

# Freie wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades eines Magister Artium M.A. am Institut für Sprache und Kommunikation, Fakultät I der TU Berlin, Fachgebiet Kommunikationswissenschaft/Audiokommunikation

zum Thema:

## "DIE HISTORISCHE ENTWICKLUNG VON LAUTSPRECHERN UND IHRES EINSATZES BEI KONZERTVERANSTALTUNGEN"

Vorgelegt von

Georg Saßnowski

1. Gutachter: Prof. Dr. Stefan Weinzierl

2. Gutachter: Dr. F. Wißmann

### **INHALTSVERZEICHNIS**

ENT	TSTEHUNG UND ENTWICKLUNG 6			
2.1	Telegraphentechnik und Telefon		6	
2.2	Die erste elektromechanische Wiedergabe		11	
2.3	Das elektromagnetische Prinzip		13	
2.4	Das elektrodynamische Prinzip		17	
	2.4.1	Konuslautsprecher	18	
	2.4.2	Rice-Kellog-Lautsprecher	23	
	2.4.3	Der Blatthaller	28	
	2.4.4	Band-/Bändchenlautsprecher	33	
2.5	Das ele	Das elektrostatische Prinzip		
2.6	Das piezoelektrische Prinzip			
2.7	Sonder	rformen	43	
	2.7.1	Manger-Wandler	43	
	2.7.2	Distributed Mode Lautsprecher	45	
	2.7.3	Ionen-Lautsprecher	46	
2.8	Lautsprechergehäuse – Kriterium der Schallabstrahlung		49	
	2.8.1	Schallwände	52	
	2.8.2	Schallzeilen	54	
	2.8.3	Trichter-/Hornlautsprecher	57	
	2.8.4	Direktstrahlende Mehrwegboxen	62	
	2.8.5	konventionelle Lautsprecher-Arrays	63	
	2.8.6	Line Arrays	64	
2.9	verwer	ndete Materialien	69	
EIN	SATZ AU	UF KONZERTVERANSTALTUNGEN	72	
3.1	"Victory Liberty Loan" in New York City		76	
3.2	"The Grateful Dead" – The Wall of Sound		78	
3.3	20. Weltjugendtag auf dem Marienfeld in Köln		83	

4.	SCHLUSSBETRACHTUNG:				
5.	ANH	IANG	87		
	5.1	Literaturverzeichnis	87		
	5.2	Abbildungsverzeichnis	91		
	5.3.	Erklärung	95		

#### 1. EINLEITUNG

Die Beschaffenheit und Nutzung von Beschallungstechnik unterliegen in starkem Maße dem Wandel der Zeit. Ein Fakt, der durch die zunehmende Digitalisierung der Audioübertragung und der damit einhergehenden rasanten Entwicklung neuer Technologien noch beschleunigt wird. Als Chester Rice und Edward Kellogg im März 1924 ihren "trichterlosen Lautsprecher mit Schallwand" zum Patent anmeldeten, dachte noch niemand an Line Arrays oder digitale Signalcontroller mit FIR Filtertechnologie. Doch während sich die technischen Neuentwicklungen im Verstärker- und Controllersektor in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts förmlich "überschlugen", entsprechen die in Beschallungsanlagen eingesetzten Lautsprecher heute immer noch der grundlegenden Funktionsweise eines Lautsprechers wie er schon im frühen 20. Jahrhundert zur Anwendung kam. Erst mit den Jahren erfolgte auch in diesem Bereich eine konsequente Weiterentwicklung, so dass heutzutage eine homogene Beschallung von über 100.000 Menschen mit qualitativ hochwertiger Audioqualität möglich ist. In dieser Magisterarbeit sollen wesentliche Innovationen angefangen beim elektrodynamischen Telefon nach Werner Siemens aus dem Jahre 1878 bis hin zur patentierten "Waveguide sculpture technology" mit dem DOSC Waveguide der Firma L-Acoustics im Jahre 1992 in ein Zeitraster gefasst werden.

Diese Arbeit soll sich grundlegend der Entwicklung der Lautsprechertechnologie sowie einigen zentralen, wegweisenden Beispielen in der Live-Beschallung von Konzertveranstaltungen zuwenden. Im Wesentlichen soll dokumentiert werden, welches die entscheidenden technischen Innovationen im Bereich der Beschallungstechnik insbesondere der Lautsprechertechnik im Laufe der Zeit waren und inwiefern sie in der heutigen Praxis noch Ihre Anwendung finden. Im Falle einer Weiterentwicklung eines bestimmten Grundprinzips bzw. Grundaufbaus, wird diese dargestellt und hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit bewertet werden. In der Arbeit spielt die Untersuchung technikhistorischer Aspekte eine große Rolle. In frühen Phasen technologischer Entwicklung bestehen in der Regel vielfältige und zum Teil gegensätzliche Vorstellungen von der Nutzung einer

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Trichterloser Lautsprecher mit Schallwand 27.3.1924. Patentnummer US 179521 [Rice-Kellogg-Lautsprecher] siehe auch Kapitel 2.4.2

Einleitung Kapitel 1

technischen Neuerung. In den vorliegenden Ausführungen sollen diese vorgestellt und eingeschätzt werden. Im Zuge dieser Untersuchung erfolgt eine Darstellung der "Neuartigkeit" bzw. Besonderheiten dieser neuen Technologien. Dabei halte ich eine genaue Herausstellung der Innovationszyklen für wichtig.

Weiterhin soll das Wirkungsprinzip verschiedener Lautsprechertypen dargelegt und anhand dessen ihre technischen Stärken und Schwächen aufgezeigt werden. Dabei ist es angebracht, alle Ausführungen in einen historischen Kontext zu stellen. Zentrale Leitfrage in dieser Hinsicht ist: Was war zum jeweiligen Zeitpunkt verfügbar, wie wurde es eingesetzt und welche Ergebnisse wurden damit erzielt? Darüber hinaus soll geklärt werden, inwiefern bestimmte Lautsprechertypen/-prinzipien noch heute Verwendung finden und wenn ja, wo sie in welchem Kontext eingesetzt werden.

In diesem Zusammenhang bietet sich an, die Anwendung von verschiedenen Lautsprechertechnologien anhand von unterschiedlichen Beispielen in der Live-Beschallung von Konzertveranstaltungen exemplarisch aufzuzeigen.

Grundsätzlich ist zu diesem Thema eine Vielzahl von verwertbarer Literatur erschienen. Auch in den Papers der "Audio Engineering Society" spielen Lautsprecher und Ihre (Weiter)Entwicklung eine große Rolle. So unterstützt Jesse Klappholz in seinen Ausführungen meine These, dass heute eingesetzte Lautsprecher sich nicht grundlegend von denen in den 20/30er Jahren unterscheiden. Einzig "better magnet structures, higher temperature adhesives and materials" verbesserten die älteren Aufbauten und erlaubten so eine erheblich höhere Leistung mit entsprechend höherem akustischem Output. J. Eargle und M. Gander stellen fest, dass Hörner und direktabstrahlende Systeme die Basis der Beschallung für mehr als ein ganzes Jahrhundert geprägt haben.<sup>3</sup>

Zahlreiche weitere Autoren untersuchen und beschreiben den Stand der Technik in Ihrer Zeit und geben Ausblicke auf kommende mögliche Verbesserungen und Neuentwicklungen. Eine umfassende Zusammenstellung über die relevantesten und weitreichendsten Entwicklungen im 20. Jahrhundert existiert aber nicht. Diese soll nun im Zuge dieser Arbeit entstehen.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Vgl. Klapholz 1988, S.19.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Vgl. J.Eargle, M.Gander 2004, S.1.

#### 2. ENTSTEHUNG UND ENTWICKLUNG

Die tatsächliche Erfindung des Lautsprechers lässt sich schwer an einer einheitlichen Jahreszahl oder einem einzigen Entwickler festmachen. Ein Grund dafür ist, dass der Übergang von den ersten Entwicklungen zum entsprechenden Artefakt oft fließend ist. Ferner forschten zahlreiche Entwickler zur gleichen Zeit im gleichen Feld. Die Patente die angemeldet wurden, unterschieden sich oft nur in Details. Desweiteren fanden in den verschiedenen Ländern, oft gerade Deutschland und Amerika, ähnliche Entwicklungen statt woraufhin mehrere gleichartige Patente erteilt wurden. Aufgrund dieser Vielfältigkeit, deren ganzheitliche, detailierte Behandlung den Rahmen dieser Arbeit übersteigen würde, erscheint es mir sinnvoll, das Hauptaugenmerk auf die Kernstücke in der Entwicklung der Lautsprechertechnologie zu legen. Da die Entwicklungsphasen der einzelnen Prinzipien zeitlich ziemlich eng zusammenfallen, halte ich eine chronologische Darstellung für wenig übersichtlich. Ich werde deshalb versuchen, die Schallwandler nach ihrem Antriebsprinzip geordnet zu behandeln. Zusammenfassend gesagt, soll mein Schwerpunkt auf den überwiegend angewandten Prinzipien, also auf dem elektromagnetischen und –dynamischen Prinzip, liegen.

#### 2.1. Telegrafentechnik und Telefon

Den wichtigsten Vorläufer der Lautsprecherentwicklung stellt die elektrische Telegrafentechnik dar. Daher erscheint mir die Erwähnung von Telegrafie und Rundfunk als Wegbereiter für die Lautsprecherentwicklung notwendig, weil sie im Zusammenhang mit der Informationsübertragung entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung der verschiedensten Schallwandlersysteme hatte. Sie wurde u.a. durch den Amerikaner Samuel Finley Morse bekannt und ermöglichte bereits im Jahr 1837 eine Übertragung von Signalen durch elektrische Stromleitungen.4 Einen vorläufigen Abschluss in diesem Gebiet erreichte Alexander Graham Bell mit der Entwicklung des harmonischen Telegrafen. Mit Ihm war es möglich, simultan mehrere Morsezeichen in unterschiedlichen Frequenzen über dieselbe Leitung zu senden. Wie in der folgenden Abbildung 1 zu sehen beinhaltete der Aufbau einen Mikrophon- beziehungsweise Lautsprecherteil, die jeweils abwechselnd als Mikrofon und als Fernhörer benutzt wurden. Die beiden Wandler waren baugleich und setzten sich

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Erste Entwicklungen werden bereits im 18. Jahrhundert verortet. Näheres dazu siehe Conrad 1989, S. 280f.

hauptsächlich aus einer biegsamen Metallmembran, einem Stabmagneten und einem Verbindungsdraht bzw. eine den Magneten umschließende Drahtspule zusammen.

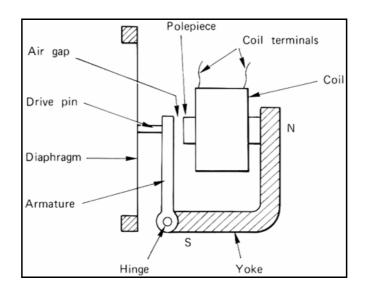


Abb. 1: Skizze von Bells 1876 patentierten elektrischen Mikrofonwandler

Die beim Besprechen erzeugten Schallwellen versetzten die Membran in Schwingungen, welche dann an den, mit einer Drahtspule umwickelten und unter Gleichstrom gesetzten, Magneten weitergegeben werden. Durch den geänderten Magnetfluss wird in der Spule eine elektrische Spannung induziert. Die je nach Schalleinfall dementsprechend variierende Modulationsspannung wird dann über eine Drahtverbindung an das Empfängerteil weitergeleitet. Hier fand nun der umgekehrte Prozess statt und der ankommende modulierte Strom erzeugte ein veränderliches magnetisches Feld. Dieses versetzte die Membran in Schwingungen wodurch wieder Schallwellen entstanden. Dass das aufnehmende und das abgebende Element zunächst baugleich waren, zeigen auch frühe Bezeichnungen, wie die in Frankreich gängigen Begriffe "Hörmikrophon" und "Sprechtelephon".<sup>5</sup> Im Jahr 1876 meldete Bell sein berühmt gewordenes Patent für den "Speaking Telegraph" an, für den sich dann bald die Bezeichnung "Telefon" einbürgerte.<sup>7</sup>

Aus deutscher Sicht wird auch gerne Philipp Reis als Erfinder des Telefons angeführt. Anfang 1861 bastelte er eine Vorrichtung zur elektrischen Tonübertragung. Er orientierte sich bei

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Vgl. Mönch 1925, S. 4.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> 14.2.1876 - elektromagnetisches Telephon, Alexander Graham Bell, U.S. Patent - Nr. 174465.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Vgl. Borwick 1990, S. 10.

seinem Modell am Aufbau des Ohres. In einer hölzernen Ohrmuschel befand sich ein Trommelfell aus Schweinedärmen und Gehörknöchelchen aus Platinstreifen, welche von einem Draht berührt wurden. Das "Trommelfell" gerät durch das Auftreffen von Schallwellen in Schwingungen und unterbricht somit den Stromkreis zwischen Metallstreifen und der Drahtfeder. Nach weiteren Versuchen vereinfacht Reis das Verfahren und verwendete anstatt des Ohrmodells einen mit einer Membran bespannten Schalltrichter. Als Empfänger dient ihm eine um eine Stricknadel gewickelte Kupferdrahtspule, durch die die vom Sender ausgesandten Stromimpulse fließen. Die bewegte Nadel übersetzt die Impulse wieder in Schallwellen; zur Verstärkung der Töne setzt Reis ein Holzkästchen als Resonanzboden ein. 1861 wurde dieser Apparat dann das erste Mal mit der Übertragung eines Waldhornsolos präsentiert – diese war zwar schlecht, aber sie funktionierte. Technisch betrachtet war die Konstruktion sehr empfindlich und anfällig. Die Vorrichtung konnte nur bei sehr schwacher Berührung des Platinblechstreifens durch die Drahtfeder funktionieren, da die Einstellung von jeder geringen mechanischen Erschütterung und Temperaturänderung zu Fall gebracht werden konnte. Reis erregte mit seinem Telefon zwar vielfach Aufsehen, vermochte indes bei den Gelehrten und den Männern der Praxis nicht die Anerkennung finden, die ihn dazu beflügelt hätte, weitere Versuche anzustellen und sein Telefon weiter zu entwickeln.

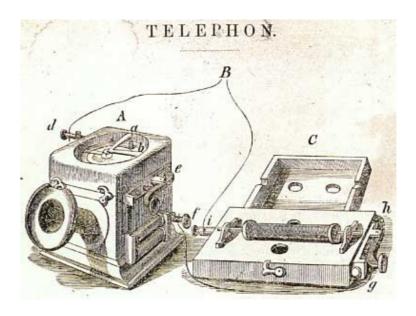


Abb. 2 Reis' Wackelkontaktsender (A) und magnetostriktiver Empfänger (C) in der Ausführungsform von 1863

Im Originalprospekt von Johann Philipp Reis aus dem Jahr 1863 heißt es:

"Jeder Apparat besteht, wie aus obiger Abbildung ersichtlich, aus zwei Theilen; Dem eigentlichen Telephon A und dem Reproductionsapparat C. Diese beiden Theile werden in solcher Entfernung von einander aufgestellt, dass das Singen oder das Tönen eines musikalischen Instrumentes auf keine andere Weise, als durch den Apparat von einer Station zur anderen gehört werden kann."

Es zeigt sich also, dass die Entdeckung der Funktionsweise des Telefons verschiedenen Erfindern zugeschrieben werden kann. Auch die Entwicklung von prinzipiell funktionierenden Apparaten wird bei mehreren etwa zeitgleich verortet. Sicher ist, dass sich die zahlreichen damit beschäftigten Techniker mit ihren Arbeiten gegenseitig stark beeinflussten und Alexander Graham Bell schließlich der erste war, der zusätzlich zu seinen technischen auch über soviel organisatorische Fähigkeiten verfügte, dass er das Telefon als Apparat zur Marktreife bringen und dann 1876 in Boston erfolgreich einführen konnte. In der Folgezeit wurde die Technik von Bell und zahlreichen anderen Entwicklern vorangetrieben, was zur Folge hatte, dass Mikrophon und Lautsprecher in ihrer Bauweise nicht länger identisch waren, sondern sich bald zu unterscheiden begannen. Dass die Verwendung dieses technischen Prinzips schon immer mit Musik assoziiert wurde, zeigt beispielsweise ein Zitat von Phillip Reis, in dem er sagte, ihm sei:

"nun die Konstruktion eines Apparates gelungen, mit welchem ich imstande bin, Töne verschiedener Instrumente, ja bis zu einem gewissen Grade die menschliche Stimme selbst zu reproduzieren. (...) Den von mir konstruierten Apparat habe ich Telephon genannt."<sup>11</sup>

Auch in dieser Aussage findet das bereits mehrfach angesprochene Problem der Zurechenbarkeit von tatsächlicher Urheberschaft technischer Entwicklungen ein weiteres

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Vgl. Reuter 1990 S.6.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Genannt werden beispielsweise Arbeiten von Charlea Bourseul um 1854 (Vgl. Netzwelt Lexikon 2005.) und die von Ernst W. Siemens um 1874 (Vgl. Schoenherr 2005, http://history.sandiego.edu/gen/recording).

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Zu nennen sind hier unter anderem noch Antonio Meucci, und Elisha Gray (Vgl. Netzwelt Lexikon 2005.) sowie Edison und Dolbear (Vgl. Hunt 1954, S. 31.).

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Phillip Reis im Physikalischen Verein zu Frankfurt am Main am 26.10.1861. Zit. nach Mönch 1925, S. 21.

Beispiel. Dazu lässt sich am Beispiel der Telefontechnik ein genereller Aspekt hinzufügen. Tatsache ist, dass demjenigen die Urheberschaft und damit auch fast immer die geschichtliche Bedeutung zugeeignet wird, der über das entsprechende Patent verfügt. Alexander Graham Bell wurde sein Telefonpatent erst 1887 endgültig vom United States Supreme Court zugesprochen.<sup>12</sup> Für die telefonische Schallübertragung gab es unterschiedliche Pläne, wie diese zu nutzen sei. Hier lässt sich bereits ein interessanter Punkt erkennen, für den Nina Degele Beispiele gibt:

"Mit Alexander Graham Bells Telefon verbanden zeitgenössische Techniker die Vision der Opernübertragung in die privaten Wohnungen und Häuser; zu Thomas Edisons Phonograph kursierte das Nutzungsszenario, damit die letzten Worte von Sterbenden aufzuzeichnen; das Radio galt als technische Möglichkeit, die Theorie elektromagnetischer Wellen nach James Clerk Maxwell zu testen." <sup>13</sup>

Edison, der unter anderem bedeutsam für die Verbesserung der Klangqualität der telefonischen Übertragung war, hatte die Intention diese Technik für Konzertübertragungen zu nutzen. Ende der 1870er Jahre führte er mit seiner Musical Telephone benannten Technik mehrmals Konzerte aus der Oper übertragen an ein größeres Publikum vor. 14 Ebenso versuchte Thaddeus Cahill, der mit seinem Instrument Telharmonium berühmt wurde, zu Beginn des 20. Jahrhunderts Konzertveranstaltungen, die über das telefonische Leitungsnetz verbreitet wurden, zu etablieren. 15 Trotz vielfältiger Bemühungen konnte sich diese Art der Anwendung nicht durchsetzen, sondern die Nutzer akzeptierten die telefonische Schallübertragung nur als zweiseitige, kommunikative Verbindung. Es wird vermutet, dass die mangelnde Akzeptanz der Hörer zum großen Teil an der noch sehr schlechten Qualität bei der Musikübertragung lag. Werner Mönch schrieb 1925 dazu:

"Am wichtigsten ist die verzerrungsfreie Wiedergabe bei musikalischen Darbietungen. Jedes Instrument, jede Stimme hat ganz charakteristische Obertöne, fehlen bei der Wiedergabe einige, so muß sie entstellt und schlecht sein. Nun ist aber gerade die Übertragung dieser Obertöne bei den meisten Fernsprechern und –hörern sehr mangelhaft; daherkommt es, dass

<sup>12</sup> Vgl. Hunt 1954, S. 23.

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Vgl. Degele 2002, S. 65f.
<sup>14</sup> Vgl. Israel/King/Nier/Rosenberg 1994, S. 314.

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Vgl. Prieberg 1956, S. 37.

beim Unterhaltungsrundfunk oft einige Musikinstrumente kaum zu erkennen sind."<sup>16</sup>

Ebenso lieferte Mönch eine plausibel erscheinende Erklärung für den Übergang von der Telefontechnik zur Lautsprechertechnik. Nach ihm resultierte aus der Kombination aus einem Hörer, der bei der Rezeption dauerhaft an das Ohr gedrückt werden musste und einem sich verbreitenden Rundfunk, dem man sich über längere Zeitdauer widmen wollte ein Verlangen der Rezipienten "nach einem Hörer, der in größerer Entfernung vom Hörenden aufgestellt sein sollte und trotzdem ein ungestörtes Aufnehmen des Dargebotenen durch das Ohr ermöglichte".<sup>17</sup>

#### 2.2. Die elektromechanische Wiedergabe

In den frühen 20er Jahren erfolgte die Wiedergabe von Musik noch rein akustisch mechanisch, wobei als Membranen vornehmlich Materialien wie Glimmer, Glas und Holz Verwendung fanden. Die so erzeugten Schallschwingungen wurden über Trichter abgestrahlt. Erst die Rundfunktechnik machte eine elektromechanische Schallwandlung notwendig, da hierbei kein mechanischer Aufzeichnungsträger vorhanden war. Der Rundfunk setzte 1923 in Berlin zunächst mit einem relativ schwachen Sender ein, dem bald weitere in größeren Städten folgten. Die verfügbaren technischen Mittel wie das Kohlemikrofon, der Lichtbogensender und der Detektorenempfänger setzten der jungen Rundfunktechnik enge Grenzen, so dass unter diesen Vorraussetzungen nur Ortsempfang möglich war. Die erste Wiedergabe des Detektorempfangs erfolgte über Kopfhörer, in welchem eine dünne Stahlblechmembrane im Rhythmus der Tonwechselspannung zum Schwingen angeregt wurde.

Die wenig elastische Membran, ihre starre Lagerung im Haltering und die unproportionale Auslenkungsänderung zur Tonspannungsänderung hatten nicht nur eine extreme Beschneidung des übertragenen Frequenzbandes, sondern auch mit der Lautstärke steigende Verzerrungen zur Folge. Daher war nur eine leise Wiedergabe unmittelbar vor dem Gehörgang möglich. Man erinnerte sich bald der Grammophontrichter, welche man als vergrößerte Kopfhörermuscheln verwandte, um damit den gesamten Raum zu beschallen.

-

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> Vgl. Mönch 1925, S. 8.

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Vgl. Mönch 1925, S. 52.



Abb. 3: Familie beim Radioempfang im Jahr 1923

Damit war praktisch der erste "Lautsprecher", wenn auch mit extrem schlechter Klangqualität, geschaffen.

"Dass es noch Konservenmusik in des Wortes schlimmster Deutung war, dass die Stimme des Sprechers klang, als käme sie aus einem zahnlosen Mund, dass ein Konzert keine Unterscheidung von Streich- und Blasinstrument zuließ, nahm der Hörer als unabänderliche Gegebenheit hin"<sup>18</sup>

Deshalb, aber wohl hauptsächlich wegen der hohen Preise für Radioapparate und Teilnehmergebühren (60 Goldmark im Jahr 1923), hielt der Rundfunk in Deutschland nur verhalten Einzug. Im Jahre 1926 nannten erst 8 % aller deutschen Haushalte trotz Senkung der Gebühren ein Radiogerät ihr Eigen. Erst das Erscheinen neuer, billiger Ortsempfänger auf Röhrenbasis führte 1929 zu einem Ausstattungsgrad von 20 %. Damit war der wirtschaftliche Anreiz für die Industrie gegeben, der Entwicklung von verbesserten Lautsprechersystemen für die Rundfunktechnik besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

-

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> Vgl. Schmidt 1998 S.313 f.

#### 2.3 Das elektromagnetische Prinzip

Die völlig unbefriedigende Wiedergabe der Kopfhörer führte zur Konstruktion der ersten Lautsprechersysteme. Der älteste, aber auch primitivste Lautsprechertyp war eine Weiterentwicklung des aus der Telefontechnik bekannten Fernhörers. Er wurde schon 1879 von Alexander Graham Bell benutzt und später auch an kleine Trichter angekoppelt. Ein Fernhörer besteht aus einem Dauermagneten, über dessen Schenkel Spulen gesteckt werden. Vor den Polen des Magneten befindet sich eine dünne Eisenmembran. Schickt man durch die Spulen einen tonfrequenten Wechselstrom, gerät die Membran in mechanische Schwingungen, strahlt also Schall ab. Dieser entspricht in seiner Frequenz dem tonfrequenten Wechselstrom. Somit ist die Umwandlung von elektrischer Energie in Schallenergie vollzogen.

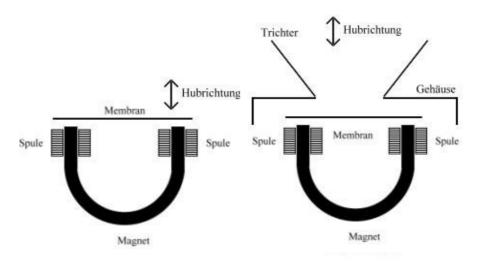


Abb. 4: Fernhörer nach Bell, rechts im Bild eine Version mit angekoppeltem Trichter

Derartige Systeme konnten natürlich nur sehr beschränkte Lautstärken abgeben. Der erste Schritt zum wirklichen Lautsprecher bestand daher in der Entwicklung eines entsprechend kräftigen Fernhörersystems. Dies wurde so mit einem Schalltrichter kombiniert, dass die Membran an einem Trichterende abschloss. Damit konnte man bereits Lautstärken erzielen, die zur Versorgung auch größerer Räume ausreichten. Die akustischen Eigenschaften waren jedoch sehr schlecht. Dies lag unter anderem an der sehr hohen mechanischen Vorspannung<sup>19</sup>.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> Die Membran oder der Konus eines Lautsprechers, aber auch des eigentlichen Antriebelementes müssen irgendwo befestigt werden. Das ist die Position, die ein Lautsprecher ohne Aussteuersignal einnimmt. Je geringer diese mechanische Vorspannung ist, desto besser der Klang.

