

Simulation komplexer Lautsprechergehäuseformen

Beispiel: Bandpaß mit zwei Wandlern

Jörg Panzer, Panzer und Partner
Steinstr. 15, D-81667 München

Am Beispiel eines Mehrkammer-Bandpaßgehäuses für die Baßwiedergabe wird die Simulation mit Hilfe der klassischen Methode der konzentrierten Elemente und eindimensionalen Wellenleiter demonstriert. Verwendet wird der Simulator AkAbak[®], ein MS-Windows[™] basierendes Programm zur Simulation und Entwicklung elektroakustischer Netzwerke.

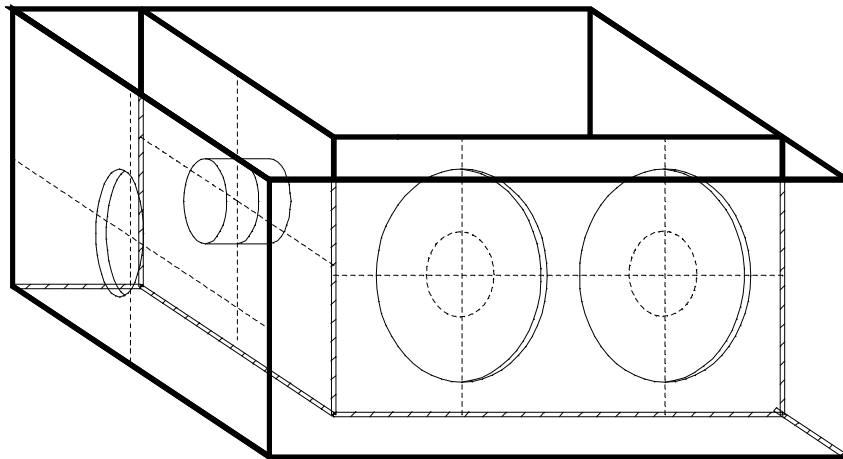
0. Einführung

Da hier zur Beschreibung der Wellenausbreitung in Hohlräumen nur diskrete Komponenten und eindimensionale Wellenleiter zur Verfügung stehen, befindet man sich in der sogenannten "Linienwelt"; es existieren nur Punkte (diskrete Elemente) und Linien (Wellenleiter). So beschränkt, sind Eigenschaften wie "oben", "unten", "links" und "rechts" unbekannt. Nur "vor" und "zurück" sind die Richtungen in denen sich die Schallwelle fortpflanzen kann. Gegenüber dem dreidimensionalen Raum sind physikalische Vorgänge in dieser Welt natürlich leichter zu beschreiben.

In der Linienwelt bewegt sich eine Welle stets geradeaus, das heißt vorwärts und rückwärts, aber niemals in diejenige Richtung einer anderen Dimension. Um die Wirkung von Druckgradienten in andere Richtungen zu berücksichtigen, bedient man sich der zur Verfügung stehenden diskreten Elemente und Wellenleiter.

Als Beispiel stelle man sich eine lange Röhre mit einer Biegung vor. Die Welle bewegt sich vorwärts und rückwärts entsprechend den Randbedingungen. Eine der Randbedingungen wird durch die Biegung geschaffen. In der Linienwelt wird die Biegung mit Hilfe einer akustischen Masse und ggf. einer Nachgiebigkeit modelliert.

Die Vorgehensweise beim Modellieren ist folgende: Zuerst schafft man sich ein grobes Modell. Ein grobes Modell ist so beschaffen, daß vor allem grundlegende Resonanzen erfaßt werden. In einem weiteren Schritt testet man die Sensibilität der Analyse bezüglich Details, wie im letzten Beispiel die akustische Masse, welche die Rohrbiegung repräsentiert. Wenn man keine oder nur eine sehr geringe Wirkung durch die Anbringen der Masse zwischen den akustischen Röhren feststellt, so kann man das Element vernachlässigen. Andererseits, bei hoher Sensibilität des Systems gegenüber diesem Punkt, ist es angebracht, das Modell an dieser Stelle zu verfeinern.



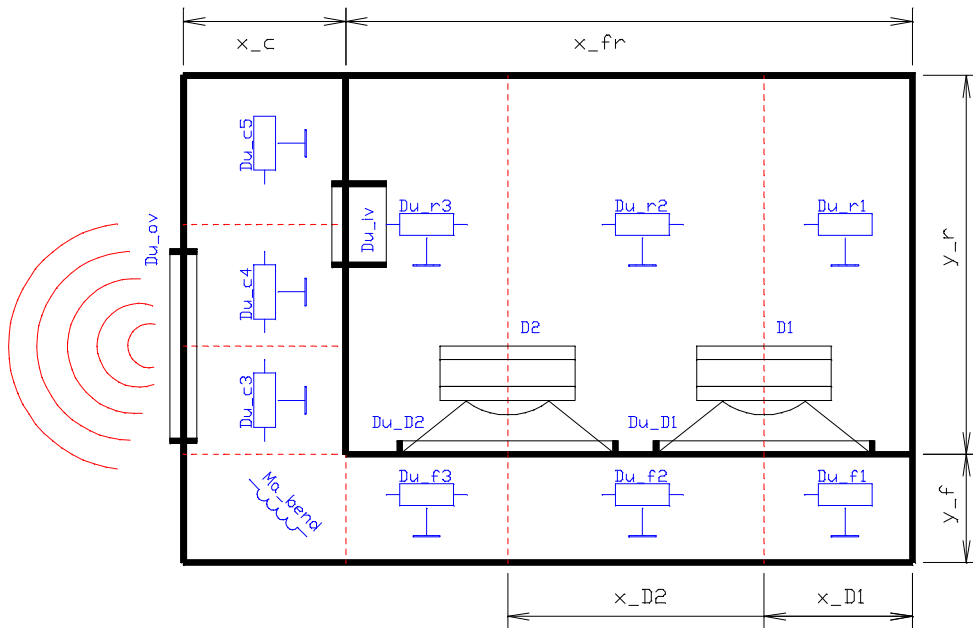


Abbildung 1 Skizze des Bandpaßgehäuses

1. Beispielgehäuse

Abbildung 1 zeigt das untersuchte Bandpaßgehäuse. Angetrieben wird es durch zwei Lautsprecherchassis. Vorder- und Rückseite der Membranen werden akustisch durch die innere Schallwand getrennt. Die Schallwelle, die von der Frontseite abgestrahlt wird, bewegt sich durch ein Rohrsystem und wird schließlich am Ausgang der Tunnelöffnung, welche sich auf der linken Seite des Gehäuses befindet, in den freien Raum abgestrahlt. Der rückwärtig erzeugte Schall wandert zuerst durch einen wesentlich größeren Hohlraum, welcher durch einen inneren Tunnel mit den äußeren Hohlräumen verbunden ist.

