

Philosophie einer Legende: Das Klipschorn

Zum 70. Geburtstag einer der besten Ideen des Lautsprecherbaus

Von Paul W. Klipsch und Claus Müller (Vorwort und Übersetzung)

Im Oktober 1941 wurde in dem amerikanischen Wissenschaftsmagazin „The Journal of the Acoustical Society of America“ der Artikel über die Entwicklung eines neuen Lautsprecherprinzips von Paul W. Klipsch veröffentlicht. Dieses System wird bis zum heutigen Tage von der Firma Klipsch hergestellt. Es gibt davon sehr viele Varianten, auch von anderen Herstellern, was die Beliebtheit dieser Konstruktion unterstreicht. Das Faszinierende dieses Basssystems ist die absolut verzerrungsarme Wiedergabe bei einem sehr hohen Wirkungsgrad. Die Boxen stehen in einer Raumecke und nutzen diese sowie den Boden des Raumes als eine Verlängerung dieses gefalteten „Eckhorns“. Ich selbst benutze bis zum heutigen Tage diese Konstruktion in der Version von ACR aus dem Jahre 1990. Mir würde nicht einfallen, das System durch ein anderes zu ersetzen.

Zu spektakulär ist die Faszination, die bei jedem Hören aufs Neue eintritt. Für alle Interessierten unter Ihnen, liebe Leser, möchte ich hier die Übersetzung des Originalartikels aus dem Jahre 1941 abdrucken. Mir ist bewusst, dass in diesem Artikel sehr viele Zahlen und Formeln stehen. Andererseits sind auch jene Fakten enthalten, die das Alleinstellungsmerkmal dieser Konstruktion begreifbar machen.



Paul W. Klipsch mit seiner Erfindung in einer Version aus Acrylglas

OKTOBER 1941

J. A. S. A.

FOLGE 13

Ein Basshorn mit kleinen Abmessungen

Paul W. Klipsch

Houston, Texas

(Empfangen am 7. August 1941)

Hier wird ein neuer Hornlautsprecher beschrieben: Ein gefaltetes Tieftonhorn, das Wand- und Bodenreflexionen nutzt, um an der Austrittsöffnung die Impedanzanpassung zu verbessern. In einer Raumecke operierend, ist der Lautsprecher fähig, Töne mit denselben Wellenlängen, derselben Effizienz und einer Ruhe zu reproduzieren, die bei vergleichbaren Theaterlautsprechern die 8-fache Abmessung des Gehäuses erfordern. Da die Größe des Hornlautsprechers ungefähr der einer modernen Radiokonsole entspricht, ist er für den Gebrauch im Wohnzimmer geeignet. Wegen seiner hohen Leistungsfähigkeit kann er ebenfalls in kleinen Theatern und Centern benutzt werden. Mit kleinen Modifikationen für einen oder mehrere größere Treiberlautsprecher wird er auch stark genug für große Aufführungsorte sein. Für die Benutzung im Freien kann er gestapelt oder zu Clustern zusammengefasst werden. Bei einem Frequenzbereich von 40 bis

400 Hertz ist eine gute Musikqualität erreichbar. Eine passende Hochfrequenzeinheit mit entsprechend kleinen Abmessungen und der nötigen Leistungsfähigkeit ab 400 Hertz ist für eine Vollbereichsnutzung unerlässlich. Die Quelle für den Betrieb des Horns sowie das eingesetzte Lautsprecherchassis verlangen eine hohe Impedanzfestigkeit. Um beim Klang kompromisslos gut zu bleiben, müssen sich die anderen Komponenten der Anlage vergleichbar anhören und die gesamte Box von derselben Quelle gespeist werden. Impedanzmessungen haben bewiesen, dass das Horn bis hinunter zu 40 Hertz sehr effizient arbeitet. Die Benutzung der Wohnraumecken, wo normalerweise Platz verschwendet wird, formen den Endabschluss des Horns in einer einfachen, kompakten Struktur und bewirken eine beträchtliche Materialeinsparung. Trotz der kleinen Abmessung muss kein Qualitätsverzicht in Kauf genommen werden.

EINFÜHRUNG

VIELE Arten der Nutzung der hohen akustischen Impedanz, die in Raumecken herrscht, wurden bereits ersonnen. Kellogg¹, Stone², Weil³, Ephraim⁴, Sandeman⁵ und Horace-Hulme⁶ sind die Repräsentanten der frühen Kunst. Kürzlich wurde eine Bassreflexbox angekündigt⁷, die in eine Ecke eingebaut wird.

Die vorliegende Entwicklung bietet einen Hornstrahler mit kleineren Abmessungen, als es jemals zuvor mit der längsten zu reproduzierenden Wellenlänge möglich war. Die Vorteile von Hörnern sind bekannt. Verglichen mit einem Direktstrahler in einem geschlossenen Gehäuse ist der Wirkungsgrad des Horns 10 bis 50 Mal höher. Die im Folgenden beschriebenen Faktoren erlauben wesentlich kleinere Membranhübe, ein Faktor, der harmonische Störungen bzw. Klirrfaktoren sehr wesentlich reduziert. Gut berechnete Hörner sind zu sehr linearen Frequenzgängen fähig. Die Fähigkeit, mit Leistung umzugehen, ist ebenfalls hoch.

In der Vergangenheit waren Hörner, die tiefe Frequenzen übertragen sollten, sehr sperrig. Ein typischer Theatertieftöner nahm einen Platz von 1,2 mal 1,2 mal 2,4 Metern ein.

