

Beschallungstechnik - Entwicklung, Anwendungen und akustische Simulation

Wolfgang Ahnert

ADA-AMC GmbH, 13189 Berlin, E-Mail: wahnert@ada-amc.eu

Einleitung

Im folgenden Beitrag soll ein Überblick über die Entwicklung des Fachgebiets Beschallungstechnik gegeben werden. Dabei werden die historische Entwicklung der wichtigen Komponenten erläutert sowie Anwendungen dargestellt. Auch werden eigene Beiträge zur Entwicklung des Fachgebietes sowie zu akustischen Simulationen erörtert.

Die Darlegungen gliedern sich wie folgt:

- Technik im 19. Jahrhundert
- Wandler und Verstärker 1900 bis 1930
- Lautsprecher 1915 – 1940
- Lautsprecherentwicklung nach 1945
- Beschallungsdesign ab 1950
- Eigene Beiträge ab 1975
- Moderne Computersimulation der Beschallung und neue Lautsprechertypen ab 1990
- Neue Aufgaben der Beschallung seit 2000
- Komplexe Beschallungslösungen in letzter Zeit

Der Begriff Beschallungstechnik hat sich erst nach dem zweiten Weltkrieg eingeführt, die damit verbundene Anlagentechnik ist aber seit 100 Jahren weltweit in Gebrauch.

Um eine Beschallungsanlage aufzubauen, mussten die einzelnen Komponenten zuerst erfunden und dann so kombiniert werden, dass sie eine Anlage ergaben. Die drei grundsätzlichen Bauteile einer Beschallungsanlage sind:

- 1) Ein Gerät, das die akustischen Signale aufnimmt und in ein elektrisches Signal **verwandelt**.
- 2) Eine Komponente, die das elektrische Signal **verstärkt** und entsprechend auch regelt.
- 3) Ein Gerät, das die elektrischen Signale in akustische Schwingungen **zurückverwandelt** und diese dann noch hörbar abstrahlt.

Mit anderen Worten braucht man ein Mikrofon, einen Verstärker und einen Lautsprecher. Mikrofon und Lautsprecher sind Schallwandler und basieren auf unterschiedlichen Techniken wie dem

- Elektrodynamischen Prinzip
- Elektrostatischen Prinzip
- Piezoelektrischen Prinzip u.a.

Beim Lautsprecher dominiert das elektrodynamische Prinzip, beim Mikrofon das elektrodynamische und das elektrostatische Prinzip

Entwicklungen im 19. Jahrhundert

Die Erfindung des Telephons ist ein wesentlicher Faktor für die Entwicklung des Mikrofons und des Lautsprechers. 1861 baute **Philipp Reis** sein **Telephon** unter Verwendung mechanisch-magnetischer Wandler (Abbildung 1):

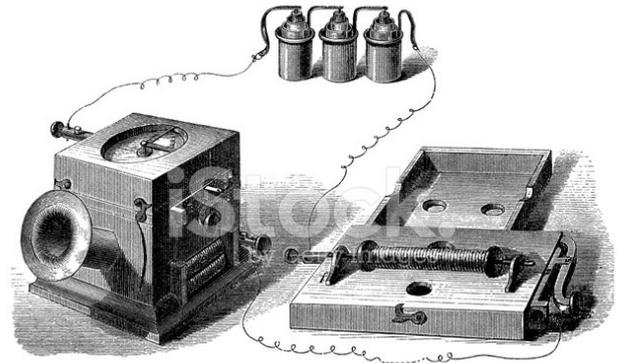


Abbildung 1: Reis'sches Telephon mit einem Kontakt-Mikrofon und einer schwingenden Stricknadel

Ein mitschwingender Holzdeckel verstärkte die abgestrahlten Signale und stellte somit einen ersten Telephonlautsprecher dar. Reis konnte Signale nur in eine Richtung übertragen.

Als Erfinder des **Kohlemikrofons** wird oft David Edward Hughes um 1875 genannt (Abbildung 2):

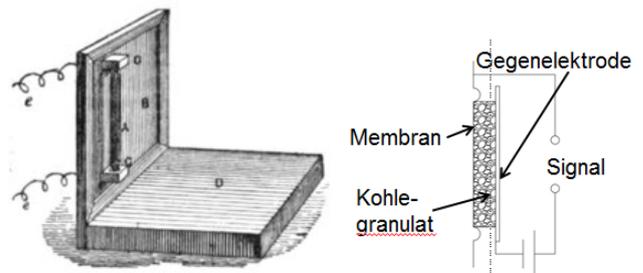


Abbildung 2: Durch Druckschwankungen des Schalls Änderungen eines elektrischen Übertragungswiderstandes einer hinter der dünnen Membran liegenden Kohlegranulatschicht.

Ein auf Gegensprechen funktionierendes Telefon stellte Joseph Bell 1876 vor. Er verwendete noch elektromagnetische Wandler (Abbildung 3):

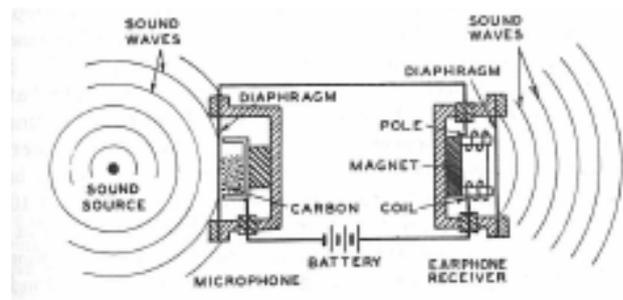


Abbildung 3: Bell'sches Telephon, Sender und Empfänger noch identisch

Ein erstes elektrodynamisches Mikrofon erfand Werner von Siemens im Januar 1878. Der Wandler konnte sowohl als Sendeteil (Mikrofon), als auch als Telefonhörer bzw. Lautsprecher eingesetzt werden.

Dieses nach dem Tauchspulenprinzip arbeitende, anfangs recht schwere Mikrofon (33 kg!) hätte man auch als Lautsprecher mit gutem Klang einsetzen können. Leider gab es noch keine Verstärker (Abbildung 4):

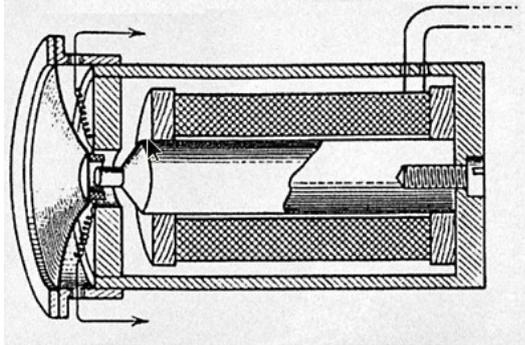


Abbildung 4: Elektro-dynamisches Telefon von Werner von Siemens

Komponenten der Beschallung 1895 - 1915

a) ‚Laute Sprecher‘

Den ersten Lautsprecher nach dem Tauchspulenprinzip baute der Brite Oliver Lodge im Jahre 1898, der Prototyp aller späteren Lautsprecher (Abbildung 5):

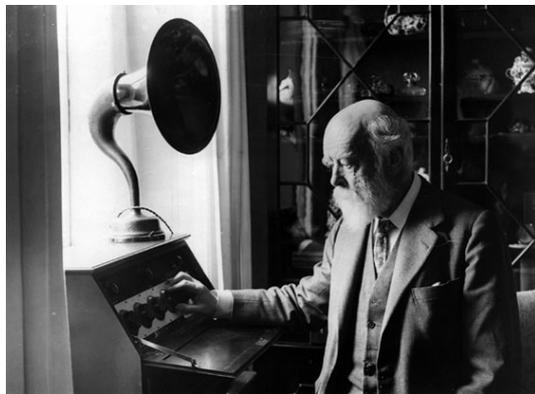


Abbildung 5: Elektro-dynamischer Lautsprecher von O. Lodge

b) Erste Elektronenröhren

Die erste brauchbare Elektronenröhre, anfangs entwickelt für die in Anwendung kommenden Detektorempfänger, wurde 1906 von Lee DeForest als ‚Audionröhre‘ (auch Triode genannt) vorgestellt (Abbildung 6). Sie wurde später auch im Impedanzwandler von Kondensatormikrofonen und in Signalverstärkern eingesetzt:

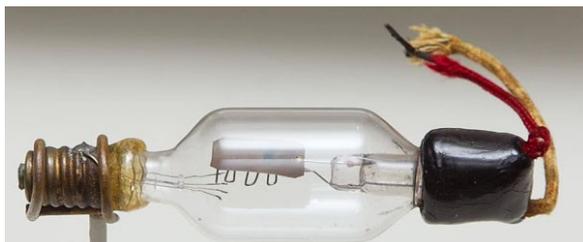


Abbildung 6: Audionröhre (auch Triode genannt)

c) Kondensatormikrofon

1915 stellte E.C. Wente ein Kondensatormikrofon vor, dessen Aufbau dann 1920 patentiert wurde. Dieser Mikrofontyp nahm eine stürmische Entwicklung und 1928 führte

G. Neumann sein legendäres Mikrofon CMV3 („Neumann-Flasche“, Abbildung 7) ein:



Abbildung 7: Kondensatormikrofon CMV3

Erste Beschallungen ab 1915

a) Beschallungen mit elektro-dynamischen Lautsprechern des Magnavox-Systems



Abbildung 8: Sängerin in der Fifth Liberty Loan in New York im Jahre 1915

Das erste dokumentierte Beispiel einer röhrenbasierten Beschallungsanlage mit dem **Magnavox System** (10W Leistung!) ist ein Weihnachtskonzert für **100.000 Personen am 24. Dezember 1915** in der San Francisco City Hall.

US-Präsident Woodrow Wilson nutzte 1919 eine **Magnavox Anlage** um sich an **75.000 Menschen** in San Diego zu richten (Abbildung 9):



Abbildung 9: Ansprache von Präsident Wilson 1919

b) Verwendung elektromagnetischer Hornstrahler

1919 Anwendung von 112 Horntrichter für 10.000 Personen in Victory Liberty Loan NY von Western Electric (Abbildung 10). Erstmalsige Bezeichnung als PA-Anlage.

