



Psychoakustik

3. Stunde





Einfache und komplexe Töne

Definition: Als Schall bezeichnet man die sich wellenartig ausbreitende räumliche und zeitliche Druckänderung eines elastischen Mediums.

Einfache und komplexe Töne

- Wir sind umgeben von Luft. Schall pflanzt sich in Luft von der Quelle kegelförmig als *longitudinale* Welle fort, im Gegensatz zu gespannten Saiten, bei denen wir von *transversalen* Wellen sprechen (da die Bewegung der Saite im rechten Winkel zur Fortpflanzungsrichtung der Welle steht).
- Schall hat in Luft bei 20 °C eine Geschwindigkeit von 344 m/sec. In anderen Medien schneller (z.B. Mickey Mouse-Effekt in Helium)
- Die Intensität des Schalls nimmt als Funktion der Entfernung ab.
- Die Übertragung von Schall über Luft und das Ohr ist annähernd *linear*, d.h. frei von Verzerrungen. Der Schall, der von Musikinstrumenten wie etwa Klavier, Gitarre oder auch Gong ausgehen, ist linear und kann als Summe von langsam abklingenden Sinuswellen mit unterschiedlichen Frequenzen dargestellt werden. Wir bezeichnen diese als musikalische oder komplexe Töne.



Sinustöne

Da Schall auf Schwingungen beruht, lassen sich Schallereignisse durch ihren zeitlichen Schwingungsverlauf darstellen und beschreiben.

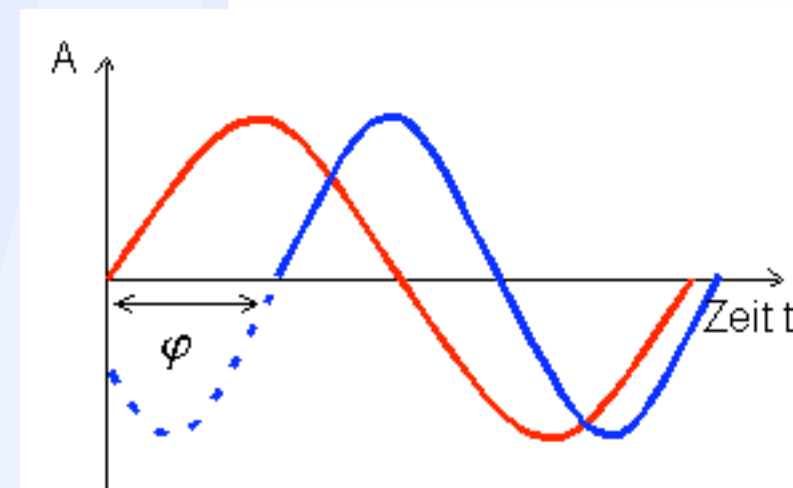
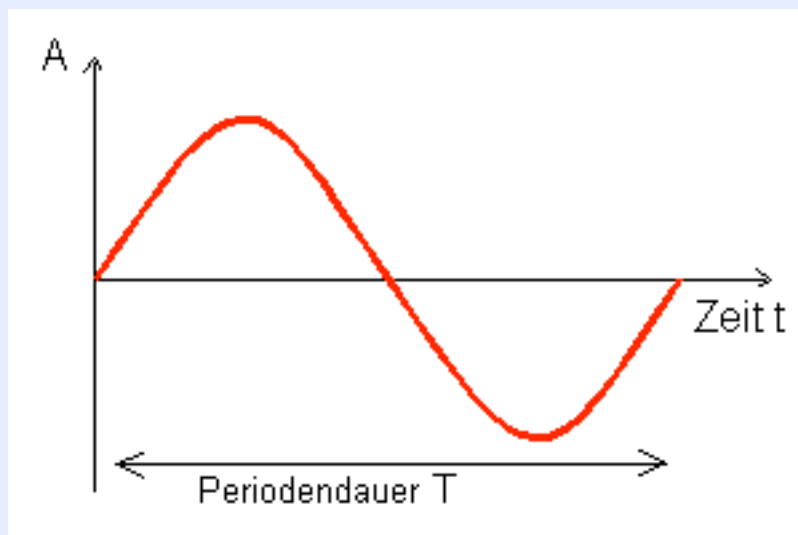
Die einfachste Schwingungsform liegt mit der sinusförmigen Schwingung vor, die man mit einem mathematischen Pendel oder mit bestimmten Schallquellen, z.B. einer Stimmgabel erzeugen kann.

