber auch für diskrete Elemente eines **Line Array Systems** verwendet. (vgl. Weinzierl 2008, S.431f)

2.2.2 Bassreflex - Gehäuse

Bassreflex-Gehäuse besitzen im Unterschied zu geschlossenen Gehäusen eine zylinderförmige Öffnung, auch Resonator genannt. Erst der Resonator macht es möglich, dass Luft aus dem Gehäuse entweichen beziehungsweise hineinströmen kann. Wirkungsgrad und Empfindlichkeit des Lautsprechers steigen gegenüber dem geschlossenen Gehäuse an und man ist in der Lage kleinere Gehäuse zu verwenden.

Es gilt abermals das Masse-Feder Prinzip, das Luftvolumen im Gehäuse wirkt als Feder während die Luft im Tunnel als Masse agiert. Die Resonanzfrequenz des Lautsprechers wird über die Dimensionierung von Resonator und Gehäuse bestimmt. Im Bereich der Resonanzfrequenz wird das Schallsignal verstärkt und gleichzeitig der Treiber entlastet.

Schallsignale, welche außerhalb der Resonanzfrequenz des Systems liegen werden jedoch nicht verstärkt, womit sich auch der vermeintliche Pegelgewinn wieder relativieren kann. Zudem können störende Luft-Strömungsgeräusche entstehen, welche in stärkerem Ausmaß auch vermehrt zu Verzerrungen führen können. Die Membran eines Bassreflex-Gehäuses kann bei starken Rückkopplungen zudem unkontrollierte Auslenkungen erzeugen und dadurch zerstört werden. (vgl. Weinzierl 2008, S.432)

Bassreflexgehäuse finden auch in modernen Line Array-Systemen für den Tieftonbereich Verwendung. Viele Hersteller von professionellen Lautsprecher Systemen verwenden diesen Gehäusetyt für ihre Bass-lautsprecher beziehungsweise Subwoofer.

2.2.3 Bandpass - Gehäuse

In Bandpassgehäusen wird der Treiber – nicht sichtbar und geschützt in das Innere des Gehäuses verbaut (siehe auch Abbildung 15). Ein vermeintlicher Vorteil dieses Bandpassgehäuses liegt in der geringen Belastung des Treibers, da dieser den Schall nicht mehr direkt abstrahlt, sondern ausschließlich die Resonatoren anregt beziehungsweise die Bandpasskammer, wodurch der Treiber geschont wird. Durch die Filterung von Obertonverzerrungen kann jedoch der Treiber lauter gespielt (stärker belastet) werden und dadurch unbemerkt zu Schaden kommen. Die konstruktionsbedingte Hochpassfilterung begünstigt das Auftreten von Phasenverschiebungen wodurch es bei der Übertragung von tiefen Frequenzen zu Laufzeitverzögerungen – *Latenzen* kommen kann. Diese Latenzen werden durch Größe und Abstimmung des Gehäuses bestimmt. Verzögerungen dieser Art können sich vor allem im Rahmen von Live-Veranstaltungen bemerkbar machen. Ist die Laufzeit des Signals in zu großem Ausmaß verzögert, kann der Zuseher eine deutliche und störende Asynchronität zwischen Bühnengeschehen und abgestrahltem Schallereignis bemerken. (vgl. Weinzierl 2008, S.432)

Verwendet wird die Bandpass-Konstruktion zum Beispiel von der Firma HK Audio für das *Mid-High Unit* des *Cohedra Compact* – Line Array-Systems. (vgl. Cohedra Operator Compact & Gross Deutsch Nov 2004.ppt)

2.2.4 Hornlautsprecher

Das akustische Grundprinzip eines Horns war schon den Völkern der Antike bekannt, und noch heute verwenden viele Instrumente wie auch Lautsprecher einen Trichter für die Schallabstrahlung. Hornlautsprecher nutzen die meist exponentielle Form des Horntrichters um den **Strahlungswiderstand** auf die Kolbenmembran zu erhöhen und dadurch die Leistung zu vergrößern.

*„Der **Akustische Strahlungswiderstand** beschreibt das Verhältnis von Kraft (oder Druck) und Schnelle von Teilchen auf einer gedachten oder tatsächlich vorhandenen Oberfläche. Der Begriff ist wesentlich für die Ermittlung des Energieflusses und damit auch des Wirkungsgrades bei akustischen Strahlungsvorgängen.“*

(http://de.wikipedia.org/wiki/Akustischer_Strahlungswiderstand)

Das Hornprinzip bietet eine technisch relativ einfach zu realisierende Möglichkeit hohe Schalldrücke über geringe Leistungen zu erzielen. Es ist jedoch schwierig, ansprechende Hornlautsprecher für die Tieftonwiedergabe zu realisieren. Schwierig aufgrund der sehr großen Abmessungen die ein akustisch ansprechendes Horn konstruktionsbedingt aufweisen müsste. In Kinosälen werden trotzdem zum Teil „Menschengroße“ Basshörner für die Tieftonwiedergabe verwendet (Phillips).

Hornlautsprecher finden heutzutage im kompakten Segment professioneller Beschallungstechnik zumeist als Mittel- oder häufiger als Hochtontreiber in Mehrwegsystemen Verwendung. Es sollte in diesem Zusammenhang auch darauf hingewiesen werden, dass eine kompakte Bauform meist mit Kompromissen (Klangverfärbungen – man spricht auch vom typischen „Hornklang“) in der Schallübertragungsqualität einhergeht.

Um den Strahlungswiderstand von Hörnern noch weiter zu steigern setzt man Kompressionstreiber ein. Hierfür muss der Lautsprecher in eine Druckkammer eingebaut werden. *„Die Membran arbeitet dann nicht mehr direkt auf das Horn, sondern zunächst auf das Volumen der Druckkammer, dessen Austrittsöffnung den Schall in das Horn abstrahlt“.* (Weinzierl 2008, S. 439)

In Abhängigkeit von der Resonanzfrequenz und Größe der Druckkammern produzieren Kompressionstreiber bei höheren Frequenzen rasch stehende Wellen, die unerwünschte Resonanzen erzeugen. *„Eine stehende Welle bildet sich immer dann aus, wenn eine halbe Wellenlänge oder ein ganzzahliges Vielfaches davon zwischen zwei schallharte Wände passt.“* (vgl. Weinzierl 2008, S. 439)

Deswegen werden die Druckkammern in der Regel auch sehr klein gehalten, um auch bei höheren Frequenzen keine störenden Resonanzen oder nichtlinearen Verzerrungen auszubilden. Es kann auch zu hörbaren Luft-Strömungsgeräuschen kommen, welche durch die Kompression entstehen.

Die Kombination eines konventionellen Horntreibers mit einer Druckkammer ist als teilweise problematisch anzusehen, da aufgrund von nichtlinearen Verzerrungen nahezu kein zufriedenstellendes akustisches Ergebnis erreicht werden kann. Aufgrund ihres hohen Wirkungsgrads werden sie aber trotzdem häufig vor allem für „Freiluft“-Beschallungssituationen eingesetzt.

Wegen der starken Nichtlinearitäten herkömmlicher Hornsysteme wurden für moderne Line Array-Systeme speziell geformte Hörner, auch *Waveguides* genannt, entwickelt. (Siehe Kapitel Line Arrays-Simulation).

Als Einzellautsprecher findet man Hornlautsprecher noch in alten Stadien oder öffentlichen Plätzen. Man verwendet sie hier in erster Linie für die Alarm oder Signaltonwiedergabe. Breitbandige Einzelsysteme werden heute anders als früher keineswegs mehr für anspruchsvolle Beschallungssituationen wie zum Beispiel Musik genutzt.

3 Line Arrays

3.1 Die Anfänge

Das Streben nach qualitativ besseren-, gezielter einsetzbaren, anpassungsfähigen Beschallungssystemen, die einen gleichmäßig hohen, wie auch gut verteilten, Schalldruckpegel für individuelle akustische (Raum)Verhältnisse bereitstellen können, führte zu einer großen technischen Weiterentwicklung im PA-Lautsprecherbereich. Diese Entwicklung zeichnete sich am Deutlichsten in den letzten fünf Jahrzehnten ab, von der *Wall of Sound* (eingesetzt von der Band *Grateful Dead*) als eine der ersten Beschallungslösungen die *Arrays* und auch noch *Cluster* Kombination von Lautsprechern einsetzte, bis hin zu modernen, kompakten Line Array-Systemen.

Der Begriff Line Array stammt von der Anordnungsform der Lautsprecher in einem eng. *Array* – also in einer zu deutsch „Reihe“. Bei einem Line Array werden die Lautsprecher im Allgemeinen untereinander beziehungsweise vertikal in Form einer eng. *Line* – zu Deutsch „Linie“ angeordnet.

Die ersten im deutschsprachigen Raum *Tonsäulen* oder später auch *Schallzeilen* und *Kirchenzeilen* genannten Lautsprecher kamen in den 1950igern zum Vorschein. Die physikalischen Grundlagen der Line Array Technologie wurden aber schon in den 1930iger Jahren von Wolfe & Malter in ihrer Publikation „*Directional Radiation of Sound JASA Vol.2 No.2*“ beschrieben. Der Physiker Dr. Harry F. Olson veröffentlichte schließlich im Jahr 1957 sein Werk „*Acoustical Engineering*“ in dem das Grundprinzip der Line Array Technologie definiert wird.

In den 1960igern verwendete man diese „Ur-Arrays“ hauptsächlich zur Verringerung der Nachhallzeit und der Verbesserung der schlechten Sprachverständlichkeit in Räumen mit großen Nachhallzeiten.

Ihren so genannten „Durchbruch“ in der Eventtechnik erlebten Line Arrays mit dem Aufkommen von großen Konzerten und Festivals in den späten 1960ern bei denen es mit klassischen Lautsprecher Systemen, (zumeist in *Cluster* Form) nicht mehr möglich war, den gesamten Publikumsbereich gleichmäßig, das heißt mit demselben Schalldruckpegel, zu beschallen.

Heutzutage ist der Begriff Line Array aus der Beschallungstechnik nicht mehr wegzudenken, Line Array Systeme haben sich seit ihren Anfängen stetig weiterentwickelt und werden mittlerweile nicht nur ausschließlich bei Großveranstaltungen eingesetzt, sondern finden in mannigfaltigen Variationen portabel- oder zur Festinstallation zum Beispiel in Theatern oder diversen Auditorien, Seminarräumen usw. ihre Verwendung.

Um die Wirkungsweise von Line Array Systemen besser zu verstehen und auch die Schwierigkeiten und Probleme der Line Array-Technik aufzuzeigen, bedarf es einer eingehenden Analyse der ihr zugrundeliegenden physikalischen Theorien.

3.2 Grundlagen

Line Array-Systeme bestehen meist aus mehreren (Einzel-)Lautsprechern gleichen oder auch unterschiedlichen Typs. Je nach Anwendungsfall können unterschiedliche Abstrahlcharakteristika erzeugt werden.

Das Abstrahlverhalten eines Lautsprechers zählt neben dem Amplitudenfrequenzgang, dem Phasenfrequenzgang und dem Wirkungsgrad zu den wichtigsten Kenngrößen eines Lautsprechers. In Abhängigkeit von Konstruktion und Bauform ist es möglich, nahezu jeden beliebigen Abstrahlwinkel horizontal oder vertikal von 10° bis 360° zu realisieren.

Warum benötigt man also mehrere Lautsprecher in Array Form, wenn sich idealerweise auch ein einzelner Lautsprecher *x-beliebig* anpassen lässt?

Hier bedarf es einer genaueren Untersuchung, da sich gleich mehrere akustische Probleme ergeben. Versucht man zum Beispiel, einen vollbereichstauglichen- elektrodynamischen Einzellautsprecher mit einem breitbandigem Signal anzusteuern, wird man sehr schnell die Schwachstellen dieses Ein-Treiber Prinzips feststellen können. Während eine große Membran-Fläche nötig ist, um entsprechend tiefe Frequenzen abzustrahlen, verhält es sich mit hohen Frequenzen genau gegenteilig. So kommt es bei breitbandiger Übertragung zu Partialschwingungen und Überlagerungen, die allesamt das Klangbild negativ beeinflussen beziehungsweise Verzerrungen verursachen.

Weitere Gründe für den Einsatz von Line Array Systemen lassen sich anhand des Verhältnisses von Schallleistung zum Abstrahlwinkel des Lautsprechers erklären. Die mögliche Schallleistung eines Lautsprechers, verteilt sich auf den gesamten Abstrahlwinkel von diesem, so dass sich der Schalldruck an einem definierten Punkt im Abstrahlbereich des Lautsprechers mit steigendem Abstrahlwinkel verringert.

Daraus folgt, dass bei einzelnen Lautsprechern mit großem Abstrahlwinkel bereits in wenigen Metern Entfernung ein deutlich bemerkbarer Abfall des Schalldrucks festzustellen ist. (vgl. Weinzierl 2008, S.441)

Um auch in größeren Entfernungen noch genügend Schalldruck über den gesamten Frequenzbereich zu bieten, wird unter Einbeziehung der Abstrahlcharakteristik ein System aus mehreren Lautsprechern – ein Array - kombiniert, um so die Schallleistung respektive den Schalldruck zu steigern.

Werden höhere Pegel (auf größere Distanzen) gefordert, so wird auf eng abstrahlende Systeme zurück gegriffen, die zwar über geringere Abstrahlwinkel verfügen, jedoch in diesem Bereich höhere Pegel (bei gleicher Treiberleistung) bereitstellen können. Schließlich können aus diesen Einzelsystemen oder Grundmodulen beliebige, den jeweiligen Anforderungen entsprechende, Array-Systeme gebildet werden.

Moderne Line Array-Systeme sind fast ausschließlich als Mehrwegsysteme konzipiert, da man mit breitbandigen Einzellautsprechern, den hohen Anforderungen, die an die Signalqualität im professionellen Bereich gestellt werden, nicht mehr gerecht werden kann. Bei einem Mehrwegsystem verbaut man unterschiedliche Lautsprecher(Treiber) in ein gemeinsames Gehäuse. Jeder dieser Lautsprecher ist dabei auf einen fest definierten Frequenzbereich optimiert.