Bild 1 zeigt ein Eckhorn. Mit einem Frequenzgang bis 40 Hz, was einer Wellenlänge von 8,6m entspricht (kompatibel zum Theaterlautsprecher), misst diese Box nur 1m Höhe, hat ungefähr dieselbe „Flügelbreite“ und nur 70cm von der Frontplatte bis zur Wanddecke. Die Gehäusgröße ist vergleichbar mit Radiokonsolen und somit

vollständig für den Heimgebrauch geeignet. Die benötigte Verstärkerleistung ist für den Gebrauch jeweils anzupassen – vom Wohnzimmer bis zur Theaterhalle. Selbst in großen Mehrzweckhallen wird die benötigte Leistung erreicht.

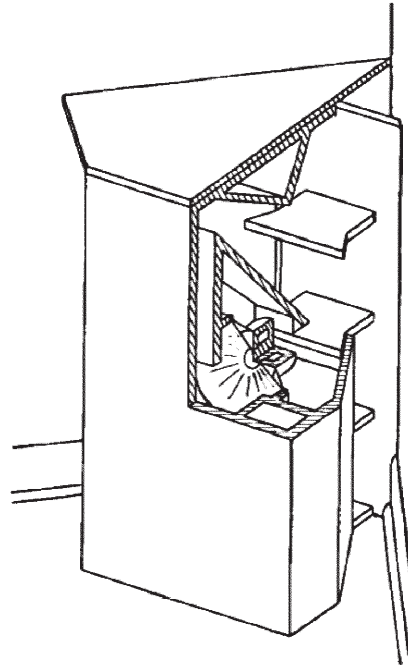


Bild 1: Aufgeschnittene Schrägansicht des neuen Horns, das die Vorteile des hohen akustischen Scheinwiderstandes (Impedanz) einer Raumecke nutzt.

1 E. W. Kellogg, J. Acous. Soc. Am. 3. 54 (1931)

2 Stone, U. S. Patent 1.819.721 (1931)

3 Weil, U. S. Patent 1.820.996 (1931)

4 Ephraim, U. S. Patent 1.962.300 (1934)

5 Sandeman, U. S. Patent 1.984.550 (1934)

6 Horace-Hulme British patent, 342.369 (1931)

7 Electronics, p. 99 (May, 1941)

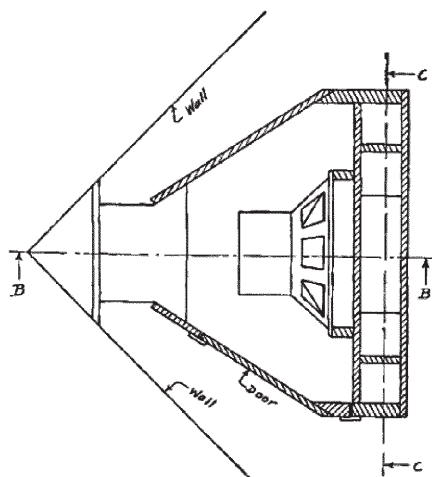


Bild 2: Teilansicht des Horns von oben

Um die Wellenlänge mit demselben Grad an Ruhe, derselben Horneffizienz und derselben Öffnungsfläche zu reproduzieren, würde ein konventionelles Horn im freien Feld eine Mundöffnung von $2,9 \text{ m}^2$ benötigen. Wenn dieses Horn auf einem Boden oder an einer Wand arbeiten würde, wären immer noch $1,5 \text{ m}^2$ bzw. $1,35 \text{ m}^2$ Durchmesser von Nöten. Die Hornlänge wäre, bezogen auf eine 38 cm -Membran, mehr als 2 m . Das Horn in Bild 1 hat eine aktuelle Mundöffnungsfläche von $0,37 \text{ m}^2$ und eine Hornlänge von 1 m und spart 75% des Volumens und Materials eines herkömmlichen Horns ein. Mit der Benutzung der Raumecken als Hornwand wird noch mehr Material eingespart.

BESCHREIBUNG

Bild 2, 3 und 4 zeigen die Konstruktion des Gehäuses. Bild 2 zeigt mit dem Längsquerschnitt, wie das Horn in der Ecke steht sowie das Arrangement der Seitenwände, der Frontplatte und des Treibers. Die Seitenwände sind in einem solchen Winkel angeordnet, dass sie, zusammen mit den Wänden, dem Boden und der Deckelplatte das endgültige Horn bilden. Die Abstrahlung erfolgt in einem festen $\pi/2$ -Festwinkel (zusammen mit den Wänden und dem Boden) und macht die Mundöffnungsfläche $1/4$ so groß als sie mit einem 2π -Winkel (mit dem Boden ohne die Wände) wäre.

Bild 3 zeigt mit dem Seitenquerschnitt (B-B des Bildes 2) den Weg der Luft von der Membran zur Rückseite des Horns. Die Luftkammer hinter dem Lautsprecher wird sichtbar. Bild 2 ist der A-A Schnitt von Bild 3.

Bild 4 ist der C-C Schnitt von Bild 2 und zeigt die Kehlenöffnung vor dem Lautsprecher und die erste abzweigende Kammer.

