AJHorn 6

Inhalt

1 Einführung 2
1.1 Lizenzvereinbarung 2
1.2 Funktionsumfang 2
1.3 AJHorn 6 Neuerungen 3
1.4 Geschichte des Hornlautsprechers 7
1.5 Zur Theorie 7
2 Simulation unterschiedlicher Gehäusetypen 8
2.1 Frontloaded Horn 8
2.2 Rearloaded Horn 9
2.3 Transmissionline 10
2.4 Bassreflexgehäuse 10
2.5 Bandpassgehäuse 11
2.6 Geschlossene Gehäuse 12
3 Erste Schritte 13
3.1 Setup 13
3.2 AJHorn starten 13
3.3 Erste Simulation 14
3.4 Zweite Simulation 15
3.5 Ausblick 16
4 Dateneingabe 17
4.1 Treiber 17
4.2 Horn 19
4.3 Frequenzweiche 22
4.4 Achsen 23
5 Simulationsresultate 24
5.1 SPL (Schalldruck in dB) 24
5.2 Elektrische Impedanz in Ω 24
5.3 Membranamplitude in mm 24
5.4 SPLmax (linearer Maximalschalldruck in dB) 24
5.5 Pmax (erforderliche Leistung in Watt für den Maximalschalldruck) 24
5.6 Konturradius 24
5.7 Akustische Impedanz der Membran 24
6 Grenzen der Simulationsgenauigkeit 25
6.1 Der Lautsprecher selbst 25
6.2 Die Vorkammer und Rückkammer 25
6.3 Absorberkammer und Absorbertunnel 25
6.4 Hornkontur 25
7 Vergleich mit Messergebnissen 26
7.1 Variables Testhorn 26
7.2 Kleines Rearloaded Horn 26
7.3 Gefaltete Frontloaded Tieftonhörner 28
7.4 Frequenzweichen, Saugkreise und Notch-Filter 29
8 Zusammenfassung 30

1 Einführung

1.1 Lizenzvereinbarung

AJHorn ist eine Software für spezialisierte Anwender mit relativ geringer Auflage aber hohem Entwicklungsaufwand. Das Programm konnte und kann nur weiterentwickelt werden, wenn Anzahlen von Lizenzen verkauft werden können. Um uns vor dem unrechtmäßigen Missbrauch des Programms zu schützen, besitzt jede vertriebene Version **eine eigene Seriennummer**. Diese kann man ersehen wenn im Hauptmenü auf „?“ und dann auf „Info“ geklickt wird. Die letzte Zahl hinter der Versionsnummer (z.B. 6.0.**127**) ist die persönliche Seriennummer für den jeweiligen Lizenznehmer. Durch diese eindeutige Zuordnung ist eine lückenlose Aufklärung im Falle eines Missbrauchs gewährleistet. Sollte eine AJHorn Lizenz weiterverkauft oder weitergegeben werden hat der Verkäufer die Pflicht eine Quittung mit persönlichen Angaben des Käufers und der Seriennummer (ähnlich der Originalrechnung/Lieferschein) als Beleg für die Übertragung der Lizenz zu erstellen und ein Duplikat aufzubewahren. Ebenso ist der Käufer über diese Lizenzvereinbarung zu informieren. Der Verkäufer trägt im Zweifel die Verantwortung (Haftung) für dieses Geschäft und ist verpflichtet die Angaben des Käufers zu prüfen. Selbstverständlich ist nach der Übergabe die eventuell vorhandene Installation auf dem Computer des Verkäufers zu deinstallieren.

1.2 Funktionsumfang

AJHorn ist ein einzigartiges wissenschaftliches Berechnungsprogramm für Hornlautsprecher, Transmissionlines und Spezialfälle dieser Typen, bei dem auf eine einfache und schnelle Eingabe der Parameter wertgelegt wurde. Die Simulationstypen sind z.B.:

- **Frontloaded Hörner**
- **Frontloaded Hörner mit Bassreflex-Rückkammer**
- **Rearloaded Hörner**
- **Rearloaded Hörner mit Innentreiber**
- **Klassische Transmissionlines**
- **Transmissionlines mit Vorkammer**
- **Transmissionlines mit Absorberkammer (Helmholtzabsorber)**
- **Transmissionlines mit zwei Treibern**
- **Treiberpositionen entlang des Horn- oder Transmissionline-Verlaufs frei wählbar**
- **Bandpass-Hörner**
- **Bandpass-Transmissionlines**
- **Bandpässe mit ventilierter Rückkammer**
- **Mittel- und Hochtonhörner**
- **7 Konturen wählbar, z.B. Konisch, exponentiell oder Traktrix („Kugelwellenhorn“)**

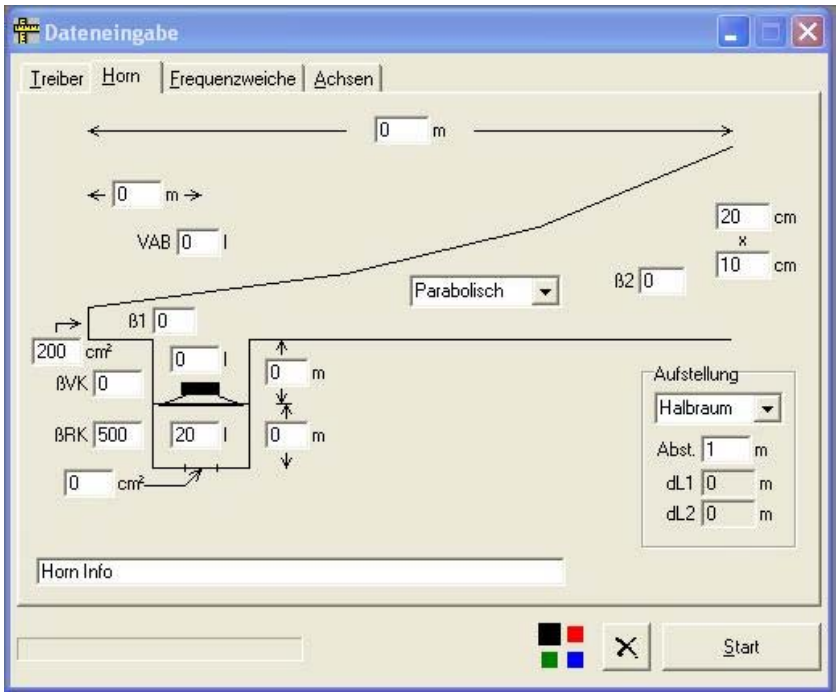
Die verschiedenen Ausgabeparameter der Simulation sind:

- **Schalldruckfrequenzgang (SPL)** in dB in beliebiger Entfernung (aufstellungsabhängig)
- **Frequenzgang der elektrischen Impedanz** in Ohm
- **Frequenzgang der Membranamplitude** beider Treiber
- **Frequenzgang des linearen Maximalschalldrucks** in dB
- **Frequenzgang der erforderlichen elektrischen Leistung** für linearen Maximalschalldruck
- **Frequenzgang der normierten akustischen Strahlungsimpedanz** am Hornhals
- **Radius der Öffnungsfunktion** in cm (grafisch)
- **Fläche, Höhe und Radius der Öffnungsfunktion** (als ASCII Zahlenwerte)

Die Übereinstimmung mit dem Experiment wird dabei eindrucksvoll bestätigt. Das Programm ist unter Windows ab Version 95/NT lauffähig.

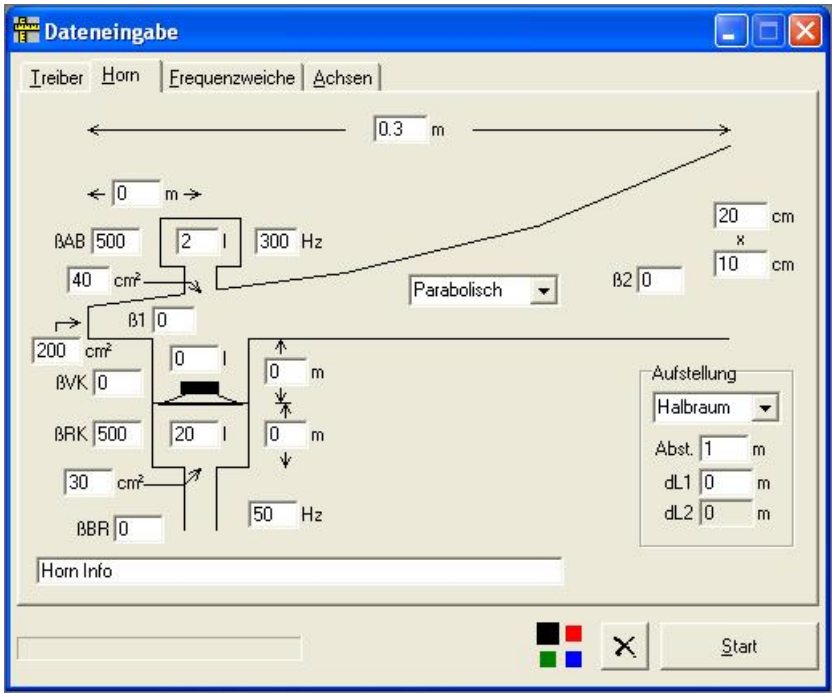
1.3 AJHorn 6 Neuerungen

Die Änderungen für AJHorn 6 waren technischer und grafischer Natur. Es wurde versucht, so viel wie möglich auf besondere Anwenderwünsche, wie auch auf die Optimierung bereits bestehender Hörner einzugehen. Die neu hinzugekommenen Features sind einzigartig und bringen den Entwickler noch näher zum Optimum.



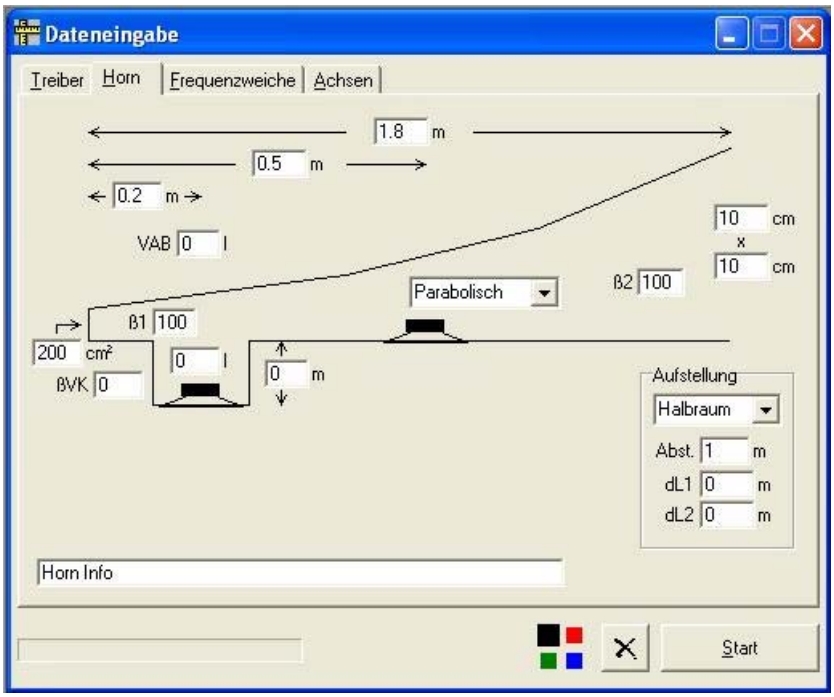
Visuelle Darstellung

Die Dateneingabe vereinfacht sich durch die visuelle Darstellung erheblich, im Vergleich zu den bei der Vorgängerversion ausschließlich verwendeten Formelzeichen. Die Horngrafik lässt sich mit der Maus an verschiedenen Stellen anklicken um so zwischen den Arten (Frontloaded, Rearloaded, zweiter Treiber, zweite Rückkammer, Absorberkammer) intuitiv zu wählen. Nach einer schnellen Einarbeitung wird die fehlerfreie Eingabe der Abmessungen zum Kinderspiel. Wenige Mausklicks später ist z.B. eine Absorberkammer und eine Bassreflexrückkammer hinzugefügt.

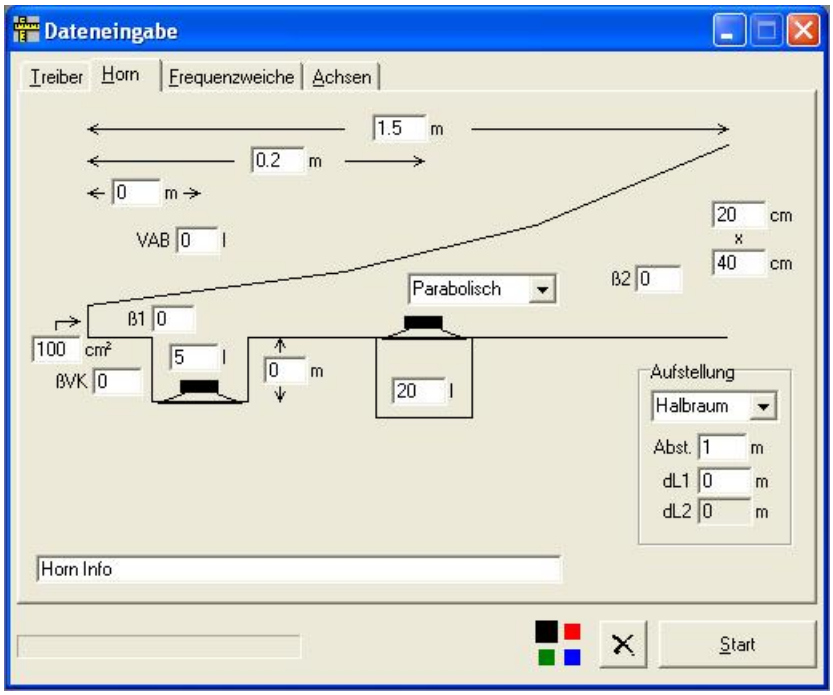


Zweiter Treiber

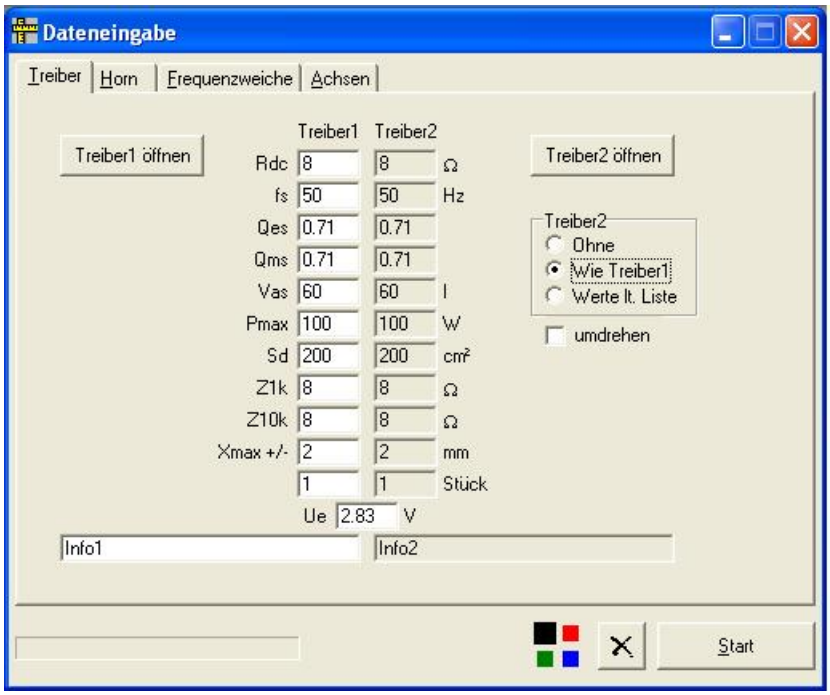
Mit AJHorn 6 kann ein zweiter Treiber an eine beliebige Stelle zwischen Treiber 1 und dem Hornausgang gesetzt werden. So sind z.B. die populären Transmissionlines mit zwei Treibern simulierbar.