Bei sehr tiefen Frequenzen, wenn die Wellenlängen wesentlich größer sind als die Abmaße des Gehäuseinneren, ist es möglich, dieses Gehäuse nur mit Hilfe von konzentrierten Elementen wie die akustische Masse, die Nachgiebigkeit und den Widerstand zu modellieren. Die Bandbreite der Analyse kann aber erheblich zu höheren Frequenzen hin verbreitert werden, wenn statt dessen Wellenleiter verwendet werden.

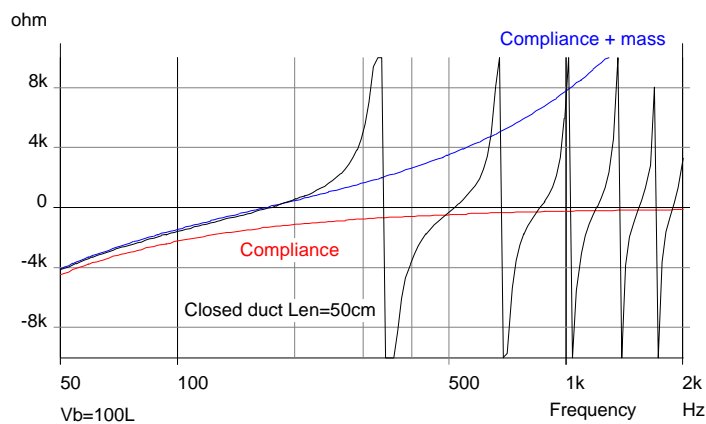


Abbildung 2 Vergleich von Reaktanzen.

Eindimensionale Wellenleiter sind Vierpole, dessen Impedanzen die Schwingungsmoden in einer Richtung widerspiegeln. Analysiert man zum Beispiel ein geschlossenes Gehäuse mit Hilfe eines abgeschlossenen Wellenleiters, dann verhält sich die Eingangsimpedanz bei sehr tiefen Frequenzen wie diejenige einer Nachgiebigkeit (Abbildung 2). Mit steigender Frequenz allerdings verringert sich der Betrag der Reaktanz, um nach der ersten Eigenfrequenz eine Masse-Reaktanz anzunehmen. In Abbildung 2 ist zum Vergleich zusätzlich die Reaktanzkurve einer Serienschaltung von Nachgiebigkeit und Masse eingezeichnet.

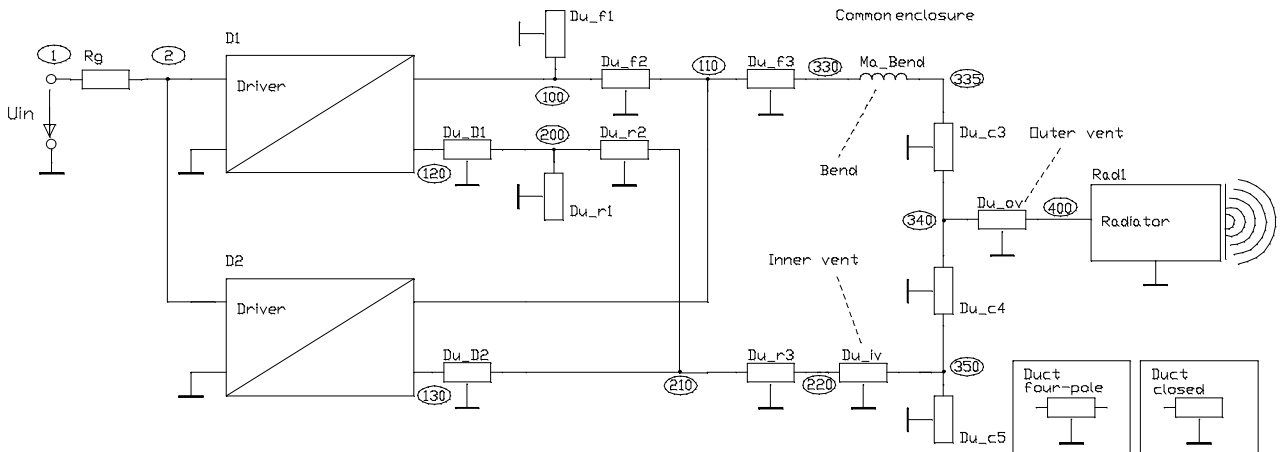


Abbildung 3 Ersatzschaltbild mit eindimensionalen Wellenleitern

Abbildung 3 zeigt das Ersatzschaltbild des Beispiellautsprechers. Zwei elektrisch parallel geschaltete Wandler werden über den Generatorwiderstand R_g mit der Spannung U_{in} versorgt. Weitere elektrische Bauelemente und abstrakte Filterkomponenten können der Schaltung vorgeschaltet werden, sollen aber hier nicht weiter mit einbezogen werden.

Die beiden Pole auf der rechten Seite der Wändlersymbole repräsentieren Vorder- und Rückseite der Wandlerrmembran. Die Rückseiten beider Membranen (unterer Pol) strahlen jeweils durch einen kurzen ringförmigen Duct (Du_{D1} , Du_{D2}) in das rückwärtige Gehäuse. Diese Elemente spiegeln die Montageweise wieder, bei welcher der Schall der Membranrückseite durch die Versenkung in der Schallwand geführt wird. Alternativ könnte man hier auch das Element "akustische Masse" verwenden.

Die Hohlräume vor und hinter der Schallwand sind durch eine Kette von Ducts modelliert. Die frequenzabhängige Wellenausbreitung wird nach Abbildung 1 von rechts nach links berechnet. Die Duct-Kette beginnt mit geschlossenen Wellenleitern (Du_{f1} bzw. Du_{r1}).

Man beachte hier, daß der Ausgang geschlossener akustischer Röhren im Ersatzschaltbild als nicht geerdet gezeichnet wird, da an der Abschlußwand die Flußgröße, d.h. die Volumengeschwindigkeit, zu Null wird.