KEHLENÖFFNUNG MIT MEHREREN MERKMALEN

Das gezeigte Modell ist für einen 12-Zoll-Treiber (30 cm) ausgelegt. Der Frequenzbereich beträgt 40 bis 400 Hertz (Hz). Für gute Ergebnisse bei 400 Hz wird eine Kehlenöffnung von 323 cm^2 benötigt, ein Membrandurchmesser von $26,7 \text{ cm}$ und ein Membrangewicht von 14 bis 18 Gramm. Solch eine kleine Kehlenöffnung wird unnötig hohe Lasten bei tieferen Frequenzen verhindern. Konsequenterweise ist die Anfangswiderstandsverteilung so,

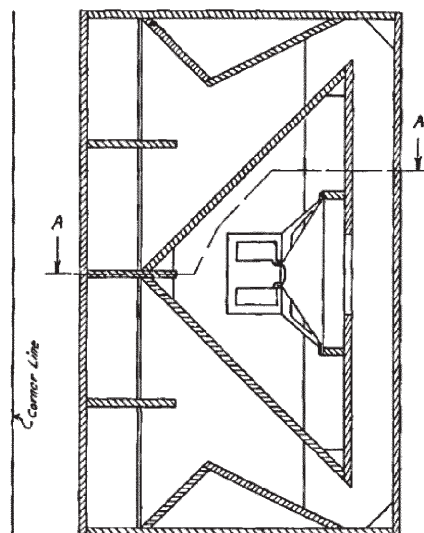


Bild 3: Teilansicht des Horns von der Seite

dass sich die Hornfläche nach $20,3 \text{ cm}$ verdoppelt, was einer unteren Grenzfrequenz von 100 Hz entspricht. Der Rest der Horncharakteristik ist so ausgelegt, dass er sich alle $40,6 \text{ cm}$ verdoppelt, deshalb wird die untere Grenzfrequenz dann wieder bei 47 Hz liegen. Das Ergebnis ist eine Art „Gummikehle“. Mit diesen Flächenverhältnissen „sehen“ die Frequenzen bis 100 Hz eine Kehlenöffnung mit 645 cm^2 , die bis zu den Frequenzen bis 400 Hz kontinuierlich auf 323 cm^2 abnimmt. Der einzige Unterschied gegenüber der inneren Öffnung von Olson⁸ ist, dass sie konisch ist. Die Ergebnisse sind nahezu die gleichen.

DIE KAMMER ZWISCHEN MEMBRAN UND KEHLENÖFFNUNG

Um den positiven Blindwiderstand zu verhindern, der durch die Mehrfachverjüngung der vorigen Kammer hervorgerufen wird (gilt vor allem für Frequenzen von 200 bis 400 Hz), wird nun eine Kammer von $4,1$ Litern mit negativem Blindwiderstand entgegengesetzt, und zwar zwischen der Membran und der Kehlenöffnung. Diese Luftkammer ist kleiner als $1/8$ der Wellenlänge bei 400 Hz .

8 H. F. Olson, „A horn consisting of manifold exponential sections“, J. Soc. Mot. Pict. Eng. 30, 551 (1938)

LUFTKAMMER HINTER DER MEMBRAN

Die Luftkammer hinter der Membran ist so beschaffen, dass sie den Blindwiderstand der Kehle bei tiefen Frequenzen ausgleicht.

Um den Blindwiderstand der Kehle eines unendlichen Horns exakt ausgleichen zu können, sollte die Kammer hinter dem Lautsprecher das 2,9-fache Volumen der Kehlenfläche multipliziert mit der Hornlänge bei einer Flächenverdoppelung haben. Das sieht dann folgendermaßen aus:

Der Luftkammerblindwiderstand auf der Membran beträgt in mechanischen Ohm:

$$(1) \frac{1}{\omega C_M} = A_D^2 p c^2 / \omega V$$

Der Kehlenwiderstand auf der Membran beträgt bei Grenzfrequenz in mechanischen Ohm:

$$(2) X_T = p c A_D^2 / A_T$$

A_D Membranfläche

A_T Kehlenfläche

ω Winkelgeschwindigkeit bei Grenzfrequenz, $\omega = 2\pi f$ (f ist die Frequenz)

V Volumen der Luftkammer

p Luftdichte

c Schallgeschwindigkeit in Luft: $c = 340\text{m/s}$

Um die Blindwiderstände anzugleichen, müssen (1) und (2) gleich sein, daraus folgt:

$$(3) V = A_T c / \omega$$

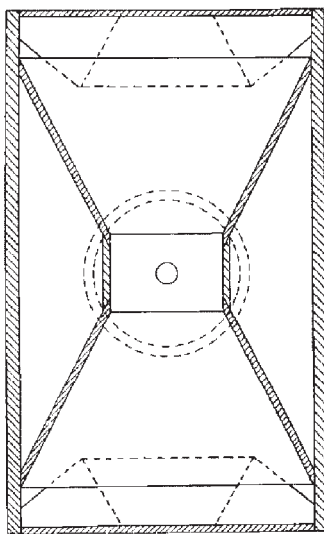


Bild 4: Teilansicht von vorne

Die Hornlänge mit Flächenverdoppelung ist:

$$(4) l = \lambda / 18,1 = c / 18,1 f = 2\pi c / 18,1 \omega$$

wobei λ die längste zu übertragende Welle ist und f die tiefste Frequenz, daraus folgt:

$$(5) V = A_T c (18,1 / 2\pi c) l = (18,1 / 2\pi) A_T l = 2,9 A_T l$$

Für die beschriebene Ausführung ist $l = 40,6\text{cm}$, $A_T = 645\text{cm}^2$ und für das unendliche Horn $V = 75400\text{cm}^3 = 75,4\text{l}$.