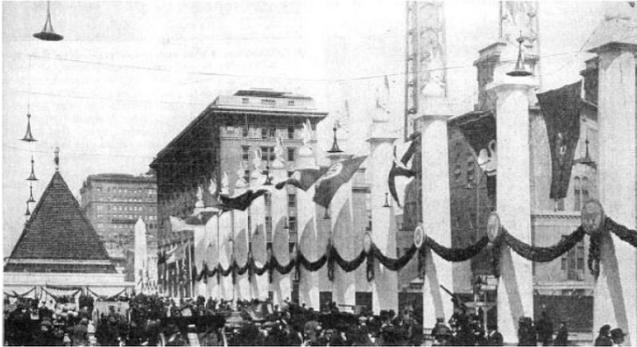


Abbildung 10: Abgehängte elektromagnetische Hornstrahler

c) Einsatz von Hornstrahlern 1924/28 in Stadien

Einsatz von elektrodynamischen Hornstrahlern am Spielfeldrand bei Fußballturnieren 1924 in Paris und 1928 in Amsterdam (Abbildung 11):



Abbildung 11: Elektrodyn. Hornstrahler am Spielfeldrand

Lautsprecherentwicklungen ab 1925

In dieser Zeit wurden neue Lautsprechertypen entwickelt. Hierzu zählt der Blatthaller von Riegger (Abbildung 12), bei dem auf einer größeren Membranplatte stromdurchflossene Kupferbänder mäanderförmig montiert waren. Diese tauchten in ein Magnetfeld ein. Der Signalfluß in dem Kupferband führte dann zur Auslenkung der Membranplatte. Die Abmaße der Platte bestimmten die untere Übertragungsfrequenz, bei 60 cm Breite waren das etwa 400 Hz. Weitere Lautsprecher arbeiteten mit einer Riffelfalte oder als Faltkonus zur Schallabstrahlung. Siemens & Halske setzten 1928 auch Bändchenlautsprecher ein.

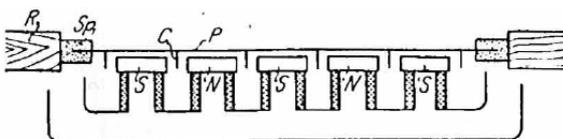


Abbildung 12: Schnittdarstellung des Blatthallers

Erste theoretische Arbeiten zur Schallabstrahlung wurden bereits 1927 von Heinrich Stenzel publiziert [1]. In Abbildung 13 sind Richtdiagramme einer Kolbenmembran dargestellt:

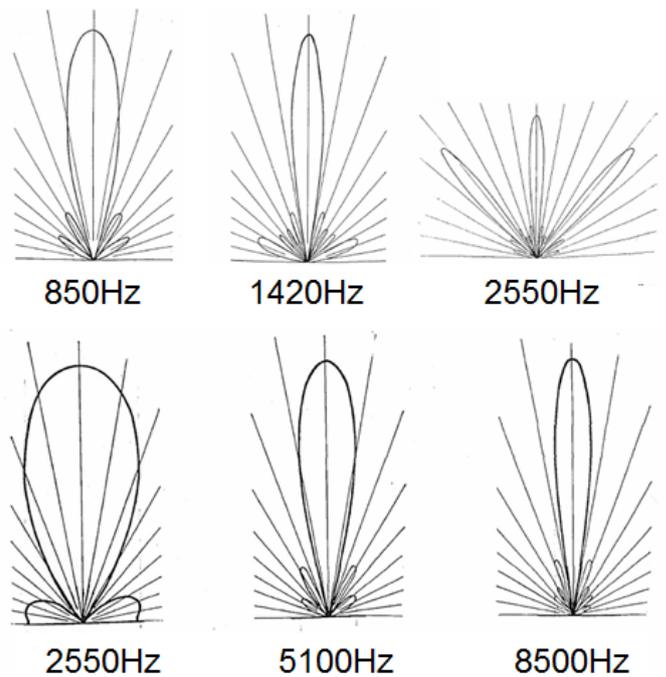


Abbildung 13: Richtdiagramme einer Kolbenmembran

Beispiele von Lautsprechern aus dieser Zeit sind in der Abbildung 14 zu sehen:

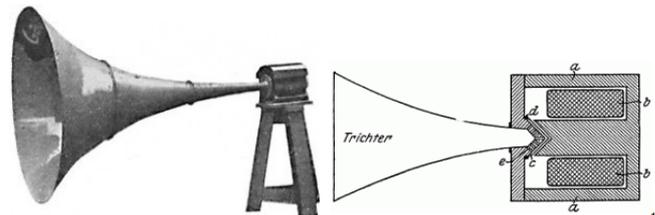


Abbildung 14: Hornlautsprecher 1925 – 1930

Lautsprecher für Massenveranstaltungen im dritten Reich:

Diese Massenveranstaltungen fragten nach Neuentwicklungen wie Rund- oder Pilzstrahler (Abbildung 15). Beim Pilzstrahler wurde der Schall nach oben abgestrahlt und dann über einen Konus nach unten abgelenkt.

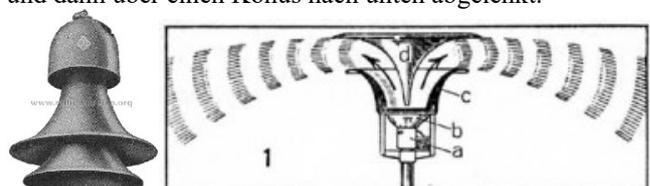


Abbildung 15: Rund- und Pilzstrahler

Erste Designanweisungen für Lautsprecher- und Mikrofonanordnungen sind ab 1935 von R. Petillon[2], F. Bergtold[3] und anderen Autoren zu finden, siehe Abbildung 16:

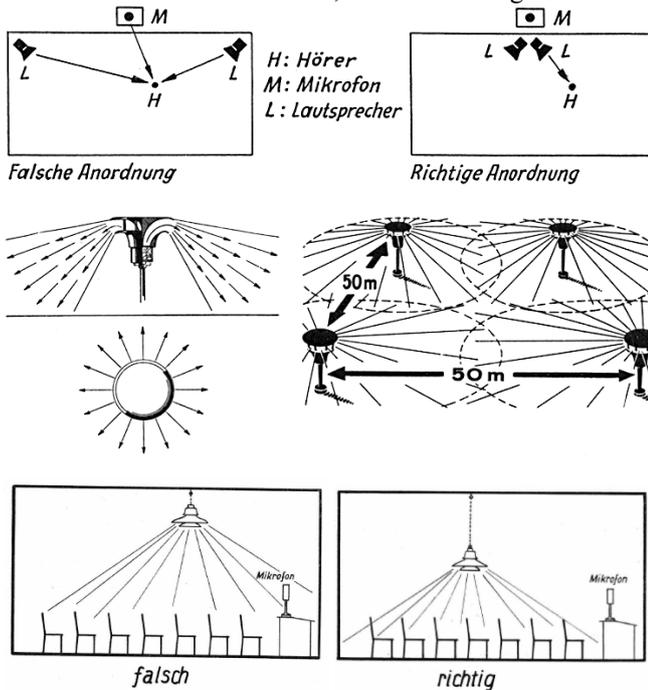


Abbildung 16: Beispiele von Designhinweisen

Auch fanden in dieser Zeit bereits erste Berechnungen von Verstärkerleistungen statt. Abbildung 17 zeigt den Einsatz von solchen Pilzstrahlern (Telefunken) mit „guten Klangeigenschaften bei der Übertragung von Ansprachen und Musik“ (1934 Nürnberg).

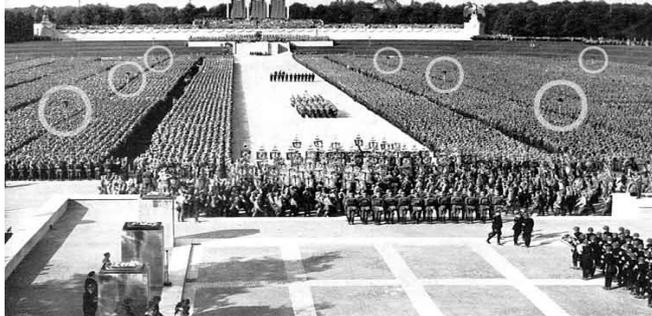


Abbildung 17: Beschallung zum sogenannten Reichsparteitag

Es wurden 45 verteilte Pilzlautsprecher (insg. 1.200W) und 4 Kondensatormikrofone CMV3 von Neumann für ca. 120.000 Aufmarschierte verwendet.

Für die Beschallung während der Olympischen Spiele 1936 in Berlin wurden neuartige Lautsprecher nach dem sogenannten Löschprinzip entwickelt. Das Prinzip geht auf Heinrich Benecke [4] zurück, siehe Abbildung 18.

Dabei sind zwei Strahler auf einem Mast gegeneinander angeordnet. Dadurch löscht sich der Schall auf der Mittellinie 5 in nachfolgender Abbildung oben aus und nur der nach unten abgestrahlte Schallanteil wird im Zuschauerbereich wirksam. Die Pegelabsenkung über der Entfernung verhindert Echosstörungen. Während der Olympischen Spiele wurden für die 100.000 Zuschauer im Stadion 36 solche 50 W-Strahler auf 7 m hohen Masten im Abstand von 50 m zueinander eingesetzt (Abbildung 19). Wegen Echos (Lee effect) spielte das Orchester in einem separaten Pavillon.

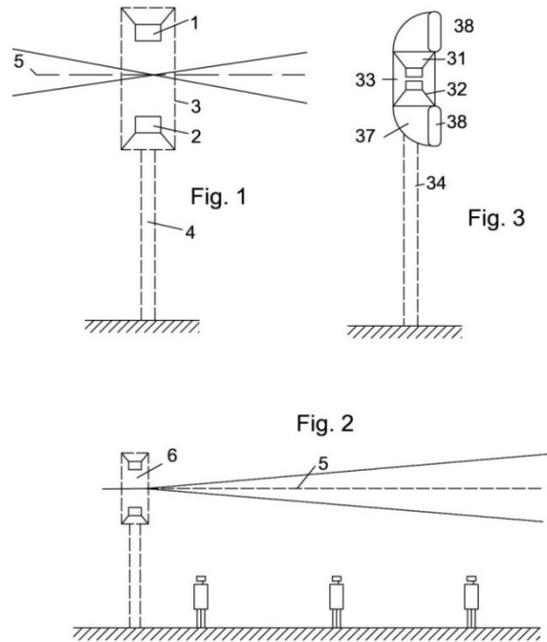


Abbildung 18: Löschstrahler-Prinzip von H. Benecke



Abbildung 19: Beschallung des Olympia-Stadions in Berlin mit 36 Löschstrahlern im Jahre 1936

Abbildung 20 zeigt die zentrale Verstärkerzentrale (Leistung für das Stadion insgesamt 1.800W):



Abbildung 20: Verstärkerzentrale für alle Spielstätten

Harry F. Olson 1940

In den USA erschien 1940 von Harry F. Olson das Fachbuch „Architectural Engineering“ [5], was Beschallungslösungen in großen Räumen, Schulaulen und Versammlungsstätten erläuterte. Er unterschied bereits zwischen zentraler und dezentraler Beschallung (Abbildung 21) und gab nun auch Richtdiagramme von üblichen Punkt- und Linienstrahlern an (Abbildung 22).