Die Strecke von Membran 1 zu Membran 2 simulieren die Ducts " Du_{f2} " bzw. " Du_{r2} ".

Im Vordergehäuse erstreckt sich " Du_{f3} " von Membran 2 bis zur Biegung. Im rückwärtigen Gehäuse ist " Du_{r3} " die Verbindung zwischen Membran 2 und dem inneren Tunnel " Du_{iv} ".

Das Vordergehäuse ist über eine Rohrbiegung und das Rückgehäuse über einen Tunnel mit dem gemeinsamen Gehäuse "Common" verbunden.

Nach [Mor] erzeugt eine 90°-Biegung von Wellenleitern mit konstantem Querschnitt eine Reaktanz, welche einer akustischen Masse von $Ma=1.85/WD$ entspricht. WD ist die Weite des Tunnels bzw. im verwendeten Beispiel die Gehäusehöhe z . Mit dieser Formel ergibt sich für die akustische Masse " Ma_{Bend} " ein Wert von $Ma=4.62\text{kg/m}^4$. Mit einem etwas kleineren Wert von $Ma=3.5\text{kg/m}^4$, erhält man allerdings ein besseres Simulationsergebnis.

Zwischen dem rückwärtigen Gehäuse und dem gemeinsamen Gehäuse liegt der innere Tunnel "Du_iv" mit einem Durchmesser von $dD=6.7\text{cm}$ und einer geometrischen Länge von $L=5.5\text{cm}$. Wenn zwei akustische Röhren mit unterschiedlichem Querschnitt verbunden sind, entsteht eine zusätzliche akustische Masse. Man kann diese entweder durch ein diskretes Element berücksichtigen oder einfach dadurch, indem man in der Simulation für die Länge des Tunnels einen größeren Wert eingibt. Letzteres ist die sogenannte Endungskorrektur. Strahlt die Tunnelöffnung in den freien Raum wird die Endungskorrektur durch die Reaktanz der Strahlungsimpedanz gegeben. Innerhalb von Gehäusen aber hängt der Wert von dem Unterschied der angrenzenden schnitte ab. In unserem Beispiel beträgt die Endungskorrektur des inneren Tunnels $L_+=3.8\text{cm}$, d.h. die effektive Gesamtlänge von Duct "Du_iv" ist gleich $L_{\text{eff}}=9.3\text{cm}$.

Wenn die Luft durch den engen Tunnel gepreßt wird, entstehen zwangsläufig Viskositäts- und Wirbelverluste. Per Voreinstellung berechnet das Programm AkAbak Viskositätsverluste in Wellenleitern. Zusätzlich treten letztere aber auch in Schallfeldern mit stark unterschiedlichem Geschwindigkeitsprofil auf, zum Beispiel bei Einströmung in eine enge Passage. Der Parameter "QD/fo" berücksichtigt diese zusätzlichen Widerstände im Wellenleiter.

Auch das gemeinsame Gehäuse besteht aus einer Kette von Wellenleitern, in dessen Mitte derjenige Tunnel "Du_ov" angebracht ist, an dessen Ausgang die Abstrahlung in den freien Raum erfolgt. Man beachte, daß, obwohl die Kette von Röhren des gemeinsamen Gehäuses räumlich senkrecht zu den beiden anderen steht, keinerlei Positionsangabe über die Richtung erfolgt. Nur zusätzlich angebrachte Massen berücksichtigen den Richtungswechsel.

Der Austrittstunnel "Du_ov" besteht aus einem Loch im Gehäuse. Auf der Innenseite ist eine kleine Endungskorrektur von $L_+=1.7\text{cm}$ angebracht. Die Außenseite des Lochs strahlt den Schall in den freien Raum ab. Das Simulationsprogramm sieht hierfür ein komplexes Element namens "Radiator" vor. Der Radiator liefert zum einen die korrekte Strahlungsimpedanz inklusive Brechungseffekten an der endlichen Schallwand und Reflexionen an nahegelegenen Wänden. In unserem Beispiel nicht zum Tragen kommt die Membranform, da die abstrahlende Tunnelfläche plan ist. Zum anderen berechnet das Radiator-Element die Abstrahlung in den freien Raum inklusive Richtcharakteristik, welche ebenfalls die Membranform, Brechungseffekte und Reflexionen mit einbezieht.

3. Skript

Das äquivalente Ersatzschaltbild von Abbildung 3 kann nun in die Skriptsprache von AkAbak umgesetzt werden (siehe Anhang). Das Programm selbst besitzt keine graphische Eingabemöglichkeit. Normalerweise wird man sich zuerst mit Hilfe einer Skizze über die Funktionsweise der Struktur klar werden und dann einen Schaltplan entwerfen, welcher im Folgenden in ein Skript umgesetzt wird.

Am Skriptanfang sind in einer sogenannten "Definition" die Parameter des verwendeten Wandlers untergebracht. Die Wandler-Parameter wurden mit dem im Programm eingebauten Bestimmungswerkzeug aus der komplexen Impedanzmeßkurve der Wandler ermittelt. Weiter unten im Skript beziehen sich zwei Driver-Elemente auf diese Definition.

In der Definition "Def_Const" lassen sich Zahlenwerte festlegen, auf die im ganzen Skript zugegriffen werden kann. Def_Const verwendet den eingebauten Formel-Parser, so daß neben reinen Zahleneingaben auch Formeln oder Formelsysteme angegeben werden können. Normalerweise können Parameter in der zugehörigen Einheit bzw. Untereinheit wie z.B. "cm", "L" oder "uF" beschrieben werden. Innerhalb Def_Const oder bei Angaben, welche vom Formelparser berechnet werden, werden Zahlenwerte in SI-Einheiten angenommen (z.B. $2e-2$ für 2cm).

Im verwendeten Beispiel beschreiben die Zahlenwerte in Def_Const die Geometrie des Gehäuses. Zum Beispiel steht "z" für die Höhe des Gehäuses von $z=40\text{cm}$. Mit diesem Arrangement fällt es leicht, die Simulation auch für andere Abmaße zu testen, einfach indem man an zentraler Stelle

Die nächsten Zeilen beginnen mit dem eigentlichen Netzwerk. Jedes Netzwerk beginnt mit dem Schlüsselwort "System". Die Elemente des Netzwerks sind mit Hilfe von Knotennummern verbunden. Parametern werden entweder Zahlen in der jeweiligen Einheit zugeordnet oder, in

geschweifte Klammern gesetzt, Formeln, die wie besprochen auch Werte beinhalten können, welche vorher in Def_Const deklariert worden sind.