Hinzu kamen die außerordentlich mangelhaften akustischen Eigenschaften des am häufigsten verwendeten Blechtrichters, der in bestimmten Frequenzgebieten ausgesprochene Resonanzstellen zeigte. Man ging daher bald zu anderen Systemen über.

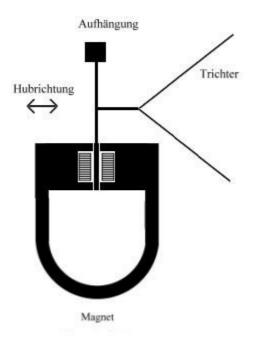


Abb. 5: Elektromagnetsicher Zungenlautsprecher / 4polig

Die erste Weiterentwicklung stellte der elektromagnetische Lautsprecher dar. Er funktioniert grundsätzlich nach demselben Prinzip wie eben erwähnt. An Stelle der runden Metallmembran tritt jedoch ein kleines Weicheisenstück, das zwischen den Polen des mit Spulen versehenen Dauermagneten schwingt und unter dem Einfluss der Sprechströme in Vibrationen gerät. Dabei wurden die mechanischen Schwingungen über ein geeignetes Hebelwerk auf eine großflächige Konusmembran aus Hartpapier oder einem ähnlichen Stoff übertragen und dann direkt abgestrahlt. Mit dieser Konstruktion konnten der Wirkungsgrad und die Tonqualität wesentlich verbessert werden. Das lag unter anderem an den nun nicht mehr vorhandenen Resonanzerscheinungen des Blechtrichters. Später erreichte man durch eine symmetrische Anordnung, dass in der Ruhelage keine magnetische Kraft mehr auf den Anker ausgeübt, die magnetische Vorspannung<sup>20</sup> also auf ein Minimum reduziert wurde.

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> Liegt ein magnetisierbares Teil nicht mittensymmetrisch im magnetischen Kraftfeld eines Magneten, wird es in diese Mitte gezogen. Dadurch werden die Halbwellen des NF-Signal unsymmetrisch verarbeitet, was zu gewissen Verzerrungen führt.

Trotzdem arbeiteten auch diese Systeme keineswegs verzerrungsfrei und waren den Tonfrequenzbereich betreffend immer noch sehr eingeschränkt.

Eine weiter verbesserte Form und der Höhepunkt der Entwicklung des elektromagnetischen Lautsprechers, war der sogenannte Freischwinger.

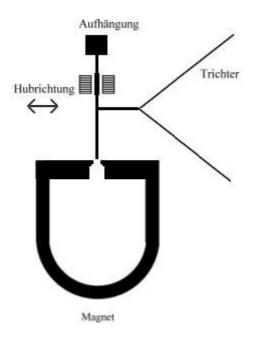


Abb. 6: Freischwinger-Lautsprecher

Bei dieser Konstruktion war ein Anstoßen des Metallblättchens am Magnetsystem nicht möglich, weil es nicht zwischen sondern vor den Magnetpolen angebracht war. Der Freischwinger ließ sich relativ günstig bauen und fand daher vor allem in kleinen Rundfunkempfängern eine starke Verbreitung.

Spätestens Anfang der 1930er Jahre zeichnet sich eine allgemeine, auf die schlechte Wirtschaftslage und geringe Kaufkraft reagierende Tendenz der Radiofirmen ab, ihre Produktpalette nicht nur um neu entwickelte leistungsstarke Geräte zu erweitern, sondern mindestens auch einen preiswerten Empfänger mit reduzierter Ausstattung ins Programm aufzunehmen – das weit verbreitetste Modell war der Volksempfänger VE 301 mit einem Freischwinger als Lautsprecher. Technisch gesehen war der Volksempfänger schon veraltet als er eingeführt wurde, erlangte aber trotzdem als erstes elektronisches Massenmedium in Deutschland eine große Bedeutung.

Analog dazu wurde 1934 auch der Volkslautsprecher VL 34 entwickelt.

"In vorbildlicher Weise haben sich die großen und kleinen Firmen dieses Industriezweiges unter Zurückstellung aller persönlichen Wünsche zusammengefunden und in Gemeinschaftsarbeit ein Gemeinschaftsprodukt herausgebracht, das das Beste ist, was jemals auf dem Lautsprechergebiet zu einem derartig niedrigen Preise auf den Markt gebracht wurde."<sup>21</sup>

1939 schreibt Fritz Bergtold in seinem Leitfaden der Elektroakustik:

"Elektromagnetische Lautsprecher kommen für Übertragungsanlagen kaum noch in Betracht. Man verwendet sie höchstens, um Nebenräume mit Schall zu versorgen oder um etwa in irgendwelchen Nischen des Übertragungsraumes die Verständlichkeit zu erhöhen."<sup>22</sup>

In der modernen Elektroakustik haben elektromagnetische Lautsprechersysteme keinerlei Bedeutung mehr.



Abb.7: Werbeprospekte angebotener "Freischwingersysteme" aus dem Jahre 1932

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> [ohne Autor:] Selbsthilfe der Lautsprecher-Industrie, in: Der Radio-Händler. Fachblatt für den Handel mit Radioartikeln. Rundschau über die gesamte Radiotechnik, 11. Jg., Nr. 14, 1934, S. 632.
<sup>22</sup> Vgl. Bergtold 1939 S. 38.

#### 2.4 Das elektrodynamische Prinzip

Am 27.4.1898 meldet der Physiker Sir Oliver Lodge das britische Patent Nr. 9712 für einen elektrodynamischen Wandler an und baut nach diesem Prinzip im selben Jahr einen trichterlosen Lautsprecher mit Schwingspulensystem, "welcher als Urtype aller nachfolgenden dynamischen Lautsprecher angesehen werden kann und der sich im wesentlichen auch mit den heute noch üblichen Ausführungen deckt"<sup>23</sup>

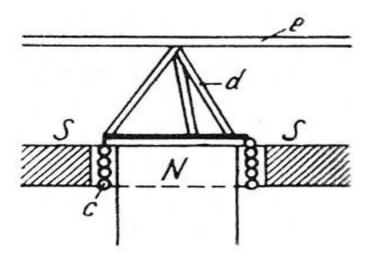


Abb. 8: Anordnungsschema des ersten dynamischen Lautsprechers von O. Lodge

In dem sehr kräftigen Feld NS des Topfmagneten war eine kleine Spule c angeordnet, welche mittels der Verstrebungen d die schon verhältnismäßig groß ausgeführte Membran e in Schwingungen versetzte. Bemerkenswert bei dieser Ausführung ist, dass für die Wiedergabe ein Trichter vermieden und die Schallabstrahlung allein durch die Membran bewirkt werden sollte.

Der entscheidende Vorteil dieses Antriebssystems gegenüber dem elektromagnetischen Prinzip liegt im Wegfall der störenden großen Masse des Ankers und der größeren Bewegungsfreiheit der Membran. Das Maximum der Bewegungsamplitude wird im Wesentlichen nur durch die elastische Membran bestimmt. Damit ist es möglich, das schwingende System tief abzustimmen, so dass eine um vielfaches verbesserte Basswiedergabe erreichbar ist.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> Vgl. Nesper 1929 S.6.

Da sich hier im Gegensatz zum elektromagnetischen System ein unmagnetischer Leiter in einem konstanten magnetischen Feld bewegt, kann eine große Rückstellkraft entfallen, jedoch ergibt sich eine wesentlich geringere Empfindlichkeit. Diese kann aber durch eine entsprechend große Feldstärke im Luftspalt wieder ausgeglichen werden. Auch ist durch den proportionalen Zusammenhang zwischen elektrischer und mechanischer Antriebskraft die Voraussetzung für relative geringe nichtlineare Verzerrungen gegeben.

Aufgrund der physikalischen Überlegenheit gegenüber allen anderen Antriebssystemen hat sich das elektrodynamische Prinzip allgemein durchgesetzt und wird auch heute noch vor allem wegen des verhältnismäßig guten Wirkungsgrades in der Beschallungstechnik fast ausschließlich angewandt.

Die verschiedenen elektrodynamischen Lautsprechersysteme sind fast gleichzeitig in der Mitte der 20er Jahre zu brauchbaren Modellen entwickelt worden. Bis Ende 1926 wurden in Deutschland etwa 100 Beschallungen mit diesen Großlautsprechern durchgeführt und dabei die ersten grundlegenden praktischen Erkenntnisse wie Richtwirkung, Bündelung und Frequenzabhängigkeit der Interferenz gesammelt.

#### 2.4.1. Der Konuslautsprecher

Die Lautsprecher-Schwingspule war schon lange bekannt. Trotzdem kam es erst 1925 in den USA durch Rice und Kellogg zur kommerziell verwertbaren Konstruktion eines elektrodynamischen Schwingspulensystems mit Konusmembran. Aufgrund seiner zur damaligen Zeit überragenden Vorteile, wie hohem Wirkungsgrad und Schalldruck, sowie annehmbarem Frequenzgang bei geringen Verzerrungen, war dieser Lautsprechertyp in kurzer Zeit weltweit verbreitet.

Trotz diffizilerer Konstruktionen und höherem Materialaufwand anderen Systemen gegenüber setzte er sich in Deutschland etwa 1930 allgemein durch und ist bis heute das dominierende Lautsprecherprinzip geblieben. Anfangs verwendete man noch vielfach die Innenzentrierung auf dem Magnetkern mittels eines filigranartig ausgestanzten Pertinaxblattes<sup>24</sup>. Infolge besserer Basswiedergabe durch die größere Elastizität gingen jedoch bald alle Hersteller zur weit ausladenden Außenzentrierung über.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> Pertinax ist ein Faserverbundwerkstoff aus Papier und einem Phenol-Formaldehyd-Kunstharz (Phenoplast).

Zur Gleichfelderzeugung wurden bis in die 50er Jahre noch vielfach Elektromagneten verwendet. Die Membraneinspannung bei den ersten Konuslautsprechern bestand noch aus Leder und die Membran selbst war aus mehreren Papier- oder Pappstücken zusammengeklebt. Bedingt durch den zweiten Weltkrieg stagnierte die Entwicklung, so dass erst ab Ende der 40er Jahre ein Aufschwung in der Konstruktion verbesserter elektrodynamischer Lautsprechersysteme zu verzeichnen ist. Durch neue Technologien bei der Herstellung der Magnete für permanentdynamische Lautsprecher, wie HF-Schmelze und magnetische Ausrichtung im flüssigen Zustand<sup>25</sup> konnten im Gegensatz zu Vorkriegsmodellen bis zu 30% mehr Feldstärke erzielt werden.

Auch die Membranen wurden jetzt aus einem Stück im Pappgussverfahren gefertigt, nachdem Vorrichtungen zur Herstellung handgeschöpfter Membranen für Versuchszwecke entwickelt worden waren. So konnte man schnell und problemlos günstige Membranformen erproben und realisieren. Zu der Zeit als die Membranen für die Lautsprecher noch aus Papier hergestellt wurden, war man zur Anwendung der Kegelform gezwungen, da sich aus Papier nur ein abwickelbarer Körper herstellen lässt. Erst als es möglich war, die Membranen im Gussverfahren zu erzeugen, stand der Verwendung nicht abwickelbarer Membranen nichts mehr im Wege. Auf diese Weise entstanden die in den Telefunken Laboratorien entwickelten "NAWI"-Membranen<sup>26</sup>. Bei dieser Membranform treten im Gegensatz zu Konusmembranen weniger Partialschwingungen auf, woraus eine verfärbungsfreiere Wiedergabe resultiert.

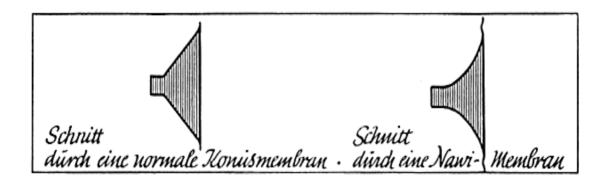


Abb. 9: Konusmembran vs. NAWI – Membran

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> sog. heißgerichtete Magnete.

Nawi-Membran: Nichtabwickelbare Membran. Besondere Form von Lautsprechermembranen. Manche Körperflächen lassen sich aus Zeichenpapier herstellen. Die gewöhnliche Konus-Membran ist z.B. ein solcher hergestellter Körper. Wenn man eine solche Membran aufschneidet, lässt sie sich in eine Ebene abwickeln. Macht man das gleiche Experiment mit einer Kugel, so wird man feststellen, dass dies nicht möglich ist, die Kugelfläche bleibt immer gekrümmt.

Ebenfalls zur Verminderung von Knickschwingungen wurden Membranwerkstoffe mit hoher innerer Dämpfung und großer Steife entwickelt. Als optimal erwies sich eine besondere Zellulose mit bestimmter Faserlänge und einer in vielen Versuchen gefundenen Lacktränkung. Auch die günstigsten Öffnungswinkel und Konushöhen sowie die Krümmungen der Mantellinien der NAWI-Membranen sind bei den einzelnen Firmen empirisch ermittelt worden. Zusätzlich brachte man noch geeignete Beschichtungen auf die Membran auf, wodurch eine höhere Steife erreicht und die Feuchte-Empfindlichkeit reduziert wurde.

Bereits 1939 sind nach W. Kautter<sup>27</sup> Versuche über die Wahrnehmbarkeit nichtlinearer Verzerrungen durchgeführt worden. Aus der Erkenntnis, dass mit steigender Frequenz auch eine steigende Empfindlichkeit für Klirrkoeffizienten 2. und 3. Ordnung vorliegt, kam man etwa 1947 zu dem Schluss, den Frequenzbereich bei der Abstrahlung zu teilen. Das Ergebnis waren Koaxiallautsprecher mit einem selbstständigen System für den Hochtonbereich.

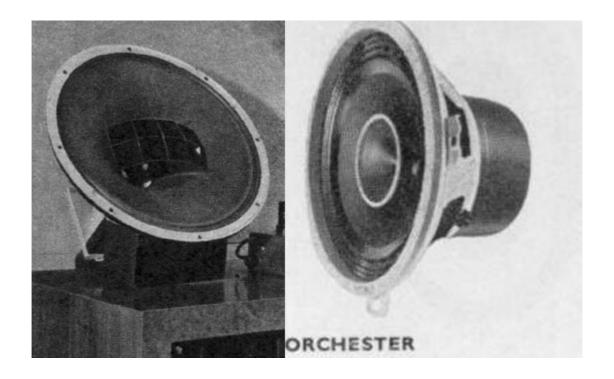


Abb.10: verschiedene Formen von Koaxiallautsprechern, rechts im Bild der Isophon-Orchester Lautsprecher der Firma Telefunken

-

<sup>&</sup>lt;sup>27</sup> Vgl. W. Kautter, "Wann sind nichtlineare Verzerrungen hörbar" in: Das Radio Magazin, Nr. 5, 1948, S. 118

Diesen klassischen Zweiweglautsprecher gibt es seit den Fünfzigerjahren in verschiedenen Größen (8" bis 15")

- (1) staubdichter, akustisch durchlässiger Abschluss der Einheit Schwingspule Luftspalt des Magneten
- (2) magnetischer Kurzschlussring
- (3) Luftpolster
- (4) Kanülensystem zur Phasenkompensation des Hochtontreibers
- (5) Hochtonmembran
- (6) Spulenträger aus Aluminium
- (7) Hochtonhorn, dessen Verlängerung durch die Tieftonmembran gebildet wird
- (8) Tiefton-Nawimembran
- (9) äußere Membranaufhängung

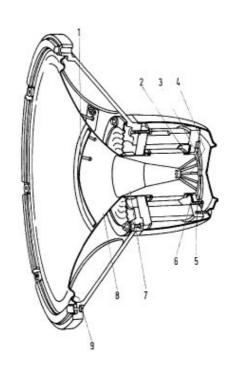


Abb.11: moderner Koaxiallautsprecher von Tannoy

Konuslautsprecher konnten zu dieser Zeit schon beachtliche Leistungen verarbeiten. Als Sensation galt auf der ersten Messe unter dem Funkturm im Oktober 1950 das "elektrische Glockengeläut" der Firma Siemens. Dazu waren auf dem Berliner Funkturm acht Konuslautsprecher in Kurztrichtern montiert, die von einem 400 Watt Verstärker gespeist wurden.

Außer der Konusmembran sind auch andere Membranformen entwickelt worden. So zum Beispiel die Kugelkalotte, eine für heute gebräuchliche Hochtonsysteme weit verbreitete Membranform; oder die wieder in Vergessenheit geratene Falt- oder Fächermembran. Die Grundidee war, ähnlich dem Rieggerschen Blatthaller (siehe Kapitel 2.4.3), eine rein kolbenförmig schwingende Membran von hoher Steife, die extrem weich eingespannt ist. Der übertragende Frequenzbereich soll 5 Hz bis 15 kHz umfasst haben<sup>28</sup>.

"Es ist verblüffend, wie klar und deutlich man mit solchen Systemen z.B. das eigenartige, metallische Schwirren des Jazz-Besens hört, ein Klang, der in der elektrischen Übertragung sonst kaum wahrnehmbar ist."<sup>29</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>28</sup> [ohne Autor], "Universal-Lautsprecher mit Faltmembran" in: Das Radio Magazin, Nr. 14/15, 1949, S. 389

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup> Vgl. E. Schwandt, "Vollkommende Lautsprecher" in: Das Radio Magazin, Nr. 14/15, 1949, S. 387

Leider hat diese Konstruktion trotz billiger Herstellung und universeller Anwendbarkeit keine Beachtung gefunden. Die grundsätzliche Entwicklung der zwei Grundformen und heute vorwiegend verwendeten elektrodynamischen Lautsprecher, des Konus- und Kalottenlautsprechers, war etwa 1930 abgeschlossen. Große revolutionäre Umwälzungen sind seither nicht zu verzeichnen gewesen. Jedoch erfolgte eine kontinuierliche technische Weiterentwicklung, die zu einer hohen Qualität der Lautsprecher geführt hat.

Bei modernen Lautsprechern wurde es durch die Verwendung besonders plastischer Membranutensilien wie Bextrene und Polypropylene möglich, Bass- Mittelton-Lautsprecher zu bauen, die bis zu Frequenzen von 3 – 4 kHz eine ausgeglichene Übertragungskennlinie aufweisen.

Von wesentlicher Bedeutung für die Übertragungsqualität eines Lautsprechers ist jedoch seine Schallführung bzw. das verwendete Gehäuse. Für die Beschallungstechnik sind mehrere Systeme gebräuchlich, auf die später (siehe ab Kapitel 2.8) noch näher eingegangen wird. Während es bei mittleren und hohen Frequenzen relativ einfach ist, genügende Schalleistungen zu erzeugen, steigt der Leistungsaufwand mit sinkender Frequenz steil an. Für Beschallungsanlagen werden daher besonders im Bassbereich extrem belastbare Lautsprecher gefordert. Moderne Basslautsprecher zeichnen sich durch hochpermeable Magnete und Aluminium-Flachdraht-Wicklungen auf Wickelkörpern aus Spezialwerkstoffen aus. Damit und durch den Einsatz von extra entwickelten Klebstoffen konnten die Masse des schwingenden Systems verringert und die Temperaturbeständigkeit gesteigert werden. Hochleistungslautsprecher der internationalen Spitzenklasse sind in der Lage, elektrische Sinus-Leistungen von 1000 Watt zu verarbeiten, wobei im Spalt kurzzeitig Betriebstemperaturen bis zu 300 °C entstehen können. Deshalb werden die dabei auftretenden großen Membranhübe gleichzeitig zur Zwangskühlung der Schwingspule genutzt. Dazu sind an der Magnetrückseite speziell konstruierte Lufteintritte angebracht. Zur Erreichung einer möglichst niedrigen unteren Grenzfrequenz sind großflächige Membranen notwendig. International üblich sind Basslautsprecher mit 12" (30cm), 15" (38cm) und 18" (45cm) Membrandurchmesser mit harter Einspannung. Seit kurzem finden aber auch 21" Basslautsprecher in der Beschallung Verwendung. So arbeiten z.B. in dem "T21Sub" der Firma ADAMSON zwei 21" Treiber.

#### 2.4.2. Rice-Kellogg-Lautsprecher

Die Ära des dynamischen Lautsprechers begann trotz der wertvollen Pionierarbeiten der in den vorausgegangenen Ausführungen genannten Firmen im Grunde erst im Jahre 1924. Zu dieser Zeit entwarfen Chester W. Rice und Edward W. Kellogg einen dynamischen Lautsprecher, bei welchem die Membran durch ein sehr kräftiges Magnetsystem angetrieben wurde und insbesondere an einem Schallschirm befestigt war. Bei dieser Konstruktion wurde nicht nur auf die äußere Ausführung, sondern auch auf die Verwendung ganz besonders hochwertiger Materialien großer Wert gelegt. Unter anderem dadurch erklärte sich die immer größer werdende Beliebtheit dieses Lautsprechertyps. Folgende Abbildung stellt eine grundsätzliche Ansicht gemäß der Patentschrift<sup>30</sup> dar.

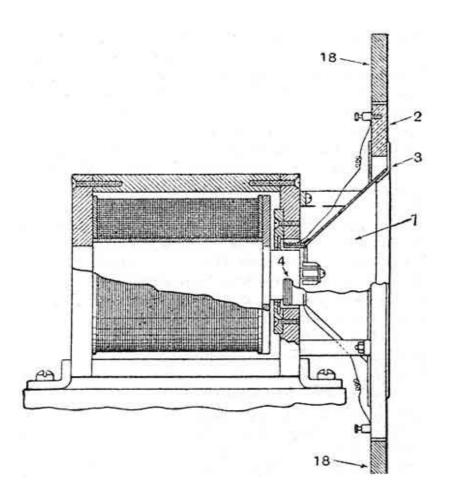


Abb. 12: schematisierte Ansicht des Rice-Kellog Lautsprechers gemäß der Patentschrift

\_

<sup>&</sup>lt;sup>30</sup> DRP 631724 vom 11.12.1924 – trichterloser Lautsprecher mit Schallwand, AEG.

Der Rice-Kellogg Lautsprecher ist ein elektrodynamischer Schallsender. Er besteht aus einem mechanischen Schwingungssystem mit einer sehr tief abgestimmten Konusmembran. Aufgrund dieser Abstimmung liegt der gesamte zu übertragende Frequenzbereich oberhalb der Eigenschwingung. In der folgenden Abbildung sieht man ein damals gebräuchliches Lautsprechersystem. Es ist getrennt in den elektrodynamischen Antrieb und die Konusmembran. Die Konusmembran ist an ihrem Rande so lose gehaltert, dass sie leicht und ohne Spannungen den größten ihr aufgezwungenen Amplituden folgt. Dabei sind die Rückstellkräfte so gering, dass die Eigenschwingung der aus leichtem Papier hergestellten Membran trotz ihrer geringen Maße sehr tief liegt. Dadurch sind auch die Möglichkeiten der Überschreitung der Grenzen des Hookschen Gesetzes ausgeschaltet, so dass in mechanischakustischer Hinsicht die Amplitudentreue gewährleistet ist. Membranen dieser Art bezeichnet man auch als Trägheitsmembran. Um der aus leichtem Papier hergestellten Membran eine gute Steifigkeit zu geben, wählte man beim Rice-Kellogg Lautsprecher die Konusform. Auf einem besonderen, kleinen, zylinderförmigen Spulenkörper aus Papier sitzt die Schwingspule der Konusmembran. Sie ist mit der Membran starr verbunden.



Abb. 13: Elektrodynamischer Schwingspulenlautsprecher mit konusförmiger Membran, links das Lautsprecherchassis und rechts eine Papiermembran in Konusform.

In der folgenden Abbildung ist die an einem Haltering befestigte konische Membran gut zu erkennen. In dem Spalt eines von Gleichstrom durchflossenen kräftigen Elektromagneten befindet sich eine bewegliche Dynamometerspule. An ihr ist der Membrankonus, dessen untere Spitze abgeschnitten ist, fest angebracht. Die wesentliche Neuerung bei dieser Anordnung ist die Verwendung eines Schallschirms. An diesem ist der elastische Membranrand befestigt. Dadurch soll verhindert werden, dass die nach rückwärts erzeugten Schallschwingungen mit den nach vorn abgestrahlten Interferenzen bilden konnten. Dieser Lautsprecher war infolgedessen in der Lage, auch die tiefen Töne bis etwa 100 Schwingungen pro Sekunde herab gut wiederzugeben.

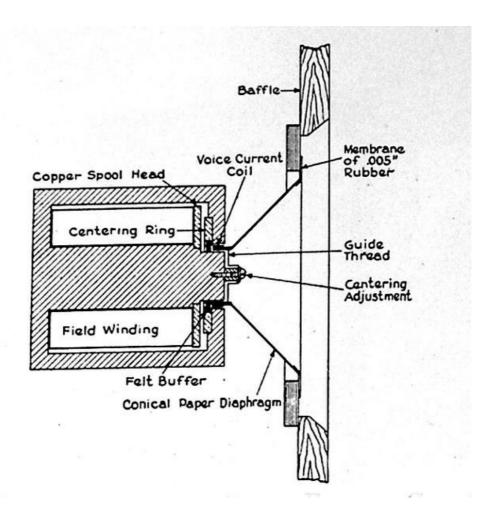


Abb. 14: Zeichnung von Chester W. Rice – "a large free-edged paper cone, coil driven, conical diaphragm loudspeaker unit" <sup>31</sup>

-

<sup>&</sup>lt;sup>31</sup> Vgl. Rice, Chester W. and Edward W. Kellogg 1925, S 461-475...

