



Psychoakustik

2. Stunde

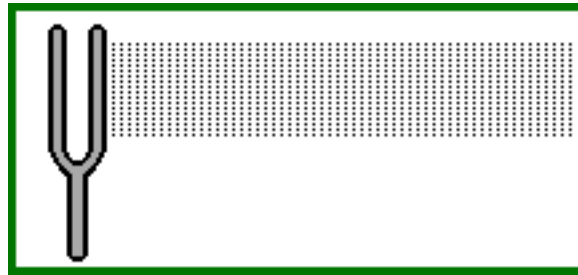
Töne und Klänge

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

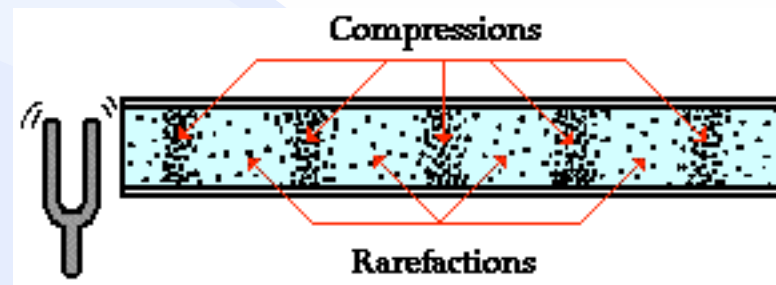


Einfache und komplexe Töne

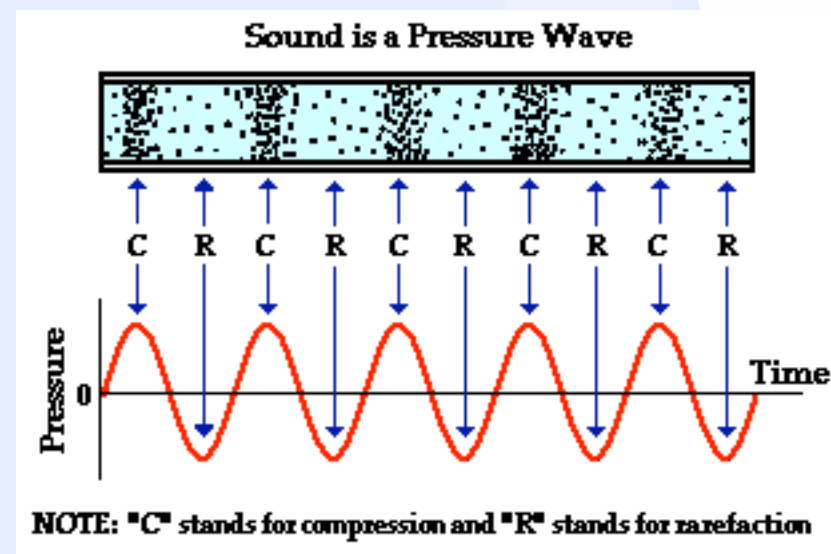
- Wir sind umgeben von Luft. Schall pflanzt sich in Luft von der Quelle kugelförmig als *longitudinale* Welle fort, im Gegensatz zu gespannten Saiten, bei denen wir von *transversalen* Wellen sprechen (da die Bewegung der Saite im rechten Winkel zur Fortplanzungsrichtung der Welle steht).
- Schall hat in Luft bei 20 °C eine Geschwindigkeit von 344 m/sec. In anderen Medien schneller (z.B. Mickey Mouse-Effekt in Helium) oder langsamer.
- 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.



Eine Stimmgabel erzeugt longitudinale Wellen



Eine Stimmgabel erzeugt longitudinale Wellen. Es entstehen Verdichtungen und Verdünnungen (Kompression/Dekompression) von Luft.



Die longitudinale Welle lässt sich einfacherweise auch als transversale Welle darstellen und konzeptualisieren.



