

Photo Story

„Das Zeitverhalten vom Equalizer in Abhängigkeit von der Güte“

Die Geschichte beschreibt die Änderungen des Zeitverhaltens durch den Einsatz eines Equalizers, von der Aufnahme über den Lautsprecher bis zur Raumakustik.



Autor: Dipl.-Ing. Leo Kirchner

Inhaltsverzeichnis:

1.	Die Güte Q	2
2.	Die Amplitudenfrequenzgang- und Cosinus-Burst Messung.....	3
3.	Die Güte von Schaltungen.....	6
3.1	Der Schwingkreis	6
3.2	Die Frequenzweiche	6
3.3	Das Digitalfilter	7
3.4	Die Lautsprecher Bassabstimmung	8
3.5	Die Raumakustik	9
4.	Kompensation von Resonanzen	11
5.	Auswertung	13
W1	Die Funktion digitaler Filter.....	14

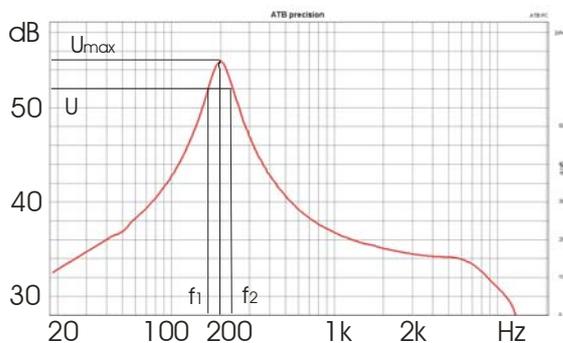
© Kirchner elektronik
Brunnenweg 10
D-38118 Braunschweig
Telefon: +49531 46412

www.kirchner-elektronik.de

1. Die Güte Q

Bei der Aufnahme und Wiedergabe von Musik werden Filterschaltungen benutzt. Dies sind Equalizer bei der Bearbeitung im Studio, Weichenschaltungen bei den Lautsprechern, Schwingkreise zur Kompensation von Lautsprecherresonanzen und Equalizer zur Korrektur der Raumakustik. Die Funktion der Schaltungen wird durch die Übertragungsfunktion beschrieben. Wie diese Übertragungsfunktion erzeugt wird, hat für die Funktion keine Bedeutung, sie kann mit passiven oder aktiven Schaltungen, mit einem DSP oder Rechner berechnet realisiert werden. Die Funktion beschreibt die Eigenschaften.

Aus der Funktion wird der Amplituden- und Phasenfrequenzgang berechnet. Meistens wird nur der Frequenzgang betrachtet. Im Frequenzgang ist bei elektrischen Schaltungen das Zeitverhalten, das Ein- und Ausschwingen, zu erkennen. Zur Beschreibung des Zeitverhaltens wird der Parameter Güte, Q, in der Elektrotechnik benutzt. Das Q ist z.B. von der Bassabstimmung, Q_m , Q_e und Q_t , bekannt.



Berechnung der Güte Q eines
Serienschwingkreises

Resonanzfrequenz = f_r

$$U = U_{\max} / \sqrt{2}$$

Bandbreite: $B = f_2 - f_1$

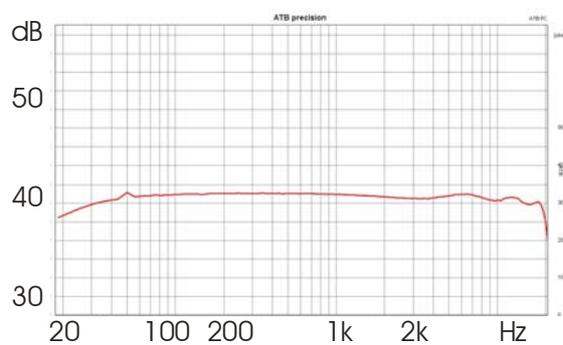
$$\text{Güte: } Q = f_r / B$$

2. Die Amplitudenfrequenzgang- und Cosinus-Burst Messung

Für die Messung des Amplitudenfrequenzgangs wird das PN Rauschen mit einem professionellen Studioprogramm aufgenommen. Mit der EQ Funktion wird das Rauschen mit entsprechender Güte berechnet. Dieses Signal wird dann abgespielt und mit dem ATB-System gemessen. Bei der Messung sind die Eigenschaften der Soundkarte, der Abfall im Tieftonbereich und die Welligkeit im Hochtonbereich zu erkennen.

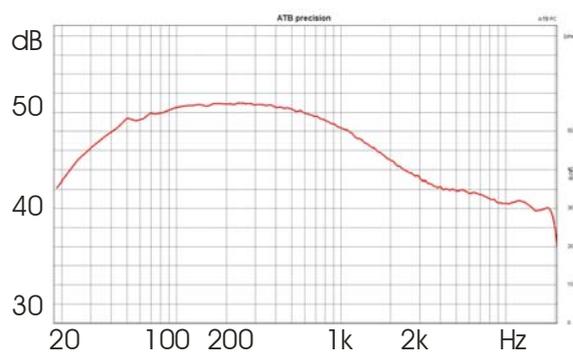
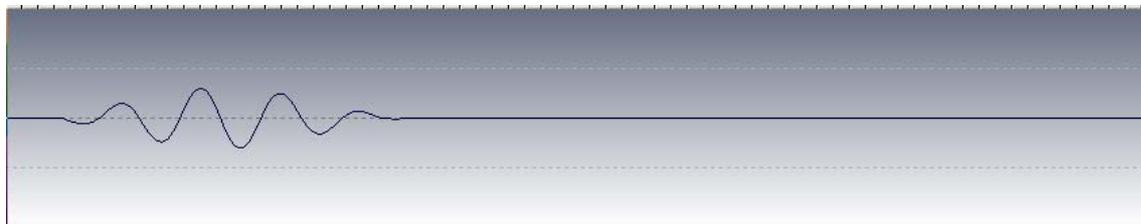
Bei der Cosinus-Burst Messung wird das Signal vom ATB precision erzeugt und aufgenommen. Nach der Berechnung mit der EQ Funktion des Programms wird der zeitliche Verlauf dargestellt.

Bei der EQ Funktion wird gain, die Verstärkung, und width des Frequenzbereiches eingestellt. Die Güte wird aus dem Frequenzgang berechnet.