Trägt man den Verlauf einer sinusförmigen Schwingung über der Zeit auf, so erhält man einen typischen Verlauf, der eindeutig durch die Größen

- Periodendauer **T** : zeitliche Dauer eines Schwingungsverlaufs
- Amplitude **A**: Maximale Auslenkung der Schwingung
- Phase **ϕ** : Startpunkt der Schwingung, bzw. zeitliche Verschiebung zweier Schwingungsverläufe zueinander beschrieben wird.

Aus Gründen der Handhabbarkeit wird statt der Periodendauer **T** die Frequenz **f** zur Beschreibung der Schwingungsanzahl pro Sekunde verwendet. Diese ergibt sich direkt aus dem Kehrwert der Periodendauer:

- Frequenz **f** : **$f = 1/T$** : Schwingungsanzahl pro Sekunde. Die Einheit der Frequenz ist das Hertz [**Hz**]
- Schallereignisse, die durch sinusförmige Schwingungen hervorgerufen werden, bezeichnet man als reine Töne.





Lautstärke

Das relative Verhältnis zwischen den Amplituden zweier Sinustöne wird häufig in Dezibel ausgedrückt.

Die Formel zur Berechnung von Dezibel ist: $\text{dB}(A_1/A_2) = 20 \log_{10} (A_1/A_2)$.

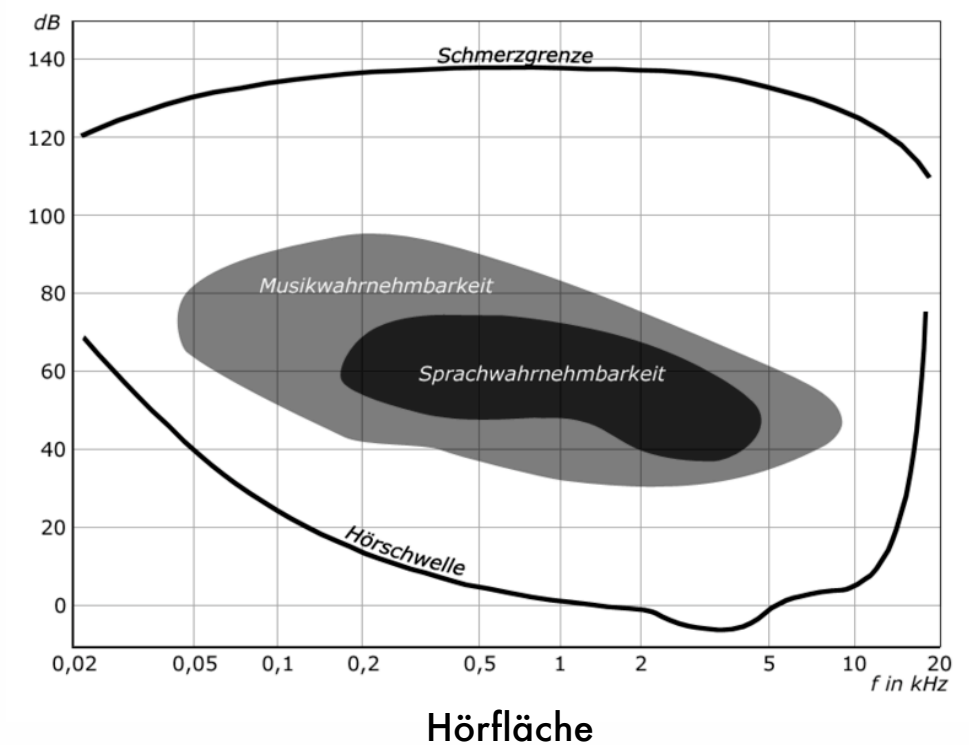
Die **Hörschwelle** (auch **Ruhehörschwelle**) ist derjenige **Schalldruck** beziehungsweise **Schalldruckpegel**, bei dem unser **Gehör** Töne oder Geräusche als **Sensor** gerade noch wahrnimmt. Dies wird auch als untere Hörgrenze der **Hörfläche** bezeichnet. Der kleinste Schalldruck, der für das menschliche Gehör gerade noch wahrnehmbar ist, beträgt $20 \mu\text{Pa}$ bei einer Frequenz von 1 kHz. Dieser Wert wurde als Bezugswert (Referenz) für den absoluten Schalldruckpegel festgelegt. ($20 \mu\text{Pa} = 0 \text{ dB SPL}$; SPL= Sound Pressure Level)

