



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

„Das virtualisierte Variophon“

Verfasser

Ludwig Gredler-Oxenbauer

angestrebter akademischer Grad

Magister der Philosophie (Mag.phil.)

Wien, 2012

Studienkennzahl lt. Studienblatt:
Studienrichtung lt. Studienblatt:
Betreuer:

A 316
Diplomstudium Musikwissenschaft UniStg.
Univ.-Prof. Dr. Christoph Reuter

Inhalt

1	Einleitung.....	4
2	Elektronische Klangerzeugung.....	6
2.1	Die systematische Einordnung des Variophons.....	6
2.2	Frühe Elektrophone.....	8
2.3	Klangmaschinen der Pionierzeit in Deutschland und Österreich.....	10
2.4	Synthesizer.....	12
2.4.1	Historische Entwicklung der Synthesizer.....	12
2.4.1.1	Analoge modulare Synthesizer.....	13
2.4.1.2	Monophone analoge Kompaktsynthesizer.....	15
2.4.1.3	Polyphone programmierbare analoge Synthesizer.....	16
2.4.1.4	Polyphone programmierbare digitale Synthesizer mit Sampling.....	19
2.4.1.5	Die Renaissance der analogen Synthesizer.....	21
2.4.2	Software-Synthesizer.....	22
2.4.2.1	SynthEdit.....	23
2.4.2.2	Andere Entwicklungsumgebungen.....	24
3	Theoretische Grundlagen.....	25
3.1	Die Klangfarbe von Blasinstrumenten.....	26
3.1.1	Formantbereiche.....	26
3.1.2	Feste Formanten.....	26
3.1.3	Die Impulsformungstheorie.....	28
3.2	Digitale Verfahren.....	31
3.2.1	Digitale Signalverarbeitung.....	32
3.2.1.1	Kodierung von digitalen Signalen.....	32
3.2.1.2	Sampling.....	33
3.2.1.3	Quantisierung und Wahl der richtigen Größen.....	35
3.2.1.4	Digitale Formate.....	36
3.2.2	MIDI.....	38
3.3	Die Funktionsweise von Synthesizern.....	45
	Spannungssteuerung.....	47
3.3.1	Oszillatoren.....	48
3.3.1.1	Wellenformen aus Oszillatoren.....	48
3.3.1.2	Steuergrößen eines Oszillators.....	49
3.3.1.3	LFO.....	50
3.3.2	Filter.....	50
3.3.3	VCA.....	54
3.3.4	ADSR.....	55
3.3.5	Andere Features.....	57
3.3.5.1	Rauschgenerator.....	57
3.3.5.2	Ringmodulator.....	57
3.3.5.3	Mixer.....	58
3.3.5.4	Flanger.....	58
3.3.5.5	Chorus.....	58
3.3.5.6	Phaser.....	59
3.3.5.7	Sequenzer.....	59

3.3.5.8	Sample and Hold.....	59
3.3.5.9	Oszillator-Synchronisation	60
3.3.5.10	Pulsweiten-Modulation.....	60
3.3.5.11	Kreuz-Modulation	60
3.3.6	Schaltbeispiel - Ein Ton des Variophons	60
3.4	Synthesemethoden.....	62
3.4.1	Additive Synthese	63
3.4.2	Subtraktive Synthese.....	64
3.4.3	Frequenzmodulation.....	64
3.4.4	Sampling	67
3.4.5	Physical Modeling	67
3.4.6	Granularsynthese	68
3.4.7	Impulsformung	68
4	Das Variophon	70
4.1	Das analoge Variophon	70
4.1.1	Die Funktionsweise des analogen Variophons	70
4.1.2	Hauptteile des analogen Variophons.....	71
4.1.3	Dynamik.....	72
4.1.3.1	Versuchsanordnung zur Messung des dynamischen Verhaltens.....	73
4.1.3.2	Dynamikstufen.....	73
4.2	Das virtualisierte Variophon.....	76
4.2.1	Das Hauptmodul	76
4.2.2	Die Hauptelemente im Detail	77
4.2.2.1	Die MIDI-Unit	78
4.2.2.2	Die MIDI-Steuerung	79
4.2.2.3	Die Switch-Box.....	81
4.2.2.4	Das Instrumenten-Modul.....	83
4.2.2.4.1	Die Oscillator-Unit im Fagott-Modul.....	86
4.2.2.4.2	Registerberechnung und Registerwahl	87
4.2.2.5	End-VCA.....	88
4.2.3	Die grafische Umsetzung	90
4.2.3.1	Subcontrols	90
4.2.3.2	Bewegliche Elemente.....	92
5	Bewertung und Ausblick.....	96
5.1	Variophon vs. SynthEdit	96
5.2	Ausblick.....	98
6	Literaturverzeichnis	99
7	Anhang	101
7.1	Auszug aus der Instrumentensystematik	101
7.2	Synthesizer von 1964 bis 2002	103
7.3	Abstract.....	108
7.4	Lebenslauf.....	109

1 Einleitung

In den 1970-er Jahren war in Deutschland für kurze Zeit ein analoges elektronisches Musikinstrument auf dem Markt, das bisher in seiner Art einzigartig ist:

Das Variophon. Dieses Instrument kann mit einem melodikaähnlichen Blaswandler gespielt werden, was eine nuancenreiche Tongebung und Klangformung beim Spiel von zehn unterschiedlichen Blasinstrumenten erlaubt.

Die Sonderstellung, die das Variophon innerhalb der elektronischen Klangerzeuger einnimmt, begründet sich mit der eingesetzten Syntheseart, der Impulsformung. Diese wurde damals wie heute außer im Variophon und seinem Vorgängermodell nirgendwo anders mit elektronischer Hardware realisiert. Die Impulsformungstheorie erklärt das Prinzip von Klangerzeugung und Klangverhalten bei Blasinstrumenten. Die Überführung dieser Theorie in ein Syntheseverfahren manifestiert sich im Variophon und den Blasinstrumenten, die mit diesem Gerät nachgestellt werden können.

Diese Arbeit befasst sich mit dem Variophon und seinen digitalen Emulationen. Eine virtuelle Version dieses Instrumentes wurde erstmals 2007 von Michal Oehler im Rahmen einer Analyseplattform zur digitalen Impulsformung erstellt. Eine weitere Virtualisierung, die mit Hilfe von frei zugänglicher Software entwickelt wird, liegt in einer ersten Version vor. Diese enthält auch eine komplette optische Umsetzung des Originalgerätes, im akustischen Bereich orientiert sie sich an den Erkenntnissen von Oehler.

Viele der heute selbstverständlichen Standards im Umfeld jeglicher Art von Audioanwendungen waren zur Zeit der Entwicklung des Variophons noch nicht verfügbar. Zwischen dem analogen Gerät und der Erstellung seiner Virtualisierungen liegen vier Jahrzehnte, die eine Fülle von bahnbrechenden Neuerungen im Bereich der elektronischen Klangerzeugung und Audibearbeitung hervorgebracht haben. Dazu zählen die konstante Verbesserung der Synthesizer, der Übergang von analogen zu digitalen Lösungen, die breite Verfügbarkeit von Softwarelösungen im Audibereich, die mit der Verbreitung des Personal Computers bis in kleinste private Bereiche einhergeht, Standardisierung wie etwa die Einführung von MIDI ab 1983 und generell die weitgehend abgeschlossene Ablösung analoger Verfahren durch Prozesse die mit digitaler Signalverarbeitung arbeiten. Ohne diesen Fortschritt gäbe es die schon erwähnten Virtualisierungen des Variophons

nicht. Deshalb werden einige dieser Entwicklungen, wie etwa MIDI oder digitale Signalverarbeitung auch in dieser Arbeit behandelt. Es soll eine Zeitreise unternommen werden, die beim analogen Variophon beginnt und bei seinen Emulationen am Computer endet. Auf der Wegstrecke soll alles, was diese Emulationen ermöglicht hat, mitgenommen werden.

So wird in Kapitel 2 zur elektronischen Klangerzeugung zunächst die Stellung des Variophons innerhalb der Familie der Elektrophone dargestellt. Danach werden die Synthesizer behandelt, wobei in diesem Kapitel ihre historische Entwicklung zusammengefasst wird. Dies deshalb, weil viele der Funktionsprinzipien, die in diesen Geräten zu finden sind, auch Bestandteil der eingesetzten Entwicklungsumgebung zur Virtualisierung sind. Diese Entwicklungsumgebung (SynthEdit) als Vertreter der Software-Synthesizer wird hier ebenfalls vorgestellt.

In Kapitel 3 werden die theoretischen Grundlagen aufbereitet. Zu diesen zählt die Klangbildung bei Blasinstrumenten, die über klangbestimmende Formanten zur Impulsformungstheorie führt. Ein weiterer Abschnitt ist der digitalen Welt gewidmet. In diesem werden die digitale Signalverarbeitung als Grundpfeiler moderner Audiotechnologie sowie MIDI als standardisiertes Bindeglied zwischen elektronischen Klangerzeugern vorgestellt. Im dritten Teil von Kapitel 3 wird die Funktionsweise von Synthesizern erklärt. Damit soll ein Teil der Grundlagen für die später erörterte Virtualisierung gelegt werden. Im letzten Teil des Kapitels findet sich ein Überblick über die gängigsten Methoden der Klangsynthese.

Dem Variophon selbst ist Kapitel 5 gewidmet. Das analoge Variophon wird detailliert beschrieben. Die Funktionsweise und das Zusammenwirken seiner Hauptbestandteile werden erklärt. Ein besonderes Augenmerk ist dabei dem dynamischen Verhalten des Gerätes gewidmet, da dieses zu dessen größten Stärken zählt. Daran schließt in einem zweiten Abschnitt eine Beschreibung der gegenwärtigen Version der selbst erstellten Virtualisierung an.

Zum Abschluss wird in Kapitel 6 eine kleine Gegenüberstellung zwischen der Virtualisierung und dem analogen Gerät vorgenommen. Diese erfolgt anhand von Vergleichen zwischen Spektren des elektronischen Instrumentes mit solchen der virtuellen Version. Auch Messdaten, die mit einem reellen Fagott aufgenommen wurden, werden einbezogen. Damit soll der gegenwärtige Entwicklungsstand der Virtualisierung beurteilt werden, sowie ein Ausblick auf noch umzusetzende Verbesserungen bzw. Erweiterungen gegeben werden.

2 Elektronische Klangerzeugung

Die künstliche Erzeugung von Klängen ist das Bemühen, natürlich erzeugte, d.h. mit natürlichen Instrumenten erzeugte Klänge auf andere Art zu generieren. Dieses Bemühen mag aus unterschiedlichen Motivationen erfolgen, letztendlich trägt es auch bei zu verstärkter Analyse und damit zu gesteigertem Verständnis von Klangerzeugungsprozessen. Mit dem technischen Fortschritt der letzten ein- bis zweihundert Jahre ist auch eine intensive Beschäftigung mit künstlicher Klangerzeugung zu beobachten. Anfänglich waren eher mechanische Komponenten vorherrschend, die auf leicht modifizierten Instrumenten in erster Linie die InstrumentalistInnen, d.h. deren unmittelbaren körperlichen Einsatz bei der primären Tonerzeugung ersetzen sollten. Mit dem Beginn der Elektronik, zunächst der Röhren- und später der Halbleitertechnik, kam es vermehrt zu Entwicklung von technischen Apparaturen, die in ihrem Erscheinungsbild mit den ursprünglichen Instrumenten nur mehr wenig gemeinsam hatten. Hier soll ein Überblick über die wichtigsten Stationen dieser Entwicklung gegeben werden. Das Hauptaugenmerk liegt auf den Synthesizern, da deren Methodik auch Teil von modernen Softwarelösungen ist.

2.1 Die systematische Einordnung des Variophons

Das Variophon wird auch als Blasssynthesizer bezeichnet, da für die Tonerzeugung wichtige Parameter wie Lautstärke und Klangfarbe u.a. mit Hilfe eines Blaswandlers erzeugt werden können. Blaswandler sind Flöten- oder melodikaähnliche Steuereinrichtungen, die den Anblasdruck in Spannungen oder in modernen Versionen auch in MIDI-Daten umwandeln und somit eine nuancenreiche Beeinflussung des Spiels zulassen (vgl. Enders 1997, 33). Dadurch mag es berechtigt erscheinen, das Instrument auch als Synthesizer zu bezeichnen. Die klassische Synthesizer-Architektur, die auf fast beliebig kombinierbaren autonomen Modulen beruht, ist im Variophon allerdings nicht vorzufinden.

Es soll auch die Positionierung des Variophons als elektronisches Musikinstrument innerhalb der entsprechenden Abteilung der Instrumentensystematik erörtert werden. In der auf Hornbostel und Sachs zurückgehenden Systematik finden sich

in Hauptgruppe 5 die Elektrophone¹. Hinzugefügt wurden diese von Dräger (1948, 6, 43-46). Sie werden definiert als *Instrumente die mechanische Mittel, elektronisch gespeicherte Information oder elektronische Schaltkreise zur Erzeugung von Klängen, die über Lautsprecher ausgegeben werden, verwenden.*² Die Elektrophone untergliedern sich in 5 Hauptgruppen: Elektroakustische Instrumente (51), Elektromechanische Instrumente (52), Analoge elektronische Instrumente (53), Digitale Instrumente (54), Analog-Digitale Hybridformen (55) und Software (56). In die Hauptgruppe der Elektrophone können sowohl das analoge Variophon als auch dessen digitale Emulationen eingeordnet werden.

Funktionalität / Gerät	Synthesizer	Analoges Variophon	Virtualisiertes Variophon
Modularität	fast unbegrenzt	nur im Bezug auf Instrumentenmodule	nützt modulares Grundkonzept reeller Synthesizer
Ursprungssignale	jegliche Art von Wellenform	Rechteckwelle aus IC	Rechteckwelle aus Oszillator-Modul (VCO)
interner Signalfluss	Analoge (normierte) Steuerspannungen Digitale Logik	proprietäres Spannungsschema	virtuelle Spannungen
Signalfluss von und zur Peripherie	Analoge Steuerspannungen MIDI	proprietäres Spannungsschema	MIDI
Syntheseform	vielfältig, geräteabhängig	Impulsformung (dynamische Pulsweitenmodulierung & Subtraktive Synthese)	
Monophon / Polyphon	geräteabhängig	ausschliesslich monophon	
Peripherie	Keyboards diverse MIDI-Geräte	Blaswandler oder Keyboard mit separatem Blaswandler, u. a.	MIDI Keyboard MIDI Blaswandler (Casio Digital Horn)
Dynamiksteuerung	allgemein über MIDI	Blaswandler und Impulsformung ausgerichtete Elektronik	MIDI-Controller, MIDI-Blaswandler und nach Impulsformung ausgerichtete Anordnung von virtuellen Einheiten
Analog / Digital	analog, digital und Hybridformen	analog	digitale Nachstellung analoger Vorgänge

Tab. 2.1. Grundsätzliche Unterschiede zwischen Synthesizern, Variophon und Virtualisierung.

Das analoge Variophon selbst lässt sich in die Untergruppe 531.2 Systematik der einordnen. Diese enthält *analoge Synthesizer und andere elektronische Instrumente, die mit integrierten Schaltkreisen (Transistor und/oder IC) elektrische Klangsignale erzeugen und/oder verarbeiten.* Eine weitere Untergliederung erfolgt nach der jeweils verwendeten Syntheseform (additiv, subtraktiv, etc.) Für die im Variophon bzw. dessen Vormodellen erst- und einmalig umgesetzte Impulsformung - bei Enders auch *Real Sound Processing* genannt (1997, 342) - existiert allerdings keine eigene Kategorie.

¹ Die Auflistung der Elektrophone findet sich im Anhang (7.1, S. 101).

² Aus dem Englischen übersetzt, siehe Definition im Anhang.

In Tab. 2.1 werden die grundsätzlichen Unterschiede zwischen Synthesizern im allgemeinen, dem Variophon und dem virtualisierten Variophon angeführt. Diese Aufstellung soll die Abgrenzung des Variophons gegenüber den Synthesizern erkennbar machen und zugleich aufzeigen, dass die Virtualisierung mit Elementen arbeitet, die ihren Ursprung in der traditionellen Synthesizerwelt haben. Ein Blick in die Systematik zeigt auch, welche unterschiedlichen Analyseansätze existieren und wie diese im Bereich der Elektrophone umgesetzt wurden. Die hier angeführten Unterscheidungskategorien und ihre jeweiligen Ausprägungen werden im Zuge dieser Arbeit detailliert besprochen. Dabei befasst sich ein wesentlicher Teil mit der Funktionsweise, der historischen Entwicklung und den unterschiedlichen Varianten von Synthesizern. Zum einen soll dadurch eine Abgrenzung und präzise Positionierung des analogen Variophons innerhalb der Elektrophone ermöglicht werden. Dazu werden Gemeinsamkeiten und Unterschiede analysiert. Zum anderen soll das Konzept Synthesizer in vertiefender Weise vorgestellt werden, weil es auch Basiskonzept der verwendeten Software zur Virtualisierung (SynthEdit) ist.

2.2 Frühe Elektrophone

Etwa um die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts wurden die ersten Geräte oder Anlagen zur künstlichen Generierung von Klang mit mechanischen, elektrischen, später elektronischen Mitteln erzeugt. In den mehr als hundertfünfzig Jahren, die seither vergangen sind, ist eine beachtliche Anzahl von Instrumenten dieser Art entstanden. Im Umfeld des Variophons sind vor allem Synthesizer von Interesse. Diese basieren auch auf Methoden und Erkenntnissen, die in Instrumenten der Vor-Synthesizer-Ära entwickelt wurden. Seit die Elektrizität Teil des menschlichen Alltags ist, gibt es auch Bemühungen, elektrische Schaltkreise für musikalische Zwecke zu nützen. So präsentierte Elisha Gray bereits 1874 seinen ‘musical telegraph’, ein Verbund von Oszillatoren (pro Ton ein elektromagnetischer Schaltkreis), der von einer zweioktavigen Tastatur gesteuert wurde (vgl. Ruschkowski 1998, 17).

