Kapitel 6: Fourieranalyse und der Klangcharakter von Musikinstrumenten

6.1. Flageolett und Teiltöne

Experiment 6.1a Seilwellengerät

Das Seilwellengerät (Abbildung 5.8) wird auf die „Grundschwingung“ eingestellt. Berührt man das schwingende Seil an einem Knotenpunkt, so springt die Schwingungsform schlagartig in einen Typ stehender Welle über, der an der entsprechenden Stelle einen Knoten hat (Abbildung 6.1 „Finger (lose)“):

Auffallend an diesem Experiment ist, dass zusätzliche Knoten an Stellen entstehen, die gar nicht von Fingern berührt werden. Ein Schwingungsbild mit unterschiedlich großen Bäuchen ist nicht möglich.

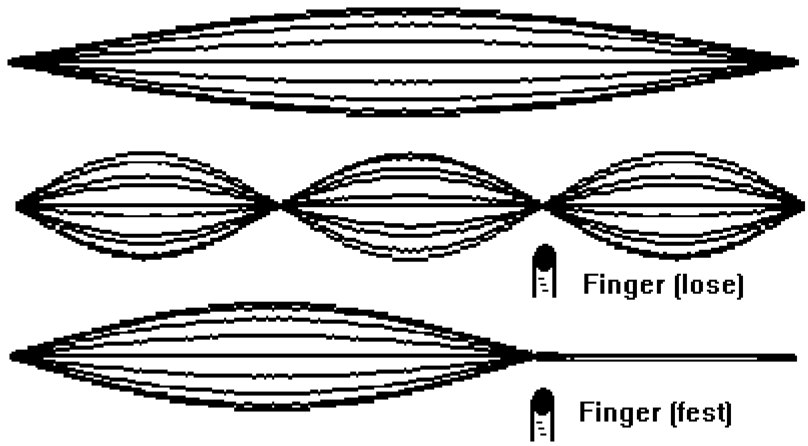


Abb. 6.1 Knotenpunkte am Seilwellengerät

Wir übertragen das „makroskopische“ Experiment 6.1a auf die „mikroskopischen“ Vorgänge einer musikalischen Saite. Dabei können wir die Knoten und Bäuche nicht sehen, wir können aber deren Existenz und Größe hörend nachvollziehen: denn eine Saite, deren Schwingung 2-, 3-, 4- usf. Mal so viele Bäuche wie die Grundschwingung aufweist, sendet nach der „Längenformel“ von Abschnitt 5.2 die 2-, 3-, 4- usw. fache Frequenz aus.

Experiment 6.1b Flageolett beim Cello

Wir verwenden ein Cello und spielen zunächst ein *glissando*: die Saite wird durch Fingerdruck verkürzt, der Finger kontinuierlich bewegt, sodass sich die Saitenlänge kontinuierlich ändert. Nun bewegen wir den Finger wie beim glissando, drücken die Saite aber nicht aufs Griffbrett, sondern berühren sie nur. Man hört eine kunterbunte Abfolge von „Flageolett“-Tönen, ohne jede erkennbare Reihenfolge, hoch-tief im ständigen Wechsel, aber in erkennbaren Intervallfolgen ohne jeden glissando-Effekt.

Zwischenergebnis: Wir haben mit dem Finger nacheinander unterschiedliche Knoten der Saite hergestellt, wobei es gemäß Experiment 6.1a ja durchaus vorkommen kann, dass erheblich mehr als zwei Knoten entstehen und somit die gehörte Tonhöhe weit über die beim „richtigen“ Greifen erwartete hinausgeht. Die Klangfarbe der flageolett-Töne ist matter („sinusförmiger“) als die der normalen Töne. In der Abbildung 6.2 sind Beispiele von Flageolett-Stellen und –Tönen. Wenn die Saite (nur) in der Lage wäre, die abgebildeten flageoletts zu erzeugen und ein Finger von links außen nach rechts bewegt und die Saite rechts gestrichen würde, so würde man die Tonfolge e“, e’, c’, e“, g, e’, c ... hören.

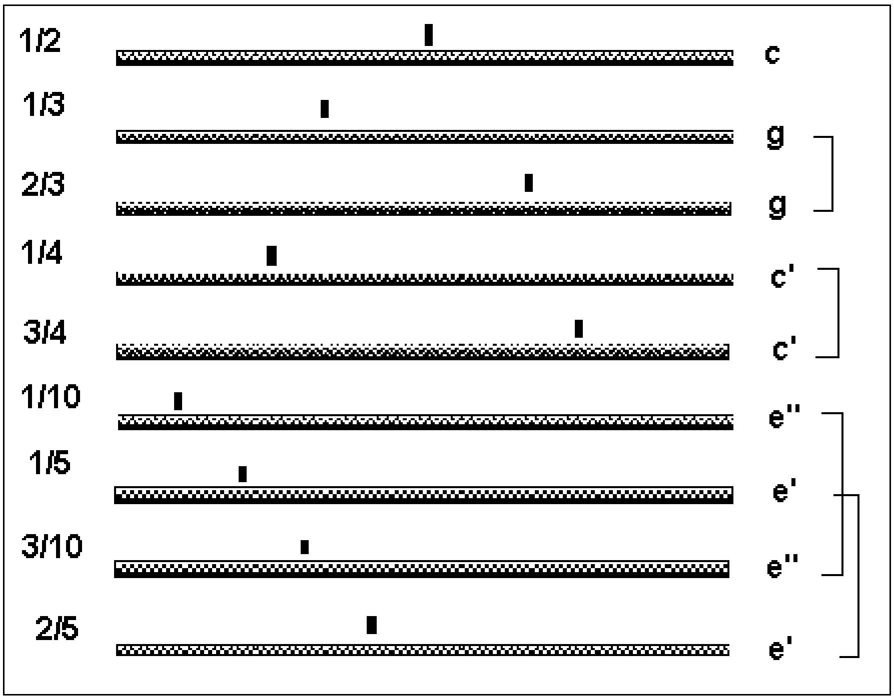


Abb. 6.2 Flageolett-Stellen auf einer Saite

Gesamtergebnis:

