
BACHELORARBEIT

Herr
Dennis Schmidt

**Analyse von Klangsynthese-
verfahren in Hinblick auf deren
Funktionsweise**

2019

BACHELORARBEIT

**Analyse von Klangsynthese-
verfahren in Hinblick auf deren
Funktionsweise**

Autor/in:

Herr Dennis Schmidt

Studiengang:

Media and Acoustical Engineering

Seminargruppe:

MG14wA-B

Erstprüfer:

Herr Prof. Dr.-Ing. Michael Hösel

Zweitprüfer:

Herr Dipl.-Musikpädagoge Thomas Wand

BACHELOR THESIS

Analysis of methods of sound synthesis regarding their func- tionality

author:

Mr. Dennis Schmidt

course of studies:

Media and Acoustical Engineering

seminar group:

MG14wA-B

first examiner:

Mr. Prof. Dr.-Ing. Michael Hösel

second examiner:

Mr. Dipl.-Musikpädagoge Thomas Wand

Bibliografische Angaben

Schmidt, Dennis:

Analyse von Klangsyntheseverfahren in Hinblick auf deren Funktionsweise

Analysis of methods of sound synthesis regarding their functionality

59 Seiten, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,
Fakultät Medien, Bachelorarbeit, 2019

Abstract

Seit den 1950er Jahren existieren, als Synthesizer bekannte, elektronische Instrumente. Zunächst wurden dafür spannungsgesteuerte Schaltungen in analogen Synthesizern verwendet, später konnten mithilfe der Computertechnik auch digitale Synthesizer erstellt werden. Beide Arten beruhen auf unterschiedlichen Syntheseverfahren zur Nachbildung akustischer Instrumente oder zur Erzeugung von eigenen Klängen. In dieser Arbeit werden der grundlegende Aufbau und die Funktionsweise der gängigsten Klangsyntheseverfahren erläutert und in Hinblick auf deren Vor- und Nachteile in analogen, sowie digitalen Synthesizern analysiert. Zudem werden verfahrensspezifische Klangcharakteristiken und ihr mögliches Klangpotential aufgezeigt.

Inhaltsverzeichnis

<i>Inhaltsverzeichnis</i>	V
<i>Abkürzungsverzeichnis</i>	VII
<i>Abbildungsverzeichnis</i>	VIII
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	2
2.1 Akustik	2
2.1.1 Schallwahrnehmung	2
2.1.2 Schwingungen	3
2.1.3 Obertöne und Klangfarbe	5
2.1.4 Töne, Klänge, Geräusche	5
2.2 Mathematische Grundlagen	6
2.2.1 Reelle Fourier-Reihe	6
2.2.2 Komplexe Fourier-Reihe	8
2.2.3 Beispiele	8
2.2.4 Fourier-Transformation und Frequenzspektrum	11
3 Synthesizer	12
3.1 Geschichte	12
3.2 Aufbau	13
3.2.1 Modulare Synthesizer	13
3.2.2 Steuerspannung und Klaviatur	14
3.2.3 Oszillator	15

Inhaltsverzeichnis	VI
3.2.4 Rauschgenerator	19
3.2.5 Filter	20
3.2.6 Verstärker	24
3.2.7 Hüllkurvengenerator	24
3.2.8 Niederfrequenzoszillator	27
4 Klangsyntheseverfahren	28
4.1 Analoge Klangsynthese	28
4.1.1 Lineare Klangsyntheseverfahren	28
4.1.2 Nichtlineare Klangsyntheseverfahren	31
4.1.3 Phase-Distortion- und Waveshaping-Synthese	36
4.2 Digitale Klangsynthese	38
4.2.2 Wavetable-Synthese	39
4.2.3 Granularsynthese	40
4.2.4 Sampling	42
4.2.5 Physical Modeling	42
5 Vor- und Nachteile der Syntheseverfahren	44
6 Fazit	46
Literaturverzeichnis	X
Anlagen	XII
Eigenständigkeitserklärung	XIII

Abkürzungsverzeichnis

AM	Amplitudenmodulation
CD	Compact Disk
DAW	Digital Audio Workstation
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
EG	Envelope Generator
FFT	Fast Fourier Transform
FM	Frequenzmodulation
LFO	Low Frequency Oscillator
MIDI	Musical Instrument Digital Interface
PD-Synthese	Phase-Distortion-Synthese
PM-Synthese	Physical-Modeling-Synthese
VC	Voltage Control
VCA	Voltage-Controlled-Amplifier
VCF	Voltage-Controlled-Filter
VCO	Voltage-Controlled-Oscillator

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Querschnitt durch das menschliche Gehör.....	2
Abbildung 2: Kenngrößen einer sinusförmigen Schwingung	4
Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung von Hörereignissen, Schallschnelleverlauf und Spektraldarstellung	6
Abbildung 4: Darstellung einer Rechteckfunktion $f(x)$	8
Abbildung 5: Amplitudenspektrum einer Rechteckfunktion.....	9
Abbildung 6: Darstellung einer Dreieckfunktion $f(x)$	10
Abbildung 7: Schematische Grundschialtung eines modularen Synthesizerkonzepts ..	14
Abbildung 8: Grundschialtung Klaviatur.....	15
Abbildung 9: Darstellung Sinuswelle: Zeitlicher Wellenverlauf (oben), Spektraldarstellung (unten).....	16
Abbildung 10: Darstellung Sägezahnwelle: Zeitlicher Wellenverlauf (oben), Spektraldarstellung (unten).....	17
Abbildung 11: Darstellung Dreieckwelle: Zeitlicher Wellenverlauf (oben), Spektraldarstellung (unten).....	18
Abbildung 12: Darstellung Rechteckwelle: Zeitlicher Wellenverlauf oben, Spektraldarstellung unten	19
Abbildung 13: Spektraldarstellung Weißes Rauschen.....	20
Abbildung 14: Grundschialtung Tiefpass	21
Abbildung 15: Frequenzgang Tiefpass 1. Ordnung	21
Abbildung 16: Grundschialtung Hochpass.....	22
Abbildung 17: Frequenzgang Hochpass 1. Ordnung.....	22
Abbildung 18: Grundschialtung Bandpass ($R=$ Lastwiderstand)	23
Abbildung 19: Frequenzgänge Bandpass und Bandsperre	23

Abbildung 20: Amplitudenverlauf einer ADSR-Hüllkurve	26
Abbildung 21: Additive Klangsynthese - links: Ausgangssinusschwinungen, rechts: Ergebniswellenform	29
Abbildung 22: Amplitudenmodulation: zwei Ausgangsschwingungen (oben) und die resultierende amplitudenmodulierte Schwingung (unten).....	32
Abbildung 23: Darstellung einer Frequenzmodulation	33
Abbildung 24: Beispielskombination der Operatoren des Yamaha DX-7	36
Abbildung 25: Phase-Distortion-Synthese	37
Abbildung 26: Darstellung drei unterschiedlicher Wavetables.....	39
Abbildung 27: Grains mit unterschiedlichen Wellenformen, Frequenzen und Hüllkurven	41

1 Einleitung

Die Grundzüge der elektronischen Klangerzeugung entstanden bereits Anfang des 20. Jahrhunderts. Als Beispiele hierfür gelten das Telharmonium und das Trautonium. Im Jahr 1955 entwickelte Robert Moog das erste elektronische Klangsynthesesystem, das als Grundbaustein der heutigen Synthesizer gilt. Nach dieser Erfindung des ersten Synthesizers wurden in den folgenden Jahren von immer mehr Firmen neue Klangsyntheseverfahren und darauf basierende elektronische Systeme vorgestellt. Dies läutete eine neue Ära der elektronischen Klangerzeugung und -gestaltung ein.

Mit der Digitalen Revolution entstanden neue Möglichkeiten, Klänge mit Hilfe von Computern zu erzeugen. Dies führte dazu, dass komplett neue Arten der Klangsynthese entwickelt werden konnten, die weitaus komplexere Alternativen zu den analogen Synthesizern boten. Dennoch schwören Liebhaber auch heute noch, nach Einführung digitaler Synthesizer, auf die älteren analogen Systeme. Daher stellt sich die Frage, was die Vor- und Nachteile der analogen, sowie der digitalen Systeme sind?

Mit dieser Frage befasst sich diese Arbeit. Dafür wird zunächst der allgemeine Aufbau von Synthesizern und deren Komponenten erklärt. Anschließend werden Aufbau, Funktionsweise und Klangcharakteristiken der gängigsten Syntheseverfahren erläutert, sowie abschließend die Verfahren, bezogen auf die erhaltenen Erkenntnisse, in Hinblick auf deren Vor- und- Nachteile analysiert.

Zur Veranschaulichung einzelner Punkte dieser Arbeit, sind auf der beigelegten CD Klangbeispiele vorzufinden. Für die Erzeugung der Klänge wurden der analoge Synthesizer Minibrute 2S der Firma Arturia und der digitale Softwaresynthesizer Serum der Firma Xfer Records verwendet. Diese wurden über die DAW Logic Pro X aufgenommen. Zur spektralen Darstellung einiger Klänge wurde vom Spectrum Analyzer der Firma SIR Audio Tools Gebrauch gemacht.

2 Grundlagen

2.1 Akustik

Akustik ist die Wissenschaft des Schalls. Dieser lässt sich als mechanische Schwingungen eines elastischen Mediums beschreiben und breitet sich als Welle aus.¹ Alle Töne, Geräusche, Klänge setzen sich aus mehr oder weniger verschiedenen Schwingungen zusammen. Sie können durch Luft (Luftschall), Wasser (Wasserschall) oder einen festen Körper (Körperschall) übertragen werden.

2.1.1 Schallwahrnehmung

Schallereignisse nimmt der Mensch über das Ohr als akustischen Reiz wahr, allerdings nur im Frequenzspektrum zwischen 20 Hz und 20 kHz. Treffen Schallwellen auf das äußere Ohr, werden sie wie ein Trichter durch den Gehörgang an das Trommelfell geleitet. Diese Luftbewegungen im Gehörgang bringen das Trommelfell synchron zum Schwingen.

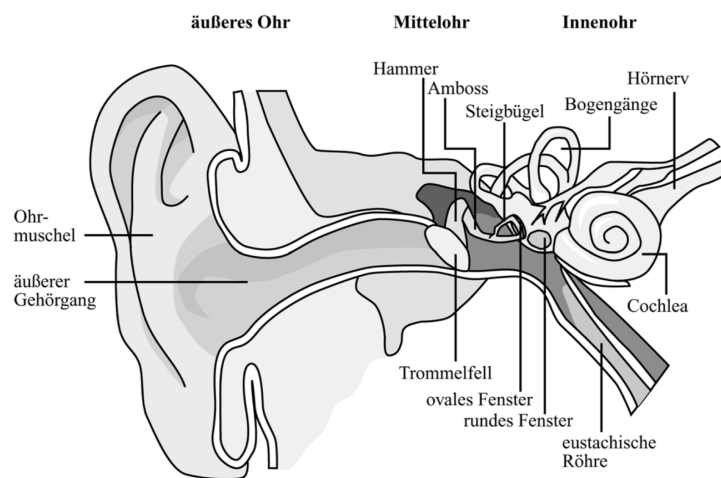


Abbildung 1: Querschnitt durch das menschliche Gehör²

¹ Vgl. Dickreiter, *Raumakustik, Schallquellen, Schallwahrnehmung, Schallwandler, Beschallungstechnik, Aufnahmetechnik, Klanggestaltung*, S. 1.

² Dickreiter u. a., *Handbuch der Tonstudioteknik*, S. 96.

Im Mittelohr befinden sich die Gehörknöchelchen Hammer, Amboss und Steigbügel. Sie bilden ein Hebelsystem, welches die Schwingungen des Trommelfells verstärkt und über das ovale Fenster an das Innenohr übermittelt.³ In der mit Flüssigkeit gefüllten Cochlea, auch Gehörschnecke genannt, nehmen feine Haarzellen die Schwingungen auf und leiten sie als elektrische Impulse an das Gehirn weiter.

Für die Wahrnehmung von akustischen Tönen sind die wichtigsten Hörempfindungen die Lautstärke, sowie die Tonhöhe. Die Lautstärke beschreibt die Empfindung von „Intensität“ oder „Stärke“ eines Schallereignisses. Neben dem physikalischen Schalldruckpegel, der für das Erkennen der Lautstärke im Gehirn verarbeitet wird, ist auch die Frequenz der Schallwelle ein weiterer wichtiger Faktor. Sie bestimmt die Wahrnehmung der Tonhöhe. Dies ist durch das menschliche Gehör allein jedoch nicht eindeutig ermittelbar, da bei Frequenzen unter 2000 Hz die Tonhöhenwahrnehmung mit zunehmendem Pegel geringfügig sinkt und andererseits bei Frequenzen darüber mit zunehmendem Pegel steigt.⁴

2.1.2 Schwingungen

Ändern sich physikalische Größen in Abhängigkeit von der Zeit werden diese Vorgänge als Schwingungen definiert. Sie können in periodische, wie beispielsweise Sinus- oder Cosinus-Schwingung, auf einer Seite und nicht-periodische Schwingungen, wie Rauschen und Impulse auf der anderen Seite, unterteilt werden. Im Gegensatz zu den regellosen oder einmaligen Vorgängen der nicht-periodischen Schwingungen bleibt das Zeitintervall der regelmäßigen periodischen Schwingung konstant.⁵ Die einfachste harmonische Schwingungsform wird Sinusschwingung genannt und beruht auf der gleichnamigen Sinusfunktion.

Es ist wichtig, einige Kenngrößen von Schwingungen zu erklären, da sie für das grundlegende Verständnis der Klangsynthese notwendig sind.

³ Vgl. Dickreiter, *Raumakustik, Schallquellen, Schallwahrnehmung, Schallwandler, Beschallungstechnik, Aufnahmetechnik, Klanggestaltung*, S. 107.

⁴ Vgl. Henle, *Das Tonstudio Handbuch - Praktische Einführung in die professionelle Aufnahmetechnik*, S. 50ff.

⁵ Vgl. Ulrich und Hoffmann, *Hörakustik - Theorie und Praxis*, S. 364.

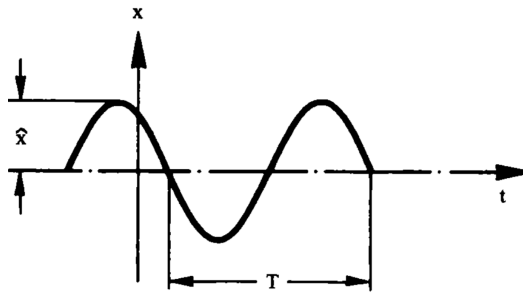


Abbildung 2: Kenngrößen einer sinusförmigen Schwingung⁶

Die Amplitude \hat{x} beschreibt die maximale Auslenkung einer Schwingung und somit den Scheitelwert einer Sinusgröße x . Der Zeitabschnitt, in dem ein kompletter Schwingungszyklus durchlaufen wird, heißt Periodendauer T . Die Frequenz f beschreibt die Schwingungsperioden pro Sekunde und ergibt sich somit aus dem Kehrwert der Periodendauer $f = \frac{1}{T}$.

Überlagerung von Schwingungen

Werden zwei oder mehrere harmonische Schwingungen addiert, kommt es zu einer Überlagerung der Schwingungen. Bei gleicher Frequenz entsteht in Abhängigkeit von Amplituden und Phasendifferenz der Einzelschwingungen eine neue Schwingung.⁷ Beispielsweise werden die Amplituden einer entstehenden Schwingung verdoppelt, wenn zwei harmonische Schwingungen in gleicher Phase schwingen. Dementsprechend löschen sie sich bei einer Phasenverschiebung von 180° gegenseitig aus. Von einer Schwebung ist die Rede, wenn die Frequenzen beider Schwingungen nur leicht voneinander abweichen. In diesem Fall entspricht die Frequenz der resultierenden Schwingung dem Mittelwert der beiden überlagerten Töne. Zudem ist sie moduliert, das heißt ihre Lautstärke schwankt mit der Schwebungsfrequenz.⁸ Weichen die beiden Frequenzen stärker voneinander ab, entsteht keine harmonische Schwingung mehr.

Klangbeispiel Nr. 1 auf der beigelegten CD veranschaulicht die Wirkung einer Schwebung. Ausgangsmaterial sind zwei überlagerte Sägezahn-schwingungen, wobei die Frequenz der zweiten langsam erhöht wird.

