ETH Institut für Verhaltenswissenschaft

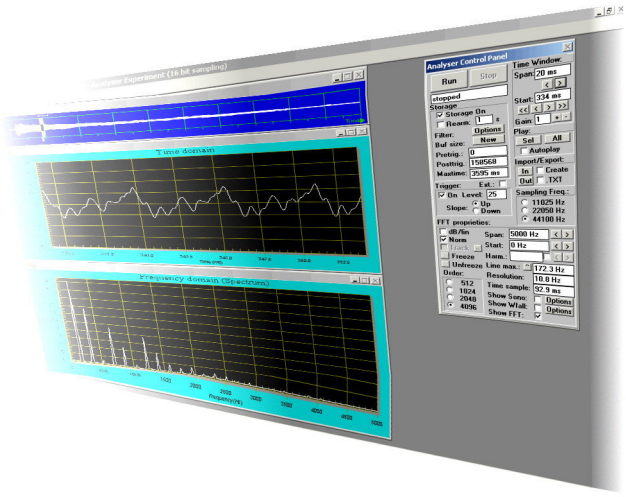
Gelenktes Entdeckendes Lernen
Analyse von Klangspektren

Physik

Gymnasium, 1 bis 2 Jahre vor der Matura

Entdeckungsmöglichkeit:
- Verbindung von Höreindrücken (Klanghöhe, Lautstärke, Farbe) mit physikalischen Parametern
- Diskrete Obertonspektren von Musikinstrumenten
- Klangspektren verschiedener Instrumentenfamilien
- Unterschiede zwischen Klängen und Geräuschen, gesprochener Sprache und Musik etc.

Dauer der gesamten Unterrichtseinheit: 90 Minuten
Dauer des selbständigen Entdeckens: 60 Minuten



Autor: Alain Hauser
Betreuerin: Anna Prieur

Fassung vom 14. September 2004
Bisher nicht schulerprobt.

Inhaltsverzeichnis

Seite

Einleitung....3

Teil 1: Material für die Schülerinnen und Schüler....4

Informationsangebot....4

Klangbeispiele und Analysesoftware....4

Unterlagen für die Klasse....5

Basisinformationen....6

Overtone....7

Instrumente....10

Lenkung....12

Prüfung....12

Teil 2: Dokumente für die Lehrperson....14

Erforderliches Vorwissen....14

Simulation möglicher Ergebnisse....14

Allgemeine Beobachtungen....15

Beobachtungen zu den einzelnen Musikinstrumenten....16

Prüfung....19

Ideen und Anregungen zur Weiterentwicklung....20

Anhang: Beispiele von Klangspektren....23

Dank....32

Einleitung

Die Akustik wird im Allgemeinen als Randgebiet der Physik betrachtet. Kein anderer Themenkomplex der Physik gründet auf ihren Erkenntnissen und Methoden. Gerade an einem Gymnasium ist es daher nicht zwingend notwendig, Schallphänomene detailliert zu behandeln.

Akustische Phänomene eignen sich aber hervorragend, um die Theorie der Schwingungen und Wellen anschaulich zu illustrieren und für Schüler direkt erlebbar zu machen. Abstrakte Begriffe wie Amplitude, Frequenz und Fortpflanzungsgeschwindigkeit erhalten in der Akustik die ganz konkrete Bedeutung von Lautstärke, Tonhöhe und Schallgeschwindigkeit. Theoretische Konzepte wie die lineare Überlagerung von Wellen werden durch Synthese und Analyse von Klängen experimentell greif- bzw. hörbar.

Meines Erachtens darf der Akustik im Gymnasium deshalb durchaus grössere Beachtung geschenkt werden. Gerade die Komplexität der Schallphänomene und ihrer Verarbeitung durch das menschliche Ohr machen die Akustik zu einem äusserst reichen Feld für eigenes Entdecken, Beobachten, Analysieren, Experimentieren. Die Akustik schlägt auch eine Brücke zur Musik und dürfte deshalb besonders in musikalisch orientierten Klassen Anklang finden. Mit diesem Thema schafft die Physik Alltagsbezug und greift in Gebiete über, die in der Regel eher unter kulturellen Aspekten ausgeleuchtet werden.

Die vorliegende Unterrichtseinheit bietet einer gymnasialen Schulklasse die Gelegenheit, im Rahmen eines Gelenkten Entdeckenden Unterrichts selbständig Schallaufnahmen zu analysieren. Als Schallquellen liegt eine Sammlung von Klangbeispielen verschiedener Musikinstrumente vor. Zusätzlich können die Schülerinnen eigene Klänge und Geräusche oder Sprache aufzeichnen. Mit Hilfe eines Computerprogramms werden die Schallsignale der Tonaufzeichnungen untersucht und spektral zerlegt. Die Lernenden können die diskreten Obertonspektren von Musikinstrumenten untereinander vergleichen und sehen die Unterschiede zu einem kontinuierlichen Frequenzspektrum von Konsonanten oder Geräuschen.

Als Lehrperson finden Sie in diesem Text und auf der beigelegten CD-ROM das gesamte Unterrichtsmaterial, das Sie benötigen. Blätter für die Klasse sind im Teil 1 dieses Texts enthalten, die Software zur Spektralanalyse wie auch die Klangbeispiele von Musikinstrumenten finden Sie auf der CD-ROM.

Ich hoffe, dass diese Unterrichtseinheit hilft, eine Schulklasse in die faszinierende Welt der Akustik einzuführen.

Teil 1: Material für die Schülerinnen und Schüler

Informationsangebot

Klangbeispiele und Analysesoftware

Hardwareanforderungen

Zur Spektralanalyse von Klangaufnahmen verwendet diese Unterrichtseinheit die Analyse-Software Overtone, deren Installation und Bedienung in den folgenden Kapiteln beschrieben wird. Die Minimalanforderungen an die Computer-Hardware fallen relativ bescheiden aus:

Prozessor	Intel 486, 66 MHz
Arbeitsspeicher	32 MB
Festplattenplatz	50 MB
Bildschirmauflösung	800 × 600 Pixel
Sonstiges	CD-ROM-Laufwerk, Soundkarte, Lautsprecher, Mikrofon

Für effizientes Arbeiten empfehle ich allerdings, mindestens folgende Ausstattung zu verwenden:

Prozessor	Intel Pentium, 133 MHz
Arbeitsspeicher	64 MB
Festplattenplatz	50 MB
Bildschirmauflösung	1024 × 768 Pixel
Sonstiges	CD-ROM-Laufwerk, Soundkarte, Kopfhörer, Mikrofon

Auf Macintosh-Systemen ist Overtone nur unter Windows-Emulatoren lauffähig. Da eine Emulator-Umgebung gegenüber der normalen Betriebssystem-Umgebung an Rechenleistung einbüsst, brauchen Apple-Computer zum Arbeiten mit Overtone tendenziell eine etwas bessere Prozessorleistung und einen grösseren Arbeitsspeicher als IBM-Computer. Die Leistungseinbusse moderner, professioneller Emulatoren wie Microsoft's Virtual PC sollte allerdings nicht allzu gross sein. Zum Einsatz von Overtone unter Macintosh sei auch auf dem Abschnitt „Softwarevoraussetzungen" weiter unten in diesem Kapitel verwiesen.

Zur Not können Overtone und die Klangbeispiele auch direkt ab CD-ROM eingelesen werden, um Festplattenplatz zu sparen. Da der Zugriff auf Programm und Audiodateien dadurch deutlich langsamer wird, ist diese Variante aber nicht empfehlenswert.

Im Idealfall hat jede Schülerin und jeder Schüler einen Kopfhörer zur Verfügung, um sich gut auf die Klangbeispiele konzentrieren zu können. Andernfalls ersetzen Lautsprecher mit sinnvoll eingestellter Lautstärke die Kopfhörer.

Die Unterrichtseinheit ist für die Arbeit in Zweiergruppen mit je einem Computer konzipiert. Selbstverständlich ist auch Einzelarbeit möglich, falls genügend Computer zur Verfügung stehen.

Es reicht, wenn etwa ein Viertel der Arbeitsstationen mit Mikrofon ausgestattet ist. Die verschiedenen Zweiergruppen müssen dann ab und zu den Arbeitsplatz wechseln, damit im Verlauf der Doppellektion alle Schüler einmal mit Mikrofon arbeiten können. Der grösste Teil des Tonmaterials liegt in Form von Audiodateien vor und kann ohne Mikrofon untersucht werden.

Als Lehrkraft sollten Sie die Schallaufnahme vor der Unterrichtslektion selber testen. Sie ersparen sich und den Schülern damit Ärger mit falsch eingestellten Mikrofonen. Unter Umständen müssen Sie die Aufnahmelautstärke des Mikrofons anpassen. Doppelklicken Sie dazu auf das Tray-Icon für die Lautstärke (kleines Lautsprecher-Symbol neben der Uhr). Sie sehen nun ein Fenster für die Lautstärkeregelung. Um die Aufnahmelautstärke einzustellen, wählen Sie im Menü „Optionen“ den Punkt „Eigenschaften“ und im daraufhin erscheinenden Dialogfenster die Option „Aufnahme regeln für Aufnahme“. In der Liste der verfügbaren Aufnahmegeräte markieren Sie das Mikrofon („Mic“) mit einem Häkchen. Wenn Sie nun auf „OK“ klicken, sehen Sie die Lautstärkeregelung der Aufnahmegeräte. Achten Sie darauf, dass das Mikrofon als Aufnahmegerät ausgewählt ist, und stellen Sie dessen Lautstärke so ein, dass Sie in Overtone Sprache in normaler Umgangslautstärke gut aufzeichnen können.

Softwarevoraussetzungen

Die Analyse-Software Overtone läuft auf allen Windows-Versionen: 3.1, 9x, Me, NT, 2000, XP. Mit Vorteil wird die Unterrichtseinheit deshalb auf Windows-Systemen durchgeführt.

Um Overtone auf Macintosh-Systemen zum Laufen zu bringen, ist ein Windows-Emulator notwendig. Eine gute Wahl ist sicher die aktuelle Version von Virtual PC von Microsoft; Informationen dazu finden Sie unter *http://www.apple.com/macosx/applications/virtualpc/*. Die Website *http://www.emulation.net/windoze/* listet alternative Emulatoren auf. Dort finden Sie unter anderem auch Freeware- und OpenSource-Produkte.

Grundsätzlich empfehle ich, Overtone vor der Anwendung im Unterricht auf den Schulcomputern zu testen.

Um die Unterrichtseinheit auf Apple-Rechnern ohne Windows-Emulator durchzuführen, müssen Sie an Stelle von Overtone ein anderes Programm zur Klanganalyse verwenden. Unter Macintosh lauffähig sind zum Beispiel Spectrum Analyser (*http://www.hitsquad.com/smm/programs/Spectrum_Analyser/*) oder Amadeus (*http://www.hairersoft.com/Amadeus.html*).

Installation von Overtone und Klangbeispielen

Wie bereits erwähnt, empfehle ich der Physiklehrerin oder dem Physiklehrer, Overtone und die Klangaufnahmen der Musikinstrumente auf den Schulcomputern zu installieren. Sie starten die Installation durch Ausführen des Programms *setup.exe* im Stammverzeichnis der beigelegten CD-ROM. Ein Installationsassistent führt Sie durch den Installationsvorgang. Standardmässig werden Overtone und die Klangbeispiele im Verzeichnis *C:\Programme\Overtone* installiert. Das Installationsprogramm erstellt eine Verknüpfung zu Overtone auf dem Windows-Desktop. In den Arbeitsblättern für die Klasse setze ich diese Installation voraus.

Falls Sie Overtone direkt ab CD ausführen wollen, starten Sie die ausführbare Datei *\Overtone\overtone.exe* auf der CD-ROM; die Klangbeispiele befinden sich im Verzeichnis *\Overtone\Audio*.

Unterlagen für die Klasse

Die folgenden Seiten umfassen Basisinformationen zur Akustik, einen kurzen Überblick über die Bedienung von Overtone sowie eine Liste der Instrumente, die in den Klangbeispielen vertreten sind. Jede Zweiergruppe hat je ein Exemplar der folgenden Blätter zur Verfügung.

Basisinformationen

Wir haben uns in den letzten Wochen mit Schwingungen und Wellen beschäftigt. Sie wissen, dass sich Schall durch Wellen ausbreitet. Heute werden Sie die Gelegenheit haben, auf der Grundlage Ihres bisher erworbenen Basiswissens eigenständig Kenntnisse in der Akustik, der Lehre des Schalls, zu erwerben. Damit zu Beginn alle auf dem gleichen Stand sind, habe ich Ihnen in den folgenden Zeilen die wichtigsten Grundkenntnisse kurz zusammengefasst; Sie werden das meiste davon bereits wissen.

Die einfachste Form einer Schwingung, die Sie kennen, ist die harmonische, sinusförmige Schwingung. Ganz allgemein beschreibt aber jede periodische Funktion eine **Schwingung**. Verschiedene Sinusschwingungen unterschiedlicher Frequenz und Amplitude lassen sich zu ganz unterschiedlichen Schwingungsformen überlagern. Wir haben nur wenige Beispiele solcher Überlagerungen gesehen. Ganz allgemein lässt sich jedoch *jede* periodische Schwingung durch eine Überlagerung harmonischer Schwingungen beliebig gut annähern! Und genau diesen Umstand werden Sie sich heute zu Nutze machen. Die Zerlegung einer beliebigen Schwingung in eine Reihe von harmonischen Schwingungen nennt man übrigens nach ihrem Entdecker **Fourier-Zerlegung**. Sie spielt sowohl in der Mathematik und Physik als auch in der Technik eine grosse Rolle.