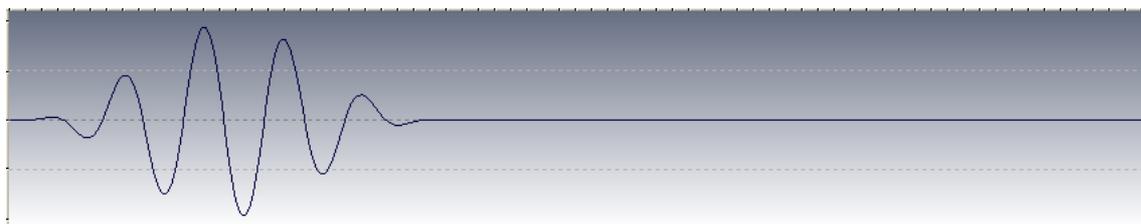
$Q=0$, $gain=0$, $width=0$

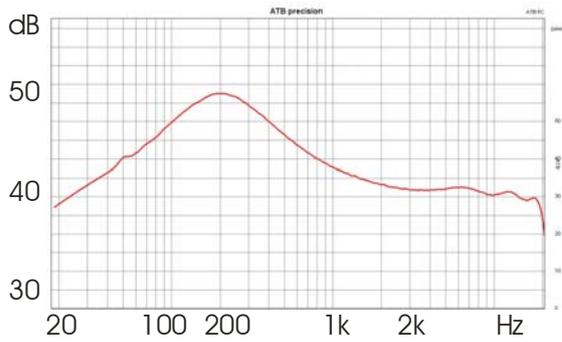
Der Frequenzgang und der Cosinus-Burst als Ausgangssignal mit ausgeschalteter EQ Funktion



$Q=0,2$, $gain=10dB$, $width=5$

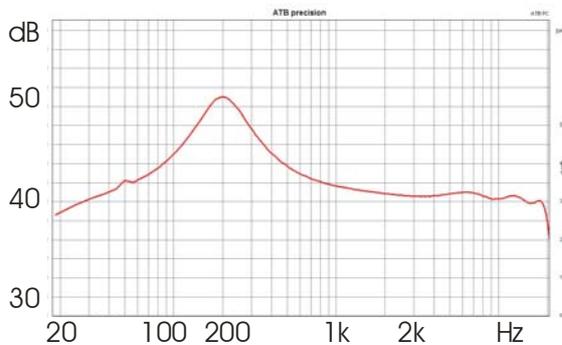
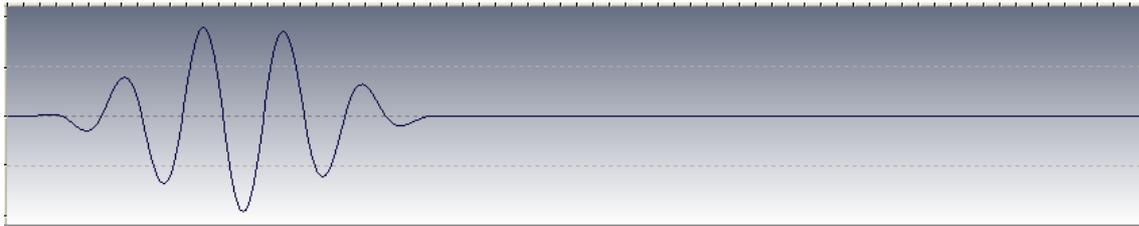
Der Frequenzgang zeigt einen großen Frequenzbereich für die Verstärkung. Der Cosinus-Burst zeigt die höhere Amplitude, die Form bleibt





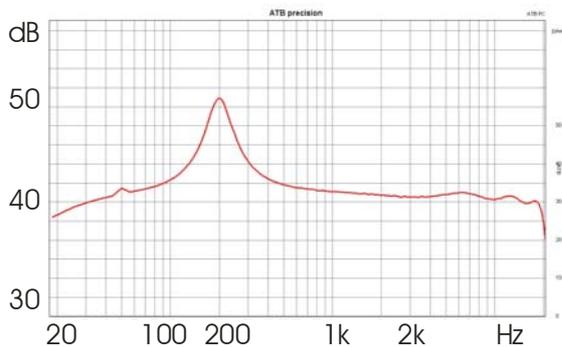
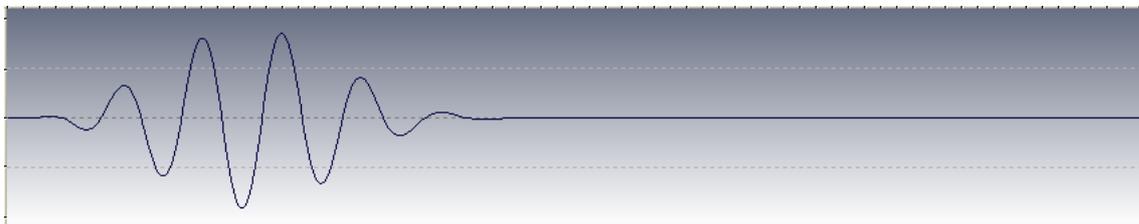
$Q=0,66$, gain= 10dB , width=2

Der Frequenzbereich für die Verstärkung ist kleiner. Bei dem Cosinus-Burst verschieben sich die maximalen Amplituden



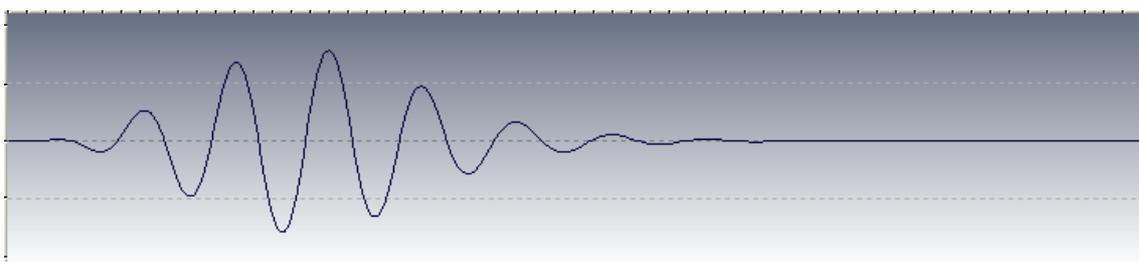
$Q=1,3$, gain=10dB , width=1

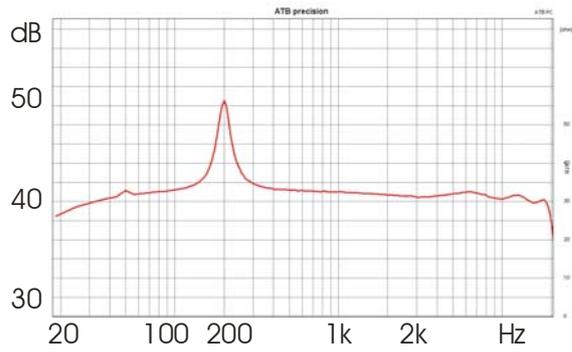
Der Frequenzbereich wird schmaler. Bei dem Cosinus-Burst verschieben sich die maximalen Amplituden weiter nach hinten. Es entsteht ein Nachschwingen.