4. Simulation

Nach der Eingabe der Struktur und der Parameter wird das Skript interpretiert und in einen binären Code umgesetzt, welcher dann die Grundlage zur schnellen Berechnung dient.

AkAbak's Rechengrundlage ist die lineare Systemtheorie. Die Simulation wird in der Frequenzebene durchgeführt durch das Lösen der Knotenpotentialmatrix.

Die Ausgabe am gewählten Beobachtungspunkt ist die Systemantwort auf den Dirac-Impuls. Der Beobachtungspunkt kann eine der Netzwerkgrößen sein, wie zum Beispiel Strom und Spannung oder Druck und Volumengeschwindigkeit oder ein Abhörpunkt im freien Raum. Dargestellt wird der Frequenzgang oder die Zeitantwort. Letztere wird mit Hilfe der FFT berechnet.

4.1 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise beim Modellieren und Simulieren hängt natürlich von dem Ziel ab, welches man mit dem Simulator anstrebt. Häufig will man zum Beispiel nur eine Idee testen oder für Lehrzwecke die Wirkungsweise grundlegender Schaltungen demonstrieren.

Bei der Konstruktion strebt man eine gute Kontrolle der Systemeigenschaften an. Zum einen möchte man schwer meßbare Größen wie zum Beispiel den Membranhub oder den Druck in einem der Tunnel ermitteln. Zum anderen läßt eine gelungene Simulation die Skalierung von Parametern zu, um einerseits zu optimieren und andererseits die Sensibilität der Übertragungsfunktion gegenüber Parameterschwankungen zu testen.

Bei der Konstruktion gesellen sich zur Simulation der Aufbau und die Messung. Zunächst formuliert man die Idee und führt eine Blindsimulation durch. Struktur und Parameterwerte sollten plausibel und auf die offensichtlichsten Eigenschaften der Struktur begrenzt sein. Nach dem Aufbau legt man Beobachtungspunkte fest, deren Systemantworten das Gerät möglichst vollständig beschreiben. In unserem Beispiel wird hierzu der Verlauf der Eingangsimpedanz und derjenige des Schalldrucks direkt am Ausgangstunnel verwendet. Nach dem Aufbau mißt man die Frequenzgänge an den gewählten Beobachtungspunkten und legt die Meßkurven den Simulationskurven unter, um sie vergleichen zu können.

Im sogenannten Postprocessing werden nun die Parameterwerte variiert und ggf. Elemente zugefügt oder verändert, bis Meßkurven und Simulationskurven plausibel übereinstimmen. Da die Natur über unendlich viele Elemente verfügt, das Simulationsverfahren aber nur grob nachbilden kann, werden viele Wirkungen überspitzt oder zu scharf dargestellt. Es bedarf einiger Übung diese Plausibilität der Übereinstimmung herzustellen. In vielen Fällen stellt sich das Postprocessing aber als diejenige Phase der Konstruktion heraus, bei der man am meisten über die aufzubauende Struktur lernt.

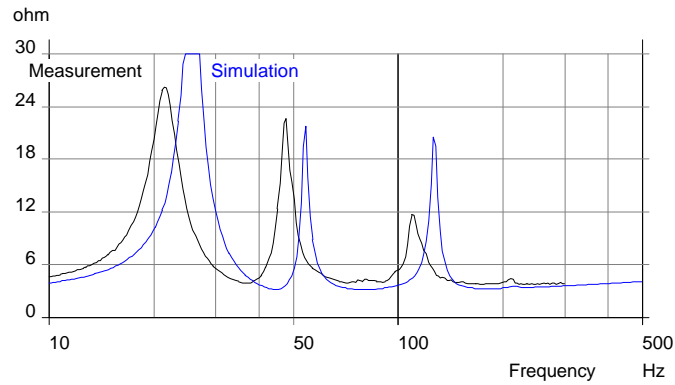


Abbildung 4 Erster Versuch. Betrag der Eingangsimpedanz.
Blindsimulation. Zum Vergleich Messung

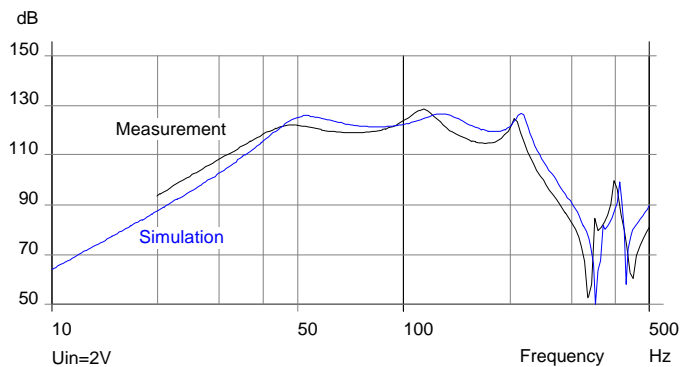


Abbildung 5 Erster Versuch. Schalldruckpegel direkt am Ausgangstunnel.
Blindsimulation. Zum Vergleich Messung

4.2 Blindsimulation

Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen die Simulationen der elektrischen Eingangsimpedanz und des Schalldruckpegels direkt am Ausgangstunnel mit den Parametern wie sie vor dem Aufbau des Gehäuses angesetzt wurden. Die Struktur des Skripts ist fast identisch mit dem endgültigen Skript (siehe Anhang). Lediglich die beiden Tunnel "Du_D1" und "Du_D2" fehlen, welche den Schalldurchtritt direkt hinter der Membran modellieren. Ferner fehlen die Endungskorrekturen. Die Masse der Biegung hat hier noch den theoretischen Wert von $M_a=4.6\text{kg/m}^4$.

Im Vergleich mit der Messung erkennt man, daß die Struktur schon ganz gut wiedergegeben wird, doch deutlich zu erkennen ist, daß die Eigenfrequenzen zu hoch liegenden.