Sinustöne

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

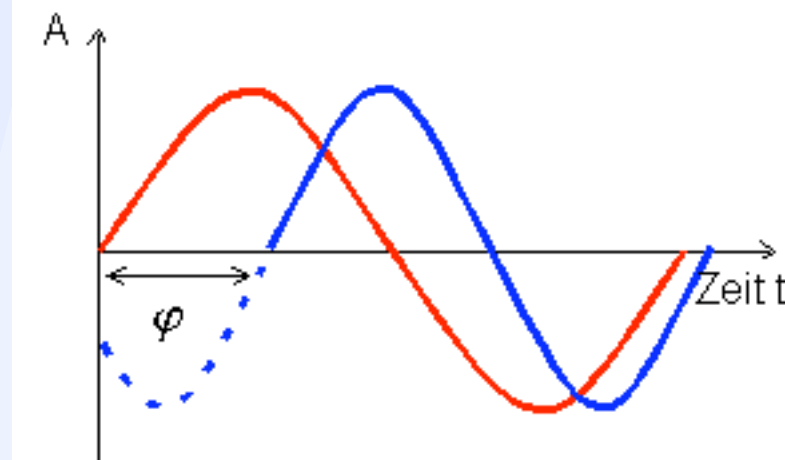
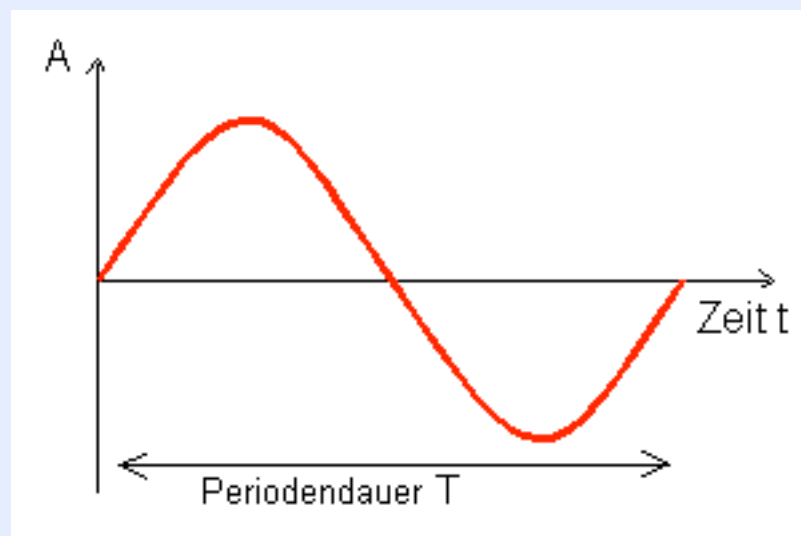
Die einfachste Schwingungsform (komplexe Klangereignisse verstehen sich als Summe einfacher Schwingungen) liegt mit der sinusförmigen Schwingung vor, die man mit einem mathematischen Pendel oder mit bestimmten Schallquellen, z.B. einer Stimmgabel erzeugen kann.

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.



