

Digitale Klangsynthese

Bachelor-Thesis



Autor: Alexander Tremel
Matrikelnummer: 57305
Lehrstuhl: Mathematik mit Schwerpunkt Digitale Bildverarbeitung
Prof. Dr. Tomas Sauer

Writing about music is like dancing about architecture.

Abstract

Mathematik und Musik liegen sehr eng beieinander. Werden akustische und musikalische Grundlagen mit Informatik und Mathematik verknüpft, lassen sich digitale Klänge erzeugen.

Die vorliegende Arbeit greift dieses Zusammenspiel auf und untersucht, ob die, in manchen Augen veraltete, Programmiersprache *CSound* dafür geeignet ist, die gängigen Arten der Klangsynthese umzusetzen und professionell klingende Resultate mit komplexen Arrangements zu erzielen. Dies ist geglückt.

Der Fokus dieser Arbeit war das Erarbeiten und Generieren von unterschiedlichen Klangfarben durch verschiedene Möglichkeiten der Klangsynthese und nicht die Nutzer-Interaktion oder ein Echtzeitbetrieb. Dies entspricht auch dem ursprünglichen Einsatzgebiet von *CSound*.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Motivation	5
1.2	Zielsetzung	5
2	Musik aus mathematischer Sicht	6
2.1	Allgemeine Schwingungslehre	6
2.1.1	Der Sinus	6
2.1.2	Addition von Sinusschwingungen	8
2.2	Töne, Klänge und Geräusche	9
2.3	Relative Empfindungsänderung bei Tonhöhe und Lautstärke . .	13
2.4	Fourier-Reihe	15
2.4.1	Reelle Fourier-Reihe	15
2.4.2	Komplexe Fourier-Reihe	16
2.4.3	Beispiele	16
2.4.4	Fourier-Transformation	19
2.4.5	Klangfarbe und Spektralanalyse	19
2.5	Klassische Klangerzeuger	21
2.5.1	Harmonische Klangerzeuger	22
2.5.2	Unharmonische Klangerzeuger	24
3	Klangsynthese	26
3.1	Geschichte	26
3.2	Analoge Klangsynthese	26
3.2.1	Modulare Synthesizer	26
3.2.2	Kompakte Synthesizer	27
3.3	Digitale Synthesizer	27
3.4	Synthesekomponenten	28
3.4.1	Oszillator (VCO)	28
3.4.2	Rauschgenerator	31
3.4.3	Hüllkurve	32
3.4.4	Filter	33
3.4.5	Signalverstärker (VCA)	36
3.4.6	Niederfrequenzoszillator (LFO)	36
3.5	Syntheseverfahren	37
3.5.1	Subtraktive Klangsynthese	37
3.5.2	Additive Synthese	39
3.5.3	FM-Synthese	40
3.6	Weitere Synthesearten	45
3.6.1	Granularsynthese	45
3.6.2	Wavetable Synthese	45
3.6.3	Physical-Modeling-Synthese	45
3.6.4	Sampling	45

4	Besonderheiten bei digitalen Klängen	46
4.1	Abtastrate	46
4.2	Samplingtiefe	47
5	CSound	49
5.1	Orchestra- und Score-Datei	49
5.2	P-Felder	50
5.3	Variablen	52
5.3.1	Lokale Variablen	52
5.3.2	Globale Variablen	52
5.4	Funktionen	52
5.5	Opcodes	52
5.6	Beispiel	54
5.7	Alternativen	55
6	Elektronische Musik in CSound	56
6.1	Drums	56
6.1.1	Kickdrum	56
6.1.2	Snare	56
6.1.3	Hi-Hat	57
6.2	Synthesizer	57
6.2.1	Additiver Bass	57
6.2.2	Weitere Synthesizer	58
6.3	Das Arrangement	58
6.4	Das Ergebnis	58
7	Fazit und Ausblick	59

1 Einleitung

1.1 Motivation

Seit Menschengedenken erzeugen unsere Vorfahren Klänge und Geräusche mit verschiedensten Hilfsmitteln. Musik ist somit schon seit prähistorischer Zeit ein Bestandteil menschlicher Kultur und zog sich durch sämtliche Kulturen bis der „griechische Begriff *musiké* (...) über das lateinische *musica* “Eingang in fast sämtliche europäische Sprachen gefunden hat. ¹ Lange Zeit war Musik geprägt von natürlichen Klängen und Instrumenten, die diese erzeugen und es entwickelten sich über die Jahrhunderte eine große Anzahl verschiedener Blas-, Tasten-, Streich-, Zupf- und Tasteninstrumente.

Ab dem Jahre 1730 kam eine weitere Sparte an Instrumenten, mit damals ungeahnten Ausmaßen, hinzu, welche im 20. Jahrhundert die Musikgeschichte revolutionieren wird. „Pater Prokopius Diviš (...) konstruierte ein sogenanntes Mutationsorchester mit dem Namen »Denis d’or «“, welches angeblich viele Blas- und Saiteninstrumente simulieren konnte. ²

Auch wenn nicht sofort der Umbruch begann, war damit ein Grundstein dafür gelegt, was später unter anderem durch Moog ermöglicht wurde. Mittlerweile gibt es scheinbar unzählige elektronische Instrumente. Zum einen Geräte, die natürliche Klänge simulieren können und zum anderen Instrumente, die völlig neuartige Klänge erzeugen.

Heute werden für die Musikproduktion die meisten synthetischen Instrumente am Computer erzeugt und je leistungsfähiger diese werden, desto weniger Grenzen gibt es in der Klangerzeugung. Man kann davon ausgehen, dass auf diesem Gebiet in der nächsten Zeit viele Türen der Möglichkeiten geöffnet werden.

Durch diese Entwicklung verschmelzen in der modernen Musikproduktion zwei Aufgabenfelder, die bisher getrennt waren. Traditionell gibt es Instrumentenbauer, die den Charakter der Instrumente formen und Musiker, die die Instrumente spielen. Spricht man von Klangsynthese und elektronischer Musikproduktion, so kann der Musiker den Klang selbst formen und stößt auf immer weniger Einschränkungen.

1.2 Zielsetzung

Kenntnisse aus der Mathematik, der Informatik und Grundlagen aus Musik und Akustik sollen verbunden und mit Hilfe der Programmiersprache *CSound* verschiedene Instrumente programmiert werden, die sich zu einem Lied zusammensetzen lassen. Als Grundlage dafür sollen Kenntnisse über die gängigen Synthesarten und deren Komponenten dienen, sowie auf die digitale Signalverarbeitung eingegangen werden.

¹Zit. nach [Ren03].

²Zit. nach [Rus10].

2 Musik aus mathematischer Sicht

2.1 Allgemeine Schwingungslehre

Man kann vorwegnehmen, dass sich alle möglichen Geräusche oder Klänge, die wir über unser Ohr wahrnehmen, aus mehr oder weniger verschiedenen Schwingungen zusammensetzen. Um nachvollziehen zu können, wie die Synthese von Klängen funktioniert, ist es also unumgänglich sich ein allgemeines Grundverständnis der Schwingungslehre anzueignen.

2.1.1 Der Sinus

Die einfachste mögliche Schwingungsform ist die Sinusschwingung. Diese lässt sich aus einer Kreisbewegung gewinnen: Auf einem Kreis bewegt sich mit gleichbleibender Geschwindigkeit ein Punkt, welcher als zeitliche Funktion auf der Y-Achse dargestellt wird. Logischerweise rotiert diese Projektion nicht mehr in gleichbleibender Geschwindigkeit, sondern schwankt. Die dabei entstandene Gleichung ist als $y = \sin(x)$ bekannt.

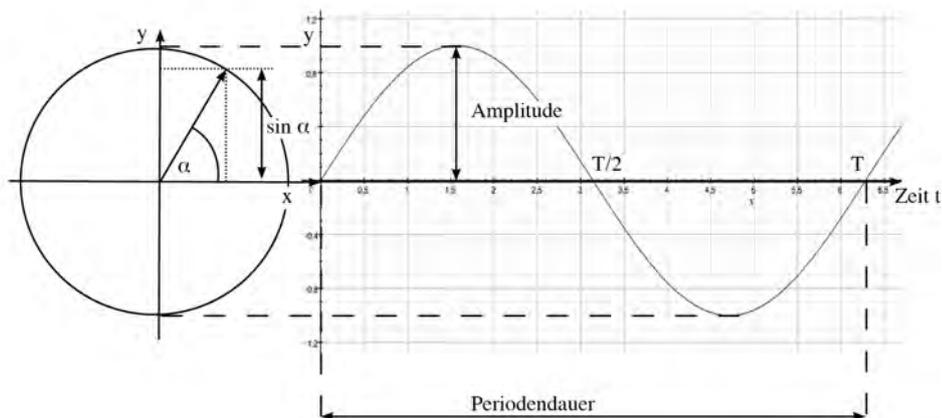


Abbildung 1: Der Sinus: Amplitude und Periodendauer

Am Beispiel der Sinusschwingung lassen sich folgende Begriffe einführen: Der größte Ausschlag eines schwingenden Punktes wird als Amplitude betitelt. Der Ausschlag an einem bestimmten Punkt (also zu einer bestimmten Zeit) ist als Elongation bekannt. Die Amplitude ist folglich die größte aller Elongationen. Im weiteren Verlauf wird klar werden, dass die Amplitude einen großen Einfluss auf die Empfindung der Lautstärke hat.

Spricht man von der Lautstärke als Charakteristikum eines Tones, so sollte man auch ein weiteres Merkmal erwähnen: Die Tonhöhe. Diese wird definiert durch die Frequenz, welche in der Einheit *Hertz* (Hz) angegeben wird. $1 Hz$ entspricht dabei einer Schwingung pro Sekunde. Kennzeichnend für unseren

Standard-Kammerton a_1 sind die berühmten 440 Hz.³ Frequenz f (in Hertz) und Periodendauer T (in Sekunden) stehen in folgendem Verhältnis:

$$f = \frac{1}{T}$$

Des Weiteren gibt es die Möglichkeit Schwingungen anhand ihrer physischen Ausbreitung - also ihre Wellenlänge - zu betrachten. Wichtig dafür ist die Schallgeschwindigkeit c , die natürlich unter anderem vom Übertragungsmedium abhängt. Wir geben uns mit dem Medium Luft zufrieden und definieren: $c = 344 \frac{m}{s}$.⁴ Somit ergibt sich folgendes Schaubild:

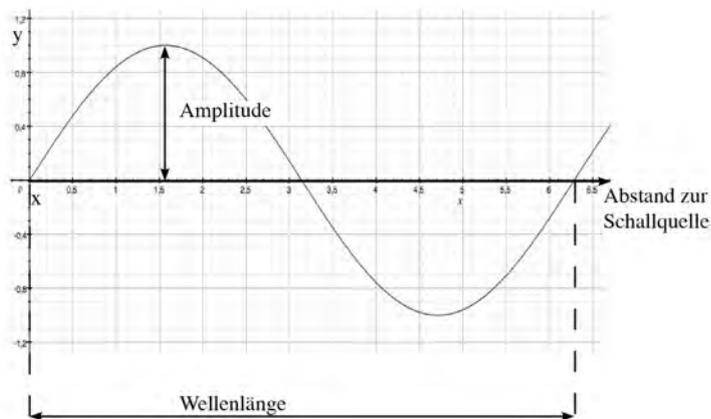


Abbildung 2: Der Sinus: Periodendauer

Die Wellenlänge λ steht mit der Frequenz und der eben erklärten Wellenlänge in folgendem Verhältnis:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

³Auf der beigelegten CD befindet sich eine Audiodatei mit einer einfachen 440 Hz Sinus-schwingung. Der Quellcode dafür liegt auch bei.

⁴ $c = 344 \frac{m}{s}$ gilt für trockene Luft mit 20°C. Aufgrund der Nicht-Dispersivität von Luft ist c unabhängig von f . Nähere Details sind jedoch irrelevant.

2.1.2 Addition von Sinusschwingungen

Bei gleicher Frequenz

Addiert man zwei Sinusschwingungen mit gleicher Frequenz und identischer Amplitude, so hat dies Auswirkungen auf die Amplitude der entstehenden Schwingung gleicher Frequenz. Der Faktor dafür ist die Phasenlage. Ist diese gleich, wird die Amplitude verdoppelt. Bei Gegenphasigkeit (180° Verschiebung) löschen sie sich aus. Für alle Werte dazwischen gilt: Es entsteht eine Sinusschwingung, deren Phasenverschiebung die Hälfte der Phasendifferenz ist.

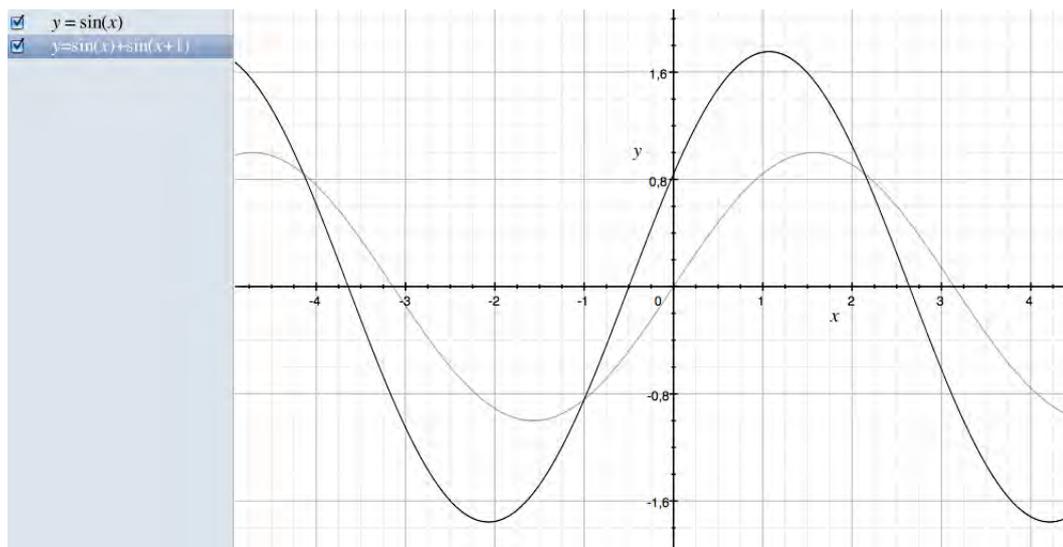


Abbildung 3: Die Addition von Sinusschwingungen mit Phasenverschiebung.

Die Phasenverschiebung kann auch als Phasenwinkel φ bezeichnet werden und es ergeben sich für die neu entstandene Schwingung, und in Verbindung mit der Kreisfrequenz ω , folgende Zusammenhänge:

$$e = a \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi)$$

$$\varphi = \omega \cdot t$$

Bei unterschiedlicher Frequenz

Bei Addition von Sinusschwingungen verschiedener Frequenzen entsteht eine neue Wellenform, deren Periodenlänge dem kleinsten gemeinsamen Vielfachen der beiden Einzelschwingungen entspricht.

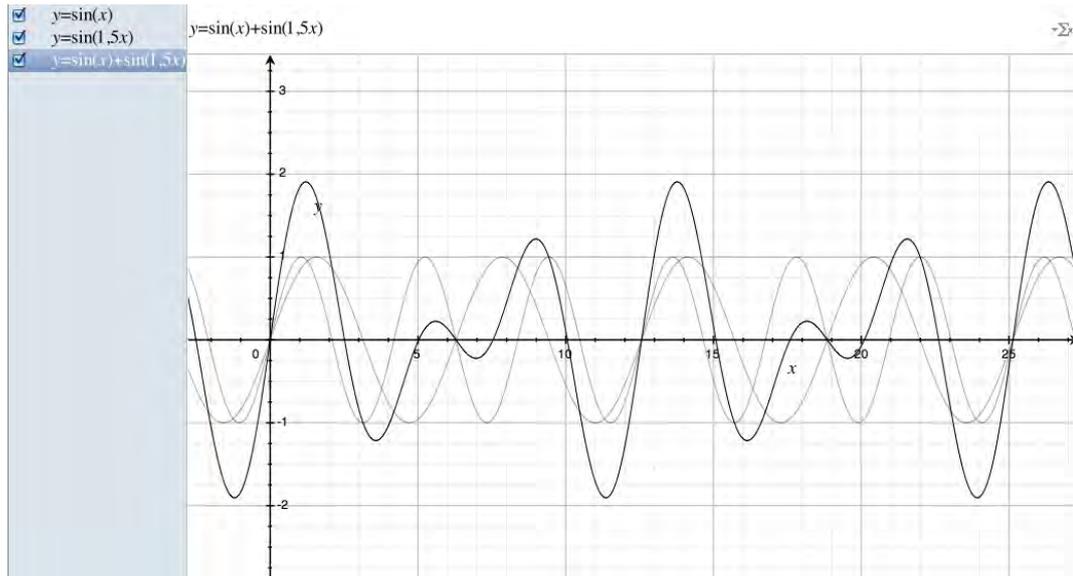


Abbildung 4: Die Addition von Sinusschwingungen mit verschiedenen Frequenzen.

Schwebung

Werden zwei Schwingungen, deren Frequenzen sich nur wenig unterscheiden, addiert, so entsteht eine modulierte Schwingung. Das heißt, ihre Amplitude nimmt mit der Schwebungsfrequenz - die der Differenz der Frequenzen der beiden ähnlichen Töne entspricht - ab und zu. Somit schwankt der für Menschen wahrnehmbare (einzelne) Ton auch in seiner Lautstärke.⁵

Erhöht man den Frequenzunterschied langsam, so kann das Ohr den immer schneller werdenden Amplitudenschwankungen nicht mehr folgen und die Schwebung verschwindet. Sobald die Differenz größer als 16 Hz liegt, nimmt man einen dritten Ton wahr: den sogenannten Tartianischen Ton, dessen Frequenz die Differenz der zwei addierten Schwingungen ist.⁶

Schwebungen sind für das Stimmen von akustischen Instrumenten sehr wichtig. Bei völliger Tongleichheit sollten keine zu hören sein, wohingegen sie beispielsweise bei der gleichmäßig temperierten Stimmung bei bestimmten Akkorden auftreten sollten.

[KJM06] [Dic97] [Sta80]

2.2 Töne, Klänge und Geräusche

Treten die bereits erklärten Schwingungen in physikalischer Form und einer Frequenz zwischen 16 und 16.000 Hz auf, so werden diese für das menschliche Ohr hörbar. Als sogenannte Schallquelle könnte aus musikalischer Sicht zum Beispiel eine Membran oder eine gespannte Saite dienen, die zum Schwingen

⁵Auf der beiliegenden CD befindet sich als Hörbeispiel eine Schwebung, generiert durch eine 440 Hz und eine 445 Hz Sinusschwingung. Auch der Quellcode liegt bei.

⁶Auf der beiliegenden CD befindet sich eine Audiodatei, die durch zwei voneinander abdriftenden Sinusschwingungen den Tartianischen Ton hörbar machen. Auch der Quellcode liegt bei.