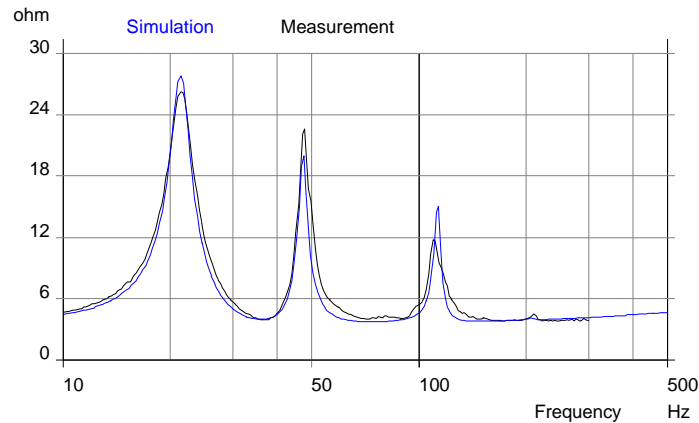


Abbildung 6 Betrag der Eingangsimpedanz.
Simulation und Messung

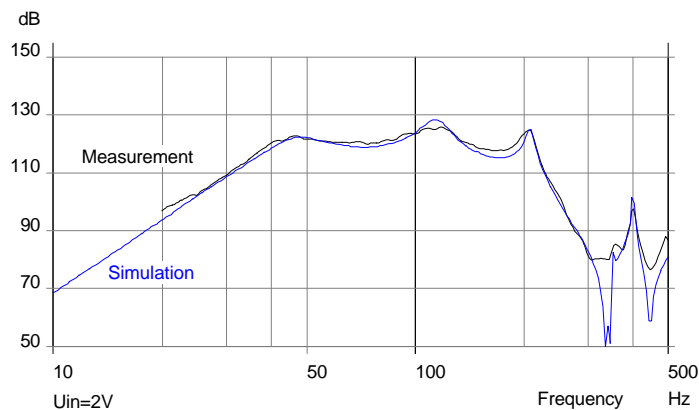


Abbildung 7 Schalldruckpegel direkt am Ausgangstunnel.
Simulation und Messung

4.3 Endgültige Simulation

Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen die Kurven an den Beobachtungspunkten der endgültigen Simulation im Vergleich mit der jeweiligen Messung. Die Gewißheit, daß mit diesen Werten die Simulation vertrauenswürdig ist, gewinnt man vor allem während des Postprocessings. Dadurch, daß man mit Überlegung diesen oder jenen Wert verändert und sogleich die entsprechende Veränderung der Kurve sieht, erhält das Postprocessing eine gewisse Dynamik. Es ist immer wieder erstaunlich festzustellen, wie genau die geometrischen Daten eingehalten werden müssen. Zum Beispiel führt eine kleine Änderung der Länge der Wellenleiter oder eine leichte Änderung des Membrandurchmessers zu drastischen Veränderungen in der Wiedergabekurve, welche nicht durch Änderung anderer Parameter kompensiert werden kann.

Nachdem das Skript ein vertrauenswürdiges (wenn auch grobes) elektroakustisches Abbild des Lautsprechers ist, lassen sich nun leicht interessante Größen untersuchen, die meßtechnisch schwer zu erfassen sind.

Zunächst noch ein Wort zur verwendeten Schalldruckbestimmung. Normalerweise simuliert und mißt man den Schalldruck im freien Raum in einem bestimmten Abstand zum Lautsprecher. Zusätzliche Angaben zur Positionierung, Schallbrechung und Reflexion sind dann nötig. Der verwendete Beispiellautsprecher aber besitzt nur eine abstrahlende Öffnung, welche im Vergleich zur Wellenlänge klein ist. In diesem Fall ist es möglich, den Schalldruck direkt am Ausgangstunnel zu bestimmen mit dem Vorteil, daß Probleme mit der Raumakustik entfallen.

Weiterhin ist das Bild der so erhaltenen Schallpegelkurve gleich derjenigen des Pegels der akustischen Ausgangsleistung.

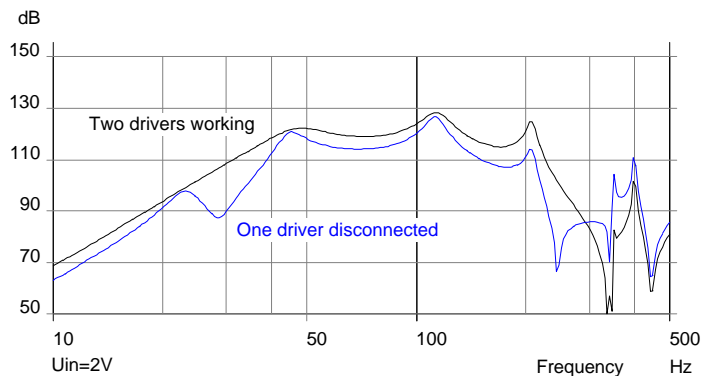


Abbildung 8 Schalldruckpegel am Ausgangstunnel.
Wandler D1 elektrisch abgekoppelt.

4.3.1 Schallpegelverlauf bei Ausfall eines Wandlers

Abbildung 8 zeigt die Wirkung auf den Schalldruckverlauf, wenn die elektrische Zuleitung zu Wandler D1 unterbrochen wird. D1 wirkt dann als passive Membran, dessen Pol-/Nullstelle im Frequenzbereich von 20Hz .. 30Hz liegt.

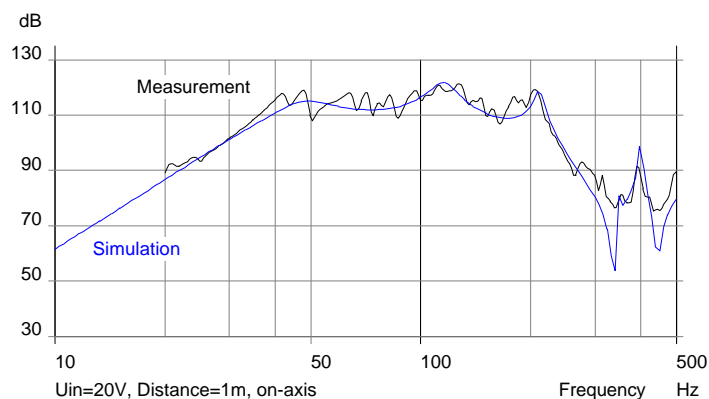


Abbildung 9 Schallpegel im Abhörraum bei $U_{in}=20V$ und $r_1=1m$
Simulation und Messung (Raumakustik überlagert)

4.3.2 Schallpegelverlauf im freien Schallfeld ($U_{in} = 20V$)

Abbildung 9 zeigt den Schallpegelverlauf im Abhörraum im Abstand von $r=1m$ bei einer Eingangsspannung von $U_{in}=20V$. Die Simulation beinhaltet nun zusätzlich einen Reflektor (der Boden auf dem der Lautsprecher steht) und Schallbrechung. Die Lp-Meßkurve zeigt deutlich die Wirkung der Raummoden (Raumabmessungen: 7m x 5m x 4m).

