Beschreibung von Systemen der Audiotechnik über Amplituden- und Phasengang

Wie wir bereits gelernt haben, lassen sich beliebig komplexe Audiosignale als Überlagerung von elementaren Sinusschwingungen beschreiben. Haben diese Audiosignale einen periodischen Verlauf, so stehen die in ihnen enthaltenen Sinusschwingungen in einem ganzzahligen Frequenzverhältnis zu einer Grundschwingung. Dies ist die Aussage der Fourierreihenentwicklung:

$$f_p(t) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n \cdot \sin(2\pi \cdot n \cdot f_0 \cdot t + \varphi_n)$$

f_0 bezeichnet hierbei die Frequenz der Grundschwingung, c_n die Amplituden und φ_n die Phasenverschiebungen der einzelnen Teilschwingungen.

Will man nun die Eigenschaften eines Systems der Audiotechnik beschreiben, so betrachtet man, wie das System auf die Teilfrequenzen eines Audiosignals einwirkt. Unter dem allgemeinen Begriff 'System' kann man sich hierbei verschiedenste Komponenten vorstellen, unabhängig davon, ob sie analog oder digital sind:

Schallwandler	Mikrofon, Lautsprecher, Kopfhörer
Kanäle	Kupferkabel, Glasfaserkabel, Luftstrecke
Verstärker	z. B. Vorverstärker in der Soundkarte oder im Mischpult, Endstufe in einer Stereoanlage
Filter	Klangregelung, Anti-Aliasingfilter bei der Digitalisierung, Filter zur Störbefreiung etc.

Vorausgesetzt, die Eigenschaften des Systems sind zeitlich unveränderlich, das heißt, sie hängen nicht davon ab, zu welchem Zeitpunkt das Audiosignal auf das System gegeben wird, lässt es sich mittels seines so genannten *Frequenzgangs* vollständig beschreiben, ohne dass der konkrete innere Aufbau des Systems bekannt sein muss.

Dabei wird unterschieden zwischen dem *Amplitudengang* und dem *Phasengang* des Systems.

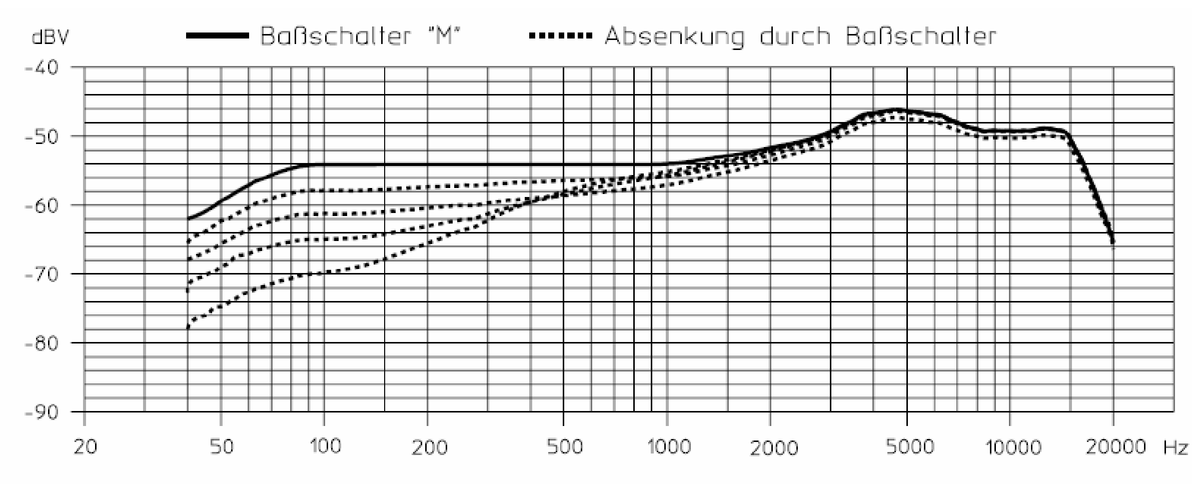
Der Amplitudengang A(f) beschreibt, wie die einzelnen Teilfrequenzen eines Audiosignals in der Amplitude verändert werden, ob sie z.B. verstärkt aus dem System herauskommen - wie bei einem Verstärker gewünscht - oder gedämpft wie z.B. bei einem Filter zur Störbefreiung.

Der Phasengang φ(f) beschreibt hingegen, wie sich die Phasenlage zwischen Ein- und Ausgang des Systems verändert. Man kann sich vorstellen, dass das Audiosignal wie z.B. bei einer Telefonverbindung per Satellit hörbar verzögert wird, also eine Laufzeit Δt zwischen Ein- und Ausgang besteht. Diese Laufzeit drückt man bezogen auf den Phasenunterschied zwischen Ein- und Ausgang bei der betrachteten Frequenz aus. Da der Ausgang gegenüber dem Eingang verzögert ist, ist dieser Phasenwinkel negativ, wobei allerdings zu beachten ist, dass aufgrund der Periodizät der Sinusfunktion -180° = +180° gilt, bzw. z.B. -215°=+145°.