Wird die Saite an einer der Stellen 1/N, 2/N, 3/N bis (N-1)/N berührt, so erklingt immer derselbe Ton, da stets dieselbe stehende Welle entsteht. So erklingt zum Beispiel die vierfache Frequenz (= doppelte Oktav) beim Berühren an der 1/4 *und* 3/4 Stelle. Die 2/4-Stelle ist mit 1/2 identisch. Bei der 1/10-Teilung erhält man für 1/10, 3/10, 7/10 und 9/10 dieselbe stehende Welle, bei 2/10, 4/10, 6/10 und 8/10 diejenigen der 1/5-Teilung und bei 5/10 diejenigen von 1/2.

Rechts in Abbildung 6.2 sind für den Grundton C die jeweils erkennbaren Tonhöhen angegeben. Die Klammern kennzeichnen identische Tonhöhen, die durch Berührung an unterschiedlichen Stellen hervorgerufen werden. - Die Menge der durch flageolett gewonnenen „ganzzahligen Teiltöne“ kann man in der Reihenfolge ihrer Tonhöhe aufzeichnen. Man erhält dann eine Abfolge, die in der uns gebräuchlichen Notenschrift näherungsweise wie folgt aussieht:

Abb. 6.3 Die Teiltonreihe bis zum 32. Glied in Annäherung

Die ganzzahligen Teiltöne sind hier in Gruppen so angeordnet, dass immer eine Gruppe innerhalb einer Oktav liegt. In der untersten Oktav liegt ein Teilton, in der 1. Oktav liegen 2 Teiltöne, in der 2. Oktav liegen 4 Teiltöne, in der 3. Oktav 8 Teiltöne usw. (In der N-ten Oktav liegen 2^N Teiltöne.) Die in der Abbildung umrahmten Teiltöne sind durch die vorliegende Notation ungenau wiedergegeben. Unser „natürliches“ abendländisches Tonsystem ist aus den Teiltönen der Ordnungszahlen 1,(2,) 3, (4,) 5, (6, 8,) 9, (10, 12,) 15 zusammengebastelt. Die eingeklammerten Teiltöne sind bereits Oktavierungen tiefer liegender. Mehr hierüber in Kapitel 8.

6.2. Der Satz von Fourier, Obertöne und Spektrum

Pythagoras hat, wie sein Biograf Iamblichos sagte, „die Musik erfunden“, indem er entdeckt hat, dass gewisse in der Musikpraxis seiner Zeit als „schön“ anerkannten Intervalle mit den einfachsten ganzzahligen Saitenteilungstönen erzeugt werden können. Bis ins 19. Jahrhundert war die Herleitung und Legitimation des aus gewissen Teiltönen zusammengesetzten abendländischen Tonsystems eine Sache der Religion: denn schließlich musste man „glauben“, dass ganze Zahlen musikalisch „schön“ sind. Diese Glaubensfrage änderte sich mit der Entdeckung Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), der ganz allgemein für periodische Schwingungen nachwies, dass diese sich stets auf eindeutige Weise aus Sinusschwingungen, deren Frequenz ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz sind, zusammensetzen lassen. Dies bedeutet *mathematisch* ausgedrückt:

- *Jede* periodische Schwingung ist zusammensetzbar aus Sinusschwingungen.
- Die Frequenzen dieser Sinusschwingungen sind *ganzzahlige Vielfache* der Frequenz der Ausgangsschwingung.
- Die Zusammensetzung ist *eindeutig*, d.h. die Amplituden der Sinusschwingungen, aus denen sich die Ausgangsschwingung zusammensetzt, sind eindeutig bestimmt, wenn alle Sinusschwingungen gleiche Phase haben.

Musikalisch ausgedrückt:

- Jeder Ton ist zusammensetzbar aus „harmonikalen“ Sinustönen, aus „Teiltönen“ (im Sinne des vorigen Abschnitts). Diese Zusammensetzung ist eindeutig.
- Die pythagoreischen Teil(ungs)töne werden zu „**Obertönen**“.

Unter „**Fourieranalyse**“ versteht man die eindeutige Zerlegung einer Schwingung in die Sinusschwingungen „mit ganzzahligen Frequenzen“ [lasch ausgedrückt]. Unter „**Fouriersynthese**“ versteht man die Zusammensetzung einer Schwingung aus lauter Sinusschwingungen „mit ganzzahligen Frequenzen“. Die Zusammensetzung kann bei extrem künstlichen Schwingungen (wie „Rechteck“ oder „Dreieck“) sehr, sehr viele Sinusschwingungen erfordern - im Extremfall unendlich viele. Allerdings ist die dabei auftretende unendliche Summe „konvergent“ im Sinne recht weit gefasster Maßbegriffe. Der Satz von Fourier war in doppelter Hinsicht ein über 150 Jahre nachwirkendes Ereignis in der Geschichte der Musikphilosophie. Hermann Helmholtz hat ihn auf die Musik angewendet und damit die Musikphilosophie/-ästhetik endgültig von der (naturwissenschaftlichen) Musikalischen Akustik abgetrennt („Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik“ von 1862).