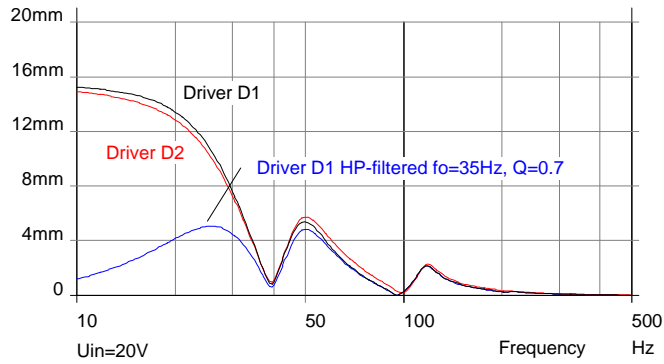


Abbildung 10 Membranhubverlauf von Wandler D1 und D2 und Wandler D1 mit Hochpaßfilter bei $f_0=35\text{Hz}$

4.3.2 Membranhubverlauf

Abbildung 10 zeigt den Membranhubverlauf von Wandler D1 und D2 bei einer Eingangsspannung von $U_{in}=20\text{V}$. Die Kurven sind leicht unterschiedlich aufgrund der asymmetrischen Lage im Gehäuse.

Die dritte Kurve in Abbildung 10 zeigt die Wirkung eines zweipoligen Hochpaßfilters auf den Membranhub. Das Maximum bleibt dann bei allen Frequenzen unterhalb von $X_{max}=5.08\text{mm}$.

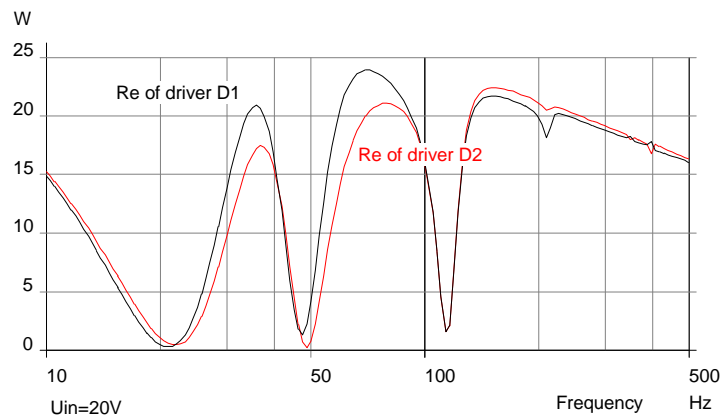


Abbildung 11 Elektrische Wirkleistung im Widerstand R_e der Schwingspule von Wandler D1 und D2

4.3.3 Elektrische Eingangsleistung

Abbildung 11 zeigt den Verlauf der elektrischen Wirkleistung im Widerstand der Schwingspule von Wandler D1 und D2. Wandler D1 wird bei 70Hz um $P_{el}=2.84\text{W}$ mehr belastet als Wandler D2. Wie beim Membranhub spiegelt sich auch hier der asymmetrische Aufbau des Gehäuses wieder.

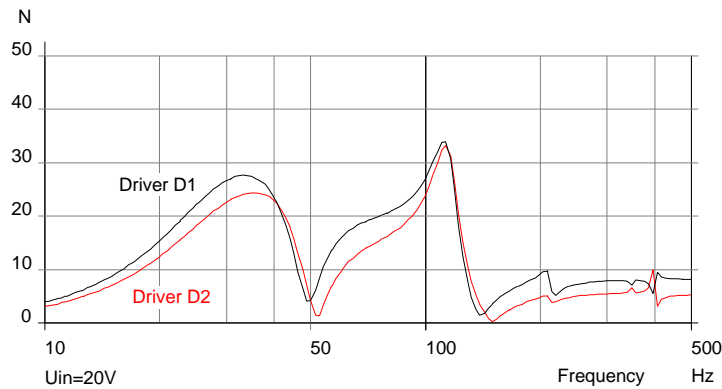


Abbildung 12 Auf die Membran wirkende Kraft

4.3.4 Auf die Membran wirkende Kraft

Abbildung 12 zeigt die Kraft, welche bei $U_{in}=20V$ auf die Membranen wirkt. Das Maximum liegt bei 112Hz mit $F=34N$. Um ein Gefühl für diese Größe zu bekommen, stelle man sich ein Gewicht von ca. 3.4kg vor, welches mit 112Hz um $X=+-1.8mm$ hin- und herbewegt wird.

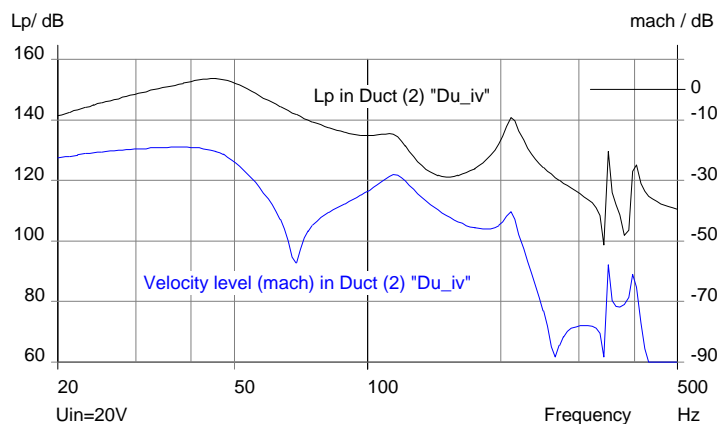


Abbildung 13 Schallpegel und Teilchengeschwindigkeit im inneren Tunnel "Du_iv"

4.3.5 Schalldruck und Geschwindigkeit im Gehäuse

Abbildung 13 zeigt den Schallpegel und die Teilchengeschwindigkeit im inneren Tunnel "Du_iv". Hier ist die Teilchengeschwindigkeit als Pegel relativ zur Schallgeschwindigkeit (mach) angegeben. Beide Größen zeigen besonders unterhalb 50Hz extrem hohe Pegel. Nicht-lineare Eigenschaften der Luft werden an dieser Stelle einen begrenzenden Effekt haben und Verzerrungen verursachen. In der Tat zeigt die Messung des Klirrfaktors bei den Spitzen der Kurven von Abbildung 13 ebenfalls stark erhöhte Werte (Kurve hier nicht gezeigt).

