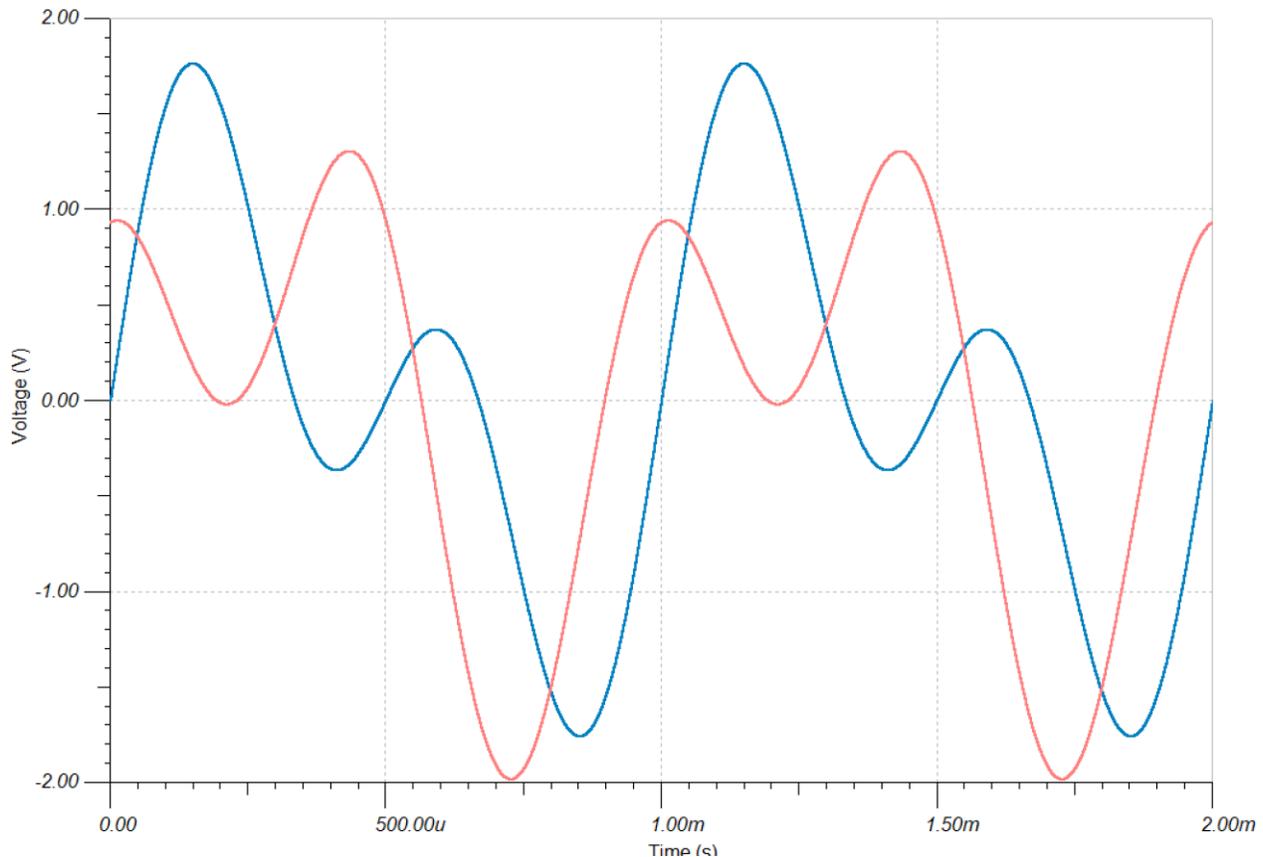


## Frequenzgang vs. Phasengang:

Die Frequenzganganalyse ist für die meisten Leute intuitiv sehr einfach nachvollziehbar. Sie sagt aus wie laut ein Eingangssignal abhängig von der Frequenz aus einem Audio-Gerät wieder herauskommt. Aus persönlicher Erfahrung weiss auch jeder, dass Töne über 20kHz für die meisten Personen nicht hörbar sind. Also Katzenschreck und Hundepfeife hören wir Menschen normalerweise nicht. Da erstaunt es auch nicht, dass es in audiophilen Kreisen als gegeben und normal angesehen wird, dass der Frequenzgang eines Audio-Gerätes oberhalb 20kHz abfallen darf ohne dass damit eine Klangeinbusse einhergehen würde. Wir hören diese Töne ja eh nicht, daher muss der Frequenzgang ja auch nicht bis zu 200kHz, 2MHz oder gar noch höher linear verlaufen! Diese Argumentation ist intuitiv sehr einfach nachvollziehbar, wird daher von vielen Endkunden aber auch Audio-Ingenieuren bewusst oder unbewusst unterstützt und ist daher in der Audiophilen Szene sehr stark verankert.

Und doch gibt es da so verrückte Hersteller wie soulution aber auch andere (Spectral und früher Halcro) die Ihre Geräte mit einem linearen Frequenzgang bis in den MHz-Bereich ausstatten und dabei einen immensen schaltungstechnischen Aufwand betreiben. Da