In so einem beliebigen System würde beispielweise ein Tieftontreiber von 60-500 Hz ein Mitteltontreiber von 500-4000 Hz und ein Hochtontreiber von 4000–16000 Hz arbeiten. Jene Frequenzen, die den Übergang von einem Lautsprecher zu einem anderen markieren werden Trennfrequenzen oder auch *Crossover-Frequencies* genannt. Über eine Frequenzweiche, welche das Audiosignal in die jeweiligen Bereiche zerlegt, werden die richtigen Lautsprecher angesteuert.

Ein Nachteil von Mehrwegsystemen ist, dass im Bereich der *Crossover Frequencies* häufig unerwünschte Phasendifferenzen entstehen. Phasendifferenzen werden auch Phasendrehungen oder Phasenverschiebungen genannt und bezeichnen die Laufzeitunterschiede, die gleiche Frequenzen innerhalb desselben Audiosignals, an einer fest definierten Abhörposition, zueinander haben. Daraus folgt, dass bei der Wiedergabe eines Stereosignals, die räumliche Abbildung der Lautsprecher nicht mehr mit der Abbildung, der Signalquelle übereinstimmt und ortsabhängige Interferenzen auftreten.

3.3 Physikalische Fundamente

Der Phasenfrequenzgang eines Lautsprechers oder Systems steht in direktem Zusammenhang mit seinem Amplitudenfrequenzgang. Interferenzen treten auf, wenn sich identische Signale abhängig von ihrer Phasenlage zueinander entweder abschwächen oder verstärken.

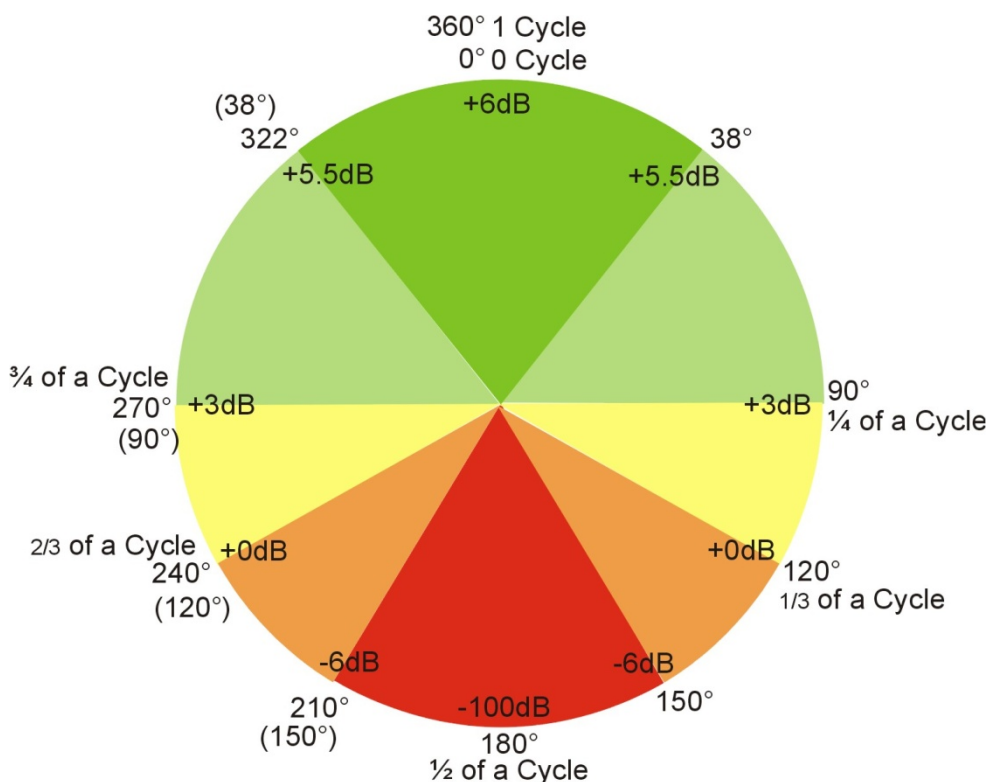


Abbildung 16: : Phasenbeziehung zweier identischer Signale

Abbildung 16 zeigt die Phasenbeziehung von zwei identischen Signalen. Ist etwa ein Signal gegenüber dem anderen um mehr als 120° phasengedreht, so kommt es zu einer Abschwächung des Signalpegels, bei 180° und sämtlichen ungeradzahligen Vielfachen zur Auslöschung. Bei 0° , 360° und allen geradzahligen Vielfachen kommt es zur Verdoppelung (+6 dB) des Signalpegels.

In professionellen Mehrwegsystemen wird der Phasenfrequenzgang heutzutage digital korrigiert, um einen möglichst linearen Amplitudenfrequenzgang zu erzielen. Interferenzen beeinflussen grundsätzlich auf negative Weise den Frequenzgang (auch Amplitudenfrequenzgang genannt) eines Beschallungssystems oder Lautsprechers.

Der Frequenzgang eines Schallstrahlers gibt Auskunft über sein Wiedergabeverhalten. Grundsätzlich sollte ein idealer Schallstrahler oder ein ideales Beschallungssystem in einem Bereich von 20-20000 Hz alle Frequenzen, welche mit demselben Eingangspegel aufgezeichnet wurden, auch mit exakt demselben Schalldruckpegel wiedergeben. Ist das der Fall, so spricht man von einem *linearen Lautsprecher* beziehungsweise einem linearen Beschallungssystem. In der Praxis neigen jedoch, wie bereits an anderer Stelle erwähnt, alle Lautsprecher (-Systeme) dazu Schallsignale zu verzerren. Der Frequenzgang eines Mehrwegsystems kann sich aber, bei dementsprechender Abstimmung-Korrektur, sehr linear verhalten.

Unterschiede in der Phasenlage treten in viel stärkerem Maße auf wenn man ganze Mehrwegsysteme untereinander kombiniert ohne ihren Phasengang aufeinander abzustimmen. Neuartige Line Array Systeme sind aber in der Lage diese meist aufstellungsbedingten Phasendifferenzen zwischen den diskreten Einzelsystemen durch elektronische Korrekturen auszugleichen und sich an den gewünschten Anwendungsfall anzupassen.

3.3.1 Abstrahlwinkel

Im Bereich der Mittelachse eines Lautsprechertreibers herrscht der größte Schalldruck, davon ausgehend fällt der Schalldruck zu den Seiten hin kontinuierlich ab. Der Abstrahlwinkel eines Lautsprechers wird definiert als der Winkel zwischen der Mittelachse (0°) des Lautsprechers und dem Bereich zu den Seiten hin an dem der Schalldruck der Frequenz um -6 dB abgenommen hat.

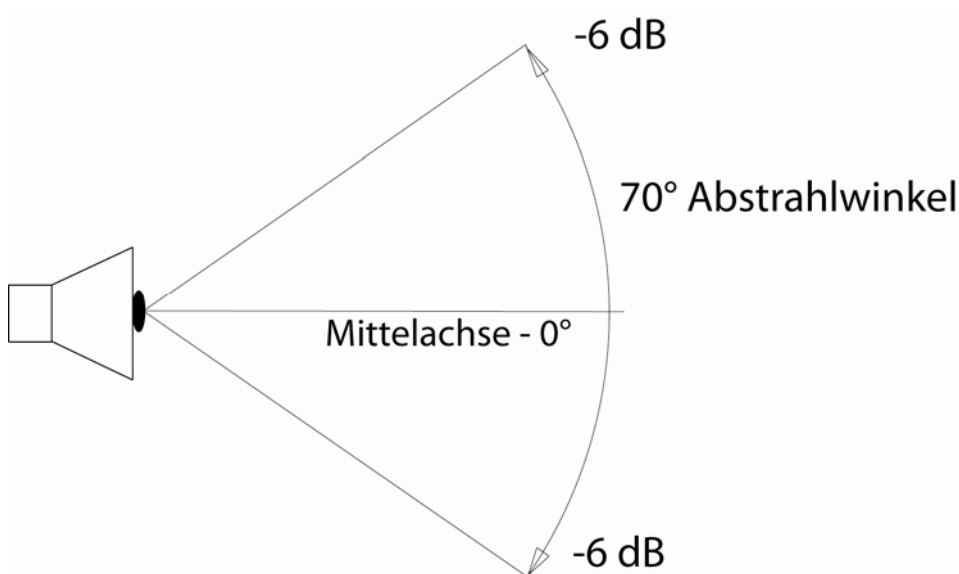


Abbildung 17: Skizze – Definition Abstrahlwinkel

Um diesem Schalldruckverlust zu den Seiten entgegenzuwirken, versucht man bei einem Line Array die einzelnen Elemente so anzuordnen, dass diese wie ein (einzelner) idealer Linienstrahler eine kohärente Wellenfront abstrahlen. Abstrahlwinkel von Lautsprechern werden sowohl für die horizontale- als auch für die vertikale Abstrahlrichtung angegeben, zum Beispiel $90^\circ \times 60^\circ$. (vgl. Weinzierl 2008, S.442)

Bei Line Array Systemen versucht man das Abstrahlverhalten der einzelnen Schallwandler so weit zu optimieren, dass über einen möglichst großen Bereich hinweg, eine kohärente Zylinderwelle, die im Idealfall einen vertikalen Abstrahlwinkel von 0° besitzt, über den gesamten Frequenzbereich des Systems abstrahlt. (Siehe auch: Vergleich Kugelwelle – Zylinderwelle)

Am Beispiel von zwei Hornlautsprechern, die jeweils einen Abstrahlwinkel von 40° besitzen lässt sich zeigen, wie aus zwei mit 40° abstrahlenden Elementen ein Array wird, das einen Abstrahlwinkel von 80° aufweist.

Die zwei Lautsprecher werden dabei so angeordnet, dass sich ihre Teilflächen genau in dem Bereich, in dem der Pegel des Einzelsystems um 6 dB relativ zu seiner Mittelachse abgefallen ist, überschneiden. Bei durchdachter und genauer Konstruktion, lassen sich die normalerweise stark auftretenden Interferenzen (Kammfiltereffekte), bei der Überlappung der Signale, auf ein vernachlässigbares Minimum reduzieren. (vgl. Weinzierl 2008, S.442)

Die Grafiken zeigen die Unterschiede in der Abstrahlcharakteristik eines einzelnen Hornlautsprechers mit 40° horizontalem Abstrahlwinkel und einem Array, bestehend aus zwei dieser 40° Lautsprecher mit 80° Abstrahlwinkel.

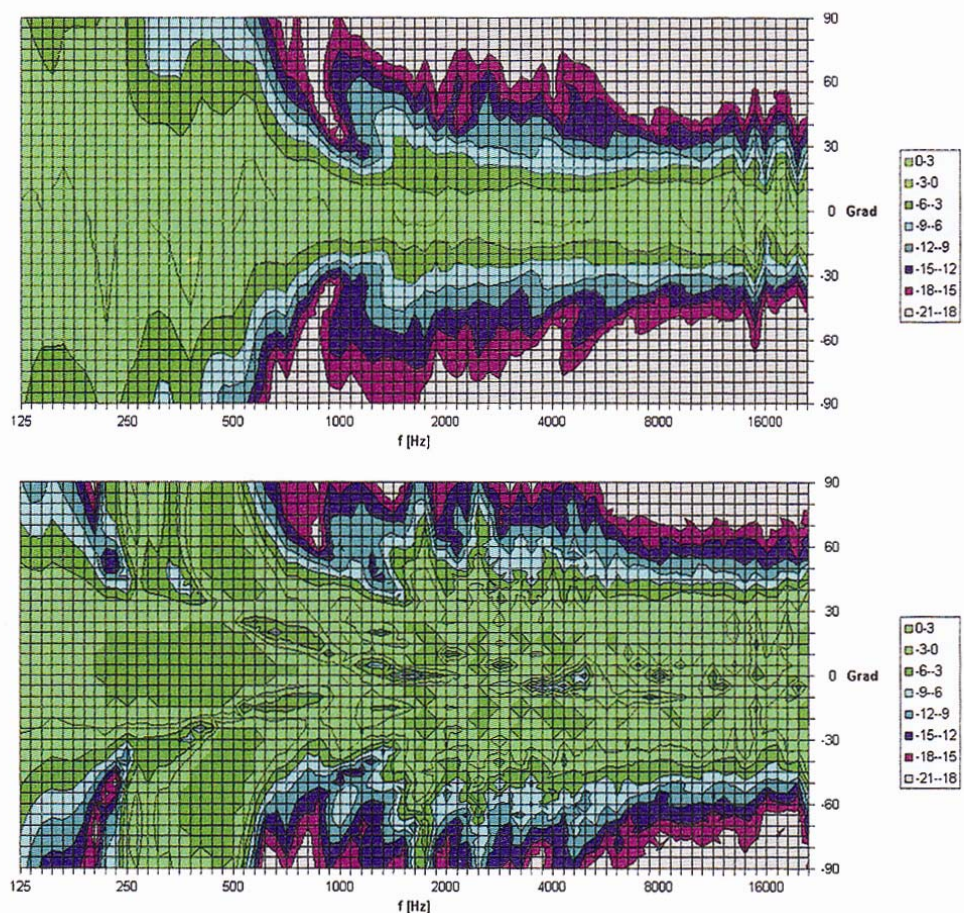


Abbildung 18: Isobaren eines 40° und zweier 40° Hornsprecher (Weinzierl 2008, S.443)

Die Isobaren-Kurven zeigen die Schalldruckverteilung der Lautsprecher an. Gleiche Farben bedeuten gleiche Schalldruckpegel. Die abgebildeten Grafiken zeigen eindrucksvoll wie sich die zwei 40° Hornstreiber bei richtiger Anordnung nahezu wie ein einzelner 80° Streiber verhalten.

Messtechnisch werden Isobaren „...als Pegelabfall in Abhängigkeit von der Frequenz gegenüber dem Wert auf der Hauptachse (typischerweise die 0° Achse) ermittelt.“ (vgl. Weinzierl 2008, S. 443)

3.3.2 Idealisierung der Schallquellen

Die Grundlegenden physikalischen Fundamente, die man sich bei der Konstruktion von Line Array Systemen zu Nutze macht, sind größtenteils idealisierte Annahmen über das Verhalten von Schallquellen.