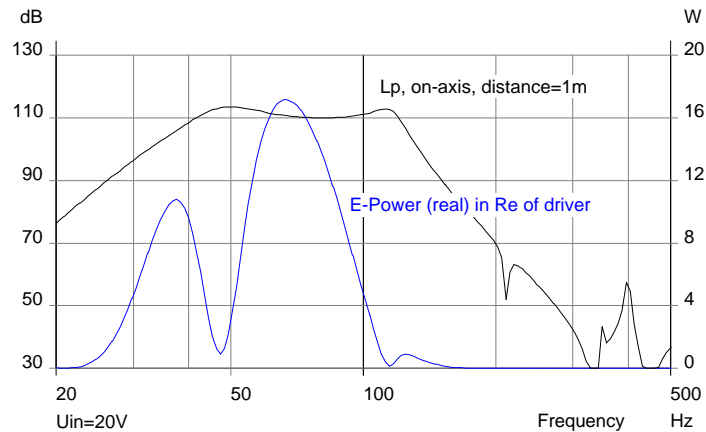


Abbildung 14 Hoch- und tiefpaßgefilterte Lp-Wiedergabe und Belastung der Schwingspule von Wandler D1

5. Filterung

In Abschnitt 4.3.2 wurde schon der vorteilhafte Einsatz eines Hochpaßfilters auf den Membranhub demonstriert. Die Wiedergabekurve kann auch im oberen Frequenzbereich begrenzt werden, so daß zum einen die Anregung höherer Moden im Gehäuse begrenzt wird und zum anderen die Schwingspule entlastet wird.

Abbildung 14 zeigt als Beispiel die hoch- und tiefpaßgefilterte Schallpegel-Wiedergabe und Belastung der Schwingspule von Wandler D1. Der Hochpaß ist ein Filter zweiter Ordnung mit einer Güte von $Q=0.707$ und einer Filterfrequenz von $f_0=35\text{Hz}$. Der Tiefpaß ist ein Butterworth-Filter vierter Ordnung mit einer Nullstelle bei 212Hz . Die Filterfrequenz liegt bei $f_0=100\text{Hz}$. Passiv realisiert führen die Bauteilwerte auf extrem hohe Werte (z.B. $L_{\max}=0.244\text{H}$ und $C_{\max}=0.251\text{F}$ beim Tiefpaßfilter). Aktiv sind diese Filter allerdings leicht zu realisieren und abzustimmen.

Durch die Filterung wird u.a. auch die Belastung der Schwingspule verringert. Belastet man den Lautsprecher z.B. im Frequenzbereich 20Hz bis 500Hz mit dem Testsignal nach IEC268 ($U_{\text{in}}=14.14V_{\text{eff}}$), dann wird die Schwingspule im ungefilterten Zustand mit $P=11.9\text{W}$ belastet. Schaltet man die Filter ein, so sinkt die Belastung auf $P=2.85\text{W}$.

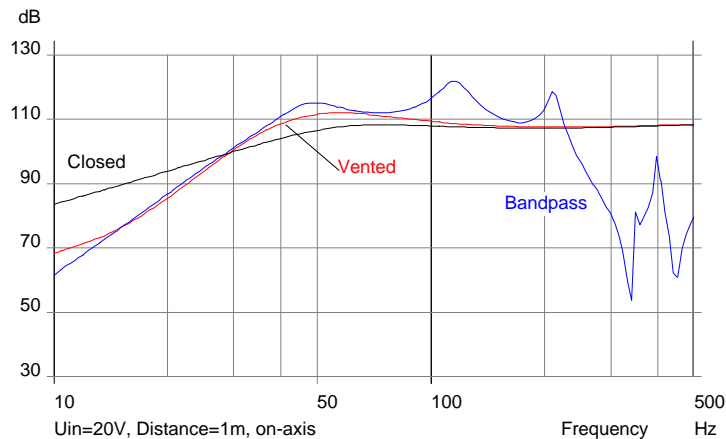


Abbildung 15 Schalldruckpegel dreier äquivalenter Konstruktionen

6. Vergleich Bandpaßgehäuse mit anderen Gehäusen

Abbildung 15 vergleicht den Schallpegelverlauf dreier äquivalenter Baßlautsprecher-Konstruktionen: Das geschlossene Gehäuse, das Reflexgehäuse und das besprochene Bandpaßgehäuse. Alle drei simulierten Gehäusetypen besitzen das gleiche Volumen (ca. $V_b=100L$).

Mit steigender Anzahl an Polstellen und geeigneter Wahl der Güten läßt sich die zur Verfügung stehende Energie mehr und mehr in ein gegebenes Frequenzband konzentrieren. Das geschlossene Gehäuse zum Beispiel besitzt nur eine Polstelle und besitzt demnach die größte Bandbreite. Das einfache Reflexgehäuse enthält zwei Polstellen. Bei richtiger Abstimmung kann die Energie des tiefsten Spektrums zu höheren Frequenzen verschoben werden, was zu einer verstärkten Baßwiedergabe führt. Bandpaßgehäuse lassen sich beliebig komplex gestalten, mit einer Vielzahl von Resonanzstellen, welche dafür sorgen, daß die Schallenergie in ein enges Frequenzband verlagert wird. Voraussetzung für den guten Wirkungsgrad ist natürlich, daß bei den Resonanzen eine möglichst hohe Güte erlangt wird. Ansonsten ist die Bandbegrenzung im Allgemeinen leichter durch elektrische Filterung zu erreichen und man kann sich den Aufwand der komplizierten Formgebung und Abstimmung sparen.

