

TechTalk No7

08-05.2011

Willkommen beim TechTalk - dem regelmäßig erscheinenden Newsletter von ari acoustics. TechTalk erläutert technische Grundlagen und Hintergründe und stellt neue Produkte vor. TechTalk soll auch zur Diskussion anregen. Schreiben Sie uns Ihre Anregungen, Fragen und Korrekturen.

TechTalk No1:

Welche Lautstärke soll eine Hifi-Anlage im Hörraum bzw. an der Position des Hörers im Hörraum erzielen?

TechTalk No2:

Welche Lautsprecher und Verstärker benötige ich für Hifi-gerechte Lautstärke in meinem Raum?

TechTalk No3:

Welchen Einfluss hat das Bündelungsverhalten meines Lautsprechers und das Absorptionsverhalten des Hörraumes auf Lautstärke und Frequenzgang?

TechTalk No4:

Welche Verstärkerleistung verkräftet mein Lautsprecher - Elektrische Belastbarkeit von Lautsprechern

TechTalk No5:

Interview mit Allen Isaaksen, Chef von Wavecor

TechTalk No6:

Basswiedergabe in Wohnräumen und Auslegung eines Subwoofers mit dem Wavecor SW182BD01/02

TechTalk No7:

Aero2D - die strömungsgünstige Bassreflexöffnung

Übersicht:

Heutige Subwoofer sind mit ihren steifen Membranen und starken Magnetantrieben außerordentlich leistungsfähig. Stehen zudem leistungsstarke Schaltverstärker zur Verfügung, so erreichen sie beeindruckende Schallpegel und selbst bei kleinen Gehäuseabmessungen eine sehr tiefe untere Grenzfrequenz. Gute Subwoofer machen richtig Druck – aber klingen sie auch „musikalisch“?

Musikalisch ist hier ein wichtiger Punkt. Beim Heimkino ist in erster Linie der ausreichende Schalldruck in den tiefsten Lagen entscheidend. Für eine überzeugende Musikwiedergabe ist dagegen ein ausgeglichener Frequenzgang wichtig. Zudem spielt das zeitliche Verhalten, das korrekte Timing, für ein bruchloses Zusammenspiel mit den Satellitenlautsprechern eine entscheidende Rolle.

Hier kommt die Raumakustik mit ins Spiel – und zwar gewaltig! Im folgenden TechTalk8 soll aufgezeigt werden, wie bedeutend die Raumakustik ist und welche Möglichkeiten durch die Digitale Signalbearbeitung gegeben sind.

1. Ein einleitendes Experiment

Haben Sie einen Lautsprecher mit Bassreflexgehäuse und haben Sie schon einmal seine Wirkungsweise genauer untersucht? Nein? Dann sollten Sie sich den Spaß einmal gönnen und folgendes Experiment machen: Spielen Sie einen Sinuston ab, der möglichst exakt der Bassreflexfrequenz Ihres Lautsprechers entspricht. Erst leise dann immer lauter.

Wahrscheinlich werden Sie folgendes feststellen:

Mit zunehmender Lautstärke verändert sich der Klang des „Brummtons“, er wird heller. Diese Klangänderung kommt daher, dass der Klirrfaktor des Lautsprechers zunimmt und sich höherfrequente Schallanteile zum Grundton dazu mischen. Bei einer Abstimmfrequenz von 30Hz sind das die Töne um 60Hz (K2), 90Hz (K3), 120Hz (K4)... Diese Klirranteile sind in einem Frequenzbereich, bei dem die Empfindlichkeit des Ohres bereits deutlich größer ist als bei dem tiefen Grundton. Bei großen Lautstärken und entsprechenden Klirrfaktoren treten die Klirranteile daher klanglich in den Vordergrund. Bei 10% Klirrfaktor wird der Klang durch die Klirrfaktoranteile dominiert. Das Experiment gibt Ihnen einen realistischen Eindruck über die unverzerrt erreichbare Lautstärke Ihres Lautsprechers im Tieftonbereich.

