

# TecEars – technische Gehörbildung

## Einleitung

Die Gehörbildung jedes Tontechnikers und Tonliebhabers sollte nebst den konventionellen, musikalischen Aspekten (Intervalle, Akkorde und Skalen) auch technisch orientierte Themen umfassen. Bisher war in diesem Bereich nur wenig Übungsmaterial vorhanden. Im Rahmen einer Masterarbeit an der Zürcher Hochschule der Künste (ZHdK) habe ich vor 10 Jahren eine umfangreiche Software für technische Gehörbildung entwickelt und dieser nun für die neusten macOS Umgebungen ein Upgrade verpasst. Das Programm behandelt nicht die musikalische Gehörbildung – dazu findet man im Internet viele sehr gute Tools. Bei TecEars behandeln die Übungen Themen wie Lautstärke, Tonhöhe, Intonation, Stereobild oder Klangfarbe. Die flexible und offene Handhabung der Übungen zeichnet die Software besonders aus. So kann beispielsweise jede Aufgabe mit unterschiedlichsten Audiosignalen in verschiedenen Schwierigkeitsstufen durchgeführt werden. Dank den spielerischen und interaktiven Übungsformen macht das Hörtraining sogar Spass... Und für diejenigen, welchen die technischen Grundlagen noch fehlen, befindet sich am Schluss des Dokuments ein kleines Akustik-Glossar.

## Ziel

Folgende Ziele wurden bei der Entwicklung von TecEars angestrebt:

- Vielfalt** Zu jedem Thema sollen mehrere Übungen existieren. Das Thema soll aus unterschiedlichen Blickwinkeln beleuchtet werden und dem Benutzer dadurch viel Abwechslung bieten.
- Signale** Jede Übung soll mit unterschiedlichen Signalen durchgeführt werden können. Ein Pop-Tonmeister soll mit Pop-Musik, ein Klassik-Enthusiast mit klassischer Musik üben können. Zudem sollen verschiedene Signalprototypen wie Rauschen und einfache Wellenformen zur Verfügung stehen.
- Interaktivität** Durch die Möglichkeiten heutiger Computersoftware sind interaktive Übungsformen weit verbreitet und werden von den Lernenden geschätzt. Beispielsweise soll die Änderung von Parametern sofort hörbar gemacht werden.
- offene Aufgabenstellung** Die Aufgabenstellung soll möglichst offen sein und die Lernenden nicht einschränken. Es gibt unterschiedliche Arten mit dem Übungsmaterial umzugehen und verschiedene Wege eine Lösung zu finden.
- Spielplatz** Zu jedem Thema soll ein Spielplatz geschaffen werden. Darunter wird eine Umgebung verstanden, in der sich die Lernenden mit den im jeweiligen Thema behandelten Phänomene experimentell beschäftigen können.

## Spezifikationen

TecEars ist eine Standalone Applikation welche auf macOS ab Version 10.13 (High Sierra) läuft. Ältere Mac-Betriebssysteme wie auch Windows und Linux werden nicht unterstützt. Grund dafür ist, dass an der ZHdK fast ausschliesslich mit Apple Computern gearbeitet wurde und eine nachträgliche Portierung auf Windows sehr aufwändig wäre.

Die Software ist in C (Audio-Engine) und Objective-C/Cocoa (Benutzeroberfläche) geschrieben.

## Support

Die Software baut keine Verbindung ins Internet auf und kann somit nicht nach Updates suchen und mich auch nicht über auftretende Bugs informieren. Allfällige Updates und Bugfixes werden weiterhin über diese Webseite erreichbar sein: [www.soundworx.ch/tecears.html](http://www.soundworx.ch/tecears.html)

Falls im Zusammenhang mit dem Programm Probleme oder Bugs auftreten oder allgemeine Fragen zur Software bestehen, kann man sich gerne an mich wenden: [ueli.wuerth@srf.ch](mailto:ueli.wuerth@srf.ch)

## Benutzeroberfläche

Zugunsten der Benutzerfreundlichkeit ist das Interface der meisten Übungen sehr ähnlich gehalten. Nachfolgend ein Beispiel an welchem alle Bedienelemente kurz beschrieben werden.