Mit **Hörgrenze** wird die Eingrenzung des menschlichen Hörbereichs bezeichnet, welcher durch die **Hörfläche** abgebildet wird. Links befinden sich die tiefsten hörbaren oder empfundenen Schwingungen mit der **Frequenz** von etwa 16 Hz und rechts die höchsten hörbaren Schwingungen mit etwa 19 kHz. Unten findet man die Hörschwelle bei der die Hörempfindung beginnt und oben die **Schmerzschwelle**, welche die Grenze kennzeichnet, ab der die **Lautstärke** nicht mehr ertragen werden kann. Alle vier Hörgrenzen sind für jeden Menschen individuell und verändern sich im Laufe des Lebens. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die Größe der Hörfläche im Laufe des Lebens kleiner wird.

Die untere Hörschwelle ist stark frequenzabhängig. Sie liegt bei der Frequenz 2 kHz bei 0 dB, bei höheren und tieferen Frequenzen ist die Hörschwelle zu höheren Pegeln hin verschoben. So ist ein tiefer Sinus-Ton von 30 Hz erst dann hörbar, wenn der Schalldruckpegel 60 dB überschreitet. Hohe Sinus-Töne von 15 kHz können auch für Normalhörende erst ab etwa 60 dB wahrgenommen werden.



Berechnung von Dezibel in Max/MSP





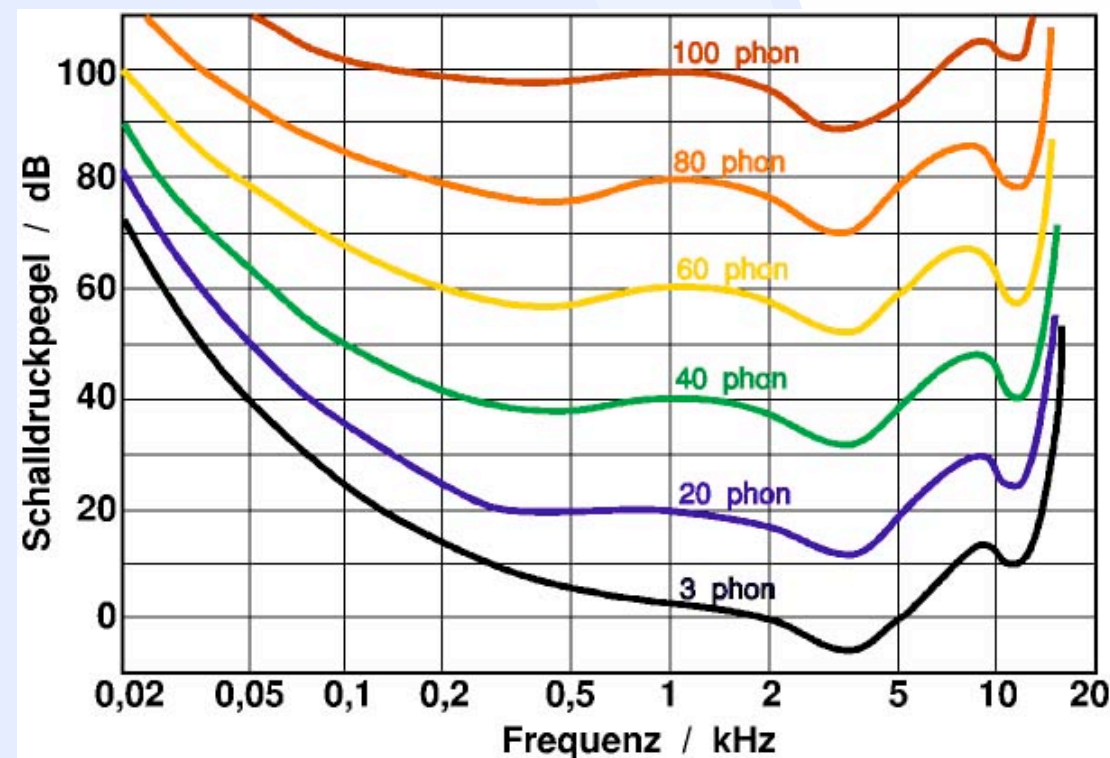
Kurven gleicher Lautstärke

nach Fletcher und Munson

Aus dem **Verlauf der Hörschwelle** geht hervor, daß das Gehör nicht für alle Frequenzen die gleichen Empfindlichkeit aufweist. Sinustöne unterschiedlicher Frequenz werden, trotz gleichen Schallpegels, unterschiedlich laut wahrgenommen.