$Q=3,3$, gain=10dB , width=0,5

Der Frequenzbereich für die Verstärkung wird immer schmaler. Bei dem Cosinus-Burst wird das Nachschwingen immer stärker

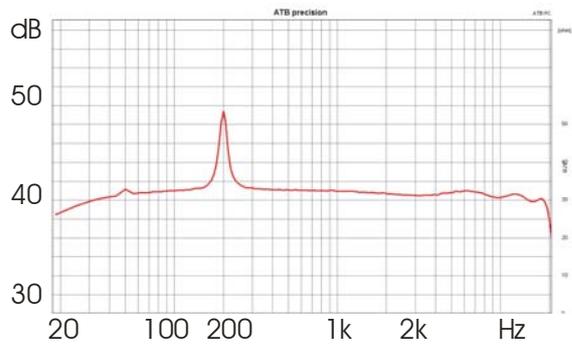
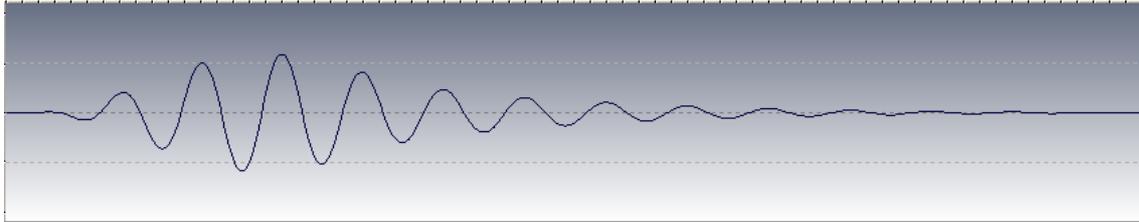




$Q=5$, gain=10dB ,width=0,2

Der Frequenzbereich für die Verstärkung ist sehr schmal.

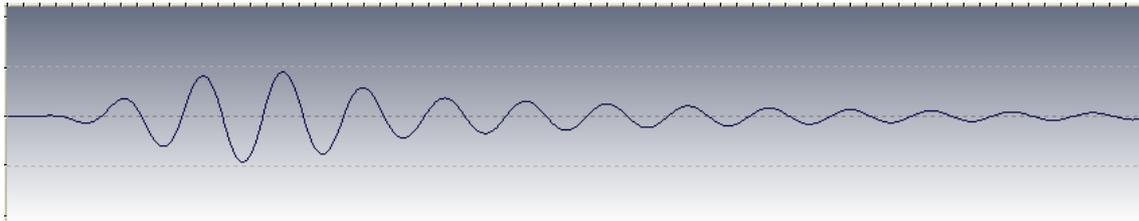
Das Signal des Cosinus-Bursts ist nicht mehr zu erkennen. An der kleineren Amplitude ist zu erkennen, dass das Signal nicht mehr einschwingen kann.



$Q=16,6$, gain=10dB , width=0,1

Diese Einstellung erscheint als ideal für die Unterdrückung von klangverfälschenden Spitzen im Frequenzgang.

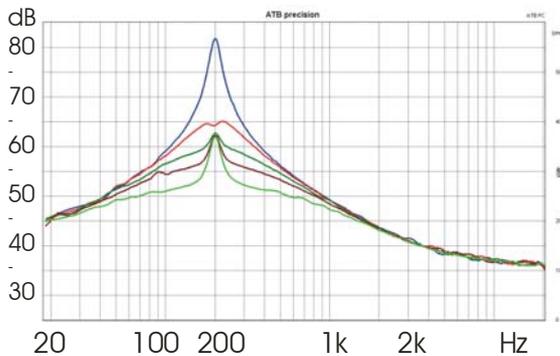
Der Cosinus-Burst zeigt, dass ein neues Signal entsteht. Dieses unterscheidet sich in Form und Amplitude und besitzt ein sehr langes Nachschwingen.



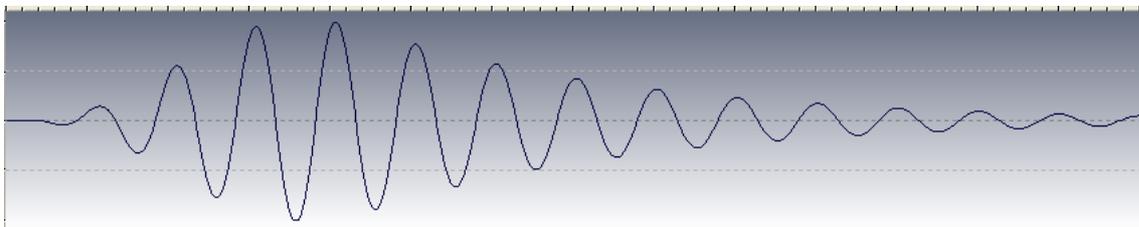
3. Die Güte von Schaltungen

3.1 Der Schwingkreis

Die im vorherigen Kapitel berechneten EQ Funktionen lassen sich auch mit vergleichbaren Eigenschaften mit passiven Bauteilen aufbauen.



Die blaue Line zeigt den Frequenzgang des Schwingkreises mit $Q=7,14$. Bei den unteren Frequenzgängen wurde eine Kompensation versucht. Die konnte nicht gelingen, da der EQ nur eine maximale Absenkung um 20dB besitzt.



Das Bild zeigt die Cosinus-Burst Messungen mit dem langen Ein- und Ausschwingen.

3.2 Die Frequenzweiche

Die Filter von den Frequenzweichen für Lautsprecherkombinationen werden durch die Ordnung und die Güte spezifiziert.

Mit der Ordnung wird die Steilheit,

1. Ordnung = 6dB/oktav
2. Ordnung = 12dB/oktav
3. Ordnung = 18dB/oktav
4. Ordnung = 24dB/oktav

beschrieben.

Die Güte wird mit dem Namen des Entwicklers, hier für 2. Ordnung

- | | |
|-----------------|-----------|
| Linkwitz-Riley, | $Q=0,49$ |
| Bessel, | $Q=0,58$ |
| Butterworth, | $Q=0,707$ |
| Chebychev, | $Q=1,0$ |
- beschrieben.

Laut der Literatur sollen die Chebychev Filter nur in Ausnahmefällen benutzt werden. Durch $Q=1,0$ wird das Signal verfälscht.