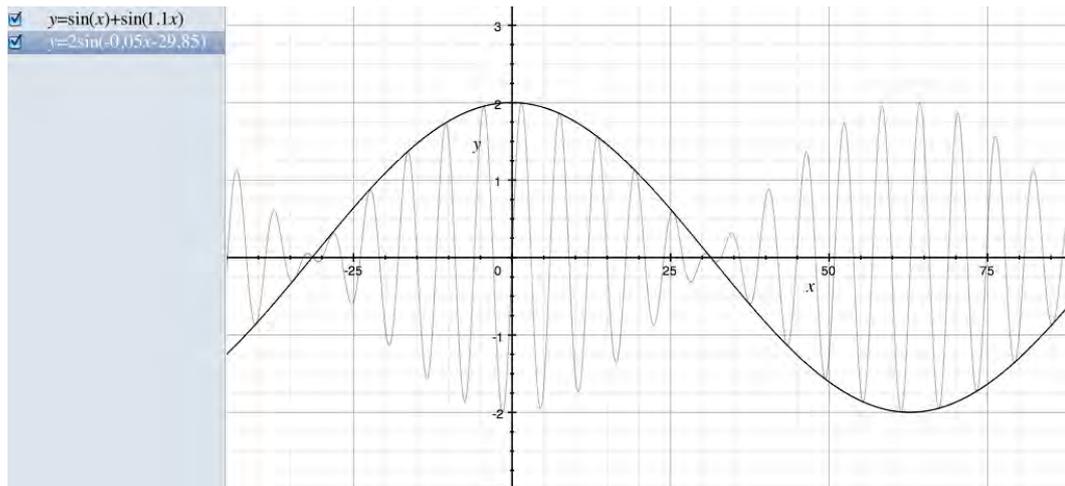


Abbildung 5: Die Schwebung

gebracht werden. Physikalisch gesprochen gilt eine Schwingung als Schallquelle, wenn sie die sie umgebende Luft in Bewegung versetzt und auch unter Einflussnahme äußerer Faktoren in das Ohr des Hörers gelangt.

Hier ist man im physikalischen Gebiet der Akustik angekommen, wo – anders als im normalen Sprachgebrauch – nicht nur zwischen Ton, Geräusch und Knall sondern auch zwischen Ton und Klang unterschieden wird. „Die Akustik beschäftigt sich mit der Ausbreitung von Longitudinalwellen in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern,⁷ und wird in die, in der Grafik dargestellten Bereiche gegliedert. (Hier wird Klang nicht gesondert aufgezählt, da ein solcher nur aus verschiedenen Tönen besteht, wie später erläutert wird.) Aus akustischer Sicht

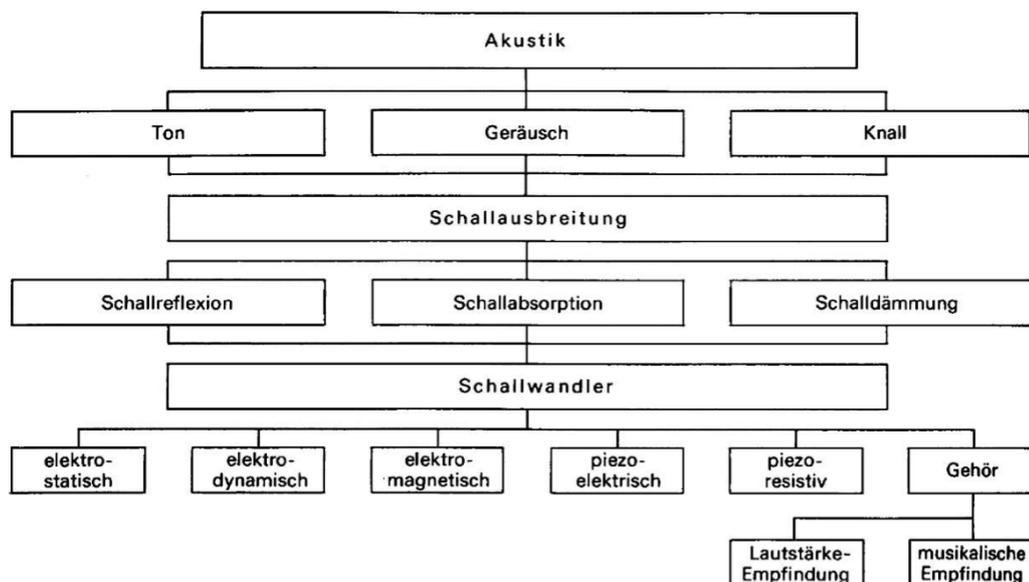


Abbildung 6: Akustik und Teilgebiete. (Quelle: [HMS07].)

⁷Zit. nach [HMS07].

bezeichnet man eine reine Sinusschwingung im hörbaren Bereich, also nur eine einzige Schallfrequenz, als Ton. Daraus resultiert eine sehr arme Klangfarbe, denn es wird nur eine Frequenz im Frequenzspektrum wiedergespiegelt. In der Natur kommen solche reinen Töne nur selten vor, denn ein Grundton tritt nur im Zusammenhang mit Obertönen auf.

Kommen, die für volle Klangfarbe relevanten, Obertöne hinzu, spricht man von einem Klang, wenn diese zu einem großen Teil aus ganzen Vielfachen der Frequenz des Grundtones bestehen. Die Verteilung, der zeitliche Verlauf und die Amplitude der Obertöne sind ausschlaggebend für den Charakter eines Instrumentes und dafür verantwortlich, dass das G einer Geige anders klingt, als das eines Klaviers.

Ist das Frequenzspektrum sehr breitbandig mit einem stark schwankenden Amplitudenverlauf und treten bei den Obertönen mehr als hauptsächlich ganzzahlige Vielfache auf, spricht man von einem Geräusch. Ein Musiker wiederum bezeichnet diese aperiodischen Schwingungen als disharmonischen Klang.

Bei einem ebenfalls sehr breitbandigen Frequenzspektrum, aber einem wenig schwankenden Amplitudenverlauf, kennzeichnet man eine kurzzeitige Schwingung oder einen Impuls als Knall, falls der Intensitätsverlust sehr schnell ist. Im Folgenden wurden ein Sinuston (Ton), ein Dreiklang aus Sinustönen (Klang), ein Tastendruck auf einem Klavier (Klang) sowie der gleiche Ton auf einem Saxophon (Klang), Wasserrauschen (Geräusch) und Händeklatschen (Knall) auf ihren zeitlichen Verlauf und ihr Frequenzspektrum hin untersucht.⁸

[Mö07] [HMS07]

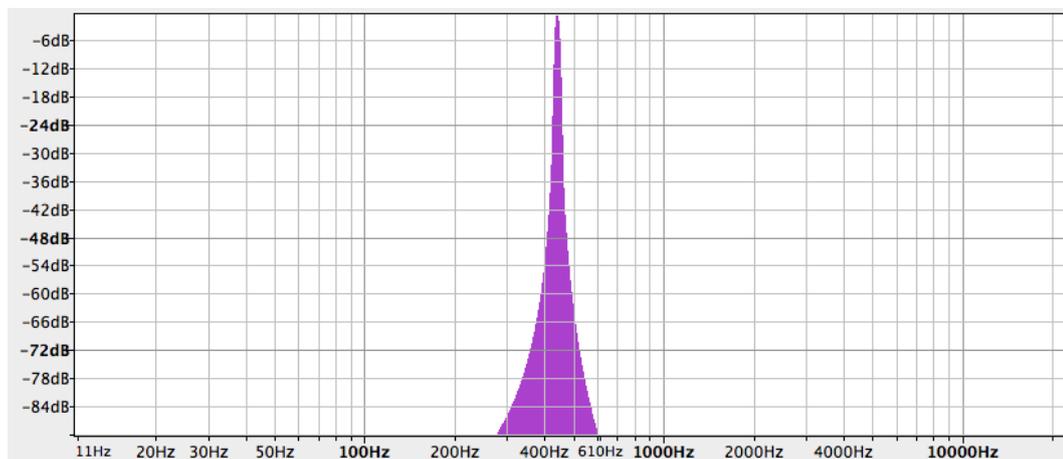


Abbildung 7: Eine 440 Hz Sinusschwingung als Beispiel für einen Ton.

⁸Auf der beiliegenden CD befinden sich alle folgenden Hörbeispiele und (falls die Datei eigens implementiert wurde) der Quellcode.

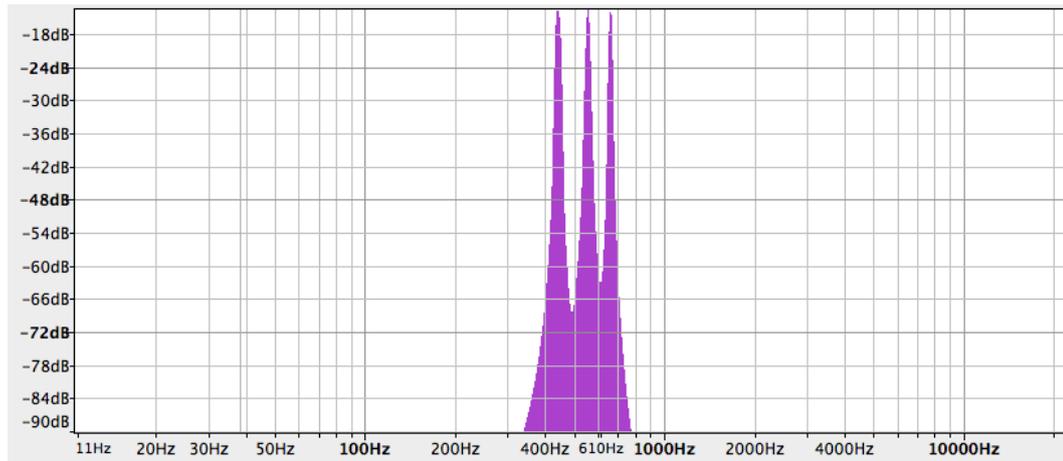
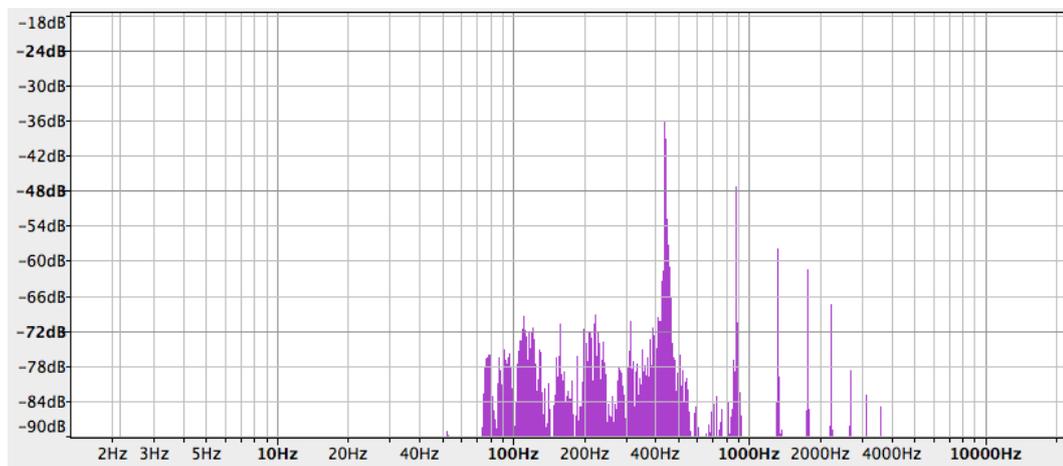
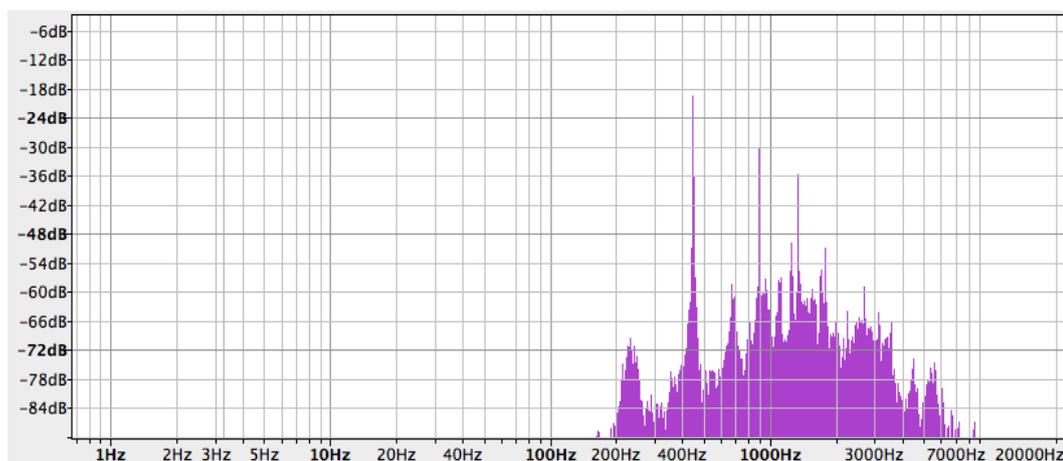


Abbildung 8: Ein Dreiklang aus Sinusschwingungen als Beispiel für einen Klang.

Abbildung 9: Ein Klavier spielt ein a (440 Hz) als Beispiel für einen Klang.Abbildung 10: Ein Saxophon spielt ein a (440 Hz) als Beispiel für einen Klang.

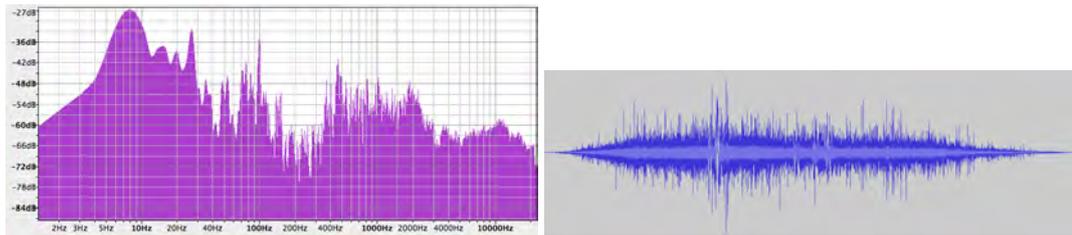


Abbildung 11: Wasserrauschen kann viele Frequenzen und einen gleichmäßigen zeitlichen Verlauf vorweisen .

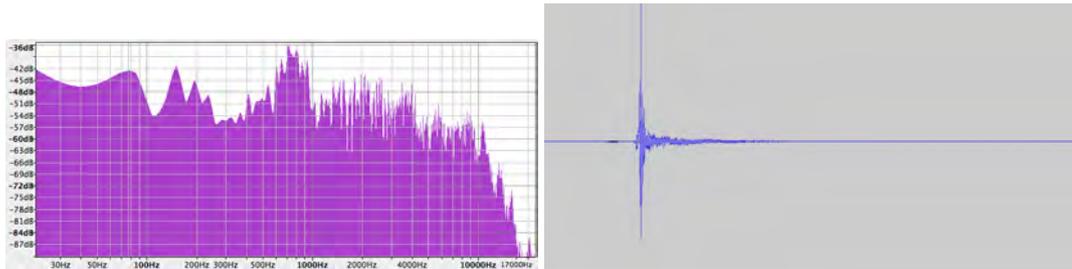


Abbildung 12: Händeklatschen kann viele Frequenzen und einen ruckartigen zeitlichen Verlauf vorweisen .

2.3 Relative Empfindungsänderung bei Tonhöhe und Lautstärke

1834 erkannte Weber⁹ durch Forschungen mit Gewichtsbelastungen die relative Empfindungsänderung, die im Allgemeinen besagt, dass sich Reize um einen bestimmten Prozentsatz (und nicht absoluten Wert) ändern müssen, damit sich die Abweichung für uns Menschen gleich anfühlt. Dies konnte durch Versuche unter anderem für Gewichtsempfinden, Helligkeitsempfinden und Geschmackskonzentration belegt werden. Dass dies auch für das Erfassen von Tonhöhen gilt, wird allein durch unser Tonsystem klar: Sowohl bei 440 Hz als auch bei 880 Hz liegt ein A. Das nächste A erst bei 1720 Hz. Der Wert wird also jeweils verdoppelt. Man kann natürlich auch einen Schritt weiter gehen: Nach reiner Stimmung empfindet man die Quinte von 440 Hz bei 660 Hz und von 880 Hz bei 1320 Hz. Beide Male muss um 50 Prozent und nicht um einen konstanten Wert erhöht werden.¹⁰ Zusammenfassend lässt sich demzufolge, für den Zuwachs an Empfindung ΔE , den Reizzuwachs ΔR und den Ausgangsreiz R ,

⁹Ernst Heinrich Weber (1795 - 1878), deutscher Physiologe.

¹⁰Auf die genaue Stimmung von Musikinstrumenten wird hier nicht eingegangen. Diese spielt für die Veranschaulichung und den weiteren Verlauf der Arbeit keine Rolle.

diese Gesetzmäßigkeit folgendermaßen festhalten:¹¹

$$\Delta E = k \frac{\Delta R}{R}$$

Weitere Versuche zeigen, dass diese Feststellung in etwa auch für das Empfinden von Lautstärke gilt. Das bedeutet, der Mensch empfindet den Unterschied zwischen den Schalldrücken p und $2p$ in den meisten Fällen gleich wie zwischen $5p$ und $10p$. Daraus geht hervor, dass eine Maßeinheit für Lautstärke logarithmisch sein sollte, auch wenn das Formalisieren von Reizen nicht einfach ist.¹² Im Folgenden sei R_0 der Schwellreiz, also der kleinste mögliche Reiz, bei dem die Empfindung $E \geq 0$ beginnt. Da auch bei unendlich kleinen Abständen bei Empfindungen E und Reizen R gilt, dass E abhängig von R ist, gilt nach der oben genannten Formel:

$$dE = k \frac{dR}{R}$$

$$\frac{dE}{dR} = \frac{k}{R}$$

Somit ergibt sich durch Integration nach R

$$E = k \cdot \ln(R) + C$$

$$E = k \cdot \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)$$

$$E = k \cdot 2,3 \cdot \lg\left(\frac{R}{R_0}\right)$$

Wie bereits angedeutet, hat dies zur Folge, dass sehr große Differenzen in R möglich sind, während E relativ überschaubar bleibt. Dies ist auch nötig, denn aufgrund von Forschungen ist klar, dass der Mensch Schallpegel von ca. $20 \cdot 10^{-6} \text{N/m}^2$ bis 200N/m^2 wahrnehmen kann. Verwendet man diesen kleinsten hörbaren Pegel als p_0 für die international festgelegte Definition vom Schalldruckpegel $L = 20 \lg\left(\frac{p}{p_0}\right)$, so ergibt sich die gebräuchliche Bezeichnung dB (Dezibel).

Als Beispiel werden hier ein paar Werte geliefert:

¹¹Auf der beigelegten CD ist eine Audiodatei enthalten, die zuerst verschiedene Frequenzen abspielt und konstant 100 Hz addiert. Als Vergleich dazu werden die selben Frequenzen wiederholt, zu denen dann relativ ein Viertel addiert wurden. Auch der Quelltext dazu liegt bei.

¹²Auf der beigelegten CD ist eine Audiodatei enthalten, in welcher die Amplitude zuerst linear ansteigt. Hier wirkt es, als würde sich in der Lautstärke in den letzten Sekunden kaum mehr etwas ändern. Als Vergleich dazu wird danach die selbe Frequenz gespielt und die dB Skala steigt linear an. Dies wirkt für unser Ohr als gleichmäßiger Anstieg. Auch der Quelltext dazu liegt ebenfalls bei.