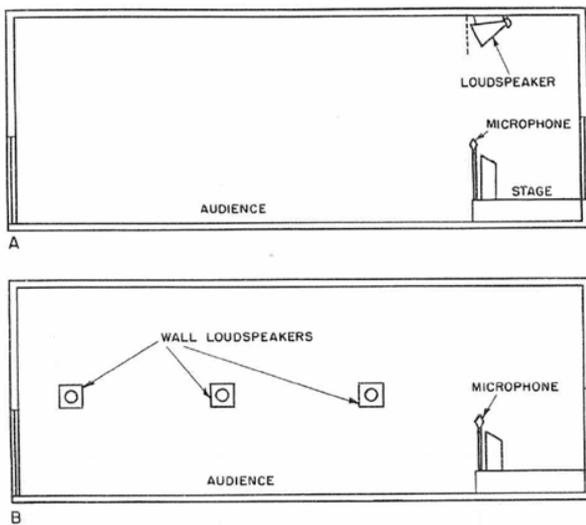


Abbildung 21: Zentrale (A) und dezentrale (B) Beschallung

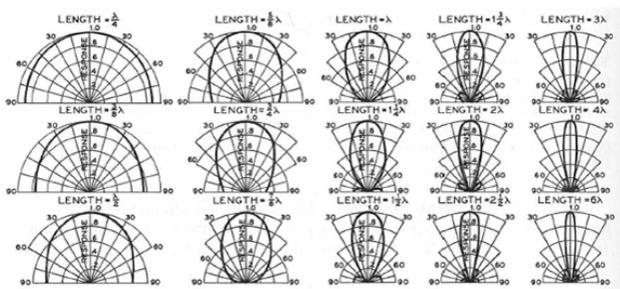


Abbildung 22: Linienstrahler, Frequenzmuster von 85 bis 2040 Hz

Lautsprecher nach 1945

Vereinfacht kann gesagt werden, daß in den USA Hornlautsprecher (Abbildung 23) und in Europa, dabei insbesondere in Deutschland, Schallzeilen (Abbildung 24) dominierten:

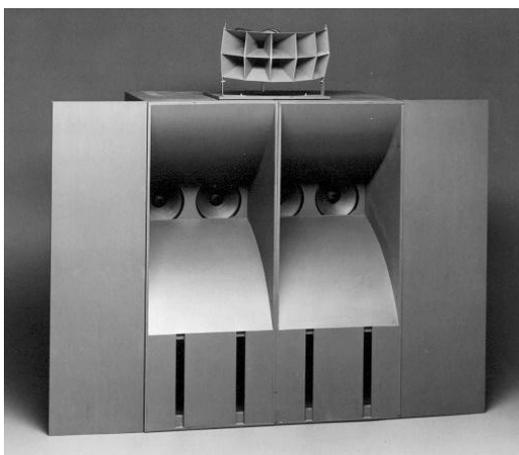


Abbildung 23: Fa. Altec, A2 Voice of the Theatre

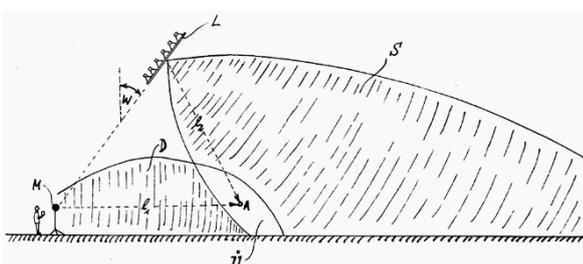


Abbildung 24: Schallzeilenanordnung von Siemens & Halske [6]

Somit kamen sowohl Schallzeilen als auch Hornsysteme in Kongreßzentren, Kirchen, Stadien aber auch in Kinos zur Anwendung. Bündelungsuntersuchungen von Lautsprechern wurden aber noch mit Spiegeln und Licht durchgeführt (Abbildung 25):

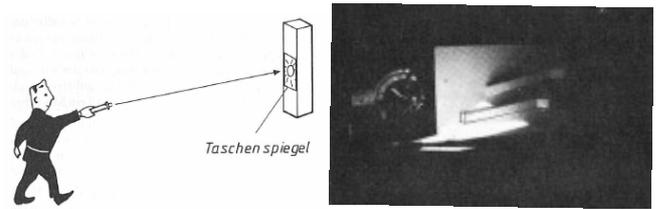


Abbildung 25: Lautsprecheresetup mit Spiegeln und Licht

1951 war ein Jahr mehrerer Veröffentlichungen, die entscheidenden Einfluß auf die Entwicklung der Beschallungstechnik nahmen. Das war zum einem die Berechnung des Bündelungsgrades von Schallzeilen [7], vgl. Abbildung 26:

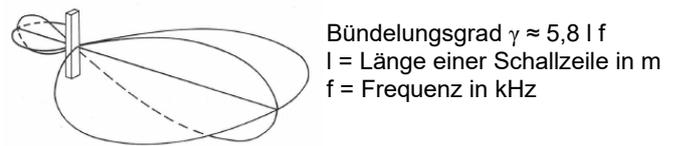


Abbildung 26: Bündelungsgrad nach Benecke/Sawade

Ein weiterer Meilenstein war die Ermittlung des Präzedenzeffektes nach Haas ebenfalls 1951 [8], siehe Abbildung 27:

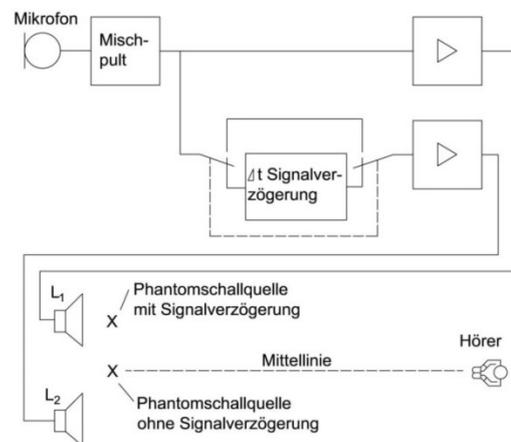


Abbildung 27: Schaltungsaufbau zur Findung des Haas-Effektes

Es wurde von Haas festgestellt, daß ein um 10...40 ms verzögerter Schall bis zu 10 dB lauter als der unverzögerte Originalschall sein kann, vgl. Abbildung 28:

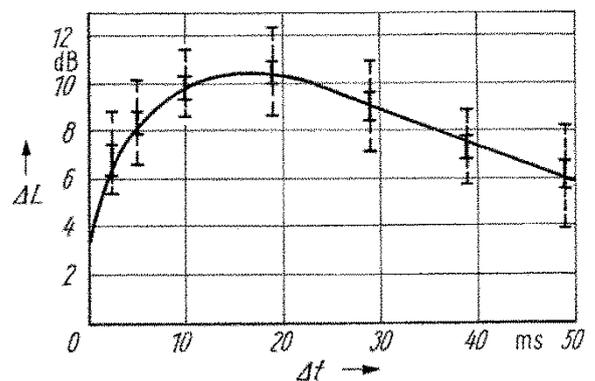


Abbildung 28: Relation Pegel – Verzögerung beim Haas-Effekt

Das wird intensiv bei modernen Beschallungslösungen verwendet, da hier eine Ortung des akustischen Geschehens an den z.B. in einem Deckenbereich befindlichen Lautsprecher verhindert werden kann.

Neue Erkenntnisse zur Beschallungstechnik 1955 - 1970

Herbert Petzoldt veröffentlichte 1957 eine Fachbuchreihe Elektroakustik und darunter den Band 4: Grundlagen der Beschallungstechnik [9]. Er erläutert Beschallungslösungen für Stadien, Theater, Konzertsäle u.a. In Abbildung 29 sind Beispiele dazu zu sehen:

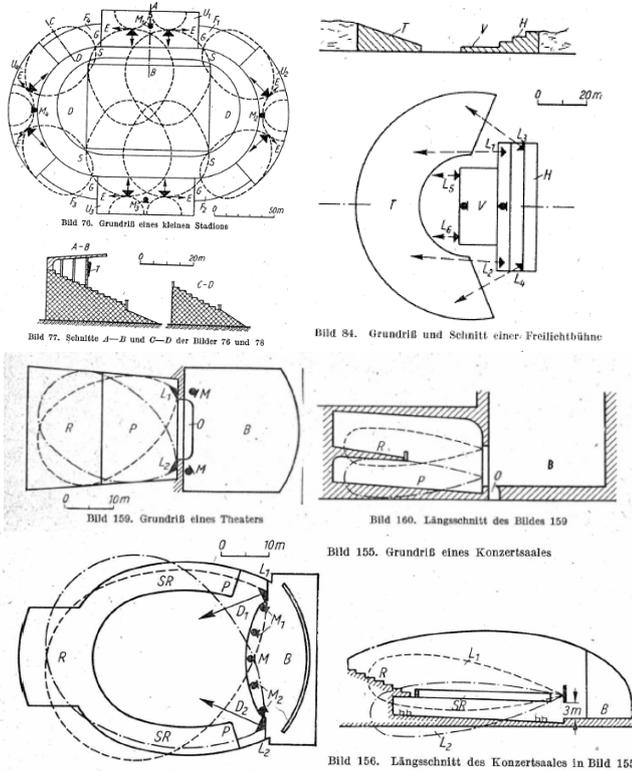


Abbildung 29: Beispiele von Beschallungslösungen

H. Petzoldt beschreibt auch Verzögerungsgeräte mittels Rohrverzögerung bis 100 ms, aber auch schon solche mit einer Bandschleifenverzögerung bis 3 s. Quantitativ erfaßt er die Richtwirkungen von Schallzeilen verschiedener Länge und Zusammenstellung, siehe Abbildung 30.

Form der Gruppe	Anordnung der Systeme	Form der Schallscheibe in der Ebene E für mittlere Frequenzen	Faktor Γ
1×6			2,4
1×12			3,5
1×24			4,9
2×6			3,5
2×12			4,9
4×6			4,9
6×6			6
4×12			6,9
6×12			8,5
12×12			12

Abbildung 30: Schallzeilenrichtwirkung und -faktor Γ

Dabei werden Richtfaktoren Γ für den Sprachbereich zwischen 500 und 1000 Hz berechnet. Außerdem gibt Petzoldt klare Anweisungen zur Berechnung der notwendigen Verstärkerleistungen.