Schall breitet sich in Form von Wellen aus. Er wird durch ein Medium, im Normalfall Luft, übertragen. Eine Schallquelle regt benachbarte Luftschichten zu Schwingungen an und erzeugt auf diese Weise periodische Schwankungen des Luftdrucks, **Schalldruck** genannt. Diese Verdichtungen und Verdünnungen der Luft breiten sich von der Schallquelle weg nach allen Seiten aus. Auf diese Weise pflanzen sich **Schallwellen** fort. Das Trommelfell in unserem Ohr wird von ankommenden Schallwellen in Schwingung versetzt. Unser Innenohr registriert diese Schwingungen und leitet sie über Nervenzellen ans Gehirn weiter. Schalleindrücke, die wir wahrnehmen, entstehen also durch Luftschwingungen. Wenn wir Schall aufzeichnen wollen, zum Beispiel elektronisch auf einer CD, müssen wir folglich nur den zeitlichen Verlauf des Schalldrucks festhalten.

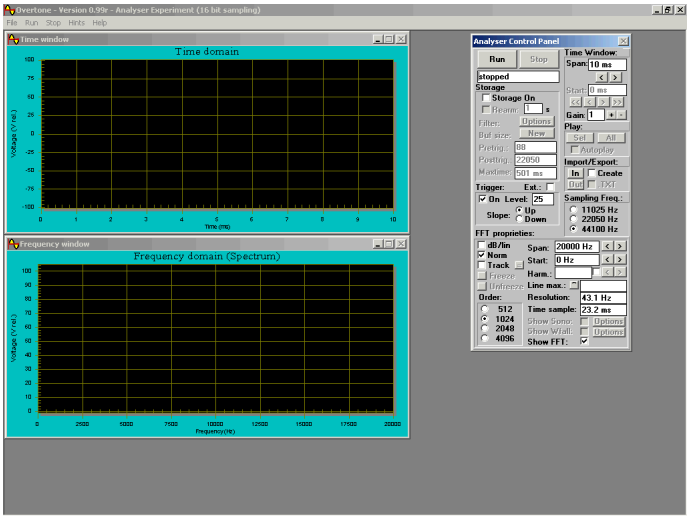
Aus der Fourier-Zerlegung eines Klangsignals können Sie vieles über den Klang herausfinden. Klänge und Geräusche aus Ihrer Umwelt bestehen immer aus einer Unmenge überlagerter harmonischer Schwingungen. Die tiefste vorkommende Frequenz beim Schall eines Musikinstruments nennt man **Grundfrequenz**; sie entspricht dem sogenannten **Grundton** des Klangs. Schwingen noch weitere Frequenzen mit, nennt man diese **Obertöne**.

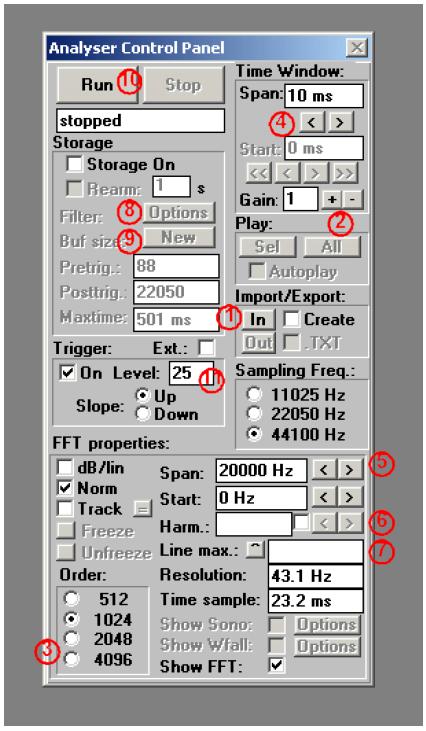
Overtone

Die Software Overtone wurde von Ägidius Plüss von der Universität Bern entwickelt, um Klangsignale zu produzieren und zu analysieren. Die Software ist frei verfügbar und kann im Internet unter *http://www.clab.unibe.ch/overtone* heruntergeladen werden.

Sie werden das Programm benutzen, um verschiedene Schallquellen zu analysieren. Damit Sie rasch mit der Arbeit beginnen können, habe ich Ihnen hier eine kurze Bedienungsanleitung zusammengestellt. Sie deckt keineswegs den gesamten Funktionsumfang von Overtone ab, behandelt aber alle Funktionen, die Sie für ihre Arbeit benötigen.

Zum Starten von Overtone doppelklicken Sie auf das entsprechende Desktop-Symbol auf Ihrem Computer. Zuerst erscheint ein Dialogfenster mit Hinweisen zur Registrierung; klicken Sie hier auf die Schaltfläche „Continue“. Nun sehen Sie das Programmfenster vor sich. Damit Sie Klänge analysieren können, wählen Sie im Menü „File“ die Untermenüs „Experiments“ → „Analyser“. Nun sehen Sie folgendes Fenster vor sich:





Das Kindfenster auf der rechten Seite trägt die Überschrift „Analyser Control Panel“. Es dient zur Steuerung von Overtone.

Zum Einlesen einer Audiodatei klicken Sie auf die Schaltfläche „In“ (1). Im nun erscheinenden Dialog zur Dateiauswahl sehen Sie das Programmverzeichnis von Overtone. Wechseln Sie ins Unterverzeichnis „*Audio*“. Dort finden Sie eine Sammlung von Audiodateien mit Klangbeispielen von Musikinstrumenten. Welche Datei zu welchem Instrument gehört, entnehmen Sie der Liste der Instrumente. Wählen Sie eine Datei aus und klicken Sie auf die Schaltfläche „OK“. Overtone zeigt Ihnen als Nächstes ein kleines Dialogfenster mit Informationen zur Datei an. Es handelt sich bei allen Aufnahmen um Stereoaufnahmen; wählen Sie zur Analyse jeweils den linken Kanal durch Drücken des Schalters „Left“.

Im Programmfenster von Overtone sehen Sie jetzt auf der linken Seite drei Kindfenster. Das oberste mit Titel „Storage“ zeigt den zeitlichen Verlauf des Schallpegels der ganzen Audiodatei. Sie sehen darin einen gelben, vertikalen Balken, dessen Breite der Zeit von 10 ms entspricht. Dies ist der markierte Bereich des Klangsignals, der von Overtone in den beiden unteren Kindfenstern analysiert wird. Im mittleren Fenster, mit „Time window“ angeschrieben, wird der zeitliche Verlauf des Schallpegels des markierten Ausschnitts vergrössert dargestellt. Im untersten Fenster schliesslich, im „Frequency window“, sehen Sie den für Sie interessantesten Teil: die Spektralanalyse des markierten Bereichs. Hier wird das Klangsignal Fourier-analysiert, d.h. in eine Reihe harmonischer Schwingungen zerlegt. Das Diagramm in diesem Fenster hat zwei Achsen. Auf der horizontalen Achse, der Abszisse, sind Frequenzen der einzelnen harmonischen Schwingungen aufgetragen. Auf der vertikalen Achse, der Ordinate, sehen Sie, mit welcher Amplitude eine Schwingung einer bestimmten Frequenz vorkommt. Die Skala dieser Achse ist in relativen Einheiten gehalten. Die absoluten Werte interessieren uns nicht.

Als Erstes möchten Sie sicher wissen, wie Ihr Klangbeispiel tönt. Um die Audiodatei abzuspielen, klicken Sie im Steuerungsfenster auf die Schaltfläche „Play: All“ (2).

Bevor Sie mit der Analyse beginnen, müssen Sie nun im Steuerungsfenster das Optionsfeld „Order: 4096“ auswählen (3). Damit erhöhen Sie die Genauigkeit der Spektralanalyse. Sie erkennen dadurch feinere Details in den Klangspektren.

Nachdem Sie ein Klangbeispiel zur Analyse geöffnet haben, ist im obersten Fenster zuerst der Anfang der Datei markiert. Um einen beliebigen Ausschnitt zu analysieren, bewegen Sie den Mauscursor im Fenster „Storage“ ans untere Ende des Markierungsbalkens, bis er sich in einen nach oben weisenden Pfeil verwandelt. Nun können Sie bei gedrückter linker Maustaste den Markierungsbalken beliebig in der Tonaufnahme nach vorn und hinten ziehen.

Haben Sie einen interessanten Ausschnitt gefunden, stehen Ihnen verschiedene Werkzeuge zur Analyse zur Verfügung. Zuoberst im Steuerungsfenster, unter „Span“, sehen Sie die Länge des markierten Zeitintervalls. In der Standardeinstellung beträgt sie 10 ms. Mit Hilfe der beiden Schalter „<“ und „>“ (4) können Sie die Länge des Intervalls verändern. Sie sehen dann im Zeitfenster, dem mittleren der linken Seite, unterschiedlich lange Abschnitte Ihres Klangbeispiels dargestellt. Der Rest der für uns relevanten Einstellungen ist zuunterst im Steuerungsfenster unter „FFT „properties“ aufgeführt. Unter „Span“ (5) stellen Sie die Obergrenze der analysierten Frequenzen ein. Setzen Sie diese herunter, stellt Overtone die tiefen Frequenzen vergrössert dar. Im Eingabefeld „Harm.“ (6) können Sie eine Frequenz (in Hertz) eintragen. Wenn Sie anschliessend das Optionsfeld rechts markieren, werden ganzzahlige Vielfache dieser Grundfrequenz mit Hilfe rosaroter Linien im Frequenzdiagramm aufgetragen. Gleich darunter, im Feld „Line max.“ (7), finden Sie die Frequenz mit der grössten Amplitude. Mit Hilfe der Schaltfläche „^“ übertragen Sie diese Frequenz direkt ins Eingabefeld „Harmonics“ („Harm“).

Skizzieren Sie die untersuchten Spektren auf ein Blatt Papier und notieren Sie Ihre Beobachtungen dazu. Einige wenige Spektren, die besonders viele interessante Details aufweisen, können Sie auch ausdrucken. Klicken Sie dazu mit der rechten Maustaste ins gewünschte Diagramm. Im Popup-Menü wählen Sie unter „Viewing Style“ die Option „Monochrome“, um eine schwarzweisse Darstellung des Diagramms zu erhalten. Anschliessend öffnen Sie nochmals das Popup-Menü und wählen den Menüpunkt „Export Dialog...“. Overtone zeigt Ihnen dann ein Dialogfenster an, wo Sie unter „Export Destination“ mit Hilfe des Optionsfeldes „Printer“ den Drucker auswählen. Anschliessend klicken Sie auf die Schaltfläche „Print“ und bestätigen den markierten Drucker im folgenden Dialogfenster. Achten Sie bitte darauf,

nur wenige Spektren auszudrucken. Sie blockieren sonst den Drucker und stören dadurch andere Gruppen.

Damit Sie sich nicht auf die vorhandenen Klangbeispiele beschränken müssen, können Sie auch eigene Schallsignale mit einem Mikrofon aufzeichnen und analysieren. Dazu müssen Sie als Erstes ein paar Einstellungen in Overtone vornehmen. Mit Hilfe der Schaltfläche „Filter: Options“ (8) können Sie ein Dialogfeld aufrufen, in dem Sie die höchste aufzuzeichnende Frequenz einstellen können. Die tiefe Frequenz 1000 Hz ist bereits eingestellt. Erhöhen Sie den Wert auf 21000 Hz, indem Sie die vorderste Stelle der angezeigten Frequenz durch Klicken auf die Schaltfläche „^“ gleich darüber erhöhen, und schliessen Sie das Dialogfeld wieder über die Schaltfläche „Quit“. Als Nächstes müssen Sie genügend Speicher für die Aufnahme bereitstellen. Klicken Sie dazu auf die Schaltfläche „Buf size: New“ (9) und tragen Sie im auftauchenden Dialogfeld die Werte 100 für „Pretrigger Buffer Size“ bzw. 100000 für „Posttrigger Buffer Size“ ein. Sie können damit etwa 2 s Schall aufnehmen. Schliessen Sie das Dialogfeld mit einem Mausklick auf „OK“. Sie können nun eine Aufnahme starten, indem Sie im Steuerungsfenster auf „Run“ (10) klicken und anschliessend mit dem Mikrofon einen Schall aufnehmen. Overtone beginnt mit der Schallaufzeichnung, sobald das Eingangssignal des Mikrofons eine gewisse Schwelle überschreitet. Falls die Hintergrundgeräusche in Ihrem Zimmer zu laut sind, ist diese Schwelle permanent überschritten; Sie merken das daran, dass die Schallaufzeichnung sofort nach dem Klicken auf die Schaltfläche „Run“ startet. In diesem Fall müssen Sie die Minimalschwelle heraufsetzen. Ändern Sie dazu den Wert im Feld „Level“ (11); der Wert muss zwischen 0 und 100 liegen. Probieren Sie aus, wie hoch er in Ihrer Umgebung sein muss, damit die Hintergrundgeräusche nicht schon eine Aufnahme auslösen.