könnte man schon denken die haben ja einen Knall oder aber dann sicher etwas nicht richtig verstanden. Das Ziel hierbei ist es nicht diese hohen Frequenzen hörbar zu machen, sondern liegt vielmehr darin die Phasenverschiebung im Audioband (bis 20kHz) so gering wie möglich zu halten. Wir sind der festen Überzeugung, dass eine Audiokomponente das Musiksignal abgesehen von seiner Funktion (verstärken, abschwächen) in keiner Weise verändern sollte. Das Ausgangssignal einer Audiokomponente sollte eine exakte Kopie des Eingangssignal darstellen, im Falle eines Verstärkers lediglich multipliziert um den Verstärkungsfaktor.  $\text{sig}_{\text{out}}(t) = \text{sig}_{\text{in}}(t) * \text{gain}$  Das bedeutet dass das Ausgangssignal insbesondere auch im Zeitbereich eine exakte Kopie des Eingangssignals darstellen sollte, also Phasenverschiebung = 0.

Die Grafik unten zeigt folgendes Eingangs-Signal =  $\sin(f_1 * t) + \sin(f_2 * t)$  in blauer Farbe, also ein «Musiksignal» bestehend aus zwei sich überlagernden Sinus-Schwingungen mit der Frequenz  $f_1 = 1\text{kHz}$  und  $f_2 = 2\text{kHz}$ . Für das rote Ausgangssignal wurde für die Sinus-Schwingung mit 2kHz eine Phasenverschiebung  $\varphi$  zugefügt. Ausgangs-Signal =  $\sin(f_1 * t) + \sin(f_2 * t + \varphi)$