Diese idealisierten Annahmen dienen dem Zweck der Vereinfachung. So strahlt zum Beispiel der omni - direktionale Schallstrahler (auch Punktquelle genannt) der Theorie nach den Schall in alle Richtungen des Raumes gleichmäßig stark ab. Während jedoch ein idealisierter Linienstrahler oder eine Linienquelle eine, abhängig von der Länge des Strahlers, endliche-gerichtete Zylinderwelle abstrahlt. Eine weitere rein theoretische Idealisierung wäre ein Schallstrahler mit unendlich ausgedehnter Membran, welche homogen schwingt und somit eine unendliche ebene Welle abstrahlt.

Die Line Array Technologie nützt die akustischen Vorteile des Linienstrahler-Prinzips, da es dadurch möglich wird eine gerichtete Zylinderwelle abzustrahlen. Im Vergleich zu einer Punktschallquelle, die sphärische-Wellen (Kugelwellen) erzeugt, bei denen sich pro Abstandsverdoppelung der Schalldruck halbiert (also um -6 dB verringert), nimmt der Schalldruck einer kohärenten Zylinderwelle nur um -3 dB pro Abstandsverdoppelung ab. Der Idealfall wäre die unendliche, ebene Welle, bei der der Schalldruck von der Entfernung unabhängig ist und konstant bleibt.

Der Schalldruck einer Punktquelle halbiert sich wegen der kugelförmigen Ausbreitung des Schalls, dieses Gesetz wird als „*Inverse Square Law*“ bezeichnet. Breitet sich der Schall in sphärischen Wellen aus, vervierfacht sich die Oberfläche einer Kugelsphäre mit der Verdoppelung des Abstandes, das eine Verringerung der Schallleistung um ein Viertel und eine Abnahme des Schalldruckes um die Hälfte bewirkt. (-6 dB).

Abstrahlcharakteristik einer diskreten „Punktschallquelle“

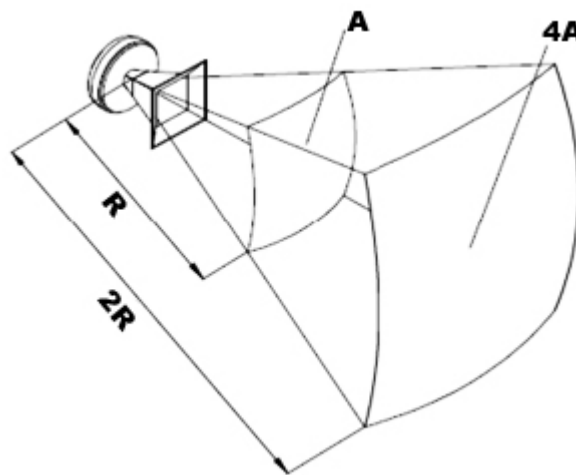


Abbildung 19: Schallausbreitung einer Kugelwelle

Abstrahlcharakteristik eines Linienstrahlers

Linienstrahler

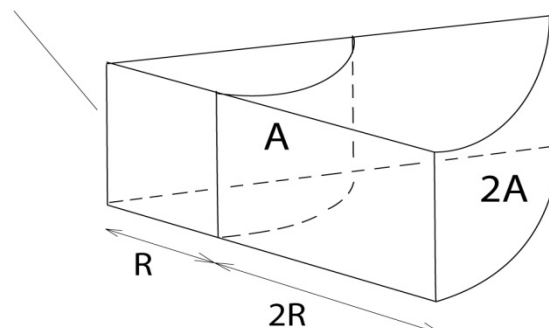


Abbildung 20: Schallausbreitung einer Zylinderwelle

Dadurch, dass sich die Schallausbreitung der Zylinderwelle auf die horizontale Ebene beschränkt, vergrößert sich die Oberfläche der Welle pro Abstandsverdoppelung nur mehr um den Faktor Zwei, wodurch der Schalldruckverlust eines Linienstrahlers auf die Hälfte = -3 dB sinkt.

3.3.3 Nahfeld - Fernfeld

Die von einem Line Array erzeugte Zylinderwelle besitzt eine bestimmte (endliche) Ausdehnung, welche wiederum von der Frequenz f und der Länge l des Arrays abhängig ist. Diese in ihrer Ausdehnung endliche Zylinderwelle besitzt eine Grenze an der sie wieder zu einer oder mehreren sphärischen Welle(n) wird.

Als Nah- und Fernfeld bezeichnet man die Ausbreitungsbereiche und ihre Grenze definiert den Übergang der Schallausbreitung von der Zylinderwelle (Nahfeld) zur Kugelwelle (Fernfeld). Der Übergang von kohärenter Zylinderwelle in eine sphärische Welle erfolgt dabei kontinuierlich.

Die Ausdehnung des Nahfeldes lässt sich für eine fest definierte Frequenz abhängig von der vertikalen Länge des Linienstrahlers (oder Line Arrays) mit folgenden Formeln berechnen:

Formel nach Heil

$$r_n = \frac{3}{2} f \cdot l^2 \sqrt{1 - \frac{1}{(3 \cdot f \cdot l)^2}}$$

Und die Formel nach Ureda:

$$r_n = \frac{l^2 \cdot f}{2 \cdot 340 \text{ m/s}}$$

Die Frequenz f wird in [Hz], die Länge l in [m] und die Schallgeschwindigkeit c in [m/s] angegeben.

Das Ergebnis r gibt die Länge des Nahfeldes, also den Bereich in dem sich der Schall in Form einer annähernd kohärenten Zylinderwelle ausbreitet, für die vordefinierte Frequenz und die Länge des Linienstrahlers oder Line Arrays an. (vgl. Weinzierl 2008, S. 444)

Nah- und Fernfeld lassen sich aufgrund der Frequenzabhängigkeit der Richtwirkung nicht für den gesamten von einem Lautsprecher (System) abgedeckten Frequenzbereich angeben.

Würde man ausgehend von diskreten Punktschallquellen ein Line Array aufbauen, dürfte der Abstand, der die einzelnen Quellen voneinander trennt, nicht größer als die halbe Wellenlänge der abgestrahlten Frequenz ausfallen, da es sonst vermehrt zu Interferenzen in Form von Auslöschungen und Verstärkungen (Nebenmaxima) kommt. In der Praxis existieren jedoch keine idealen punktförmigen- oder linienförmigen Schallquellen, denn jeder Lautsprecher weist eine gewisse Richtcharakteristik auf. Diesen Umstand macht man sich bei der Koppelung von Arrays zu Nutze, in dem das Richtverhalten der Einzelkomponenten passend aufeinander abgestimmt wird, so dass diese eine möglichst kohärente Wellenfront mit geringen Interferenzen abstrahlen.

3.3.4 Schallbeugung

In Zusammenhang mit Abstrahlcharakteristik und Verzerrungsverhalten eines Lautsprechers oder Line Array-Systems spielt auch die Beugung des Schalls eine gewichtige Rolle. „Ein Objekt wird für eine Welle nur dann zu einem Hindernis, wenn sein Durchmesser in der Größenordnung der Wellenlänge liegt.“ (Raffaseder 2002, S.75)

Die Wellenlänge des Schalls ist bekanntermaßen frequenzabhängig, hohe Frequenzen besitzen geringe Wellenlängen und tiefe Frequenzen weisen große Wellenlängen auf. Während bei dem Aufeinandertreffen von kleineren Hindernissen mit großen Wellenlängen der Schall um das Objekt herum „gebeugt“ und dadurch nicht wesentlich verändert wird, wird bei einer Kollision von kleinen Wellenlängen mit einem im Verhältnis großen Hindernis der Schall reflektiert.

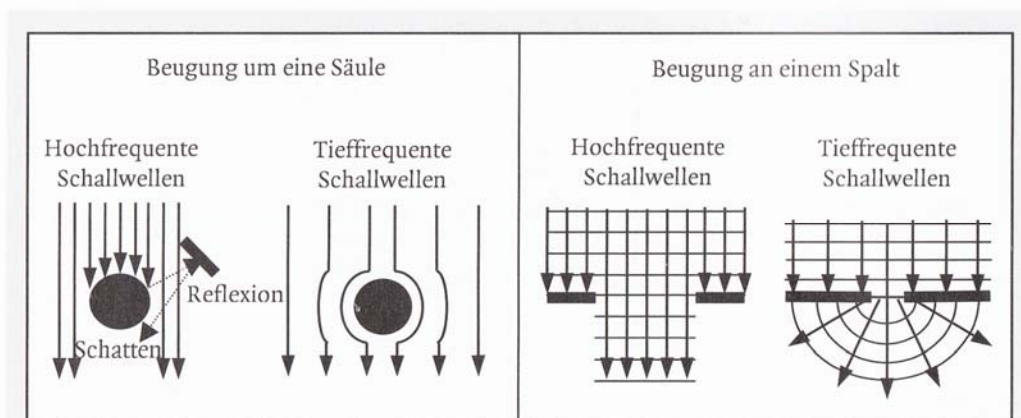


Abbildung 21: Schallbeugung Hindernis und Spalt (Raffaseder, S.76)

Trifft der Schall auf einen im Vergleich zu seiner Wellenlänge kleinen Spalt kommt es ebenfalls zu einer Beugung beziehungsweise Veränderung der Richtung (siehe Abbildung 21).

Diese und andere akustische Phänomene macht man sich bei der Konstruktion von *Directivity Horns*, *Waveguides* oder *Waveformer* für Line Array-Systeme zu Nutze.

3.4 Simulation

Nachfolgend soll anhand von Simulationen mit der Software **MAPP Online Pro** von **Meyer Sound** gezeigt werden, wie unterschiedliche Frequenzen beziehungsweise Wellenlängen eines Signals das Abstrahlverhalten eines einzelnen bereits physikalisch optimierten Lautsprechers, eines Lautsprechersystems oder Line Arrays beeinflussen.

Über MAPP Online Pro: „Das Programm verwendet ein patentiertes, internetfähiges Client-Server-System, über das Benutzer Lautsprechersystem, Raumeigenschaften und Umgebungsparameter in eine Java-basierte Thin-Client-Anwendung eingeben, die auf einem Laptop oder einem Computer unter Windows XP Pro oder Macintosh OS X läuft.“
(<http://www.meyersound.de/products/software/mapponline/pro/index.shtml>)

„Vorhersagen, die mit dem MAPP Online Pro erzeugt werden, basieren auf Messungen die mit Lautsprechermodellen durchgeführt wurden. Die Messungen wurden in Meyer Sound's schalltoter Kammer durchgeführt. Dazu wurde ein speziell angefertigter Arm genutzt, der den Lautsprecher um 360 Grad drehen kann. Bei jedem Grad der Drehung wurde eine Messung mit 1/48 Oktave Auflösung durchgeführt. Durch diese 360 Grad Messungen jedes Lautsprechers sind die Vorhersagen des MAPP Online Pro sowohl bei den Frequenzen als auch beim Zeitfaktor sehr akkurat. Obwohl auch andere Auflösungen für die Anzeigen gewählt werden können, sind die Auflösungen die den Berechnungen zugrundeliegen immer hochauflösend.“
(<http://www.meyersound.de/products/software/mapponline/pro/measurements.shtm>)

Die folgende Testreihe wurde mit dem Lautsprechermodell **M´elodie** von Meyer Sound durchgeführt. Das M´elodie Lautsprechermodul wird von Meyer Sound in die Kategorie der sehr kompakten Line Array Module eingeordnet und kann somit als gutes Beispiel für ein High End – System aus dem Kompaktbereich gesehen werden. Die einzelnen Vollbereichslautsprecher sind in erster Linie für den Einsatz als kompaktes Line Array konzipiert, können aber auch als Front- oder Sidefill verwendet werden.

3.4.1 Testreihe Meyer Sound M´elodie Einzellautsprecher

Sämtliche Simulationen beziehen sich auf eine Raumtemperatur von 20° C, einen Luftdruck von 1.013,25mb und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50%. Die relative Bandbreite des gemessenen Frequenzspektrums beträgt eine Oktave.

Die Abkürzungen LF, MF und HF stehen jeweils für *low*-, *mid*- und *high frequency*.

M´elodie Abstrahlcharakteristik vertikal-Simulation für 125Hz (LF)

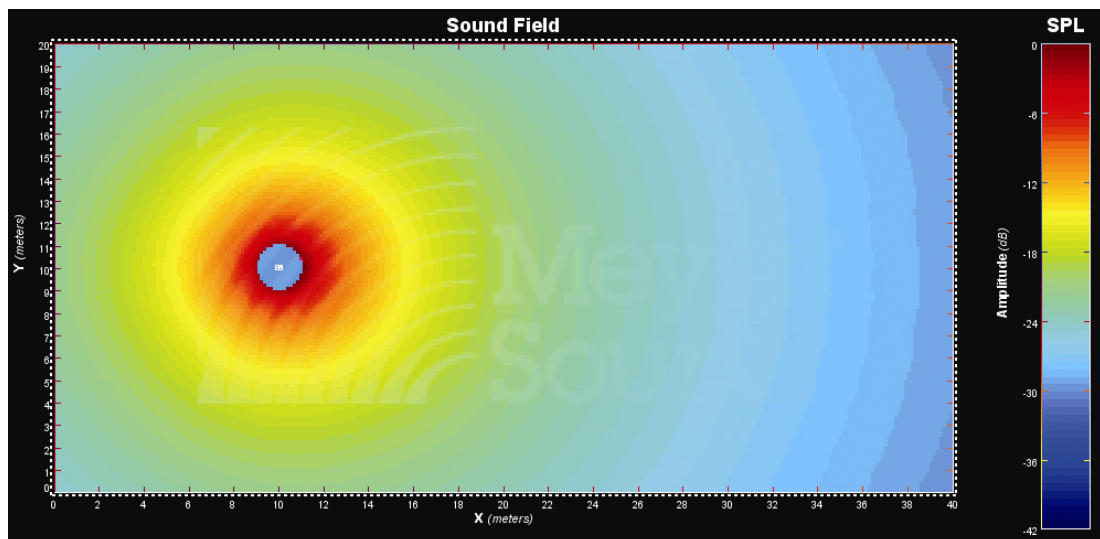


Abbildung 22

Im Frequenzbereich von 125 Hz strahlt der M´elodie Lautsprecher den Schall nahezu omni-direktional ab. Man könnte anhand der Grafik auch glauben einen ungerichteten Lautsprecher oder eine Punktschallquelle zu sehen. Dadurch das die Frequenz von 125 Hz einer Wellenlänge von 2,75 m entspricht und damit im Verhältnis zu den Abmessungen des Lautsprechergehäuses groß ist, wird die Schallwelle um ihn herum gebeugt und strahlt somit auch nach hinten ab. (siehe auch Schallbeugung).