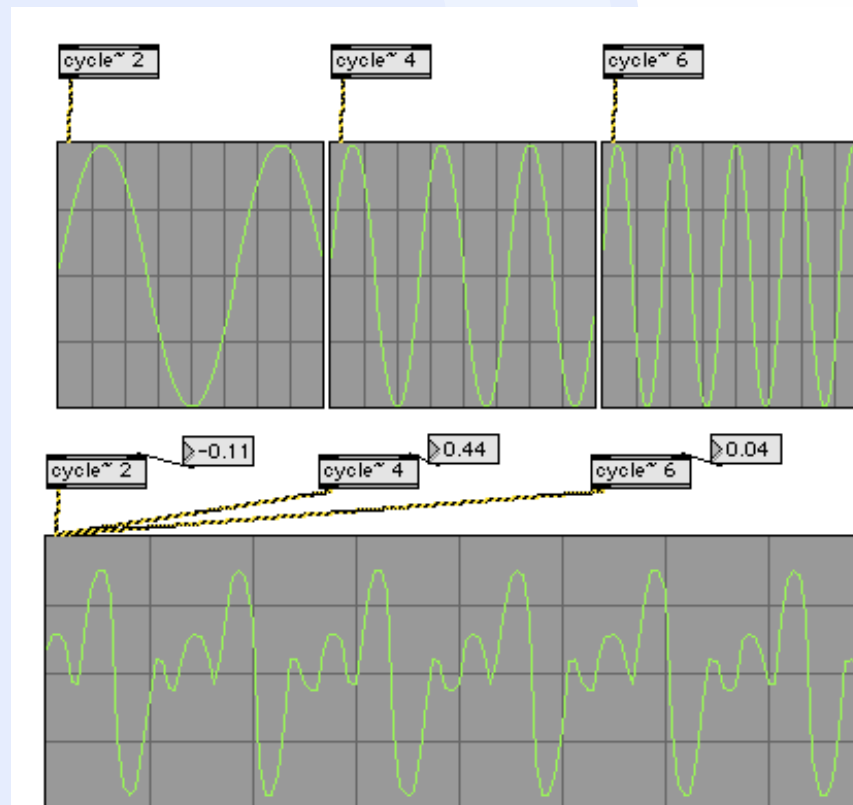


Ton und Klang

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

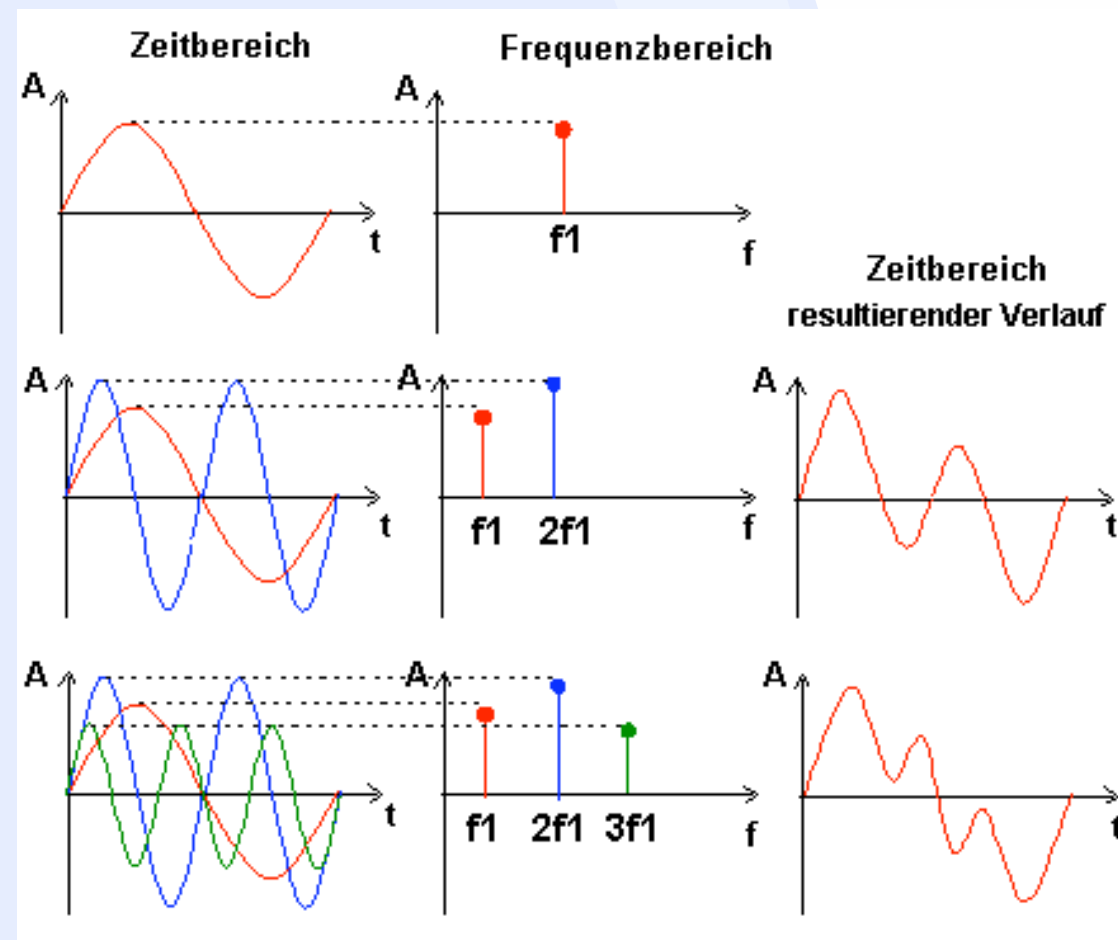
Jede periodische Schwingung kann als eine Überlagerung von Sinusschwingungen unterschiedlicher Amplituden und Frequenzen dargestellt werden.