Die Treiber können entweder gleiche, oder unterschiedlichte Thiele-Small-Parameter besitzen. Treiber 2 kann, wie im nachfolgenden Bild gezeigt, auch eine eigene Rückkammer erhalten. Die Vorteile einer solchen Anordnung sind bisher noch wenig bekannt. Nach diesem Schema lassen sich z.B. Mixturen aus Front- und Rearloaded Hörnern mit der Bassperformance von Front- und der Mitteltonwiedergabe von Rearloaded Hörnern konstruieren.



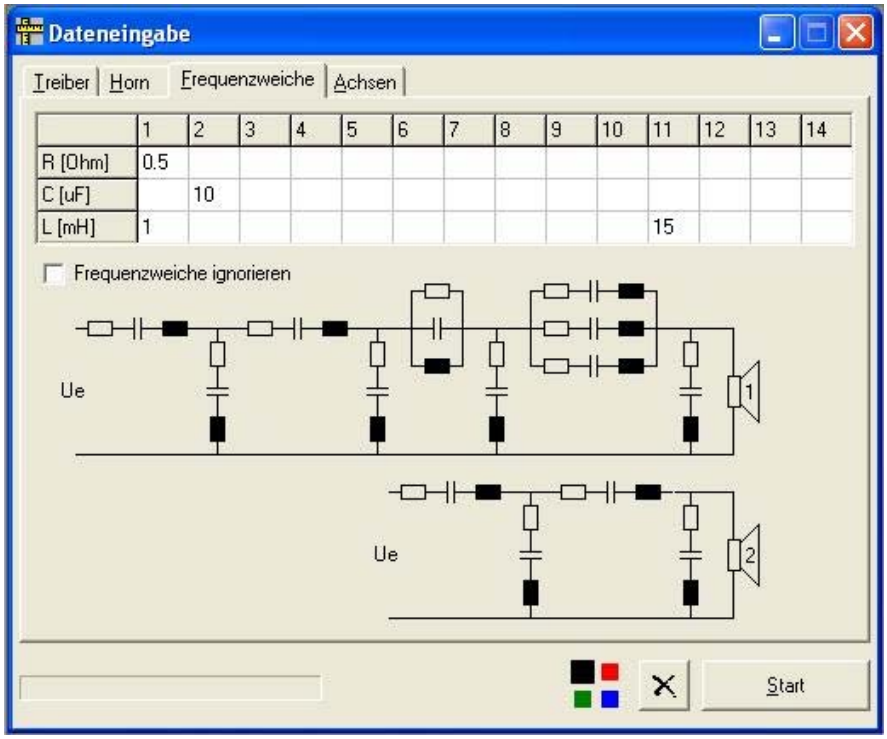
Dazu passend die Eingabedaten für die beiden Treiber.



Durch eventuelle Verpolung / Umdrehen des zweiten Treibers lassen sich die Projekte weiter optimieren.

Frequenzweiche für Treiber 2

Beide Treiber werden mit unterschiedlichen Frequenzweichen angesteuert, um eine größtmögliche Flexibilität zu erreichen.



Projekte , die mit früheren AJHorn-Versionen erstellt wurden. Lassen sich problemlos mit AJHorn 6 aufrufen und weiterbearbeiten.

Ausweitung der AJHorn Impedanztheorie

Eine der wichtigsten technischen Neuerungen (und auch die Zeitaufwendigste) ist auf den ersten Blick kaum sichtbar. Nun wird auch die Vorkammer, die Rückkammer und das Bassreflexrohr mit der AJHorn Impedanztheorie simuliert, und nicht nur das Horn selbst. Jetzt werden Projekte mit z.B. relativ großer oder langer Vorkammer oder langem Bassreflexkanal noch genauer simuliert. Ebenso werden nun Laufzeitunterschiede besser berücksichtigt.

Frequenzabhängige Dämpfung

In der Praxis hat sich gezeigt, dass Dämpfungsmaterial mit zunehmender Frequenz eine stärkere Wirkung besitzt. Die Eingabe der Beta-Werte bleibt zwar unverändert, jedoch wird die Bedämpfung nun in der Simulation als frequenzabhängig betrachtet.

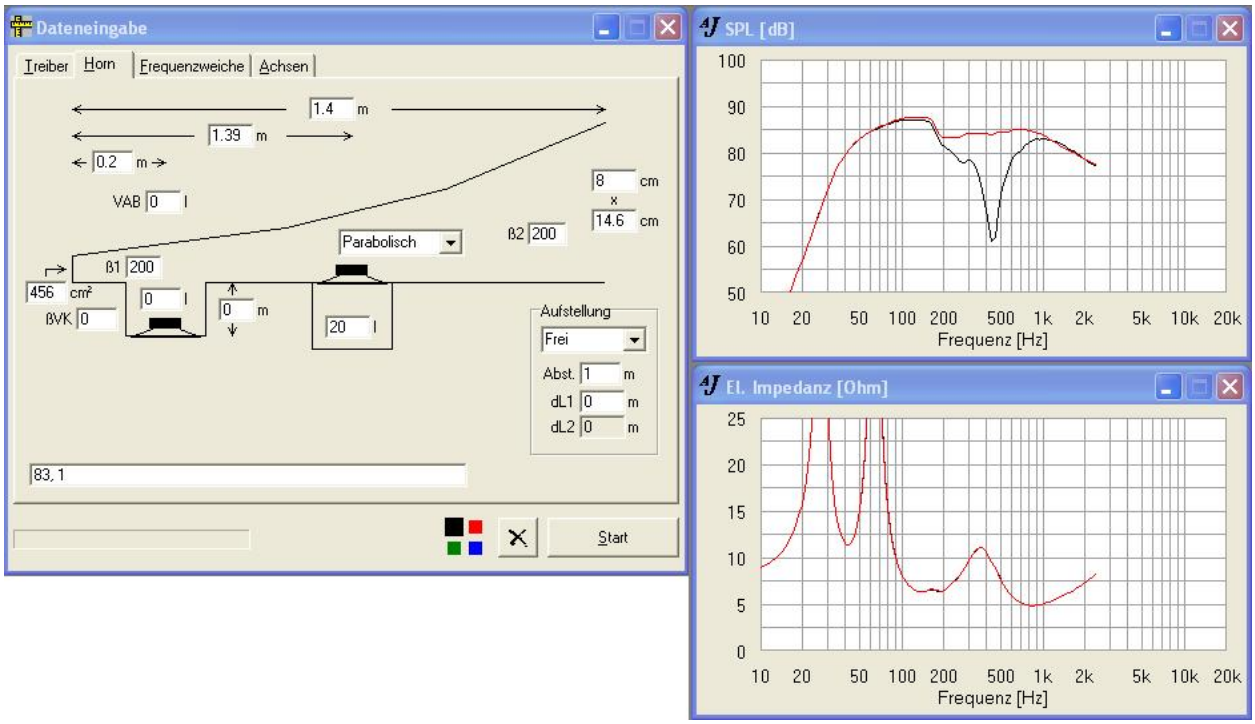
Farbe der Ausgabegrafen

Die verschiedenen Ausgabegrafen wechseln nicht mehr automatisch ihre Farbe sondern durch manuelles Auswählen einer der vier Farben im Eingabefenster unten.

Mehrwege-Systeme

Oft bereitet die Abstimmung der passiven Frequenzweiche, gerade zwischen Tief- und Mitteltönern Probleme. Der Grund dafür sind Phasenprobleme, da die Resonanzfrequenzen der Einzeltreiber oft im Trennungsbereich liegen. AJHorn sollte nicht die letzte Möglichkeit sein, eine Frequenzweiche zu optimieren – dies geschieht auch heute noch und in Zukunft nur durch präzise Messungen und Hörtests – jedoch kann das Programm Hilfestellung bei der Optimierung bieten.

Die folgende Abbildung zeigt die Eingabedaten und das zugehörige Simulationsergebnis für die Trennung zweier Treiber bei ca. 400 Hz. Treiber2 (Mitteltöner) bekommt eine eigene geschlossene Kammer und wird sehr Nahe an den Hornausgang gesetzt (TP2 = 1.39 m). Das bedeutet, er strahlt ohne Einfluss des Hornes ab.
Die schwarze Kurve zeigt die Simulation mit Treiber2 umgedreht, die rote Kurve mit nicht umgedrehtem Treiber2 (also wie auf dem Bild unten). Da Treiber2 in der Praxis nicht mit dem Magneten nach außen eingebaut wird, ergibt sich das rote Simulationsergebnis auch, wenn man Treiber 2 verpolt und mit dem Magneten nach innen einbaut.



1.4 Geschichte des Hornlautsprechers

Hörner wurden in den Anfängen der Schallübertragung zur Wirkungsgradsteigerung von mechanischen oder elektrodynamischen Wandlern verwendet. Bestes Beispiel für die Steigerung des Wirkungsgrades von mechanischen Wandlern ist das Grammophon, das ohne elektrische Verstärkung die Schwingungsübertragung der Nadel von der Schallplatte in hörbare Schwingungen umsetzte. Später dann wurden Wandler die durch elektrische Signale gespeist wurden eingesetzt. Die Klangqualität solcher Hörner war sehr bescheiden, weshalb, auch durch die Entwicklung immer leistungsfähigerer Verstärker, die Hornlautsprecher bald durch direkt strahlende Systeme abgelöst wurden.
Heute liegt der Schwerpunkt der Verwendung von Hörnern auf verschiedenen Gebieten. Zum einen ist im Bereich der Beschallungstechnik der Anspruch an Lautstärke und Abstrahleigenschaften so gestiegen, dass man in hochwertigen Anlagen überwiegend Hörner verwendet. Eine weitere Anwendung von Hörnern liegt in der Festinstallation im Diskothekenbereich. Zudem werden Hörner auch für zuhause für High-End und HiFi Anwendungen konstruiert, bei denen sicherlich auch das außergewöhnliche Design eine große Rolle spielt. Für den Beschallungsbereich sind z.B. im Tieftonbereich Hörner interessant, die eine tiefe, wirkungsgradstarke Basswiedergabe mit hohem Maximalschalldruck bei akzeptabler Gehäusegröße ermöglichen. Für High-End oder HiFi-Anwendungen steht der lineare Schalldruckfrequenzgang an oberster Stelle. Alle diese Horntypen können mit **AJHorn** simuliert und optimiert werden. Wir sind sicher, dass der Ruf, Hörner verfärbten das Klangbild, mit Hilfe dieses Programms in kurzer Zeit der Vergangenheit angehört.

1.5 Zur Theorie

Wenn Sie über wenig fundamentale Kenntnisse in der Theorie elektrisch-mechanisch-akustischer Systeme verfügen sollten, können Sie diesen Abschnitt auch auslassen. Er wird für die Bedienung des Programms nicht benötigt.
Die Theorie der Hornlautsprecher ist zu komplex, um Sie auch nur ansatzweise hier zu behandeln. Außerdem benutzt **AJHorn** teilweise modifizierte Ansätze. Trotzdem wird die klassische Theorie grob aufgezeigt.
Nach der Theorie eindimensionaler akustischer Wellenleiter kann man die Druck- und Schnelleverteilung ín einem Horn durch die fundamentale Horngleichung (Webster,1919) beschreiben.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{1}{A}\frac{\partial A}{\partial x}\frac{\partial p}{\partial x} + k^2 p = 0$$

Diese Differentialgleichung zweiter Ordnung besitzt von ihren Randbedingungen abhängige Lösungen. Durch die Verwendung der Randbedingungen an Hornhals und Hornmund kann man die spezifische Strahlungsimpedanz am Hornhals in Abhängigkeit der spezifischen Strahlungsimpedanz am Hornmund bestimmen.
Normierung auf ρ*c (ρ = Dichte der Luft, c= Schallgeschwindigkeit) ergibt z.B. für den Real- und Imaginärteil der normierten Strahlungsimpedanz am Hals einer zylindrischen Röhre einen relativ welligen Verlauf mit einigen Resonanzpeaks. Diese Funktion lässt sich mit **AJHorn** sehr gut veranschaulichen. Da die Strahlungsimpedanz unmittelbar in die abgestrahlte akustische Leistung eingeht, muss der resultierende Schalldruckfrequenzgang einer zylindrischen Röhre auch sehr wellig verlaufen. Dies ist mit einer naturgetreuen Wiedergabe nicht zu vereinen.
Berechnet man jedoch die normierte Strahlungsimpedanz eines sich kontinuierlich erweiternden Trichters, wird man mit zunehmender Mundfläche eine Linearisierung der Impedanz feststellen. Dieses Phänomen ist auch als "Impedanztransformation" bekannt.
Mit der geschickten Wahl der Öffnungsfunktion (Hornkontur), den Lautsprecherdaten, Vorkammer- und Rückkammervolumen lässt sich auch ein linearer Schalldruckfrequenzgang erzielen. Dieser ist oberste Voraussetzung für eine naturgetreue nicht mehr zu Resonanzen neigende Musikwiedergabe.

Wenn Sie bei Ihren Versuchen das optimale Horn für Ihre Anwendung zu finden etwas mit den Eingabedaten herumspielen, werden Sie feststellen, dass sich nahezu alle Parameter gegenseitig beeinflussen. So ist es z.B. möglich, dass das Vorkammervolumen die untere Grenzfrequenz oder die Linearität des Schalldruckes beeinflussen kann, die Halsfläche sich auch auf die Linearität oder den Wirkungsgrad im mittleren Frequenzbereich auswirkt. Auch kann es passieren, dass ein konisches Horn im Vergleich zu einem hyperbolischen Horn entgegen anders lautenden Äußerungen eine tiefere untere Grenzfrequenz besitzt.
Der Einfluss einer passiven Frequenzweiche wird vom Programm korrekt erfasst. Gerade hier lohnt sich die Investition in ein hochwertiges Simulationsprogramm, da die komplexe Impedanz einen entscheidenden Einfluss auf das Verhalten der Frequenzweiche besitzt.

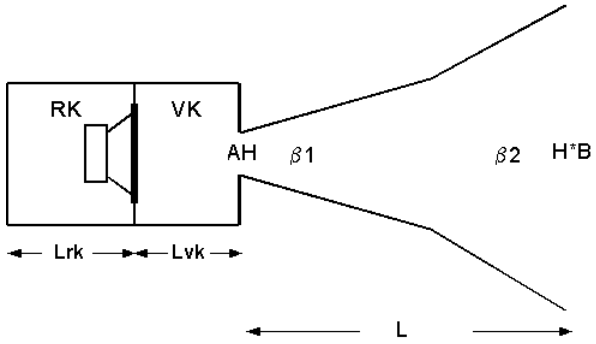
Wie aus den genannten Beispielen zu ersehen ist, ist es auch wenig sinnvoll mit Hilfe einfacher Formeln die untere oder obere Grenzfrequenz eines Horns mit dem Taschenrechner zu berechnen, wie dies für geschlossene oder Bassreflexgehäuse durchaus mit sehr präzisem Ausgang möglich ist. Die einzige Möglichkeit die Frequenzgänge eines Horns (oder natürlich auch einer Transmissionline) mit hoher Genauigkeit und vertretbarem Aufwand zu berechnen, bleibt einem Computersimulationsprogramm wie **AJHorn** vorbehalten.

