

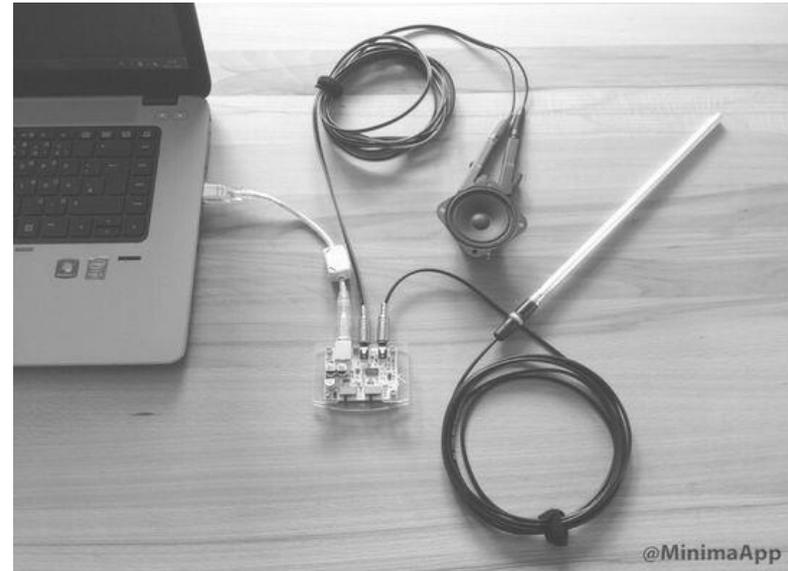
Grundlagen akustischer Messtechnik

Autodidaktischer Ansatz

1. Ermittlung von Messabständen

Version 1.0 (17.11.2015)

*Meinen herzlichen Dank an alle
diy-hifi-forum user, die Forumbetreiber und Moderatoren,
die das STIC Projekt ermöglicht und unterstützt haben !*



Was interessiert den Anwender ?

Der Anfänger stellt sich häufig zuerst die Frage, wo und in welchem Messabstand das Mikrofon platziert werden sollte.

Will man den Frequenzgang einer Lautsprecherbox am Hörplatz messen, so ist das Mikrofon einfach an genau dieser Stelle aufzustellen. Man misst auf diese Weise alle Reflexionen mit und bekommt den exakten Frequenzgang wie das eigene Ohr das Signal auch hören würde.

Eine völlig andere Angelegenheit ist die Erstellung des Quasifreinfeldfrequenzganges einer Lautsprecherbox, so wie man es den Graphen in Zeitschriften wie Stereoplay etc. entnehmen kann. Hier wird der Frequenzgang, zwecks Vergleichbarkeit unabhängig vom Raum – also reflexionsfrei – so vermessen, wie er in einem üblichen Hörabstand ($\sim >2$ Meter) in einem schalltoten Raum am Ohr ankommen würde. Dazu stellt man die Box entweder in einen ‚reflexionsfreien Raum‘, misst im Freien oder überlegt sich, wenn beides nicht zur Verfügung steht, eine Methode wie man in einem normalen Wohnraum möglichst genaue Messungen machen kann.

Die letzte Methode wird hier und in den folgenden Papers beschrieben.

Mikrofonabstand so gering wie erlaubt

Wenn wir das Mikrofon so nahe wie möglich vor die Membran platzieren dürften, so könnten wir uns schon ohne komplizierte Untersuchungen einige Vorteile erhoffen:

- Der direkte Schall ist von sehr hoher Intensität. Nebengeräusche und Reflexionen haben sehr geringen Einfluss auf das Messergebnis, da diese mit erheblich geringerer Intensität auf das Mikrofon treffen***
- In diesem Fall reicht auch ein kleines Zimmer aus***

Das klingt schon mal attraktiv, daher ist klar, dass ein möglichst kurzer Messabstand eines unserer Ziele ist. Leider müssen wir wie wir auf den folgenden Seiten feststellen, dass bestimmte Abstandsregeln eingehalten werden müssen, um Messfehler gering zu halten

Daher kommen wir nicht herum, uns etwas mit Mathematik zu beschäftigen...

Schallausbreitung einer ebenen Scheibe (Rayleigh-Formel)

Rayleigh-Formel

Was haben wir nun zu erwarten, wenn wir ein Mikrofon vor die Membran eines Lautsprechers halten? In erster Näherung entspricht ein idealer Lautsprecherkonus einer ebenen runden Scheibe. Für die Scheibe gibt es eine Formel für den Schalldruck als Funktion vom Scheibenradius a , dem Scheibendurchmesser d und dem Messabstand r , wenn die Scheibe in eine unendlich große Schallwand eingebaut ist:

$$|p(r)| = 2\rho_0 cv \sin\left(ka \frac{(r^2/a^2 + 1)^{1/2} - r/a}{2}\right)$$

a = Membranradius, k = Wellenzahl = $\omega/c = 2\pi/\lambda = 2\pi f/c$, ω = Frequenz = $2\pi f$,
 c = Schallgeschwindigkeit, ρ_0 = Dichte der Luft

Scheibenradius a
Scheibendurchmesser d



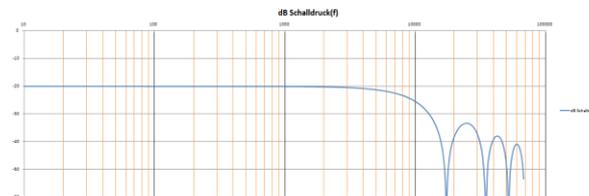
Schallausbreitung einer ebenen Scheibe (Rayleigh-Formel)

Rayleigh-Formel

Die Auflösung der Rayleigh Formel gibt uns leider die Information, dass wir bereits bei Messungen an einem idealen Lautsprecher mit prinzipiell absolut linearem Frequenzgang (= Scheibe) abstands- und frequenzabhängige Messfehler machen, wenn wir den Messabstand zu gering wählen.