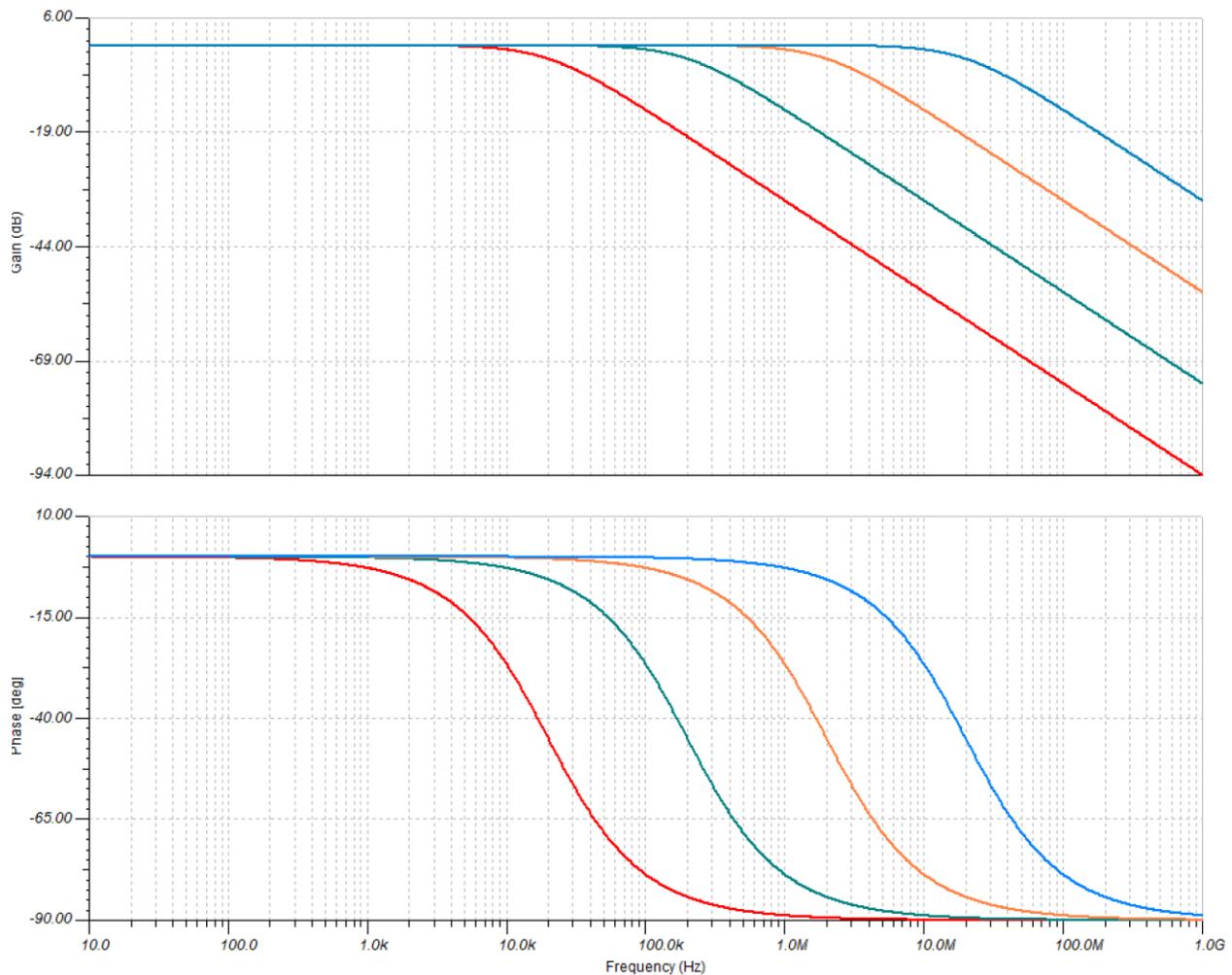


Ein Audiogerät welches alle Frequenz-Komponenten des Eingangssignals ohne Abschwächung oder Verstärkung reproduziert aber eine Phasenverschiebung für die höheren Frequenzen aufweist würde das blaue Eingangs-Signal als rote Ausgangssignal wiedergeben. Dass es sich dabei nicht um dasselbe Signal handelt ist sicher augenfällig und wir meinen auch ohrenfällig. Aber genau darüber wird heftig diskutiert. Es gibt sogar Fachleute die behaupten die Information von Sprache und Musik sei ausschliesslich im Frequenzbereich kodiert und dass somit Phasenverschiebung keine Rolle spielen würden und somit auch nicht hörbar wären. (P.S. so ein Quatsch!!)

Egal wie breitbandig ein Schaltung-Design ausgelegt ist, es wird immer eine obere Grenzfrequenz geben ab welcher das Gerät nicht mehr in der Lage sein wird das Eingangssignal ohne Abschwächung zu reproduzieren. Alle Audiogeräte sind also Tiefpassfilter mit einer mehr oder weniger hohen Grenzfrequenz (ein Verstärker ist ein Tiefpassfilter mit Verstärkung). In erster Näherung kann man behaupten, dass ein Tiefpassfilter erster Ordnung das grundsätzlicher Verhalten hinreichend genau beschreibt.