M´elodie Abstrahlcharakteristik vertikal-Simulation für 1kHz (MF)

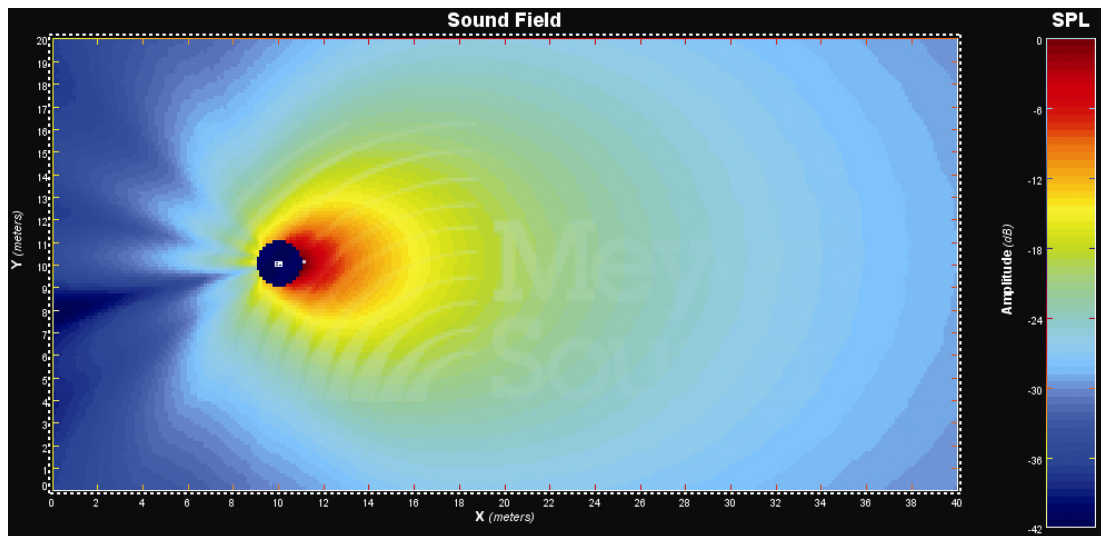


Abbildung 23

Eine schon etwas deutlichere, leicht keulenförmige vertikale Richtcharakteristik ist für den Frequenzbereich von 1 kHz zu erkennen. In diesem Bereich, wird bereits von einem einzelnen Lautsprecher eine annähernd kohärente Zylinderwelle (wenn auch nur für eine kurze Entfernung) mit nur geringem vertikalem Öffnungswinkel erzeugt. Der Trend zur stärkeren Bündelung von höheren Frequenzen ist bereits im Ansatz erkennbar.

M´elodie Abstrahlcharakteristik vertikal-Simulation für 8kHz (HF)

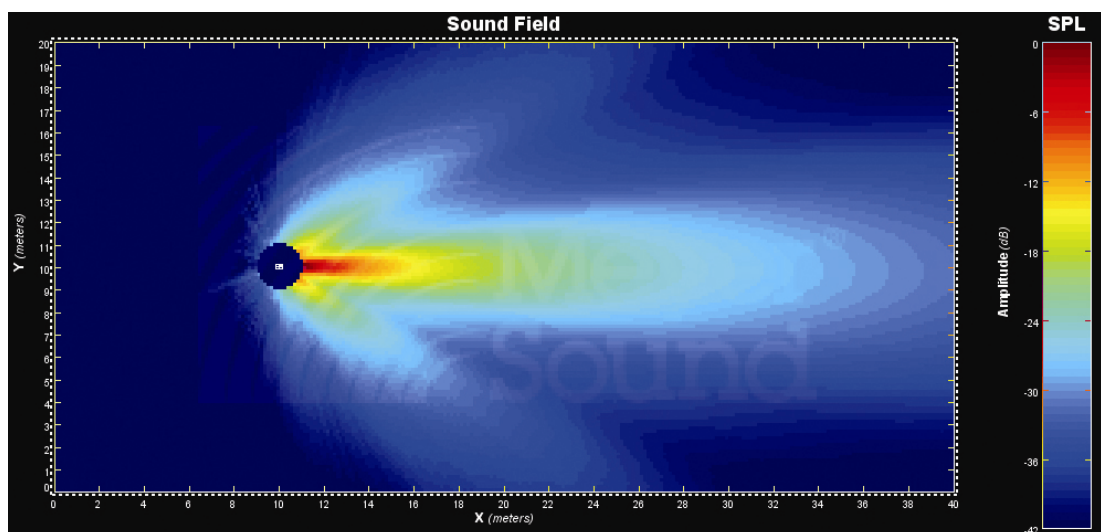


Abbildung 24

Anhand der Simulationsgrafik in Abbildung 24 wird deutlich, dass sich das Schallsignal im Bereich für 8 kHz im Gegensatz zu dem Frequenzbereich von 1 KHz noch stärker bündelt. Somit hat sich auch sein Nahfeld beziehungsweise die Zylinderwelle weiter ausgebreitet und der Schalldruckpegel fällt entsprechend schwächer ab. Es ist deutlich erkennbar, dass sich, neben dem im Verlauf der Mittelachse befindlichen Schalldruckpegel-Hauptmaximums, auch geringe Nebenmaxima ausgebildet haben.

M´elodie Abstrahlcharakteristik vertikal-Simulation für 16kHz (HF)

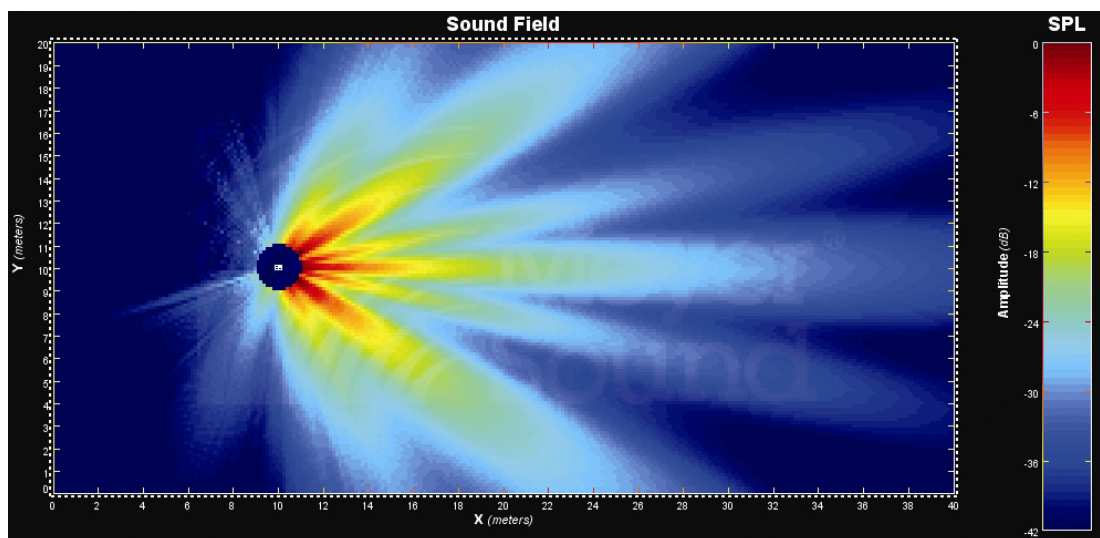


Abbildung 25

Im Frequenzbereich von 16 kHz erzeugt der Lautsprecher mittlerweile ausgeprägte destruktive Interferenzen (Auslöschungen), aber auch konstruktive Interferenzen (Verstärkungen in Form von neuen Haupt- und Nebenmaxima). Ein einzelner M´elodie Lautsprecher hat für diesen Frequenzbereich also klar seine Grenzen, die möglichst homogene Beschallung betreffend, erreicht.

3.4.2 Testreihe Meyer Sound M´elodie aus acht Elementen

Die Grafiken der zweiten Simulationsreihe zeigen im Vergleich dazu, ein Line Array-System, aufgebaut aus acht M´elodie Einzellautsprechern. Das Line Array hat eine Gesamthöhe von exakt zwei Metern und wird in diesem Beispiel ohne **Splay** verwendet ($\text{Splay} = 0^\circ$). *Splay* bezeichnet den Winkel, der zwischen den einzelnen Lautsprechern eingestellt werden kann um das Line Array, je nach Anwendungsfall und Bedürfnissen, entsprechend zu krümmen.

In Beschallungssituationen bei denen mit einem geflogenen Array ein größerer vertikaler Abstrahlwinkel verlangt wird, zum Beispiel um Tribünen oder Konzerthäuser mit Parkett und Galerie oder ähnliche zu beschallen, lässt sich über den Splay-Winkel, das vertikale Abstrahlverhalten des Systems verändern. Die folgenden Simulationen wurden unter denselben, von den Einzellautsprecher-Simulationen bereits bekannten Grundbedingungen durchgeführt.

M´elodie-Line Array Abstrahlcharakteristik vertikal-Simulation für 125Hz(LF)

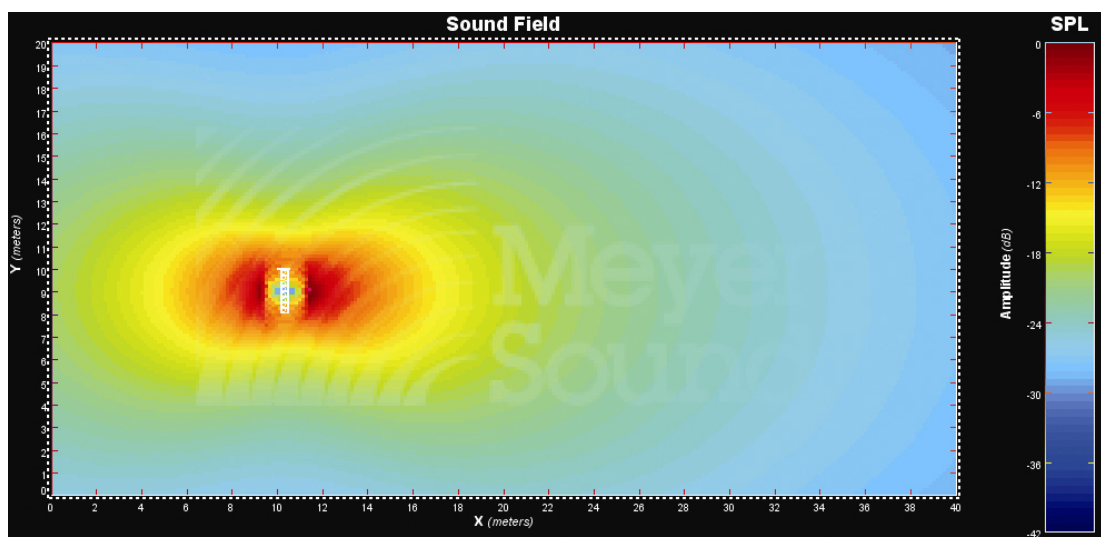


Abbildung 26

In der Simulation für den Frequenzbereich um 125 Hz, ergibt sich ein im Vergleich zu einem einzelnen M´elodie Lautsprecher, wesentlich größerer Nahfeldbereich. In die vertikale Abstrahlrichtung geht sehr wenig bis gar keine Schallenergie verloren, so dass man bei diesem Beispiel, einer kohärenten Zylinderwelle näher kommt.

M´elodie-Line Array Abstrahlcharakteristik vertikal-Simulation für 1kHz(MF)

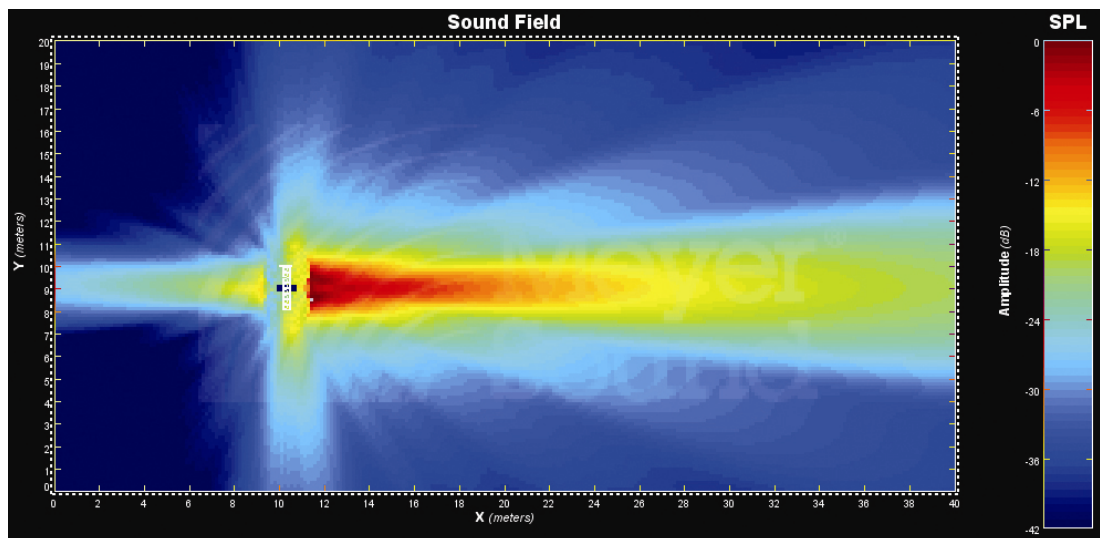


Abbildung 27

Abbildung 27 zeigt eindrucksvoll, dass das Line Array System hier nun seine Stärken ausspielen kann. Bezüglich des Frequenzbereichs um 1kHz berechnet die Software ein nahezu ideales Abstrahlverhalten, annäherungsweise vergleichbar mit dem Abstrahlverhalten einer idealen Linienquelle. Daraus folgend, zeigt das Array hier ein hohes Maß an Schallbündelung bei viel geringerer Schalldruckpegelabnahme mit steigender Entfernung auf.