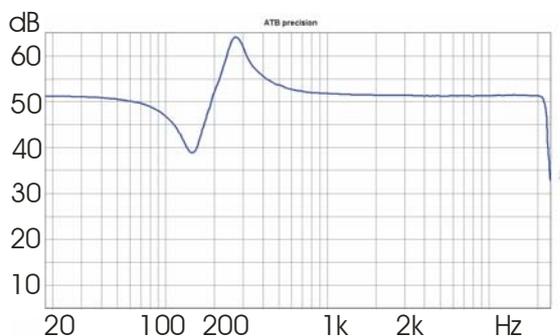
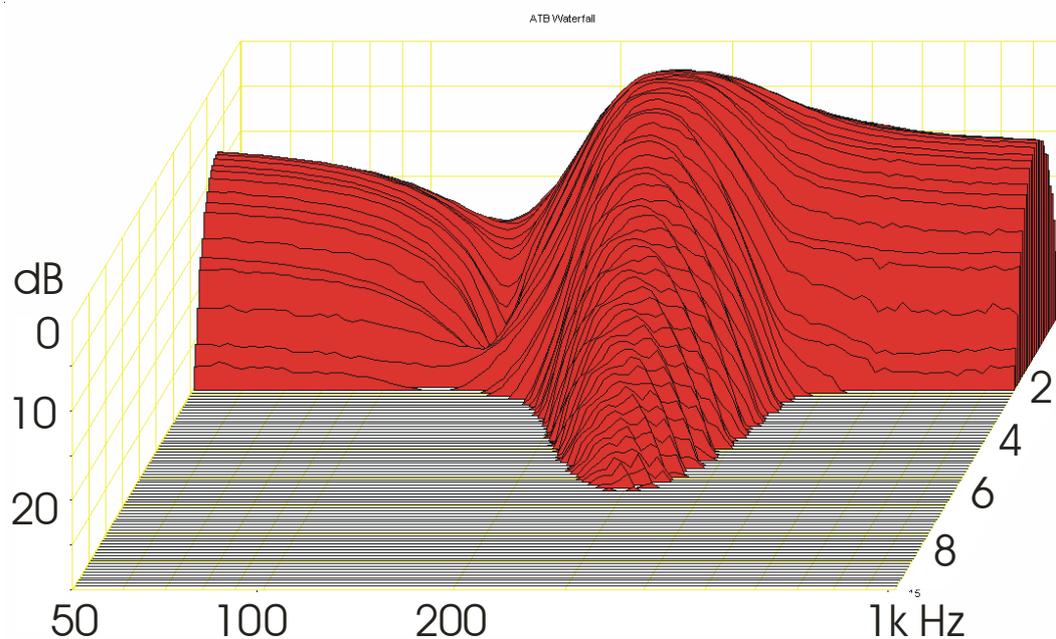
3.3 Das Digitalfilter

Als nächstes wird ein Digitalfilter im Wasserfalldiagramm gezeigt.

Bei der Messung wird aus den Signalen der Cosinus-Burst Messungen die Hüllkurve berechnet. Die Hüllkurven für mehrere Frequenzen werden im Wasserfalldiagramm des ATB precision in einer 3D Grafik gezeigt. Die y-Achse ist die Amplitude, die x-Achse die Frequenz und die nach hinten verlaufende z-Achse die Zeit. Damit alle Frequenzen gleichzeitig gezeigt werden können, wird die Zeit der z-Achse normiert und in Perioden skaliert.

Gemessen wird ein DSP für Digitalweichen. Es wird eine Shelf Hochpass und eine Shelf Tiefpass Funktion eingestellt. Beide Funktionen haben die gleiche Frequenz- und Amplituden Einstellung. Bei gleicher Einstellung der Güte verändert sich an dem Frequenzgang der Kurve nichts. Die Funktionen heben sich auf.

Für die Messung werden verschiedene Güten, für den Tiefpass $Q=0,7$ und für den Hochpass $Q=5$, gewählt.



Das Wasserfalldiagramm zeigt das Shelf Filter mit $Q=5$. Entsprechend des Frequenzganges, im eingeschwungenen Zustand gemessen, besteht eine starke Absenkung bei 140Hz. Das Wasserfalldiagramm zeigt, dass die Absenkung erst verzögert auftritt. Der Filter muss erst einschwingen. Dass dann die Absenkung vom Nachschwingen der oberen Resonanz verringert wird, ist eine neue Erkenntnis. Die Anhebung bei 280Hz zeigt die volle Schönheit

des Zeitverhaltens bei einer Güte von $Q=5$. Bei dem Einschwingen wird das Maximum erst erreicht, wenn das Signal für die höheren Frequenzen schon abgefallen ist. Das Ausschwingen verlängert den Cosinus-Burst um den Faktor 3. In Kapitel 2 wird der Burst für $Q=5$ gezeigt. Die Shelf Filter werden auch mit hohen Q Werten empfohlen, um z.B. den Frequenzbereich eines Hochton Kalottenlautsprechers zu linearisieren. Die Frequenzen werden bei 1.5kHz angehoben und ein steiler Abfall durch die Absenkung bei 850Hz erreicht. Das hierbei entstehende Nachschwingen verhindert eine natürliche Wiedergabe. Auch im Tieftonbereich ist das Shelf Filter beliebt. Wird ein Tieftöner in ein zu kleines Gehäuse eingebaut, besitzt er eine hohe Resonanzfrequenz mit hoher Güte. Die Bassüberhöhung wird durch ein Shelf Filter mit der Güte der Gehäuseabstimmung ausgeglichen. Unterhalb der Resonanzfrequenz wird der abfallende Frequenzbereich angehoben. Hierbei entsteht ein langes Nachschwingen im Tieftonbereich, das mit einer natürlichen Wiedergabe nichts zu tun hat.

3.4 Die Lautsprecher Bassabstimmung

Die Abstimmung eines Tieftöners in einer Lautsprecherbox bestimmt sein Signalverhalten. Das Ziel ist ein exaktes Zeitverhalten, schnelles Ein- und Ausschwingen. Dieses wird bei den Thiele-Schmal Parametern durch die Güte beschrieben. Dieses soll der Theorie entsprechend bei $Q=0,7$ betragen.

Bei dem in ein Gehäuse eingebauten Lautsprecher lässt sich der Q Wert nur bei dem geschlossenen Gehäuse mit der Impedanzmessung ermitteln. Die Güte kann durch eine SPL Messung ermittelt werden. Dies funktioniert bei den geschlossenen Boxen. Bei Gehäusen mit Öffnungen, Bassreflex, Bandpass, Transmissionline, Basshörnern, Cardioid und TQWT, bestehen zwei Schallquellen. Diese müssen zur Bestimmung der Güte mit der SPL Messung gleichzeitig und mit einer Anpassung der Schalldrücke auf die abstrahlende Fläche gemessen werden. Hierbei treten bei fast allen Veröffentlichungen Fehler auf. Mit diesen SPL Messungen lässt sich die Güte nicht bestimmen.

Für die Messung der Güte von Lautsprechern mit ventilierten Gehäusen wird die Güte mit dem Cosinus-Burst ermittelt. Um den Raum auszuschalten, wird im Nahfeld gemessen. Als Messfrequenz wird aus der Impedanzmessung die Resonanzfrequenz oder Abstimmfrequenz gewählt.

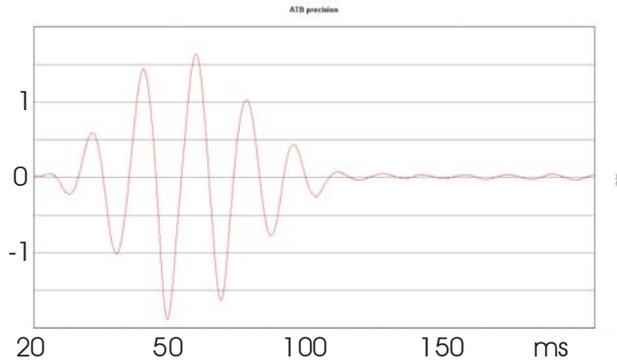
Die Bestimmung eines vorteilhaften Lautsprechergehäuses wird durch die sehr aufwendigen Simulationsprogramme aus der Automobil Industrie ermöglicht. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass etliche Modelle der Lautsprechertechnik nur Erklärungshilfen sind.