Schallursache	Schalldruck (N/m^2)	Schalldruckpegel (dB)
Hörschwelle	$2 \cdot 10^{-5}$	0
Umgebungsgeräusche in der Bibliothek	$2 \cdot 10^{-3}$	40
Dicht befahrene Straße	0,2	80
Start von Düsenflugzeugen	20	120
Schmerzgrenze	200	140

[Mö07] [HMS07]

2.4 Fourier-Reihe

2.4.1 Reelle Fourier-Reihe

Seit 1822 wissen wir, dass sich alle periodischen Schwingungen als Summe von sinusförmigen Schwingungen darstellen lassen. Das hat eine starke Auswirkung auf die Akustik, denn somit lässt sich jeder periodische Klang aus einzelnen Sinus zusammensetzen.¹³ Eine Funktion $y(t)$ heißt periodisch mit Periode T_0 , wenn gilt:

$$y(t + kT_0) = y(t) \quad \forall k \in \mathbb{Z}$$

Jede periodische Schwingung setzt sich aus einzelnen Sinusschwingungen zusammen, deren Frequenzen Vielfache der Grundfrequenz sind. Es sei $y(t)$ mit Periode T_0 , dann gilt

$$\begin{aligned} y(t) &= A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(2\pi n f_0 t) - \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(2\pi n f_0 t) \\ &= A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(2\pi n f_0 t + \varphi_n) \end{aligned}$$

Mit $C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$ und $\varphi_n = \arg(B_n, A_n)$.

Die Argumentfunktion $\arg(B_n, A_n)$ gibt dabei die Winkelkoordinate bei Darstellung der kartesischen Koordinaten A_n und B_n als Polarkoordinaten an. $C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$ ist bei dieser Interpretation der Abstand des Punktes (A_n, B_n) vom Ursprung. C_n wird dabei Amplitude der n -ten Oberwelle genannt, da sie angibt, wie stark die n -te Oberwelle vertreten ist. φ_n heißt Phase der n -ten Oberwelle.

¹³Diese Feststellung geht auf den französischen Mathematiker Joseph Fourier (1768 - 1830) zurück.

Die Koeffizienten A_n und B_n folgendermaßen berechnet:

$$\begin{aligned} A_0 &= \frac{1}{T_0} \int_a^{a+T_0} y(t) dt \\ A_n &= \frac{2}{T_0} \int_a^{a+T_0} y(t) \cos(2\pi n f_0 t) dt \\ B_n &= -\frac{2}{T_0} \int_a^{a+T_0} y(t) \sin(2\pi n f_0 t) dt \end{aligned}$$

a ist hierbei eine beliebige reelle Zahl. Häufig benutzt man $a = -\frac{T_0}{2}$

2.4.2 Komplexe Fourier-Reihe

Nun kann man jedes Paar von Amplitude und Phase als komplexe Zahl in Polarkoordinatendarstellung ansehen. Dann erhält man für die Funktion $y(t)$:

$$y(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} c_n e^{i2\pi n f_0 t}$$

Die Koeffizienten ergeben sich hier zu

$$c_n = \frac{1}{T_0} \int_a^{a+T_0} y(t) e^{-i2\pi n f_0 t} dt$$

Die reellen Komponenten erhält man daraus aufgrund der Eulerformel $e^{i\tau} = \cos \tau + i \sin \tau$ als:

$$\begin{aligned} A_0 &= c_0 \\ A_n &= c_n + c_{-n} \\ B_n &= i(c_{-n} - c_n) \end{aligned}$$

Umgekehrt ergeben sich die komplexen Koeffizienten:

$$c_n = f(n) = \begin{cases} \frac{A_{-n} - iB_{-n}}{2} & \text{für } n < 0 \\ A_0 & \text{für } n = 0 \\ \frac{A_n + iB_n}{2} & \text{für } n > 0 \end{cases}$$

2.4.3 Beispiele

Es macht Sinn, sich folgende, beispielhafte Schwingungen genauer anzusehen, da sie für die synthetische Klangerzeugung besonders wichtig sind.

Rechteckschwingung Eine einfache Rechteckschwingung ist definiert durch:

$$y(t) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } 0 < t \leq 1 \\ -1 & \text{wenn } 1 < t \leq 2 \end{cases} \quad y(t + k \cdot 2) = y(t)$$

Die Funktion ist ungerade, also können nur B_n darin vorkommen. Das liegt daran, dass die Sinus-Funktion ungerade und die Cosinus-Funktion gerade ist.

$$\begin{aligned} B_1 &= -\frac{4}{\pi} \\ B_2 &= 0 \\ B_3 &= -\frac{4}{3\pi} \\ B_n &= \begin{cases} 0 & \text{für } n \text{ gerade} \\ -\frac{4}{n\pi} & \text{für } n \text{ ungerade} \end{cases} \end{aligned}$$

Für eine allgemeine Rechteckschwingung mit Maximum m

$$y(t) = \begin{cases} m & \text{wenn } 0 < t \leq \frac{T_0}{2} \\ -m & \text{wenn } \frac{T_0}{2} < t \leq T_0 \end{cases} \quad y(t + k \cdot T_0) = y(t)$$

ergeben sich folgende Koeffizienten:

$$B_n = \begin{cases} 0 & \text{für } n \text{ gerade} \\ -\frac{4m}{n\pi} & \text{für } n \text{ ungerade} \end{cases}$$

Eine angenäherte Rechtecksschwingung sieht demzufolge so aus:

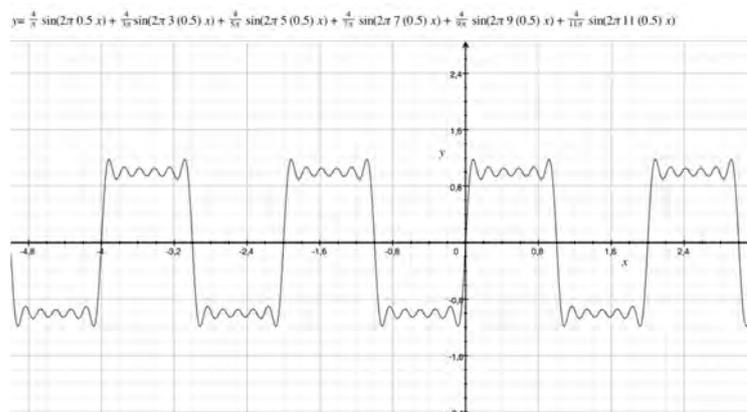


Abbildung 13: Eine Annäherung an die Rechtecksschwingung.

Dreieckschwingung Eine einfache Dreieckschwingung ist definiert durch:

$$y(t) = \begin{cases} 2t + 1 & \text{wenn } -1 < t \leq 0 \\ 1 - 2t & \text{wenn } 0 < t \leq 1 \end{cases} \quad y(t + k \cdot 2) = y(t)$$

Die Funktion ist gerade, also können nur A_n vorkommen:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{-8}{\pi^2} \\ A_2 &= 0 \\ A_1 &= \frac{-8}{(3\pi)^2} \\ A_n &= \begin{cases} 0 & \text{für } n \text{ gerade} \\ \frac{-8}{(n\pi)^2} & \text{für } n \text{ ungerade} \end{cases} \end{aligned}$$

Für eine allgemeine Dreieckschwingung mit Maximum m

$$y(t) = \begin{cases} (2t + 1)m & \text{wenn } -\frac{T_0}{2} < t \leq 0 \\ -(1 - 2t)m & \text{wenn } 0 < t \leq \frac{T_0}{2} \end{cases} \quad y(t + k \cdot T_0) = y(t)$$

ergeben sich folgende Koeffizienten:

$$\begin{aligned} A_1 &= m \frac{-8}{\pi^2} \\ A_2 &= 0 \\ A_1 &= m \frac{-8}{(3\pi)^2} \\ A_n &= \begin{cases} 0 & \text{für } n \text{ gerade} \\ m \frac{-8}{(n\pi)^2} & \text{für } n \text{ ungerade} \end{cases} \end{aligned}$$

Eine angenäherte Dreiecksschwingung sieht also folgendermaßen aus:

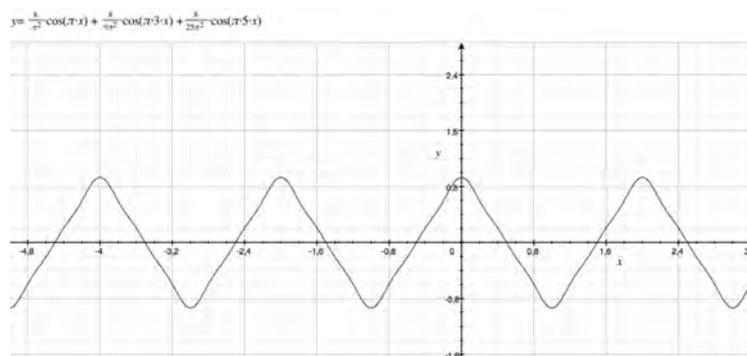


Abbildung 14: Die Annäherung an eine Dreiecksschwingung.

[Dic97] [HMS07] [Wal96] [Jam02]

2.4.4 Fourier-Transformation

Im Audiobereich kommen sehr viele nicht periodische Signale vor, deren Betrachtung natürlich auch nötig ist. Möchte man jede Art von Signalen verarbeiten, so nutzt man die Fourier-Transformation. Mit deren Hilfe lässt sich aus jedem beliebigen Signal ein sogenanntes Spektrum gewinnen. Dieses Spektrum setzt sich zusammen aus verschiedenen Sinusschwingungen und deren Amplituden.

Unterschieden wird zwischen der diskreten (DFT) und der schnellen (FFT) Fourier-Transformation. Während die DFT sehr zeitaufwendig ist, ist die FFT dagegen in $n \cdot \log(n)$ umsetzbar. Der Grund dafür ist ein rekursiver *divide and conquer* Algorithmus.

[Wal96] [Jam02]

2.4.5 Klangfarbe und Spektralanalyse

Durch die Fouriertransformation wird es nun möglich, die Klangfarbe von Klängen graphisch darzustellen und das Klangspektrum zu visualisieren. Wie bereits erwähnt, ist es die Klangfarbe, die dafür verantwortlich ist, dass ein G einer Geige nicht klingt wie ein G eines Klaviers. Das ergibt sich aufgrund der Zusammensetzung ihrer Frequenzanteile. Je harmonischer ein Klang ist, desto mehr sind nur der Grundton und die harmonischen Obertöne zu sehen. Kommen mehr Rauschanteile oder unharmonische Obertöne hinzu, so wird der Klang unsauber.

In der Tontechnik sind solche Visualisierungen, sogenannte Spektralanalysen, von großer Bedeutung. Sie verraten zum einen, welche Frequenzen die höchste Amplitude aufweisen, zum anderen geben sie darüber Auskunft, aus wie vielen Teiltönen sich ein Klang zusammensetzt.

In dieser Arbeit wird hauptsächlich mit dem Analysewerkzeug von *Audacity* gearbeitet, welche auf der FFT basiert. Um die Intensitätsverteilung der

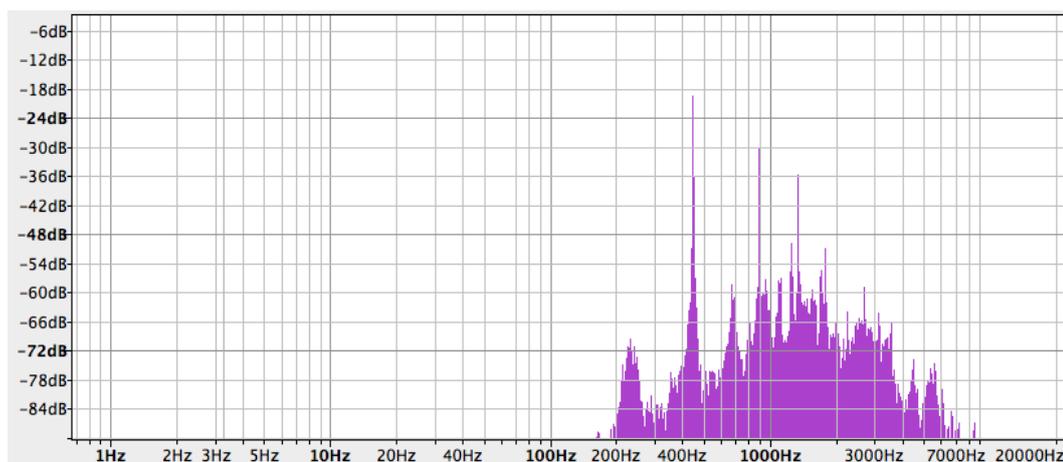


Abbildung 15: Das Frequenzanalysewerkzeug von Audacity.

Frequenzen im zeitlichen Verlauf sichtbar zu machen, arbeitet man mit sogenannten Sono- bzw. Spektrogrammen. Das macht deshalb oft Sinn, da sich die

Frequenzverteilung im Laufe der Zeit oft ändert. Je heller der Abschnitt ist, desto größer ist dort die Amplitude und desto lauter ist diese Frequenz hörbar. Auch hier wird *Audacity* verwendet.

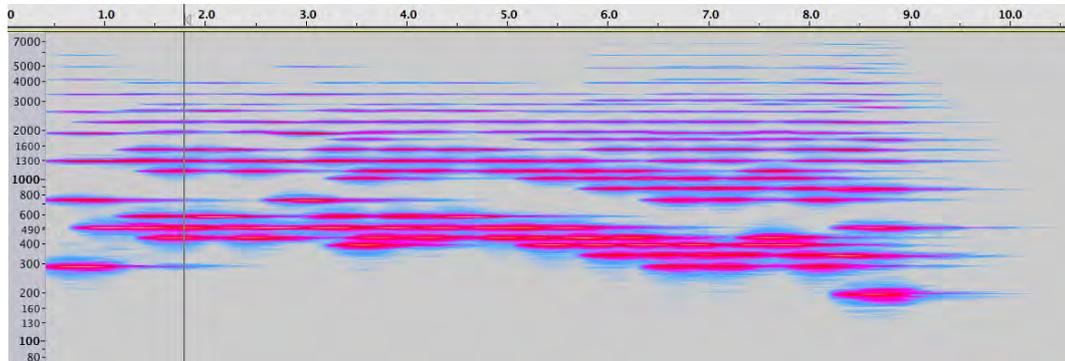


Abbildung 16: Das Spektrogramm von Audacity.

2.5 Klassische Klangerzeuger

Da elektronische Klangerzeuger zum einen oftmals akustische Instrumente nachahmen und zum anderen unser Gehör darauf trainiert ist, Klänge als schön zu empfinden, die gewissen Maßstäben folgen, empfiehlt es sich, besonders klassische Klangerzeuger auf deren Eigenschaften hin zu untersuchen.

Ganz allgemein lassen sich Klänge in drei aufeinanderfolgende zeitliche Abschnitte einteilen:

1. Jeder Klang beginnt mit einer *Einschwingungsphase* in der sich die Elongation von 0 auf den normalen Ausschlag steigert. Bei manchen Instrumenten pegelt sich hier die Tonhöhe erst ein.
2. In der *quasistationären Phase* ändert sich der Klang nur geringfügig. Trotzdem ist diese Phase ausschlaggebend für den Charakter.
3. Kein klassisches Instrument kann abrupt enden. Deshalb ist die *Ausklingsphase* unumgänglich, in welcher die Elongation wieder bis 0 absinkt.

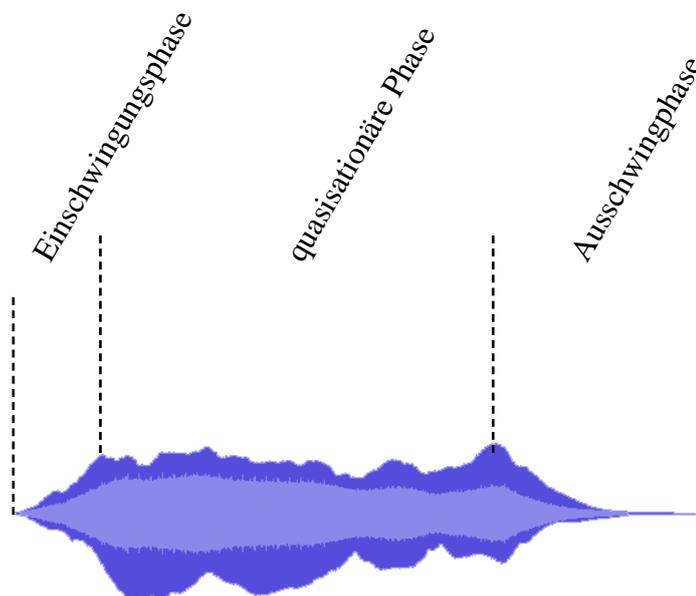


Abbildung 17: Die 3 Phasen der Elongation bei Klangerzeugern am Beispiel eines Orgeltones.

Im Folgenden werden harmonische und unharmonische Klangerzeuger auf diese drei Phasen und die Klangfarbe untersucht. Ich möchte mich hier auf Musikinstrumente einschränken, da der Vergleich zu Synthesizern im Vordergrund steht.

2.5.1 Harmonische Klangerzeuger

Von einem harmonischen Klangerzeuger spricht man, wenn ein harmonisches Linienspektrum vorliegt. Der resultierende Klang weist einen deutlichen Tonhöhencharakter auf und hört sich relativ klar an.

Je geringer der Frequenzumfang ist (je weniger Harmonische auftreten), desto weicher wird der Klang. Treten viele Harmonische auf, so wird der Klang schärfer. Natürlich ist auch ausschlaggebend, wie laut die Teiltöne sind.

Desweiteren ist interessant, dass sich Klänge ohne geradzahlige Obertöne sehr hohl anhören.

Betrachtet man die oben genannten drei zeitlichen Phasen, so kann festgehalten werden, dass sich harmonische Klangerzeuger vor allem in ihrer Einschwingungsphase unterscheiden. Im Normalfall liegt diese zwischen 15 und 50 ms. Bei Streichinstrumenten kann diese Dauer knapp eine halbe Sekunde betragen. Bei Instrumenten, die gezupft werden oder deren Saite angeschlagen wird, (Klavier) ist diese Phase natürlich kürzer und liegt in der Regel unter 10 ms. Interessant ist, dass sich bei sehr kurzen Einschwingungsphasen die Klänge in den ersten Millisekunden kaum harmonisch verhalten, sondern ein breites, rauschlastiges Klangspektrum vorweisen.

Bei Instrumenten mit sehr langer Einschwingungsphase kann man beobachten, dass sich in dieser Zeit der Klang erst aufbauen muss. Dies liegt daran, dass Resonanzkörper nicht sofort mitschwingen, vor allem bei tiefen Tönen.

Während der quasistationären Phase gibt es klangliche Änderungen, auch wenn diese oftmals nur geringfügig sind. Dadurch, dass viele Frequenzen auftreten, die sehr nah zueinander liegen, gibt es viele Schwingungen, die den Klang formen. Zudem ist klar, dass ein, vom Menschen gespieltes Instrument, kleinen Schwankungen unterliegt. Ein Geigenbogen kann nicht immer gleich schnell geführt werden und ein Saxophonspieler bläst jede Sekunde ein bisschen anders.

Manche Instrumente - vorrangig die mit kurzer Einschwingungsphase, wie das Klavier - weisen keine quasistationäre Phase vor, da sie sofort abklingen. Dafür dauert die Ausklingphase sehr lange und weist die klangformenden Faktoren der quasistationären Phase vor.

Auch die Ausklingphase hängt sehr stark vom Resonanzkörper ab. Im Großen und Ganzen lässt sich sagen, dass ein Klang mit langer Einschwingungsphase auch eine lange Ausklingphase hat. Außerdem nehmen die hohen Frequenzen eines Klanges schneller ab als tiefe.