Chester Rice und Edward Kellogg bemerkten dazu:

"...the conclusion from these experiments was to the effect that the best practical solution of the loud speaker problem was a device combining the following features: a conical diaphragm four inches or more in diameter with a baffle of the order of two feet square to prevent circulation and so supported and actuated that at its fundamental mode of vibration the diaphragm moves as a whole at a frequency preferably well below 100 cycles."<sup>32</sup>

Der in den Jahren 1923/24 in den USA entwickelte Lautsprecher wird in Deutschland aufgrund eines Patentaustauschabkommens mit General Electric durch die AEG am 11.12.1924 als sogenanntes Kombinationspatent<sup>33</sup> angemeldet und dann ab 1927 vermarktet. Dabei standen die Mitarbeiter von AEG vor einem großen Problem, denn die zur Patenterteilung nötige Innovationshöhe war zunächst umstritten. Im Grunde wurden ja lediglich längst bekannte Elemente zusammengefügt. So zum Beispiel der bereits 1877 von Werner Siemens in einem Patent<sup>34</sup> beschriebene elektrodynamische Schwingspulenantrieb oder die Schallwand zur Vermeidung des akustischen Kurzschlusses, die als "Tonverstärker" für Musikinstrumente 1915 von Walther Burstyn<sup>35</sup> vorgeschlagen worden war. Insgesamt vergingen von der Anmeldung dieses Patentes bis zur Erteilung fast zwölf Jahre. Dies ist als Zeichen dafür zu sehen, dass es hart umkämpft wurde. In Anbetracht seiner Bedeutung ist das allerdings nicht verwunderlich. Inhaltlich beschäftigt sich die Patentschrift mit den grundlegenden Bedingungen für den Aufbau eines Lautsprechers mit Schallwand, der auch in der Lage ist tiefe Frequenzen mit genügender Leistung abzustrahlen. Festgehalten sind insgesamt 15 Ansprüche, ich möchte hier den ersten wörtlich wiedergegeben.

"1. Trichterloser Lautsprecher mit Schallwand dadurch gekennzeichnet, dass eine nicht ebene, vorzugsweise konische, durch allseitig nachgiebige Halterung auf eine unterhalb der niedrigsten wesentlichen Sprachfrequenzen (etwa 100 Hz) liegende abgestimmte Membran an angeordnet und diese so bemessen ist, dass der akustische oder nahe der Schallwand Kurzschluss der abzustrahlenden tiefen Frequenzen vermieden ist."<sup>36</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>32</sup> Vgl. Rice, Chester W. and Edward W. Kellogg 1925, S 461-475...

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup> Vgl. Hatschek 1935, S.77 f.

<sup>&</sup>lt;sup>34</sup> DRP 2355 vom 14.12.1877 - Telephone und Rufapparate mit magnetischer Gleichgewichtslage der schwingenden Theile, Siemens & Halske [u.a. elektrodynamisches Prinzip].

<sup>&</sup>lt;sup>35</sup> DRP 289385 vom 27.5.1915 – Tonverstärker, Walther Burstyn.

<sup>&</sup>lt;sup>36</sup> Vgl. Rubrik "Patentschau", in: Akustische Zeitschrift 1936 1. Jahrgang.

Die endgültige Markteinführung erfolgte dann im Frühjahr 1927 auf der Leipziger Messe.

"Dieser Lautsprecher von überragender Qualität eingebaut im ist elektrischen Schallplattenspieler »Polyfar«, der von der AEG für den Grammophon-Konzern (Polyphonwerke und Deutsche Grammophon) fabriziert werde und baugleich sei mit General Electrics »Panatrope«-Gerät"<sup>37</sup>

Außerdem wird der Rice-Kellogg-Lautsprecher im September auf der Berliner Funkausstellung von der AEG unter der Bezeichnung »Geaphon« präsentiert.

"Der Hallen-Lautsprecher 'Geaphon', ein Groß-Lautsprecher von hervorragenden Eigenschaften, wird die Lücke zwischen Riesen-Lautsprechern für öffentliche Plätze und Heim-Lautsprechern ausfüllen. Sein Klangvolumen ist den akustischen Ansprüchen größerer Vortragssäle, Konzerthallen, Kinotheater, Hoteldielen und dergl. angepasst, so dass er eine Musikkapelle ersetzt und ein großes Auditorium unterhalten kann. Selbst bei größter Lautstärke werden Sprache und Musik in bisher unerreichter Schärfe wiedergegeben."<sup>38</sup>

Den Lobpreisungen aus der damaligen Zeit steht die folgende Abbildung des Frequenzgangs gegenüber. Wie man sieht zeigt sich ein sehr welliger Verlauf mir deutlichen Einbrüchen – von einem ausgewogenen Klang kann aus heutiger Sicht also keine Rede sein.

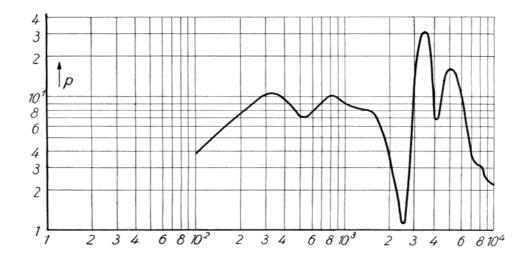


Abb. 15: Frequenzgang des Rice-Kellog Lautsprechers

 <sup>&</sup>lt;sup>37</sup> Vgl. Norden 1927 S. 262f.
 <sup>38</sup> AEG-Mitteilungen 11 1927, 447f.

#### 2.4.3. Der Blatthaller

Eingehende theoretische Betrachtungen führten zum Gedanken der Kolbenmembran, welche sich als parallele Fläche unter dem Einfluss eines elektromagnetischen Feldes bewegt. Darauf aufbauend konstruierte Riegger aus den Laboratorien von Siemens & Halske im Jahr 1924 einen elektrodynamischen Großflächenlautsprecher, den so genannten Blatthaller.

Auf einer Pertinaxmembran von 200mm x 540mm sind Kupferschienen aufgenietet, die fortlaufend miteinander verbunden sind und in die Zwischenräume der mäanderförmig angeordneten Magnetpole eintauchen.

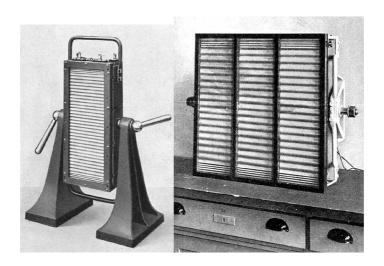


Abb. 16: links im Bild ein schmaler Blatthaller wie oben beschrieben, rechts im Bild der Riesenblatthaller mit einer strahlenden Fläche von 54cmx54cm

Damit wird die Membran überall von gleichen Kräften angegriffen und es entsteht eine transparente Wiedergabe mit einem erstaunlich ausgeglichenen Frequenzgang. Später wurde die Membran aus 1/10mm starken Duraluminium<sup>39</sup> gefertigt, das zur Erreichung einer größeren Steifigkeit gewellt war. Die Wellung lag dabei senkrecht zu der Leiterrichtung. An den parallel zu den Leitern verlaufenden Kanten wurde die Membran in Filz oder einem ähnlichen nachgiebigen Material gelagert. An den zu den Leitern senkrechten Kanten ist die Membran fest eingespannt. Der Blatthaller stellt ein tiefabgestimmtes System dar, da die Membranfläche so nachgiebig gegenüber Biegungsbeanspruchungen war, dass die

\_

<sup>&</sup>lt;sup>39</sup> Duraluminium, auch Dural oder Ergal genannt, ist eine Aluminiumlegierung, die eine besonders hohe Festigkeit hat. Der Name stammt aus dem Lateinischen (durus=hart).

Eigenschwingung der Membran unterhalb des für die Übertragung wichtigen Frequenzbereiches lag. Da nur eine enge Randzone Biegungsschwingungen ausführt, arbeitet das System ähnlich einer Kolbenmembran. Im Gegensatz zum Bandlautsprecher (siehe Kapitel 2.4.4) gab der Blatthaller tiefe Frequenzen befriedigend wieder, jedoch machten sich Verluste im Hochtonbereich bemerkbar.

Ihre ersten Einsätze erregten in allen Fachkreisen berechtigtes Aufsehen. Der Blatthaller war ein Instrument, auf das man sich selbst im Freien bei jedem Wetter verlassen konnte. So wurde zur Eröffnung des Deutschen Museums in München im Mai 1925 erstmalig ein Blatthaller eingesetzt. Dort wurden an 2 Endstufen einmal 3 und einmal 4 Blatthaller betrieben. Auf der Rednertribüne war ein Bändchenmikrophon montiert, die in einem anderen Raum gespielten Musikinstrumente wurden mit einem Rieggerschen Hochfrequenz-Kondensatormikrophon abgenommen. Nach mehrstufiger Vorverstärkung wurden die Musiksignale zu den Endstufen geleitet, welche dann die rund 1600 Zuhörer beschallten. Folgende Abbildung zeigt den Aufbau vor Ort.

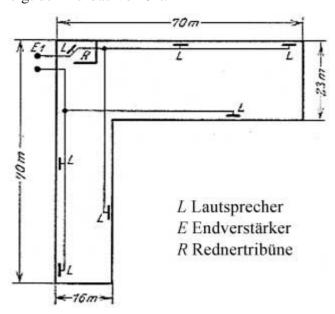


Abb. 17: Beschallungskonzept mit 7 Blatthallern zur Eröffnung des dt. Museums 1925

Mit diesem Konzept und den eingesetzten Blatthallern konnte schon damals eine beachtliche Menge von Menschen zufriedenstellend beschallt werden. So berichtete die Fachpresse von einer "außerordentlich vollkommenen und naturgetreuen Wiedergabe der Musikstücke."

\_

<sup>&</sup>lt;sup>40</sup> Vgl. Schumann, 1926 S.294f.

"Die Aufgabe der Übertragung von Musik an große Menschenmengen in einer Weise, die auch musikalisch künstlerischen Anforderungen in hohem Grade gerecht wird, ist hier durch das wissenschaftliche Laboratorium des Siemenskonzerns zum ersten Male praktisch in großem Maßstabe gelöst worden. Es war gewissermaßen eine erste große Feuerprobe, die ehrenvoll bestanden wurde, und auf deren Erfahrungen fußend weiter gearbeitet wird."

Weitere Einsätze der Blatthaller waren z.B. die Beschallung zur Eröffnung der "Neuen Autohalle" im selben Jahr in Berlin. Dort wurden mit insgesamt 8 Riesenblatthallern knapp 20.000 Zuhörer versorgt. Auf dem Marktplatz in Danzig kam 1925 anlässlich einer Physikertagung ein Blatthaller mit einem drei Meter langen Trichter zur Anwendung. Für die entstehenden "Schattenstellen" im Nahbereich des Trichters war noch ein zweiter Blatthaller ohne Trichter installiert. Blatthaller wurden vor allem für Beschallungsaufgaben im Freien eingesetzt. Eine logische Weiterentwicklung war dann der Blatthaller 3, der ab 1930 unter der Bezeichnung "Gigant-" bzw. "Wotan-Lautsprecher" für Aufsehen sorgte.

"Ein Lautsprecher, den man bis zu 20 km weit hört - eine solche Lautstärke kann man sich kaum vorstellen. Sie ist Wirklichkeit geworden durch den Riesenblatthaller - Nummer Drei. Vieltausendfach verstärkt gibt er Sprache und Musik wieder. Trotz dieser Riesenleistung ist er verhältnismäßig klein."

Der Magnet des Riesenblatthallers war außerordentlich stark und wurde mit besonders hohem Wirkungsgrad ausgenutzt. Seine Membran bestand aus 1 1/2 mm starkem gewelltem Aluminiumblech, und ihre Ausschläge betrugen bis zu 2 cm. Die dadurch entstehenden Lufterschütterungen machten es unmöglich während einer Schallübertragung mittels Blatthaller 3 in seiner unmittelbaren Nähe zu stehen. Dies war allerdings auch nicht seine Aufgabe. Er war vielmehr dafür konzipiert, von einem Dach oder von einem Fesselballon aus ganze "Stadtteile" mit Schall zu versorgen.

<sup>&</sup>lt;sup>41</sup> Vgl. Schumann, 1926 S.294f.

<sup>&</sup>lt;sup>42</sup> [Titel unbekannt], Druckschrift Siemens & Halske, Wernerwerk (SH 3981), [vermutlich 1930]. [Siemens-Archiv, München].

Auf der Großen Deutschen Funkausstellung war der Riesenblatthaller 3 von der Höhe des Funkturmes herab zu hören.

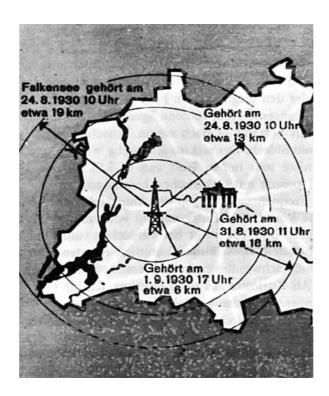


Abb. 18: zeigt bei Versuchen vom Funkturm damals beobachtete Schallreichweiten

Der Blatthaller und auch der Riesenblatthaller konnten zwar mit größeren Leistungen beschickt werden, ohne dass die Lautsprecher zerstört wurden, arbeiteten aber nicht so effektiv wie die besten Konuslautsprecher der Konkurrenz und verlangten zudem ein gewisses Mindestmaß an zugeführter Leistung, um überhaupt zu arbeiten. Gegen Mitte der 1930er Jahre überwogen somit die Nachteile des berühmten, 10 Jahre lang bei zahlreichen Großveranstaltungen erfolgreich eingesetzten schwingenden Blattes von Siemens & Halske. Somit konnte sich auch auf dem Gebiet des Großlautsprecherbaus der auf Rice und Kellogg zurückgehende dynamische Konuslautsprecher, der bereits den Rundfunk- bzw. Consumer-Bereich erobert hatte, die Spezialkonstruktion dem Siemensgegen aus Forschungslaboratorium durchsetzen. Trotzdem stellte der Riesenblatthaller Mitte der 20er Jahre den leistungsstärksten funktionierenden Lautsprecher dar. In der folgenden Abbildung ist eine Übersicht über verwendete Lautsprecher schematisiert.

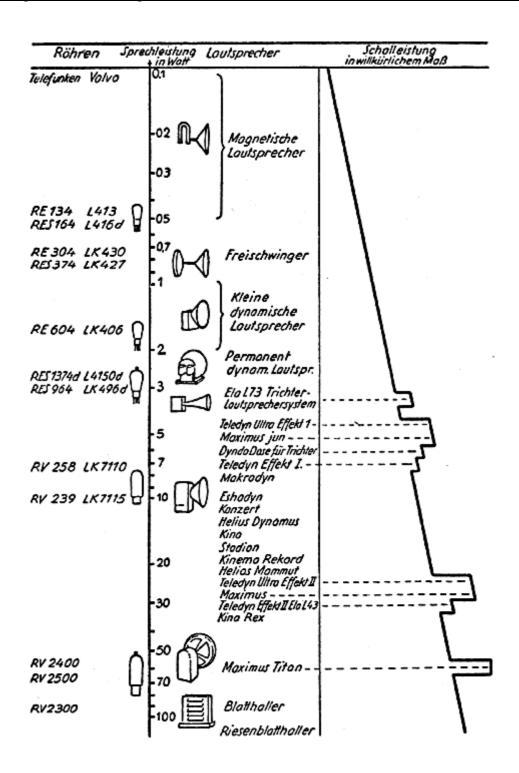


Abb. 19: "Die Leistungen der verschiedenen Lautsprecherarten. Größere Leistungen als angegeben darf man den Lautsprechern nicht zuführen, wohl aber kann man einen für größere Leistungen gebauten Lautsprecher meist auch mit etwas kleineren Leistungen betreiben."

<sup>&</sup>lt;sup>43</sup> Vgl. Wigge Stuttgart 1934.

#### 2.4.4. Band- / Bändchenlautsprecher

Zunächst ging man daran, den schwingenden Körper so leicht wie möglich zu machen. So entstand aus den Arbeiten von Walter Schottky und Erwin Gerlach zum 1924 vorgestellten Bändchenmikrofon der Bandlautsprecher<sup>44</sup> als eine Sonderform des elektrodynamischen Lautsprechers.

Zwischen den Polen eines Elektromagneten ist ein quergeriffeltes Aluminiumband von 100mm Länge und 10mm Breite fast spannungslos aufgehängt. Dabei fungiert das Bändchen gleichzeitig als Antriebsspule und Membran. Es führt unter dem Einfluss des wiederzugebenden Wechselstromes im Magnetfeld des Elektromagneten Schwingungen aus.

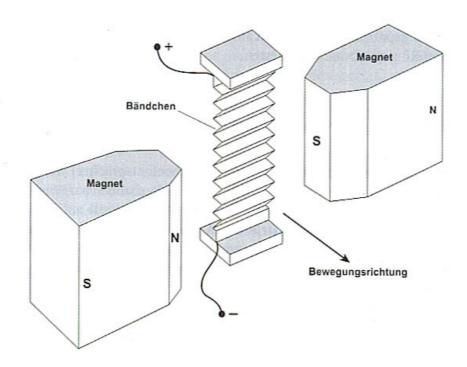


Abb. 20: schematisierter Aufbau eines Bändchenlautsprechers

Das Ergebnis war verblüffend und ein großer Erfolg. Der "erste Großlautsprecher der Welt"<sup>45</sup> gab sogar die Tonfrequenzen über 3.000 Hz wieder. Plötzlich wurden auch Obertöne deutlich hörbar, was mit elektromagnetischen Systemen zu diesem Zeitpunkt noch nicht möglich war.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>44</sup> DRP 421038 vom 13.1.1923 - Elektrodynamischer Lautsprecher, Siemens & Halske (Erwin Gerlach). [Bandlautsprecher].

<sup>&</sup>lt;sup>45</sup> Vgl. Bradtke 1937 S.2 – 7.

Schon Anfang des Jahres 1924 wurde eine Großlautsprecheranlage in einer Halle am Kaiserdamm in Berlin eingesetzt. Die Betriebssicherheit dieses Bandlautsprechers war jedoch noch nicht ausreichend, so dass während des Betriebes immer ein Techniker mit einem Ersatzbändchen bei dem Lautsprecher stehen musste.



Abb. 21: elektrodynamischer Großlautsprecher von Siemens & Halske in der Halle am Kaiserdamm in Berlin

Weitere Einsätze folgten im September 1924 auf dem Dach des Warenhauses "Tietz" in Berlin, Leipziger Str., wo ein riesiger Trichter mit der Öffnung in Richtung Dönhoff-Platz montiert war. Die erstaunte Menge soll andächtig der ertönenden Kammermusik und den Ankündigungen der Warenhausleitung gelauscht haben. Im November 1924 sorgte ein Bandlautsprecher für die Freilichtbeschallung zur Weihe der Domglocke in Köln. Hierbei wurden zur Schallführung und -bündelung lange Holztrichter verwendet. Wie sich herausstellte ließ sich mit Hilfe großer Vorsatztrichter ein überraschend guter Wirkungsgrad und damit eine erstaunliche Lautstärke erzielen. Im Gegensatz dazu stand der große Nachteil der Bandlautsprecher - die unvollkommene Wiedergabe der tiefen Frequenzen.

Deshalb setzte man für die Beschallung, besonders mit Musikdarbietungen zu dieser Zeit lieber Blatthaller ein. Weitere Nachteile von Bändchensystemen waren die große mechanischen Beschädigungen die Empfindlichkeit gegenüber und niedrige Ausgangsimpedanz, die mit einem zusätzlichen Übertrager an den Verstärkerausgang angepasst werden musste Die Entwicklung der Bandlautsprecher wurde aus diesem Grunde eingestellt und man konzentrierte sich auf die Vervollkommnung besserer Systeme.

"Wohl diejenige Art von Lautsprechern, welche die Forderung der Anpassung an verschiedenste Frequenzen bisher am besten erfüllte, war der elektrostatisch betriebene trichterlose Lautsprecher [...]. Gleichfalls hervorragend anpassungsfähig ist der »Bändchen«-Lautsprecher. Dieser, ebenso wie der elektrostatische Lautsprecher ist aber derart voluminös, seine Anschaffungs- und Betriebskosten sind so groß, dass sich hierdurch schon eine Einführung in weitere Kreise verbietet."<sup>46</sup>

Auch Riemenschneider kommt 1925 zu diesem Urteil über den Bandlautsprecher. Er erreiche eine erstaunlich große Lautstärke ohne nennenswerte Verzerrungen, könne aber aufgrund des hohen technischen Aufwands "als für die Allgemeinheit gebrauchsfähige[r] Lautsprecher"<sup>47</sup> nicht betrachten werden.

In den 50er Jahren sind wieder kommerzielle Bändchenlautsprecher auf den Markt gekommen. Berühmt geworden ist vor allem das von Stanley Kelly entwickelte Bändchen. dessen Produktion in den 60er Jahren von der Firma Decca übernommen wurde und das als "London Ribbon" fast 30 Jahre lang weitgehend unverändert produziert worden ist. Auch sein System wurde zur Wirkungsgradsteigerung mit einem Horn ausgestattet. Mitte der 50er Jahre hat auch der englische HIFI-Pionier Herbert J. Leak mit Bändchen-Lautsprechern experimentiert. Allerdings ist das Leak-Ribbon nicht über das Prototyp-Stadium hinaus gekommen. Die Produktion scheiterte an den hohen Kosten für leistungsfähige Magnetmaterialen. Die Membran des Prototyps war 50 mm lang und 9,5 mm breit - das Bändchen war damit ein reiner Hochtöner, der ab rund 3000 Hz arbeiten konnte. Leak war auf

Vgl. Kohlhauer 1924 S. 96ff.
 Vgl. Riemenschneider 1925.

der Suche nach einem geeigneten Hochtöner, der mit einem 15" Basstreiber in einem Zweiwegsystem zusammen arbeiten sollte. Dazu wäre eine Übernahmefrequenz von maximal 1000 Hz erforderlich, die einen ungeheuren Magneten erfordert hätte. Das war jedoch zu teuer, deshalb wurde die Entwicklung eingestellt.

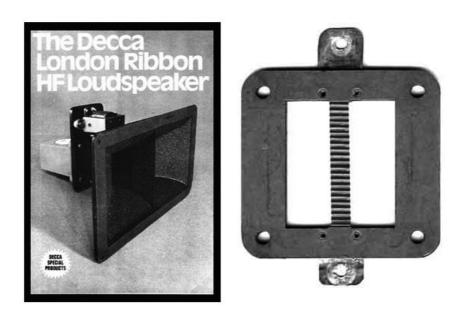


Abb. 22: links ein Prospekt der Firma DECCA, rechts im Bild das sog. "london ribbon" welches laut Prospekt so dünn wie "1/10 eines menschlichen Haares ist"

Erst Jahre später erinnerte sich Oscar Heil an das Prinzip mit der massearm gefalteten Folie. Im Gegensatz zum Bandlautsprecher bewegt sich bei seinem "Air-Motion-Wandler" die Faltfolie quer zur Richtung des Magnetfeldes. Unter Einwirkung eines Wechselstromes werden die Falten schmaler bzw. breiter und es kommt zu einem "Blasebalgeffekt", ähnlich wie bei einem Akkordeon. Vergleichbar mit der Kompression in einem herkömmlichen Horntreiber verbessert sich dadurch der Wirkungsgrad. Mit zunehmender Frequenz erhöht sich auch die Richtwirkung, weshalb dieses System sehr gut für den Hochmitteltonbereich geeignet ist. Der Air-Motion-Transformer wird in spezieller Form auch "JET-Strahler"<sup>48</sup> genannt. Er kommt bis heute in verschiedenen Versionen bei einigen Herstellern zu Verwendung, wegen seines konstruktiven Aufwandes eher im hochpreisigen Bereich.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>48</sup> Vgl. dazu: Klaus Heinz, "Air Motion Transformer Principle Loudspeaker Drives", Preprint 4984, 106th AES Convention, München, May 1999.

Die Rückkehr zum eigentlichen Bändchenlautsprecher erfolgte erst Mitte der 70er Jahre mit der zunehmenden Begeisterung für "Super-HIFI-Anlagen". Für den HIFI-Bereich haben solche Hochtonsysteme ihre volle Berechtigung, erreichen sie doch eine obere Grenzfrequenz weit über dem menschlichen Hörbereich. Auch an Transparenz sind sie aufgrund der Impulstreue, bedingt durch die geringe Masse des schwingenden Systems auch heute kaum zu überbieten. Da sie anderen Hochtonsystemen gegenüber nur einen geringen Schalldruck erzeugen können, erscheinen sie für die Beschallungstechnik jedoch weniger geeignet und finden heutzutage eher selten Verwendung. Einzig die holländische Firma "Alcons Audio" setzt für die Hochtonwiedergabe in den von ihnen gebauten Großbeschallungssystemen ihren patentierten Alcons RBN1801 Bändchenhochtöner ein. Dabei werden lange Bändchen verwendet. Sie haben die besondere Fähigkeit, eine zylindrische Wellenfront aufzubauen, die in der Vertikalen wegen ihrer starken Richtwirkung zur Vermeidung früher Reflektionen beiträgt. Von einer solchen Linienquelle kann man sprechen, wenn die Länge der Membrane größer als die halbe Wellenlänge der tiefsten abgestrahlten Frequenz ist (siehe dazu auch Kapitel 2.8.6). Der von Philip de Haan entwickelte Treiber ist der im Moment leistungsstärkste Bändchenhochtöner am Markt.