Selber aufgenommene Schallsignale können Sie genau gleich analysieren wie die Instrumentenklänge aus den Audiodateien. Geben Sie Acht, dass sich die Töne beim Aufnehmen nicht überschlagen. Sie erkennen dies daran, dass die Spitzen des Schallsignals abgeschnitten werden. Sollte dies der Fall sein, wiederholen Sie die Aufnahme.

Instrumente

Hier finden Sie eine Liste der Instrumente, zu denen Sie Klangbeispiele vorfinden. Die Überschriften bezeichnen Instrumentenfamilien. Zu jedem Instrument sehen Sie, welche Dateien entsprechende Klangbeispiele enthalten. Da Overtone noch für Windows 3.1 entwickelt worden ist, haben die Dateinamen alle maximal 8 Zeichen (ohne Erweiterung „.wav“), was leider die Verständlichkeit etwas erschwert.

Mit einer Ausnahme finden Sie pro Instrument 2 bis 3 Klangbeispiele vor. Die Ausnahme macht das Akkordeon. Da dieses Instrument über verschiedene Register mit unterschiedlichem Klang verfügt, finden Sie dort pro Register 3 Aufnahmen vor, insgesamt also 9 Dateien.

Die Instrumente mit einem Stern (*) sind auf einem Zusatzblatt fotografiert.

Instrument	Dateien
Streichinstrumente	
Violine (*)	violine1.wav bis violine3.wav
Bratsche (*)	bratsch1.wav bis bratsch3.wav
Cello (*)	cello1.wav bis cello3.wav
Tasteninstrumente	
Klavier	piano1.wav bis piano3.wav
Cembalo	cembalo1.wav bis cembalo3.wav
Holzblasinstrumente	
Blockflöte	blockfl1.wav, blockfl2.wav
Altflöte	altfl1.wav, altfl2.wav
Querflöte (*)	querfl1.wav bis querfl3.wav
Klarinette (*)	klarin1.wav bis klarin3.wav
Oboe (*)	oboe1.wav bis oboe3.wav
Sopransaxofon	sopsax1.wav bis sopsax3.wav
Altsaxofon	altsax1.wav bis altsax3.wav
Fagott (*)	fagott1.wav bis fagott3.wav
Blechblasinstrumente	
Trompete (*)	trompet1.wav bis trompet3.wav
Posaune (*)	posaune1.wav bis posaune3.wav
Horn	horn1.wav bis horn3.wav
Andere Instrumente	
Gitarre	gitarre1.wav, gitarre2.wav
Akkordeon:	
Register 1	akkord1.wav bis akkord3.wav
Register 2	akkord4.wav bis akkord6.wav
Register 3	akkord7.wav bis akkord9.wav

Violine

Bratsche

Cello

Querflöte

Klarinette

Oboe

Fagott

Trompete

Posaune

Lenkung

Der folgende Text erläutert den Schülerinnen und Schülern, was in der vorliegenden Unterrichtseinheit zu tun ist, und gibt ihnen grobe Suchrichtungen für ihre Untersuchungen an.

Die unten erwähnte Einteilung in Zweiergruppen ist von der Lehrkraft vorzunehmen. Als Lehrerin oder Lehrer achten Sie darauf, dass Zweiergruppen aus leistungshomogenen Paaren bestehen, so dass die ganze Klasse von der Arbeit profitieren kann.

„Wir haben uns in den letzten Wochen intensiv mit Schwingungen und Wellen beschäftigt. Heute werden Sie die Gelegenheit haben, mit Hilfe Ihres Basiswissens selbständig Kenntnisse über Klänge und Höreindrücke zu erwerben.

Sie werden in dieser Lektion in Zweiergruppen arbeiten; die Gruppeneinteilung können Sie der Liste an der Wand entnehmen. Pro Gruppe steht Ihnen ein Computer zur Verfügung, auf dem Sie Klangbeispiele verschiedener Instrumente vorfinden. Die Beispiele bestehen aus einzelnen Tönen. Auf dem Tisch finden Sie eine Liste aller aufgenommenen Instrumente; zusätzlich habe ich Ihnen angegeben, welchen Familien die Instrumente angehören. Auf jedem Computer ist die Software ‘Overtone’ installiert. Damit können Sie die Klangbeispiele und deren Spektren analysieren; was man darunter genau versteht, können Sie dem Text ‘Basiswissen’ entnehmen, das ich Ihnen ausgeteilt habe. Eine kurze Programmdokumentation zur Analyse-Software liegt im Computerraum auf.

Wählen Sie einige Klangbeispiele aus und untersuchen Sie diese. Gehen Sie dabei jenen Aspekten nach, die Sie interessant finden. Wie sehen die Klangspektren der Instrumente aus? Wie entwickeln sie sich im Laufe der Zeit? Können Sie Aspekte der Klangspektren mit Ihren Höreindrücken in Verbindung bringen? Achten Sie darauf, dass sie Aufnahmen verschiedener Instrumente untersuchen; so können Sie vielleicht wichtige Unterschiede feststellen. Halten Sie die Spektren und Ihre Beobachtungen fest.

Zusätzlich zu den Audiodateien haben Sie auch die Möglichkeit, eigene Klänge, Geräusche, Gesänge, Sprache oder Instrumente aufzunehmen und zu untersuchen. Zu diesem Zweck sind einige der Computer mit Mikrofon ausgerüstet. Achten Sie darauf, dass Sie ab und zu die Arbeitsstation wechseln, so dass alle Gruppen die Gelegenheit haben, einmal an einem Computer mit Mikrofon zu arbeiten. Nehmen Sie dort verschiedene Klänge auf, die Sie interessieren. Wie sieht zum Beispiel das Frequenzspektrum verschiedener Konsonanten aus? Gehen Sie bei der Analyse in gleicher Weise vor wie bei den Musikinstrumenten. Vergleichen Sie Ihre eigenen Klangbeispiele mit jenen der Musikinstrumente.

20 Minuten vor Ablauf der nächsten Stunde werden Sie die Gelegenheit haben, Ihre Resultate mit anderen Gruppen auszutauschen und zu besprechen. Bis dahin haben Sie Zeit, die Klangbeispiele zu analysieren. Ihre Notizen werde ich am Schluss nicht einziehen oder bewerten.“

Prüfung

Nach der Lenkung erfährt die Klasse, wie ihre Kenntnisse aus der Unterrichtseinheit geprüft werden.

„In der nächsten Prüfung werde ich Ihnen 10 Klangspektren vorlegen. Ich werde 4 Blasinstrumente, 4 Saiteninstrumente und 2 Geräusche oder Klänge auswählen. Sie werden aus den vorgelegten Spektren zwei aussuchen und miteinander vergleichen.

Sie werden zu den ausgewählten Spektren 5 Aspekte nennen müssen, die Ihnen auffallen, und diese in ein bis zwei Sätzen erläutern. *Welche* Aspekte Sie nennen, ist Ihnen überlassen.

Zusatzpunkte kriegen Sie, wenn Sie die Spektren den richtigen Instrumenten oder Klängen zuordnen können. Wichtiger ist mir aber, dass Sie Aspekte in den Spektren finden, die nicht auf den ersten Blick offensichtlich sind. Ich will aus Ihrer Antwort sehen, dass Sie sich wirklich mit den Spektren befasst haben.“

Teil 2: Dokumente für die Lehrperson

Erforderliches Vorwissen

Die vorliegende Unterrichtseinheit ist für Gymnasialklassen ein bis zwei Jahre vor der Matura konzipiert. Vor dem Durchführen dieser Unterrichtseinheit muss in der Klasse das Thema „Schwingungen und Wellen" behandelt worden sein. Detaillierte Kenntnisse davon werden von den Schülerinnen nicht verlangt. Sie müssen aber wissen, was Schwingungen und Wellen sind; insbesondere müssen sie harmonische Schwingungen und deren Überlagerung kennen.

Eventuell können Sie als Lehrperson vor dieser Unterrichtseinheit das Thema der Akustik anschneiden, so dass die Schüler zumindest schon einmal vom Wellencharakter des Schalls gehört haben. Notwendig ist dies aber nicht; die wirklich grundlegenden Tatsachen werden kurz auf dem Blatt „Basiswissen" erläutert. Die Klasse sollte vor allem nicht schon *zu viel* über Akustik wissen. Die Schüler können nämlich im Gelenkten Entdeckenden Unterricht vieles selbständig erarbeiten. Sie sehen in den Spektren, dass die Tonhöhe der Frequenz, die Lautstärke der Amplitude und die Klangfarbe der Schwingungsform bzw. der spektralen Zusammensetzung des Klangsignals entsprechen. Die physikalischen Grundlagen aller relevanten Höreindrücke sind also prinzipiell mit den Klangbeispielen zu ergründen. Je weniger die Klasse schon über Akustik weiss, desto mehr kann sie durch Gelenktes Entdeckendes Lernen erfahren und herausfinden.

Simulation möglicher Ergebnisse

In diesem Kapitel versuche ich, mögliche Resultate zusammenzutragen, die in den Köpfen der Schülerinnen im Verlauf dieser Unterrichtseinheit entstehen könnten. Es handelt sich bei diesen Ideen aber weder um „Musterlösungen" noch um „Minimalanforderungen". Die hier simulierten Ergebnisse sind nicht einfach „richtig" oder mustergültig; sie enthalten auch Vermutungen, Irrwege, nebensächliche Beobachtungen, die durch das vorliegende Material und die Lenkung in dieser Unterrichtseinheit angestossen werden könnten. Und sie sind keineswegs umfassend und abschliessend. Minimalanforderungen andererseits sind es allein deshalb nicht, weil die hier dargelegten Überlegungen viel zu umfangreich sind, als dass sie in einer Lektion alle erarbeitet werden könnten. Der Vollständigkeit halber habe ich mich mit allen Klangbeispielen befasst, die zur Analyse bereit liegen. Auf Grund der vorgegebenen Zeit haben Schüler aber nicht die Möglichkeit, alle Klangbeispiele zu analysieren. Sie sind gezwungen, eine Auswahl der Instrumente zu treffen, die sie interessieren.

Es wäre auch nicht sinnvoll, mehr Zeit zur Analyse zur Verfügung zu stellen. Es nützt den Lernenden nichts, die Klangbeispiele in ihrer Gesamtheit zu analysieren; viel wichtiger ist es, dass sie einige repräsentative Beispiele sehen. Sieht man zum ersten Mal solche Klangspektren, wird man von einer Fülle von neuen Eindrücken und Beobachtungen überschwemmt. Die Materie ist hoch interessant. Jedes Musikinstrument hat ein charakteristisches Spektrum, gewisse Phänomene sind in ganzen Instrumentenfamilien zu beobachten. Mit der Zeit hat man jedoch die wesentlichen Phänomene entdeckt. Dauert die Phase des Analysierens zu lange, besteht die Gefahr, dass die Untersuchungen der Klangbeispiele zur öden Routine verkommen.

Willkommene Unterhaltung bietet die Möglichkeit, eigene Klänge, Geräusche, Sprache, Gesang usw. aufzunehmen und zu analysieren. Man ist bald versucht, möglichst eigenartige Spektren hervorzubringen, und lernt auf diese Art eine Vielzahl von Unterschieden zwischen den Spektren von Musikinstrumenten und jenen anderer Klänge und Geräusche kennen.

Allgemeine Beobachtungen

Je nach individuellen Vorkenntnissen der Lernenden dürfte diese Unterrichtseinheit ganz unterschiedliche neue Erkenntnisse bringen. Wer noch wenig über Akustik weiss, findet bald heraus, dass Instrumentenklänge aus diskreten Obertönen zusammengesetzt sind. Die Spektren zeigen keine beliebigen Kurven mit Höhen und Tiefen, sondern ganz im Gegenteil sehr klar ausgeprägte Maxima, Nadelspitzen ähnlich. Die Obertonfrequenzen sind nicht beliebig und zufällig, sondern ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz. Der Vergleich der Spektren verschiedener Töne desselben Instruments zeigt, dass die Frequenz eines Tones dessen Tonhöhe entspricht. Und was macht die Lautstärke eines Tones aus? Offensichtlich die Amplitude der Schwingung. Die meisten Instrumente werden beim Ausklingen immer leiser; gleichzeitig wird die Amplitude des Schallpegels immer kleiner.

Bei vielen Instrumenten, etwa beim Klavier, bei den Flöten, oder beim Akkordeon, hat die Grundschwingung im Spektrum die grösste Amplitude. Doch ist dies keineswegs die Regel: andere Instrumente, wie etwa das Fagott, haben eine nur sehr schwach ausgeprägte Grundfrequenz und im Vergleich dazu sehr laute Obertöne. Dennoch entspricht die wahrgenommene Tonhöhe der Höhe der Grundfrequenz! Mit etwas Detektivarbeit finden begabte Schüler dies durch Vergleiche von Tönen mit schwacher und solchen mit starker Grundfrequenz heraus. Dies setzt allerdings nebst der Detektivarbeit ein musikalisches Gehör voraus; solche Schlüsse können nicht von der ganzen Klasse erwartet werden.

