

## 6.5 Hornlautsprecher

### 6.5.1 Vorn Grammophon zum Discostar: Die Hornpioniere Voigt, Webster und Klipsch

Im Jahre 1926 machte sich der damals gerade 24 Jahre alte Engländer Paul Voigt an die Entwicklung eines Lautsprechers, der wegen der damals alles andere als üppigen Verstärkerleistungen einen möglichst hohen Wirkungsgrad aufweisen sollte. Zum Antrieb seiner 6-Zoll-Membrane setzte der junge britische Erfinder [6.5.1] einen 80 englische Pfund (rund 36 Kilogramm) schweren Elektromagneten mit Eisenkern ein. Gute Dauermagnetmaterialien waren damals noch nicht erhältlich, so daß das Magnetfeld der Lautsprecher gewöhnlich durch eine Erregerspule mit konstantem Stromfluß erzeugt werden mußte. Trotz aller Bemühungen verliefen die Tests enttäuschend. Voigt:

*"Als der Lautsprecher für einen ersten Test bereit war, erwartete ich einen weit besseren Klang als von jedem vorangegangenen Lautsprecher. Nach dem Einschalten war ich sehr, sehr enttäuscht. Ich hatte noch niemals etwas so 'blechern' klingendes gehört. Die Höhen waren gut, aber die Bässe sehr ärmlich."*

[6.5.2]

Nach einigem Nachdenken nahm Voigt an, daß der kleine Durchmesser seiner Membrane für das Fiasko verantwortlich sei: Bei niedrigen Frequenzen entspricht der Membranradius nur einem geringen Bruchteil der abstrahlenden Wellenlänge, so daß die Luft, statt der Membrane Widerstand zu leisten, zur Seite ausweicht. Ohne Belastung vermag der Lautsprecher jedoch keine Arbeit zu leisten - und erzeugt auch keinen Schalldruck. [6.5.3]

Die nächstgelegene Maßnahme wäre gewesen, ein Rohr vor die Membrane zusetzen, das laterale (seitliche) Luftbewegungen sicher verhindert hätte. Allerdings verlegt eine solche Röhre den Übergabepunkt lediglich an das Ende der Röhre, ohne die eigentliche Ursache - den diskontinuierlichen Übergang von einer kleinen Membrane auf einen großen Raum - wirklich zu beseitigen

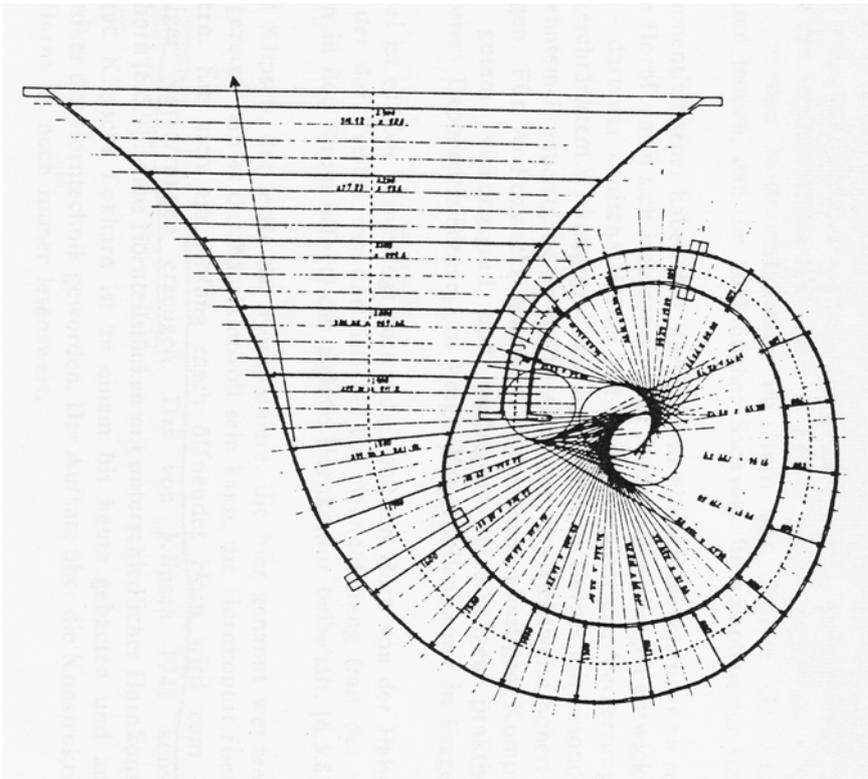


Abb. 6.5.1.- Konstruktionszeichnung des berühmten Western-Electric-Horns WE-66A, das trotz seiner gigantischen Abmessungen noch heute in einigen großen Discotheken eingesetzt wird.

Was sich als noch schlimmer entpuppte: An der Diskontinuität am offenen Ende der Röhre würde die Schallwelle ähnlich wie in einer Transmissionslinie in die Röhre zurück reflektiert, so daß sich die Anordnung eher wie eine Orgelpfeife verhielte.

Um den diskontinuierlichen Übergang zu beseitigen, konstruierte Voigt einen Lautsprecher-Vorsatz, dessen Seiten sich zunächst nur sehr langsam, mit größerer Entfernung von der Membrane jedoch immer rascher öffneten. Er erkannte, daß der äußere Rand der Wellenfront der Wand folgt und durch Reibung verlangsamt wird. Dadurch entsteht am Ausgang des Horns eine halbkugelförmige Wellenfront, die genau der Schallausbreitung im freien Raum entspricht - eine perfekte Anpassung ist erreicht. Voigt schreibt dazu:

*"Als ich die Kurve mit dem gleichmäßigsten Übergang von einem nahezu parallelen Konus nahe der Membrane auf einen 90-Grad-Winkel zu Achse aufzeichnete, fragte ich mich, ob ich die Standard-Exponentialkurve neu erfunden hätte, die damals (also Mitte der 20er Jahre!) in einigen Anzeigen erwähnt wurde. Als ich letztere aufzeichnete, erkannte ich jedoch, daß sich meine Kurve in Mundnähe erheblich schneller als die Exponentialfunktion öffnete, so daß der 90-Grad-Winkel ziemlich schnell erreicht wurde. Später erfuhr ich von unserem Zeichner, daß diese Kurve unter Mechanikern als Tractrix-Funktion bekannt sei."*  
[6.5.4]

Im Juli 1926 reichte Paul Voigt sein Kugelwellenhorn zum Patent ein, 1927 wurde ihm das britische Patent Nr. 278,098 erteilt. [6.5.5] Abb.6.5.2 zeigt ein Tractrix-Horn mit den sich darin ausbreitenden Kugelwellen.

*Die schon vor Voigts Arbeiten entwickelten Exponentialhörner arbeiten nach dem gleichen Grundprinzip: Eine sich stetig erweiternde Schallführung verhindert zunächst die laterale Schallausbreitung und sorgt für einen allmählichen Übergang zum freien Raum. Damit ist auch bei tiefen Frequenzen eine widerstandsmäßige Belastung der Membrane gegeben, so daß auch unterhalb der Resonanzfrequenz des Treibers effektiv Schall abgestrahlt werden kann. Die Strahlungsimpedanz wird gegenüber dem frei strahlenden Lautsprecher vergrößert, was eine Erhöhung des Wirkungsgrades und Reduzierung der Membranauslenkung mit sich bringt. Leider fällt der Wirkungsgrad des Horns bei höheren Frequenzen ab, da die Wiedergabe höherer Frequenzen höhere Beschleunigungen erfordert, so daß sich die Trägheit der Membranmasse bemerkbar macht. Die Entwicklung eines Hornlautsprechers mit ausgeglichenem Frequenzgang und gleichmäßig hohem Wirkungsgrad über einen weiten Frequenzbereich ist daher nicht einfach.*

Der Pionier der Exponentialhörner A.G. Webster arbeitete zu einer Zeit, als rein mechanische Grammophone mit Schalltrichtern noch allgemeiner Standard der Musikreproduktion waren. [6.5.6] Er ging - anders als Voigt - von einer ebenen Wellenausbreitung im Horn aus. Spätere Untersuchungen zeigten jedoch, daß die tatsächlichen Sachverhalte komplizierter sind. [6.5.7]

Exponentialhörner haben den Vorteil, sehr einfach berechenbar zu sein. Andere Hornformen sind insbesondere für Spezialanwendungen entwickelt worden - darunter konische Hörner mit besonders niedrigen Verzerrungen aber eingeschränktem Wirkungsgrad und hyperbolische Hörner mit besonders ausgedehntem Frequenzgang im Baßbereich aber vergleichsweise hohen Verzerrungen. Für Audiozwecke kommen wegen ihres günstigen Kompromisses von gutem Wirkungsgrad und niedrigen Verzerrungen praktisch nur Websters Exponentialhörner und Voigts Kugelwellenhörner in Frage.