⁶ Dickreiter, *Raumakustik, Schallquellen, Schallwahrnehmung, Schallwandler, Beschallungstechnik, Aufnahmetechnik, Klanggestaltung*, S. 55.

⁷ Dickreiter, *Raumakustik, Schallquellen, Schallwahrnehmung, Schallwandler, Beschallungstechnik, Aufnahmetechnik, Klanggestaltung*, S.56.

⁸ Vgl. Ulrich und Hoffmann, *Hörakustik - Theorie und Praxis*, S. 375.

2.1.3 Obertöne und Klangfarbe

Bestehen Schwingungen aus mehr als einer Sinusschwingung, wird sie als komplexe Schwingung bezeichnet. In der Natur haben wir es ausschließlich mit komplexen Schwingungen zu tun, da reine Sinusschwingungen lediglich elektronisch erzeugt werden können. Die in einer komplexen Schwingung enthaltenen Einzelschwingungen werden Partial- oder Teiltöne genannt und bestehen aus dem Grundton und Obertönen. Der Grundton besitzt dabei die niedrigste Frequenz. Alle weiteren Schwingungen bilden den Obertonanteil. Von Harmonischen ist die Rede, wenn die Frequenzen der Obertöne im ganzzahligen Verhältnis zum Grundton stehen. Das bedeutet, der erste Oberton (2. Harmonische) hat die doppelte Frequenz des Grundtones (1. Harmonische), der zweite Oberton (3. Harmonische) hat die dreifache Frequenz, usw. Bei der Erzeugung von Klängen mit perkussiven Instrumenten, wie z.B. Snare und Becken, entstehen Teiltonverhältnisse, die nicht mehr nur aus ganzzahligen vielfachen Frequenzen bestehen. Sie bestehen zum Großteil aus nicht-harmonischen, geräuschhaften Obertönen.⁹ Das Verhältnis von Grundton, Obertönen und Geräuschanteilen eines Tones wird als Klangfarbe wahrgenommen. Sie ermöglicht eine Unterscheidung verschiedener Stimmen oder Instrumente. Der Geräuschanteil beschreibt hierbei die nicht-harmonischen Obertöne.

2.1.4 Töne, Klänge, Geräusche

Der Höreindruck eines Schallereignisses lässt sich in der Physik, anders als in der Musik, in verschiedene Kategorien unterteilen. Während in der Musik Ton, Klang und Lärm die Eindrücke ausreichend beschreiben, müssen sie in der Akustik genauer definiert werden. Wird beispielsweise eine Klaviertaste angespielt, so spricht man in der Regel von meinem musikalischen Ton. Dieser besteht jedoch aus einem Grundton und mehreren Obertönen, womit es physikalisch nicht mehr als reiner Ton betrachtet werden kann. Ein reiner Ton ist in der Akustik eine sinusförmige Schallschwingung mit einer bestimmten Frequenz. Mehrere einzelne Töne beliebiger Frequenzen ergeben ein Tongemisch. Kommen nun zu der Frequenz eines Tons weitere ganzzahlige Vielfache, so bilden sie einen harmonischen Klang. Wird ein Akkord gespielt, spricht man von einem mehrfachen Klang oder Klanggemisch. Ein Knall, wie von einem Pistolenschuss oder Händeklatschen, ist ein Schallereignis oder Ton von kurzer Dauer und wird Schall- oder Tonimpuls genannt. Rauschen (engl. Noise) ist ein Schallsignal, das über ein kontinuierliches Frequenzspektrum angegeben werden kann. Es besteht theo-

⁹ Vgl. Gorges und Merck, *Keyboards, MIDI, Homerecording - Alles über Equipment und Anwendungen*, S. 41.

retisch aus unendlich vielen Einzelschwingungen, deren Frequenzen sehr dicht nebeneinander liegen. Kann ein Hörereignis nicht mit diesen Empfindungen bezeichnet werden, so gilt es als Geräusch.¹⁰

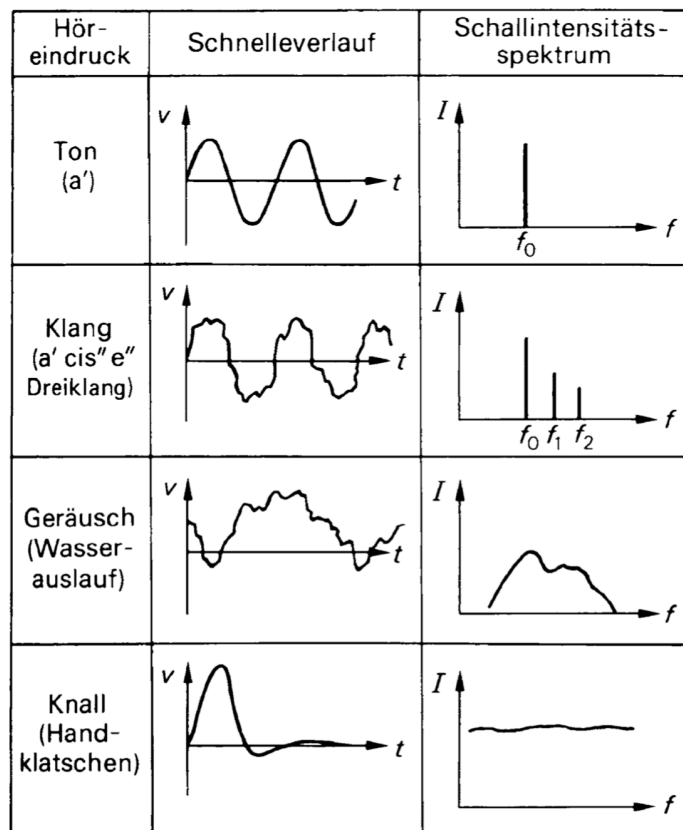


Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung von Hörereignissen, Schallschnelleverlauf und Spektraldarstellung¹¹

2.2 Mathematische Grundlagen

2.2.1 Reelle Fourier-Reihe

Dem Satz von Fourier zufolge lassen sich alle periodischen Schwingungen als Summe reiner harmonischer Teil-Schwingungen darstellen. Eine Funktion $f(t)$ ist periodisch, wenn gilt:

$$(1) f(t + T) = f(t)$$

¹⁰ Vgl. Dickreiter u. a., *Handbuch der Tonstudioteknik*, S. 43f.

¹¹ Dobrinski, Krakau, und Vogel, *Physik für Ingenieure*, S. 572.

Bei der Zerlegung der periodischen Schwingung in einzelne Sinusschwingungen können neben der Grundfrequenz auch ganzzahlige Vielfache der Frequenz auftreten. Die Fourier-Reihe lässt sich mit

$$(2) f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega_0 t) + b_k \sin(k\omega_0 t)]$$

darstellen, wobei die Grundkreisfrequenz $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$. Weiterführend wird zum erleichterten Verständnis mit einer periodischen Funktion $f(x)$ der Periode 2π gerechnet. $x = \omega_0 t$ mit $\omega_0 T = 2\pi$, somit ergibt sich

$$(3) f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx)] .$$

Das konstante Glied der Fourier-Reihe a_0 beschreibt den linearen Mittelwert (auch Offset genannt) der Funktion $f(x)$:

$$(4) a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx$$

Die beiden Fourier-Koeffizienten a_k und b_k werden wie folgt berechnet:

$$(5) a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(kx) dx \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

$$(6) b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(kx) dx \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

Wird eine periodische Funktion $f(x)$ hinsichtlich ihrer Symmetrie betrachtet, vereinfacht sich der Rechenaufwand zur Berechnung der Fourier-Koeffizienten. Ist sie gerade, so gilt $f(-x) = f(x)$. Demnach ergibt $b_k = 0$ und die Funktion wird zu einer reinen Kosinusreihe mit

$$(7) a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} f(x) dx$$

$$(8) a_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(x) \cos(kx) dx$$

Ist die Funktion ungerade, also $f(-x) = -f(x)$ wird $a_k = 0$ und¹²

$$(9) b_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(x) \sin(kx) dx .$$

¹² Vgl. Ulrich und Weber, *Laplace-, Fourier- und z-Transformation: Grundlagen und Anwendungen*, S. 2ff.

2.2.2 Komplexe Fourier-Reihe

Unter Beachtung von komplexen Zahlen erhält man für die reelle Fourier-Reihe $f(x)$ die Formel

$$(10) f(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{jkx},$$

wobei der Summationsindex k von $-\infty$ bis $+\infty$ läuft. Die komplexen Koeffizienten c_k ergeben hier

$$(11) c_k = \begin{cases} \frac{a_k - jb_k}{2} & \text{für } k < 0 \\ a_0 & \text{für } k = 0 \\ \frac{a_{-k} + jb_{-k}}{2} & \text{für } k > 0 \end{cases}$$

und werden wie folgt berechnet:

$$(12) c_k = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) e^{-jkx} dx$$

Die Betrachtung der Fourier-Reihe in komplexer Form ist wichtig für die Berechnung der Fourier-Transformation (siehe Kapitel 1.2.4).

2.2.3 Beispiele

Es ist sinnvoll, die Rechteck- und Dreiecksschwingung, als beispielhafte Schwingungen zu betrachten. Sie spielen für die synthetische Klangerzeugung eine wichtige Rolle.

1. Rechteckfunktion

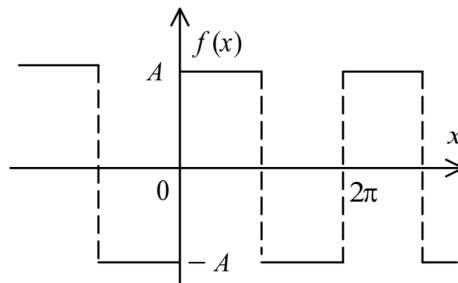


Abbildung 4: Darstellung einer Rechteckfunktion $f(x)$

Für eine Rechteckfunktion der Periode 2π gilt

$$f(x) = \begin{cases} -A & \text{für } -\pi \leq x < 0 \\ +A & \text{für } 0 \leq x < \pi \end{cases}$$

$$f(x + 2\pi) = f(x).$$

Die Funktion besitzt keinen Offset, somit ist $a_0 = 0$. Zudem ist die Rechteckfunktion ungerade, wodurch $a_k = 0$ und ausschließlich b_k berechnet werden muss.

$$b_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} A \cdot \sin(kx) dx = \frac{2A}{\pi} \left[\frac{-\cos(kx)}{k} \right]_0^{\pi}$$

$$b_k = \begin{cases} \frac{4A}{\pi k} & \text{für } k = 2n - 1 \\ 0 & \text{für } k = 2n \end{cases} \quad n \in \mathbb{N}$$

Werden die errechneten Werte nun in Formel (3) eingesetzt, erhält man die Fourier-Reihe der Rechteckfunktion.

$$f(x) = \frac{4A}{\pi} \sin(x) + \left[\frac{\sin(3x)}{3} + \frac{\sin(5x)}{5} + \frac{\sin(7x)}{7} + \dots \right]$$

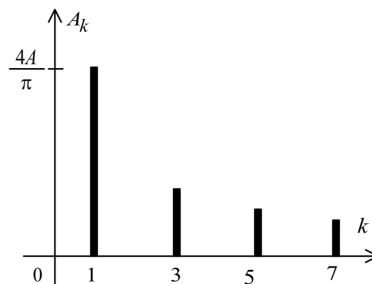


Abbildung 5: Amplitudenspektrum einer Rechteckfunktion

Anhand der Darstellung im Amplitudenspektrum (Abbildung 5) ist zu erkennen, dass die Rechteckschwingung nur aus der Grundfrequenz $k = 1$, sowie deren ungeradzahli- gen Vielfachen aufgebaut ist. Ihre Amplituden sind dabei um den Faktor $\frac{1}{k}$ abnehmend.

2. Dreieckfunktion

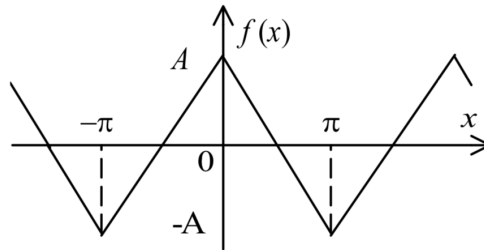


Abbildung 6: Darstellung einer Dreieckfunktion $f(x)$

Die Dreieckfunktion wird definiert durch:

$$f(x) = \begin{cases} A + \frac{2A}{\pi}x & \text{für } -\pi \leq x < 0 \\ A - \frac{2A}{\pi}x & \text{für } 0 \leq x < \pi \end{cases}$$

$$f(x + 2\pi) = f(x)$$

Es gilt $b_k = 0$, da die Funktion gerade ist. Sie ist an der X-Achse symmetrisch, demnach ergibt erneut $a_0 = 0$.

$$a_k = \frac{2A}{\pi} \int_0^{\pi} \left(1 - \frac{2}{\pi}x\right) \cos(kx) dx = \frac{2A}{\pi} \left[\frac{\sin(kx)}{k} \right]_0^{\pi} - \frac{4A}{\pi^2} \left[\frac{x \sin(kx)}{k} + \frac{\cos(kx)}{k^2} \right]_0^{\pi}$$

$$a_k = \begin{cases} \frac{8A}{\pi^2 k^2} & \text{für } k = \text{ungerade} \\ 0 & \text{für } k = \text{gerade} \end{cases}$$

Die Fourier-Reihe der Dreiecksfunktion lautet also

$$f(x) = \frac{8A}{\pi^2} \left[\cos(x) + \frac{\cos(3x)}{9} + \frac{\cos(5x)}{25} + \frac{\cos(7x)}{49} + \dots \right].$$

Auch hier treten ungeradzahlige Vielfache Frequenzen der Grundfrequenz auf. Sie sind mit dem Faktor $\frac{1}{k^2}$ abnehmend.

2.2.4 Fourier-Transformation und Frequenzspektrum

In der Realität existieren auch nicht periodische Signale, die mit der reellen Fourier-Reihe nicht mehr definiert werden können. Hierfür wurde die diskrete Fourier-Transformation (DFT) entwickelt. Mit ihr ist es möglich, eine Funktion vom Zeitbereich in den Frequenzbereich zu übersetzen und in einem Frequenzspektrum (auch nur Spektrum genannt) darzustellen. In ihm werden die Frequenzen der einzelnen, in der Ausgangsschwingung enthaltenen, Sinusschwingungen, sowie deren Amplitude abgebildet. Um die komplexe Berechnung effizienter zu gestalten, wurde 1965 die schnelle Fourier-Transformation (engl. Fast Fourier Transform, kurz FFT) entwickelt. Mit ihr können Rechenoperationen, durch mehrfache Verwendung von berechneten Zwischenergebnissen, gespart und somit die Geschwindigkeit der Verarbeitung erhöht werden.¹³

¹³ Vgl. Kuttner, *Praxiswissen Schwingungsmesstechnik*, S. 288.

3 Synthesizer

3.1 Geschichte

Schon immer war die Suche nach neuartigen Klängen und Instrumenten ein wichtiges Element des Musizierens. Hierfür wurden bei akustischen Musikinstrumenten die Materialien und Spieltechniken wieder und wieder neu entwickelt, um andere Tonhöhen, Lautstärken und Klangfarben zu erschaffen. Im Jahr 1903 erschuf Thaddeus Cahill das erste elektrische Instrument, das Telharmonium. Es wog 200 Tonnen und erzeugte Klänge, welche über das Telefonnetz übermittelt wurden. Mehrere Motoren trieben über Zahnräder Generatoren an, die Töne des Notensystems auf verschiedenen Oktavlagen erzeugten.

Nach der Erfindung der Elektronenröhre war es möglich, elektrische Signale zu verstärken und über Lautsprecher hörbar zu machen. In Folge dessen wurden in den 20er Jahren das Theremin, das Ondes Martenot und das Trautonium entwickelt. Sie bildeten elektronische Töne mithilfe von Oszillatoren. Dabei wurde ein Schwingkreis mit einem regelbaren Widerstand in seiner Schwingfrequenz bestimmt. Außerdem konnte 1935 ein weiterer Meilenstein der elektrischen Klangerzeugung geschaffen werden. Mit der Entwicklung der Hammond-Orgel gelang es Laurens Hammond, die Idee des Telharmoniums in kompakter Form im populären Musikmarkt zu etablieren. Eine Besonderheit daran war die Möglichkeit, durch Ziehregister Obertöne zum Grundton hinzuzufügen.¹⁴

Den ersten sogenannten Synthesizer entwickelte Harry F. Olson im Jahr 1955, den RCA-Synthesizer.¹⁵ Wenige Jahre später entstand das erste Synthesizerkonzept, wie es auch heute noch in analogen Synthesizern anzufinden ist. Verantwortlich dafür war Robert Moog mit seiner Grundidee, dass die Steuerung aller Parameter der Klangsynthese von außen möglich sein soll. Verschiedene Module, wie Oszillatoren, Verstärker, Modulatoren und Filter konnten beliebig zusammengesetzt und mit Steuerspannungen gesteuert werden. Ende der 60er Jahre gelang Moog die Technik, in abgemagerter Version in ein kleines Gerät zu bauen, womit es sich für Live-Auftritte eignete. Musiker

¹⁴ Vgl. Ackermann, *Computer und Musik: eine Einführung in die digitale Klangsynthese und Musikverarbeitung*, S. 25f.