Die Obertonspektren der meisten Instrumente spielen sich im Bereich bis 5 kHz oder höchstens 10 kHz ab. Oberhalb sind nur noch sehr wenige Obertöne in den Spektren sichtbar. Wer die Grundlagen der Akustik bereits kennt, wird durch diese Beobachtung eventuell dazu angestossen, eine Brücke zu Kompressionstechniken für Audiodateien zu schlagen. Während Musik-CDs Frequenzen bis 20 kHz wiedergeben, entfernt zum Beispiel der MP3-Algorithmus Obertonfrequenzen bereits unterhalb dieser Schwelle. Die Klangqualität sollte nach den Beobachtungen an den Klangspektren dadurch nur wenig leiden. Allerdings hängt die wahrgenommene Lautstärke nicht linear, sondern logarithmisch vom Schalldruck ab. Folglich ist die Untersuchung der linear aufgetragenen Amplituden zur Klärung solcher Fragen nur bedingt aufschlussreich.

Unterschiedliche Töne desselben Instruments haben zum Teil recht unterschiedliche Obertonspektren. Genau diesen Umstand nutzen Musikkomponisten aus; denn eine Melodie klingt nicht in allen Tonlagen eines Instruments genau gleich.

Ein Gitarrist, ein Pianist oder eine Cembalospielerin haben nach dem Anzupfen bzw. Anschlagen eines Tons keine Möglichkeit mehr, diesen zu verändern. Die Frequenzspektren ihrer Töne verändern sich deshalb mit der Zeit kaum mehr. Streicher und Bläser hingegen können einen Ton ihres Instruments während seiner ganzen Dauer noch beeinflussen. Noch deutlicher als akustisch machen sich Nuancen ihrer Klänge optisch in den Spektren bemerkbar.

Gewisse Klangfarben lassen sich direkt aus den Klangspektren herauslesen. Spektren mit vorwiegend hohen Frequenzen liefern einen hellen, solche mit vielen tiefen einen dumpfen Klang. Ein schmales Spektrum klingt sehr rein, während ein breites, tiefes Spektrum wie jenes vom Fagott einen warmen Klang erzeugt. Blechblasinstrumente, die auch eher breite Spektren aufweisen, klingen hingegen weniger warm als ein Fagott. Ihre Obertonfrequenzen liegen relativ hoch.

Beobachtungen zu den einzelnen Musikinstrumenten

Violine

Im Klangspektrum der Violine findet man zwei Gruppen stärker ausgeprägter Obertöne: die tieferen bis zur 5-fachen Grundfrequenz sowie die höheren ab 8-facher Grundfrequenz. Die dazwischen liegenden Frequenzen sind schwach ausgeprägt. Das Klangsignal hat grössere Zacken gegen unten, dazwischen zahlreiche kleinere.

Bratsche

Die Bratschentöne erzeugen ein volles, breites Spektrum. In den drei verschiedenen Klangbeispielen wurde der Ton wohl unterschiedlich gestrichen; jedenfalls gibt es wenige gemeinsame Merkmale, die in allen drei Spektren deutlich zu sehen wären. Generell sind aber viele tiefe Obertöne stark ausgeprägt. Die Bratschentöne werden mit einem Vibrato gespielt, das sich sehr deutlich im Klangspektrum widerspiegelt. In der ersten Aufnahme zum Beispiel schwankt die Grundfrequenz zwischen 290 und 300 Hz, die Obertöne sind jedoch Vielfache von 295 Hz.

Cello

Die drei Cellotöne werden unterschiedlich gespielt; dementsprechend liefern die drei Klangbeispiele unterschiedliche Spektren. In der ersten Aufnahme ist der Ton zu Beginn unsauber gespielt; eine zweite Saite schwingt mit. Im Spektrum findet man deshalb Vielfache von 295 Hz, obwohl der „eigentliche“ Ton eine Frequenz von 355 Hz hat. In der ersten wie in der dritten Cello-Aufnahme können die Obertöne ähnlich wie bei der Violine wieder in zwei Gruppen unterteilt werden. Offenbar handelt es sich hierbei um eine Eigenart von Streichinstrumenten.

Klavier

Klaviertöne sind gleich nach dem Anschlag deutlich lauter als danach; sie klingen rasch ab. In der lauten Phase verändert sich das Klangspektrum der Töne kaum, beim Ausklingen hingegen variieren die Amplitudenverhältnisse zwischen den einzelnen Obertönen sehr stark. Kurz nach dem Anschlagen nehmen die Amplituden im Spektrum bis ungefähr zum 8. Oberton linear ab. Die Frequenzen der Obertöne sind nicht genau ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz; sie kommen aber ganzzahligen Vielfachen sehr nahe. Am Anfang der zweiten Klangaufnahme mischt sich ein Rauschen in die tiefen Frequenzen.

Cembalo

Das Cembalo produziert ein zackiges, gezähntes Klangsignal. Die Obertöne sind etwa bis zu einer Frequenz von 10 kHz sichtbar, jedoch unterschiedlich ausgeprägt. Erster und zweiter Oberton besitzen eine grosse Amplitude. Nach oben hin tauchen immer wieder kleinere Gruppen von Obertönen auf. Das Spektrum zeigt, dass selbst einfachere Schwingungsformen aus einer Vielzahl harmonischer Schwingungen zusammengesetzt sein können. Die Cembalospielerin hat dreimal denselben Ton gespielt, den sie nach dem Tastenanschlag nicht mehr beeinflussen konnte. Trotzdem weisen die drei Spektren kleine Unterschiede auf.

Blockflöte

Die Blockflöte hat ein schwach ausgeprägtes Obertonspektrum: der 1. und der 2. Oberton sind vorhanden, der 4. und 6. schwingen schwach mit, der Rest ist kaum erkennbar. Das aufgezeichnete Klangsignal erinnert an einen Kamm.

Altflöte

Die Spektren der zwei Töne in den Audiodateien unterscheiden sich deutlich. Die Intensität des Grundtons und des 2. Obertons im ersten Klangbeispiel sind über die Zeit konstant, die Intensität des 1. Obertons schwankt. Die einzelnen „Berge“ in der Schwingungsfunktion des Schalldrucks haben am rechten Rand eine Terrasse. Diese wird offenbar von der Intensität des 1. Obertons bestimmt: je lauter der Oberton, desto breiter ist die Terrasse. Im zweiten Klangbeispiel sind mehr Obertöne sichtbar. Es schwingen aber fast nur ungerade Vielfache der Grundfrequenz mit.

Querflöte

Der Verlauf des Schalldrucks gleicht einer „zerquetschten“ harmonischen Schwingung. Die einfache Schwingungsform könnte einen Zusammenhang zum relativ armen Spektrum haben. Überlegung dieser Art können allerdings etwas zu kurz greifen: auch die Oboe hat eine eher einfache Schwingungsform, im Vergleich zur Querflöte aber ein breiteres Spektrum; sägezahn- oder rechteckförmige Schwingungen sehen einfach aus, obwohl sie aus sehr vielen harmonischen Schwingungen zusammengesetzt sind. Im ersten Klangbeispiel findet man nebst einem ausgeprägten Grundton und einem gut sichtbaren 2. Oberton nur noch den 1. und 3. Oberton. Im zweiten Klangbeispiel erscheinen zwar etwas mehr Obertöne, vom 2. an aufwärts sind sie jedoch ziemlich schwach ausgeprägt.

Klarinette

Im Gegensatz zur Querflöte hat die Klarinette ein breites Spektrum. Wie beim Fagott wirkt auch der Klang der Klarinette warm. Im zweiten und dritten Klangbeispiel sind ungerade Vielfache der Grundfrequenz deutlich stärker ausgeprägt als andere.

Oboe

Die Oboe hat etwas "Zischendes" im Ton. Obwohl ihre Schallschwingung „mehr oder weniger harmonisch“ aussieht, zeigt die Klanganalyse ein eher breites Spektrum. Im zweiten Klangbeispiel oszilliert die Amplitude der Schwingung; abgesehen davon sind sowohl die Schwingungsform als auch das Frequenzspektrum der beiden ersten Klangaufnahmen sehr ähnlich. In der dritten Audiodatei wird das Spektrum noch breiter als in den vorangehenden beiden.

Sopransaxofon

Das Klangsignal des Sopransaxofons zeigt einzelne Spitzen nach unten, dazwischen reihen sich kleinere Hügel aneinander. Die Oberschwingungen sind bis zum 4. Oberton sichtbar. Ihre Amplituden fallen zu höheren Frequenzen hin kontinuierlich ab.

Altsaxofon

Je nach behandeltem Stoff kann das Spektrum des Altsaxofons die Schüler an unterschiedliche Verteilungen erinnern: es kommt einer Poissonverteilung recht nahe, und es erinnert an die Maxwell-Boltzmann-Verteilung der Geschwindigkeiten von Gasteilchen. Auffällig ist jedenfalls, dass der unterste Ton im Spektrum nicht der lauteste ist. Trotzdem entspricht die wahrgenommene Tonhöhe der Frequenz des untersten, des Grundtons, wie man durch Vergleich der Tonhöhen der Flöten herausfindet. Die Schwingungsform des Klangsignals erinnert an einen „Doppelgipfel“.

Fagott

Der zeitliche Verlauf des Schallpegels weist markante, grosse „Schlenker“ auf, dazwischen findet man kleinere Oszillationen. Das Spektrum spielt sich wegen des tiefen Tons hauptsächlich im Bereich unter 2 kHz ab; es ist dort aber ausgesprochen breit im Vergleich zu anderen Instrumenten. Dies spiegelt sich vermutlich im warmen Klang des Fagotts wieder. Der Grundton und der 1. Oberton sind nur sehr schwach ausgeprägt. Die Obertöne sind viel lauter. Selbst der 13. Oberton ist noch gut sichtbar, obwohl er im Vergleich zum Grundton schon sehr hoch ist. Die Obertonfrequenzen des Fagotts stehen nicht immer genau in einem ganzzahligen Verhältnis zur Grundfrequenz.

Trompete

Trompetenklänge erzeugen ein eher breites Spektrum an Obertönen. Zum 2. oder 3. Oberton hin steigen die Amplituden an, von da an fallen sie wieder ab. Trotz der Breite des Spektrums tönt die Trompete zum Beispiel im Vergleich zum Fagott weniger warm. Das hat vermutlich damit zu tun, dass die Trompete höherfrequentige Obertöne hat. Im dritten Klangbeispiel variiert das Obertonspektrum mit der Zeit, gleich aber im Grossen und Ganzen denjenigen der beiden anderen Tonaufnahmen.

Posaune

Im Verlauf der Zeit ändern sich Klangfarbe und Spektrum der Posaunentöne. Insgesamt sind die Spektren überall breit. Die Obertöne sind bis zur 7-fachen Grundfrequenz noch stark ausgeprägt. Ein sehr breites Spektrum zeigt vor allem das dritte Klangbeispiel: dort sind Obertöne bis zur 20-fachen Grundfrequenz sichtbar! Das hörbare Rauschen beim Anblasen des Tons widerspiegelt sich im Spektrum: die Amplitudenmaxima sind ungewöhnlich breit, und tiefe Frequenzen werden von einem Rauschen überlagert.

Horn

Das Horn zeigt einen ähnlichen Verlauf des Klangsignals wie die Altflöte; im Vergleich zur Altflöte ist die Schwingung beim Horn noch etwas „runder“. In allen Klangbeispielen dominiert der erste Oberton. Zu hohen Frequenzen hin fallen die Amplituden der Obertöne rasch ab. Beim Anblasen mischen sich Nebengeräusche in den Klang. Das Spektrum wird gestreut; man findet viele Frequenzen vor, die nicht in ganzzahligem Verhältnis zur Grundfrequenz stehen.

Gitarre

Das Klangsignal der Gitarre hat über die Schwingungsperiode hinweg nur wenige Oszillationen. Erwartungsgemäss sind im Spektrum wenige Frequenzen zu finden; vom 4. Oberton an fallen die Amplituden sehr rasch ab. Kurz nach dem Anzupfen der Saite mischen sich verschiedene Frequenzen ins Spektrum, die nicht zum Grundton passen. Eventuel handelt es sich dabei um Schwingungen einer anderen Saite, die durch Resonanz zum Mitschwingen angeregt wird.

Akkordeon - Register 1

Die drei Töne weisen zum Teil unterschiedliche Spektren auf. Während die erste Klangaufnahme einen Ton mit schwach ausgeprägten Obertönen wiedergibt, sind in den beiden anderen Klangbeispielen der 1. bis 6. Oberton gut sichtbar. Die Spektren wie auch der periodische Verlauf des Schalldrucks sind zeitlich konstant.

Akkordeon - Register 2

Das Audiosignal ist zackig, kantig. Die deutlich hörbaren Lautstärkeunterschiede sind im obersten Analysefenster von Overtone gut sichtbar. Im ersten Klangbeispiel variiert mit der Lautstärke auch das Spektrum. Interessanterweise ist dieses in den leisen Bereichen reicher und breiter als in den lauten! Generell sind etwa 20 Obertöne zu sehen, mit kontinuierlicher Abnahme der Amplitude vom 2. Oberton an aufwärts. In der zweiten Aufnahme verändert sich im Laufe der Zeit nicht nur die Lautstärke ein wenig, sondern auch die Klangfarbe.