Jede Übung und jeder Spielplatz muss mit *Run* gestartet werden und kann pausiert werden. Durch *Reset* wird die Übung beendet und die Uhr, der Übungszähler und die Fehlerberechnung zurückgesetzt. Nach einem Reset können Anpassungen an den Settings vorgenommen werden.

Zahlreiche Übungen bieten einen A-B-Vergleich zweier Signale an, wobei die Manipulation des einen Signals beurteilt oder das eine dem andern Signal angeglichen werden muss. Über die *Solution* Schaltfläche lässt sich die Lösung anzeigen und anschliessend eine neue Übung starten.

A-B-Übungen bieten die Möglichkeit an, beim Umschalten zwischen Signal A und B für eine festgelegte Dauer ein Störgeräusch einzuspielen. Dadurch wird der Vergleich erschwert und die Gedächtnisfähigkeit des Lernenden trainiert.

Bei Anzeige des Clipping-Icons (!) sollte das Volume reduziert werden um eine Übersteuerung des Ausgangs zu verhindern.

Anzeige des aktuellen und durchschnittlichen Fehlers

The screenshot shows the TecEars software interface for the 'Rebuild Filter Graph' exercise. At the top, there are playback controls (Run, Pause, Reset), a timer showing 00:42, and buttons for 'A' (Original) and 'B' (Edited). The 'New Exercise' button is also visible. Below these are indicators for 'Count' (1), 'Current Error' (26.55 dB), and 'Mean Error' (26.55 dB). There are also controls for 'Interference' (OFF, 1-5) and 'Clipping' (indicated by a red exclamation mark icon), and a volume slider.

The main area features a frequency response graph with a grid. The y-axis represents gain in dB, ranging from -12 dB to 12 dB. The x-axis represents frequency in Hz, ranging from 20 Hz to 20 kHz. A blue curve shows the original signal's response, and a red curve shows the modified signal's response. A blue arrow points to the difference between the two curves.

Below the graph is a 'Settings' section with two columns: 'Used Filters' and 'Predetermined'. The 'Used Filters' section includes checkboxes for 'low-pass', 'high-pass', 'high-shelf', and 'low-shelf', and a dropdown for 'No. of peaking' set to 1. The 'Predetermined' section includes checkboxes for 'gain', 'frequency', and 'quality'. The 'low-pass' filter is currently selected.

On the right side, there is a 'Signal Source' section with a search bar and a list of tracks. The selected track is 'Hello' by Adele, from the album '25'. Below the list is a 'Position' slider set to 0:03:45 and a 'Mode' section with buttons for 'Normal', 'Shuffle', and 'Repeat'.

Arrows from the surrounding text point to various elements: the Run/Reset buttons, the A/B buttons, the error indicators, the Clipping icon, the volume slider, the left sidebar menu, the Settings section, and the Signal Source list.

Im Seitenmenu können die Übungen ausgewählt werden. Es stehen 18 Übungen und 5 Spielplätze (*Introduction*) zur Verfügung. Die Übungen werden weiter unten ausführlich beschrieben.

Im Bereich Settings lassen sich Einstellungen vornehmen, welche die Schwierigkeit der Übungen beeinflussen. Damit lässt sich der Schwierigkeitsgrad dem eigenen Können anpassen. Die meisten Einstellungen lassen sich nur bei gestoppter Übung durchführen (*Reset* in der Toolbar).

Im linken Fensterteil kann die Signalquelle ausgewählt werden. Zur Verfügung stehen:

- **iTunes:** eigene Musik-Bibliothek mit allen nicht kopiergeschützten Titeln
- **Sample:** Es kann auf mehrere Ordner mit Audiofiles zugegriffen werden. Auf der Webseite stehen Links zu Sample-Libraries zur Verfügung.
- **Synth:** Es stehen unterschiedliche Oszillatoren zur Verfügung, die über das Software-Keybord, die Tastatur (D-Ö) oder ein externes MIDI-Keybord gespielt werden können.
- **Noise:** Pinkes und weisses Rauschen in Mono oder Stereo.

Bei gewissen Übungen stehen nicht alle Signalquellen zur Verfügung.

## Menu

Über das Menu erreicht man:

*View* → *Metering*: Es stehen vier verschiedene Metering-Instrumente zur Verfügung: PPM-Meter, VU-Meter, FFT-Analyse und 31-Band-RTA. Rote Signalanteile entsprechen dem rechten, blaue dem linken Kanal. Bei bestimmten Übungen stehen gewisse Meterings absichtlich nicht zur Verfügung.