Wichtig für die Lebendigkeit eines Klanges sind außerdem die Geräuschanteile, das heißt breitbandige Frequenzen, die zum Großteil nicht harmonisch sind. Da diese leiser als die Harmonischen sind, treten sie nicht als unharmonisch in den Vordergrund. In den folgenden Abbildungen werden verschiedene Instrumente auf deren Elongationen und Klangspektren betrachtet:¹⁴

[Mey80] [Dic97]

¹⁴Auf der beiliegenden CD befinden sich alle Audiodateien.

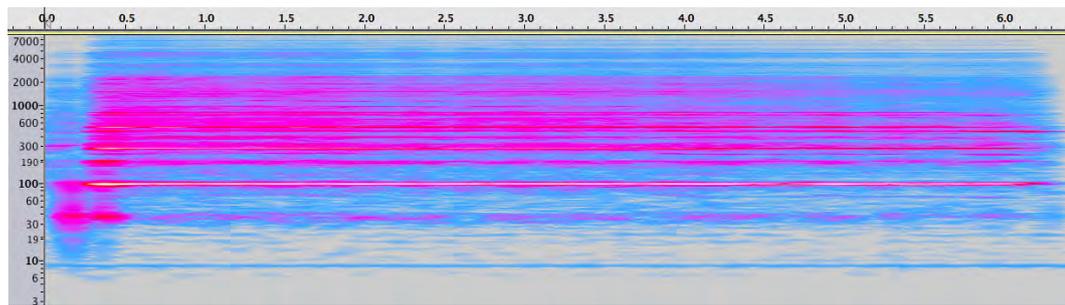


Abbildung 18: Das Spektrogramm eines Saxophones.
 [Relativ tonales Spektrum mit durchgängig hohen Rauschteilen. Die Einschwingungs- und Ausklingphase sind in etwa gleich lang.]

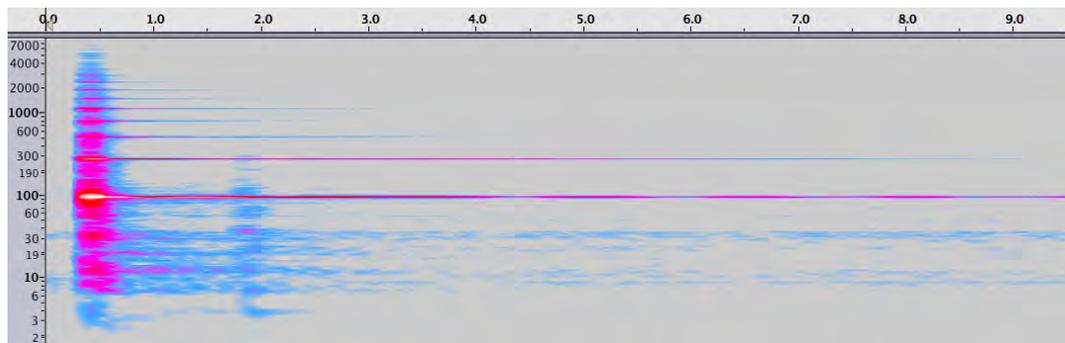


Abbildung 19: Das Spektrogramm eines Klavieres.
 [Sehr rauschlastiger Anschlag dem keine quasistationäre Phase folgt. Sehr tonale Ausklingphase, in der die Höhen schneller abnehmend.]

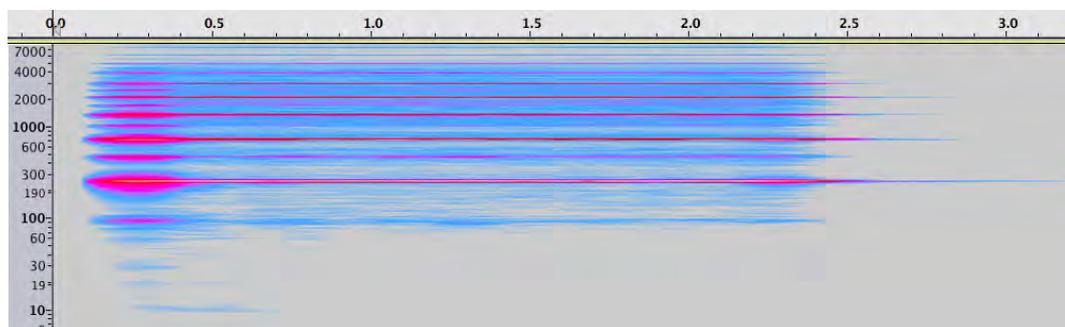


Abbildung 20: Das Spektrogramm einer Oboe.
 [Alle Phasen sind sehr tonal. Die Einschwingungsphase ist etwas lauter.]

2.5.2 Unharmonische Klangerzeuger

Unharmonische Klänge sind rauschartige Frequenzen mit einem breiten Spektrum und ohne Tonhöhencharakter. Es gibt viele unharmonische Klänge, doch nur wenig unharmonische Instrumente. Meist werden sie für perkussive Klänge genutzt, weshalb sich als Beispiel ein Schlagwerk sehr gut eignet.

Wie das Klavier haben beispielsweise die Snare Drum oder Hi-Hats sehr kurze Einschwingungsphasen von wenigen Millisekunden, die sofort in die Ausklangphase übergehen. Eine Tonhöhe ist nicht zu erkennen. Allerdings muss erwähnt werden, dass Bassdrum, Tom und Crash in der Ausklangphase einen, wenn auch schwachen, Tonhöhencharakter entwickeln.

In den folgenden Abbildungen werden verschiedene Instrumente auf deren Elongationen und Klangspektren betrachtet:

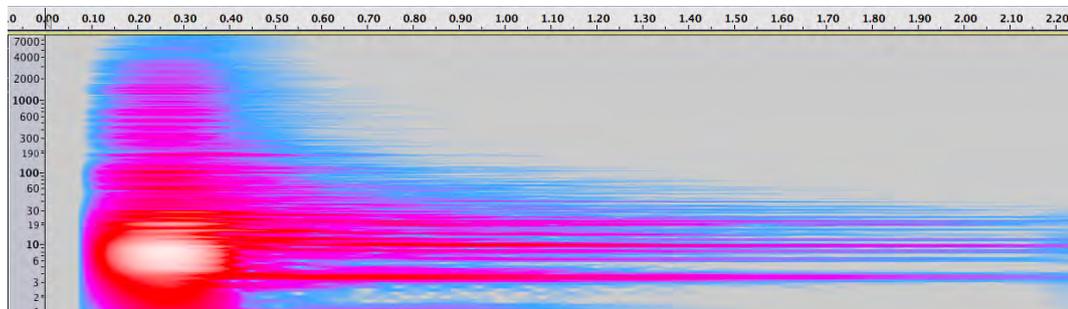


Abbildung 21: Das Spektrogramm einer Kickdrum.

[Sehr rauschlastige Einschwingungsphase mit Akzenten im Bassbereich. Höhen nehmen in der Ausklangphase schnell ab, wobei im Bass tonale Reste bestehen bleiben.]

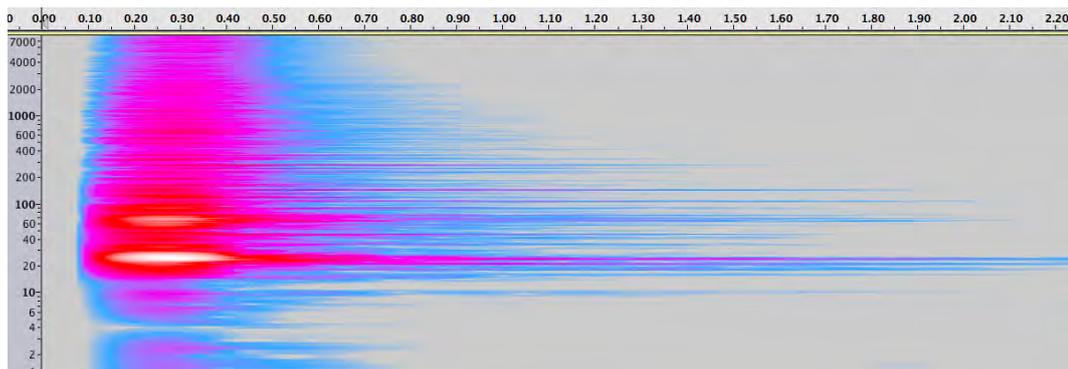


Abbildung 22: Das Spektrogramm einer Snaredrum.

[Ähnlich wie die Kickdrum, nur drei bis vier Oktaven höher. Außerdem weist die Einschwingungsphase mehr Rauschteile vor.]

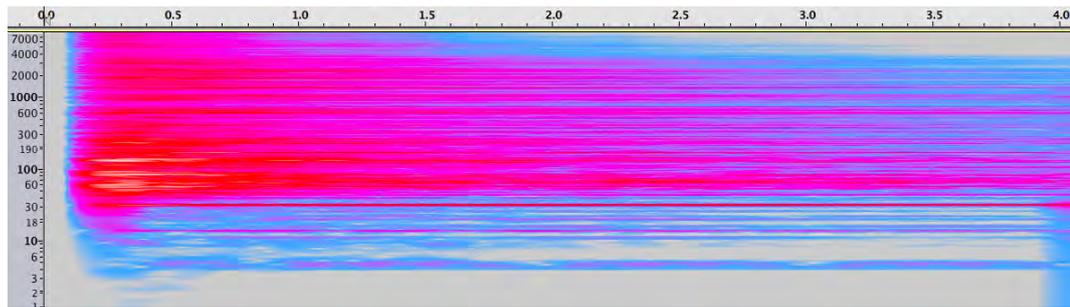


Abbildung 23: Das Spektrogramm einer am Rand gespielten Ride.
[Fast nur Rauschen in beiden Phasen. Auch hier nehmen hohe Frequenzen schneller ab.]

[Mey80] [Dic97]

3 Klangsynthese

3.1 Geschichte

Die ersten Vorgänger der heutigen Synthesizer wurden Anfang des 20. Jahrhunderts gebaut. Dazu verwendete man die verschiedensten Techniken und Möglichkeiten zur Schallverbreitung. Das 200 Tonnen schwere *Dynamophon* aus dem Jahre 1906 verbreitete Klänge über das Telephonnetz, während das *Theremin* von 1920 bereits über Lautsprecher verfügte. Bekannt wurde letzteres durch dessen Spielweise: Durch Bewegen der Hand in einem elektrostatischen Feld lässt sich die Tonhöhe regulieren. Wenig später hielt Ondes *Martinet* Einzug in viele Opernhäuser und Theater, bevor 1932 das erste elektronische Musikinstrument, das Telefunken-Model des *Trautoniums*, in Serie ging. Der erste kommerzielle Erfolg war dann schließlich die weltberühmte *Hammond-Orgel*, die 1934 in Großserie ging.

Bahnbrechend war schließlich der *Electronic Music Synthesizer* von Olson und Belar aus dem Jahre 1955, denn erstmal traten die Komponenten in der selben Kombination wie auch in modernen Synthesizern auf: Oszillatoren, Rauschgeneratoren, Filter, Hüllkurven und viele mehr.

Den endgültigen Startschuss legte in den Sechzigern der Amerikaner Robert Moog. Er setzte zum einen auf die Klaviatur und zum anderen auf die Spannungsteuerung des Oszillators von $1 \frac{V}{\text{Oktave}}$, was bis heute Standard ist. Seine ersten Exemplare waren zwar noch sehr unübersichtlich und benötigten eine lange Einstellungszeit, aber innerhalb weniger Jahre verbesserte sich die Technik sowie die Handhabung wesentlich, bis 1970 der *Minimoog* den Markt und die Bühnen eroberte.

[Sch98]

3.2 Analoge Klangsynthese

In vielen Fällen wird die analoge Klangsynthese mit der subtraktiven Synthese gleichgesetzt, da dieses Verfahren in den meisten analogen Geräten zum Einsatz kommt. In dieser Arbeit werde ich mich aber bei der Charakterisierung von *analog* nicht auf subtraktive Geräte beschränken. Jeder Synthesizer, der zur Klangerzeugung ausschließlich spannungsgesteuerte Schaltkreise verbindet, zählt als analoger Synthesizer.

3.2.1 Modulare Synthesizer

Die ersten gebräuchlichen Synthesizer, wie Moogs Erstling, waren sogenannte *modulare Synthesizer*. Die einzelnen Komponenten sind separate Module, deren Ein- und Ausgänge je nach Belieben mit speziellen Kabeln, den *Patch-Cords* verbunden werden müssen. Vorteilhaft daran ist vor allem die Flexibilität und die Möglichkeit, alle möglichen Kombinationen zu verbinden. Als Nachteil kann sicher genannt werden, dass ein gewisses *Know-How* unbedingt nötig ist. Ohne Fachwissen bekommt man keinen Ton zu Stande, da es nicht funktioniert

sich einfach an die Klaviatur zu setzen und mit dem Spielen loszulegen. Ein weiterer Nachteil ist es sicherlich auch, dass man durch die Notwendigkeit vieler *Patch-Cords* sehr schnell den Überblick verliert und der Signalverlauf erst nachvollzogen werden muss. Auch deshalb sind diese Geräte zu groß und zu aufwändig für den normalen Bühnenbetrieb.

[Rus10] [Sch98]

3.2.2 Kompakte Synthesizer

Aufgrund dieser Nachteile setzten sich in den 70er Jahren die kompakten Synthesizer durch. Die Komponenten dieser Geräte waren fest verdrahtet und in einem einzelnen Gerät untergebracht. Das brachte zwar Einschnitte in der Flexibilität mit sich, aber Performance war den Nutzern wichtiger. Ein Beispiel dafür ist der bereits genannte *MiniMoog*.

Des Weiteren entwickelten sich in dieser Zeit drei weitere wichtige Neuerungen, die heute unverzichtbar erscheinen. Bisher konnte man auf Synthesizern nicht effektiv mehrere Tasten gleichzeitig drücken, es war also unmöglich Akkorde zu spielen. Vorreiter, bei der Lösung dieses Problems, war dabei wieder Moog, der 1975 den *Polymoog* vorstellte, der 71 Töne gleichzeitig spielen konnte.

Der *Polymoog* brachte auch noch eine weitere Neuerung mit sich: Man orientierte sich an klassischen Instrumenten und machte die Tasten anschlagsdynamisch. Das heißt, dass der Synthesizer darauf reagiert, wie stark eine Taste gedrückt wird. Je leichter sie gedrückt wird, desto kleiner wird die Amplitude und desto leiser wird der Klang.

Der dritte wichtige Fortschritt war es nun, dass verschiedene Parametereinstellungen abspeicherbar waren. Man konnte einen bestimmten Klang erstellen und diese Einstellung nach Belieben wieder reproduzieren. Diese, vor allem für Liveauftritte wichtige Neuerung, wurde allerdings erst durch die fortschreitende Digitalisierung ermöglicht.

3.3 Digitale Synthesizer

Die bereits genannten Synthesizer, die analoge Methoden zur Klangerzeugung und digitale Komponenten zur Speicherung benutzten, wurden als hybride Systeme bekannt. Wie in vielen Bereichen hielt in den 80ern auch in der Welt der Synthesizer die Digitaltechnik Einzug und es entstanden komplett digitale Synthesizer. Sämtliche analoge Bauteile wurden durch digitale Komponenten ersetzt, wodurch auch die Möglichkeit entstand, Klänge nicht nur durch subtraktive Synthese, sondern auch auf andere Art und Weise herzustellen. Ein wichtiges Beispiel ist dabei der Yamaha DX7, der auf eine Art der FM-Synthese setzte und somit als erster brauchbare Simulationen von Pianos oder perkussiven Instrumenten liefern konnte.

[Rus10] [Ack91]

3.4 Synthesekomponenten

Für die Erzeugung von elektronischen Klängen gibt es zum einen verschiedene Möglichkeiten und zum anderen werden für jede Syntheseart bestimmte Methoden wiederverwendet. Es gibt also eine Reihe von Komponenten, um die man im Normalfall nicht herumkommt und welche man in drei Gruppen gliedern kann. Zur Klangerzeugung zählen Oszillatoren und Rauschgeneratoren. Hüllkurven und Filter sind Komponenten der Klangformung und der Niederfrequenzoszillator ist der wichtigste Vertreter aus dem Gebiet der Klangmodulation.

3.4.1 Oszillator (VCO)

Das Basismodul eines Synthesizers ist der Oszillator, da er die Grundschwingung erzeugt. In den meisten Fällen treten in einem Synthesizer mehrere Oszillatoren auf, um dem Nutzer mehr Gestaltungsmöglichkeiten zu geben. Diese sind nicht nur beschränkt auf eine Art von Schwingung, sondern sind in der Lage, verschiedene Kurvenformen zu erzeugen.¹⁵

Sinuswelle

Der Sinus ist der Grundton ohne harmonische oder unharmonische Obertöne. Wie man jetzt schon erwähnen kann, ist diese Schwingung besonders wichtig für die additive, aber nutzlos für die subtraktive Synthese. In der Praxis der Analogsysteme ist eine Generierung der Sinusschwingung sehr schwierig. Darum verwendet man oft eine gefilterte Dreieckschwingung.

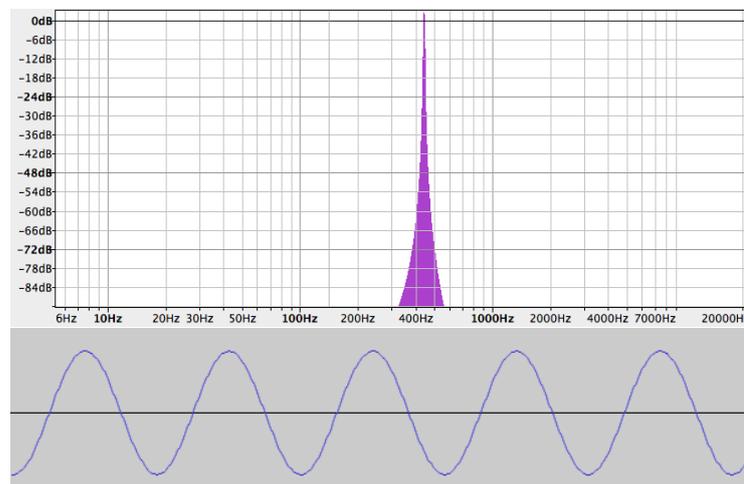


Abbildung 24: Das Spektrogramm und die Verlaufsaufnahme eines Sinus.

¹⁵Folgende Schwingungen wurden digital erzeugt und liegen auf der CD bei. Ebenso der Quellcode.

Sägezahnwelle

Bei einer Sägezahnswingung, die auch als Kippschwingung bekannt ist, treten alle geradzahigen und ungeradzahigen Harmonischen der Grundfrequenz auf. Das macht sie besonders interessant für Synthesizer, die später ähnlich wie Streicher oder Orgeln klingen sollen.

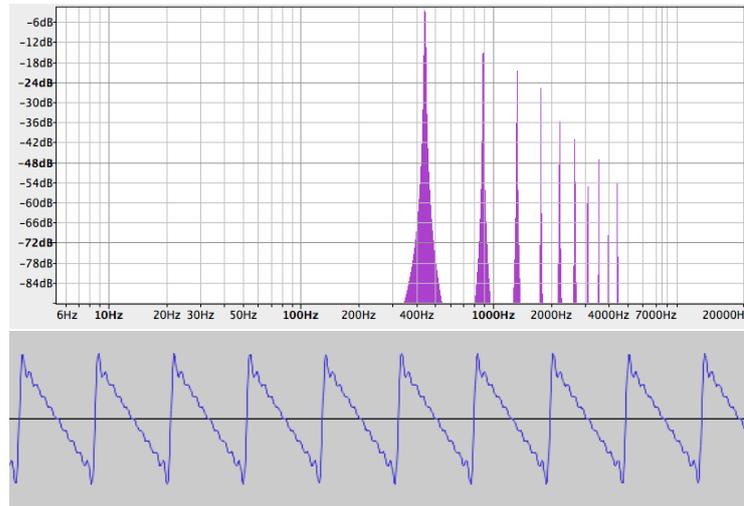


Abbildung 25: Das Spektrogramm und die Verlaufsaufnahme einer Sägezahnwelle.