Harry F. Olson erläutert 1959 den Einsatz von Verzögerungstechnik in Beschallungsanlagen noch bei Verwendung von Rohr-Delay, aber auch schon Bandschleifenverzögerung [10] (Abbildung 31):

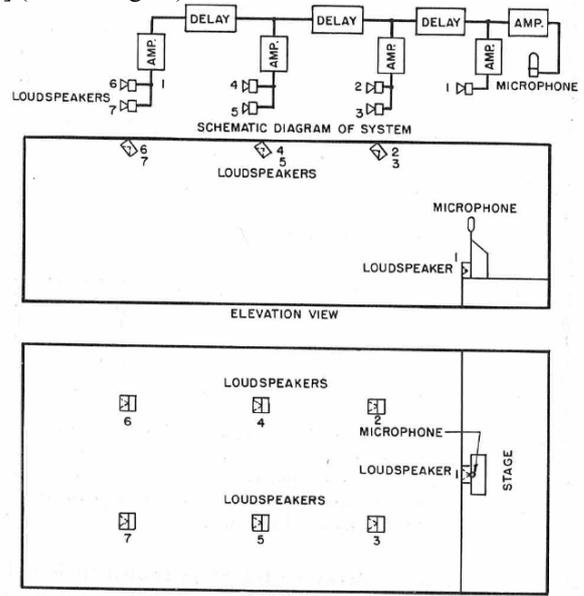


Abbildung 31: Beschallung mit Delay nach H. F. Olson

Erste professionelle Verzögerungstechnik mittels Bandschleifen steht ab 1960 zur Verfügung. In einem Prospekt der Philips Nachhallmaschine EL 6911 [11] stehen als Anwendungen u.a.:

1. Verbesserung der Akustik existierender Konzertsäle
2. Erzeugung spezieller Effekte z.B. für eine Kirchenakustik in Opernaufführungen.
3. Erzeugung akustischer Effekte bei Radio- und Fernsehübertragungen
4. Schallverzögerung bei Beschallungsanlagen zur Erhöhung der Verständlichkeit eines Redners

Solche Verzögerungsgeräte (Abbildung 32) kamen nun zunehmend zum Einsatz:



Abbildung 32: Nachhallmaschine EL 6911 von Philips

Ein repräsentatives Beispiel war der Einsatz von zwei Philips EL 6911 zur Nachhallsteigerung im 1961 eröffneten Kongreßpalast des Kreml in Moskau.

David L. Klepper hat in den 60er Jahren eine Reihe von Veröffentlichungen besonders in der Audio Engineering Society gemacht, die den Einsatz der Verzögerungstechnik auch bei üblichen Beschallungsaufgaben beschreiben [12], siehe Abbildung 33:

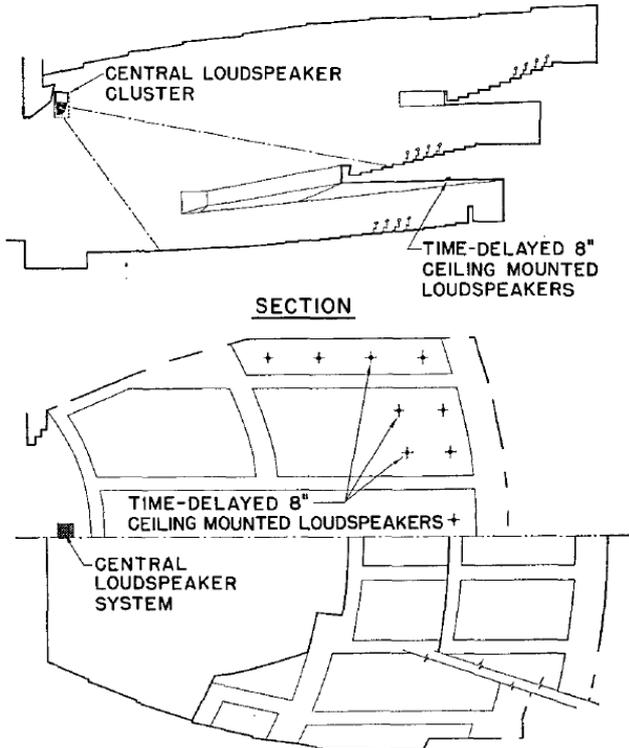


Abbildung 33: Verzögerungstechnik im Theater (1967)

Neue Schwerpunkte der Beschallung ab 1970

Es wurden zu diesem Zeitpunkt neue Maßstäbe gesetzt:

- Erzielung notwendiger Sprachverständlichkeiten
- Keine ungewöhnlichen Signalverzerrungen dürfen auftreten, etwaige lineare Verzerrungen sollten mit den üblichen raumakustischen Bedingungen korrelieren
- Keine zusätzliche Störsignale wie Rauschen oder Knackgeräusche
- Es darf keine akustische Rückkopplung auftreten.
- *Visuelle und akustische Lokalisation von Schallquellen (z.B. Sänger) und deren Signale (verstärkte Originalstimme) sollten zusammenfallen*

Besonders der letzte Punkt war neu und führte weltweit zu neuen Überlegungen für den optimalen Einsatz von Verzögerungstechnik.

In den USA veröffentlichte Don Davis 1975 das Fachbuch „Sound System Engineering“ [13], in dem erstmalig Pegelberechnungen für Direkt- und Gesamtschall bei Berücksichtigung von akustischen Rückkopplungsschwellen zu finden sind. Er prägte die Terms „Needed Acoustic“ und „Potential Acoustic Gain“ und forderte erstmalig von den Lautsprecherherstellern zur Schallpegelberechnung gemessene Polardiagramm Daten, siehe Abbildung 34.

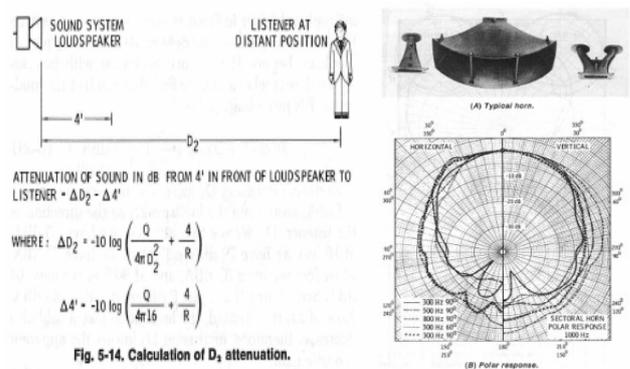


Abbildung 34: Erste Berechnungen und Polardaten

In Deutschland wurden dagegen 1978 noch Fachbücher zur Beschallungstechnik veröffentlicht, deren Inhalt kaum über die Darstellungen von H. Petzoldt von 1957 hinausgingen. Ende der 70er Jahre wurden die Band-Delayergeräte durch digitale Geräte verschiedener Hersteller abgelöst, vgl. Abbildung 35:



Abbildung 35: Verzögerungsgerät TDU7000 der Fa. AKG

Das Vorhandensein dieser Technik initiierte den Autor sich unter Anwendung dieser Technik mit einer neuartigen Beschallungslösung unter Sicherung der akustischen Schallquellenortung im Rahmen seiner Promotion zu beschäftigen. Zusammen mit Prof. Reichardt und anderen Kollegen wurde das Laufzeit- oder Deltastereofonie-Konzept entwickelt, vgl. Abbildung 36.

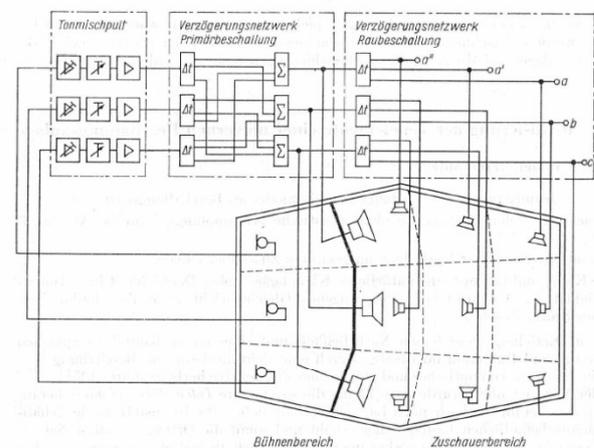


Bild 13.4. Prinzipielle Darstellung der Mikrofone in den Quellenbereichen, der Signalbehandlung und der Lautsprecheranordnung in einem Laufzeitstereofoniesystem

Abbildung 36: Prinzipschaltung Deltastereofonie DSS

Dabei ist die Bühne eines Saales oder Freifläche in Teilbühnen aufgeteilt, deren Lage aber nur dem zuständigen Toningenieur bekannt ist. Jedes Signal in diesen Teilbühnen wird nun einer Mischmatrix (mit Pegel- und Delay-Einstellungen) zugeführt, die am beliebigen Hörerplatz im Saal allen beschallenden Lautsprechern mit richtigen Pegeln und

Delays versorgt. Dadurch wird am Hörerplatz bei gleichbleibendem Pegel immer die Ortung zur Originalschallquelle sichergestellt. Der Haas-Effekt garantiert, daß auch bei wandernder Quelle von einer Teilbühne zur benachbarten die Ortung nicht verlorengeht.

Das Verfahren ist im In- und Ausland patentiert worden [14]. Die erstmalige Anwendung der Deltastereophonie einschließlich der komplexen Verzögerungstechnik erfolgte 1976 im Großen Saal des Palastes der Republik in Ostberlin für insgesamt 6.000 Lautsprecher, siehe Abbildung 37. Alle Berechnungen und Optimierungen der Delay- und Pegel-einstellungen wurden noch ohne Computer mit der Hand durchgeführt.



Abbildung 37: DSS im Großen Saal des Palastes der Republik

Zur gleichen Zeit entwickelte Prof. G. H. Plenge ein Beschallungssystem für den Saal 1 im 1979 eröffneten ICC in Westberlin [15]. In den in der Abbildung 38 sichtbaren Ballons sind Lautsprecher über Verzögerungsstrecken angeordnet, die so aktiviert werden, daß die Ortung zum Bühnengeschehen erhalten bleibt:



Abbildung 38: Beschallung im Saal 1 des ICC

Im Jahr 1981 erschien das Buch „Grundlagen der Beschallungstechnik“ von Ahnert/Reichardt [16]. In diesem Buch wurden die wesentlichen Ergebnisse meiner Dissertation ergänzt durch wertvolle Abschnitte von Prof. Reichardt dargelegt. Es wurden die wichtigsten Eigenschaften der elektroakustischen Wandler und ihr Einfluß auf die Beschallungstechnik dargestellt. Weiterhin erfolgte die Berechnung der erzielbaren Schallpegel in Innenräumen wie im Freien, sowohl für einzelne Verstärkerkanäle wie für komplexe Anordnungen, siehe Abbildung 39. Es wurde der Einfluß der akustischen Rückkopplung berücksichtigt.