Um die Jahrhundertwende konstruierte Thaddeus Cahill das *Dynamophone*, eine elektromechanische Riesenanlage zum Betreiben von Klangsynthese. Mit Hilfe von Zahnrädern als Tongeneratoren wurden mit enormem Aufwand Sinustöne erzeugt und zu Klängen zusammengemischt. Die Anlage besaß noch keinen eige-

nen Verstärker, als Wiedergabemedium wurde das öffentliche Telefonnetz von New York verwendet, weshalb die Anlage auch Telharmonium genannt wurde. Der unverhältnismäßig hohe Aufwand (die Anlage hatte ein Gewicht von fast 200 Tonnen) führte bald zu einem Ende von Cahills Projekt. Das Prinzip der Klangerzeugung (Additive Synthese, siehe auch 3.4.1, S. 63) jedoch wurde später in der Hammondorgel wieder verwendet. Dieses Gerät (entwickelt 1929) verwendete ebenfalls Zahnradgeneratoren, die Steuerung erfolgte elektromagnetisch, die kompakte Bauart macht es zu einem Instrument für den privaten Hausgebrauch (vgl. Ruschkowski 1998, 18-23).

Um 1920 wurde von Lew Termen das *Ätherophon* entwickelt.³ Es handelt sich hierbei um einen Schwebungssummer der eine Differenzschwingung aus zwei hochfrequenten, für das menschliche Ohr nicht hörbaren Schwingungen erzeugt. Gespielt wird das Instrument berührungslos. Mit Handbewegungen werden Tonhöhe und Lautstärke variiert, indem elektromagnetische Felder, die von zwei Antennen ausgehen, 'gestört' werden (vgl. Ruschkowski 1998, 24-35).

Angeregt durch das Theremin entwickelte Maurice Martenot in den 1920-er Jahren die *Ondes Martenot*. Der siebenoktavige Schwebungssummer konnte auch mit einem Ring gespielt werden, der entlang eines Drahtes auf- und abgeschoben wurde und ein glissando artiges Verändern der Tonhöhe erlaubte. Eine zusätzliche Veränderung der Klangfarbe durch Filter war ebenfalls möglich (vgl. Ruschkowski 1998, 47-55).

Ein Instrument, das auf Grund seiner Bau- und Funktionsweise zwischen den frühen Elektrophonen und den ersten Synthesizern steht, ist das *Mellotron*. Es wurde in England entwickelt und vertrieben. Eine erste brauchbare Version kam 1965 auf den Markt. Man kann das Instrument als frühen Sampler bezeichnen. Gespielt wurde auf zwei nebeneinander gelegten Manualen, wobei sich im linken Manual 18 Tasten für die Rhythmussektion und 17 für Begleitakkorde, im rechten 35 Tasten für Melodiespiel befanden. Für jede Note gab es ein Band, untergliedert in 18 Passagen (jeweils 6 in 3 Parallelsuren), diese wurden durch eine Vor- und Rückspuleinrichtung angesteuert. Die Bänder konnten je nach dem, was aufgenommen wurde, mit unterschiedlichen Klängen, Effekten oder Instrumenten belegt werden (wie in späteren Geräten Klangmodule). Es war auch möglich, Klangbibliotheken

³ Auch als Theremin oder Termenvox bezeichnet.

mit eigenen Aufnahmen (die man überspielen lassen musste) zu erstellen. Das Mellotron wurde recht häufig in der Pop-Musik eingesetzt, u.a. von den Beatles 1967 in *Strawberry Fields Forever* (vgl. Becker 1990, 25-28).

2.3 Klangmaschinen der Pionierzeit in Deutschland und Österreich

Die folgende Zusammenfassung der Entwicklung elektrischer Klangerzeuger in Deutschland und Österreich bis 1945 wurde nach Donhauser (2007) und Ruschkowski (1998) erstellt.

Bereits gegen Ende des 19. Jahrhunderts wurden die ersten elektromagnetischen *Dauerton-Klaviere* konstruiert. Die primäre Klangerzeugung erfolgte bei diesen Instrumenten noch auf konventionelle Art, die Tonmanipulation durch zusätzlich eingebaute elektrische Komponenten. Mit Wechselstrom betriebene Elektromagnete hielten die Saiten in andauernder Erregung, zur Steuerung dieser Ströme gab es unterschiedliche Methoden. Eine Lösung arbeitete mit Mikrofonen, die am Resonanzboden angebracht waren und die Schwingungen der Saite gleichphasig an die Elektromagneten weitergaben, wodurch sich stabile Schwingkreise aufbauen konnten.

1929 wurde in Wien das von Emerich Spielmann gebaute *Superpiano* vorgestellt. Dieses Instrument funktionierte nach dem Lichttonverfahren, das periodische Unterbrechungen von Lichtstrahlen in Stromimpulse umwandelt, die tonfrequenten Signalen entsprechen. Im *Superpiano* rotieren 12 identische Scheiben mit je 7 Schlitzspuren, die die Wellenform des erzeugten Tons abbilden. Die Scheiben rotieren in unterschiedlicher Geschwindigkeit, wodurch 12 Halbtöne erzeugt werden können. Je nach Oktavlage wird Licht durch eine der 7 Spuren geschickt, wodurch das Spiel in 7 Oktaven möglich ist.

1930 wurde in Deutschland in einer Rundfunksendung das *Hellertion* präsentiert. Dieses von Bruno Helberger und Peter Lertes konstruierte Instrument erzeugte seine Töne mittels einer Röhrenschaltung, die eine obertonreiche Schwingung generierte, die in Folge noch gefiltert wurde. Die Tonwahl erfolgte über Bandmanuale, wobei stufenlos in beliebiger Tonhöhe gespielt werden konnte. Eine Weiterentwicklung des Instrumentes war durch den Einsatz von vier Bandmanualen vierstimmig spielbar.

Ebenfalls 1930 wurde von der Wiener Klavierbaufirma Stelzhammer nach einem Entwurf von Wilhelm Lenk das *Magnetton* gebaut. Bei diesem Instrument sorgen Zahnscheiben (ähnlich wie bei der Hammondorgel) für tonfrequente Wechselströme. Diese Ströme werden Spulen entnommen, vor welchen die Zahnscheiben rotieren, die Tonhöhe variiert mit der Umdrehungszahl.

1931 wurde in Berlin der von der Firma Bechstein gebaute *Neo-Bechstein* der Öffentlichkeit präsentiert, ein elektroakustisches Klavier ohne Resonanzboden (dessen Funktion übernahmen Röhrenverstärker und Lautsprecher). Entwickelt wurde dieses Instrument von Walter Nernst, Hans Driescher und Oskar Vierling. Die hier verwendete Methode der Tonabnahme (Abnahme der Saitenschwingungen durch Magnetspulen) war 1928 von Stephan Frankó patentiert worden.

Beim ebenfalls von Oskar Vierling entwickelten *Elektrochord* erfolgte die Tonabnahme mit elektrostatischen Mitteln: Schwingungen führen zu Kapazitätsveränderungen und damit zu Lade- und Entladeströmen. Ein erstes Modell des Elektrochord wurde 1932 in der Berliner Funkausstellung vorgestellt.

Ebenfalls mit Lichttontechnik funktionierte die *Lichttonorgel* von Edwin Welte, die 1936 der Öffentlichkeit präsentiert wurde. Sie besaß zwei Manuale und ein Pedal mit insgesamt 16 Registern. Die Oszillogramme zur Tongenerierung wurden mittels Tonaufzeichnung von realen Instrumenten (Orgeln und Blasinstrumenten) gewonnen.

Ein wichtiger Pionier der Elektromusik war Jörg Mager. Seine Entwicklungen wurden als vielversprechend und zukunftsweisend angesehen. Von diesen seien das *Sphärophon* und das *Partiturophon* erwähnt. Das Sphärophon war ein in stufenloser Tonhöhe spielbares, monophones Instrument. Mager wollte die Grenzen des Zwölf-Halbtöne-Schemas aufbrechen, kehrte später jedoch zurück zur Verwendung von konventionellen Tastaturen mit zwölf Halbtönen. Im Partiturophon wird vierstimmige Polyphonie durch den Einsatz von vier monophonen Klaviaturen ermöglicht. Zur Tongenerierung verwendete Mager obertonreiche Sägezahn-schwingungen, die mittels Röhrentechnik erzeugt wurden. Seine Instrumente wurden vor allem wegen ihres reichen Vorrats an unterschiedlichen Klangfarben gelobt. Trotz aller Errungenschaften schaffte Mager es nicht, seine Entwicklungen konsequent voranzutreiben bzw. abzuschließen. Keines der Geräte erlangte je Serienreife, ein Umstand der nicht zuletzt auf die als schwierig beschriebene Persönlichkeit Magers zurückgeführt werden kann.

Eines der wenigen Instrumente der deutschen Pionierzeit, die auch noch nach 1945 lange in Verwendung standen, war das *Trautonium*. Die erste Version dieses Instrumentes wurde von Friedrich Trautwein konstruiert und 1930 vorgestellt. Zur Tonerzeugung diente die Kippschwingung eines Glimmlampengenerators (der in späteren Versionen durch Röhren ersetzt wurde), über ein Bandmanual konnte in stufenloser Tonhöhe gespielt werden. Eng verknüpft ist die weitere Entwicklung des Trautoniums mit dem Pianisten und Komponisten Oskar Sala. Er beschäftigte sich als Ein-Mann-Unternehmen bis zu seinem Lebensende 2002 fast ausschließlich mit dem Instrument, indem er einerseits permanent dessen technische Weiterentwicklung vorantrieb und es andererseits regelmäßig in virtuosen Auftritten präsentierte. Varianten des Trautoniums waren das Volkstrautionium (1934) mit zwei Formantfiltern, das Rundfunk-Trautionium (1935) mit zwei Bandmanualen mit jeweils zwei Filtern und Hilfstasten, das Konzert-Trautionium (1938), sowie das Mixtur-Trautionium (1952), das auch in der Lage war, Subharmonische zu erzeugen. Das Mixtur-Trautionium besaß mehrere Register in welchen über Filter unterschiedliche Frequenzbereiche geregelt und damit unterschiedliche Klangfarben voreingestellt werden konnten. Diese Register konnten während des Spiels über Pedale ein- oder ausgeschaltet werden, wodurch dieses Instrument in seiner Funktionsweise durchaus einem analogen Preset-Synthesizer (siehe auch 2.4.1.3, S.16) ebenbürtig war. Für das Trautionium wurden zahlreiche Kompositionen geschrieben, nicht nur von Oskar Sala selbst, sondern auch von anderen namhaften Komponisten wie etwa Paul Hindemith.

2.4 Synthesizer

Synthesizer sind elektronische Klangerzeuger, die Klangsynthese mit Hilfe von modularen Funktionseinheiten betreiben. Ihre Funktionsweise wird (in 3.3) detailliert beschrieben. Hier soll zunächst ein Überblick über die historische Entwicklung dieser Geräte gegeben werden. Danach wird noch SynthEdit als Vertreter der Software-Synthesizer vorgestellt.

2.4.1 Historische Entwicklung der Synthesizer

In diesem Kapitel werden die populärsten Vertreter der Synthesizer vorgestellt. Beginnend mit den Großanlagen à la Keith Emerson über die kompakten mo-

nophonen Geräte geht es zu den programmierbaren polyphonen Geräten bis hin zu Samplern und Geräten, die während einer analogen Renaissance auf dem Markt auftauchten. Eine zusammenfassende tabellarische Übersicht dazu findet sich im Anhang (siehe 7.2, S.103).

Mit dem Fortschritt der Entwicklung ist auch die Zahl der Unterscheidungskriterien gewachsen. Die wichtigsten dieser Kriterien seien vorab erwähnt: Bauart (modular oder kompakt), Arbeitsweise (analog, digital, hybrid), Stimmen (monophon, polyphon), Synthesemethoden (subtraktiv, additiv, Frequenzmodulation, Sampling, Mischformen), Anzahl Type der Filter (Tiefpass, Hochpass), Programmierbarkeit und MIDI-Anbindung. Die folgende Zusammenfassung orientiert sich an Becker (1990 und 1995), Fortune et al. (2007, 295-297) und Ruschkowski (1998, 136-145).

2.4.1.1 Analoge modulare Synthesizer

Analoge modulare Synthesizer sind das Urmodell des Klangbaukastensystems Synthesizer (vgl. Enders 1997, 311). Sie waren ähnlich den frühen Großcomputer-Anlagen, die fast ausschließlich von Experten bedient werden konnten. Die einzelnen Module waren jeweils als völlig autonome Funktionseinheit ausgeführt. Diese Einzelkomponenten konnten beliebig angeordnet werden und mittels externer Verkabelung (engl. patchcords) beliebig miteinander verbunden werden. Auch die Anzahl der verwendeten Module war dadurch nicht auf eine bestimmte Höchstmenge beschränkt. Dies brachte eine hohe Flexibilität und führte zu vielen unterschiedlichen Verbindungsvarianten, die je nach Einsatz neu gesteckt werden mussten, was andererseits die Bedienung auch unübersichtlich und kompliziert machte. Die Entwicklung der modularen Großsysteme geht zurück auf Robert Moog. Bereits 1964 stellte Moog Prototypen seiner ersten Synthesizerkomponenten auf der Jahrestagung der AES⁴ vor. Das Konzept der Spannungssteuerung, das ebenfalls von Moog entwickelt wurde, beschreibt dieser in einem Aufsatz im Journal der AES (Moog 1965). Zwischen 1965 und 1968 wurden von Moogs Firma Großsysteme (Model 15, 35 und 55) in kleinen Stückzahlen gefertigt. *Model 15* war eine transportable Ausführung, *Model 35* war für den stationären Stu-

⁴ Audio Engineering Society; die 1948 in den USA gegründete Vereinigung widmet sich exklusiv der Audio Technologie und zählt derzeit weltweit ca. 14000 Mitglieder. Quelle: www.aes.org, 16.10.2012.

diobetrieb konzipiert. Es enthielt u.a. 5 VCO's⁵, 3 VCA's⁶, 3ADSR's⁷, Tief- und Hochpassfilter⁸. Das größte Gerät dieser ersten serienmäßigen Fertigung war das *Model 55*. Es bestand aus einer Konsole, die dem Model 35 entsprach, sowie einer Erweiterung mit 18 zusätzlichen Modulen. 1969 veröffentlichte die Komponistin Wendy Carlos die LP *Switched on Bach*. Die darin wiedergegebenen Werke von Bach wurden ausschließlich mit Moog-Synthesizern eingespielt. Der durchschlagende Erfolg der LP verhalf auch Moog und seinen Geräten zu einem Durchbruch. Musiker von Weltklasse wie George Harrison, Mick Jagger oder Keith Emerson wurden zu seinen Kunden (vgl. Becker 1990, 8-12).

Ein weiterer Konstrukteur von Großsystemen war Donald Buchla. Seine "*100 Series*" wurde 1966 vorgestellt. Sie basierte im Wesentlichen auf Moogs Konzepten der Spannungssteuerung, unterschied sich allerdings in zwei Punkten von Moog: zum einen gab es einen Sequenzer⁹ als elektronische Alternative zum mechanischen Aneinanderfügen einzelner Tonbandsegmente, zum anderen eine Steuerungsmöglichkeit in Form von Sensortasten, die die Möglichkeiten der herkömmlichen mechanischen Steuerungen um einiges übertraf. Buchlas Geräte wurden nur in kleinen Stückzahlen gefertigt und fanden ihre Abnehmer vornehmlich in Hochschulen oder Elektronikstudios (vgl. Becker 1990, 14).

Der mit *Switched on Bach* ins Leben gerufene Synthesizer-Boom führte 1969 zur Firmengründung von ARP, eine Firma, die sich sehr bald zu einem ernstzunehmenden Konkurrenten von Moog entwickelte. ARPs Einstieg begann 1969 mit dem *ARP 2500*. Dieses Großsystem besaß bereits einen Sequenzer (für 3x10 Steps), konnte Sample and Hold¹⁰ und war begrenzt polyphon (vgl. Becker 1995, 23-26).

Das größte in Serie gebaute Modulsystem ist der 1971 von EMS entwickelte *EMS Synthesi 100*. Eine dieser Anlagen (gefertigt für eine Universität) besaß u.a. 80 VCAs und über 300 Ein- und Ausgänge. Der Synthesi 100 wurde auch von Karlheinz Stockhausen verwendet, der vor allem die Möglichkeiten von dessen Digitalsequenzer schätzte (vgl. Becker 1995, 27-32).

⁵ Voltage Controlled Oscillator (siehe 3.3.1, S. 48).

⁶ Voltage Controlled Amplifier (siehe 3.3.3, S. 54).

⁷ Attack – Decay – Sustain – Release (siehe 3.3.4, S. 55).

⁸ Filter (Siehe 3.3.2, S. 50).

⁹ Siehe 3.3.5.7, S. 59.

¹⁰ Siehe 3.3.5.8, S. 59.

2.4.1.2 Monophone analoge Kompaktsynthesizer

Eine neue Entwicklung setzte ab 1969 mit dem Auftreten der Kompaktsynthesizer ein. Diese Geräte unterschieden sich von ihren monströsen Vorgängern vor allem durch den Wegfall der externen Kabelverbindungen. Der von der britischen Firma EMS gebaute *EMS VCS 3* war eines der ersten Gerät dieser Klasse. Ihm folgte 1971 der *Synthi A*, technisch seinem Vormodell gleich, nur so kompakt gebaut, dass man ihn in einem Aktenkoffer unterbringen konnte. In beiden Geräten wurde anstelle der Kabel ein Kreuzschienensteckfeld (engl. patch-matrix) zur Verbindung der Module eingesetzt. Die Verbindungen konnten dadurch um einiges übersichtlicher als mit dem sonst üblichen Kabelsalat hergestellt werden (vgl. Becker 1990, 16-18; Vail 2000, 110-114).

Mit dem *Minimoog* von Bob Moog kam 1970 der erste kommerziell erfolgreiche Kompaktsynthesizer auf den Markt. Sein Grunddesign gilt als Vorlage für die klassische Synthesizer-Architektur. Einige der Schaltungen wurden von den großen Modulsystemen übernommen (u.a. Filtersektion), andere Baugruppen speziell für diese Gerät neu entwickelt (u.a. Oszillatoren und ADSR). Der Minimoog verfügt über drei VCO's, von denen einer auch als LFO¹¹ eingesetzt werden kann. Weiters gibt es einen Mixer¹², einen Tiefpassfilter mit Resonanz und zwei ADSR's (einmal für Filter und einmal für VCA). Mit der einfachen Anordnung der Bedienungselemente setzte das Gerät Maßstäbe in punkto Übersichtlichkeit und Benutzerfreundlichkeit. Der Tiefpassfilter (4-pole¹³) mit einer Flankensteilheit von 24 dB/Oktave ist heute noch legendär für seinen warmen und weichen Klang. Zahlreiche populäre Musiker - unter ihnen Chick Corea oder Keith Emerson - haben mit dem Minimoog den Sound der Studioproduktionen der 70er Jahre geprägt und damit zu seiner Popularität beigetragen, was sich auch in den Verkaufszahlen widerspiegelt: bis zur Einstellung der Produktion 1981 wurden über 13.000 Minimoogs produziert (vgl. Becker 1990, 19-20; Vail 2000, 159-166).