¹⁵ Vgl. Stange-Elbe, *Computer und Musik Grundlagen, Technologien und Produktionsumgebungen der digitalen Musik*, S.187.

konnten die Klaviatur des Minimoog mit der rechten Hand spielen und gleichzeitig mit der linken Hand die Klangfarbe über Steuerknöpfe und Kontrollräder manipulieren.

Nach dem Minimoog präsentierte Moog 1975 den ersten polyphonen Synthesizer, den Polymoog. Dieser ermöglichte erstmals das Spielen mehrerer Töne eines Synthesizers gleichzeitig über die Klaviatur. Zudem wurden zwei weitere Neuerungen in dieser Zeit entwickelt. Einerseits die anschlagsdynamischen Tasten, die die Amplitude des Signals durch stärkeres oder schwächeres Anschlagen beeinflusste. Andererseits wurden mithilfe der Digitaltechnik die ersten hybriden Synthesizersysteme erstellt. Auf ihnen konnten verschiedene Parametereinstellungen abgespeichert und zu einem gewünschten Zeitpunkt wieder abgerufen werden.¹⁶

3.2 Aufbau

Synthesizer gibt es heutzutage in verschiedenen Größen und Formen, jedoch ist ihr grundlegender Aufbau sehr ähnlich. Ihre Oberfläche enthält unterschiedliche Bedienelemente, um die Parameter der Klangerzeugung selbst steuern zu können. Dazu gehören Wheels (Handräder), Slider (Schieberegler), Knobs (Drehknöpfe) und die Klaviatur. Außerdem sind oftmals Displays (Bildschirme), sowie zugehörige Funktionstaster aufzufinden, die der Programmierung, der Speicherung und dem Abruf von Parametereinstellungen dienen.

3.2.1 Modulare Synthesizer

Die elektronische Klangerzeugung und -gestaltung geschieht in Synthesizern. Neben Robert Moog war auch Don Buchla ein Vorreiter auf dem Gebiet. Sie erfanden das erste Konzept modularer Synthesizersysteme, wie sie heute bekannt sind. Diese bestehen aus einzelnen elektrischen Geräten, die über Patchkabel und Steckfelder miteinander verbunden werden. In Abbildung 7 wird eine beispielhafte Schaltung dieser Module dargestellt. Die einzelnen Module werden in den folgenden Kapiteln genauer erläutert.

¹⁶ Vgl. Ackermann, *Computer und Musik: eine Einführung in die digitale Klangersynthese und Musikverarbeitung*, S. 26f.

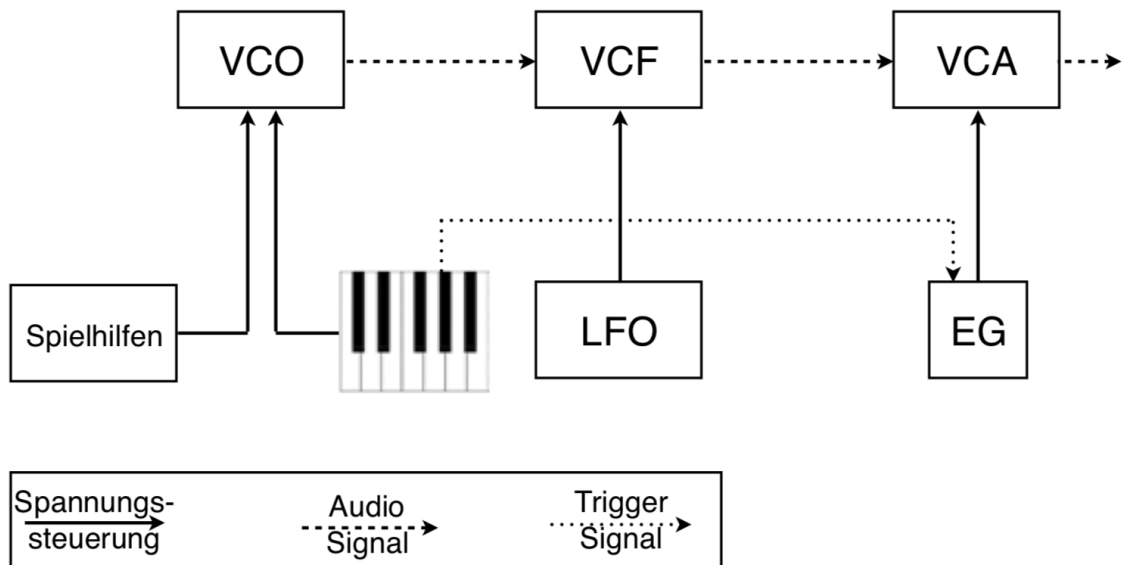


Abbildung 7: Schematische Grundsaltung eines modularen Synthesizerkonzepts¹⁷

Wie bereits erwähnt, sind für Klänge die primären Merkmale wie Tonhöhe, Lautstärke und Klangfarbe wichtig. Um diese drei Elemente zu behandeln existiert im grundlegenden Aufbau von modularen Synthesizern jeweils ein eigenes Modul. Die Klangerzeugung findet im Oszillator statt. Die gewünschte Lautstärke lässt sich mit dem Verstärker (engl. Amplifier) bestimmen. Zuletzt kann die Klangfarbe des Klanges hauptsächlich durch einen Filter beeinflusst werden. Zu geringem Teil wird sie auch vom Oszillator generiert.¹⁸

3.2.2 Steuerspannung und Klaviatur

Die Module des Modularsystems werden durch variable Gleichspannung gesteuert. Sie trägt den Namen Steuerspannung (engl. Voltage Control, kurz VC). Hierfür kann jeglicher Erzeuger von Gleichspannung genutzt werden. Die Klaviatur (engl. Keyboard) des Synthesizers ist dabei im musikalischen Bereich das zentrale Steuerelement.¹⁹ Sie wird neben dem Erzeugen der Steuerspannung für zwei weitere Eigenschaften genutzt: erstens das Erzeugen eines Gatesignals, was der Dauer eines Tastendrucks entspricht

¹⁷ Stange-Elbe, *Computer und Musik Grundlagen, Technologien und Produktionsumgebungen der digitalen Musik*, S. 191.

¹⁸ Vgl. Anwander, *Synthesizer. So funktioniert elektronische Klangerzeugung*, S. 21f.

¹⁹ Vgl. Stange-Elbe, *Computer und Musik Grundlagen, Technologien und Produktionsumgebungen der digitalen Musik*, S. 191f.

und zweitens einen Trigger-Impuls über den Tastenanschlag.²⁰ In Reihe geschaltete Widerstände werden durch Drücken der Tasten abgegriffen und so die Spannung verändert. Eine Oktave entspricht hierbei einem Volt. Eine Oktave besteht aus 12 Tasten, das bedeutet jede Taste ändert die Spannung um ein zwölftel Volt.

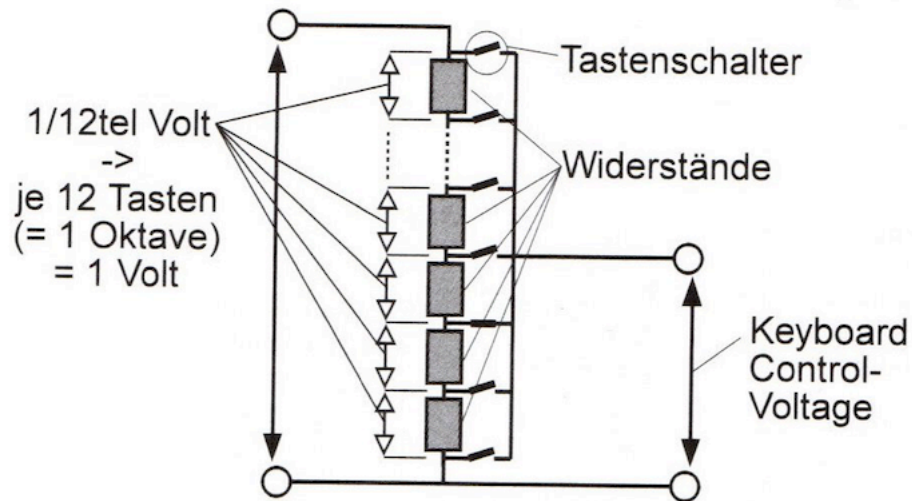


Abbildung 8: Grundschtaltung Klaviatur²¹

3.2.3 Oszillator

Die Basis eines modularen Synthesizersystems bildet der Spannungsgesteuerte Oszillator (engl. Voltage-Controlled-Oscillator, kurz VCO). Er generiert die Grundschwingung und steuert über die Spannung die Tonhöhe des Schwingkreises.²² In heutigen Synthesizern werden meist zwei oder mehr Oszillatoren für verschiedene Kombinationsmöglichkeiten angeboten. Für die subtraktive Klangersynthese (siehe Kapitel 4.1.1) ist eine obertonreiche Wellenform als Ausgangssignal wichtig, weswegen in den Oszillatoreinstellungen oft unterschiedliche Kurvenformen zur Auswahl stehen.

²⁰ Vgl. Ackermann, *Computer und Musik: eine Einführung in die digitale Klangersynthese und Musikverarbeitung*, S. 30f.

²¹ Anwander, *Synthesizer. So funktioniert elektronische Klangerzeugung*, S. 32.

²² Vgl. Ackermann, *Computer und Musik: eine Einführung in die digitale Klangersynthese und Musikverarbeitung*, S.28.

Sinuswelle

Die reine Sinuswelle (Klangbeispiel Nr. 2) besteht nur aus der Grundfrequenz einer Schwingung. Sie besitzt weder harmonische noch unharmonische Obertöne. Dadurch wird sie für die subtraktive Klangsynthese unbrauchbar, jedoch für die additive sehr wichtig. Sie eignet sich beispielsweise, um Bässen mehr klangliches Volumen zu verschaffen.

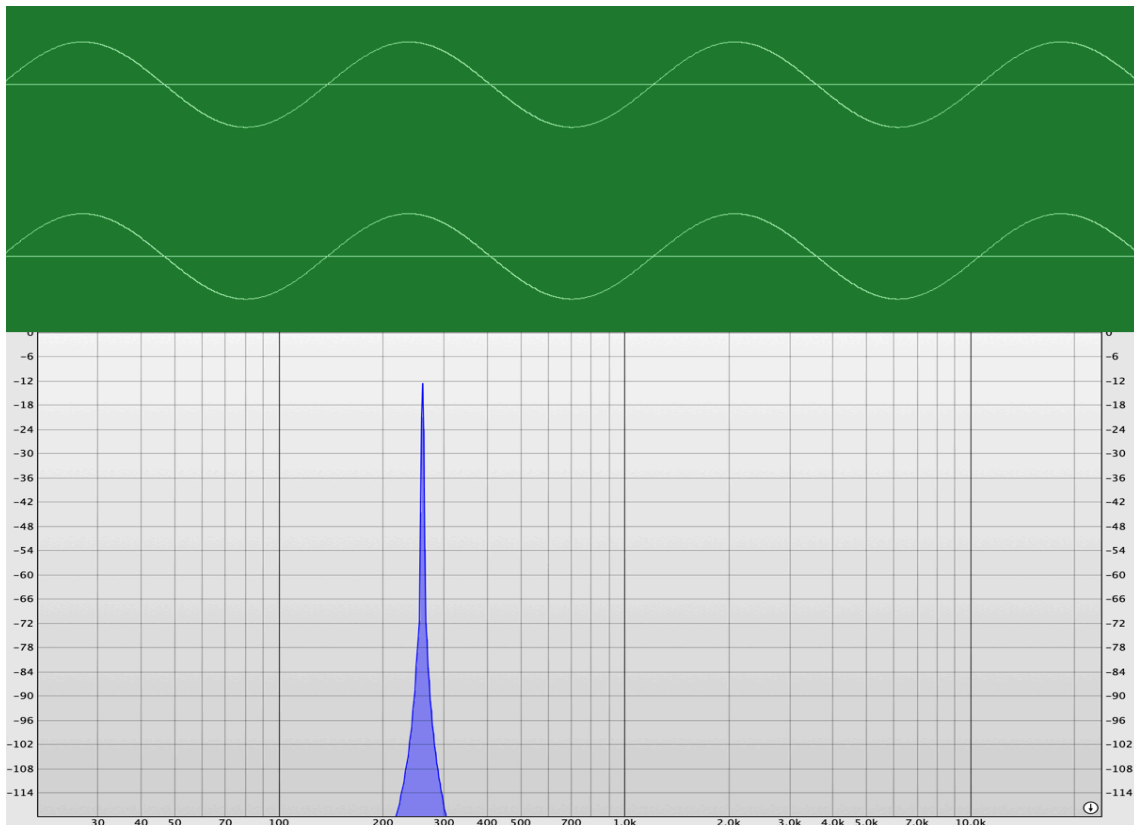


Abbildung 9: Darstellung Sinuswelle: Zeitlicher Wellenverlauf (oben), Spektraldarstellung (unten)

Sägezahnwelle

Einen kräftig hellen Klang hat die Sägezahnwelle (Klangbeispiel Nr. 3) und erinnert an den Klang einer Trompete. Neben der Grundfrequenz sind alle geradzahigen und ungeradzahigen Obertonfrequenzen vorhanden. Ihre Amplitude ist proportional abfallend, wie die Abbildung der Spektraldarstellung (Abbildung 10) verdeutlicht. Eine Besonderheit ist, dass die Sägezahnwelle in zwei Formen auftreten kann: erstens ist die Kurve aufsteigend oder zweitens ist die Kurve abfallend. Für den Hörer macht dies kaum einen Unterschied, jedoch bilden sie zwei unterschiedliche Effekte bei der Verwendung als Niederfrequenzoszillator.

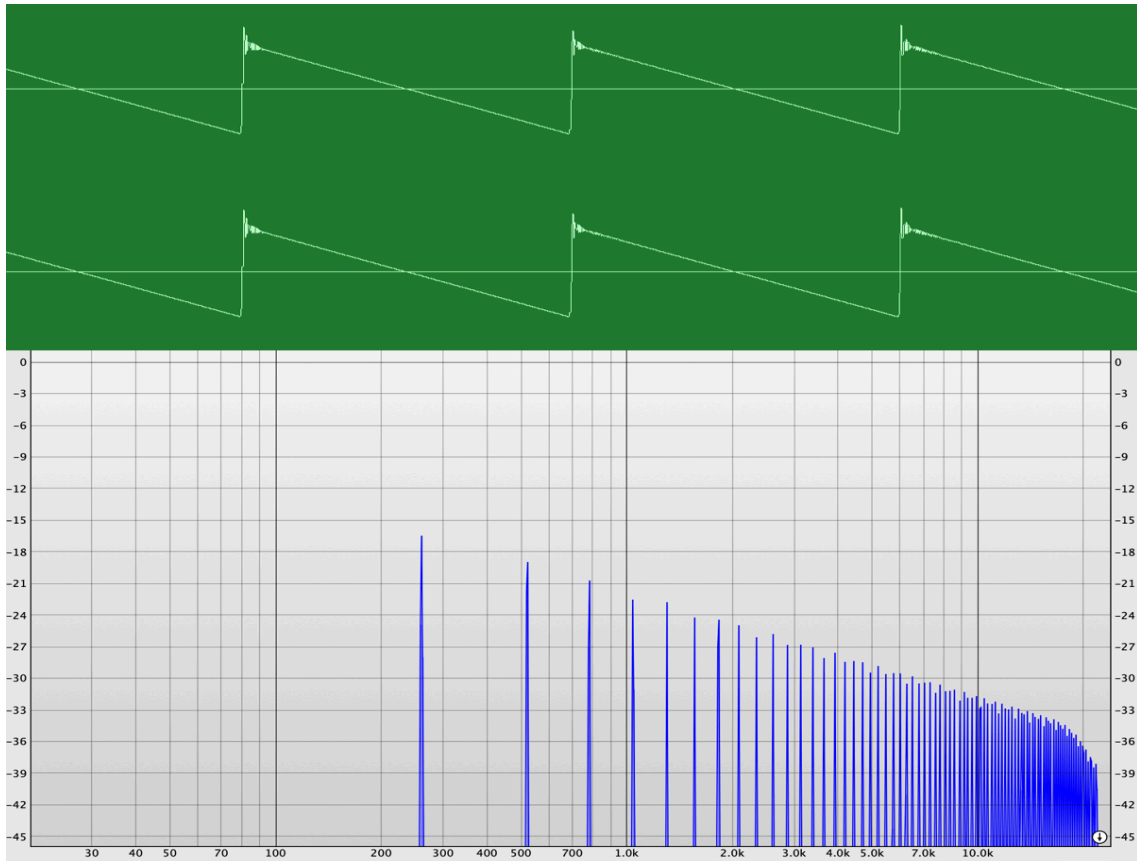


Abbildung 10: Darstellung Sägezahnwelle: Zeitlicher Wellenverlauf (oben), Spektraldarstellung (unten)

Dreieckwelle

Die Dreieckwelle (Klangbeispiel Nr. 4) hat neben ihrer Grundfrequenz nur ungeradzahlige Teiltöne. Ihre Amplituden fallen dabei proportional zum Quadrat ab (Abbildung 11 stellt dies im Spektrum dar). Dadurch klingt sie weniger hell als Sägezahn- und Rechteckwelle und besitzt einen weicheren Klang, ähnlich der Sinuswelle. Sie eignet sich besonders für die Synthese von Flötenklängen.