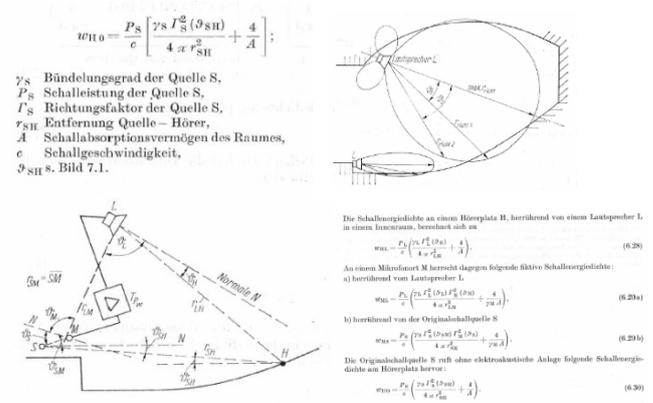


Abbildung 39: Berechnungen aus Buch Ahnert/Reichardt

Neben Anwendungen des beschriebenen Deltastereophonieverfahrens in Ostberlin, Prag und Sofia erfolgte auf einem Heimcomputer ‚Sinclair Spectrum‘ die Berechnung der Pegel- und Delayverhältnisse 1984 für die Seebühne in Bregenz/Österreich. Mit programmtechnischer Unterstützung von Dr. Rainer Feistel wurde die Delaymatrix für die 100 m breite Seebühne für damals „nur“ 4000 Zuschauer errechnet. Lautsprecher wurden in der Dekoration versteckt und das DSS-Verfahren sicherte, daß die Solisten auch bei Bewegung immer von den Zuschauern geortet werden konnten, siehe Abbildung 40.

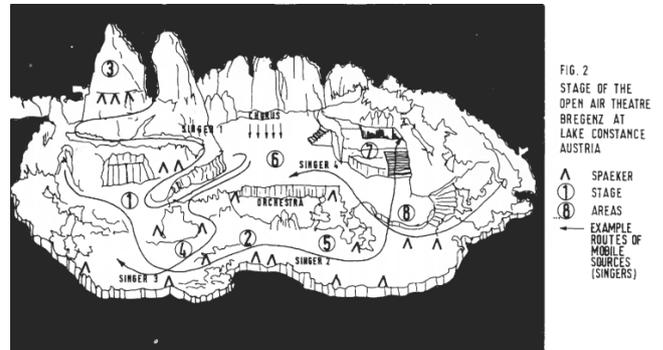


Abbildung 40: „Zauberflöte“ mit DSS auf der Seebühne 1985

Der Erfolg des DSS-Verfahrens auch an anderen Orten führte dazu, daß die Fa. AKG in Wien einen speziellen DSS-Prozessor DSP610 entwickelte [17]. Dieser Prozessor hatte 6 Ein- und 10 Ausgänge, siehe Abbildung 41. Somit konnten auf Teilbühnen bis zu 6 Solisten parallel bewegt werden, wobei deren Mikrofonsignale den 10 Beschallungsgruppen zugeführt wurden. Die Umschaltung von Teilbühne zur benachbarten Teilbühne erfolgte hier nicht durch eine Panorama-Umschaltung von Delay Lines, sondern durch knackfreies Umschalten der digitalen Delay-Einstellungen. Das Gerät kam in Japan, USA und Rußland zum Einsatz.

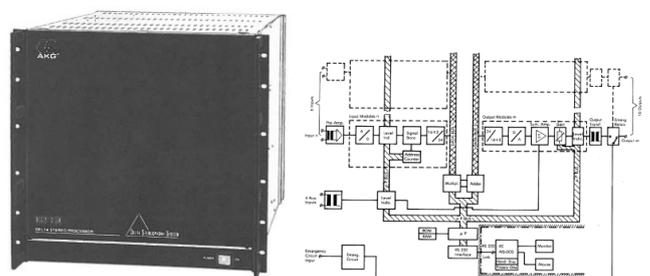


Abbildung 41: DSS-Prozessor DSP 610 der Fa. AKG

Für diesen Prozessor mußten projektspezifisch die jeweiligen Datensets in einem Simulationslauf vorausberechnet werden, anfangs mit einem Heimcomputer und ab 1988 mittels eines neuartigen Computerprogramms ADAS, das als Vorläufer der Software EASE betrachtet werden kann, dazu Abbildung 42.

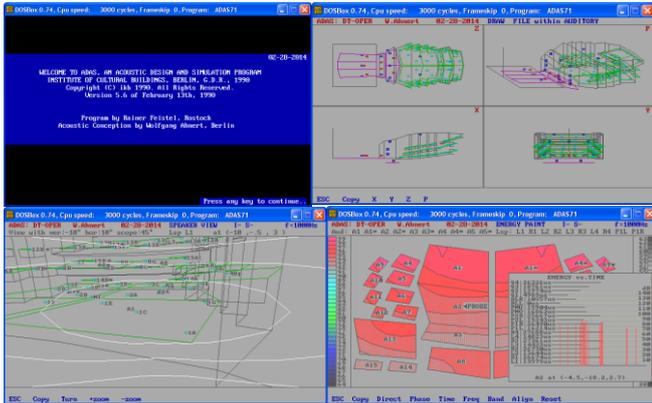


Abbildung 42: ADAS Simulation und Berechnungsbeispiele

Mit dem Programm ADAS wurden nun die projektspezifischen Datensets berechnet und in Form von Koeffizienten dem Prozessor DSP610 übergeben, der dann nach erstellten Bühnenbild und Sichtbarmachung der Teilbühnen (6 an der Zahl im Abbildung 43) die 6 Quellen farblich markiert zeigte. Mit Maus oder Joystick konnten dann die Quellen bewegt werden (Tracker gab es noch nicht). Für die aktive Quelle 2 sind die aktuellen Pegel- und Delaywerte der 10 Lautsprecheranordnungen in der Abbildung 43 sichtbar, die sich bei Bewegung der Quelle automatisch anpaßten.

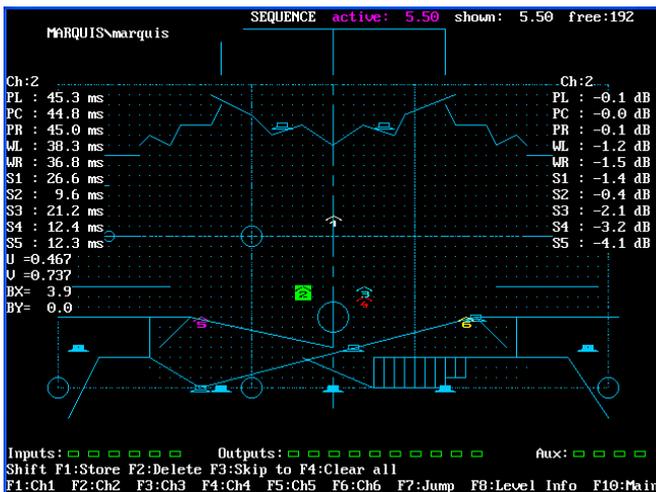


Abbildung 43: Displaydarstellung des DSS-Prozessors DSP610

Software zu akustischen Simulation

Seit 1985 Entwicklung raum- und elektroakustischer Simulationssoftware:

- Bose Modeler seit 1985
- CATT Acoustic seit 1986/87
- Odeon seit 1988
- EASE seit 1990

Ab 1990 Beschallungsplanung mittels Computersoftware:

- Nachhallzeitberechnung
- Direkt- und Gesamtschallermittlung
- Deutlichkeits- und Verständlichkeitsmaße
 - Articulation loss for Consonants
 - Speech Transmission Index STI und RaSTI
- Coverage-Untersuchungen
- Strahlenverlauf und erste Auralisationen

1993 erschien das Fachbuch „Beschallungstechnik – Grundlagen und Praxis“ von Ahnert/Steffen [18]. In diesem Buch wurden die aktuellen Grundlagen des Fachgebiets dargestellt und auch Fallbeispiele behandelt. Außerdem war dem Buch eine Diskette beigelegt, die einen Einblick in das aktuelle EASE Programm zur Berechnung beschallungstechnischer Aufgabenstellungen vermittelte, vgl. Abbildung 44:

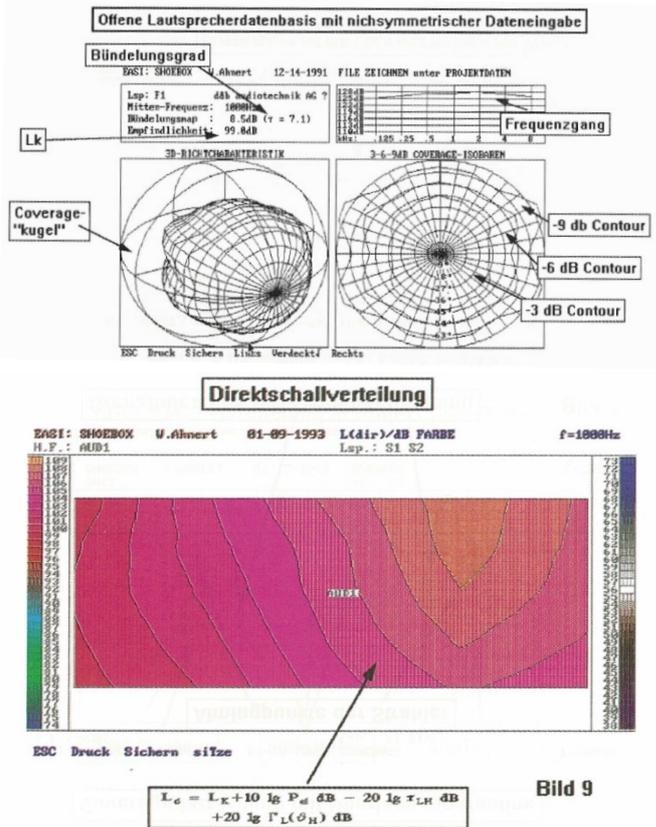


Abbildung 44: Beispielplots aus EASE 1.0

Neue Lautsprechertypen und -formate

Auf der 92. AES-Convention in Wien 1992 stellten C. Heil und M. Urban einen neuen Lautsprechertyp und den damit verbundenen mathematisch-physikalischen Background vor, was zu einer stürmischen Entwicklung moderner Line Arrays führte [19].