2 Simulation unterschiedlicher Gehäusetypen

AJHorn bietet durch seinen modularen Aufbau die Möglichkeit unterschiedliche Gehäusetypen mit ein und dem selben Berechnungsalgorithmus zu simulieren. Dies ist insofern interessant, weil die Theorie zur Hornberechnung nicht in einem schmalen Bereich angenähert ist, sondern tatsächlich die genaue Lösung der akustischen Gegebenheiten darstellt, und die Grenzfälle Transmissionline, Bassreflex, Bandpass und geschlossenes Gehäuse damit automatisch enthalten sind. Aufbauend darauf ist die Grenze zwischen den einzelnen Typen fließend. Ob man nun ein Bassreflexgehäuse als Helmholtzresonator bezeichnet oder als rearloaded konisches Horn mit relativ großer Vorkammer, dessen Halsfläche gleich der Mundfläche ist, ist reine Definitionssache. In der Praxis sind beide Typen identisch. Die folgenden Beispiele werden dies verdeutlichen.

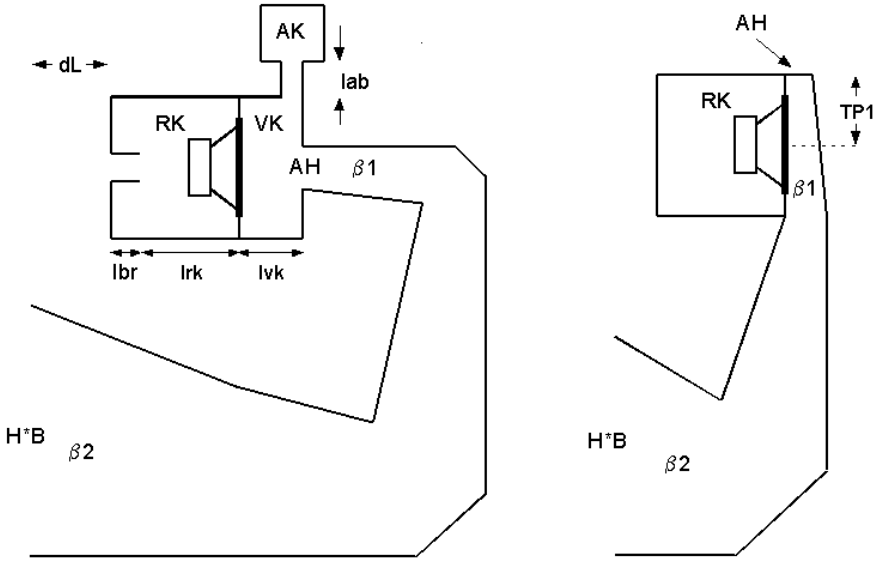
2.1 Frontloaded Horn

Wie aus der folgenden Abbildung zu ersehen, handelt es sich bei einem Frontloaded Horn um ein Horn, dessen Treiber zu einer Seite der Membran in Verbindung mit dem Horn zur Schallabstrahlung beiträgt. Die Rückseite des Treibers strahlt in eine geschlossene oder ventilierte Rückkammer (RK) mit dem Volumen Vrk. Die Länge der geschlossenen Rückkammer hat bei ausreichender Bedämpfung keinen Einfluss auf das Simulationsergebnis.



Vor der Membran befindet sich eine Vorkammer (VK). Die Länge der Vorkammer ist definiert als die akustische Weglänge zwischen Treibermembran und Hals. Das Horn selbst wird durch seine Mundhöhe (H), die Mundbreite (B), die Länge (L) und die Halsfläche (AH) sowie durch seine Kontur (parabolisch, konisch, exponentiell, hyperbolisch, geometrisch oder Traktrix) beschrieben. Ebenso ist durch die Wahl der Dämpfungskoeffizienten $\beta 1$ und $\beta 2$ der Einfluss von Dämpfungsmaterial im Horn berücksichtigt. $\beta 1$ ist der Dämpfungswert am Hornhals und $\beta 2$ der am Hornmund. Dazwischen wird die Dämpfung linear interpoliert.

Die folgenden schematischen Abbildungen beschreiben die Verwendung von Absorberkammer (AK) und Treiberposition (TP).



Das linke Horn besitzt eine ventilierte Rückkammer (RK, **„Bassreflexrückkammer“**) und eine Absorberkammer (AK, **„Helmholtzabsorber“**). Die Länge der Rückkammer ist definiert als der akustische Weg zwischen Treibermembran

und Bassreflexrohr. Eventuell vorhandene Abstandsunterschiede zwischen dem Hornmund und dem Bassreflexausgang relativ zum Hörort werden mit der Variablen dL (Differenzlänge) beschrieben. Sie berechnet sich nach folgender Gleichung.

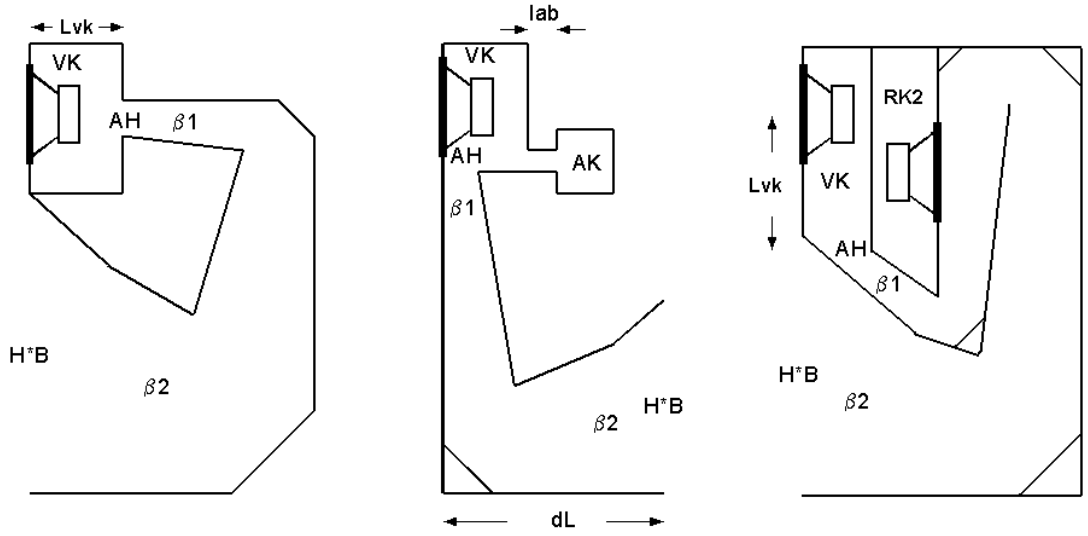
$$dL = \overline{Hörort, Tunnelausgang} - \overline{Hörort, Hornmund}$$

Die Differenzlänge ist also positiv, wenn der Hornmund sich näher am Hörort befindet.

Nach dem Prinzip des rechten Horns im vorigen Bild funktionieren viele auf dem Markt befindliche Frontloaded Basshörner. Hier wird zur Verringerung des Gesamtvolumens die Vorkammer so klein wie möglich gehalten (Vorkammervolumen = Kegelinhalt des Membrankonus). Dadurch kommt es zu Unsymmetrien im Vorkammerbereich, die AJHorn durch die schlichte Eingabe der Variablen TP (**Treiberposition**) korrekt simuliert.
Achtung! Die Halsfläche (AH) ist die Fläche am Hornanfang und nicht an der Treiberposition!

2.2 Rearloaded Horn

Das Rearloaded Horn unterscheidet sich vom Frontloaded Horn dadurch, dass die Rückkammer entfällt. Treiber 1 strahlt also direkt über die Membran und indirekt über das Horn ab. Schematische Beispiele zeigen die drei folgenden Zeichnungen.



Das Horn besitzt die Mundhöhe (H), die Mundbreite (B), die Hornlänge (L), die Differenzlänge (dL), die Halsfläche (AH) und eine Vorkammer (VK). An die Vorkammer kann sich auch eine Absorberkammer (AK) anschließen. Das Horn kann sich nach verschiedenen Konturen wie beim Frontloaded Horn angegeben öffnen. Der Einfluss von Dämpfungsmaterial lässt sich wieder über die Koeffizienten $\beta 1$ und $\beta 2$ beschreiben. Die **Differenzlänge (dL)** ist der Längenunterschied zwischen den beiden schallabstrahlenden Medien Membran und Hornöffnung bezogen auf den Hörort. Sie berechnet sich nach folgender Gleichung.

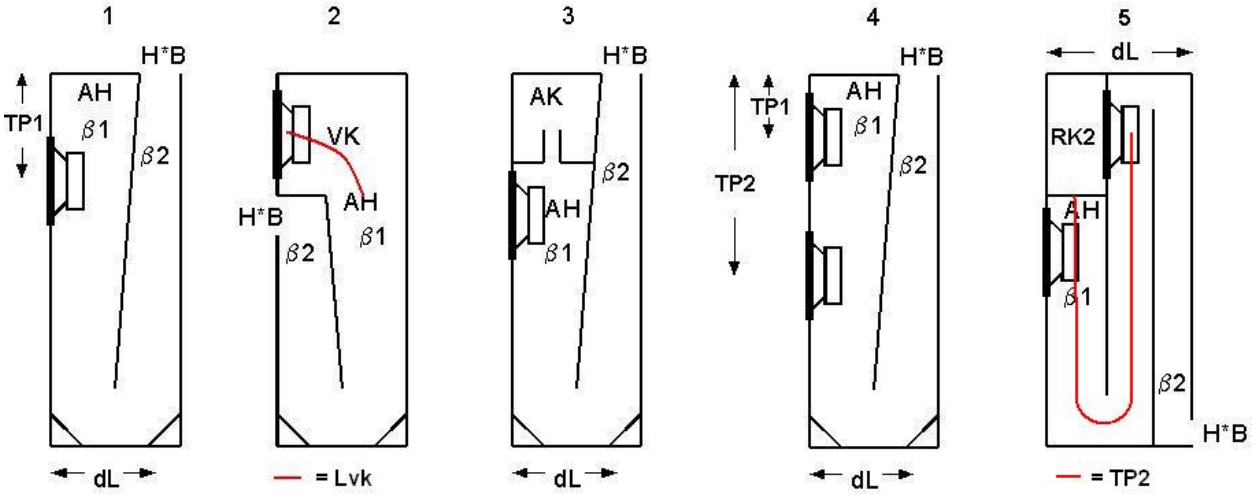
$$dL = \overline{Hörort, Hornmund} - \overline{Hörort, Membran}$$

Die Differenzlänge ist also positiv, wenn sich die Membran näher zum Hörort befindet. Wenn der Schall aus Membran und Hornmund gleiche Wege zum Hörort zurücklegen müssen, so ist die Differenzlänge 0. Diese Länge spielt bei der phasenrichtigen Summation zwischen Membranschall und dem Schall aus dem Hornmund eine Rolle.

Das rechte Horn besitzt einen Innentreiber (Treiber2), durch dessen geschlossene Rückkammer die Tiefbassausbeute gesteigert werden kann. Mit dieser Simulationsmöglichkeit können unter Umständen ältere Konstruktionen (klassische Rearloaded Hörner) im Bassbereich verbessert werden, wenn noch ungenutztes Volumen vorhanden ist. Ob und wie so eine Konstruktion dann funktioniert, lässt sich mit AJHorn simulieren und optimieren.

2.3 Transmissionline

Eine Transmissionline ist ein Gehäusetyp ähnlich dem Rearloaded Horn, bei dem sich jedoch das Horn nicht erweitert, sondern verjüngt oder denselben Querschnitt beibehält. Sie kann eine Vorkammer besitzen, muss aber nicht. Die folgenden Abbildungen zeigen verschiedene Möglichkeiten der Realisierung einer Transmissionline.

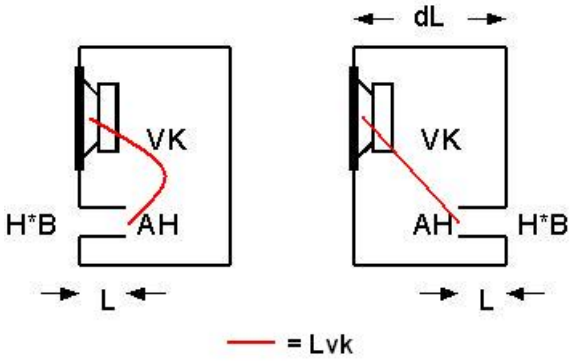


1. zeigt eine klassische einmal gefaltete Transmissionline.
2. ist eine klassische einmal gefaltete Transmissionline mit Vorkammer.
3. besitzt einen ähnlichen Aufbau wie Nr. 1, jedoch mit zusätzlicher Absorberkammer (AK). Diese Absorberkammer ist auch unter dem Begriff **„interner Helmholtzabsorber“** bekannt.
4. beschreibt den Aufbau einer Transmissionline mit **zwei Treibern** mit den Treiberpositionen **TP1** und **TP2**.
5. ist eine Kombination aus klassischer Transmissionline mit zusätzlichem Innentreiber. Durch geschickte Wahl der Position von Treiber2 (TP2) lassen sich Resonanzen der Line unterdrücken und andere Frequenzbereiche verstärken.

Die Transmissionline besitzt die Mundhöhe (H), die Mundbreite (B), die Länge (L), eine eventuelle Differenzlänge (dL), die Halsfläche (AH) und eine Vorkammer (VK). Einflüsse von Dämpfungsmaterial werden über die Koeffizienten $\beta 1$ und $\beta 2$ berücksichtigt.
Achtung! Die Halsfläche (AH) ist die Fläche am Transmissionlineanfang und nicht an der Treiberposition!

2.4 Bassreflexgehäuse

Dieser sehr weit verbreitete Typ eines Lautsprechergehäuses wird oft auch als Helmholtzresonator oder ventiliertes Gehäuse bezeichnet. Über diesen Typ existieren sehr viele Theorien der akustischen Simulation. Teilweise in tabellarischer, aber auch in der Form von Berechnungsprogrammen. AJHorn geht hier einen Schritt weiter und berechnet den Schalldruckfrequenzgang mit dem Einfluss der Strahlungsimpedanz der Membran, der Laufzeit von Membran zum Tunnel und der Resonanzfrequenzen des Tunnels. Die folgenden Abbildungen zeigen verschiedene Bassreflexgehäuse.



Die Eingabedaten sind hier die Mundfläche (H*B), die Länge des Reflexkanals (L) (Hornlänge), eine eventuelle Differenzlänge (dL) die Fläche am Kanalanfang AH (Halsfläche) und das Vorkammervolumen (VK). Die Länge der Vorkammer (Lvk) ist der akustische Weg zwischen Treibermembran und Kanalanfang.

Bei **Reflexrohren mit rundem Querschnitt** werden die Halsfläche (AH) und die Mundfläche (H*B) so gewählt dass der Querschnitt der Fläche entspricht. Die Form spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Die Fläche berechnet sich nach der bekannten Formel

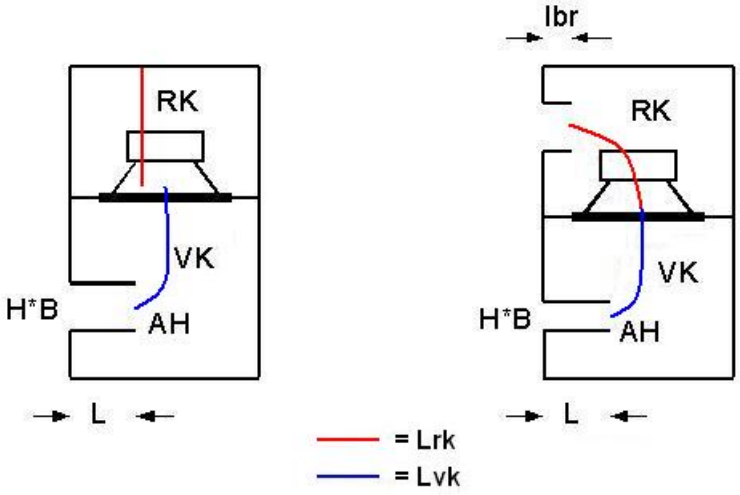
$$A[cm^2] = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$ d = Tunnelinnendurchmesser in cm.

