



Grundlegendes zu Akustik und Signalverarbeitung



by John Perr

[<johnperr\(at\)linuxfocus.org>](mailto:johnperr@linuxfocus.org)

About the author:

Linux-Anwender seit 1994;
einer der französischen
Autoren von LinuxFocus;
Maschinenbauingenieur, MSc
Sound and Vibration Studies

Abstract:

Dieser Artikel bietet Grundlegendes zu Akustik und Signalverarbeitung für Musiker und Informatiker..

Wer je davon geträumt hat, seine eigenen Musikaufnahmen zu machen, oder am Computer mit Musik herumzuspielen, sollte weiterlesen.

Translated to English by:

John Perr

[<johnperr\(at\)linuxfocus.org>](mailto:johnperr@linuxfocus.org)

Einführung

Dieser Artikel soll dem Leser ein Grundwissen über Schall (Sound) und Schallverarbeitung geben. Natürlich wird ein Hauptaugenmerk auf Musik liegen, aber alles in allem ist Musik doch nur Schall wie jedes andere Geräusch auch, nur eben angenehmer zu hören.

Zuerst werden die physikalischen Konzepte von Schall präsentiert, und die Art und Weise, wie das menschliche Ohr ihn interpretiert. Dann werden Signale betrachtet, z.B. wie sich Schall verändert, wenn er aufgenommen wird, besonders mit modernen digitalen Geräten wie Sampler oder Computer.

Zuletzt wird auf aktuelle Kompressionstechnologien wie mp3 oder Ogg vorbis eingegangen.

Die Themen, die in diesem Artikel zur Sprache kommen, sollten einem breiten Publikum verständlich sein.

Der Autor versucht sein Bestes, eine "normale Sprache" zu verwenden und besonders Ausdrücke, die Musikern vertraut sind. Ein paar wenige mathematische Formeln tauchen hie und da in den Abbildungen auf, sind hier aber nicht weiter wichtig (puuh! Gott sei Dank...).

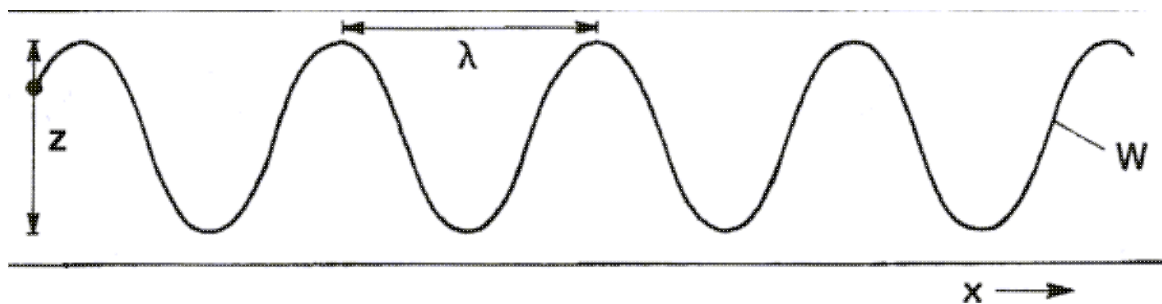
Ein bisschen Physik

Schall

Physikalisch gesprochen ist Schall mechanisches Vibrieren von gasförmigen, flüssigen oder festen Medien. Die Elastizität des Mediums erlaubt dem Schall, sich von der Schallquelle weg als Wellen auszubreiten, genauso wie die Kreise, die von einem ins Wasser geworfenen Stein ausgehen.

Jedes Mal, wenn ein Objekt vibriert, geht ein kleiner Anteil seiner Energie an die Umgebung als Schall verloren. Um es gleich zu sagen, Schall kann sich nicht in Vakuum ausbreiten.

Abbildung 1a zeigt, wie ein Taststift, der mit einer vibrierenden Quelle, z.B. einem Lautsprecher, verbunden ist, eine Wellenlinie zeichnet, wenn darunter ein Papierband vorbeiläuft.



z: Vibrirender Taststift mit der Amplitude $\pm A_0$

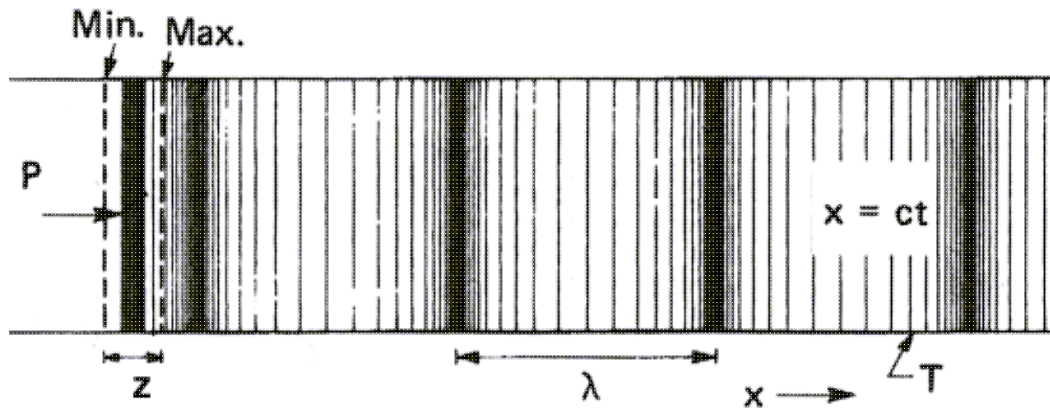
»: Wellenlänge

x: Bandgeschwindigkeit c

w: Resultierende Welle

Abbildung 1a: Vibrirender Taststift auf einem vorbeilaufenden Papierband

In der Luft pflanzen sich Schallwellen als Änderungen des Luftdrucks fort. Ein Lautsprecher verursacht Luftdruckänderungen in der umgebenden Luft. Diese (schwachen) Änderungen des Drucks setzen sich durch die Luft fort. Wichtig ist, dass sich nur der Druck fortpflanzt, nicht aber die Luft selber. Auch beim Beispiel mit den sich ausbreitenden Kreisen im Wasser, das ich zuvor angesprochen habe, pflanzen sich nur die Wellen fort, das Wasser bleibt aber am selben Platz. Ein schwimmendes Objekt bewegt sich nur auf und ab. Das ist auch der Grund dafür, dass man vor einem Lautsprecher keinen "Wind" verspürt. Schallwellen pflanzen sich mit etwa 344 Metern pro Sekunde fort, in Luft bei 20°C, aber die Luftteilchen selbst bewegen sich nur ein paar Mikrometer vor und zurück.



P: Vibrierender Kolben
T: Rohr
t: Zeit

Abbildung 1b: Vibrierender Kolben in einer Flüssigkeit

Frequenz und Tonhöhe

Wir wissen inzwischen aus den obigen Abbildungen, dass Schallwellen eine sinusförmige Form haben. Der Abstand zwischen zwei Scheitelpunkten wird Wellenlänge genannt und die Anzahl der Scheitelpunkte, die ein Beobachter in einer Sekunde sieht, ist die Frequenz. Dieser in der Physik verwendete Begriff ist für einen Musiker nichts anderes als die Tonhöhe. Niedrige Frequenzen ergeben Basstöne, währenddessen hohe Frequenzen hohe Töne ergeben.

Abbildung 2 zeigt sowohl Frequenz als auch Wellenlänge von Schallwellen, die sich in Luft ausbreiten:

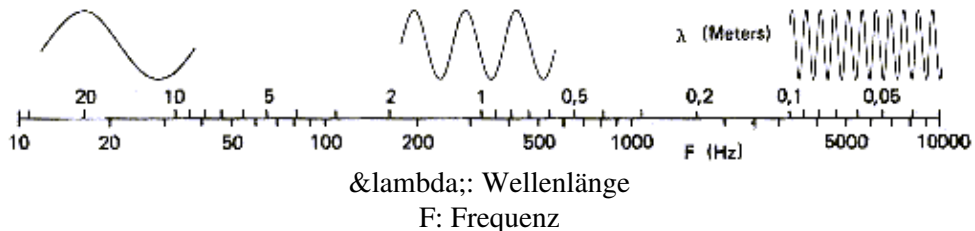


Abbildung 2: Wellenlänge und Frequenz in der Luft

Amplitude und Lautstärke

Ein anderes Merkmal von Schall ist seine Amplitude. Schall kann leise oder laut sein. Das entspricht kleinen oder großen Schwankungen des Luftdrucks, je nach der Kraft, mit der die Luft zusammengedrückt wird. Um die Stärke von Schall (Schalldruck) zu bewerten, wird die Einheit Dezibel (dB) verwendet. Dezibel scheint eine eher schwierige Einheit zu sein, wie Abbildungen 3a und 3b zeigen. Es wurde gewählt, weil sich damit nichtsdestotrotz einfach rechnen lässt, und weil der Logarithmus dem menschlichen Hörverhalten entspricht, wie wir im nächsten Kapitel sehen werden. Ganz ohne Zweifel verwenden wir beim Hören Mathematik, ohne es zu merken:

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0}$$

$$L_w = 10 \log_{10} \frac{W}{W_0}$$

Abbildung 3a: Schalldruck Abbildung 3b: Leistungspegel

Bis jetzt müssen wir nur wissen, dass dB sich auf den Leistungspegel beziehen. 0 dB entsprechen der unteren menschlichen Hörschwelle und sagen nicht aus, dass kein Schall vorhanden wäre. Dezibel ist eine Maßeinheit für Schall, die den menschlichen Wahrnehmungsgrenzen entspricht. Änderungen des Bezugspunktes (P_0 oder W_0) ändern dementsprechend den dB-Wert. Darum entspricht die dB-Angabe am Lautstärkereglern des HiFi-Verstärkers nicht dem Geräuschpegel, sondern der elektrischen Ausgangsleistung des Verstärkers. Das ist also eine komplett andere Maßeinheit, da 0 dB oft die maximale Ausgangsleistung des Verstärkers bezeichnet. Akustisch betrachtet ist die Lautstärke viel größer, sonst hättest du dir wohl nicht diesen besonderen Verstärker gekauft, aber es hängt auch von der Effizienz der Lautsprecher ab... Abbildung 4 zeigt uns Amplitude und Frequenz verschiedener, bekannte Schallquellen. Die geschwungenen Linien verbinden, was das menschliche Gehör als gleich laut empfindet; darauf werden wir später noch genauer eingehen:

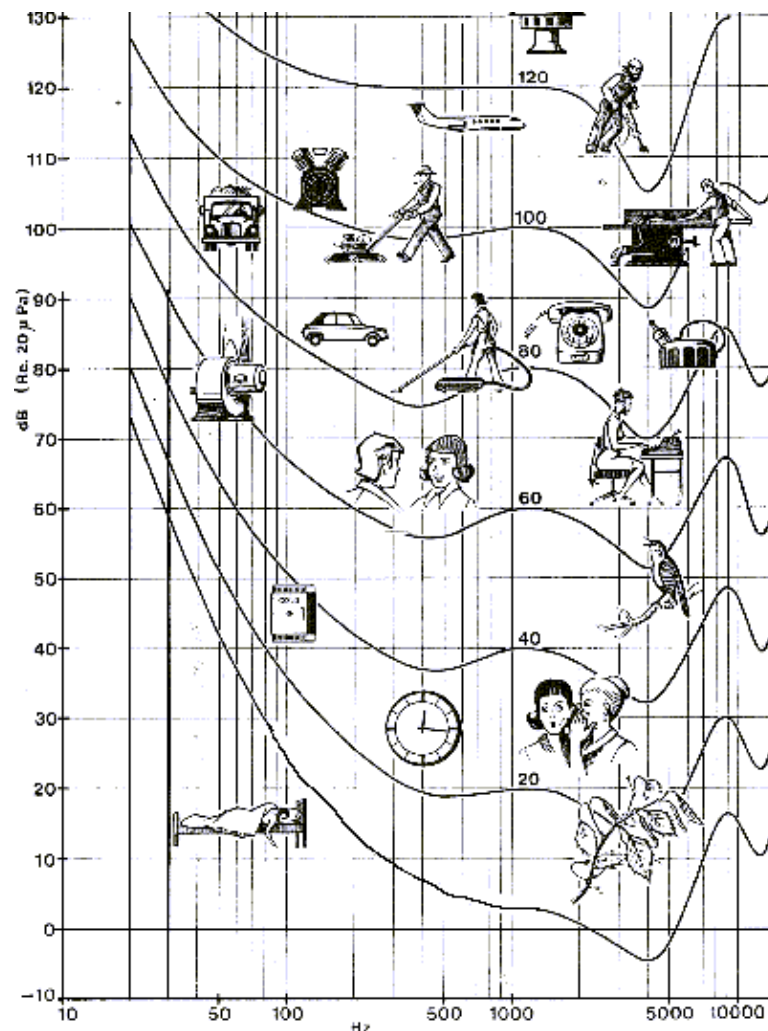


Abbildung 4: Geräuschpegel üblicher Schallquellen

Die nachstehende Tabelle zeigt Pegel verbreiteter Schallquellen in Dezibel und Watt. Achte darauf, wie die Verwendung von Dezibel als Einheit die Notation vereinfacht.

Leistung (Watt)	Pegel dB	Beispiel	Leistung (W)	
100 000 000	200	Saturn V Rakete	50 000 000	
1 000 000	180		4 Duesenflugzeuge	50 000
10 000	160			
100	140	Großes Orchester	10	
1	120	Meißelhammer	1	
0.01	100	Sprache: Schreien	0.001	
0.000 1	80			
0.000 001	60	Sprache: Unterhaltung	20×10^{-6}	
0.000 000 01	40			
0.000 000 000 1	20	Sprache: Flüstern	10^{-9}	
0.000 000 000 001	0			

Schalldruck einiger typischer Schallquellen

Die Schallamplitude kann auf verschiedene Weise gemessen werden. Das gilt auch für andere Wellensignale wie Abbildung 5 zeigt:

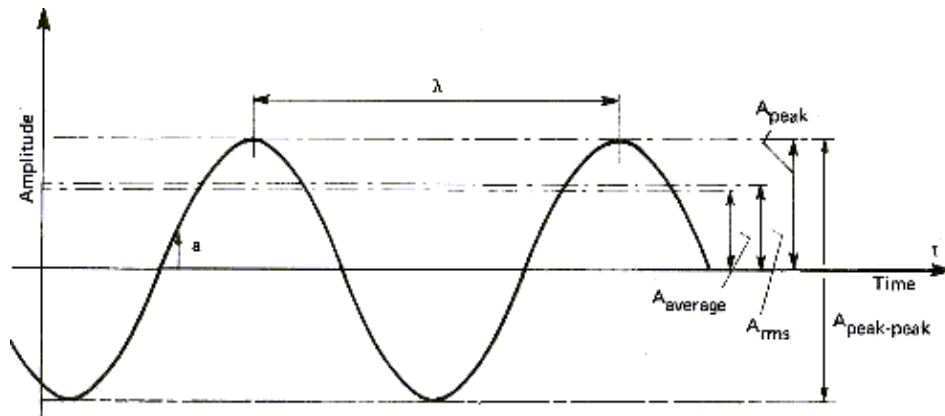


Abbildung 5: Verschiedene Maßeinheiten einer Signalamplitude

Symbol	Name	Definition
$A_{\text{Durchschnitt}}$	durchschnittliche Amplitude	arithmet. Mittel des positiven Signalteils
A_{RMS}	quadrat. Mittelwert	Amplitude proportional zum Energieinhalt
$A_{\text{Scheitelwert}}$	höchste Amplitude	maximale positive Amplitude
$A_{\text{doppelter Scheitelwert}}$	Amplitude des doppelten Scheitelwerts	maximale positive bis negative Amplitude

Die durchschnittliche Amplitude ist nur eine theoretische Maßzahl, die technisch nicht verwendet wird. Der quadratische Mittelwert wird hingegen allgemein verwendet, um äquivalente Signale und im Besonderen Sinuswellen zu messen. Zum Beispiel ist die Spannung, die bei uns mit 220 Volt aus der Steckdose kommt, eigentlich eine Sinuswelle mit einer Frequenz von 50 Hertz (Hz). Dabei sind die 220 Volt der quadratische Mittelwert, so dass der Wert eigentlich zwischen -311 Volt und 311 Volt schwingt. Wenn wir die andere Definition verwenden, dann hat das Signal einen Scheitelwert von 311 Volt oder 622 Volt doppelten Scheitelwert. Dieselben Definitionen werden für das Ausgangssignal des Verstärkers verwendet, das zu den Lautsprechern führt. Ein Verstärker, der 10 Watt in quadrat. Mittelwert liefert, erreicht damit einen Scheitelwert von 14 Watt und einen doppelten Scheitelwert von 28 Watt. Im Handel wird für die Leistung

eines Verstärkers gerne der doppelte Scheitelwert propagiert, weil er natürlich höher ist und imposanter klingt.

Zeit und Raum

Zeit spielt eine gewichtige Rolle in der Akustik. Zeit und Raum sind sehr eng miteinander verknüpft, da Schall eine Welle ist, die sich über die Zeit im Raum fortpflanzt.

Wenn man das bedenkt, kann man drei Arten von akustischen Signalen definieren:

- Periodisch: diese Signale wiederholen sich mit der Zeit
- Zufällig: diese Signale sind nicht periodisch. Im folgenden werden wir einer eingeschränkten Art dieses Signaltyps begegnen; jenen, deren statische Eigenschaften über die Zeit konstant bleiben. Man nennt sie ergodische Zufallssignale und Beispiele dafür wären das "Weiße Rauschen" und das "Rosa Rauschen", das von Wissenschaftlern oder manchen Musikern gebraucht wird.
- Impuls: Signale, die sich nicht über die Zeit wiederholen, die aber eine definierte Form haben.