Sie faßten zusammen, daß bei Punktquellen mit sphärischer Ausbreitung der Schalldruck mit 6 dB/Entfernungsverdopplung ab nimmt, jedoch bei Linienquellen der Länge l strahlen diese den Schalldruck im Nahfeld zylinderförmig mit ca. 3 dB bei Entfernungsverdopplung ab, vgl. Abbildung 45:

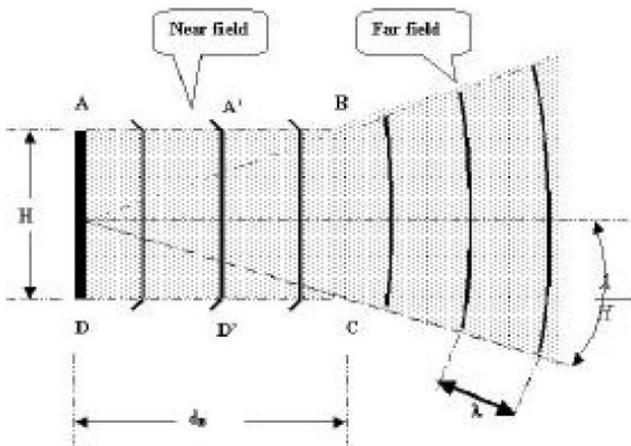


Abbildung 45: Nahfeld bei Line Arrays

Die frequenzabhängige Nahfeldentfernung kann Abbildung 46 entnommen werden:

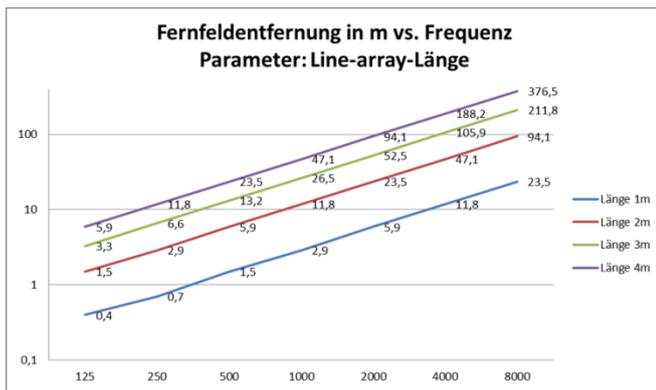


Abbildung 46: Nahfeldentfernung vs. Frequenz

Sofort begann die Produktion von solchen Line Arrays von mehreren Lautsprecherherstellern, vgl. Abbildung 47:



Abbildung 47: Line Arrays: L-Acoustics, JBL und Renkus-Heinz

Ende der 90er Jahre hat Mark Ureda verstärkt die Simulationsberechnungen von Line Arrays vorangetrieben und dazu eigene Simulationstools entwickelt [20], vgl. Abbildung 48. Auch andere Softwarepakete wie EASE haben diese Algorithmen eingeführt.

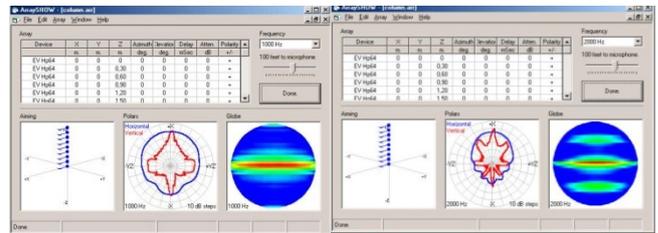


Abbildung 48: Balloondaten-Berechnung nach M. Ureda

Nach 2000 zusammen mit Dr. Stefan Feistel

Es erfolgte die Entwicklung eines neuen Lautsprecherdatenformats für die Computersimulation.

Ein Lautsprecher wurde bis dahin meist durch eine einzige akustische Quelle (Punktquelle) dargestellt. Richtdaten in festen Tabellen (meist zugänglich) beschrieben die Abstrahlcharakteristika des Lautsprechers und waren somit von jedem änderbar.

Problem: Wie erfasst man Daten komplexer ausgedehnter Anordnungen wie:

- Mehrwegsysteme
- Schallzeilen und gerichtete Arrays
- Konventionelle Line Arrays
- Lautsprechercluster und Arrays
- Flach-Lautsprecher

Für das bisherige Datenformat für kugelförmig abstrahlende Punktquellen ergeben sich folgende Amplituden- und Phasendarstellungen (Abbildung 49).

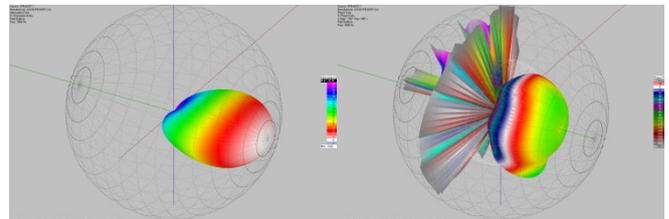


Abbildung 49: Amplituden- und Phasenballon einer Punktquelle

Für die in Abbildung 47 dargestellten Line Arrays wurden Datenformate in Simulationsprogrammen als Dynamic Loudspeaker Library DLL eingeführt, wodurch ein gerichtete Schallabstrahlung simuliert werden konnte, vgl. Abbildung 50:

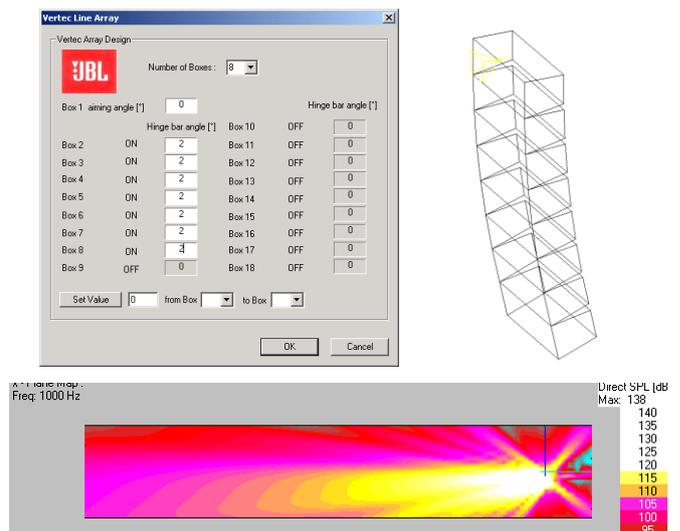


Abbildung 50: DLL-Datensatz und gerichtete Abstrahlung

1998 entwickelte die holländische Fa. Duran Audio als erste sogenannte digital gesteuerte Schallzeilen. Dabei sind die 4“ bis 6“ Woofer fest in einem Gehäuse installiert (teilweise in logarithmischen Abständen) und werden einzeln und frequenzabhängig angesteuert. Bei Duran Audio (heute von JBL vertrieben [21]) wird zwischen DDC und DDS Ansteuerung unterschieden. Bei DDC Ansteuerung (Abbildung 51) werden Parameter gesetzt und die gewünschte Richtwirkung wird erzielt. Im DDS Betrieb beeinflusst die mit Schall zu versorgende Hörerfläche die notwendige Richtwirkung der digital gesteuerten Schallzeile. Mittlerweile werden solche digital gesteuerten Schallzeilen von vielen Herstellern, wie Fohhn, clear voice, Renkus-Heinz, Pan Acoustics u.a. gefertigt.

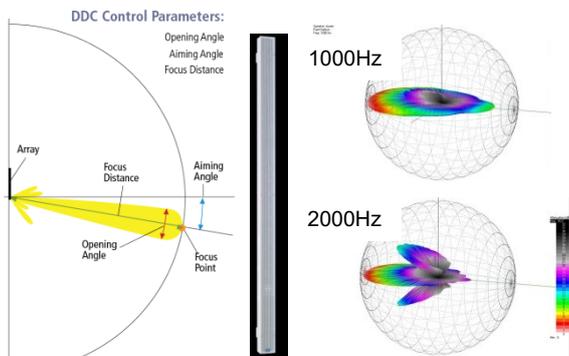


Abbildung 51: Intellivox-Schallzeile von Duran Audio

In der 2005 wieder aufgebauten Frauenkirche in Dresden sind 2 große und 36 kleine Intellivox-Zeilen sehr unauffällig verbaut, vgl. Abbildung 52. Die Sprachverständlichkeit wird in der halligen Kirche (bei mittleren Frequenzen beträgt die Nachhallzeit etwa 4 s) als sehr gut eingeschätzt.

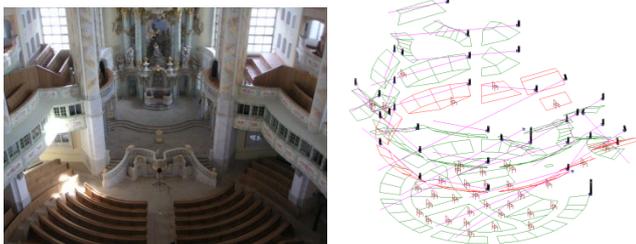


Abbildung 52: Intellivox-Zeilen in der Frauenkirche

Nach 2000 wurde im Softwarepaket EASE das neue Datenformat GLL (Generic Loudspeaker Library) für die Lautsprecher eingeführt. Dieses Format ist auf alle Wandler und Quellen, somit auch auf Mikrofone anwendbar.

Mit bisherigen Daten in Tabellenform gab und gibt es typische Probleme für folgende Lautsprecher:

- Aktive oder schaltbare passive Mehrwegelautsprecher
- Zwei Zweiwegelautsprecher übereinander
- Schallzeilen, mechanisch oder digital gerichtet
- Touring Line Arrays
- Cluster Systeme

Die Erfordernisse beim GLL Modeling sind aber:

- Datenauflösung < Terz
- Einführung der Phaseninformation
- Mechanische Konfigurierbarkeit (Rigging)
- Elektronische Konfigurierbarkeit (Filter)
- Bessere Integration mit der Herstellersteuersoftware

Was ist notwendig zur Erzeugung einer GLL?

Kombination der „Quellen“ in einer Box:

- 3D Lokalisierung aller Wandler / Quellen in der Box
- Definition der Eingangsmatrix (Externe Eingänge -> akustische Ausgänge)
- Verfügbare Filter
- Gehäusezeichnung
- Es entstehen GLL Projekte mit allen notwendigen Angaben und Konfiguration, siehe Abbildung 51.