Wir werden daher die Formel genauer untersuchen, um zu ermitteln, wie man Messabstände denn möglichst gering halten kann und gleichzeitig geringe Messfehler erzielt.

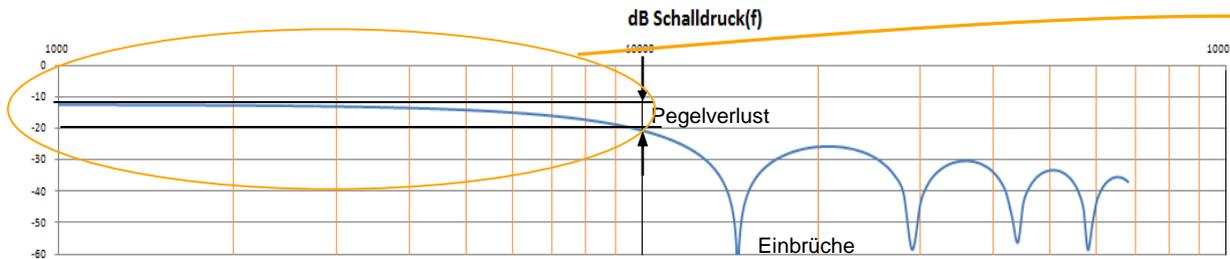
Auf den folgenden Seiten wird die Rayleigh-Formel für einige Beispiele grafisch dargestellt. Auf der x-Achse ist die Frequenz dargestellt auf der y-Achse der Schalldruck. Man sieht deutlich frequenz- und abstandsabhängige Pegeleinbrüche.



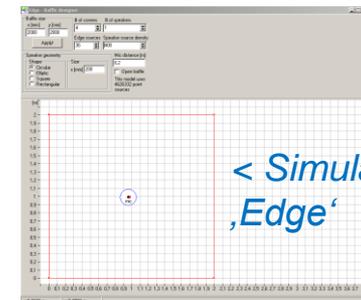
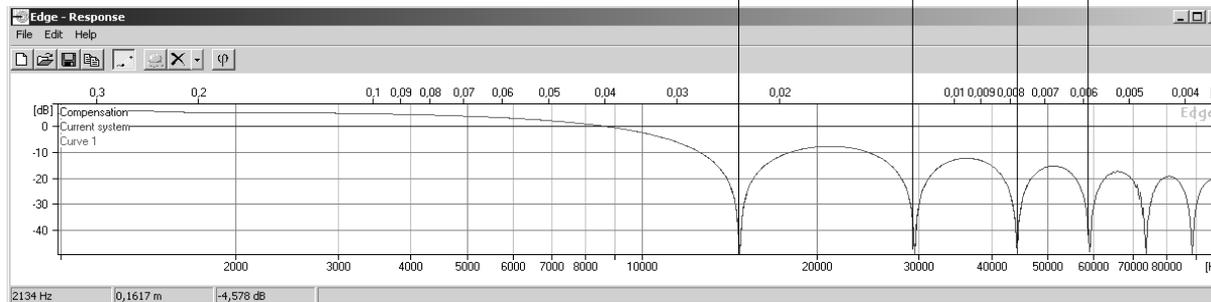
Um Euch die Möglichkeit zu geben, mit Abständen und Durchmesser zu spielen und den minimalen Messabstand zu ermitteln, habe ich Rayleigh Formel in EXCEL grafisch aufgelöst ([Rayleigh-Formel.xls](#))

Schallausbreitung einer ebenen Scheibe (Rayleigh-Formel)

Mikrofonposition bei $r = d$ (Mikrofonabstand = Chassisdurchmesser = 20cm)



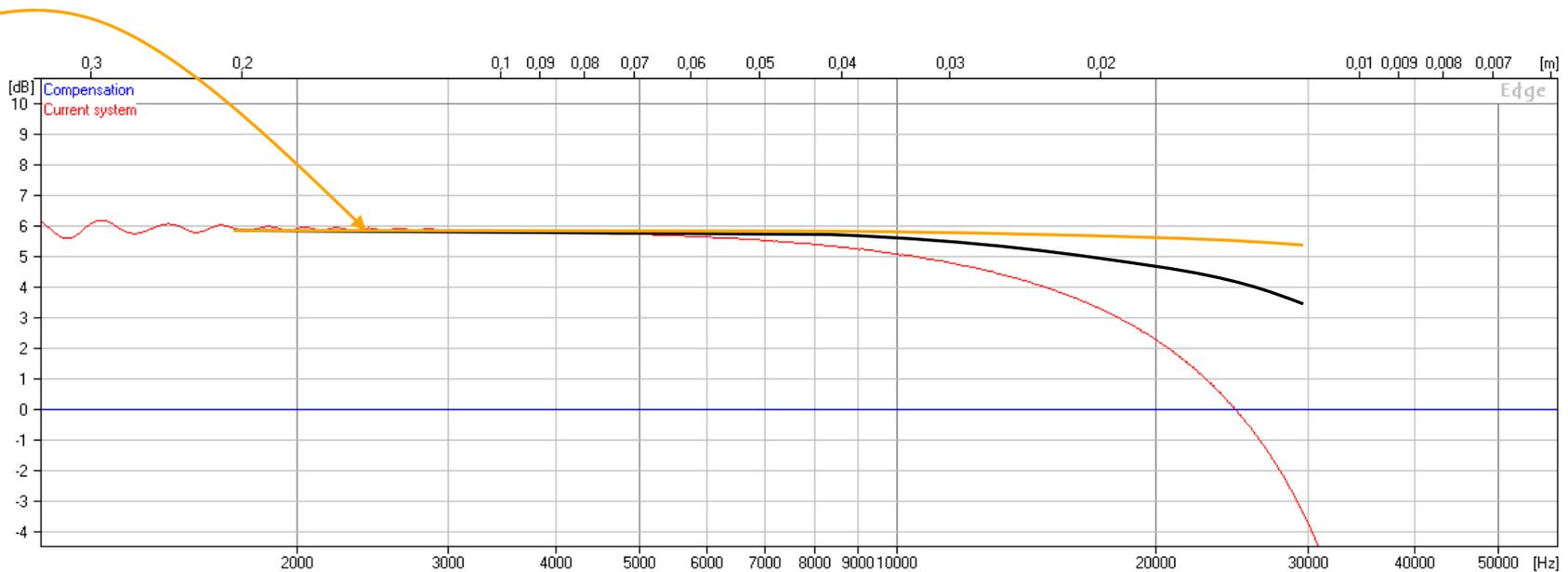
< Excel (Rayleigh Formel)