In einem endlichen Horn verändert sich der Blindwiderstand der Kehle im Verhältnis wie der Wert des Blindwiderstandes einer negativen Kapazität. Der Anfangswert ist so groß, dass theoretisch der kapazitive Blindwiderstand der Kammer für das endliche Horn höher ist als für das unendliche. Es muss in Betracht gezogen werden, dass dieser Blindwiderstand im Vergleich zur Länge des unendlichen Horns 1,5- bis 2-fach so groß wird.

Die Steifheit der Membranaufhängung trägt einiges zum gesamten Wert der Kammer bei, jedoch streute diese Beschaffenheit in Beispielen mit 12-Zoll-Lautsprechern nur um ca. 15-25%.

Ungefähr 49-57 Liter sind ein annähernd befriedigender Wert für eine 645cm^2 -Kehle. In einem Experimentiermodell reichte ein 42,6l-Volumen mit einer 452cm^2 -Kehle und dieselbe Widerstandsverteilung aus. In der gezeigten Box ist das Durchschnittsvolumen bei 63,9l, von denen ca. 9,8l von Treiber, Montierung und vorderer Luftkammer eingenommen werden.

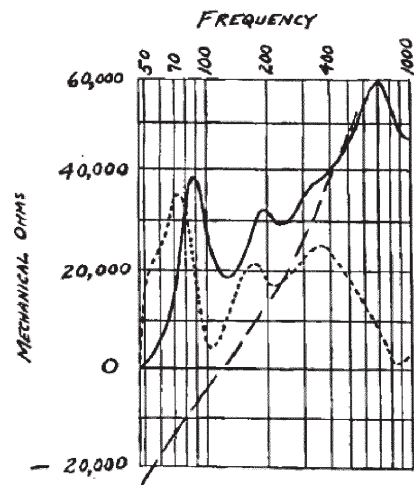


Bild 5: Berechnete Impedanzen des neuen Horns. Durchgezogene Linie: Widerstandskomponente der Kehlenimpedanz, Gepunktete Linie: Blindwiderstandskomponente der Kehlenimpedanz, Gestrichelte Linie: Kombinierte Kurve aus dem Widerstand der Luftkammer hinter der Membran und des Blindwiderstandes der Masse des bewegten Systems.

Wenn die Durchschnittsentfernung der Membran zur Oberfläche der Luftkammer ungefähr gleich zur $1/4$ -Wellenlänge bei 400Hz ist, das sind dann 21,3cm, tritt die Resonanz der ersten Luftkammer bei dieser Frequenz auf. Bei Resonanz ist die Widerstands- und Blindwiderstandsbelastung hinter der Membran sehr klein. Für Frequenzen kleiner 400Hz wird der Blindwiderstand kapazitiv sein und kleiner 100Hz wird der Wert unbedeutend von den Berechnungen von (1) abweichen.

MUNDÖFFNUNG BZW. HORNÖFFNUNGSFLÄCHE

Die gewählte Öffnung beträgt $0,368\text{m}^2$. Das entspricht einer Öffnung von $1,47\text{m}^2$ bezogen auf die Abstrahlung im $2\text{-}\pi$ -Festwinkel. Die erstgenannte Fläche setzt den Einsatz mit 2 Wänden und dem Boden voraus.

Die Ausführung des Horns kann auf der Basis von einer Öffnungsfläche von $1,47\text{m}^2$ sowie einer entsprechenden Hornlänge berechnet werden. Aus der berechneten Kehlenimpedanz resultiert ebenfalls eine 4-mal größere Fläche. Die mechanische Impedanz des aktuellen Lautsprechers wird durch die Multiplikation des entsprechenden Wertes mal 4 gefunden. Die Hornöffnungsfläche ist mit $0,368\text{m}^2$ konservativ bewertet, weil sie die hinteren Kanten der Seitenwände markiert. Die gemeinsame Verjüngung der Seitenteile reduziert zweifellos das Ausmaß der ersten Spitze der Impedanzkurve unter den berechneten Wert.

Für ein entsprechendes 100-Hz-Horn wäre die Mundöffnung $(47/100)^2 \cdot 1,47\text{m}^2 = 0,325\text{m}^2$, das entspricht einem Kreisdurchmesser von 63,5cm. Olson⁹ hat Kehlenimpedanzkurven für viele Öffnungen errechnet. Die hier genannte 63,5cm-Durchmesser-Öffnung befindet sich zwischen den 50,8- und den 76,2cm-Größen von Olson, die Auswirkungen zeigen seine Bilder 5.5.b und 5.5.c, die Hornlänge entspricht nahezu seinem Bild 5.6.d. Die Impedanzkurve sollte etwas ruhiger als in Bild 5.6.d erwartet werden, entsprechend zur 25% größeren Kehlenöffnung. Einige berechnete Punkte beweisen das. Die Impedanz wurde für 200Hz berechnet und der Effekt der stetigen Verjüngung unterhalb dieser Frequenz wurde aufgrund der Berechnung von Olson⁹ angenommen. Die Ergebnisse zeigt Bild 5. Die durchgezogene Linie zeigt die Widerstandskomponente der Kehlenimpedanz in mechanischen Ohm auf der Membran. Die gepunktete Kurve zeigt den Blindwiderstand. Die gestrichelte Kurve ist der kombinierte Wert des mechanischen Widerstands der Membranmasse mit dem der Luftkammer hinter der Membran.