Die Diagramme in Abbildung 6 zeigen ein paar Tonsignale. Wir verwenden diese Diagramme, um den Begriff des Spektrums zu veranschaulichen. Das Spektrum eines Signals zeigt die unterschiedlichen Frequenzen, also Tonhöhen, die gemeinsam einen komplexen Klang ausmachen. Wenn wir ein stabiles periodisches Signal betrachten (gleichbleibender Ton), ist das Spektrum über die ganze Zeitspanne stabil und zeigt nur einen Wert (ein einzelner Strich in Abbildung 6a rechts). Man kann jeden Klang als eine Zusammensetzung mehrerer Töne, also Sinuswellen, sehen. Wir werden später sehen, dass dieses "Aufsplitten" eines periodischen Signals in lauter Sinuswellen zum ersten Mal im 19. Jahrhundert von einem französischen Mathematiker namens Fourier gezeigt worden ist. Diese Erkenntnis wird uns auch erlauben, auf Akkorde einzugehen. In der Zwischenzeit möchte ich aber bei Sinuswellen bleiben, weil die viel einfacher zu zeichnen sind, als Solos von Jimmy Hendrix...

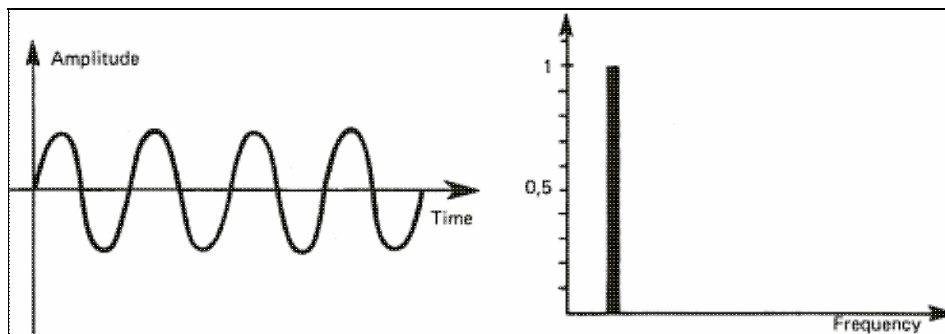


Abbildung 6a: Reine Sinuskurve (einfach und periodisch)

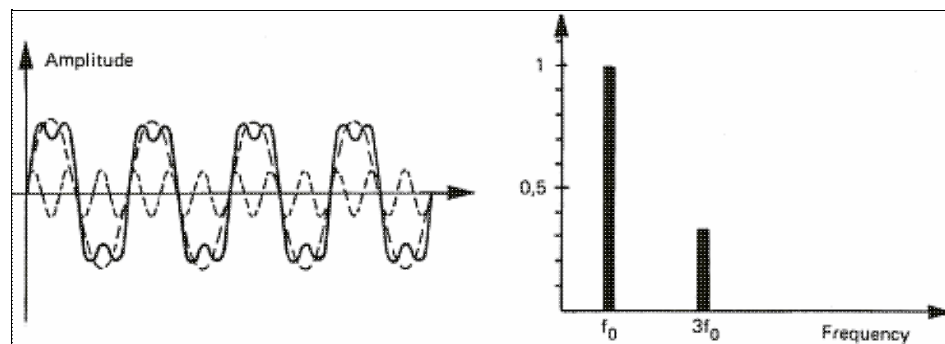


Abbildung 6b: Kombination von zwei Sinuswellen

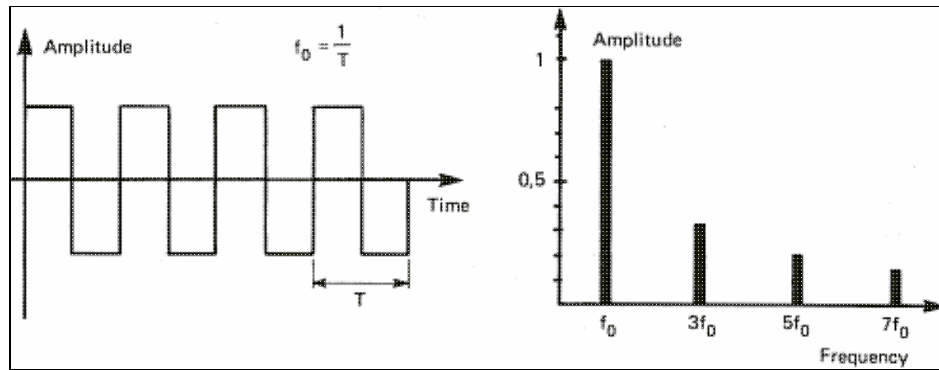


Abbildung 6c: Rechteckwelle (komplex aber periodisch)

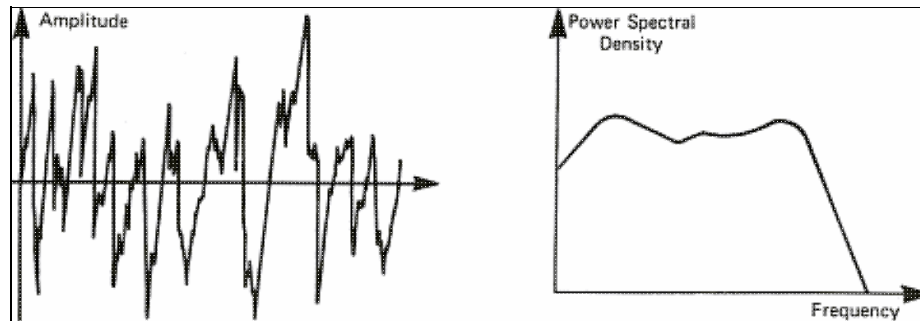


Abbildung 6d: Zufallssignal (komplex und nicht periodisch)

6: Klangsignale und ihre Spektren

Um Schall mit einem Computer verarbeiten zu können, müssen wir ihn aufnehmen, d.h. wir verwandeln die Veränderungen des Luftdrucks in eine Reihe von Zahlen, die der Computer dann versteht. Man verwendet dazu ein Mikrophon, das Luftdruckänderungen in ein elektrisches Signal verwandelt. Dieses Signal wird dann regelmäßig abgetastet (gesampelt) und der momentane Wert des Signals als Zahl gespeichert. Sampler ist ein allgemeinerer Begriff, und von Elektronikern wird oft der Begriff ADC (*Analog to Digital Converter*) verwendet. Sampling finden wir auch bei der Soundkarte des PCs. Die Geschwindigkeit, mit der die Soundkarte das Eingangssignal pro Sekunde abtastet und als Zahlen abspeichert (=digitalisiert), wird Abtastfrequenz genannt. Abbildung 7 zeigt den Einfluss der Abtastfrequenz auf ein Signal und sein Spektrum, das mit Hilfe der Fouriertransformation berechnet wurde. Für die Mathe-Junkies unter uns gibts hier ein paar Formeln:

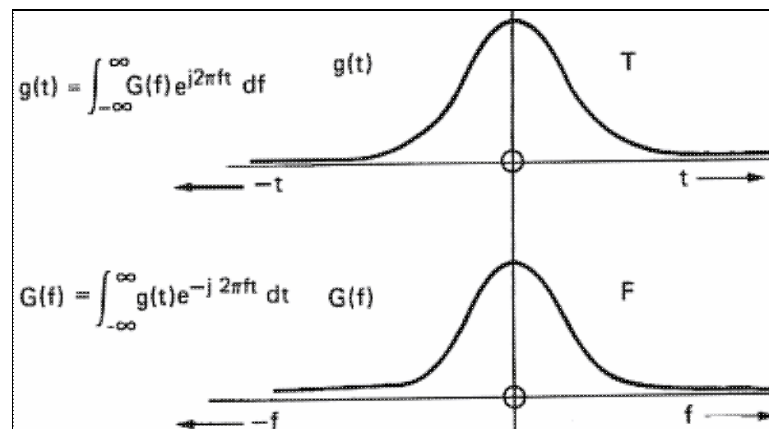


Abbildung 7a: Integraltransformation

Unendlich und kontinuierlich im Zeit- und Frequenzbereich

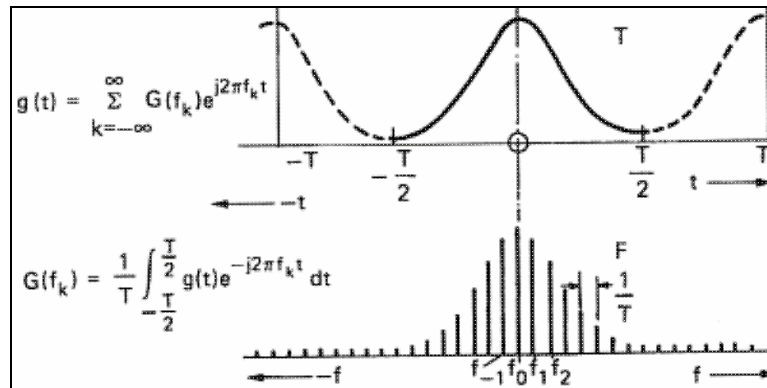


Abbildung 7b: Fourierreihen

Periodisch im Zeitbereich und diskret im Frequenzbereich

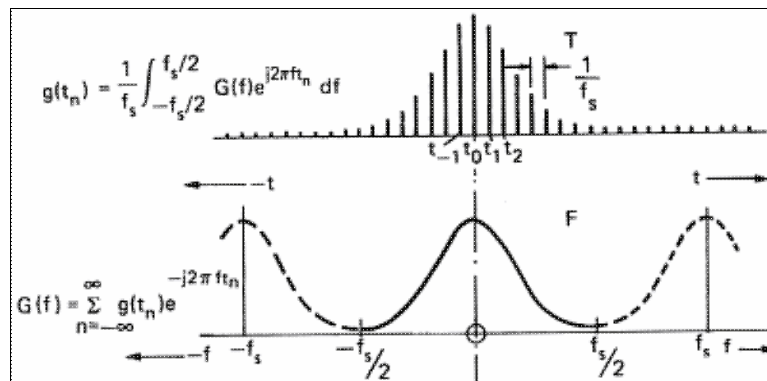


Abbildung 7c: Abgetastete Funktion

Diskret im Zeitbereich und periodisch im Frequenzbereich

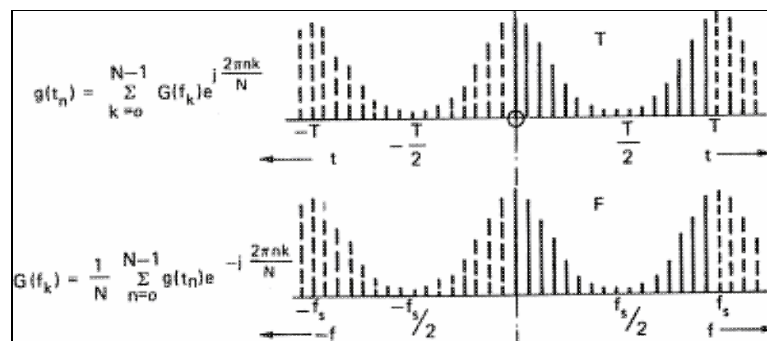


Abbildung 7d: Diskrete Fouriertransformation

Diskret und periodisch im Zeit- und Frequenzbereich domains

Das zeigt uns (bitte glaub mir), dass die Transformation einer kontinuierlichen Welle in eine Reihe diskreter Werte das Spektrum periodisch macht. Ist das Signal ebenfalls periodisch, dann wird das Spektrum ebenfalls diskret (eine Anzahl von Werten) und wir brauchen nur mehr mit einer endlichen Anzahl von Frequenzen zu rechnen. Das sind gute Neuigkeiten, weil unser Computer nur mit Zahlen und Werten rechnen kann, und nicht mit Wellen.

Im Fall der Abbildung 7d ist das Signal sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich diskret, im Zeitbereich periodisch und im Frequenzbereich nur zwischen 0 Hz und der halben Abtastfrequenz.

Mit dem Übergang vom kontinuierlichen zum diskreten Signal gehen letztendlich Teile des ursprünglichen Klangsignals verloren. Der Computer kennt das Klangsignal nur zu den Abtastzeitpunkten. Um

sicherzugehen, dass keine großen Verfälschungen auftreten, müssen wir beim Abtasten ein paar Dinge berücksichtigen. Zum ersten müssen wir sicherstellen, dass das Klangsignal keine Frequenzen enthält, die höher als die halbe Abtastfrequenz sind. Wenn man das vergisst, werden diese höheren Frequenzen als tiefere interpretiert, und das klingt nicht schön. Abbildung 8 verdeutlicht uns das:

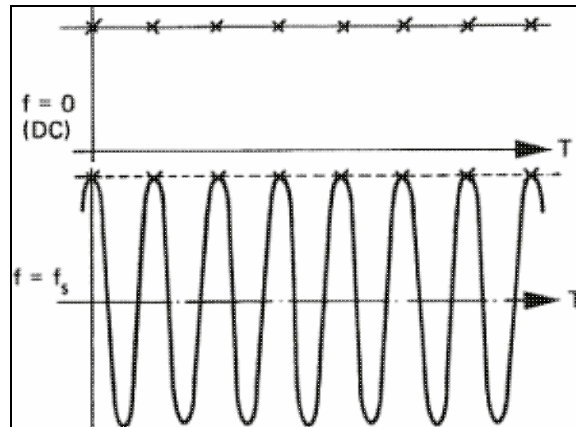


Abbildung 8a: Aliasing.

Oben: Abtastfrequenz ist gleich der max. Freq. und wie ein DC Signal vom Sampler gesehen wird.

Unten: Frequenzkomponente bei Abtastfrequenz f_s wird als Gleichstrom interpretiert

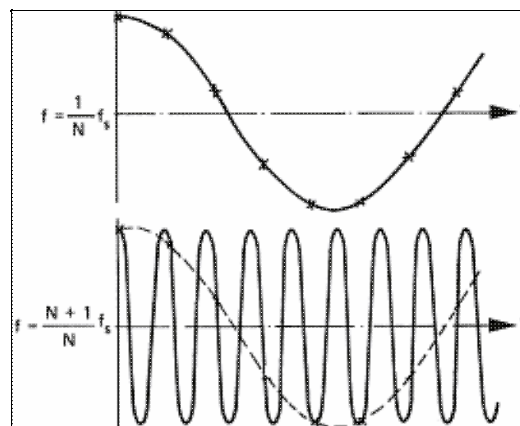


Abbildung 8b: Aliasing.

Oben: Frequenz bei $(1/N)f_s$

Unten: Frequenzkomponente bei $[(N+1)/N]f_s$ wird als $(1/N)f_s$ interpretiert

Dieses spezielle Verhalten von abgetasteten Signalen ist als das Shannon'sche Abtasttheorem bekannt, benannt nach dem Mathematiker, der dieses Phänomen als erster beschrieben hat. Ein ähnlicher Effekt kann in Filmen, etwa Western, beobachtet werden. Dabei scheinen sich Wagenräder oft rückwärts zu drehen, was am Stroboskop-Effekt von Filmen liegt. Für die praktische Anwendung des Musik-Digitalisierens heißt das, dass man alle Frequenzen oberhalb der halben Abtastfrequenz loswerden muss. Tut man das nicht, wird der Originalton stark verfälscht. Wenn man z.B. die Abtastfrequenz der Compact Disc betrachtet (44.1 KHz), darf es keine Frequenzen oberhalb von 22 kHz geben. (*Sag den Fledermäusen im Haus, sie sollen ruhig sein, die reden nämlich mit Ultraschall...*).

Um die ungewollten Frequenzen loszuwerden, verwendet man Filter. Filter ist ein weitverbreiteter Begriff, der für alles verwendet wird, was bestimmte Klangkomponenten herausheben oder umwandeln kann. So verwendet man etwa einen Tiefpassfilter, um hohe Frequenzen zu unterdrücken, die wir zwar nicht hören können, die aber beim Abtasten lästig sind (*das Traschen der Fledermäuse also*). Ohne jetzt näher darauf

einzuzeigen, zeigt das folgende Diagramm die Eigenschaften eines Filters:

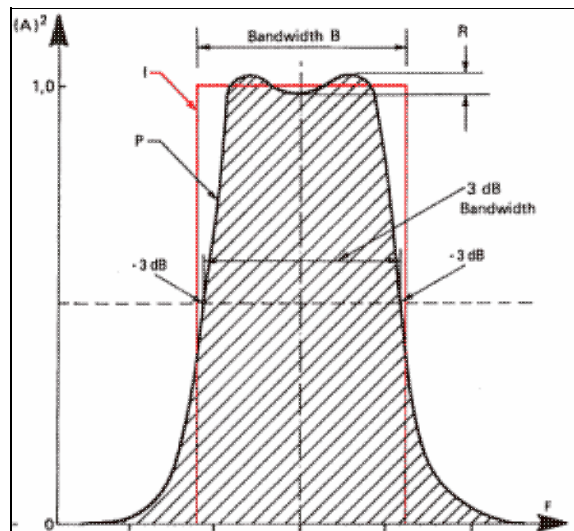


Abbildung 9: Piratical vs ideal filter.

- I: Idealer Filter*
- P: Praktischer Filter*
- R: Welligkeit*
- B: Effektive Bandbreite*

Ein Filter verändert das Signal sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich. Eine 100 Hz Rechteckwelle, in der Frequenzen ab 200 Hz weggefiltert werden, wird zur Sinuswelle, weil der obere Teil des Spektrums entfernt wurde (siehe Abbildung 6c). Ähnlich wird ein Klavierton von 1000 Hz, der bei 1200 oder 1500 Hz gefiltert wird, ganz anders klingen. Die niedrigste Frequenz eines Signals wird Grundfrequenz genannt, die anderen sind Vielfache davon und werden harmonische Frequenzen genannt.