So zeigt z.B. ein ‚ideales‘ 20cm Chassis bei $r = d$ massive, abstandsbedingte Einbrüche bei $\sim 14\text{kHz} / \sim 27\text{kHz}$ etc., aber auch bereits Pegelerlust bei mittleren Frequenzen ($\sim -2\text{dB}@5\text{kHz}$). Diese Pegelerluste erhöhen sich mit steigendem Chassisdurchmesser – Der Abstandsbereich in dem Einbrüche im hörbaren Frequenzbereich auftreten, nennt man Nahfeld. Das Nahfeld eignet sich also zunächst nicht besonders für Frequenzgangmessungen. Daher müssen wir sichergehen, dass unser Messabstand ausreichend hoch ist, um nicht mehr im Nahfeld zu sein (= Fernfeld)

Schallausbreitung einer ebenen Scheibe (Rayleigh-Formel)

Frequenzabhängige Pegelverluste bei verschiedenen Abständen r eines Chassis mit 20cm Durchmesser (z.B Breitbandlautsprecher) bei höheren Messabständen



Pegelverlust -3dB @20kHz bei 60cm Messabstand

Pegelverlust ~-1,2dB@20kHz bei 1m Messabstand

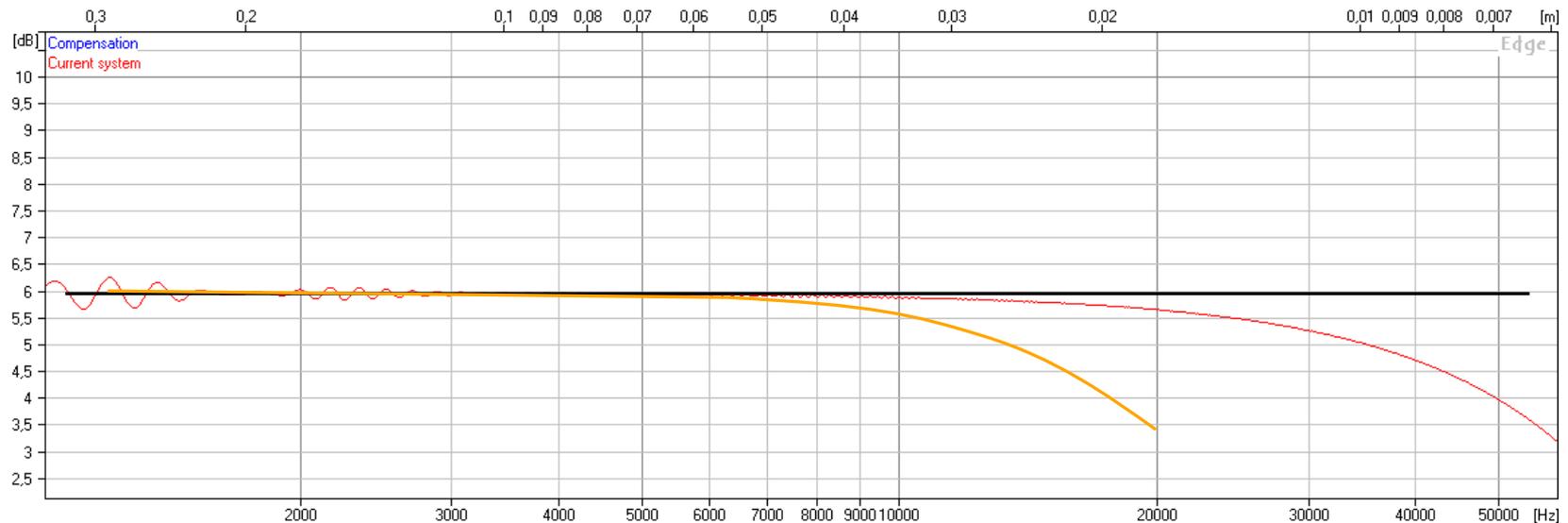
Pegelverlust ~-0,2dB @20kHz bei 2m Messabstand

Je höher der Messabstand desto genauer ist die Messung. Bei 1 Meter Messabstand ist die Messung bei Lautsprechern bis einem Durchmesser von 20cm schon recht genau.

(~-1dB@20kHz)

Schallausbreitung einer ebenen Scheibe (Rayleigh-Formel)

Frequenzabhängige Pegelverluste bei verschiedenen Abständen r eines Chassis mit 6cm Durchmesser bei höheren Messabständen