Es erfolgt dann die Kompilation des GLL Projektes

- Fälschungssichere GLLs entstehen
- Autorisierung erfolgt durch Lautsprecherhersteller

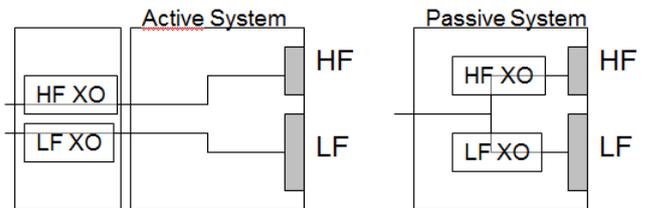


Abbildung 53: GLL Projekte für Zweiwegesysteme

Für ein Line Array Modul können die 3 Wege dann kombiniert werden, Abbildung 54:

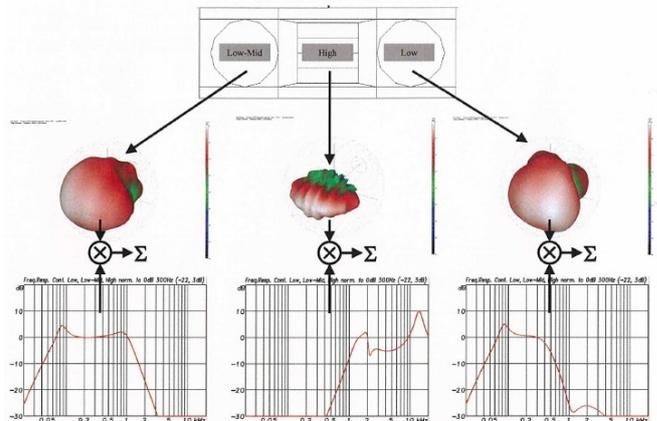


Abbildung 54: GLL-Erzeugung für 3 Wege-Modul, © A. Goertz

Die GLL Daten können als Design- und Analyse-Werkzeug bei der Planung von Beschallungsaufgaben verwendet werden [22].

Nach dem 11. September 2001 verstärkte sich weltweit der Fokus auf Alarmrufsysteme für den Katastrophenfall. Es wurde gefordert:

- Notwendiger Lautstärkepegel
- Notwendiger Frequenzgang, je nach Anwendung
- Hohe Sprachverständlichkeit bei ausreichendem S/N Verhältnis
- Echofreiheit

Es erfolgte die Entwicklung des STIPa Meßsystems im Jahre 2003 und 2004 die Aktualisierung von IEC 60268-16 (Objective Rating of speech intelligibility by speech transmission index). Dabei ergaben sich neue Forderungen an simulierende Softwarepakete bei der Planung von Sprachalarmanlagen. Es wurde jetzt auch die Berücksichtigung von Noise und Masking verlangt. Dies hatte sofort Einfluß auf die Planung der Beschallungsanlagen für die Stadionneu-

und –umbauten zur Fußballweltmeisterschaft in Deutschland 2006. Der Autor nahm an den Planungen für die Stadien in Berlin und München teil und nach Fertigstellung der Arbeiten wurden Vergleichsmessungen in beiden Stadien im unbesetzten Falle durchgeführt, siehe Abbildung 55:

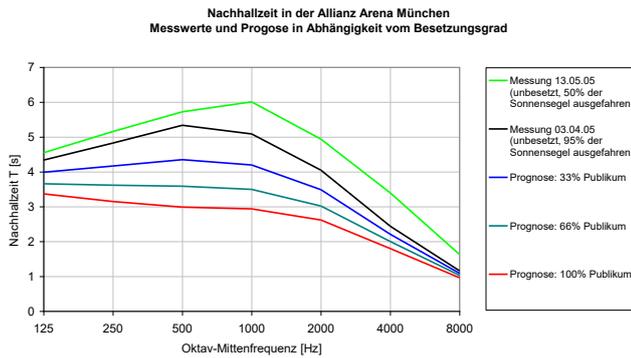


Abbildung 55: Nachhallzeit in der Allianz-Arena München

Aus obiger Abbildung ist ersichtlich, daß die eigentlichen Messungen nur in der leeren Arena gemacht werden konnten, vgl. die zwei oberen Kurven für zwei unterschiedliche Sonnensegelpositionen. Für die unterschiedlichen Besetzungsgrade konnte der Nachhallzeitverlauf nur prognostisch mit einem Simulationsprogramm vorhergesagt werden. Eine solche Prognose ist natürlich mit Fehlern behaftet. Somit war es nicht überraschend, daß bald danach eine Softwarelösung vorlag, mit der auch im besetzten Zustand der Stadien Messwerte ermittelbar sind.

Diese neue Lösung basiert auf einer Echtzeit-Entfaltung RTD von Signalen im Vergleich mit Referenzsignalen, was nicht nur für typische Meßsignale sondern auch für Sprach und Musiksignale möglich ist, vgl. Abbildung 56:

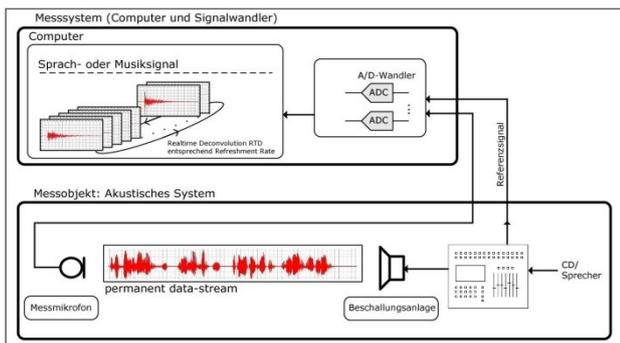


Abbildung 56: Echtzeit-Entfaltung von Sprache und Musik

Die Methode arbeitet wie folgt: Wie üblich in Stadien oder Arena wird zeitlich bis zu drei Stunden vor Spielbeginn mit der Abstrahlung von Musik- und Sprachsignalen (Werbung, Durchsagen, Suchmeldungen, Programmänderungen u.a.) begonnen. Diese Signale werden mit Meßmikrofonen an verschiedenen Stellen im Stadion aufgenommen und dem RTD Algorithmus zugeführt und durch Verwendung des ebenfalls anliegenden Referenzsignals zur Entfaltung gebracht. Mit einer Refreshment-Rate von 10/s stehen dann Impulsantworten dynamisch zur Verfügung, die dann im Postprocessing klassisch ausgewertet werden können. Abbildung 57 zeigt Ergebnisse der Nachhallzeitermittlung in einem Stadion bei unterschiedlichen Besetzungsgraden [23]:

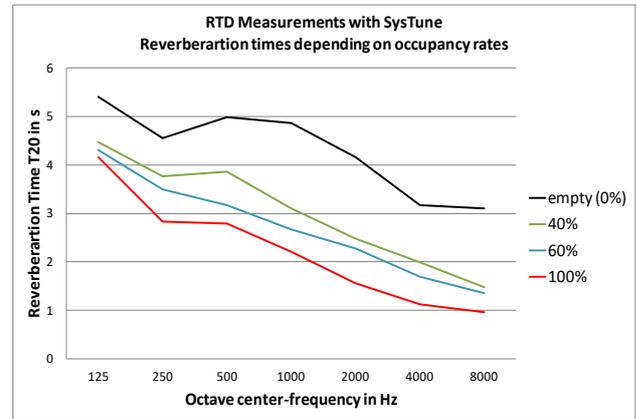


Abbildung 57: Nachhallzeit vs. Frequenz, verschiedene Besetzung

Die Methode wurde auch schon in Theatern eingesetzt [24].

„Extreme“ Anforderungen an Beschallungssysteme

In Vorbereitung des FIFA World Cup in Rußland veröffentlichte die FIFA 2014 neue Bestimmungen an die Beschallungsqualität der Stadien in Rußland. Diese Forderungen müssen mehr als hinterfragt werden [25]. Ausgewählte Forderungen aus der Edition 5, Abschnitt 50.20.20.50. der Technischen Spezifikation für PA-Systeme:

- Geräuschpegel bis zu **110 dB(A) (!!!)**
- Beschallungssystem soll den Geräuschpegel um 6 dB übersteigen können, also maximal **116 dB(A) (!!!)**
- Maximaler SPL soll **125 dB(A) (!!!)** nicht übersteigen!
- Frequenzgang mindestens von 120 Hz bis 5000 Hz, +/- 3 dB.
- STI von > 0.55 im Stadion und für Zwecke der Unterhaltung im Stadion **STI von > 0.75 (!!!)**, Unsinn)

Geräuschpegel bis zu 110 dB(A) sind kaum zu erwarten, Simulationen wurden bisher meist mit 92...95 dB(A) durchgeführt, was auch Messungen entspricht. Dadurch sollen sich Signalpegel von 116 dB(A) und maximale um 125 dB(A) ergeben, was eindeutig gesundheitsgefährdend ist und praktisch nicht umgesetzt werden wird. Die STI Werte um 0.55 erscheinen realistisch, nicht jedoch der hohe geforderte Wert von 0.75 für Unterhaltungsshows im Stadion. Dieser wird bei den Abmaßen der Stadien, der herrschenden Nachhallzeiten und wegen der hohen Schalldrücke nicht erreicht werden können. Bei den hohen Schallpegeln setzt ganz stark der Maskierungseffekt ein, der den STI-Wert limitiert. Darüber wird aber in der Spezifikation aber nicht gesprochen.

In EASE wurden Simulation mit verschiedenen Lautsprechertypen für das Lushniki-Stadion in Moskau durchgeführt:



Abbildung 58: Lushniki-Stadion mit STI-Simulation in EASE

Dabei wurden Simulationswerte von 0.55 für den STI erzielt, siehe vorhergehende Abbildung 58. Kürzlich stattgefundenen Einmessungen bestätigten die simulierten Verständlichkeitswerte.

Der Autor hofft, daß diese teilweise unsinnigen Werte für Schallpegel und Verständlichkeit für den nächsten World Cup in Qatar 2022 korrigiert werden.

Komplexe Manipulation von akustischen Schallfeldern

In jüngster Zeit ist wieder viel von ‚Immersive Sound‘, von immersiver Beschallung die Rede. Ziel einer solchen Beschallung ist dabei nicht nur eine klanggetreue und dem Raum oder der Umgebung angepaßte Wiedergabe, sondern auch die Lokalisierung der Schallquellen im weitesten Sinne. Wie im Falle von natürlichen Schallquellen will man den Sänger und/oder das Ensemble oder Teile davon auf der Bühne richtig orten, obwohl viele Lautsprecher im Saal an der Schallübertragung beteiligt sind.

Mit der weiter oben beschriebenen Deltastereofonie wurden solche Vorgehensweisen bei der Beschallung in der 80er Jahren propagiert. Wegen der damit verbundenen Kosten besonders mit bei der Nachführung bewegter Quellen (es standen keine Sound Tracker zur Verfügung) blieb das Verfahren nur einzelnen ausgewählten Projekten vorbehalten.