Mit zunehmender Lautstärke gesellen sich sehr oft die folgenden hochfrequenten Störgeräusche dazu:

- Zirpen und Fiepsen resultieren meist aus kleinen Undichtigkeiten des Gehäuses. Diese treten oft bei Kabeldurchführungen oder bei Schrauben und im Montagebereich der Chassis auf.
- Rattergeräusche kommen meist durch lose Befestigungen sowie durch ungünstig verlegte Kabel im Innern des Gehäuses.
- Schlüpfende Geräusche werden meist von einer falsch ausgelegten Bassreflexöffnung erzeugt. Die Luftströmung durch die Bassreflexöffnung wird bei hohen Lautstärken turbulent. Deutlich vernehmbare Blasgeräusche sind die Folge. Wenn Sie die Hand 3cm bis 5cm vor die Bassreflexöffnung halten, werden Sie sehen mit welcher großen Geschwindigkeiten es aus dieser Öffnung bläst (bitte die Öffnung nicht zuhalten, sonst kann der Basslautsprecher mechanisch überlastet werden).

Undichte Gehäuse und klappernde Befestigungen können einfach korrigiert werden. Gegen Strömungsgeräusche durch eine ungünstige Bassreflexöffnung kann dagegen nachträglich nichts mehr unternommen werden. Gerade bei Subwoofern sind hochfrequente Strömungsgeräusche außerordentlich störend, denn diese führen unmittelbar zur einfachen Ortbarkeit des Subwoofers.

Daher ist es besonders wichtig diesem Thema bei Konstruktion und Aufbau des Gehäuses besondere Beachtung zu schenken. Was das bedeutet beschreibt das folgende Kapitel.

2. Einige Grundlagen zur Strömungstechnik in Rohren

Ob das Bassreflexgehäuse eine gute Unterstützung des Bassbereichs erzielt, hängt vor allem davon ab, wie groß die auftretenden Strömungsverluste sind. Hohe Strömungsverluste in der Bassreflexöffnung führen zu einem schlechten Wirkungsgrad des Bassreflexsystems. Folge davon ist eine flauere Basswiedergabe, ein unnötig hoher Klirrfaktor und übermäßige Störgeräusche. Die Frage ist also, wie diese Strömungsverluste reduziert werden können.

Für Luftströmungen durch Rohre im technischen Anlagen- und Apparatebau gibt es zahlreiche experimentelle Untersuchungen. Für diesen technischen Fall der Rohrströmungen können sogenannte Verlustfaktoren V_k ermittelt werden – je kleiner dieser ist, desto geringer sind die Verluste.

Verluste treten beim Einströmen der Luft in ein Strömungsrohr auf, sowie beim Durchströmen des Rohres, bei eventuellen Umlenkungen in einem gebogenen Rohr und beim Ausströmen der Luft aus dem Rohr. Die Verluste selbst hängen dabei sehr stark von der Formgebung des

Strömungsrohres ab und können durch eine gute Gestaltung entscheidend verringert werden.

Einlauf:

Mit besonders hohen Verlusten ist ein scharfkantiger, frei in den Raum ragender Einlauf belastet. Dies beschreibt den Fall eines frei in das Boxenvolumen hineinragenden Bassreflexrohres ohne Abrundung. Günstiger ist, wenn die Rohröffnung bündig in eine Wand eingelassen ist. Um die Verluste deutlich zu reduzieren, muss der Einlauf zusätzlich mit großem Radius abgerundet werden.

Auslauf:

Ein Auslauf ohne Querschnittsänderung hat nur sehr geringe Strömungsverluste zur Folge. Wird das Rohr als Bassreflexrohr eingesetzt, so wechselt aber die Strömungsrichtung im Takt der Musik. Jeder Auslauf ist gleichzeitig ein Einlauf – und dieser sollte wie oben dargestellt auf jeden Fall mit einem großen Radius abgerundet sein. Ein Auslauf mit Rundungsradius entspricht aber einem Diffusor und leider ist die Strömung in einem Diffusor auch mit Verlusten behaftet. In einem Diffusor wird der Strömungsquerschnitt größer und – sofern die Strömung dem gesamten Querschnitt erfasst – die Geschwindigkeit der Strömung langsamer. Erfolgt die Querschnittsänderung zu schnell, so folgt die Strömung nicht mehr der Querschnittsänderung – die Strömung reißt von der Wand ab. Dabei bilden sich zusätzliche Strömungswirbel die zu Verlusten führen. Je größer also der Öffnungswinkel des Diffusors ist, desto größer werden auch die Strömungsverluste. Günstig ist es daher, den Öffnungswinkel des Diffusors klein zu halten und nur eine allmähliche Strömungsumlenkung zuzulassen. Es gilt daher einen günstigen Kompromiss zwischen Einström- und Ausströmgeometrie zu finden.