Pegelverlust -0,3dB @20kHz bei 18cm Messabstand

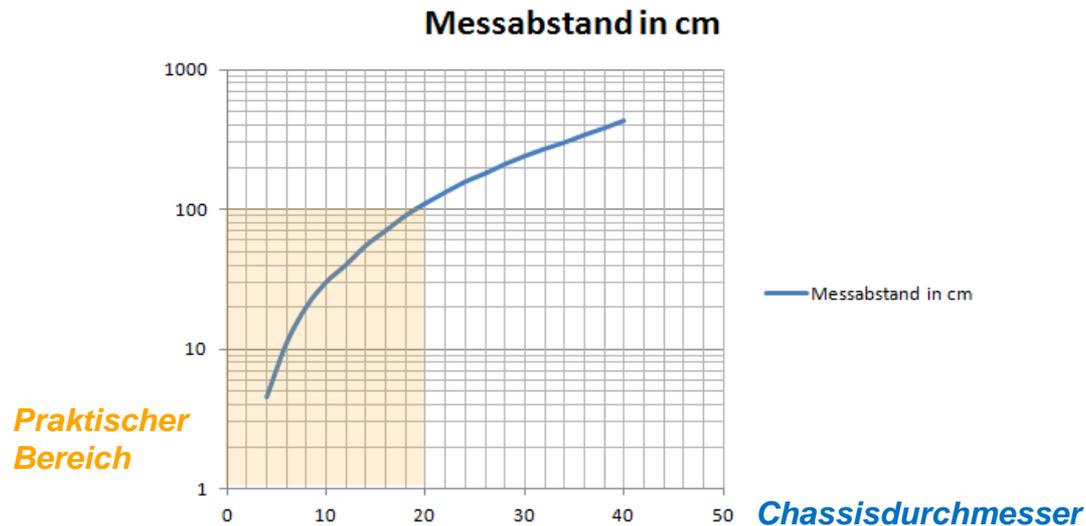
Pegelverlust ~-0dB@20kHz bei 1m Messabstand

Pegelverlust ~-2,5dB @20kHz bei 6cm Messabstand

Bei einem 6cm Chassis könnte man theoretisch bei einem Messabstand von ,nur‘ ca. 10cm mit geringem Fehler ~-1dB über das gesamte Frequenzband 20Hz...20kHz messen.

Schallausbreitung einer ebenen Scheibe (Rayleigh-Formel)

Chassis mit größerem Durchmesser benötigen zunehmend höheren Messabstand, um noch 20kHz unter einem Fehler von -1dB richtig messen zu können:



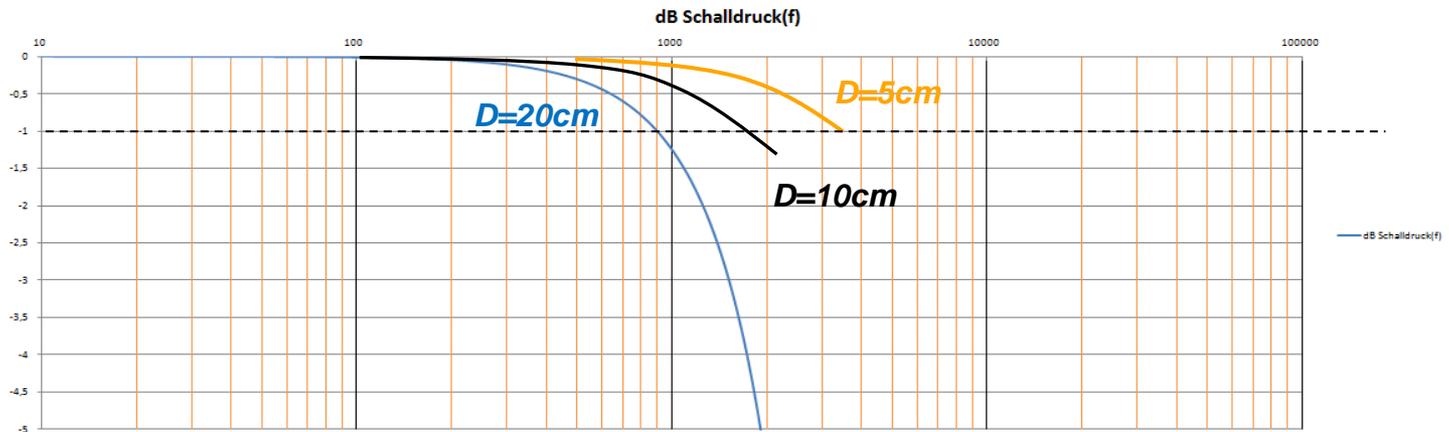
Allerdings dürfte es in der Praxis wohl kein Chassis mit mehr als 20cm Durchmesser geben, bei dessen Messung eine Genauigkeit bis 20kHz gefordert ist, da das Chassis aus anderen Gründen wohl nicht bis 20kHz eingesetzt wird. In der Praxis benötigt ein 20cm Breitbandlautsprecher etwa einen Messabstand von 1 Meter.

Wenn wir trotzdem einen 40cm Lautsprecher bis 20kHz einsetzen möchten, benötigen wir tatsächlich einen Messabstand von 4,3 Meter um bis 20kHz mit einem Fehler von -1dB zu messen. Bei einem Hochtöner dürften wir gemäß der Rayleigh-Formel theoretisch sogar kurz vor der Membran messen.

Schallausbreitung einer ebenen Scheibe (Rayleigh-Formel)

Unsere Rayleigh Formel gibt aber noch eine andere interessante Information:

Betrachten wir doch einmal die Situation wenn man direkt vor der Membran, quasi bei Messabstand Null misst. Jetzt haben wir die ungünstige Situation, dass wir die hohen Frequenzen erst recht nicht richtig messen können. (Wir können jedoch immerhin ermitteln, bis zu welcher Frequenz hinauf wir fehlerfrei messen können) Also was soll das Ganze?



Immerhin kann man ein 20cm Chassis bis ca 1kHz herauf mit geringem Pegelverlust von etwa -1dB messen, ein 10cm Chassis bis herauf zu ca 2kHz und ein 5cm sogar bis 3,5kHz.