Im Zeitbereich verursacht ein Filter Veränderungen der Welle, die man Verzerrungen nennt. Das wird hauptsächlich durch die Verzögerung jeder Harmonie relativ zu den anderen, verursacht.

Um den Einfluss eines Filters auf ein Signal zu zeigen, betrachten wir einmal einen einfachen Rechteckimpuls (Abbildung 10a), die Amplitude seines Spektrums im Frequenzbereich (Abbildung 10b) und die Phase seines Spektrums (Abbildung 10c). Dieser Rechteckimpuls arbeitet wie ein Filter, der nur Signale zwischen $t=0$ und T Sekunden durchlässt. Das Spektrum des Impulses stellt die Frequenzantwort des Filters dar. Wir sehen, dass eine höhere Frequenz des Signals zu einer größeren Verzögerung zwischen den Frequenzkomponenten führt, und zu einer niedrigeren Amplitude.

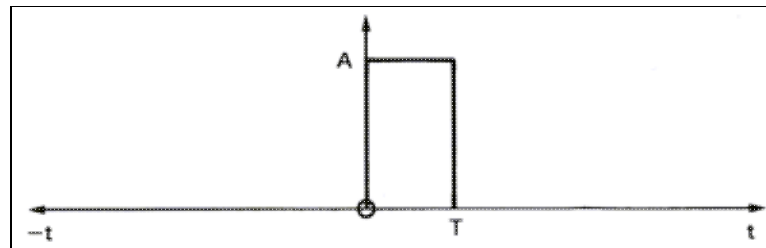


Abbildung 10a: Zeitsignal Rechteckimpuls bei $t=0$.

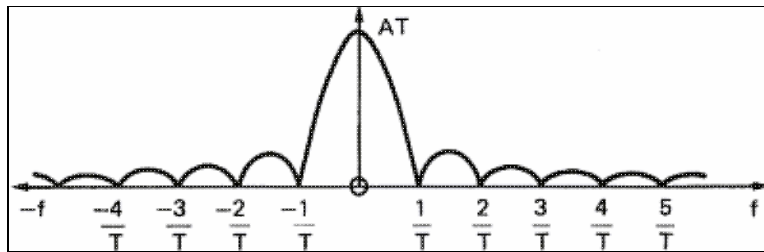


Abbildung 10b: Spektrum (Amplitude).

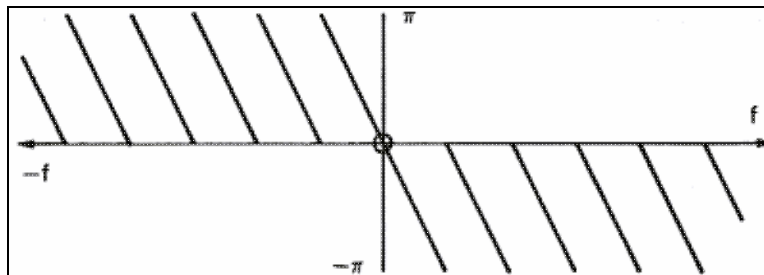


Abbildung 10c: Spektrum (Phase).

Abbildung 11 zeigt den Einfluss des Rechteckfilters auf ein einfaches Signal wie eine Sinuswelle

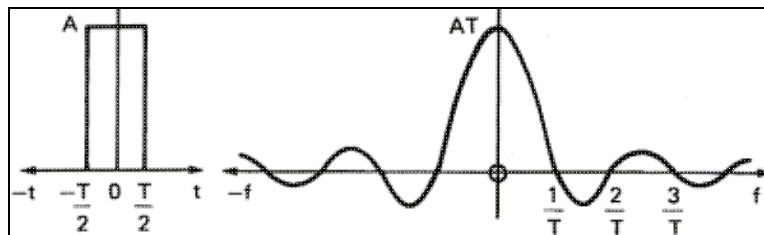


Abbildung 11a: Rechteckimpuls
Impulsion at $t=0$.

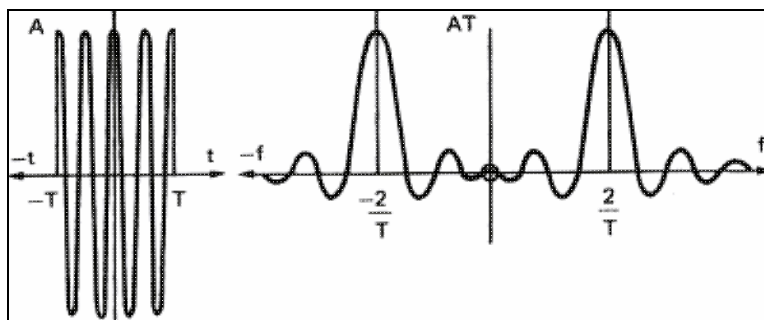


Abbildung 11b: Klangimpuls

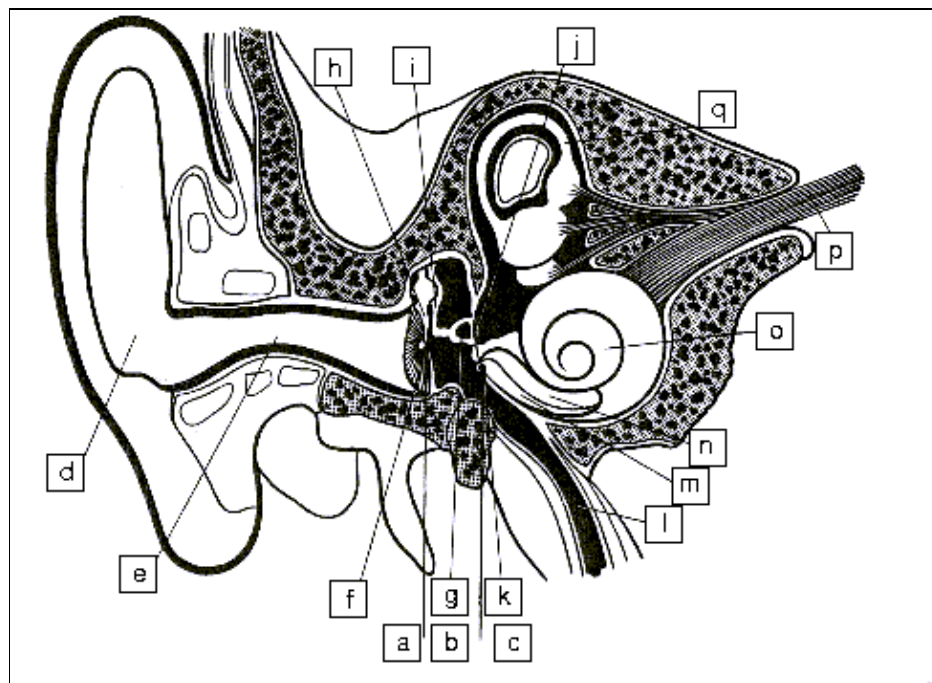
Wenn man den Klang abrupt beim Zeitpunkt T abschneidet, führt das zur Bildung neuer Frequenzen im Spektrum der Sinuswelle. Wenn das gefilterte Signal komplexer ist, wie etwa die Rechteckwelle von Abbildung 6c, werden Frequenzkomponenten zurückbleiben und zu einem verzerrten Signal am Ausgang des Filters führen.

Physiko–Akustik

Das menschliche Ohr

Um ein besseres Verständnis von Akustik und Schall zu bekommen, beschäftigen wir uns doch mal mit dem Teil, den wir dabei am meisten brauchen, dem Ohr.

Abbildung 12 zeigt einen Querschnitt des Ohrs. Schall wird in der Ohrmuschel aufgefangen und gelangt durch den Hörkanal zum Trommelfell, das mehr oder weniger wie ein Mikrofon arbeitet. Die Vibrationen des Trommelfells werden von drei kleinen Knöchelchen, die wie Hebel wirken, verstärkt. Sie heißen Hammer, Amboss und Steigbügel.