Der Effekt der Luftkammer zwischen Kehle und Membran kann aus dem entsprechenden Kreis berechnet werden. Bild 6 zeigt die Kombination aus beiden Faktoren,

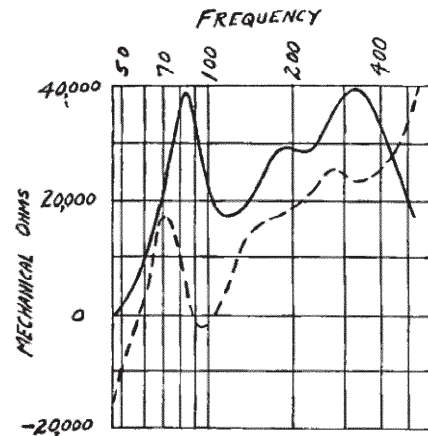


Bild 6: Die Ladung der Membran und die kombinierten Horneffekte, der „Massenblindwiderstand“ der bewegten Komponente sowie vordere und hintere Luftkammer. Durchgezogene Linie: Widerstandskomponente, Gepunktete Linie: Blindwiderstandskomponente.

wobei die durchgezogene Linie die Widerstandskomponente und die gepunktete Linie die Blindwiderstandskomponente der Membranbelastung in mechanischen Ohm zeigt. Die Blindwiderstandskomponente beinhaltet den Kehlenwiderstand des Horns, den Blindwiderstand der Membranmasse und die Effekte der vorderen und hinteren Luftkammer.

Die Impedanz der bewegten Masse eines Lautsprechers mit einem Produkt aus Flusssdichte / Spulenmasse mit $550 \cdot 10^6$ und einem Spulenwiderstand von $6,5 \Omega$ ist in Bild 7 gedruckt. Diese Impedanz ist einfach

$$B_2 I_2 \cdot 10^{-9} / Z_M$$

für eine $6,5 \Omega$ -Spule, $B_2 I_2$ ist $225 \cdot 10^{12}$ und Z_M ist die Impedanz aus Bild 6. Die daraus berechnete Leistungsfähigkeit zeigt Bild 8. Die benutzte Effizienz zeigt Formel (6) und wird später erklärt, zusätzlich werden die Verluste des Verstärkers mit einbezogen. Die Verstärkerimpedanz beträgt 6Ω .

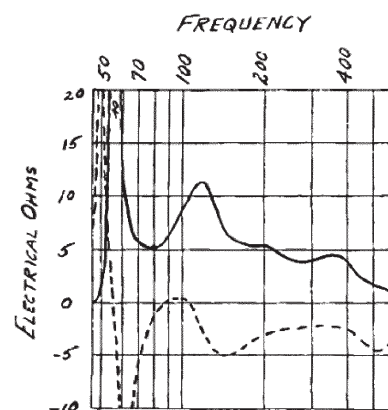


Bild 7: Bewegte Impedanz an der Schwingspule, berechnet aus den Kurven Bild 6 für einen Treiber mit einem Bl -Produkt von $15 \cdot 10^6$ Gauß-Zentimetern. Durchgezogene Linie: Widerstandskomponente Gepunktete Linie: Blindwiderstandskomponente

9 H. F. Olson, RCA Review 1, No. 4, pp. 68 (1937); Also Elements of Acoustical Engineering (Van Nostrand, 1940), Figs. 5.5, 5.6, 5.7, 5.8

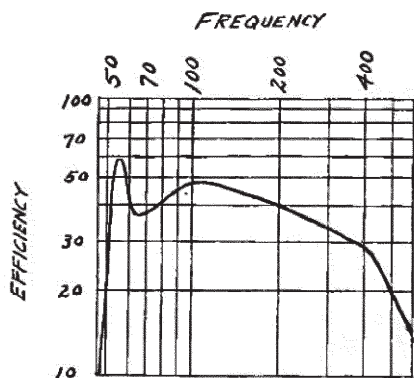


Bild 8: Berechnete absolute Leistungsfähigkeit, beinhaltet die Berücksichtigung der Treiberquellenimpedanz, basierend auf die bewegte Impedanz aus Bild 7. Schwingspulenimpedanz: $6,5\Omega$. Verstärkerquellenimpedanz: 6Ω

EXPERIMENTIERERGERBNISSSE

Bild 9 zeigt die Ergebnisse von veränderlichen Impedanzmessungen, die mit einem Experimentiermodell gemacht wurden. Dieses Modell wurde nach der vorliegenden Beschreibung hergestellt. Es unterscheidet sich etwas durch eine kompliziertere und weniger effiziente Faltung (aus der Sicht, Platz zu sparen). Die Kammer hinter der Membran wurde auf die Front gesetzt. Diese ungeschickt gebaute Variante zeigt Bild 10.

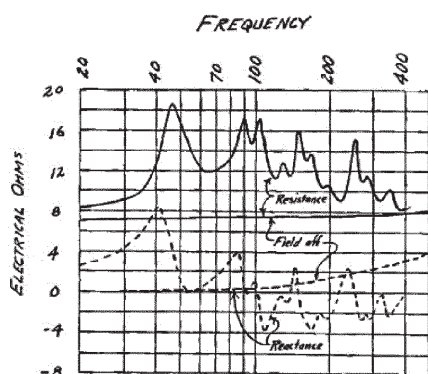


Bild 9: Die gemessene Schwingspulenimpedanz eines Treibers, der im Experimentiermodell arbeitet. Durchgezogene Linie: Widerstandskomponente, Gepunktete Linie: Blindwiderstandskomponente. Die geblockte Impedanz bzw. unbewegte Bedingung wurden möglich, indem die Quelle abgeschaltet wurde. Diese Kurven sind mit „Field off“ markiert. Die Differenz zwischen normal und „Field off“-Kurven ergeben den bewegten Widerstand und Blindwiderstand.