Umlenkung:

Auch die Umlenkung einer Strömung verursacht Strömungsverluste. Eine Umlenkung sollte also vermieden werden. Wie die Untersuchungen zeigen ist es günstig im Bereich der Umlenkung eine gewisse Querschnittserweiterung zuzulassen. Dies kann vorteilhaft erreicht werden, in dem der Krümmungsradius des Rohres Außen und Innen in etwa gleich gewählt wird.

Reibung im Rohr

Die Strömung in einem Rohr wird natürlich auch durch die Reibung der Luft zur Rohrwand abgebremst. Diese (Reibungs-)Verluste hängen also von der Rohrreibungszahl und der Länge des Rohres ab und davon ob die Strömung laminar oder turbulent ist. Rohre mit großer Wandrauigkeit und turbulenter Strömungen führen zu deutlich höheren Verlusten als laminare Strömungen in glatten Rohren.

Ursache	Verlustbeiwert V_k	Bemerkung
		Zielgeometrie mit sehr kleinen Verlusten
Einlauf mit großer Abrundung	0,03	
Einlauf gerundet	0,175	Sollte doch immer machbar sein
Einlauf scharfkantig	0,375	
Einlauf scharfkantig, frei stehend	1,8	Auf jeden Fall vermeiden!
Diffusor mit schlagartiger Erweiterung auf 3-fachen Querschnitt	4	Einschnürungen, Kanten + Stufen im Bassreflexrohr unbedingt vermeiden
Diffusor 10Grad Öffnungswinkel	0,75	Zielgeometrie ! Besonders kritisch!
Diffusor 20Grad	1,6	Anwachsen V_k durch Strömungsablösung
Krümmen 90° günstig gestaltet	0,2	
Rohrreibung $L=20\text{cm}$, $D=5\text{cm}$	0,3	

Tabelle 1: Typische Verlustbeiwerte einer technischen Rohrströmung

Tabelle 1 zeigt beispielhaft die Verlustfaktoren in einem 20cm langen Rohr. Je höher der Verlustfaktor desto schlechter. Deutlich wird, dass scharfkantige und frei stehende Bassreflexrohre unbedingt vermieden werden sollten. Zudem wird deutlich, dass vor allem eine Erweiterung des Strömungskanals leicht zu hohen Strömungsverlusten führen kann. Ganz schlecht ist eine schlagartige Erweiterung und bereits ein Öffnungswinkel von 20° führt zu deutlichen Verlusten. Für die Strömung durch ein Rohr ist also ein stark gerundeter Einlauf und ein sich langsam erweiternder Auslauf besonders günstig.

So viel zum Grundsätzlichen, aber: Die Luftströmung in einem Bassreflexrohr ist *keine* einfache Rohrströmung. In der Bassreflexöffnung bewegt sich die Strömung im Takte der Musik hin und her. Aus den Enden der Bassreflexöffnung strömt die Luft ein und aus. Wie weit sich die einzelnen Luftteilchen dabei bewegen hängt im Wesentlichen vom Hub der Lautsprechermembran und vom Verhältnis der Strömungsflächen von Lautsprechermembran und Bassreflexrohr ab. Bewegt sich beispielsweise die Lautsprechermembran um 10mm und ist die Membranfläche 5-mal so groß wie die Fläche der Bassreflexöffnung so bewegt sich das Luftteilchen im Bassreflexrohr gerade mal um 50mm. Die Bewegung der Luftteilchen ist also kleiner als die Länge des Bassreflexrohres. Die Luftteilchen durchströmen also gar nicht die Bassreflexöffnung sondern werden darin hin und her geschubst – eine richtige Luftströmung mit voll ausgebildeter Strömungscharakteristik entsteht nicht. Daher ist die Argumentation mit der technischen Rohrströmung zwar hilfreich um die grundsätzlichen Zusammenhänge zu verstehen, sie ist aber bei weitem nicht ausreichend.