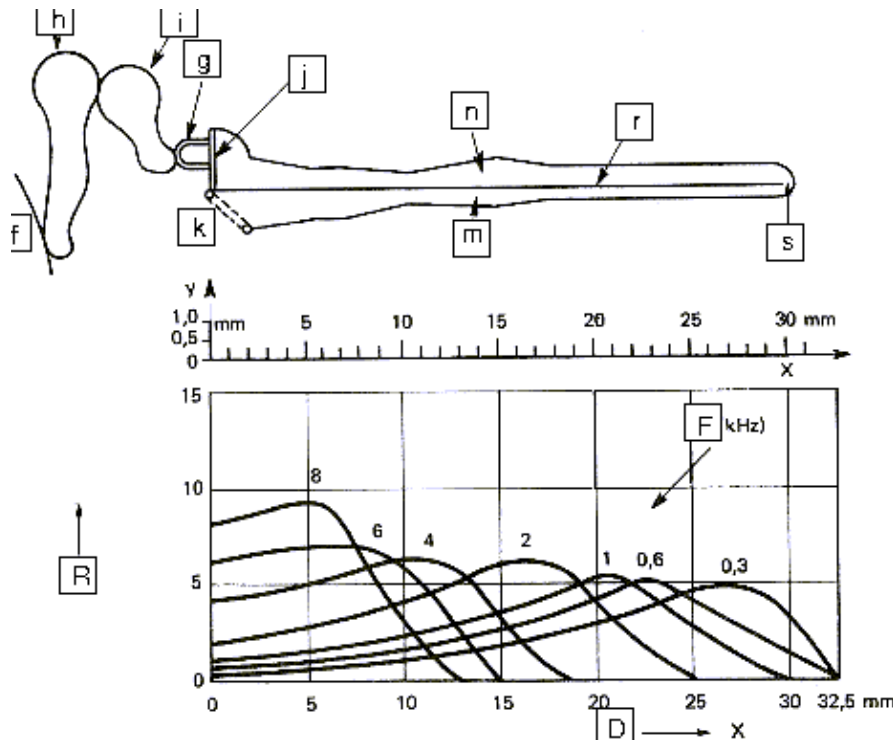


- a) Äußeres Ohr
- b) Mittelohr
- c) Inneres Ohr
- d) Ohrmuschel
- e) Hörkanal
- f) Trommelfell
- g) Steigbügel
- h) Malleus
- i) Amboss
- j) Oval Window
- k) Round Window
- l) Ohrtrumpete
- m) Paukentreppe
- n) Scala vestibuli
- o) Schnecke
- p) Gehör- und Gleichgewichtsnerve
- q) Bogengänge des Gleichgewichtsorgans

Abbildung 12: Die wichtigsten Teile des Ohrs

Die Bewegungen des Steigbügel–Knochens werden über das Oval Window zur Ohrschnecke übertragen. Die Schnecke enthält zwei Kammern, getrennt durch die Basilarmembran, die mit empfindlichen Haaren bedeckt ist und mit dem Hörnerv verbunden ist (wie Abbildung 13 und 14 unten zeigen). Die Basilarmembran hilft bei der Wahrnehmung des Schalls, weil die unterschiedlichen Teile der Hörschnecke auf verschiedene Frequenzen mehr oder weniger empfindlich sind. Das erlaubt dem Gehirn, die Tonhöhe von Noten zu unterscheiden.

- f) Trommelfell
- g) Steigbügel
- h) Hammer
- i) Amboss
- j) Oval Window
- k) Round Window
- m) Paukentreppe
- n) Scala Vestibuli



r) Basilarmembran

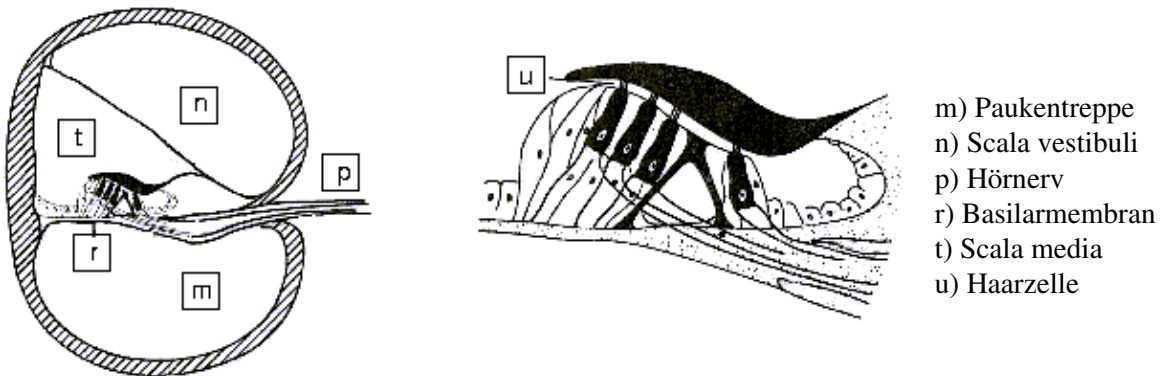
s) Helicotrema

R) Relative Antwort

F) Frequenzantwort

D) Distance along membrane

Abbildung 13: Längsschnitt der Hörschnecke



m) Paukentreppe

n) Scala vestibuli

p) Hörnerv

r) Basilarmembran

t) Scala media

u) Haarzelle

Abbildung 14: Querschnitt der Hörschnecke

Wahrnehmung

Das Gehirn spielt eine sehr wichtige Rolle, weil es für die gesamte Auswertung des Schalls sorgt. Es macht es möglich, dass wir Geräusche und Klänge erkennen, je nach Tonhöhe und Dauer. Das Gehirn ermöglicht auch räumliches Hören, indem es die Signale beider Ohren vergleicht. Es ermöglicht uns, Musikinstrumente oder Menschen zu erkennen, und ihre räumliche Position festzustellen. Es scheint, dass die meiste Arbeit, die das Gehirn leistet, angelernt wurde.

Abbildung 15 zeigt, wie wir Schall abhängig von der Frequenz hören.

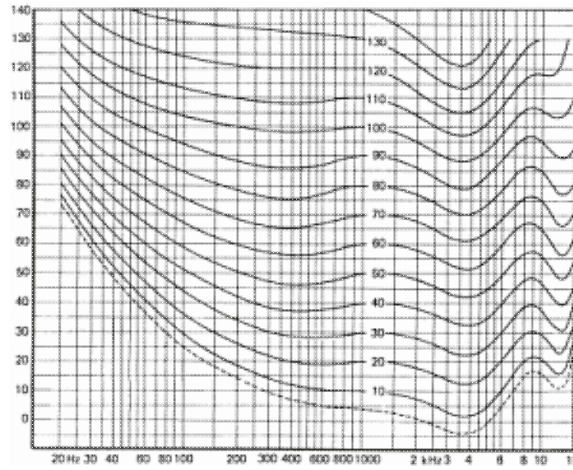


Abbildung 15: Linien gleich empfundener Lautstärke

Diese Kurven wurden für die Durchschnittsbevölkerung ermittelt, sind ein statistischer Mittelwert für Menschen zwischen 18 und 25 Jahren und gelten für reine Töne. Unterschiede zwischen Personen können durch viele Faktoren erklärt werden, z.B.:

- Erfahrung: z.B. ob man ein Musiker ist oder nicht
- Dauerndes "starkem-Lärm-ausgesetzt-sein"
- Alter
- ...

Abbildung 16 zeigt den Einfluss des Alters auf die Fähigkeit, hohe Frequenzen wahrzunehmen. Auf die Quellen bezogen sind die Ergebnisse recht unterschiedlich. Das kann leicht erklärt werden durch große Unterschiede in der Bevölkerung und weil solche Studien nicht einfach nur das Alter in Betracht ziehen. Nicht selten findet man schon etwas ältere Musiker mit "junggebliebenen" Ohren, genauso wie es junge Menschen mit beträchtlichen Gehörschäden gibt. Gründe für frühe Hörschäden sind dabei oft zu lange Konfrontation mit Schall in extremer Lautstärke, etwa in Konzerten oder Diskotheken.

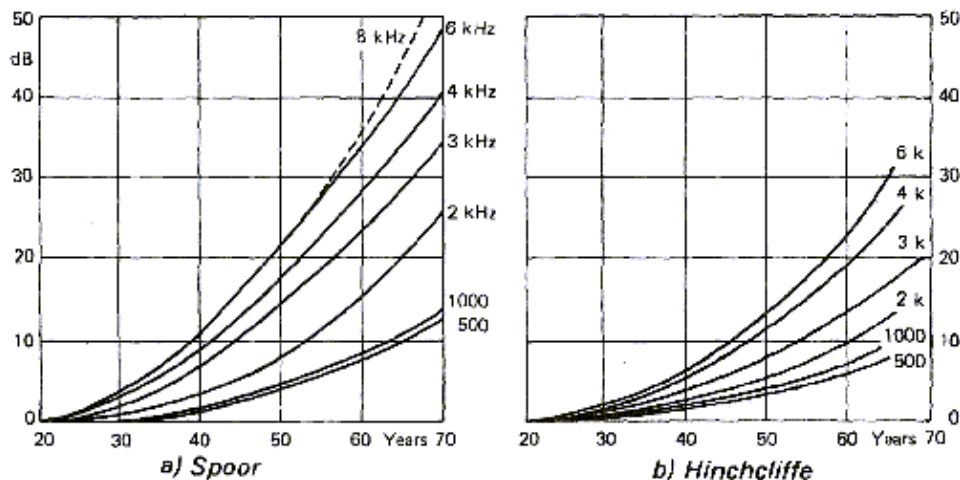


Abbildung 16: Altersabhängiger Gehörverlust nach Spoor und Hinchcliffe

Ob extreme Schalleinwirkung das Gehör dauerhaft verschlechtert, hängt sowohl von der Dauer als auch von der Lautstärke ab. Wichtig ist, dass jede Form von Schall schädlich sein kann. Laute Musik mit dem Kopfhörer hat dieselben Auswirkungen auf die Hörzellen wie der Rasenmäher oder ein startendes Flugzeug.