*TecEars* → *Preferences...*: In den Einstellungen stehen 4 Tabs zur Verfügung:

**General**: Hier können Sample-Ordner hinzugefügt oder gelöscht werden.

**Audio**: Hier lässt sich das Ausgabe-Gerät auswählen. Das Eingabegerät wird nicht verwendet.

**Matrix**: Bei Mehrkanal-Audiointerfaces lässt sich der gewünschte Hardware-Ausgang des linken und rechten Kanals festlegen.

**MIDI**: Hier lassen sich MIDI Ein- und Ausgänge für die Verwendung auswählen.

*Help* → *TecEars Help*: Es öffnet sich ein kleines Hilfefenster, welches abhängig von der aktuell ausgewählten Übung eine Anleitung anzeigt und teilweise gewisse technische Details erläutert. Zudem findet man dort auch alle möglichen Shortcuts.

## Shortcuts

<b>Leertaste</b>	Start/Pause
<b>Tab</b>	Lösung anzeigen / neue Übung
<b>Esc</b>	Reset
<b>a/b</b>	Zwischen A und B umschalten
<b>Pfeil L-R</b>	Volume ändern
<b>D-Ö / R-O</b>	Keyboardsteuerung bei Synth Sounds (D-Ö weisse Tasten, R-O schwarze Tasten)
<b>1</b>	Signalquelle iTunes
<b>2</b>	Signalquelle Samples
<b>3</b>	Signalquelle Synth
<b>4</b>	Signalquelle Rauschen

## Übungen

Die Software stellt insgesamt 18 Übungen und fünf Spielplätze zu den Themen Lautstärke, Tonhöhe, Formanten, Stereobild, Intonation und Störgeräuschen zur Verfügung. Im Folgenden werden die Übungen kurz besprochen:

**VOLUME**  
**Adjust Volume** Sound [A] erklingt mit einer fixen Lautstärke. Aufgabe ist es, die Lautstärke von Sound [B] mithilfe des Reglers an Klang [A] anzugleichen. Der Regler verändert den Pegel von Sound [B] und ist somit auch nur bedienbar wenn Sound [B] gehört wird.

**VOLUME**  
**Detect Difference** Es erklingt ein Original-Sound mit fixer Lautstärke. Daneben gibt es drei Varianten mit unterschiedlichen Pegelabweichungen zum Originalsound. Zu den Varianten A-C muss die Pegelabweichung über das Dropdown-Menu angegeben werden. Die Lautstärke der Varianten wird dadurch nicht hörbar geändert. Über den Schwierigkeitsgrad in den Einstellungen lässt sich der dB-Bereich der Lösungsvorschläge von 1dB-Schritten (*hard*) bis 3dB-Schritten (*easy*) anpassen.

**VOLUME**  
**Identify Steps** Das Audio macht in unregelmässigen Abständen Pegelsprünge von mindestens  $\pm 3\text{dB}$ . Möglichst zeitnah sollte die passende Schaltfläche gedrückt werden. Die

gedrückten Pegelsprünge werden mit einer gelben Linie visualisiert. Mit dem Klick auf *Solution* wird die Übung gestoppt und die Lösung als rote Linie angezeigt.

VOLUME

### Follow Changes

Die Lautstärke des linken Kanals variiert während der Wiedergabe zufällig und stufenlos. Mit dem Regler kann die Lautstärke des rechten Kanals gesteuert werden. Ziel ist es, den Pegel des rechten Kanals gleichzeitig mit der Lautstärke des linken Kanals zu ändern, damit der Klang so stabil wie möglich in der Stereomitte bleibt. Nach dem Klicken auf die Schaltfläche *Solution* wird die Lösung rot angezeigt.

PITCH

### Adjust Pitch

Unter [A] erklingt ein Ton mit einer fixen Tonhöhe. Unter [B] erklingt ein leicht verstimmter Ton, den es durch den Regler an Ton [A] anzupassen gilt. Über den Schwierigkeitsgrad in den Einstellungen lässt sich die Cent-Skala von Klang [B] verschieden rastern: Von 3 Cent-Schritten (*easy*) bis 0.5 Cent-Schritte (*hard*). Weiter Infos zu Cent sind im anschliessenden Glossar unter «Intervall» zu finden.