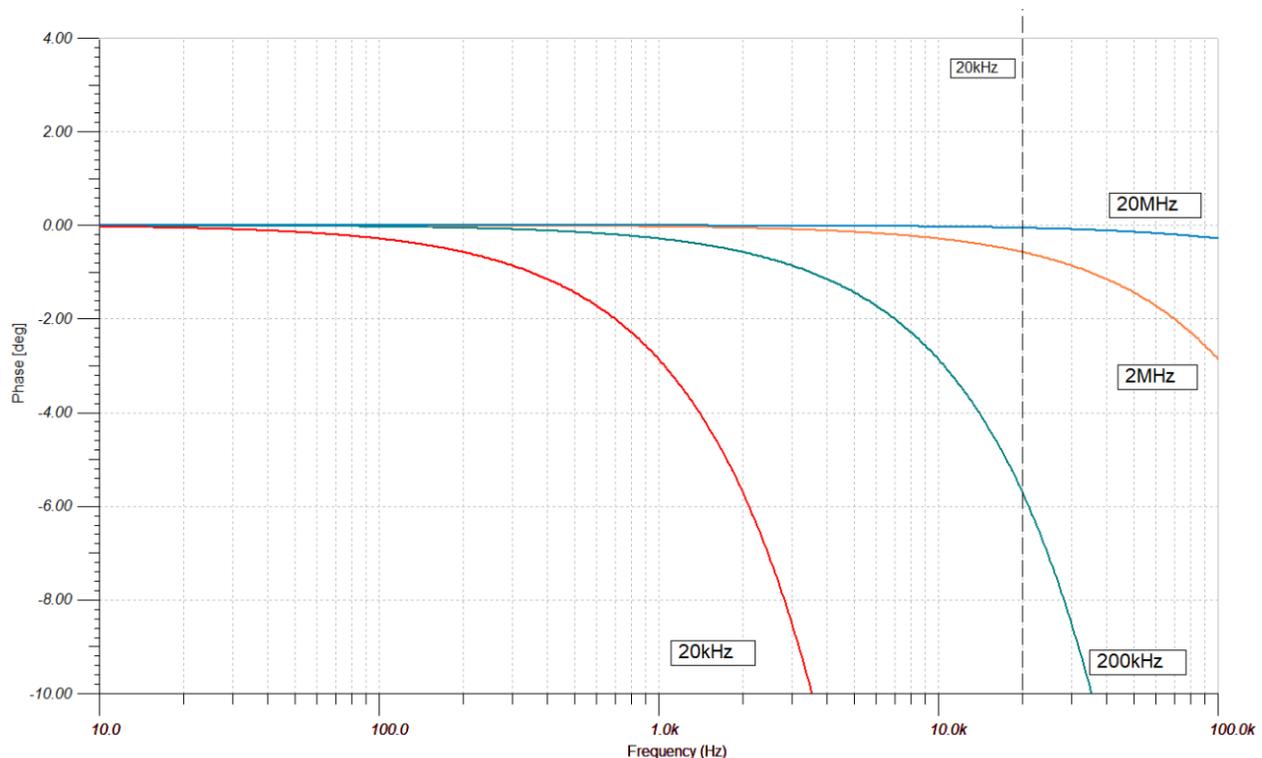
Nachstehend Grafik zeigt den Bode-Plot, also Frequenzgang und Phasengang für ein Tiefpassfilter 1. Ordnung (z.B. ein einfaches RC-Glied) mit den Grenzfrequenzen (-3dB) 20kHz, 200kHz, 2MHz und 20 MHz. Solange wir nur den Frequenzgang betrachten scheint die Welt für alle 4 Filter-Grenzfrequenzen in Ordnung zu sein und für die Übertragung von Audiosignalen durchaus geeignet. Wenn wir uns aber den

Phasengang ansehen wird klar warum eine Frequenzbandbreite von 20kHz für die Wiedergabe von Audiosignalen bei weitem nicht ausreicht.