Akkordeon - Register 3

Im Gegensatz zum vorangehenden Register variieren die Spektren dieses Registers kaum mit der Zeit. Der Grundton ist jeweils gut ausgeprägt. Das Schallsignal zeigt eine Art harmonische Schwingung mit überlagerten, kleinen Zacken.

Rauschen

„Perfektes" Rauschen wie in der Beispieldatei *noise.wav* von Overtone zeichnet sich durch ein völlig zufälliges, unstrukturiertes, kontinuierliches Spektrum aus, in dem alle Frequenzen, auch sehr hohe, vertreten sind. In der Umgebung wird man ein solches völlig zufälliges Spektrum kaum vorfinden. Selbst beim Rauschen aus dem Radio sind die Frequenzen immer auf einen bestimmten Bereich aus dem Spektrum konzentriert. Innerhalb dieser Bandbreite aber sind keine einzelnen, isolierten Maxima zu finden. Das Spektrum ist im Gegensatz zu den Tönen der Musikinstrumente kontinuierlich und zufällig.

Sprache

Unterschiedliche Laute zeigen sehr unterschiedliche Spektren. Bedeutende Unterschiede findet man vor allem zwischen Konsonanten und Vokalen. Vokale sind mehr oder weniger aus diskreten Frequenzen zusammengesetzt; ihre Spektren gleichen jenen von Musikinstrumenten. Konsonanten hingegen weisen kontinuierliche Spektren auf, ähnlich dem eines Rauschen. Ein gesprochenes „i" beispielsweise ist aus wenigen diskreten, tiefen Frequenzen zusammengesetzt, die wie bei den Instrumenten ganzzahlige Vielfache einer Grundfrequenz sind. In hohen Lagen aber, dort wo in einem ausschliesslich diskreten Spektrum etwa der 30. Oberton angesetzt wäre, findet man ein begrenztes kontinuierliches Spektrum, in dem keine einzelnen Frequenzen mehr auszumachen sind. Im Gegensatz dazu hat ein „o" kaum kontinuierliche Komponenten im Spektrum, sondern besteht fast ausschliesslich aus harmonischen Oberfrequenzen. Ein „e" gleicht im Spektrum dem „i", während ein „u" dem „o" nahe kommt. Auch zwischen einzelnen Konsonanten lassen sich deutliche Unterschiede festmachen. Generell reicht ihr Spektrum in viel höhere Bereiche als jenes von Vokalen. Sehr hoch hinauf reicht das Spektrum eines gesprochenen „s", während jenes von „f" eher in mittleren Bereichen lokalisiert ist. Im Gegensatz zu einem reinen Rauschen sind die kontinuierlichen Spektren von Konsonanten strukturiert; sie zeigen klare Maxima in mittleren Frequenzen und fallen in hohen und tiefen Lagen ab. Sehr kurze Konsonanten wie „p", „t", „k" usw. lassen sich kaum sinnvoll analysieren.

Prüfung

In der Prüfung werden den Schülerinnen 10 Klangspektren vorgesetzt. Damit die Auswahl das Informationsangebot gut repräsentiert, sind alle Instrumentenfamilien zu berücksichtigen. Zu empfehlen ist zum Beispiel folgende Zusammenstellung: 3 Holz-, 1 Blechblasinstrument, 1 bis 2 Streichinstrumente, Klavier, Gitarre, eventuell Cembalo oder Akkordeon, Rauschen, gesprochener Laut.

Als Orientierungshilfe für Lehrpersonen habe ich im Anhang pro Instrument drei charakteristische Klangspektren abgedruckt. Diese Spektren können auch als Kopiervorlage für die Beispiele in der Prüfung verwendet werden. Als Lehrperson können Sie sich mit Hilfe dieser Beispiele eine Vorstellung davon machen, wie die Spektren überhaupt aussehen und welche Antworten Sie in der Prüfung erwarten können. Falls Sie Klangspektren selber aus den Audiodateien erstellen wollen, sollten Sie darauf achten, möglichst charakteristische Beispiele zu nehmen. Die Schüler müssen in der Prüfung zeigen können, dass sie das Wesentliche in den Spektren erkannt haben; es geht nicht darum, ihnen „Sherlock Holmes-Aufgaben" zu stellen mit Spektren, die kaum etwas Typisches über die Instrumente zeigen.

Die Prüfungsaufgabe zu den Klangspektren sieht wie folgt aus:

„Sie haben vor Kurzem am Computer selbständig Klangbeispiele untersucht. Sie haben die Spektren der Klänge betrachtet und untersucht, welche Frequenzen mit welcher Intensität vorkommen. Auf dem Beiblatt finden Sie 10 solche Klangspektren; 8 davon stammen von Instrumenten, die Sie untersucht haben, die restlichen repräsentieren irgendwelche Geräusche aus der Umwelt.

Aufgabe: Wählen Sie **2 Spektren** aus.

(a) Nennen Sie **5 Aspekte**, die Ihnen an den Spektren auffallen. Sie können die beiden Spektren auch miteinander vergleichen.

(b) Versuchen Sie, die Spektren einem Instrument oder einem Geräusch, Klang etc. zuzuordnen.

Notieren Sie pro Beobachtung 2 bis 3 stichwortartige Sätze. Sie können direkt in die Spektren hinein notieren. Trennen Sie Ihre 5 Punkte aber klar ersichtlich ab.

Massstab: (a) Sie erhalten einen Punkt für jeden **wesentlichen** Aspekt, den Sie genannt haben. Damit meine ich, dass Sie nicht einfach das Diagramm in Worte fassen, sondern Beobachtungen, Kuriositäten, charakteristische Eigenschaften des Spektrums notieren. Notieren Sie *nicht mehr als 5 Beobachtungen*. Ich bewerte nur die ersten 5 Punkte.

(b) Wenn Sie ein Spektrum korrekt einem Instrument oder Geräusch und das zweite mindestens korrekt einer Instrumentenfamilie zuordnen, erhalten Sie einen Zusatzpunkt.

Insgesamt können Sie in der Aufgabe maximal **5 Punkte** holen."

Was verstehe ich unter „wesentlichen" Aspekten? Sicher *nicht* akzeptiert werden Tautologien der Form: „Im Spektrum findet man eine Schwingung der Frequenz 840 Hz mit einer relativen Amplitude von 60%". Die Schüler sollen die Klangspektren nicht einfach *ablesen*, sondern zusammenfassen, erklären, vergleichen, mit eigenen Beobachtungen aus dem Unterricht in Zusammenhang bringen. Gute Antworten gehen auf die Besonderheiten der vorgelegten Spektren ein. Eventuell gehen begabte Schülerinnen auch auf den Höreindruck ein. Gerade beim letzten Punkt kann es gut sein, dass die Antworten nicht mit dem übereinstimmen, was man tatsächlich hört. Das muss man allerdings als Lehrkraft in Kauf nehmen; die Antworten in der Prüfung widerspiegeln das, was die Schüler selbständig, ohne Korrektur der Lehrperson, herausgefunden haben. Gut begründete Antworten geben in der Prüfung Punkte.

Ideen und Anregungen zur Weiterentwicklung

Unter Mithilfe der Klasse können Sie als Lehrkraft die Sammlung von Klangbeispielen auf der beigelegten CD-ROM selbständig erweitern und bereichern. Die Schülerinnen eines Gymnasiums spielen in der Regel eine sehr breite Palette von Instrumenten. Unter Umständen

erklären sich einige bereit, einige Töne vorzuspielen und als Ergänzung der Sammlung der Klangbeispiele abspeichern zu lassen.

Die Tonaufzeichnung von Instrumenten erfordert aber zusätzliche Zeit. Die Klangbeispiele, die die Schüler in Form von Audiodateien vorgesetzt bekommen, sollten qualitativ einwandfrei sein. Deshalb lässt sich die Tonaufnahme kaum direkt in den Unterricht integrieren; jegliche Hintergrundgeräusche und Gespräche aus dem Klassenverband würden die Klangbeispiele „verunreinigen". Dieses Kapitel fasst kurz meine Erfahrungen mit der Tonaufnahme zusammen. Es soll Ihnen einige Hinweise zur Aufnahmetechnik geben und Ihnen helfen, Fehler bei der Aufnahme zu vermeiden.

Hardwarevoraussetzungen

Für die digitale Tonaufnahme auf einem Computer ist leistungsfähigere Hardware nötig als zum Abspielen und Analysieren der Klangbeispiele. Für Windows-Systeme würde ich folgende Leistungsmerkmale empfehlen:

Prozessor	Intel Pentium II, 400 MHz
Arbeitsspeicher	128 MB
Festplattenplatz	200 MB
Sonstiges	Soundkarte, Lautsprecher, Mikrofon

Besonderes Augenmerk ist auf die Multimedia-Ausstattung zu legen. Die Soundkarte muss einwandfrei funktionieren und qualitativ hochwertige Aufnahmen erlauben. Testen Sie die Hardware vor einer Klangaufnahme. Manche Soundkarten arbeiten unsauber und mischen ein Rauschen oder Pfeifen in die Aufnahme.

Sehr zu empfehlen ist die Verwendung eines Minidisc-Geräts zur Aufnahme. Einerseits können Sie dadurch ungebunden einen geeigneten Aufnahmeort wählen, und andererseits verunreinigen die Kühlergeräusche des Computers so nicht die Aufnahme. Stellen Sie das Mikrofon in einiger Entfernung zum Rekorder auf, damit die Betriebsgeräusche des Minidisc-Geräts nicht aufgezeichnet werden.

Die Qualität des Mikrofons hat sehr grossen Einfluss auf die Güte der Aufnahme. Billige Mikrofone registrieren hohe Frequenzen in der Regel schlecht und neigen zum Rauschen. Für meine Tonaufnahmen habe ich ein Mikrofon der Marke Sony, Modell ECM-MS907, verwendet. Stellen Sie das Mikrofon für die Tonaufnahme auf einen Ständer.

Aufnahmetechnik

Als Klangbeispiele spielen die Musiker 3 bis 4 Töne, die je 1 bis 2 Sekunden dauern. Sie spielen *ohne Vibrato* und setzen zwischen den einzelnen Tönen ab. Laute Instrumente wie Blechblasinstrumente müssen in genügendem Abstand zum Mikrofon stehen, damit sich die Töne nicht überschlagen. Bei der Aufzeichnung von leisen Instrumenten wie Gitarre oder Harfe ist es besonders wichtig, dass sich keine Hintergrundgeräusche in die Aufnahme mischen. Überwachen Sie während der Aufnahme stets die Lautstärke. Gute Aufnahmegeräte zeigen die Eingangslautstärke an. Überschreitet diese den zulässigen Höchstwert, muss die Aufnahme wiederholt werden. Andernfalls wird das Klangsignal bei einem bestimmten Schallpegel abgeschnitten und verändert dadurch seine Wellenform. Die Spektralanalyse liefert dann völlig falsche Resultate.

Sind die Töne auf Minidisc aufgenommen, werden sie über eine Buchse an der Soundkarte auf den Computer übertragen. Zur Aufnahme auf dem Computer habe ich die Software „Nero Wave Editor" von Ahead verwendet, die zusammen mit dem Brennprogramm „Nero Burning

ROM“ (*http://www.nero.com/de/index.html*) geliefert wird. Selbstverständlich kann die Aufnahme auch mit anderen Programmen durchgeführt werden. Die folgende Liste zeigt eine Auswahl von Wave-Editoren für Windows, ist aber keineswegs vollständig. Getestet habe ich die einzelnen Programme nicht.

Programm	**Website**
Goldwave	*http://www.goldwave.com/*
Wavelab	*http://www.steinberg.de/*
NGWave	*http://www.ngwave.com/*
WavEditor	*http://mysite.verizon.net/sant6374/bfssoft.html*

Von der Verwendung einfacher Aufnahmeprogramme wie dem Audiorecorder von Windows rate ich ab, da solche Programme kaum Funktionen zum Nachbearbeiten der Klänge besitzen.

Überspielen Sie zuerst alle aufgenommenen Töne auf einmal auf den Computer und speichern Sie die ganze Aufnahme als eine Datei ab. Die einzelnen Töne erkennen Sie gut an der Amplitude des Schallpegels. Kopieren Sie sie in die Zwischenablage, fügen Sie sie in eine leere Datei ein und speichern Sie diese ab. Bei der Aufnahme wird natürlich eine Posaune eine Gitarre um ein Vielfaches übertönen. Entsprechend sind die auf den Computer aufgenommenen Klänge sehr unterschiedlich laut. Damit die Klänge bequem zu analysieren sind, sollten sie aber alle ungefähr dieselbe Lautstärke haben. Sie müssen also noch normalisiert werden. Darunter versteht man das Skalieren der Lautstärke, so dass die Lautstärkemaxima einen bestimmten, definierten Wert annehmen. Die auf CD vorgelegten Klänge sind alle auf -5 dB normiert. Ich empfehle deshalb, neu aufgenommene Klänge ebenfalls so zu normieren, damit die Klänge bei der Analyse alle ähnlich laut klingen.