Dabei ist es aber keineswegs notwendig, daß ein Horn von der Halsöffnung (an welcher der Treiber montiert ist) bis zur Mundöffnung (mit der sich das Horn in den Raum öffnet) die gleiche Hornkontur beibehält. [6.5.8]

Paul Klipsch, der letzte der Hornpioniere, die hier genannt werden sollen, hat gezeigt, daß es durchaus sinnvoll sein kann, die Hornkontur fließend zu ändern. Ein sich am Anfang rasch öffnendes Horn wird zum Beispiel weniger Verzerrungen erzeugen. Das von Klipsch 1941 konstruierte Eckhorn [6.5.9] ist aus Hornteilstücken mit unterschiedlicher Hornkontur aufgebaut. Klipschs Eckhorn ist zu einem bis heute gebauten und kopierten Klassiker der Horntechnik geworden. Der Aufsatz über die Konstruktion dieses Horns ist noch immer lesenswert.

Durch unterschiedliche Formgebung ist es auch möglich, die an der Hornöffnung entstehende Wellenfront so zu formen, daß sich eine genau definierte Richtwirkung ergibt. Bei Schallübertragungen in großen Räumen oder etwa bei Open-Air-Konzerten läßt sich das Auditorium mit derart gebündeltem Schall regelrecht ausleuchten. Gerade bei PA-Anwendungen ist dies neben dem hohen Wirkungsgrad ein zusätzlicher Vorteil von Hornlautsprechern.

## 6.5.2 „Hole in the Wall“

Wir werden noch etwas beim Tractrix-Horn und seiner Geschichte bleiben, da gerade dieser Horn typ in den letzten Jahren zum Wiedererwachen des Interesses am Bau von Hörnern beigetragen hat. Das von Paul Voigt entwickelte Tractrix-Horn ist in Deutschland vor allem als Kugelwellenhorn bekannt geworden [6.5.10] Warum sollte sich der Schall bei der Musikwiedergabe im Wohnraum ausgerechnet wie eine halbe Kugelwelle ausbreiten? Voigt trug seine Ansicht von guter HiFi-Wiedergabe 1924 während einer Diskussion über die damals ganze 18 Monate alte britische Rundfunkgesellschaft BBC vor. 57 Jahre später erinnert sich der Pionier:

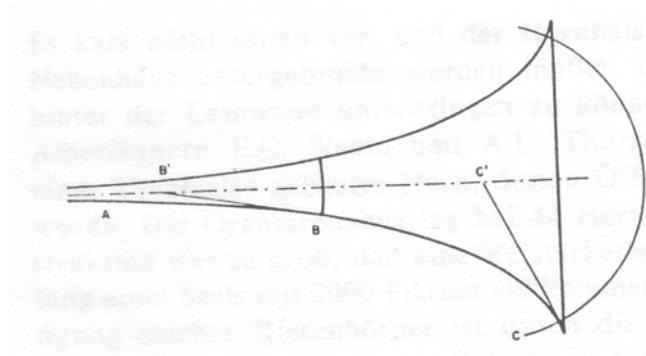


Abb. 6.5.2 In Tractrix-Hörnern breiten sich als Kugelsegmente aus, so daß vor eine Halbkugel-Wellenfront entsteht.

„In jenen frühen Tagen überlegte ich mir weniger, welche Stückchen und Einzelteile zu guter Audio-Wiedergabe zusammengefügt werden sollten, sondern grundlegender, was gute Audio-Technik sein würde, wenn wir sie jemals erhalten könnten. 1924 war meine Antwort die "Loch in der Wand"-Theorie, [6.5.11] die lange Zeit umstritten blieb. Einige Leute dachten, perfekte Wiedergabe solle so klingen, als sei der Klang im Wiedergaberaum erzeugt worden. Dies übersieht die Tatsache, daß der Wiedergaberaum ein ganz bestimmtes, vom Aufnahmestudio oder Konzertsaal unterschiedliches Nachhallmuster aufweist. Der Nachhall des Aufnahmeortes kann leicht unterdrückt werden, in dem man den Musiker ausreichend nahe an ein Loch in der Wand des Wiedergaberaums holt, um ihn direkt durch dieses Loch sprechen zu lassen. :  
Diese Theorie war Grundlage meines Ausblicks." [6.5.12]

Vor einem Loch in einer ebenen Fläche breiten sich Wellen jedoch in Halbkugelschalen aus - was der niederländische Physiker Christinnen Huygens bereits im 17. Jahrhundert erkannte. Listet man nun die Vorteile von Hornlautsprechern auf,

- hoher Wirkungsgrad,
- exzellente Impulswiedergabe,
- hohe Strahlungsdämpfung,
- geringe Membranauslenkungen,
- keine Dynamikkompression und
- geringe Verzerrungen,

so sollte man zu dem Schluß kommen, daß verblüffend wenige Hornlautsprecher gebaut werden. Wo also liegt der Nachteil, mit dem für alle diese Vorteile bezahlt werden muß?

Wir sind am Anfang dieses Kapitels den Überlegungen des jungen Paul Voigt auf der Suche nach der Ursache der mangelhaften Baßwiedergabe seines Lautsprechers gefolgt und waren auf den geringen Membrandurchmesser gestoßen. Zur Anpassung dieses niedrigen Durchmessers an die abzustrahlende Wellenlänge sah Voigt einen kontinuierlichen Übergang - das Horn - vor, Geht man der Einfachheit halber zunächst von einem runden Hornquerschnitt aus, so liegt auf der Hand, daß der Ausgangs Querschnitt gewissermaßen als ideale Membrane gedacht werden kann, die die optimale Größe zur Abstrahlung der unteren Grenzfrequenz aufweist.

Die Grenzfrequenz ist dann:

$$f_g = \frac{c}{2\pi r_m} \quad (6.5.1)$$

mit  $f_g$  - Grenzfrequenz des Horns

$c$  - Schallgeschwindigkeit = 345 m/s

$r_m$  - Radius der Mundöffnung des Horns [in m]

Stellt man die Gleichung nach  $r_m$  um und setzt versuchsweise eine wünschenswerte untere Grenzfrequenz  $f$  von 30 Hertz ein, so erhält man:

$$r_m = \frac{c}{2\pi f_g} = \frac{345}{6,28 \cdot 30} = 1,83\text{m} \quad (6.5.2)$$

Der Öffnungs-Durchmesser eines solchen freistehenden Kugelwellenhorns mit einer unteren Grenzfrequenz von 30 Hertz betrüge mehr als dreieinhalb Meter - womit die seltene Anwendung solcher Konstruktionen hinreichend erklärt sein dürfte. Hörner zur Wiedergabe eines angemessen tiefen Basses sind riesige Aufbauten, die sich nur schwer in normalen Wohnräumen unterbringen lassen. Voigt, Western Electric und andere Firmen bauten solche gigantischen Hörner daher auch vornehmlich zur Beschallung von Kinopalästen und großen Sälen,

Es kam nicht selten vor, daß der Hornhals mitsamt dem Treiber in einem Nebenhaus untergebracht werden mußte, um die erforderliche Hornlänge hinter der Leinwand unterbringen zu können. Abb.6.5.3 zeigt ein von Amerikanern E.C. Wente und A.L. Thuras [6.5.13] 1928 zur Beschallung eines Tanzsaales gebautes Horn, dessen Öffnung in die Saaldecke eingesetzt wurde. Die Grenzfrequenz lag bei 44 Hertz. Der Wirkungsgrad dieser Konstruktion war so groß, daß eine Verstärkerleistung von 2,3 Watt zur Beschallung eines Saals mit 2000 Plätzen vollkommen ausreichte. Die Existenzberechtigung solcher Riesenhörner ist durch die Entwicklung preisgünstiger leistungsstarker Verstärker natürlich eingeschränkt worden. In einigen Großdicotheken feiern die riesigen Western-Electric-Hörner trotzdem fröhlich Auferstehung - wohl nicht zuletzt wegen der dekorativen Werte des schneckenförmig gewickelten Hornkanals.

Es gibt Möglichkeiten, die Größe von Baßhörnern soweit zu reduzieren, daß sie auch in normalen Wohnräumen Platz finden - sofern man den Lautsprecher als Möbelstück akzeptiert. Dazu kann man zum Beispiel das Horn in einer Raumecke münden lassen, so daß die Wände als Hornverlängerung eingesetzt werden. Das Eckhorn von Paul Klipsch ist ein Beispiel dafür [6.5.14]

Strahlt das Horn in ein eingeschränktes Raumsegment, so verkleinert sich auch die notwendige Mundfläche. Sie ist für Aufstellungen

- |                                   |                  |
|-----------------------------------|------------------|
| - auf dem Boden:                  | $S_m' = 1/2 S_m$ |
| - auf dem Boden vor einer Wand:   | $S_m' = 1/4 S_m$ |
| - auf dem Boden in einer Raumecke | $S_m' = 1/8 S_m$ |

Die Mundfläche eines Eckhorns ist damit achtmal kleiner als die eines freistehenden Horns. Hörner mit sehr tiefbaßtauglicher Grenzfrequenz werden so überhaupt erst möglich.