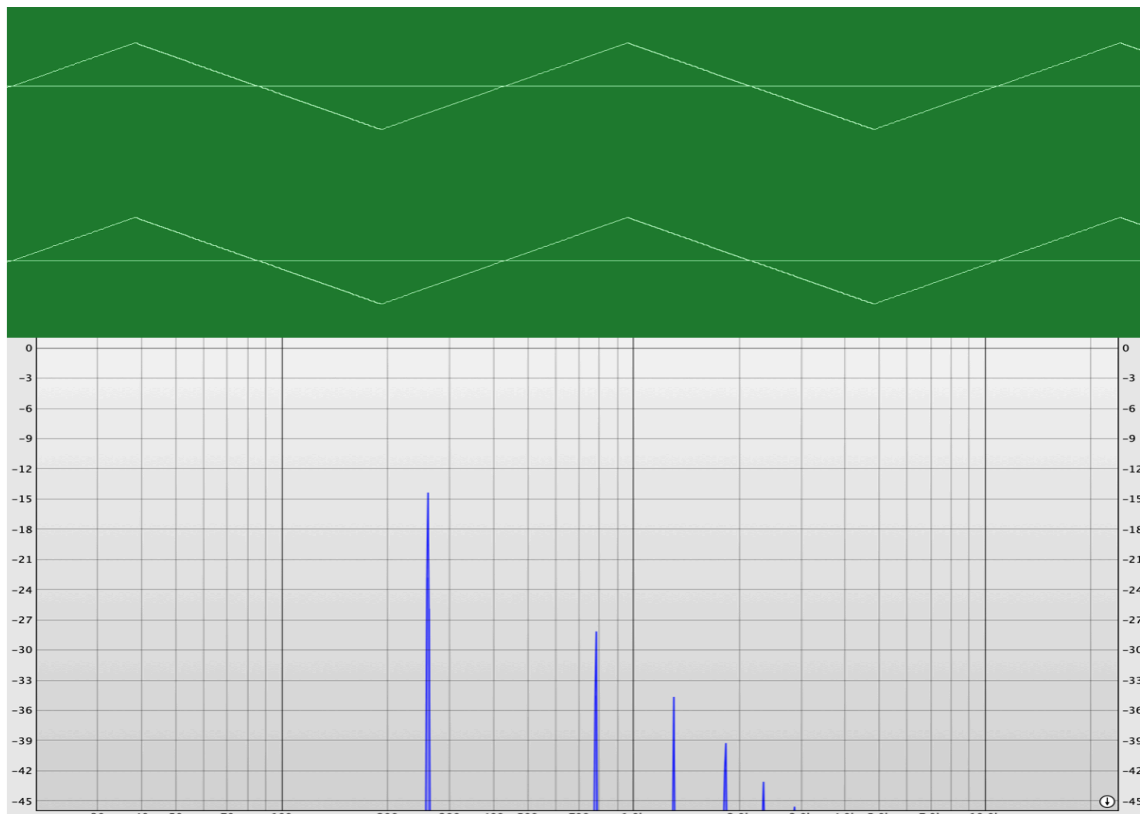


Abbildung 11: Darstellung Dreieckswelle: Zeitlicher Wellenverlauf (oben), Spektraldarstellung (unten)

Rechteckwelle und Pulsweite

Neben der Sägezahnwelle ist die Rechteckwelle (Klangbeispiel Nr. 5) eine der sehr obertonreichen Oszillatorschwingung. Auch sie setzt sich aus dem Grundton und den ungeradzahligen Obertonfrequenzen zusammen, deren Amplituden proportional abfallen. Dies geschieht jedoch nicht so stark wie bei der Sägezahnschwingung, weswegen sie hohler und metallisch klingt. Die sogenannte Pulsweite ist eine Form der Rechteckwelle, bei der das Verhältnis von Impuls und Impulspause der Welle verändert wird. Die Pulsweite (engl. Pulse Width) beschreibt diese Längenveränderung der einzelnen Schwingungsphasen.^{23 24}

²³ Vgl. Anwander, *Synthesizer. So funktioniert elektronische Klangerzeugung*, S. 53f.

²⁴ Vgl. Stange-Elbe, *Computer und Musik Grundlagen, Technologien und Produktionsumgebungen der digitalen Musik*, S. 198f.

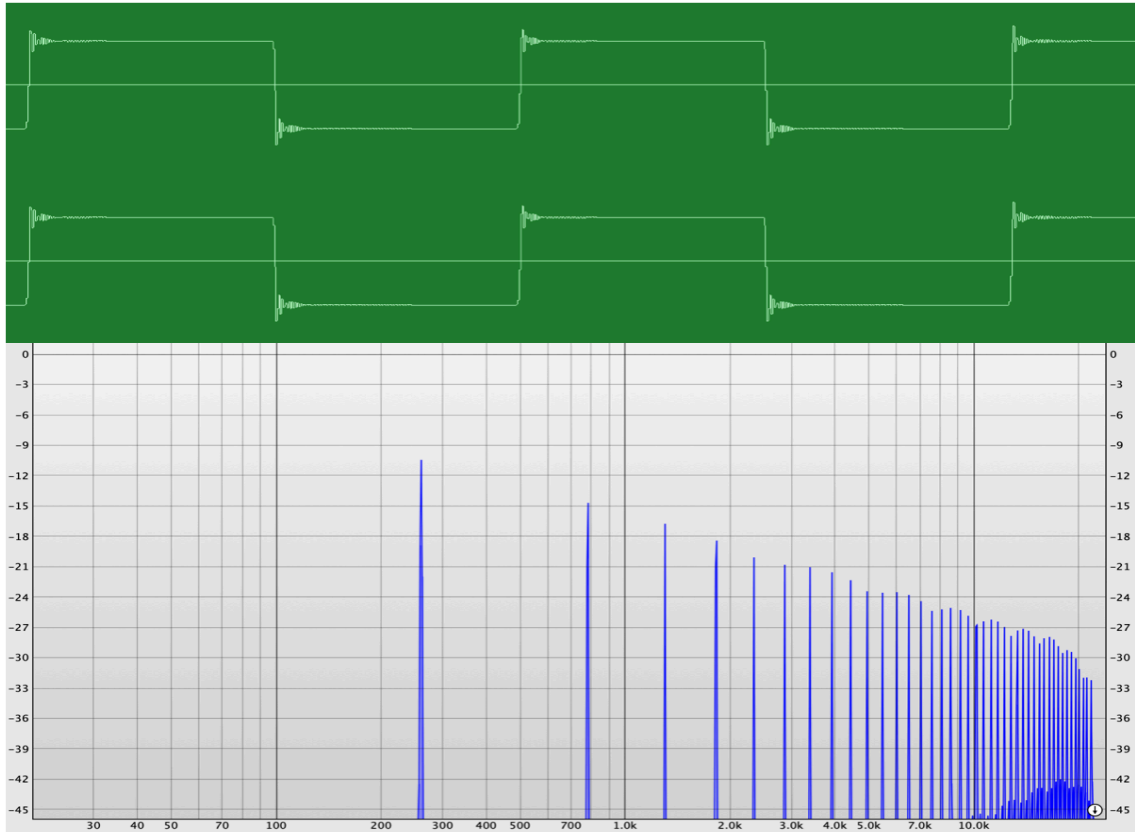


Abbildung 12: Darstellung Rechteckwelle: Zeitlicher Wellenverlauf oben, Spektraldarstellung unten

In den Klangbeispielen Nr. 2 bis Nr. 5 wird eine einfache Melodie mit den unterschiedlichen Wellenformen abgespielt, wodurch deren klangliche Unterschiede deutlich wahrnehmbar sind.

3.2.4 Rauschgenerator

Für die Synthese von unharmonisch, perkussiv klingenden Instrumenten wird unter anderem ein Rauschgenerator (engl. Noise Generator) benutzt. Mit ihm ist es möglich, beispielsweise den Einfluss des Teppichs unten an einer Snare oder zischende Beckenklänge nachzustellen. In der Spektraldarstellung (Abbildung 13) ist zu erkennen, dass alle nebeneinander liegenden Frequenzen des ganzen Frequenzspektrums oder eines Frequenzbandes, auftreten. Für die Klangsynthese in Synthesizern sind das Weiße und das Rosa Rauschen die Wichtigsten.

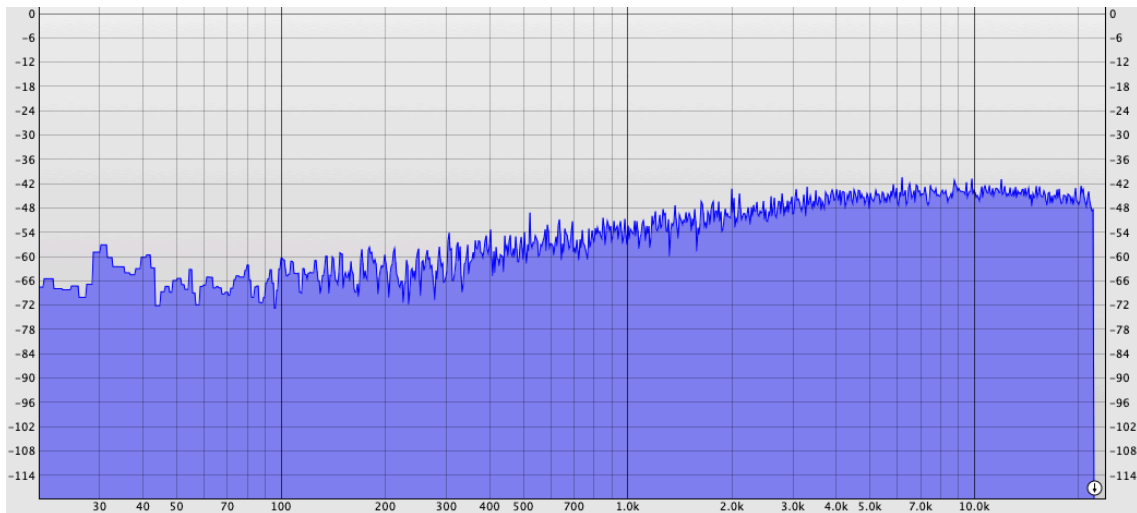


Abbildung 13: Spektraldarstellung Weißes Rauschen

Weißes Rauschen

Das Weiße Rauschen (in Klangbeispiel Nr. 6 zu hören) ist, wie alle anderen Rauschformen, ein aperiodisches Signal. Darin sind alle Frequenzen des gesamten Frequenzspektrums enthalten. Ihre Amplituden sind alle gleich.

Rosa Rauschen

Einen dumpferen Klang hat das Rosa Rauschen. Das liegt daran, dass hier ein Amplitudenabfall von 3dB pro Oktave vorliegt. Also sind die hohen Frequenzen weniger stark als die tiefen.²⁵ Umgekehrt funktioniert Blaues Rauschen: Hierbei wird die Amplitude der Frequenzen pro Oktave um 3dB erhöht, wodurch ein schriller Klang entsteht. Für die Klangsynthese wird das Blaue Rauschen jedoch kaum verwendet.

3.2.5 Filter

Wie bereits erörtert, ist das Filter (engl. Voltage-Controlled-Filter, kurz VCF) ein weiteres sehr wichtiges Element der Klangsynthese. Es wird dafür verwendet, aus obertonreichen Klängen bestimmte Frequenzanteile zu dämpfen oder auszulöschen. Unterschieden wird zwischen den vier Varianten, Tiefpass-, Hochpass-, Bandpass- und Bandsperrefilter.

²⁵ Vgl. Ackermann, *Computer und Musik: eine Einführung in die digitale Klangsynthese und Musikverarbeitung*, S.28.

Tiefpass

Unumgänglich für die subtraktive Klangsynthese ist der Tiefpass (Klangbeispiel Nr. 7). Seine analoge Schaltung besteht aus der Parallelschaltung eines Kondensators (Kapazität C) mit einem Widerstand R (Abbildung 14).

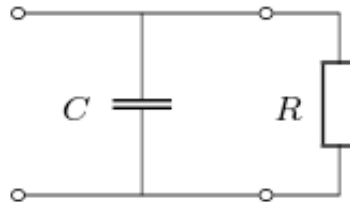


Abbildung 14: Grundsaltung Tiefpass²⁶

Die Frequenz, ab der die gewünschte Dämpfung der Obertöne anfängt, wird Grenzfrequenz f_g (engl. Cutoff) genannt. Sie ist definiert, als die Frequenz, bei der die Dämpfung 3dB beträgt. In analogen Synthesizer lässt sie sich mithilfe der Spannung als Parameter einstellen.²⁷ Demnach werden bei Tiefpassfiltern die Frequenzen oberhalb der Grenzfrequenz gedämpft, wie in Abbildung 15 zu sehen ist. Die zwei Bereiche unter und über der Grenzfrequenz heißen Durchlassbereich für die nicht gedämpften, sowie Sperrbereich für die gedämpften Frequenzen.

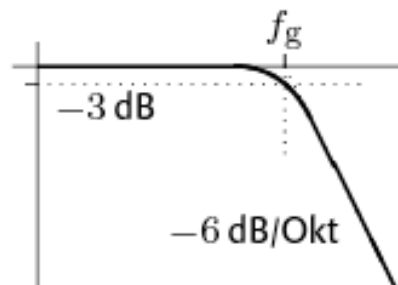


Abbildung 15: Frequenzgang Tiefpass 1. Ordnung²⁸

²⁶ Dörne, S. 154. Dörne, *Tontechnik Hören, Schallwandler, Impulsantwort und Faltung, digitale Signale, Mehrkanaltechnik, tontechnische Praxis*, S. 154.

²⁷ Vgl. Dickreiter u. a., *Handbuch der Tonstudioteknik*, S. 340.

²⁸ Dörne, *Tontechnik Hören, Schallwandler, Impulsantwort und Faltung, digitale Signale, Mehrkanaltechnik, tontechnische Praxis*, S. 154.

Hochpass

Umgekehrt, als der Tiefpass, funktioniert der Hochpass (Klangbeispiel Nr. 8).

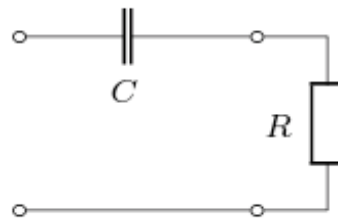


Abbildung 16: Grundschtaltung Hochpass²⁹

Die Schaltung des Hochpassfilters (Abbildung 16) unterscheidet sich insofern von der Tiefpassschaltung, dass der Kondensator und Widerstand nicht mehr parallel, sondern in Reihe geschaltet sind. Es werden nicht die Frequenzen oberhalb des Cutoffs, sondern die tieferen Frequenzen gedämpft und die hohen lässt er passieren. Anwendung findet der Hochpass beispielsweise in der Gestaltung des Gesamtklangbildes von mehreren Signalen, mit sich überlagernden tiefen Frequenzen. Indem einige durch das Filtern gedämpft werden, entsteht ein klareres Klangbild. Im Frequenzgang ist die spiegelsymmetrische Charakteristik zum Tiefpass zu erkennen (Abbildung 17).