Diese Eigenschaft des Gehörs wird mit Hilfe der Kurven gleicher Lautstärke beschrieben.

Sie geben, in Abhängigkeit der Frequenz, den Schalldruckpegel an, der die jeweils gleiche Lautheitsempfindung hervorruft wie ein Sinuston der Frequenz 1 kHz und dem zu beschreibenden Schallpegel. In der nebenstehenden Abbildungen sind die Kurven gleicher Lautstärke für einige Schallpegel angegeben.



Schalldruckpegel in dB

Lautstärkepegel in phon

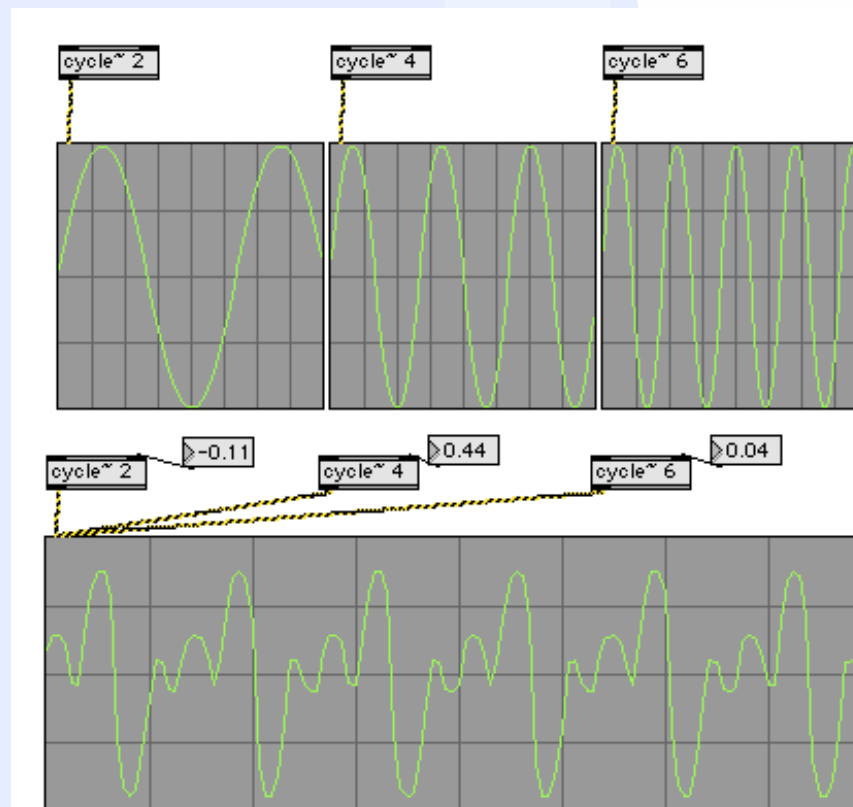


Ton und Klang

Ein Schallereignis, das zwar einen periodischen Schwingungsverlauf aufweist, dessen Amplitudenverlauf aber von der Sinusform abweicht, entsteht durch die Überlagerung mehrerer Sinusschwingungen verschiedener Amplituden und Frequenzen. Die Frequenzen der Einzelschwingungen müssen hierbei in einem ganzzahligen Verhältnis zueinander stehen. Schallereignisse die diese Bedingung erfüllen, werden als **Klang** bezeichnet. Die **Komponenten eines Klanges** haben spezielle Namen, die in der Akustik zur physikalischen Beschreibung von Schallen häufig benutzt werden.

Bei Klängen bezeichnet man die tiefste vorhandene Frequenz als Grundschwingung. Die darauf aufbauenden Teilschwingungen mit ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz werden als Oberschwingungen oder Harmonische bezeichnet. Hieraus geht hervor, daß die von Musikinstrumenten erzeugten Töne, physikalisch gesehen, Klänge darstellen.