Das Experimentiermodell ist dem vorher beschriebenen Modell in vielerlei Hinsicht untergeordnet. Die Aufgabe, mit militärischer Gründlichkeit zu forschen, schließt Fehler aus. Was die Berechnung und Experimentiererergebnisse betrifft, kann ganz sicher davon ausgegangen

werden, dass das neue Modell besser ist als das Experimentiermodell.

Die „geblockte“ Impedanzmessung war nötig, um äußere Feldeinflüsse auszuschließen. Die Unterschiede zwischen den Kurvenpaaren zeigen die Bewegung des Widerstandes und des Blindwiderstandes. Es können Fragen über die Genauigkeit einer solch „geblockten“ Impedanzmessung gestellt werden; doch, da der Fluss der Lautsprecherspule den Luftspalt zweimal durchfließen muss, ist es wahrscheinlich, dass die Sättigung einen geringen Impedanzeffekt auf der statischen Spule hervorruft, speziell bei Frequenzen, die kleiner als 1000Hz sind*.

Das Experimentierhorn wurde mit einer einfachen Kehlenöffnung mit 450cm^2 statt einer „Kehlenöffnung mit mehreren Merkmalen“ und einer Mundöffnung mit $0,516\text{m}^2$ gebaut. Die Luftkammer zwischen Kehle und Membran war mehr oder weniger unbestimmbar, weil der Lautsprecher umgedreht war und der Feldmechanismus Teil der Kehle und der Luftkammer in Anspruch nahm. Diese Tatsache, zusammen mit der komplizierten Faltung und der Tatsache, dass die Kehle zu groß war, erklärt die niedrige Impedanz unter 200Hz . Die Seitenwände waren aus $1/4$ -Zoll-Sperrholz ($6,35\text{mm}$) und nicht verstrebt, ihre Vibration ist für einige Unregelmäßigkeiten unter 80Hz verantwortlich.

Der Treiber war ein Jensen 12A mit einer Freiraumresonanz von 63Hz . Die gemessene Steifheit der Aufhängung war im Neuzustand ungefähr 3300g/cm . Das Umsetzungsverhältnis von Strom in Kraft, Bl, bzw. die Flussdichte der Leiterschleife der Schwingspule wurde mit $15 \cdot 10^8$ gemessen. Der Spulenwiderstand betrug $6,5\Omega$.

Aus diesen Faktoren und der Horntheorie, bezogen auf die Erklärung des Blindwiderstandes der Masse des bewegten Systems, die Aufhängung und die Nachgiebigkeit der Luftkammer hinter der Membran sowie der Dimension der Impedanz der berechneten Kehle, wurde die veränderliche Impedanz berechnet.

Diese berechnete Impedanz der Widerstandskomponente ist in der durchgezogenen Linie in Bild 11 zu sehen, gepunktet die gemessene. Die gemessene Kurve zeigt die Tieffrequenzabstrahlung besser als die berechnete. Da die Übereinkunft der beiden Kurven nur mäßig ist, sei hier eine Erklärung der Diskrepanzen versucht: Zuerst muss die Horntheorie einen beträchtlichen Fehler in unmittelbarer Nähe der Grenzfrequenz haben¹⁰. Zweitens hat die Vibration der dünnen Seitenwände die Unregelmäßigkeiten bei 80Hz hervorgerufen. Drittens hatte die Luftkammer zwischen Kehle und Membran eine komplizierte Form und das veranschlagte Volumen beinhaltet einen beträchtlichen Fehler, weshalb die Kurve über 200Hz einen starken Anstieg hat.

Die Grenzfrequenz des Horns ist 47Hz und die berechnete Kurve zeigt schlechte Auswirkungen unterhalb 55Hz . Aber die Messungen und kritische Hörtests zeigten gute Werte bis 40Hz .

*Dass die Membranbewegung nebensächlich ist, wird von der Tatsache in Bild 9 demonstriert, weil die „Field off“-Kurven ruhig sind und nur wegen der Existenz der gezeigten Effekte der Selbstinduktivität schwanken.

Die Spitzen in der Impedanz über 80Hz zeigen wahrscheinlich keine zunehmende Leistungsfähigkeit, sondern zunehmende Verluste wegen der mechanischen Vibration der Seitenwände.

Trotz der rauen Erscheinung der Messkurve zeigten die Hörtests mit einem Oszillator keine angenommenen Spitzen oder Löcher unterhalb 350Hz und gar nichts Auffälliges unterhalb 200Hz.

Einige Zeit wurde das Experimentiermodell ohne Luftkammer hinter der Membran betrieben. Ursprünglich wurde von Olson und Hackley¹¹ wirklich darüber nachgedacht, die höheren Frequenzen von der sichtbaren Membranseite ohne Kammer abzustrahlen. Wegen der hohen Effizienz bei tiefen Frequenzen war der Lautsprecher nicht in der Lage, höhere Frequenzen mit befriedigender Leistung abzustrahlen. Deshalb wurde ein zweites System für den Bereich über 400Hz über eine Frequenzweiche angekoppelt, um den jeweiligen Systemen die entsprechenden Frequenzen in einem 2-Wege-System zuzuleiten.