Dämpfungsmaterial in der Vorkammer sowie der Einfluss von Absorptionsmaterial im Tunnel oder Kanalverluste werden über die Koeffizienten βvk, β1 und β2 auch berücksichtigt.

Die Differenzlänge bezeichnet hierbei wieder den Abstand von Membran zu Tunnelausgang relativ zum Hörort. Natürlich kann sich der Reflexkanal auch erweitern oder verjüngen. So sind unendlich viele Gehäusetypen möglich, denen man eine genaue Zuordnung nicht geben kann, dessen Simulationsergebnis jedoch korrekt ist.

2.5 Bandpassgehäuse

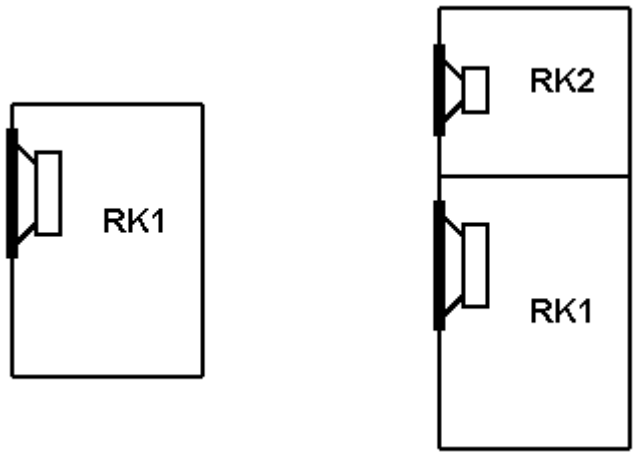
Ein Bandpassgehäuse besteht aus einer geschlossenen oder ventilierten Rückkammer (RK) und einer Vorkammer (VK) mit sich anschließendem Reflexkanal der Länge L. Es handelt sich um einen Spezialfall des **Frontloaded** Typs. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Aufbau von klassischem Bandpass und Bandpass mit ventilierter Rückkammer.



Auch hier kann der sich an die Vorkammer anschließende Tunnel mit konstantem Querschnitt über die Länge verlaufen, sich öffnen oder auch verjüngen. Unterschiedlichste Gehäusetypen wie **Bandpass-Transmissionline** oder **Bandpass-Horn** erschließen sich so einer Simulation.
Die Halsfläche (AH), Mundhöhe (H), Mundbreite (B), Rückkammerlänge (Lrk) und Vorkammerlänge (Lvk) sind wie bei den vorangegangenen Gehäusetypen definiert.
Die beiden Gehäusekammern des ventilierten Bandpasses sollten unterschiedliche Abstimmfrequenzen besitzen, ansonsten kommt es zu einem akustischen Kurzschluss (gegenseitige Auslöschung der Schallanteile). AJHorn simuliert durch die in Version 6 erweiterte Impedanztheorie auch die Resonanzfrequenzen beider Tunnel.

2.6 Geschlossene Gehäuse

Das geschlossene Gehäuse ist die wohl einfachste Lösung, einen Tieftonlautsprecher zu betreiben. Es verhindert durch die geschlossene Rückkammer, dass sich die beiden Schallanteile von Membranvorder- und -Rückseite gegenseitig auslöschen (akustischer Kurzschluss). Dieser Gehäusetyp lässt sich mit **AJHorn** ebenfalls berechnen, da er einen Spezialfall des **Frontloaded Horns** darstellt. Ein Beispiel für ein geschlossenes System wird bei jedem Start von **AJHorn** geladen. Die folgenden Abbildungen zeigen den Aufbau eines geschlossenen Gehäuses.



Das geschlossene Gehäuse ist also ein Frontloaded Horn, bei dem das Vorkammervolumen und die Hornlänge Null gesetzt werden, die Halsfläche (AH) entspricht ebenso wie die Mundfläche (H*B) der Membranfläche (SD) des Chassis (siehe auch 4.2). Durch Hinzufügen von Treiber2 können auch Systeme mit zwei Basskammern und unterschiedlichen Trennfrequenzen oder Mehrwege-Systeme simuliert werden.

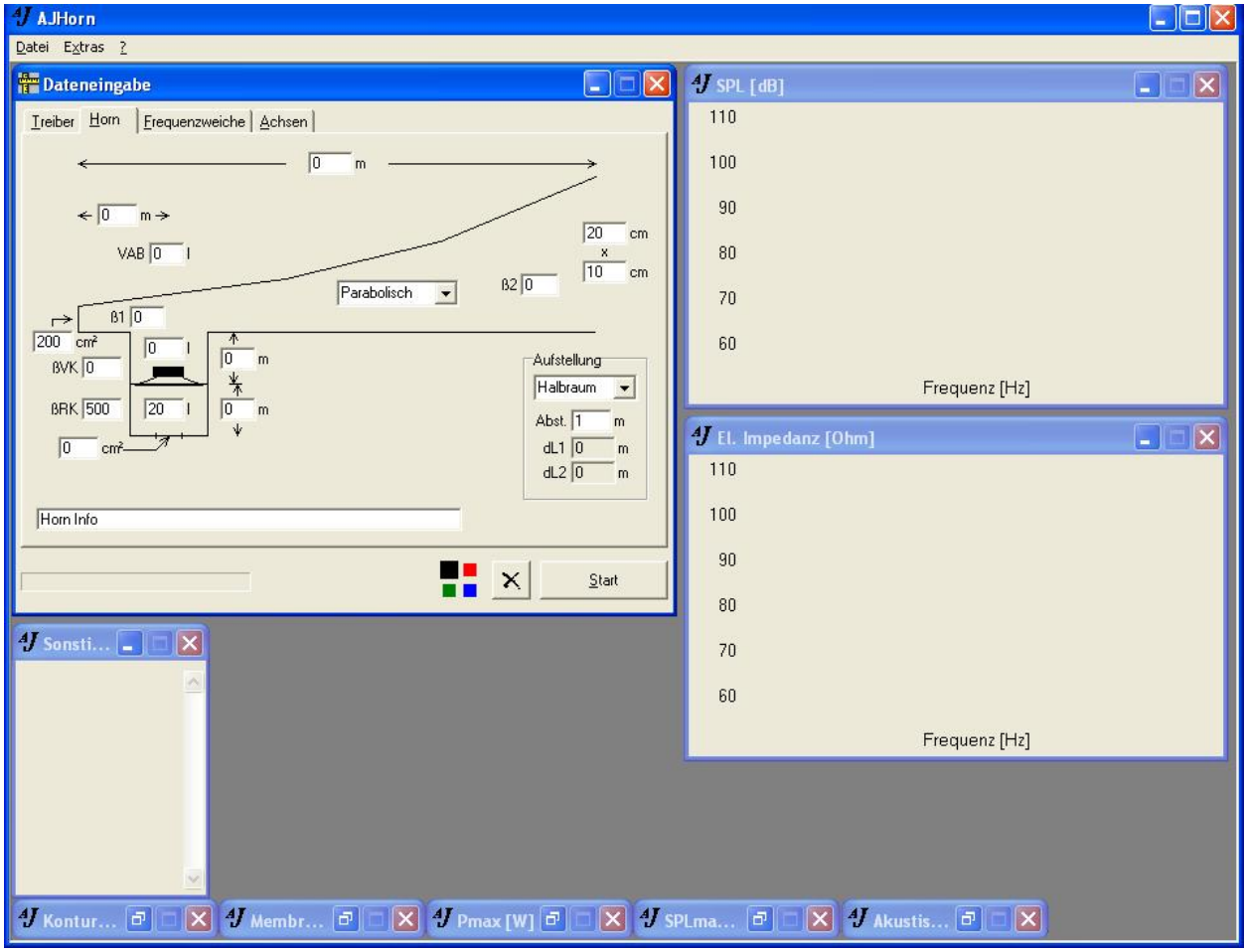
3 Erste Schritte

3.1 Setup

AJHorn stellt keine besonderen Anforderungen an die Aktualität des Betriebssystems und läuft auf allen 32 bit Windows Versionen (95, 98, NT, XP, 2000, ..). Zur Installation führen Sie bitte die Datei SETUP.EXE aus. Folgen Sie den Anweisungen auf dem Bildschirm. AJHorn ist nun auf Ihrem Rechner installiert.

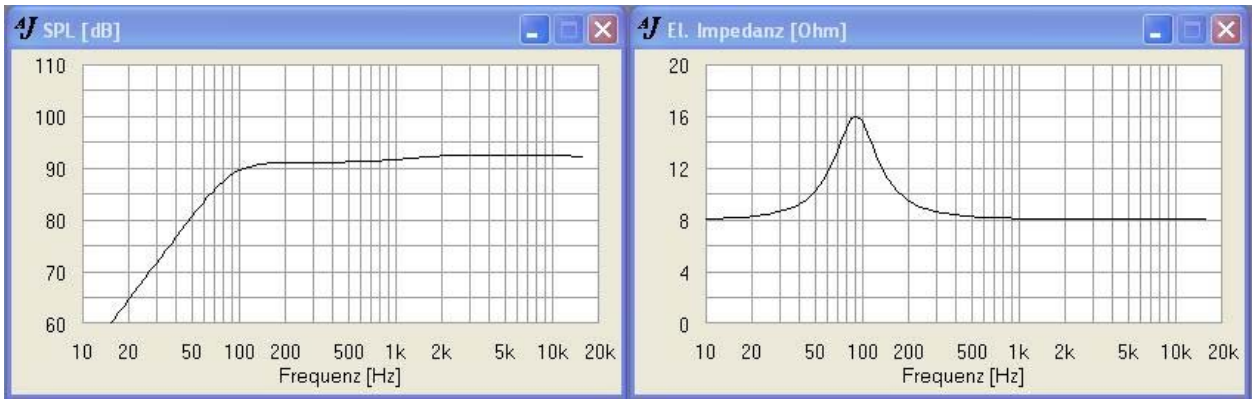
3.2 AJHorn starten

Zum Starten von **AJHorn** benutzen Sie die Task-Leiste Start/Programme/AJHorn. Es erscheint das Hauptfenster von **AJHorn**.



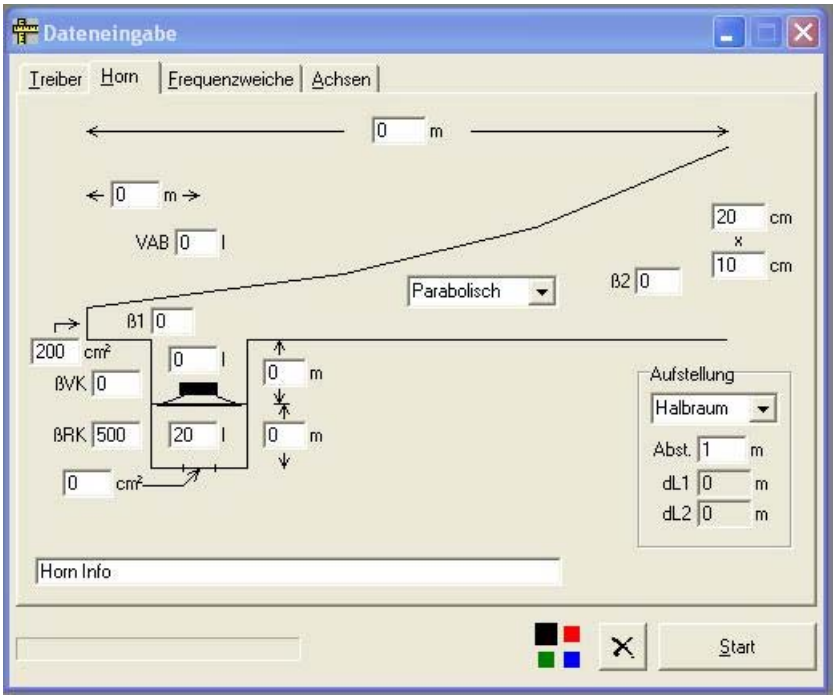
3.3 Erste Simulation

AJHorn lädt bei jedem Start Standardwerte in die Datei NEU.HRN. Dieser Dateiname ist also für **AJHorn** reserviert. Klicken Sie im Menu auf "Start" und AJHorn beginnt zu rechnen. Nach der Berechnung ist die folgende Grafik zu sehen.



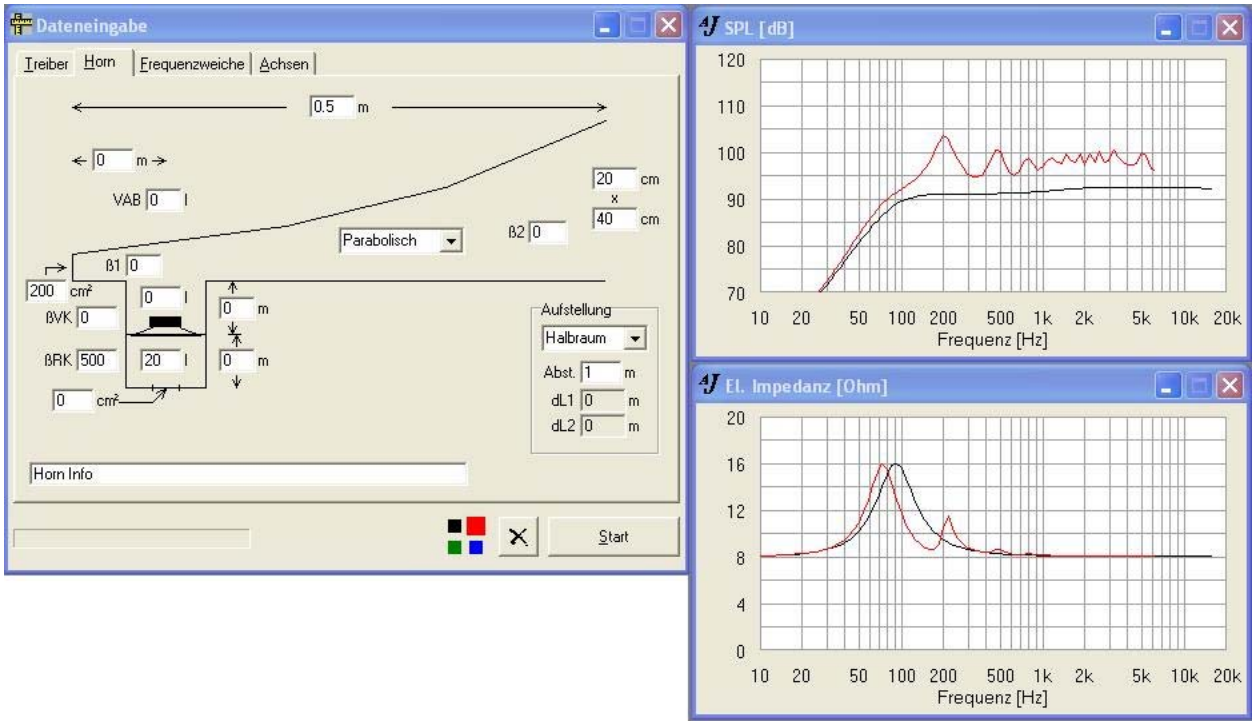
NEU.HRN ist ein Lautsprecher in einem geschlossenen Gehäuse mit einer Einbaugüte Q_{TC} von 0.71 (Butterworth). Dies ist an dem gleichmäßigen Abfall des Schalldrucks zu tiefen Frequenzen zu erkennen.
Gleichzeitig mit dem Schalldruck berechnete AJHorn auch die anderen Frequenzgänge, die Sie durch aktivieren der minimierten Fenster betrachten können.