Als Konkurrenzprodukt zum Minimoog kam 1970 der *ARP 2600* auf den Markt. Es war eine Kompaktversion von ARPs großem Modulsystems *ARP 2500*. Während beim *ARP 2500* die Module über Patch-Matrixes (wie beim *EMS VCS 3*) zu verbinden waren, wurde beim *ARP 2600* dafür eine interne Verkabelung verwen-

¹¹ Low Frequency Oscillator (siehe 3.3.1.3, S. 50).

¹² Siehe 3.3.5.3, S. 58.

¹³ d.h. der Filter arbeitet mit vier internen Filterinstanzen (siehe auch 3.3.2, S. 50).

det. Zusätzlich gab es die Möglichkeit, mit traditionellen Patchkabeln andere Verbindungsvarianten zu stecken und damit die werksmäßigen Voreinstellungen außer Kraft zu setzen. Was den ARP 2600 zu einer interessanten Alternative zum Minimoog machte, waren dessen zusätzliche Features wie Rauschgenerator¹⁴, Ringmodulator¹⁵, Mikrofonvorverstärker u.v.m. Auch verhielten sich die Oszillatoren von ARP wesentlich stimmstabiler als die von Moog. Insgesamt war der ARP 2600 ein übersichtliches Gerät, wozu auch die mit Verbindungslinien grafisch unterlegten Schieberegler beitrugen. Einer der prominenten Musiker, die dieses Gerät benutzten, war neben anderen der Österreicher Joe Zawinul (vgl. Becker 1990, 21-24; Vail 2000, 124-134).

Ebenfalls von ARP kam ab 1972 deren Odyssey-Serie auf den Markt, eine verkleinerte Weiterentwicklung des ARP 2600. Der *Odyssey Mk I (Model 2800)* wurde als direktes Konkurrenzprodukt zum Minimoog gebaut und besaß einen ähnlichen Funktionsumfang wie dieser. Als zusätzlich Features enthielt er einen Hochpassfilter (einsetzbar in Serie mit dem Tiefpass), Oszillator-Synchronisation¹⁶, Pulsweitenmodulation¹⁷ und eine bereits duophone Tastatur (vgl. Becker 1990, 29-31).

1978 brachte Moog eine Weiterentwicklung des Minimoog, den *Multimoog* heraus. Dieser besaß eine Reihe von Sounds und Effekten, die man beim Minimoog noch nicht findet: Sample and Hold, Pulsweitenmodulation, Oszillatorsynchronisation und eine druckempfindliche Tastatur (vgl. Becker 1990, 65-67).

Ein vielseitiges Gerät war der *Korg MP-4 (Korg Mono/Poly)* aus dem Jahr 1982. Er besaß u.a. 4 VCO's, 2 LFO's, Oszillator-Synchronisation, Kreuzmodulation¹⁸ und war bei Bedarf mit bereits vierstimmiger Polyphonie spielbar (vgl. Becker 1990, 95).

2.4.1.3 Polyphone programmierbare analoge Synthesizer

Wichtige Merkmale dieser Klasse sind Mehrstimmigkeit und Programmierbarkeit. Unterschiedliche Klangprogrammierungen können als Presets in einem Speicher (engl. patch memory) abgelegt und von dort rasch wieder abgerufen werden, ver-

¹⁴ Siehe 3.3.5.1, S. 57.

¹⁵ Siehe 3.3.5.2, S. 57.

¹⁶ Siehe 3.3.5.9, S. 60.

¹⁷ Siehe 3.3.5.10, S. 60.

¹⁸ Siehe 3.3.5.11, S. 60.

gleichbar mit dem Zugriff auf unterschiedliche Register beim Orgelspiel (vgl. Enders 1997, 242).

Als eines der ersten dieser Geräte, die wegen ihrer Speichermöglichkeiten auch als Preset-Synthesizer bezeichnet werden, kam 1978 der *Prophet 5* von *Sequential Circuits* auf den Markt. Eine intelligente Bedienerführung und die Möglichkeit, alle Reglerpositionen zu speichern, zeichnen ihn gegenüber anderen Preset-Maschinen seiner Zeit aus. Er war fünfstimmig polyphon. Jeder Stimme waren zwei Oszillatoren, ein Filter, ein VCA und zwei ADSR's zugeordnet. Er besaß einen Generator für weißes Rauschen und konnte 40 (in späteren Ausführungen 120) programmierbare Presets speichern (vgl. Becker 1990, 52-54; Vail 2000, 173-177).

1979 folgte die *OB*-Serie von Oberheim. Deren Geräte waren bis zu 8-stimmig polyphon und besonders leicht zu programmieren. Man konnte bis zu 124 Einstellungen speichern (vgl. Fortune et al. 2007, 296).

Ein Nachfolgemodell des Prophet 5, der *Prophet 600*, wurde 1982 als erster Synthesizer, der serienmäßig mit MIDI¹⁹ ausgestattet war, vorgestellt. Als abgespeckte Version des Prophet 5 konnte sich das Gerät allerdings kommerziell nicht durchsetzen, vor allem scheiterte es 1983 an der übermächtigen Konkurrenz des Yamaha DX7 (vgl. Becker 1995, 114-115).

Achtstimmig polyphon war der ab 1980 erhältliche *Roland Jupiter-8*, eines der ersten Geräte mit der Möglichkeit des Keyboard Split. Im Split-Modus konnten zwei Sounds gleichzeitig gespielt werden, indem je ein Sound einer Hälfte des Keyboards zugeordnet werden konnte. Im Dual-Modus konnten zwei Klänge übereinandergelegt werden. Weiters erwähnenswert ist die Möglichkeit von Arpeggio-Effekten. Der Jupiter-8 war auch eines der Geräte, die eine DCB²⁰-Schnittstelle besaßen. Eine abgespeckte Variante des Jupiter-8, der *Jupiter-6* wurde 1983 als eines der ersten serienmäßig MIDI-fähigen Geräte herausgebracht (vgl. Becker 1990, 86-89; 1995, 116-117).

Mit dem *Korg Trident* konnte man 1980 ein ebenfalls achtstimmig polyphones Gerät erwerben. Der Trident war Korgs Antwort auf den Jupiter 8. Er enthielt drei unterschiedliche Sektionen: Streicher, Bläser und Synthesizer, jede Sektion mit

¹⁹ Siehe 3.2.2, S. 38.

²⁰ DCB = Digital Communication Bus, ein nur von Roland verwendeter, firmeninterner Schnittstellenstandard zur Koppelung von Synthesizern. DCB konnte sich auf Grund seiner - im Vergleich zu MIDI - mehr als begrenzten Möglichkeiten nicht durchsetzen (vgl. Becker 1990, 97).

achtstimmiger autonomer VCO-, VCF- und LFO-Architektur. Die Sektionen konnten gleichzeitig genutzt und miteinander kombiniert werden. Darüber hinaus gab es noch einen eigenoszillationsfähigen globalen Flanger²¹. Im Patch-Speicher konnten 16 (später 32) eigene Settings abgelegt werden, zusätzlich gab es drei Voreinstellungen für Klavierklänge (vgl. Becker 1990, 86-89; Vail 2000, 196).

1982 versuchte Moog mit dem *Memorymoog* mit der Entwicklung Schritt zu halten und auch den bevorstehenden Bankrott abzuwenden (was beides nicht gelang). Trotz sechs Minimoogs in einem Gerät, Oszillator Synchronisation, Sample and Hold, Filter für jede Stimme, Speicher für 100 Presets u.v.m. scheiterten der *Memorymoog* und sein 1984 erschienener Nachfolger, der *Memorymoog Plus*. Daran konnten auch die (sehr eingeschränkte) MIDI-Fähigkeit und der Sequenzer des Plus-Modells nichts ändern (vgl. Becker 1990, 102-104).

Mehr Erfolg war 1981 dem *Korg Polysix* beschieden. Er besitzt sechs-stimmige Polyphonie, programmierbare Effekte, Chorus²², Phasing²³ und Ensemble²⁴, 32 Speicherplätze sowie die Möglichkeit, den Speicher auf Kassette zu sichern. All dies trug zum Erfolg dieses Gerätes bei, am meisten aber dessen Verkaufspreis: der *Polysix* wurde von Korg als verspätetes Konkurrenzprodukt zum *Prophet 5* auf den Markt gebracht und kostete nur ein Drittel von dem, was man für den *Prophet* bezahlen musste (vgl. Becker 1990, 93-95).

Zeitgleich mit dem *Polysix* erschien der *Roland Juno 60* am Markt. Er war ebenfalls sechs-stimmig polyphon und besaß 56 Speicherplätze. Als Oszillatoren wurden bereits DCO's²⁵ verwendet. Optional gab es einen extern anzuschließenden Sequenzer. Dessen maximale Speicherkapazität lag bei 4000 Noten, die Daten konnten extern auf Band gespeichert werden. (vgl. Becker 1990, 96-97).

Der Fortschritt in der digitalen Technik machte auch vor den Synthesizern nicht Halt. Optisch zu erkennen war das an Geräten, die nun weniger Schieberegler oder Drehknöpfe besaßen. An deren Stelle wurden Dateneingabe und Programmwahl vorrangig. Maßgeblich beteiligt an dieser Entwicklung war Korg. 1983 erschien der *Poly 61* (als Nachfolger des *Poly Six*), er besaß u.a. zwei DCO's, 64

²¹ Siehe 3.3.5.4, S. 58.

²² Siehe 3.3.5.5, S. 58.

²³ Siehe 3.3.5.6, S. 59.

²⁴ Das Zusammenspiel mehrerer unterschiedlicher Registrierungen (vgl. Enders 1997, 83).

²⁵ Digitally Controlled Oscillator, digital gesteuerter Oszillator.

Programmspeicherplätze und ein integriertes Kassetten-Interface zur Sicherung der Daten (vgl. Fortune et al. 2007, 296; Becker 1995, 118-119).

1984 brachte Korg den *Korg Poly 800* heraus. Dieser bot die Möglichkeit in 54 Speicherplätzen bis zu 50 editierbare Parameter zu verwalten. Eingebaut war auch ein Step-by-Step Sequenzer mit 256 Schritten Die achtstimmige Polyphonie wurde allerdings dadurch eingeschränkt, dass es nur einen einzigen Filter für alle Stimmen gab. Eine verbesserte Version kam als Nachfolgemodell *Poly 800 II* 1986 heraus. Zu dessen Verbesserungen gehörten ein programmierbares Digital-delay, Sequenzer mit 1000 Schritten und ein programmierbarer Equalizer (vgl. Becker 1995, 136-137).

Zuletzt soll hier noch der *Polymoog* von Moog erwähnt werden, der bereits 1976 herauskam. Dieser besaß zwar nur acht Presets, aber mit seiner Vollpolyphonie von insgesamt 71 Stimmen verbunden mit einer gewichteten, dynamisch spielbaren Tastatur (die noch dazu splitbar war) setzte der Polymoog seinerzeit Maßstäbe. Die Vollpolyphonie wurde mit einer speziellen Frequenzteiler-Schaltung realisiert. Diese arbeitet mit Master-Oszillatoren, die eine Top-Oktave generieren, aus welcher mit Hilfe von Frequenzteilern die jeweils fünf darunterliegenden Oktaven abgeleitet werden (vgl. Becker 1990, 39).

2.4.1.4 Polyphone programmierbare digitale Synthesizer mit Sampling

Neben der fortschreitenden Ablöse analoger Lösungen durch digitale Konzepte begann sich ab 1983 auch die Frequenzmodulation (FM) als Mittel der Klangsynthese durchzusetzen. Als Methode wurde die FM von John Chowning entwickelt, der die Ergebnisse seiner Forschungen 1973 veröffentlichte (Chowning 1973, siehe auch 3.4.3). Das musikalische und wirtschaftliche Potential, welches in der FM lag, wurde sehr bald auch von Yamaha erkannt, die Firma erwarb Mitte der 70er-Jahre die entsprechenden Lizenzen. Nach langer Entwicklung kamen 1982 der *GS-1* und der *GS-2* heraus, Geräte die noch mit recht rudimentärer FM-Synthese arbeiteten. Wirklich durchschlagenden Erfolg – im Sinne einer digitalen Revolution – hatte Yamaha 1983 mit dem *DX7*. Mitverantwortlich dafür war u.a. der umfangreiche neue Klangvorrat, vor allem Keyboarder schätzten die Emulation von Elektro-Klavier-Klängen à la Wurlitzer oder Fender Rhodes. Der *DX7* war 16-stimmig polyphon und mit seiner Midi-Fähigkeit unter den ersten Geräten, die

dieses damals noch sehr neue Verbindungsprotokoll für Musikgeräte propagierten. Die FM-Synthese konnte mit sechs Operatoren pro Stimme betrieben werden. Zu erwähnen sind auch die anschlagsdynamische 5-Oktaven-Tastatur, die freie Programmierbarkeit mit 32 Speicherplätzen und Presets in Form von zwei ROM-Cartridges²⁶ mit je 64 Sounds. Dies alles erhielt man für ca. 4700 DM, ein für damalige Verhältnisse sensationell günstiger Preis, der auch die ca. 200.000 Stück, die bis 1986 gebaut wurden, erklärt (vgl. Becker 1995, 120-125).

Es dauerte einige Zeit, bis ernst zu nehmende Konkurrenzprodukte zum DX7 auftauchten. Unter diesen waren Geräte von Roland und Korg. 1987 brachte Roland mit dem *Roland D-50* einen ebenfalls MIDI-fähigen Synthesizer heraus, der mit 8-Bit PCM²⁷-Samples arbeitete, Chorus und digitales Echo (engl. reverb) enthielt (vgl. Jenkins 2007, 95). Eine weitere Neuheit, die der D-50 mit sich brachte, war der Einsatz der LA-Synthese (eigentlich simplifizierte S&S²⁸ Synthese, bei Roland aber als Linear Arithmetic Synthesis bezeichnet). Diese Methode verarbeitet digital gesampelte Wellenformen mit digitalen Filtern und Effekten, wobei man sich hauptsächlich auf die jeweilige Einschwingphase konzentriert (vgl. Jenkins 2007, 95; Enders 1997, 153; Russ 2009, 252 u. 455).

Ein weiteres Midi-fähiges Gerät, das digitales Sampling integrierte, war der *Korg M1*, 1987 auf den Markt gekommen. Der M1 arbeitet mit AI-Synthese²⁹ und verwendet dafür 4 Megabyte PCM-Speicher mit gesampelten und synthetisierten Wellenformen. Geräte, welche wie der M1 alle Funktionalitäten enthielten, die für eine einfache Musikproduktion erforderlich waren (Synthesizer, Effektgerät, Drumcomputer und Sequenzer), wurden auch als Workstation bezeichnet. Trotz digitaler Grundbasis in beiden Geräten wurde die Folgeverarbeitung nach der traditionellen subtraktiven Methode gestaltet: Oszillator → Filter → Verstärker → zusätzliche Modulation³⁰. Obwohl der M1 eines der erfolgreichsten Geräte seiner Art war, besaß er nur Tiefpassfilter ohne Resonanz (vgl. Russ, 2009, 350 u. 360).

²⁶ ROM = Read Only Memory, Speicher der nur gelesen werden kann.

²⁷ PCM = Pulse Code Modulation, ein Verfahren zur Umformung von analogen Signalen in digitalen Code. Es enthält besondere Methoden zur Fehlerkorrektur (Redundanz, Datenstreuung u.a.), die einen wesentlichen Beitrag zur verlustfreien Speicherung und Wiedergabe leisten (vgl. Huber 2010, 211; Enders 1997, 230).

²⁸ Samples and Synthesis.

²⁹ Von Korg verwendete Bezeichnung für Klangsynthese welche Segmente gesampelter Wellenformen aus dem ROM kombiniert.

³⁰ Wie z.B. Chorus oder Hall.

Das Prinzip von in ROM gespeicherten Wellenformen als Ausgangsmaterial für Klangerzeugung und Klangbearbeitung findet sich auch in den Folgemodellen von Korg und Roland. In der *Korg Wavestation*, herausgebracht 1990, wird Wave-Sequencing als neue Synthesevariante betrieben. Kurze Segmente von Sample-Wellenformen aus dem ROM können nacheinander bzw. ineinander übergehend abgerufen werden, wodurch neue, komplexe und ungewohnte Klangmuster und rhythmische Abfolgen entstehen (vgl. Fortune et al. 2007, 297; Russ 2009, 220). Die Programmierung der bisher erwähnten Geräte war meist unübersichtlich und kompliziert gelöst. Anders war dies beim *Roland JD-800*, vorgestellt 1991. Dieser Synthesizer war in seinen Programmierungsmöglichkeiten extrem flexibel und übersichtlich angelegt, unter anderem realisiert mit an die 60 Schieberegler und ebenso vielen Knöpfen, die Editorfunktionalitäten übernahmen (vgl. Russ 2009, 365).

2.4.1.5 Die Renaissance der analogen Synthesizer

In den frühen 1990-er Jahren kam es zu einem wiedererstarkenden Interesse an analogen Synthesizern. Klangmanipulation durch Schieben von Reglern oder Drehen an Knöpfen war wieder gefragt. Die dadurch entstehende Nachfrage führte zur Erzeugung einer neuen Generation analoger Synthesizer. So kam im Jahr 1994 der *Doepfer MS-404* auf den Markt, ein analoger, monophoner Synthesizer mit einem VCO, einem LFO, 24dB Resonanzfilter, MIDI-Steuerung (ohne Keyboard) und ADSR. Ein ähnliches Gerät war der *MAM MB-33*, ein Bass-Synthesizer mit einem VCO beschränkt auf Sägezahn- und Rechteckwelle, ebenfalls MIDI-gesteuert. Beide emulieren Originalgeräte aus der ersten analogen Ära (vgl. Jenkins 2007, 198-199).

Ein Höhepunkt der analogen Retrowelle wurde 2000 mit dem *Aleisis Andromeda A6* erreicht. Dies war ein komplett analoges Gerät mit 16-stimmiger Polyphonie. Zwei Oszillatoren, 32 Filter, Hall, Chorus, Echo, Arpeggio, 256 Presets, 128 Anwender-Presets u.v.m. – einzustellen und zu speichern mit 72 Drehknöpfen und 144 Tasten - machten den A6 zu einem wahren Super-synthesizer (vgl. Jenkins 2007, 215-216).

Zuletzt brachte Moog noch im Jahre 2002 den *Minimoog Voyager* heraus, ein Gerät das sich zur Gänze am Minimoog (erzeugt zwischen 1970 und 1982) orien-

tiert. Diese moderne Version des Minimoog ist allerdings MIDI-fähig und besitzt 128 Speicherplätze, Tonhöhenrad, Modulationsrad u.v.m. (vgl. Jenkins 2007, 217).