In der Praxis kann die Hornstruktur meist nicht gestreckt aufgebaut werden, sondern muß so gefaltet werden, daß sie sich in einem rechteckigen Gehäuse unterbringen läßt. Die Berechnung und Konstruktion solcher Falthörner ist allerdings kompliziert. Jede willkürliche Veränderung der Hornlänge oder Öffnungsfläche erzeugt Diskontinuitäten, an denen Schall ins Horn zurückgeworfen werden kann, so daß solche Hörner nicht automatisch so verzerrungs- und verfärbungsfrei klingen, wie ihre Konstrukteure dies erwarteten. In der Regel müssen sich Amateure daher auf den Nachbau bewährter Konstruktionen beschränken. [6.5.15]

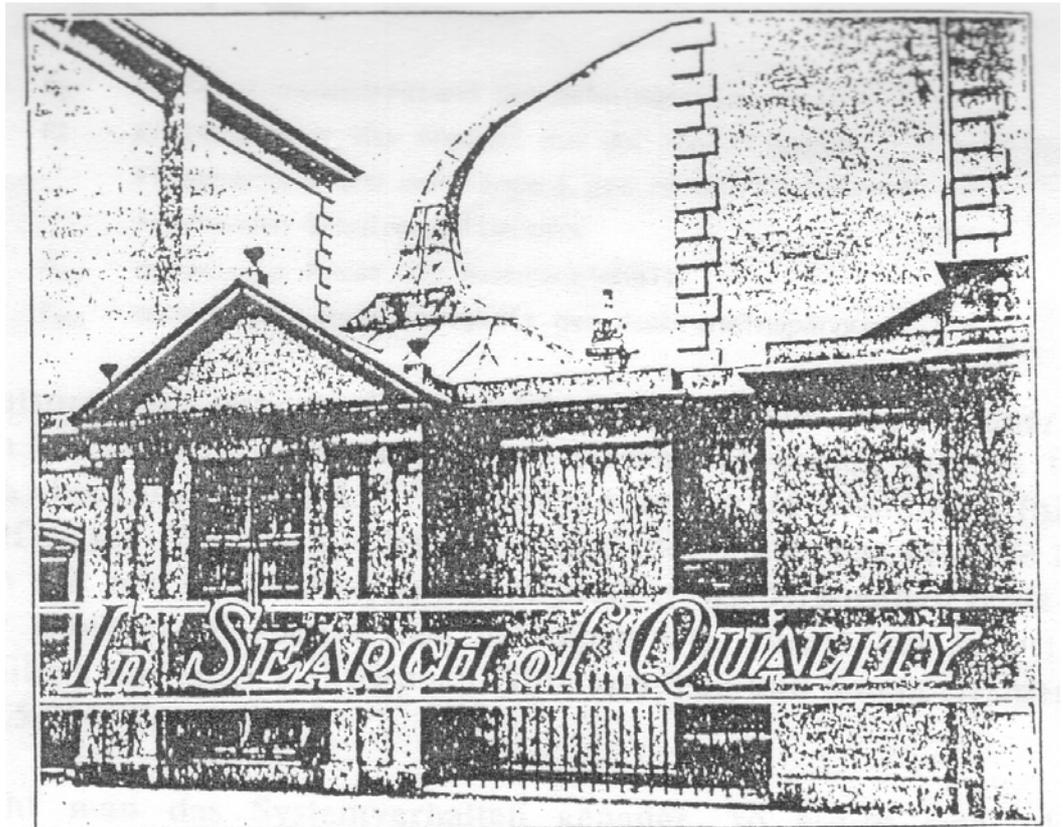
### 6.5.3 Auswahl geeigneter Treiber für Basshörner

Wie wir gesehen haben, beruht der hohe Wirkungsgrad von Hornlautsprechern auf der verbesserten Anpassung der Membrane an den Strahlungswiderstand der Luft. Für Mittelton-Hörner werden spezielle Treiber hergestellt, die für ihren speziellen Einsatzzweck optimiert sind.

Welche Chassis soll man jedoch als Treiber für Baßhörner einsetzen?

Jede Lautsprechermembrane hat eine bestimmte Masse, deren Massenträgheit jeder Änderung der Bewegung einen Widerstand entgegen setzt. Nun stellen Schwingungen, wie sie der Membrane durch den Verstärker aufgezwungen werden, nichts anderes als die ständige Änderung der Bewegung dar: Die Membrane muß auf eine bestimmte Geschwindigkeit beschleunigt, abgebremst, erneut in Gegenrichtung beschleunigt, wiederum abgebremst werden ... und so weiter. Je größer die zur Erreichung eines bestimmten Schalldrucks notwendige Auslenkung der Membrane wird, um so größer wird offensichtlich auch die zur Überwindung der Massenträgheit benötigte Energie: Die Membrane hat eine hohe mechanische Impedanz.

Die von Hörnern verwirklichte gute Anpassung des Lautsprechers an die Schallkennimpedanz der Luft ("Impedanztransformation") sorgt für einen hohen Wirkungsgrad und geringe Membranauslenkungen, so daß nur geringe Trägheitskräfte auftreten. Bei niedrigen Frequenzen kann der Wirkungsgrad eines idealen (und leider sehr großen) Horns daher in der Nähe von 50 Prozent liegen - angesichts der mickrigen Ein-Prozent-Werte anderer Wandler eine unglaubliche Leistung. Allerdings wiese ein Horn mit diesem Wirkungsgrad nur eine niedrige Übertragungsbandbreite auf, wäre also zur HiFi-Wiedergabe weniger geeignet. [6.5.16]



*Abb. 6.5.3.: Das von den Amerikanern Wentz und Thuras gebaute Horn zur Beschallung eines Tanzpalastes musste wegen seiner enormen Länge nach außen verlegt werden. Der Schallaustritt des Horns war in der Decke unter einem Ziergitter verborgen.*

Die Trägheitskräfte sind von der Frequenz des wiedergegebenen Signals abhängig: Ganz offensichtlich muß die Membrane zur Wiedergabe von Schwingungen höherer Frequenz mit gleichem Schalldruck stärker beschleunigt werden, da ja nur eine kürzere Zeit zur Erreichung der Endgeschwindigkeit zur Verfügung steht. [ 6.5.18]

*Für höhere Frequenzen nimmt die Massenträgheit der Membrane daher wieder zu, so daß der Wirkungsgrad des Horns sinkt. Die bewegte Masse bedingt eine obere Grenzfrequenz*

$$f_{hm} = \frac{2 f_{ms}}{Q_{es}} \quad (6.5.3)$$

mit  $f_{hm}$  - massenbedingte obere Grenzfrequenz des Hornsystems  
 $f_{ms}$  - mechanische Grundresonanz des Treibers  
 $Q_{es}$  - Gesamtgüte des Treibers

die von der Resonanzfrequenz  $f_{ms}$  und der Güte  $Q_{ts}$  des Treiber abhängig ist.  $Q_{ts}$  wird bei horngeeigneten Treibern von der elektrischen Güte dominiert. [6.5.18]

Die Gleichung zeigt, daß sich der Wiedergabebereich ausdehnen läßt, indem man die Resonanzfrequenz erhöht und/oder die elektrische Güte verkleinert und dadurch für einen kräftigeren Antrieb sorgt. Das ist leicht einzusehen: Ein starker Antrieb kann die auftretenden Trägheitskräfte besser überwinden und dehnt den Übertragungsbereich aus.

Geht man versuchsweise davon aus, daß ein geplantes Baßsystem bei einer Übergangsfrequenz von 800 Hz mit einem Mitteltonhorn gekoppelt werden soll und legt man 800 Hz als wünschenswerte massenbedingte Grenzfrequenz des Baßhorns fest, so wäre bei einem Treiber mit einer sehr hohen Resonanz von  $f_{ms} = 70$  Hz mindestens eine elektrische Güte von

$$Q_{es} = \frac{2 f_{ms}}{f_h} = \frac{2 \cdot 70 \text{ Hz}}{800 \text{ Hz}} = 0.175 \quad (6.5.4)$$

mit  $Q_{es}$  - elektrische Güte des Treibers  
 $f_{ms}$  - mechanische Grundresonanz des Treibers  
 $f_h$  - obere Grenzfrequenz des Hornsystems

erforderlich. Solch ein Lautsprecher ist bestimmt nicht an jeder Ecke zu finden. Damit ist auch klar, warum Klinger [6.5.19] für Hornsysteme Treiber mit hoher Resonanzfrequenz fordert. Sollte sich wegen der damit verbundenen Kosten kein geeigneter Lautsprecher einsetzen lassen, so muß die Übergangsfrequenz gesenkt werden. Die Definition der elektrischen Güte  $Q_{es}$  zeigt, worauf es bei der Auswahl von Horntreibern ankommt:

$$Q_{es} = \frac{R_e}{(B_l)^2} \sqrt{\frac{M_{ms}}{C_{ms}}} \quad (6.5.5)$$

mit  $R_e$  - Gleichstrom-Widerstand der Schwingspule,  
 $B_l$  - Kraftfaktor - das Produkt aus der magnetischen Flußstärke  $B$  und der Länge  $l$  des im Magnetfeld tauchenden Schwingspulleiters  
 $M_{ms}$  - dynamische Masse der Membraneinheit  
 $C_{ms}$  - mechanische Nachgiebigkeit der Membraneinspannung