Bei der Verstärkung sehr leiser Instrumente auf dem Computer wird natürlich auch das Hintergrundrauschen lauter. Dieses können Sie mit Hilfe Ihres Wave-Editors entfernen. Allerdings sollten Sie diese Massnahme wirklich nur dann anwenden, wenn das Rauschen den Klang hörbar stört, weil Sie dadurch das Audiosignal und damit unter Umständen auch das Klangspektrum verändern!

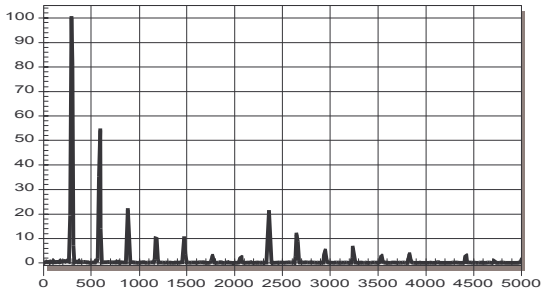
Geben Sie den Klangbeispielen Dateinamen im 8.3-Format, da Overtone die Dateinamen sonst nicht richtig lesen kann. Speichern Sie die Klangbeispiele *unkomprimiert* im wav-Format mit einer Frequenz von 44100 Hz, einer Klangtiefe von 16 Bit und zwei Kanälen (stereo) ab.

Anhang: Beispiele von Klangspektren

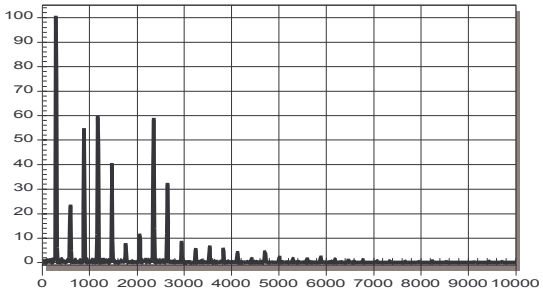
Die folgende Sammlung von Klangspektren soll der Lehrperson als Überblick und eventuell als Kopiervorlage für die Spektren darstellen, die der Klasse in der Prüfung vorzusetzen sind.

Die Angaben unter den Spektren bezeichnen jeweils die Audiodatei und den Zeitpunkt, an dem die Spektren aufgenommen worden sind. Auf der Abszisse sind jeweils Frequenzen in Hertz aufgetragen, auf der Ordinate die relativen Amplituden der Obertöne.