2.4.2 Software-Synthesizer

Reelle physische Geräte mit einem dedizierten Anwendungsbereich lassen sich leicht systematisieren, dies zeigt auch die Durchsicht der Systematik, wo dieser Bereich zum Teil (51 bis 55) bis in die vierte Unterebene untergliedert wird. Mit dem Fortschritt in der Computertechnik sowohl im Hardware- als auch im Softwarebereich hat sich die Anzahl der Anwendungen im Audio-Bereich vervielfacht, dies wiederum hauptsächlich im Bereich der Personal-Computer. Vieles von dem, was früher nur mit teuren Spezialgeräten möglich war, kann mittlerweile als Anwendung auf jedem Heimcomputer betrieben werden. Dies trifft für Klangerzeugung und Klanganalyse im gleichen Ausmaß zu. Die Tatsache, dass mit Computer-basierten Methoden fast alles gelöst werden kann, sowie die rasante Entwicklung auf dem Sektor der Audio-Anwendungen lassen Systematisierungsversuche in diesem Bereich schnell scheitern. So verwundert es auch nicht besonders, dass Software in der Systematik nur als Hauptgruppe 56 enthalten ist und weder untergliedert noch weiter ausgeführt wird. Es existieren mittlerweile einige Entwicklungsumgebungen, die es erlauben, Klangsyntheseanwendungen mit dem Computer wie mit einem Baukastensystem zu erstellen. Manche sind lizenzpflichtig, andere kommen aus dem Freeware-Bereich. In dieser Arbeit wird hauptsächlich auf die Freeware-Umgebung SynthEdit eingegangen, da das virtualisierte Variophon mit dieser Software erstellt wurde. Was SynthEdit - und mit ihm alle anderen Entwicklungsumgebungen für Software-Synthesizer - ihren Vorbildern aus der Welt der realen Synthesizer voraushaben, sind die umfangreichen Programmierungsmöglichkeiten. Auf diese muss vor allem dann zurückgegriffen werden, wenn es um die Umsetzung von dynamischen Abläufen geht. Nach Durchsicht der Entwicklungsstufen und der unterschiedlichen Varianten von realen Geräten muss festgestellt werden, dass eine Nachbildung der Funktionsweise des Variophons mit realen Synthesizern kaum möglich ist. Wohl könnten mit entsprechender Pulsweite und Filterung Einzeltöne erzeugt werden, doch nicht die dynamischen Abläufe, die individuell auf Tonhöhe und Dynamikstufe reagieren.

2.4.2.1 SynthEdit

SynthEdit ist eine graphische Entwicklungsumgebung zur Erstellung von Instrumenten oder Effekten, die aus hunderten von Einzelkomponenten zusammengesetzt werden können. Die auf C++ basierende Software wurde in ihrer ersten Version 1987 von Jeff McClintock entwickelt und wird von diesem laufend betreut und erweitert. Dokumentiert wurde die Software von Fortune et al. (2007). Die hier vorliegende Zusammenfassung wurde nach dieser Dokumentation erstellt.

Ähnlich realen modularen Synthesizern können die Programmierungen wie mit einem Baukasten zusammengesetzt werden, ohne dass eine Zeile Programmcode geschrieben werden muss (visuelle Programmierung). Neben den Elementen, die im Basispaket enthalten sind, steht eine Unmenge von Modulen von Drittanbietern zur Verfügung. Diese können - meist gratis - über das Internet heruntergeladen werden. Auf diesem Weg finden sich oft Lösungen, die man leicht einbinden kann, ohne selbst noch Entwicklungsarbeit leisten zu müssen. Die Modellierung von SynthEdit orientiert sich an realen analogen Synthesizern. Wie bei den realen Vorbildern wird, um die Kompatibilität der Module zueinander zu gewährleisten, mit Steuerspannungen gearbeitet, die sich im Allgemeinen zwischen 0.0 und 10.0 Volt bewegen. Erstellt werden Instrumente oder Effekte, die als VST-Module (auch als VST Plug-in bezeichnet) in einem VST-Host laufen. VST steht für *Virtual Studio Technology*, ein Schnittstellen-Standard zur Entwicklung von Plugins, offen für die Allgemeinheit nach der Freigabe 1997 durch Steinberg Media Technologies (vgl. Fortune et al. 2007, 13-14). Ein VST-Host ist das Trägersystem, unter dem VST Plug-ins laufen. Dies kann man mit der Beziehung zwischen Anwendungsprogrammen und dem Betriebssystem eines Computers vergleichen, wo das Betriebssystem als Trägersystem für diverse Anwendungen (wie auch VST-Host oder SynthEdit) fungiert. Abb. 2.1 zeigt dieses Zusammenspiel: Innerhalb eines Betriebssystems laufen (neben vielen anderen Anwendungen) ein VST-Host und SynthEdit. Mit SynthEdit werden Plugins entwickelt, getestet und als SynthEdit-Files (Dateiendung .se) oder als DLL³¹ im Filesystem des Rechners abgelegt. Diese DLL's können in den VST-Host geladen werden und unter dessen Kontrolle laufen. VST-Anwendungen können als DLL verpackt an Dritte weiter-

³¹ DLL steht für Dynamic Link Library, Speicherungsformat für ausführbaren Programmcode unter Windows.

gegeben werden und von diesen unter einem VST-Host betrieben werden. Anzu-
merken ist allerdings, dass SynthEdit selbst und die unter SynthEdit erzeugten
Plugins nur unter Windows³² lauffähig sind.

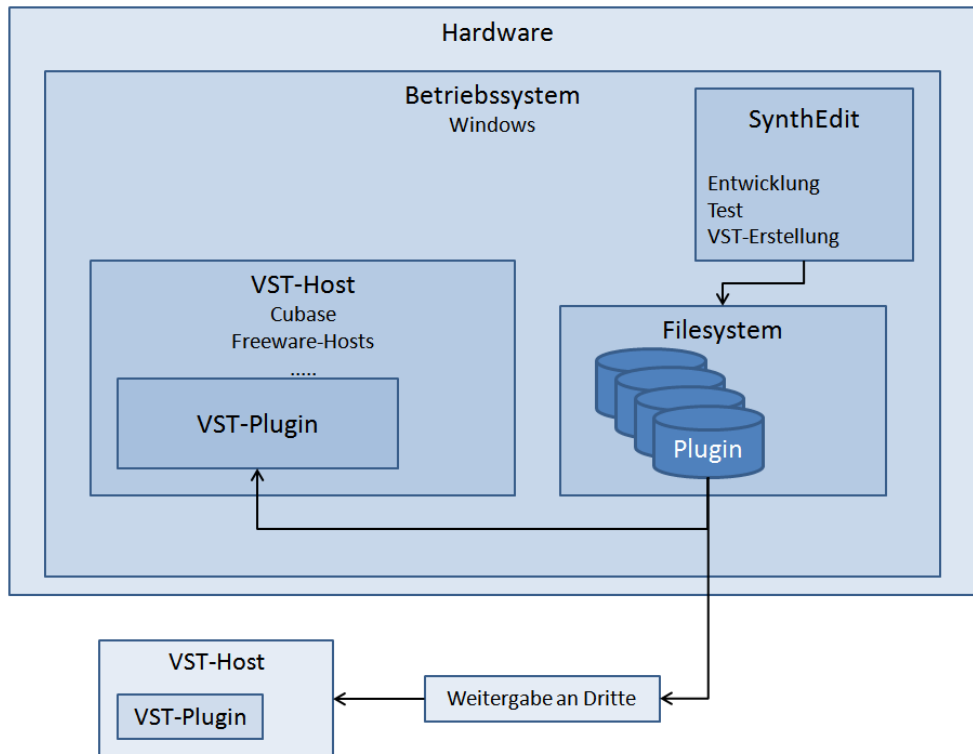


Abb. 2.1. Betriebssystem, SynthEdit, VST-Host und deren Positionierung am Computer. Derzeit ist SynthEdit auf das Windows-Betriebssystem beschränkt.

2.4.2.2 Andere Entwicklungsumgebungen

Neben SynthEdit existieren auch noch andere graphische Entwicklungsumgebungen mit mehr oder weniger ähnlichem Leistungsumfang. Dazu zählen *Reaktor*³³ von *Native Instruments*³⁴, *Max/MSP* von *Cycling'74*³⁵ und die Open-Source-Software *Pure Data*. Reaktor und Max/MSP sind kostenpflichtig. Allen ist gemeinsam, dass sie wie SynthEdit visuelle Programmierung verwenden.

Reaktor bietet mit über 200 Basismodulen die umfangreichste Sammlung von Quellenmaterial zum Bau von virtuellen Synthesizern und Effekt-Prozessoren.

³² Windows XP, Windows Vista und Windows 7. (Quelle: www.synthedit.com/demo/).

³³ Mit Reaktor wurde auch die Analyseplattform zur digitalen Impulsformung von Michael Oehler realisiert.

³⁴ <http://www.native-instruments.com>.

³⁵ <http://cycling74.com>.

Dazu kommen Bibliotheken mit unzähligen unterschiedlichen Instrumenten und Presets (vgl. Miranda 2002, 206-207).

Max/Msp wurde ursprünglich am IRCAM³⁶ in Paris von Miller Puckette als Software zu Musiksteuerung entwickelt. Mit Hilfe des Graphical User Interface³⁷ konnten Kontrollblöcke für MIDI-Verarbeitung, Step-Sequencer u.v.m. koordiniert werden. Die ständige Weiterentwicklung ermöglicht mittlerweile auch die Verarbeitung von Videomaterial (vgl. Miranda 2002, 409).

Ebenfalls von Miller Puckette wurde Pure Data entwickelt und ist darum Max/Msp nicht unähnlich. Das Programm ist als Open Source Software frei erhältlich und wird von einer Community, an der sich Medienkünstler, Entwickler, Forscher und Musiker beteiligen, weiterentwickelt. Eine der Intentionen von Pure Data ist die offene Anbindung von Anwendungen außerhalb des Audio- bzw. MIDI-Bereiches wie z.B. Grafik oder Video³⁸.

3 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel sollen die Grundlagen vorgestellt werden, welche die Klangbildung von Blasinstrumenten erklären. Diese sind auch Basis sowohl für die Entwicklung des analogen Variophons als auch für Emulationen digitaler Natur.

Die hohe Verfügbarkeit von computerbasierten Methoden sowie die Grundthematik dieser Arbeit erfordern auch einen grundsätzlichen Blick in die Welt der digitalen Klangsynthese und generell eine Beschäftigung mit digitaler Signalverarbeitung. Mit der Vorstellung von digitaler Signalverarbeitung im Allgemeinen und MIDI als speziellem Verbindungskonzept von elektronischen Klangerzeugern im zweiten Teil dieses Kapitels, werden ebenfalls Grundlagen erörtert, die in Emulationen auf Softwareebene von Bedeutung sind.

Anschließend wird als weitere Grundlage für Emulationen die Funktionsweise von Synthesizern erklärt.

Dem folgt abschließend ein Überblick über die gängigsten Methoden der Klangsynthese.

³⁶ Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Music in Paris, www.ircam.fr, Zugriff 21.11.2012.

³⁷ Bildschirmoberfläche einer visuellen Computeranwendung, die als Schnittstelle zwischen Benutzer und Anwendung fungiert, wird in Folge mit GUI abgekürzt.

³⁸ <http://puredata.info>, Zugriff 21.11.2012.

3.1 Die Klangfarbe von Blasinstrumenten

Hier soll ein Überblick darüber gegeben werden, welche Faktoren die Klangfarbe von Blasinstrumenten bestimmen. Weiters wird das primäre Tongenerierungsprinzip von Blasinstrumenten beleuchtet.

3.1.1 Formantbereiche

Ein grundlegender Faktor, der für den Klang eines Blasinstrumentes von Bedeutung ist, ist die Existenz von sogenannten Formanten bzw. Formantbereichen. Das sind Abschnitte im Spektrum innerhalb derer die Amplituden der Teiltöne besonders hervorgehoben werden. Diese Bereiche bestimmen die Klangfarbensignatur eines Blasinstrumentes (Reuter 2002), sie haben Anteil an der Erkennbarkeit des Instrumentes und beeinflussen, wie sehr ein Instrument im Zusammenspiel mit anderen individuell erkannt werden kann (Reuter 1995). Bei Reuter (2002) findet sich ein Gesamtkatalog, der für die Gesamtmenge aller in einem modernen Orchester vorkommenden Blasinstrumente Auskunft u.a. über Klangfarbe und Register sowie formantbezogene Registergrenzen gibt. Im Zuge der Untersuchung des analogen Variophons wird hier fast ausschließlich auf das Fagottmodul eingegangen, daher werden Formantbereiche und Registergrenzen hier exemplarisch ebenfalls für das Fagott erörtert.

3.1.2 Feste Formanten

Der Nachweis von festen Formanten bei Blasinstrumenten wurde von Schumann bereits 1929 erbracht, deren Gesetzmäßigkeiten im Verhalten in vier Gesetzen formuliert (Schumann, 1929).

Das *Formantstreckengesetz* beschreibt die grundsätzliche Existenz von Formantgebieten, die in fixen Frequenzbereichen liegen. Die Lage dieser Bereiche ist nicht vom jeweiligen Grundton abhängig. Die Amplituden der Teiltöne, die im Formantbereich liegen, sind deutlich höher als die der außerhalb liegenden; oder anders gesagt, Teiltöne deren Frequenzen innerhalb der Formantgrenzen liegen, werden besonders hervorgehoben. Damit verschieben sich von Ton zu Ton die Ordnungszahlen der Teiltöne, die in einem Formanten liegen (vgl. Mertens 1975, 31-60).

Tonhöhe	Hz	TT1	TT2	TT3	TT4	TT5	TT6	TT7	TT8	TT9	TT10
A1	55	55	110	165	220	275	330	385	440	495	550
H1	62	62	123	185	247	309	370	432	494	556	617
C2	65	65	131	196	262	327	392	458	523	589	654
D2	73	73	147	220	294	367	441	514	587	661	734
E2	82	82	165	247	330	412	494	577	659	742	824
F2	87	87	175	262	349	437	524	611	698	786	873
G2	98	98	196	294	392	490	588	686	784	882	980
A2	110	110	220	330	440	550	660	770	880	990	1100
H2	123	123	247	370	494	617	741	864	988	1111	1235
C3	131	131	262	392	523	654	785	916	1046	1177	1308
D3	147	147	294	440	587	734	881	1028	1174	1321	1468
E3	165	165	330	494	659	824	989	1154	1318	1483	1648
F3	175	175	349	524	698	873	1048	1222	1397	1571	1746
G3	196	196	392	588	784	980	1176	1372	1568	1764	1960
A3	220	220	440	660	880	1100	1320	1540	1760	1980	2200
H3	247	247	494	741	988	1235	1481	1728	1975	2222	2469
C4	277	277	554	832	1109	1386	1663	1940	2218	2495	2772
D4	294	294	587	881	1175	1469	1762	2056	2350	2643	2937
E4	330	330	659	989	1318	1648	1978	2307	2637	2966	3296

Tab. 3.1. Teiltonlage der Fagott-Tonleiter. Die Teiltöne, welche im Bereich des ersten Formanten liegen, sind hervorgehoben. Diese zeigen bei einer Messung (mit Audition) die jeweils höchsten Amplitudenwerte. Sie liegen alle in einem Frequenzbereich zwischen 300 Hz und 500 Hz.

Dies ist in Tab. 3.1 zusehen, wo die Tonleiter des Fagotts mit den ersten 10 Teiltönen gelistet ist. Der erste Formant des Fagotts liegt zwischen 300 Hz und 500 Hz (Reuter, 2002, 263), die jeweils in diesen Bereich fallenden Teiltöne sind markiert. Auch das Variophon-Fagott verhält sich gemäß dem Formantstreckengesetz. Dies ist in Abb. 3.1 zu sehen. Die Spitzen liegen jeweils zwischen 300 Hz und 500 Hz (im markierten Bereich).

Das *Formantverschiebungsgesetz* beschreibt das Verhalten bei dynamischen Änderungen bei gleicher Tonhöhe. Bei einem Anstieg der Dynamik (beispielsweise von p auf ff) verschiebt sich das Maximum innerhalb des Formantbereiches auf die höheren Teiltöne (vgl. Mertens 1975, 61-66). Dieses Verhalten konnte mit dem Variophon nicht nachgestellt werden.

Das *Formantsprunggesetz* beschreibt das Verhalten bei starken dynamischen Änderungen bei gleicher Tonhöhe. Bei einem starken Anstieg der Dynamik (beispielsweise von ff auf fff) springt das Maximum in den nächsthöheren Formantbereich, wobei die Teiltöne, welche zwischen den Formantbereichen liegen, übersprungen werden. Es handelt sich hier um einen Sonderfall des Formantverschiebungsgesetzes (vgl. Mertens 1975, 64-66). Am Variophon konnte dieses Verhalten ebenfalls nicht nachgestellt werden, sehr wohl konnte allerdings beobachtet werden, dass bei starker Dynamiksteigerung die höheren Formantbereiche gene-

rell angehoben werden (siehe auch Abb. 4.4, Abb. 4.5 und Abb. 4.6 – Frequenzdiagramme von unterschiedlichen Dynamikstufen in 4.1.3.2).

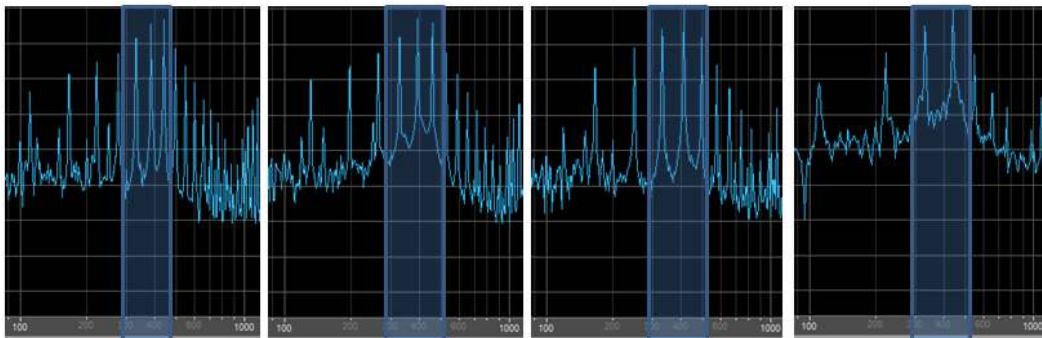


Abb. 3.1. Ausschnitt der Spektren der Töne A1, C2, E2 und A2, gespielt mit dem Variophon (Fagottmodul). Der erste Formantbereich ist hervorgehoben. Beim A1 liegen die Maxima in Teilton 6, 7 und 8, beim C2 in Teilton 5, 6 und 7, beim E2 in Teilton 4, 5 und 6, beim A2 in Teilton 3 und 4. Bei A1, C2 und E2 ist der Grundton nicht zu sehen, da er links außerhalb des Ausschnittes liegt.