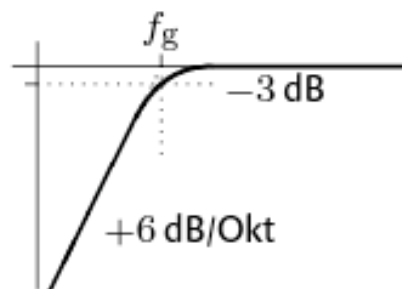


Abbildung 17: Frequenzgang Hochpass 1. Ordnung³⁰

Bandpass und Bandsperre

Die Kombination aus Tief- und Hochpassfilter ist der Bandpassfilter. Er lässt nur ein bestimmtes Frequenzband um die eingestellte Mittenfrequenz f_0 passieren. Die anderen Frequenzanteile darüber und darunter werden gedämpft. Die Mittenfrequenz wird

²⁹ Dörne, S. 154.

³⁰ Dörne, S. 154.

als die mittlere Frequenz zwischen der oberen und unteren Grenzfrequenz definiert. Für die technische Realisierung werden auch die Schaltungen von Hoch- und Tiefpass kombiniert (Abbildung 18). Sie ist die sogenannte Wien-Brücke.³¹

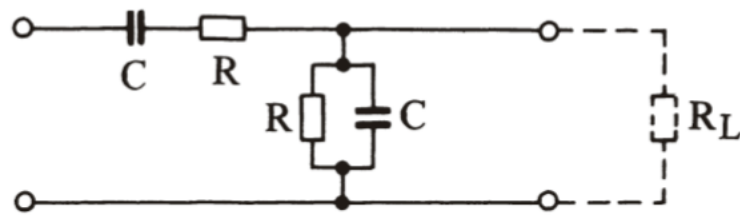


Abbildung 18: Grundsaltung Bandpass ($R_L = \text{Lastwiderstand}$)³²

Auch zum Bandpass-Filtertyp existiert eine umgekehrte Form, die Bandsperre (engl. Notch Filter). Mit ihr ist es möglich, ein bestimmtes Frequenzband um die eben erwähnte Mittenfrequenz zu minimieren und außerhalb liegenden Bereiche passieren zu lassen. In Abbildung 19 lässt sich die gegenteilige Funktionsweise von Bandpass und Bandsperre feststellen.

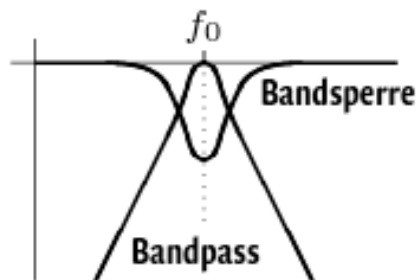


Abbildung 19: Frequenzgänge Bandpass und Bandsperre³³

Die Klangbeispiele Nr. 7 bis Nr. 10 verdeutlichen die Wirkungen der Filter. Hierbei werden sie auf eine im Synthesizer generierte Melodie angewendet, wobei die Grenzfrequenzen im Laufe der Aufnahme verändert werden.

³¹ Vgl. Dickreiter u. a., *Handbuch der Tonstudioteknik*, S. 341.

³² Dickreiter u. a., S. 341.

³³ Dörne, *Tontechnik Hören, Schallwandler, Impulsantwort und Faltung, digitale Signale, Mehrkanaltechnik, ton-technische Praxis*, S. 155.

Flankensteilheit und Resonanz

Beschäftigt man sich intensiv mit dem Thema der Filter, wird man nicht umhinkommen, von Filtern erster Ordnung und zweiter Ordnung in Fachbüchern zu lesen. Diese Ordnungen beziehen sich dabei auf die eingestellte „Stärke“ des Filters. Sie lassen sich über die Steilheit ihres Kurvenverlaufs festlegen. Von einem Filter erster Ordnung ist die Rede, wenn das Eingangssignal im Sperrbereich um 6dB pro Oktave gedämpft wird. Auch seine Flankensteilheit beträgt somit 6dB/Oktave. Bei einem Filter zweiter Ordnung beträgt die Flankensteilheit 12dB/Oktave.³⁴ Es lässt sich folgende allgemeine Formel für die Flankensteilheit von Filtern ableiten:

$$(13) \text{ Flankensteilheit} = \text{Filterordnung} \times 6 \frac{\text{dB}}{\text{Oktave}}$$

Um den Frequenzbereich der Grenzfrequenz zu betonen, gibt es bei den meisten Synthesizern einen extra steuerbaren Parameter. Dieser heißt Resonanz und ist dafür zuständig, das Ausgangssignal invertiert dem Eingangssignal beizumischen. Dadurch wird das Frequenzband um die Grenzfrequenz erhöht und der gewünschte Betonungseffekt erzeugt. Bei überhöhter Resonanz fängt die Filterschaltung selbst an zu schwingen und bildet einen eigenen Sinuston.³⁵

3.2.6 Verstärker

Aufgrund der Frequenzdämpfung ist das Ausgangssignal des Filters leiser als das Eingangssignal. Um diesem Lautstärkeproblem entgegen zu wirken, wird ein Verstärker (engl. Voltage-Controlled-Amplifier, kurz VCA) zwischengeschaltet. Seine einzige Aufgabe besteht darin, die Amplituden eines Audiosignals um einen Betrag proportional zur Steuerspannung zu erhöhen und abzusenken.³⁶

3.2.7 Hüllkurvengenerator

Wie bereits erklärt, entsteht per Tastendruck der Klaviatur ein Gatesignal. Dieses kann für die Steuerung des Hüllkurvengenerators (engl. Envelope Generator, kurz EG) genutzt werden. Er ermöglicht es, einen durch vier Parameter veränderbaren Span-

³⁴ Vgl. Dörne, S. 154.

³⁵ Vgl. Anwander, *Synthesizer. So funktioniert elektronische Klangerzeugung*, S. 63.

³⁶ Vgl. Stange-Elbe, *Computer und Musik Grundlagen, Technologien und Produktionsumgebungen der digitalen Musik*, S. 193.

nungsverlauf zu erzeugen. Die Parameter hierbei sind Attack, Decay, Sustain und Release, weswegen auch von der Bezeichnung der ADSR-Hüllkurven die Rede ist. Der EG kann beispielsweise zur Steuerung der Lautstärke eingesetzt werden.

Attack

Der erste Parameter ist die Attack-Time. Sie beschreibt die Zeit, in der das Signal nach dem Tastendruck auf ihre maximale Amplitude ansteigt. Ist eine sehr kurze Zeit eingestellt, so erklingt der Ton unmittelbar nach Anschlag der Taste in vollem Maße. Wird eine lange Zeit gewählt, schwillt der Ton langsam zu seiner maximalen Lautstärke an.

Decay

Die Decay-Time lässt einen Ton, je nach Einstellung, mehr oder weniger schnell auf das Sustainlevel abfallen. Dies geschieht direkt nachdem er die maximale Amplitude erreicht hat.

Sustain

Der Sustainlevel ist der einzige der vier Parameter, der keine zeitliche Dauer beeinflusst. Er gibt an, auf welchen Wert die Amplitude des Signals bei gedrückt gehaltener Taste und nach Ablauf der Decay-Dauer sinkt. Bei maximal eingestelltem Wert des Sustain, wird die Decay-Wirkung nichtig, da der Sustainlevel dem Amplitudenmaximum des Signals entspricht. Man spricht hierbei von einer AR-Hüllkurve, die über den gesamten Verlauf nur durch Attack und Release beschrieben wird.³⁷

Release

Den letzten einstellbaren Parameter der ADSR-Hüllkurve bildet die Release-Time. Durch sie klingt ein Ton nach dem Loslassen der Taste in einer bestimmten Zeit aus. Ist keine oder eine sehr kurze Release-Dauer vorhanden endet der Ton abrupt mit dem Ende des Gatesignals.³⁸

³⁷ Vgl. Raffaseder, *Audiodesign [Kommunikationskette, Schall, Klangsynthese, Effektbearbeitung, akustische Gestaltung]*, S. 232.

³⁸ Vgl. Ackermann, *Computer und Musik: eine Einführung in die digitale Klangsynthese und Musikverarbeitung*, S. 31.

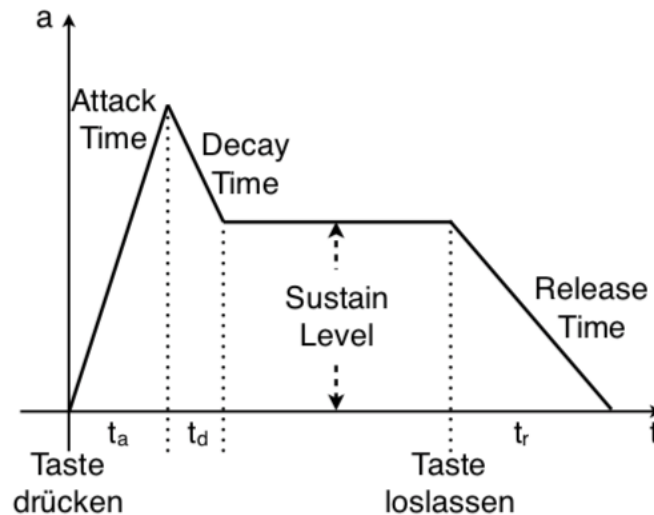


Abbildung 20: Amplitudenverlauf einer ADSR-Hüllkurve³⁹

Der Hüllkurvengenerator spielt eine große Rolle für den Eindruck von Klängen. Mit ihm lassen sich bestimmte Klangcharakteristiken von akustischen Instrumenten nachbilden. Perkussive Instrumente können mittels kurzer Attack-Time und ohne Sustain erstellt werden, wofür sich eine sogenannte AD-Hüllkurve eignet, die ausschließlich über die Attack- und Decay-Time eingestellt wird. Andererseits besitzt ein gestrichener Geigenklang einen längeren Attack und durch ständige Energiezufuhr kann der Sustain beliebig lange gehalten werden. Erst wenn die Geige nicht mehr gespielt wird setzt der Release ein und der Ton klingt aus.⁴⁰

Nicht nur für die Lautstärkeregelung über den VCA kann eine Hüllkurve eingesetzt werden. Auch in der Tonhöhensteuerung oder um den Verlauf des Filters zu beeinflussen findet sie Verwendung. In modernen Softwaresynthesizern sind der kreativen Nutzung von Hüllkurven kaum Grenzen gesetzt. Hier lassen sich nahezu alle Parameter mit ihnen steuern.

In manchen elektronischen Instrumenten sind auch mehrstufige Hüllkurven vertreten, die es ermöglichen beliebige Parameter in Level und Time einzustellen.⁴¹

³⁹ Stange-Elbe, *Computer und Musik Grundlagen, Technologien und Produktionsumgebungen der digitalen Musik*, S. 194.

⁴⁰ Vgl. Stange-Elbe, *Computer und Musik Grundlagen, Technologien und Produktionsumgebungen der digitalen Musik*, S. 193f.

⁴¹ Vgl. Raffaseder, *Audiodesign [Kommunikationskette, Schall, Klangsynthese, Effektbearbeitung, akustische Gestaltung]*, S. 233.

3.2.8 Niederfrequenzoszillator

Eine besondere Form eines Oszillators ist der Niederfrequenzoszillator (engl. Low Frequency Oscillator, kurz LFO). Dieser unterscheidet sich von der bereits erklärten Oszillatorart, da er keine Töne im menschlichen Hörbereich wiedergibt, sondern im Bereich von 0 Hertz bis 20 Hertz arbeitet. Er wird verwendet, um klangbestimmende Parameter kontinuierlich zu manipulieren. Wird er beispielsweise, ähnlich wie eine Hüllkurve, auf den Eingang eines VCA geschaltet, ergeben sich konstant fortlaufende Lautstärke-schwankungen. Die Amplitude des LFO gibt die Spanne an, wie stark der Parameter um seinen Mittelwert schwankt. Die Frequenz bestimmt, wie viele Schwankungen pro Sekunde durchgeführt werden. Auch Niederfrequenzoszillatoren können mit verschiedenen Wellenformen benutzt werden. Zu den bereits bekannten Sinus-, Sägezahn-, Dreieck- und Rechteckwellen ist in vielen Synthesizern auch eine sog. Randomwelle (engl. random = zufällig) einstellbar. Sie bewirkt eine zufällige Abfolge von Amplitudenwerten und ermöglicht so das Erstellen von komplexeren Klangfolgen. In modularen analogen Synthesizern wird hierfür das Ausgangssignal eines Rauschgenerators an den Eingang eines sogenannten Sample & Hold-Moduls geschaltet, das zu definierbaren Zeitpunkten eine Probe aus dem zufälligen Rauschsignal entnimmt und diesen Amplitudenwert bis zur nächsten Probeentnahme ausgibt.

Wie auch der EG lässt sich der LFO auf unterschiedliche Parameter der Klanggestaltung anwenden. Wird er für die Manipulation der Tonhöhe eingesetzt, hat dies aus der Musik bekannte Effekte zur Folge. Eine Sinuswelle mit kleiner Amplitude bewirkt einen Vibrato-Effekt, wobei eine gleich verwendete Rechteckwelle zu einem Triller-Effekt führt. Auch ein Tremolo lässt sich mit einem LFO erstellen. Hierbei wird von einer Sinusschwingung auf den VCA Gebrauch gemacht.⁴²

⁴² Vgl. Raffaseder, S. 233.

4 Klangsyntheseverfahren

Für die elektronische Klangsynthese wurden mit der Zeit immer mehr Verfahren entwickelt, die unterschiedliche Herangehensweisen aufzeigen. Dieses Kapitel befasst sich mit den einzelnen Klangsyntheseverfahren und erläutert ihren Aufbau, sowie deren Funktionsweisen.

Allgemein lassen sich Synthesizer anhand ihrer Syntheseverfahren in zwei Kategorien unterteilen, nämlich in die analogen und die digitalen Synthesizer. Sie haben ihren Namen durch die entweder analogen oder digitalen Verfahren auf denen ihre Klangerstellung beruht. Zusätzlich ist in modernen Synthesizern häufig die Rede von hybriden Synthesizern. Sie bestehen aus einer Kombination der beiden Verfahrenskategorien.⁴³

4.1 Analoge Klangsynthese

Die analogen Klangsyntheseverfahren lassen sich erneut in die zwei Kategorien der linearen und nichtlinearen Verfahren unterteilen. Während bei der linearen Klangsynthese im Klangspektrum ausschließlich die Teiltöne, die hinzugefügt wurden auftreten werden bei der nichtlinearen Synthese auch neue Teiltöne gewonnen.

4.1.1 Lineare Klangsyntheseverfahren

Zu der Klasse der linearen Klangsyntheseverfahren gehören die bereits angesprochene subtraktive und die additive Synthese.

Additive Klangsynthese

Die additive Klangsynthese beruht auf dem Prinzip nach Joseph Fourier, dass sich alle Klänge in einzelne Sinusschwingungen zerlegen lassen und somit jeder Klang aus der Überlagerung von reinen Sinusschwingungen besteht. Für dieses Klangsyntheseverfahren wurde seine Erkenntnis in der Praxis angewendet.

⁴³ Vgl. Ackermann, *Computer und Musik: eine Einführung in die digitale Klangsynthese und Musikverarbeitung*, S. 27.

Für die Generierung des gewünschten Klangs werden mehrere Oszillatoren kombiniert. Sie haben die Aufgabe, einzelne Sinusschwingungen auszugeben, um so den gewünschten Ergebnisklang zu erzeugen.