*Ein Lautsprecher mit niedriger elektrischer Güte muß daher einen niedrigen Schwingspulwiderstand, einen starken Magneten (großes  $B$ ), eine lange Schwingspule (große Leiterlänge  $l$ ), eine leichte Membrane (niedriges  $M_{ms}$ ) aufweisen. Paul Voigts Versuche der 40er Jahre, das gesamte hörbare Spektrum mit nur einem einzigen Lautsprecher wiederzugeben (eine Tradition, der Lowther bis heute treu geblieben ist), führte zur Konstruktion eines Treibers mit einer elektrischen Güte von 0.05 und einem riesigen Magneten. [6.5.20]*

Untersucht man das Systemverhalten genauer, so ergibt sich, daß das Produkt aus Wirkungsgrad und oberer Grenzfrequenz für ein System praktisch konstant bleibt, wenn das Verhältnis von effektiver Membranfläche zur Halsfläche des Horns verändert wird. Small hat daher das Wirkungsgrad-Bandbreiten-Produkt (engl. "Efficiency-Bandwidth-Product" - EBP) als Beurteilungskriterium für die Horneignung von Treibern vorgeschlagen. [6.5.21] Dieses Produkt errechnet sich aus der oberen Grenzfrequenz des Hornsystems  $f_h$  und dem Wirkungsgrad:

$$f_h \cdot \eta_T = \frac{f_{ms}}{Q_{es}} \frac{R_{md}}{R_{md} + R_{m2}} \quad (6.5.6)$$

mit Fh - obere Grenzfrequenz des Horns  
 NT - Wirkungsgrad des Hornsystem  
 Fms - mechanische Grundresonanz des Treibers  
 Qes - elektrische Güte des Treibers  
 Rmd - mechanischer Widerstand der Membranvorderseite  $R_{md} = (S_d/S_t) P_{oc}$   
 Sd  
 Rm2 - Summe aus dem Verlustwiderstand des Gehäuses hinter dem Treiber  
 Rmb und dem Reibungswiderstand Rms der Membraneinspannung

Die Summe der Verlustwiderstände in Rm2 ist bei horngeeigneten Treibern und entsprechenden Gehäusen gewöhnlich so klein, daß der Wert vernachlässigt werden kann. Damit vereinfacht sich der Ausdruck für das Wirkungsgrad Bandbreiten Produkt EBP zu:

$$EBP = f_{ms} / Q_{es}$$

(6.5.7)

(6.5.7)

mit EBP  
 Efficiency  
 Bandwidth  
 Product nach Small

Aus dieser Gleichung ergibt sich auch, daß maximaler Wirkungsgrad bei Hornsystemen minimale Bandbreite (niedrige obere Grenzfrequenz) und umgekehrt eine große Bandbreite (hohe obere Grenzfrequenz) einen niedrigen Wirkungsgrad impliziert. Das Verhalten kann über das Verhältnis  $S_d/S_t$  gesteuert werden. Direktstrahlende Systeme wie geschlossene Gehäuse und Baßreflexkonstruktionen benötigen EBP Werte zwischen 50 und 100 Hz. Bei guten Horntriebren sollte dieser Wert über 150 Hz liegen. [6.5.22] Damit läßt sich nun leicht testen, welche Treiber aus dem Datenteil für den Einsatz in Hornsystemen in Frage kommen.

#### 6.5.4 Konstruktion von Hornsystemen

Das Horn arbeitet als akustischer Transformator und wandelt akustische Energie mit hohem Druck und niedriger Geschwindigkeit am Eingang (Hornhals) in akustische Energie mit niedrigem Druck und hoher Geschwindigkeit am Ausgang (Hornmund) um. Wie beim elektrischen Vorbild dieser Analogie müssen dazu drei Bedingungen erfüllt sein:

- 1) Die Impedanz am Hornhals muß an die Signalquelle (den Treiber) angepaßt werden.
- 2) Die Impedanz am Hornmund muß an den vorgefundenen Lastwiderstand (die Impedanz des Hörraums) angepaßt werden.
- 3) Der Wandler muß an den zu übertragenden Frequenzbereich angepaßt werden.

Dabei wird die Auslegung des Horns selbst durch vier Parameter

$S_m$	Mundfläche,
$S_t$	Halsfläche,
$m$	Öffnungskonstante und
$l_h$	Hornlänge

bestimmt. Jeweils drei dieser Größen legen die vierte automatisch fest.

Für den Bau brauchbarer Hörner im HiFi- und Bühnenbereich kommen praktisch nur exponentielle und Kugelwellenhörner in Frage, da diese Hornart einen günstigen Kompromiß zwischen gutem Wirkungsgrad und günstigem Verzerrungsverhalten bieten. Im folgenden Teil wird daher zunächst der einfachere Entwurf von Exponentialhörnern besprochen, anschließend die Errechnung von Kugelwellen- oder Tractrix Hörnern.

### 6.5.5 Die Halsfläche: Anpassung des Horns an den Treiber

Die Halsöffnung koppelt das Horn an den treibenden Lautsprecher und ermöglicht damit die Abstimmung des Wandlers nach Forderung (1). Der Entwickler hat über diese Größe Einfluß auf den Wirkungsgrad des Hornsystems und auf die Bandbreite, in der vom Horn Schalldruck abgestrahlt werden kann.

Den höchsten Wirkungsgrad bei gleichzeitig geringen Verzerrungen kann man erzielen, wenn die Halsfläche gerade der halben Membranfläche  $S_d$  entspricht. Das Hals-/ Membran- Flächenverhältnis  $S_t/S_d$  ist dann 0,5. Um die maximale Bandbreite bei der Hornwiedergabe zu erzielen, setzt man das  $S_t/S_d$  Flächenverhältnisse in der Größenordnung von 0.3 bis 0.5 ein.

Kommt es auf einen höheren Wirkungsgrad an, werden (bei geringen Abstrichen beim Verzerrungsverhalten)  $S_1/S_2$ -Flächenverhältnisse in der Größenordnung von 0.5 bis 0.7 eingesetzt.

### 6.5.6 Die Mundfläche Anpassung des Horns an den Hörraum

Die Mundöffnung koppelt das Horn an den Hörraum und ermöglicht damit die Abstimmung des Wandlers nach Forderung (2). Wichtig dabei ist, daß Schallenergie immer dann reflektiert wird, wenn sie auf eine akustische "Diskontinuität" trifft. Eine solche Diskontinuität kann zum Beispiel der Wechsel von einem gasförmigen Medium wie Luft zu einem festen Medium wie Stein sein: Das Ergebnis ist ein Echo - die Schallenergie wird wie Licht von einem Spiegel zurückgeworfen, reflektiert.

Eine ähnliche Diskontinuität tritt auch an der Mundöffnung des Horns auf, wenn die bisher zwischen Wänden geführte Schallwelle auf die ganz anderen Impedanzverhältnisse des freien Raumes trifft. Auch in diesem Fall wird Schallenergie reflektiert, läuft in das Horn zurück. Die dabei auftretenden Interferenzen verändern die Strahlungsimpedanz im Horn und damit die akustische Last, an die der Treiber Energie abgibt. Ein welliger Frequenzgang wäre die Folge.

Dieser Fall kann sichtlich vermieden werden, wenn die Diskontinuität am Hornmund nicht auftritt, weil sich das Horn unendlich fortsetzt. Der größte Teil der theoretischen Hornanalysen geht von den Verhältnissen in solchen "infiniten" Hörnern aus. Für den Hornbauer stellt dies aber keine praktikable Lösung dar, da für die Anwendung in Wohnräumen und Auditorien nur endliche Hörner - und zwar möglichst kleine - in Frage kommen.

Eine der wichtigsten Fragen der Hornkonstruktion ist daher, wie groß die Mundfläche gemacht werden muß, um den Verhältnissen in einem infiniten Horn möglichst nahe zu kommen.