Das *Formantintervallgesetz* beschreibt die Beziehungen zwischen den stärksten Teiltönen zweier benachbarter Formanten. Es postuliert, dass die Frequenzen der beiden Maxima im jeweils selben Verhältnis zueinander stehen (vgl. Mertens 1975, 67-71). Für das Fagott liegt dieses Verhältnis nach unterschiedlichen Messungen übereinstimmend bei 3:8 (Reuter 1995, 78). Allerdings wird dieses Gesetz durch Verschiebungs- und Sprunggesetz in Frage gestellt, da diese Gesetze eine Verschiebung der Maxima im Formanten beschreiben und somit nicht eindeutige Maxima bestimmt werden können.

3.1.3 Die Impulsformungstheorie

Die Impulsformungstheorie führt gleichbleibende Klangfarben eines Instrumentes auf dessen Anregungsfunktion in der Klangerzeugung zurück. Formuliert wurde diese Erklärung von Fricke (1975) als *Theorie der formantbildenden Impulsfolgen bei Blasinstrumenten*. Ein Ausgangspunkt für diese Theorie sind Messungen und Analysen von Fransson (1966; 1967), bestätigt werden die Erkenntnisse auch durch die Arbeit von Voigt (1975). Als impulsförmiger Vorgang ist die Anregungsfunktion besonders bei Blasinstrumenten erkennbar. So ist das Schwingen des Rohrblattes eine periodische Wiederholung von Öffnungs- und Verschlussphasen. Mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen konnte 1975 die Rohrblattschwingung eines Fagotts, das künstlich angeblasen wurde, veranschaulicht

werden (Voigt 1975, 217). Die Aufnahmen zeigen, dass die Verschlussphasen bei unterschiedlichen Frequenzen gleich lange andauern. Man sieht bei unterschiedlicher Frequenz und somit unterschiedlicher Periodenlänge (f^* und eine Oktave darunter f) die jeweils gleiche Verschlussdauer. Die aus den Anregungsimpulsen resultierenden Spektren zeigen nun eine Besonderheit: das Verhältnis zwischen Verschlussdauer (auch als Impulsbreite oder kurz t bezeichnet) zur Periodenlänge T bestimmt die Energieverteilung auf die Teiltöne des Spektrums, d.h. es setzt spektrale Minima. Wenn also für die Anregungsfunktion v gilt $v = t / T$ so sind die Minima im Spektrum bei jedem $(1 / v)$ -ten Teilton zu finden. Dies sei anhand eines Beispiels illustriert: $t = 1$ ms, $T = 10$ ms, $v = 1/10$, die Minima liegen bei jedem $1 / (1/10)$ -ten also bei jedem 10. Teilton. Wenn man dieses Beispiel weiterführt, ergibt sich ein weiterer wichtiger Umstand. Zur Illustration werden diesmal die Frequenz von 250 Hz und 500 Hz mit jeweils einer Impulsbreite von 1 ms genommen (siehe Abb. 3.2). Bei 250 Hz beträgt T 4 ms, $v = t/T = 1/4$, die Minima liegen also bei 1000 Hz, 2000 Hz und so fort. Bei 500 Hz beträgt T 2 ms, $v = t/T = 1/2$, die Minima liegen hier ebenfalls bei 1000 Hz, 2000 Hz und so fort. Verallgemeinernd gesagt gilt: bei gleichbleibender Impulsbreite und unterschiedlichen Frequenzen finden sich die spektralen Minima an den jeweils gleichen Positionen. Dies ist gleichzeitig eine Erklärung für die feststehenden Formantbereiche der jeweiligen Instrumente. Diese Bereiche bilden sich zwischen den jeweiligen Minima aus. Abb. 3.2 und Abb. 3.3 zeigen dies für zwei unterschiedliche Frequenzen erzeugt mit gleicher Impulsbreite. Die Minima und Formantbereiche finden sich an den selben Stellen.

Auch ein mit dem Variophon erzeugtes Spektrum zeigt das sehr schön. In Abb. 3.4 ist das Spektrogramm dreier mit dem Variophon erzeugter Töne zu sehen. Tiefes A1, E2 und A2 (55, 82.4 und 110 Hz). Alle drei Töne wurden mit gleicher Dynamik, d.h. mit gleicher Impulsbreite gespielt. Man erkennt, dass Formanten und Minima in dieselben Bereiche fallen.

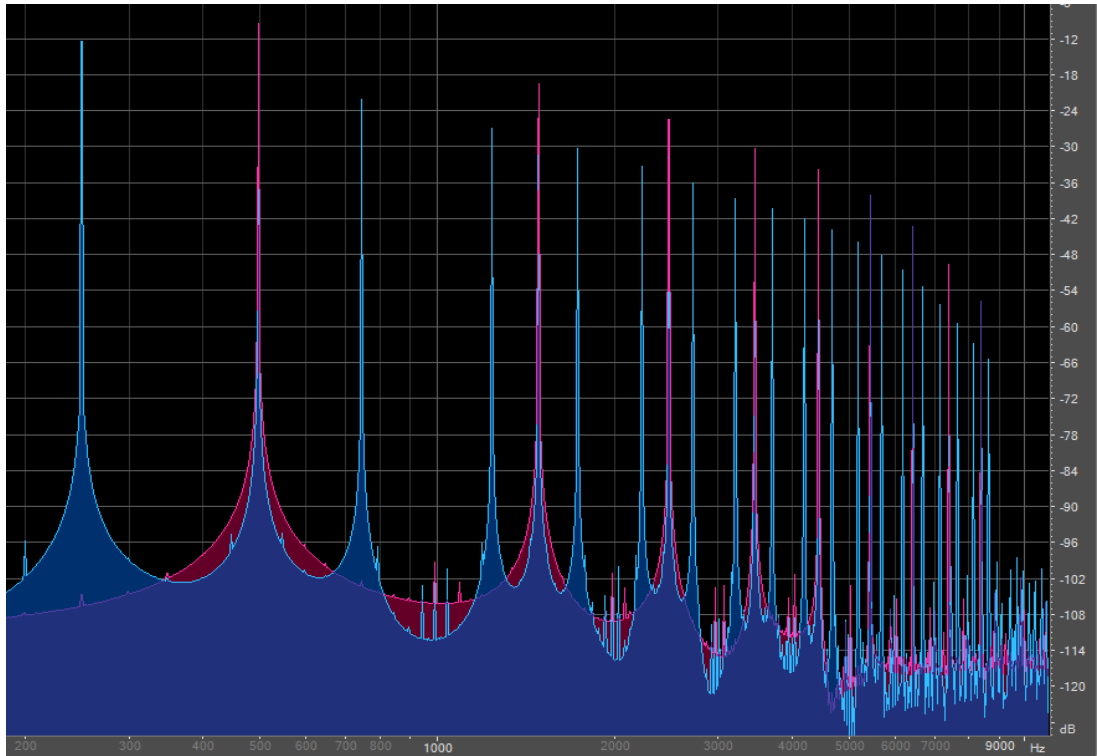


Abb. 3.2. Frequenzspektrum eines 500 Hz Tones (rot) und eines 250 Hz Tones (blau). Beide Töne wurden mit einer Rechteckwelle erzeugt, in beiden Fällen liegt die Impulsdauer bei 1 ms. Die spektralen Minima liegen jeweils bei einem Vielfachen von 1000 Hz.

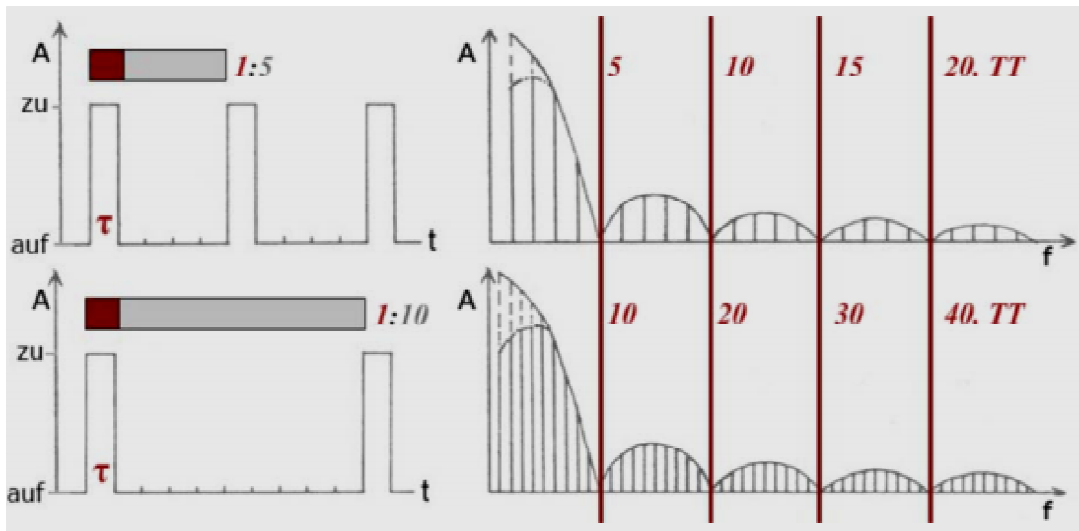


Abb. 3.3. Formantbereiche bei gleicher Impulsdauer (nach Voigt 1975, 53 und Oehler & Reuter 2006, 1520).

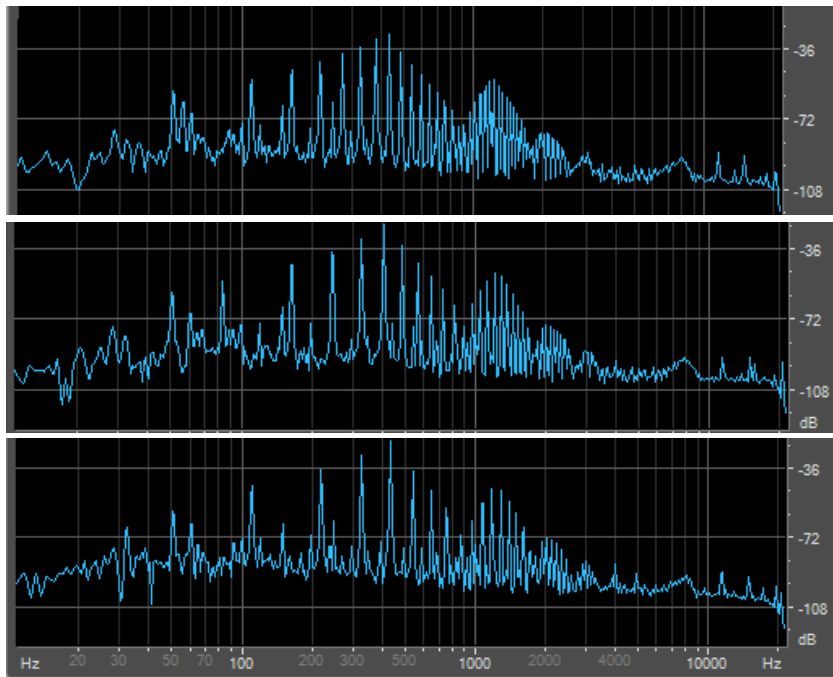


Abb. 3.4. Spektrogramm dreier mit dem Variophon (Fagottmodul) bei mittlerer Dynamik gespielter Töne. Oben A1 (55 Hz), Mitte E2 (82,4 Hz), unten A2 (110 Hz).

3.2 Digitale Verfahren

Die Ablösung vieler analoger Verfahren durch digitale Lösungen hat bereits fast alle Lebensbereiche erfasst. Das prominenteste Beispiel für diese Entwicklung ist wohl der Schritt von der Schallplatte zur CD. Im für diese Arbeit relevanten Umfeld spielt die zunehmende Digitalisierung ebenfalls eine bedeutende Rolle. Im ersten Abschnitt dieses Kapitels werden mit Fokus auf Audioanwendungen die Grundprinzipien der digitalen Signalverarbeitung vorgestellt. Der zweite Abschnitt befasst sich mit MIDI. Die Einführung von MIDI, das mittlerweile ein etablierter Standard zur Verbindung von elektronischen Klangerzeugern ist, war ein früher Schritt in Richtung Digitalisierung.

Die später beschriebene Virtualisierung des Variophons versucht das zugrunde liegende Prinzip der Impulsformung mit computerbasierten Klangsynthesebausteinen umzusetzen. Viele der dabei verwendeten Mittel, die heute genereller Bestandteil von moderner Audioverarbeitung sind, waren zur Zeit der Entwicklung des analogen Variophons noch nicht verfügbar. Dazu gehören MIDI als universelles Verbindungs- und Steuerungsprotokoll für elektronische Musikinstrumente und die digitale Klangverarbeitung als technologischer Grundpfeiler jeglicher akustischer Anwendung der Jetztzeit.

3.2.1 Digitale Signalverarbeitung

Bereits in der Entwicklungsgeschichte der Synthesizer (siehe 2.4.1) zeigt sich ein deutlicher Trend der Ablösung von analogen Bauweisen durch digitale Konzepte. Im Zuge dieses Trends erfolgte auch die Entwicklung der digitalen Signalverarbeitung, die eine heute nicht mehr wegzudenkende Basis der modernen Audio-technologie ist. Das Ausmaß, in dem die digitale Signalverarbeitung jegliche Form des Produzierens, Sammelns oder Verteilens multimedialer Anwendungen verändert hat, ist enorm. In den letzten Jahren hat sich die Arbeitsweise von Produzenten und Technikern bei Aufnahme, Manipulation und Weitergabe von digitalen Audiodaten dramatisch verändert. Wie bei fast allen anderen Medien sind diese Veränderungen mit dem Einzug des Personal Computers in die modernen Studios einhergegangen. Mit den neuen Computer-Generationen und der dazugehörigen Hardware-Peripherie lassen sich die Aufgaben dieser Studios mit erstaunlicher Leichtigkeit bewältigen (vgl. Huber 2010, 199; Weinzierl 2008, 785-786). Sowohl die Virtualisierung des Variophons als auch die spektralen Vergleiche zwischen dem reellen und dem virtuellen Variophon (siehe Kap. 5) wurden mit Computeranwendungen erstellt, die Methoden der digitalen Signalverarbeitung verwenden. Nicht zuletzt deshalb werden in der Folge eine Beschreibung der grundsätzlichen Arbeitsweise und eine Erläuterung der damit verbundenen Begriffswelt gegeben.

3.2.1.1 Kodierung von digitalen Signalen

Das Grundprinzip der digitalen Repräsentation von Audiosignalen beruht auf der Speicherung von analogen Spannungswerten in binärer Form. In der analogen Welt laufen diese Signale als fortlaufende Spannungsschwankungen (und damit als Amplitudenschwankungen), die schlussendlich über Lautsprecher verstärkt an das menschliche Ohr gelangen. In der digitalen Welt werden diese Schwankungen als Spannungsgröße pro Zeiteinheit festgehalten. Dabei wird von Analog-Digital-Wandlern eine möglichst große Anzahl von Momentaufnahmen in gleichbleibenden Intervallen gemacht. Diese Aufnahmen werden als sequentieller Datenstrom aneinandergereiht und können als binäre Computerdateien gespeichert und auf vielfältige Art weiterverarbeitet werden. Um digitale Audiodaten wieder hörbar zu machen, bedarf es wiederum eines Dekodierungsprozesses, der Digital-Analog-

Wandlung. Bei Huber (2010, 201-216) werden mehrere Stadien im Prozess des Kodierens und Dekodierens von Audiodaten erläutert, sie sollen auch hier in der Folge vorgestellt werden.

3.2.1.2 Sampling

Folgendes nach Huber (2010, 201-202), Weinzierl (2008, 787-790) und Enders (1997, 13 u. 18): Sampling ist ein Prozess, der ein einlaufendes analoges Signal in diskreten, zeitlich präzise getakteten Intervallen abtastet. Während jeden Intervalls wird das analoge Signal für einen kurzen Moment "eingefroren". Während dieses Einfrierens ermittelt der Wandler die aktuelle Spannungsgröße. Die Genauigkeit dieser Ermittlung ist abhängig von der internen Schaltung des Wandlers und der geforderten Bittiefe. Nach Ermittlung der Spannungsgröße wird diese als binäres Wort im jeweiligen Speicher abgelegt. Größe und Struktur dieses Wortes sind wiederum abhängig von der geforderten Genauigkeit. Die Anzahl der Abtastintervalle pro Zeiteinheit (Sekunde) wird durch die sogenannte Samplerate (auch Abtastfrequenz bzw. Abtastrate, engl. *sampling rate*) vorgegeben. Aus der Samplerate ergibt sich die Samplezeit (*sampling time*), die Zeit die pro Einzelabtastung verstreicht. Bei einer Samplerate von 44,1 kHz beträgt diese beispielsweise $1/44100$ Sekunden³⁹ (siehe auch Abb. 3.5). Je höher die Samplerate angesetzt wird, desto genauer ist digitale Abbildung des analogen Verlaufs. Aus der Höhe der Samplerate ergibt sich die Bandbreite, die abgebildet werden kann (siehe auch Abb. 3.6). Die Höhe der Samplerate richtet sich auch nach einer Regel, die als Nyquist-Theorem bekannt ist: will man Klänge ohne hörbare klangliche Einbußen speichern, muss die Abtastfrequenz mindestens doppelt so hoch sein, wie die im Signal enthaltene höchste Frequenz. Da der menschliche Hörbereich bei ca. 20 kHz endet, macht dies eine Samplerate von mindestens 40 kHz notwendig. Befolgt man diese Regel, so vermeidet man das Auftreten von sogenannten Aliasing-Effekten. Diese äußern sich als unerwünschte Störfrequenz, die gleich der Differenz zwischen Originalfrequenz und Abtastfrequenz ist. Bei Audioaufnahmen werden deshalb auch Tiefpassfilter (siehe 3.3.3) eingesetzt, diese unterdrücken Frequenzanteile des Eingangssignals, welche über der Hälfte der Abtastfrequenz liegen. Diese Filter schneiden nicht punktgenau ab, sondern mit abfallender Kenn-

³⁹ Das sind $\sim 0,0226$ ms.

linie ab. So erhöht sich ab der Eckfrequenz das Verhältnis zwischen Samplerate und Bandbreite zu Ungunsten der Bandbreite. In Tab. 3.2 ist ersichtlich, welche die gängigsten Abtastraten sind und wo diese eingesetzt werden.