Seit Anfang der 2000er Jahre hat sich aber das TiMax Beschallungsverfahren eingeführt, das eine solche komplexe Manipulation akustischer Gegebenheiten zum Ziel hat [26]. Aus Abbildung 59 ist das Prinzip des Verfahrens erkennbar:

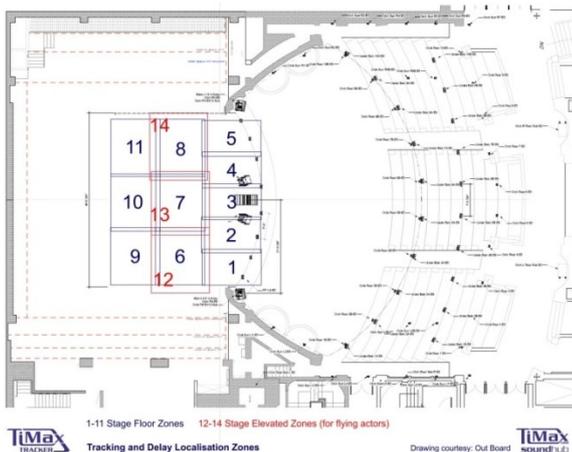


Abbildung 59: TiMax Beschallung von Fa. Out Board

Die Bühne wird wie bei DSS-Verfahren unterteilt in Teilbühnen oder separate Quellgebiete, vgl. auch Abbildung 60:

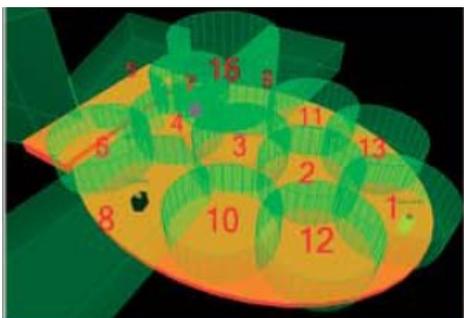


Abbildung 60: Beispiel der Lage der Quellgebiete

Nur dem Beschallungsingenieur ist die Lage der Quellgebiete bekannt. Er wird jedem Signal innerhalb eines Quellgebiets eine Delaymatrix zuordnen, die allen Lautsprechern im Saal je nach Lage und Entfernung die richtigen Pegel und Zeitverzögerungen zuordnet. Dadurch können die Bedingungen des Haas-Effektes eingehalten und die Lokalisation zum Bühnengeschehen gesichert werden.

Die Position eines Sängers oder einer Musikgruppe auf der Bühne wird mit Hilfe eines Trackingsystems ermittelt. Ist die Originalschallquelle als Bezugsschallquelle zu pegelschwach, werden Ortungsmonitore im Bühnenbereich verwendet, siehe Abbildung 61.

Bei der TiMax-Anwendung in der Royal Albert Hall in London 2015 sind bei der „Madame Butterfly“ Aufführung die Bezugslautsprecher zur Unterstützung des Originalschallpegels (muß zu Ortungszwecken nur maximal 10 dB unter dem Pegel der Hauptlautsprecher liegen) unter den Laufstegen untergebracht, siehe Abbildung 61:



Abbildung 61: Lage der Bezugslautsprecher im Bühnenbereich

Die Fa. L-Acoustic propagiert seit kurzer Zeit ein Beschallungsverfahren nach dem L-ISA Design [27], siehe Abbildung 62:

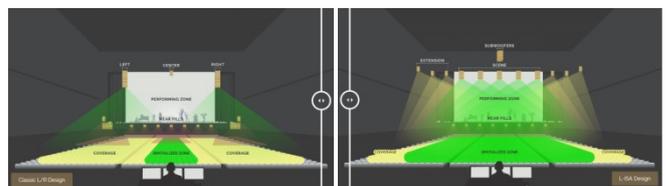


Abbildung 62: L/R Beschallung vs. L-ISA Design

Im klassischen Links/Rechts Design ist sicher eine gute Bedeckung der Hörerflächen erzielbar, eine räumliche Wiedergabe wird aber nur in der Mitte des Saales empfunden.

Im L-ISA Design wird durch Delay- und Trackertechnik die räumliche Wiedergabe im gesamten Hörerbereich erlebbar. Zusätzlich sind durch Trackereinsatz Solisten und einzelne Musikgruppen eindeutig lokalisierbar.

Der schaltungstechnische Aufwand (und damit die Kosten der Installation) ist dabei durchaus höher aber das Ergebnis einer der natürlichen Schallwiedergabe nahen akustischen Wahrnehmung ist durchaus überzeugend. Nicht mehr allein Klangfarbe und erreichter Schallpegel stehen hier im Mittelpunkt, sondern das Empfinden einer natürlichen Schallwiedergabe mit Direktschall von der agierenden, ortbaren Quelle, mit nützlichen Anfangsreflexionen und dem angepaßten Nachhall. Letzterer kann auch durch ein modernes Nachhallverlängerungssystem ergänzt worden sein.

Einen ähnlichen Weg schlägt zur Zeit die Fa. d&b mit dem System Soundscape vor [28], siehe Abbildung 63:

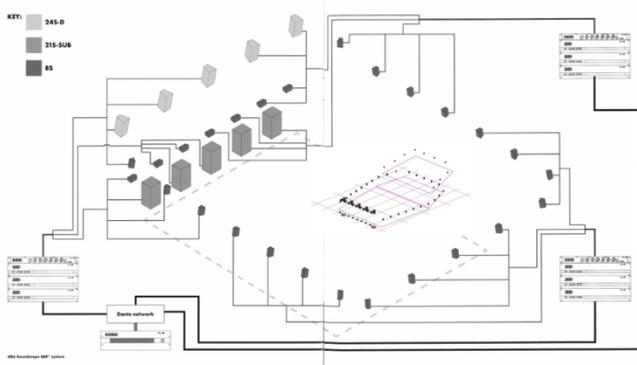


Abbildung 63: Soundscape Installation von d&b

Auch hier erkennt man einen beträchtlichen Schaltungsaufwand. Bereits aber am gewählten Namen erkennt man den Wunsch eine Sound-Umgebung zu kreieren, die in Freiräumen bereits als Umgebungsgeräusche wünschenswert geschaffen werden sollen, somit nun auch bei Konzerten in Räumen und im Freien.

Was ist in Zukunft bei Beschallungen wichtig?

“Immersive“ Sound einschließlich Schallquellen-Ortung, Schallpegelverteilung oder Sprachverständlichkeit?

Antwort:

Diese Zielstellungen werden in der Zukunft mehr und mehr und sicher gleichzeitig zu beachten sein.

Es geht um Beschallungskomfort in einer Qualität, wie wir ihn bei der Abstrahlung von natürlichen Schallquellen z.B. in Konzertsälen oder Opernhäusern erleben.

Hochwertige Forderungen an Beschallungssysteme ist sicher zunehmend Bestandteil anzustrebender Beschallungsqualitäten.

Literatur

[1] STENZEL, H.: Über die Richtwirkung von Schallstrahlern, Elektrische Nachrichten-Technik, Band 4 (1927), Seite 239

[2] PETILLON, R.: Lautsprecher- und Verstärkeranlagen, Weidmannsche Buchhandlung Berlin 1936

[3] BERGTOLD, F.: Schall und Klang, Verlag von R. Oldenbourg, München und Berlin 1939

[4] DRP 690437 vom 18.2.1936 (Lautsprecheranordnung zur Unterdrückung hörbaren Schalls in einem bestimmten Raumteil)

[5] OLSON, H. F.: Elements of Architectural Engineering, D. van Nostrand Company, Inc. 250 Fourth Avenue, New York 3, 1940

[6] Patent DE 812258 of Siemens&Halske von Mai 1949

[7] BENECKE, H., SAWADE, S.: Strahlergruppen in der Beschallungstechnik, Sonderdruck Funkpraxis 1951

[8] HAAS, H.: Über den Einfluß eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache, Acustica, 1(1951), 2, 49-58

[9] PETZOLDT, H.: Elektroakustik, Band IV: Grundlagen der Beschallungstechnik, Fachbuchverlag Leipzig 1957

[10] OLSON, H. F.: Acoustical Engineering, D. van Nostrand Company, Inc., Princeton, New Jersey, New York 1960

[11] <http://museumofmagneticsoundrecording.org/images/R2R/PhilipsEL6911Echotapper.pdf>

[12] KLEPPER, D. L.: Time-Delay Units for Sound Reinforcement Systems, JAES, April 1967, Vol. 15, No. 2

[13] DAVIS, D., DAVIS, C.: Sound System Engineering, Howard W. Sams & Co., Inc., Indianapolis 1975

[14] DDR-Patentschrift 120 341

[15] PLENGE, G. H.: Sound reinforcement system with correct localization image in a big congress centre, 73. AES-Conv., Eindhoven, 1983, Prepr. No. 1980 (F2)

[16] AHNERT, W., REICHARDT, W.: Grundlagen der Beschallungstechnik, VEB Verlag Technik Berlin und S. Hirzel Verlag Stuttgart, beide 1981

[17] NADLER, W.: Der Delta-Stereo-Compact-Processor (DSP610) zur Realisierung eines richtungsgetreuen Beschallungssystems, 81. AES-Conv., Los Angeles 1986

[18] AHNERT, W., STEFFEN, F.: Beschallungstechnik – Grundlagen und Praxis, S. Hirzel Verlag Stuttgart · Leipzig 1993

[19] HEIL, C., URBAN, M.: Sound Fields Radiated by Multiple Sound Sources Arrays, 92. AES-Conv. Wien 1992, Preprint No. 3269

[20] UREDA, M.: Wave Field Synthesis with Horn Arrays, 100. AES-Conv. Copenhagen May 1996, Preprint No. 4144

[21] <http://www.jblpro.com/www/products/installed-sound/intellivox-series#.WruTKU0Um70>

[22] FEISTEL, S., AHNERT, W., BOCK, S.: New Data Format to Describe Complex Sound Sources, pres. at the AES 119th Convention – New York, (2005 October 7-10)

[23] AHNERT, W., FEISTEL, S., BEHRENS, T.: Modern Measurements in Presence of Audience, IOA Conference, reproduced sound 28, Brighton 2012

[24] AHNERT, W., FEISTEL, S., BEHRENS, T.: Acoustic measurements in a theatre during the performance, ISRA Conference, Montreal 2013

[25] FIFA World Cup Stadium Requirements Handbook 2018 FIFA World Cup / 01.11.2014

[26] <http://www.outboard.co.uk/index.html>

[27] <http://www.l-isa-immersive.com/>

[28] <http://www.dbaudio.com/de/db/firma/pressemeldungen/details/article/db-soundscape-das-hoererlebnis-weiter-entwickelt.html>