Der Vorteil liegt -wie wir später sehen werden- darin, dass in diesem extremen Nahfeld keine Reflexionen mehr die Messung verfälschen würden und daher nicht ‚gegatet‘ werden muss. Diese Messung nennt man ,Nahfeldmessung

Fazit der Rayleigh-Formel

Bei Chassisdurchmesser kleiner als 20cm und Anwendung einer Abstandsregel von $r \geq 5 \cdot d$ messen wir mit einem Pegelverlust $< -1.5\text{dB}$ @20kHz

Damit wir nicht ständig neu in die Tabelle auf Seite 9 gehen müssen, um den minimalen Messabstand zu ermitteln, führen wir eine Abstandsregel ein, die bis auf weiteres sehr genaue Messungen bis zu einem Chassisdurchmesser von 20cm ermöglicht:

Regel 1 für Fernfeldmessungen:

Messabstand = ca. 5 mal Chassisdurchmesser

Für die Nahfeldmessung (Abstand = 0) machen wir auch gleich mal eine Regel:

Regel 2 für Nahfeldmessungen:

*Messabstand $< \sim 5\text{mm}$ für Nahfeldmessungen bis hin zu folgenden
Maximalfrequenzen gültig:*

D=20cm: 1kHz / D=10cm: 2kHz / D=5cm: 3,5kHz

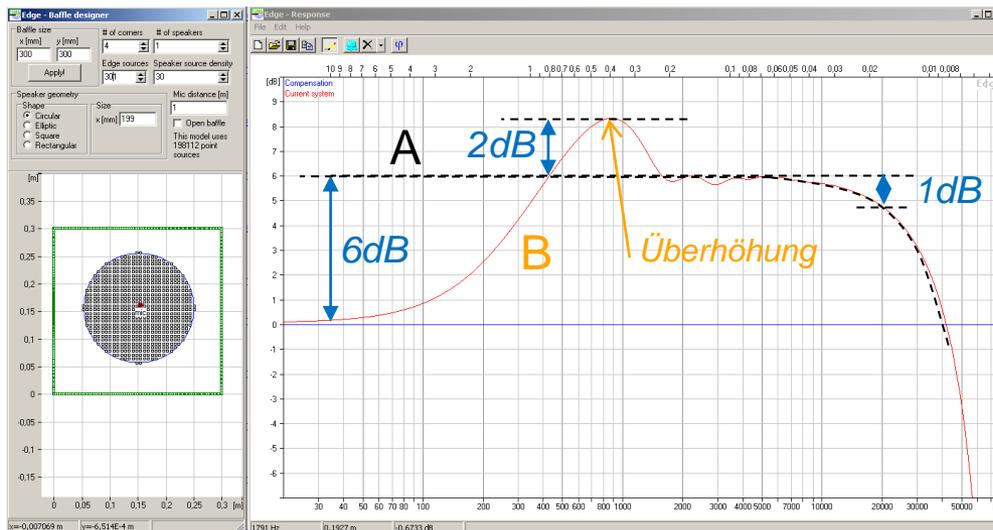
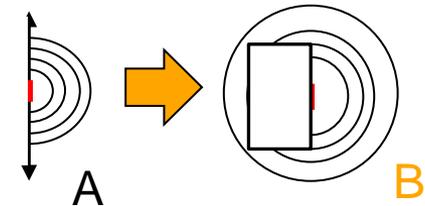
Diese Überlegungen gelten für den Einbau in eine theoretisch unendliche Schallwand. In der Praxis wird das Chassis in ein Gehäuse eingebaut und die Schallwand ist also endlich. Wir müssen also noch nachprüfen, ob wir obige Regeln bei Messen an einer Lautsprecherbox überhaupt praxistauglich sind.

Baffle Step

In der Praxis ist das Lautsprecherchassis in eine endliche Schallwand eingebaut. Schallwellen unter einer bestimmten Wellenlänge also Frequenzen unterhalb einer bestimmten Frequenz werden um das Gehäuse herum gebeugt. Diese Energie fehlt dann am Mikrofon und man misst unterhalb einer bestimmten Frequenz ~6dB weniger Schalldruck. Dieser Übergang von den Halb- in den Vollraum passiert nicht schlagartig, sondern kann abhängig von der relativen Position des Chassis zur Gehäuseschallwand sogar Frequenzüberhöhungen und –Resonanzen aufweisen.

Den Verlauf kann man mit ‚EDGE‘ simulieren:

Box mit quadratischer 30cm Schallwand und idealem 20cm Lautsprecher:

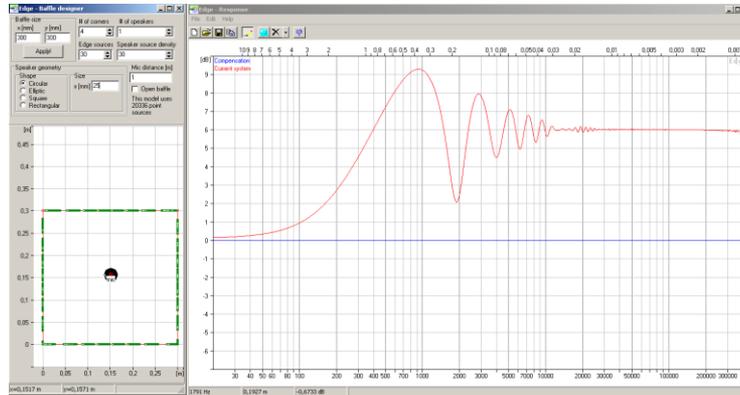


So zeigt z.B unser 200mm Chassis nicht nur den vorig gezeigten -1dB Abfall @20kHz bei 1m Messabstand, sondern auch noch einen 6dB Pegelverlust unterhalb 1kHz und dazu noch eine Überhöhung von etwa 2dB (BaffleStep)

$$F \approx \frac{3430}{\text{Schallwandbreite [cm]}} \\ \frac{3430}{30} \sim 1\text{kHz}$$