Was Pythagoras, Johannes Kepler und Johann Sebastian Bach nur durch die Kraft des Glaubens geschafft haben - *die Welt ist Zahl, die Welt ist Klang* -, ist nach Fourier eine notwendige Folge der „Natur des Tones“. Die Teiltonreihe und damit die harmonikale Basis der abendländischen Musik ist nicht nur eine Zahlenspekulation, sondern erklingt immer, sobald auch nur ein Ton ertönt.

Der Satz von Fourier ist ein mathematischer Satz und bezieht sich daher auf alle Arten periodischer Schwingungen. Er ist *universell* in dem Sinne, dass jegliche periodische Erscheinung in „harmonikale Elementarschwingungen“ zerlegt werden kann. Wenn heute Musikphilosophen wie Joachim Ernst Berendt oder Hans Kayser angesichts dieses Universalismus in Erstaunen geraten, so wundern sie sich eigentlich über die in der abendländischen Neuzeit paradigmatisch angenommene universelle Gültigkeit mathematischer Gesetze in der Natur.

Rein technisch ist die Vielfalt der musikalischen Töne danach eindeutig katalogisierbar: jeder Ton besteht aus Obertönen, und die jeweilige Amplitude der entsprechenden Oberschwingungen ist ein eindeutiges „Maß“ eines jeden Tons. Die Gesamtdarstellung dieser Amplituden nennt man (Fourier-) **Spektrum** des Tons.

Einige Warnungen:

- Der Satz von Fourier gilt nur für periodische Schwingungen. Klangereignisse, die auf *nicht periodische* Schwingungen zurückzuführen sind, haben keine harmonikalen Obertöne, haben kein (Fourier-) Spektrum etc.
- Der Satz von Fourier gilt streng genommen nur für *unendlich ausgedehnte* Schwingungen. Ist eine Schwingung nur kurz, so ist der Vorgang des Anfangens und Aufhörens - auch für das menschliche Ohr - oft wichtiger als der Ton selbst.
- Dennoch wird der Begriff „Oberton“ und „Spektrum“ bisweilen auch *auf nicht-ganzzahlige Obertöne* und/oder nicht-stabile Obertöne angewendet. Auch wir tun dies in Kapitel 9.
- Der Begriff „Spektrum“ ist nur sinnvoll, wenn ein „stationärer Klang“ vorliegt. Weder die Klangfarbe, noch die Tonhöhe dürfen sich ändern. Ändert sich die Klangfarbe, was ja in der Tat bei jedem Musikinstrument der Fall ist, so muss ein sich zeitlich veränderndes Spektrum angegeben werde.

Experiment 6.2 Fourieranalyse der Rechteckschwingung

Wir demonstrieren mittels eines Tricks, wie sich eine Rechteckschwingung aus harmonischen Sinusschwingungen zusammensetzt. Dazu schicken wir eine elektrische Rechteckschwingung durch ein Triefnass-Filtersystem, dessen Durchlassbereich veränderbar ist. Der Tiefpass lässt, wie der Namen sagt, nur Schwingungen bis zu einer (einstellbaren) „cut-off-frequency“ durch.

Die „cut-off-frequency“ f kann am Synthesizer kontinuierlich erhöht werden. Wir hören und beobachten am Oszilloskop, wie die durchgelassene Schwingung aussieht. Abbildung 6.4 zeigt einige Schwingungsbilder. Verwendet man statt eines Tief- ein Bandpassfilter (ein Filter, der nur einen engen, ca. eine Terz großen Frequenzbereich passieren lässt), so hört man zumindest die ersten 6 bis 8 Obertöne der Rechteckschwingung in der Abfolge von Abbildung 6.4.

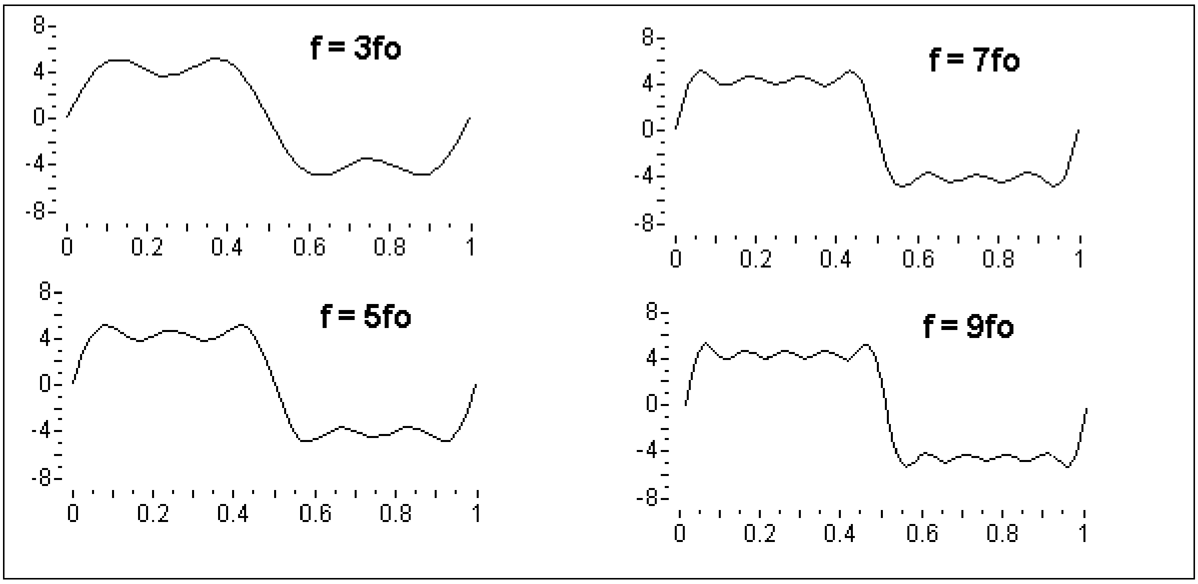


Abb. 6.4 Rechteck- als Summe ungeradzahlige Sinusschwingungen (experimentell gezeigt)

Die Filter-Experimente zeichnen das musikalisch nach, was in der mathematischen Theorie der Fourierreihen rein rechnerisch hergeleitet werden kann: eine Rechteckschwingung lässt sich als und endliche (aber konvergierende) Summe von ungeradzahligen Sinusschwingungen mit den Amplituden 1, 1/3, 1/5, 1/7 usw. darstellen!