Abb. 23: die kleine Version des RBN1801 – der Alcons RBN401 Bändchenhochtöner

## 2.5 Das elektrostatische Prinzip

Als Partner des 1924 von Riegger erfundenen Kondensatormikrofons entstand der nach dem gleichen Funktionsprinzip arbeitende elektrostatische Lautsprecher. Erste Versuche erfolgten bereits 1920 durch Joseph Massolle und gipfelten in der Entwicklung des "Statophon"<sup>49</sup>. Masolle hielt das Prinzip der elektrostatischen Anziehung bei richtiger Ausführung für das Geeignete um ein "brauchbares Organ zur Erzielung größerer naturgetreuer Schallmengen zu entwickeln"<sup>50</sup>. Gegenüber der mit Löchern NN versehenen, ruhenden massiven Elektrode B befindet sich die schwingende dünne Elektrode, die

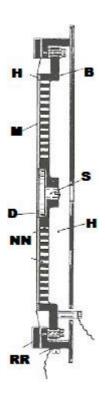


Abb. 24: Schematische Darstellung eines Triergon-Lautsprechers -- "Statophon" genannt

Membran M. Der Abstand zwischen Elektrode und Membran wird durch den Abstandsring D mit der Schraube S bestimmt. Die Elektrode besteht aus einer gespannten isolierenden Glimmerscheibe, die ihrer äußeren Seite durch einen Silberbelag leitend gemacht wurde. Dafür wurde ammoniakalische Silbernitratlösung verwendet. Ein Problem war dabei die Beschaffung von dünnen und sehr großen Glimmerplatten und die darauffolgende Verarbeitung zu 1/10 mm dicken Membranen. Dieser leitende Belag ist mit dem äußeren Befestigungsring RR leitend verbunden. Zwischen beiden Elektroden liegt eine Gleichstromvorspannung an, welche von im akustischen Rhythmus erfolgenden Wechselspannungen überlagert sind. Die Vibrationen der Membrane werden als Schall auf die angrenzende Luftschicht übertragen.

<sup>&</sup>lt;sup>49</sup> DRP 368 287 vom 4.12.1920 - Anordnung für elektrostatische Telephone [Statophon] / Joseph Massolle, Hans Vogt und Joseph Engl.

<sup>&</sup>lt;sup>50</sup> Vgl. Deutsches Museum - Abhandlungen und Berichte - 32. Jahrgang 1964 - Heft2.

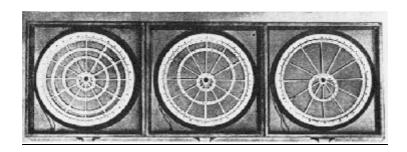


Abb. 25: Statophon-Kombination.

Die Abbildung zeigt eine Kombination mehrerer Statophone wie sie bei Tonfilmvorführungen und sog. "Fernkonzerten" verwendet wurden. Jedes einzelne Statophon ist dabei für die Wiedergabe unterschiedlicher Tonbereiche konstruiert.

Dieser Lautsprechertyp wird erst funktionsfähig, wenn zwischen beide Platten eine Polarisationsspannung in Reihe mit der Wechselspannung gelegt wird. Sofern die Amplitude der Wechselspannung die der Gleichspannung nicht übersteigt, schwingt die Membran um ihre Mittellage mit der Frequenz der Wechselspannung. Da nur für genügend hohe Frequenzen die Wechselspannungsamplitude viel kleiner ist als die Polarisationsspannung ist, sind diese Systeme nur für die Hochtonwiedergabe geeignet.

Ein brauchbarer Lautsprecher wurde 1930 von Hans Vogt entwickelt. Bei dem von ihm benutzten Gegentaktprinzip befindet sich die Membran nicht einer starren Platte gegenüber, sondern zwischen zwei ruhenden Elektroden, die zur Schallabstrahlung in den Raum perforiert sind. Dies gestattet die Verarbeitung größerer Signalspannungen und damit die Wiedergabe auch tieferer Frequenzen.

Eine Weiterentwicklung kam dann mit dem Quad ESL 57 auf den Markt. Basierend auf einem Patent von Edward W. Kellogg<sup>51</sup> stellte der englische HIFI Pionier Peter Walker im Jahr 1957 den ersten "fullrange" tauglichen elektrostatischen Lautsprecher der Öffentlichkeit vor. Er wird heute noch gebaut und erfreut sich unter Soundpuristen großer Beliebtheit. Der ELS 57 erzeugte einen derartig wirklichkeitsgetreuen Klang, dass man davon in England sagte: "for the closest approach to the original sound". Gemeint ist, dass es wohl

<sup>&</sup>lt;sup>51</sup> US – Patent 1983377 vom 17.9.1929 - Kellogg, [elektrostatisch].

keinen anderen Lautsprecher gab, der Instrumente und Stimmen derart naturgetreu wiedergeben konnte. Da ich den Lautsprecher noch nicht persönlich gehört habe, kann ich nicht darüber urteilen. Fakt ist, das die Beurteilung eines Klanges immer subjektiv bleiben wird. Nach Einführung der Stereofonie Anfang der 60er Jahre war mit dem Quad ESL 63 auch ein Stereomodell verfügbar. Nun war sogar eine Richtungs-Erkennbarkeit bei einzelnen Instrumenten möglich.



Abb. 26: vollbereichstauglicher, elektrostatischer Lautsprecher Quad ESL 57

Den Vorteilen dieses Systems, die darin bestehen, dass die Membran sehr leicht und groß sein kann und dass die angreifenden Kräfte über die gesamte Membranfläche gleichmäßig verteilt sind, stehen erhebliche Nachteile gegenüber. Große Membranbewegungen lassen sich nur durch sehr hohe Spannungen und genügend kleine Abstände zwischen den Elektroden erzielen. Desweiteren steigt die zwischen den Elektroden ausgeübte mechanische Anziehungskraft nicht proportional mit der Signalspannung an, wodurch nichtlineare Verzerrungen auftreten. Außerdem erzeugen elektrostatische Lautsprecher nur geringe Schallpegel, so dass eine Anwendung für Beschallungszwecke ungeeignet erscheint. Trotzdem sind sie heute eine der teuersten und besten Lösungen zur Abstrahlung von hohen Tönen und findet vor allem in Studiomonitoren und HighEnd – HIFI Lösungen Verwendung.

## 2.6 Das piezoelektrische Prinzip

Der piezoelektrische Effekt ist seit vielen Jahren bekannt. Er wurde im Jahre 1880 von den Brüdern Jacques und Pierre Curie entdeckt. Sie fanden heraus, dass bei mechanischer Beanspruchung auf der Oberfläche von Turmalinkristallen elektrische Ladungen entstehen, deren Menge sich proportional zur Beanspruchung verhält. Dieser Effekt stellt allerdings nur eine Eigenschaft der heute "Ferroelektrika" genannten Stoffe dar. Sie besitzen elektrische Eigenschaften, die den magnetischen Eigenschaften ferromagnetischer Werkstoffe analog sind und zum Teil immer noch erforscht werden. Die Elektrostriktion als Umkehrung des piezoelektrischen Effekts findet vor allem als Schallwandlerprinzip neben magnetostriktiven Schwingern in der Ultraschalltechnik Anwendung.

Aber auch als Hochtonlautsprecher sind derartige Systeme in Gebrauch. Da die durch Anlegen einer Spannung an den Kristall erzeugten Deformationen sehr klein sind, werden sie auf eine Konusmembran übertragen und sind als Schall hörbar.

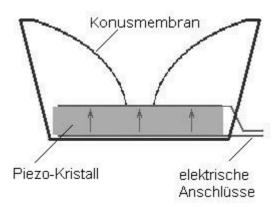


Abb. 27: Funktionsweise des piezoelektrischen Systems

Es gibt auch Piezo-Hochtonsysteme mit vorgesetzten Hornstrahlern. Deren Wirkungsgrad ist zwar größer als der von Modellen mit freistrahlender Membran, dafür haben sie aber ungünstigere Übertragungskennlinien und die Wiedergabe ist mehr verfärbt. Als preiswerte Alternative zu hochwertigen Druckkammerhornsystemen sind solche Lautsprecher in Beschallungsanlagen gelegentlich zu finden. Sie sind leicht, da sie keinen Magneten

benötigen und können sogar ohne Frequenzweiche, d.h. ohne zusätzliche Kondensatoren oder Spulen betrieben werden. Zur hochqualitativen Schallwiedergabe sind piezoelektrische Lautsprecher aufgrund der, durch den hohen Klirrfaktor bedingten, unterdurchschnittlichen Klangqualität nicht zu empfehlen.

Ein im Jahr 1939 vorgestelltes System war der sogenannte "Leisesprecher". Er hatte die Form einer allseitig geschlossenen flachen Dose mit einem Durchmesser von etwa 12 cm und bestand aus einem Bakelitgehäuse, in welches ein Kristallsystem eingebaut war. Er war so konzipiert, dass ein sehr guter Hörempfang durch Kissen oder Polster hindurch



Abb. 28: "Leisesprecher" von Grawor, vorgestellt auf der Berliner Funkausstellung 1939

möglich war. Die Frequenzkurve zeigte dementsprechend einen Anstieg zu den höheren Frequenzen, wodurch die starke Dämpfung der Höhen durch die besondere Art des Empfanges ausgeglichen wurde.

"Es besteht noch der gewiß nicht zu unterschätzende Vorteil, daß der "Leisesprecher" einfach unter das Bettkissen gesteckt wird, oder hinter das Polster im Armstuhl geschoben wird, ohne

durch Bügel und angepreßte Ohrmuscheln lästig zu fallen, wie die bisher verwendeten Kopfhörer, was insbesondere bei Kranken auf die Dauer als unerträglich empfunden wird."<sup>52</sup>

Angeschlossen wurde der "Leisesprecher" an die Primärseite eines Ausgangstransformators. Sein Verbrauch lag bei 0.050 Watt, so dass es möglich war, viele einzelne Systeme an einem Empfänger zu betreiben, was auch für einen kostengünstigen Einsatz in großer Anzahl sprach.

### 2.7 Sonderformen

Neben Wandlertypen auf die schon näher eingegangen wurde, existiert noch eine Vielzahl anderer, eher exotischer Varianten mit geringer Verbreitung im Lautsprecherbau. Auf drei weitere dieser Sonderformen möchte ich nun etwas genauer eingehen.

# 2.7.1 Manger-Wandler

Einige Lautsprechertypen arbeiten mit Biegewellenschwingungen. Sie sind besonders geeignet zur breitbandigen Wiedergabe. Ein Beispiel dafür ist der sogenannte Manger-Wandler. Fast 30 Jahre ist es her, dass Josef Manger die Idee für den nach ihm benannten, ungewöhnlichen Schallwandler entwickelte. Das Funktionsprinzip ist so genial wie einfach. Wirft man einen Stein ins Wasser, so breiten sich an der Oberfläche konzentrische Wellen aus; ganz ähnlich funktioniert die per Impuls angeregte Membranbewegung des Manger-Chassis. Ausgehend von der 70-Millimeter-Schwingspule im Zentrum breiten sich auf der biegeweichen Membran Wellen aus, die in einem sternförmigen akustischen "Sumpf" auslaufen, um Reflexionen zu vermeiden. Die komplexe Schwingungsform des Tonsignals wird bei diesem so genannten Biegewellen-Wandler als Welle auf der weichen Membran nachgebildet und erzeugt den Schall durch Wellentäler und -berge. Hier bietet sich ein Vergleich zum menschlichen Ohr an. Der Manger Schallwandler arbeitet ähnlich wie die

<sup>-</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>52</sup> [ohne Autor:] Silent Loud Speaker – der Leisesprecher, in: Funktechnischer Vorwärts, Nr. 22, 1937, S. 644.

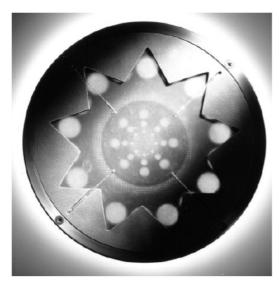


Abb. 29: Mangerscher Biegewellenwandler

Basilarmembran in der Cochlea. Das durch die Gehörknöchelchen in das Innenohr übertragene komplexe Schallsignal breitet sich auf der Basilarmembran in Form einer Wanderwelle aus. Die Basilarmembran besitzt an ihrem Anfang beim ovalen Fenster eine andere Steifigkeit als in der Schneckenspitze. Daher führen die einzelnen Frequenzanteile des Signals an unterschiedlichen Orten zu Auslenkungen, wobei die hohen Frequenzen gleich hinter dem ovalen Fenster und die tiefen Frequenzen erst in der Nähe des Helikotremas abgebildet werden. Die Membran des Manger-

Wandlers besteht aus drei Schichten mit unterschiedlicher Steifigkeit. Die Wellenausbreitung erfolgt auch hier in Form einer Wanderwelle, wobei im Zentrum die hohen Frequenzen übertragen werden. Je tiefer die Frequenzen sind, desto weiter am Rand werden sie abgestrahlt. Somit gibt es kein aus Hoch-, Mittel- und Tieftönern zusammengesetztes Signal, keine örtlich getrennten Schallquellen, die Interferenzeffekten ausgesetzt sind und sich somit je nach Phasenlage addieren oder subtrahieren. Beim Manger-Wandler macht sich das akustische Signal als komplexes Ganzes auf den Weg zum Zuhörer. Bedingt durch das kurze Einschwingverhalten, das mit dem Verhalten des Luftdrucks auf einen Pegelsprung nahezu identisch ist, "scheinen die Schallsignale im Raum zu entstehen"<sup>53</sup>.

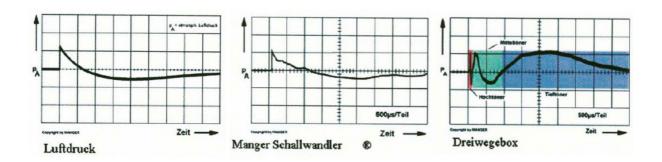


Abb. 30: Vergleich verschiedener Einschwingvorgänge

<sup>&</sup>lt;sup>53</sup> Vgl. dazu Ulrike Seifert-Kraft "Das umgekehrte Ohr" aus der Hörakustiker-Fachzeitschrift AUDIO INFOS No. 8, S. 43f.

Die räumliche Transparenz bewirkt, dass z.B. einzelne Musikinstrumente gut ortbar sind und aus dem Gesamtklang herausgehört werden können. Natürlich war der Weg von der Idee zur Produktion nicht einfach. Es dauerte lange, bis die passenden Membran-Materialien gefunden waren und die Fertigung perfekt klappte. In HiFi-Kreisen wird die Technik seit Jahrzehnten heiß diskutiert<sup>54</sup>, in der Beschallungstechnik findet dieser Lautsprechertyp aufgrund seiner begrenzten Leistungsfähigkeit keine Anwendung.

### 2.7.2 Distributed Mode Lautsprecher

Ebenfalls mit Biegewellenschwingungen arbeitet der "Distributed Mode Loudspeaker" (DML). Dabei handelt es sich um eine Lautsprecherart, die in den letzten Jahren mehr und mehr an Interesse gewinnt. Dabei ist das Grundprinzip eine Erfindung, die von Dietz, Bothe & Bauch schon 1927 als Patent angemeldet wurde. Warum die Bedeutung der Biegewellenwandler trotzdem erst in den letzten Jahren mehr und mehr wächst, ist darauf zurückzuführen, dass erst mit dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik die Voraussetzungen für eine effektive Weiterentwicklung gegeben sind.

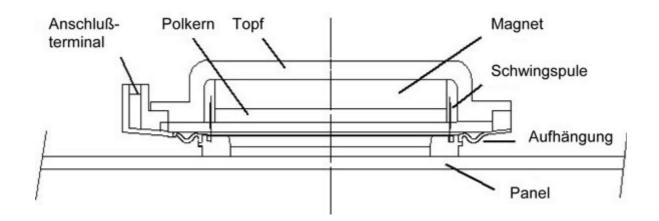


Abb. 31: Querschnitt eines typischen Moving-Coil Exciters

Der Mechanismus zur Schallabstrahlung basiert nicht auf einer kolbenförmigen Bewegung der Membran. Im Gegenteil, ein flaches Panel wird derart in Vibration versetzt, dass möglichst viele seiner Eigenmoden angeregt werden. Ein Gehäuse, wie im klassischen

<sup>&</sup>lt;sup>54</sup> Vgl. dazu AV-Magazin Ausgabe 02/2005 Testbericht "Manger Sidekick/Subsonic".

Lautsprecherbau üblich, ist dabei nicht notwendig. Ein DML-Panel besteht aus einer dünnen (0.2 - 6 mm) ebenen Platte mit hoher Steifigkeit und einem geringen Gewicht. Die Anregung erfolgt über sogenannte Exciter, die das Panel zu Biegeschwingungen anregen. Bei einem korrekt entworfenen Panel verteilen sich die angeregten Moden gleichmäßig im Frequenzbereich. Eine hohe Modendichte erzeugt ein stark unterschiedliches Geschwindigkeitsprofil auf dem Panel, wodurch ein räumlich gleichmäßig verteiltes Abstrahlverhalten bewirkt wird. Damit ist es möglich, jede Region des Panels vollständig unabhängig von der benachbarten Region zum Schwingen zu bringen. Ganz im Gegensatz dazu stehen die wohlgeordneten und gleichförmigen Bewegungen eines Kolbenstrahlers.

Harris und Hawksford haben gezeigt, dass eine Platte, die eine solche Schwingungscharakteristik aufweist, einen breitbandigen akustischen Strahler darstellt.<sup>55</sup> Das erzeugte Schallfeld unterscheidet sich dabei deutlich von dem eines konventionellen Lautsprechers. Zu den Vorteilen bei der Anwendung dieser Technologie gehören der breite Frequenzbereich der Schallwiedergabe (Breitbandlautsprecher) und das gleichmäßige räumliche Abstrahlungsverhalten, so dass sich ein weitgehend homogenes Schallfeld ausbreiten kann. Verzerrungen liegen auf oder unter dem Niveau vergleichbarer Konuslautsprecher. Allerdings besitzen sie eine mangelhafte Tieftonwiedergabe sowie einen geringen Wirkungsgrad.

In der Zukunft könnten also Flachlautsprecher entwickelt werden, die z.B. als Bilder an der Wand hängen oder unsichtbar in Möbel integriert sind. Damit könnte die Schallwiedergabe gerade in architektonisch wertvollen Räumen nahezu "unsichtbar" geschehen.

## 2.7.3 Ionen-Lautsprecher

Wohl zu den exotischsten Wandlern gehört der Ionen-Lautsprecher. Er ist der einzige Wandler der eine praktisch masselose Membran besitzt. Entwickelt vom Pariser Physiker Dr. Siegfried Klein findet er erstmals Mitte der 50er Jahre Erwähnung. Das sogenannte IONOPHONE wurde unter dem Namen IONOVAC von der DuKane Corporation in den USA und unter dem Namen IONO FANE von der Firma Fane Acoustics Ltd. in England vertrieben.

<sup>&</sup>lt;sup>55</sup> Vgl. dazu Harris, Neil; Hawksford, Malcolm J, "The Distributed-Mode Loudspeaker (DML) as a Broad-Band Acoustic Radiator", Preprint 4526, 103th AES Convention, September 1997.

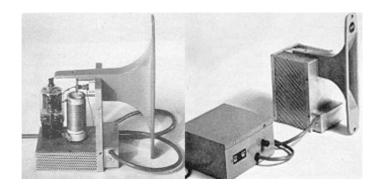


Abb. 32: Ionenschallwandler IONOVAC links der Hochfrequenzteil, rechts die komplette Einheit mit abgesetztem Netzteil

Alle bisher beschriebenen Lautsprecher haben eine Gemeinsamkeit: Eine mehr oder weniger massebehaftete Membran muss bewegt werden, um Schall abzustrahlen. Der Ionen-Lautsprecher hat diesen Nachteil nicht, da hier praktisch keine Membran vorhanden ist. Es brennt ein Lichtbogen, der mit einem hochfrequenten Strom gespeist wird. Dieser "Speisestrom" wird mit einer Tonfrequenzspannung moduliert. Dadurch schwankt die Helligkeit des Lichtbogens und auch die Temperatur im Rhythmus der Tonfrequenzspannung. Da das Volumen der Luft mit steigender Temperatur zunimmt, werden die angrenzenden Luftmoleküle angestoßen und Schallwellen können sich ausbreiten. Hier wird der gleiche Effekt ausgenutzt, der auch bei der Entstehung des Donners wirksam ist. Die Schallerzeugende Luft hat ein Volumen von etwa einem Kubikzentimeter, das heißt das schallerzeugende Medium hat eine Masse von 1,29 Milligramm. Die Kalotte eines Titanhochtöners ist etwa 15 mal schwerer. Da sich die Flamme nahezu trägheitslos ausdehnt bzw. zusammenzieht werden die elektrischen Signale ohne Einschwingen in Schall umgewandelt.

Aufgrund der kleinen Masse besitzt der Ionen-Lautsprecher einen "beschränkten" Frequenzgangs von 8 -100 kHz Deshalb wird er ausschließlich als Hochtöner eingesetzt. Um den gewünschten Wirkungsgrad und Lautstärke zu kommen braucht der Ionenhochtöner ein Horn. Leider haben Hörner viele klangbeeinflussende Eigenschaften (siehe Kapitel 2.8.3). So versuchten sich Siegfried Klein und Reiner Hass ab 1978 an einer Version ohne Horn. Dazu war ein Vergrößern der Flamme notwendig. Sie pulsierte somit höher, erreichte einen höheren Wirkungsgrad und eine fast kugelförmige Abstrahlung. Leider entsteht bei jedem Ionisierungsvorgang ultraviolettes Licht, das den Sauerstoff der Luft (O<sup>2</sup>) in Ozon (O<sup>3</sup>)

umwandelt. Also wurde versucht die Ozonabgabe wirkungsvoll zu unterdrücken. Man machte sich die Empfindlichkeit des Gases auf Wärme zu nutze. Ozon zerfällt spontan mit einer Halbwertzeit von 3 Tagen bei einer Raumtemperatur von 20°C. Je höher die Temperatur umso schneller der Prozeß. Die Lösung war ein Katalysator, der aus zwei ineinander liegenden Drahtkugeln bestand und die Hitze der Plasmaflamme im Inneren des Wandlers hielt. So wurde der Ozonzerfall beschleunigt und die gesetzlichen Grenzwerte unterschritten. Der MP 1 war der erste rundumstrahlende Plasma Hochtöner. 2 Jahre später kam mit dem MP 2 eine verbesserte Version mit neuem Gehäuse auf den Markt. Leider wurde er nicht weiter hergestellt. Gründe sind nicht bekannt. Vermutlich war die Schaltung zu aufwendig oder zu wartungsanfällig.

Prominentestes Beispiel jedoch war der Ionenschallwandler der CORONA Acoustic GmbH. Dieser Hochtöner entstand um 1978 in der Werkstatt von Otto Braun<sup>56</sup>. Er lieferte den höchsten Schalldruck und produzierte die geringsten Verzerrungen unter den damaligen Ionensystemen. Trotz ihrer außergewöhnlich guten Übertragungsqualitäten kommen Ionen-Hochtöner nur selten zur Anwendung. Ihre Herstellung ist aufgrund des komplizierten, aufwendigen Aufbaus sehr kostenintensiv. Auch ist der maximal erreichbare Schalldruck sehr begrenzt. Somit ist ein Einsatz auf Konzertveranstaltungen, allein schon wegen des Handlings und der geltenden Sicherheitsvorschriften (MVStättV)<sup>57</sup> undenkbar.



Abb. 33: Ionenschallwandler der CORONA Acoustic GmbH

<sup>-</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>56</sup> Nicht zu verwechseln mit dem Politiker Otto Braun.

<sup>&</sup>lt;sup>57</sup> Versammlungsstättenverordnung - länderspezifische Verordnung zum Bau und Betrieb von sogenannten Versammlungsstätten (u.a. Konzerthäuser).

## 2.8 Lautsprechergehäuse – Kriterium der Schallabstrahlung

Besonders für die Wiedergabe der tiefen Frequenzen ist es unbedingt erforderlich, den Schallwandler mit einem geeigneten Gehäuse zu versehen. Die enorme Bedeutung der Gehäusegestaltung wird besonders an der Vielfalt der bisher entwickelten Boxensysteme deutlich. Alle Systeme besitzen ihre spezifischen Vor- und Nachteile und sind jeweils für ihren Verwendungszweck optimiert.

Allen Gehäusekonstruktionen gemeinsam ist jedoch die Aufgabe, den "akustischen Kurzschluss" zu verhindern, den Strahlungswiderstand möglichst groß zu machen und den Wirkungsgrad zu verbessern. Dabei bilden der verwendete Wandler und seine Schallführung im Gehäuse eine Einheit – den Lautsprecher. Abweichend vom allgemeinen Sprachgebrauch ist mit dem deutschen Begriff "Lautsprecher" eigentlich nur der Schallwandler selbst, also das Lautsprecher-"Chassis" gemeint.

Großlautsprecher lassen sich nach ihrer Abstrahlcharakteristik in Richtstrahler und ungerichtete Strahler einteilen. Letztere arbeiten meist mit einer horizontal angeordneten Membran, wobei innerhalb bestimmter Bereiche eine nahezu gleichmäßige Wiedergabe erreicht wird. Dazu zählen Pilz-, Ampel-, Boden- und Deckenlautsprecher. Im historischen Kontext werden sie unter dem Begriff Rundstrahler zusammengefasst.

"Der besonderen Aufgabe, eine möglichst zweckentsprechende Schallabstrahlung für eine größere Hörerzahl zu vermitteln, dienen die Rund- und Richtstrahler, die neuerdings von zahlreichen Fabriken in bezüglich Form und Material teilweise voneinander abweichenden Ausführungen herausgebracht werden."<sup>59</sup>

Sie fanden vor allem bei dezentralen Beschallungen Anwendung. So sorgten in den Jahren 1935/1936 auf Großveranstaltungen wie den Olympischen Winterspielen, der Frühjahrsmesse Leipzig oder der großen Funkausstellung Rundstrahler für homogene Beschallung von großen Flächen. Dabei wird die Schallenergie nach allen Seiten gleichmäßig etwas nach unten geneigt abgestrahlt. Daher bleibt die Lautstärke innerhalb einer größeren Fläche an jeder Stelle gleich.