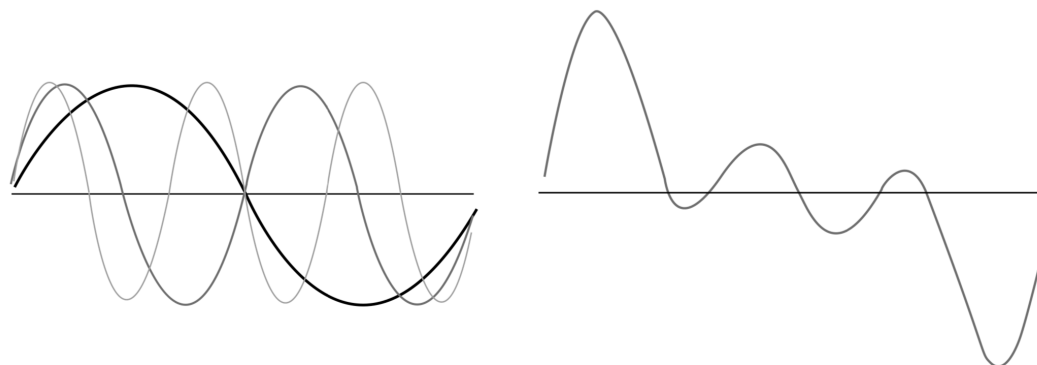


Abbildung 21: Additive Klangsynthese - links: Ausgangssinusschwingungen, rechts: Ergebniswellenform⁴⁴

Wichtig dabei ist, dass jede der Sinusschwingungen einer individuellen Frequenz zugeordnet wird. Diese bilden die Partialtöne des Ergebnisklangs.⁴⁵ Wie bereits erwähnt, bildet auch hier die Schwingung mit der niedrigsten Frequenz den Grundton und die anderen die Obertöne. Sind sie ganzzahlige Vielfache von der Grundfrequenz, ergibt das einen harmonischen Klang, werden Frequenzen in anderem Verhältnis gewählt, wird der Klang unharmonisch. Die Amplituden der Schwingungen bestimmen die Klangfarbe. Außerdem ist es von Vorteil die Tonhöhen- und Lautstärkeparameter (Frequenz und Amplitude) mit Verwendung von Hüllkurven dynamisch zu steuern. So können interessante dynamische Charakteristiken der Klänge über den zeitlichen Verlauf der Welle geschaffen werden. Werden keine Hüllkurven verwendet, bleibt der Klang starr und konstant.⁴⁶

⁴⁴ Stange-Elbe, *Computer und Musik Grundlagen, Technologien und Produktionsumgebungen der digitalen Musik*, S. 199.

⁴⁵ Vgl. Raffaseder, *Audiodesign [Kommunikationskette, Schall, Klangsynthese, Effektbearbeitung, akustische Gestaltung]*, S. 234.

⁴⁶ Vgl. Ackermann, *Computer und Musik: eine Einführung in die digitale Klangsynthese und Musikverarbeitung*, S. 104ff.

Subtraktive Klangsynthese

Die subtraktive Synthese ist die bisweilen am weitesten verbreitete Syntheseart.⁴⁷ Sie lässt sich mit der Grundschaltung der modularen Synthesizer in Abbildung 7 erklären. Die Basis der Klangerzeugung wird durch das vom VCO ausgegebene Signal generiert. Dabei ist darauf zu achten, eine möglichst obertonreiche Wellenform zu wählen. Hierfür eignen sich die bereits bekannten Dreieck-, Rechteck-, Sägezahn- und Pulswellen. Deshalb stehen diese in den meisten Synthesizern, die auf der subtraktiven Synthese beruhen, zur Verfügung.⁴⁸ Eine Sinusschwingung ist ungeeignet, da sie keine Obertöne besitzt. Um gewünschte Effekte, wie beispielsweise eine Schwebung (mehr dazu in Kapitel 2.1.2 Überlagerung von Schwingungen), zu erzeugen, bieten viele Synthesizer mehr als einen Oszillator zur Generierung von Klängen an.

Im nächsten Schritt wird ein Filter an den Ausgang des Oszillators geschaltet, welcher Obertonanteile des Signals herausfiltert. Er ist der wichtigste Bestandteil des Syntheseverfahrens, da er Frequenzanteile subtrahiert und somit das Klangspektrum ändert. Durch diese Funktion erhielt das Verfahren den Namen der subtraktiven Klangsynthese. Es kann zwischen allen in Kapitel 3.2.5 aufgeführten Filtertypen gewählt werden.⁴⁹

Da bei der Filterung ausschließlich Minderungen oder Auslöschungen der Frequenzanteile stattfinden, ist der Klang nach dem Filtern leiser als zuvor. Um dem entgegenzuwirken, wird ein VCA eingesetzt. Er ermöglicht eine Verstärkung des Signals auf die gewünschte Lautstärke. Um dem Klang, beispielsweise bei einem Tastendruck der Klaviatur, einen dynamischen zeitlichen Verlauf zu verleihen, wird der VCA meist über Hüllkurven gesteuert.

Die Grundstruktur der subtraktiven Klangsynthese kann durch zusätzliche Oszillatoren, Filter, Hüllkurven, und LFO's erweitert werden, um zusätzliche, kreative Möglichkeiten durch unterschiedliche Bearbeitung der Parameter zu erhalten.⁵⁰

⁴⁷ Vgl. Anwander, *Synthesizer. So funktioniert elektronische Klangerzeugung*, S. 128.

⁴⁸ Vgl. Raffaseder, *Audiodesign [Kommunikationskette, Schall, Klangsynthese, Effektbearbeitung, akustische Gestaltung]*, S. 234f.

⁴⁹ Vgl. Stange-Elbe, *Computer und Musik Grundlagen, Technologien und Produktionsumgebungen der digitalen Musik*, S. 200.

⁵⁰ Vgl. Raffaseder, *Audiodesign [Kommunikationskette, Schall, Klangsynthese, Effektbearbeitung, akustische Gestaltung]*, 235.

Zur Veranschaulichung der subtraktiven Klangsynthese bieten sich die Klangbeispiele Nr. 7 bis Nr. 10, die zur Darstellung der Filtertypen verwendet wurden, an. Sie wurden mithilfe dieses Verfahrens erstellt.

4.1.2 Nichtlineare Klangsyntheseverfahren

Bereits in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden die Amplituden- und die Frequenzmodulation für die drahtlose Übertragung von Nachrichten entwickelt.⁵¹ Später erweiterte sich ihr Verwendungsbereich auch auf die elektronische Klanggestaltung. Sie gehören zur Gruppe der nichtlinearen Klangsyntheseverfahren. Bei Modulationen wird ein Trägersignal (engl. Carrier) durch ein Modulationssignal (engl. Modulator) verändert, was eine zeitliche Parameterveränderung des Trägersignals, entsprechend dem Verlauf des Modulationssignals, bewirkt.⁵² Dies kann sich entweder auf dessen Amplitudenverlauf (Amplitudenmodulation) oder auf die Frequenz (Frequenzmodulation) beziehen. Bei nichtlinearen Klangsyntheseverfahren können neben den ursprünglich verwendeten Frequenzen des Trägers- und Modulationssignals, weitere Frequenzen im Spektrum entstehen.

AM-Synthese und Ringmodulation

Im Bezug auf den LFO wurde bereits von einem resultierenden Tremolo-Effekt gesprochen, wenn er auf den VCA einwirkt. Wird die Frequenz des LFO dabei in den menschlichen Hörbereich angehoben, entsteht eine Amplitudenmodulation (AM) und mit ihr eine neue Schwingungsform.

⁵¹ Vgl. Werner, *Nachrichtentechnik Eine Einführung für alle Studiengänge*, S. 115, S. 123.

⁵² Vgl. Ackermann, *Computer und Musik : eine Einführung in die digitale Klangsynthese und Musikverarbeitung*, S. 33.

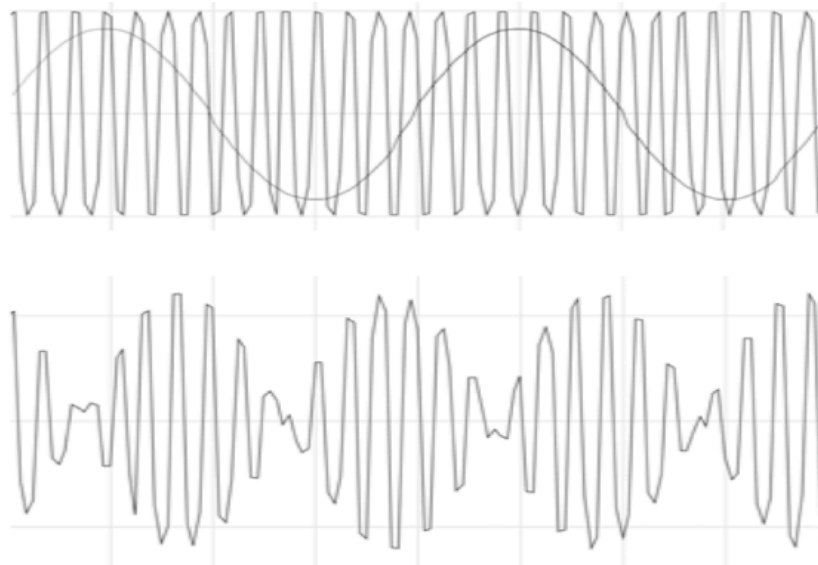


Abbildung 22: Amplitudenmodulation: zwei Ausgangsschwingungen (oben) und die resultierende amplitudenmodulierte Schwingung (unten)⁵³

Die Amplitudenmodulation wird als eine Multiplikation der Trägerschwingung y_c mit der Modulationsschwingung y_m definiert:

Carrier:
$$(14) y_c = a_c \sin 2\pi f_c t$$

Modulator:
$$(15) y_m = a_0 + a_m \sin 2\pi f_m t$$

Amplitudenmodulation:
$$(16) y(t) = y_m y_c = (a_0 + a_m \sin 2\pi f_m t) a_c \sin 2\pi f_c t$$

Diese Multiplikation wird beispielsweise mit einer Ringmodulation, aus vier in Ringform hintereinander geschalteten Dioden, realisiert.⁵⁴ Ihre Klangcharakteristiken lassen sich als metallisch und glockenartig beschreiben.

Wird eine Ringmodulation mit zwei Sinusschwingungen unterschiedlicher Frequenzen $f_1 = 500$ Hz und $f_2 = 300$ Hz erstellt, besteht das Klangspektrum des resultierenden Signals aus zwei neuen Frequenzen. Die Ringmodulation führt eine Addition, sowie eine Subtraktion der beiden Frequenzen durch, womit sich die neuen Frequenzen 800

⁵³ Stange-Elbe, *Computer und Musik Grundlagen, Technologien und Produktionsumgebungen der digitalen Musik*, S. 205.

⁵⁴ Vgl. Dörne, *Tontechnik Hören, Schallwandler, Impulsantwort und Faltung, digitale Signale, Mehrkanaltechnik, tontechnische Praxis*, S.191.

Hz ($= f_1 + f_2$) und 300 Hz ($= f_1 - f_2$) ergeben. Die initialen Frequenzen werden dabei unterdrückt und unhörbar.

Tauscht man die Sinusschwingung des Trägersignals mit einer obertonreicheren Schwingung, werden die Additionen und Subtraktionen aller Partialtöne des Trägersignals mit der Frequenz des sinusförmigen Modulationssignals durchgeführt. Hierbei werden meist unharmonische Frequenzverhältnisse gewonnen. Verwendet man obertonreiche Schwingungen für das Träger- und das Modulationssignal, ergeben sich noch komplexere Klangspektren.⁵⁵

Ein beispielhafter Synthesizer, der die Ringmodulation nutzt, ist der ARP 2500 von Alan R. Pearlman.⁵⁶

FM-Synthese

Die Veränderung der Frequenz eines Trägersignals mithilfe eines Modulationssignals wird Frequenzmodulation (FM) genannt. Dabei erhöhen positive Werte des Modulationssignals die Frequenz des Trägers und negative verringern sie. Der Wert des Modulatorsignals entscheidet somit über die Stärke der Abweichung.⁵⁷

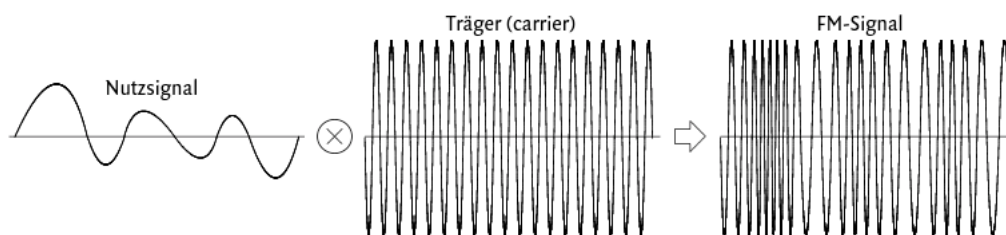


Abbildung 23: Darstellung einer Frequenzmodulation⁵⁸

Musikalische Klänge mit der Frequenzmodulation zu erstellen ist auf John Chowning zurückzuführen, der anfangs der 1970er Jahre die zunächst für die Übertragung von Nachrichten verwendete Methode zum Klangsyntheseverfahren weiterentwickelte.

⁵⁵ Vgl. Ackermann, *Computer und Musik: eine Einführung in die digitale Klangsynthese und Musikverarbeitung*, S. 33f.

⁵⁶ Vgl. Dörne, *Tontechnik Hören, Schallwandler, Impulsantwort und Faltung, digitale Signale, Mehrkanaltechnik, tontechnische Praxis*, S. 239.

⁵⁷ Vgl. Stange-Elbe, *Computer und Musik Grundlagen, Technologien und Produktionsumgebungen der digitalen Musik*, S. 207.

⁵⁸ Dörne, S. 193. Dörne, *Tontechnik Hören, Schallwandler, Impulsantwort und Faltung, digitale Signale, Mehrkanaltechnik, tontechnische Praxis*, S. 193.

Hierbei werden als Träger und Modulator sinusförmige Schwingungen gewählt, deren Frequenzen gleich sind oder nahe aneinander liegen und sich im hörbaren Frequenzbereich des menschlichen Gehörs befinden.⁵⁹ Ist die Modulationsfrequenz unterhalb von 20 Hz, entsteht ein Vibrato-Effekt.

Die Berechnung des resultierenden Signals ist die Addition des Modulationssignals zur Frequenz eines harmonischen Trägers:

$$(17) y_{FM} = A \cdot \sin(2\pi f_c t + I \cdot \sin(2\pi f_m t))$$

Der sogenannte Frequenzhub Δf ist die maximale Abweichung der Frequenz des FM-Signals von der Trägerfrequenz. Mit ihm lässt sich der Modulationsindex I ermitteln, welcher das Verhältnis von Frequenzhub zur Modulationsfrequenz beschreibt.

$$(18) I = \frac{\Delta f}{f_m}$$

Die neben der Trägerschwingung neu entstehenden Partialschwingungen werden Seitenbänder genannt. Ihre Frequenzen f_s gruppieren sich symmetrisch und im Abstand von ganzzahligen Vielfachen der Modulationsfrequenz über- und unterhalb der Trägerfrequenz. Mathematisch lassen sie sich wie folgt bestimmen:

$$(19) f_s = |f_c \pm n \cdot f_m| \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Da von sinusförmigen Träger- und Modulationsfrequenzen Gebrauch gemacht wird, können ihre Amplituden anhand der Besselfunktion analysiert werden, deren genauere Erörterung den Umfang dieser Arbeit überschreiten würde. Ist der Modulationsindex $I = 0$, werden keine Seitenfrequenzen gebildet und das Spektrum besteht ausschließlich aus der Trägerfrequenz. Mit zunehmendem Modulationsindex steigt die Anzahl der Seitenbänder. Unterschreiten Seitenbänder den Wert von 0 Hz, entsteht eine Spiegelung um den Nullpunkt und sie werden mit einer Phasenumkehrung zu den Komponenten im positiven Bereich addiert.⁶⁰

Die Lautstärke des frequenzmodulierten Signals entspricht der Amplitude des Trägersignals. Anders ist es jedoch bei der Klangfarbe. Mit steigender Amplitude des Modula-

⁵⁹ Vgl. Dörne, S.239.

⁶⁰ Vgl. Ackermann, *Computer und Musik: eine Einführung in die digitale Klangsynthese und Musikverarbeitung*, S. 107ff.

tionssignals wird der Klang heller. Das liegt daran, dass der Anteil der Seitenbänder zunimmt und gleichzeitig die Trägerfrequenz an Energie verliert.⁶¹

Mit der FM-Synthese lassen sich somit bereits durch Einstellen von wenigen Parametern komplexe Klangspektren erstellen. Harmonische Klänge können erzeugt werden, indem man die Frequenz des Modulators als ganzzahliges Vielfaches der Trägerfrequenz wählt, wohingegen nicht-ganzzahlige Verhältnisse zu unharmonischen, geräuschhaften Klängen führen. Zudem kann durch Einsetzen einer Hüllkurve auf den Modulationsindex ein sich zeitlich veränderndes Klangspektrum geschaffen werden. Zusätzlich kann durch Addieren oder mehrstufiger Modulation mehrerer FM-Wellenformen der Klang bereichert werden.