Die Theorie zeigt, dass ein Einschluss der Membran zu einer Verbesserung unter 80Hz führt, jedoch schien bei der ersten Box die Widerstandskomponente der bewegten Impedanz von 1Ω auf 0,5Ω bei 50Hz abzunehmen. Nach dem Versiegeln der Box mit flüssigem Gummi stieg der Widerstand auf 5Ω und die verbesserte Effizienz war charakteristisch für den Klang symphonischer Musik. Ein besserer Treiber verbesserte die Impedanz bei 50Hz auf 10Ω (Bild 9) mehr als erwartet. Ein kleines Loch in der Luftkammer kann einen großen Widerstand und einen positiven Blindwiderstand bewirken. Ist das Loch groß genug, so arbeitet die Kammer mehr als eine akustische Masse (Trägemacher) anstatt als eine akustische Kapazität. Das hätte auch durch die Theorie vorhergesagt werden können.

LEISTUNGSFÄHIGKEIT

Die Gesamteffizienz, die die interne Generatorimpedanz mit einbezieht (Anodenimpedanz, die über den Transformator reflektiert wird), ist¹²

$$(6) \quad \eta = 4 \frac{r_{\text{gen}} r_{\text{EM}}}{|Z_{\text{ET}}|^2},$$

wobei $|Z_{\text{ET}}|$ der Absolutwert der kompletten Generator und Lastimpedanz, r_{EM} die Widerstandskomponente der bewegten Impedanz und r_{gen} die vom Generator reflektierte Impedanz ist.

Gleichung (6) kommt der Definition der „absoluten Effektivität“ nach I. R. E. -Standard sehr nahe. Sie sollte für Hörner, bei denen die Leistung hoch und die mechanischen Verluste gegenüber der akustischen Leistung relativ klein sind, zutreffen.

10 Stewart and Lindsey, Acoustics (Van Nostrand, 1930), pp. 146

11 Olson and Hackley, "Combination horn and direct radiator loudspeaker", Proc. I. R. E. 1557 (1936)

12 L. G. Bostwick, J. Acous. Soc. Am. 2, 243 (1930). This Eq. (6) corresponds to that given by Bostwick on p. 247 of the reference.

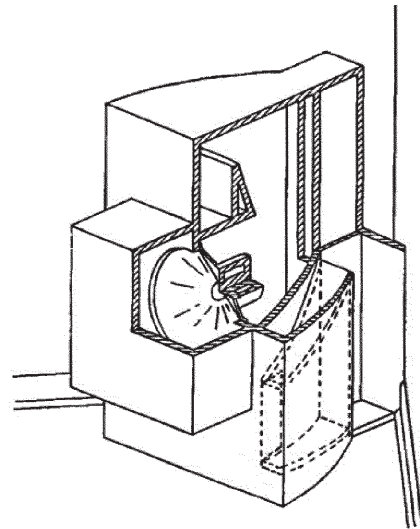


Bild 10: Konstruktion des Experimentiermodells. Der Treiber ist umgedreht und die Membranrückseite schaut zum Hornhals. Die Membranvorderseite wurde mit einer Luftkammer abgeschlossen, deren Größe an den Ausgleich der Blindwiderstandskomponente der Kehlenimpedanz angepasst ist. Im Vergleich dazu zeigt Bild 1 die einfachere und sauberere Konstruktion des neuen Designs, bei dem die Luftkammern hinter der Frontplatte verborgen sind.

Wenn man dieses Kriterium für die Leistungsfähigkeit nimmt und eine Generatorimpedanz von 6Ω voraussetzt (annähernd die Hälfte der Schwingspulenimpedanz), so ist die Effizienz bei 45Hz ca. 45% und bei 70Hz ca. 35%. Zwischen 45 und 200Hz bleibt die Effizienz innerhalb dieser Grenzen. Wird die Kehle noch genauer konstruiert, kann die Effizienz zwischen 30% und 45% bis 400Hz gehalten werden. Dieser Wert bewegt sich innerhalb der 3dB-Grenze. Im Gegensatz zu herkömmlichen Boxenkonstruktionen kann mit demselben Treiber im Eckhorn ein um 10dB bis 15dB höherer Ausgangspegel erreicht werden.

HÖRTESTS

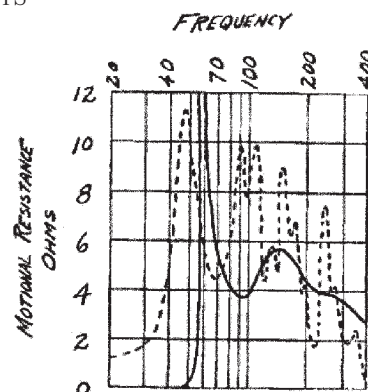


Bild 11: Vergleich der gemessenen und berechneten bewegten Impedanz des Experimentiermodells. Angemerkt sei, dass die gemessene Kurve Leistung unterhalb der untersten Frequenz im Gegensatz zur berechneten Kurve zeigt. Die gemessene Kurve bewegt sich innerhalb engerer Toleranzen als die berechnete. Durchgezogene Linie: Berechnete Widerstandskomponente der bewegten Impedanz, Gepunktete Linie: Gemessene Widerstandskomponente der bewegten Impedanz

Das Experimentiermodell stand für einige Zeit im Wohnzimmer des Autors. Die Frequenzen oberhalb 400Hz wurden von einem Western Electric 555W-Receiver mit einem kleinen Holzhorn mit 48cm Länge und einer Öffnung von 20cm mal 38cm wiedergegeben. Eine Frequenzweiche trennt die beiden Bereiche voneinander. Hörtests mit Radioprogrammen und Schallplatten zeigten definitiv ein schöneres und vollkommeneres Klangbild als viele konventionelle Lautsprecher. Gäste hatten die Neigung, die Vorführung mit ihren Erlebnissen von Liveveranstaltungen zu vergleichen statt mit anderen Reproduktionssystemen.