<sup>&</sup>lt;sup>58</sup> Chassis bezeichnet in der Akustik einen einzelnen Lautsprecher in einer Lautsprecherbox.

<sup>&</sup>lt;sup>59</sup> Vgl. Nesper in Günther (Hg.) 1936, S. 38-45.

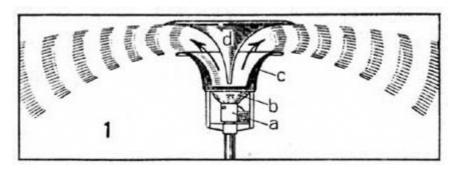


Abb. 34: Rundstrahler (sog. Pilzlautsprecher) von Telefunken aus dem Jahr 1933

In der obigen Abbildung sehen wir einen sog. Pilzlautsprecher der Firma Telefunken. Das dabei eingesetzte Antriebsystem (a+b) war ein Schallwandler mit elektrodynamischem Schwingspulenantrieb und der von Telefunken entwickelten Nawi-Membran. Weiterer Bestandteil (c+d) waren zwei ineinandergesteckte, nach oben offene, genau berechnete Trichter. Sie sorgten für gleichmäßig nach allen Seiten verteilte Schallwellen. Ein Problem bei großen Veranstaltungen damals war die Überlagerung der Schallwellen einzelner Lautsprecher. Der Vorteil eines Rundstrahlers war, dass ähnlich einer erhöht aufgehängten Lampe, die das Licht im weiten Umkreis nach unten wirft, die Schallwellen in einer bestimmten genau definierbaren Entfernung den Boden erreichten. Der Wirkungskreis war also genau begrenzt. Somit konnte das Übersprechen an den Grenzen der Schallbereiche zweier verschiedener Lautsprecher verringert werden. Mit gleichmäßig verteilten Rundstrahlern war es also möglich beliebig große Flächen ohne Echo und Doppelsprechen versorgen. Am 1. Mai 1933 wurden derartige Systeme erstmalig in großer Menge auf dem Flugfeld des Tempelhofer Flughafens in Berlin benutzt.

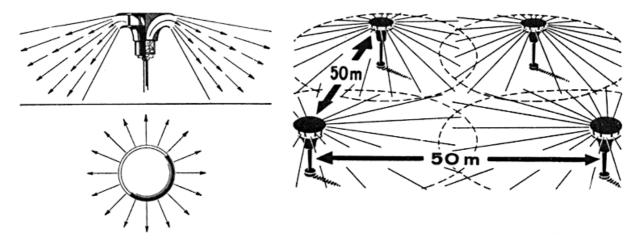


Abb. 35: Abstrahlcharakteristik eines Rundstrahlers

Nach ähnlichem Prinzip arbeiteten auch die "Telefunken Löschstrahler".  $^{60}$ 

"Setzt man zwei Lautsprecher, auf einen Mast, und läßt beide gegenphasig arbeiten, so wird in der Ebene 5 praktisch der gesamte Schall durch Interferenz ausgelöscht. Man kann so die Abstrahlung tiefer Frequenzen, die nicht mehr gerichtet werden können, in einer bestimmten Ebene vermeiden. Diese Anordnung wurde, wie bekannt, im Olympia-Stadion benutzt."

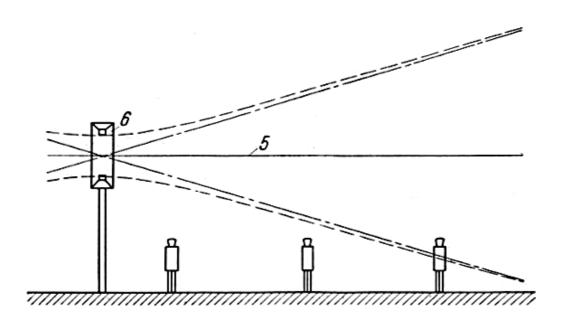


Abb. 36: Lautsprecheranordnung mit "Toter Zone" - Löschstrahler der Firma Telefunken (1936)

-

 $<sup>^{60}</sup>$  DRP 690437 vom 18.2.1936 - Lautsprecheranordnung zur Unterdrückung hörbaren Schalls in einem bestimmten Raumteil (Löschstrahler).

<sup>&</sup>lt;sup>61</sup> Vgl. Akustische Zeitschrift 1.Jahrgang 1936.

### 2.8.1 Schallwände

Die einfachste Möglichkeit den akustischen Kurzschluss zu vermeiden, besteht in der Montage des Chassis auf einer Schallwand in beliebiger Form.

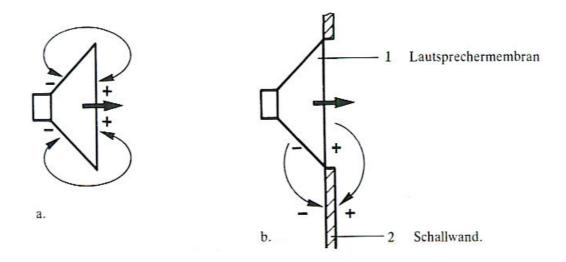


Abb. 37: Akustischer Kurzschluss (a) und seine Verhinderung durch eine Schallwand (b)

#### Schon 1936 erkannte man:

"Das Schallbrett hat die Aufgabe, das Abstrahlen der tiefen Töne zu ermöglichen. Das Frequenzband eines Lautsprechers mit Schallbrett reicht wesentlich weiter in den tiefen Tonbereich als das Frequenzband des Lautsprecherchassis allein. Je größer das Schallbrett (Mindestgröße 100x100 cm), desto wirksamer."

Je größer die Schallwand ist, desto mehr wird der akustische Kurzschluss in Richtung tieferen Frequenzen verschoben und umso mehr tiefere Töne werden hörbar. Ideal wäre also eine unendliche Schallwand. Diese lässt sich in guter Näherung durch Einbau des Chassis in eine Wand des Abhörraumes realisieren, was in großen Tonstudios auch zum Teil praktiziert wird. Durch asymmetrische Montage der Chassis auf endlichen Schallwänden sind Pegeleinbrüche infolge von Auslöschungen vermeidbar. Der Vorteil von Schallwänden besteht darin, dass durch den Einbau der Lautsprecher-Chassis keine zusätzlichen Klangverfälschungen entstehen.

<sup>2</sup> 

<sup>&</sup>lt;sup>62</sup> Gemeinschafts-Empfangs-Anlagen mit dem DAF 1011, Firmendruckschrift Telefunken (25 Ela 200, 11.36.M.), 68 Seiten, [1936].

Um 1950 wurden von K. Feik eingehende Versuche mit Schallwänden zur Realisierung eines "Universalstrahlers"<sup>63</sup> durchgeführt, mit welchem sich verschiedene Abstrahlcharakteristiken realisieren lassen sollten. Heute werden Schallwände nur noch sehr selten zu Beschallungszwecken eingesetzt und haben deswegen kaum noch eine nennenswerte praktische Bedeutung.

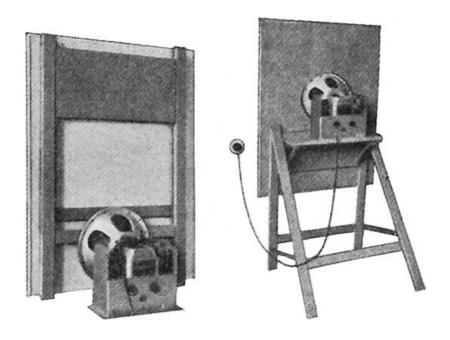


Abb. 38: transportables Schallbrett von P. Grassmann (1936)

<sup>&</sup>lt;sup>63</sup> Vgl. Feik: "Der Universalstrahler, ein neuartiges Beschallungsgerät für elektroakustische Übertragungsanlagen" in : Wissenschaftliche Annalen zur Verbreitung neuer Forschungsergebnisse. 1. Jahrgang, Heft 7, Deutsche Akademie der Wissenschaften (Hg.).

### 2.8.2 Tonsäulen oder Schallzeilen

Bis Ende der 40 er Jahre löste man große Musik- oder Sprachbeschallungen durch das Verteilen einer Vielzahl von Lautsprechern auf die zu versorgende Fläche oder durch ein oder mehrere Großlautsprecher, welche zusammenhängend an einer Stelle aufgestellt wurden. Erstere Lösung bedurfte eines großen Aufwands, da neben der Aufstellung der vielen einzelnen Lautsprecher auch noch das Stromversorgungsnetz für diese Lautsprecher, meistens sogar unterirdisch, verlegt werden musste. Eine Schwierigkeit bei dieser Variante war dafür zu sorgen, dass jeder Hörer möglichst von nur einem einzigen Lautsprecher versorgt wurde um ein "Verschwimmen" der Übertragung durch unterschiedliche Laufzeiten verschiedener Lautsprecher zu verhindern. Die an zweiter Stelle genannte Lösung erforderte Großlautsprecher, die damals nur in kleinen Stückzahlen, also unwirtschaftlich, hergestellt wurden. Auch hatten solche Anlagen den erheblichen Nachteil, dass die sich unmittelbar vor dem Lautsprecher befindenden Personen zu stark und die am weitesten entfernten Personen zu schwach mit Schall versorgt wurden. Eine Verbesserung dieser Situation versprach die Entwicklung der "Anordnung zur zentralen breitbandigen Schallversorgung eines Luftraumes"64 durch die Firma Telefunken, die im Oktober 1948 zum Patent angemeldet wurde.

"Die Erfindung bezieht sich auf eine zentralisierte Anlage und beseitigt alle Mängel, die derartigen Anlagen bisher anhafteten. Durch die Erfindung wird erreicht, daß bei einer Bündelung des Schalles in eine Ebene hinein die Lautstärke gleichmäßig verteilt ist, und zwar ohne Bevorzugung oder Benachteiligung bestimmter Frequenzen." <sup>65</sup>

Die Schallzeilen sind bis heute eine gebräuchliche Strahlergruppe geblieben. Wichtigster Grund dafür ist der Fakt, dass sich damit viele Beschallungsaufgaben in genügender Qualität bei überschaubarem Aufwand und geringen Kosten realisieren lassen. Die konsequente Weiterentwicklung von Schallzeilen führte Anfang der 90er Jahre zu den sogenannten Line-Arrays. Aufgrund der zunehmenden Bedeutung von Line-Arrays in der modernen

<sup>&</sup>lt;sup>64</sup> BDP 934353 vom 2.10.1948, Telefunken (Heinrich Benecke, Siegfried Sawade und Herbert Petzoldt). Titel des entsprechenden britischen Patents: "Improvements in or relating to Public Address and like Sound Disseminating Systems". (GB 695912).

<sup>&</sup>lt;sup>65</sup> Auszug aus Patentschrift BDP 934353.

Beschallungstechnik wird an dieser Stelle auf das Kapitel 2.8.6 verwiesen, wo ausführlicher auf dieses Thema eingegangen wird. Eine Schallzeile wird in klassischer Form aus einer Aufreihung von einzelnen Strahlern zusammengesetzt. Jede dieser Quellen strahlt eine Welle mit einer sphärischen Front ab, die sich dann im Schallfeld überlagern. Etwa ab 1950 stellten alle namhaften Firmen wie Siemens, Philips und Telefunken entsprechende Tonsäulen auf internationalen Messen in Utrecht, Zürich, Brüssel oder Kopenhagen vor. Die konstruktive Ausführung war bei allen Schallzeilen ähnlich. Tonsäulen mit geschlossener Rückwand strahlen mit Kugelcharakteristik, mit offener Rückwand hingegen mit achtförmiger

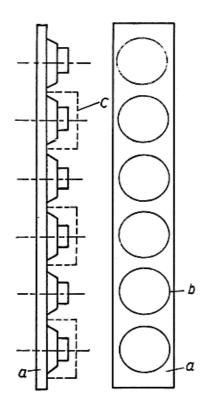


Abb. 39: Schallzeile mit a)
Schallwand, b) Lautsprecher und
c) variable Rückwand

Charakteristik. Mittels akustischer Laufzeitglieder in der Gehäuserückwand lässt sich über die entstehende mechanische Reibung auch eine nierenförmige Charakteristik erzielen. Durch die entsprechende Anordnung mehrerer Tonsäulen sowie die Gestaltung Rückwände lässt sich ihrer jede gewünschte Richtcharakteristik in der horizontalen, als auch vertikalen Strahlungsebene erreichen. Die akustische Mitkopplung<sup>66</sup> kann so akzeptabel beherrscht werden. Daher werden Tonsäulen zur Schallversorgung großer Freiflächen oder großer Räume bevorzugt angewandt. Der Nachteil von Tonsäulen besteht in der starken Frequenzabhängigkeit des erreichbaren Bündelungsgrades, welche auch durch Knickung und seitlichen Versatz der jeweiligen Anordnung lediglich gemindert werden kann. Außerdem lassen sich, besonders für populäre Musik, nicht die erforderlichen Schalldrucke flacher erzielen. SO dass ein Gesamteindruck der wiedergegebenen Schallereignisse

entsteht. So werden Schallzeilen in dieser Form heute hauptsächlich zur Sprachbeschallung von Kirchen, Kongresszentren und öffentlichen Einrichtungen eingesetzt, während ihre moderne Weiterentwicklung, das Line-Array immer mehr Verwendung findet. Aufgrund Ihrer ausgeprägten Richtwirkung müssen Schallzeilen zur optimalen Beschallung einer

. .

<sup>&</sup>lt;sup>66</sup> Rückkopplungserscheinungen, hervorgerufen durch zurückwirken der Lautsprechersignale auf das Mikrofon.

Publikumsfläche immer exakt auf diese ausgerichtet werden. Weiterhin ist bekannt, dass die Richtwirkung mit steigender Frequenz kontinuierlich zunimmt. Demnach werden höhere Frequenzen stärker gebündelt abgestrahlt als tiefere. Auch treten ab einer bestimmten Frequenz Nebenmaxima auf. Bereits 1962 erkannten David L. Klepper und Douglas W. Steele<sup>67</sup> dieses Problem und versuchten mit unterschiedlichen akustischen und elektrischen Filtertechniken die Abstrahlung der Zeile zu beeinflussen. Ziel war es, dass bei tiefen Frequenzen alle Lautsprecher arbeiten und die Strahleranordnung somit für tiefe Frequenzen als Linienquelle agiert. Für die hohen Frequenzen wurden die außen liegenden Systeme über Tiefpassfilter schrittweise ausgeblendet. Mit zunehmender Frequenz wurde die Quelle also kürzer und somit das Bündelungsverhalten über einen weiten Frequenzbereich annähernd konstant gehalten.

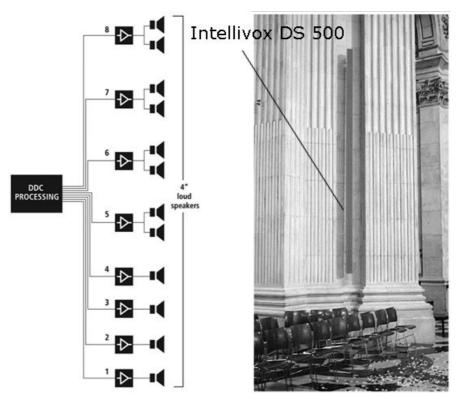


Abb. 40: links vereinfachtes Blockschaltbild des von Duran Audio entwickelten Systems Intellivox, rechts im Bild das in der St. Pauls Cathedral / London eingebaute Intellivox DS

500

<sup>&</sup>lt;sup>67</sup> Vgl. dazu: David L. Klepper und Douglas W. Steele, "Constant Directional Characteristics from a Line Source, Paper 261 / 14<sup>th</sup> AES-Convention October 1962

Mit der Einführung der digitalen Signalverarbeitung Anfang der 90er Jahre war es bei dem von der Firma Duran Audio entwickelten DDC Verfahren<sup>68</sup> möglich jeden Lautsprecher mit einer eigenen Endstufe zu versehen und über ein DSP-System anzusteuern. So ist mit diesem Setup neben der einfachen Tiefpassfilterung zur Anpassung der effektiven Schallzeilenlänge zum Beispiel ein programmierbarer Öffnungswinkel oder eine einstellbare Neigung der Richtkeule realisierbar. Eingesetzt wird dieses Prinzip u.a. auch zur Beschallung des neuen Hauptbahnhofes in Berlin.

### 2.8.3 Trichter-/Hornlautsprecher

Hornlautsprecher vereinen alle Vorteile wie hohe Bündelung, Empfindlichkeit sowie hohen Wirkungsgrad, allerdings auf Kosten großer Abmessungen und erheblich höheren Gewichts. Auch lassen sich mit richtig konstruierten und notwendigerweise schmalbandig betriebenen Trichterlautsprechern geringere nichtlineare Verzerrungen als mit direkt strahlenden dynamischen Lautsprechern erzielen.

Aus diesem Grunde werden heutzutage häufig Hornsysteme zur Beschallung eingesetzt. Dabei sind die grundsätzlichen Erkenntnisse bei der Berechnung von Hornlautsprechern so alt wie die Elektroakustik selbst. D. Wedell bemerkt dazu im Jahr 1982:

"...es gibt seit 40 Jahren keine neuen Erfindungen mehr. Wer also heutzutage behauptet, er hätte im Basshornbau etwas Grundlegendes erfunden, der kennt einfach die Literatur nicht"<sup>69</sup>

Sofern eine enorme akustische Leistung gefordert ist und die Richtcharakteristik kontrollierbar sein soll, werden Hornlautsprecher seit langem eingesetzt. Durch eine geeignete Kombination von Hörnern kann eine beliebige Art von Richtungswirkung erzielt werden. Die Anfänge der Horn Geschichte liegen mehr als 100 Jahre zurück. Begonnen hat alles mit der Einführung des Grammophons, das ohne elektrische Verstärkung die mechanischen Schwingungen der Nadel von der Schallplatte in hörbare Signale umsetzte. Die Gestaltung eines Hornlautsprechers war eine lange und mühsame Aufgabe. Schon 1879 hat Lord

<sup>&</sup>lt;sup>68</sup> DDC – Digital Directivity Control.

<sup>&</sup>lt;sup>69</sup> Vgl. D. Wedell, "P.A: Bauchbuch" in: Das Fachblatt 1982 S. 24.



Abb. 41 Grammophon im Jahr 1910

Rayleigh des Problem der Berechnung Strahlungswiederstandes für kreisförmige Membranen allgemein gelöst. Für Membranen mit angesetztem konischen Trichter stellte A. Webster allgemeingültige eine eindimensionale Gleichung auf. Damit wurde auch die Berechnung verschiedenartig gekrümmter Trichter möglich. Theoretische und praktische Untersuchungen über die Annahme Websters stellte M. Hall 1932 an, wobei auch praktische Erkenntnisse von Goldsmith und Minton aus dem Jahre 1924 Berücksichtung fanden. Wichtig waren auch die Arbeiten von Klipsch und Voigt, die die Gesetze der Horntechnik weiter erforschten. In der Entstehungszeit der Hörner waren nur Röhrenverstärker mit geringen

Ausgangsleistungen verfügbar. Man brauchte also effiziente Lautsprechersysteme. Das Horn war das einzige Lautsprecherkonzept, welches die geringe Leistung wirksam in Schall umwandeln konnte. Der von Rice und Kellogg entwickelte dynamische Lautsprecher, konnte auch ohne ein Horn wirksam Schall abstrahlen, hatte aber einen geringeren Wirkungsgrad als ein Hornlautsprecher.



Abb. 42: links im Bild der Großlautsprecher der Firma Gaumont (ca. 1924), rechts im Bild ein elektrodynamischer Trichterlautsprecher von Magnavox (ca. 1922)

Aufgrund dessen kamen in den 20er und 30er Jahren auf Großveranstaltungen oft Entwicklungen aus diesem Bereich zum Einsatz.

"Infolge der ausgezeichneten Durchbildung nicht nur des dynamoelektrischen Lautsprechers und der hierzu gehörenden Verstärkeranlage, sondern auch des angebauten Trichters selbst, sind derartige Großlautsprecher nicht nur in der Lage, beispielsweise größere Orchester zu ersetzen, sondern sogar diese in ihrer Klangwirkung noch weit zu übertreffen."

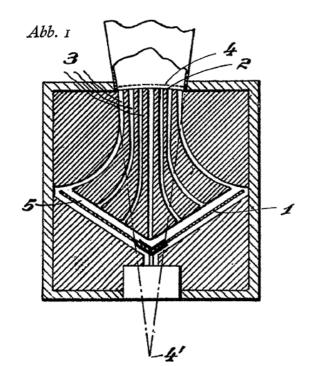
Als grundlegende allumfassende Abhandlung über Hornlautsprecher ist die Publikation von O.R. Hanna und J. Slepian "The Function and Design of Horns for Loudspeakers" aus dem Jahre 1924 anzusehen. Diese wurde im AES Paper 25 im Jahre 1977 auf den Seiten 573 – 585 neu publiziert.

Mit der Vermarktung und dem praktischen Einsatz von Transistoren ab dem Jahre 1949, war der Vorteil des Hornlautsprechers gegenüber dem dynamischen Lautsprecher nicht mehr wichtig. Der Transistor konnte auch elektrische Ströme und Spannungen verstärken. Er war vergleichsweise klein und einfach zu fertigen. Röhrenverstärker und die aufwändig gebauten Hornlautsprecher wurden dann von Transistorverstärker, mit ihren größeren Ausgangsleistungen, und dynamischen Lautsprechern für den massiven Gebrauch ersetzt.

Grundsätzlich besteht ein Trichterlautsprecher aus dem Antriebssystem, als "Treiber" oder "Driver" bezeichnet und seiner trichterförmigen Schallführung. Zum Antrieb werden oft Druckkammersysteme verwendet. Durch die Flächenverhältnisse von Membran und Austrittsöffnung der Druckkammer findet eine Geschwindigkeitstransformation statt, die zu einer erhöhten Leistungsabstrahlung führt. Bei der Konstruktion von Druckkammer-Hochton-Treibern müssen auftretende Interferenzstörungen (Phasenunterschiede) besonders beachtet werden, die im Hochtonbereich wesentlich besser wahrgenommen werden als bei tiefen Frequenzen. Die folgende Abbildung zeigt einen solchen Ansatz. Durch entsprechend konstruierte Umweg-Elemente, auch Phasenkorrekturglieder werden genannt, Gangunterschiede zwischen den verschiedenen Wellenzügen eliminiert. Die zurückgelegten Wegstrecken der Wellen von der Membran zum Trichterhals sind damit nahezu gleichlang. Die Aufgabe des Trichters besteht darin, die schwingende Membran bzw. die erzeugten

<sup>&</sup>lt;sup>70</sup> Vgl. Nesper 1929.

Schallwellen am Ausgang der Druckkammer an das Schallfeld anzupassen.



"Mit einem derartig hergestellten
Trichterlautsprecher ist es möglich, ein
gleichmäßiges Frequenzband abzustrahlen,
so daß die sonst bei Trichterlautsprechern
bekannten sogenannten Löcher in der
Wiedergabe vermieden sind."<sup>71</sup>

- 1. Kegelmembran
- 2. Trichtermündung
- 3. Tonführungen
- 4. Kugelschale
- 5. Drucktransformationsraum

Abb. 43 Trichterlautsprecher (1930)

Dabei kann der Trichter konischen, exponentialen, parabolischen oder auch hyperbolischen Querschnitt haben. Bei hohen Frequenzen hat die unterschiedliche Gestalt des Trichters kaum praktischen Einfluss hinsichtlich des Strahlungsverhaltens. Im unteren Frequenzbereich sind dagegen merkliche Unterschiede zu verzeichnen, da der Strahlungswiderstand bei den genannten Trichterformen verschieden schnell seinem Maximum zustrebt. Am günstigsten erweist sich dabei der hyperbolische Trichter, dessen nichtlineare Verzerrungen aber bei gleicher Eingangsleistung größer als bei anderen Trichtern sind. Die kleinste Intermodulation haben Konustrichter. Im Wesentlichen werden aber Exponentialtrichter angewandt, da sie unter allen Trichterformen den günstigsten Kompromiss darstellen. Mit Länge und Mündungsquerschnitt sind Richtungseigenschaften sowie Übertragungsbereich der Trichter in bestimmten Grenzen beeinflussbar. Erste praktische Untersuchungen darüber sind 1921 von E. Watzmann durchgeführt und in der Zeitschrift für technische Physik veröffentlicht worden. Die untere Übertragungsgrenze Mündungsfläche der Trichter wird durch die bestimmt. Daraus resultieren welche besonders für mobile Abmessungen,

 $<sup>^{71}</sup>$  DRP 606087 vom 18.3.1930 - Trichterlautsprecher der Firma Telefunken (Walter Schottky).

Beschallungsanlagen nachteilig sind. Um handlichere Abmessungen zu erreichen, werden die erforderlichen Trichterlängen durch mitunter komplizierte Basshornkonstruktionen, sogenannte Falttrichter oder Falthörner realisiert. Prinzipiell wird dabei der Trichter aus mehreren Kammern gebildet, deren Ausgangsquerschnitte sich nach einer Exponentialfunktion vergrößern. Man unterscheidet im Wesentlichen einfach oder mehrfach gefaltete Trichter die symmetrisch (W-Horn) oder asymmetrisch (Schnecke) aufgebaut sind.