Dieser Sachverhalt soll durch die Grafik demonstriert werden. Der Aufbau von Klängen durch die Überlagerung von Sinusschwingungen soll durch **ein Hörbeispiel** verdeutlicht werden. Achten Sie darauf, daß die resultierende Schwingung, die aus der Überlagerung hervorgeht, den gleichen Tonhöhereindruck hervorruft, wie die Grundschwingung.





Darstellung durch das Frequenzspektrum

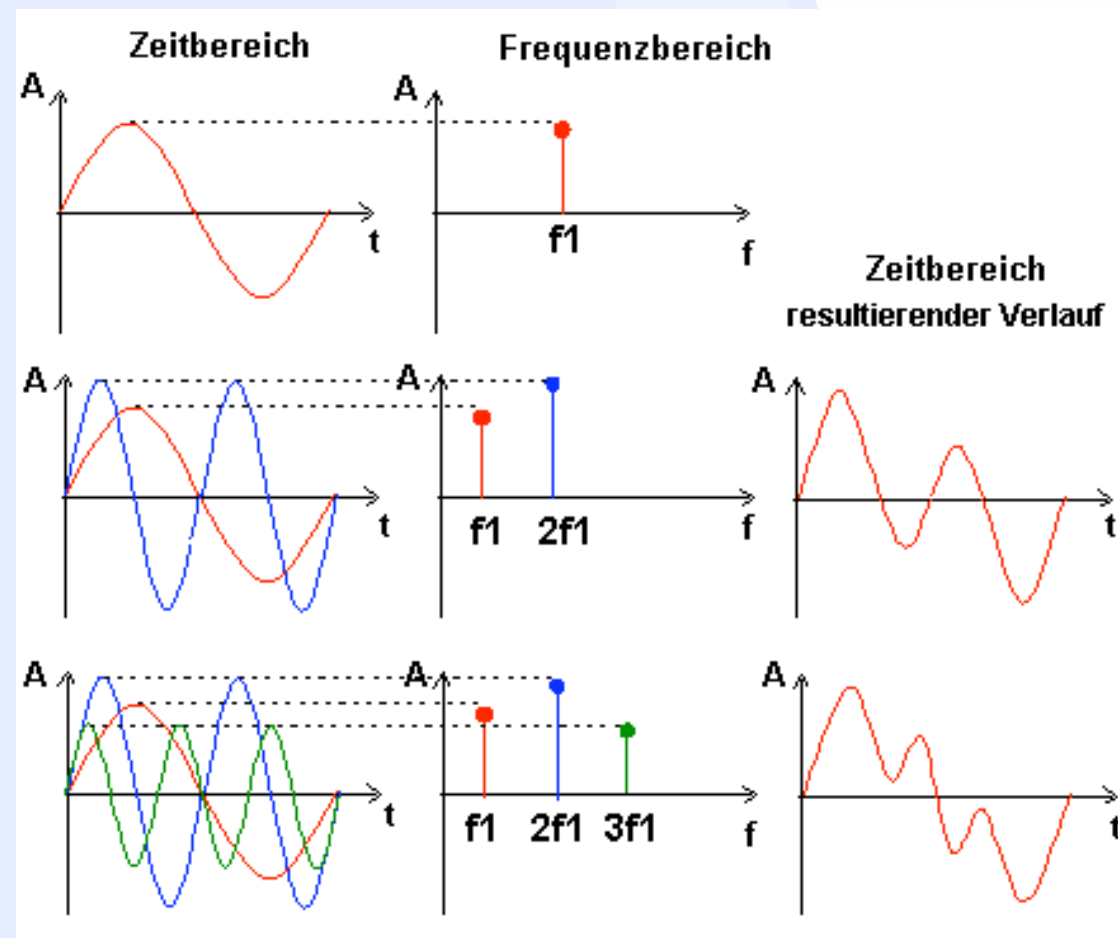
Jede periodische Schwingung kann als eine Überlagerung von Sinusschwingungen unterschiedlicher Amplituden und Frequenzen dargestellt werden.

Trägt man die Amplituden der beteiligten Schwingungen in Abhängigkeit der Frequenz auf, so erhält man eine Darstellung die als Frequenzspektrum (kurz: Spektrum) bezeichnet wird.

Im Spektrum wird die Amplitude jeder Teilschwingung durch eine Linie entsprechender Höhe in Abhängigkeit ihrer Frequenz repräsentiert. Der Zusammenhang zwischen dem zeitlichen Schwingungsverlauf und dem Spektrum soll durch die nebenstehende Zeichnung verdeutlicht werden.