DIE NEUE AUSFÜHRUNG DES HORNS

Beim neuen Design (Bild 1 bis 4) sind die Nachteile des Experimentiermodells ausgemerzt. Die Luftkammer ist verborgen und alle Holzplatten sind aus entsprechend starkem Material (1/2Zoll statt 1/4Zoll = 12,7mm statt 6,35mm). Horncharakteristik, Kehlegröße und Luftkammergrößen sind sauber berechnet und ergeben über den ganzen Bereich von 40Hz bis 400Hz gute Resultate.

MÖGLICHE VERÄNDERUNGEN

Der beschriebene Tieftöner hat einen großen Leistungsbereich. Dieser kann noch durch ein stärkeres System oder der Benutzung von mehreren Systemen verstärkt werden. Die Wände der vorderen Kehlenöffnung können in eine einfachere Horncharakteristik geändert werden, wenn ein Lautsprecher mit größerer Spule verwendet wird. In diesem Fall kann die Luftkammer zwischen Membran und Konus weggelassen werden. Es können zwei Treiber eingebaut werden, die sich vorzugsweise rückwärtig gegenüberliegen sollten und möglicherweise direkt an den schrägen Seitenwänden montiert werden. Für die Beschallung von großen Sälen können zwei Hörner übereinander gestellt werden oder auch nebeneinander, wenn es die Wände entsprechend zulassen. Solche Gegebenheiten existieren möglicherweise nur in Hallen oder Theatern.

Für die Abstrahlung im entsprechenden 2π - oder 4π -Winkel würden mehrere Hörner ein Vielfaches weniger an Platz in Anspruch nehmen als momentan erhältliche Lautsprechersysteme mit vergleichbarem Wirkungsgrad.

Da der Zweck war, ein hochwertiges Musiksystem zu entwickeln, kann dieser Typ als avantgardistisches bzw. zukunftsweisendes System angekündigt werden.

Obwohl es der Zweck war, einen Lautsprecher für hochwertige Wiedergabe zu entwickeln, kann diese Bauart auch für Durchsagesysteme verwendet werden. Durch

die Reduzierung der Dimensionen auf 1/3 würde die untere Grenzfrequenz bei etwa 140Hz liegen. Mit einem kleinen, aber starken 6 Zoll Lautsprecher mit einer leichten bewegten Masse um etwa 4 Gramm würde die Kehle von ca. 3cm² für eine Wiedergabe oberhalb von 200Hz sorgen. Durch die Verwendung einer geeigneten Membran und entsprechenden Sicken könnte auch mit einer größeren Kehle ein gutes Zusammenspiel erreichbar sein. Die Reduzierung der 323cm² Kehle durch den linearen Faktor von 1/3 reduziert die Fläche um den Faktor 1/9 und ergibt dann eine Kehle von ungefähr 36cm². Diese Berechnung sollte einen guten Wirkungsgrad für den Bereich einer passablen Sprachwiedergabe ergeben. Die Faltung des Horns ist so gewählt, dass Verluste vernachlässigt werden können. Eine solche Einheit könnte den Sprachfrequenzbereich abdecken und der Platzbedarf wäre so groß wie der eines Tischradios. Der Wirkungsgrad wäre in der Größenordnung von 25 bis 50% im Vergleich zu 1 bis 3% eines Direktstrahlers. Ein solcher Lautsprecher sollte eine breite Anwendung in Hotels, auf Parkplätzen, auf Busbahnhöfen und allen Orten finden, wo ein System mit hohem Wirkungsgrad und einer passablen Qualität gefragt ist.

Für den Radiohörer, die bevorzugt symphonische Musik hört, ist das große Horn unerlässlich, natürlich zusammen mit einem in Frequenzgang und Leistungsbereich vergleichbaren Hochtonlautsprecher, wie er momentan noch nicht in vertretbarer Größe für Wohnräume erhältlich ist.

Mit einem guten Tonabnehmersystem und einem ruhigen Plattenspieler können Schallplatten mit der vollen Basstiefe reproduziert werden und die Brillanz ist nur durch die Lautsprecher für die höheren Frequenzen und durch die Qualität der Tonträger begrenzt. Die Gesamtgröße des Basshorns zusammen mit den anderen Lautsprechern ist nur wenig größer als eine durchschnittliche Radiokonsole. Die hohe Qualität der Wiedergabe rechtfertigt den Aufwand.

Für kleine Theater, bei denen die Bühne sehr klein ist, ist der qualitativ hochwertige, sehr starke Lautsprecher ideal angebracht. Und wenn sehr viel Leistung gebraucht wird, bleibt auch beim Einsatz mehrerer Systeme sehr viel Platz und die Installation wird wesentlich flexibler. Mehrfach einsetzbare Lautsprecher und ganze Arrangements mit dem vollen Frequenzgang und hoher Ausgangsleistung können sehr kompakt ausgeführt werden.