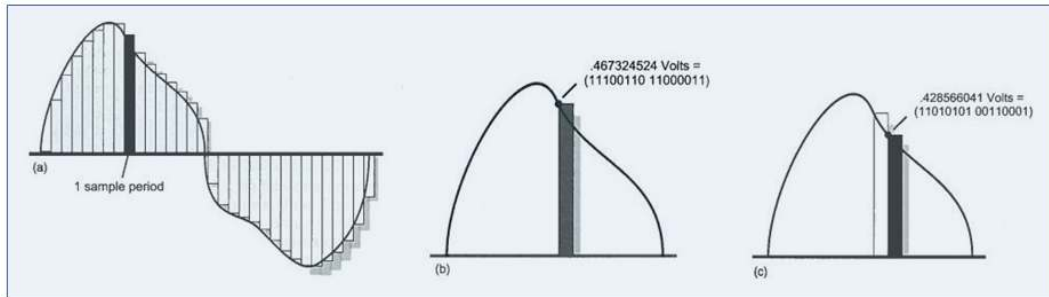


Abb. 3.5. Der Sampling Prozess: (a) Ein digitales Signal wird aus periodisch ermittelten Samples erstellt. (b) Das analoge Signal wird "eingefroren", während der Konverter die Spannung zum Zeitpunkt der Messung ermittelt und in einen binären Wert umwandelt. (c) Nach Abschluss der Digitalisierung eines Samples wird dieses freigegeben und der Prozess mit der Digitalisierung des nächsten Samples fortgesetzt. Aus Huber (2010, 202).

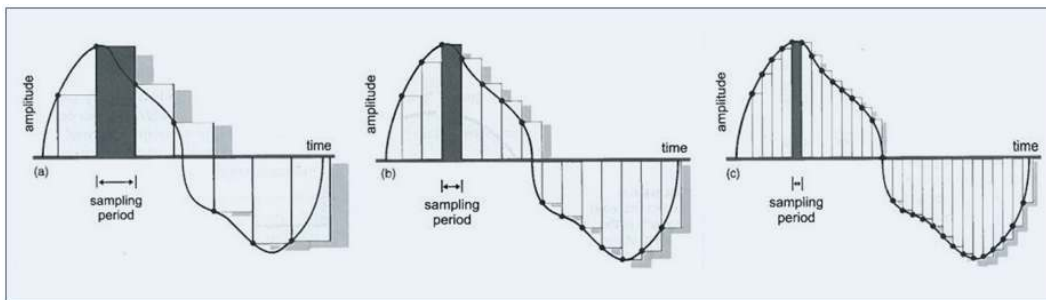


Abb. 3.6. (a) Bei zu niedrigen Samplingraten geht wichtige Information, die zwischen den Samplingperioden liegt, verloren. (b) Dieser Verlust kann mit Erhöhung der Samplingrate verringert werden. (c) Eine Erhöhung der Samplingrate führt auch zu einer Erhöhung der Bandbreite in Richtung höherer Frequenzbereiche. Aus Huber (2012, 203).

Abtastrate in 1000	Bandbreite in kHz	Einsatz
32	15	Satellitenübertragung
44,1	20	CD, Minimalanforderung prof. Audio
48	22	DVD, Standard prof. Audio
88,2		Produktionen mit hoher Auflösung
96		Defacto Abtastrate für Aufnahmen mit hoher Auflösung
192		selten verwendet (wegen zu hoher Speicheranforderung)

Tab. 3.2. Gängige Abtastraten. Nach Huber (2010, 208).

3.2.1.3 Quantisierung und Wahl der richtigen Größen

Folgendes nach Huber (2010, 203-207) und Weinzierl (2008, 790-795): Quantisierung befasst sich mit der Darstellung der Amplitudenwerte pro Zeitintervall. Die Genauigkeit, mit der die ursprünglichen Spannungsgrößen festgehalten werden, ist abhängig von der Bittiefe pro Datenwort. Sie bestimmt die Anzahl und die Größe der Abstufungen, in der die Amplitude skaliert werden kann. Nach der binären Arithmetik lässt eine Wortbreite von n Bits 2^n Abstufungen zu. In Tab. 3.3 ist die Anzahl der möglichen Abstufungen pro Bittiefe gelistet. Sie beginnt mit 256 Stufen bei 8 Bit, bereits eine Verdoppelung auf 16 Bit Wortbreite steigert die Stufenzahl auf das 256-fache. Wenn auch – wie aus der Tabelle ersichtlich – eklatant höhere Abstufungsanzahlen möglich sind, so wird im Audibereich die 16-Bit Auflösung am häufigsten verwendet. Bei jeder Quantisierung werden unvermeidlich Fehler gemacht, diese werden als Quantifizierungsfehler bezeichnet. Ein Quantifizierungsfehler ist die Differenz zwischen quantisiertem Signal und Originalsignal zu einem beliebigen Abtastzeitpunkt. Die hohen Auflösungen (ab 32 Bit) werden von Signalprozessoren oft nur intern verwendet, um eine höhere Fehlerfreiheit zu erreichen. Eine häufig anzutreffende Option ist die Speicherung in Gleitkommadarstellung (engl. *floating point*). Durch flexibles Verschieben der Dezimalposition wird ein höherer Abstufungsgrad auch bei geringen Wortbreiten ermöglicht.

Abhängig von der jeweiligen Aufgabenstellung muss entschieden werden, welche Sampleraten und welche Wortgrößen (zur Amplitudendarstellung) eingesetzt werden sollen. Dies sind Entscheidungen, die man bisweilen auch als Verwender von Audioanwendungen auf einem Personal Computer treffen muss. Zu geringe Abtastraten führen zu Verlusten und Verzerrungen (analog zur Filmtechnik, wo eine zu geringe Anzahl von Bildern pro Zeiteinheit zum Ruckeln führt). Im Gegensatz dazu können Qualitätssteigerungen, die höhere Raten bringen, meist nicht mehr wahrgenommen werden. Es gilt, einen Kompromiss zwischen erwünschter Bandbreite, verfügbarem Speicher und möglichen Transferraten zu finden (siehe auch Tab. 3.2). Besonderen Augenmerk verdient die 44,1k-Rate. Sie ist Langzeitstandard im privaten und im professionellen Audibereich. Auch bei der CD-Produktion wird diese Rate verwendet. Sie erfüllt bei Verwendung von entsprechend qualitativ hochwertigen Wandlern die Minimalanforderung für eine verlust-

freie Aufnahmetechnik. Im Bereich der Wortgrößen führen zu geringe Bitraten ebenfalls zu Verzerrungen sowie zu hohe Raten zu Qualitätssteigerungen jenseits der Wahrnehmungsgrenze (bei signifikant erhöhtem Bedarf nach Speicherkapazitäten). In diesem Zusammenhang muss auch der Maximallevel einer Aufnahme gesehen werden. Huber (2010, 214) bezeichnet den Trend zu immer höheren Lautstärken, der in den letzten Jahrzehnten zu verzeichnen ist als "loudness war". Generell kann mit digitalen Techniken ein höherer Dynamikbereich erfasst werden. Es wird ein Maximalpegel zwischen -12 dB und -20 dB vorgeschlagen. Dadurch werden Übersteuerungen⁴⁰ und störendes Rauschen auf ein erträgliches Maß reduziert. Tab. 3.3 zeigt eine Aufstellung unterschiedlicher Wortgrößen mit der jeweils resultierenden Anzahl an Abstufungen und dem Dynamikumfang, der abgedeckt werden kann (wobei die dB-Werte ab 24 Bits theoretische Größen sind). Als Vergleichsgrößen seien hier noch die Dynamikumfänge von analogen Medien wie Schallplatten (50 – 60 dB) oder Tonbandgeräten ohne Rauschunterdrückungssystem (bis 76 dB) erwähnt (vgl. Enders 1997, 230).

Bits pro Wort	Anzahl Abstufungen	Dynamikumfang in dB
8	256	49,8
16	65.536	97,8
20	1.048.576	121,8
24	16.777.216	145,8
32	4.294.967.296	193,8

Tab. 3.3. Wortgrößen bei digitaler Audiospeicherung, resultierende Anzahl an Abstufungen zur Darstellung der Amplitude, resultierender Dynamikumfang, welcher abgedeckt werden kann. Nach Huber (2010, 213).

3.2.1.4 Digitale Formate

Folgendes nach Weinzierl (2008, 487-497): Standardformate zur Speicherung von digitalen Audiodaten leisten einen wesentlichen Beitrag zu hoher Kompatibilität und erleichtern den Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Geräten oder Anwendungen. Stellvertretend für die große Menge an unterschiedlichen Formaten zur Speicherung von Audiodaten soll hier auf das Wave (.wav) Format von Microsoft eingegangen werden, welches eine der bekanntesten und am häufigsten

⁴⁰ Sammelbegriff für alle Vorgänge, bei denen ein Übertragungssystem zu hoch angesteuert wird (vgl. Enders 1997, 340).

verwendeten Strukturen ist, war es doch eines der ersten vollständig definierten Audio-Dateiformate. Wave-Files enthalten Audiodaten, die nach dem Standardverfahren PCM kodiert sind. PCM ist ein Akronym für *Pulse Code Modulation* und bezeichnet eine Methode zur effizienten und präzisen Speicherung von digitalen Audiodaten. Im Sampling werden die digitalen Sequenzen von Amplitudenwerten aus dem Analog-Digital-Wandler nicht eins zu eins als Rohdatenstrom gespeichert. Die Ablage auf dem Datenträger erfolgt nach Kriterien, die Effizienz und Fehlertoleranzen einschließen. Je nach Art der verwendeten Datenträger wird redundante Speicherung eingesetzt, um eine möglichst hohe Fehlertoleranz zu erreichen. Weiters entsprechen Wave-Files der RIFF-Spezifikation (*Resource Information File Format*), diese erlaubt die Speicherung von zusätzlicher Anwendungsinformation direkt im File. Im Gegensatz zu MP3⁴¹ oder anderen komprimierten Formaten kann mit Wave-Files verlustfrei gespeichert werden. Optional unterstützt Wave unterschiedliche Komprimierungscodes, im Falle von PCM wird ohne Komprimierung gearbeitet, d.h. es werden keine Algorithmen zur Datenreduktion (wie z.B. das Weglassen von Anteilen die gemäß psychoakustischen Erkenntnissen nicht gehört würden) eingesetzt. Das Wave-Format ist universell ausgelegt, so können Mono- oder Stereofiles mit unterschiedlichen Sampleraten und unterschiedlichen Auflösungen gespeichert werden. Ein Wave-File beginnt immer mit dem Zeichencode „RIFF“, gefolgt von Längeninformation und dem Zeichencode „WAVE“. Danach folgen Segmente, die als Sub-Chunks bezeichnet werden. Die einfachste Anordnung einer Wave-Struktur wird auch als *canonical form* bezeichnet. Diese Anordnung (zu sehen in Tab. 3.4) enthält nur einen Format-Sub-Chunk und einen Daten-Sub-Chunk, aber keinen der optionalen Typen (*cue*, *plst*, *inst* und *smpl*). In Abb. 3.7 ist ein hexadezimaler⁴² Auszug des Beginns eines Wave-Files zu sehen. Mit Kenntnis der zugrundeliegenden Struktur lässt sich die dort kodierte Steuerinformation auslesen. Die entsprechende Interpretation wurde als letzte Spalte in Tab. 3.4 angefügt.

⁴¹ Standardformat zur Speicherung von digitalen Audiodaten in komprimierter Form. Herausgegeben von der MPEG-Gruppe (Moving Picture Experts Group). Der zur Zeit gültige Standard ist ISO-MPEG Audio Level-2 Layer-3, kurz MP3, entwickelt vom Fraunhofer Institut und Thomson Multimedia (vgl. Huber 2010, 377).

⁴² Die hexadezimale Darstellungsform zeigt ein Byte (ein Zeichen, eine Speicherstelle) in zwei Hälften (Bit 1-4 und Bit 5-8) an. Dabei werden die Werte, die eine solche 4-Bit-Kombination annehmen kann (0 – 15) mit den Zahlen 0 - 9 (für die Werte 0 - 9) und den Buchstaben A bis F (für die Werte 10 – 15) dargestellt.

	Code	Start Byte	Byte Länge	Bedeutung	Werte in Beispiels-Audiodatei	
Riff-Gruppen-Chunk	"RIFF"	0	4	Kennzeichnung für Beginn eines Riff-Chunks		
	Größe	4	4	Längeninformation		
	"WAVE"	8	4	Name des Riff-Files: WAVE		
	Format-Sub-Chunk	"fmt"	12	4	Kennzeichnung für Beginn eines Format-Sub-Chunks	
		Größe	16	4	Längeninformation	10 00 00 00 > Länge 16
		Audioformat	20	2	Art der Audiokodierung	01 00 > Audiokodierung 1
		Kanalanzahl	22	2	Anzahl der Kanäle	02 00 > 2 Kanäle
		Abtastrate	24	4	Originale Abtastrate	22 56 00 00 > 22050
		Average Bytes per Second	28	4	= Kanalzahl x Abtastrate x Bytes pro Sample	88 58 01 00 > 88200 (= 2 x 22050 x 2)
		Blockgröße	32	2	= Kanalzahl x Bytes pro Sample	04 00 > 2 x 2 Bytes pro Sample
Data-Sub-Chunk	Bits per Sample	34	2	Bits pro Abtastwort (nur bei PCM-Kodierung)	10 00 > 16 Bits	
	"data"	36	4	Kennzeichnung für Beginn eines Daten-Sub-Chunks		
	Größe	40	4	Längeninformation		
	Audiodaten	44	n...	Audiodaten in Struktur und Länge wie in den Vorfeldern festgelegt		

Tab. 3.4. Einfachste Anordnung einer Wave-Struktur (canonical form). Nach Weinzierl (2008, 696). Die Werte in der Beispielspalte wurden der Audiodatei entnommen, die in Abb. 3.7 zu sehen ist.

```

0x000000: 52 49 46 46 C4 C7 0D 00 57 41 56 45 66 6D 74 20 RIFFÄÇ . .WAVEfmt
0x00010: 10 00 00 00 01 00 02 00 22 56 00 00 88 58 01 00 . . . . ."V...X.
0x00020: 04 00 10 00 64 61 74 61 A0 C7 0D 00 1C EF 00 00 . . . .data Ç...i..
0x00030: DF 10 CA 21 E5 10 CF 21 E8 10 CD 21 E9 10 CA 21 ß.Ê!à.Ï!è.Í!é.Ê!
0x00040: EA 10 C8 21 E8 10 C9 21 E6 10 CB 21 E5 10 CC 21 é.Ê!è.Ê!æ.Ê!á.Ï!
0x00050: E4 10 CA 21 E3 10 C9 21 E4 10 C9 21 E5 10 CB 21 ä.Ê!ä.Ê!ä.Ê!ä.Ê!
0x00060: E5 10 CC 21 E6 10 CA 21 E6 10 C9 21 E6 10 C9 21 ä.Ï!æ.Ê!æ.Ê!æ.Ê!
0x00070: E5 10 CB 21 E5 10 CD 21 E5 10 CB 21 E4 10 C8 21 ä.Ê!ä.Ï!ä.Ê!ä.Ê!
0x00080: E4 10 C5 21 E5 10 BC 10 E5 10 28 DE E5 10 33 DE ä.Ä!ä..ä.(pä.3p

```

Abb. 3.7. Beginn eines Wave-Files in hexadezimaler Darstellung. Es handelt sich dabei um eine Datei, die mit SynthEdit erzeugt wurde. Ein spektraler Ausschnitt aus dieser Datei ist in Abb. 3.2 (S.30) zu sehen.

3.2.2 MIDI

Die folgende Beschreibung von MIDI wurde nach Enders (1997, 175-178), Fortune et al. (2007, 163-165) und Russ (2009, 476-483) erstellt.

In der Frühzeit der Synthesizer benötigte man für deren Steuerung pro Gerät ein Keyboard. Wollte man mehrere Synthesizer gleichzeitig spielen, um unterschiedliche Klänge zu kombinieren, war die entsprechende Anzahl von Keyboards einzusetzen. Man erinnere sich an die altarartigen Bühnenaufbauten von Keith Emerson, der seine Auftritte in einem Meer von Keyboards zu einem Markenzeichen machte. Der Wunsch, mehr als ein Gerät mit nur einer Steuerung zu betreiben, gab den Anstoß zur Entwicklung von MIDI, dessen erster Einsatz auf der

NAMM Show⁴³ 1983 vorgestellt wurde. Dabei wurde das Zusammenspiel zweier, von unterschiedlichen Herstellern erzeugten Synthesizern demonstriert. Es handelte sich dabei um die ersten Synthesizer, die serienmäßig mit MIDI ausgestattet waren, den *Prophet 600* von Sequential Circuits und den *Jupiter P-6* von Roland. Im selben Jahr wurde die MIDI -Norm als Spezifikation vom Verband der MIDI -Hersteller⁴⁴ veröffentlicht. Diese Basisspezifikation wurde im Lauf der Zeit mit weiteren Normen ergänzt. Bei Enders (1997, 175) findet sich eine Zusammenstellung dieser Normen: *Standard MIDI File* (Speicherung von MIDI -Daten), *Sample Dump Standard* (Übertragung von Sound Samples via MIDI), *General MIDI System* (Vereinheitlichung von Synthesizern), *MIDI Machine Control* (Kommunikation mit Aufnahmegegeräten), *MIDI Time Code* (zeitliche Synchronisation), *MIDI Show Control* (Steuerung von Vorführungen und Konzerten), *MIDI Tuning Standard* (Stimmungssysteme). Das Akronym MIDI steht für Musical Instrument Digital Interface und ist eine gemeinsame Sprache mit der elektronische Musikinstrumente und sehr bald auch Computer kommunizieren konnten. Es beschreibt als Protokoll einen seriellen digitalen Datenstrom, der von MIDI-Geräten interpretiert (gelesen) oder ausgegeben (geschrieben) werden kann. Die Übertragungsgeschwindigkeit beträgt 32000 Bits pro Sekunde, wodurch die Übermittlung eines Bytes etwa 0,32 ms dauert. Auf Grund dieser geringen Übertragungsgeschwindigkeit kann es bei Übermittlung von größeren Datenmengen zu hörbaren Verzögerungen kommen. Zur Entstehungszeit von MIDI war Speicher noch ein rares Gut⁴⁵, dies und die langsame Übertragungsrate begründen die schlanke und platzsparende Architektur des MIDI -Protokolls. Der Nachteil dieser Schlankheit ist die Nichterweiterbarkeit, die enge Grenzen setzt. Andererseits hat sich MIDI dadurch als weltweiter Standard etabliert, der eine eindeutige und unverwechselbare Sprache spricht.