Die Darstellung von Schwingungen durch das Spektrum nennt man **Darstellung im Frequenzbereich**. Analog bezeichnet man die Darstellung als zeitlichen Verlauf als **Darstellung im Zeitbereich**.

Reine Töne und Klänge können als **diskretes Spektrum**, d.h. als Spektrum mit einzelnen Linien dargestellt werden. Geräusche hingegen besitzen ein **kontinuierliches Spektrum**. Die Darstellung durch das Spektrum ist ein wichtiges Hilfsmittel zur Beschreibung von Schallen, da jedes Schallereignis ein charakteristisches Spektrum



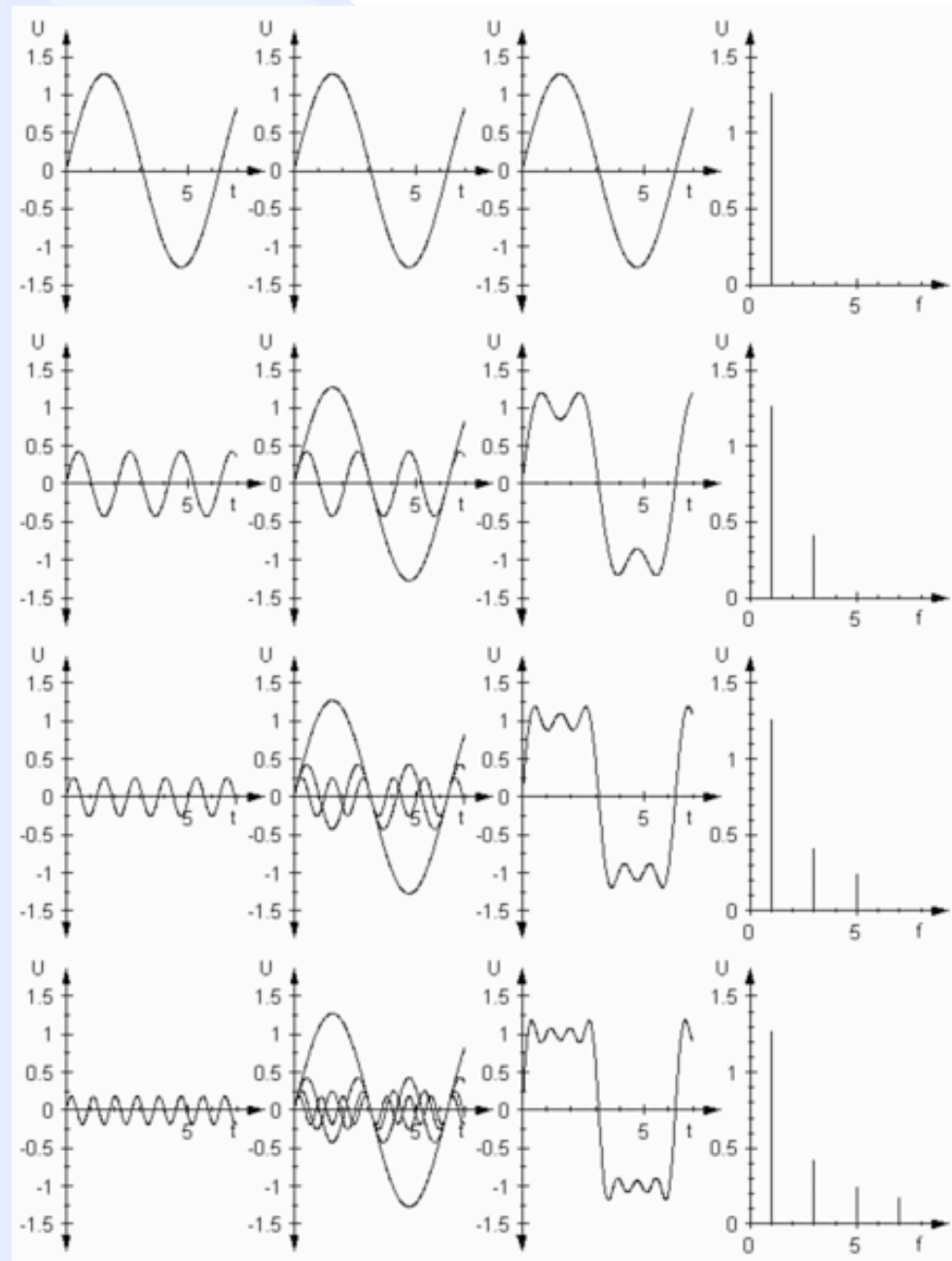




Fourieranalyse/-transformation

Satz von Fourier: Jede periodische Schwingung lässt sich als Summe von Cosinus- und Sinusschwingungen beschreiben. So etwa die Annäherung einer Rechteckschwingung durch eine folgende Funktion:

$$u(t) = \frac{4U_S}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{9} \dots \right)$$