Im Tieftonbereich gelten die Gesetze der Strömungsmechanik. Wer seine Hand vor eine Bassreflexöffnung hält, spürt den Luftstrom.

Die Programme ermöglichen die Optimierung von schon bekannten Gehäusekonstruktionen. Bei Bassreflexgehäusen kann durch Fließwiderstände das Gehäusevolumen vergrößert werden. Auch lassen sich TQWT Bassgehäuse optimieren. Bei den Dipol- Subwoofer führen die Berechnungen zu der optimalen Konstruktion, den Dipol-Cardioid Subwoofer.

Ein Beispiel für die Gehäusekonstruktion ist der Lautsprecher Analog.on OK². Das Model mit neuen high-tech Tieftönern hat die Bezeichnung Analog.on OK-SP. Das Gehäusevolumen beträgt 20 Liter für die zwei 17cm Tief-Mittelton Lautsprecher. Durch einen Fließwiderstand (Variovent) wird das optimale Gehäusevolumen erzielt. Gleichzeitig wird die Resonanz des Gehäuses bedämpft. Ein berechnetes Gehäuse kommt auf 140 Liter.

Mit dem Cosinus-Burst wird die Güte mit $Q=0,9$ bestimmt. Dies ist im Vergleich mit anderen Bassreflex Boxen ein guter Wert.



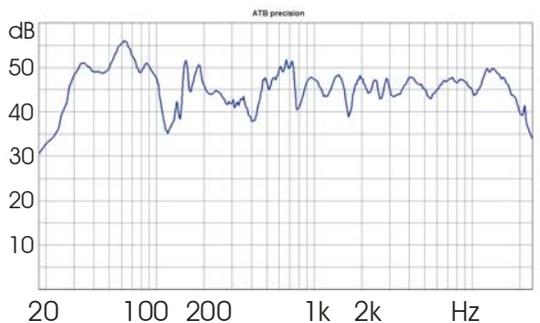
Cosinus-Burst mit 60Hz.

Das Bild zeigt, dass die Analog.on OK-SP den Cosinus-Burst wiedergeben kann.

Dies ist nur ein Beispiel für den Test der Bassabstimmung mit dem Cosinus-Burst.

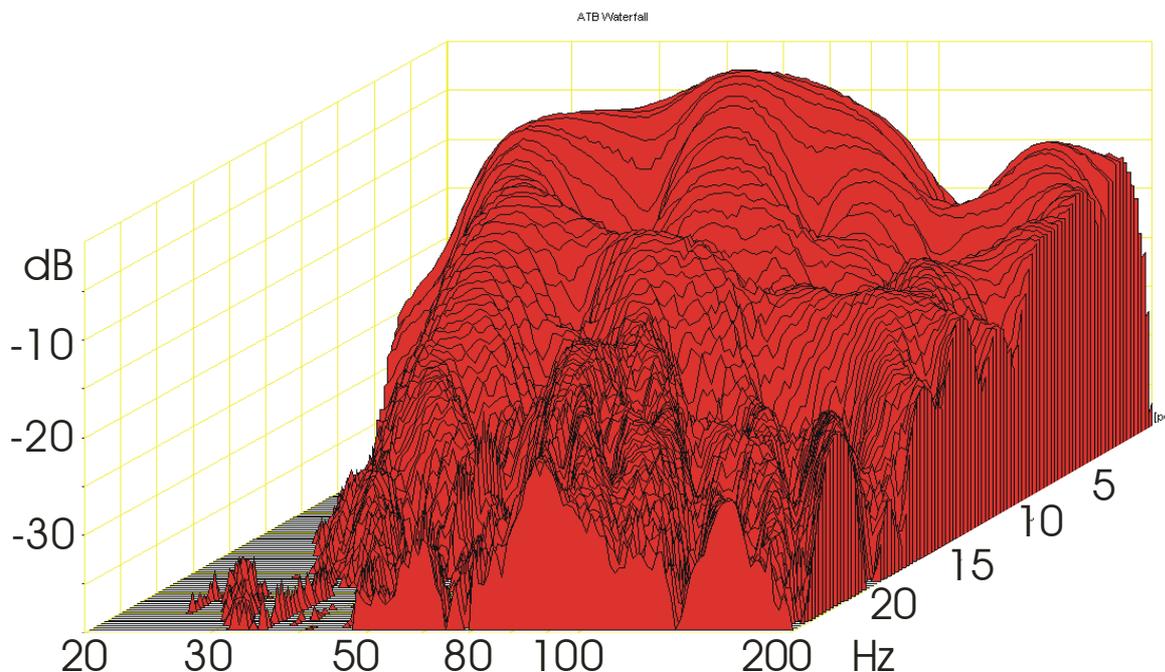
3.5 Die Raumakustik

Als weiteres wird die Güte von Raumresonanzen , Moden, gezeigt. Wie noch beschrieben wird, muss zur Kompensation der Resonanz mit einem DSP die Güte ermittelt werden.



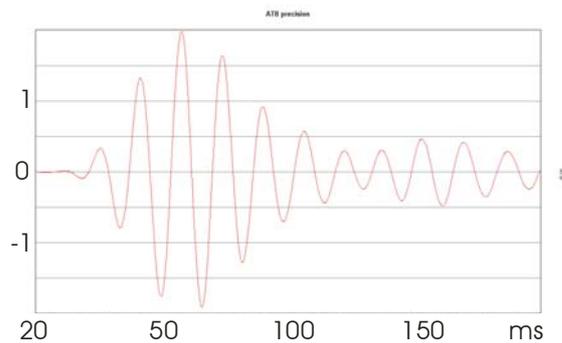
Frequenzgang eines Lautsprechers im Raum an der Sitzposition gemessen.

Bei 32Hz und 62Hz sind Überhöhungen und bei 116Hz ist ein tiefer Einbruch zu sehen. Zur Einstellung des Equalizers müssen die Resonanzen und deren Güte sowie die Art des Einbruchs bekannt sein.