Daher wurden bereits frühzeitig untersucht, wie Bassreflexöffnungen zu dimensionieren sind und wie sie ausgeformt sein sollten. Eine gute Übersicht zur Literatur sowie ausführliche eigene Untersuchungen präsentiert der herausragend informative Artikel „Maximizing Performance from Loudspeaker Ports“ der 2002 von Salvatti, Devantier und Butten, alles Forscher des Harman Konzerns veröffentlicht wurde (<http://www.harman.com/EN-US/OurCompany/TechnologyLeadership/Pages/ScientificPublications.aspx>). Die Autoren führten zehn experimentelle Studien durch, deren Ergebnisse im folgenden Kapitel kurz zusammengefasst werden.

3. Strömung im Bassreflexkanal

1. **Grenzschalldruck:** Alle Bassreflexrohre sind nur bis zu einem Grenzschalldruck wirksam. Bei höheren Schallpegeln zeigen sie alle eine starke Kompression. Der Grenzschalldruck hängt von dem Durchmesser des Bassreflexrohrs und dem Radius der Abrundung am Eintritt und Austritt des Bassreflexrohrs ab. Günstig ist eine Bassreflexöffnung mit großem Durchmesser und starker Abrundung der Eintritts- und Austrittsöffnung.

Ergänzung: Harwood (1972) empfiehlt eine maximale Strömungsgeschwindigkeit in der Bassreflexöffnung von 10m/min (entsprechend 36 km/h) und leitet hieraus ein Diagramm zum minimalen Durchmesser von Bassreflexöffnungen ab. Für 102dB Schallpegel bei 30Hz sollte der Durchmesser mindestens 100mm betragen. Eine Verdoppelung der Fläche oder der Abstimmfrequenz führt zu einem 3dB höheren Grenzschalldruck.

Anmerkung: Bei 36km/h auf Fahrrad oder Moped pfeift Ihnen der Wind ganz schön um die Ohren.

2. **Kompression durch turbulente Strömung:** Die Strömung in einem Bassreflexrohr kann laminar oder turbulent sein. Ein Maß hierfür ist die Reynolds Zahl Re . In technischen Strömungen durch Rohre mit scharfkantigem, frei stehendem Ein- und Austritt bildet sich bei ca. $Re = 2.3 \cdot 10^4$ eine turbulente Strömung aus. Bei Bassreflexöffnungen mit nicht abgerundeten Bassreflexrohren sind Kompressionseffekte bei $Re = 5 \cdot 10^4$ deutlich und bei $Re = 10^5$ stark ausgeprägt. Dies zeigt, dass die Kompression vom Übergang einer laminaren zu einer turbulenten Rohrströmung hervorgerufen wird. Dieser Übergang kann durch einen stark abgerundeten Ein- und Auslass zu deutlich höheren Strömungsgeschwindigkeiten bzw. Schallpegeln verschoben werden.

Anmerkung: turbulente Strömungen sind auf Grund des intensiveren Impulsaustausches zwischen den Luftteilchen deutlich zäher (bis zu 1000fach) als laminare Strömungen. Man braucht daher eine wesentlich größere Kraft um die gleiche Luftmenge in der Bassreflexöffnung zu bewegen – der Wirkungsgrad sinkt.

3. **Abstimmung:** Auch für Bassreflexrohre mit stark abgerundeten Enden können einfache Formeln zur Frequenzabstimmung gefunden werden. Eine wesentliche Größe ist der charakteristische Radius der Bassreflexöffnung. Dieser wird von den Autoren mit NFR bezeichnet wobei $NFR = 0$ ein gerades Rohr ohne Abrundung und $NFR = 1$ ein vollständig abgerundetes Rohr bedeutet.

Aus dem Artikel von Salvatti et al:

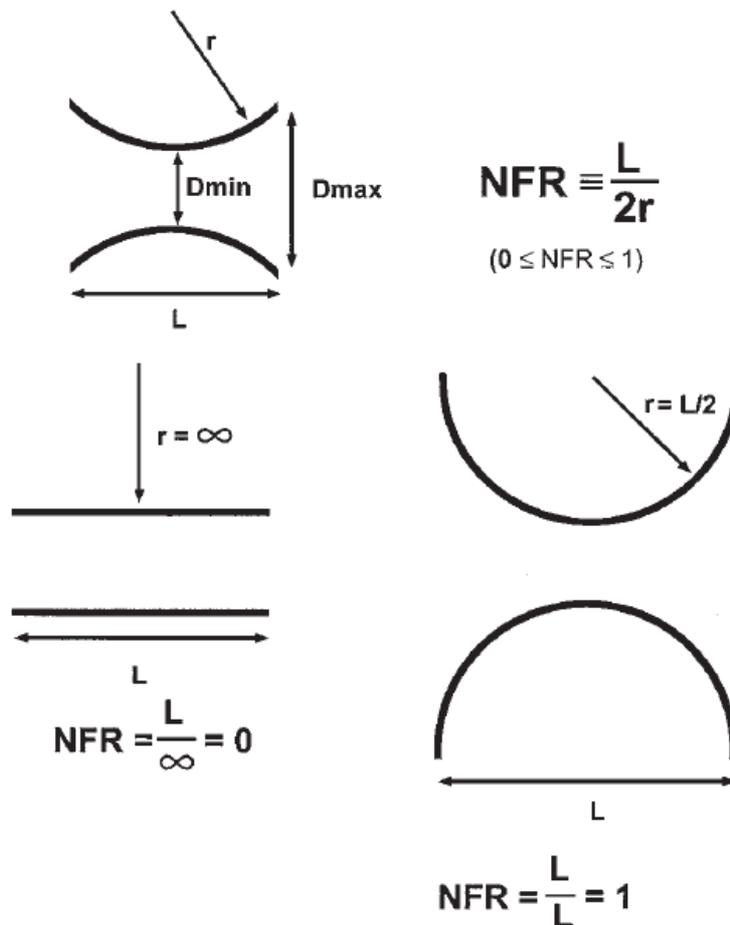


Fig. 28. Simple radiused port nomenclature.

4. **Kompression bei abgerundeten Bassreflexöffnungen:** Mit zunehmendem Schallpegel nehmen die Verluste zu und die Resonanzfrequenz verschiebt sich zu höheren Frequenzen. Bei geringen Schallpegeln zeigen stark abgerundete BR-Rohre besonders geringe Verluste. Oberhalb des Grenzschaallpegeln zeigen sie ein abruptes Auftreten der Kompression und eine starke Verschiebung der Resonanzfrequenz. $NFR=0.5$ bietet einen günstigen Kompromiss sowohl bei geringen Pegeln als auch nah dem Maximalpegel.

5. **Verzerrungen:** Bei mittleren und kleinen Pegeln nehmen die Verzerrungen mit zunehmender Verrundung ab. Bei großen Pegeln nahe dem Grenzpegel bietet $NFR=0.5$ die geringsten Verzerrungen.
6. **Strömungsbildung:** Bei einem Rundungsverhältnis von $NFR=0.5$ bildet sich im gesamten Schallpegelbereich das gleichmäßigste Strömungsprofil in der Bassreflexöffnung aus. Bei größeren NFR kommt es bei hohen Schallpegeln zu einer Ablösung der Strömung von der Wand und zur Ausbildung eines zentralen Jets.
7. **Rauhigkeit der Wand:** Eine raue Wand führt nur bei turbulenten Strömungen zu einer Reduktion der Wandreibung. Bei einer laminaren Strömung wie sie in der Bassreflexöffnung vorliegen, vergrößert die Wandrauhigkeit die Verluste und ist daher zu vermeiden. Die von B&W propagierte Golfballoberfläche der Bassreflexöffnung ist wohl eher ein Werbeargument.
8. **Komplexe Profile der Bassreflexöffnung:** Wichtig ist vor allem eine großzügige Abrundung der Bassreflexöffnung. Die Details der Geometrie besitzen nur einen geringen Einfluss auf das Ergebnis. Es werden keine besseren Ergebnisse als bei gleichmäßiger Rundung mit $NFR=0.5$ erreicht.
Anmerkung: Im Mai 2010 hat der Harman Konzern dann doch eine spezielle Bassreflexgeometrie patentiert die etwas besser sein soll. Sie ist aber wesentlich schwieriger zu berechnen und erfordert ein genaues Bauen. „Speaker Port System for Reducing Boundary Layer Separation, US 7,711,134B2“. Auch hier sind die Unterschiede wahrscheinlich recht gering, das Patent aber gut geeignet um die Werbetrommel zu rühren.
9. **Asymmetrie:** Unterschiedliche Strömungsbedingungen am Eingang und Ausgang der Bassreflexöffnung führen zu erhöhten K₂-Verzerrungen. Frei stehende Endungen im Boxeninnern in Kombination mit bündigen Endungen an der Schallwand führen zu deutlichen Verzerrungen. Bereits ein Flansch mit 15mm Breite am Abschluss im Boxeninnern genügt für einen Ausgleich.
Anmerkung: Ein eindeutiges Ergebnis, das man einfach berücksichtigen kann. Weg mit frei stehenden Bassreflexrohren!
10. **Kühlung:** Die Luftströmung durch die Bassreflexöffnung führt zu einem Luftaustausch und zur Kühlung der Box und des Lautsprechers. Große Bassreflexöffnungen mit starker Abrundung bringen auf Grund der geringen Strömungsgeschwindigkeiten geringere Kühleffekte als kleine Bassreflexrohre mit turbulenten Strömungen. Eine gute Kühlung ist aber nur bei hochleistungs-PA Systemen wichtig und für Hifi-Lautsprecher kein relevantes Thema.