Wie schon erwähnt ist NEU.HRN ein Lautsprecher im geschlossenen Gehäuse. Er besitzt weder eine Vorkammer, noch einen Hornkanal. Zu erkennen ist dies an dem Vorkammervolumen von 0 l und der Hornlänge von 0 m. Ebenso ist die Halsfläche und die Mundfläche gleich der Membranfläche des Treibers (Sd). Die Eingabedaten für das Horn sieht man in der folgenden Abbildung.

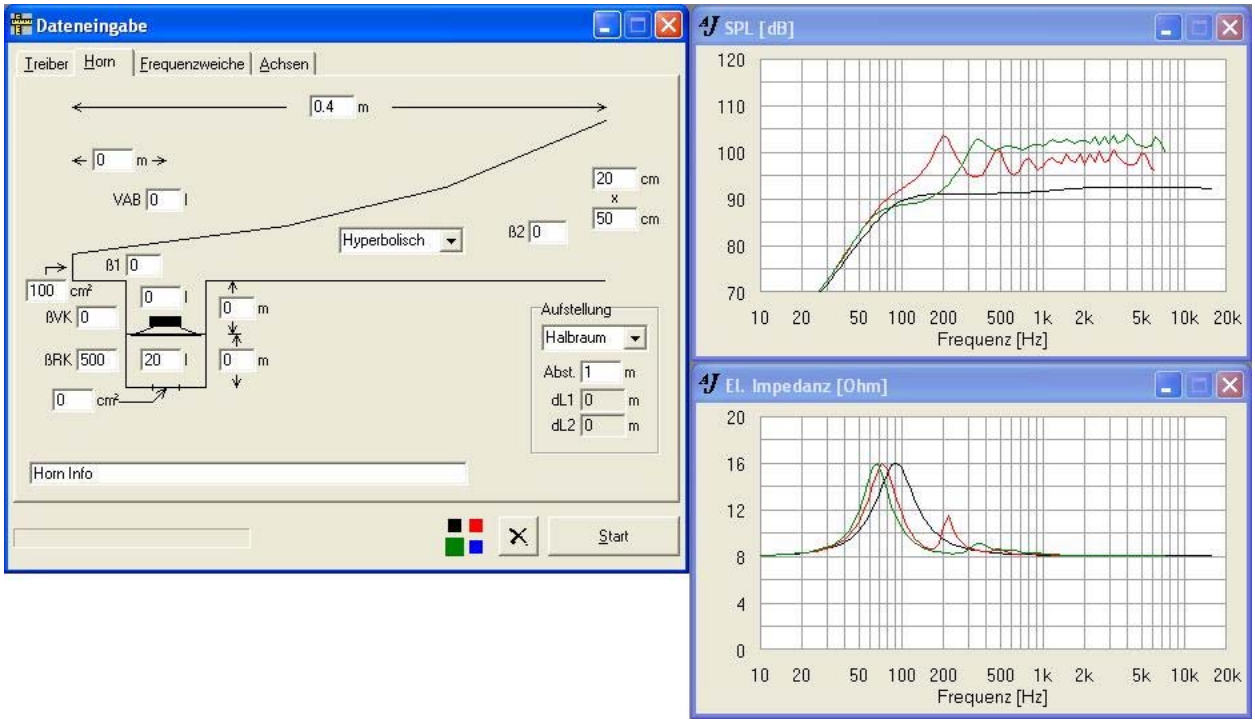


3.4 Zweite Simulation

Nun wird ein parabolischer Trichter simuliert, dessen Halsfläche gleich der Membranfläche ist, und dessen Mundfläche der 4-fachen Halsfläche entspricht (h*b = 800cm²). Die Länge des Trichters beträgt 0,5 m. Weiterhin wird rot als Farbe für die nächste Simulation gewählt. Die Eingabedaten für **AJHorn** und das Simulationsergebnis nach dem Klick auf „Start“ sind in der folgenden Abbildung zu sehen.



Man erkennt eine Steigerung des Wirkungsgrades im Mitteltonbereich um ca. 5 dB gegenüber der ursprünglichen Version. Jedoch ist dies mit einem welligeren Schalldruckfrequenzgang verbunden.
Durch die geschickte Wahl der Eingabeparameter kann man aber den Schalldruckfrequenzgang linearisieren und so zu einem wohlklingendem Lautsprecher gelangen. Das Ergebnis einer solchen Optimierung ist in der nachfolgenden Abbildung gezeigt.



Dieser Hornlautsprecher ist nun ab 300 Hz einsetzbar und besitzt eine wesentlich bessere Linearität und einen höheren Wirkungsgrad, als die nicht optimierte Version.

3.5 Ausblick

Mit dem im letzten Abschnitt vorgestellten Verfahren lassen sich nun beliebige Horn- oder Transmissionline Lautsprecher am Computer optimieren. Erst wenn die Simulation am Computer überzeugt, wird der Lautsprecher auch aufgebaut.

Zum genauen Verständnis der Eingabeparameter werden im Verzeichnis \Beispiele verschiedene Standardsimulationen für Lautsprecher nach dem geschlossenen, Bassreflex-, Horn- und Transmissionlineprinzip gezeigt. TML2.hrn zeigt beispielsweise, wie man mit Hilfe der Veränderung der mechanischen Abmessungen einer Transmissionline das berühmte „Transmissionline-Loch“ von über 10 dB bei TML1.hrn auf unter 3 dB verringern kann.

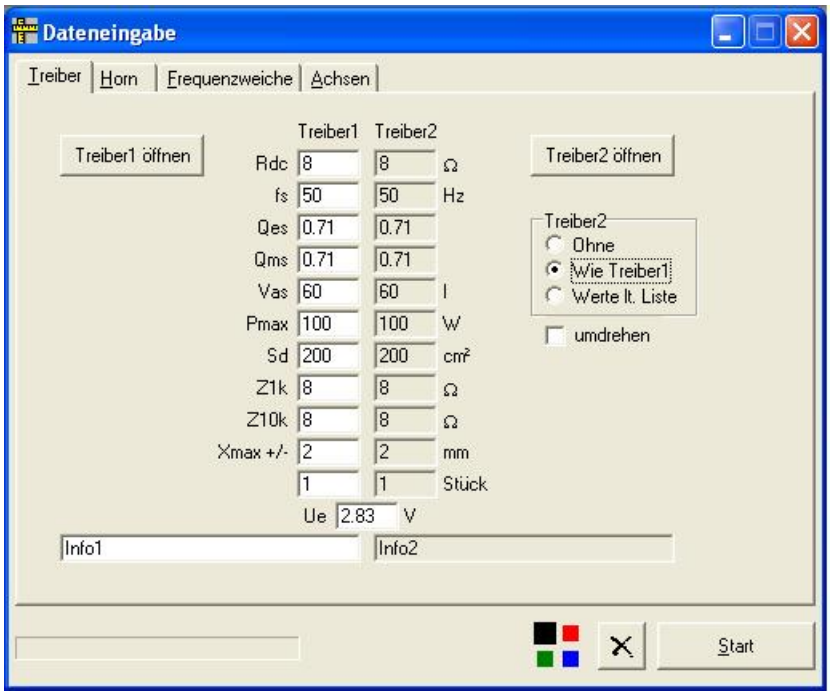
Anhand der Eingabedaten können sie nun sehen, was bei der Eingabe der verschiedenen Gehäusetypen zu beachten ist. Zur Modifikation und zum Erhalt der Daten sollte die Datei erst unter einem anderen Namen gespeichert werden (z.B. in Eigene Dateien\AJHorn\[Dateiname]).

4 Dateneingabe

Nach der Vorstellung unterschiedlicher Gehäusetypen, die mit **AJHorn** simuliert werden können, wenden wir uns nun der Dateneingabe zu. Es wurde versucht die Dateneingabe so einfach wie möglich zu gestalten, um die Übersicht nicht zu verlieren.

4.1 Treiber

Lautsprecher-Chassis werden durch die heute üblichen **Thiele-Small-Parameter (TSP)** beschrieben. Sie geben Aufschluss über die Eigenschaften des Lautsprechers bei seiner Resonanzfrequenz. Der Frequenzgang eines Horns hängt, wie bei den einfacheren Gehäusetypen auch, in entscheidendem Maße von dem verwendeten Lautsprecher (Treiber) und seinen TSP ab. Deshalb ist es wichtig, diese Parameter zu kennen. Sie werden entweder in verschiedenen Fachzeitschriften veröffentlicht, in Datenblättern der Hersteller erwähnt, oder stehen als Datenbank zur Verfügung. Sie können sich auch direkt an die Hersteller oder Vertriebe wenden. Zu erwähnen ist auch noch, dass man die TSP relativ einfach mit den heute üblichen Computer-Messsystemen bestimmen kann. Zur Bestimmung der Parameter ohne ein Computer-Messsystem gibt es in Akustikbüchern brauchbare Vorschläge.



Schaltfläche „Treiber öffnen“

Hier können Sie eine AJHorn-Datei (.hrn) auswählen, von der nur der Treiber geladen werden soll. Die übrigen Daten des aktuellen Projekts bleiben unberührt. Zur Kompatibilität mit älteren Versionen werden beim Öffnen von Treiber2 aus der gewünschten hrn-Datei die Werte von **Treiber1** ausgewählt und Treiber2 des aktuellen Projekts zugeordnet.

Rdc (Gleichstromwiderstand)

Dieser in elektrischen Ohm angegebener Wert bezeichnet den Widerstand der Schwingspule, wenn durch diese ein Gleichstrom fließt.

fs (Freiluftresonanzfrequenz)

Dieser Wert in Hz (Hertz) bezeichnet die Eigenfrequenz des mechanischen Pendels aus Membranmasse und Aufhängungsnachgiebigkeit.

Qes (Elektrische Güte)

Dieser dimensionslose Wert beschreibt den Einfluss der elektrischen Dämpfung.

Qms (Mechanische Güte)

Dieser dimensionslose Wert beschreibt den Einfluss der mechanischen Dämpfung.

Vas (Äquivalentvolumen)

Dieser Wert in l (Liter) bezeichnet das Volumen, das nötig wäre, um die selbe Federsteifigkeit der Membranaufhängung zu erreichen, wie sie durch die Sicke und Zentrierspinne des Treibers erreicht wird.

Pmax (Elektrische Belastbarkeit)

Dieser Wert in Watt gibt die Herstellerangabe der elektrischen Belastbarkeit an. Sie wird für die Berechnung der linearen elektrischen Leistung und für den Maximalschalldruck benötigt.

Info

Hier können Sie Kommentare zum Treiber, z.B. dessen Typenbezeichnung eintragen.

Sd (Membranfläche)

Dieser Wert in qcm bezeichnet die effektiv schwingende Fläche der Lautsprechermembran.

Z1k und Z10k (Impedanz bei 1kHz und 10kHz)

Die Schwingspuleninduktivität eines Lautsprechers ist über der Frequenz nicht konstant, sondern nimmt im Allgemeinen zu höheren Frequenzen hin ab. Ebenso besitzt die Schwingspuleninduktivität einen Imaginärteil, der sich im Allgemeinen mit zunehmender Frequenz vergrößert. Diesem Phänomen wird Rechnung getragen, indem die elektrische Impedanz in Ohm bei zwei Frequenzen (1kHz und 10kHz) eingegeben wird. Aus dem Impedanzgang eines Lautsprechers kann man diese beiden Werte sehr gut ablesen.
Achtung! Stehen diese Werte nicht zur Verfügung, so sollte für beide Werte der Gleichstromwiderstand (Rdc) eingegeben werden. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die Simulation zu mittleren und hohen Frequenzen dann nicht mehr korrekt sein kann und auch der Einfluss auf die passive Frequenzweiche, vor allem bei höheren Trennfrequenzen, nicht mehr korrekt ist.

Xmax (Lineare Auslenkung)

Dieser in +/- mm angegebene Wert bezeichnet die maximale Auslenkung der Schwingspule, bis sie den homogenen Bereich des Magnetfeldes verlässt. Darüber lässt die Kraft auf die Schwingspule nach und es kommt zu Nichtlinearitäten (Oberwellen, Klirrfaktor). Die maximale **nichtlineare** Auslenkung der Membran kann allerdings sehr viel höher liegen. Wird dieser Wert im Datenblatt des Lautsprechers nicht erwähnt, so kann man ihn nach folgender Formel berechnen:

$$X_{\max} = \frac{H_{VC} - H_{AG}}{2}$$

H_{VC} ist die Wickelhöhe der Schwingspule und H_{AG} ist die Höhe des Luftspaltes (obere Polplatte).

Anzahl der Treiber

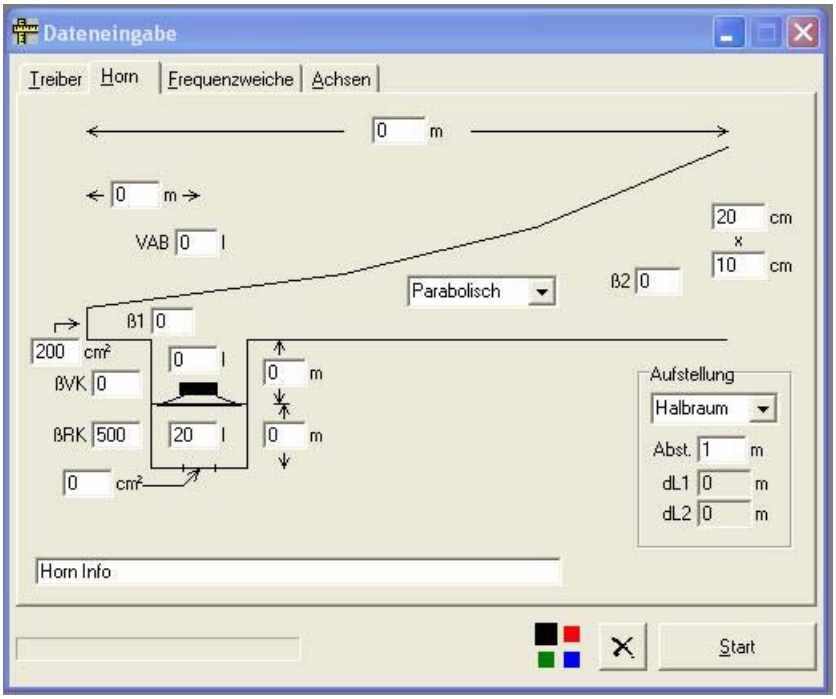
Dieser Wert bezeichnet die Anzahl der parallel geschalteten Treiber in einem Horn. Zu beachten ist, dass **alle** diese Treiber **zusammen auf ein Horn** der Mundhöhe (H), der Hornbreite (B), der Rückkammer (VRK) usw. arbeiten.

Ue (Eingangsspannung)

In diesem Menüpunkt kann man die elektrische Eingangsspannung in Volt (V) eingeben. Soll die Simulation bei einem Watt durchgeführt werden, so muss hier für 4 Ohm Treiber 2 V und für 8 Ohm Treiber 2,83 V eingegeben werden.