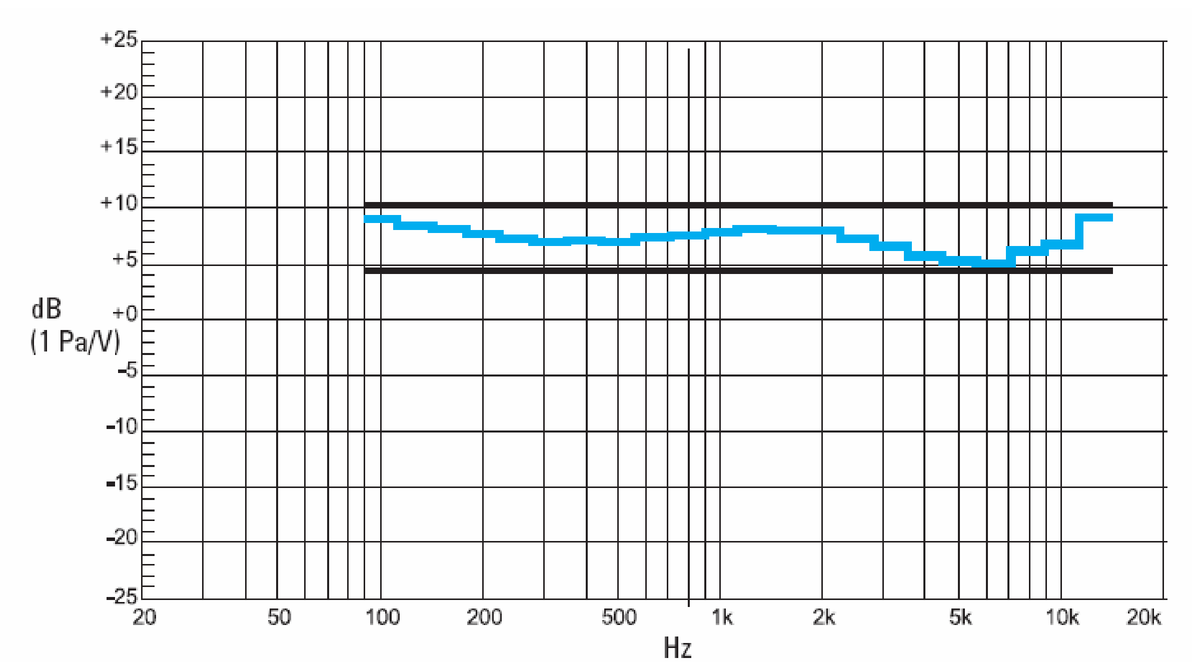
<u>Beispiel:</u> Benötigt ein Sinussignal mit der Frequenz 1 kHz (360° entspricht 1 ms) eine Laufzeit von 0.1 ms durch ein System, so entspricht die Phasenverschiebung φ(f=1kHz) genau -36°.

Ist die Laufzeit Δt für alle Frequenzen gleich, so steigt die Phasenverschiebung φ(f) mit der Frequenz linear an. Wandern hingegen verschiedene Frequenzen unterschiedlich schnell durch das System, man spricht auch von *Dispersion*, so kommt es zu so genannten Phasenverzerrungen, bei denen die Wellenform am Ausgang gegenüber dem Eingang verändert erscheint.

Beispiel für den Amplitudengang eines Mikrofons (Sennheiser MD 421)



Beispiel für den Amplitudengang eines Kopfhörers (Sennheiser HD 280)



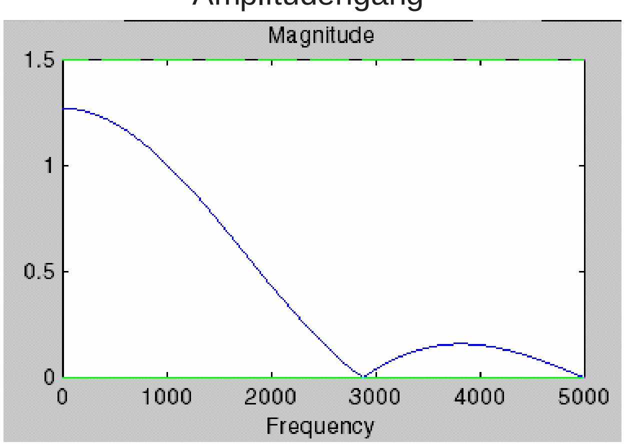
Betrachten wir nun ein Beispiel für die Berechnung des Ausgangssignals eines Systems, wenn das Eingangssignal, sowie Amplituden- und Phasengang des Systems gegeben sind.

Das Eingangssignal bestehe aus folgenden Teilschwingungen.