MIDI ermöglicht es, mehrere Geräte im Verbund mit einer zentralen Steuerung zu betreiben. Als geräteunabhängiger Standard verbindet es Geräte von unterschiedlichen Herstellern. Die digitalen Steuerströme lassen sich auch digital speichern.

⁴³ NAMM steht für *National Association of Music Merchants*. Dieser Herstellerverband der Musikindustrie veranstaltet eine jährliche Messe, die NAMM Show, in Anaheim, Kalifornien.

⁴⁴ MIDI Manufacturers Association.

⁴⁵ Was sich immer rasanter ändert: nach dem Gesetz von Moore (Moore's Law, 1975) verdoppelt sich die Anzahl von Transistoren in integrierten Schaltungen alle zwei Jahre. Mittlerweile nimmt man einen Zeitraum von 18 Monaten für die Verdoppelung der Integrationsdichte an (vgl. Huff 2009, 12-32).

Eine der Grundaufgaben einer MIDI -Steuerung ist es, den angeschlossenen Geräten zu signalisieren, dass eine bestimmte Note beginnen soll in einer bestimmten Lautstärke zu erklingen oder dass eine erklingende Note enden soll. Die kleinste Informationseinheit in einem MIDI -Strom ist ein MIDI -Befehl (Command). Er wird als Sequenz von mehreren Bytes dargestellt. Das erste Byte einer Sequenz ist das Status-Byte, es kodiert den Befehl und den Kanal (Channel). In einem MIDI -Verbund arbeitet jedes der beteiligten Geräte in einem von 16 möglichen Kanälen. Über die Kanal-Nummer im Status-Byte erkennt das jeweilige Gerät, ob ein Befehl an es gerichtet ist. Dem Status-Byte folgt eine Sequenz von zwei Befehls-spezifischen Bytes. Der Inhalt dieser beiden Bytes hängt von der Art des Befehls ab. So folgen dem Note-On Command ein Byte für die Tonhöhe (pitch) und eines für Lautstärke (velocity).

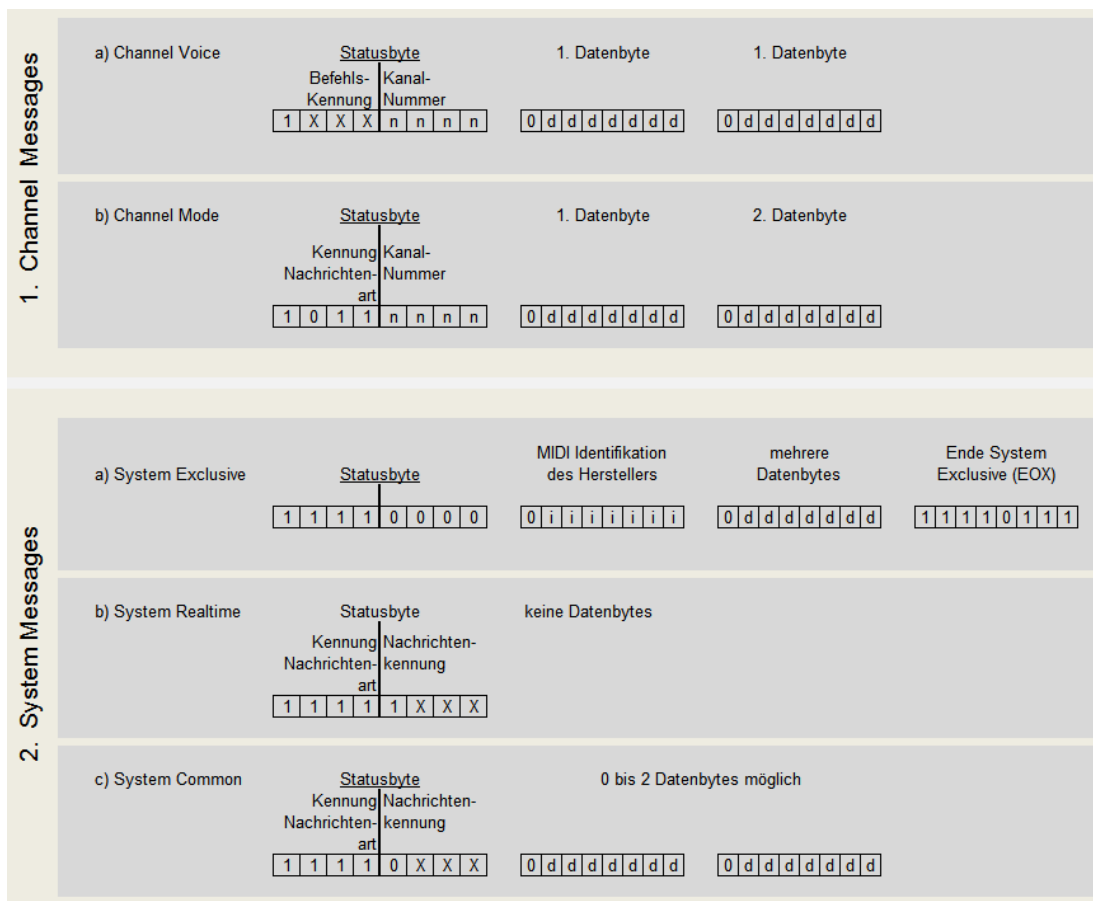


Abb. 3.8. Übersicht über MIDI Steuerbefehle. Nach Enders (1997, 176).

Abb. 3.8 zeigt eine Übersicht über alle möglichen MIDI -Befehle. Erkennbar ist die generelle Struktur mit einem Statusbyte gefolgt von keinem bis mehreren Datenbytes. Statusbytes werden als solche eindeutig durch die 1 im ersten Bit identi-

fiziert, Datenbytes durch eine 0. Die 7 restlichen Bits eines Datenbytes repräsentieren einen Wertebereich zwischen 0 und 127. Im oberen Teil der Abbildung sind die Channel-Messages zu sehen. Dies sind Befehle, die über einen MIDI-Kanal an ein MIDI-Instrument geleitet werden. Mit Channel-Voice-Befehlen werden die einzelnen Stimmen eines MIDI-Gerätes angesteuert. Die Befehlskennung eines Channel-Voice-Befehls ist in den Bits 2 bis 4 des Statusbyte kodiert. Hier sind die Werte 000, 001, 010, 011, 100, 101 und 110 möglich. Tab. 3.5 zeigt diese Channel-Voice Befehle mit ihren jeweiligen Operanden (Datenbytes). In Bit 5 bis 8 ist die Nummer des Kanals, an welchen sich ein Befehl richtet, kodiert, womit 16 unterschiedliche Kanäle (0 bis 15) angesteuert werden können.

Status	Status dezimal	Datenbyte1	Datenbyte 2	Beschreibung
1000nnnn	128	Tonhöhe	Lautstärke	NOTE_OFF
1001nnnn	144	Tonhöhe	Lautstärke	NOTE_ON
1010nnnn	160	Tonhöhe	Druckstärke	AFTER TOUCH
1011nnnn	176	Controller Nummer	Wert	CONTROL CHANGE
1100nnnn	192	Programm Nummer		PROGRAM CHANGE
1101nnnn	208	Druckstärke pro Kanal		AFTER TOUCH
1110nnnn	224	Wert	Wert	BITCH BENDING

Tab. 3.5. Die Channel-Voice Nachrichten im Überblick. Nach Enders (1997, 177).

Mit *Note_On* und *Note_Off* zur Steuerung von Tonhöhe, Tondauer und Lautstärke ist die Basisfunktionalität für eine Melodieführung gegeben. Mit *Programm Change* wird das jeweilige MIDI -Instrument zugeordnet bzw. aktiviert. Die Zuordnung von MIDI-Instrument (d.h. von der jeweils gespeicherten Klangfarbe) zur Programmnummer ist nach dem *General MIDI System* normiert. Diese reicht vom Acoustic Bright Piano (Nr. 1) über Violine (Nr. 41), Cello (Nr. 43) bis zum Gewehrschuss (Nr. 128). Eine komplette Tabelle dieser Zuordnungen findet sich bei Enders (1997, 112-114). Mit den sogenannten MIDI-Controllern verfügen MIDI-Geräte neben der Tastatur über zusätzliche Kontroll-Elemente, mit welchen Spielgeschehen und Klangverhalten gesteuert werden können (vgl. Fortune et al. 2007, 163-165). Neben Pedal, Modulationsrad, Frequenzshifter (engl. pitch-bender) können dies auch beliebige Drehknöpfe, Schieberegler oder Taster sein. Bei Wertänderung an einem Controller übermittelt dieser den neuen (d.h. geänderten) Wert im Datenbyte 2 als *Control Change* Nachricht. Die Nummer des Cont-

rollers ist im Datenbyte 1 kodiert, 128 unterschiedliche Controller können somit verwaltet werden. Für die Zuordnung der Controller zu einer dieser 128 Nummern existiert eine Grundnorm (siehe Tab. 3.6) die aber nicht so strikt eingehalten werden muss wie die anderen MIDI-Regeln, weshalb sie von Hersteller zu Hersteller bzw. von Anwendung zu Anwendung variieren kann.

0	Bank Select
1	Modulation Wheel
2	Breath Controller
3	Undefined
4	Foot Controller
5	Portamento Time
6	Data Entry MSB
7	Main Volume
8	Balance
9	Undefined
10	Pan
11	Expression
12	Effect Control 1
13	Effect Control 2
14–15	Undefined
16–19	General Purpose 1–4
20–31	Undefined
32	Bank Select (LSB)
33	Modulation Wheel (LSB)
34	Breath controller (LSB)
36	Foot Pedal (LSB)
37	Portamento Time (LSB)
38	Data Entry (LSB)
39	Volume (LSB)
40	Balance (LSB)
42	Pan position (LSB)
43	Expression (LSB)
44	Effect Control 1 (LSB)
45	Effect Control 2 (LSB)
46–63	LSB for Controllers 14–31
64	Hold Pedal
65	Portamento
66	Sostenuto
67	Soft Pedal
68	Legato Footswitch
69	Hold 2 Pedal
70	Sound Variation
71	Sound Timbre (Resonance)
72	Release Time
73	Attack Time
74	Sound Brightness (Cutoff)
75–79	Sound Controllers 6–10
80–83	General Purpose 5–8
84	Portamento Control
85–90	Undefined
91	Effect 1 (Reverb) Level
92	Effect 2 (Tremolo) Level
93	Effect 3 (Chorus) Level
94	Effect 4 (Detune) Level
95	Effect 5 (Phaser) Level
96	Data Increment
97	Data Decrement
98	NRPN LSB
99	NRPN MSB
100	RPN LSB
101	RPN MSB
102–119	Undefined
120	All Sound Off
121	Reset All Controllers
122	Local Keyboard
123	All Notes Off
124	Omni Mode Off
125	Omni Mode On
126	Mono Mode On
127	Poly Mode On

Tab. 3.6. Standard Definitionen der MIDI-Controller. Aus Fortune et al. 2007, 164.

Die zweite Gruppe der Channel-Messages sind die Channel-Mode-Messages (vgl. Enders 1997, 182). Sie übertragen die Befehle zur Auswahl des MIDI-Modes.

Damit ist einer von vier mögliche Übertragungs-Modi gemeint: *Omni-Mode* (richtet sich an alle Kanäle), *Poly-Mode* (Einstellung auf beliebigen Kanal, nur Daten des eingestellten Kanals werden gesendet oder empfangen), *Mono-Mode* (jede monophone Stimme geht an einen anderen Kanal) und *Multi-Mode* (Stimmen können beliebig, in der Regel auch dynamisch zugeordnet werden).

Die zweite Hauptgruppe der MIDI-Nachrichten enthält die System-Messages (siehe Abb. 3.5, vgl. Enders 1997, 318). Diese untergliedern sich in *System Common Messages* (allgemeine Nachrichten für alle angeschlossenen Geräte und nicht nur für den gewählten Kanal), *System Exclusive Messages* (zum Austausch gerätespezifischer Informationen wie z.B. Klangkonfigurationen) und *System Realtime Messages* (Synchronisation von MIDI-Geräten über MIDI -Clock⁴⁶).

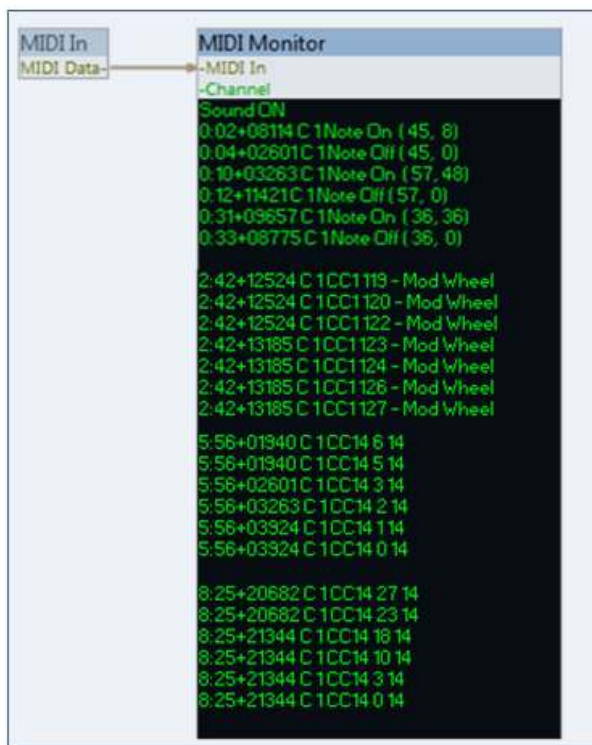


Abb. 3.9. MIDI-Datenstrom von einem USB-Keyboard nach SynthEdit. Im ersten Block sieht man 3 Note-On – Note-Off – Ereignisse: **45** (A2, 110 Hz, velocity 8), **57** (A3, 220 Hz, v. 48) und **36** (C2, 65.4 Hz, v. 36). Der zweite Block zeigt (als Control Change Nachricht) die letzte Phase eines Drehens am Modulationsrad, was in der obersten Position den Wert 127 liefert. Der dritte Block zeigt das langsame Drehen eines Drehreglers auf null (als Control Change 14) mit den Werten 6,5,4,3,2 und 1. Der letzte Block zeigt das schnellste Drehen desselben Reglers, die Werte springen über 27,23,18,10 und 3 auf null, eine Demonstration dafür, dass MIDI hier zu langsam ist, um alle Zwischenwerte zu übermitteln.

⁴⁶ Midi Clock ist ein Synchronisierungssignal im System Realtime Format. Mögliche Werte dieses Signals sind clock, start, continue und stop.

Abb. 3.9 zeigt einen Ausschnitt aus einem MIDI-Strom, der von einem USB-Keyboard (Alesis QX49) an SynthEdit geschickt wurde und in SynthEdit mit Hilfe eines MIDI-Monitors sichtbar gemacht wurde.

MIDI-Hardware kann mit speziellen 5-poligen MIDI-Kabeln verbunden werden. An den Geräten finden sich drei unterschiedliche Anschlüsse: MIDI-IN, MIDI-OUT und MIDI-THRU. Diese Anschlüsse sind elektrisch nicht direkt verbunden, der Datenaustausch erfolgt über Optokoppler. Diese übertragen Daten über Lichtimpulse, was zu einer geringeren Störanfälligkeit (Brummen, Rauschen) führt. Mit den drei Anschlüssen lassen sich MIDI-Geräte zu beliebigen MIDI-Verbänden zusammenschließen. Die Geräte werden gesteuert von den Daten, die über MIDI-IN einfließen. Steuernde Daten fließen durch MIDI-OUT aus den Geräten, und zwar nur solche, die aktiv vom Gerät erzeugt wurden. MIDI-THRU ist ein Weiterleitungsausgang, der exakt das ausgibt, was durch MIDI-In eingeflossen ist. Ein Blick in Abb. 3.10, die einen Verbund von vier MIDI-Geräten zeigt, erklärt diese Steuerabhängigkeiten. Hier werden Signale, die von Gerät 1 erzeugt werden, über dessen MIDI-Out an das MIDI-In von Gerät 2 weitergegeben. Von dort gelangt das Signal von 1 über MIDI-Thru auch an Gerät 3. Damit klingen 2 und 3 mit, wenn das Ursprungssignal auf 1 erzeugt wird. In der Abbildung werden auch die Signalflüsse je nach Ursprungsgerät des primären Signals gezeigt.

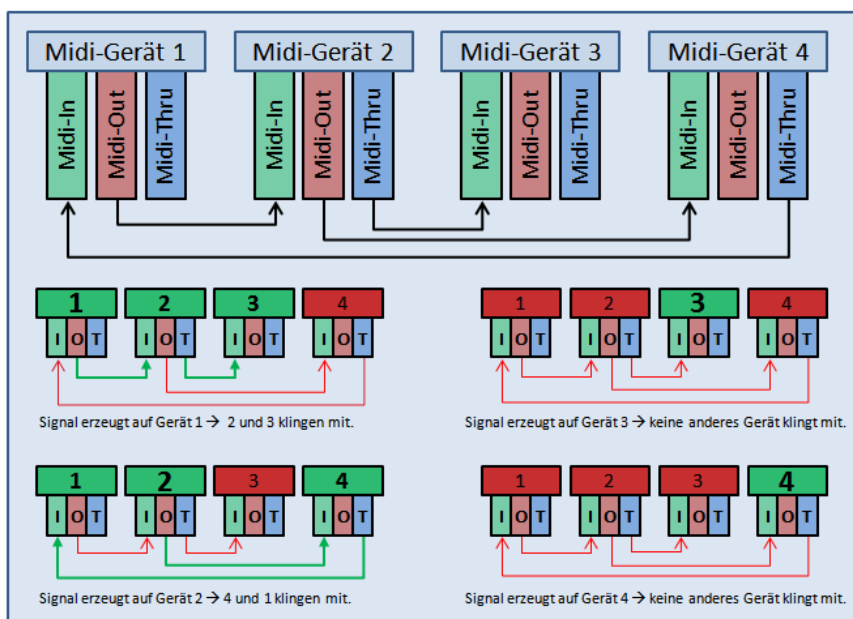


Abb. 3.10. Vier MIDI-Geräte, die in unterschiedlicher Weise miteinander verbunden sind. Oben das generelle Schema, im unteren Teil die Signalflüsse je nach Ursprungsgerät des primären MIDI-Signals. Eigenerstellung Gredler-Oxenbauer.