PITCH

### Detect Pitch

In dieser Übung geht es darum, die erklingende Tonhöhe möglichst genau zu erkennen. Sobald die Übung gestartet wird erklingt ein Ton. Die Tonhöhe muss nun mithilfe des in den Settings ausgewählten Eingabegeräts möglichst präzise getroffen werden. Anschliessend wird die richtige Lösung als rote Klaviatur-Taste oder fettgeschriebener Hz-Zahl auf der Schaltfläche angezeigt. Als Eingabegerät kann die angezeigte Klaviatur, die numerischen Schaltflächen mit Hz-Angaben oder ein externes MIDI-Keyboard verwendet werden. Der Schwierigkeitsgrad kann nur für die numerischen Schaltflächen eingestellt werden und legt fest wie eng der Bereich ist aus welchen Lösungsvorschläge präsentiert werden. Über die *Duration* kann die Länge des Tons festgelegt werden. Und mit dem *Range*-Regler lässt sich der Bereich der erklingenden Töne einschränken.

Achtung: Töne unter 100Hz werden nicht von allen Computer-Lautsprechern wiedergegeben...

PITCH

### Rebuild Sound

Es wird ein Klang abgespielt, der aus einem oder mehreren Oszillatoren besteht [A]. Ziel ist es, diesen Klang mit den verfügbaren Oszillatoren in [B] so genau wie möglich nachzustellen. Dabei muss auf den Pegel und die Frequenz der Oszillatoren geachtet werden. Wenn die Anzahl der Oszillatoren zufällig ausgewählt wird, stehen sechs Oszillatoren zur Verfügung. Sie müssen selbst entscheiden, wie viele Oszillatoren benötigt werden, um den Klang zu kreieren und die überzähligen Oszillatoren deaktivieren (CMD-Klick). Im "harmonischen" Modus stehen die Frequenzen der Oszillatoren in einer harmonischen Beziehung und bilden somit Obertöne des Grundtons.

Wegen der endlichen Auflösung des Computerbildschirms lassen sich die Oszillatoren nicht zu 100% auf die richtige Frequenz ziehen.

PITCH

### 31 Band EQ

Diese Übung simuliert eine Live-Situation, in der es erforderlich ist, eine Rückkopplung mit dem 31-Band-Equalizer zu unterdrücken. Während einer definierbaren Fadezeit wird das Filter eingeblendet. Wenn für den Filtertyp *Cut* ausgewählt ist, erscheint die Rückkopplung nicht als Frequenzverstärkung, sondern als Sperrfilter. Daher muss der entsprechende Regler nach oben geschoben werden. Bei *random* muss selbst entschieden werden, ob es sich um eine Frequenzverstärkung oder -abschwächung handelt und entsprechend der passende Regler in die entgegengesetzte Richtung bewegt werden. Es können bis zu drei gleichzeitige Filter aktiviert werden. Nach dem Drücken der Schaltfläche

*Solution* wird die Lösung rot angezeigt. Zuerst kann der Bereich der zu trainierenden Frequenzen eingeschränkt werden.

FORMANTS

### **Introduction**

Auf diesem Spielplatz kann mit dem Zusammenhang zwischen der Vokal-Färbung und der entsprechenden Formanten experimentiert werden. Pro Vokal werden nur die zwei untersten Formanten dargestellt und berechnet. Weiter theoretische Infos zu Formanten sind im anschließenden Glossar zu finden.

FORMANTS

### **Detect Formant**

In [A] ist der unveränderte Originalton zu hören. In [B] hört man eine gefilterte Version von [A]. Ziel ist es, die Filterfrequenz(en) durch Verschieben des Schiebereglers so genau wie möglich zu bestimmen. Durch das Schieben der Regler sind absichtlich keine Änderungen am Klang hörbar. Um den Schwierigkeitsgrad der Übung zu ändern, kann die Verstärkung und Qualität/Güte des Filters unter *Settings* geändert werden. Durch Aktivieren von *change signal gain* wird eine zufällige Lautstärkeänderung des Signals aktiviert, wodurch schwieriger zu erkennen ist, ob es sich um einen Boost- oder Cut-Filter handelt.