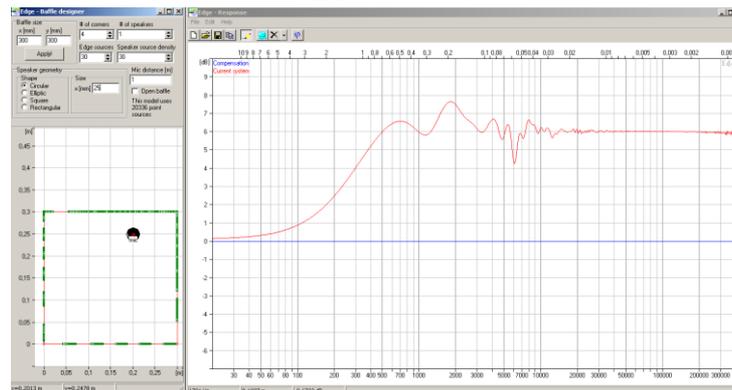
Baffle Step

Hier eine EDGE Simulation in der gleichen quadratischen 30cm Schallwand mit einem 50mm Chassis in 1 Meter Messabstand



Massive Welligkeit

Gleiche Box nur ist hier das Lautsprecherchassis ausermittig positioniert



Reduzierung der Welligkeit durch außermittige Platzierung

Baffle Step

Letztlich sind wir an dem Frequenzgang bei üblichen Hörabständen interessiert ($> \sim 2\text{Meter}$). Da die Schallwandgeometrie des Lautsprechers vom Hersteller absichtlich gewählt wurde und natürlich - wie vorher gezeigt - den Frequenzgang beeinflusst, muß man zwecks Vergleichbarkeit zu anderen Lautsprecherboxen diese Geometrie (=BaffleStep) natürlich mitmessen. Dazu müssen wir beim Messen einen ausreichenden Mindestabstand einhalten.

Andererseits möchten wir jedoch aber auch so nahe wie möglich am Chassis messen (Regel 1: $r = 5 \cdot d$). Daher müssen wir uns jetzt die Frage stellen, ob wir bei Anwendung der Regel 1 sicher sein können, dass wir mit dem Mikrofon ausreichend weit weg sind um den BaffleStep auf jeden Fall vollständig und korrekt mitzumessen.

Simulationen mit EDGE zeigen, dass wir mittels Regel 1 den Bafflestep nur dann vollständig (Genauigkeit etwa 1dB) mitmessen würden, wenn die Schallwandbreite nicht größer als der Messabstand ist. Für Messfehler $< 1\text{dB}$ gilt die folgende Regel 3.

Regel 3 für Fernfeldmessungen:

Messabstand \geq Schallwandbreite

($\sim +1\text{dB}$ Messfehler unterhalb des Bafflesteps wenn Messabstand = Schallwandbreite)

Höherer Messabstand reduziert den Fehler

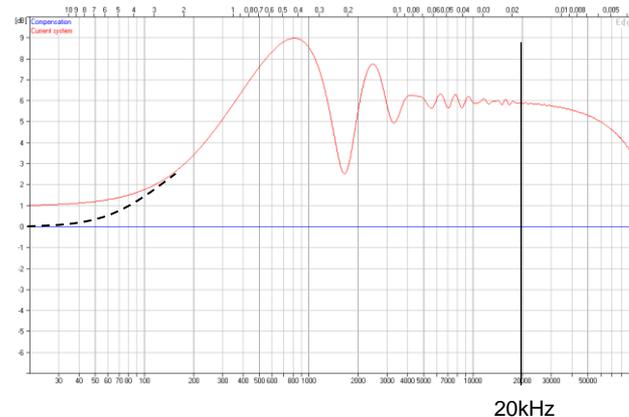
Alle Regeln müssen
eingehalten werden!

Erst wenn die Schallwandbreite > 5 mal Chassisdurchmesser beträgt, dominiert die Regel 3 den Messabstand, darunter die Regel 1. In den meisten Fällen reicht daher die Anwendung der Regel 1. So zeigt theoretisch z.B ein 6cm Breitbänder in einer Schallwandbreite von 30cm mit 30cm Messabstand einen geringen Messfehler.

Baffle Step

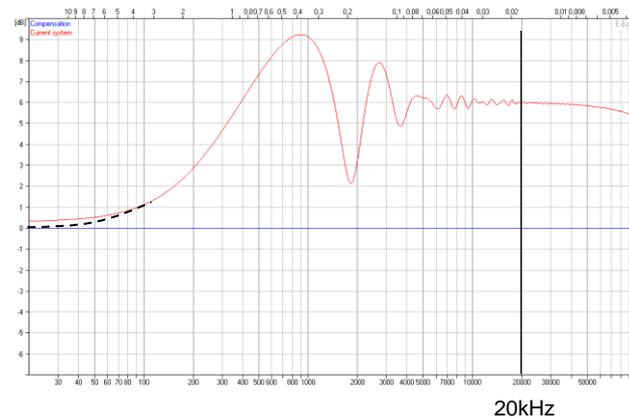
Hier eine EDGE Simulation eines (idealen) 6cm Lautsprechers in 30cm Abstand bei 30cm Schallwandbreite (Regel 1 und Regel 2 gerade so erfüllt)

Gestrichelte Linien bei unendlich hohem Messabstand



Das Gleiche bei 60cm Messabstand (Messabstand höher als beide Regeln vorschreiben)

Gestrichelte Linien bei unendlich hohem Messabstand



Man sieht, dass man den Messabstand nicht unnötig hoch wählen muss

Baffle Step

Natürlich gibt es noch folgende Anmerkungen zur Ermittlung des optimalen Messabstandes:

- *Die vorigen theoretischen Überlegungen gelten zunächst für die Messung eines Chassis in einem geschlossenem Gehäuse.*
- *Im Übrigen empfehle ich das Simulationsprogramm THE EDGE (Tolvan) für eigene Simulationen <http://www.tolvan.com/index.php?page=/edge/edge.php> THE EDGE ermittelt ausgehend vom Einbau eines idealen Lautsprechers (= ebene Scheibe) den Frequenzgang bei einstellbaren Messabständen und Schallwandgeometrien.*

Auf den folgenden Seiten wird erklärt, warum man denn nicht - trotz der Argumente auf Seite 3 - einfach generell den Messabstand so hoch wie möglich wählt, um so genau wie möglich zu messen. Möglicherweise treten Nebengeräusche wenig auf und eigentlich hat man ja meistens den Platz für etwa 2-3 Meter Abstand zur Verfügung:

Reflexionen und 'Gaten'

Da wir ja in einem normalen Wohnraum messen wollen, wird der Schall aus den Lautsprecher am Boden, Wänden und Decke und allen möglichen Gegenständen reflektiert und trifft dann natürlich auch auf das Mikrofon.