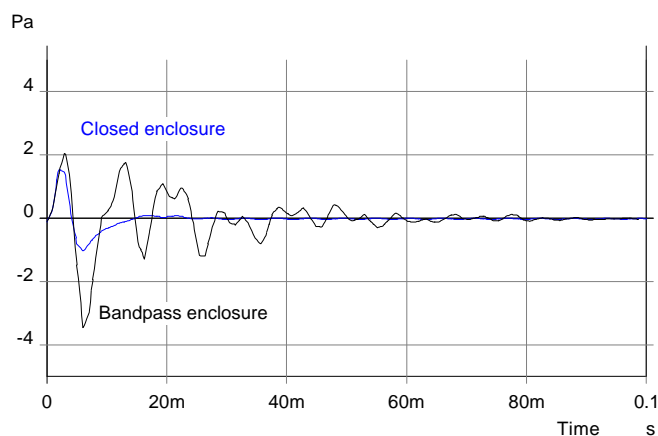


Abbildung 16 Impulsantwort des Schalldrucks in der Zeitebene von Bandpaßgehäuse und geschlossenem Gehäuse

Mit steigender Zahl an Resonanzen kann man die Bandpaßkurve der Schallpegelwiedergabe mehr und mehr einer rechteckigen Form annähern. Betrachtet man die Resonanzen als Harmonische einer Fourier-Reihe, die diese Rechteckform aufbauen, ist klar, daß je enger das Frequenzband wird und je steiler die Flanken zum Sperrband werden, desto länger wird die Impulsantwort in der Zeitebene.

Abbildung 16 zeigt die Impulsantwort des Schalldrucks in der Zeitebene von Bandpaßgehäuse und ¹. Deutlich erkennbar ist, daß die erworbenen Vorteile im Spektrum zu Lasten einer wesentlich längeren Impulsantwort in der Zeitebene gehen (was übrigens auch deutlich wahrnehmbar ist).

7. Zusammenfassung

An Hand eines Mehrkammer-Bandpaßgehäuses für die Baßwiedergabe wird die Anwendung der Simulation mit konzentrierten Elementen und eindimensionalen Wellenleitern demonstriert und mit Meßergebnissen verglichen. Interessante Belastungs- und Wiedergabegrößen werden berechnet und besprochen. Ein Vergleich mit äquivalenten anderen Gehäuseformen macht die Wirkungsweise und Vor- und Nachteile einer Bandpaßkonstruktion deutlich.

8. Dank

Herrn Dipl.-Ing. Philipp Göppl sei gedankt für Aufbau und Messung des Testlautsprechers. Herrn Gottwald Kerin für die Bereitstellung der Räumlichkeiten und Werkstatt. Herrn Dipl.-Ing L. Kirchner für die Bereitstellung des MS-Windows basierenden Audiomeßsystems "ATB-Board".

9. Literatur

- | | |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ber | Beranek, L. L.: "Acoustics"; American Institute of Physics, Inc., New York, USA, 1986 (335 East 45 Street, New York, New York 10017, USA) |
| Mec | Mechel, Fridolin O.: "Schallabsorber I, II"; Stuttgart : Hirzel 1995 |
| Mor | Morse, P., Ingard, K.: "Theoretical Acoustics", Princeton, New Jersey, USA, Princeton University Press, 1986 (41 William Street, Princeton, New Jersey 08540, USA) |
| Zwi | Zwicker E., Zollner, M.: "Elektroakustik", Berlin: Springer 1984 |

¹Das Spektrum des geschlossenen Gehäuses wurde zur Vermeidung von Welligkeit mit einem BU-Tiefpaß gefensterter.

10. Anhang

| AkAbak Script: Multi Chamber Bandpass Enclosure

```
Def_Driver 'Drv 1'
  dD=16.5cm      |Outer diaphragm diameter
  dD1=5cm        |Inner diaphragm diameter
  tD1=2.5cm      |Cone depth
  fp=2.0kHz      |Mass reduction control frequency
  Mms=36g        |Mass of vibrating assembly
  Cms=0.53e-3m/N|Suspension compliance
  Rms=1.23Ns/m   |Suspension resistance
  Bl=10.25Tm     |Conversion factor
  Re=6ohm        |Voice coil resistance factor
  fre=2.1kHz     |Voice coil resistance control frequency
  ExpoRe=0.78    |Voice coil resistance modifier
  Le=12.11mH     |Voice coil inductance factor
  ExpoLe=0.45    |Voice coil inductance modifier

Def_Const      |Global constants
{
  z = 40e-2;    |Enclosure height
  y_f = 10e-2;  |Front enclosure depth
  y_r = 28.4e-2;|Rearward enclosure depth
  x_fr = 51.6e-2;|Front, rearward enclosures width
  x_c = 18.4e-2;|Common enclosure width
  x_D1 = 12.1e-2;|Position of first driver
  x_D2 = 36.3e-2;|Position of second driver
}

System 'S1'
  Resistor 'Rg' Node=1=2 R=0.5ohm |Generator resistance

  Driver 'D1' Def='Drv 1' Node=2=0=100=120
  Driver 'D2' Def='Drv 1' Node=2=0=110=130

|Front enclosure -----
  Duct 'Du_f1' Node=100 Len={x_D1} HD={z} WD={y_f}
  Duct 'Du_f2' Node=100=110 Len={x_D2 - x_D1} HD={z} WD={y_f}
  Duct 'Du_f3' Node=110=330 Len={x_fr - x_D2} HD={z} WD={y_f}

|Rearward enclosure-----
  Duct 'Du_r1' Node=200 Len={x_D1} HD={z} WD={y_r}
  Duct 'Du_D1' Node=120=200 Len=4.5cm dD={18e-2 - 14e-2}
  Duct 'Du_r2' Node=200=210 Len={x_D2-x_D1} HD={z} WD={y_r}
  Duct 'Du_D2' Node=130=210 Len=2.5cm dD={18e-2 - 14e-2}
  Duct 'Du_r3' Node=210=220 Len={x_fr-x_D2-1.6e-2} HD={z} WD={y_r}

|Inner vent (5.5cm+3.8cm end correction)-----
  Duct 'Du_iv' Node=220=350 Len=9.3cm dD=6.7cm QD/fo=0.5

|Acoustical mass of bend -----
  AcouMass 'Ma_Bend' Node=330=335 Ma=3.5kg/m4

|Common enclosure -----
  Duct 'Du_c3' Node=335=340 Len={0.5*y_r} WD={x_c} HD={z}
  Duct 'Du_c4' Node=340=350 Len=5cm WD={x_c} HD={z}
  Duct 'Du_c5' Node=350 Len={0.5*(y_r+y_f)-5e-2} WD={x_c} HD={z}

|Output vent (1.6cm+1.7cm end correction)-----
  Duct 'Du_ov' Node=340=400 Len=3.3cm dD=16cm

|Radiation into free space -----
  Radiator 'Rad1' Def='Du_ov' Node=400
  x=0 y=0 z=0 HAngle=0 VAngle=0 |Mounting position
```