Dreieckwelle

Die Dreieckwelle besteht im Gegensatz zur Sägezahnwelle nur aus ungeradzahigen Harmonischen. Außerdem ist deren Lautstärke wesentlich geringer und es entsteht dadurch ein wärmerer Sound, der dem Sinus mehr ähnelt. Somit entstehen Klänge, die an das menschliche *O* erinnern und besonders günstig für Synthesizer mit einem flötenähnlichen Charakter sind.

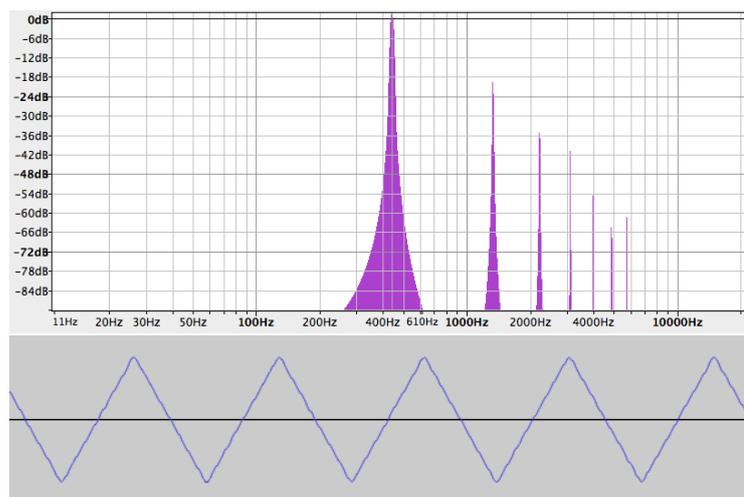


Abbildung 26: Das Spektrogramm und die Verlaufsaufnahme einer Dreieckwelle.

Rechteckwelle

Wie die Dreieckswelle setzt sich die symmetrische Rechteckwelle aus dem Grundton und den ungeradzahigen Harmonischen zusammen. Jedoch nimmt die Lautstärke der Obertöne nicht so schnell ab, weshalb der Klang hölzerner wirkt. Oft dient diese Schwingung als Grundlage für Blasinstrumente, die im speziellen einer Klarinette ähneln.

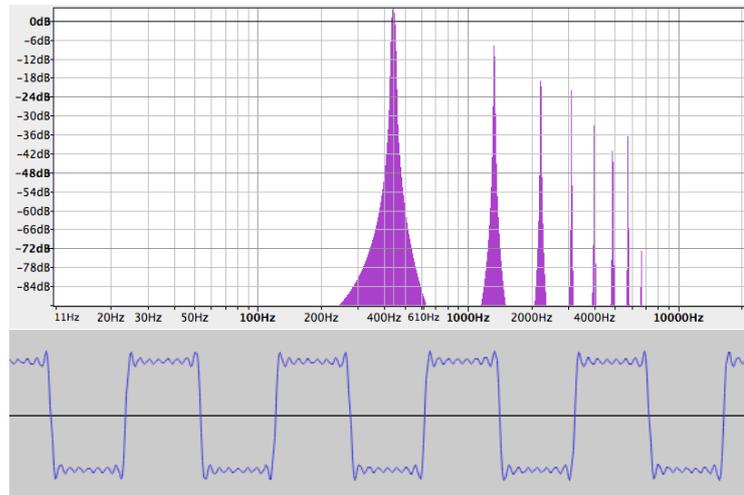


Abbildung 27: Das Spektrogramm und die Verlaufsaufnahme einer Rechteckwelle.

Moog-Sägezahn

Moog-Synthesizer stellen eine weitere Wellenform zur Verfügung, die Addition von Dreieck- und Sägezahnwelle. Der Klang dieser eigenen Schwingung lässt sich auch als Mischung dieser beiden Wellenarten definieren.

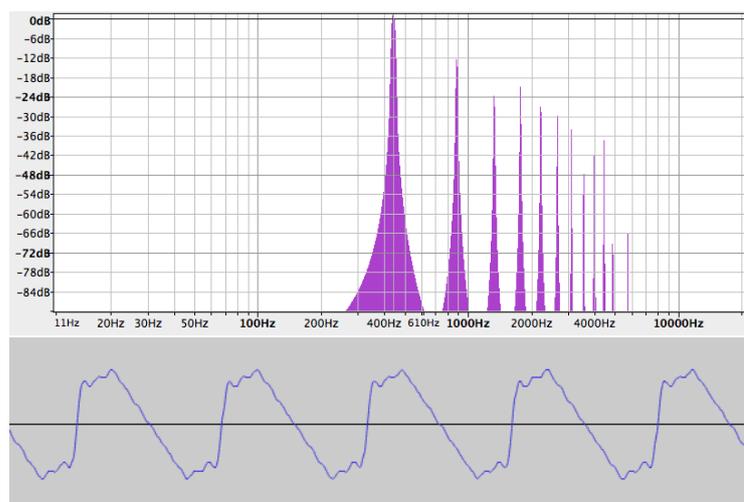


Abbildung 28: Das Spektrogramm und die Verlaufsaufnahme einer Rechteckwelle.

3.4.2 Rauschgenerator

Rauschen ist ein Schallvorgang, dessen Spektralanalyse für einen bestimmten Bereich vollkommen ausgefüllt ist. Daraus resultiert ein völlig unharmonischer Klang über sämtliche Frequenzen. Zunächst können solche Frequenzzusammensetzungen zum Programmieren eines Instrumentes als völlig irrelevant erscheinen, doch sie spielen in vielen Fällen eine große Rolle. Zum einen kommen sie in der Natur relativ häufig vor und zum anderen lassen sich damit sehr leicht Instrumente mit perkussivem Klang erstellen. Unterschieden wird hauptsächlich zwischen folgenden Arten von Rauschen:

Weißes Rauschen

Beim weißen Rauschen kommen über dem ganzen hörbaren Bereich alle Frequenzen konstant vor, sodass jede Frequenz die gleiche Amplitude aufweist. Wie bereits erörtert, ist das Tonhöhenempfinden des menschlichen Ohres logarithmisch, sodass die hohen Frequenzen als lauter empfunden werden.

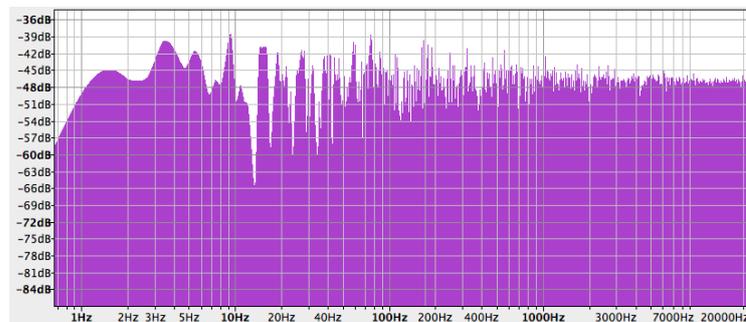


Abbildung 29: Das Spektrogramm von weißem Rauschen.

Rosa Rauschen

Mit dem rosa Rauschen wird auf das logarithmische Tonhöhenempfinden eingegangen. Folgendermaßen nehmen mit zunehmender Tonhöhe die Rauschanteile ab. Damit es sich für das menschliche Ohr so anhört, als wäre die Verteilung zwischen hohen und tiefen Anteilen ausgewogen wird die Amplitude für jede Verdoppelung der Frequenz um 3 dB reduziert.

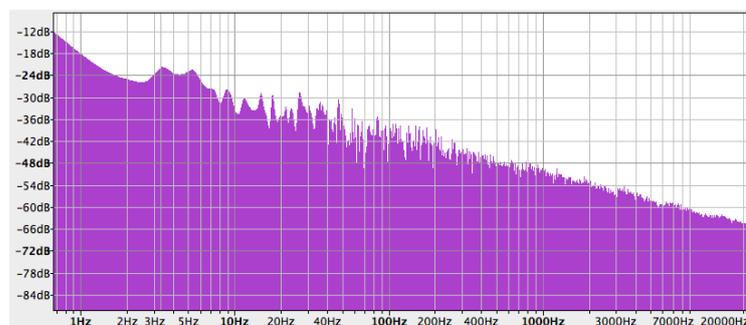


Abbildung 30: Das Spektrogramm von rosa Rauschen.

Blaues Rauschen

Auch blaues Rauschen sollte genannt werden. Hier wird der Gedanke vom rosa Rauschen umgekehrt und die Amplitude pro Oktave um 3 dB erhöht. Es entsteht dabei ein sehr grelles, hohes Rauschen, welches aber bei der Klangsynthese kaum verwendet wird.

3.4.3 Hüllkurve

Damit Klänge lebendiger wirken, besitzen sie einen dynamischen Verlauf. Da bei den meisten Synthesizern die sogenannte ADSR-Hüllkurve verwendet wird und diese relativ einfach zu verwenden ist, wird sie im Folgenden erläutert. Durch sie werden die Einschwingungsphase (Attack), die Abfallphase (Decay), die stationäre Phase (Sustain) und die Ausschwingungsphase (Release) bestimmt.

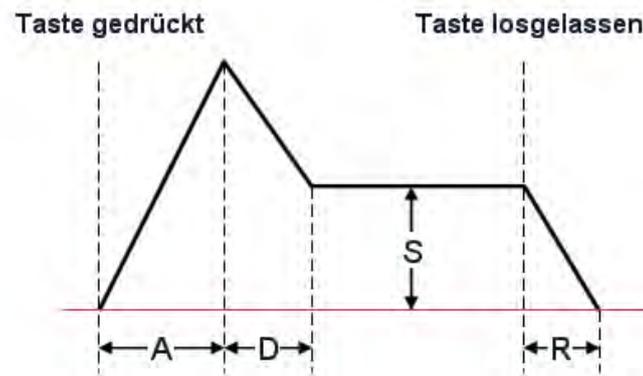


Abbildung 31: Die ADSR Hüllkurve und ihre Parameter.

Attack-Zeit Durch die Attack-Zeit wird festgelegt, wie lange es dauert, bis nach dem zeitlich gewünschten Signalbeginn (z.B. Tastendruck) der Signalpegel bei seinem Maximum angekommen ist. Erfahrungsgemäß wirken abrupt beginnende Klänge sehr unnatürlich.

Decay-Zeit und Sustain-Pegel Durch die zweite Angabe wird geregelt, wie viel Zeit aufgewendet wird, bis der Signalpegel zum Sustain-Level abfällt. Der Sustain-Pegel ist der einzige Parameter in der ADSR-Hüllkurve dessen Einheit keine Zeit, sondern ein prozentualer Wert des maximalen Pegels ist.

Release-Zeit Damit das Signal auch nicht „ohne Vorwarnung“ endet, kann man durch die Release-Zeit angeben, wie lange es nach dem zeitlich gewünschten Signalende (z.B. Loslassen der Taste) dauert, bis der Pegel wieder auf Null

fällt.

Pro und Kontra dieser Hüllkurve liegen auf der Hand: Sie ist einfach zu bedienen, jedoch kommt man schnell an ihre Grenzen. Das Signal beginnt immer beim Pegel 0 oder *max* (*Attack* = 0), es gibt immer nur ein *Sustainlevel*, *max* wird nur einmal erreicht und so weiter. Aufgrund dessen wurde die ADSR ständig weiterentwickelt und es entstanden viele weitere Hüllkurven. Zu erwähnen ist hier die 4-Stufen-Hüllkurve. Vier verschiedene Abschnitte lassen sich jeweils durch Parameter für Zeit und Level modifizieren. Moderne Synthesizer weisen zusätzliche Knickpunkte auf, wodurch der Erstellung komplexerer Klangverläufe keine Grenzen mehr gesetzt werden.

Wie bereits schon durchgesickert ist, verwendet man Hüllkurven hauptsächlich dazu, den Verlauf der Lautstärke zu modifizieren. So lässt sich regeln, ob das Signal sanft oder abrupt beginnt und endet. Ein hochwertigeres musikalisches Ziel kann jedoch erreicht werden, wenn die Hüllkurve die Filter (im nächsten Kapitel erläutert) beeinflusst. Klänge werden dadurch viel lebendiger und akustische Instrumente lassen sich leichter nachahmen. Des Weiteren wird oft versucht, mit Hüllkurven die Frequenz des Oszillators zu beeinflussen. Das führt einerseits zu recht experimentellen Klängen, kann andererseits hervorragende Ergebnisse liefern, vor allem wenn es um perkussive oder brassähnliche Klänge geht.

Die auf der CD beigefügte Beispieldatei wurde mit folgenden Parametern erstellt:

iatt	idec	islev	irel
0.5	1	0.7	2
0.2	2	0.2	3
0.02	3	0.9	0.1
2	2	0.5	1
2	0.5	0.3	4

[Sch98] [Rus10]

3.4.4 Filter

Unumgänglich, sowohl für die Erstellung analoger als auch für die Implementierung von Softwaresynthesizern, ist die Verwendung von Filtern. Auch im Audiobereich werden diese benutzt, um bestimmte Frequenzen und Frequenzanteile vom Signal zu entfernen oder zu minimieren.

Filtersteilheit

Die „Stärke“ eines Filters wird durch deren Steilheit festgelegt. Um den Gesetzen des relativen Hörens bei Tonhöhe und Lautstärke zu entsprechen, muss auch hier in den Einheiten *Oktave* und *dB* gedacht werden. Ein Filter *erster Ordnung* beträgt die Flankensteilheit 6 dB pro Oktave, was bedeutet, dass

nach einer Verdoppelung der Frequenz die Amplitude des ursprünglichen Signals halbiert wird. Allgemein gilt:

$$\text{Flankensteilheit} = \text{Filterordnung} \cdot \frac{6\text{db}}{\text{Oktave}}$$

Filtertypen

Oftmals werden für den gewünschten Effekt verschiedene Filtertypen kombiniert oder gleiche Filter mit unterschiedlichen Parametern gekoppelt. Im Wesentlichen gibt es vier verschiedene Standardfiltertypen, welche hier aufgeführt werden.

Tiefpassfilter

Tiefpassfilter oder Tiefpässe besitzen die Eigenschaft, dass sie Frequenzen unterhalb einer festlegbaren Grundfrequenz f_c passieren lassen, wobei das c für das englische Wort *cutoff* steht. Nennenswert dabei ist, dass ideale Filter sowohl technisch nicht umsetzbar, als auch im Audibereich praktisch nicht gewünscht sind. Ein idealer Filter wäre es, wenn alle Frequenzen unter f_c hörbar wären und alle anderen ausnahmslos unterdrückt würden. Anstatt dessen wird mit Filtern gearbeitet, die technisch umsetzbar sind und als reale Filter bezeichnet werden. In der Praxis finden sie vor allem Verwendung dafür, den Grundton von verschiedenen Klängen hervorzuheben.

Als Audiobeispiel dient ein Signal aus einer Dreieckswelle, kombiniert mit rosa

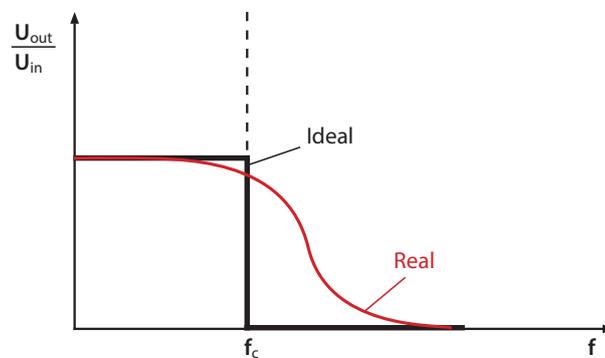


Abbildung 32: Das Tiefpassfilter.

Rauschen, das nacheinander durch ein Filter erster Ordnung, zweiter Ordnung und einer Implementierung von Moog's Transistorkaskadenfilter geschaltet wird.

Hochpassfilter

Hochpässe oder Hochpassfilter verhalten sich genau umgekehrt, denn sie unterdrücken Frequenzen, die höher sind als die Grenzfrequenz f_c . Auch hier gibt es keine idealen Filter. Hochpässe finden im Audibereich eine breite Anwendung.

Vor allem benutzt man sie, um Signale, die in Konkurrenz zum Bassignal stehen, zu schwächen, womit ein saubereres Klangbild erzeugt wird. Als Audiobeispiel dient wieder dasselbe Signal, das nacheinander durch ein Filter erster Ordnung und zwei Filter zweiter Ordnung geschaltet wird. Letzteres ist auffallend durch den ähnlichen Klang zum Moogfilter.

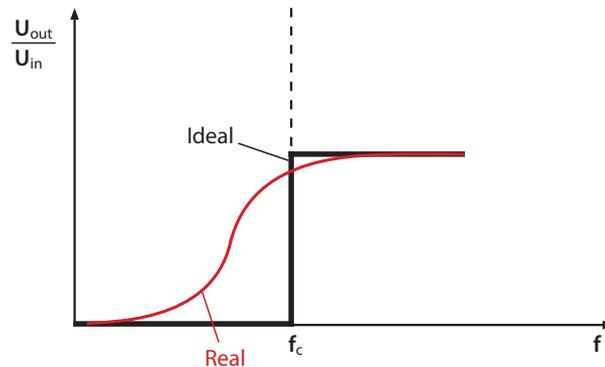


Abbildung 33: Das Hochpassfilter.

Bandpassfilter

Ein Bandpass oder Bandpassfilter ist eine Kombination aus einem Hoch- und einem Tiefpass. Hierbei werden Frequenzen um einen definierbaren Bereich f_c durchgelassen. Das c steht hierbei für das englische Wort *center*.

Für die Audiodatei wurden verschiedene Filter zweiter Ordnung mit verschiedensten Parametern für *center* und Filterbreite verwendet. Auffallend ist, dass bei sehr engen Filtern auch aus einem Rauschen ein sehr tonaler Klang wird.

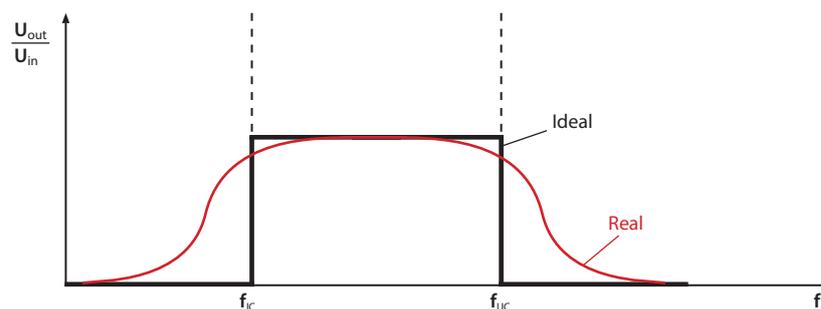


Abbildung 34: Das Bandpassfilter.