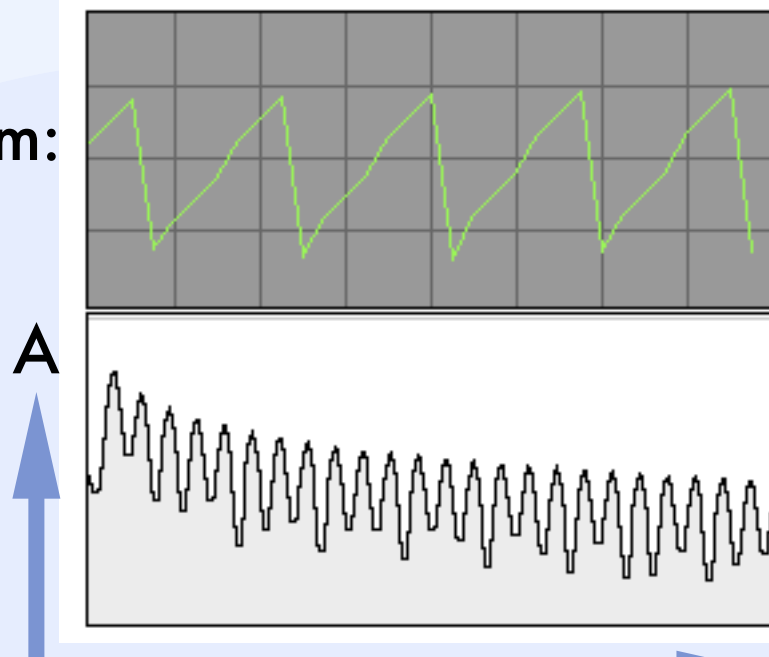




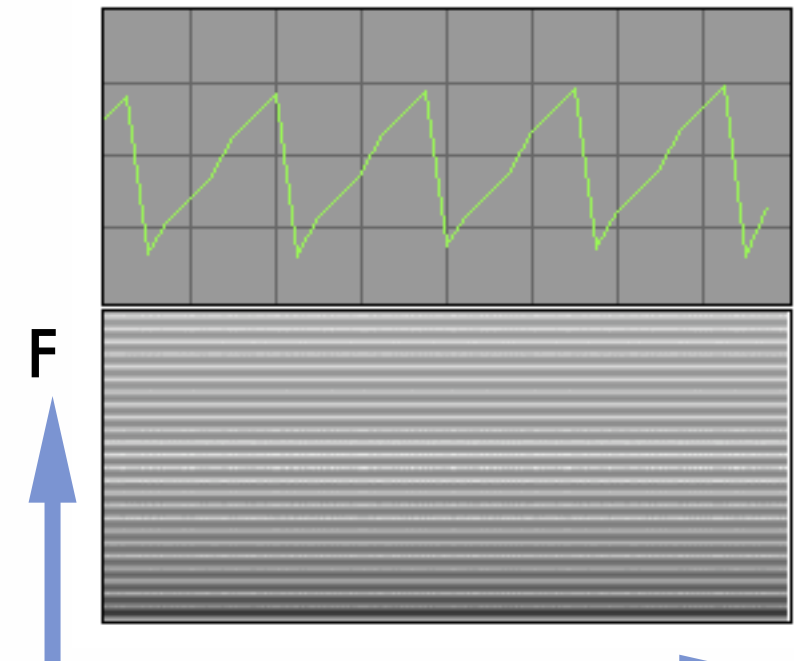
Spektrogramm und Sonogramm

Einfache Darstellung des Spektrum einer Sägezahnswingung

Spektrogramm:

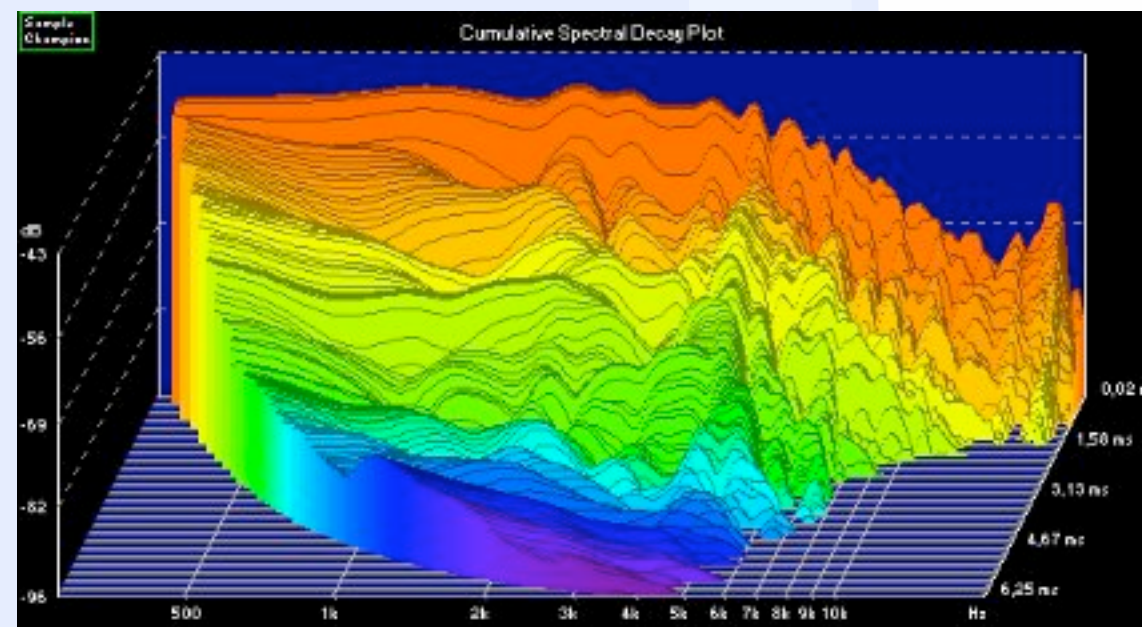


Sonogramm:
Amplitude wird
durch Grauwert
dargestellt



Wasserfalldarstellung eines komplexen Spektrums

A



Analyse und Resynthese mit dem Phase Vocoder

Der Phase Vocoder wurde 1965 von James L. Flanagan und R.M. Golden im AT&T Bell Laboratorium entwickelt. Wie der Name schon sagt, ist der Phase Vocoder eine Art Vocoder, das heisst ein Stimmenver- oder entschlüssler.

Phase Vocoder funktionieren allgemein gesagt wie eine Filterbank bei der die Filter in Reihe geschaltet sind und jeder Filter einen bestimmten Bereich der Frequenzen herausfiltert bzw. deren Lautstärke ermittelt. Die Filterbank ist mit einer Oszillatorbank gekoppelt. Dabei ermittelt die Filterbank die Daten bezüglich der Frequenz und Lautstärke eines Teilbereiches des Klanges. Mit anderen Worten wird der Klang in die einzelnen Teiltöne zerlegt.

Die Daten der Lautstärke der einzelnen Teiltöne werden zur Resynthese eines Klanges benutzt, indem die Oszillatorbank in der Lautstärke angesteuert wird, die die Filterbank vorher gemessen hatte. Dadurch wird der Klang aus seinen einzelnen Teiltönen wieder neu zusammengesetzt.

In der elektroakustischen Musik findet der Phase Vocoder starken Anklang. Mit diesem Verfahren können die Signale in beliebiger Weise verändert resynthetisiert werden. Filtert man z.B. Sprache mit der Filterbank und füttert anstelle der Oszillatoren einen Orgelakkord zurück, in die auf Wiedergabe gestellten Filter, so kann man diesen Orgelakkord sprechen oder singen lassen. Der Phase Vocoder kann auch Übergänge zwischen verschiedenen Klänge erzeugen: eine Stimme kann langsam in einen Flötenton übergehen (Morphing) oder es können veränderung der Geschwindigkeit des Klanges erzielt werden, ohne das Spektrum zu verändern. Man kann einen Sprecher beschleunigen, ohne die Tonhöhe zu erhöhen.