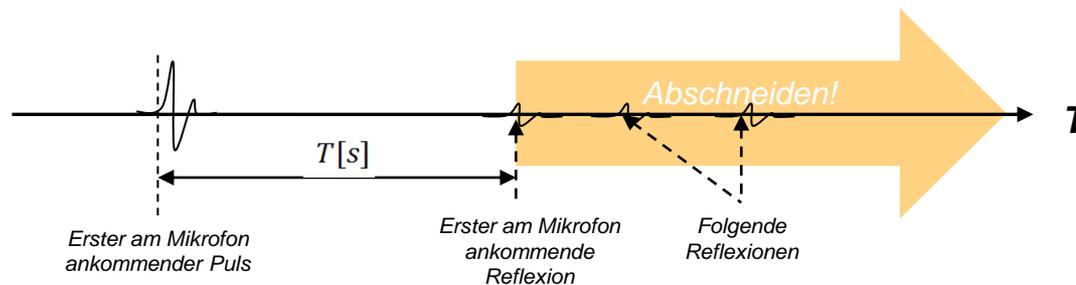
Um unterscheiden zu können, ob ein gemessene Frequenzgangfehler durch den Raumeinfluss (= Reflexionen) entstand oder der Lautsprecherbox selbst zu Lasten gelegt werden kann, möchte man den Frequenzgang des Lautsprechers ohne die Reflexionen messen können.

Der reflektierte Schall legt prinzipbedingt einen längeren Weg zurücklegt als der Direktschall. Mit modernen Messsystemen kann man in der Zeitebene graphisch den Zeitpunkt des reflektierten Schallereignisses erfassen und anschließend aus dem Gesamtsignal ausschneiden. Eine Transformation in die Frequenzebene zeigt den Frequenzgang dann ohne die Reflexionen. Leider beschneidet dieses Verfahren (= ,Gaten') die tiefen Frequenzen. Unterhalb einer bestimmten Frequenz F_g ist der angezeigte Frequenzgang defakto nicht mehr gültig, (auch wenn die Software etwas anzeigt)

Reflexionen und 'Gaten'

„Gaten“

Den zeitlichen Ablauf des am Mikrophon eintreffenden Erstimpuls und die anschliessenden Reflexionen zeichnet das Messprogramm auf:



Der Programmbenutzer erkennt den ersten eintreffenden Reflexionspuls und schneidet diesen manuell aus dem Diagramm aus, setzt quasi ein Zeitfenster innerhalb dessen die Werte gültig sind.

Leider sind damit unterhalb einer bestimmten Frequenz F_g die Ergebnisse nicht mehr gültig. Wie wir auf den folgenden Seiten sehen können, hängt F_g vom Messabstand und hauptsächlich von der Positionshöhe des Lautsprechers (Abstand Lautsprecher / Zimmerboden) ab.

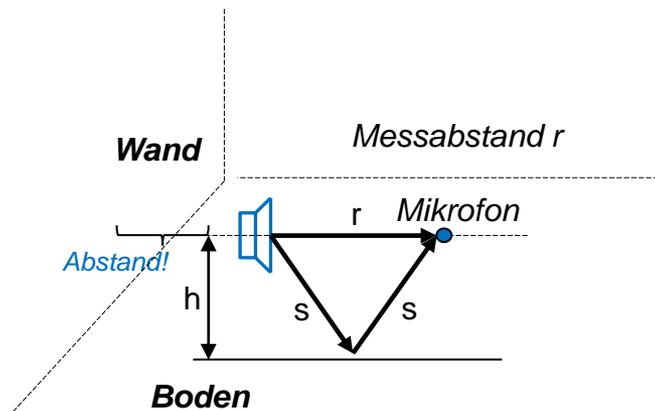
Es errechnet sich F_g zu $1/(\text{Zeitabstand zwischen eintreffendem Direktschall und erster Reflexion})$. Da der Schall etwa 343m/s zurücklegt, müssen wir uns jetzt ein Bild von den Abmessungen des Messraumes und der Mikrofonaustellung machen, um uns Maßnahmen zu überlegen, wie man in einem normalen Wohnraum F_g so niedrig wie möglich bekommt.

Deswegen überlegen wir uns erst mal, wie man so ein Messsetup in einem Wohnraum optimal aufbauen kann:

Reflexionen im Messraum

Reflexionen

- Eine Schallwelle legt ca. 0,34 Meter pro Millisekunde zurück oder benötigt für 1 Meter die Zeit von 2,94ms
- Beispiel: Bei Aufstellung des Lautsprechers 1 Meter über dem Boden und Messung in ca. 1 Meter Abstand (Laufweg = 2,24 Meter) trifft die erste (Boden)Reflexion (2,24m-1m)*2,94ms also 3,6ms später am Mikrofon ein (Fg liegt dann bei 279Hz).