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**.

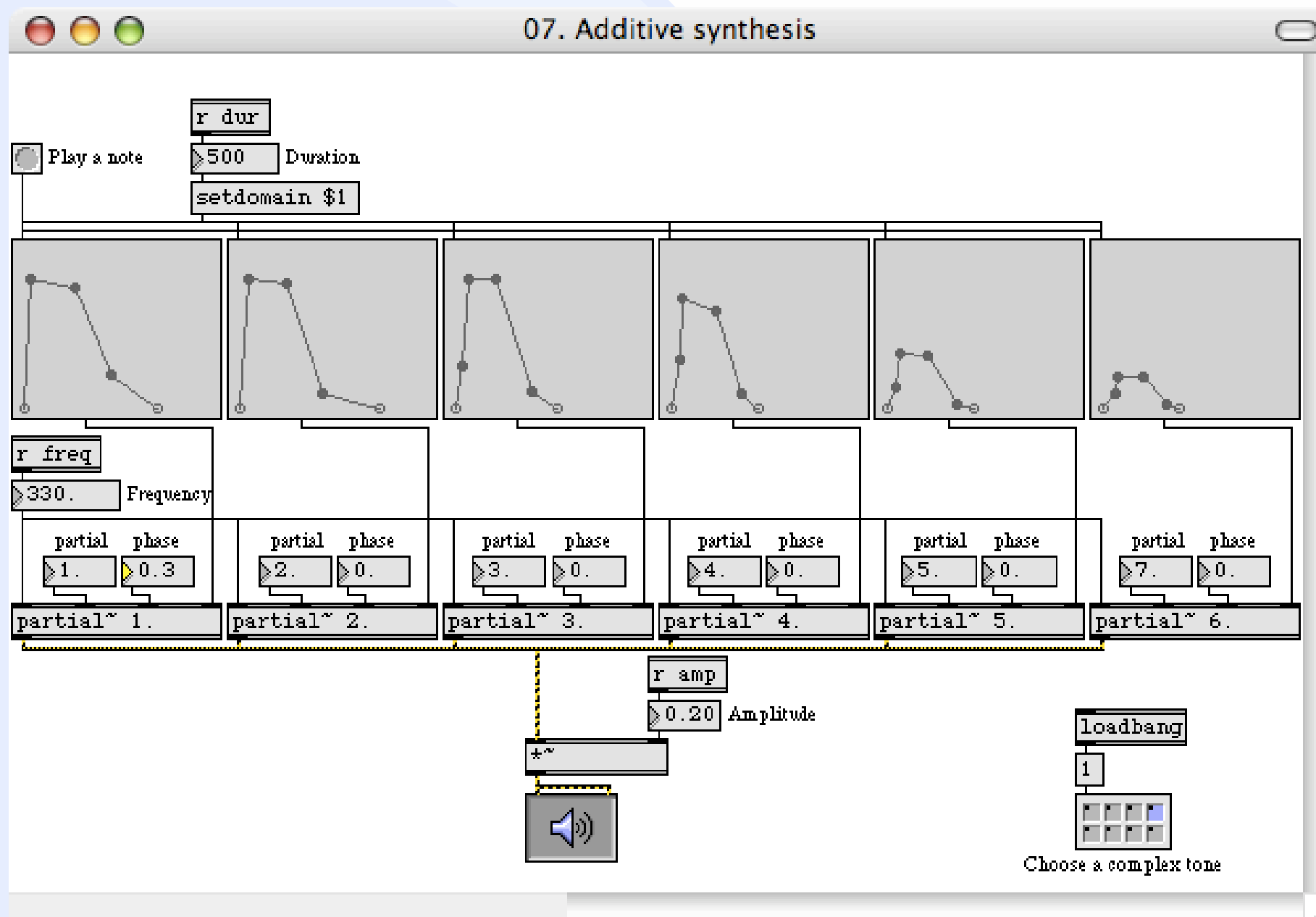
Reine Töne und Klänge können als **diskretes Spektrum**, d.h. als Spektrum mit einzelnen Linien dargestellt werden. Geräusche hingegen besitzen ein **kontinuierliches Spektrum**. Die Darstellung durch das Spektrum ist ein wichtiges Hilfsmittel zur Beschreibung von Schallen, da jedes Schallereignis ein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