Das Wasserfalldiagramm zeigt das Zeitverhalten des Raums im Tieftonbereich. Die im Frequenzgang zu erkennende Resonanz bei 32Hz ist im Wasserfall eher als die Überlagerung von Reflexionen zu erkennen. Die Reflexion erzeugt auch das Loch bei 45Hz. Bei 62Hz ist eine echte Raumresonanz zu erkennen. Hier läuft ein Gebirgszug parallel zur z-Achse. Um die

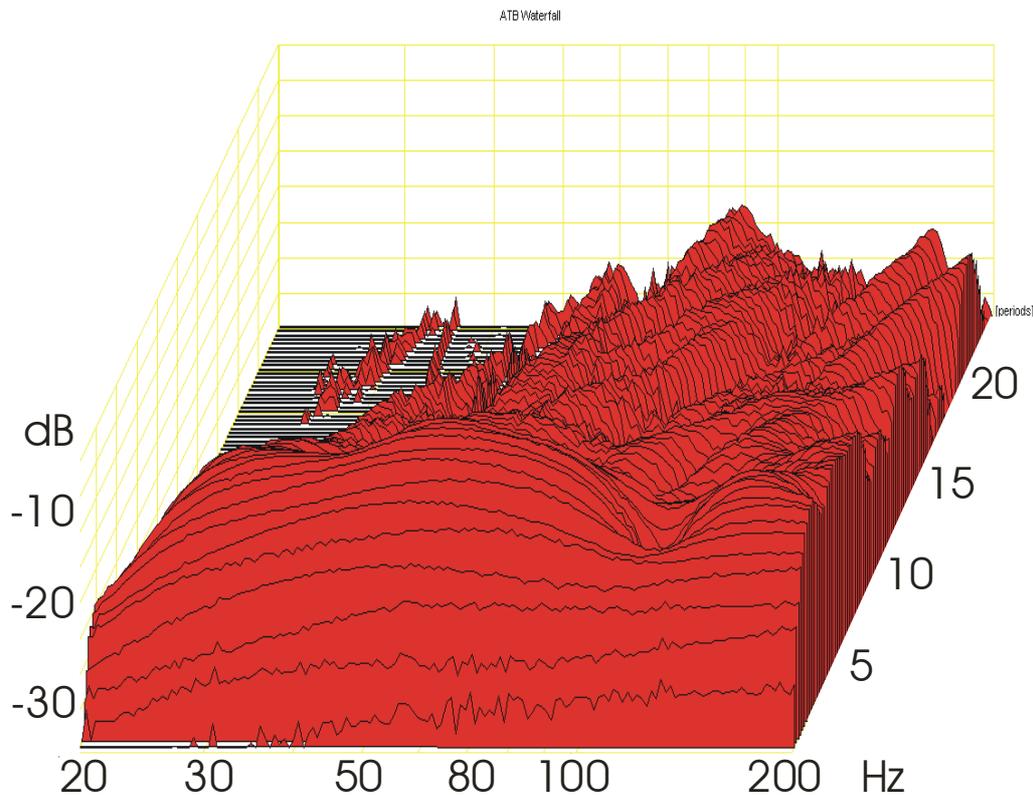
Güte der Resonanz zu bestimmen wird eine Cosinus-Burst Messung mit der Frequenz von 60Hz durchgeführt.



Die Cosinus-Burst Messung zeigt eine Güte von $Q=5$.

Bei 150ms ist eine Reflexion zu sehen. Diese sind im Wasserfalldiagramm an den leicht gebogenen Gebirgen, die quer zur x- und y-Achse verlaufen, zu erkennen.

Der Einbruch in der Frequenzgangkurve bei 116Hz ist auf eine Reflexion zurückzuführen. Dies wird durch die Betrachtung des Wasserfalldiagramms von der Front sichtbar.



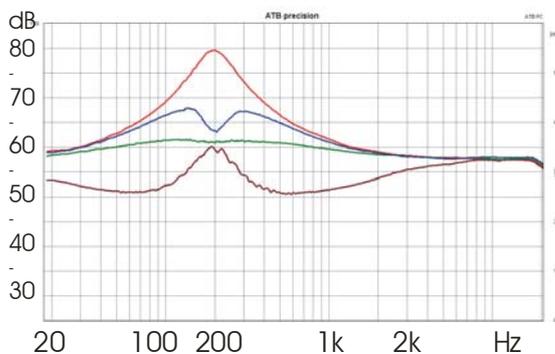
Das Wasserfalldiagramm, von der Front betrachtet, zeigt das Einschwingen. Hier zeigt sich, dass das Signal über den Frequenzbereich gleichmäßig ansteigt. Die Wiedergabe wird erst später vom Raum beeinflusst. Dies widerspricht auch der manchmal verbreiteten Meinung, dass das Einschwingverhalten des Lautsprechers keine Bedeutung hat, da dies nur vom Raum bestimmt wird. Die Resonanz bei 62Hz baut sich langsam auf, da der Raum erst einschwingen muss. Der Einbruch bei 116Hz entsteht auch erst, wenn die Schallwelle vom Raum reflektiert wird. Dies zeigt das Loch im Gebirge. Nach der Auslöschung steigt die Amplitude wieder an und bildet in der folgenden Zeit einen Gebirgszug. Diese Raumreflexion kann nicht mit dem Equalizer ausgeglichen werden. Hier hilft nur eine andere Sitzposition. Ein Trost ist, dass sie den Klang weniger beeinflusst, als der Einbruch im Frequenzgang vermuten lässt.

4. Kompensation von Resonanzen

Ein Beispiel für die Kompensation von Resonanzen ist der Lautsprecher. Bei Lautsprechern werden Membran- und Gehäuseresonanzen durch elektrische Schwingkreise oder akustische Absorber kompensiert. In der Raumakustik werden Raumresonanzen, Mode, mit dem Equalizer kompensiert. Dieser arbeitet meistens mit Digitalfiltern, die ein DSP berechnet. Zur Optimierung der Raumakustik werden auch akustische Resonatoren eingesetzt. Eine Resonanz wird durch die Resonanzfrequenz und die Güte beschrieben. Soll eine Resonanz kompensiert werden, müssen Frequenz und Güte bekannt sein.

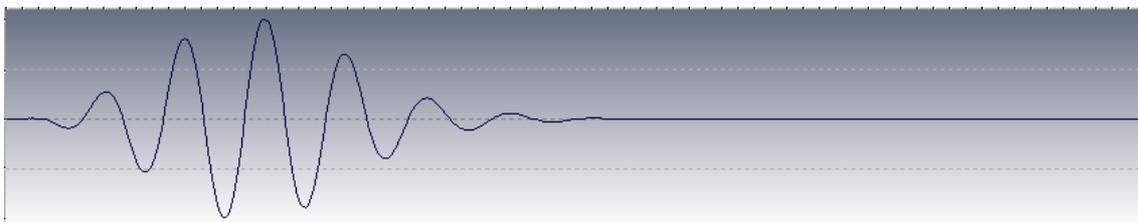
Zur Demonstration der Güte eines Schwingkreises wird ein elektrischer Serienkreis aufgebaut. Der Amplitudenfrequenzgang wird mit dem PN Rauschen gemessen. Die Zeitmessungen werden mit dem Cosinus-Burst durchgeführt.

Bei der Messung wird das Signal über dem Schwingkreis aufgenommen und mit der EQ Funktion des Aufnahme Programms bearbeitet. Danach wird es abgespielt und mit dem ATB gemessen.