4.2 Horn

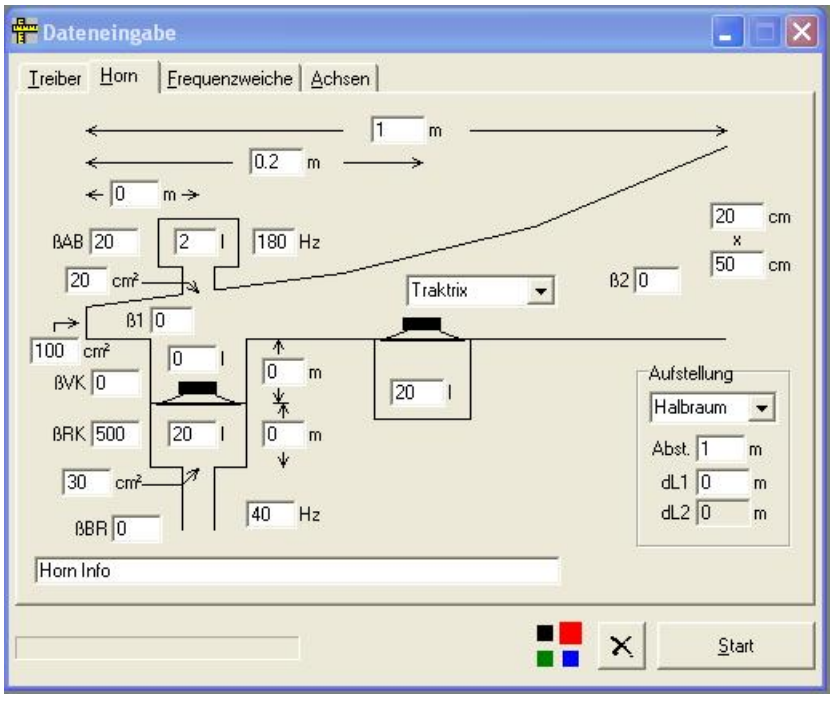
In diesem Menuabschnitt werden die Abmessungen und Volumina des Horns, der Horntyp und die Öffnungsfunktion des Horns angegeben. Zur Veranschaulichung der Eingabeparameter sind auch die Grafiken in Abschnitt 2 hilfreich.



Die Eingabe-Grafik lässt sich an verschiedenen Stellen anklicken, um so zwischen den verschiedenen Typen zu wählen. Im Einzelnen sind dies

- Klick auf die Rückkammer ► Wechsel zwischen Front- und Rearloaded.
- Klick auf die Rückkammer2 ► Hinzufügen / Entfernen der Rückkammer2.
- Eingabe VAB (Volumen der Absorberkammer) > 0 l ► Absorberkammer wird hinzugefügt.
- Eingabe Fläche des Bassreflexkanals > 0 cm² ► Bassreflexkanal wird hinzugefügt.

Eventuell muss zur Aktivierung des Feldes noch auf irgendein anderes Feld geklickt werden. Die Aktivierung sämtlicher Elemente führt zu folgendem Aufbau, der in den meisten Fällen jedoch kaum zu optimieren ist.



Kontur

Die Benennung der Hornöffnungsfunktionen beruht auf historischen Vorgaben. Diesen zu Folge wird die Kontur als Radius eines kreisrunden Horns angesehen. Leute ohne tiefergehende Kenntnisse in Funktionentheorie können diesen Abschnitt überspringen und sich die unterschiedlichen Funktionen mit Hilfe der Plotfunktion von AJHorn ansehen.

Parabolisch — Ein parabolisches Horn ist ein Horn, dessen Radius sich mit der Quadratwurzelfunktion erweitert. Die Fläche ist also proportional der Länge.

Konisch — Ein konisches Horn ist ein Horn, dessen Radius sich linear mit der Länge erweitert. Die Fläche geht also quadratisch mit der Länge.

Exponentiell — Der Radius eines Exponentialhorns erweitert sich mit der Exponentialfunktion (e-Funktion). Die Besonderheit der Funktion bringt es mit sich, dass sich auch die Fläche exponentiell erweitert.

Hyperbolisch — Der Radius eines reinen hyperbolischen Horns erweitert sich mit der Kosinushyperbolikus-Funktion (cosh). Die Fläche geht also mit dem Quadrat von cosh.

Oktal hyperbolisch — Der Radius eines oktalen hyperbolischen Horns geht mit der achten Potenz der cosh-Funktion. Die Fläche also mit der 16ten Potenz von cosh.

Geometrisch — Die Fläche eines geometrischen Horns ist definiert als Summe der unendlichen Reihe
A(x) = konst.* (1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + ...).
Im Anfangsbereich ähnelt es stark dem Exponentialhorn, es öffnet sich aber mit zunehmender Länge immer schneller.

Traktrix — Der Radius des Traktrixhorns („Kugelwellenhorn“) folgt der Traktrixfunktion („Schleppkurve“). Dieser Kontur werden Vorteile bei der Wellenausbreitung im Horn nachgesagt. AJHorn kann dieses Horn sowohl akustisch als auch mechanisch simulieren und Fläche, Radius und Höhe in Abhängigkeit von der Länge darstellen (explizite Darstellung). Dies ist deshalb erwähnenswert, weil es mathematisch nur eine implizite Darstellung (Länge in Abhängigkeit vom Radius) der Traktrixfunktion gibt.

Je nach eingesetztem Lautsprecher und der einzelnen Hornparameter können die verschiedenen Typen unterschiedliche Frequenzgänge hervorrufen. Manche sind linearer als andere, manche bieten eine niedrigere untere Grenzfrequenz, wieder andere den höchsten Wirkungsgrad und/oder die niedrigste Membranamplitude. Der Anwender ist also in der Lage, sich durch die Auswahl der Kontur einen Lautsprecher nach seinen Wünschen zu schaffen.

Raumposition

Dieser Parameter hat Einfluss auf den Wirkungsgrad und die Frequenzganglinearität im unteren, mittleren und oberen Übertragungsbereich. Verschiedene reflexionsfreie Aufstellungsbedingungen werden angenommen und können ausgewählt werden.

Frei — Diese Aufstellungsvariante findet man in einem reflexionsfreien Messraum ("schalltoter"-Raum). Sie ist momentan die einzige Möglichkeit zuverlässig Absolutmessungen mit hoher Genauigkeit auch im Tiefbassbereich durchzuführen. Alle Messungen in Abschnitt 7 wurden auf diese Weise aufgenommen. Die freie Aufstellung liegt allgemein immer dann vor, wenn die Hornöffnung nicht wesentlich kleiner ist als die Abmessungen der Schallwand und der Lautsprecher sonst frei nach allen Seiten abstrahlen kann. Eine korrekt durchgeführte Absolutmessung bestätigt eindrucksvoll die Genauigkeit von AJHorn.

Boden — Bei dieser Variante steht der Lautsprecher der freien Aufstellungsvariante auf dem Boden. Er besitzt also auch eine Schallwand, die nicht wesentlich größer ist, als die Hornöffnung.

Halbraum — Diese Aufstellungsvariante wurde den Berechnungen von Thiele und Small zugrundegelegt. Die Ergebnisse beziehen sich auf die Montage des Lautsprechers oder Hornes in eine unendliche Schallwand.

Boden + Wand — Diese Aufstellungsvariante bezieht sich auf die Abstrahlung des Lautsprechers in den Viertelraum.

Ecke — Diese Aufstellungsvariante bezieht sich auf die Abstrahlung des Lautsprechers in den Achtelraum.

Abstand

Der Abstand r in Metern bezeichnet die Entfernung vom Lautsprecher zum Ohr bzw. Messmikrofon. Für **Frontloaded** Typen ist dies der Abstand Hornmund-Messmikrofon und für **Rearloaded** Typen der Abstand Treibermembran-Messmikrofon.

Mundhöhe und Mundbreite

Wie in Abschnitt 2 mehrfach erwähnt ist dies die Höhe und Breite des Horns an seiner Austrittsöffnung (Hornmund). Zu beachten ist, dass das Programm die eindimensionale Lösung der Horngleichung verwendet. Als Hornfunktion ist also nur die **Fläche** in Abhängigkeit von der Länge nötig. So ist z.B. auch nur die **Mundfläche** und nicht das Verhältnis von Mundhöhe zu Mundbreite interessant. Es wird durch die Eingabe von Mundhöhe und Mundbreite nur die Bedienung des Programms erleichtert. Sie können also auch nach einer Umrechnung **kreisrunde** Hörner simulieren.

Hornlänge

Dies ist der Weg zwischen dem Hornanfang (Hals) und dem Hornende (Mund) in m.

Position Treiber1 bzw. Treiber2

Dies ist der Abstand des jeweiligen Treibermittelpunktes zum Hornanfang (Hals). Genauere Angaben findet man in den Zeichnungen in Kapitel 2.

dL (Differenzlänge)

Diese Länge spielt bei der phasenrichtigen Summation von Teilschalldrücken eine Rolle. Die Differenzlänge ist der Längenunterschied zwischen zwei schallabstrahlenden Medien bezogen auf den Hörort. Für Frontloaded und Rearloaded Typen hat dieser Wert unterschiedliche Bedeutung. Die genaue Anwendung wird in Kapitel 2 beschrieben.

Halsfläche

Diese Fläche in cm^2 ist die Fläche am Anfang des Horns (Hals).

Vorkammervolumen

Dieser Wert in l (Liter) beschreibt das Volumen zwischen Lautsprechermembran und Hornanfang.

β1, β2, βab, βvk, βrk (Dämpfungskoeffizienten)

Mit diesen Koeffizienten wird der Einfluss von Dämpfungsmaterial im Hornkanal beschrieben. Bei $\beta 1$ und $\beta 2$ wird davon ausgegangen, dass vom Hals ($\beta 1$) bis zum Mund ($\beta 2$) des Hornkanals die Dämpfung linear verläuft. Alle übrigen Koeffizienten setzen homogen gedämpfte Gehäuse voraus.
Ab AJHorn 6 ist die Dämpfung frequenzabhängig. Die Eingabe der Beta-Werte bleibt zwar unverändert, jedoch wird die Bedämpfung nun in der Simulation als frequenzabhängig betrachtet. Brauchbare Werte liegen zwischen 0 (keine Dämpfung, glatte Wände) und 1000 (vollständige Füllung mit Dämmmaterial). Außer für die Rückkammer wird empfohlen zu Beginn der Berechnungen β auf 0 zu setzen um dann durch Verändern der Werte den Einfluss der Bedämpfung zu beobachten.

Rückkammer

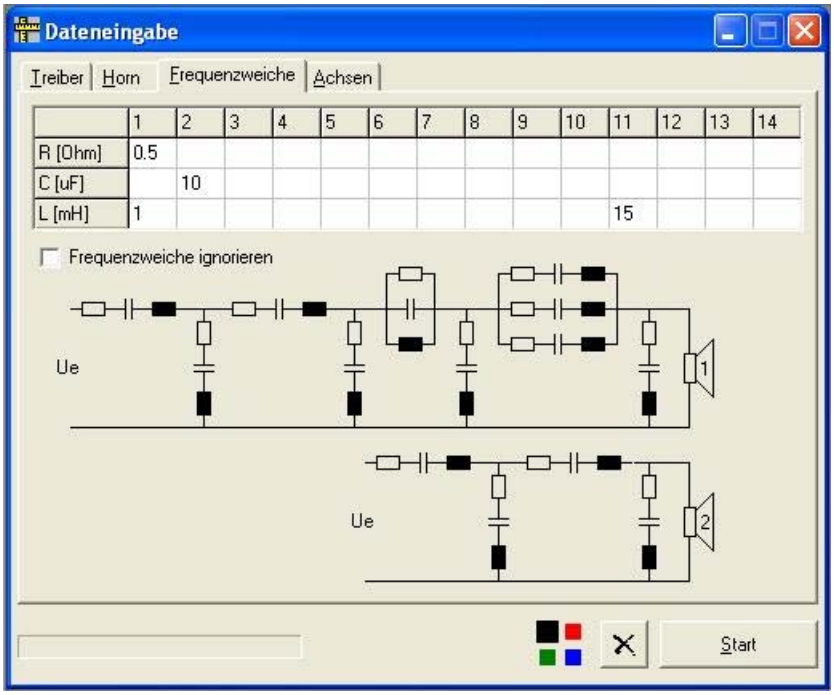
Eingabevariablen für die Rückkammer sind das Rückkammervolumen, die Bassreflexfrequenz, die Fläche des Bassreflextunnels und der Dämpfungskoeffizient des Bassreflextunnels βbr. Die zugehörige Kanallänge wird von AJHorn berechnet und im Fenster „Sonstiges“ als lbr (Länge des Bassreflexkanals) ausgegeben.
Die Rückkammervariablen bleiben bei Rearloaded Typen unberücksichtigt.

Absorberkammer

Die Absorberkammer befindet sich fest an der Mündung Vorkammer ► Horn (Position Treiber1). Eingabevariablen für die Absorberkammer sind das Volumen, die Absorberkammerfrequenz fab, die Fläche des Absorberkammerkanals und der Dämpfungskoeffizient der Absorberkammer βab. Die Absorberkammer sollte in den meisten Fällen bedämpft werden (βab > 0), sonst kommt es zu Resonanzen, die von AJHorn korrekt simuliert werden. Die Länge des Absorberkanals (lab) wird von AJHorn berechnet und im Fenster „Sonstiges“ angezeigt.

4.3 Frequenzweiche

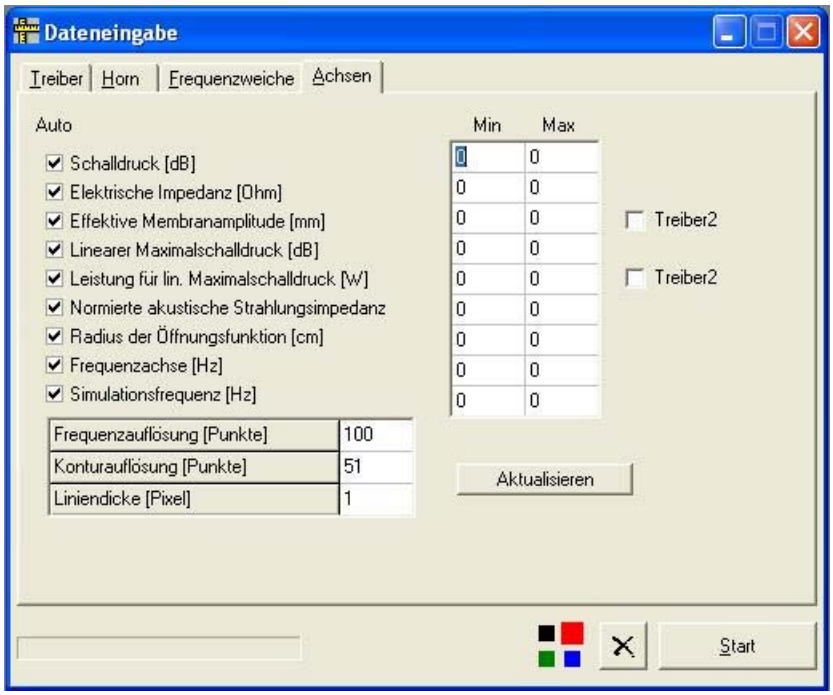
In diesem Menuabschnitt kann eine passive Frequenzweiche hinzugefügt werden. Die Widerstände R_i werden in Ohm (Ω), die Induktivitäten L_i (Spulen) in mH und die Kapazitäten C_i (Kondensatoren) in µF angegeben. Die folgende Abbildung zeigt den Aufbau der passiven Weiche.



Durch Anklicken eines Frequenzweichenbauteils im Schaltplan unten wird der Cursor auf das entsprechende Feld in der Eingabetabelle oben gesetzt. Dort wird dann der Wert des Bauteils eingetragen. Wird ein Eingabefeld freigelassen, wird das Bauteil bei der Berechnung nicht berücksichtigt (bei Reihengliedern gebrückt).