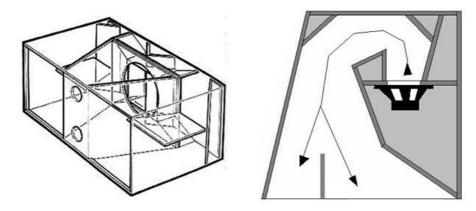


Abb. 44: links im Bild "W-Horn" und rechts eine sogenannte "Schnecke"

Heute liegt der Schwerpunkt der Verwendung von Hörnern auf verschiedenen Gebieten. Im Bereich der Beschallungstechnik ist der Anspruch an Lautstärke und Abstrahleigenschaften so gestiegen, dass bei hochwertigen Anlagen überwiegend Hörner verwendet werden. Für den Beschallungsbereich sind etwa im Tieftonbereich Hörner interessant, da sie eine tiefe, wirkungsgradstarke Basswiedergabe mit hohem Maximalschalldruck bei akzeptabler Gehäusegröße ermöglichen. Eines der ältesten bekannten Basshörner für Großbeschallungen ist das Shearer Horn. Es hat eine Basisbreite von 2m und zeichnet sich durch enormen Schalldruck aus. Weitere übliche Konstruktionen existieren unter anderem von Dave Martin (Martin-Bin), Jim Lansing, Klipsch, Schmack und Carlson.

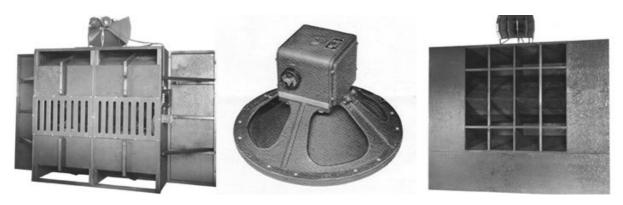


Abb. 45: das Shearer Horn und der darin eingesetzte Lansing X15 Bass-Treiber (Mitte)

### 2.8.4 Direktstrahlende Mehrwegboxen

Besonders als Nahbeschallungslautsprecher und Monitore finden direktstrahlende Kompaktund Bassreflexboxen mit mehreren Lautsprecherchassis für die einzelnen Frequenzbereiche Verwendung. Das Bassreflex- oder Phasenumkehrprinzip wurde in Deutschland unter der Bezeichnung "Tonkompressor" als Neuheit bei Musiktruhen auf der ersten Berliner Messe unter dem Funkturm vom 1. bis 15. Oktober 1950 gezeigt und ist danach in den allgemeinen Solche Systeme finden heute in fast jeder übernommen worden. Beschallungssituation ihren Einsatz und gehören damit zu den am häufigsten verwendeten Lautsprechern. Durch den Einsatz von komplizierten Frequenzweichen (Butterworth-Filter) lässt sich eine verfärbungsarme Wiedergabe erreichen. Daher finden solche Boxensysteme auch häufige Anwendung in Studio-Abhörlautsprechern. Durch neue Halbleitertechnologien ist die Bereitstellung praktisch unbegrenzter elektrischer Leistung heute kein Problem mehr. Üblich sind Endverstärker, die Sinusleistungen von 200 bis 2000 Watt aufbringen. Damit ist man in der Lage, anstelle eines an der Leistungsgrenze betriebenen Lautsprecherchassis in einem Basshorn viele Kompaktsysteme zu betreiben, wobei der Energieverlust durch die integrierten passiven Frequenzweichen hinnehmbar wird. Der Vorteil ist die Minimierung der auftretenden nichtlinearen Verzerrungen und der Intermodulation sowie die Austauschbarkeit der Einzelkomponenten im mobilen Betrieb. Bei Lautsprechern ist die Intermodulation die typische Verzerrung, die bei Überlastung sofort hörbar wird - die Schwingspule verlässt dabei den linearen Bereich ihrer Auslenkung. Bei Mehrwegeboxen kann Intermodulation normalerweise nur in den Frequenzbereichen wirksam werden, die mit dem gleichen Chassis abgestrahlt werden. Da Verzerrungen im Bereich zwischen 500 Hz. und 4 kHz am deutlichsten zu hören sind und Intermodulation am stärksten durch den großen Membranhub tiefer Frequenzen ausgelöst wird, sind Mehrwegesysteme 1-Wege Systemen deutlich überlegen. Außerdem war zum damaligen Zeitpunkt die Meinung über Klangfarben in einer Wandlung allgemeinen begriffen. Nach der Ablösung von Tonsäulen Hornstrahlerkombinationen war die damit erreichbare Überbetonung des Bass- und Höhenbereiches besonders erwünscht. Inzwischen wird aber ein ausgewogenes und transparentes Klangbild mit besonderer Impulstreue bei der Wiedergabe der Ein- und Ausschwingvorgänge auch für Großbeschallungen in der Popmusik als optimal angesehen, so dass der Einsatz von superstarken Basshörnern nicht mehr zwingend notwendig erscheint.

# 2.8.5 Konventionelle Lautsprecher-Arrays

Ein sehr wichtiges Kriterium hinsichtlich einer modernen Beschallungsanlage ist ein möglichst hoher Schalldruckpegel über den gesamten hörbaren Frequenzbereich und ein definiertes räumliches Abstrahlungsverhalten. Idealerweise wählt man sich also einen einzelnen Lautsprecher mit dem für die Beschallungssituation notwenigen Abstrahlwinkel. Jedoch stößt man hier sehr bald an Grenzen, da sich die vorhandene Schallleistung auf den gesamten Raumwinkel verteilt. Das heißt je größer der von einem einzelnen Lautsprecher abzudeckende Raumwinkel ist, desto geringer ist der dort zu erzielende Schalldruck. Um dies zu umgehen, bildet man Lautsprecher-Arrays oder Cluster, man gruppiert also eine gewisse Anzahl von Lautsprechern in der horizontalen Ebene. So kann man mit mehreren eng abstrahlenden Einzelsystemen einen großen Raumbereich mit dementsprechend hohem Schalldruck abdecken.

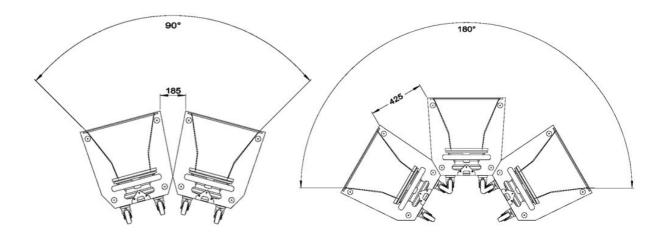


Abb.46: Clusterbildung aus GAE Director Tops (60°x40°) und daraus resultierender Abstrahlwinkel

Da die von beiden Quellen zeitgleich ausgesendeten Signale jedoch für die meisten Punkte im Raum einen Zeitversatz haben, entstehen Interferenzen. Bei tiefen Frequenzen tritt dieses Problem nicht auf, da die Wellenlänge immer größer ist als der doppelte Abstand der Quellen zueinander. Bei konventionellen Clustern im Tieftonbereich versucht man eine Kopplung der

Lautsprecher zu erreichen. Somit wirken beide Quellen also wie eine einzige.<sup>72</sup> Für den Hochtonbereich ist dies nicht möglich und so versucht man die Interferenzeffekte durch geschickte Konstruktion und Anordnung der Boxensysteme auf ein erträgliches Maß zu reduzieren.



Abb. 47: typische Lautsprecherarrays links um 1975, rechts aus den 90er Jahren

Mit dieser Anordnung der Lautsprecher ließ sich also bereits eine breitbandige Schalldruckpegelerhöhung für eine große Zuhörerzahl erzielen. Ab 1970 wurde so ein Großteil der Beschallungsaufgaben realisiert. Heute kommen diese Systeme immer noch, besonders im kleineren, budgetorientierten Rahmen, für Konzertveranstaltungen zum Einsatz.

## 2.8.6 Line Arrays

Das Erscheinungsbild von Großbeschallungsanlagen hat sich in den letzten Jahren gravierend verändert. Während Anfang der 90-er Jahre Openair-Bühnen noch von riesigen "Wänden" aus konventionellen Lautsprechern eingerahmt wurden, findet man heute fast ausschließlich Systeme, die auf dem Modell der Linienquelle basieren. Diese, meist vertikal aufgehängten "Linearrays", haben in der modernen Veranstaltungstechnik seit einigen Jahren eine immer größere Bedeutung erhalten, denn sie ermöglichen eine bisher nicht erreichbare Klangqualität bei einer außerordentlich großen Reichweite.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>72</sup> Vgl. dazu Volker Holtmeyer: "Mysterium Line-Array - Mode oder Trend?", CAVIS-Kongress Frankfurt, März 2003.



Abb. 48: Line Array System GAE Waveline

Erreicht wird dies, durch die weitgehend kohärente Abstrahlung der einzelnen Arrayelemente über das gesamte Frequenzspektrum, wobei destruktive Interferenzen auf der Hörfläche unterbunden werden. Dies war mit einzelnen Lautsprechern und - für größere Beschallungen -



Abb. 49: das JBL Modell 4682 (1970)

mit konventionellen Lautsprecherclustern früher möglich. Zur Vermeidung Lautstärkeunterschiede Publikumsbereich einzelnen werden die Arrayelemente zueinander gewinkelt, dass für die Beschallung der hinteren Bereiche mehr Schallenergie zur Verfügung steht als für die vorderen. Diese Winkelung muss mit sehr großer Sorgfalt durchgeführt werden, da schon eine Abweichung von wenigen Grad zu einem klanglichen Versagen des gesamten Beschallungssystems führen kann.

Mit Line Arrays kam man den grundlegenden Faktoren einer hochwertigen Beschallung, nämlich ein ausreichender Schallduckpegel und ein ausgeglichenes Frequenzspektrum über alle Punkte einer zu beschallenden Fläche, ein großes Stück näher. Allein im Jahre 2002 "erblickten" 12 neue Line Array Systeme der verschiedensten Hersteller das Licht der Welt. Genauere Untersuchungen zum Thema wurden bereits in den 50er Jahren von Beranek und Olsen publiziert. Bereits in den 70er Jahren entwickelte JBL Line Array Systeme wie z.B. den Lautsprecher 4682, der mit insgesamt vier 10" Treibern, angeordnet in einer vertikalen Linie für einen linearen Frequenzgang bis 2 KHz sorgte. Bei 1/10 seiner Nennbelastbarkeit erzeugte dieser Lautsprecher in 15 Meter Entfernung einen Schalldruckpegel von 96 dB.

Wegweisend für die heutige Line Array Technologie waren allerdings die 1992 veröffentlichten Ausführungen zur "Wave Front Sculpture Technology" von Christian Heil und Marcel Urban<sup>73</sup>. Beide wendeten aus der Optik bekannte Zusammenhänge zur Erläuterung der Interferenzphänomene beim Arbeiten mit Line Arrays an. Anfangs stand die Audioindustrie der Entwicklung aus dem Hause L-Acoustics sehr skeptisch gegenüber<sup>74</sup>. Dies änderte sich jedoch schnell, so dass eine "Grossbeschallung" ohne diese Technologie heute überhaupt nicht mehr vorstellbar ist. Wie schon erwähnt ist der Line Array Ansatz seit vielen Jahren bekannt, doch konnte eine kohärente Wellenfront anfangs nur bis 2 KHz erzeugt werden. Bei tieferen Frequenzen gelang das mit linienförmig angeordneten Treibern ohne Probleme. Häufige Anordnungen bestanden aus dicht aneinander angeordneten 8" Konuslautsprechern, welche bis knapp unter 1 KHz arbeiten bzw. 5" Treiber die meistens bis 2 KHz betrieben wurden<sup>75</sup>. Dies wird auch heute noch so angewendet. Die nötige Weiterentwicklung bestand also darin, auch für hohe Frequenzen eine kohärente Wellenfront zu erzeugen. Für die höheren Frequenzen genügt es dann aber nicht mehr, die Treiber lediglich übereinander aufzureihen, da sich ansonsten die Quellen separieren und damit Nebenmaxima verursachen würden. Um diese kohärente Wellenfront mit "normalen Treibern" zu erzeugen werden sogenannte Waveguides eingesetzt, die sich je nach Hersteller Waveformer (JBL), Hydra (Electro Voice) oder auch Wavefront Sculpture Technology (L-Acoustics) nennen. <sup>76</sup> Die Firma Nexo setzt in Ihrem GEO - System einen parabolischen Reflektor ein, der den von einem konventionellen Kompressionstreiber erzeugten Schall

<sup>&</sup>lt;sup>73</sup> Vgl. C. Heil, M. Urban 1992, S.1ff.

<sup>&</sup>lt;sup>74</sup> Christian Heil, CEO of L-ACOUSTICS and Paul Bauman, L-ACOUSTICS Technical Support Director in: Pro Sound News USA April 2002.

<sup>&</sup>lt;sup>75</sup> Vgl. A. Goertz in: "Lautsprecher", Handbuch der Audiotechnik, Stefan Weinzierl (Hrsg.), Springer Verlag Berlin/Heidelberg, 2008.

<sup>&</sup>lt;sup>76</sup> Vgl. : A. Goertz: "Theoretische Grundlagen und die praktische Anwendung von Line-Arrays in der Beschallungstechnik und ihre Berücksichtigung in Simulationsprogrammen", Audio & Acoustics Consulting Aachen.

umlenkt und so an der Austrittsöffnung für eine phasengleiche Abstrahlung sorgt.

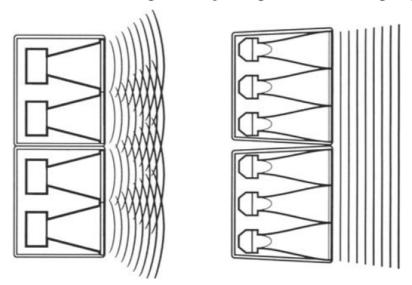


Abb. 50: links eine Quelle mit sphärischen Abstrahlverhalten und daraus resultierenden Interferenzen, rechts im Bild Ausbildung einer kohärenten Wellenfront durch Waveguides

Alle Varianten werden zur Kontrolle der Abstrahlung in der horizontalen Ebene mit Hornansätzen ausgestattet. Ein weiterer Ansatz ist der Einsatz von Bändchenlautsprechern, welche wie besprochen prinzipienbedingt eine ebene Wellenfront erzeugen. Die Vorteile wurden bereits in Kapitel 2.4.4 beschrieben.

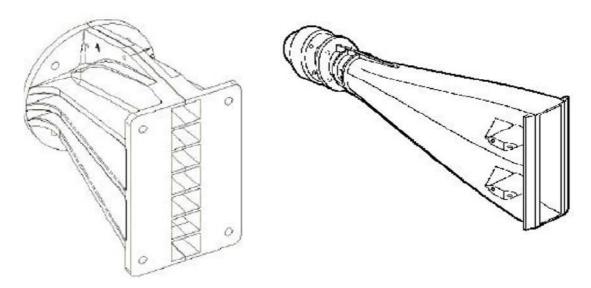


Abb. 51: Waveguide Ausführungen links der Hydra (EV), rechts der Waveformer (JBL)

Beim Line Array System fällt der Pegelabfall des Schalldrucks im Verhältnis zur Entfernung

wesentlich geringer aus als bei konventionellen Lautsprechersystemen: typischerweise kann ein theoretischer 3dB-Abfall des SPL bei doppelter Entfernung erreicht werden, im Gegensatz zum 6dB-Abfall bei konventionellen Lautsprechersystemen. Bei einem Abstand von z.B. 16 Metern liefert ein Line Array System typischerweise +12dB mehr Schalldruck als ein konventionelles System. Wichtig ist der Unterschied zwischen dem Nahfeld und dem Fernfeld einer solchen Anordnung. Deren Übergang geschieht in einer bestimmten Entfernung in Abhängigkeit von der Wellenlänge zur Länge der Strahleranordnung.

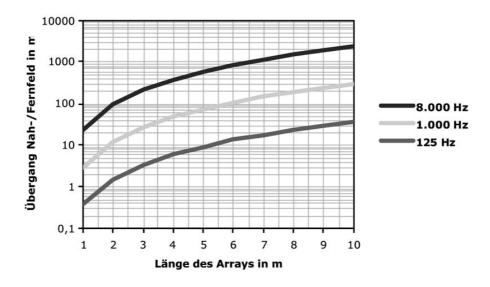


Abb. 52: Übergang vom Nahfeld zum Fernfeld

Moderne Line Array Systeme sind also im Moment das beste Werkzeug zur optimalen Beschallung von Konzertveranstaltungen. Bei Großbeschallungen längst zum Standard geworden haben sie zumeist die Cluster aus mehreren horizontal und vertikal aufgereihten Hornlautsprechern abgelöst da sie die Defizite derer gezielt eliminieren. Weitere Vorteile sind unter anderem die Überbrückung von großen Distanzen durch die Bildung eines ausgedehnten Nahfeldes. Weiterhin ist es möglich durch die Skalierbarkeit der Systeme die vertikale Abstrahlcharakteristik an die zu beschallende Fläche anzupassen. Wenngleich es bei kleineren Beschallungsaufgaben vehemente Verfechter konventioneller Lautsprecherkonzepte gibt, kann auch dort der Einsatz von Line-Arrays durchaus sinnvoll sein. Genau hier setzen Line-Array-Systeme der quasi zweiten Generation an, die gezielt nicht darauf ausgelegt sind, lange Arrays zu bilden, aber dennoch entscheidende Vorteile gegenüber üblichen

Lautsprechern ausspielen können. Die JBL VRX-Serie ist beispielsweise ein solcher Vertreter. Hier ist man sogar noch einen Schritt weiter gegangen und gibt ein festes Curving vor. Es werden also keine unterschiedlichen Winkel zwischen den einzelnen Elementen eines Arrays eingestellt. Das hat zum einen den Vorteil, dass man sich keine Gedanken um das Curving machen muss, und zum anderen können so die Waveguides der Hochtöner exakt für diesen Winkel optimiert werden.

#### 2.9 Die verwendeten Materialien

Mit dem technologischen Fortschritt und der Entwicklung neuer Fertigungstechniken änderten sich auch die Materialien, aus denen Lautsprecher gefertigt wurden.

So verwendet man Mitte der 20er Jahre, und vor allem in den USA mit stärkeren Endstufen, ausschließlich das anfangs kräftigere elektrodynamische System. Früher wurde das magnetische Feld in einem dynamischen Lautsprecher oft von einem Elektromagneten erzeugt. Bei Rundfunkgeräten und Verstärkeranlagen diente dieser Elektromagnet gleichzeitig als Siebdrossel für die Anodenspannung. Bei der Suche nach besseren Metallkernen für Transformatoren entwickelt General Electric Anfang der 30er Jahre die Alnico-Legierung (Aluminium, Nickel, Kobalt), die sich als hoch ferromagnetisch herausstellt. So ließen sich ab 1932 mit Permanentmagneten genügend starke Magnetfelder erzeugen, so dass dieser "elektrodynamische" Lautsprecher praktisch verschwunden ist. Es dauerte nicht lange, bis ausschließlich das einfachere permanentdynamische System Verwendung fand.



Abb. 53: Isophon Werbung für permanentdynamische Lautsprecher 1932

Viele Hersteller setzen heute vermehrt auf den recht neuen Magnetwerkstoff Neodym, welcher in der Erdkruste sehr häufig vorkommt. Für die Konstruktion Neodym-Magneten benötigt man allerdings nur einen relativ dieser kleinen Prozentsatz "Seltenen Erden"<sup>77</sup>. Da sie korrosionsanfällig sind, müssen sie beschichtet werden, was nur in einem äußerst vorsichtigen Prozess geschehen darf, da mit zunehmender Temperatur die Entmagnetisierungskurven im Verlauf ansteigen und somit die Antriebsleistung abnimmt. Inzwischen gibt es bezahlbare Legierungen, welche die Konstruktion von Neodymmagneten zulassen, die jeden anderen Permanentmagneten in punkto Feldstärke hinter sich lassen und das mit kleinerer und leichterer Bauform. Das diese Magneten bisher noch nicht so weit verbreitet sind, liegt an dem bis heute sehr hohen Preis. Rationellere Fertigungsmethoden sorgen aber inzwischen dafür, dass Neodym-Magnete preislich annähernd mit konventionellen Konstruktionen mithalten können.



Abb. 54: Lautsprecher mit Neodym-Magnet (links) und konventionellem Magnet (rechts)

Auch das Fertigungsmaterial der Lautsprechermembran, wurde stetig weiterentwickelt. Der erste dynamische Lautsprecher von Kellogg und Rice aus dem Jahre 1924 hatte einen Abstrahlkonus aus Papier. Trotz anderer heute zur Verfügung stehenden Membranmaterialien mit theoretisch besseren Eigenschaften, hat dieses alte Membranmaterial seine Bedeutung nicht verloren. Es gibt immer noch sowohl billige Lautsprecher, wie auch Chassis der

<sup>&</sup>lt;sup>77</sup> Zu den Metallen der Seltenen Erden gehören die chemischen Elemente der 3. Gruppe des Periodensystems (mit Ausnahme des Actiniums) und die Lanthanoide. Neodymium hat die Ordnungszahl 60.

absoluten Spitzenklasse mit Papierkonus. Heute werden Lautsprechermembranen meist aus Papierguss gefertigt und oft mit unterschiedlichen Materialien und Lacken imprägniert oder beschichtet. Typische Eigenheiten von Papiermembranen sind ihre große Eigendämpfung und wenig ausgeprägte, durch Teilschwingungen verursachte Membranresonanzen, ihr linearer Frequenzgang und ihre gute Impulswiedergabe. Ihr Klang wird als "natürlich" und angenehm die empfunden. Problematisch dagegen ist schwer zu kontrollierende Abstrahlrichtcharakteristik. Dem wird heute durch das Einpressen von Sicken entgegenwirkt. Auch kann sich durch Austrocknen bzw. Feuchtigkeitsaufnahme im Laufe der Zeit das Membrangewicht verändern, was Klangeinbußen zur Folge hat.

In den 70er Jahren wurden oft Membranen aus Bextren verwendet. Bextren ist ein "natürlicher" Kunststoff aus Zellulose. Bextren-Membranen sind mechanisch stabil und starrer als Papiermembranen. Sie neigen aber zu ausgeprägten Teilschwingungen und müssen deshalb mit einem Dämpfungsmaterial belegt werden. Die Eigenschaften der 5"- und 8"-Chassis mit Bextrenmembran der Firmen KEF und Audax waren für damalige Verhältnisse eine Sensation. Diese Lautsprecher hatten jedoch eine ausgeprägte und deutlich hörbare Resonanz bei rund 1.5 kHz und werden daher heute nicht mehr verwendet. Im gleichen Zeitraum verwendete man auch Membranen aus Hartschaumstoff. Sie besaßen praktisch keine Teilschwingungsneigung im Tiefton- und unteren Mitteltonbereich und wurden vor allem durch den Tieftöner B139 der Firma KEF bekannt. Aufgrund ihres geringen Wirkungsgrades, ihrer geringen Belastbarkeit und den überstark ausgeprägten Resonanzen im oberen Mitteltonbereich konnten sie sich dennoch nicht durchsetzten. Heute gibt es keine Lautsprecher mit Schaumstoffmembranen mehr.

Wegen ihrer geringen Masse und der großen mechanischen Festigkeit schien auch Kohlefaser als ein geeignetes Membranmaterial. Die Herstellung von Membranen aus Kohlefasern ist jedoch nicht unproblematisch. Aus diesem Grund, und auch wegen des relativ hohen Preises, hat sich dieses Membranmaterial aber nicht breit durchgesetzt. Ähnliches gilt für Membranen aus Kevlar. Dieses Membranmaterial wurde erstmals von den Firmen Eton und Focal Mitte der Achtzigerjahre verwendet. Kevlarmembranen besitzen einen sehr linearen Frequenzgang mit regelmäßigem, und nicht sehr steilem Abfall des Frequenzgangs am oberen Ende des Abstrahlbereichs. In der Beschallungstechnik finden sie heute in den hochwertigen Schallwandlern der Firma Adamson Verwendung.

# 3. EINSATZ AUF KONZERTVERANSTALTUNGEN

Während Klänge bis zur Entwicklung der Elektroakustik nur auf mechanisch akustischem Weg durch schwingende Saiten, Stimmbänder, Trommelfelle, Luftsäulen oder Metallzungen erzeugt wurden, kam die Möglichkeit hinzu, elektrische Schwingungen über elektroakustische Wandler hörbar zu machen. Außerdem konnte man die Leistung von Tonsignalen verstärken und sie als akustisches Signal wiedergeben. Es entstand die Beschallung als neues Fachgebiet. Wurden früher Räume und Säle für Konzerte angemessen groß gebaut bzw. entsprechend große Räume genutzt, um für eine bestimmte Anzahl Zuhörer und Musiker die optimale Wirkung des jeweiligen musikalischen Genres zu erzielen, so war es jetzt möglich dieses Verhältnis durch den Einsatz von Beschallungstechnik zu verändern.

"Ende des 19. Jahrhunderts hatte sich die am Kunstideal ausgerichtete E-Musik von der kommerziell bestimmten U-Musik getrennt."<sup>78</sup>

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden Musikformen mit neuen Besetzungen und Instrumenten populär, z.B. Jazz und Blues. Dort war die Gitarre sehr beliebt. Als relativ leises Instrument konnte sie für mehr als ein rhythmisches Begleitinstrument kaum eingesetzt werden. Als die elektrodynamischen Wandler erfunden wurden, versuchte man sie für die Verstärkung der Gitarre zu nutzen. Ein entscheidender Fortschritt war die Erfindung des elektromagnetischen Tonabnehmers. Diese Entwicklung gipfelte 1931 im Bau der ersten Elektrogitarre, einer Gitarre, die speziell für Tonabgabe über elektroakustische Wandler konstruiert war. 1932 baute Adolph Rickenbacker die ersten Gitarrenverstärker. In den 40er Jahren entwickelte sich der Bebop als neue Stilrichtung. Dabei änderten sich auch die traditionellen Funktionen der Instrumente innerhalb der Jazzbands. Die verstärkte Gitarre fundierte nun als gleichwertiges Soloinstrument neben Trompete und Saxophon.

Am Beispiel der Gitarre kann man gut verfolgen, wie die Elektroakustik Einzug in die Musik hielt und sich die Konzertbeschallung entwickelte. Mit dem Aufkommen des Rock'n Roll und der Beatmusik wurde der Einsatz der elektroakustischen Verstärkung immer größer.