Unser Tiefpass-Filter mit Grenzfrequenz 20kHz verursacht im gesamten Audioband erhebliche Phasenverschiebungen, bei 20kHz sind es sage und schreibe  $45^\circ$ . Das bedeutet, dass Signale mit dieser Frequenz zeitlich um  $1/8$  ihrer Periode versetzt gegenüber Signalen mit tiefen Frequenzen am Ausgang unserer Audio-Komponente wiedergegeben werden. Man könnte genausogut den Hochtöner gegenüber den Bassmembranen um diese Laufzeitdifferenz verschieben. Wir sind überzeugt mit Highend hat das nichts zu tun und das will eigentlich auch niemand!

Die Frage nach wieviel Bandbreite eine Audiogeräte aufweisen sollte entspricht somit der Frage wieviel Phasenverschiebung wir im Audioband zulassen wollen. Nachstehende Grafik ist ein gezoomter Ausschnitt aus dem Phasengang unserer Tiefpassfilter. Ein Filter mit 200kHz Grenzfrequenz weist immer noch eine Phasenverschiebung von  $6^\circ$  bei 20kHz, ein Filter mit 2MHz Grenzfrequenz reduziert die Phasenverschiebung auf unter  $1^\circ$ , das 20MHz –Filter verschiebt die Phase dann nur noch um ein paar Milli-Grad.



Viele Audiofans mögen sich nun Fragen ist denn das wirklich noch hörbar oder ist das nur reiner Overkill (schneller, höher, weiter).

Der Vorverstärker solution 725 weist ein obere Grenzfrequenz von 2 MHz auf. Als Schutzfunktion verfügt er über ein Tiefpassfilter welches diese Grenzfrequenz in 3 Stufen verändern kann (2MHz, 200kHz und 20kHz). Auf Messen haben wir den Effekt dieses Filters tausendfach vorgeführt. Das Urteil des Publikums ist eindeutig. Alle drei Stufen sind sehr deutlich wahrnehmbar. Mit zunehmender Reduktion der Übertragungs-Bandbreite wird die Soundstage schmäler und weniger tief, die Klangfarben sind weniger brilliant, insgesamt klingt alles irgendwie langweilig.