4.4 Achsen

Wie schon weiter oben erwähnt lassen sich mit AJHorn verschiedene Eigenschaften eines (Horn-)Lautsprechers simulieren. Mit dieser Menüoption legen sie eine automatische oder manuelle Achsenskalierung der Ausgabefrequenzgänge fest.



Ein Haken bei der Spalte „Auto“ bedeutet, dass AJHorn eine automatische Skalierung der Achsen vornimmt. Wird ein Haken entfernt, müssen Minimalwerte und Maximalwerte der Achse angegeben werden. In der Zeile „Simulationsfrequenz“ kann die kleinste und größte simulierte Frequenz eingegeben werden. Dazwischen werden die Punkte logarithmisch verteilt. Die Variable „Konturauflösung“ gibt die Anzahl der Konturschritte für die Konturtextdatei an. Dieser Wert ist sicherheitshalber auf 10000 begrenzt. Mit der Schaltfläche „Aktualisieren“ werden die Grafen neu gezeichnet, jedoch keine neue Berechnung durchgeführt.

5 Simulationsresultate

5.1 SPL (Schalldruck in dB)

Dieser auch als "Sound Pressure Level" (SPL) bekannte Wert gibt den simulierten Frequenzgang des Schalldrucks des Lautsprechers in einer Entfernung von r Metern auf Achse an. Er gehört zur Standardmessung eines jeden Lautsprechers und lässt viele Schlüsse auf das Klangverhalten des Lautsprechers zu, da das Ohr im hörempfindlichen Bereich ebenfalls als Drucksensor arbeitet. Er sollte nach Möglichkeit relativ glatt verlaufen. Schmalbandige Überhöhungen im Frequenzgang von mehr als ca. 3 dB sind als "Lieblingsfrequenzen" des Lautsprechers durchaus hörbar und daher zu vermeiden.

5.2 Elektrische Impedanz in Ω

Dieser Frequenzgang gehört ebenfalls zur Standardmessung und -beurteilung von Lautsprechern.

5.3 Membranamplitude in mm

Dies ist der Frequenzgang des Effektivwerts der Membranauslenkung bei einer bestimmten Eingangsspannung. Der Spitze-Spitze-Wert liegt bei dem 2,83-fachen des Effektivwertes.
Gerade bei einem Horn wird die Membranamplitude in entscheidendem Maße reduziert und gleichzeitig der Schalldruck gesteigert. Dies ist der Grund für die fast schon als unglaublich geltenden Schalldrücke, die ein korrekt konstruiertes Horn abzugeben in der Lage ist, und für den legendären Ruf dieser Art Lautsprecher.

5.4 SPLmax (linearer Maximalschalldruck in dB)

Dieser Frequenzgang gibt den Schalldruck an, den der Lautsprecher maximal erzeugen könnte. Die Höhe des Maximalschalldrucks ist begrenzt durch den Effektivwert von X_{max} und durch die elektrische Belastbarkeit des Treibers.

5.5 Pmax (erforderliche Leistung in Watt für den Maximalschalldruck)

Dieser Frequenzgang gibt die benötigte Leistung für den linearen Maximalschalldruck an.

5.6 Konturradius

Dieses Fenster zeigt die Hornkonturfunktion in cm an. Für eine genauere Angabe der Werte und eine spätere praktische Realisierung kann man sich auch die Zahlenwerte im Hauptmenü unter „Extras“->“Kontur listen“ auch listen lassen. Dabei werden in den einzelnen Spalten die aktuelle Länge, die Fläche, die Höhe und der Radius angezeigt.

5.7 Akustische Impedanz der Membran

Wird die Vorkammer weggelassen, ist dieser Wert identisch mit der Strahlungsimpedanz des Hornhalses. Dieser durch Messungen schlecht zugängliche Wert ist ein Maß für die abgestrahlte akustische Leistung. Die Impedanz wird auf ρ*c normiert dargestellt. In der fundamentalen Literatur über Akustik und in theoretischen Betrachtungen wird auf diese Größe Bezug genommen, so dass sie hier der Vollständigkeit auch zum Vergleich mit Literaturwerten angeführt wird. Der Realteil ist durchgezogen und der Imaginärteil gestrichelt dargestellt.

6 Grenzen der Simulationsgenauigkeit

AJHorn ist ein sehr aufwändiges, präzises, wissenschaftliches Programm, mit dem Hornlautsprecher und Transmissionlines und deren Spezialfälle simuliert werden können. Bei der Berechnung werden allerdings einige Idealisierungen vorausgesetzt. Für die Ergebnisse der Simulation kann deshalb keine Gewähr übernommen werden. Es liegt auch in unserem Interesse, Ihnen die Simulationsgrenzen weiterzugeben, denn wir wollen, dass sie Ihren geplanten Lautsprecher so exakt wie möglich vorherberechnen können.

6.1 Der Lautsprecher selbst

Die Membran des Lautsprecherchassis verhält sich nur bis zu einer gewissen Frequenz kolbenförmig, d.h. sie schwingt an allen Stellen mit gleicher Amplitude vor und zurück. Schwingt eine Membran nicht mehr kolbenförmig kommt es zu Membranresonanzen. Dieses Phänomen wird auch als "Aufbrechen" bezeichnet. Der Schalldruckfrequenzgang wird dann zunehmend wellig. Es versteht sich wohl von selbst, dass dies auch einen Einfluss auf den Schalldruckfrequenzgang des Horns hat.

6.2 Die Vorkammer und Rückkammer

Diese Kammern werden bei AJHorn 6 als zylindrische Röhre der Länge l mit der AJHorn-Impedanztheorie beschrieben (also als Horn). Im Gegensatz zu früheren Versionen können so Laufzeitunterschiede und Hohlraumresonanzen der Kammern gut beschrieben werden. Auch für nicht zylindrische Kammern ist dieses Modell anwendbar und erstaunlich präzise. Es kann jedoch durch die detaillierten Abmessungen der Vorkammer zu Resonanzen im Schalldruckfrequenzgang kommen, allerdings erst bei relativ hohen Frequenzen. Diese Erscheinungen sind weiter unten messtechnisch beschrieben. Wenn Hörner auch an ihrem oberen Übertragungsende genutzt werden sollen, muss die Vorkammer so klein wie möglich gehalten werden. Die genaue Geometrie der Vorkammer spielt dabei auch eine Rolle (Phasenkorrektur). Die Rückkammer wird in den allermeisten Fällen bedämpft und stellt so kein großes Problem dar.

6.3 Absorberkammer und Absorbertunnel

Die Absorberkammer wird, bei AJHorn durch einen relativ einfachen Zusammenhang beschrieben[1]. Dieses Bild ist nur dann korrekt, wenn die Abmessungen kleiner als die Wellenlänge der abzustrahlenden Frequenz sind. Wird die Absorberkammer bei Wellenlängen im Bereich oder oberhalb der Abmessungen betrieben, ist diese durch geeignete Materialien zu bedämpfen. Die Frequenz, ab der eine Bedämpfung unbedingt empfohlen wird liegt bei

$$f_0[Hz] \approx \frac{17000}{x[cm]}.$$

Die Variable x ist dabei die größte Dimension der Kammer (also das Maximum aus Länge, Breite und Höhe).
Im Tunnel der Absorberkammer bilden sich stehende Wellen, die den Klang negativ beeinflussen können. Die stehende Welle mit der niedrigsten Frequenz liegt bei

$$f_0[Hz] \approx \frac{15000}{lbr[cm]}.$$

Da die Absorberkammerfrequenz sinnvoller Weise im Tief- oder Grundtonbereich liegt, das Volumen bei wenigen Litern und die Länge bei wenigen Zentimetern dürfte diese Eigenschaft sich kaum störend bemerkbar machen.

6.4 Hornkontur

AJHorn bedient sich der Lösung der eindimensionalen Horngleichung. Es werden also ebene sich ausbreitende Wellen angenommen. Für sich langsam öffnende Konturen ist dies sehr gut erfüllt. Wird aber die Steigung der Öffnungsfunktion zu groß, breitet sich die Welle nicht mehr eben aus (nein, auch nicht als Kugelwelle). Bei den meisten Bass- und Mitteltonhörnern wird man wohl keine Probleme haben. Die Simulationen sind für diese Typen sehr genau. Probleme können bei Hochtonhörnern mit sehr großer Mundfläche auftreten. Das Ergebnis der Simulation ist dann zwar immer noch gut, aber nicht so traumhaft, wie bei einem Basshorn.

[1] Acoustic compliance, acoustic mass

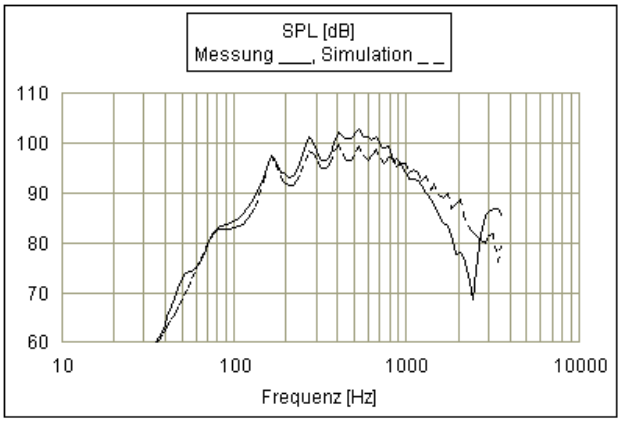
7 Vergleich mit Messergebnissen

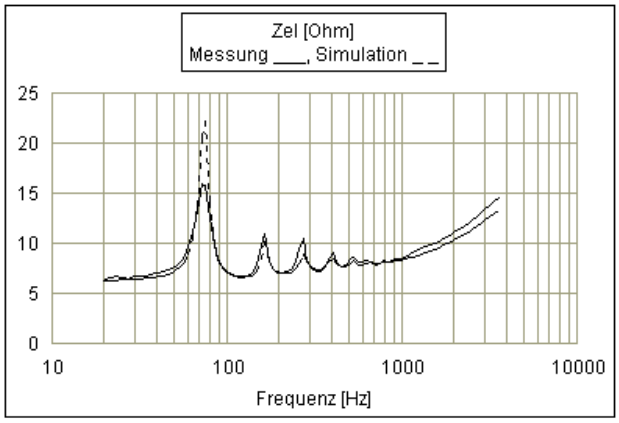
Wem nützt das schönste Simulationsprogramm, wenn niemand weiß, ob die berechneten Resultate auch in der Praxis zutreffen. Sinn eines Simulationsprogramms ist es doch, Zeit für den Aufbau von Prototypen zu sparen, und am Bildschirm zu sehen was passiert, wenn man den einen oder anderen Parameter ändert. Voraussetzung dafür ist natürlich das Vertrauen in die Simulation. Dieses soll durch die nachfolgenden Beispiele etwas gefestigt werden.

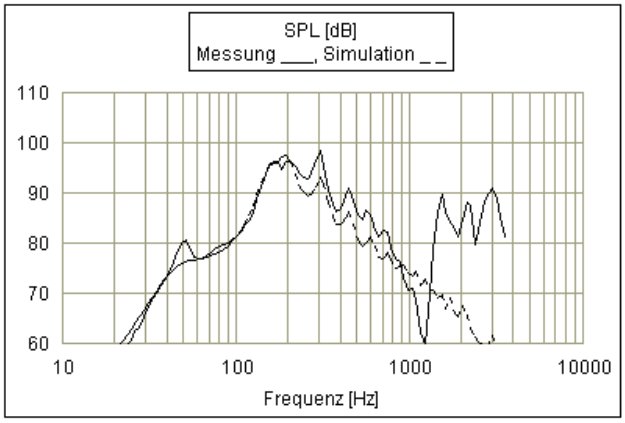
Alle Messungen wurden in einem reflexionsarmen Messraum mit einer unteren Grenzfrequenz von 70 Hz durchgeführt. Die Mess- und die Simulationsergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

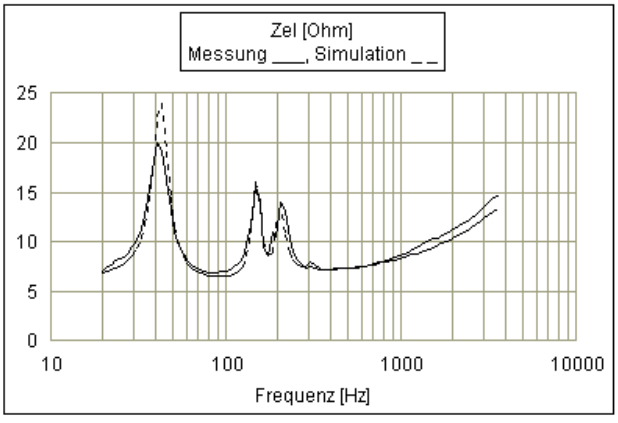
7.1 Variables Testhorn

Das variable Testhorn ist ein Frontloaded-Mitteltonhorn, welches nicht etwa auf einen linearen Frequenzgang optimiert wurde, sondern die charakteristischen Resonanzspitzen eines nicht idealen Horns aufzeigen soll, um diese mit der Simulation zu vergleichen. Es besteht aus mehreren Teilstücken, um die Länge, die Halsfläche und die Mundfläche des Horns zu variieren. Die Öffnungsfunktion ist die Exponentialfunktion. Die verschiedenen Simulationen mit **AJHorn** und die zugehörigen Messungen zeigen die folgenden Abbildungen.







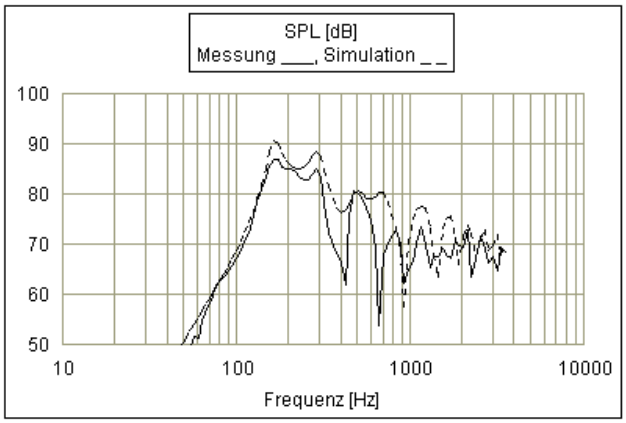


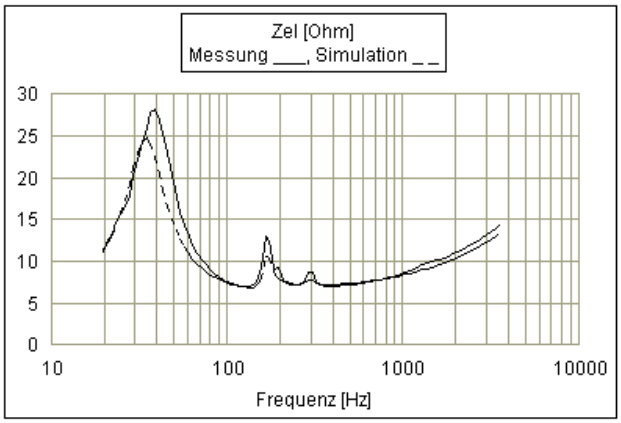
7.2 Kleines Rearloaded Horn

Das kleine Rearloaded Horn ist ein Horn welches aus dem variablen Testhorn durch Entfernen der Rückkammer gewonnen wurde. Es ist also ebenfalls nicht als konkrete Anwendung gedacht, sondern soll die Theorie mit dem

Experiment vergleichen. Die Differenzlänge dL von 0 m ist durch die Anordnung des Mikrofons erreicht worden. Diese wird in der folgenden Abbildung deutlich.