Laufweg der Bodenreflexion

$$2s = D = 2 \sqrt{\frac{r^2}{4} + h^2}$$

Differenz Direktschall – reflektierter Schall

$$\Delta = D - r$$

Laufzeitunterschied: T_s

Untere Grenzfrequenz Gate

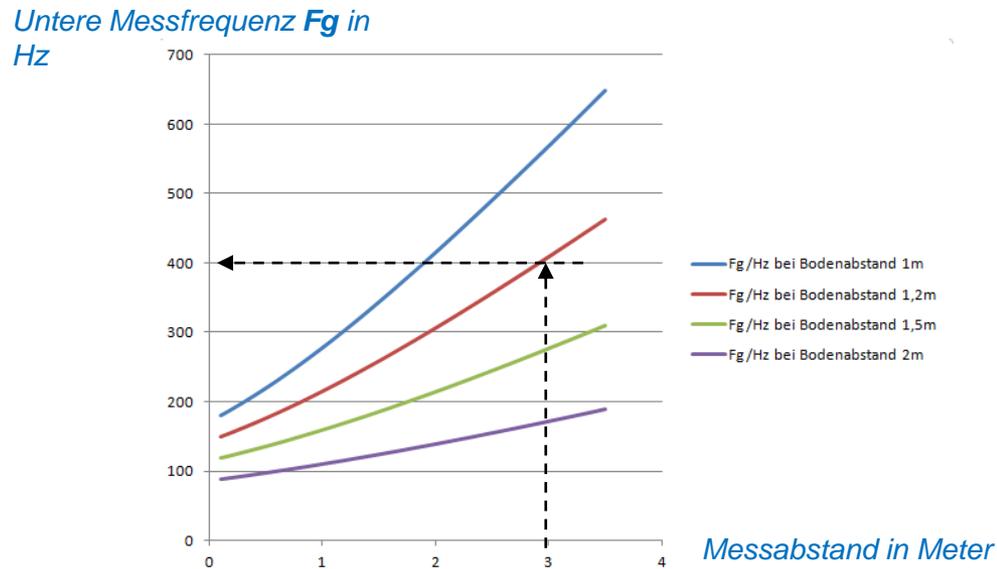
$$T[s] = \Delta / 344$$

$$F_g = 1/T[s]$$

„Freies“ Luftvolumen (keine reflektierenden Gegenstände) sowohl mehr als 1 Meter um das Mikrofon herum als auch >1 Meter um den Lautsprecher herum erforderlich. Zwischen Mik und Lautsprecher darf natürlich auch nur Luft sein. Abstand zur Decke und zu Wänden und dem Messpersonal (!) muß dabei hier auch mehr als 1 Meter betragen.

Messabstand im praktischen Messraum beim Gaten

**Auswertung
der Formeln
auf der
vorigen Seite**



Bei optimaler Position des Lautsprechers mittig zwischen Boden und Decke (~1,25m) und einem Messabstand von 3 Metern sind bereits alle Messergebnisse unter 400Hz ungültig. Wie man der Kurve entnehmen kann ist, es sinnvoll den Messabstand so gering wie möglich zu wählen. Bei 80cm Messabstand können wir bereits bis 200Hz herunter aussagekräftig messen. Wenn wir im Freien messen würden und die Box mit 2 Meter Bodenabstand aufstellen würden, so können wir mit 80cm Messabstand bis ca 100Hz herunter messen. Das spricht für einen geringen Messabstand.

In normalen Wohnräumen kann mit Gate nur der Frequenzbereich oberhalb ca. 200...300Hz reflexionsfrei gemessen werden, wenn die Box einfach auf einen Tisch gestellt wird

Zusammenfassung

Hier noch einmal die Abstandsregeln zusammengefasst:

Um bis 20kHz und bis zu 20cm Chassisdurchmesser fehlerfrei zu messen und um möglichst tiefe Frequenzen beim Gaten zu erfassen:

Regel 1 für (gegate) Fernfeldmessungen

Messabstand = ca. 5 mal Chassisdurchmesser

Um die Schallwandeinflüsse mitzumessen:

Regel 3 für Fernfeldmessungen:

Messabstand \geq Schallwandbreite

($\sim +1$ dB Messfehler unterhalb des Befflesteps wenn Messabstand = Schallwandbreite)

Um besonders niedrige Frequenzen messen zu können, ohne das man ein ‚Gate‘ benötigt

Regel 2 für Nahfeldmessungen:

Messabstand < 5 mm für Nahfeldmessungen bis hin zu folgenden Maximalfrequenzen gültig:

D=20cm: 1kHz / D=10cm: 2kHz / D=5cm: 3,5kHz

Alle Regeln müssen eingehalten werden!

Ausblick

Man sieht, dass eine Nahfeldmessung besonders für ganz tiefe Frequenzen geeignet ist und bei üblichen Lautsprecherabmessungen bis ca 1 KHz einen geringen Messfehler zeigt. Man benötigt kein Gate weil der Anteil der Reflexionen im Vergleich zum Direktschall sehr gering ist. Ein Gate wäre bei einer Nahfeldmessung kontraproduktiv.

Man sieht, dass eine gegatete Fernfeldmessung für mittlere bis hohe Frequenzen geeignet ist, und durch das Gate die Reflexionen - wie gewünscht - nicht mit gemessen werden. Mit Anwendung der Regel 1 erzielt man in einem normalen Wohnraum Ergebnisse die zwischen 300Hz und 20kHz geringe Fehler aufweisen.

Um den gesamten Audiodbereich 20Hz....20kHz darstellen zu können, werden also beide Messungen benötigt. Die Nahfeldmessung liefert bis ca 300Hz genaue Ergebnisse und darüber hinaus liefert die gegatete Fernfeldmessung die besseren Ergebnisse.

Die entsprechenden Graphen werden umskaliert, an der Schnittstelle bei etwa 300Hz ausgeschnitten und wieder zusammengefügt und ergeben dann - wie gewünscht - eine Frequenzmessung zwischen 20Hz und 20kHz.

Die Methode wird anschliessend in einem weiteren Paper erklärt.

Quellen

Dr. Heinrich Weber

*ARTA-Handbuch
ARTA Application Note AP4: ‚Ermittlung des
Freifeldfrequenzganges‘*

<http://www.artalabs.hr/support.htm>

‚The Edge‘ Software

<http://www.tolvan.com/index.php?page=/edge/edge.php>