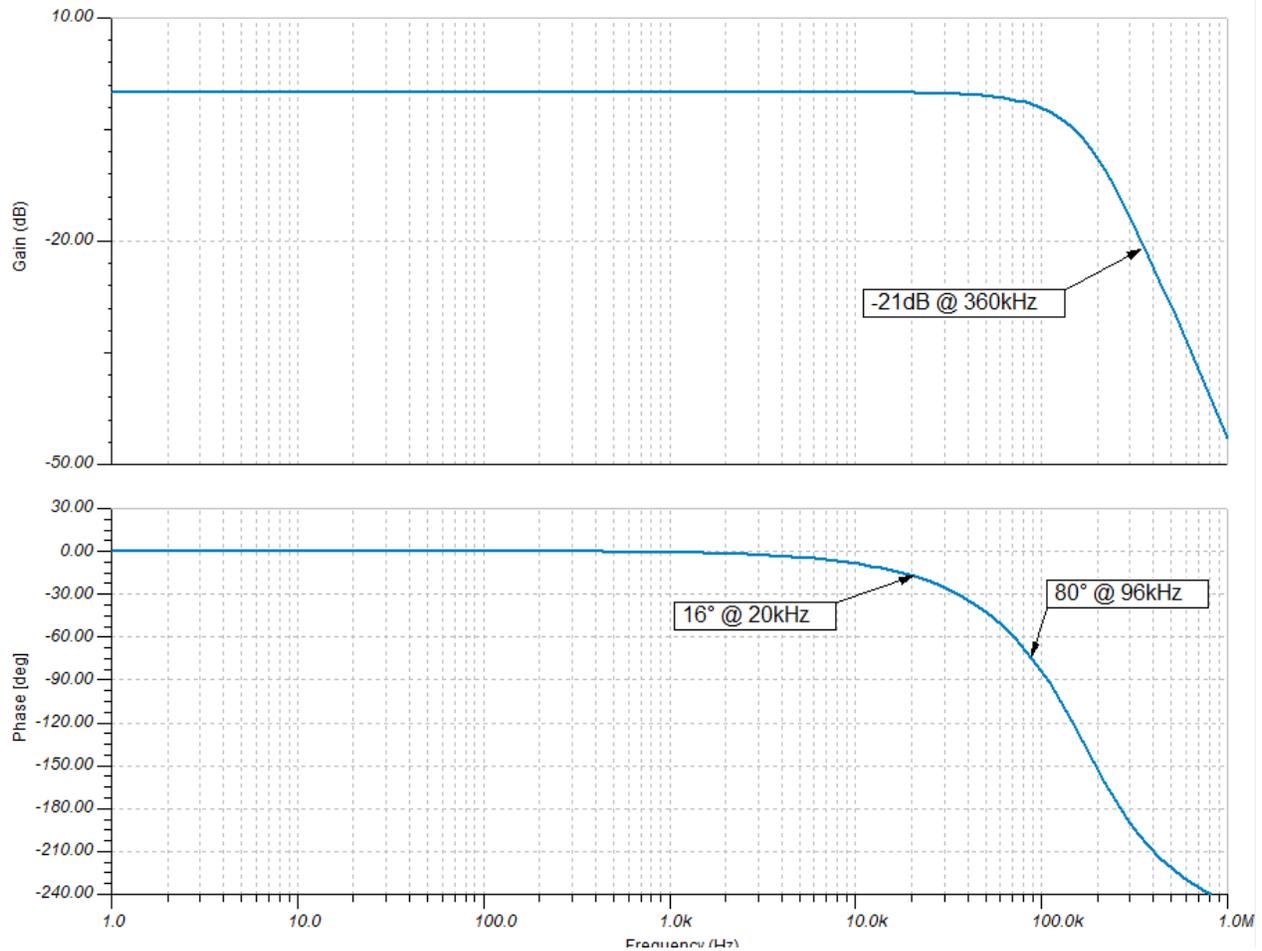
Das Thema Phasenverschiebung betrifft natürlich nicht nur Verstärker oder Vorverstärker sondern ist insbesondere für Quellgeräte essenziell.

Die Aufgabe eines Phono-Entzerrers ist den Frequenz- und Phasengang mit welchem die Musik auf der LP versehen wurde wieder rückgängig zu machen, also wieder linear zu machen und dabei gleichzeitig zu verstärken. Die drei charakteristischen Frequenzen der RIAA-Kennlinie (50Hz, 500Hz und 2120Hz) scheinen zunächst in sicherer Entfernung der oberen Grenzfrequenz des Audiobandes (20kHz) zu liegen. Doch ein Blick auf den Phasengang einer auf 20kHz begrenzten Ausgangsstufe zeigt sofort, dass jeglicher Aufwand für eine möglichst akkurate Entzerrung mit dem Phasengang der Ausgangsstufe wieder zunichte gemacht würde. Also sind auch MHz-Bandbreiten für den Phonoentzerrer notwendig! Crazy? Ja, aber logisch und notwendig!