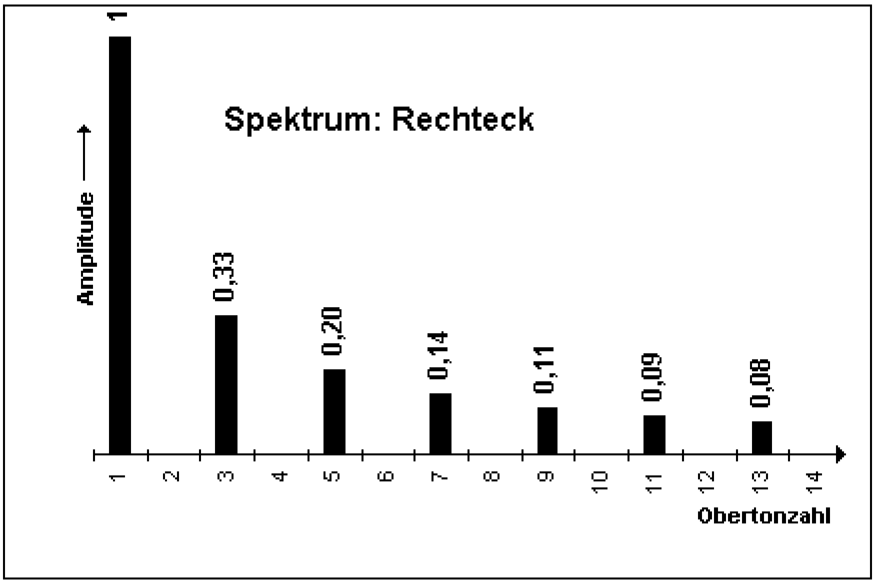


Abb. 6.5 Rechtschwingung als Spektrum dargestellt

Das *Ergebnis* von Experiment 6.2 lässt sich auch als „Spektrum“ darstellen.

Experiment 6.2 ist ein qualitatives Experiment, das die Existenz von Obertönen nachweist und grobe Vorstellungen über deren Verteilung vermittelt. Helmholtz hat sich bei seinen „Spektralanalysen“ ebenfalls einer qualitativen Methode bedient, der „Resonanzmethode“ der Fourieranalyse. Dabei ging er davon aus, dass die Obertöne entsprechende Resonatoren zum Mitschwingen anregen. Ein Resonator der Frequenz 900 Hz kann also beispielsweise dann in Schwingung versetzt werden, wenn ein Ton der Frequenz 100 Hz einen 9. Oberton (der Frequenz 900 Hz) besitzt. Helmholtz verwendete als Resonatoren Glaskugeln, die eine Öffnung zum Eindringen des zu analysierenden Schalls und eine „Ohröffnung“ hatten. (Tonbeispiel: Zusammensetzung 100-300-500-700-900-1100-1300 Hz.)

Die **Resonanzmethode (der Fourieranalyse)** wird gelegentlich in klangfarbenorientierter Klaviermusik angewandt: Durch Niederdrücken der Taste eines Obertons wird die Dämpfung der entsprechenden Saite gelöst. Schlägt man den Grundton kurz an, so hört man, wie die Saite des Obertons nachschwingt. Offensichtlich ist sie durch einen im Grundton enthaltenen Oberton in

Resonanzschwingung versetzt worden. (Gut hörbar beim 5. Oberton - zum Beispiel Grundton C und Oberton e'.)

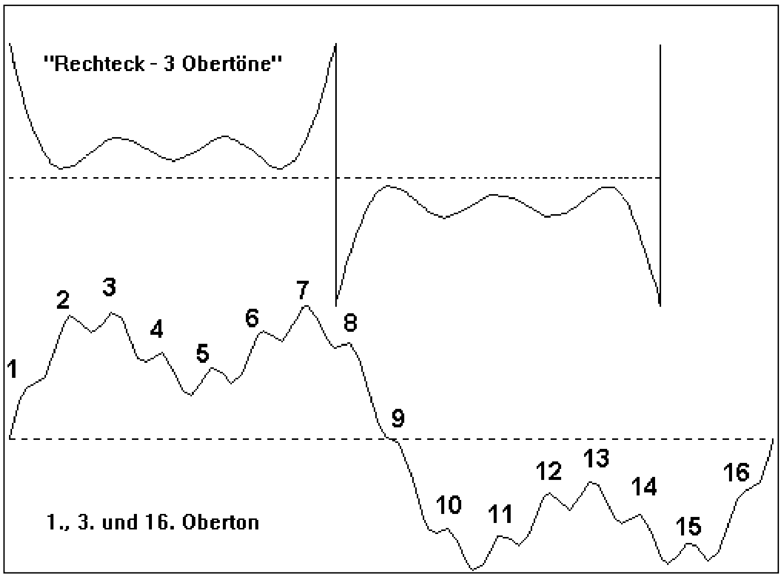


Abb. 6.6 Die "Augen-Fourieranalyse"

Experiment 6.2a Schwebungsmethode

Eine äußerst präzise Methode Obertöne zu finden und nachzuweisen ist die „**Schwebungsmethode**". Hierbei wird dem zu untersuchenden Ton mit der Grundfrequenz f_0 ein Sinuston („Suchton") veränderbarer Frequenz f überlagert. Sobald Schwebungen gut hörbar sind, befindet sich der Suchton in der Nähe eines Obertons und, sobald diese Schwebungen verschwinden, hat der Suchton die Frequenz (und Amplitude) des jeweiligen Obertons. (Tonbeispiel: Obertonschwebungen stereophon – 5., 6. 7. Oberton!)