M´elodie-Line Array Abstrahlcharakteristik vertikal-Simulation für 8kHz(HF)

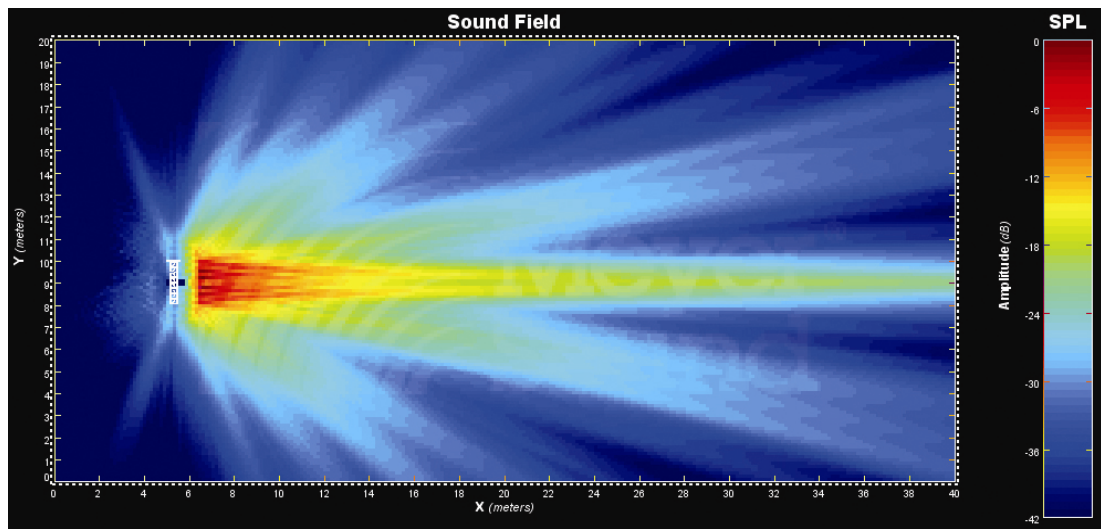


Abbildung 28

In Abbildung 28 in der die Abstrahlcharakteristik für den Frequenzbereich um 8kHz gezeigt wird, sind gegenüber dem Einzelsystem, wenn auch in geringerem Maße, erste Interferenz-Erscheinungen in Form von Auslöschungen und geringen seitlichen Nebenmaxima zu sehen.

M´elodie-Line Array Abstrahlcharakteristik vertikal-Simulation für 16kHz(HF)

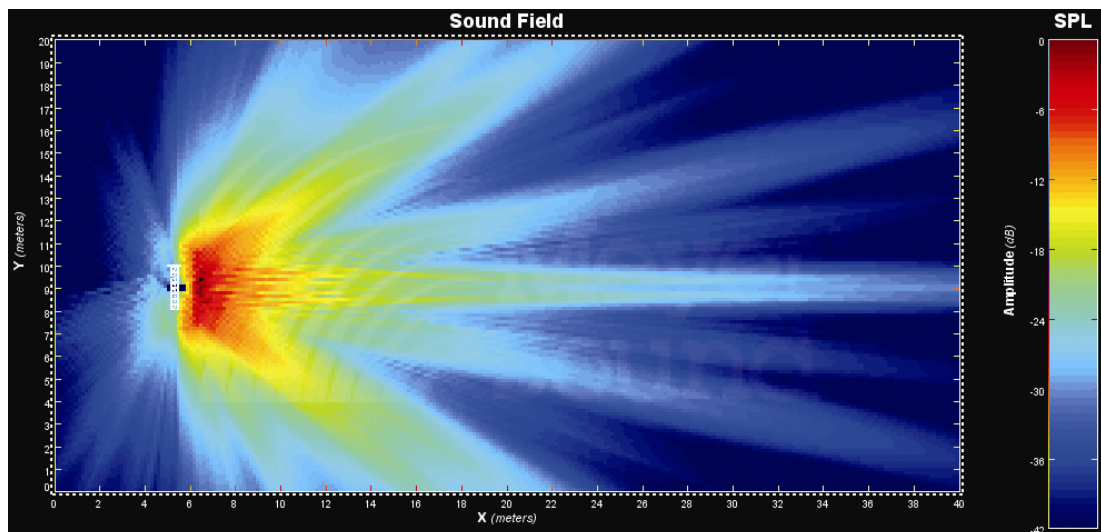


Abbildung 29

Wie man an der Schalldruckverteilung in Abbildung 29 sehen kann, nehmen die Interferenzen für den Frequenzbereich von 16kHz in starkem Ausmaß zu.

Dadurch verändert sich auch die Beschallungssituation maßgeblich. Unterschiedliche Hörplätze werden nicht mehr mit denselben Schalldruckpegeln versorgt und daraus folgt, dass sich das subjektive Lautstärkeempfinden an diesen Hörplätzen stark voneinander unterscheiden kann.

3.4.3 Fazit

Aus diesen Simulationsreihen können zwei grundlegende Erkenntnisse gewonnen werden. Erstens entsteht mit steigender Entfernung, aufgrund der stärkeren Bündelung von höheren Frequenzen gegenüber den Tiefen, ein ortsabhängiges Ungleichgewicht zwischen den Schallpegeln der Frequenzbereiche. Zweitens entstehen verstärkt Kammfiltereffekte (konstruktive und destruktive Interferenzen) ab ungefähr 8kHz.

Anhand der Simulationen ist desweiteren auch zu sehen, dass es schwierig ist im Hochtongbereich eine annähernd kohärente Welle zu erzeugen, da es ab ungefähr 7-8 KHz bereits zu ersten Interferenzerscheinungen kommt.

In der Regel soll aber der gesamte zu beschallende Bereich an jeder Position gleichmäßig und frequenzunabhängig beschallt werden. Deshalb versuchen die Hersteller diesen physikalischen Grundproblemen beizukommen.

Durch die Koppelung von speziellen Subwoofer-Systemen mit Line Arrays erreicht man bei Meyer Sound eine Verbesserung im Tieftongbereich. Das Nahfeld des Tieftongbereiches wird durch die Unterstützung der Subwoofer-Systeme, welche über eine positionsbedingte- oder elektronisch gesteuerte Anordnung der Elemente beeinflusst werden, vergrößert.

Mögliches Beispiel: Simulation- *curved* Line Array + Subwoofer für 125 Hz

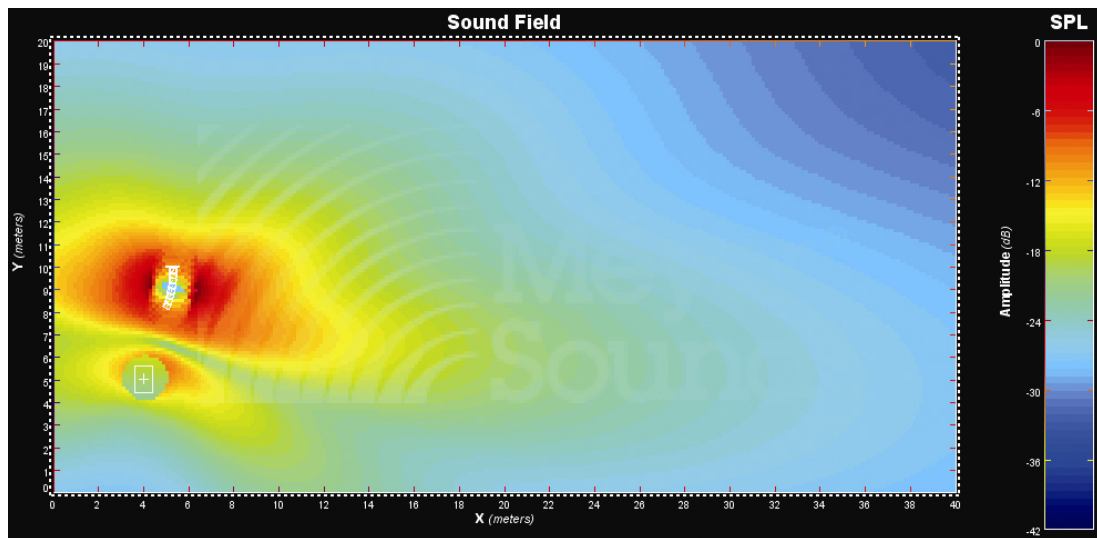


Abbildung 30

Die Summierung der Strahler durch konstruktive Interferenz von Subwoofer und Line Array Signalen, bringt eine klare Erweiterung des Nahfeldes für 125 HZ. Der blau-grüne Bereich zwischen Subwoofer und Array zeigt, dass dabei auch destruktive Interferenzen erzeugt werden.

Diese Simulation soll nicht als optimaler Lösungsfall gesehen werden. Vielmehr dient sie nur, um einen exemplarischen Ansatz aufzeigen. Konkret, wie man durch die Verbindung eines Meyer M´elodie Systems mit einem Subwoofer, bei entsprechender Kombination, das Nahfeld des Tieftonbereichs erweitern beziehungsweise beeinflussen kann.

Die Schalldruckpegelverteilungen des Meyer M´elodie Line Array-Systems können, wenn auch nicht akustisch „Perfekt“, aber im Allgemeinen als sehr gute Verteilungswerte angesehen werden. Die Leistung des aktiven Systems ist gleichfalls sehr gut in Anbetracht seiner kompakten Größe. Erste Line Array Formen (Schallzeile, Kirchenzeile...), welche in der Lage waren annähernd kohärente Wellenfronten bis ungefähr 1500 Hz zu erzeugen und um einiges größer ausgefallen sind, verdeutlichen den großen Fortschritt im professionellen Lautsprecherbau. Vor allem im Mittel- und Hochtonbereich kann das M´elodie System seine Stärken ausspielen.

Aufgrund der auftretenden kleinen Wellenlängen, werden vor allem im Hochtonbereich sehr geringe Abstände von benachbarten akustischen Lautsprecherzentren gefordert, um eine kohärente Wellenfront zu erzeugen ($< \frac{\lambda}{2}$).

Somit stellt sich die Frage, wie es die Ingenieure bei Meyer Sound geschafft haben, verhältnismäßig gute Ergebnisse in diesem Bereich zu erzielen?

3.5 Technologie Meyer Sound M'elodie

Den Abstand der akustischen Zentren kleiner als die halbe Wellenlänge der abzustrahlenden Frequenzen zu halten, ist mit konventionellen Hochton-Lautsprechern nicht mehr oder nur zu Lasten eines geringeren Schalldruckpegels zu realisieren. Aus diesem Grund wurden die *Waveguides*, *Waveformer* und andere, ähnliche Formen entwickelt, welche mittels einer speziell konstruierten Schallführung, aus der sphärischen Welle des Hochtontreibers eine Zylinderwelle formen. Meyer Sound hat hierfür ebenso wie auch diverse andere Hersteller eine eigene Schallführung die sich **REM (Ribbon Emulated Manifold) Waveguide** nennt entwickelt.

3.5.1 REM Waveguide

Der *Ribbon Emulated Manifold* von Meyer Sound kurz *REM* genannt wird in den aktuellen Meyer Sound Line Array Systemen verbaut. In Verbindung mit einem Kompressionstreiber versucht der speziell geformte *Manifold* (was soviel bedeutet wie Druckluft-Verteiler) eine möglichst kohärente Zylinderwelle zu formen.

Das Grundprinzip der REM Technologie setzt auf die Kombination eines Kompressionstreibers mit einem hornähnlichen Trichter zur Schallabstrahlung. Der Name des Treibers basiert auf dem, bereits im Kapitel Wandlerprinzipien erwähnten, Bändchenlautsprecher.

Zur Erinnerung, der Bändchenlautsprecher kommt in seinem Abstrahlverhalten einem idealen Linienstrahler sehr nahe.

Ursprünglich wollte man deshalb bei Meyer Sound auch einen Bändchenlautsprecher entwickeln, man stellte jedoch anhand der Entwicklung eines *state of the art* - Prototypen fest, dass es besser ist sich an das technisch ausgereifte- und bereits effiziente Prinzip eines Kompressionstreibers zu halten. Der *REM-Waveguide* imitiert somit das Abstrahlverhalten eines Bändchenlautsprechers. Dabei arbeitet der Kompressionstreiber auf den *Manifold*, der über vier separate *Waveguides* das Signal abstrahlt.

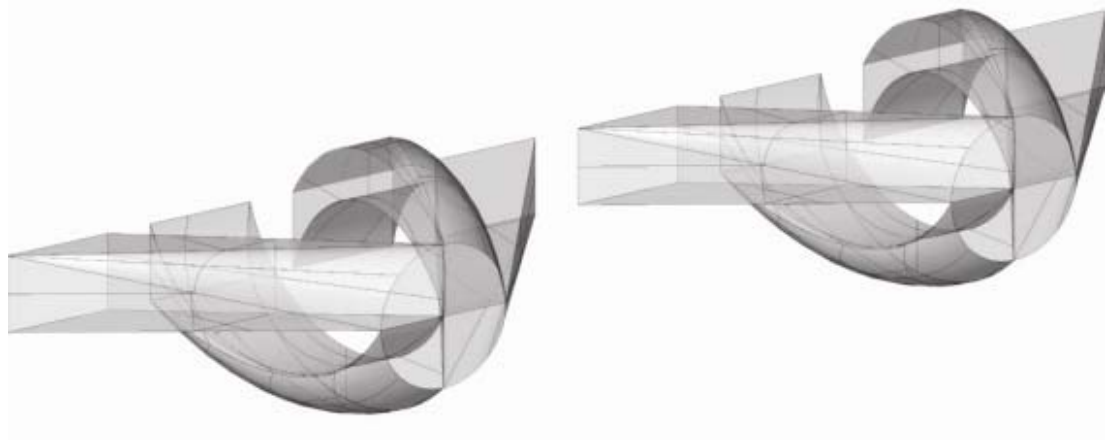


Abbildung 31: zeigt eine CAD Grafik von zwei angeordneten *REM-Waveguides* (Meyer Sound - Manifold Waveguide REM.pdf)

In Abbildung 31 erkennt man die vier *Waveguide* – „Kanäle“ über die der Schall zu ihren Austrittsöffnungen geführt wird. Die Anordnung von zwei *REM-Waveguides* wird in der abgebildeten Form in den M3D-Lautsprecher von Meyer Sound verwendet. Vergleichbar mit dem M´elodie System jedoch größer.