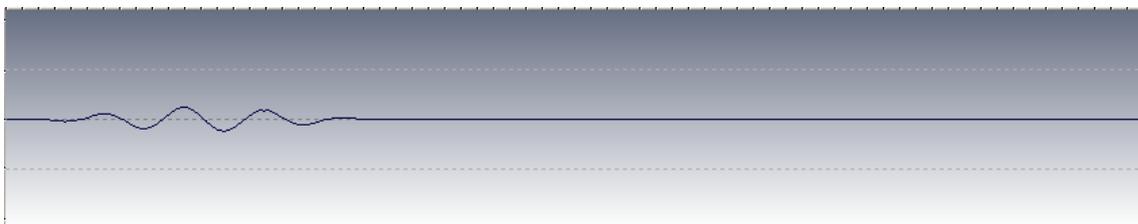


Das Bild zeigt die Frequenzgang Messungen.
Rot= Schwingkreis mit Güte 2,4
Blau= EQ mit gain = -20db, Q=6
Grün= EQ mit gain = -20dB, Q=2,7
Braun= EQ mit gain=-20dB, Q=0,66

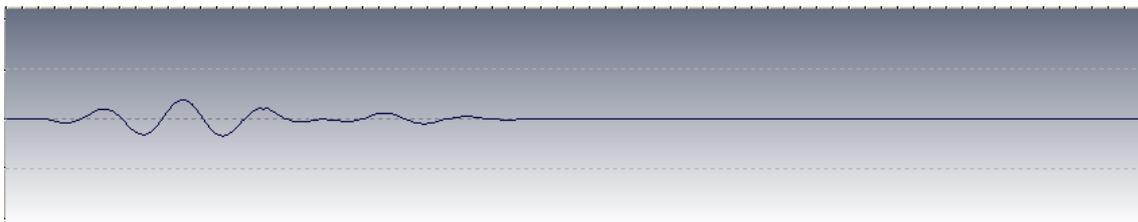
Nur der EQ mit der Güte 2,7 kompensiert die Resonanz.



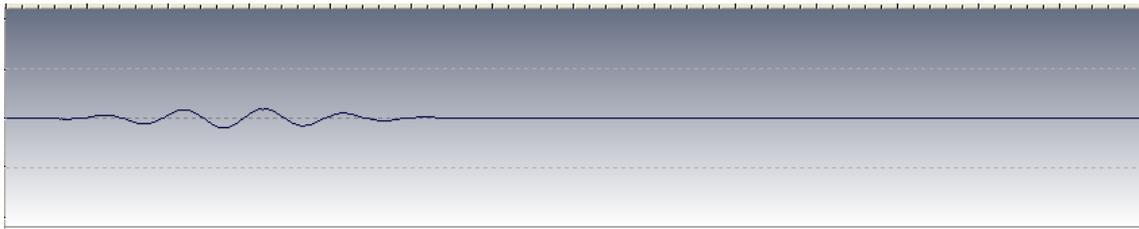
Burst des Schwingkreises. Einschwingen und langes Ausschwingen.



Kompensiert mit $Q=2,7$. Der Cosinus-Burst ist wieder hergestellt.

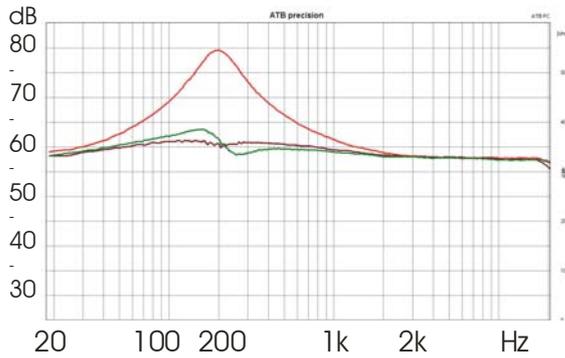


Kompensiert mit $Q=6$. Es werden beim Ausschwingen neue Signale erzeugt.



Kompensiert mit $Q=0,66$. Cosinus-Burst verzerrt.

Kompensation von Schwingkreisen mit Frequenzabweichung von 10% von Resonanzfrequenz und EQ.



Rot= Frequenzgang Schwingkreis
 Braun= richtig kompensiert
 Grün= Frequenzgangabweichung des EQ von 10%

5. Auswertung

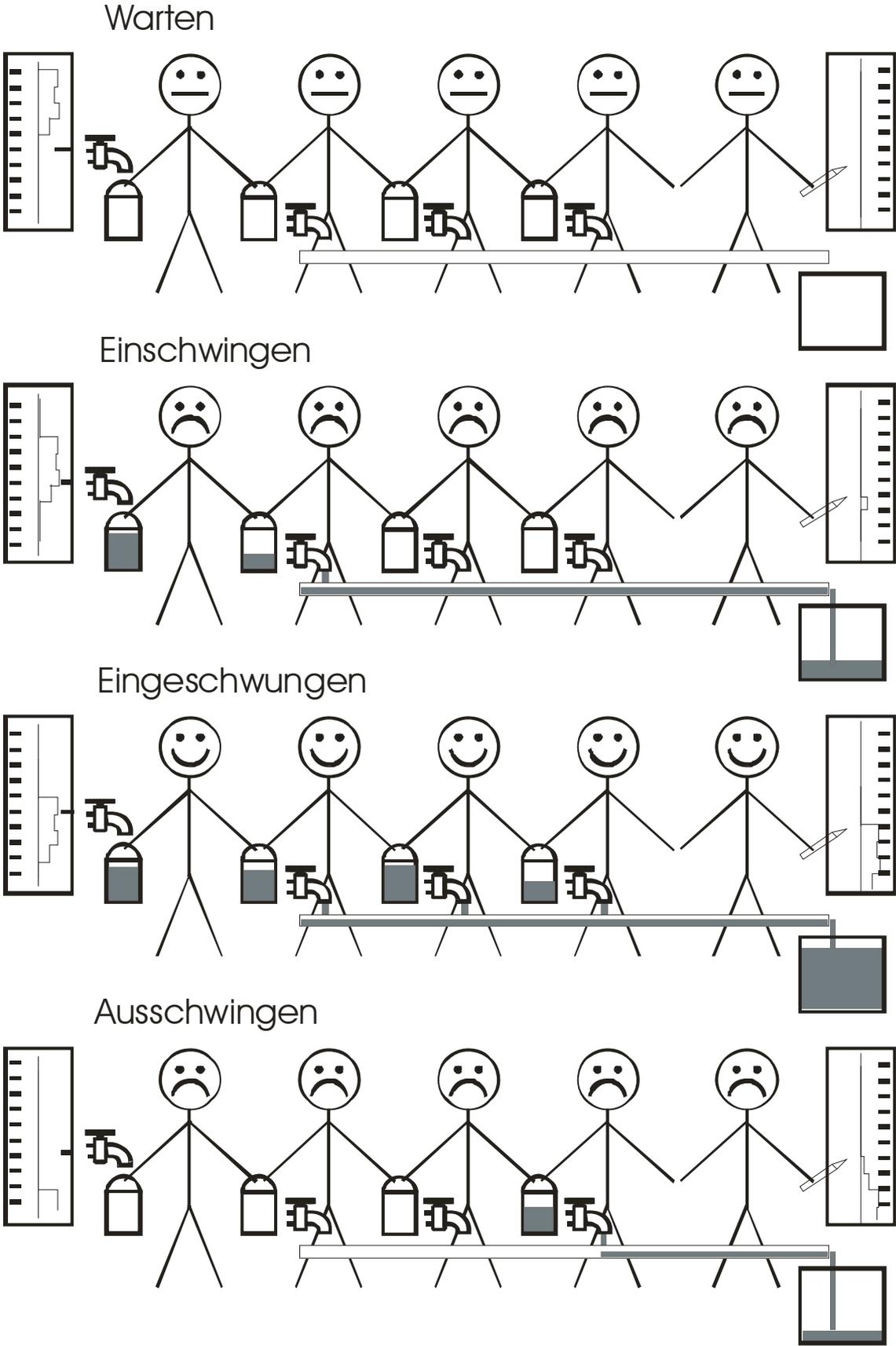
Filterschaltungen und elektrische, akustische und mechanisch schwingende Systeme werden mit Frequenz, Amplitude und Güte beschrieben. Das Zeitverhalten, das Ein- und Ausschwingen, wird durch die Güte bestimmt. Bei Lautsprecherweichen und bei der Bassabstimmung wird die Güte als entscheidender Wert betrachtet. In der Aufnahmetechnik und bei Digitalfiltern scheint die Güte keine Bedeutung zu haben. Hohe Werte für die Güte bewirken aber ein langes Ein- und Ausschwingen, das das Signal stark verändert. Dies kann in der Aufnahmetechnik erwünscht sein, sollte aber dem Tontechniker bewusst sein.