Abbildung 17 zeigt die Auswirkung von extremer Schalleinwirkung auf das Gehör. Beachte, dass dieser Effekt nicht derselbe ist wie der durch das Altern verursachte Hörverlust. Dabei kann das Ohr hohe Frequenzen schlechter wahrnehmen. Extreme Schalleinwirkung aber vermindert das Hörvermögen für Frequenzen von 3–4 KHz. Bei diesen Frequenzen ist das gesunde Ohr am empfindlichsten. Diese Art von Gehörschädigung findet man oft bei Benutzern von Schusswaffen.

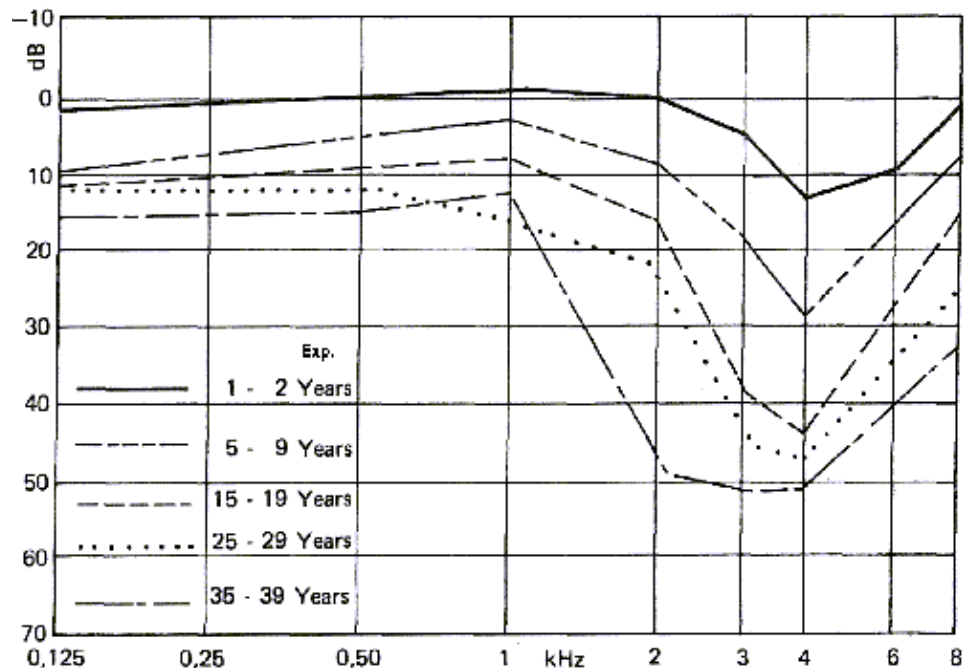


Abbildung 17: Entwicklung von Gehörschädigungen durch Schalleinwirkung
Exp.: Jahre der Einwirkung

Wenn wir Blick auf das Kapitel über Dezibel (und wie man's berechnet), werfen, sehen wir, dass schon zehn Dezibel einen sehr großen Unterschied im Schalldruck ausmachen. Die lineare Dezibelskala entspricht nämlich einer exponentiellen Skala des Schalldrucks. Grund dafür ist, dass Ohr und Gehirn Schall von sehr unterschiedlicher Amplitude und Frequenz verarbeiten können. Die höchste Frequenz, die der gesunde Mensch hören kann, ist 1000 Mal höher als die niedrigste, und der lauteste Ton hat einen eine Million Mal höheren Schalldruck als der leiseste Ton, den wir zu hören imstande sind (ein Intensitätsverhältnis von 10^{12} to 1).

Den Schalldruck zu verdoppeln entspricht gerade mal 3 dB. Das kann man zwar hören, aber es braucht 9 dB, um dem Menschen den subjektiven Eindruck von doppelter Lautstärke zu vermitteln. Dabei ist aber der Schalldruck 8 Mal höher!

Im Frequenzbereich entspricht ein Wechsel der Oktave dem Verdoppeln der Frequenz. Auch hier hören wir den eigentlich exponentiellen Anstieg der Frequenz auf lineare Art und Weise – ein physikalisches Phänomen. Greif noch nicht zum Taschenrechner, die Tonhöhen der Noten werden wir später berechnen.

Aufnahmen

Aufnahmen mit einem analogen Gerät wie einem Kassettenrecorder sind nach wie vor gebräuchlich, auch wenn sie langsam von digitalen Systemen verdrängt werden. In beiden Fällen führt die Umsetzung der Schallwelle in magnetische Schwingungen oder digitale Daten zu Veränderungen des Signals, was an den Grenzen des aufnehmenden Gerätes liegt. Wir haben schon kurz darüber gesprochen, wie sich das Abtasten

eines Signals auf sein Spektrum auswirkt. Ähnliche Effekte sieht man, wenn man ein Signal aufnimmt:

Dynamikbereich

"Dynamik" bezeichnet die Differenz zwischen der kleinsten und größten Amplitude, die ein Aufnahmegerät erfassen kann. Das beginnt im Allgemeinen mit dem Mikrophon, das Schall in ein elektrisches Signal konvertiert, und endet mit dem verwendeten Aufnahmemedium, der CD, der Kassette oder dem Computer...
Erinnern wir uns daran, dass Dezibel ein Verhältnis angeben. Im Dynamikbereich bezeichnet 0 dB also den unteren Grenzwert. Ein paar Beispiele:

- Vinyl Schallplatte: 65 dB
- Musik-Kassette: 55 dB
- 16 Bit Abtastung (CD-Standard): 96 dB
- 8 Bit Abtastung: 48 dB

Ein Orchester kann bis zu 110 dB erreichen. Das ist auch der Grund dafür, dass Aufnahmetechniker Systeme verwenden, die den Dynamikbereich komprimieren können, sodass Teile mit hoher Lautstärke nicht abgeschnitten werden und leisere nicht im Hintergrundrauschen verloren gehen.

Hintergrundrauschen

Aufnahmegeräte sind weniger leistungsfähig als das menschliche Ohr und haben den zusätzlichen Nachteil, selbst Geräusche zu produzieren. Das kann Kratzen des Tonabnehmers an der Vinylschallplatte sein, oder auch ein Summen des Verstärkers. Diese Geräusche sind zwar meist sehr leise, aber sie erlauben es uns nicht, leiseste Klänge aufzunehmen. Man hört es am besten, wenn man Kopfhörer von guter Qualität verwendet und es klingt wie ein Wasserfall, da es ein sehr weites Spektrum mit vielen Frequenzen enthält.

Verzerrung

Früher haben wir gesehen, dass Filter einen wichtigen Effekt auf die Phase eines Spektrums haben, weil sie Signale je nach Frequenz verschieben. Diese Art der Signalverzerrung nennt man harmonische Verzerrung, weil es alle harmonischen Frequenzen eines Signals betrifft.

Jedes einzelne Aufnahmegerät verhält sich wie ein Filter und induziert Signalverzerrungen. Natürlich passiert dasselbe bei der Wiedergabe, wo zusätzliche Verzerrungen und Rauschen dazukommen.

Komprimierung

Mehr und mehr verwendet man Komprimierungsalgorithmen wie mp3 oder Ogg Vorbis, um wertvollen Plattenplatz am Aufnahmemedium zu sparen.

Man sagt, dass diese Algorithmen verlustbehaftet sind, weil sie Teile des Signals entfernen, um die Dateigröße zu minimieren. Komprimierungsalgorithmen benutzen ein Computermodell des menschlichen Ohrs, um unhörbare Information zu löschen. Zum Beispiel kann man im Frequenzbereich bei zwei eng benachbarten Frequenzen, die in der Lautstärke sehr unterschiedlich sind, die leisere Frequenz löschen, weil

sie von der lauten übertönt wird. Hörtests und Ratschläge, wie man solche Software verwendet, um den besten Teil des Signals zu erhalten, findet man im Internet. Soweit der Autor informiert ist, verwendet mp3 einen Tiefpass-Filter, der Frequenzen größer 16 KHz wegfiltert, und sie erlauben keine Bitraten größer als 128 KiloBits/Sekunde. Mit diesen Zahlen lässt sich meist keine CD Qualität erreichen. Komprimierungsverfahren wie gzip, bzip2, lha oder zip verändern hingegen keine Daten, erreichen aber dafür keine so hohen Kompressionsraten. Ausserdem ist es nötig, die ganze Datei zu entpacken, bevor man sie hören kann, was man bei einem Walkman oder einem handelsüblichen Abspielgerät wohl kaum gebrauchen kann.

Und was ist mit Musik?

Um einen Ausgleich zu schaffen, folgt hier ein Vergleich von Begriffen aus der Musik und der Technik. Meist hinken diese Vergleiche, denn die Begriffe, die Musikliebhaber verwenden, beschreiben menschliche Eindrücke und nicht physische Phänomene.