Klangbeispiel Nr. 11 zeigt eine FM-Synthese. Hierbei wird eine Rechteckschwingung durch eine Sägezahnwelle moduliert. Zunächst wird der Modulationsindex langsam erhöht. Hat dieser sein im Synthesizer einstellbares Maximum erreicht, wird die Frequenz des Modulationssignals erhöht.

Zwar ist die FM-Synthese ein analoges Verfahren, eignet sich aber besonders für digitale Implementierungen. Die Firma Yamaha sorgte 1983 mit der Entwicklung der digitalen Synthesizer der DX-7-Reihe für eine weltweite Verbreitung der FM-Synthese.⁶² Diese funktionieren nach dem FM Prinzip und verfügt dafür über sechs sog. Operatoren. Diese Operatoren enthalten jeweils einen Sinusoszillator, welcher über Frequenz- und Modulationsparameter gesteuert wird und einem nachfolgenden Verstärker. Der Verstärker kann durch einen zugeschalteten Hüllkurvengenerator beeinflusst werden.

⁶¹ Vgl. Ackermann, S. 110.

⁶² Vgl. Stange-Elbe, *Computer und Musik Grundlagen, Technologien und Produktionsumgebungen der digitalen Musik*, S. 207.

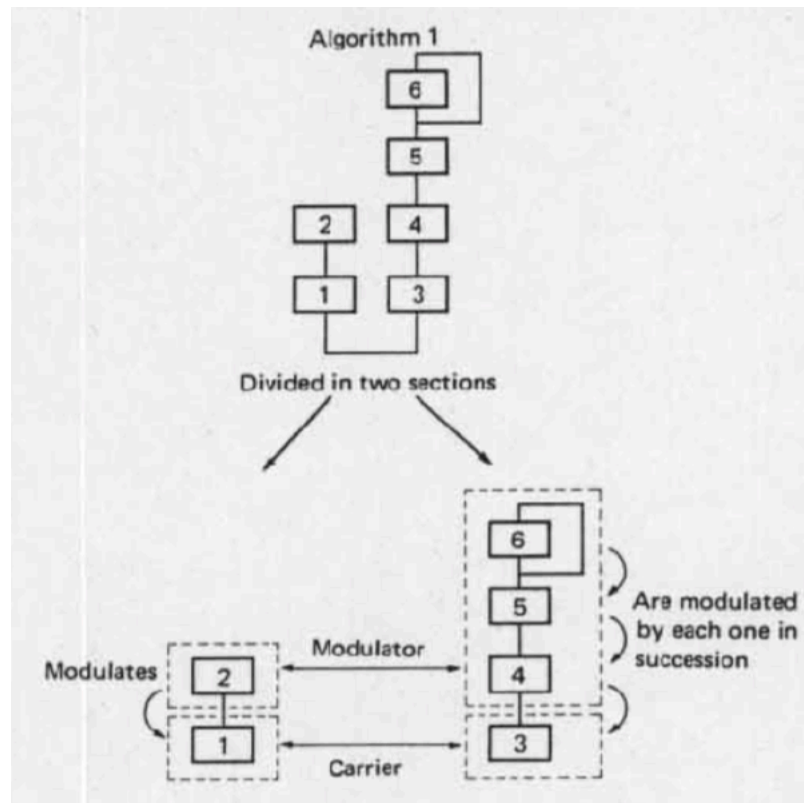


Abbildung 24: Beispielkombination der Operatoren des Yamaha DX-7⁶³

Yamaha bietet im DX-7 die Operatoren in insgesamt 32 unterschiedlichen Kombinationen als Träger oder Modulatoren an. Eine beispielhafte Kombinationsstruktur wird in Abbildung 24 veranschaulicht. Außerdem ist bei Operator Nummer 6 die Möglichkeit einer Rückkopplung zu sehen, bei der das Ausgangssignal eines Operators ihm erneut zugeführt wird, wodurch er sein Signal selbst moduliert. So können noch vielfältigere und komplexere Klänge erzeugt werden.

Phase-Distortion- und Waveshaping-Synthese

Die Phase-Distortion-Synthese (PD-Synthese) bewirkt durch Veränderung der Phasenwinkelzunahme pro Zeiteinheit die Umformung einer Welle. Der konstante Durchlauf eines Kreises wird bei einer Phasen-Zeit-Funktion als Sinuskurve auf der Zeitachse abgebildet. Anders ist es bei einem aus der PD-Synthese resultierenden Signal.

⁶³ Yamaha, „Yamaha DX7 digital programmable algorithm synthesizer - Operating Manual“, S. 11.

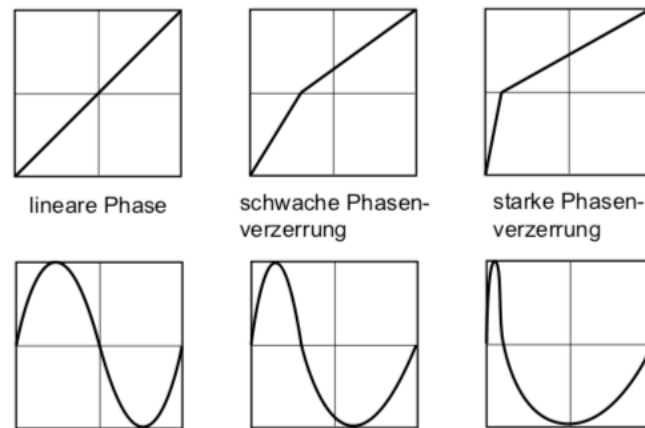


Abbildung 25: Phase-Distortion-Synthese⁶⁴

Dabei steigt der Phasenwinkel nicht mehr linear an und die Sinuskurve wird verzerrt. In Abbildung 25 wird dies an einem Beispiel veranschaulicht: Die Änderung des Phasenwinkels nimmt bis 180 Grad zunächst stärker zu, danach langsamer. Somit wird die erste, positive Hälfte der Sinuskurve zeitlich verkürzt, wobei die zweite, negative Hälfte verlängert wird. Wichtig dabei ist, dass die Periodendauer gleichbleibt, da sich andernfalls die Frequenz des Tones verändert. Außer der Sinuswelle können beliebige andere Wellenformen als Ausgangsmaterial für die PD-Synthese genutzt werden. Der erzeugte Klang erinnert an die Klangresultate der FM-Synthese.

Die CZ-Synthesizer der Firma Casio basieren auf der PD-Synthese. Die Besonderheiten an ihnen sind, dass keine Filter-Sektion genutzt wird und Hüllkurven in acht statt der üblichen vier Stufen beeinflusst werden können, da ADSR-Generatoren nicht flexibel genug sind.⁶⁵

Eine veränderte Form der Phase-Distortion-Synthese ist die Waveshaping-Synthese, bei der die Synthese im Bereich der Verstärkung stattfindet. Hierbei wird statt dem Hüllkurvengenerator ein Oszillator eingesetzt, der komplexe Wellenformen erzeugt. Sie ermöglichen eine Transformation des zeitlichen Verlaufes der Ausgangswelle. Als Eingangssignal wird meist eine Sinuswelle verwendet, da bei komplexeren Wellenformen die resultierenden Klangereignisse unvorhersehbar sind. Ausgewählte Frequenzbereiche des Ausgangssignals können durch Einstellung des Verzerrungsgrades mehr oder

⁶⁴ Stange-Elbe, S. 203.

⁶⁵ Vgl. Ackermann, *Computer und Musik: eine Einführung in die digitale Klangsynthese und Musikverarbeitung*, S. 112ff.

weniger mit Obertönen angereichert werden. Mithilfe von nichtlinearen Verzerrungen können neue Teiltöne erzeugt werden, deren Anzahl gesteuert werden kann.⁶⁶

4.2 Digitale Klangsynthese

Im Zuge der Digitalisierung im Audibereich zu Beginn der 1970er Jahre wurde die neue Technik auch für die Weiterentwicklung der Klangsynthese genutzt.⁶⁷ Dadurch entstanden neue digitale Klangsyntheseverfahren. Hierzu muss ein Computer durch ein Programm instruiert werden. Dieses Programm führt die Regeln der einzelnen Syntheseverfahren aus. Auch hier kann durch Veränderung von Parametern der Klang wie gewünscht kontrolliert werden. Digitale Synthesizer können entweder als Hardwarelösung, ähnlich wie kompakte analoge Synthesizer, mit integrierten Computerbauteilen oder als Software genutzt werden. Bei Letzterem wird das Programm als Plug-in innerhalb einer DAW (= Digital Audio Workstation, ein computergestütztes System für die Tonaufnahme, -bearbeitung, sowie Musikproduktion, Abmischung und Mastering) verwendet.

Eine wichtige Rolle spielt das Abtasttheorem, was besagt, dass Wellenformen, die aus Partialtönen mit unterschiedlicher Frequenz bestehen, anhand einer Folge von Zahlenwerten beschrieben werden können. Diese sogenannten Abtastwerte sind proportional zum momentanen Amplitudenwert der Wellenform. Die Anzahl der Abtastungen muss doppelt so groß sein, wie die Bandbreite der Wellenform. Dementsprechend wird der Computer so programmiert, dass er anhand der richtigen Zahlenfolge den gewünschten Klang berechnen kann. Anschließend werden die gespeicherten Abtastwerte mittels eines D/A-Wandlers wieder in analoge elektrische Spannungswerte umgewandelt. Nach der Glättung der erhaltenen Werte zu einem kontinuierlichen Signal, durch einen Tiefpass-Filter und einer Verstärkung des erhaltenen Signals, kann es zum Lautsprecher geschickt werden, wo es als Klang wiedergegeben wird.⁶⁸

⁶⁶ Vgl. Stange-Elbe, *Computer und Musik Grundlagen, Technologien und Produktionsumgebungen der digitalen Musik*, S. 204.

⁶⁷ Vgl. Dörne, *Tontechnik Hören, Schallwandler, Impulsantwort und Faltung, digitale Signale, Mehrkanaltechnik, tontechnische Praxis*, S. 157.

⁶⁸ Vgl. Ackermann, *Computer und Musik : eine Einführung in die digitale Klangsynthese und Musikverarbeitung*, S. 103.

MIDI

Für den Datenaustausch zwischen mehreren digitalen Geräten entwickelten Synthesizer-Hersteller wie Sequential Circuits, Oberheim und Roland 1984 den Standard des Musical Instrument Digital Interface (kurz MIDI) und optimierten diesen für den Audiobereich.⁶⁹ Er dient der parametrischen Codierung und somit der Übertragung und Aufzeichnung von Schallsignalen, die mit elektronischen Instrumenten erstellt werden. Das MIDI stellt also den Ablauf eines Musikstücks durch diskrete Steuerinformationen dar. Grundlegend dafür ist die Aufzeichnung der Frequenz, Lautstärke und Klangfarbe des akustischen Ereignisses, sowie dessen zeitlichen Start und Ende. Durch diesen neuen Standard war es erstmals möglich die Klaviatur von einem Synthesizer zu trennen und mit einer Tastatur mehrere Synthesizer steuern zu können. Zudem entstand mit der Verwendung von MIDI die Möglichkeit elektronische Instrumente miteinander zu verbinden.⁷⁰

4.2.2 Wavetable-Synthese

Die Wavetable-Synthese (dt. Wellentabellen-Synthese) ist eine erweiterte Form der subtraktiven Synthese. Zusätzlich zu den einfachen, statischen Wellenformen (Sinus-, Sägezahn-, Rechteck-, Dreieckswelle) steht eine Vielzahl an weiteren, komplexeren Wellenformen zur Verfügung. Sie werden in sogenannte Wavetables (= Wellentabel

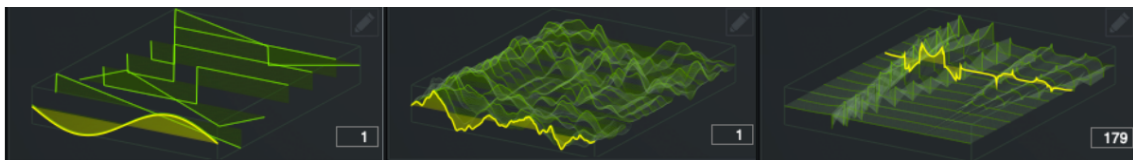


Abbildung 26: Darstellung drei unterschiedlicher Wavetables

len) zusammengefasst. Innerhalb dieser Tabellen kann der Oszillator beliebig zwischen den einzelnen Wellenformen umherspringen, was die Wellenform im Verlauf des Klanges verändert. Mit Zuhilfenahme von Hüllkurven oder LFOs, die den Oszillator steuern und alle in der Wellentabelle enthaltenen Wellenformen durchlaufen, lässt sich ein Verlauf zwischen den unterschiedlichen Klangspektren der einzelnen Wellen kreieren. Je

⁶⁹ Vgl. Dörne, *Tontechnik Hören, Schallwandler, Impulsantwort und Faltung, digitale Signale, Mehrkanaltechnik, tontechnische Praxis*, S. 245.

⁷⁰ Vgl. Raffaseder, *Audiodesign [Kommunikationskette, Schall, Klangsynthese, Effektbearbeitung, akustische Gestaltung]*, S. 133f.

nachdem, wie stark sich die Wellenformen voneinander unterscheiden, können entweder weiche und sanfte oder auch sehr abwechslungsreiche und sprunghafte Klänge entstehen.⁷¹

Nach der Wellentabelle kann das Signal, wie auch bei der subtraktiven Synthese, mit einem Filter bearbeitet werden. Dieser ist jedoch nicht ausschlaggebend für die Klangformung, da hierfür primär die Oszillatoren zuständig sind. Sie haben durch das dynamische Umschalten zwischen den Wellenformen den größten Einfluss auf den resultierenden Klang. Zum Schluss kann die Lautstärke mit Hilfe eines Verstärkers angepasst werden.⁷²

Das Klangbeispiel Nr. 12 auf der beigelegten CD verdeutlicht eine Wavetable-Synthese. Hierfür wurde zum einfacheren Verständnis, eine Wellentabelle verwendet, die aus den Grundschwingungen der subtraktiven Synthese besteht (links in Abbildung 26 zu sehen). Im Verlauf des Klages ist ein weicher Übergang zwischen den einzelnen Wellenformen wahrnehmbar.

4.2.3 Granularsynthese

Mit der Entdeckung, der möglichen Zerlegung eines Signals in akustische Quanten des ungarischen Ingenieurs und Physikers Dennis Gabor, konnte in den 1970er Jahren die digitale Synthese auf Basis von elementaren „Klangkörnern“ (engl. Grains) umgesetzt werden. Sie ist die sogenannte granulare Synthese.⁷³

Für diese Syntheseart werden Tonaufnahmen, auch Samples genannt, in 5 ms bis 30 ms lange Abschnitte unterteilt. Die so erhaltenen Grains werden mit einer Wiederholfrequenz von mindestens 20 Hz abgespielt, um so einen für den Menschen hörbaren stetigen Klang zu erzeugen. Liegt die Wiederholfrequenz unter 20 Hz, können die Grains nur als einzelne undefinierbare Impulse wahrgenommen werden. Die Startposition des Grains innerhalb des gesamten Samples, die Länge des Grains, die Länge der Überblendung zwischen den Grains und die Wiedergabegeschwindigkeit bilden die wichtigsten Parameter.

⁷¹ Vgl. Raffaseder, S. 235.

⁷² Vgl. Stange-Elbe, *Computer und Musik Grundlagen, Technologien und Produktionsumgebungen der digitalen Musik*, S. 201.

⁷³ Vgl. Dörne, *Tontechnik Hören, Schallwandler, Impulsantwort und Faltung, digitale Signale, Mehrkanaltechnik, tontechnische Praxis*, S. 240.