<sup>&</sup>lt;sup>78</sup> K. Kuhnke, M. Miller, P. Schulze – "Geschichte der Popmusik Band 1", Eres Edition und Archiv für populäre Musik (1976).

"Stärker noch als die Jazzmusik hat sich die Rockmusik soziologisch, ästhetisch und ökonomisch unter den Bedingungen und mit den Möglichkeiten der Massenmedien entwickelt. Sie ist Übertragungsmusik, meist auf elektrisch verstärkten oder elektronischen Instrumenten gespielt und für den Lautsprecher maßgerecht abgemischt."<sup>79</sup>

Mit den Instrumenten, die bei dieser Musik verwendet wurden, war es praktisch nicht mehr möglich, rein akustisch zu musizieren. Zunächst spielte man mit Verstärkern für die "leisen" Instrumente und setzte Mikrofone mit einfachen Verstärkern für den Gesang ein. Später, mit der Einführung des Transistors Ende der 40er Jahre, war es möglich geworden, leistungsstarke Endstufen in kompakter Größe und zuverlässigere Mischpulte zu bauen. Damit war man in der Lage, sämtliche Instrumente auf der Bühne abzunehmen, über ein Mischpult zusammenzuführen und über Lautsprecher wiederzugeben. Die Beschallung hatte damit einen neuen höheren Stellenwert erreicht. Sie bestimmte die akustische Qualität der Musikdarbietung in entscheidendem Maße mit. Es reichten nicht nur Instrumente und Musiker, sondern es wurden auch eine gute Verstärkeranlage und ein guter Tontechniker notwendig.

Anfang der 50er Jahre hatte die Beschallung eine Qualität erreicht, die es ermöglichte, "...sowohl die menschliche Sprache als auch die Musik mit dem natürlichen Spektrum, mit ursprünglichen Dynamik annähernd der und ohne störende Nebengeräusche wiederzugeben."80 Diese Aussage bezieht sich auf einen Versuch aus dem Jahre 1955, bei dem Versuchspersonen die gleichen Musikstücke abwechselnd von einem Orchester und von einer elektroakustischen Anlage vorgespielt wurden. Das Ergebnis zeigte, das die Unterschiede gering geworden waren. Gleichzeitig trat jetzt das Problem auf, das immer größere Konzerte mit immer mehr Zuhörern zu beschallen waren. 1967 erwogen die Beatles, von Live-Auftritten Abstand zu nehmen, weil sie mit der Qualität der Beschallung völlig unzufrieden waren. Ein Grund dafür war, das z.B. bei Konzerten in Stadien, wo die Leistung der Verstärker und Lautsprecher der Bühne zu gering war, die Beschallungsanlage des Stadions mitbenutzt wurde, was dazu führte das der Sound im Zuschauerraum und auch auf der Bühne unbefriedigend war.

-

<sup>&</sup>lt;sup>79</sup> Reinhard Flender, Hermann Rauhe in: "Popmusik – Geschichte, Funktion, Wirkung und Ästhetik", Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1989

<sup>&</sup>lt;sup>80</sup> Fred K. Prieberg in: "Musica ex Machina – über das Verhältnis von Mensch und Technik", Ullstein Verlag Frankfurt/Berlin, 1960.

Bill Hanley<sup>81</sup> bemerkte dazu:

"Wir hatten leistungsstarke 600 Watt – Röhrenverstärker und große JBL-Lautsprecher, …aber als die Beatles auftraten und alle Mädchen gleichzeitig loskreischten, war überhaupt nichts mehr zu hören. Gegen diesen Geräuschpegel kamen selbst wir nicht an."<sup>82</sup>

Die Notwendigkeit die Schallverstärkung auf eine neue Grundlage zu stellen, führte zur Entwicklung einer Kombinationslösung aus Backline-Verstärkern, Monitorsystem und PA Lautsprechern. Dies löste Ende der 1960er Jahre – zunächst für große Veranstaltungsorte, aber später dann auch in kleineren Clubs – das alte Konzept ab, das die Verstärkung einzelner Instrumente vorsah. Bis heute hat sich dieses System als Standardlösung gehalten. Die Anordnung ist allgemein bekannt. Die Backline für Gitarren und Bass wurde aus der vorhergehenden Epoche übernommen, in der Verstärker bereits als wesentlicher Bestandteil des Klangbildes dieser Instrumente galten. Das Monitorsystem hat die Aufgabe, jedem Musiker seinen verstärkten Mix sowie die Performance seiner Mitspieler zu Gehör zu bringen. Die dritte Komponente ist schließlich das PA System. Mit dieser Kombination der Schallverstärkung schien dem Ruf nach höheren Schallpegeln im Zuhörerraum gerecht zu werden, ohne den Musiker mit übermäßigen Lautstärken zuzusetzen.

Beim "Woodstock Music and Art Festival" 1969 konnten trotz "unerwarteter" Besucherströme schon akzeptable Ergebnisse erzielt werden. Immerhin galt es eine riesige Fläche mit über 100.000 Zuhörern zu beschallen. Umgesetzt wurde dies mit 20 m hohen Gerüstkonstruktionen links und rechts der Bühne. In jedem dieser Türme arbeiteten Kombinationen aus den sogenannten "Woodstock Bins" bestückt mit je vier 15" JBL D140 Lautsprechern für den Bassbereich und 4x2" und 2x10" multicell Altec Horns für den Mittenund Hochtonbereich. Da Hornstrahler nur einen begrenzten Frequenzbereich mit hohem Schalldruck und geringen Verzerrungen abstrahlen, war zur optimalen ausgewogenen Beschallung der Einsatz von mindestens drei verschiedenen Trichtern mit exakt abgestimmten Treibern notwendig. Es hieß: "that only two things at Woodstock worked consistently, the water supply and the sound."<sup>83</sup>

74

<sup>&</sup>lt;sup>81</sup> Bill Hanley – "Father of festival sound", FOH – Pionier der ersten Stunde, mischte u.a. in Woodstock, The Beatles, The Rolling Stones.

<sup>&</sup>lt;sup>82</sup>Vgl. Andy Babiuk: "Der Beatles Sound: Die Fab Four und ihre Instrumente auf der Bühne und im Studio", PPV Medien Verlag München, 2002, S. 190.

<sup>83</sup> Zit. nach http://www.billhanley.org/, Stand vom 28.07.08.

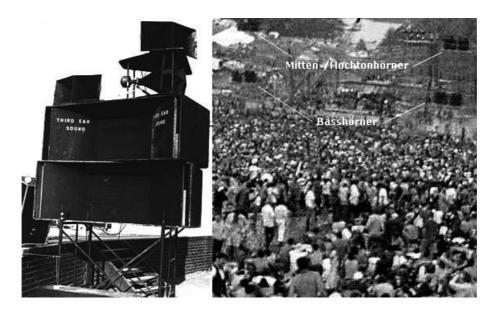


Abb. 55: links im Bild die sogenannten "Woodstock Bins", rechts die Bühne mit PA Towern

Erstmals arbeiteten die für den Sound verantwortlich Techniker vom FOH-Platz<sup>84</sup>, aus dem Publikum heraus. Dadurch hatte der Techniker einen viel besseren Höreindruck als neben oder hinter der Bühne. Außerdem war nun eine spezialisierte Person am Konzert beteiligt, die den Klang die gesamte Zeit überwachte und regelte. Mit Pink Floyd wurden Ende der 60er Jahre in Aufwand und Gerätetechnik beeindruckende Dimensionen bei der Beschallung von Live-Konzerten erreicht.

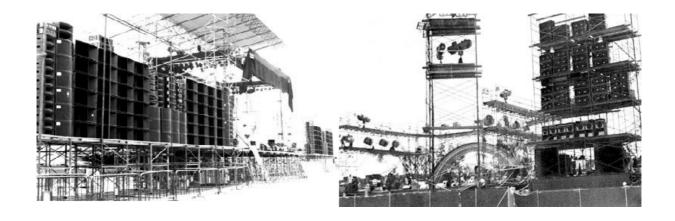


Abb. 56: eingesetzte Lautsprecherarrays bei Konzerten von Pink Floyd (1970)

 $<sup>^{84}</sup>$  FOH – "Front of House", Mischpult position im Publikum zur besseren Kontrolle des Sounds im Veranstaltung sort.

Die Elektroakustik wurde also ein untrennbarer Bestandteil der modernen Kommunikation und führte auch zur Veränderung in der Kommunikation selbst. Dieser Sachverhalt ist ein Beispiel dafür, dass technische Entwicklungen zur Befriedigung der Bedürfnisse eingesetzt und ausgenutzt werden und dass die Elektroakustik zur Verbesserung der Kommunikation und ihrer modernen technischen Mittel und Möglichkeiten dient. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist die Entwicklung soweit vorangeschritten, dass man von einer Selbstverständlichkeit beim Einsatz elektroakustischer Anlagen sprechen kann. Die Beschallung, insbesondere die Lautsprechertechnik, stellt einen Bereich der Elektroakustik dar, der den direkten Kontakt zum Rezipienten hat. Sie bildet das Bindeglied der elektroakustischen Übertragungskette zwischen Technik und Mensch.

In diesem Zusammenhang bietet sich an, die Anwendung von verschiedenen Lautsprechertechnologien anhand von unterschiedlichen Beispielen in der Live-Beschallung von Konzertveranstaltungen exemplarisch aufzuzeigen.

# 3.1 "Victory Liberty Loan" in New York City

In den frühen Epochen der Beschallung Anfang des 20 Jahrhunderts war primär die Übertragung von Sprache wichtig. Daher soll sich mein erstes Beispiel aus der Praxis auch auf einen solches Ereignis beziehen.

Nach dem Ersten Weltkrieg standen die nötigen Bestandteile für elektroakustische Massenbeschallungsanlagen in kompatibler Form auch für nichtmilitärische Forschungs- und schließlich Einsatzzwecke zur Verfügung. Mitte 1919 war es zunächst der Elektrokonzern Western Electric, der mit einer der ersten "Großbeschallungen" seine elektrotechnische Kompetenz einer breiten Öffentlichkeit präsentierte. So wurden durch eine komplexe Verschränkung von kabelgebundener Fernmeldetechnik, gerade im Kriegseinsatz erprobter Funktechnik und modernster niederfrequenter Röhrenverstärkertechnik neue zivile Nutzungsmöglichkeiten offeriert. Beim Einsatz des ersten "Public Address Systems" während des dreiwöchigen "Victory Liberty Loan", einem offenbar tourneeartig organisierten und in New York City dann drei Wochen lang medial inszenierten Spendenaufruf zur Beseitigung

wirtschaftlicher Folgeschäden des Weltkriegs, gelang eine "Spectacular Demonstration of Radiotelephony"<sup>85</sup>.



Abb. 57: Sicht auf den Victory Way, links gut zu erkennen die angebrachten "Lautsprecher"

Der Elektrokonzern Western Electric installierte eine Großbeschallungsanlage bestehend aus Röhrenverstärkern und 112 über der Park Avenue aufgehängter "loud-speaking telephones provided with large horns". Es wurden zum ersten Mal in so einer Größenordnung per Mikrofon abgenommene Ansprachen sowie Musik abgestrahlt: "and in this way thousands of people could hear the voice at the same time." Wenige Monate nach dieser modernen Vorführung von Western Electrics gelang einer erheblich kleineren amerikanischen Firma, der Magnavox Company, ein elektrotechnisch überschaubarerer, in politischer Hinsicht größerer Erfolg. Für den US-amerikanischen Präsidenten Woodrow Wilson, der am 19.9.1919 im Rahmen seiner League of Nations-Werbetour nach San Diego kommt, erbauen die Magnavox-Gründer Peter Laurits Jensen und Edwin Stewart Pridham im dortigen Stadion eine Beschallungsanlage, die es einem Präsidenten der USA erstmals ermöglichte, eine

\_

<sup>&</sup>lt;sup>85</sup> Electrical Review 1919, 895f.] [ohne Autor:] Speeches Through Radiotelephone Inspire New York Crowds, in: Electrical Review, Mai 1919, S. 895-896, zit. nach http://earlyradiohistory.us/1919vic.htm .

<sup>&</sup>lt;sup>86</sup> H. Winfield Secor in Electrical Experimenter: The Versatile Audion. Some of the Many Practical Uses to Which the Audion Has Been Adapted, in: Electrical Experimenter, Februar 1920, S. 1000f. und 1080-1083, zit. nach http://earlyradiohistory.us/1920au.htm.

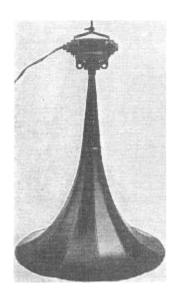


Abb. 58: loud-speaking telephones provided with large horns

knapp einstündige Rede an angeblich ca. 50.000 versammelte Menschen verständlich zu adressieren, sieht Beeinträchtigungen man von einigen der Sprachverständlichkeit für einen Teil des Auditoriums ab. 87 Realisiert wurde die vox magna des Präsidenten durch zwei Mikrofone mit trichterförmigen Schallfängern, einem bei Magnavox entwickelten dreistufigen Röhrenverstärker und lediglich zwei Lautsprechern, montiert auf dem Glasbau, der für Wilson zum Schutz seiner angeschlagenen Gesundheit innerhalb des Stadions errichtet worden war. Zu verdanken ist dieser allem Achtungserfolg dem verwendeten vor Lautsprecherantriebssystem, in das die beiden Erfinder mehrere Jahre Entwicklungsarbeit investiert hatten. Während Western Electric 112 elektromagnetisch arbeitende Schalldosen im Grunde größer

dimensionierte Telefonhörer – mit vorgesetzten Trichtern über dem zu beschallenden Victory Way verteilt aufhängen musste, um zusammen mit diesen leistungsschwachen Schallwandlern befriedigende Lautstärke zu erreichen, genügt den beiden Magnavox-Gründern die Schalleistung von zwei elektrodynamisch angetriebenen Lautsprechern, um das gesamte Stadion in San Diego von einem Punkt aus zu beschallen. Der komplexe Aufbau des Systems sowie der große Erfolg der Veranstaltung zeigt, wie weitreichend die Möglichkeiten der PA-Technik Anfang der 20er Jahre bereits waren. Dass sie allerdings noch nicht für alltägliche Live-Darbietungen von Musik genutzt wurden, hatte mehrere Gründe. 1. Wie die Beschreibung zeigt, war ein umfassender Aufwand nötig, um ein PA-System einzusetzen. Die Kosten waren zunächst noch sehr hoch und die Umsetzung erforderte eine beträchtliche technische Kompetenz, was zum Zweck von Live-Darbietungen von Musik nicht geleistet werden konnte. 2. Die Beispiele zeigen, dass es fast immer um die Verstärkung der menschlichen Stimme ging. Für Reden waren die Anlagen ausgelegt, bei der Verstärkung von Musik kamen jedoch zahlreiche Aspekte zur Geltung, die andere und weitaus größere

\_

<sup>&</sup>lt;sup>87</sup> Gerald A. Shepherd: When the President Spoke at Balboa Stadium, in: The Journal of San Diego History, 32. Jg., Nr. 2, 1986, S. 92-101, online: http://www.sandiegohistory.org/journal/86spring/president.htm [12.3.2003].

Ansprüche an die Technik stellten, damit solche Veranstaltungen beschallt werden konnten. 3. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts fanden Live-Darbietungen von populärer Musik in einem völlig anderen Rahmen statt, so dass vorerst nicht das Bedürfnis bestand beziehungsweise erst mit der Zeit wuchs, diese Art von Aufführungen für Musik umzusetzen. Während sich die PA-Anlagen bei großen Anlässen wie den beschriebenen bewiesen, wurden sie in verhältnismäßig kleinen Varianten wenig aber doch zunehmend in Theatern genutzt, bis sie im Laufe der 30er Jahre im Zusammenhang mit dem frühen Tonfilm beispielsweise von James Bullough Lansing<sup>88</sup> entscheidend verbessert wurden.

#### 3.2 "The Grateful Dead" - The Wall of Sound

Die "Wall of Sound"<sup>89</sup> wurde Anfang der 1970er Jahre von Owsley Stanley entwickelt. Es war das größte und komplexeste Beschallungssystem zu dieser Zeit. Der Ursache zum Bau dieses Systems lagen zwei Gedanken zugrunde. Damalige Lautsprecherarrays waren fast immer sehr groß und behinderten so die seitliche Sicht des Publikums auf die Musiker. Man entwickelte ein System, das hinter der Band, also im Bühnenhintergrund, positioniert war und

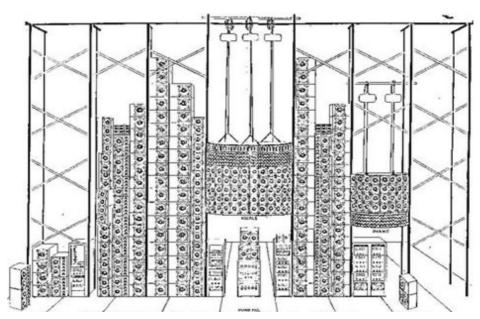


Abb. 59: "The Wall of Sound" – Beschallungssystem der Band "The Grateful Dead (1974)

\_

Lansing gründete 1946 die Firma Lansing Sound, die heute als JBL bekannt ist (Vgl. Eargle 2003.).
 Nicht zu verwechseln mit der "Wall of Sound" des Musikproduzenten Phil Spector, der damit einen

bestimmten Musikproduktionsstil definierte, der ganz im Gegensatz zu den "dünnen" Folk/Country Produktionen stand.

gleichzeitig als PA-Anlage, Instrumentenverstärker und Monitorsystem arbeitete. Weiterhin war man der Meinung, dass ein Signalmix aus verschiedenen Instrumenten bei der Übertragung mit nur zwei Lautsprecherarrays, je eines links und rechts der Bühne, nicht klar genug klingt. Also wurden sechs individuelle Soundsysteme miteinander kombiniert und so jedes einzelne Instrument einschließlich des Gesangs über ein unterschiedliches Lautsprecherarray wiedergegeben.

Das PA-System bestand aus 641 Lautsprechern angetrieben von 44 Macintosh MC-2300 Transistorverstärkern, die mit insgesamt 26,4 KW (RMS) Leistung das Konzertpublikum beschallten. Durch diese Leistung konnte man den Sound open air innerhalb einer Viertelmeile (ca. 400 Meter) mit durchschnittlicher und bei einer Entfernung von 500–600 Fuß (ca. 170–200 Meter) mit ausgezeichneter Qualität wahrnehmen. Andere Beschallungsanlagen konnten diese Lautstärke mit weniger Stromverbrauch erreichen, jedoch nicht in vergleichbarer Qualität. Primäres Ziel war es, sowohl Gesang als auch Instrumente ohne Verzerrung oder Qualitätsverlust hörbar zu machen. Bei vielen Bands in den 70ern hatte die PA raue bluesige Powerriffs zu transportieren, bei denen Verzerrungen eher von Vorteil sind. "The Grateful Dead" hatte eine andere Philosophie in ihrer Musik. Der Gedanke war mit Amplituden zu arbeiten, die auch zarte Sounds sauber und kräftig zugleich übertragen "damit es den Raum füllt, wenn Garcia<sup>91</sup> an einer Saite zupft" denn: "qualities like transparency, brilliance, presence and clarity are substantial musical dimensions".

Um dies zu erreichen wurde dabei eine Kombination aus 15"/12"/5" Lautsprechern zur Abdeckung des Tief- und Mitteltonbereichs und nicht näher spezifizierte Tweeter der Firma Elektrovoice für die hohen Frequenzen eingesetzt. Premiere hatte das System am 23. März 1974 im "Cow Palace" in San Francisco und wurde dann bis Ende Oktober auf Tour von der Band genutzt. Die eingesetzten Lautsprecher hatten Magnete aus einer Alnico Legierung und einen Papierkonus. Beim eingesetzten System zur Übertragung des Gesangs wurden alle Mikrofonsignale zusammengefasst und das kombinierte Gesangssignal über eine Frequenzweiche in 4 Frequenzbänder aufgeteilt (Low, Lower Mids, Upper Mids, High). Jedes dieser Bänder wurde separat verstärkt und dann von den entsprechenden Lautsprechern

\_

<sup>&</sup>lt;sup>90</sup>Lukas Gilkey - "An insiders Look at the Grateful Dead's Wall of Sound" zit. nach www.audiojunkies.com
<sup>91</sup> Jerry Garcia – Frontmann und Gitarrist der Band.

<sup>&</sup>lt;sup>92</sup> Rock Scully, David Dalton in: "Amerikanische Odyssee – die legendäre Reise von Jerry Garcia und Greatful Dead", Verlagsgruppe Koch/Höfen, (2005).

<sup>&</sup>lt;sup>93</sup> Zit. nach http://www.nii.net/~obie1/deadcd/wall of sound.htm, Stand vom 20.07.2008.

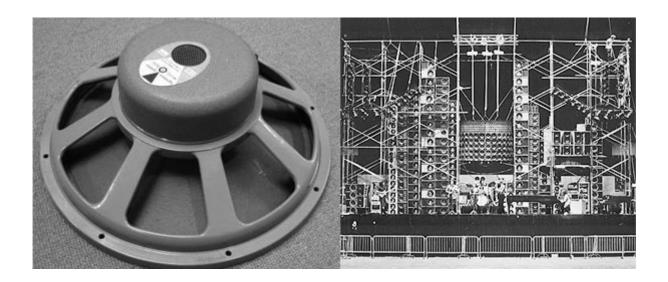


Abb. 60: D-120 12" Lautsprecher der Firma JBL einzeln, rechts als Teil der "Wall of Sound"

abgestrahlt. Das Center Cluster im Mittelpunkt der Bühne bestand aus Mitten-/Hochtonlautsprechern und war so gekrümmt, das der Schall annähernd in Form einer Zylinderwelle abgestrahlt wurde. Die vertikale Streuung war sehr gering und die horizontale Abstrahlung lag zwischen 140 und 180 Grad. Die 15" Lautsprecher zur Übertragung der tiefen Frequenzen waren gestackt.



Abb.61: Center Cluster zur Übertragung des Gesangs, rechts gestackte 15" für die Tiefen

Instrument	Kanäle	Verstärker- kanäle	Anzahl der Lautsprecher	15"	12"	5"	Hochtöner
1. Gesang	1	19	226	16	60	120	30
2. Sologitarre	1	1	20		20		
3. Rhythmusgitarre	1	1	20		20		
4. Klavier	1	8	128	16	32	80	
5. Bass	$4^{94}$	4	36	36			
6. Schlagzeug	3	10	120	16	20	60	24
Summe	11	48	641	89	178	320	54

Tabelle 1: Anzahl der eingesetzten Lautsprechertypen für die jeweiligen Instrumente

Die Wall of Sound fungierte gleichzeitig auch als ihr eigenes Monitorsystem und war zu diesem Zweck hinter der Band aufgebaut, so dass die Musiker genau das hören konnten, was das Publikum hörte. Um das aus dieser Aufstellung resultierende Feedback zu verhindern, wurde ein spezielles Mikrofonsystem entworfen. Zwei gegenphasig betriebene, gematche Bruel&Kjaer Kondensatormikrofone wurden im Abstand von 6 cm übereinander platziert. Die Sänger sangen ins obere Mikrofon, während das untere die sonstigen Geräusche im Bühnenumfeld aufnahm. Die beiden Signale wurden gemischt, und aufgrund der gegenphasigen Schaltung wurden alle Geräusche ausgelöscht, die von beiden Mikrofonen in gleichem Maße aufgenommen wurden – so wurde nur die Stimme verstärkt.

Insgesamt wurden von der Crew über 70t Equipment aufgebaut, was für damalige Verhältnisse einen immensen logistischen Aufwand erforderte. Daher und aufgrund der hohen Anschaffungs- und Unterhaltungskosten wurde dieses hervorragende, offensichtlich gut funktionierende Konzept von der Band aufgegeben und ab 1976 war "The Grateful Dead" mit einem zeitgemäßen Standardsystem unterwegs.

Dave Rat arbeitete auf der Welt Tournee der "Red Hot Chilli Peppers" im Jahr 2006 mit einem ähnlichen Beschallungskonzept. Er verwendete 4 geflogene Line Arrays, je 2 links und rechts der Bühne. Dabei fungierte je ein Stereo System für die Saiteninstrumente und eines für den Gesang wobei das Schlagzeug auf beide Systeme verteilt wurde. Rat geht sogar soweit, bei vorhandenem Budget und genug Hängepunkten zum Fliegen solcher Lasten das System für Gitarre und Bass nochmals zu teilen.

<sup>-</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>94</sup> George Mundy und Rick Turner bauten einen "quadrophonic bass" bei dem mit einem speziellen "Quad Pickup jede Basssaite einzeln abgenommen wurde. Somit wurden 4 Verstärkerkanäle benötigt.

"I found that the most noticeable improvement occurred when going from one system to two and adding the third was more subtle". 95



Abb. 62: "Dual PA" auf der Welttournee der Red Hot Chilli Peppers (2006)

Dies kann durchaus auch für kleinere Setups umgesetzt werden, indem man statt zwei eng abstrahlenden Topteilen zwei breitere als Dual PA nebeneinander verwendet. Somit ergeben sich gleichzeitig weniger Interferenzen zwischen den Tops. Der "Wall of Sound" - Ansatz ist also auch heute noch eine Möglichkeit eine höhere Auflösung und Durchsichtigkeit im Soundspektrum einer Livebeschallung zu erreichen.