Additive Synthesis

Ist uns die spektrale Zusammensetzung eines Klangs (seine Teiltöne und die Entwicklung der Amplituden in der Zeit bekannt, so kann die die Charakteristik des Instruments durch additive Synthese simuliert werden.)

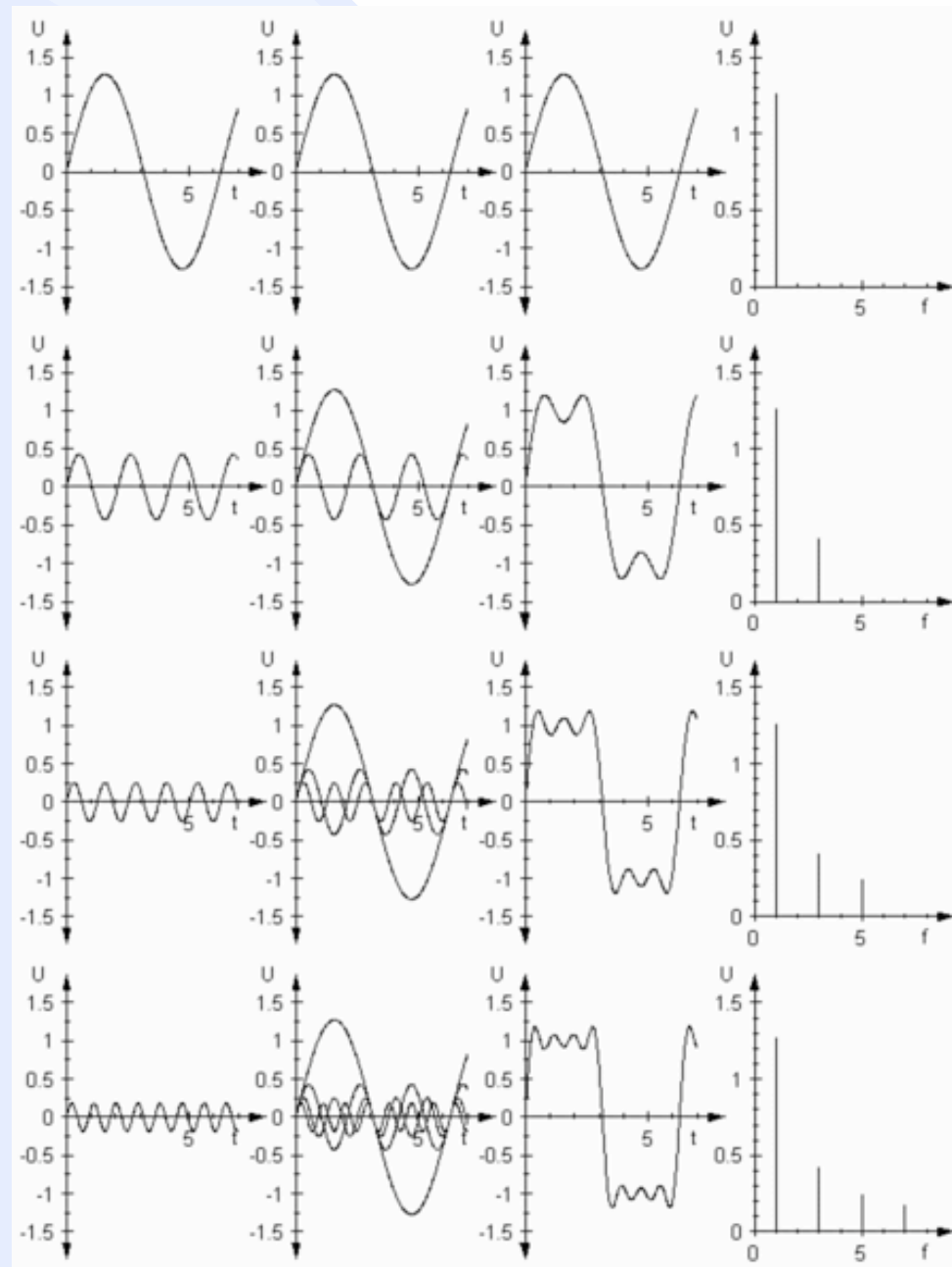




Fourieranalyse/-transformation

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:

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

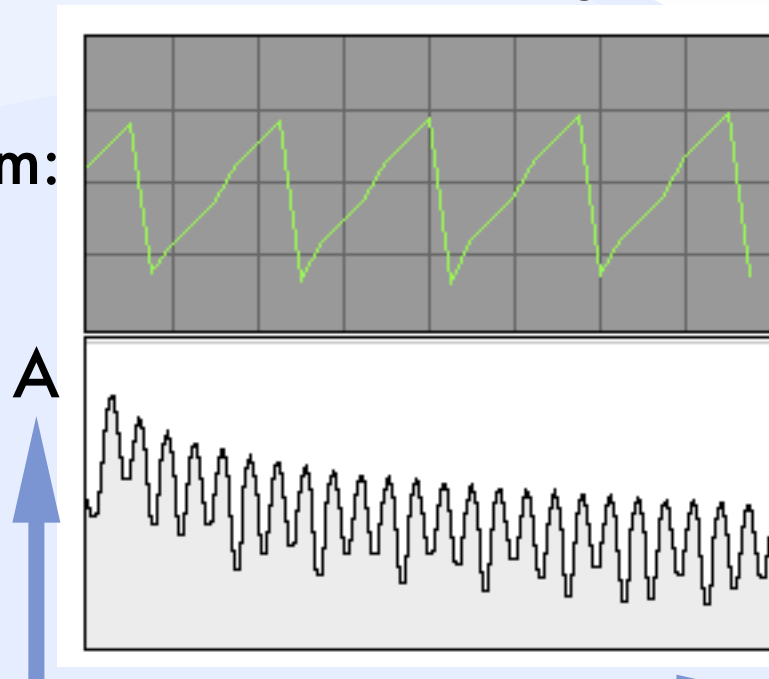




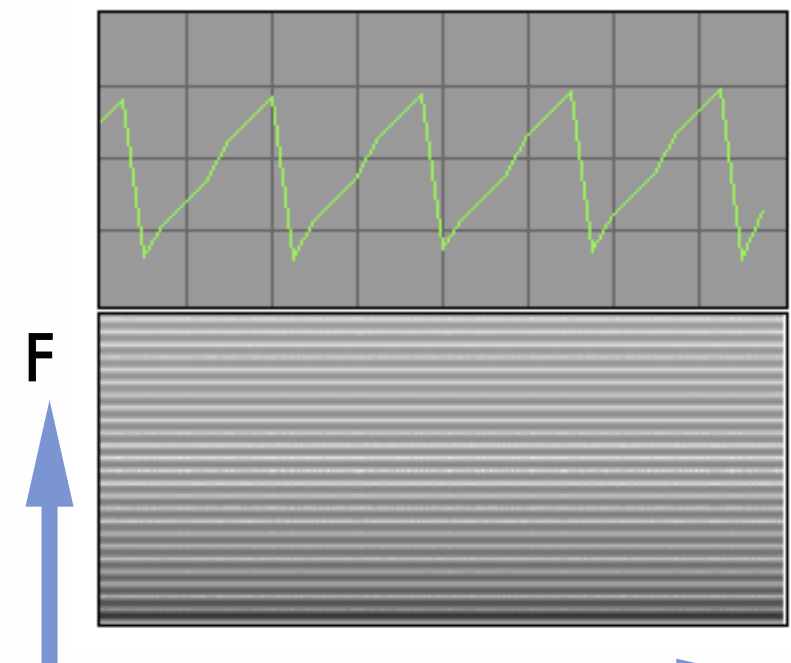
Spektrogramm und Sonogramm

Einfache Darstellung des Spektrum einer Sägezahnswingung