Man kann die Mundfläche eines Hornsystems als große Membrane betrachten. Der Umfang einer solchen Membrane muß zur wirkungsvollen Baßabstrahlung mindestens so groß sein wie die Wellenlänge  $\lambda$  der tiefsten abzustrahlenden Frequenz. [6.5.23] Der Umfang der Mundöffnung muß damit größer oder gleich

$$U_m = \lambda \quad (6.5.8)$$

- mit  $U_m$  - Umfang der Mundöffnung [in m]  
 $U_m = 2 \pi r_m$   
 $r_m$  - Radius der Mundöffnung [ in m]  
 $\lambda$  - Wellenlänge der unteren Grenzfrequenz  
 $\lambda = c/f_g$   
 $c$  - Schallgeschwindigkeit = 345 m/s  
 $f_g$  - gewünschte untere Grenzfrequenz [ in Hz]

sein. Daraus kann man die notwendige Mundfläche des Horns herleiten:

$$r_m = U_m / 2 \pi \text{ und daher} \quad (6.5.9)$$

$$S_m = \pi r_m^2 = \frac{U_m^2}{4\pi} = \frac{\lambda^2}{4\pi} = \frac{c^2}{4\pi * f_g^2} = \frac{9.47 * 10^3}{f_g^2}$$

mit  $S_m$  - erforderliche Mundfläche des Horns [in m<sup>2</sup>]

Für ein Eckhorn ( $S_m' = 1/8 S_m$ ) ist die erforderliche Mundfläche  $S_m'$  entsprechend kleiner:

$$S_m' = 1.18 * 10^3 / f_g^2$$

Die Hornkonstante  $m$  gibt an, wie schnell sich der Exponentialtrichter öffnet. Sie errechnet sich aus der gewünschten unteren Grenzfrequenz des Hornsystems:

$$m = \frac{4\pi * f_g}{c} = 3,64 * 10^{-2} * f_g \quad (6.5.12)$$

mit  $m$  - Hornkonstante [in  $m^{-1}$ ]  
 $f_g$  - untere Grenzfrequenz des Horns  
 $c$  - Schallgeschwindigkeit = 345 m/s

Eine willkürliche Verkürzung des Horns verschlechtert den Übergang zum Raum. An der entstehenden Diskontinuität zwischen Mund und Hörraum wird Schallenergie in das Horn zurück geworfen. Für ein exponentielles Horn gilt nun für die Querschnittsfläche in einer bestimmten Entfernung  $x$  vom Hornhals:

$$S_x = S_t * e^{mx} \quad (6.5.13)$$

mit  $S_x$  - Querschnittsfläche des Horns an der Stelle  $x$  [in  $m^2$ ]  
 $S_t$  - Anfangs-(Hals-) Fläche des Horns  
 $x$  - Entfernung vom Hornanfang (Hals, Ausgang der Vorkammer) [in m]  
 $e$  - Eulersche Zahl = 2.719

Setzt man für  $S_x$  den maximalen Wert - die Mundfläche  $S_m$  - ein, so kann die erforderliche Länge des Horns  $L_n$  bestimmt werden:

$$S_m = S_t * e^{mL_n} \Rightarrow e^{mL_n} = \frac{S_m}{S_t} \Rightarrow mL_n = \ln(S_m / S_t) \quad (6.5.14)$$

$$L_n = \frac{\ln(S_m / S_t)}{m} \quad (6.5.15)$$

mit  $\ln$  - natürlicher Logarithmus  
 $L_n$  - Hornlänge

Um die Hornkontur zu konstruieren, kann man nun für eine ausreichende Anzahl von Stützstellen zwischen der Halsöffnung ( $x = 0$ ) und der Mundöffnung ( $x = L_n$ ) die erforderliche Querschnittsfläche des Horns errechnen.

Mit einem Taschenrechner, der die Funktionen "e hoch x" und "ln" zur Verfügung stellt, ist das schnell erledigt. Die errechneten Werte werden in einer Tabelle notiert - dann beginnt die eigentliche Arbeit. Es muß ein Gehäuse entworfen werden, dessen Wände sich so öffnen, daß die errechneten

Querschnittsflächen möglichst genau eingehalten werden. Dabei hilft leider keine Mathematik mehr.

### 6.5.8 Die Konstruktion von Kugelwellenhörnern

Etwas anders geht man beim Entwurf von Tractrix-Hörnern vor: Auch in diesem Fall muß zunächst ermittelt werden, welche Halsfläche zur Anpassung an den Treiber und welche Mundfläche zur Anpassung an den Hörraum erforderlich ist. Damit liegt als dritte Größe die Hornlänge fest. Kugelwellenhörner öffnen sich immer nach der gleichen Funktion, so dass die Hornkonstante hier entfällt.

Allerdings ist die Errechnung des an einer bestimmten Stelle der Achse erforderlichen Querschnittsfläche des Horn schwieriger, da die hier eingesetzte Tractrix- oder Schleppekurvenfunktion gerade umgekehrt behandelt werden muß: Ein für den Radius eingesetzter Wert ergibt die zugehörige Stelle auf der Achse des Horns.

Damit ermöglicht die für die Errechnung eines Kugelwellenhorns gültige Tractrix-Funktion leider keine so simple Berechnung der Hornkontur wie beim Exponentialhorn. Wegen der einfacheren Berechnung und da die Abstrahlungsverhältnisse bei den hier betrachteten niedrigen Frequenzen ohnehin stark durch den Hörraum geprägt werden, empfiehlt sich für den Eigenbau von Baßhörnern meist ein Exponentialhorn. Trotzdem soll die prinzipielle Vorgehensweise bei der Konstruktion von Kugelwellenhörnern [6.5.24] kurz erläutert werden:

Ein wichtiger Unterschied zum Exponentialhorn ist zunächst, daß beim Tractrix-Horn der Abstand  $x$  ausgehend von der Mundöffnung des Horns (Exponentialhorn: Halsöffnung) gemessen wird. Auch in diesem Fall gilt für die Wellenlänge der Grenzfrequenz

$$\lambda = 2 \pi r_m \quad (6.5.16)$$

mit  $\lambda$  - Wellenlänge der Grenzfrequenz =  $c/f_g$   
 $f_g$  - Grenzfrequenz des Horns  
 $r_m$  - Radius des Horns an der Mundöffnung  
 $c$  - Schallgeschwindigkeit = 345 m/s

In Abhängigkeit von einer gewünschten Grenzfrequenz  $f_g$  gilt daher für den erforderlichen Radius:

$$r_m = \frac{c}{2\pi f_g} \quad (6.5.17)$$

Aus dem Radius kann über

$$S_m = \pi r_m^2 \quad (6.5.18)$$

mit  $S_m$  - Mundfläche des Horns in [m<sup>2</sup>]

die erforderliche Mundfläche des Horns errechnet werden. Dabei gelten wieder die bereits beschriebenen Verkleinerungsfaktoren für Boden- und Eckaufstellungen. Aus einer entsprechend verkleinerten Mundfläche des Horns kann der neue Radius rückgerechnet werden:

$$r_m = \sqrt{\frac{S_m}{\pi}} \quad (6.5.19)$$

Damit kann nun die Hornkontur errechnet werden. Die Funktion für die Tractrixkurve ist:

$$X = r_m \ln \frac{\sqrt{r_m^2 - r^2}}{r} - \sqrt{r_m^2 - r^2} \quad (6.5.20)$$

mit  $x$  - Entfernung vom Hornmund [in m]  
 $r_m$  - Hornradius am Hornmund [in m]  
 $r$  - aktueller Radius [in m]  
 $\ln$  - Logarithmusfunktion zur Basis  $e$

Wie man sieht, kann kein Wert  $x$  vorgegeben werden, für den sich wie beim Exponentialhorn eine zugehörige Querschnittsfläche (oder ein zugehöriger Radius) errechnen ließe. Statt dessen muß man einen Wert für den Radius  $r$  (kleiner als der Mundradius) vorgeben und erhält dann den Abstand vom Hornmund, für den dieser Radius gilt. Diesen Schritt wiederholt man mit unterschiedlichen Radien  $r$  so lange, bis man eine ausreichende Anzahl von Stützstellen zur Konstruktion der Hornkontur ermittelt hat. Mit einem Computerprogramm [6.5.25] läßt sich die Arbeit natürlich auch in diesem Fall vereinfachen.

Bei der Konstruktion von Exponentialhörnern wird mit Querschnittsflächen gearbeitet. Um dies auch beim Kugelwellhorn tun zu können, müssen die Radien  $r_x$  an der Stelle  $x$  in Flächen umgerechnet werden:

$$S_x = \pi r_x^2 \quad (6.5.21) \quad 1$$

mit  $S_x$  - Querschnittsfläche an der Stelle  $x$  [ in  $m^2$ ]  
 $r_x$  - Hornradius an der Stelle  $x$  [ in  $m$ ]

Im Prinzip gilt die Querschnittflächenberechnung für Hörner mit Kreisquerschnitt. Baut man rechteckige Querschnitte - was sich bei Baßhörnern kaum vermeiden läßt - treten natürlich Fehler auf. Die Querschnittsfläche sollte dann aber möglichst quadratisch sein.

### 6.5.9 Das Resonanzvolumen hinter dem Treiber Reactance Annulling

Zu Verzerrungen kann es kommen, wenn der Treiber nur auf einer Seite durch ein Horn belastet wird. Ideal wäre, beide Membranseiten an gleiche Hörner zu koppeln. Aus naheliegenden Gründen ist dies in der Regel nicht möglich.