4. Dimensionierung einer aerodynamisch optimierten Bassreflexöffnung

Beispielhaft wird die Auslegung anhand des **ari acoustics** Lautsprechers HE-Maxi-Regal gezeigt. Die wichtigsten Kenngrößen dieses Lautsprechers:

Membranfläche:	131	cm ²
Membranauslenkung:	±5,5	mm
Netto Gehäusevolumen:	20	l
Angestrebte Abstimmfrequenz:	32	Hz

Schritt1: Dimensionierung des Mindestdurchmessers

Durch einen ausreichend großen Mindestdurchmesser soll gewährleistet sein, dass auch bei voller Membranauslenkung bei der Bassreflexfrequenz keine Kompression auftritt. Die maximale Strömungsgeschwindigkeit die in der Bassreflexöffnung auftreten kann liegt bei

$$v_D = \frac{16 \cdot A_{SP} \cdot x_{\max} \cdot f_{br}}{\pi \cdot D_{\min}^2} \quad (1)$$

Hierbei wird angenommen, dass die Membran des Lautsprechers mit der Fläche A_{SP} ihre maximale Auslenkung x_{\max} erfährt und bei der Abstimmfrequenz f_{br} entsprechend viel Luft durch die Bassreflexöffnung bewegt wird.

Wie die Untersuchungen zeigen, sollte die Reynolds-Zahl also sicher unter $Re < 10^5$ liegen. Wobei die Reynolds-Zahl wie folgt aus der Strömungsgeschwindigkeit im Rohr v_D , dem Durchmesser D_{\min} und der kinematischen Viskosität von Luft $\nu = 0.132 \text{ cm}^2/\text{s}$ gebildet wird:

$$Re = \frac{v_D \cdot D_{\min}}{\nu} \quad (2)$$

Aus Gleichung (1) und (2) lässt sich der Durchmesser D_{\min} , für den beide Gleichungen erfüllt werden, bestimmen:

$$D_{\min} = \frac{1}{Re_{\text{grenz}}} \cdot \frac{16 \cdot A_{SP} \cdot x_{\max} \cdot f_{br}}{\pi \cdot \nu} \quad (3)$$

Mit einem ordentlichen Sicherheitsabstand zur Kompression bei $Re = 10^5$ wähle ich ein $Re_{\text{grenz}} = 2 \cdot 10^4$.

Für die HE-Maxi-Regal ergibt sich so ein sinnvoller Durchmesser von $D_{\min} = 4,5 \text{ cm}$, bzw. eine minimale Strömungskanalfläche von $A_{\min} = 16 \text{ cm}^2$.

Kleiner sollte der minimale Strömungsdurchmesser nicht werden – größer schon. Ein Bassreflexrohr mit großzügiger Aufweitung und 5cm Mindestdurchmesser ist also durchaus geeignet.