Bandsperrfilter

Auch hier entspricht der Effekt eines Bandsperr- oder Notchfilter dem Gegenteil eines Bandpasses. Alle Frequenzen um die Mittelfrequenz f_c herum werden

gefiltert, wobei alle anderen durchgelassen werden. Im Gegensatz zum Bandpass können hier jedoch nicht einfach ein Hoch- und ein Tiefpass hintereinander geschaltet werden.

Für die Audiodatei wurde zuerst die Filterbreite, dann die Filtermitte verändert, bevor zuletzt beide Parameter gleichzeitig auf ein weißes Rauschen angewendet werden.

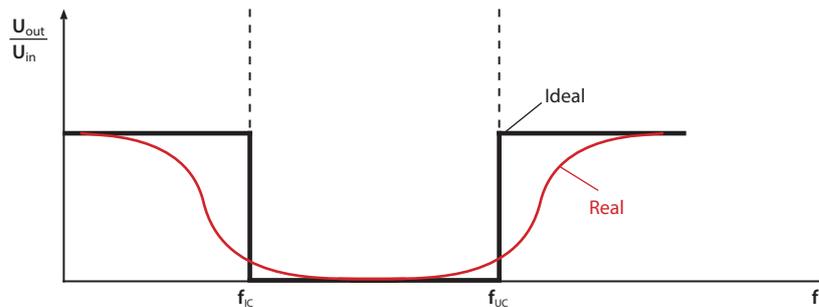


Abbildung 35: Das Bandsperrfilter.

[DZ09] [Anw13]

3.4.5 Signalverstärker (VCA)

Zu dieser Komponente muss nicht viel gesagt werden. Die einzige Funktion, die einem Verstärker zukommt ist es, die Lautstärke, also die Amplitude eines Signals zu regulieren. Da seit Moog der Großteil der analogen Synthesizer über einen *Voltage Controlled Amplifier*, also einen spannungsgesteuerten Verstärker verfügt, hat sich die Abkürzung *VCA* eingebürgert. Auch wenn es in der Zeit der Softwaresynthesizer nicht mehr auf die Spannung ankommt, werden diese fälschlicherweise immer noch als *VCA* gekennzeichnet. Das liegt wohl auch daran, dass viele Softwaretools analoge Synthesizer simulieren.

Benötigt wird ein Signalverstärker oft, da das Signal zuvor einen oder mehrere Filter durchlaufen hat und somit viel leiser ist.

[Sch98]

3.4.6 Niederfrequenzoszillator (LFO)

Wie der Name schon sagt, handelt es sich hierbei um einen Oszillator mit niedrigen Frequenzen (*Low Frequency Oscillator* - LFO). Diese können im Normalfall zwischen 0,1 Hz und 30 Hz eingestellt werden, so dass sie vom menschlichen Ohr nicht gehört werden. Oftmals kann die LFO-Frequenz auch von einem anderen LFO gesteuert werden damit komplexere Schwingungen entstehen. Wie beim normalen Oszillator wird der LFO mit den verschiedenen Wellenformen (Sinus, Sägezahn, Rechteck und Dreieck) verwendet.

Der LFO kann folgende Modulationen bewirken:

Vibrato Wird der LFO auf den Pitch-Modulationseingang der hörbaren Oszillatoren gerichtet, so entsteht eine minimale, periodische Veränderung der Frequenz. Dies ist in der Musik als Vibrato bekannt. Wichtig ist dabei, dass man einen Sinus oder eine Dreieckswelle wählt, da sonst das Ergebnis zu ruckartig ist.

Tremolo Ein Tremolo kommt dem Vibrato ähnlich, nur dass sich hier die periodischen Änderungen nicht auf die Tonhöhe sondern auf die Lautstärke beziehen. Somit wird der LFO zu dem Signalverstärker geroutet. Auch hier verwendet man bevorzugt die Dreieckswelle oder einen Sinus.

Triller Legt man, wie beim Vibrato, den LFO auf den Pitch-Modulationseingang und wählt man die Amplitude so, dass die Auswirkung des Pitches einen Halb- oder Ganzton bewirkt, so entsteht ein Triller. Natürlich muss als Wellenform ein Rechteck gewählt werden, sonst werden Töne gespielt, die nicht im Tonleiter auftreten. Die Frequenz des LFO bestimmt die Trillergeschwindigkeit.

[Anw13] [Sch98]

3.5 Syntheseverfahren

In den letzten Jahrzehnten hat sich eine Vielzahl von Syntheseverfahren entwickelt. Im Folgenden werde ich die wichtigsten vorstellen und erläutern.

3.5.1 Subtraktive Klangsynthese

Bei diesem Syntheseverfahren werden obertonreiche Wellenformen erzeugt, die dann gefiltert werden. Wellenformen, die sich dafür gut eignen sind Sägezahn-, Rechteck-, Puls- und Dreieckswellen. In einzelnen Fällen kommen auch Rauschgeneratoren zum Einsatz.

Der Aufbau subtraktiver Synthesizer ist relativ überschaubar, trotzdem lassen sich sehr schnell verschiedenste Klänge erzeugen. Nicht allein deswegen zählt dieses Verfahren zu den bewährtesten und wird bei der analogen Klangsynthese fast ausschließlich verwendet.

Als Voraussetzung dienen unterschiedliche Oszillatoren, die, wie bereits erläutert, verschiedene obertonreiche Schwingungen erzeugen. Theoretisch würde auch ein Oszillator genügen, doch beispielsweise um Schwebungen zu gewinnen werden oftmals mehrere eingesetzt und leicht gegeneinander verstimmt. Auch ist es üblich, mit den Oszillatoren verschiedene Wellenformen (beispielsweise Sägezahn- und Rechteckwelle) zu erzeugen. Damit werden mehr Obertöne generiert und ein breiterer Klang entsteht.

Dieses Signal wird danach zu den wichtigsten Bestandteilen der subtraktiven Synthese geroutet, den Filtern. Hier werden unerwünschte Bestandteile des Klanges entfernt. Verwendet werden dafür alle möglichen Filtertypen, eine

große Bedeutung spielt meist das Tiefpassfilter. Die Filter werden durch verschiedene Parameter (LFO, ADSR, manuell ...) gesteuert. Im letzten Schritt wird die Amplitude des Signals beeinflusst, damit eine passende Lautstärke entsteht. Im Normalfall kommt auch hier die ADSR-Hüllkurve zum Einsatz. Um einen lebhaften Klang entstehen zu lassen, ist es bei diesem Syntheseverfahren besonders wichtig, dass die Parameter einer ständigen Änderung unterliegen.

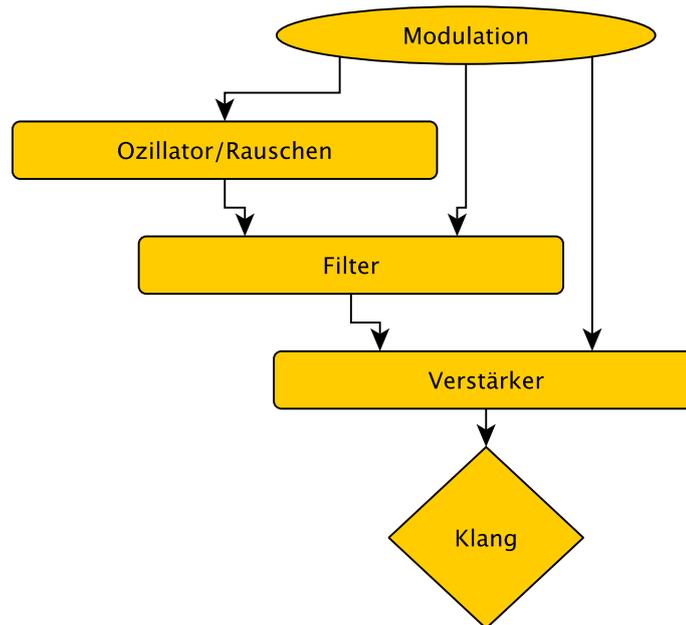


Abbildung 36: Subtraktive Klangsynthese.

Durch subtraktive Synthesizer konnte sich die eigene Klangästhetik elektronischer Geräte durchsetzen und es ist somit nicht mehr nötig, ein akustisches Instrument nachzuahmen, um einen schönen Klang zu haben.

Als Beispiel wurde eine einfache subtraktive Synthese implementiert. Sie basiert auf 2 Oszillatoren, die sich leicht verstimmen lassen. Diese durchlaufen ein Tiefpassfilter zweiter Ordnung, dessen *cutoff* Parameter dreimal pro Anschlag geändert wird. Der Amplitudenausschlag wird durch eine ADSR Hüllkurve geregelt.

[Anw13]

3.5.2 Additive Synthese

Die Erkenntnis von Fourier brachte der Tontechnologie nicht nur die Spektralanalyse sondern auch die Grundlage für die additive Klangsynthese: Alle möglichen Klänge lassen sich durch eine Summe aus verschiedenen Sinusschwingungen erzeugen. Bei dieser Syntheseform wird das Spektrum des Klanges durch die Addition von Signalen erzeugt.

Die Ausgangssituation bilden verschiedene Sinusoszillatoren, die die Teiltöne generieren. Wichtig ist, dass jeder Oszillator eine eigene Hüllkurve besitzt, um unterschiedliche Obertöne zu verschiedenen Zeiten betonen zu können. Theoretisch ist es also möglich, alle möglichen Klänge zu erstellen und auch jedes akustische Instrument nachzuahmen, doch für komplexe Klänge werden sehr viele Oszillatoren benötigt, was mit einem enormen Rechenaufwand einhergeht. Zudem wird eine Vielzahl an Parametern benötigt, um die Steuerung des Klanges zu übernehmen:

1. Die Anzahl der Sinuswellen ist ausschlaggebend dafür, wie voll ein Klang wird. Ein volles Klangspektrum kann nur durch viele Oszillatoren gewonnen werden.
2. Die Frequenz des Grundtones gibt die Tonhöhe an und ist besonders wichtig für harmonische Klänge.
3. Das Verhältnis der verschiedenen Frequenzen entscheidet darüber, wie harmonisch ein Klang wird. Treten nur Vielfache der Grundfrequenz auf, wird er sehr harmonisch.
4. Das Verhältnis der Amplituden der einzelnen Sinustöne bestimmt den Charakter des Klanges. Je lauter die Obertöne sind, desto schärfer wird dieser. Damit der Klang im zeitlichen Verlauf interessanter wird, sollte im Normalfall jeder Oszillator eine eigene Hüllkurve haben.

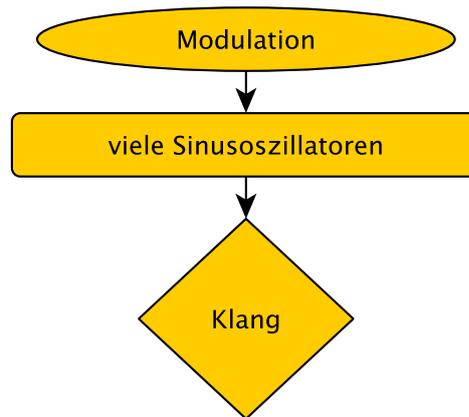


Abbildung 37: Additive Klangsynthese.

In dem Beispiel auf der CD wurde eine additive Synthese mit neun Oszillatoren und Hüllkurven implementiert. Durch Parameter kann gewählt werden, ob diese harmonisch, oder unharmonisch im Spektrum verteilt sind. Mit ein wenig Übung lassen sich mit diesem Synthesizer vielseitige Klänge erzeugen. Additive Synthese eignet sich also besonders dafür, wenn ein bereits bekannter Klang mit digitalen Mitteln und relativ hoher Rechenleistung nachgebildet wird. Diese Methode ist auch als Resynthese bekannt.

3.5.3 FM-Synthese

Die Modulation eines Klages durch einen Sinusoszillator ist schon durch das Vibrato bekannt. Die Modulation findet jedoch hier durch eine nicht hörbare Frequenz statt. Wird die Modulationsfrequenz auf den hörbaren Bereich erhöht, entsteht ein sehr volles Klangspektrum. Dieses Verfahren ist als FM-Synthese bekannt.

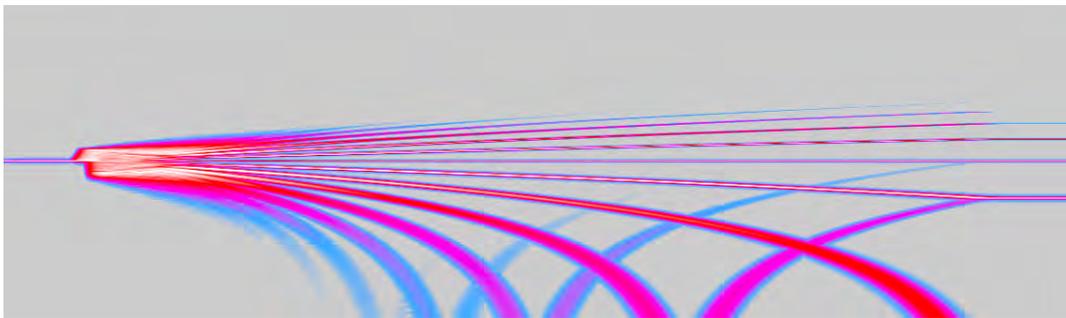


Abbildung 38: Eine gleichbleibende Trägerfrequenz mit einer steigenden Modulationsfrequenz.

Der Abstand der Seitenfrequenzen von der Trägerfrequenz sind ganzzahlige Vielfache der Modulationsfrequenz. Ist die Modulationsfrequenz kleiner als die

Trägerfrequenz, so ist letztere also nicht die Grundfrequenz.

Im Folgenden ist die Modulationsfrequenz gleich der Trägerfrequenz und die Amplitude wird stetig erhöht. Es ist feststellbar, dass auch die hörbare Anzahl an Seitenfrequenzen steigt und deren Amplituden erhöht werden. Genauen Aufschluss darüber geben die Bessel-Funktionen, deren genauer Erörterung aber den Umfang dieser Arbeit übersteigen würden. Als Richtwert kann aber über die Bandbreite aller hörbaren Seitenfrequenzen folgender Zusammenhang zur Modulationsfrequenz m und Modulationsamplitude d festgehalten werden:

$$\text{Bandbreite} = 2 \cdot d \cdot m$$

Wichtig ist außerdem der Modulationsindex I , der zur Modulationsfrequenz m und der Modulationsamplitude d in folgendem Verhältnis steht:

$$I = \frac{d}{m}$$

Außerdem treten bei Seitenfrequenzen, die theoretisch unter 0 Hz haben würden, Spiegelungen auf. Das heißt, negative Frequenzen werden an Null gespiegelt.

Allgemein gilt für den Wert des Ausgangsignals zur Zeit t :

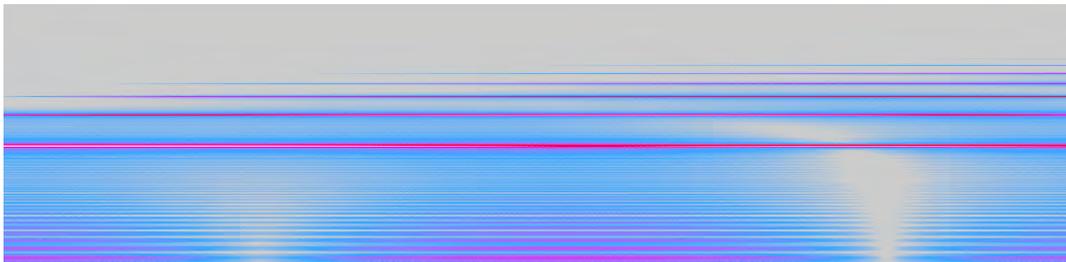


Abbildung 39: Gleichbleibende Träger- und Modulationsfrequenz mit einer steigenden Modulationsamplitude.

$$e = A \cdot \sin(\omega_c t + I \cdot \sin(\omega_m t))$$

Somit lässt sich festhalten, dass man mit der FM-Synthese mit nur wenigen Parametern sehr komplexe Spektren hervorrufen kann. Beeinflusst man die Modulation mit Hüllkurven, entstehen auch sehr leicht abwechslungsreiche stationäre Phasen. Stehen die Modulations- und die Trägerfrequenz in einem einfachen mathematischen Verhältnis, so lassen sich sehr harmonische Klänge produzieren. Sind die Frequenzen sogar gleich, lässt sich mit sanften Hüllkurven auf der Modulation und dem Ausgang und einem Modulationsindex = 5 ein trompetenähnlicher Klang erzeugen.¹⁶

¹⁶Der Beispielquellcode und eine Audiodatei mit dem Klang der Trompete befinden sich auf der CD.

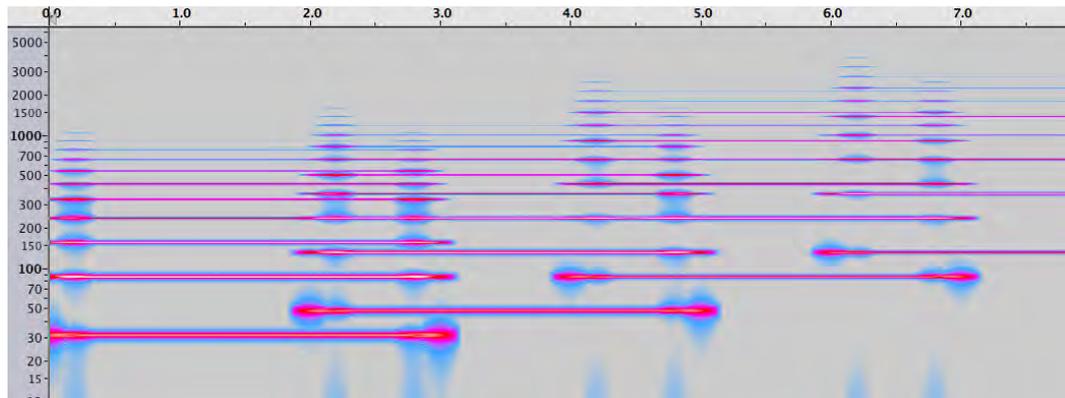


Abbildung 40: FM-Synthese: Eine Trompete mit einem sehr harmonischen Spektrum.

Das experimentelle und einzigartige an der FM-Synthese ist die einfache Generierung von unharmonischen Spektren. Ändert man den Modulationsindex, betont man mit der Hüllkurve die ersten Millisekunden und erzeugt durch ein Verhältnis von Modulations- und Trägerfrequenz von 5 zu 7 eine unharmonisches Spektrum, so lässt sich mit der gleichen Implementierung eine Glocke synthetisieren.¹⁷

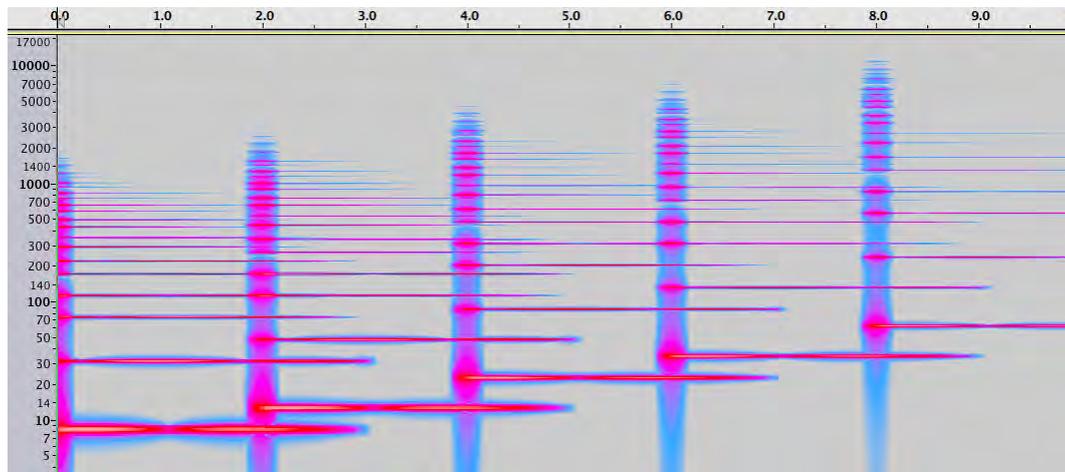


Abbildung 41: FM-Synthese: Eine Glocke mit relativ unharmonischem Spektrum, vorallem in der Einschwingphase.