In Bezug auf korrekten Phasengang stellt der D/A-Wandler die grösste Herausforderung dar. Um das Abtasttheorem von Nyquist-Shannon einzuhalten ist im Ausgang eines jeden D/A-Wandlers ein analoges Tiefpassfilter notwendig. Dieses Filter lässt sich keine auch noch so gewagte Theorie wegdiskutieren, was ja der audiophilen Szene sehr gerne gemacht wird. Ein D/A-Wandler Design ohne analoges Tiefpassfilter im Ausgang ist schlicht und einfach falsch. Für das Design dieses Tieffilters sind die Frequenz-Bandbreite des Signals sowie Abtastrate relevant, sprich je weiter weg die Abtastrate von der höchsten Frequenz im Nutzsignal liegt, umso einfacher (weniger steil) kann das Filter ausfallen. Viele hochwertige D/-Wandler setzen an dieser Stelle ein Tiefpassfilter 3ter Ordnung mit Bessel Charakteristik ein, was einen maximal linearen Phasengang im Durchlassbereich garantiert. Die Eckfrequenz liegt typischerweise bei ca. 100kHz. Wenn wir uns den Frequenz- und Phasengang eines Bessel-Filters 3ter Ordnung mit einer Grenzfrequenz von ca. 100kHz ansehen fällt auf, dass die Phasenverschiebung bis ca. 1kHz tatsächlich sehr klein bleiben dann aber schnell ansteigen. Bei 20kHz verursacht das Filter dann bereits  $16^\circ$  Phasenverschiebung. Unser Hörexperiment mit der Vorstufe hat gezeigt, dass bereits eine Phasendrehung von  $5^\circ$  eindeutig und klar hörbar ist, da sind  $16^\circ$  Phasendrehung im Quellgerät natürlich ein Grad. Die hochfrequenten Signalanteile eines 192kHz higrs Signals werde sogar mit einer Phasendrehung von  $80^\circ$  beaufschlagt.

Ein Digital-Signal mit 44.1kHz Samplingrate und 16Bit Auflösung wird Frequenzen bis ca. 20kHz beinhalten. Wenn wir nun dieses Digitalsignal mittels Upsampling auf z.B. auf 384kHz konvertieren werden im analogen Ausgangssignal oberhalb von ca. 360kHz Spiegelbilder «Images» des originalen Frequenzspektrums auftreten. Die Vorgabe des Abtasttheorems von Nyquist-Shannon fordert nun aber, dass für die perfekte Reproduktion des originalen Frequenzspektrums sämtliche Images maximal unterdrückt werden. In mathematischem Sinne = 0 sind oder dann aus technischer Sicht mindestens bis unter den Quantisierungsfehler des Digitalsignals abgeschwächt werden. Für unser CD-Signal bedeutet dies eine Abschwächung um mindestens 96dB (6 dB pro Bit) für ein Highres-Signal mit 24 Bit wären dann bereits 144dB Abschwächung notwendig. Ein Blick auf den Frequenzgangs unseres Bessel-Filters zeigt, dass diese Vorgabe bei 360kHz sowohl für CD wie auch hochauflösende Signale klar verfehlt wird.

Wir haben es hier mit einem «Trade off» zwischen idealem Phasengang im Durchlassbereich und maximaler Dämpfung im Sperrbereich zu tun. Optimieren wir die Dämpfung im Sperrbereich z.B. mittels eines steileren Filters werden wir automatische mehr Phasendrehung im Durchlassbereich in Kauf nehmen und vice versa. Erhöhen wir die Grenzfrequenz um den Phasengang zu optimieren verlieren wir Filterwirkung welche ja eh schon unzureichend ist.



Die Situation erscheint ausweglos doch genau hier setzt unsere zeroPhase-Technologie an. Die Phasenlage des digitalen Signals wird noch vor der D/A-Wandlung frequenzabhängig um die Phasenverschiebung welche das analoge Tiefpassfilter hinzufügen wird «vorverzerrt». Der Rechenaufwand für diese Phasen-Kompensation ist sehr hoch daher verwenden auch wir Tiefpassfilter wie oben beschrieben, welches die Images des originalen Frequenzspektrums gemäss Abtasttheorem nicht ausreichend unterdrücken kann dafür aber nur eine moderate Phasendrehung aufweist welche wir dann mit der zeroPhase-Technologie auf +/-0.1° kompensieren, eben zeroPhase. Zukünftige, wesentlich leistungsfähigere DSPs (DigitalSignalProcessors) werden uns erlauben mit der zeroPhase-Technologie noch wesentlich grössere Phasenverschiebungen zu kompensieren.