Schritt 2: Bestimmung der Länge

Die Abstimmfrequenz eines Bassreflexgehäuses kann grundsätzlich aus der effektiven Strömungsfläche des Bassreflexrohres A_{eff} , dessen effektiver Länge L_{eff} , dem Gehäusevolumen V_b und der Schallgeschwindigkeit c wie folgt berechnet werden:

$$f_{br} = \frac{c}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{A_{eff}}{L_{eff} \cdot V_b}} \quad (4)$$

In die Bestimmung der effektiven Flächen und Längen geht die Aufweitung des Bassreflexkanals mit ein, so dass sich die Werte wie folgt ergeben

$$A_{eff} = [1 + 0,576 \cdot NFR] \cdot A_{min} \quad (5)$$

$$L_{eff} = L + D_{min} \quad (6)$$

Mit Gleichungen (5) und (6) in (4) eingesetzt lässt sich die geforderte Länge direkt berechnen:

$$L = \frac{[1 + 0.576 \cdot NFR] \cdot A_{min} \cdot c^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_{br}^2 \cdot V_b} - D_{min} \quad (7)$$

$$L = [1 + 0.576 \cdot NFR] \cdot 23.28cm - 4.5cm \quad (\text{Werte für HE-Maxi2-Regal}) \quad (8)$$

Als günstiges Aufweitungsverhältnis der Bassreflexöffnung hat sich ein $NFR = 0.5$ herausgestellt. Somit ergibt sich eine Länge von 25,5 cm. Bei $NFR=0.25$ ergibt sich eine Länge $L= 22,1$ cm und bei einer geraden Wandung mit $NFR=0$ ergibt sich die Länge zu $L=18.8$ cm.

Die bisherigen Untersuchungen und Beschreibungen gehen immer von einer runden Bassreflexöffnung aus. Eine Bassreflexöffnung mit speziell großen Rundungen zu bauen ist aber für einen „normalen“ DIY-Boxenbauer, in dessen Werkstatt keine Drechselmaschine steht, nicht herstellbar. Daher erfolgt im aktuellen Kapitel der Übertrag auf eine einfache zweidimensionale Struktur, die **Aero2D** Bassreflexöffnung.

5. Die Aero2D Bassreflexöffnung

Grundgedanke ist, dass die Bassreflexöffnung rechteckig gestaltet wird und nur eine Seite aufgeweitet wird. Prominentes Beispiel für eine solche Bassreflexöffnung ist die „TAD Reference One“. Bei TAD heißt dies „SILENT Enclosure“.

Für den Aufbau der Maxi-Regal wurde die Höhe der Bassreflexöffnung mit 5cm festgelegt entsprechend 2 MDF-Platten mit 25mm Stärke. Somit ergibt sich eine minimale Kanalbreite von 3,2cm die nicht unterschritten werden sollte. Für die äußeren Abmessungen wurde festgelegt, dass die maximale Breite des Reflexkanals $D_{\max}=17\text{cm}$ nicht überschreitet und die Länge $L=24\text{cm}$ betragen sollte.

Mit den gegebenen Abmessungen ergibt sich direkt die Aufweitung jeder Kanalseite:

$$D_a = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{2} \quad (9)$$

Der Krümmungsradius der Wandung berechnet sich daraus mit:

$$r = \frac{L^2 + 4 \cdot D_a^2}{8 \cdot D_a} \quad (10)$$

Womit auch der NFR-Faktor für die gekrümmte Wand berechnet werden kann:

$$NFR = \frac{L}{2 \cdot r} = \frac{4 \cdot D_a \cdot L}{L^2 + 4 \cdot D_a^2} \quad (\text{Der NFR-Faktor der ebenen Wand ist } 0) \quad (11)$$

Somit ergeben sich für die Maxi-Regal die folgenden Werte:

$$\begin{aligned} D_a &= 6,9 \text{ cm;} \\ r &= 13,9; \\ NFR_x &= 0,86 \text{ (horizontale Krümmung);} \\ NFR_y &= 0,00 \text{ (vertikale Krümmung, ebene Wandung);} \\ NFR_{\text{mittel}} &= 0,5 \cdot [NFR_x + NFR_y] = 0,43 \text{ mittlere Krümmung;} \\ A_{\text{eff}} &= 20,0 \text{ cm}^2 \text{ effektive Strömungsfläche nach Gl. (5) von} \\ L_{\text{eff}} &= 28,5 \text{ cm effektive Länge nach Gl. (7)} \end{aligned}$$

Und letztendlich:

$$f_{\text{br}} = 32 \text{ Hz} \quad \text{Resonanzfrequenz des Gehäuses nach Gl (4)}$$

Voila!

Viel Spaß beim Nachbauen wünscht Euch Euer
Dr. Markus Beck