Statt dessen kann die Membranrückseite an ein geschlossenes Volumen  $V_b$  gekoppelt werden, dessen akustische Nachgiebigkeit  $C_{ab}$  auf die Eigenschaften des Hornsystems abgestimmt wird. Die Kammer hinter dem Treiber reduziert so Verzerrungseffekte aufgrund ungleichmäßiger Belastung der beiden Membranseiten und vergrößert gleichzeitig den Bereich, in dem der Treiber

eine resistive Belastung sieht.

Durch eine geschickte Abstimmung des Kammervolumens lässt sich der Imaginärteil (engl. „reactance“) der akustischen Impedanz des Hornsystems nämlich gerade zu Null machen (engl. „annulling“), so dass ein annähernd reale Impedanz übrig bleibt. Dieser Abgleich des Volumens wird als „Reactance Annulling“ bezeichnet.

Bei sehr niedrigen Frequenzen wird der Treiber immer weniger durch einen resistiven Strahlungswiderstand belastet (Realteil der mechanischen Impedanz). Statt dessen steigt der Imaginärteil der Impedanz immer weiter an. Verantwortlich dafür ist die Masse des bewegten Systems. Dieser induktive Imaginärteil der Impedanz am Hornhals lässt sich aus Membranfläche  $S_d$  und Halsfläche  $S_t$  errechnen:

$$x_l = p_0 c S_d^2 / S_t \quad (6.5.22)$$

mit $p_0$	- Dichte der Luft	= 1,18 kg/m <sup>3</sup>
$c$	- Schallgeschwindigkeit	= 345 m/s
	und dem entsprechend $p_0 c$	= 4,07 10 <sup>2</sup>

Ein geschlossenes Luftvolumen hat eine kapazitive Wirkung und verhält sich daher grade um gekehrt. Der kapazitive Imaginärteil kann aus dem Volumen und der Membranfläche errechnet werden. Er ist:

$$x_c = \frac{S_d^2 p_0 c^2}{\omega_g V_b} \quad (6.5.23)$$

mit $\omega_g$	- $2 \Pi f_g$ und
$f_g$	- Grenzfrequenz des Horns
$p_0 c$	- 1,4 10 <sup>5</sup>

Um nun den induktiven Impedanzanstieg im Bereich der unteren Grenzfrequenz auszugleichen, muß die kapazitive Wirkung des Gehäuses im Betrag gerade gleich groß gemacht werden. Dazu setzt man  $x_l$  und  $x_c$  gleich:

$$x_l = \frac{x_c p_0 c S_d^2}{S_t} = \frac{S_d^2 p_0 c^2}{\omega_g V_b} \quad (6.5.24)$$

Umgestellt nach dem Volumen der Resonanzkammer  $V_b$  ergibt sich danach:

$$V_b = \frac{S_d^2 p_0 c^2 S_t}{S_d^2 p_0 c \omega_g} = \frac{S_t c}{\omega_g} \quad (6.5.25)$$

mit  $V_b$  - Volumen der Resonanzkammer [in  $m^3$ ]  
 $S_d$  - effektive Membranfläche des Treibers [in  $m^2$ ]  
 $S_t$  - Halsfläche des Horns [in  $m^2$ ]  
 $c$  - Schallgeschwindigkeit = 345 m/s  
 $\omega_g$  - untere Grenzkreisfrequenz =  $2\pi f_g$   
 $f_g$  - untere Grenzfrequenz des Hornsystems

Diese einfache Beziehung gilt, wenn das Verhalten durch die Nachgiebigkeit des Gehäuses dominiert wird, die Nachgiebigkeit  $C_{mb}$  also Nachgiebigkeit der Membraneinspannung  $C_{ms}$  ist. Sie ist bereits von Klipsch zur Konstruktion seines berühmten Eckhorns hergeleitet worden. [ 6.5.26]

Später haben Plach [6.5.27] und Plach/Williams [6.5.28] diese Methode des „Reaktance Annulling“ weiter verfeinert. Plach und Williams - beide Ingenieure bei Jensen Manufacturing Company in Chicago, einem der berühmtesten Hornfabrikanten der 50er Jahre entwickelten eine Methode zur optimalen Abstimmung von Hornkrümmung und Kammervolumen. Dabei werden allerdings hyperbolische Hörner eingesetzt.

Da die elektromechanischen Treiberparameter in die heute geläufigeren und in mancher Hinsicht praktischeren Thiele-Small-Parameter umgerechnet werden, lässt sich das Kammervolumen  $V_b$  auch aus den Thiele-Small-Parametern errechnen. Danach wird zunächst ein Abstimmfaktor  $A$  definiert, für den gilt:

$$A = \frac{f_c}{f_{ms} Q_{ts}} - 1 \quad (6.5.26)$$

mit  $f_c$  - erforderliche Resonanzfrequenz des Hornsystems

Damit läßt sich das benötigte Kammervolumen zu  $V_b = V_{as} / A$  errechnen. Brauchbare Werte für  $A$  und  $V_b$  ergeben sich sichtlich nur dann, wenn das Produkt aus Freiluftresonanz  $f_{ms}$  und Gesamtgüte  $Q_{ts}$  kleiner als die angestrebte untere Grenzfrequenz des Hornsystems ist. Andernfalls ist der gewählte Treiber nicht für das gewünschte Horn geeignet. [6.5.29]

## 6.5.10 Das Volumen vor dem Treiber: Die Kompressionskammer

Gewöhnlich befindet sich auch vor dem Treiber ein Kammervolumen, von dem eine Öffnung ins Horn führt. Auch dieses Volumen  $V_c$  weist eine Nachgiebigkeit auf und stellt eine akustische Impedanz dar:

$$x_c = \frac{S_d^2 p_0 c^2}{2\pi f V_c} \quad (6.5.27)$$

mit  $S_d$  - effektive Membranfläche  
 $V_c$  - Volumen der Kompressionskammer  
 $f$  - Frequenz  
 $p_0$  - Dichte der Luft = 1.18 kg/m<sup>3</sup>  
 $c$  - Schallgeschwindigkeit = 345 m/s  
und dementsprechend  $p_0 c^2 = 1,4 \cdot 10^5$

Für höhere Frequenzen wird diese Impedanz immer kleiner. Sie wirkt wie ein Hochpaßfilter erster Ordnung. Die Grenzfrequenz dieses Filters läßt sich durch die Wahl eines bestimmten Volumens abstimmen. Die Grenzfrequenz  $f_h$  ergibt sich, wenn die Impedanzen von Kompressionskammer und Horn gerade gleich groß sind:

$$\frac{S_d p_0 c^2}{2\Pi f_h V_c} = \frac{p_0 c S_d^2}{S_t} \quad (6.5.28)$$

mit  $S_t$  - Halsfläche des Horns  
 $f_h$  - gewünschte obere Grenzfrequenz

Für das Volumen der Kompressionskammer ergibt sich damit:

$$V_c = \frac{c S_t}{2\Pi f_h} \quad (6.5.29)$$

Im anschließend gezeigten Konstruktionsverfahren wird aber noch eine weitere Methode zur Abstimmung der einzelnen Elemente eines Hornsystems gezeigt.

### 6.5.11 Die obere Grenzfrequenz

Allerdings wird die obere Grenzfrequenz eines Horns nicht über das – vom Konstrukteur beeinflussbare - Volumen der Kompressionskammer allein bestimmt. Der Einfluß der dynamischen Masse wurde bereits ausführlich besprochen. Da bei Treibern, die für den Einsatz in Hornsystemen geeignet sind, die Gesamtgüte  $Q_{ts}$  praktisch ausschließlich durch den elektrischen Anteil  $Q_{es}$  [6.5.30] bestimmt wird, kann man für die massenbedingte obere Grenzfrequenz in Gleichung (6.5.4) auch schreiben:

$$f_{hm} = \frac{2f_{ms}}{Q_{ts}} \quad (6.5.30)$$

mit  $f_{hm}$  - massenbedingte obere Grenzfrequenz  
 $f_{ms}$  - mechanische Grundresonanz des Treibers  
 $Q_{ts}$  - Gesamtgüte des Treibers

Da hier  $Q_{ts}$  ungefähr gleich  $Q_{es}$  ist, ist diese obere Grenzfrequenz - wie wir gesehen haben - von der bewegten Masse und dem Antrieb des

A

Treibers abhängig:

$$Q_{es} = \frac{2\pi f_{ms} R_e}{B_l^2} M_{ms} \quad (6.5.31)$$

mit  $M_{ms}$  - bewegte Masse des Treibers  
 $B_l$  - Kraftfaktor des Treibers  
 $R_e$  - Gleichstromwiderstand

Der Strom durch die Schwingspule wird bei höheren Frequenzen durch den ansteigenden Widerstand der Schwingspuleninduktivität begrenzt. Auch dadurch wird eine obere Grenzfrequenz festgelegt, die den Index „s“ für "Schwingspule" erhält:

$$f_{hs} = \frac{R_e}{\pi L_e} \quad (6.5.32)$$

mit  $f_{hs}$  - impedanzbedingte obere Grenzfrequenz aufgrund der Schwingspuleninduktivität  
 $R_e$  - Gleichstromwiderstand des Treibers [in Ohm]  
 $L_e$  - Induktivität der Schwingspule [in Henry]

Damit liegen alle möglichen Knickstellen im Frequenzgang fest. Der Konstrukteur wird in der Regel versuchen, ein gewünschtes Bandpassverhalten des Hornsystems durch Bemessung der Frontkammer zu erzielen.