Noten und reine Frequenzen

Eine Note ist u.a. durch seine Tonhöhe definiert, und diese Tonhöhe ist gleichzeitig die Grundfrequenz der Note. Wenn man das weiß, kann man die Frequenzen einer Note mit der folgenden Formel berechnen:

$$\text{FREQUENZ (in Hertz)} = \text{REF} \times 2^{(\text{OCTAVE} - 4) + (\text{TON} - 10) / 12}$$

Wenn wir für **REF** A mit 440 Hz von der Oktave 4 als Basis einsetzen, können wir die anderen Frequenzen für Töne von 1 bis 12 von C bis B berechnen:

Note	Oktave							
	1	2	3	4	5	6	7	8
C	32,70	65,41	130,8	261,6	523,3	1047	2093	4186
C #	34,65	69,30	138,6	277,2	554,4	1109	2217	4435
D	36,71	73,42	146,8	293,7	587,3	1175	2349	4699
E b	38,89	77,78	155,6	311,1	622,3	1245	2489	4978
E	41,20	82,41	164,8	329,6	659,3	1319	2637	5274
F	43,65	87,31	174,6	349,2	698,5	1397	2794	5588
F #	46,25	92,50	185,0	370,0	740,0	1480	2960	5920
G	49,00	98,00	196,0	392,0	784,0	1568	3136	6272
A b	51,91	103,8	207,6	415,3	830,6	1661	3322	6645

A	55,00	110,0	220,0	440,0	880,0	1760	3520	7040
B b	58,27	116,5	233,1	466,2	932,3	1865	3729	7459
B	61,74	123,5	246,9	493,9	987,8	1976	3951	7902

Der wahre Musikliebhaber wird bemerken, dass wir nicht zwischen diatonischen und chromatischen Halbtönen unterscheiden. Mit minimalen Änderungen kann man dieselben Berechnungen mit Kommas als Unterteilung anstatt von Halbtönen durchführen...

Um zu unterscheiden, mit welchem Instrument ein Ton gespielt wurde, reicht es nicht, nur davon auszugehen, dass jeder Ton aus verschiedenen Frequenzen besteht... Man muss auch in Betracht ziehen, wie der Ton gespielt wird (pizzicato oder legato), von welchem Instrument es kommt, ganz abgesehen von alle möglichen Effekten wie glissando, vibrato, etc... Für diesen Zweck kann man das Sonogramm eines Tons untersuchen, d.h. Veränderungen des Spektrums durch die Zeit. Ein Sonogramm erlaubt es, alle harmonischen Frequenzen über die Zeitachse zu sehen.

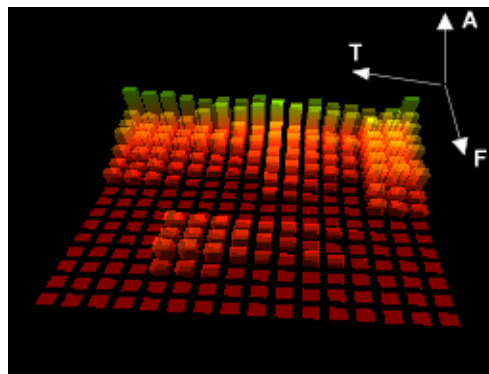


Abbildung
18: Ein
Sonogramm

T: Zeit A: Amplitude F: Frequenz

Heutzutage verwendet man bei elektronischer Tonaufnahme und Wiedergabe gänzlich künstliche Geräte wie Synthesizer, um Klänge praktisch aus dem Nichts zu erzeugen, oder Sampler, um Klänge abzuspeichern und bei verschiedenen Tonhöhen mit diversen Effekten wiederzugeben. Es ist dann etwa möglich, ein Cellokonzert so zu spielen, dass man die Originalinstrumente durch gesampelte "knarrende Stühle" ersetzt. Und das kann wirklich jeder tun, man muss kein Instrument spielen können. Die Merkmale einer einzelnen Note sind im folgenden Diagramm gegeben:

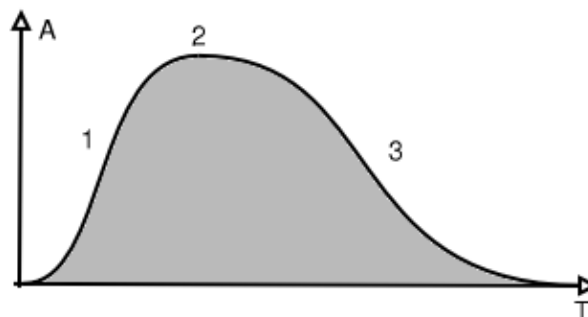


Abbildung 19: Merkmale einer Note: Hüllkurve

1: Attack A: Positive Amplitude
2: Sustain T: Zeit
3: Dämpfung

Diese Kurve zeigt die Entwicklung der Gesamtlautstärke eines Tons über die Zeit. Diese Art Kurve nennt man Hüllkurve, weil es das Signal (grauer Teil des Signals) einhüllt. Der ansteigende Teil wird "attack" genannt und kann je nach Instrumenttyp stark variieren. Den zweiten Teil nennt man "sustain", das ist der Körper des Tons und oft der längste Teil, abgesehen bei Percussion Instrumenten. Der dritte Teil kann auch je nach Instrument in Form und Länge variabel sein.

Zudem erlauben Instrumente Musikern, jeden der drei Bereiche zu beeinflussen. Unterschiedlicher Anschlag der Klaviertasten wird den attack-Bereich des Tons beeinflussen, während die Pedale die Dämpfung verändern werden. Jeder der drei Bereiche kann sein individuelles Spektrum haben (Farbe), die die Möglichkeiten an Klangfarben ins Unendliche steigern. Harmonische Frequenzen ändern sich nicht im selben Verhältnis. Basstöne tendieren dazu, länger zu dauern, sodass der Klang am Anfang und am Schluss des Tons nicht derselbe ist.

Bereich

Gemäß seiner Definition kann der Frequenzbereich eines Geräts dem Bereich eines Instruments entsprechen. In beiden Fällen beschreibt der Begriff einen Bereich von Frequenzen oder Tonhöhen, den ein Instrument spielen kann. Wie auch immer, der höchste Ton, den ein Instrument spielen kann, entspricht der Grundfrequenz in der obigen Tabelle. Anders gesagt, erfordert das Aufnehmen eines Instruments ein Aufnahmegerät, das einen viel höheren Frequenzbereich hat als die höchste Note, die das Instrument spielen kann – sofern man die Klangfarben mit aufnehmen will. Ein schmaler Frequenzbereich wird all die oberen Frequenzen wie ein Tiefpassfilter wegschneiden und die Klangfülle ändern. In der Praxis braucht das Aufnahmegerät einen Frequenzbereich, der dem des menschlichen Gehörs entspricht, in etwa 20 Hz bis 20 KHz. Oft muss man auch höher als 20 KHz gehen, weil an der oberen Grenze des Frequenzbereichs oft Verzerrungen auftreten.

Harmonien und Akkorde

Wenn man die obige Tabelle mit den Frequenzen betrachtet, wird man (als Musiker) Ähnlichkeiten zwischen harmonischen Frequenzen finden und den Noten, die einen Akkord bilden.

Harmonische Frequenzen sind Vielfache der Grundfrequenz. So sind etwa für ein C 1 bei 32.7 Hz die harmonischen Frequenzen folgende:

Harmonie	1	2	3	4	5	6	7	8
Frequenz	32,7	65,4	98,1	130,8	163,5	196,2	228,9	261,6
Note	C	C	G	C	E	G	B b	C

Hier sehen wir, warum wir einen Akkord als Tonika (C–E–G–C) oder als Septakkord kennen (C–E–G–Bb): Die Frequenzen der beteiligten Noten schwingen im Einklang mit den harmonischen Frequenzen des Grundtons (C). Darin liegt die Magie.

Zusammenfassung

Ohne zuviel ins Detail zu gehen, haben wir physikalische, biologische und technische Aspekte von Schall und Akustik betrachtet. Unser Ohr ist immer das beste Auswahlkriterium, und wird es auch immer sein. Zahlen, die uns Mathematiker liefern, oder hochentwickelte Messgeräte können uns zwar verstehen helfen, warum eine bestimmte Aufnahme so klingt wie sie klingt. Aber sie werden uns nie sagen können, ob in den 60ern die Beatles oder die Rolling Stones die bessere Musik gemacht haben.

Bibliographie

Brüel & Kjaer: Dänische Firma, die Messgeräte für Akustik und Schwingungen herstellt. Dieses Unternehmen publiziert seit langer Zeit (50 Jahreungefähr) frei verfügbare Bücher, aus denen die meisten in diesem Artikel verwendeten Abbildungen stammen. Die Bücher sind im PDF Format frei verfügbar unter <http://www.bksv.com/bksv/2148.htm>

Webpages maintained by the LinuxFocus Editor team

© John Perr

"some rights reserved" see linuxfocus.org/license/

<http://www.LinuxFocus.org>

Translation information:

fr --> -- : John Perr <johnperr(at)linuxfocus.org>

fr --> en: John Perr <johnperr(at)linuxfocus.org>

en --> de: Josef Schwarz <josef.schwarz(at)fh-sbg.ac.at>