Eine zur praktischen Orientierung recht brauchbare Fourieranalyse kann man auch mit bloßem Auge am Schwingungsbild durchführen. Die Überlagerung einfacher Teilschwingungen drückt sich unmittelbar in entsprechenden Tälern und Bergen des Oszilloskopbildes aus. Abbildung 6.6 zeigt eine Rechteckschwingung, der die drei Grundschwingungen fehlen sowie einen Grundton dem der 16. Oberton (kleine Kräuselungen) und der 3. Oberton (größerer Wellengang) überlagert wurden.

6.3. Klangfarbe und Klangcharakter

Wenn wir fragen, woran der Mensch erkennt, dass ein Hammerklavier, ein Didgeridoo oder eine Bachtrompete erklingt, dann fragen wir nach dem **Klangcharakter** des Instruments. Es setzt sich derzeit allmählich die Terminologie durch, die „Klangfarbe" vom Klangcharakter zu unterscheiden und unter Klangfarbe jene Eigenschaft zu verstehen, die durch das Spektrum (die Obertonstruktur des stationären Klanges) bestimmt ist. Der Begriff des „Spektrums" ist nur sinnvoll, wenn ein stationärer Ton vorliegt. Er hat wenig Sinn bei üblichen Instrumentalklängen, die Geräuschanteile haben, oft einen charakteristischen Einschwingvorgang besitzen und deren Spektrum stark von der Lautstärke und Tonhöhe abhängig ist. (Tonbeispiel: Klavier ohne und mit Einschingvorgang.)

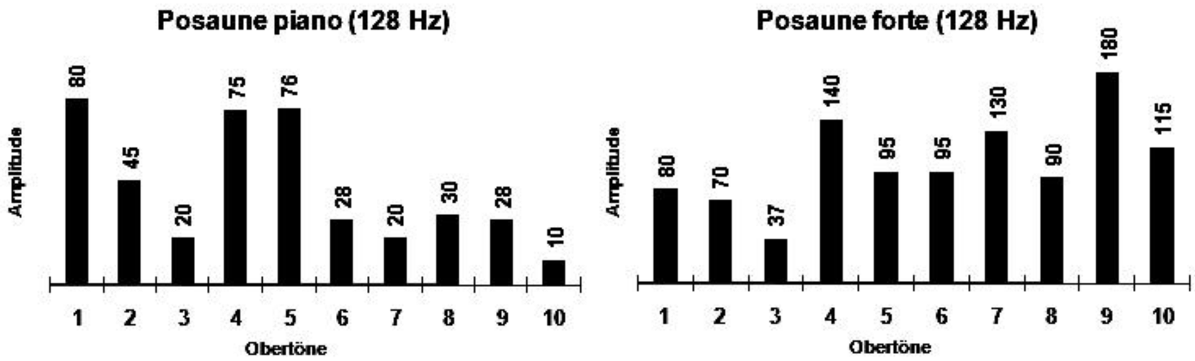
Experiment 6.3 Klangcharakter von Musikinstrumenten

In einem empirischen Experiment lassen wir einige Instrumente bestimmen, wenn der **Einschwingvorgang** weggeschnitten ist. ((Tonbeispiel: Experiment.) Wenn die Fehlerquote 50% beträgt, wurde geraten, d.h. das Instrument war nicht mehr zu erkennen. Bessere Erkennbarkeit hängt an spezifischen Eigenschaften des stationären Klanges, z.B. Luftgeräusche bei der Flöte, ein gewisses Schmettern bei der Posaune oder die „quasiperiodische Schwingung" bei der Klangschale:

Instrument	Posaune	Flöte	Geige	Gitarre	Klangschale	Klavier	Fender-Rhodes
Fehlerzahl	30%	10%	60%	20%	10%	50%	50%

So gut wie gar nicht zu erkennen sind Klavier, und die Geige auch schlecht. Ein Klavier ohne **Einschwingvorgang** hinterlässt einen fast sinusförmig-ätherischen, beinahe elektronischen Eindruck. Unter www.uni-oldenburg.de/musik-for/akustik/download ist ein Beispiel, bei dem der Einschwingvorgang eines Klaviers kontinuierlich schwankt, sodass alle Übergänge zwischen mit/ohne Einschwingvorgang zu hören sind. (Tonbeispiel: Das Experiment mit Einschingvorgänge!)

Beim Klavier haben wir schon festgestellt, dass der Klangcharakter stark von der Lautstärke abhängt, weil letztere den Einschwingvorgang beeinflusst (Experiment 2.5). Aber auch bei Instrumenten wie der Posaune, wo der Einschwingvorgang nicht so wichtig ist, ändert sich das Spektrum stark mit der Lautstärke: der Klang wird “heller”, “schmetternder”, weil bei größerer Lautstärke höhere Obertöne hervortreten:



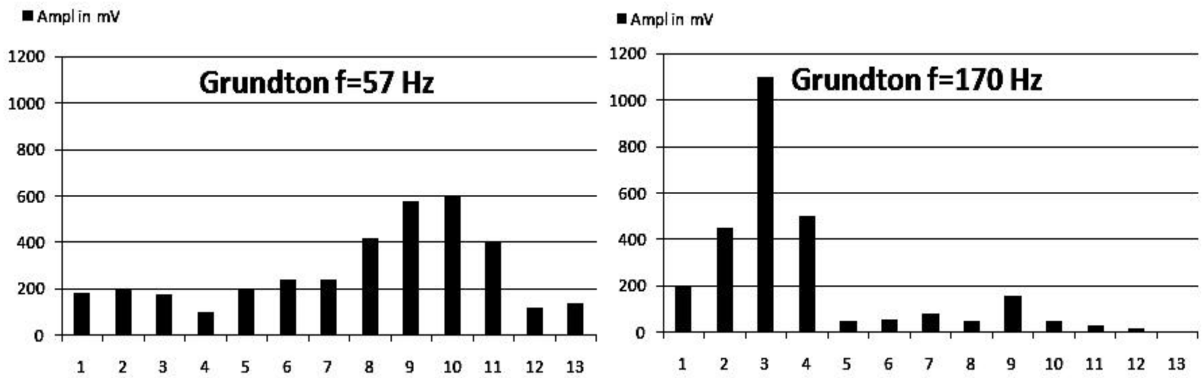


Abb. 6.7 Spektrum der Posaune bei unterschiedlichen Lautstärken

Abb. 6.8 Fagott-Spektrum bei 2 Grundtönen

Schließlich hat jedes Musikinstrument einen “**Formantbereich**”, d.h. einen Frequenzbereich mit starken Obertönen unabhängig von der Grundtonhöhe. Dieser Bereich ist durch den Bau des Instruments bestimmt und spiegelt das Resonanzverhalten wider. Der Abbildung 6.8 ist zu entnehmen, dass das Fagott bei 500-600 Hz starke Obertöne hat: beim Grundton 57 Hz liegen dies um den 10. Oberton, bei Grundton 170 Hz und den 3. Oberton. Der Bereich 500-600 Hz ist der Formantbereich des Fagotts. Hier liegen unabhängig vom Grundton starke Obertöne.

Zusammenfassun:g

- Einschwingvorgang: Dauer, Geräusch ← Eigenschaften der Schwigungserregung
- Dauerklang: (1) Spektrum: Obertongehalt (scharf/weich, hell/dunkel) ← Eigenshaften des Schwingungserzeugers, (2) Formant: Vokalcharakter ← Eigenschaften des Instruments, (3) Modulation: Vibrato ← Abbild der Spieltätigkeit.
- Ausklingen: Dauer, Klangfarbenänderung ← Eigenschaften des Instruments und des Schwingungserzeugers.

Zeitlicher Verlauf des Spektrums

Ein Spektrum kann sich auch ohne Änderung von Tonhöhe oder Lautstärke im Verlauf der Zeit ändern. Ein „Wah-wah“-Klang beispielsweise verändert die Intensität der Obertöne vom Bereich 400 Hz bis 3000 Hz (entsprechend dem Vokalcharakter u-o-a) kontinuierlich (Abbildungen 6.9 und 6.10).
Perspektivische 3D-Darstellung eines Spektrums:

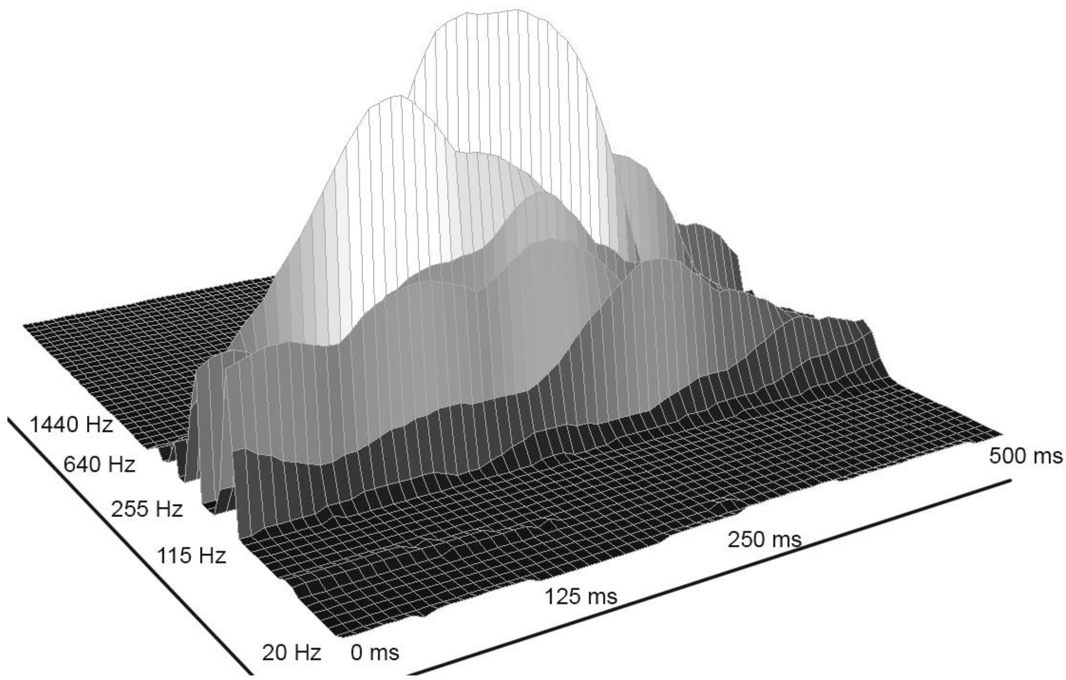


Abb. 6.9 3-D-Darstellung eines Wah-Klanges

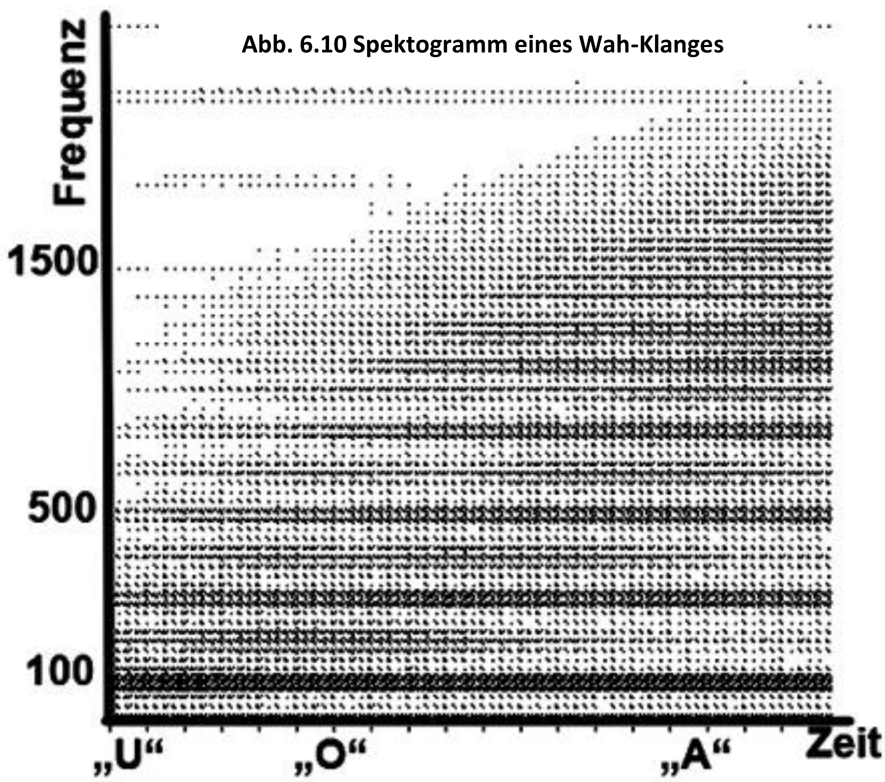


Abb. 6.10 Spektogramm eines Wah-Klanges

Bei der 3-dimensionalen erhält man das Spektrum zu einem bestimmten Zeitpunkt dadurch, dass man sich einen Schnitt durch diese „Wellenberge“ denkt. Bei 0 msec („U“) liegt die höchste Amplitude bei 455 Hz, bei 400 MS („A“) über 1440 Hz.

Im “Spektogramm” wird die 3. Dimension der Amplitude durch die Schwärzungsintensität angegeben: je schwärzer ein Bereich, umso größer die Amplitude in diesem Bereich. Es ist auch hier deutlich zu sehen, dass

“A” Obertöne in höheren Frequenzbereichen besitzt als “U”. – Das sehr suggestive und einfach zu lesende Spektogramm liefert freilich nur ungefähre Richtwerte und keine genauen Ergebnisse (daher “analoge” Darstellung).

6.4. Formanttheorie

Im musikalischen Alltag findet eine (tendenzielle) Fourieranalyse immer dann statt, wenn ein musikalischer Klang von einem Resonator verändert wird. Wenn ein obertonreicher Ton einen Resonator durchläuft, dann werden einige Obertöne verstärkt, andere abgeschwächt. Der Mund-Rachenraum des Menschen ist der wichtigste Resonator der musikalischen Alltagspraxis. Die menschliche Vokal-Stimme ist nach folgenden Schema aufgebaut:

- die Energie stammt aus der Lunge und erregt als Luftstrom die Stimmbänder,
- die Frequenz bestimmen die Stimmbänder (Spannung etc.),
- den Vokalcharakter bestimmt der Resonator Mund-Rachenraum,
- die Abstrahlung die Öffnung des Mundes.

(Die Konsonanten funktionieren nach einem anderen Prinzip, vgl. Kapitel 9.)

Die **Vokale der menschlichen Stimme** werden also dadurch hervorgebracht, dass die Stimmbänder einen obertonhaltigen (schnarrenden) Ton erzeugen, der durch den Mund-Rachenraum gefiltert wird. Je nach Stellung von Zunge, Lippen, Gaumen etc. ändert sich der Resonanzbereich und werden unterschiedliche Obertöne verstärkt. Diese Bereiche heißen „**Vokal-Formanten**“.

U	200-400							
O		420-480						
A			900-1000					
Ö		400-500		1200-1400				
Ü	200-400				1600-1800			
Ä		300-800				1800-2100		
E		300-600					2100-	
I		300-500						2500-3000
	1. Oktav	2. Oktav	3. Oktav		4. Oktav			

Experiment 4.6 Das Vokaldreieck

Wir versuchen in einer bequemen Tonlage singend von einem „u“ ohne zu unterbrechen zu einem „i“ zu gelangen. Auf dem Weg zwischen „u“ und „i“ erzeugen wir, ohne es zu wollen, andere Vokale, „ü“, oder „o“ oder/und „a“ usw. Der kontinuierliche Übergang von der Mund-Rachenstellung des „u“ zu der des „i“ erfolgt über Mund-Rachenstellungen anderer Vokale. Für deutsche Menschen gibt es drei

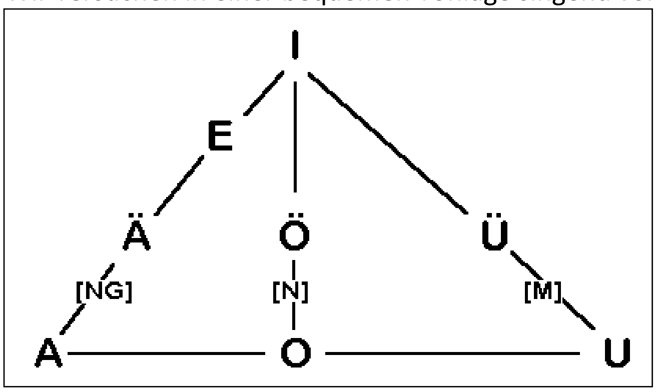


Abb. 6.11 Das Vokaldreieck

Wege vom „u“ zum „i“, wie das

„Vokaldreieck“ zeigt.