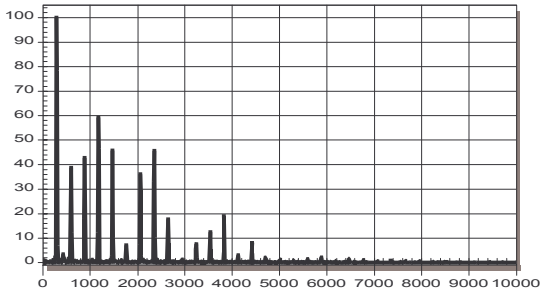
Violine



violin1.wav, 1748 ms

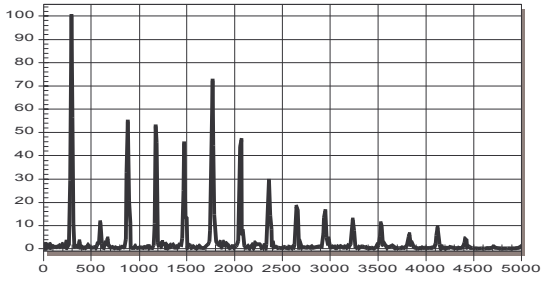


violin2.wav, 2218 ms

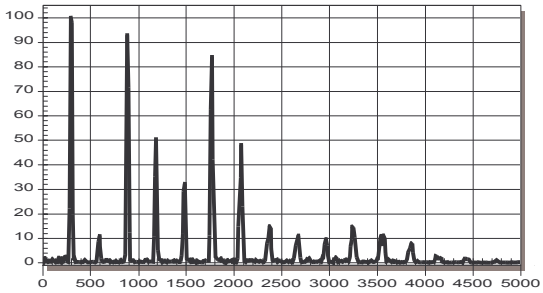


violin3.wav, 967 ms

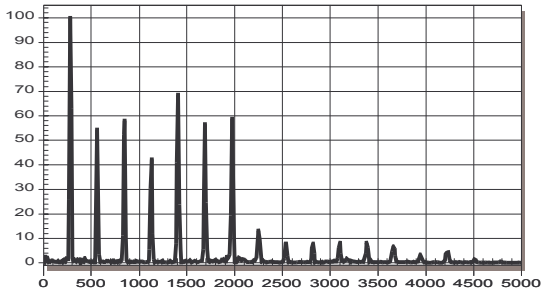
Bratsche



bratsch1.wav, 2589 ms

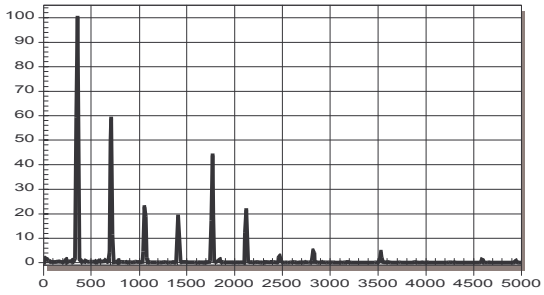


bratsch1.wav, 1769 ms

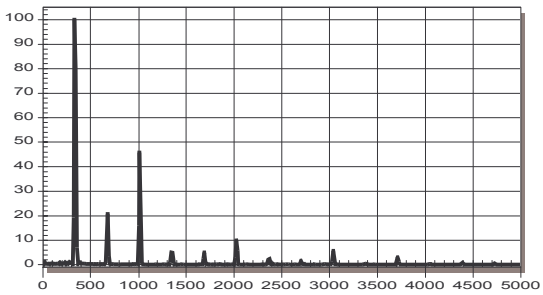


bratsch2.wav, 2068 ms

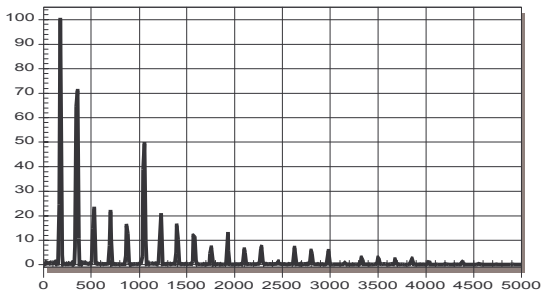
Cello



cello1.wav, 1627 ms

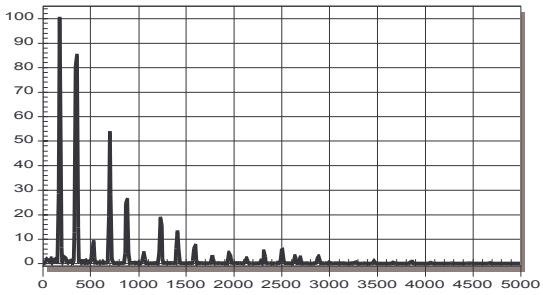


cello2.wav, 1106 ms

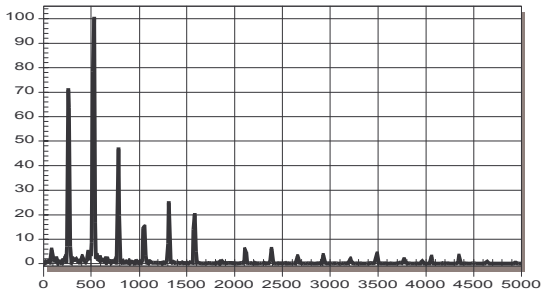


cello3.wav, 1092 ms

Klavier

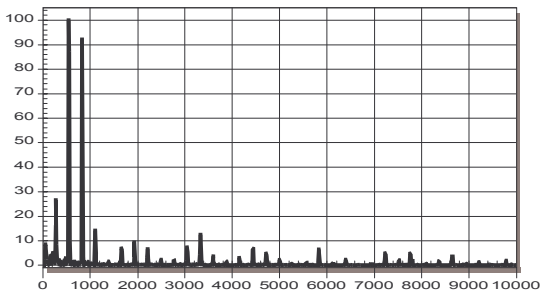


piano1.wav, 241 ms

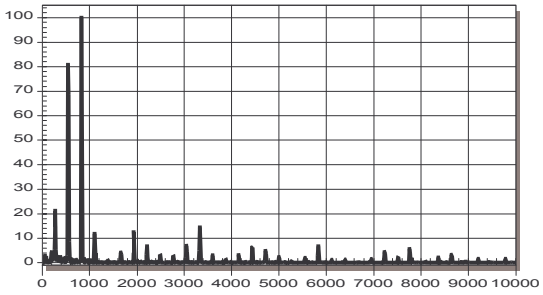


piano3.wav, 103 ms

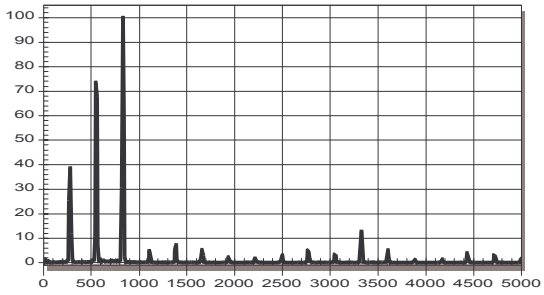
Cembalo



cembalo1.wav, 309 ms

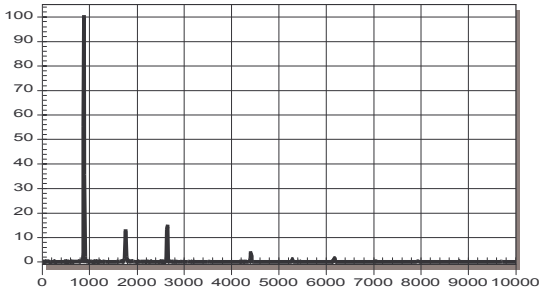


cembalo2.wav, 173 ms

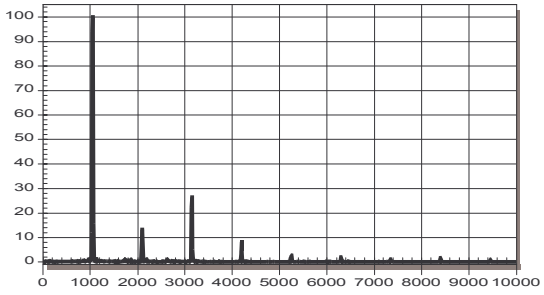


cembalo3.wav, 485 ms

Blockflöte

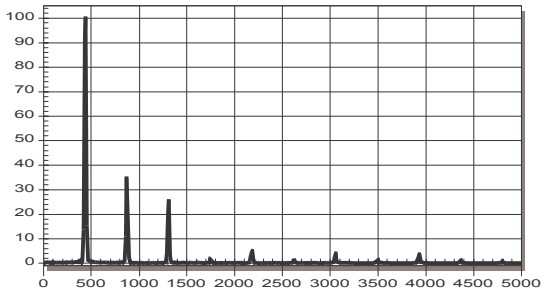


blockfl1.wav, 274 ms

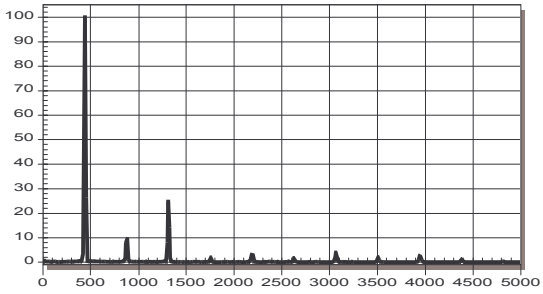


blockfl2.wav, 1054 ms

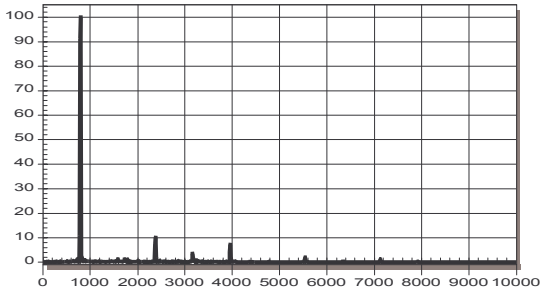
Altflöte



altfl1.wav, 596 ms

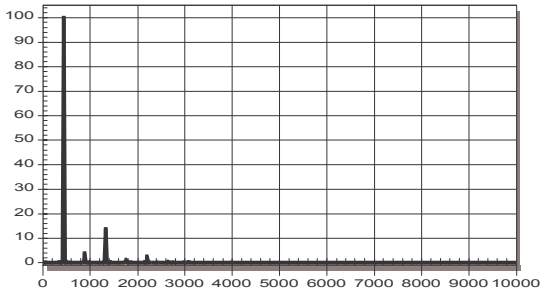


altfl1.wav, 1295 ms

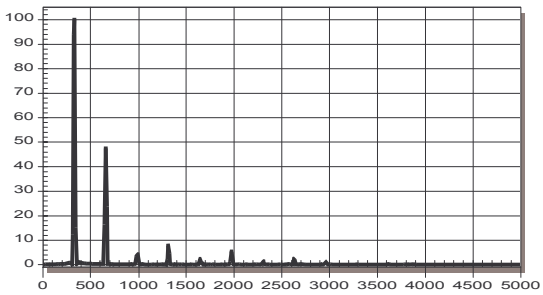


altfl2.wav, 999 ms

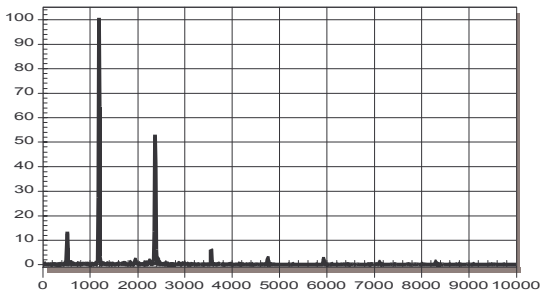
Querflöte



querfl1.wav, 995 ms

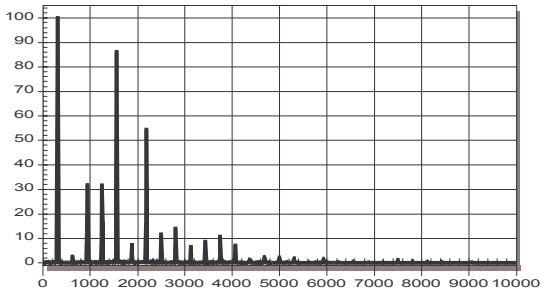


querfl2.wav, 629 ms

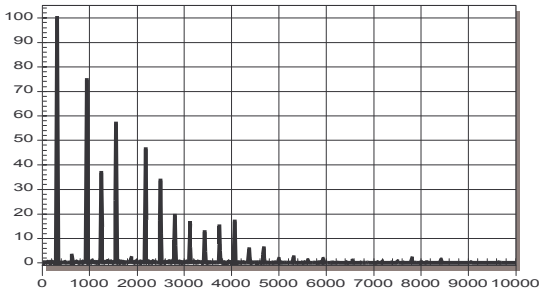


querfl3.wav, 795 ms

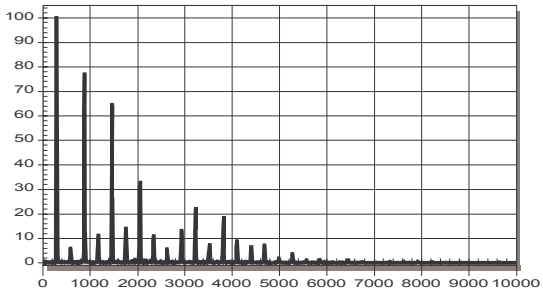
Klarinette



klarin1.wav, 233 ms

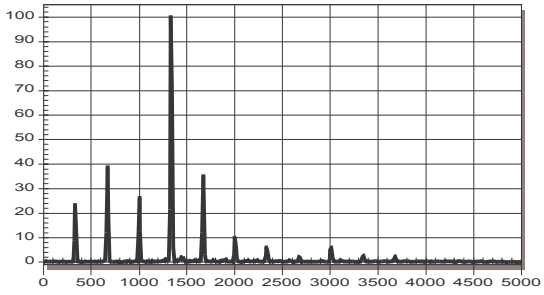


klarin1.wav, 1011 ms

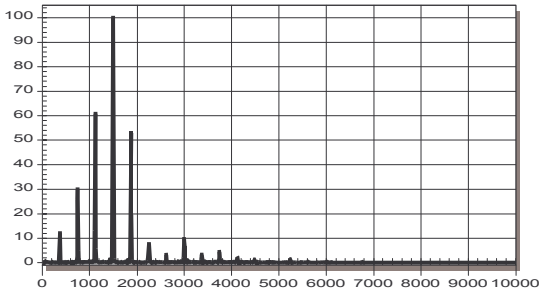


klarin2.wav, 746 ms

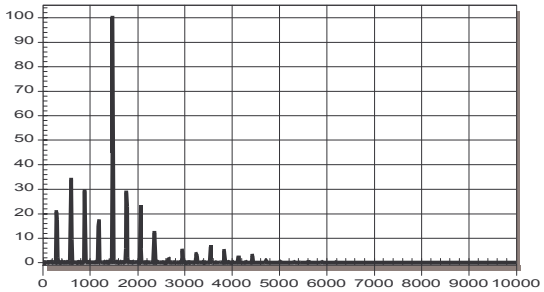
Oboe



oboe1.wav, 418 ms

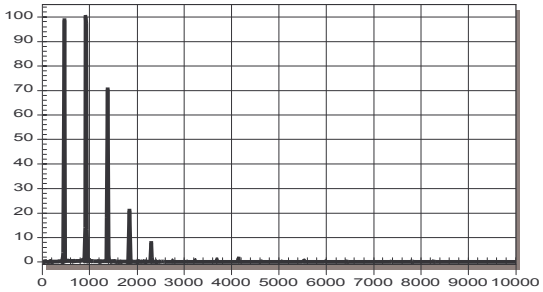


oboe2.wav, 613 ms

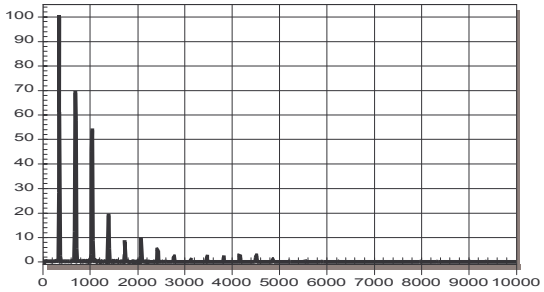


oboe3.wav, 1098 ms

Sopransaxofon

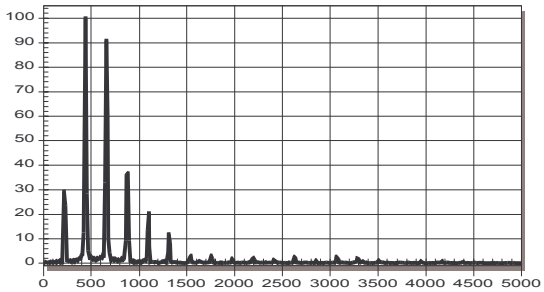


sopsax1.wav, 686 ms

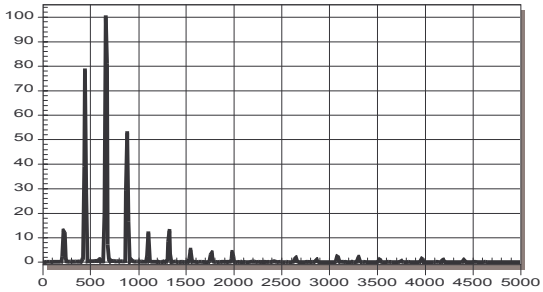


sopsax2.wav, 808 ms

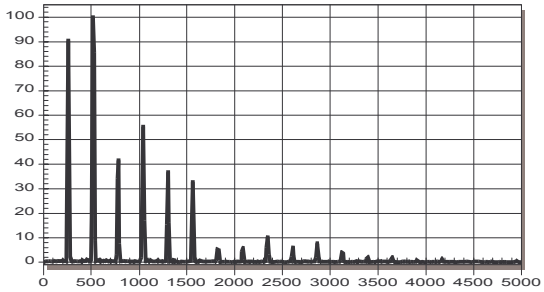
Altsaxofon



altsax1.wav, 188 ms

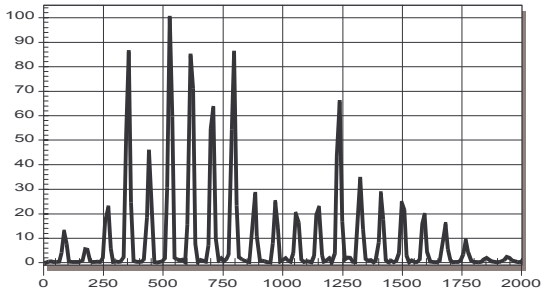


altsax1.wav, 587 ms

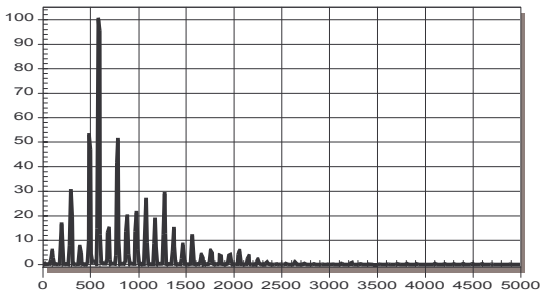


altsax2.wav, 718 ms

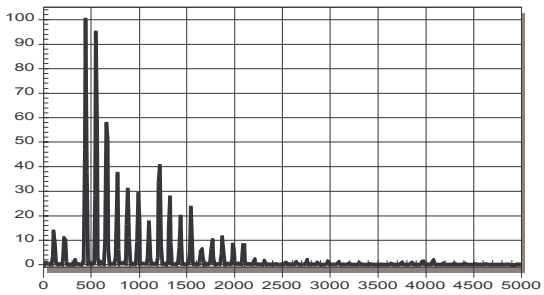
Fagott



fagott1.wav, 419 ms

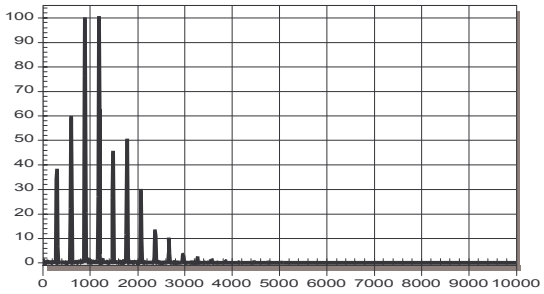


fagott2.wav, 1733 ms

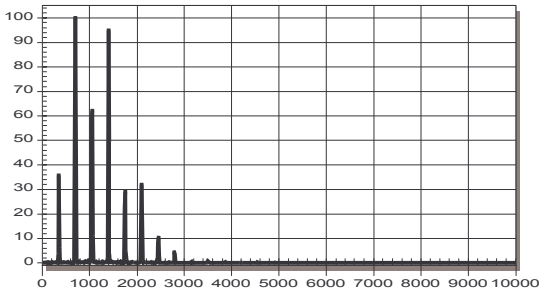


fagott3.wav, 1056 ms

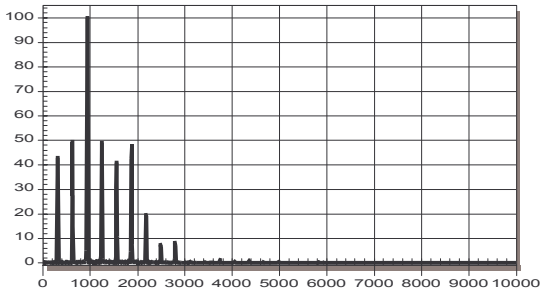
Trompete



trompet1.wav, 1266 ms

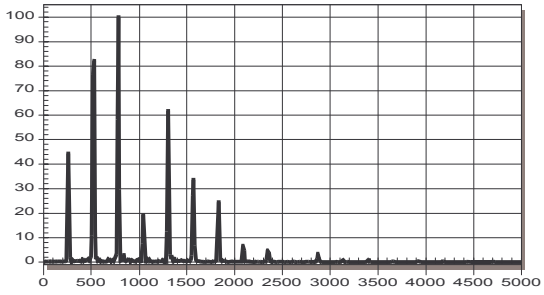


trompet2.wav, 569 ms

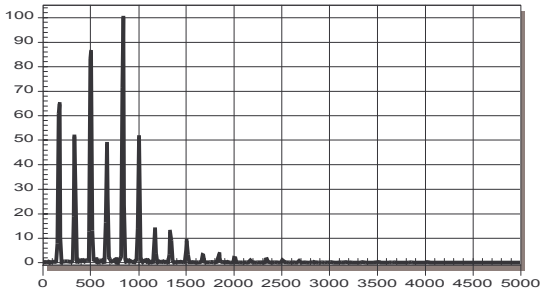


trompet3.wav, 1380 ms

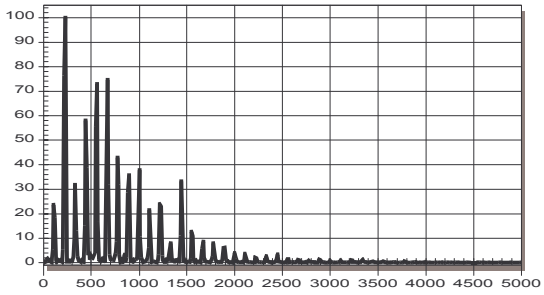
Posaune



posaune1.wav, 1418 ms

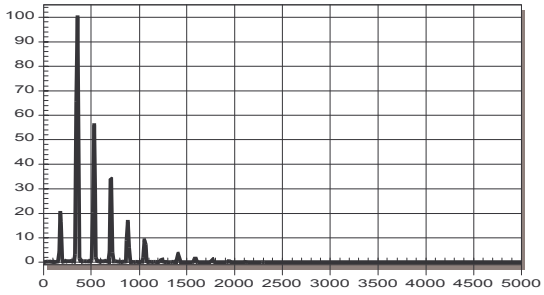


posaune2.wav, 1720 ms

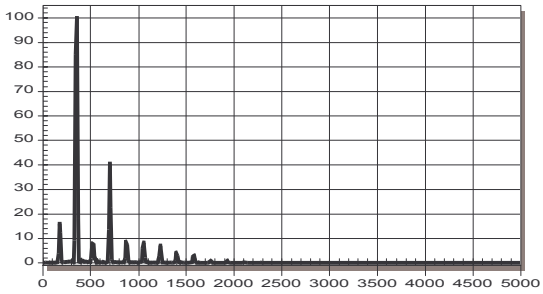


posaune3.wav, 673 ms

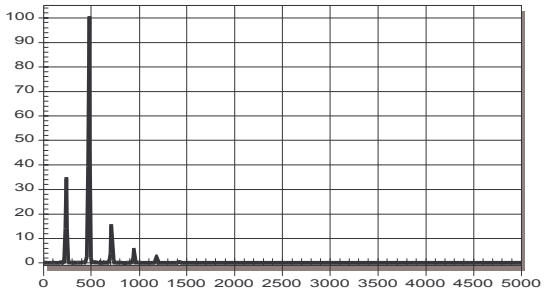
Horn



horn1.wav, 1369 ms

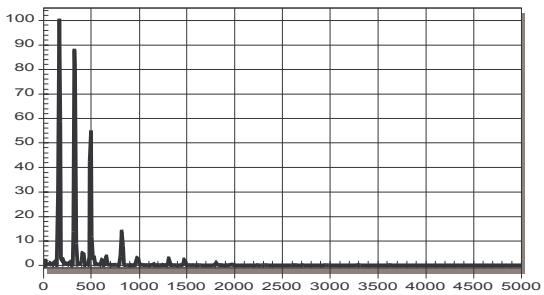