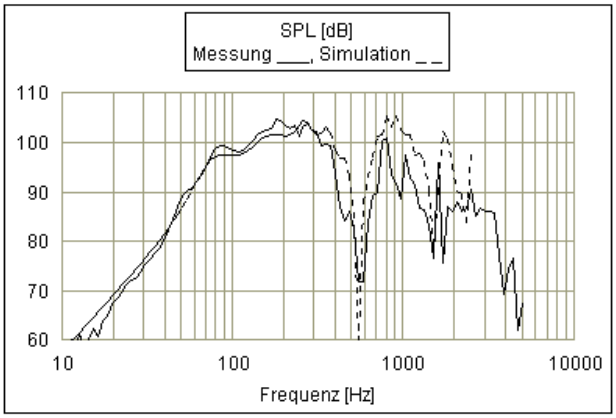
Natürlich ist diese Messung nur im Bereich kugelförmiger Abstrahlung aussagefähig. Dies ist im Bereich tiefer Frequenzen der Fall. Hier nun die Messergebnisse im Vergleich mit der Simulation.

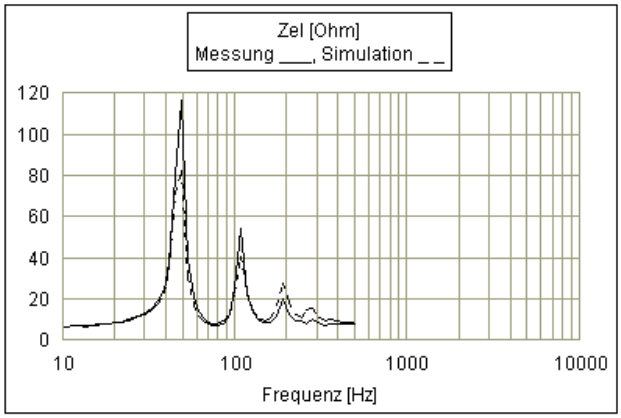


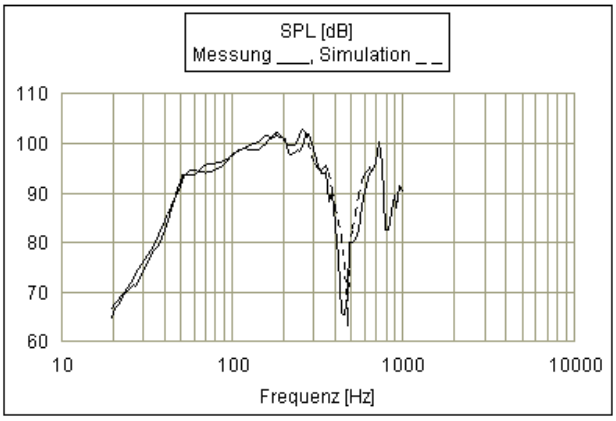


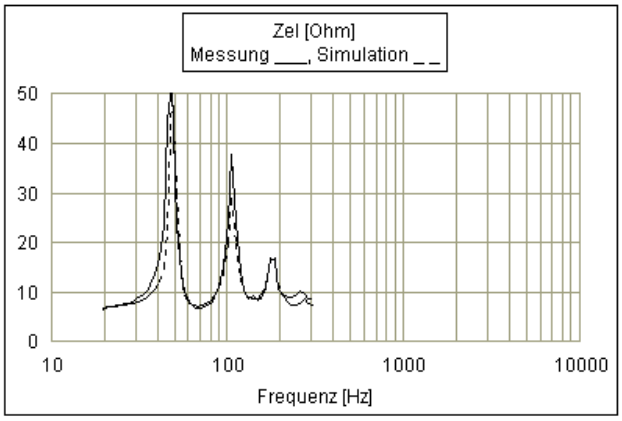
7.3 Gefaltete Frontloaded Tieftonhörner

Dies sind gefaltete Tieftonhörner mit PA-Cassis. Der Wirkungsgrad im Freifeld ist sehr hoch (>98dB, >80Hz, 1W). Im Halbraum (Thiele-Small) ist der Wirkungsgrad noch einmal 6 dB größer. Die Ergebnisse der Simulation mit **AJHorn** und die Messergebnisse zeigen die folgenden Abbildungen.







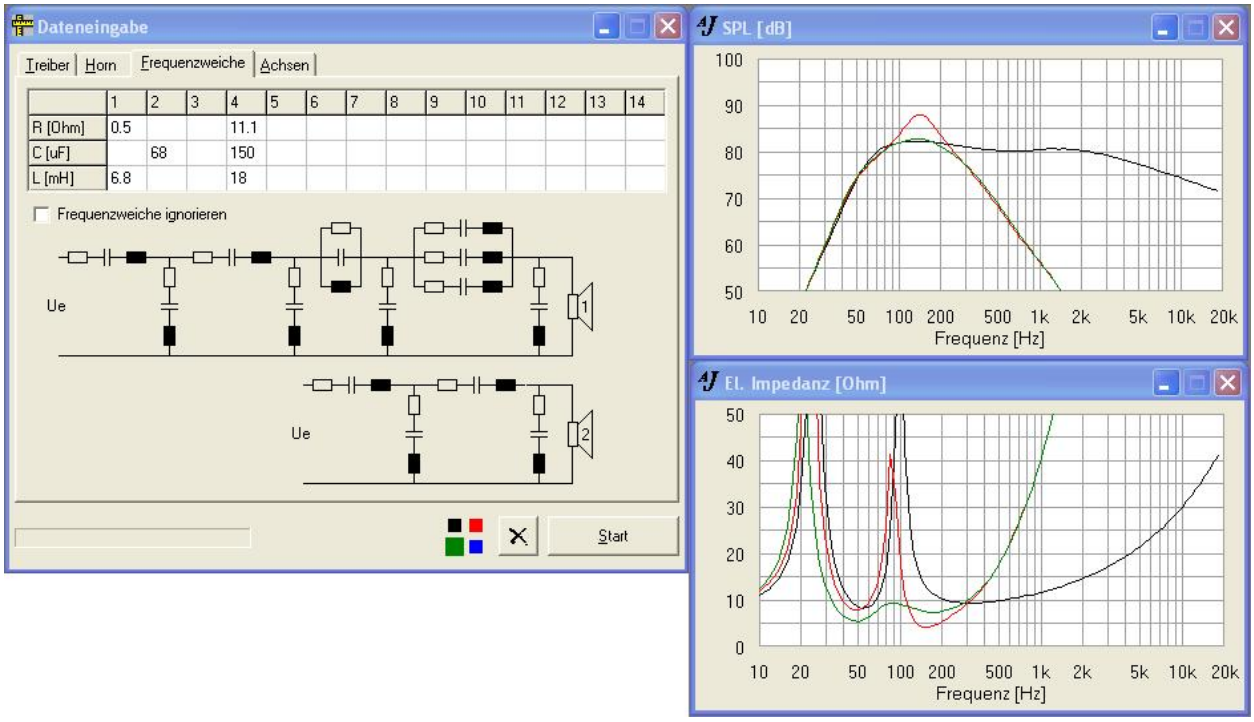


Die Eingabevariable Treiberposition (TP) von 0,15 bzw. 0,2 m führt zu Minima im Schalldruck, die korrekt simuliert werden.

7.4 Frequenzweichen, Saugkreise und Notch-Filter

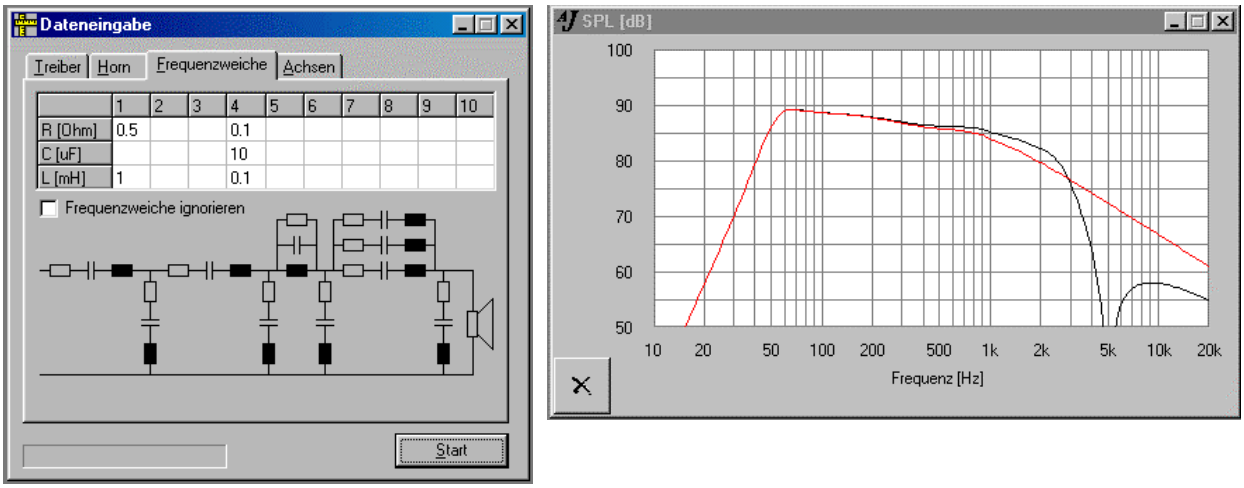
Focal 5V4411 mit Tiefpass und Saugkreis[2]

Die folgende Abbildung zeigt den simulierten Frequenzgang des Treibers 5V4411 im 4,5 Liter Bassreflexgehäuse ohne Frequenzweiche, mit Tiefpass (0,5 Ω, 6,8 mH, 68 µF) und mit zusätzlichem Saugkreis (11,1 Ω, 18 mH, 150 µF). Die Übereinstimmung mit der HobbyHifi Messung ist besser +-1 dB (30-700 Hz).



IT "Odin" mit Excel W17EX002[3]

Durch ein genaueres Modell der Schwingspuleninduktivität ab Version 4.0 kann AJHorn Frequenzweichendesigns für den Mitteltonbereich noch besser simulieren. Die Frequenzweiche greift auf der elektrischen Seite des Netzwerks ein und beeinflusst die elektrische Spannung am Chassis. Einzige dafür benötigte Größe ist der Frequenzgang der elektrischen Impedanz unter Berücksichtigung des Gehäusetyps und dessen akustischen Parametern. Diese Größe simuliert AJHorn sehr zutreffend, so dass es möglich ist, passive Netzwerke zu kreieren. Die folgende Abbildung zeigt den Treiber Excel W17EX002 mit der Reihenspule 1,0 mH (rot) und zusätzlich mit dem Saugkreis 0,1 Ω, 0,1 mH, 10 µF (schwarz).

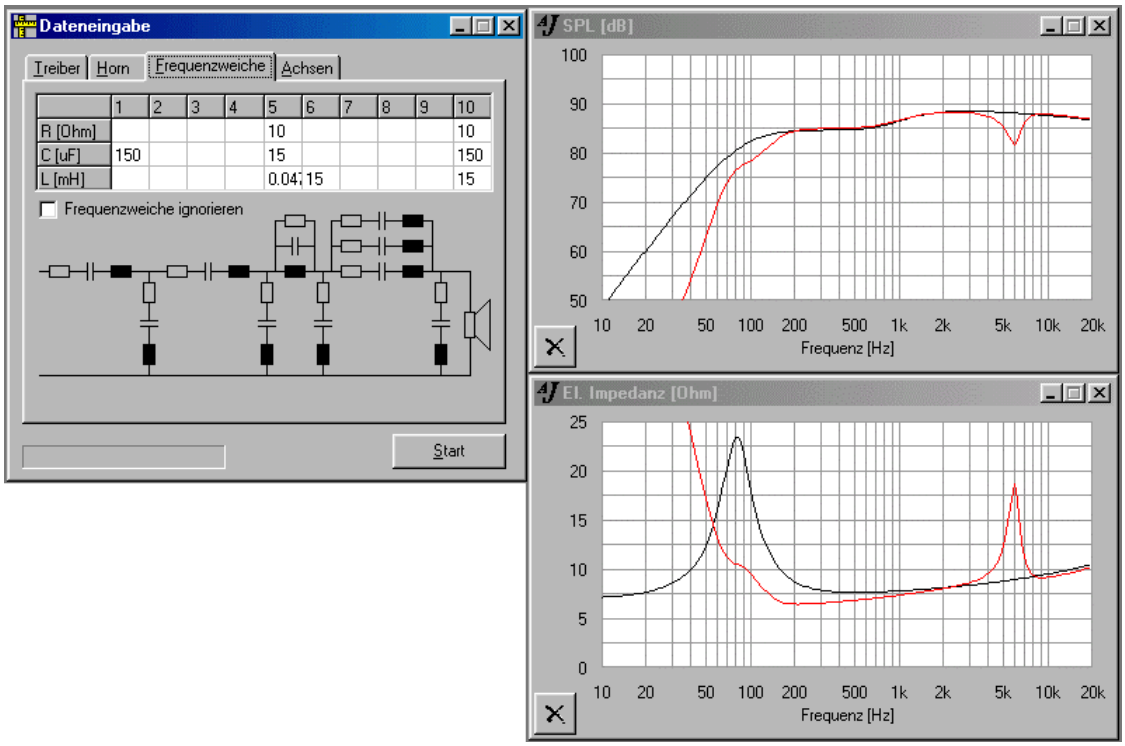


Da das Chassis laut Datenblatt zwischen 2 und 3 kHz ein Minimum und zwischen 4 und 5 kHz ein stark ausgeprägtes Maximum besitzt, ist der Saugkreis für diesen Treiber optimal angepasst.

[2] Ref.: HobbyHifi 6/99 S. 71
[3] Ref.: Klang+Ton 4/00 S. 19 ff, IT-Handbuch

“Open Source” mit Ciare HX 132[4]

Viele Breitbandsysteme müssen für eine ausgeglichene Musikwiedergabe elektrisch entzerrt werden, da sie ohne Entzerrung gewisse Frequenzbereiche zu stark betonen. Dazu werden Notchfilter in die Frequenzweiche eingebaut. Die Wirkung eines solchen Filters zeigt die folgende Abbildung, in der das System „Open Source“ mit und ohne Frequenzweiche simuliert wurde.



Der Einfluss des Notch-Filters (R5, C5 und L5) wird bei 6 kHz sichtbar. Die Wirkung der gesamten Frequenzweiche auf den Schalldruck- bzw. Impedanzfrequenzgang wird korrekt erfasst (vgl. HobbyHifi Messergebnisse).

8 Zusammenfassung

Wir hoffen, Ihnen mit dieser Anleitung einen ersten Überblick über die Leistungsfähigkeit und die unkomplizierte Eingabe von **AJHorn** gegeben zu haben. Mit ein wenig Übung wird es Ihnen gelingen, innerhalb weniger Simulationsläufe die für Sie optimale Geometrie durch Ausprobieren zu finden. Das aufwändige Fertigen von Probegehäusen wird auf ein Minimum reduziert und man kann am Bildschirm die Veränderung auf die Frequenzgänge beobachten, wenn man den einen oder anderen Parameter verändert. **AJHorn** wird Ihnen also sehr viel Zeit und Mühen ersparen.
Wir wünschen Ihnen viel Erfolg bei der Konstruktion.

AJ

AJ-Systems
Armin Jost
Nibelungenstr. 748
D-64686 Lautertal
www.aj-systems.de

[4] Ref.: HobbyHifi 3/05 S. 14 ff