Das M´elodie Mid- High Einzelsystem



Abbildung 32: Meyer Sound M´elodie
(<http://www.meyersound.de/products/mseries/melodie/components.shtml>)



Abbildung 33: *REM – Waveguide* Hochtontreiber des M´elodie
(<http://www.meyersound.de/products/mseries/melodie/components.shtml>)

Die größten Vorzüge des *REM-Waveguides* sind, seine geringe Länge, seine kompakten Abmessungen und die ebenfalls relativ gering auftretenden Verzerrungen. Allgemein steigt das Verzerrungsverhalten eines *Waveguides* proportional zu seiner Länge an. Es werden aber die angestrebten Abstrahlcharakteristika einfacher über längere *Waveguides* erreicht. Meyer Sound hat daraufhin den aus eigener Sicht „besten“ Kompromiss aus geringer Länge, kompakter Größe und definierter Abstrahlcharakteristik mit geringen Verzerrungen gefunden.

Das verzerrungsarme Wiedergabeverhalten des *REM-Waveguides* beruht auf der Tatsache, dass sich die Durchmesser der einzelnen *Waveguides* exponentiell erweitern, wodurch die Verzerrungen reduziert werden. Würden die *Waveguides* einen konstanten Querschnitt aufweisen, so müsste man mit einer Zunahme von Verzerrungen mit steigender Entfernung rechnen. Noch detailliertere Informationen bezüglich dem Verzerrungsverhalten von Hörnern kann man dem Buch „Acoustics“ von Leo L. Beranek (1996) entnehmen. (vgl. Meyer Sound - Manifold Waveguide REM.pdf)

3.6 Ansätze im Tieftonbereich

Im Hochtonbereich arbeiten moderne Line Arrays also mit speziellen *Waveguides* um das Abstrahlverhalten der Systeme zu optimieren. Welche Möglichkeiten gibt es um das Nahfeld im Tieftonbereich zu vergrößern?

Für den Tieftonbereich gestaltet es sich grundsätzlich einfacher den geforderten Mindestabstand der akustischen Zentren der Lautsprecher kleiner als die halbe Wellenlänge der abgestrahlten Frequenz zu halten, da die Wellenlängen im Bereich von Metern und nicht Zentimetern liegen. Auch für die Tieftonwiedergabe gilt, dass sich das jeweilige Konstruktionskonzept meist auf einen speziellen Anwendungsfall bezieht. Meyer Sound bietet für die Verstärkung des Tieftonbereichs bei den *M´elodie* Systemen zusätzlich den Einsatz eines Subwoofers an. Der Subwoofer kann entweder mit dem System *geflogen* werden oder am Boden *gestacked* (gestapelt) werden. Wie bereits in der Abbildung 30 zu sehen war, ist es möglich durch die Unterstützung eines Subwoofers den Bereich des Tiefton-Nahfeldes, mithilfe von konstruktiven Interferenzen zu vergrößern. Versucht man aber den Nahfeld-Bereich entscheidend zu vergrößern, ist es nicht mehr angemessen einen herkömmlichen Subwoofer unter das Array zu stellen.

Aufgrund der fast omni-direktionalen Abstrahlcharakteristik kann es auf der Bühne bereits bei geringen Anhebungen des Schalldruckpegels zu ungewollten Feedback Erscheinungen kommen.

Erlaubt es der Anwendungsfall, ist eine Vergrößerung des Nahfeld-Bereiches durch die Koppelung von mehreren Subwoofern (Basslautsprechern) zu einem Array zu erreichen. Reiht man die Lautsprecher zu einem horizontalen Array unter der Einhaltung des notwendigen Abstands ($< \text{halbe Wellenlänge d. abzustrahlenden Frequenz}$) dehnt sich das Nahfeld der Subwoofer aus und steigt mit der Länge des Arrays nach der Formel von *Ureda* weiter an.

Basslautsprecher entsprechen in ihrem Abstrahlverhalten einer Punktschallquelle und strahlen den Schall auch nach hinten ab. In der Praxis ist dies nicht erstrebenswert und gilt als störende oder verlorene Schallenergie. Ein Array aus Subwoofern dämpft diesen Schall nach hinten zwar in geringem Maß, signifikante Besserung wird aber erst durch den Einsatz elektronischer Korrekturen (Filter) erzielt. Über die elektronische Zeitverzögerung der Signale (Delay) ist man heutzutage in der Lage, die auftretende Interferenz, hervorgerufen durch die Laufzeitunterschiede des Signals zu benutzen, um die Richtcharakteristik eines Arrays zu steuern. In Verbindung mit der Positionierung der Lautsprecher eröffnet sich eine Vielzahl an Wegen, eine bestimmte Abstrahlcharakteristik zu erlangen. (siehe DSP Steuerung von Line Arrays).

Da Array-Systeme bestehend aus Tieftonlautsprechern den Nachteil haben viel Platz zu benötigen, sucht man in der Forschung nach anderen Möglichkeiten, das Richtverhalten von Basslautsprechern für kompakte Systeme zu verbessern.

An diesem Punkt setzen kardioidale Basslautsprecher an. Sie versuchen über eine Kombination von Treibern, die in die Abstrahlrichtung aber auch entgegengesetzt dazu in einem Gehäuse vereint werden, eine verbesserte-kardioidale Abstrahlcharakteristik zu bewirken.

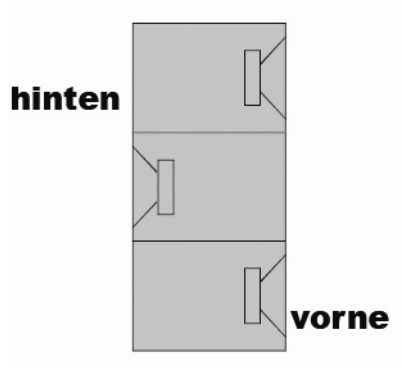


Abbildung 34: kardioides Lautsprecher Modell

„Das Prinzip setzt eine zweite Schallquelle in einem definierten Abstand hinter der ersten ein, um deren rückwärtig abgestrahlten Schall auszulöschen. Um effizient arbeiten zu können, d.h. Schallanteile hinter dem System - jedoch nicht auf der Vorderseite - auszulöschen, muss die Weglänge zwischen vorderer und hinterer Quelle in etwa einem viertel der zu kontrollierenden Wellenlänge entsprechen. Damit die gewünschte Auslöschung erzielt wird, müssen Phase und Pegel der hinteren Quelle mit einer separaten Signalbearbeitung und -verstärkung angepasst werden.“ (TI 330 Cardioid Subwoofer Array - CSA - D&B Audiotechnik.pdf)

Der nach hinten gerichtete Treiber bewirkt durch das Auftreten von destruktiven Interferenzen eine Schalldruckdämpfung des von den vorderen Treibern nach hinten abgestrahlten Signals, schlussendlich führt dies zu einer kardioiden Abstrahlcharakteristik.

Polardiagramm - kardioider Abstrahlcharakteristik

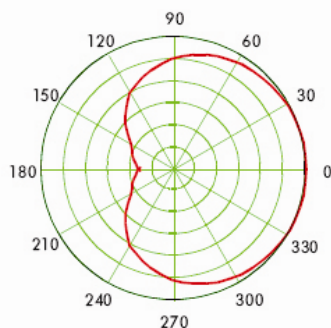


Abbildung 35: Polardiagramm der Abstrahlcharakteristik eines kardioiden Basslautsprechers (TI 330 Cardioid Subwoofer Array - CSA - D&B Audiotechnik.pdf)

Kardioide Basslautsprecher sollten wegen störender Schallreflexionen nicht direkt beziehungsweise auch nicht knapp vor eine Wand gestellt werden. (vgl. TI 330 Cardioid Subwoofer Array - CSA - D&B Audiotechnik.pdf)

Zum Thema Basswiedergabe in kompakten Line Array-Systemen kann abschließend gesagt werden, dass Hersteller teilweise zufriedenstellende Möglichkeiten, wie den kardioden Basslautsprecher und die elektronische Filterung gefunden haben, um den Nahbereich für tiefe Frequenzen auszudehnen. Bei den bisher erzielten Ergebnissen müssen nach wie vor gewisse Kompromisse bezüglich der gleichmäßigen Schalldruckverteilung eingegangen werden.

Die grundsätzlich von der physischen Konstruktion der Lautsprecher abhängige Abstrahlcharakteristik versucht man mittlerweile, wie schon an anderer Stelle erwähnt wurde, auch auf „virtuelle“- elektronische Art und Weise mithilfe von **DSP's** (Digitale **S**ignal **P**rozessoren) zu steuern. Erste Erkenntnisse und die Vorstellung eines Systems, das bereits versucht diese Technik einzusetzen, werden auf den nächsten Seiten untersucht.

3.7 Steuerung der Abstrahlcharakteristik über DSP

Die folgenden Erkenntnisse beruhen auf einem „*technical report*“ von Meyer Sound. Aufgrund von immer preiswerteren DSP's ist man heute in der Lage das von einem Lautsprecher abgestrahlte Schallsignal nicht nur über die Ausrichtung des Lautsprechers selbst, sondern auch über den Einsatz von digitalen Signal Prozessoren zu steuern. Bezeichnet wird diese Steuerung des Schallstrahls als Englisch „*beam steering*“ was eben soviel bedeutet wie „*Strahlsteuerung*“. Früher war es lediglich den Militärs vorbehalten die sehr teuren DSP's einzusetzen.

Aufgrund dessen beziehen sich die ersten Referenzen und Ideen auch hauptsächlich auf den von Militärs entwickelten Theorien zu Antennen Arrays für Radar-Systeme und deren Unterwasser Pendant - das Sonar.

Radar- und Sonar Systeme ihrerseits arbeiten in einem viel geringerem Frequenzspektrum als professionelle Lautsprechersysteme. Es genügen meist Bandbreiten von maximal einer Oktave, während im Gegensatz dazu Lautsprechersysteme in der Regel in dem Hörbereich der menschlichen Wahrnehmung von 11 Oktaven (20Hz–20kHz) betrieben werden. Wegen dieser großen Unterschiede im Hinblick auf Bandbreite und Signalart können die Theorien nicht direkt auf den Lautsprecherbereich übertragen werden.

3.7.1 Beam Steering

Grundsätzlich basiert *beam steering* auf der Tatsache, dass sich die einzelnen Lautsprechersignale eines Arrays aufgrund von Phasenunterschieden des Signals gegenseitig beeinflussen, das heißt man kann dieser Theorie nach keinen einzelnen Lautsprecher „Strahlsteuern“.

DSP's verfügen über ausreichend Rechenleistung, um Amplitude und Phase mehrerer Lautsprecher unabhängig voneinander zu steuern. Schwierig wird die Steuerung für ohnehin schon physikalisch gerichtete Elemente wie Hörner oder *Waveguides*, da sich die abgestrahlten Signale überlappen müssen. (vgl. Meyer Sound - Beam Steering.pdf)

Die meisten eingesetzten Line Arrays verwenden direkt strahlende Wandler für den Tiefton- und teilweise auch für den Mitteltonbereich und *Waveguides* oder andere spezielle Methoden (*Waveformer*, Bändchenlautsprecher, Elektrostaten...) für den Hochtonbereich. Diese Elemente sind in professionellen Systemen betreffend ihrer Richtcharakteristik bereits aufeinander abgestimmt, weshalb es schwieriger ist sie über einen DSP zu beeinflussen.

Um über den Einsatz von DSP's effektives *beam steering* zu ermöglichen bedarf es einiger Grundvoraussetzungen:

- *Kugelstrahler , Punktschallquelle oder möglichst angenäherte Form als Quelle.*
- *Abstand unter den Elementen soll kleiner als die halbe Wellenlänge der größten abgestrahlten Frequenz sein.*
- *Die Gesamtlänge des Arrays sollte größer als Wellenlänge der tiefsten abzustrahlenden Frequenz sein.*
- *Ausreichend DSP Filter um die Phase und Amplitude eines jeden Elements steuern zu können.*

(Meyer Sound – Beam Steering.pdf)

Als Beispiel dient ein modernes und professionelles M3D Array von *Meyer Sound* bestehend aus 16 Elementen. Dieses System erfüllt die oben genannten Kriterien für den Frequenzbereich unter 500 Hz, kann aber die Kriterien für Frequenzen über 500 Hz nicht einhalten. Mit diesem Array wurde versucht durch den Einsatz von DSP und einem simplen Algorithmus den „Schallstrahl“ um 20° nach unten zu lenken.

Anhand von Simulationen der hauseigenen Software MAPP Pro, die in der Lage ist Phasenbeziehungen zu berechnen, bestätigte sich die Annahme, dass es in dem Frequenzbereich von 500 Hz möglich ist ein Schallsignal um 20° nach unten zu lenken. In den höheren Frequenzbereichen von 1 kHz, 2 kHz und 4 kHz wird das Signal jedoch falsch oder überhaupt nicht beeinflusst.

Das Schallsignal wird für die Frequenzbereiche von 2 kHz und 4 kHz nicht beeinflusst, weil sich die Signale nicht mehr überlappen und ergo kein *beam steering* mehr möglich ist. Es kommt infolge der nicht mehr eingehaltenen Grundvoraussetzungen zu einer Reihe von unerwünschten Interferenz Erscheinungen die hier aber nicht näher erläutert werden. (vgl. Meyer Sound-Beam Steering.pdf)

Der technische Report von Meyer Sound spiegelt lediglich einen einfachen Versuch, die Abstrahlcharakteristik von Line Arrays durch den Einsatz von DSP's zu steuern, wieder. Es wurde gezeigt, dass es unter Einhaltung der aufgeführten Anforderungen möglich ist, jedoch nur unter dem Vorbehalt genauer Anpassung des zugrundeliegenden Array Designs.

Ein Hersteller der bereits ein kompaktes Lautsprecher-Array von dem Beginn seiner Entwicklung an für die Nutzung von DSP basierendem *beam steering* oder *beam forming* optimiert hat, ist die Firma EAW (<http://www.eaw.com/>).

EAW beschreibt auf seiner Webseite die Entwicklung ihrer DSA Line Array Serie welche speziell für die Verwendung von vertikalem *beam steering* designed wurde.

Die Array Konstruktion erinnert an frühere Schallzeilen, da man sich entschlossen hat sämtliche Treiber in ein einzelnes säulenähnliches Gehäuse unterzubringen. Die Platzierung und Einhaltung der notwendigen Abstände der einzelnen Treiber für die Steuerung des vertikalen Abstrahlverhaltens bestimmten diese Gehäuse-Form, wie auch den gesamten restlichen Entwicklungsprozess.