Bei der Optimierung der Raumakustik, ob im Wohnzimmer oder im Auto, werden Equalizer mit einem DSP eingesetzt. Diese ermöglichen beliebige Veränderungen der Wiedergabe. Bei der Einstellung des Equalizers tritt das Problem auf, dass die Frequenzgangmessung nicht ausreichend ist. Überhöhungen können durch die Aufstellung oder durch Raumresonanzen entstehen. Eine aufstellungsbedingte Überhöhung wird mit einer Shelf Filter und eine Raumresonanz mit dem EQ Filter, für das die Güte der Resonanz bekannt sein muss, ausgeglichen. Einbrüche lassen sich nur durch neue Platzierung von Lautsprecher und/oder Sitzplatz ausgleichen. Spitze Überhöhungen mit schmaler Bandbreite besitzen einen hohen Wert für die Güte. Zur Kompensation wird auch ein Filtern mit einer hohen Güte benötigt. Dieses erzeugen ein langes Nachschwingen, das zu einen breiigen Klang führt.

Einige Funktionen der Digitalfilter verändern das Zeitverhalten so stark, dass der Frequenzgang wenig über den Klang aussagt.

Der eingestellte Frequenzgang kann dann noch so linear sein, die Wiedergabe ist aber schlecht.

W1 Die Funktion digitaler Filter



Aus der mathematischen Funktion der digitalen Filter lässt sich nicht so einfach die Arbeitsweise, Rechnungen, erklären. Das Entscheidende bei der Rechnung ist der zeitliche Ablauf. Dieser wird von dem Takt vorgegeben. Der Takt wird von der Samplerate bestimmt. Diese beträgt bei der CD 44,1kHz oder 48kHz, 96kHz und 192kHz für den Studiobereich. Hierbei ist die Geschwindigkeit des Rechners nicht entscheidend, wenn er innerhalb eines Taktes die Rechnung ausführen kann.

Der zeitliche Ablauf lässt sich mit einer Eimerkette vergleichen. Die Eimerkette zeigt das Bild. Diese besteht wegen der Übersichtlichkeit nur aus drei Stationen. Die Stationen sind von der Filterfunktion abhängig. Aufwendige Filter können aus bis zu 60 Stationen bestehen.

Die Eimerkette:

Das erste Männchen ist für die Eingabe zuständig. Es liest die Werte aus einer Tabelle oder wandelt das analoge Signal in einen digitalen Wert. Entsprechend des Wertes wird ein Eimer gefüllt. Der Eimer wird an die erste Station weitergegeben.

Das zweite Männchen und die folgenden zwei sind für die Rechnung zuständig. Sie erhalten über die Koeffizienten eine Rechenaufgabe. Entsprechend der Rechnung betätigen sie in Abhängigkeit von der Füllung des Eimers den Wasserhahn und geben den Eimer weiter. Nach dem vierten Männchen hat der gefüllte Eimer seine Aufgabe erfüllt.

Das fünfte Männchen ist für die Ausgabe zuständig. Es schreibt den Wert für den Wasserstand des Behälters in eine Liste oder wandelt den Wert in ein analoges Signal um.

Zu dem Bild der Eimerkette:

1. Der Zustand Warten.

Es ist kein Signal vorhanden. Die Eimer sind alle leer und werden im Takt weitergegeben.

Die einfachste, nicht gezeigte Funktion, ist das Delay. Der Eimer wird entsprechend des Signals von dem ersten Männchen gefüllt. Er wird dann von den folgenden Männchen im Takt weitergegeben. Da keine Rechnung vorliegt werden die Wasserhähne auch nicht bedient. Das letzte Männchen trägt den Wert für den Wasserstand in die Liste ein. Das Signal wird um die Zeit = (Transportierende Männchen, Stationen) x (Länge eines Taktes) verzögert.

2. Der Zustand Einschwingen

Der Anfang des Signals liegt vor und das erste Männchen hat zwei Eimer gefüllt. Der erste Eimer ist an das zweite Männchen weitergegeben. Diese lässt entsprechend der Funktion des Filters Wasser in den Behälter für das Ergebnis fließen. Da nur ein Hahn bedient wird ist die Menge des Wassers gering und entspricht nicht der Filterfunktion. Das Ausgangssignal entsteht erst, das Einschwingen.

3. Der Zustand Eingeschwungen

Alle Männchen haben einen gefüllten Eimer. Die Wasserhähne werden alle bedient. Das Ergebnis im Behälter entspricht der Filterfunktion. Bei einer Frequenzgangmessung wird dieser Zustand gezeigt.

4. Zustand Ausschwingen

Seit zwei Takten ist kein Signal mehr vorhanden. Es wird aber noch ein gefüllter Eimer transportiert. Dieser bewirkt auch eine Füllung des Ergebnisbehälters. Obwohl kein Eingangssignal mehr vorhanden ist, besteht noch ein Ausgangssignal, das Ausschwingen.