### 6.5.12

Nachdem Thiele und Small die nach ihnen benannten Parameter ursprünglich für die Konstruktion von Baßreflexlautsprechern und geschlossenen Gehäusen eingesetzt hatten, sind diese praktischen Kenngrößen von verschiedenen Autoren auch auf andere Einbaumethoden übertragen worden. Die anspruchsvollste Aufgabe ist dabei gewiß die Konstruktion von Hornlautsprechern. [6.5.31] [6.5.32]

Ein entsprechendes Konstruktionsverfahren hat der amerikanische Lautsprecherentwickler W. Marshall Leach vorgestellt. [6.5.33] Dieser Entwurfsalgorithmus wird im folgenden Teil dargestellt. Berechnet werden dabei die Kenngrößen eines Hornsystems mit Bandpaßverhalten. Im Unterschied zu geschlossenen oder Baßreflexsystemen tritt dabei auch eine obere Grenzfrequenz  $f_h$  in Erscheinung.

Ausgangsgrößen für den Entwurf sind die Parameter

$$f_{ms}, Q_{es}, Q_{ms}, V_{as}$$

und die gewählte untere und obere Grenzfrequenz des Hornsystems:

$$f_l \text{ und } f_h$$

Ausgehend von diesen Größen kann der Hornlautsprecher berechnet werden:

1) Der Entwurf beginnt mit der Errechnung der Resonanzfrequenz  $f_c$  des in eine Hornstruktur eingebauten Treibers. Dabei ist

$$\omega_c = \sqrt{\omega_l \omega_h} \quad (6.5.33)$$

mit  $\omega_c = 2\pi f_c$  Resonanz des eingebauten Treibers

$\omega_l = 2\pi f_l$  gewählte untere Grenzfrequenz

$\omega_h = 2\pi f_h$  gewählte obere Grenzfrequenz

2) Damit läßt sich die Gesamtgüte  $Q_{tc}$  des eingebauten Treibers errechnen:

$$Q_{tc} = \frac{\omega_c}{\omega_l + \omega_h} \quad (6.5.34)$$

mit  $Q_{tc}$  - Gesamtgüte des Hornsystems

3) Im nächsten Schritt wird der Abstimmfaktor  $A$ , die sogenannte Compliance-Ratio, bestimmt. Diese Verhältniszahl entspricht dem Abstimmfaktor Alpha bei geschlossenen und Baßreflex-Boxen und wird auch ähnlich errechnet:

$$A = [f_c/f_{ms}]^2 - 1 \quad (6.5.35)$$

mit  $f_{ms}$  - mechanische Grundresonanz des Treibers

4) Daraus kann nun das Gehäusevolumen  $V_b$  der Kammer hinter dem Treiber errechnet werden. Wie bei geschlossenen und Baßreflex-Gehäusen ist

$$V_b = V_{as}/A \quad (6.5.36)$$

mit  $V_b$  - Resonanzvolumen hinter dem Treiber [in  $m^3$ ]  
 $V_{as}$  - Äquivalentvolumen des Treibers [in  $m^3$ ]

5) Die elektrische Güte des Systems ist dementsprechend

$$\dots \dots \dots Q_{ec} = \sqrt{A+1} Q_{es} \quad (6.5.37)$$

\dots mit  $Q_{ec}$  -

elektrische Güte des Hornsystems

$Q_{es}$  - elektrische Güte des eingesetzten Treibers

6) Zur Errechnung der Halsfläche des Horns wird die Gesamtgüte des Hornsystems aufgrund der akustischen Belastung benötigt. Sie wird errechnet, in dem man vom Kehrwert der Gesamtgüte des Systems  $Q_{tc}$  die Einzelwerte der elektrischen Güte  $Q_{ec}$  und der mechanischen Bedämpfung durch A Verluste in Gehäuse  $Q_{mc}$  abzieht:

$$\frac{1}{Q_{tc}} = \frac{1}{Q_{tc}} - \frac{1}{Q_{ec}} - \frac{1}{Q_{mc}} \quad (6.5.38)$$

mit  $Q_{tc}$  - Güte aufgrund der akustischen Belastung  
 $Q_{tc}$  - Gesamtgüte des Hornsystems  
 $Q_{ec}$  - elektrische Güte des Hornsystems  
 $Q_{mc}$  - mechanische Güte des Hornsystems

Bei einem verlustfreien System wird die mechanische Güte  $Q_{mc}$  nur durch die mechanischen Reibungsverluste im Treiber selbst verursacht.  $Q_{mc}$  ist dann:

$$Q_{mc} = \sqrt{A+1} Q_{ms} \quad (6.5.39)$$

mit  $Q_{ms}$  - mechanische Güte des eingesetzten Treibers

Allerdings wird bei realen Systemen auch Energie im Gehäuse absorbiert vor allem, wenn das Gehäuse mit Dämmmaterial zur Bedämpfung stehender Wellen gefüllt wird. Small [6.5.341] gibt als typische Werte für Systeme, die mit Dämmmaterial gefüllt sind, Gütewerte von 2 bis 5 an. Für ungedämpfte Systeme liegen sie bei 5 bis 10. Leach weist allerdings darauf hin, daß sich Smalls entsprechende Untersuchung auf geschlossene Gehäuse bezieht. Solche Gehäuse haben in der Regel größere Volumina als die Kammern von Hornsystemen. Für Hornsysteme kann daher ein kleinerer  $Q_{mc}$ -Wert erwartet werden. Eine exaktere Methode wäre,  $Q_{mc}$  am aufgebauten Hornsystem zu messen. Small beschreibt eine geeignete Meßmethode.

7) Im nächsten Schritt wird die notwendige Halsfläche der Hornstruktur errechnet:

$$S_t = \frac{\omega_c V_{as} Q_{lc}}{(A+1)c}$$

(6.5.40)

mit  $S_t$  - Querschnittfläche des Horns an der Halsöffnung (Horn-Throat-Area)  
 $\omega_c = 2\pi f_c$  - erforderliche Resonanzfrequenz  
 $Q_{lc}$  - Güte auf Grund der akustischen Belastung  
 $V_{as}$  - Äquivalentvolumen des Treiber [in m<sup>3</sup>]  
 $c$  - Schallgeschwindigkeit = 345 m/s

8) Aus den Gütewerten des Systems kann zur Kontrolle der Konstruktion auch der Wirkungsgrad des Hornlautsprechers errechnet werden:

$$N_{ref} = \frac{Q_{lc}}{Q_{lc}} \frac{Q_{lc}}{Q_{ec} - Q_{lc}} = \frac{Q_{lc}^2}{Q_{lc}(Q_{ec} - Q_{lc})}$$

(6.5.41)

Der gefundene Wert sollte größer sein als der eines vergleichbar großen direktstrahlenden Systems - sonst hat der aufwendige Bau eines Hornsystems keinen erkennbaren Vorteil vor einem einfachen geschlossenen oder Baßreflex-System.

9) Im nächsten Arbeitsschritt wird das optimale Volumen der Vorkammer errechnet. Die Luft in dieser Vorkammer weist eine Nachgiebigkeit  $C_{af}$  auf, über die die Wiedergabe am oberen Ende des vom Horn übertragenen Frequenzbandes beeinflußt werden kann. Nimmt man vereinfachend an, daß die Induktivität der Schwingspule im Arbeitsbereich eines Tieftonhorns noch keinen Einfluß ausübt, dann kann ein optimaler Wert für  $C_{af}$  gefunden werden, indem man die Übertragungsfunktion eines Tiefpaßfilters untersucht. Diese Untersuchung nimmt Leach vor. Entscheidend ist dabei das Verhältnis  $R_{al}/R_{at}$ . Dabei ist

$R_{al}$  - der akustische Widerstand der Impedanz am Hornhals  
(Acoustical Resistance of the Horn Throat Impedance),

$R_{at}$  - der akustische Gesamtwiderstand aus

$R_{ae}$  - dem akustischen Äquivalent der elektrischen Verluste des Treibers und