Herausgekommen ist das kompakte *Full Range* Line Array DSA250, dessen vertikales Abstrahlverhalten, laut Hersteller über einen sehr breiten Frequenzbereich von 300 Hz bis 16 kHz gut steuerbar sein soll.

Bezüglich der Treiber entschied man sich für 4" Konuslautsprecher (Tieftonwiedergabe) die untereinander, aber in der Horizontalen leicht versetzt (um die Abstände zu verringern) angebracht wurden. Für den Hochtonbereich verwendet man acht 1" große Konuslautsprecher, die auf ein einzelnes sehr kurzes und mehrzelliges Horn arbeiten.

Kompakte auf *beam steering* optimierte Line Array-Elemente von EAW



Abbildung 36: DSA250i und DSA230i

(<http://www.eaw.com/technology/nonproprietary/BeamForming/index.html>)

Darf man dem Hersteller und seinen Beschreibungen auf derer Firmenwebseite glauben, so kann man mit den aktiven 2-Wege Line Array-Elementen DSA250i und dem zusätzlich zur Tieftonunterstützung angebotenen DSA230i, die vertikale Abstrahlcharakteristik in einem sehr breiten Frequenzspektrum (300Hz-16 kHz) mittels DSP und eigener Software steuern. Den horizontalen Abstrahlwinkel gibt der Hersteller mit 120° an und den vertikalen Abstrahlwinkel soll man von 15°-120° festlegen und mit +30° *beam steering* heben beziehungsweise senken können.

(vgl. <http://www.eaw.com/technology/nonproprietary/BeamForming/index.htm>)

Wegen fehlender Quellen war es nicht möglich objektivere Information über dieses Lautsprechersystem in Erfahrung zu bringen. Als Beispiel für die tatsächliche Umsetzung von DSP gesteuertem *beam steering* in kompakten Line Array-Systemen muss an dieser Stelle die Webseite des Herstellers als einzig verfügbare Quelle ausreichen.

DSP's werden mittlerweile in fast jedem Line Array System verwendet, sei es um Verzerrungen zu reduzieren, Delays hinzuzufügen oder einfach für die Steuerung und Kontrolle etlicher signalspezifischer Parameter.

Ob sich ihre Verwendung für das beschriebene *beam steering* tatsächlich durchsetzen wird kann zurzeit nicht beantwortet werden, da sich die Entwicklungen noch in einer frühen Phase befinden.

Von einem verstärkten Einsatz von DSP's und einer Erweiterung ihrer Fähigkeiten kann aufgrund der immer weiterfortschreitenden technischen Entwicklung im Bereich des *Signal Processings* ausgegangen werden.

Um neben der theoretischen Analyse der vorliegenden Arbeit auch eine praktische Dimension zu verleihen, habe ich im Rahmen der ORF SKI Challenge WM 09' die Möglichkeit gehabt ein kompaktes Line Array-System im Live Betrieb zu erleben und das Erlebte zu dokumentieren.

4 Praktische Erfahrung

4.1 ORF SKI Challenge WM



Im Rahmen dieser Arbeit hatte ich die Möglichkeit vor Ort bei der ORF SKI Challenge '09 dabei zu sein. Natürlich nicht als Teilnehmer der Veranstaltung, sondern als Gast von DI Andreas Büchele, der es mir ermöglichte bei den Aufbauarbeiten und bei den Generalproben vor Ort mit den Mitarbeitern der Firma Steiner Mediensysteme zusammenzuarbeiten.

4.1.1 Zur Erklärung

Mit mehreren Millionen Downloads hat sich die ORF SKI Challenge in den letzten Jahren im Bereich des kostenlosen Online Gamings zu einem Phänomen im mitteleuropäischen *e-sports* Bereich entwickelt. Bei diesem Spiel, das auch Online gespielt wird handelt es sich um ein vom *ORF* und der *Kronen Zeitung* werbefinanziertes Schirennspiel das von den Benutzern kostenfrei über das Internet heruntergeladen werden kann. Die Teilnehmer haben die Möglichkeit, sich virtuell auf 6 Abfahrtsstrecken mit anderen Spielern im Online Wettkampf zu messen.

In diesem Jahr fand dagegen zum ersten Mal eine Weltmeisterschaft im *Uniqa Tower* in Wien statt. Qualifiziert hierfür waren die schnellsten Online Schifahrer der Saison, mit den drei besten Fahrern aus Österreich, Deutschland, der Schweiz und Kroatien.

4.1.2 Der Veranstaltungsort

Ein Auszug eines Pressetextes über den Veranstaltungsort von der Webseite des Uniqa Towers:

„Das „Platinum Vienna“ bietet einen ansprechenden Rahmen für unterschiedlichste Events. Die multifunktionale Räumlichkeiten, modernste Veranstaltungstechnik und Gourmet-Entertainment von Do & Co bieten die besten Voraussetzungen für erfolgreiche Veranstaltungen. Ein hochmodernes Sound- und Lichtsystem, versenkbare Projektionsflächen, flexible Bühnen und großformatige Screens sorgen für Events der Extraklasse.“ (http://tower.uniq.at/index_tow.php)

4.1.3 Der Aufbau

Die Firma *Steiner Mediensysteme* war für die gesamte technische Ausstattung verantwortlich. So wurde ein aufwendiger Video- und Tonregie Raum aufgebaut, von welchem Bild und Ton für den *Live-Stream* als auch eine Saalprojektion und die Beleuchtung realisiert wurden. Des Weiteren wurde eine Bühne für die Bands - mit den **HK Contour Line Arrays**, die Bühne für die SKI Challenge Fahrer, Zuschauertribünen, ein Fernsehstudio mit Interview Couch aufgebaut. Für die DVD - Produktion und den Live-Stream, wurden neben zwei Stativ-Kameras eine Schulterkamera, eine Funkkamera und eine Krankamera eingesetzt. Die Veranstaltung hatte man über einen Video Live-Stream ins Internet übertragen, so dass sich auch Interessierte, die nicht direkt dabei gewesen sind ein Bild von der Veranstaltung machen konnten. Zusätzlich wurde auch Material für die DVD – Produktion aufgezeichnet. DI Andreas Büchele war hauptverantwortlicher Tontechniker und zuständig für die Tonmischung des Internet Live Streams und der DVD Produktion. Im Rahmen der Veranstaltung fanden schließlich auch zwei Konzerte der Bands *Morten* aus Österreich und *Aloha from Hell* aus Deutschland statt.

FOH – *Front Of House* Mischpult für die Saalbeschallung



Abbildung 37: Von diesem Mischpult wurde das HK Contour System versorgt. Für die Live Beschallung des *Platinums* im Erdgeschoss des *Uniqa Towers* wurde ein **HK Contour** Line Array-System eingesetzt, womit ich mich in erster Linie auseinandergesetzt habe. Zu Beginn wirkte ich zusammen mit Mitarbeitern der Firma Steiner Mediensysteme beim Aufbau und der Verkabelung des Systems mit.



Abbildung 38: (links) HK-Contour Line Array; (rechts) Das Studio der ORF SKI Challenge WM

Bei den Aufbauarbeiten und anschließenden Soundchecks habe ich das *HK Contour Array* und diverse Setup- beziehungsweise Einstellungs- möglichkeiten von Verstärkern und Controller kennengelernt und schlussendlich den Klang des *HK Contour Line Arrays*.

Im Vorfeld der Veranstaltung hat man mir einen Raum Plan des „*Platinum Vienna*“ und eine Grafik des geplanten Setups für das Line Array System gegeben. Diese Grafik, generiert mit der *HK Contour Array Simulations Software CAPS-CTA*, zeigt die Schalldruckverteilung und vertikale Abstrahlcharakteristik für das verwendete System bestehend aus zwei Topteilen CTA 208 mit jeweils zwei Subwoofer-Elementen CTA 118 SUB.

Simulation -Schalldruckverteilung *HK Contour Array* – Dauerpegel Mittellung

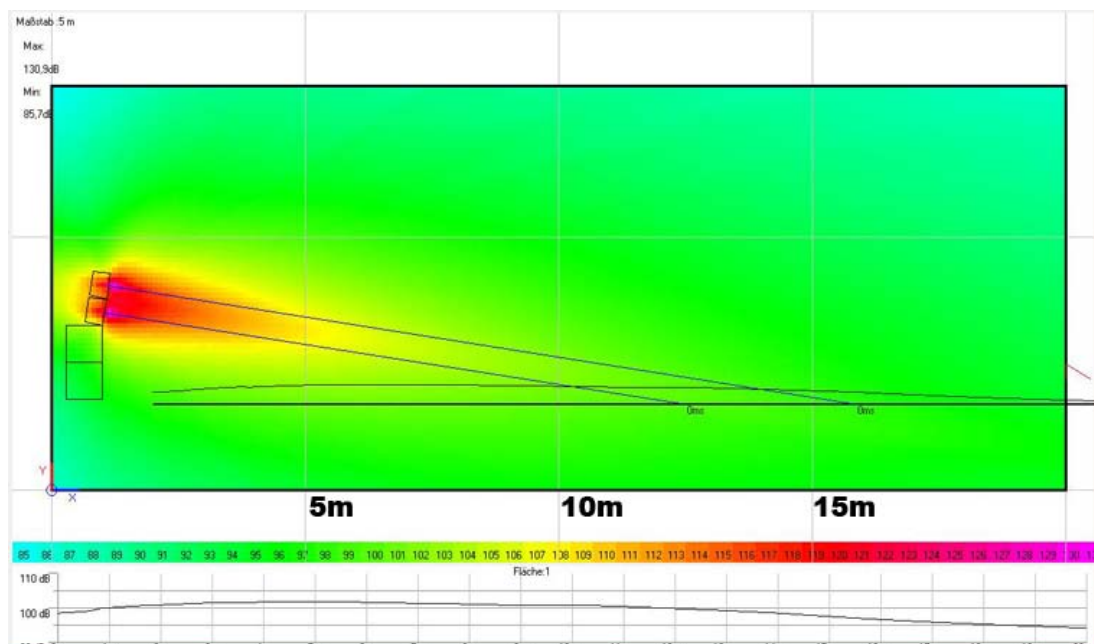


Abbildung 39: Schalldruckpegelverteilung des *Contour Line Arrays*

Die zwei Top-Elemente des Arrays wurden leicht zu den Subwoofern nach vorne geneigt, so dass sie in der vertikalen Ebene nach unten abstrahlen, da sich die Bühne und die PA circa 1,5 Meter höher als der Zuschauerbereich befanden. Es ist deutlich zu erkennen, dass der „tiefrote Bereich“ in welchem sich der Schalldruck zwischen 115 und 120 dB bewegt, nach ungefähr 5-6 Metern Entfernung kontinuierlich auf Werte um die 107-108 dB absinkt und ab ungefähr 10 Metern Entfernung Schalldruckpegel im Bereich um 100 dB erreicht werden.

Durch die Abstandsverdoppelung von 5 auf 10 Meter Entfernung sinkt der Schalldruck laut Grafik von ungefähr 110 dB bei 5 Metern auf circa 104 dB an der 10 Meter Marke. Daraus lässt sich gemäß des „**Inverse Square Law**“ schließen, dass das Nahfeld für diese(n) Frequenz(Bereich) bereits überschritten wurde und sich die abgestrahlte Schallwelle ab 5-6 Metern allmählich wieder von einer kohärenten Zylinderwelle in eine sphärische Kugelwelle wandelt. Woraus sich auch der Abfall des Schalldrucks um -6 dB erklärt. (siehe auch Nahfeld – Fernfeld)

Demnach dehnt sich das „gesamte“ Nahfeld (für den gesamten Frequenzbereich) bis ungefähr 6 Meter vor dem Array aus, das auch beim Soundcheck vor Ort subjektiv wahrgenommen werden konnte. Bis zu einer Entfernung von 6-7 Metern habe ich den gesamten Frequenzbereich homogen und linear, soweit man das subjektiv feststellen kann, bei gleichbleibender Lautstärke wahrgenommen. In diesem Bereich würde ich den Sound des Systems als ziemlich natürlich (gute Balance zwischen HF, MF und LF) und vor allem laut und druckvoll beschreiben. (HF, MF und LF stehen für *high*-, *mid*- und *low* - frequency)

Die erste starke Änderung in meiner akustischen Wahrnehmung bemerkte ich auf den ersten zwei Metern nach diesem Bereich. Zwischen 7-8 Metern Entfernung wurden tiefe Frequenzen (LF) plötzlich hörbar leiser, wohingegen mittlere und hohe (MF, HF) Frequenzen nach wie vor ungefähr auf demselben Lautstärke Niveau wirkten. Im Frequenzbereich menschlicher Sprache (~2-4 kHz) beziehungsweise des Gesangs konnte ich eine gute Übertragungsleistung bis in den hintersten Publikumsbereich feststellen. Im hintersten Abschnitt des Publikumsbereichs in 15-20 Metern Entfernung wirkte das Klangbild wieder neutraler und homogen, wenn auch leiser. Einzig die höheren Frequenzbereiche (HF) klangen etwas „scharf“, einerseits begründet durch die frequenzabhängige Bündelung, andererseits aber auch mit der zu großen Verstärkung der Höhen zusammenhängen konnte.

Aufgrund von räumlichen Gegebenheiten und den Anforderungen vor Ort, das Publikum war maximal 15-20 Meter von der PA entfernt, hat man sich entschlossen, das Line Array nicht zu „fliegen“ sondern als *groundstack* – beziehungsweise *stacked* am Boden anzubringen.

Mit „fliegen“ bezeichnet man die von der Decke „geflogene“- meist an Seilen hängende Installationsvariante, die sich für größere Veranstaltungen, bei denen höhere Pegel, auf weiteren Distanzen gefordert sind, anbietet. Mit *Groundstack* oder *stacked* bezeichnet man hingegen die Aufstellungsvariante beziehungsweise das Übereinanderstapeln am Boden. Zudem gibt es in den meisten Fällen, wie auch im Fall des *Contour Arrays* noch die Möglichkeit den Winkel zwischen den Einzelelementen einzustellen. Handelt es sich dabei um ein geflogenes Line Array so spricht man von *curving* beziehungsweise einem *curvilinear line array*.