FORMANTS

### **Vocalic Triangle**

In dieser Übung muss die Vokalfärbung des Signals [A] identifiziert und die Klangfarbe des Signals [B] so geändert werden, dass sie mit [A] übereinstimmt. Als Schwierigkeitsgrad kann eingestellt werden, ob die Färbung genau einem Vokal entspricht oder ob auch Färbungen dazwischen möglich sind (*anywhere in the triangle*).

FORMANTS

### **Rebuild Filter Graph**

Man hört ein ungefiltertes Signal [A] und ein gefiltertes Signal [B] und muss versuchen den EQ so einzustellen, dass er [B] entspricht. Die Änderungen am Equalizer sind nicht hörbar. Es ist wichtig, dass man eine genaue Vorstellung davon bekommt, was [A] von [B] unterscheidet. Schliesslich entspricht die rote Kurve der Lösung. Als Schwierigkeitsgrad können unterschiedliche Filtertypen und auch mehrere Peak-Filter aktiviert werden. Über die Einstellungen *Predetermined* lassen sich bestimmte Filter-Parameter als fix setzen um die Übung etwas zu vereinfachen. Um die Güte eines Filters zu verändern muss mit gedrückter CTRL-Taste auf den Punkt geklickt und gezogen werden.

FORMANTS

### **Rebuild Filter Blind**

Man hört ein zufällig gefiltertes Signal [B] und sieht eine Filterkurve, die im Moment nichts mit dem Signal zu tun hat. Ziel ist es, mit den verfügbaren Steuerelementen den erwarteten Klang der oben gezeigten Filterung einzustellen. Die Regler enthalten bewusst keine Skalen. Es muss nur nach Gehör gearbeitet werden und man soll sich nicht auf visuelle Hinweise verlassen. Hinweis: Das Original [A] ist immer ungefiltert und entspricht dem Originalsignal mit einem flachen EQ.

FORMANTS

### **Detect Spectrum**

Es werden vier Frequenzspektren angezeigt. Das zum gespielten Signal passende Spektrum soll angeklickt werden. Nach einem Klick auf *Solution* werden die falschen Antworten ausgegraut.

Tipp: Die Übung soll mit unterschiedlichen Signalen gemacht werden. Gewisse Signale (z.B. Rauschen oder Sinus) lassen keine eindeutige Identifizierung der Lösung zu.

STEREO IMAGE

### **Introduction**

Auf diesem Spielplatz können verschiedene Änderungen am Stereobild vorgenommen und zahlreiche Parameter geändert werden. Um die nächsten Übungen erfolgreich absolvieren zu können, lohnt es sich, ausgiebig auf diesem Spielplatz zu experimentieren. Dieser Spielplatz sollte mit Kopfhörern besucht

werden. Bei Fragen hilft auch das Glossar mit technischen Grundlagen im nächsten Kapitel.

STEREO IMAGE

### **Detect Modification**

In dieser Übung muss die Änderung am Stereobild erkannt werden und die entsprechende Schaltfläche angeklickt werden. Signal [A] ist Original und Signal [B] ist modifiziert. Diese Aufgabe sollte mit Kopfhörer gelöst werden. Um die Übung zu vereinfachen, können über die Settings nur gewisse Kategorien an Modifikationen am Stereobild zugelassen werden.

STEREO IMAGE

### **Center Stereo Image**

Signal [A] ist das Original. Bei Signal [B] wurde in einem Kanal die Lautstärke und/oder die Laufzeit (*Delay*) geändert. In dieser Aufgabe soll das Stereobild wieder zentriert werden. Je nach *Settings* geschieht dies anhand des Pegels, der Laufzeit oder beidem. Die Option *trading* bedeutet, dass eine ursprüngliche Verschiebung des Stereobilds durch Laufzeit mit einer Korrektur des entgegengesetzten Pegels korrigiert werden soll und umgekehrt. Diese Aufgabe sollte mit Kopfhörer gelöst werden.

INTONATION

### **Introduction**

Auf dieser Seite können die Klangmerkmale verschiedener Stimmungen erkundet werden. Dazu kann die gewünschte Stimmung in der Tabelle ausgewählt werden. Anschliessend kann man mit der PC Tastatur (Tasten D-Ö / R-O), der Maus auf dem Software-Keyboard oder über ein externes MIDI-Gerät Töne und Harmonien spielen. Hinweis: Bei Verwendung eines externen MIDI-Keyboards bitte die Preferences unter *MIDI* beachten.