¹⁷Der Beispielquellcode und eine Audiodatei mit dem Klang der Glocke befinden sich auf der CD

Treten mehrere Modulatoren auf, spricht man von der komplexen FM-Synthese. Die Modulatoren lassen sich parallel oder in Reihe schalten. Wählt man die parallele Variante, so lässt sich das Ergebnis noch einigermaßen abschätzen. Außerdem lässt sich so die FM-Synthese mit den bekannten LFO-Modulatoren aus der subtraktiven Synthese kombinieren. Die zweite Variante

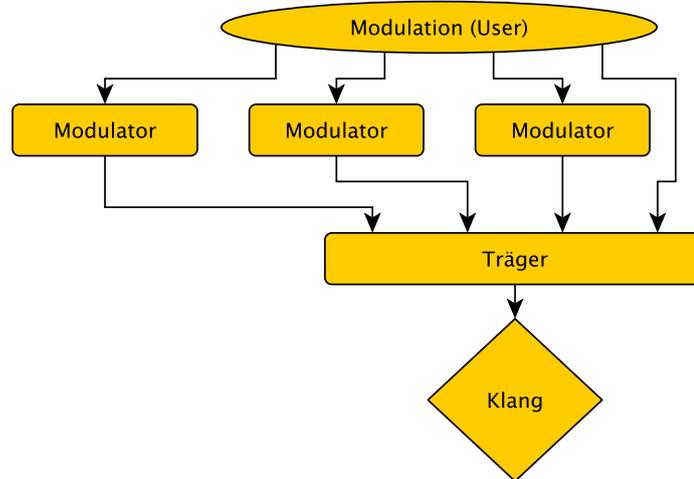


Abbildung 42: Eine FM-Synthese mit 3 Modulatoren parallel geschaltet.

ermöglicht es, sehr experimentell an die Klangsynthese heranzugehen. Es lassen sich sehr leicht Klänge mit sehr unterschiedlichen und unnatürlichen Spektren erzeugen. Diese Art der Klangerzeugung setzt ein gutes Grundverständnis und ein wenig Erfahrung voraus, bevor damit sinnvoll gearbeitet werden kann, denn die Frequenzen können leicht (gewollt, oder ungewollt) aus der Bahn geraten.¹⁸

[Rus10]

¹⁸Beispielhafte Audiodateien und der Quellcode der Implementierungen der komplexen FM-Synthese befinden sich auf der CD.

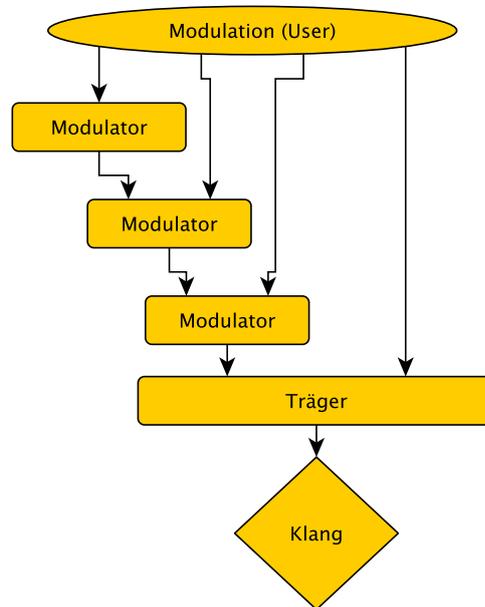


Abbildung 43: Eine FM-Synthese mit 3 Modulatoren in Reihe geschaltet.

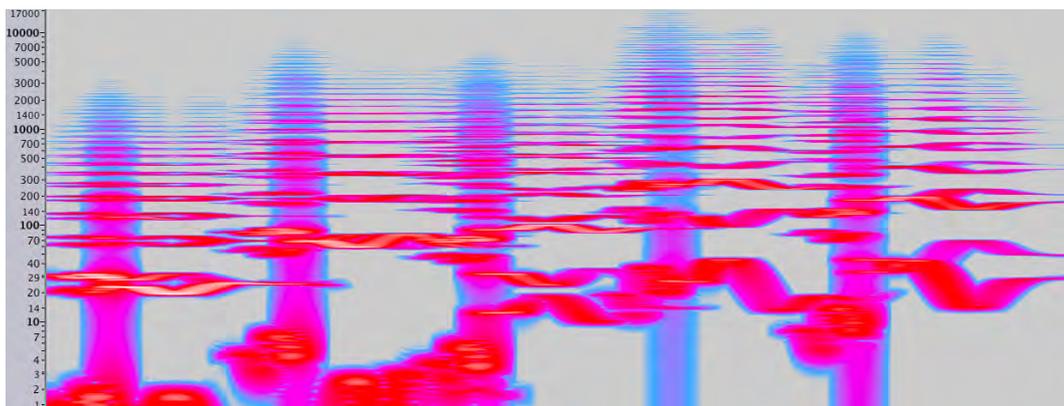


Abbildung 44: Eine komplexe FM-Synthese mit sehr unnatürlichen Spektren.

3.6 Weitere Synthesearten

Es gibt eine Vielzahl von weiteren Synthesearten. Die wichtigsten werden der Vollständigkeit halber hier erörtert.

3.6.1 Granularsynthese

Ein bereits vorhandener Klang wird auf einen sehr kurzen Ausschnitt (15 - 70 ms) reduziert und mindestens 30 mal in der Sekunde abgespielt und somit ein flüssiger Ablauf simuliert. Wichtig dabei ist, dass die Lautstärke eines jeden *Grains* (jeder wiederholte Abschnitt) über eine Hüllkurve verfügt, sodass die Elongation bei 0 startet und endet. Verschiedene Tonhöhen werden durch langsames und schnelleres Abspielen gewonnen.

3.6.2 Wavetable Synthese

Bei der Wavetable Synthese werden Oszillatoren durch digital abgespeicherte Schwingungen ersetzt. In der Regel reicht eine Wellenlänge aus und wie bei der Granularsynthese wird die Tonhöhe durch die Abspielgeschwindigkeit geregelt. Auf die herkömmliche Art und Weise durchläuft das Signal, ähnlich wie bei der subtraktiven Synthese, die verschiedenen Modulationen.

3.6.3 Physical-Modeling-Synthese

Diese Art der Klangsynthese beruht auf mathematischen Modellen, die die physischen Eigenschaften von Musikinstrumenten simulieren. Der Klang wird durch Simulationen der Abmessungen und Materialeigenschaften und bestenfalls auch durch die Umgebung, in der sie gespielt werden, geformt. Des Weiteren bietet diese Art von Klangsynthese oftmals Parameter, die Nutzer-Interaktionen mit dem Instrument widerspiegeln. Hauptsächlich wird die Physical-Modeling-Methode also zur Simulation von akustischen Instrumenten verwendet.

3.6.4 Sampling

Keine richtige Syntheseart, aber eine beliebte und ähnliche Methode zur Klangerzeugung ist das Sampling. Akustische Instrumente werden in einer bestimmten Tonlage aufgezeichnet und nach Belieben abgespielt. Tonhöhenänderungen werden, wie bei der Granularsynthese, durch unterschiedliche Abspielgeschwindigkeiten erzeugt. Früher stellte der Sampler, aufgrund der beschränkten Möglichkeiten zur Speicherung, nur wenige Tonlagen zur Verfügung und alle anderen wurden *gepitched*. (Tonlagenänderung durch Abspielgeschwindigkeit.) Mittlerweile werden sogar verschiedene Klänge pro Tonlage gespeichert, sodass ein pitch nicht mehr nötig ist.

4 Besonderheiten bei digitalen Klängen

In diesem Kapitel soll nicht auf den jahrelangen Streit der Tontechniker eingegangen werden, ob analoge oder digitale Klänge zu bevorzugen sind. Wichtig ist es, zu beachten, dass digitale Signale, im Vergleich zu den analogen, Besonderheiten mit sich bringen, da pro Längeneinheit nur ein Wert gespeichert werden kann. Eine mehr oder weniger *runde* Schwingung muss *eckig* abgespeichert werden, ohne dass es für das menschliche Ohr signifikante Unterschiede gibt. Damit diese Problem gelöst wird, muss man sich mit der Abtastrate und der Samplingtiefe beschäftigen.

4.1 Abtastrate

Als Abtastrate wird die Frequenz bezeichnet, wie oft pro Sekunde der Wert der Elongation gespeichert wird.

$$f_{abtaast} = \frac{1}{t_S}$$

Da diese Rate in einem engen Verhältnis zu den hörbaren Frequenzen steht, muss man beachten, dass das menschliche Ohr Frequenzen von etwa 16 Hz bis 20.000 Hz wahrnehmen kann.

$$f_{abtaast} \geq 2f_{max}$$

Somit ist es also wichtig, dass eine Abtastrate größer als 40000 Hz gewählt wird. Audio CDs verwenden eine Rate von 44100 Hz, wonach man sich auch hier orientiert. Wird dieses Theorem nicht befolgt, treten unerwünschte Frequenzen, genannt *Aliasing*, auf. Frequenzen, die höher als die halbe Abtastrate sind, werden nicht wiedergegeben, zu langsam abgetastet und als tiefere Frequenz ausgegeben. Salopp gesagt, wird eine steigende Frequenz an der halben Abtastrfrequenz (*Nyquist-Frequenz*) gespiegelt und wird wieder tiefer.

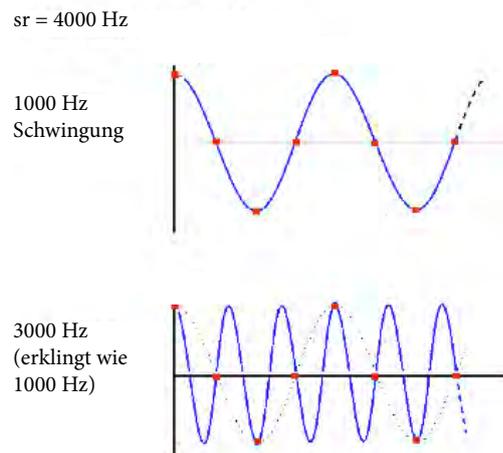


Abbildung 45: Der Aliasing-Effekt

Als Beispiel wurde eine Audiodatei mit der Abtastrate von 4000 Hz erstellt, die eine steigende Frequenz 200 Hz bis 16000 Hz abspielen soll. Wegen einer zu geringen Abtastrate wird der Ton ab der Nyquistfrequenz von 2000 Hz wieder tiefer und pendelt zwischen 0 Hz und 2000 Hz.

4.2 Samplingtiefe

Als Samplingtiefe wird die Zahl bezeichnet, die angibt, wie viele mögliche Werte die Amplitude pro Sample annehmen kann. Da sich das menschliche Ohr als sehr sensibel beweist, reicht eine Tiefe von 8 Bit (2^8 mögliche Werte) nicht aus für einen vollen Klang. Deshalb hat man sich im Audibereich neben den 44100 Hz Abtastfrequenz auf eine Samplingtiefe von 16 Bit geeinigt. Das entspricht $2^{16} = 65536$ möglichen Werten. Da es auch eine negative Auslenkung gibt, sind $+32767$ bzw. -32768 die maximalen Werte und werden als 0 dBFS (Dezibel Full Scale) definiert. Entsprechend den Regeln zur relativen Wahrnehmung werden die Amplituden den Werten dazwischen zugewiesen und -96 dBFS entspricht einer Amplitude von 0.

Wird versucht, diese 0 dBFS zu überschreiten entsteht sogenanntes *Clipping* und das Signal wird verzerrt. Wie das Audiobeispiel zeigt, wird Clipping sehr

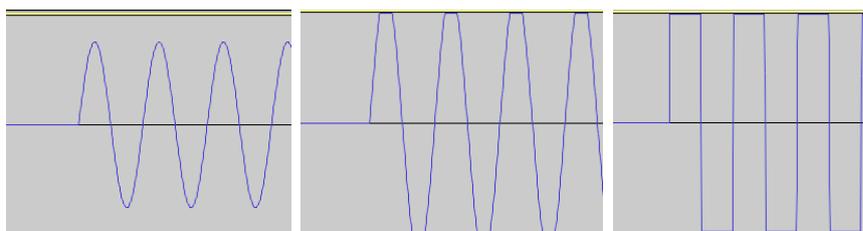


Abbildung 46: Ein Sinus mit keinem, leichtem und extremem Clipping

schnell hörbar und beeinflusst das Klangbild sehr. Interessant ist, dass der

lauter werdende Sinus immer mehr Obertöne entwickelt, da er sich durch das starke Überssteuern immer mehr an eine Rechteckwelle annähert.

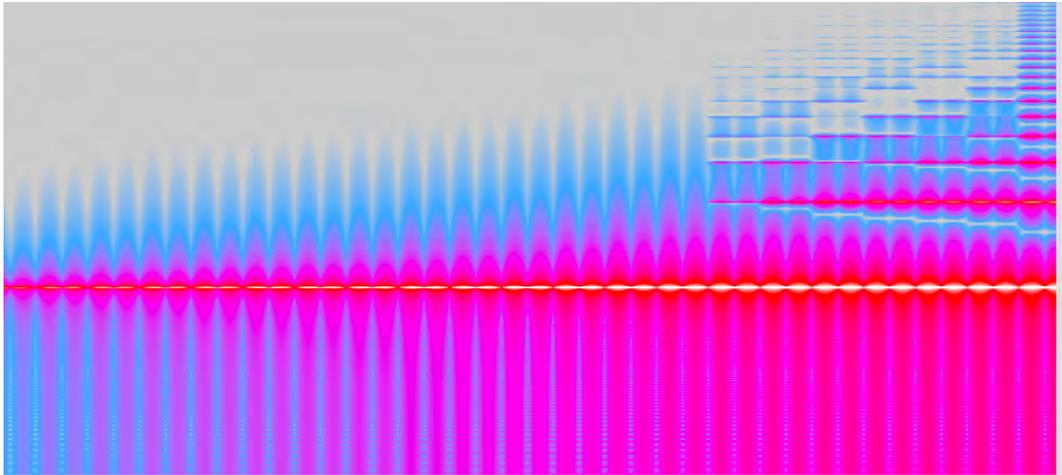


Abbildung 47: Stärkeres Clipping führt zu mehr Obertönen.

5 CSound

In den 50er Jahren entstand unter Leitung von Max Mathews in den Bell Telephone Laboratories eine neuartige Möglichkeit Klänge am Computer herzustellen. Um Rechenleistung zu sparen, wurde das Verfahren in zwei Phasen geteilt. Zuerst werden die Momentanwerte des gewünschten Klanges berechnet und auf der Festplatte gespeichert. Erst nach Abschluss dieser Berechnungen werden die Werte in der zweiten Phase ausgelesen und über einen Digital-Analog Wandler zu einem hörbaren Signal umgewandelt. Ausgehend davon entstanden die *MUSIC* Computerprogramme, welche sich bis in die 70er Jahre ständig weiterentwickelten und den Grundstein für die, in den 80ern in C entwickelte, Programmiersprache Csound bildeten. Der einzige Nachteil dieser *direkten Synthese* sollte die Dauer der Berechnungen und somit der zeitliche Unterschied zwischen dem Schreiben des Klanges und dem Anhören bleiben. Das Resultat war nur schwer absehbar und einige Korrekturen waren oft nötig. Ausgehend davon ist CSound also nicht optimal für den Echtzeiteinsatz, selbst wenn man die rasante Steigerung der Rechenleistung in den letzten Jahren bedenkt.

5.1 Orchestra- und Score-Datei

Instrumente in CSound untergliedern sich, angelehnt an die alten *MUSIC* Programme, immer in ein *orchestra file* und ein *score file*. Bei weniger komplexen Instrumenten werden diese jedoch der Einfachheit halber in eine einzelne Datei geschrieben.

Im *orchestra-file* werden die Instrumente gestaltet und definiert, während im *score-file* nur die zeitliche Folge, also das Arrangement geregelt wird.

Vorteilhaft ist dabei hier, dass es theoretisch keine Grenzen bei der Verwendung der verschiedensten Komponenten gibt. Csound kann die Klänge auch dann berechnen, wenn man hunderte Oszillatoren mit zig Filtern kombiniert und bietet dabei gegenüber herkömmlichen Möglichkeiten zur Klangsynthese erhebliche Vorteile.

Im folgenden, einfachen Beispiel sind 2 Instrumente definiert, die einen Sinus mit 440 Hz und 880 Hz wiedergeben. Sie spielen abwechselnd mit unterschiedlichen Längen. Außerdem muss beachtet werden, dass im *instrument file* anfangs immer die Samplingrate, die Kontrollrate und der Output angegeben werden müssen.

```

<CsoundSynthesizer>
<CsOptions>
</CsOptions>
<CsInstruments>

sr          =          44100
kr          =          4410
ksmps      =          10
nchnls     =          1

a1          instr 1
           oscil  10000, 440, 1
           out    a1
           endin

a1          instr 2
           oscil  10000, 880, 1
           out    a1
           endin

</CsInstruments>
<CsScore>
f1         0         4096         10         1

i1         0         2
i2         2         1
i1         4         5
i2         8         3

e

</CsScore>
</CsoundSynthesizer>

```

5.2 P-Felder

Das Arrangement im Score-Bereich einer Csound-Datei setzt sich aus verschiedenen Parametern zusammen. Die ersten 3 Parameter sind fest definiert. Es handelt sich um: Nummer des Instruments (i1, i2, i3..), Zeitpunkt des Beginns und Dauer. Alle weiteren Parameter sind frei wählbar und können jedem Instrument als sogenannte P-Felder hinzugefügt werden. Meist dienen als P4 und P5 die Frequenz und die Amplitude. Desweiteren werden im folgenden Beispiel die Parameter der ADSR-Hüllkurve als P6 - P9 gesetzt.

```
<CsoundSynthesizer>
<CsOptions>
-odac
</CsOptions>
<CsInstruments>

sr = 44100
ksmps = 4410
nchnls = 1
0dbfs = 1

instr 1

iatt = p6
idec = p7
islev = p8
irel = p9

aenv      adsr iatt , idec , islev , irel

aout      oscil p4, p5, 1
asig      pinkish 1
          out  aenv * aout * asig

endin

</CsInstruments>
<CsScore>
f1 0 1024 10 1 1 1

i1      0   5  0.5  440   0.5   1   0.7   2
i1      +   5  0.9  660   0.2   2   0.2   3
i1      +   5  0.9  440   0.02  3   0.9   0.1
i1      +   5  0.9  220   2     2   0.5   1
i1      +   5  0.9  220   2     0.5  0.3   4

e

</CsScore>
</CsoundSynthesizer>
```

5.3 Variablen

5.3.1 Lokale Variablen

Zahlen, die sich im Verlauf der Zeit ändern können beziehungsweise dürfen und nur innerhalb eines Instrumentes benötigt werden, speichert man lokale Variablen. Die Bezeichnungen für diese müssen in CSound mit einem i , einem k , einem a oder einem p beginnen. Die verschiedenen Anfangsbuchstaben haben eine unterschiedliche Bedeutung.