$R_{am}$  - dem akustischen Äquivalent der mechanischen Verluste des Treibers mit den auftretenden akustischen Verlusten

$$R_{at} = R_{ae} + R_{am}$$

Will man einen maximalen Wirkungsgrad erzielen, so gelten die Bedingungen

$$R_{al} = R_{at} \text{ und } Q_{lc} = 2 Q_{tc} \quad (6.5.42)$$

Da nun die Güte als

$$Q = 1/\sqrt{k} \quad (6.5.43)$$

definiert ist und Leach ermittelt, daß der maximale Wirkungsgrad bei  $k = 4$  ; auftritt, ist  $Q = 0,5$

$$C_{af} = 0.668 Q_{tc}^2 C_{af} \quad (6.5.44)$$

mit  $C_{af}$  - akustische Nachgiebigkeit (Compliance) der Frontkammer  
 $C_{at}$  - gesamte akustische Nachgiebigkeit von Treiber und Gehäuse  
 Zur Bestimmung von  $C_{at}$  errechnet man zunächst

$$\frac{1}{C_{at}} = \frac{1}{C_{ab}} + \frac{1}{C_{as}} \quad (6.5.45)$$

mit  $C_{at}$  - gesamte akustische Nachgiebigkeit  
 $C_{ab}$  - akustische Nachgiebigkeit der Luft im Gehäusevolumen  
 $C_{as}$  - akustische Nachgiebigkeit der Membraneinspannung

$$C_{ab} = \frac{V_b}{p_0 c^2 S_d^2} \quad C_{as} = \frac{V_{as}}{p_0 c^2 S_d^2} \quad (6.5.46)$$

mit  $V_b$  - Kammervolumen hinter dem Treiber [in m<sup>3</sup>]  
 $V_{as}$  - Äquivalentvolumen des Treibers [in m<sup>3</sup>]  
 $S_d$  - effektive Membranfläche [in m<sup>2</sup>]  
 $p_0$  - Dichte der Luft = 1.18 kg/m<sup>3</sup>  
 $c$  - Schallgeschwindigkeit = 345 m/s  
 und dementsprechend  $p_0 c^2 = 1.4 \cdot 10^5$

$$C_{at} = \frac{C_{ab} C_{as}}{C_{ab} + C_{as}} \quad (6.5.47)$$

$$C_{mt} = C_{at} / S_d^2 \quad (6.5.48)$$

mit  $C_{at}$  - akustische Nachgiebigkeit der Frontkammer  
 $C_{mt}$  - mechanische Nachgiebigkeit der Frontkammer

Aus der akustischen Nachgiebigkeit  $C_{at}$  läßt sich das Volumen der Frontkammer  $V_f$  errechnen:

$$\begin{aligned}
 V_f &= p_0 c^2 C_{at} \\
 (6.5.49) \quad &= p_0 c^2 S_d^2 C_{mt} \\
 &= 1.4 \cdot 10^5 C_{at}
 \end{aligned}$$

mit  $V_f$ - Volumen der Frontkammer [in  $m^3$ ]

10) Das hier referierte Entwurfsverfahren nach Leach sieht vor, daß in einem letzten Arbeitsschritt geprüft wird, ob für das berechnete System ein Ausgleich der Impedanzen bei der unteren Grenzfrequenz - ein Reactance Annulling -verwirklicht werden kann. Als variable Größe verwendet Leach hier abweichend von anderen Autoren [6.5.35] die Hornkonstante  $m$ , über die die Impedanz am Hornhals eingestellt werden kann. Er verweist dazu auf Beranek [6.5.36] und Olson [6.5.37] Dort [6.5.38] findet sich folgende Beziehung für die gesamte Nachgiebigkeit des Treibersystems mit seinem rückwärtigen Gehäuse

$$\begin{aligned}
 C_{mt} &= \frac{2S_t}{S_d^2 p_0 c^2 m} \\
 (6.5.50)
 \end{aligned}$$

mit  $C_{mt}$  - gesamte erforderliche mechanische Nachgiebigkeit von Treiber und Gehäuse

$S_t$  - Halsfläche des Horns [in  $m^2$ ]  
 $S_d$  - effektive Membranfläche des Treibers [in  $m^2$ ]  
 $m$  - Hornkonstante [in  $m^{-1}$ ]  
 $p_0$  - Dichte der Luft = 1.18  $kg/m^3$   
 $c$  - Schallgeschwindigkeit = 345  $m/s$

und dementsprechend  $p_0 c^2 = 1.4 \cdot 10^5$

Diese Gleichung kann leicht nach der Hornkonstante umgestellt werden. Man erhält dann,

$$\begin{aligned}
 m &= \frac{2S_t}{1.4 \cdot 10^5 S_d^2 C_{mt}} \\
 (6.5.51)
 \end{aligned}$$

dabei ist  $C_{mt} \sim C_{at} / S_d^2$

Mit dieser Hornkonstante muß der Impedanzausgleich bei einer Frequenz un-  
 unterhalb von  $f_1$  auftreten.

Daher muß die Horngrenzfrequenz unter die zu Anfang des Entwurfs vorgegebene Frequenz  $f_i$  gelegt werden. Da in der Hornkonstante

$$m = \frac{4\pi f_g}{c} = 3.64 \cdot 10^{-2} f_g \quad (6.5.52)$$

mit  $f_g$  - untere Grenzfrequenz des Horns  
 $c$  - Schallgeschwindigkeit = 345 m/s

ist, kann dies durch Umstellung der Gleichung leicht überprüft werden:

$$f_g = \frac{mc}{4\pi} = 27,5m < f_i \quad (6.5.53)$$

Die erforderliche Horngrenzfrequenz  $f_g$  kann auch nach der von Leach angegebenen Gleichung

$$f_g = \frac{(A+1)S_t c}{2\pi V_{as}} \quad (6.5.54)$$

mit  $A$  - Abstimmfaktor =  $[f_c / f_{ms}]^2 - 1$   
 $S_t$  - Halsfläche des Horns  
 $c$  - Schallgeschwindigkeit = 345 m/s

errechnet werden. Liegt diese Frequenz für das errechnete System über der vorgegebenen Frequenz  $f_i$ , so kann kein Impedanzausgleich erzielt werden. Gegebenenfalls müssen dann die Eingangsgrößen für den Entwurf geändert werden. Damit ist der Entwurfsalgorithmus nach Leach abgeschlossen. Mit den Werten

$f_g$  - Grenzfrequenz des Horns [ in Hz]  
 $S_t$  - Halsfläche des Horns [in m<sup>2</sup>]  
 $m$  - Hornkonstante [ in m<sup>-1</sup>]

als Vorgabe kann anschließend die erforderliche Hornkontur errechnet werden.

Die Vorzüge von Hörnern sind nicht unumstritten. Mancher sieht in ihnen (das Königsprinzip des Lautsprecherbaus und schwärmt von der Urgewalt und Dynamik-, mit der Bässe - auf die wir uns hier ja beschränkt haben - wiedergegeben werden. Andere stehen dem komplizierten Innenleben der Ungetüme skeptisch gegenüber und weisen auf mögliche Verfärbungen und heute doch reichlich zur Verfügung stehende Verstärkerleistung hin. Zwei ganz gegensätzliche Stimmen sollen daher das Kapitel abschließen. Das erste Zitat stammt aus dem Buch "How to Build Speaker Enclosures" von Alexis Badmaieff und Don Davis. Auf den typischen Hornfreak sollte demnach folgende Selbstbeschreibung passen:

*"Sie sagen von sich Sie seien kein Typ für Kompromisse. Sie haben willentlich den Preis für einen 7-Liter Ford GT Mark II bezahlt ( und sich in dessen Unbequemlichkeit geschickt), der im letzten Jahr die 24 Stunden von LeMans gewonnen hat, weil Leistung für Sie der wichtigste Faktor ist.*

*Auf der Jagd stemmen Sie sich gegen den Rückstoß Ihrer Weatherby Mark V .387 Magnum. Alles kleinere als Ihre 8x10 Linhof ist für Sie eine Miniaturkamera. Ihr Aero-Jet Commander schießt Sie zwischen Ihrer handgearbeiteten norwegischen Motorjacht aufAntigua und Ihrem Beacon Hill Apartment in Boston hin und her ,wo Sie Live-Übertragungen des Boston Symphony Orchestra auf Ihrer Ampex MR-70 aufzeichnen. Kurz: Sie verlangen das Beste und Sie sind fähig und willig und begieri,. Ihreignes Basshorn zu bauen. Seine schiere Enormität zieht Sie an.“ [ 6.5.39]*

Das mag die amerikanische Stimme sein. Das letzte Wort gehört dein engagierten Selbstbauer, der ohnehin alles ausprobiert, bevor er ein Urteil fällt. Das vorletzte Wort soll aber dem britischen Lautsprecherspezialisten Martin Colloms gehören, der in seinem Buch "High Performance Loudspeakers" warnt:

*„Der Autor [Colloms. M.G.] ist sich der Gefahr zur Verallgemeinerung bei diesem Thema bewußt. Nach seiner Ansicht sind Hornsysteme nicht zu Topqualität in der Lage und die meisten Entwürfe sind erheblich schlechter als typische direktstrahlende Systeme. Der Hauptgrund für die Wahl von Hornlautsprechern, die traditionell im PA-Bereich eingesetzt werden, ist ihr hoher Wirkungsgrad verbunden mit der Möglichkeit, das Abstrahlverhalten besser kontrollieren zu können. Beides sind entscheidende Bedingungen, wenn große Säle beschallt werden müssen.“*  
[6.5.40]