Spektrogramm:



Sonogramm:
Amplitude wird
durch Grauwert
dargestellt

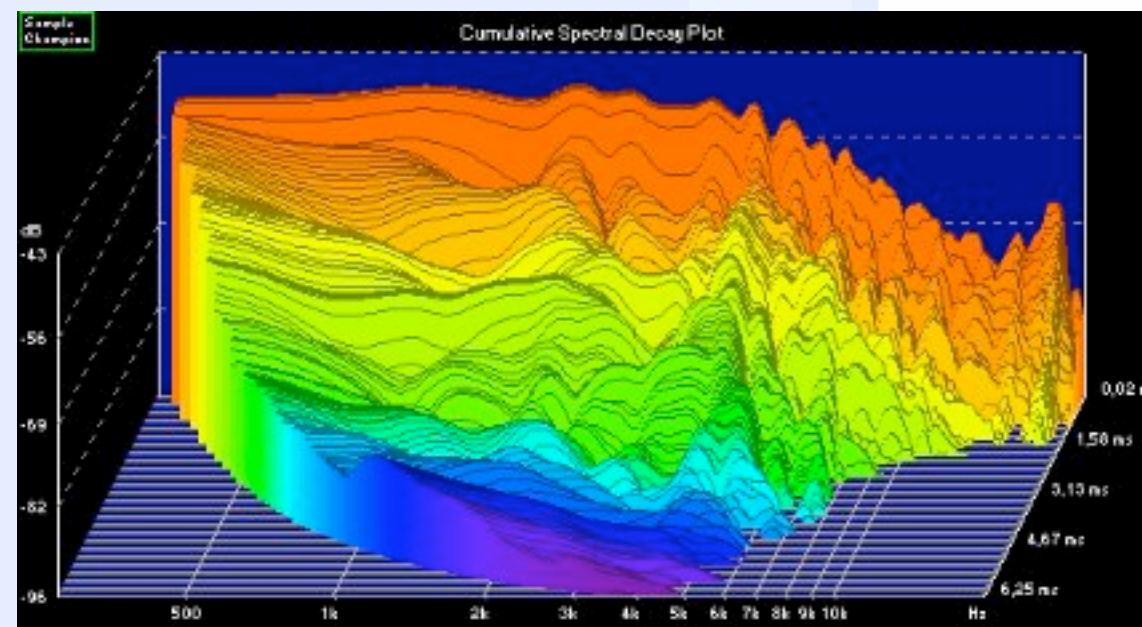


F (0 - 5000 Hz)

t (msec)

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.