INTONATION

### **Intervals**

Es wird ein Intervall abgespielt, welches in der ausgewählten Stimmung «rein» eingestellt werden soll. In den *Settings* lässt sich einstellen, ob das Intervall mehr als eine Oktave umspannen kann und ob der obere oder untere Ton anzupassen ist. Mit dem *Range*-Regler lässt sich der Frequenzbereich, in welchem sich die Intervalle befinden, festlegen.

INTONATION

### **Chords**

Diese Übung ähnelt *Intonation Intervals*. Man hört drei oder vier Töne, die gestimmt werden müssen. Man kann festlegen, welche Akkord-Typen auftreten dürfen (Dur-, Moll-, verminderte und übermässige Dreiklänge sowie verschiedene Septakkorde). *Reference* gibt an, ob der Grundton oder ein anderer als Referenz für die Stimmung dienen soll. Die Tonhöhe der Referenz kann folglich nicht geändert werden.

NOISE

### **Sampling Rate – Bit Depth**

Auf diesem Spielplatz kann mit verschiedenen Abtastraten und Bittiefen experimentiert werden. Es können Abtastratenkonvertierungen mit und ohne Anti-Aliasing sowie Bittiefenkonvertierungen mit und ohne Dithering gehört werden. Die Abtastrate des Audio-Interface ist davon nicht betroffen und kann in den Preferences unter *Audio* eingestellt werden.

NOISE

### **Introduction Noise**

Auf diesem Spielplatz können verschiedene Störgeräusche angehört werden: Rauschen, Klicken, Aliasing, Kammfilter, Verzerrungen und Brummen. Um die nächste Übung erfolgreich absolvieren zu können, lohnt es sich, ausgiebig auf diesem Spielplatz zu experimentieren.

NOISE

### **Detect Noise**

Bei dieser Übung müssen verschiedene Störgeräusche aus dem Signal herausgehört werden. Signal [A] hat ein Störgeräusch. Für das Signal [B] muss dasselbe Störgeräusch ausgewählt sein. Nach einem Klick auf *Solution* wird die richtige Lösung angezeigt.

## Technische Grundlagen

Für diejenigen, welche gerne das Gehör bilden möchten, denen aber die technischen Grundlagen fehlen (oder seit der Ausbildung wieder vergessen haben...) ein kleines Akustik-Glossar:

- Frequenz** Die Frequenz wird in Hertz (Hz) gemessen und bestimmt die Tonhöhe eines Klangs. Die Frequenz beschreibt die Anzahl Schwingungen pro Sekunde, z.B. der Saite einer Geige, einer Lautsprechermembran oder der Luftmoleküle, welche auf unser Trommelfell treffen. Je höher die Frequenz, desto höher der Ton. Das menschliche Gehör nimmt ungefähr Frequenzen zwischen 20Hz und 20000Hz (20kHz) wahr, wobei die obere Grenze mit dem Alter stetig abnimmt. Die Wiedergabefähigkeit von tiefen Frequenzen (unter 100Hz) variiert je nach Qualität eines Lautsprechers oder Kopfhörers enorm.
- Lautstärke** Die Lautstärke wird in Dezibel (dB) gemessen. Eine absolute Lautstärkenmessung benötigt immer eine Referenzgrösse, z.B. Spannung dBu, Leistung dBm, digitale Vollaussteuerung dBFS. In dieser Software geht es aber immer nur um Lautstärkenunterschiede, welche somit in dB angegeben werden. Bei Spannungen entsprechen 6dB einer Verdoppelung der Spannung. Bei der Wahrnehmung der Lautstärke (Lautheit) geht man anhand von Studien von einer wahrgenommenen Verdoppelung der Lautstärke bei 10dB aus.
- Formant** Ein Formant ist eine Hervorhebung eines bestimmten Frequenzbereichs. Dieser besitzt eine Mittenfrequenz, welche in Hz angegeben wird. Seine Stärke (Gain) wird in dB definiert. Die Breite der Anhebung wird durch die Güte bestimmt. Grosse Güten bezeichnen kleine Breiten und kleine Güten bezeichnen grosse Frequenzbereiche. Die Güte wird im Englischen „quality“ genannt und daher mit Q abgekürzt. Je höher die Güte eines Formants ist, desto stärker wird eine konkrete Tonhöhe und weniger eine Klangverfärbung wahrgenommen.
- Die Klangfarbe jedes Instruments wird durch eine Anzahl instrumententypischer Formanten bestimmt. Das Besondere dabei ist, dass der Formant mit der gespielten oder gesungenen Tonhöhe nicht mitwandert sondern eine Eigenschaft des Instruments über den gesamten spielbaren Frequenzbereich ist.
- Die Vokale der menschlichen Stimme werden durch mehrere Formanten bestimmt. Ein „U“ hat seine zwei untersten Formanten beispielsweise bei 300Hz und 800Hz. Darüber folgen noch weitere, schwächere Formanten. Alle Formanten zusammen machen den Klang eines „U“ aus.
- Frequenzspektrum** In einem Frequenzspektrum werden die Frequenzanteile eines Signals grafisch dargestellt. Dies kann über eine Filterbank (31-Band RTA) oder eine Fourier-Transformation (FFT) geschehen.
- Intervall** Das Intervall beschreibt das Verhältnis zweier Tonhöhen. Dazu werden Begriffe wie Oktave (Verdoppelung der Frequenz) oder Quinte (Frequenzverhältnis von 3:2) verwendet. Der Halbton ist das kleinste musikalische Intervall. Eine Oktave besteht aus einer Schichtung von 12 Halbtönen. Für eine feinere Beschreibung wird der Halbton in 100 Cent aufgeteilt. Somit besitzt eine Oktave 1200 Cents.
- Intonation** Die Intonation beschreibt die Abstimmung von Tonhöhen. Ein kleiner Exkurs: Wenn man auf dem Klavier sieben Oktaven aufeinanderstapelt erreicht man denselben Ton wie wenn man 12 Quinten aufeinanderstapelt. Mathematisch betrachtet entspricht das einem Verhältnis von  $(3/2)^{12}$  (12 reine Quinten gestapelt) zu  $2^7$  (7 Oktaven gestapelt). Das heisst:  $129.75 : 128 = 1.0136$ . Gemäss Klavier wäre erwartet worden, dass die beiden

Stapel genau dasselbe Verhältnis ergeben würden, da die beiden Intervall-Stapel denselben Ton erreichen. Dieses übrig bleibende Mikrintervall von 1.0136:1 heisst pythagoreisches Komma und entspricht etwa einem Achtelton (23.46 Cent).

Die Bedeutung des pythagoreischen Kommas in der Musik ist gross. Die Oktave als Intervall ist unantastbar. Somit müssen die „Klavier-Quinten“ ganz leicht tiefer intoniert werden, als eine reine Quinte. Wie dies nun genau stattfindet beschreiben unterschiedlichste Stimmungen: Werkmeister, Mitteltönig, rein, gleichstufig, wohltemperiert (Bach), pythagoreisch, Silbermann 1/6 Komma, ...

Bei jeder Stimmung wird der „Fehler“ (das pythagoreische Komma) unterschiedlich auf die Intervalle verteilt. Gewisse Stimmungen sind somit nur in einer Tonart wirklich rein und tönen in anderen Tonarten fürchterlich. Andere Stimmungen sind in keiner Tonart rein, dafür tönen alle Tonarten gleich „falsch“. Je nach Musikstil wird die eine oder andere Stimmung verwendet.

Eine weitere Kenngrösse in diesem Zusammenhang ist der Kammerton. Damit ist allgemein das eingestrichene A gemeint, der heutzutage in den meisten Ländern 440Hz beträgt. Aber auch dieser variiert je nach Musikstil und Orchester erheblich. Anhand des Kammertons und der verwendeten Stimmung können alle weiteren Tonhöhen berechnet werden.

Kleiner Tipp: Falls mal eine Stimmgabel fehlen sollte: +43 1 211 101 507 liefert 400Hz.