### 3.3 20. Weltjugendtag auf dem Marienfeld in Köln

Anlässlich des Papst-Besuchs zum Weltjugendtag 2005 wurde auf dem Marienfeld bei Köln die größte, je in Europa installierte, zusammenhängende Beschallungsanlage installiert. Aufgrund der enormen Größe der zu beschallenden Fläche, immerhin galt es ca. 100 Pilgerblöcke mit durchschnittlich 100x100m Grundfläche zu versorgen, kam nur der Einsatz

 $<sup>^{95}</sup>Zit.\ nach\ \ www.prosoundweb.com/index.php/srlive/article/from\_the\_wall\_of\_sound\_to\_now\_pa\_evolution.$ 

von Line Array Systemen in frage. Schließlich sollten Pegeldifferenzen in der Vertikalen möglichst gering gehalten werden. Das Beschallungskonzept bestand aus folgenden Komponenten: sieben PA Tower mit jeweils sechs JBL VT 4889 zur Beschallung der vorderen Pilgerblöcke, zwölf Delay-Türme mit jeweils fünf JBL VT 4887 und zwei d&b C6, zwölf Türme mit jeweils sechs VT 4887, zwölf Türme mit jeweils sechs C4 und zwei Q7 sowie 57 Türme mit jeweils sechs d&b Q1 und einer Q7. Also insgesamt 693 Lautsprecher. Dazu kamen noch außerdem vier kleine Tower mit JBL VRX 932 LA direkt am Fuße des Altarhügels. <sup>96</sup>

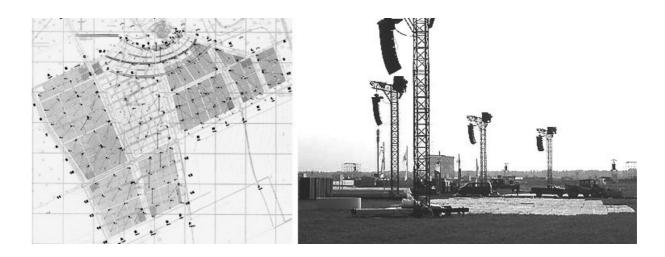


Abb. 63: links Geländeplan des Marienfeldes, rechts zur Beschallung eingesetzte Delay-Türme mit Line Array-Systemen

Eine im Vorfeld durchgeführte Simulation mit EASE 4.1 zeigte, dass mit Line Array Systemen in einer Höhe von etwa 9m und mit einer in etwa strahlenförmigen Ausrichtung der Lautsprecher der notwendige Direktschallpegel und eine ausreichende Sprachverständlichkeit erreicht werden kann. Vorraussetzung dafür waren allerdings die der Entfernung zum Bezugspunkt (Altarhügel) entsprechenden Delay-Zeiten. Der Maximalpegel im sprachrelevanten Frequenzbereich (250Hz-4 KHz) lag bei der Simulation aller Systeme gleichzeitig gemittelt bei 102 dB. Bei einem zu erwartenden Störpegel von 82 dB durch das Publikum war damit ein ausreichender Störspannungsabstand gewährleistet. Das zur Umsetzung der vorgeschriebenen Werte eingesetzte Line Array Element VT4889, war

\_

<sup>&</sup>lt;sup>96</sup> Vgl. Production Partner 10/2005.



Abb. 64: Der Papst Benedikt XVI. bei seiner Predigt, im Hintergrund die Line-Array Elemente an den entsprechenden Delay-Towern.

bestückt mit zwei 15" Tieftönern (JBL 2255), vier 8" Mitteltontreibern (JBL 2250) und



Abb. 65: eingesetzte JBL Vertec 4889 Systeme mit Crown MA 5002 VZ Verstärker

drei 1,5" Druckkammer Hochtönern (JBL 2435). Durch die Verwendung modernster Materialien und Technologien für Gehäuse und Treiber wird Leistungsfähigkeit bei höchste niedrigstem (72)die Gewicht kg) bereitgestellt, Konusmembranen sind zusätzlich feuchtigkeitsabweisend imprägniert. Die ebenfalls eingesetzte kleinere Version VT4887A arbeitet mit zwei 8" Tieftönern, vier 4" Mitteltontreibern und zwei 1" Druckkammer Hochtönern. Mit den genannten Systemen konnte auch das umfangreiche Musikprogramm für die 1 Million anwesenden Pilger aus aller Welt qualitativ hochwertig übertragen werden. Die komplexe Signalverteilung auf die verschiedenen Systeme erfolgte ausschließlich digital. Dies ist eine Tendenz, die (nicht

nur) die Beschallungstechnik in den nächsten Jahren ihrer Weiterentwicklung entscheidend prägen wird.

## 4. SCHLUSSBETRACHTUNG

Dr. Eugen Nesper<sup>97</sup> schrieb im Jahre 1925 im Vorwort zu seinem Buch "Lautsprecher" (Springer Verlag Berlin) folgendes: "Obwohl bisher in künstlerischer Beziehung der Radiotelefonie-Empfang mit Kopfhörer kaum, oder wenigstens nur in seltenen Fällen, durch den Lautsprecher ersetzt werden kann, spielt der Lautsprecher doch mehr und mehr eine Rolle, insofern, als es erwünscht ist, die Rundfunkdarbietungen objektiv meistens auch einem größeren Hörerkreise nutzbar zu machen". Seit dies geschrieben wurde, hat sich das Bild vollständig gewandelt. Der Kopfhörer wurde in vielen Gebieten vollständig vom Lautsprecher verdrängt, der als elektroakustischer Wandler auf dem Gebiet der Information eine so wichtige Rolle spielt, dass er aus dem heutigen Leben nicht mehr wegzudenken ist.

Die Anforderungen an den Lautsprecher haben sich im Wandel der Zeit geändert. War früher eine hohe Empfindlichkeit aufgrund geringer Verstärkerleistungen eine primäre Zielsetzung, so ist es heute ein möglichst perfektes und flexibel anzupassendes Richtverhalten. Große Hornsysteme mit Kompressionstreibern bieten gute Klangeigenschaften bei ausgezeichnetem Wirkungsgrad. Hohe Verstärkerleistungen sind heute in guter Qualität bei geringem Gewicht und verträglichen Kosten verfügbar. Viele weitere Details wurden in letzter Zeit verbessert. An erster Stelle ist das optimierte Verhältnis zwischen Leistung und Gewicht zu nennen. Lautsprechersysteme im Gewichtsbereich um die 350 kg können heute auf Konzerten Tausende Menschen hochwertig beschallen. Daran war in den 70er Jahren noch nicht zu denken. Neue Materialien für Membranen, Schwingspulen, und Magnetsysteme werden Lautsprecher in Zukunft noch leichter und robuster machen. Neue Fertigungsmethoden tragen dazu bei, die Gehäuse noch genauer zu konstruieren. Somit kann in Zukunft eine noch feinere Skalierbarkeit im Abstrahlverhalten erreicht werden, was eine bessere Anpassung an die Raumakustik der Veranstaltungsstätten möglich macht.

Aufgrund der Digitalisierung der Beschallungstechnik können Lautsprecher- und Hornentwicklung am PC mit Hilfe von Filtersimulationen kostengünstiger und schneller realisiert werden. Durch Hornberechnungen nach der BEM<sup>98</sup> Methode entfällt der sonst übliche langwierige und kostspielige Musterbau.

Trotzdem gibt es aber noch viel zu tun, denn nach wie vor ist der Schallwandler das schwächste Glied in der Kette der Schallübertragung.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>97</sup> Dr. Eugen Nesper (1879–1961), Pionier des deutschen Rundfunkwesens,

<sup>98</sup> Boundary Element Methode

# 5. ANHANG

# 5.1 Literaturverzeichnis

Akustische Zeitschrift	im Auftrag der Deutschen Forschungsgemeinschaft, unter Mitwirkung der Deutschen Reichspost u. PhysikalTechn. Reichsanstalt, hg. v.Martin Grützmacher u. Erwin Meyer, Verlag S. Hirzel, Leipzig. (1. Jg.: 1936)				
Ahnert, Wolfgang Steffen, Frank	Beschallungstechnik: Grundlagen und Praxis, S Hirzel Verlag Stuttgart Leipzig 1981				
Babiuk, Andy	Der Beatles Sound: Die Fab Four und ihre Instrumente auf der Bühne und im Studio, PPV Medien Verlag München, 2002				
Ballou, Glen	Handbook for Sound Engineers: The New Audio Cyclopedia Howard W. Sams & Co., and SAMS 1991				
Bergtold, Fritz	Schall und Klang Leitfaden der Elektoakustik Verlag von R.Oldenburg München und Berlin 1939				
Borwick, John	Microphones. Technology and Technique. Boston / London (Focal Press) 1990				
Bratke, W.	Wir beherrschen den Schall. 10 Jahre Ela-Technik, in: Der Telefunken-Kamerad, Nr. 1, 1937				
Conrad, Walter	Wer – Was – Wann? Entdeckungen und Erfindungen In Naturwissenschaft und Technik. Leipzig (VEB Fachbuchverlag) 4. verbesserte Aufl., 1989				
Degele, Nina	Einführung in die Techniksoziologie. München (Fink) 2002.				
Dickreiter, Michael	Handbuch der Tonstudiotechnik, Verlag K.G. Saur München 6. verbesserte Auflage 1997 Band 1				
Eargle, John Gander, Michael	Historical Perspectives and technology overview of loudspeakers for sound reinforcement, aus: AES Paper Vol 52. No. 4 April 2004				
Feik, G.	Der Universalstrahler, ein neuartiges Beschallungsgerät für elektroakustische Übertragungsanlagen, in : Wissenschaftliche Annalen zur Verbreitung neuer Forschungsergebnisse. 1. Jahrgang, Heft 7, Deutsche Akademie der Wissenschaften (Hg.)				
Flender, Reinhard Rauhe, Herrmann	Popmusik – Geschichte, Funktion, Wirkung und Ästhetik, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1989				

Anhang Kapitel 5

Goertz, Anselm Theoretische Grundlagen und die praktische Anwendung Line Arrays in *Beschallungstechnik* und ihre **Berücksichtigung** Simulationsprogrammen, CAVIS Congress 2002 Harris, Neil The Distributed-Mode Loudspeaker (DML) as a Broad-Band Acoustic Hawksford, Malcolm Radiator, Preprint 4526, 103th AES Convention, September 1997 Hatschek, Paul Darf der Radiohändler Lautsprecher für Tonfilmzwecke verkaufen?, in: Elektroton und Schallplatte. Beilage für Kraftverstärker, Nadel- und Lichttonwiedergabe, (Beilage von Der Radio-Händler), Nr. 1, 1935 Hehlgans, F. Der Rice-Kellogg Lautsprecher, in: Tonfilm. Aufnahme und Wiedergabe nach dem Klangfilm-Verfahren (System Klangfilm-Tobis), hg. v. Fritz Fischer und Hugo Lichte, Leipzig 1931 Heil, Christian Soundfield radiated by multiple sound sources arrays AES Paper Preprint 3269 presented at the 92nd Convention Vienna (March 1992) Urban, Marcel Heinz, Klaus Air Motion Transformer Principle Loudspeaker Drives, Preprint 4984, 106th AES Convention, München, May 1999 Holtmeyer, Volker Mysterium Line-Array - Mode oder Trend?, CAVIS-Kongress Frankfurt, März 2003 Hunt, Frederick Electroacoustics. The analysis of transduction and its historical background. Cambridge/Massachusetts (Harvard University Press) 1954 Israel, Paul The Papers of Thomas A. Edison, Volume 3. Baltimore/London (John Hopkins University Press) 1994 Kautter, W, Wann sind nichtlineare Verzerrungen hörbar? in: Das Radio Magazin, Nr. 5, 1948 The History of sound reinforcement, In "S Paper 6-002" Klapholz, Jesse **AES** conference: 6th International Conference (May 1988). Constant Directional Characteristics from a Line Source, Paper 261 Klepper, David 14<sup>th</sup> AES-Convention October 1962. Steele, Douglas Kohlhauer, Erich Der Tefag-Lautsprecher, in: Der Radio-Amateur. Zeitschrift für Freunde der Drahtlosen Telephonie und Telegraphie. Organ des Deutschen Radio-Clubs, 2. Jg., Nr. 35, 1924

Anhang Kapitel 5

Kuhnke, K. Miller, M.	Geschichte der Popmusik Band 1, Eres Edition und Archiv für populäre Musik (1976)
Mönch, Werner	Mikrophon und Telephon einschließlich der Lauthörer. Berlin (Hermann Meusser) 1925
Nesper, Eugen	<i>Dynamische Lautsprecher</i> , (=Sonderdruck aus Radio-Handel und – Export. Fach- und Exportzeitschrift für Elektrotechnik, Nr. 10-12, 1928), Leipzig 1929
Nesper, Eugen	Fortschritte im Lautsprecherbau, in: Fortschritte der Funktechnik und ihrer Grenzgebiete, 1. Band, (=Handbuch der Funktechnik und ihrer Grenzgebiete, 4. Band), hg. v. Hanns Günther, Stuttgart [1936]
Netzwelt Lexikon	Lautsprecher. (H <sup>2</sup> Media Factory) 2005. In: http://www.netzwelt.de/lexikon/Lautsprecher.html, Stand vom 2.2.2005
Norden, K	Neue Systeme elektrischer Sprechmaschinen und Lautsprecher, in: Elektrotechnische Zeitschrift, 48. Jg., Nr. 9, 1927
Prieberg, Fred	Musik des technischen Zeitalters. Freiburg/Zürich (Atlantis Verlag) 1956
Prieberg, Fred	Musica ex Machina – über das Verhältnis von Mensch und Technik, Ullstein Verlag Frankfurt/Berlin, 1960
Reuter, Michael	Telekommunikation. Aus der Geschichte in die Zukunft, Heidelberg 1990
Rice, Chester W. Kellogg, Edward	Notes on the Development of a New Type of Hornless Loudspeaker, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers 44, 1925, p. 461-475
Riemenschneider, K.	Drahtlose Telegraphie und Telephonie. Ihre geschichtliche Entwicklung vom Feuertelegraphen bis zur Hochfrequenzmaschine, Berlin 1925
Schmidt, Uta C.	Vom "Spielzeug" über den "Hausfreund" zur "Goebbels-Schnauze". Das Radio als häusliches Kommunikationsmedium im Deutschen Reich (1923-1945), in: Technikgeschichte, Bd. 65, Nr. 4, 1998
Schumann, W. O.	Die Musik- und Sprachverteilungsanlage bei der Einweihungsfeier des Deutschen Museums, in: Elektrotechnische Zeitschrift, 47. Jg., Nr. 10, 1926

Anhang	Kapitel 5
Schwandt, E.	Vollkommende Lautsprecher, in: Das Radio Magazin, Nr. 14/15, 1949
Scully, Rock Dalton, David	Amerikanische Odyssee – die legendäre Reise von Jerry Garcia und Grateful Dead, Verlagsgruppe Koch/Höfen, (2005)
Seifert-Kraft, Ulrike	Das umgekehrte Ohr aus der Hörakustiker-Fachzeitschrift AUDIO INFOS No. 8
Shepherd, Gerald	When the President Spoke at Balboa Stadium, in: The Journal of San Diego History, 32. Jg., Nr. 2, 1986
Stark, Berndt	Lautsprecher Handbuch – Theorie und Praxis des Boxenbauens, Richard Pflaum Verlag KG München, 1985
Weinzierl, Stefan	Handbuch der Audiotechnik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008
Wigge, Heinrich	Technisches Hilfsbuch für Gemeinschaftsempfang, Hörerberatung und Funkschutz, ([Nebentitel:] Gemeinschaftsempfang, Hörerberatung, Funkschutz. Ein Hilfsbuch für die Praxis), Stuttgart 1934

### 5.2 Abbildungsverzeichnis:

- [1] Borwick, John: Microphones. Technology and Technique. Boston / London (Focal Press) 1990, S. 10.
- [2] Ausschnitt aus Originalprospekt von Joh. Ph. Reis, August 1863; eine Seite repr. In Michael Reuter: Telekommunikation. Aus der Geschichte in die Zukunft, Heidelberg 1990.
- [3] Hans H. Biebel, Heinz Hiebler, Karl Kogler, Herwig Walistch: Große Medienchronik, Wilhelm Fink Verlag, Paderborn, 1999.
- [4-6] Reiner Steinführ auf http://www.oldradioworld.de/lautsprecher.htm Stand vom 15.08.2008.
- [7] links Katalog von "Radio-Diehr" aus Berlin (Jahrgang 1928/1929) aus http://www.del-service.de/graetz\_lautsprecher.htm Stand vom 15.08.2008 rechts Rundfunk-Großhändler. Fachblatt des Radio-Großhändler-Verbandes e. V., Verlag Druckerei H. Osterwald, Hannover. (1. Jg.: 1932/33).
- [8] Nesper, Eugen: Dynamische Lautsprecher, (=Sonderdruck aus Radio-Handel und Export. Fach- und Exportzeitschrift für Elektrotechnik, Nr. 10-12, 1928), Leipzig1929.
- [9] Gemeinschafts-Empfangs-Anlagen mit dem DAF 1011, Firmendruckschrift Telefunken (25 Ela 200, 11.36.M.), 68 Seiten, [1936].
- [10] links Collage aus FORTUNE MAGAZINE dated OCTOBER 1946 AMERICAN GOLD RUSH. rechts High Fidelty Jahrbuch 1967/1968, Firmendruckschrift Telefunken.
- [11] Vorlesungsscript, Theorie der Tontechnik / Studienrichtung Tonmeister Universität für Musik und darstellende Kunst Wien, Institut für Elektroakustik Jürg Jecklin Theorie der Tontechnik 5. Lautsprecher und Kopfhörer, Vers. Mai 2003.
- [12] Nesper, Eugen: Dynamische Lautsprecher, (=Sonderdruck aus Radio-Handel und Export. Fach- und Exportzeitschrift für Elektrotechnik, Nr. 10-12, 1928), Leipzig1929.
- [13] Fritz Fischer und Hugo Lichte (Hg.): Tonfilm. Aufnahme und Wiedergabe Beim Klangfilm-Verfahren (System Klangfilm-Tobis), Leipzig 1931, Abb.159.
- [14] Rice, Chester W. and Edward W. Kellogg, "Notes on the Development of a New Type of Hornless Loudspeaker," Transactions of the American Institute of Electrical Engineers 44, 1925, p. 461-475.
- [15] AEG-Jahrbuch 1928-29]: Jahrbuch des Forschungs-Instituts der Allgemeinen Elektricitäts-Gesellschaft. Erster Band. 1928-1929, Berlin 1930, S. 58.

Anhang Kapitel 5 Ferdinand Trendelenburg: Der Blatthaller, in: Tonfilm. Aufnahme und [16] Wiedergabe nach dem Klangfilm-Verfahren (System Klangfilm-Tobis), hg. v. Fritz Fischer und Hugo Lichte, Leipzig 1931, S. 171-174. [17] W. O. Schumann: Die Musik- und Sprachverteilungsanlage bei der Einweihungsfeier des Deutschen Museums, in: Elektrotechnische Zeitschrift, 47. Jg., Nr. 10, 1926, S. 294f. Ferdinand Trendelenburg: Aus der Geschichte der Forschung im Hause [18] Siemens, (=Technikgeschichte in Einzeldarstellungen, Nr. 31, hg. v. Verein Deutscher Ingenieure), Düsseldorf 1975. [19] Heinrich Wigge: Technisches Hilfsbuch für Gemeinschaftsempfang, Hörerberatung und Funkschutz, ([Nebentitel:] Gemeinschaftsempfang, Hörerberatung, Funkschutz. Ein Hilfsbuch für die Praxis), Stuttgart 1934. [20] Anselm Goertz - Kapitel 8 "Lautsprecher" in: "Handbuch der Audiotechnik", herausgegeben von Prof. Dr. Stefan Weinzierl Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008 [21] Bratke: Wir beherrschen den Schall. 10 Jahre Ela-Technik, in: Der Telefunken-Kamerad, Nr. 1, 1937, S. 2-7. [22] Homepage der Firma Alcons Audio http://www.alconsaudio.com/site/linearray/line\_array\_4.html Stand vom 14.08.2008 [23] Audio&Music Bulletin Rudolf auf Α. Bruil http://www.soundfountain.com/amb/ribbon.html Stand vom 15.08.2008 [24/25] Deutsches Museum - Abhandlungen und Berichte - 32. Jahrgang 196464 -Heft2 http://www.quad-musik.de/html/quad es1571.html Stand vom 05.08.2008 [26] [27] Bernd Stark: Lautsprecherhandbuch – Theorie und Praxis des Boxenbauens, Pflaum Verlag München 1985 Heinrich Kösters: 16. Große Deutsche Funkausstellung, in: Akustische [28] Zeitschrift, 4. Jg., Nr. 5, 1939, S. 350ff. [29] Frankfurter Allgemeine Zeitung vom 23.01.2001 ab S 5. [30] Ulrike Seifert-Kraft in "Das umgekehrte Ohr" aus der Hörakustiker-Fachzeitschrift AUDIO INFOS No. 8

Anhang Kapitel 5

[31]	Aufsatz von Charalampos FEREKIDIS zu "DML - Distributed Mode Loudspeaker. A New Transducer, Acoustical Properties and the Consequences in Terms of Practical Use" in http://www.wvier.de/texte/NXT_Tonmeistertagung.pdf Stand vom 17.08.2008
[32/33]	http://www.plasmatweeter.de/ Stand vom 17.08.2008
[34]	Der Große Brockhaus. Handbuch des Wissens in zwanzig Bänden, 15., völlig neubearb. Aufl. v. Brockhaus' Konversations-Lexikon, Ergänzungsband A-Z [=21. Band], Leipzig 1935.
[35]	Gemeinschafts-Empfangs-Anlagen mit dem DAF 1011, Firmendruckschrift Telefunken (25 Ela 200, 11.36.M.), 68 Seiten, [1936].
[36]	Akustische Zeitschrift, im Auftrag der Deutschen Forschungsgemeinschaft, unter Mitwirkung der Deutschen Reichspost u. PhysikalTechn. Reichsanstalt, hg. v. Martin Grützmacher u. Erwin Meyer, Verlag S. Hirzel, Leipzig. (1. Jg.: 1936).
[37]	Michael Dickreiter Handbuch der Tonstudiotechnik, Verlag K.G. Saur München 6. verbesserte Auflage 1997 Band 1 S. 209
[38]	Hanns Günther (Hg.): Fortschritte der Funktechnik und ihrer Grenzgebiete, 1. Band, (=Handbuch der Funktechnik und ihrer Grenzgebiete, 4. Band, hg. v. M. v. Ardenne u. a.), unter Mitarbeit v. P. Hatschek, E. Nesper, Th. Schultes, R. Thun, R. Wigand, H. Wigge, Stuttgart [1936].
[39]	BDP 934353 vom 2.10.1948, Telefunken (Heinrich Benecke, Siegfried Sawade und Herbert Petzoldt). Titel des entsprechenden britischen Patents: "Improvements in or relating to Public Address and like Sound Disseminating Systems". (GB 695912).
[40]	Firmenbroschüre auf http://www.duran-audio.com/pdfs/downloads/brochures/AXYS_Intellivox_brochure.pdf Stand vom 01.09.2008
[41]	Johannes Webers: Meilensteine der Audiotechnik publiziert zum 50. Jahrestag des Verbandes deutscher Tonmeister auf www.tonmeister.de Stand vom 12.08.2008.
[42]	links Eugen Nesper: Dynamische Lautsprecher, (=Sonderdruck aus Radio-Handel und -Export. Fach- und Exportzeitschrift für Elektrotechnik, Nr. 10-12, 1928), Leipzig 1929. rechts Paul D. Tyerl: "Magnavox". Lautsprecher-Telephon, (aus: Modern Wireless, März 1923, übers. v. M. Blaschke), in: Der Radio-Amateur. Zeitschrift für Freunde der Drahtlosen Telephonie und Telegraphie. Organ des Deutschen Radio-Clubs, 2. Jg., Nr. 1, 1924, S. 14f.

Anhang	Kapitel 5
[43]	DRP 606087 vom 18.3.1930 - Trichterlautsprecher der Firma Telefunken (Walter Schottky).
[44]	www.mp-2.nl/w-bin_exploded.jpg Stand vom 21.08.2008
[45]	Shearer Basshorn http://www.audioheritage.org/html/profiles/lmco/shearer.htm
[46]	Firmenprospekt GAE, opal audio Vertieb GmbH, Werther (2002)
[47]	http://www.albinger.de/deutsch/index.html, Stand vom 10.08.2008
[48]	Autor
[49]	John Eargle, David Scheirman and Mark Ureda: JBL's Vertical Technology™: Achieving Optimum Line Array Performance Through Predictive Analysis, Unique Acoustic Elements and a Dedicated Loudspeaker System, AES Convention October 2003
[50]	Anselm Goertz: Theoretische Grundlagen und die praktische Anwendung Line Arrays in der Beschallungstechnik und ihre Berücksichtigung in Simulationsprogrammen, CAVIS Congress 2002
[51/52]	Diplomarbeit Volker Holtmeyer - Simulation von Line-Array- Lautsprechersystemen mit der CAAD-Software Ulysses
[53]	Rundfunk-Großhändler. Fachblatt des Radio-Großhändler-Verbandes e. V., Verlag Druckerei H. Osterwald, Hannover. (1. Jg.: 1932/33).
[54]	http://www.av-magazin.de/Neodym_Magnet.141.0.html, Stand vom 27.08.2008
[55]	http://www.billhanley.org/, Stand vom 28.07.08.
[56]	Nick Mason, "Inside Out: A Personal History of Pink Floyd" S. 140
[57-58]	http://earlyradiohistory.us/1919vic.htm, Stand vom 30.08.2008
[59-61]	http://www.nii.net/~obie1/deadcd/wall_of_sound, htm Stand vom 28.07.08.
[62]	http://www.prosoundweb.com/index.php/srlive/article/from_the_wall_of_sound_to_now_pa_evolution/, Stand vom 29.07.2008
[63]	Production Partner, 10/2005, Report "WJT"
[64/65]	http://www.crystalsound.de, Stand vom 03.09.2008

Anhang	Kapitel 5
5. 3 Erklärung	
Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Magisterarbeit von mir selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet wurden.	
Berlin, den 09.09.08	

.....

(Georg Saßnowski)