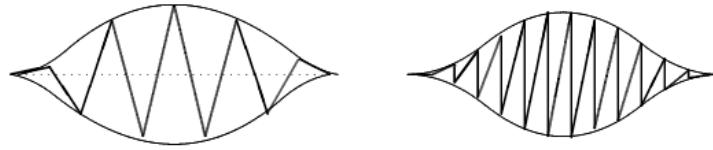


Abbildung 27: Grains mit unterschiedlichen Wellenformen, Frequenzen und Hüllkurven⁷⁴

Die einzelnen Grains können fortwährend wiederholt, in beliebiger Reihenfolge aneinandergereiht oder ineinander übergeblendet abgespielt werden. Dazu werden sie mit Hüllkurven bearbeitet (Abbildung 27), um permanente Sprünge in der Signalform und daraus entstehende Störgeräusche zu umgehen. So entsteht eine zeitliche Verschmelzung des Klangs. Größere Klangvielfalt kann durch Zufallsmodulationen von Startposition und Länge der Grains generiert werden.⁷⁵

Man unterscheidet zwischen zwei Anordnungsprinzipien der Grains: die synchrone oder die asynchrone Anordnung. Die Anordnung in einem festen Zeitraster (engl. Frames) wird als synchrone Anordnung bezeichnet. Der resultierende Klang wird durch die Klangfarbe, Lautstärke und Tonhöhe der einzelnen Frames definiert. Bei der asynchronen Anordnung werden die Grains in sogenannten Grain Clouds abgespielt, wobei ein Teil der Steuerung nach dem Zufallsprinzip geschieht. So können mehrere Grains auch gleichzeitig und mit unterschiedlichen Abspielparametern wiedergegeben werden. Die Parameter der Grain Clouds sind

- die statistische Dichte (in Grains pro Sekunde)
- der Amplitudenverlauf (in Abhängigkeit der mittleren Grainamplitude)
- die statistische Frequenz und
- die räumliche Darstellung.⁷⁶

⁷⁴ Dörne, *Tontechnik Hören, Schallwandler, Impulsantwort und Faltung, digitale Signale, Mehrkanaltechnik, tontechnische Praxis*, S. 241. Dörne, S. 241.

⁷⁵ Vgl. Raffaseder, *Audiodesign [Kommunikationskette, Schall, Klangsynthese, Effektbearbeitung, akustische Gestaltung]*, S. 239.

⁷⁶ Vgl. Dörne, *Tontechnik Hören, Schallwandler, Impulsantwort und Faltung, digitale Signale, Mehrkanaltechnik, tontechnische Praxis*, S. 241.

4.2.4 Sampling

Das Ausgangsmaterial für das Sampling besteht aus einem digital aufgezeichneten akustischen Sample. Nun wird dieses akustische Ereignis in der Abspielgeschwindigkeit verändert, wodurch sich auch seine Tonhöhe ändert. Die zu Grunde liegende Idee kann am Beispiel eines Klaviers erklärt werden. Als Sample wird ein durch Tastendruck erzeugter Klang des Klaviers benutzt. Durch das Sampling ist es nun theoretisch möglich alle 87 weiteren Töne der Klaviatur nachzubilden.

Die durch das Sampling erhaltenen Klänge können wie bei anderen Syntheseverfahren mit Hilfe von Modulationen und Filtern bearbeitet werden.

Beim Sampling erhält man zudem die Möglichkeit, Samples in umgekehrter Reihenfolge oder als sogenannten Loop zu spielen. Der Loop bildet eine Wiederholschleife des Samples. So können z.B. längere Schlagzeustrhythmen durch Gedrückthalten einer Taste wiederholt werden. Außerdem können Töne unbegrenzt lange gehalten werden, indem sich die Sustain-Phase ständig wiederholt. Wichtig hierbei ist, dass der Klang am Anfangs- und Endzeitpunkt des Loops nahezu identisch ist, damit der Sprung vom Ende zum Anfang nicht wahrnehmbar ist.⁷⁷

Da aber beim Verändern der Abspielgeschwindigkeit das gesamte Signalspektrum, einschließlich seiner Formanten, verschoben wird, können so niemals die Originaltöne des Klaviers nachgebildet werden und es ergeben sich nur Klänge, die sehr ähnlich wie das Original klingen.⁷⁸ Um dies zu umgehen, wurde das Multisampling entwickelt. Hierbei wird statt eines einzelnen Samples eine Vielzahl von Klängen der Instrumente in unterschiedlichen Tonhöhen und Spielweisen aufgenommen. Der Sampler muss dann so programmiert sein, dass er, abhängig von der durch MIDI übertragenen Notenummer und Anschlagstärke, das am besten geeignete Sample auswählt.⁷⁹

4.2.5 Physical Modeling

Das in den 1990er Jahren zum ersten Mal in kommerziellen Synthesizern verwendete Physical Modeling Verfahren (PM-Synthese) unterscheidet sich von anderen Synthe-

⁷⁷ Vgl. Stange-Elbe, *Computer und Musik Grundlagen, Technologien und Produktionsumgebungen der digitalen Musik*, S. 209.

⁷⁸ Vgl. Raffaseder, *Audiodesign [Kommunikationskette, Schall, Klangsynthese, Effektbearbeitung, akustische Gestaltung]*, S. 203.

⁷⁹ Vgl. Raffaseder, S. 238.

semöglichkeiten. Es wird nicht versucht, den zeitlichen Verlauf und die spektrale Zusammensetzung von Klängen nachzubilden. Vielmehr werden die Entstehungsmechanismen, die einen bestimmten Klangverlauf hervorrufen, simuliert. Durch programmierte Algorithmen können Computersimulationen von akustischen Instrumenten generiert werden. Diese beruhen auf den physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Parameter, die für die Erzeugung von Klängen in den akustischen Instrumenten notwendig sind. Dazu wird das Instrument in seine elementaren Systeme wie Saite, Membran, Luftsäule oder Resonator zerlegt, die in der Computersimulation je nach Bedarf angeschlagen, angestrichen oder angeblasen werden. Als Parameter können in der PM-Synthese die im Instrument zur Klangerzeugung verwendeten Materialien, Saitenspannung, sowie Bogen- und Anblasdruck verändert werden. Damit lassen sich sehr lebendige und in der Klangfarbe dynamische Klänge erzeugen. Zudem besteht die Möglichkeit, die Physik in der Computersimulation zu umgehen. Das bedeutet, es lassen sich neuartige Klänge realisieren, zum Beispiel durch allmähliche Umwandlung des Materials einer Saite von Metall über Nylon zu Holz, kontinuierliche Übergänge zwischen Anzupfen und Anstreichen oder die Gestaltung von Saiten mit großen Durchmesser und geringer Masse, die über riesige Resonanzbögen schwingen. Dabei klingen die Resultate nie abstrakt, da sie einem bekannten Material, einem Oszillator oder einem Resonanzkörper zugeordnet werden können.⁸⁰

⁸⁰ Vgl. Raffaseder, *Audiodesign [Kommunikationskette, Schall, Klangsynthese, Effektbearbeitung, akustische Gestaltung]*, S. 240.

5 Vor- und Nachteile der Syntheseverfahren

Wie sich herausstellt, hat jedes Verfahren zur Klangsynthese durch dessen Aufbau und Funktionseise Vorteile und Nachteile im Vergleich zu den anderen Synthesarten.

Die additive Synthese bietet die größtmögliche Kontrolle über das resultierende Klangergebnis. Sie benötigt dafür eine Menge Informationen über Amplituden- und Frequenzverläufe der einzelnen Partialtöne. Um aber komplexere Wellenformen zu erhalten, muss eine Vielzahl an Oszillatoren verwendet werden und mit jedem neuen Oszillator vergrößert sich der Aufwand. Dies ist ein Nachteil für die Synthese in Echtzeit-Systemen, da hier nur eine gewisse Anzahl an Partialtönen zur Verfügung stehen. Deshalb wird die additive Synthese meist in digitalen Softwarelösungen verwendet, die den Klang nicht in Echtzeit berechnen.

Die größte Bedienfreundlichkeit hat die subtraktive Synthese. Bei ihr müssen nur relativ wenige Parameter eingestellt werden, um ein gewünschtes Klangresultat zu bekommen. Zudem besteht ein anschaulicher Zusammenhang zwischen diesen klangbestimmenden Parametern und dem Ergebnis. Allerdings ist das Klangpotential der subtraktiven Synthese stark eingeschränkt, da die Grundwelle nur zu einem gewissen Maß durch Filter und Verstärker verändert werden kann.

Anders ist es bei den nichtlinearen Syntheseverfahren. Die Modulationssynthesen, AM und FM, sowie PD- und Waveshaping-Synthese, haben den großen Vorteil, dass durch die Verwendung von wenigen Bauelementen komplexe Klänge und Klangverläufe erzeugt werden können. Dies führt jedoch gleichzeitig zu ihrem Nachteil. Im Gegensatz zur subtraktiven Synthese besteht kein anschaulicher Zusammenhang zwischen den Parametereinstellungen und dem erzeugten Klang. Dadurch ist für die Erstellung eigener Klänge eine gewisse Erfahrung beziehungsweise Einarbeitungszeit mit der Synthesetechnik von Nöten. Zudem haben die PD- und Waveshaping-Synthese den Nachteil, dass nur Frequenzkomponenten erzeugt werden können, die einem ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz des Eingangssignals entsprechen.

Einen Kompromiss erhält man mit der Wavetable-Synthese. Diese kombiniert die einfache Handhabung durch gleichartigen Aufbau wie die subtraktive Synthese mit einer großen Klangvielfalt.

Die Granularsynthese bietet eine hervorragende Möglichkeit zur experimentellen Klanggestaltung, eignet sich jedoch weniger für konventionelle Synthesizersounds oder zur Nachahmung akustischer Instrumente. Die Klangcharakteristik mit Verwendung von zu langen Grains kann schnell leblos und maschinell klingen, wobei zu kurze Grains den resultierenden Klängen der subtraktiven Synthese sehr nahekommen. Au-

ßerdem kann durch die Granularsynthese in Verbindung mit Loops ein akustisches Ereignis quasi zum Einfrieren gebracht werden. Hiermit findet sie auch Anwendung zur Änderung der Wiedergabegeschwindigkeit eines Samples ohne Veränderung der Tonhöhe.

Mit der heutigen Samplingtechnik können akustische Instrumente glaubwürdig nachgebildet werden. So können, beispielsweise bei Film- oder Werbefilmen, mit einem Sampler Kosten gespart werden, da kein komplettes Orchester die Musik einspielen muss. Jedoch kann durch Sampling keine perfekte Nachahmung der Instrumente mit ihren unendlich vielen möglichen Klangnuancen geschaffen werden.

Auch mit der PM-Synthese lassen sich akustische Instrumente authentisch nachbilden. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist jedoch, dass die notwendigen komplexen Algorithmen für die Synthese einen hohen Rechenaufwand mit sich bringen. Zudem weisen einige Modelle, durch die Berücksichtigung der vielen physikalischen Eigenschaften, einen hohen Komplexitätsgrad auf. Dadurch kann es rasch passieren, dass der Anwender den Überblick über die Parameter verliert oder sie so einstellt, dass das Modell nicht zu schwingen beginnt und still bleibt.

6 Fazit

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die unterschiedlichen Syntheseverfahren, je nach Anwendungsgebiet, mehr oder weniger geeignet sind. Wird die Bildung bestimmter neuer Klänge angestrebt, müssen Kenntnisse über ihre spektrale Beschaffenheit vorliegen, um sie bilden zu können. Anschließend kann mit dem Wissen über die Funktionsweisen der Verfahren das dafür geeignete ausgewählt und verwendet werden. Außerdem muss beachtet werden, wieviel Erfahrung der Anwender mit den Verfahren hat, da bei einigen kein anschaulicher Zusammenhang zwischen den einstellbaren Parametern und dem resultierenden Klang besteht. Dies kann, bei falscher Verwendung, schnell in einem unerwünschtem Klangchaos enden.

Mit der PM-Synthese und dem Sampling bietet der Bereich der digitalen Klangsynthese zwei Verfahren, die besser zum Nachbilden von Klängen geeignet sind, als mit dem Einsatz analoger Syntheseverfahren. Diese reichen jedoch noch nicht an die Klänge natürlicher Instrumente heran.

Durch die mögliche Speicherung von Parametereinstellungen haben digitale Syntheseverfahren einen großen Vorteil gegenüber den analogen. Zudem können mehrere Synthesizer durch den MIDI-Standard kombiniert und gleichzeitig mit einer Tastatur gesteuert werden. Durch die Verwendung von Computern sind sie sehr effizient und bieten präzise Einstellungsmöglichkeiten. Weitere Vorteile bieten digitale Softwaresynthesizer. Sie sind kostengünstig und ermöglichen weit mehr Einstellungsmöglichkeiten als analoge Synthesizer.

Wie anfangs angesprochen schwören Liebhaber von Synthesizern dennoch auf die alte analoge Technik. Das liegt daran, dass die Klänge, die durch spannungsgesteuerte Schaltungen erzeugt werden, niemals perfekte Wellenformen generieren können. Die dabei auftretenden fehlerhaften Geräuschanteile bewirken für jeden analogen Synthesizer eine eigene Klangcharakteristik. Zwar können in Softwaresynthesizern analoge Syntheseverfahren durch entsprechende Programmierung nachsimuliert werden, jedoch ist diese Technik noch nicht soweit ausgereift, um sie perfekt zu imitieren.

Literaturverzeichnis

Ackermann, Philipp. *Computer und Musik : eine Einführung in die digitale Klangsynthese und Musikverarbeitung*. Wien ; New York: Springer-Verlag/Wien, 1991.

Anwander, Florian. *Synthesizer. So funktioniert elektronische Klangerzeugung*. 9. Auflage 2017. PPVMEDIEN GmbH, Bergkirchen, 2000.

Dickreiter, Michael. *Raumakustik, Schallquellen, Schallwahrnehmung, Schallwandler, Beschallungstechnik, Aufnahmetechnik, Klanggestaltung*. 5., Völlig Neubearbeitete und ergänzte Auflage. Berlin De Gruyter, 2012.

Dickreiter, Michael, Volker Dittel, Wolfgang Hoeg, und Martin Wöhr. *Handbuch der Tonstudioteknik*. 7. völlig neu bearbeitet und erweiterte Auflage. Berlin; Boston: K. G. Saur, 2009.

Dobrinski, Paul, Gunter Krakau, und Anselm Vogel. *Physik für Ingenieure*. 12., Aktualisierte Auflage. Wiesbaden Vieweg+Teubner, 2010.

Dörne, Thomas. *Tontechnik Hören, Schallwandler, Impulsantwort und Faltung, digitale Signale, Mehrkanaltechnik, tontechnische Praxis*. 4. aktualisierte Auflage. München Hanser, 2015.

Gorges, Peter, und Alex Merck. *Keyboards, MIDI, Homerecording - Alles über Equipment und Anwendungen*. 2. Auflage. GC Carstensen Verlag, München, 1990.

Henle, Hubert. *Das Tonstudio Handbuch - Praktische Einführung in die professionelle Aufnahmetechnik*. 5., Komplet überarbeitete Auflage. GC Carstensen Verlag, München, 2001.

Kuttner, Thomas. *Praxiswissen Schwingungsmesstechnik*. 1. Aufl. Springer Vieweg, 2015.

Raffaseder, Hannes. *Audiodesign [Kommunikationskette, Schall, Klangsynthese, Effektbearbeitung, akustische Gestaltung]*. München Wien Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., 2002.

Stange-Elbe, Joachim. *Computer und Musik Grundlagen, Technologien und Produktionsumgebungen der digitalen Musik*. Berlin Boston De Gruyter Oldenbourg, 2015.

Ulrich, Helmut, und Hubert Weber. *Laplace-, Fourier- und z-Transformation : Grundlagen und Anwendungen*. 10., Erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.

Ulrich, Jens, und Eckhard Hoffmann. *Hörakustik - Theorie und Praxis*. 1. Auflage. DOZ Verlag Heidelberg, 2007.

Werner, Martin. *Nachrichtentechnik Eine Einführung für alle Studiengänge*. 7., Erweiterte und aktualisierte Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2010.

Yamaha. „Yamaha DX7 digital programmable algorithm synthesizer - Operating Manual“, o. J. https://de.yamaha.com/files/download/other_assets/9/333979/DX7E1.pdf.

Anlagen

CD mit Klangbeispielen:

01. Schwebung

02. Sinuswelle

03. Sägezahnwelle

04. Dreieckwelle

05. Rechteckwelle

06. Weißes Rauschen

07. Tiefpass

08. Hochpass

09. Bandpass

10. Bandsperre

11. FM-Synthese

12. Wavetable-Synthese

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ort, Datum

Vorname Nachname