## Stereo

Ein Stereosignal entsteht durch leicht unterschiedliche Signale im linken und rechten Tonkanal. Ein Monosignal hingegen wird mittig wahrgenommen, da es im linken und rechten Kanal dasselbe Signal enthält. Es gibt nun zwei Möglichkeiten um ein Signal nach links zu schieben:

- 1) Das Signal wird im linken Kanal lauter als im rechten wiedergeben. (Pegelsstereofonie)
- 2) Das Signal wird im linken Kanal früher als im rechten wiedergeben. (Laufzeitstereofonie)

In der Natur treten beide Effekte meistens gekoppelt auf: Die Schallwellen des links vorbeifahrenden Autos erreichen mein linkes Ohr früher als mein rechtes und werden um den Kopf herum zum rechten Ohr auch in der Lautstärke (und zusätzlich im Frequenzspektrum) gedämpft.

Die Übungen zu Stereo werden von Vorteil mit Kopfhörern oder mittig vor einem guten Stereo-Lautsprecher-Setup sitzend gemacht. Diese Übungen über die integrierten Laptop-Lautsprecher zu lösen ist sinnlos.

## Ton und Klang

Physikalisch gesehen besteht ein **Ton** aus genau einer Sinusschwingung. Die Sinusschwingung ist die einfachste Wellenform und entspricht einer klar definierten Tonhöhe ohne weitere Obertöne. Einen Sinus-Ton lässt sich physikalisch erzeugen, kommt in der Natur aber kaum vor. Ein **Klang** besteht aus einem Grundton mit einem oder mehreren Obertönen. Obertöne sind immer Vielfache der Grundfrequenz. Ein Klang mit der Grundfrequenz 110Hz besitzt Obertöne mit 220Hz, 330Hz, 440Hz, 550Hz, ... Wie stark welcher Oberton ausgeprägt ist, wird durch die Formanten der Instrumente/Stimme bestimmt. Die Rechteck- und Sägezahnschwingungen sind Klänge mit zahlreichen Obertönen.

## Rauschen

Ein Rauschen enthält Frequenzkomponenten aller Tonhöhen. Die Färbung von Rauschen gibt ihm den Namen: weiss, pink oder braun. Aus einem Rauschen ist keine Tonhöhe heraushörbar. Der „W“-Konsonant entspricht ungefähr einem Rauschen. Durch

Resonanzbildung im Mundraum entsteht ein Formant, welcher dem Rauschen eine Tonhöhe verleiht. Je stärker dieser Formant wird, desto eindeutiger ist die Tonhöhe. Man kann das mit dem fließenden Übergang von einem „W“ zu einem Pfeifen vergleichen.

### **Sampling Rate**

Analoge Audiosignale müssen abgetastet werden um in digitaler Form gespeichert zu werden. Die Sampling Rate (*deutsch: Abtastrate*) bestimmt, wie viele „Samples“ pro Sekunde gemessen und gespeichert werden. Je höher die Sampling Rate desto höher ist auch die höchste abbildbare Frequenz. Somit lassen sich bei einer Abtastrate von 48kHz (48000Hz) Frequenzen bis 24kHz abbilden und speichern (im Vergleich: Der Mensch kann bis maximal ca.20kHz hören).

Kurz: Die Sampling Rate bestimmt den abbildbaren Frequenzbereich.

Die Sampling Rate im Audibereich kann mit der Auflösung (dpi) eines Bildes im optischen Bereich verglichen werden.

### **Bittiefe**

Die Bittiefe bestimmt mit welcher Genauigkeit die Samples gemessen und gespeichert werden. Eine hohe Bittiefe bedeutet grössere Dynamik aber auch grössere Datenraten. Als Faustregel gilt: Pro Bit lassen sich 6dB Audiomaterial abbilden. Die CD hat eine Bittiefe von 16bit, was einer Dynamik von ca. 96dB entspricht. Im Vergleich dazu: In einem ruhigen Schlafzimmer hat man ca. einen Schallpegel von 30dB SPL. Die Schmerzgrenze des menschlichen Gehörs liegt bei etwa 130dB SPL. Auf einer CD kann also die gesamte Dynamik von wahrgenommener Stille bis Schmerzgrenze aufgezeichnet werden. Ob die Lautsprecher im Wohnzimmer das auch wiedergeben können ist eine andere Frage...

Kurz: Die Bittiefe bestimmt den abbildbaren Dynamikbereich

Die Bittiefe im Audibereich kann mit der Farbtiefe (Anzahl Farbabstufungen) im optischen Bereich verglichen werden.

*Ueli Würth, 21. April 2020*