Versucht man nun, einen dieser Wege mehrfach und langsam hin- und her zu gehen und mit dem angegebenen Konsonanten zu beginnen, so kann es passieren, dass wir den Eindruck haben, dass sich nicht nur die Klangfarbe des Grundtons ändert, sondern dass tatsächlich Quint- oder Terzschritte in der „Klangbewegung“ zu vernehmen sind. Diese Schritte zeugen von den durch die jeweiligen Vokalformanten angesprochenen Obertönen des Grundtons.

Die Formanttheorie hat auch schöne Seiten: die Obertonmusik. Am berühmtesten ist der Obertongesang, bei dem ein Mensch zweistimmig zu singen scheint. Die ObertonsängerIn produziert mit ihren Stimmbändern einen obertonreichen und möglichst tiefen Bordunton. Den Mund-Rachenraum stellt sie als sehr engen Bandpassfilter ein. Nun kann es vorkommen - und nach vielen Jahren intensiven Übens kommt es immer häufiger vor -, dass aus dem Bordunklang ein einziger Oberton „herausgeholt“ werden kann, wobei eine Art Rückkopplung genau diesen Oberton verstärkt und alle übrigen unterdrückt. Der Oberton klingt sinusförmig. Die in Abbildung 6.11 eingezeichneten Konsonanten geben Hilfestellungen bei solch einem „Obertontraining“. Beginnt man mit ihnen und fährt dann zum nächst höheren Vokal fort, so erschließen sich die Obertöne einfacher.

Experiment 4.7 Die Formanten von Musikinstrumenten

Wenn ein Instrumentalklang einem Vokal ähnelt, so bedeutet das, dass er in dem zu diesem Vokal gehörenden Formantbereich starke Obertöne besitzt. Viele Musikinstrumente haben solche Formantbereiche, d.h. also Frequenzbereiche mit starken Obertönen unabhängig von der jeweils gespielten Tonhöhe. Wir nehmen Instrumentalklänge analog oder digital auf und spielen sie in anderer Geschwindigkeit ab. Dadurch werden die Frequenzen sämtlicher Obertöne um denselben Faktor verändert, sodass sich am Spektrum, das ja nur Frequenzverhältnisse angibt, nichts ändert. Der Klangcharakter des Instrumentaltons ändert sich aber, da der Formantbereich transponiert wird. Es kommen die in der Tabelle wieder gegebenen qualitativen Ergebnisse zustande.

1 Oktav tiefer	*original*	*1 Oktav höher*
Panflöte	Panflöte	Panflöte
Tuba	Jagdhorn	Trompete
Waldhorn	Waldhorn	Trompete oder Oboe
Bass-Klarinette	Klarinette	Klarinette
Engl.-Horn	Oboe	Violine
„Cello“	Violine	Violine
Klavier?	Klavier	Klavier

Qualitativ lässt sich dies Ergebnis so deuten, dass der Formantbereich des einen Instruments durch die Oktavierung auf den Formantbereich eines anderen Instruments gerückt ist mit dem Effekt, dass das ursprüngliche Instrument mit dem anderen verwechselt wird. Eine Violine hat Formantbereiche um c^6 und c^7, während die der Oboe bei e^5 und e^6 liegen. Die Verschiebung des Oboen-Spektrums um (knapp) 1 Oktave bedeutet, dass die Oboen-Formanten sich mit denen der Violine (fast) decken. Ähnliches gilt von Posaune und Trompete. Die Panflöte hat keine ausgeprägten Formanten, weshalb sie beliebig „transponiert“ werden kann.

Ersichtlich setzt die „Formanttheorie“ der Samplingtechnologie (Abschnitt 4.4) enge Grenzen. Denn Soundsampler beruhen auf dem Prinzip, dass ein Instrumentalklang unterschiedlich schnell abgespielt (mit unterschiedlichen Abtastfrequenzen ausgelesen) werden kann. Der Ursprungsklang soll so transponiert werden, als ob das Instrument selbst höher oder tiefer spielen würde. Sobald sich aber die jeweiligen Formanten zu sehr verschieben, entsteht der berüchtigte „Mickeymaus-Effekt“.

Weitere Tonbeispiele:

Obertongesang

Trompete und Geige dieselbe Passage

Klarinette

Maultrommel

Obertongesang

Bezeichnung	*Bedeutung*	*Stimmtechnik*
sygyt	Imitation einer milden Sommerbrise, de Gesang des Vogels	Obertongesang, vorn im Mund gebildet: üü
chömii	Wind, der zwischen den Felsen wirbelt	Obertongesang, weiter hinten gebildet: uu
kargyraa	heulender Winterwind - oder der Schrei eines Mutterrindes, das ihr Kind verloren hat	Untertongesang mit vagierenden Formanten: u-o-a
borbangnadyr	die rollenden Stromschnellen eines Flusses	Lippen- oder andere Triller
ezenggileer	dahintrottelndes Pferd („ezer“ = Sattel)	pulsierender Luftstrom
chylandyk	singende Kröten („chylandyk“ = Kröte)	Verbindung von sygyt und kargyraa

Höre ein Musikbeispiel aus dem fernen Tuva und „lokalisiere“ die hier beschriebenen Effekte!
(Musik auf http://www.uni-oldenburg.de/musik-for/akustik/download.)