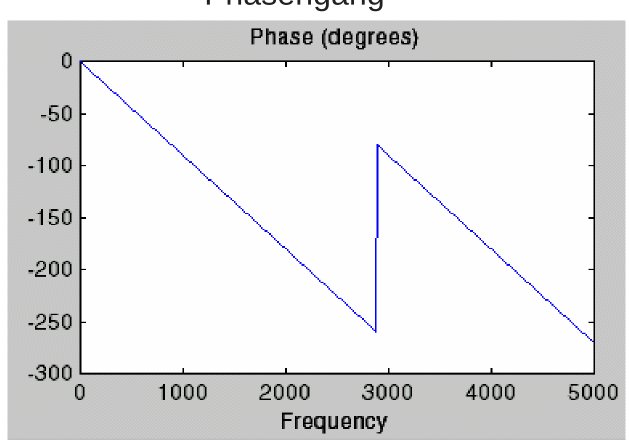
$$x_e(t) = 10V \cdot \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot t + \varphi_1) + 5V \cdot \sin(2\pi \cdot 2 f_0 \cdot t + \varphi_2) + 10V \cdot \sin(2\pi \cdot 4 f_0 \cdot t + \varphi_3)$$

$$f_0 = 500 Hz, \varphi_1 = 0°, \varphi_2 = 90°, \varphi_3 = -90°$$

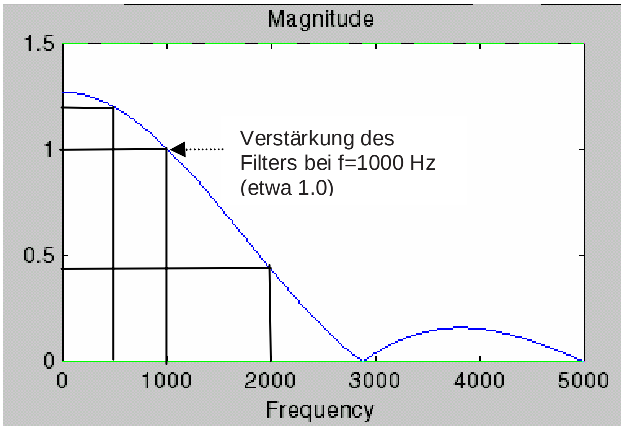
Amplitudengang

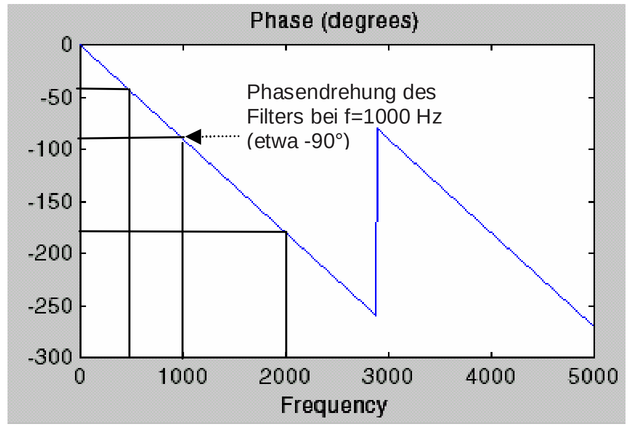


Phasengang



Wir haben also Teilschwingungen von 500, 1000 und 2000 Hz vorliegen. Um jetzt zu berechnen, wie sich die Amplituden dieser Schwingungen durch die Filterung verändern, müssen wir aus dem Amplitudengang (linke Grafik) die Verstärkungen bei den interessierenden Frequenzen ablesen.





Diese sind im Amplitudengang mit schwarzen Linien gekennzeichnet. Die Verstärkung beträgt demnach bei 500 Hz etwa 1.2, bei 1000 Hz 1.0 und bei 2000 Hz nur noch 0.4. Das Ausgangssignal hat demnach die folgenden Spitzenamplituden:

f= 500Hz: 10 V x 1.2 = 12 V
f=1000Hz: 5 V x 1.0 = 5 V
f=2000Hz: 10 V x 0.4 = 4 V

Wie wir sehen, werden hohe Frequenzen stärker gedämpft als niedrigere. Wir haben es also mit einem Tiefpaß-Filter zu tun.

Wollen wir nun die Phasenlage der Schwingungen am Ausgang des Filters wissen, müssen wir aus dem Phasengang (rechte Grafik) die resultierenden Phasendrehungen ablesen. Diese betragen bei 500 Hz etwa -45°, bei 1000 Hz -90° und bei 2000 Hz etwa -180°. Die Phasendrehung durch das Filter wird zu den Phasenwinkeln der Teilschwingungen am Eingang addiert. Am Ausgang ergeben sich damit in unserem Beispiel folgende Phasenwinkel:

f= 500Hz: 0° - 45 °= -45°
f=1000Hz: 90° - 90° = 0°
f=2000Hz: -90° - 180° = -270°= 90°

Damit ergibt sich das Ausgangssignal wie folgt:

$$x_a(t) = 12V \cdot \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot t + \varphi_1) + 5V \cdot \sin(2\pi \cdot 2f_0 \cdot t + \varphi_2) + 4V \cdot \sin(2\pi \cdot 4f_0 \cdot t + \varphi_3)$$

$$f_0 = 500Hz, \varphi_1 = -45°, \varphi_2 = 0°, \varphi_3 = 90°$$