1. Beginnt die Bezeichnung mit i wird der Wert nur einmal zu Beginn der Berechnung initialisiert und bleibt unverändert.
2. Bei Bezeichnungen, die mit einem k beginnen, wird der Wert bei jedem Sample der Kontrollrate neu berechnet.
3. Will man, dass bei jedem Sample der Wert neu berechnet wird, so muss die Bezeichnung mit einem a beginnen.
4. Da sich auch die P-Fields im Nachhinein ändern können, kann man das mit Variablenbezeichnungen ermöglichen, die mit p beginnen.

5.3.2 Globale Variablen

Variablen, die für mehrere Instrumente gelten sollen, können an beliebigen Stellen im *instrument-file* stehen. Für diese gelten die gleichen Bedingungen wie für die lokalen Variablen, nur das zusätzlich noch ein weiterer Buchstabe, ein g vorangestellt werden muss.

5.4 Funktionen

In CSound gibt es einige Funktionen, die schon vorimplementiert genutzt werden können. Oft verwendete sind im Folgenden aufgeführt:

- `int(x)` ermittelt den ganzzahligen Teil von x .
- `dbamp(x)` ermittelt den dB-Wert der linearen Amplitude x .
- `ampdb(x)` ermittelt die lineare Amplitude des Pegels x .
- `cpsmidi(x)` wandelt die Kennzahl einer MIDI-Note in eine Frequenz um.

Weitere Funktionen sind bei [Bou00] und [Aik13] zu finden.

5.5 Opcodes

CSound bietet die Möglichkeit Verläufe von Signalen, Hüllkurven oder einfachen Parametern mit beliebig vielen Punkten zu bestimmen.

Als Beispiel ein Linesegment aus der FM-Synthese:

```
aLine linseg .001, 2, .01, p3-4, 440, 2, 220
```

Das Signal steigt in den ersten beiden Sekunden von 0.001 auf 0.01, steigt in der Zeit $p^3 - 4$ weiter auf 440 und fällt in den letzten beiden Sekunden wieder auf 220.

Exponentiale Kurven funktionieren nach dem gleichen Prinzip und werden mit *expseg* aufgerufen. Segmente mit nur zwei Parametern werden mit *line* und *expon* erstellt.

Nach dem gleichen Prinzip werden ADSR-Hüllkurven, Verstärker, Filter und Oszillatoren erstellt.

```
kenv  adsr      iatt , idec , islev , irel
kgain gain      asig , krms
klpf  butterlp  asig , kfreq
kosc  oscil     kamp, kcps , ifn
```

Theoretisch wäre es möglich eine scheinbar unendliche Liste dieser Opcodes aufzuzählen, doch für weitere Informationen darf auf die Quellen [Bou00] und [Aik13] hingewiesen werden.

5.6 Beispiel

Zum besseren Verständnis eine komplette CSound-Datei mit der passenden Erörterung.

```

<CsoundSynthesizer>
<CsOptions>
-odac
;csound -W -d -o bandsperrfilter.wav
</CsOptions>
<CsInstruments>

sr = 44100
ksmps = 10
nchnls = 1
0dbfs = 1

        instr 1
aVco    vco2          .4, 440, 12
aNoise  pinkish      1
aSig    ntrpol       aVco, aNoise, .3
kcf     expon        p4, p3, p5
kbw     expon        p6, p3, p7
aSig    areson       aSig, kcf, kbw, 1
        out          aSig
        endin

        instr 2
aSig    noise .4, 0
kcf     expon        p4, p3, p5
kbw     expon        p6, p3, p7
aSig    areson       aSig, kcf, kbw, 1
        out          aSig
        endin

</CsInstruments>
<CsScore>

i1 0 9 1000 1000 1 10000
i1 10 9 200 20000 500 500
i2 20 10 200 20000 500 10000
i2 30 10 20000 1000 10000 1000

</CsScore>
</CsoundSynthesizer>

```

-odac	Direkte Ausgabe auf der Soundkarte
;	Kommentar
sr	Samplingrate
ksmps	Anzahl der Samples in der Kontrollschleife
nchnls	Anzahl der Outputkanäle (1 = mono)
sr	Samplingrate
0dbfs = 1	Die Werte der Amplitude müssen zwischen 0 und 1 liegen. 1 entspricht dem Maximum von 0dbfs.
instr1	Instrument 1 beginnt.
aVco	Oszillator mit der Amplitude 0.4, 440 Hz und der Einstellung 12. (Dreieckwelle)
aNoise	Rosa Rauschen
aSig	Generiert Signal indem aVco und aNoise im Verhältnis 3:7 zusammengeführt werden.
kcf	Exponentielle Kurve von p4 bis p5 mit der Dauer p3
aSig	Bandsperrfilter mit dem Eingang aSig, einer Centerfrequenz kcf und einer Bandbreite kbw.
endin	Ende Instrument1
il	Instrument 1 startet bei 0 für 9 Sekunden mit den weiteren Parametern p4 bis p7.

[Bou00] [Aik13]

5.7 Alternativen

Chuck Die etwas jüngere Programmiersprache ChuckK kann mit einer moderneren und (für Anfänger) leichter verständlicheren Syntax trumpfen. Durch sogenanntes *Sporkling* können leicht parallele Klangverarbeitungen stattfinden. Die Praxiserfahrung zeigt allerdings, dass noch an der Stabilität gearbeitet werden muss.

Max MSP und Pure Data Max MSP und Pure Data setzen darauf, dass sich Komponenten in einer graphischen Oberfläche zusammensetzen lassen und mit Kabel verbunden werden. Pure Data ist im Gegensatz zu Max MSP frei verfügbar.

SuperCollider SuperCollider wird sehr oft im Live-Coding-Betrieb eingesetzt und ist mit seiner C-ähnlichen Syntax auch relativ gut lesbar. Zudem bietet es viele Möglichkeiten zur funktionalen Programmierung. Auch mit dem Protokoll OSC ist dieses System gut kombinierbar.

6 Elektronische Musik in CSound

Die bereits erörterten Kenntnisse sollen dafür genutzt werden, ein elektronisches Musikstück in CSound zu komponieren. Das Arrangement orientiert sich stark an *Das Modell* von *Kraftwerk*.

6.1 Drums

Bisher wurde zwar darüber gesprochen, wie die Klangspektren von Drums und perkussiven Instrumenten aussehen, doch der Quellcode dazu war nicht bekannt.

6.1.1 Kickdrum

```
instr 1
kenv1 expon 50 ,.25 ,0.01
kenv2 expon 25 ,.25 ,0.01
kfrq1 expon 100 ,.25 ,60.0
kfrq2 expon 130 ,.25 ,60.0
a1 oscili kenv1 ,kfrq1 ,1
a2 oscili kenv2 ,kfrq2 ,1
a3 adsr .001 , .1 ,.1 , .1
a4 noise 1*a3 ,.5
outs a1+a2+a4 , a1 + a2+a4
endin
```

Die Kickdrum setzt sich aus 2 leicht unterschiedlichen Sinusschwingungen zusammen, die schnell in der Frequenz fallen. Dazu kommen Hüllkurven, die die Amplitude schnell minimieren und ein leichtes weißes Rauschen.

6.1.2 Snare

```
instr 2
kenv1 expon 10 ,.250 ,0.01
kenv2 expon 15 ,.175 ,0.1
kfl line 1000 ,.250 ,10000
a1 noise 60 ,.25
a2 oscili kenv1 ,500 ,1
a3 = a2+(a1*kenv2)
a4 butlp a3 ,kfl
a5 buthp a4 ,100
outs a5 , a5
endin
```

Die Snaredrum ist etwas rauschlastiger und höher als die Kick und wird dementsprechend auch programmiert. Die Frequenz des Tiefpassfilters steigt in einer

viertel Sekunde von 1000 Hz auf 10000 Hz wobei der Hochpassfilter kontinuierlich bei 100 Hz bleibt. Das Ganze wird von einem kurzen 500 Hz Ton unterstützt. Die Verkettung der einzelnen Elemente ist jedoch ein bisschen komplizierter als bei der Kickdrum.

6.1.3 Hi-Hat

```
instr 3
kenv1 expon 10,.0250,0.01
kenv2 expon .25,.075,0.001
a1 oscili kenv1,10000,1
a2 noise 12,.6
a3 = a2*kenv2
a4 sum a1+a3
outs a4, a4
endin
```

Auch die Hi-Hat setzt sich aus Rauschen und einem Oszillator zusammen. Logischerweise ist hier die Frequenz am höchsten und die Hüllkurve am kürzesten.

6.2 Synthesizer

6.2.1 Additiver Bass

```
instr 4 ;bass
kenv1 line 20,p3,0
kenv2 line 10,p3,0
kenv3 line 25,p3,0
kvr1 oscili 1,3,1
kvr2 oscili 1,2.7,1
kvr3 oscili 1,1.7,1
ifrq = cpsmidinn(p4)
a1 oscili kenv1,ifrq+kvr1,1
a2 oscili kenv2,ifrq*2+kvr2,1
a3 oscili kenv3,ifrq/2+kvr3,1,1
a4 sum a1+a2+a3
outs a4, a4
endin
```

Dieser weiche Bass entsteht durch eine Art additive Synthese. Ein Oszillator spielt die Grundfrequenz, ein weiterer verdoppelt diese und ein dritter halbiert sie. Alle drei Oszillatoren werden durch einen LFO moduliert und sinken linear in der Amplitude.

6.2.2 Weitere Synthesizer

Alle anderen Synthesizer wurden so, oder so ähnlich schon in dieser Arbeit vorgestellt und werden teilweise nur mit verschiedenen Parametern gespielt. Alle implementierten Synthesizer (Subtraktive, Additive und FM-Synthese) sind vorhanden und wurden auf das Arrangement abgestimmt.

6.3 Das Arrangement

Da die elektronische Musik sehr stark von Wiederholungen geprägt ist, wird jedes Instrument in Schleifen abgespielt. Trotzdem wird hier klar, dass im score-file eindeutig die Schwachstelle von CSound liegt. Längere Passagen lassen sich mit CSound leider nicht meistern, ohne dass der Score sehr unübersichtlich wird. Hier ein Beispiel für die schlechte Lesbarkeit eines Teils des score-file:

```
{ 2 LOOP9
  i8 [ 00 + 16 * $LOOP9 ] 03.75 7112 7 0.5 1 .7 0.5 3 0
  i8 [ 00 + 16 * $LOOP9 ] 03.75 68
  i8 [ 00 + 16 * $LOOP9 ] 03.75 64
  i8 [ 04 + 16 * $LOOP9 ] 03.75 70 12 7 0.5 1 .7 0.5 3 0
  i8 [ 04 + 16 * $LOOP9 ] 03.75 66
  i8 [ 04 + 16 * $LOOP9 ] 03.75 63
  i8 [ 07 + 0 * $LOOP9 ] 00.50 68 12 7 0.3 .1 .5 0.05 3 0
  i8 [ 07 + 0 * $LOOP9 ] 00.50 64
  i8 [ 07 + 0 * $LOOP9 ] 00.50 61
  i8 [ 08 + 0 * $LOOP9 ] 07.75 66 12 7 0.5 1 .7 0.05 3 0
  i8 [ 08 + 0 * $LOOP9 ] 07.75 63
  i8 [ 08 + 0 * $LOOP9 ] 07.75 60
  i8 [ 24 + 0 * $LOOP9 ] 07.75 75 12 7 0.5 1 .7 0.05 3 0
  i8 [ 24 + 0 * $LOOP9 ] 07.75 72
  i8 [ 24 + 0 * $LOOP9 ] 07.75 69
}
```

6.4 Das Ergebnis

Mit dem Willen zur Tüftelei lassen sich mit CSound überraschende Ergebnisse erarbeiten. Das implementierte Lied weist authentische Synthesizerklänge vor, welche durch ihre Vielseitigkeit überzeugen. Sehr präzise Drumsounds, ein warmer, druckvoller Bass sowie klangvolle Höhen und Mitten setzen sich zu einem Lied zusammen, die einen digitalen Charakter vermitteln.

7 Fazit und Ausblick

Durch die Kombination von Mathematik, Informatik und Musik lassen sich digitale Klänge nach Belieben erzeugen. Diese Arbeit legt dar, dass *CSound* nach wie vor ein hervorragendes Mittel ist, die klassischen Methoden der Klangsynthese umzusetzen und auch experimentelle Klanggenerierung und -bearbeitung zu betreiben. Außerdem wird deutlich, dass sich Musik in sehr vielen Bereichen durch Mathematik beschreiben und mit der Informatik umsetzen lässt. Selbst komplizierte Arrangements lassen sich so abbilden, auch wenn *CSound* damit Probleme hat.

Wie das implementierte Lied deutlich macht, reichen die genauer untersuchten Synthesarten (subtraktive, einfache additive und FM-Synthese) aus, um vielseitige digitale Klänge zu erzeugen, die auch leicht als solche erkannt werden. Will man akustische Instrumente nachahmen, so sollte man entweder die additive Synthese mit sehr vielen einzeln ansteuerbaren und regelbaren Oszillatoren verwenden, oder auf das *Sampling* beziehungsweise das *Physical-Modeling* zurückgreifen.

Außerdem soll festgehalten werden, dass *CSound* eine sehr viel mächtigere Sprache ist und für mehr verwendet werden kann, als für die direkte Soundsynthese. *Algorithmische Komposition* zählte schon immer zu ihren Stärken wobei seit neueren Versionen die Möglichkeiten zur Oberflächenprogrammierung und Nutzer-Interaktion (Echtzeiteinsatz) gegeben sind. Letzteres ist im Moment noch etwas instabil. Als interessant könnte sich ein Echtzeitsystem, basierend auf einer Kombination aus dem neuen *OSC-Protokoll* und *CSound* erweisen.

Literatur

- [Ack91] Philipp Ackermann. *Computer und Musik*. Springer angewandte Informatik, 1991.
- [Aik13] Jim Aikin. *Csound Power*. Course Technology, 2013.
- [Anw13] Florian Anwander. *Synthesizer*. PPV Medien, 2013.
- [Bou00] Richard Boulanger. *The Csound Book*. Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [Dic97] Michael Dickreiter. *Handbuch der Tonstudioteknik*. Saur, 1997.
- [DZ09] Kurt Diedrich and Franz Peter Zantis. *Filtern ohne Stress*. elektor, 2009.
- [HMS07] Ekbert Hering, Rolf Martin, and Martin Stohrer. *Physik für Ingenieure*. Springer, 2007.
- [Jam02] J F James. *A Student's Guide to Fourier Transforms*. Cambridge University Press, 2002.
- [KJM06] Manfred Knaebel, Helmut Jaeger, and Roland Mastel. *Technische Schwingungslehre*. Springer, 2006.
- [Mey80] Jürgen Meyer. *Akustik und musikalische Aufführungspraxis*. Das Musikinstrument, 1980.
- [Mö07] Michael Möser. *Technische Akustik*. Springer, 2007.
- [Ren03] Hans Renner. *Grundlagen der Musik*. Schott Musik International, 2003.
- [Rus10] André Ruschkowski. *Elektronische Klänge und musikalische Entdeckungen*. Reclam, 2010.
- [Sch98] Reinhard Schmitz. *Analoge Klangsynthese*. wioo basics, 1998.
- [Sta80] Wilhelm Stauder. *Einführung in die Akustik*. Heinrichshofen, 1980.
- [Wal96] James S. Walker. *Fast Fourier Transforms*. CRC-Press, 1996.

Abbildungsverzeichnis

1	Der Sinus: Amplitude und Periodendauer	6
2	Der Sinus: Periodendauer	7
3	Die Addition von Sinusschwingungen mit Phasenverschiebung.	8
4	Die Addition von Sinusschwingungen mit verschiedenen Frequenzen.	9
5	Die Schwebung	10
6	Akustik und Teilgebiete. (Quelle: [HMS07].)	10
7	Eine 440 Hz Sinusschwingung als Beispiel für einen Ton.	11
8	Ein Dreiklang aus Sinusschwingungen als Beispiel für einen Klang.	12
9	Ein Klavier spielt ein <i>a</i> (440 Hz) als Beispiel für einen Klang.	12
10	Ein Saxophon spielt ein <i>a</i> (440 Hz) als Beispiel für einen Klang.	12
11	Wasserrauschen kann viele Frequenzen und einen gleichmäßigen zeitlichen Verlauf vorweisen	13
12	Händeklatschen kann viele Frequenzen und einen ruckartigen zeitlichen Verlauf vorweisen	13
13	Eine Annäherung an die Rechtecksschwingung.	17
14	Die Annäherung an eine Dreiecksschwingung.	18
15	Das Frequenzanalysewerkzeug von Audacity.	19
16	Das Spektrogramm von Audacity.	20
17	Die 3 Phasen der Elongation bei Klangerzeugern am Beispiel eines Orgeltones.	21
18	Das Spektrogramm eines Saxophones.	23
19	Das Spektrogramm eines Klavieres.	23
20	Das Spektrogramm einer Oboe.	23
21	Das Spektrogramm einer Kickdrum.	24
22	Das Spektrogramm einer Snaredrum.	24
23	Das Spektrogramm einer am Rand gespielten Ride.	25
24	Das Spektrogramm und die Verlaufsaufnahme eines Sinus.	28
25	Das Spektrogramm und die Verlaufsaufnahme einer Sägezahnwelle.	29
26	Das Spektrogramm und die Verlaufsaufnahme einer Dreieckswelle.	29
27	Das Spektrogramm und die Verlaufsaufnahme einer Rechteckwelle.	30
28	Das Spektrogramm und die Verlaufsaufnahme einer Rechteckwelle.	30
29	Das Spektrogramm von weißem Rauschen.	31
30	Das Spektrogramm von rosa Rauschen.	31
31	Die ADSR Hüllkurve und ihre Parameter.	32
32	Das Tiefpassfilter.	34
33	Das Hochpassfilter.	35
34	Das Bandpassfilter.	35
35	Das Bandsperrfilter.	36
36	Subtraktive Klangsynthese.	38
37	Additive Klangsynthese.	40

38	Eine gleichbleibende Trägerfrequenz mit einer steigenden Modulationsfrequenz.	40
39	Gleichbleibende Träger- und Modulationsfrequenz mit einer steigenden Modulationsamplitude.	41
40	FM-Synthese: Eine Trompete mit einem sehr harmonischen Spektrum.	42
41	FM-Synthese: Eine Glocke mit relativ unharmonischem Spektrum, vorallem in der Einschwingphase.	42
42	Eine FM-Synthese mit 3 Modulatoren parallel geschaltet.	43
43	Eine FM-Synthese mit 3 Modulatoren in Reihe geschaltet.	44
44	Eine komplexe FM-Synthese mit sehr unnatürlichen Spektren.	44
45	Der Aliasing-Effekt	47
46	Ein Sinus mit keinem, leichtem und extremem Clipping	47
47	Stärkeres Clipping führt zu mehr Obertönen.	48

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt und durch meine Unterschrift, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Ausführungen an Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder Sinn anderer Werke entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht und ihre Quellen vermerkt. Die Arbeit wurde weder in gleicher oder ähnlicher Form bereits einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt, noch anderswo veröffentlicht.

Passau, 13.6.2014

Alexander Tremel