horn1.wav, 2215 ms

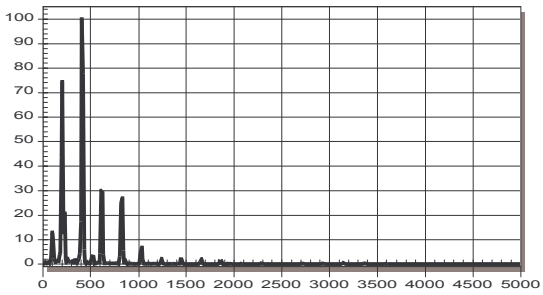


horn2.wav, 408 ms

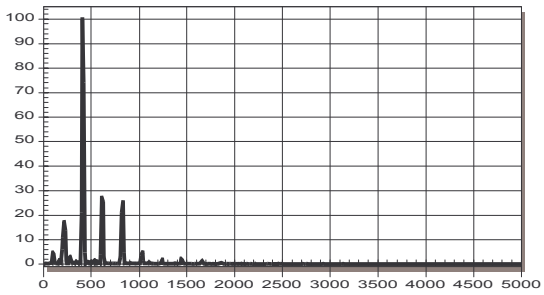
Gitarre



gitarre1.wav, 352 ms

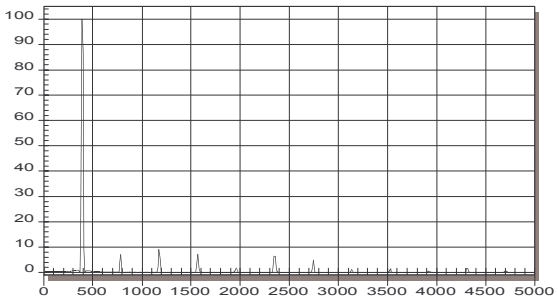


gitarre2.wav, 133 ms

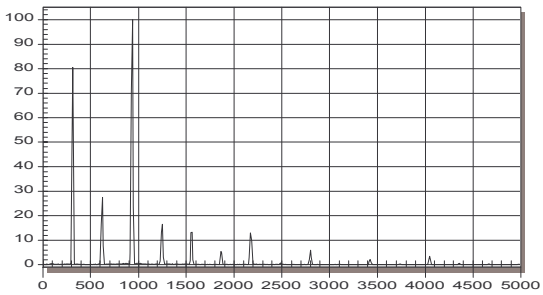


gitarre2.wav, 251 ms

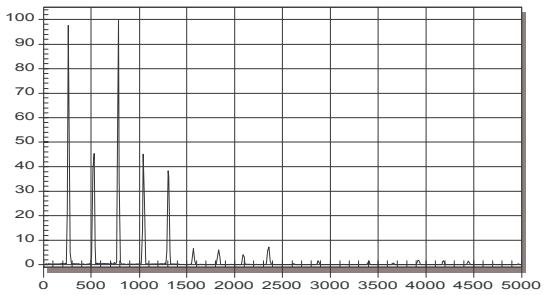
Akkordeon - Register 1



akkord1.wav, 452 ms

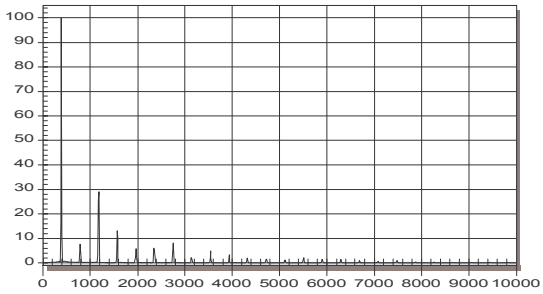


akkord2.wav, 583 ms

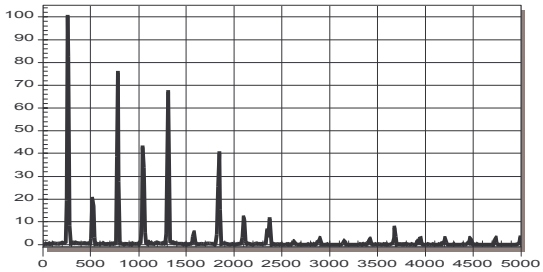


akkord3.wav, 585 ms

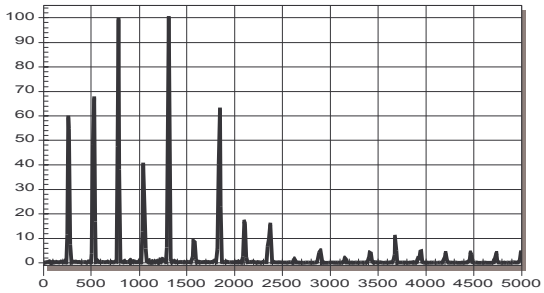
Akkordeon - Register 2



akkord4.wav, 627 ms

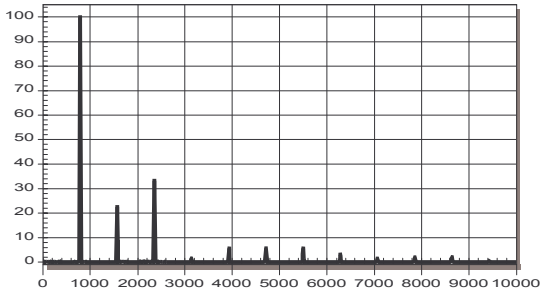


akkord6.wav, 480 ms

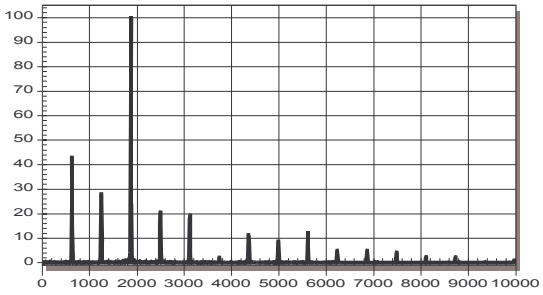


akkord6.wav, 1114 ms

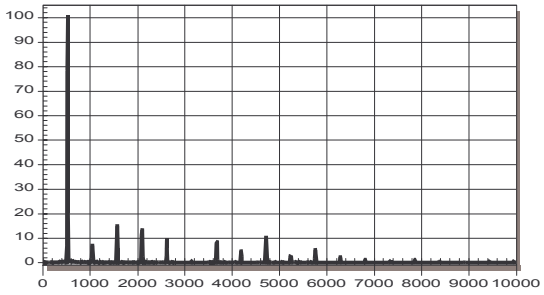
Akkordeon - Register 3



akkord7.wav, 499 ms

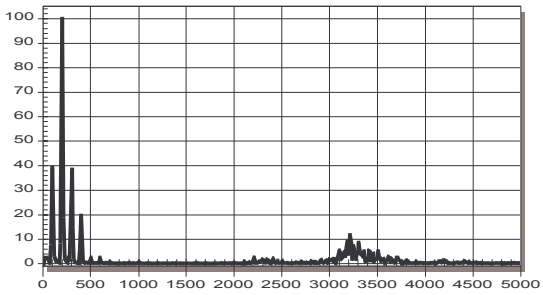


akkord8.wav, 836 ms

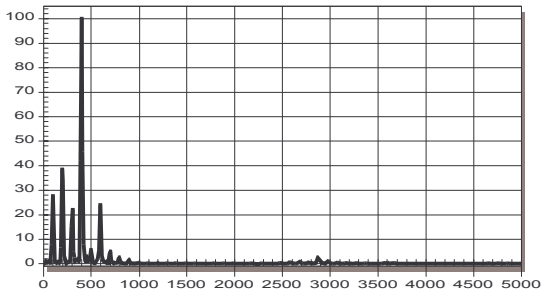


akkord9.wav, 702 ms

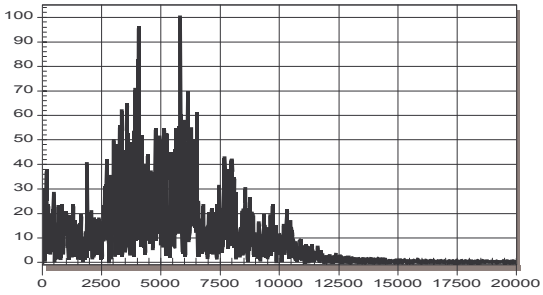
Sprache



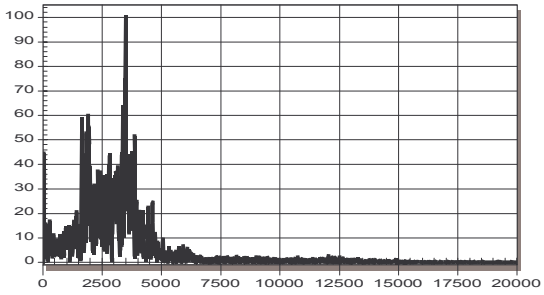
Gesprochenes „i“



Gesprochenes „o“

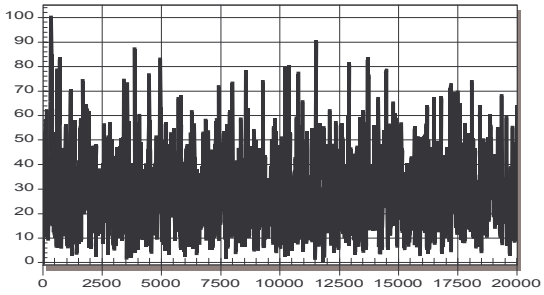


Gesprochenes „s“



Gesprochenes „f“

Rauschen



Dank

Zahlreiche Personen aus meinem Umfeld haben massgeblich dazu beigetragen, dass ich diese Unterrichtseinheit überhaupt in der vorliegenden Form habe vollenden können. Ihnen allen sei an dieser Stelle ganz herzlich für ihre Unterstützung gedankt.

An vorderster Stelle sei meine Mitstudentin Laura Keller erwähnt. Sie hat mir jederzeit bereitwillig Minidisc-Gerät und Mikrofon zur Verfügung gestellt. Ohne diese technische Unterstützung hätte ich die Instrumente kaum in derart guter Qualität aufnehmen können. Auch Frank Meier, der mir seine professionelle Soundkarte zur Verfügung gestellt hat, hat einen wichtigen Beitrag zur Qualität der Klangbeispiele geleistet.

Die reiche Palette an Klangbeispielen auf der CD-ROM ist nur dank dem Einsatz zahlreicher engagierter Musikerinnen und Musiker zu Stande gekommen. Beteiligt an den Aufnahmen waren die Polyband und das Jugendsinfonieorchester Crescendo, die Aufnahmen organisiert haben Viktor Hangartner und Dominique Gärtner. Weitere Klangaufnahmen stammen von Laura Keller, Viviane Mumprecht, Paul Schudel, Sonja Schudel und Immanuel Stampfli.

Die fotografierten Instrumente gehören jungen Musikerinnen und Musikern des Berner Jugendsinfonieorchester; herzlichen Dank auch ihnen und vor allem Benedikt Stampfli, der mir den „Fototermin“ organisiert hat.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Ägidius Plüss, dessen ausgereifte Software Overtone wie massgeschneidert für diese Arbeit ist.

Durch die sorgfältige Durchsicht der Rohfassung durch meine Mutter habe ich etliche Tippfehler ausmerzen können, die mir selber nicht aufgefallen waren.

Zuletzt möchte ich mich auch bei meiner Betreuerin Frau Anna Prieur bedanken. Sie hat mir beim Entwerfen und Verfassen der Arbeit viele hilfreiche Verbesserungsvorschläge gegeben.