Für diesen, eher kleinen Rahmen (150–200 Zuschauer auf den Tribünen) befanden es die Veranstalter mehr als ausreichend, ein Array aus zwei Topteilen und zwei Subwoofern am Boden zu bilden. Dazu hat man die zwei Topteile und die zwei Subwoofer jeweils übereinander angeordnet und am Boden aufgestellt (*groundstack*). Erwähnen sollte man aber, dass es grundsätzlich möglich ist ein *Contour Array* bestehend aus maximal vier Topteilen CTA 208 zu *fliegen*, woraus sich ein Line Array von zwei Metern Höhe ergeben würde. Wie bereits untersucht, ergibt sich durch die vergrößerte Länge auch ein Vorteil im Abstrahlverhalten.

Die Frage, die sich jedoch bezüglich der bei der ORF SKI Challenge WM ´09 verwendeten Konfiguration stellt ist: Wie schafft es das *HK Contour Line Array* ein ausgedehntes Nahfeld bei vergleichsweise geringen Abmessungen zu erzeugen? Welche Technologien werden dafür verwendet? Im nächste Punkt wird versucht dieser Frage auf den Grund zu gehen.

4.1.4 Technologie Contour Array

Die Mid-High Units des *Contour Arrays* sind mit der *COHEDRA Acoustic Lens* Technologie ausgestattet. Diese spezielle, den *Waveguides* anderer Hersteller ähnliche Technologie (REM), ermöglicht es dem System eine näherungsweise kohärente Wellenfront für den Bereich der mittleren bis hohen Frequenzen abzustrahlen.

COHEDRA Acoustic Lens wie sie im CTA 208 verwendet wird.



Abbildung 40: Querschnitt *COHEDRA Acoustic Lens*

(Cohedra Operator Compact & Gross Deutsch Nov 2004.pdf)

Die Wellenfront, welche von den Acoustic Lenses des *Contour Arrays* erzeugt wird, ist gemäß den Angaben des Herstellers optimal auf die Wellenfronten des Mittel- und Tiefton Bereichs abgestimmt, wodurch das gesamte Line Array ein Schallsignal mit einer idealen kohärenten Wellenfront abstrahlt. In Wahrheit sind vom Hersteller verfasste Angaben dieser Art meist nur bedingt zutreffend. (Cohedra Operator Compact & Gross Deutsch Nov 2004.pdf)

Es wird in der Praxis, tatsächlich keine ideale Kohärenz erzeugt. Jedoch gelingt es dem *Contour Array* relativ gut ein, rein subjektiv bewertet, ausgewogenes Verhältnis, zwischen den mittleren bis hohen Frequenzen und den tiefen Frequenzen wiederzugeben.

Wie bereits zuvor beschrieben, nimmt mit steigender Entfernung die subjektiv wahrgenommene Lautstärke der Bassfrequenzen nahezu sprunghaft ab, während die mittleren- und hohen Frequenzen annähernd gleich laut bleiben.

Daraus folgt, dass es dem *HK Contour Array* gelingt, gute Kohärenz für den mittleren- wie auch hohen Frequenzbereich zu erreichen. Des Weiteren aber ähnlich wie die meisten anderen kompakten Systeme, worauf auch bereits im theoretischen Kernteil dieser Arbeit hingewiesen wurde, es nicht schafft, eine annähernd kohärente Zylinderwelle mit dementsprechend großem Nahfeld im Tieftonbereich auszubilden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit beschreibt, welche Grundvoraussetzungen und Anforderungen an eine professionelle Beschallungsanlage gestellt werden und wie es durch die ständige technische Weiterentwicklung möglich wurde, die vormals sehr großen, schweren und viel Raum benötigenden Beschallungssysteme durch immer kompakter werdende Systeme zu ersetzen.

Dies ist in erster Linie aufgrund der Tatsache geschehen ist, dass viele Hersteller erkannt haben, dass es möglich ist das Potential und die Grenzen der Akustik besser als bisher zu nützen, um ihrerseits Fortschritte in der Entwicklung moderner Lautsprechersysteme zu erzielen. Angefangen bei dem Design und der Konzeption von Lautsprechergehäusen, Schallwandlern, der Abstimmung ihrer Richtcharakteristik, bis hin zu ihrem elektronischen Zusammenspiel mittels DSP, all diese Bereiche müssen aufeinander abgestimmt werden, um ein möglichst zufriedenstellendes Ergebnis zu erreichen.

Es wird auf die zugrundeliegenden physikalischen Theorien eingegangen und ihre Auswirkungen anhand von Beispielen erörtert. Dabei wird beleuchtet, welche Vorteile der Einsatz von speziell entwickelten Technologien wie Wellenformern oder *Waveguides* bringen können und inwieweit diese vielgepriesenen Technologien tatsächlich in der Lage sind, eine effizientere und annähernd kohärente Abstrahlcharakteristik für den Hochtonbereich zu bilden, als es nicht optimierte Lautsprecherlösungen vermögen.

Durch den Einsatz fortgeschrittener Simulations Software war es möglich zu prüfen, wie sich ein kompaktes Line Array System in einer virtuellen Umgebung verhält. Anhand der Simulationen konnte in weiterer Folge auch die Theorie hinter der Technologie und die Schwachstellen eines kompakten Line Array-Systems aufgezeigt werden.

Desweiteren wird festgehalten, dass in dem Bereich der gerichteten Tiefbasswiedergabe kompakter Systeme, aufgrund der herrschenden Physik und der kompakten Bauweise, zumindest für die untersuchten Systeme noch keine oder nur bedingt zufriedenstellende Lösungen gefunden wurde. Als zurzeit einzig wirkliche Alternative zu breiten Bass-Arrays, um auch kompakte Systeme mit gerichteten Basssignalen zu versorgen gilt der Kardioide Basslautsprecher oder *Cardioid Subwoofer*.

Es konnte festgestellt werden, dass die *beam steering* – Technologie, mit der die Abstrahlcharakteristik von speziell dafür entwickelten Lautsprechersystemen elektronisch über DSP's gesteuert werden kann, zu einer der vielversprechendsten, wenn auch komplexen Entwicklungen im Bereich der Line Array-Systeme gezählt werden kann. Die Vorzüge sind die Flexibilität und die kompakte Größe, die Steuerung setzt jedoch voraus, dass der Tonmeister über entsprechende Kenntnisse der möglichen Effekte verfügt.

Letztendlich hat sich durch Beobachtungen im Rahmen der Praxis-Veranstaltung vieles bereits aus der Theorie Bekanntes bestätigen können. In der Praxis scheint es dennoch schwieriger für die Hersteller, wie auch für die Anwender, die aus der Theorie bekannten Prinzipien auch tatsächlich umzusetzen. Allgemein kann behauptet werden, dass nicht alle Systeme die sich als Line Array bezeichnen, auch tatsächlich deren Grundlagen befolgen.

Dieser Themenbereich birgt definitiv noch viele Entwicklungen und Möglichkeiten für zukünftige Untersuchungen. Möglicherweise gelingt es der Forschung in den nächsten Jahren Wandlerprinzipien wie den Manger-Wandler oder das Prinzip des Bändchenlautsprechers weiter zu verbessern. Eventuell werden selbst neue Theorien begründet und dadurch Beschallungssysteme noch weiter optimiert.

Da mittlerweile genügend Rechenleistung für immer komplexere Anwendungen zur Verfügung steht, kann auch aus dem Bereich der DSP mit neuen Entwicklungen und Verbesserungen in den kommenden Jahren rechnen.

Dasselbe gilt für Software zur Berechnung und Simulation von Lautsprechersystemen, die ebenfalls von der steigenden Rechenkapazität zukünftiger Prozessoren profitieren wird.

Zudem werden gerade neue Modelle zur besseren Berechnung und Veranschaulichung von Lautsprechersystemen entwickelt. Anhand von *Directivity Balloons* oder „Ballon-Daten“ wird man in Zukunft möglicherweise die Abstrahlcharakteristik eines Lautsprechersystems in einer 3-Dimensionalen Ansicht darstellen und berechnen können.

6 Literaturverzeichnis

Dickreiter, Michael 1997: Handbuch der Tonstudioteknik Band 1, 6. Auflage
München: K.G. Saur Verlag KG (als Dickreiter 1997a)

Dickreiter, Michael 1997: Handbuch der Tonstudioteknik Band 2, 6. Auflage
München: K.G. Saur Verlag KG München (als Dickreiter 1997b)

Raffaseder, Hannes 2002: Audiodesign, München, Wien: Carl Hanser Verlag

Weinzierl, Stefan 2008: Handbuch der Audiotechnik, Berlin Heidelberg:
Springer-Verlag Berlin Heidelberg

7 Digitale Quellen

Cohedra Operator Compact & Gross Deutsch Nov 2004.pdf (Adt, Thomas
2004, Saarbrücken, Deutschland)

Meyer Sound - Manifold Waveguide REM.pdf (Meyer, Perrin 2005, MEYER
SOUND LABORATORIES INC, Berkeley,CA)

Meyer Sound - Beam Steering.pdf (Meyer, Perrin 2002, MEYER SOUND
LABORATORIES INC, Berkeley,CA)

TI 330 Cardioid Subwoofer Array - CSA - D&B Audiotechnik.pdf (Author
Unbekannt 2004, d&b audiotechnik AG, Backnang, Deutschland)

8 Internet Quellen

www.meyersound.de

- <http://www.meyersound.de/products/software/mapponline/pro/index.shtml> (03/2009)
- <http://www.meyersound.de/products/software/mapponline/pro/measurements.shtml> (03/2009)
- <http://www.meyersound.de/products/mseries/melodie/components.shtml> (03/2009)

tower.uniq.at

- http://tower.uniq.at/index_tow.php (03/2009)

www.visaton.com

- http://www.visaton.com/bilder/sonstige/lexikon_konuslautsprecher.gif (03/2009)

de.wikipedia.org

- <http://de.wikipedia.org/wiki/Signal-Rausch-Verh%C3%A4ltnis> (03/2009)
- http://de.wikipedia.org/wiki/Akustischer_Strahlungswiderstand (03/2009)

www.eaw.com

- <http://www.eaw.com/technology/nonproprietary/BeamForming/index.html> (04/2009)

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht von Anforderungsprofilen (Weinzierl 2008, S.497)	10
Abbildung 2: (Weinzierl 2008, S.540).....	14
Abbildung 3: (Weinzierl 2008, S.541).....	15
Abbildung 4:Übersicht-Sprachverständlichkeitsskalen (Weinzierl 2008,S.543)	17
Abbildung 5: Berrechnung - Klirrfaktor (Dickreiter 1997b, S.444)	22
Abbildung 6:Formel-Umrechnung-THD von % in dB (Weinzierl 2008, S.1146)	24
Abbildung 7:Formel-Umrechnung-THD von dB in % (Weinzierl 2008, S.1146)	24
Abbildung 8: Übersicht THD [dB] und Klirrfaktor [%] (Weinzierl 2008, S.1146)	24
Abbildung 9: Der rote Graph repräsentiert die Summe aller Verzerrungskomponenten = <i>THD</i> , Blau steht für <i>k2</i> , Grün für <i>k3</i> , Orange für <i>k4</i> und Schwarz für <i>k5</i> . (Weinzierl 2008, S.480)	25
Abbildung 10: Querschnitt des Aufbaus eines Konuslautsprechers (http://www.visaton.com/bilder/sonstige/lexikon_konuslautsprecher.gif)	29
Abbildung 11: zeigt den Querschnitt eines Kalottenlautsprechers. 1 = Ringmagnet; 2 = Magnetplatte; 3 = Polplatte; 4 = Polkern; 5 = Schwingspule; 6 = Schwingspulenträger; 7 = Kalotte mit Sicken; 8 = Montageplatte; 9 = Zuführungslitzen. (Dickreiter 1997a, S.207)	30
Abbildung 12: Prinzip eines elektromagnetisch planar aufgebauten Bändchenlautsprechers (Weinzierl 2008, S.426)	32
Abbildung 13: Grafik eines <i>Air Motion Transformers</i> , die Lamellen der Membran ziehen sich abhängig vom Signalstrom zusammen oder bewegen sich auseinander. (vgl. Weinzierl 2008, S.427)	32
Abbildung 14: Skizze eines elektrostatischen Wandlers (Dickreiter 1997a, S.208) .	34
Abbildung 15: Verschiedene Tieftonlautsprecher Gehäusetypen. A: Geschlossenes Gehäuse; B: Bassreflex-Gehäuse; C: Bandpassgehäuse Typ 1; D: Bandpassgehäuse Typ 2 (Weinzierl 2008, S. 432)	37
Abbildung 16: : Phasenbeziehung zweier identischer Signale	46
Abbildung 17: Skizze – Definition Abstrahlwinkel	48
Abbildung 18:Isobaren eines 40° und zweier 40° Horntreiber (Weinzierl 2008,S.443)	49

Abbildung 19: Schallausbreitung einer Kugelwelle	51
Abbildung 20: Schallausbreitung einer Zylinderwelle	51
Abbildung 21: Schallbeugung Hindernis und Spalt (Raffaseder, S.76)	54
Abbildung 22	56
Abbildung 23	57
Abbildung 24	57
Abbildung 25	58
Abbildung 26	59
Abbildung 27	60
Abbildung 28	61
Abbildung 29	61
Abbildung 30	63
Abbildung 31: zeigt eine CAD Grafik von zwei angeordneten <i>REM-Waveguides</i> (Meyer Sound - Manifold Waveguide REM.pdf)	65
Abbildung 32: Meyer Sound M´elodie (http://www.meyersound.de/products/mseries/melodie/components.shtml)	66
Abbildung 33: <i>REM – Waveguide</i> Hochtontreiber des M´elodie	66
Abbildung 34: Kardiod-Lautsprecher Modell	69
Abbildung 35: Polardiagramm der Abstrahlcharakteristik eines kardioden Basslautsprechers (TI 330 Cardioid Subwoofer Array - CSA - D&B Audiotechnik.pdf)	69
Abbildung 36: DSA250i und DSA230i (http://www.eaw.com/technology/nonproprietary/BeamForming/index.html)	74
Abbildung 37: Von diesem Mischpult wurde das HK Contour System versorgt	78
Abbildung 38: (links) HK-Contour Line Array; (rechts) Das Studio der ORF SKI Challenge WM	78
Abbildung 39: Schalldruckpegelverteilung des <i>Contour</i> Line Arrays	79
Abbildung 40: Querschnitt <i>COHEDRA Acoustic Lens</i>	82
Sämtliche Abbildungen die über keinen direkten Quellenverweis verfügen wurden von René Rainer erstellt.	