Auch das SynthEdit-Variophon arbeitet mit MIDI. Die steuernde Außenwelt ist durch MIDI-Geräte (z.B. MIDI-Keyboard) repräsentiert. Deren Signale gelangen über USB⁴⁷ in den Computer und werden von SynthEdit unter Einsatz von speziellen Konvertern in Kontrollspannungen umgewandelt. Eine detaillierte Beschreibung der MIDI-Steuerung im SynthEdit-Variophon findet sich in einem eigenen Abschnitt (siehe 4.2.2.2, S.79) innerhalb der Beschreibung der SynthEdit-Umsetzung.

3.3 Die Funktionsweise von Synthesizern

Synthesizer sind elektronische Klangerzeugungsgeräte. Ihre Architektur basiert auf dem Grundkonzept der Modularität. Die einzelnen Bausteine (Module) lassen sich in (fast) beliebiger Weise kombinieren, weshalb Synthesizer oft auch als Klangbaukästen bezeichnet werden, was auch im Sinne der Bezeichnung *Synthesizer* liegt. Diese beruht auf dem Begriff *Synthese* und bezieht sich auf Vorgänge, bei denen etwas zusammengesetzt, synthetisch erzeugt oder aufgebaut wird. (vgl. Enders 1985, 8-9). Die Module besitzen Ein- und Ausgänge zur Ein- und Ausgabe von Steuerwerten oder Signalinformation. Bei analogen Synthesizern wird diese Information in Form von Gleichspannung transportiert, wobei sich die Spannungsgrößen in einem definierten (normierten) Wertebereich bewegen.

	Modul		Schallereignis	Klangempfindung
Klangerzeugung	Tongenerator	VCO	Periodische Schwingungen	Tonhöhen
	Rauschgenerator	VCO	Aperiodische Schwingungen	Geräusch, Rauschen
Klangverarbeitung	Filter	VCF	Teiltenspektrum	Klangfarbe
	Verstärker	VCA	Amplitude	Lautstärke
Klangsteuerung	Steuereinrichtungen		Programmierung,	Tongebung,
	Tastatur		Steuerung und	Artikulation,
	Steueroszillatoren	LFO/VCO	Speicherung	Klänge,
	Joystick		von Spannungen	komplexe musikalische
	Sequencer			Strukturen und Vorgänge
			

Tab. 3.7. Funktionsbereiche eines Synthesizers und deren Anteil an Erzeugung, Verarbeitung und Steuerung von Klang. Nach Enders (1985, 9).

Bei den Modulen selbst unterscheidet man zwischen den primären Tongeneratoren und sekundären Modulen zur Klangbearbeitung. Zu den primären Komponenten

⁴⁷ Universal Serial Bus, serielle Schnittstelle zur Verbindung eines Computers mit externen Geräten.

ten zählen Oszillatoren, diese erzeugen periodische Schwingungen in unterschiedlichen Wellenformen. Die Gruppe der sekundären Elemente enthält wesentliche Bausteine für Modulation und Klang- bzw. Klangfarbenformung wie Filter, Hüllkurvengeneratoren oder Verstärker. Eine dritte Gruppe enthält Elemente, die Klangsteuerung betreiben und damit den Funktionsumfang erweitern. In dieser Gruppe finden sich Steuereinrichtungen, welche über Programmierung und Speicherung von Spannungen komplexe musikalische Strukturen und Abläufe realisieren können (vgl. Enders 1997, 312).

Modul	Eingang	Werte bzw. Auswahl	Ausgang
VCO	Frequenz Pulsweite Wellenform	meist in Volt/Oktav (5 Volt = 440 Hz) nur bei Pulsschwingung Sägezahn, Puls, Rechteck, Dreieck, Sinus	Signal
VCA	Amplitude Signal		Signal mit modifizierter Amplitude
VCF	Signal Cutoff-Frequenz Resonanz Flankensteilheit Filterart	Frequenz ab der Filterwirkung einsetzt Faktor Anhebung Amplitude bei Cutoff-Frequenz Filterwirkung (pro Oktave) Low-Pass, High-Pass, Band-Pass, Band-Sperre	Signal gefiltert
ADSR	Attack Decay Sustain Release Gate	Dauer Anstieg Dauer Abstieg auf Sustain Level Amplitude die gehalten wird Dauer des Nachklingens on > start Attack, off > start Release	Amplitude

Tab. 3.8. Überblick über die wichtigsten Module eines Synthesizers und deren Ein- und Ausgänge. Nach Russ (2009, 104).

Bei analogen Synthesizern ist dieser Funktionsbereich in einem eher eingeschränkten Umfang verfügbar. Virtuelle Computeranwendungen hingegen bieten eine fast unbegrenzte Vielfalt an programmierbaren Abläufen (vgl. Russ 2009, 73-75).

Tab. 3.7 zeigt eine schematische Darstellung der Funktionsbereiche eines Synthesizers und deren Anteil an der Erzeugung, Verarbeitung und Steuerung von Klang. In der Folge werden die wichtigsten dieser Elemente im Detail beschrieben. Einen Überblick über die wichtigsten Module und deren Ein- und Ausgänge zeigt Tab. 3.8.

Spannungssteuerung

Das Prinzip der Spannungssteuerung (engl. Voltage Control) ist ein Grundpfeiler der präzisen und flexiblen Arbeitsweise eines analogen Synthesizers. Die theoretischen Grundlagen dieses Prinzips wurden von Robert Moog (1965) formuliert, sie fanden ihre erste praktische Umsetzung in Moogs modularen Systemen (siehe auch 2.4.1.1, S.13). In Moogs Artikel werden bereits die wichtigsten Elemente eines Synthesizers beschrieben, Moog verwendet auch bereits die Abkürzungen VCA, VCO und VCF, und stellt eine beispielhafte Anwendung vor, die als Verbund dieser Module arbeitet. Interessanterweise wird diese Anwendung noch nicht als Synthesizer, sondern als *composition system* bezeichnet (Moog 1965, 205).

Mit Hilfe von Gleichspannungen im Niederspannungsbereich – meist zwischen -15 und +15 Volt – lassen sich Größenänderungen auch in sehr kleinen Bereichen analog abbilden. Eine solche Änderung wäre zum Beispiel ein Frequenz-Vibrato, wo innerhalb von kurzen Zeiteinheiten Frequenzschwankungen von wenigen Hertz erfolgen. Die entsprechende Spannungsschwankung bewegt sich in diesem Fall im Millivolt-Bereich.⁴⁸ Ein weiterer grundlegender Vorteil liegt in der Möglichkeit, mehrere Spannungen additiv oder subtraktiv zu verknüpfen. Liegen mehrere Spannungen an einem Eingang, so werden deren Werte vorzeichengerecht addiert. Will man beispielsweise um eine Oktave nach unten transponiert spielen, so genügt es, an den Frequenzeingang der entsprechenden Komponente zusätzlich eine Spannung von minus ein Volt zu legen⁴⁹ (vgl. Enders 1985, 19-21; ders. 1997, 294 u. 304; Russ (2009, 104).

Auch computerbasierte Systeme zur Klangsynthese arbeiten mit Spannungssteuerung. Bei SynthEdit werden die entsprechenden Kontrollflüsse als virtuelle Spannungswerte abgebildet. Die virtuellen Komponenten verwenden oft dieselben Steuerwertbereiche wie ihre analogen Vorbilder und verhalten sich somit auch insgesamt wie diese. So verwendet SynthEdit Spannungs-Ein- und Ausgänge für Audiosignale, deren Spannungsbereich im Allgemeinen zwischen -10 und +10 Volt liegt. Legt man mehrere Spannungen an einen Eingang, so werden diese ebenfalls additiv verknüpft (Fortune et al. 2007, 15).

⁴⁸ Ein Millivolt (1 mv) = 1/1000 Volt..

⁴⁹ Siehe auch 3.3.1, S. 48.

3.3.1 Oszillatoren

Wie natürliche Musikinstrumente benötigen Synthesizer einen primären Tongenerierungsprozess. Was bei Streichern Saite und Bogen, bei Bläsern Rohrblatt oder Lippenspannung bewerkstelligen, übernehmen im Synthesizer ein oder mehrere Oszillatoren. Diese sind in der Lage, die Wellenformen, die einem periodischen Schwingungsmuster zu Grunde liegen, zu erzeugen. Neben diesen gibt es auch noch die reine Sinusschwingung. Ein Sinuston schwingt nur in einer Frequenz und besitzt somit keine Obertöne. Reine Sinustöne kommen bei natürlichen Instrumenten (mit Ausnahme der Stimmgabel) kaum vor. Alle anderen Schwingungsformen eines Oszillators erzeugen ein sogenanntes Spektrum, damit ist das gleichzeitige Vorhandensein eines Grundtons und seiner Obertöne gemeint. Die Frequenz der Obertöne bei harmonischen Schwingungen beträgt jeweils ein ganzzahliges Vielfaches des Grundtons (z.B. 110 Hz, 220 Hz, 330 Hz, ...). Wie dieses Spektrum strukturiert ist, d.h. welche Obertöne in welcher Intensität (Amplitude) enthalten sind, ist abhängig von der Wellenform. Um reichhaltige klangliche Möglichkeiten zu bieten, sollten leistungsfähige Synthesizer mindestens zwei Oszillatoren besitzen. Diese können dann minimal gegeneinander verstimmt werden (Schwebungen, Streicherklang), sie können unterschiedliche Wellenformen mischen (Erzeugung neuer Grundklänge), sie können synchronisiert werden (siehe 3.3.5.9, S. 60) oder - wie z.B. bei der Frequenzmodulation (siehe 3.4.3, S. 64) - sich gegenseitig steuern (vgl. Becker 1990, 112).

3.3.1.1 Wellenformen aus Oszillatoren

Abb. 3.11 zeigt eine Zusammenstellung der verschiedenen Wellenformen und der damit erzeugten Spektren. Die obertonreichste Form ist die Sägezahnschwingung, ihr Spektrum enthält in absteigender Intensität die Obertöne aller Ordnungszahlen. Das Spektrum einer Dreiecksschwingung hingegen enthält nur Obertöne deren Frequenz in einem ungeradzahligem Verhältnis zum Grundton stehen, wobei die Intensität mit steigender Ordnungszahl stark abfällt. Ähnlich verhält es sich bei der Rechteckschwingung, auch hier gibt es nur Obertöne ungerader Ordnungszahl, allerdings nimmt deren Amplitude nicht so drastisch ab wie bei der Dreiecksschwingung. Die Pulsschwingung nimmt einen stufenförmigen Verlauf, wobei das Verhältnis zwischen Zeitdauer des positiven Ausschlags und Perioden-

dauer (auch Impulsanteil) ausschlaggebend für die Obertonverteilung ist. So wird beispielsweise bei einem Impulsanteil von 10 Prozent (Impulsdauer = Periodendauer * 1/10) die Amplitude jedes 10. Obertones⁵⁰ auf ein Minimum gesetzt.⁵¹ Die Rechteckschwingung ist somit ein Sonderfall der Pulsschwingung. Sie kann als Pulsschwingung mit einem Impulsanteil von 50 Prozent gesehen werden, wodurch jeder 2. Oberton⁵² minimiert wird (vgl. Enders 1985, 47-54).

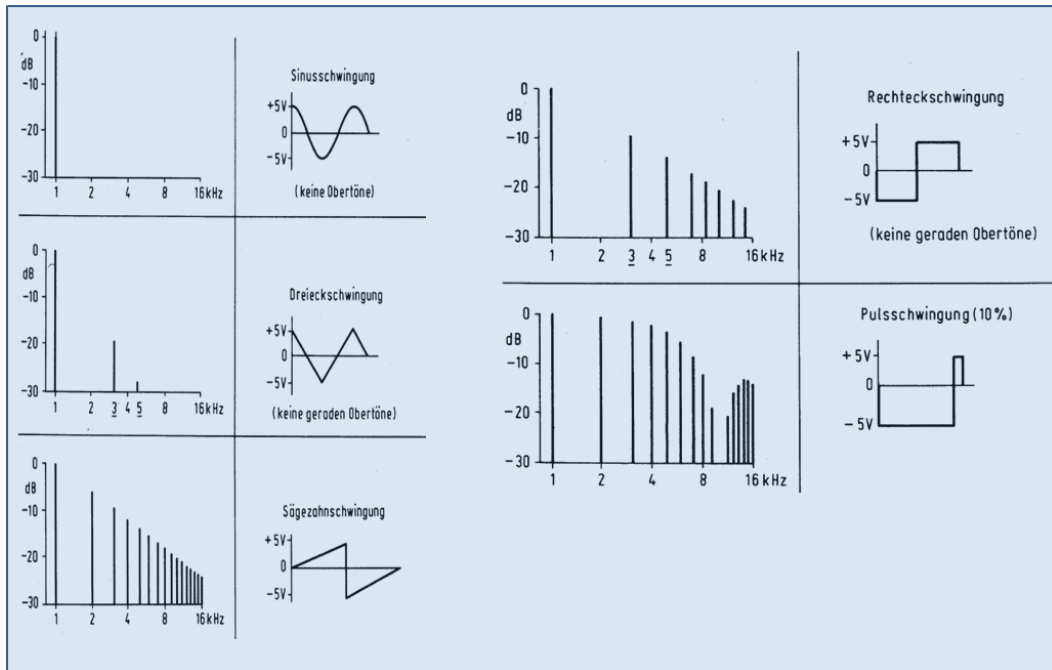


Abb. 3.11. Schwingungsformen eines Oszillators mit resultierendem Spektrum (Enders 1985, 46).

3.3.1.2 Steuergrößen eines Oszillators

Die wichtigste Steuergröße für spannungsgesteuerte Oszillatoren (engl. VCO für *Voltage Controlled Oscillator*) ist die Frequenz. Eine gängige Norm ist das Volt-pro-Oktav-Schema. Liegen 5 Volt am Frequenzsteuereingang, so schwingt die eingestellte Wellenform mit einer Grundfrequenz von 440 Hertz. Ein Volt erhöht setzt die Frequenz auf 880 Hertz, ein Volt abgezogen vermindert um eine Oktave auf 220 Hertz. Um Halbtonschritte abzubilden müssen entsprechend jeweils 0,833 Volt (=1/12 Volt) addiert oder subtrahiert werden. Man ist hier nicht auf Halbtonschritte beschränkt, selbst minimale Spannungsänderungen führen zu einer Änderung der Oszillatorfrequenz. Dadurch sind beispielsweise stufenlose

⁵⁰ = jeder (100/10). Oberton.

⁵¹ Mehr dazu in 3.1.3, S. 28.

⁵² = jeder (100/50). Oberton.

Glissandi oder Microintervalle möglich. Im Fall der Pulsschwingung gibt es eine weitere Steuergröße – die Pulsweite. Diese wird oft in einem Steuerbereich von $-x$ Volt nach $+x$ Volt geregelt. Null Volt bedeuten dann eine Impulsweite von 50 Prozent, also eine Rechteckschwingung. Bei SynthEdit liegt der Stellbereich zwischen -10 Volt und $+10$ Volt (SynthEdit Help/Oscillator). Die Stellgrößen können entweder als fixer Wert eingestellt oder mit den Spannungen aus den Ausgängen anderer Module geregelt werden. Auch eine Kombination aus beidem als Resultat vorzeichengerechter Addition von Spannungen ist möglich (vgl. Enders 1985, 21; Johne 2010, 25).

Beim SynthEdit-Variophon wird die Pulsweite dynamisch geregelt (siehe auch 0, S.83)

Bei SynthEdit-Oszillatoren findet man zwei weitere spannungsgesteuerte Eingänge: Phase Mod (Phasenmodulation) und PM Depth (Modulationstiefe). Diese können u.a. zur Umsetzung von FM-Synthese genutzt werden (SynthEdit Help/Oscillator; siehe auch 3.4.3, S.64).

3.3.1.3 LFO

Der LFO (engl. *Low Frequency Oscillator*) ist eine Sonderform des VCO. Sein Schwingungsbereich liegt im unteren Frequenzbereich, oft sind auch Schwingungen mit einer Periodendauer über einer Sekunde möglich, etwa im $1/10$ Hertz Bereich. Ein LFO wird vornehmlich zur Modifikation von Signalen verwendet, d.h. sein Signalausgang wird nicht als Signal weiterverarbeitet sondern als (oft zusätzliche) Steuergröße. Ein klassisches Beispiel dafür ist das bereits erwähnte Frequenzvibrato. Die langsam hinauf und hinunter pendelnden Spannungswerte am Signalausgang des LFO gehen zusätzlich an den Frequenzeingang eines VCO und bewirken damit eine Frequenzmodulation in der Modulationsfrequenz des LFO (vgl. Enders 1997, 164).

3.3.2 Filter

Filter werden eingesetzt, um Frequenzbereiche eines Spektrums zu unterdrücken. Ebenfalls spannungsgesteuert (VCF für engl. Voltage Controlled Filter) lässt sich die Frequenz, ab der die Filterwirkung einsetzt, von außen vorgeben. Diese Frequenz wird auch als Eckfrequenz (engl. *Cut-Off-Frequency*) bezeichnet. Je nach

Arbeitsweise eines Filters werden Bereiche ober- oder unterhalb oder im Bereich der Eckfrequenz unterdrückt oder durchgelassen. Man unterscheidet zwischen zwei elementaren Typen (Tiefpass, Hochpass) und Kombinationen dieser elementaren Typen. Tiefpassfilter (engl. low pass) unterdrücken den Frequenzbereich, der hinter der Eckfrequenz liegt, Hochpassfilter (engl. high pass) den Bereich vor der Eckfrequenz. Setzt man Tiefpass und Hochpass gemeinsam ein, erhält man je nach Lage eine Bandsperre oder einen Bandpass. Bei der Bandsperre liegt die Eckfrequenz des Tiefpass unter der des Hochpass, es wird alles durchgelassen, was unter der unteren oder über der oberen Eckfrequenz liegt. Beim Bandpass liegt die Eckfrequenz des Hochpass unter der des Tiefpass, es wird nur das durchgelassen, was über der Hochpass- und unter der Tiefpassgrenze liegt. In beiden Fällen ist die Breite des Bandes abhängig vom Abstand der Eckfrequenzen. Die Wirkung eines Filters setzt nicht schlagartig ein. Die zunehmende Dämpfung ab der Eckfrequenz wird als Filterwirkung oder Flankensteilheit bezeichnet. Als Maß dafür werden dB pro Oktave angegeben (vgl. Enders 1985, 55-58).

Die Flankensteilheit ist auch abhängig vom jeweiligen Design eines Filters. Ein Grundelement zur Filterung enthält einen Transistor und einen Widerstand (engl. *resistor* und *capacitor*, abgekürzt mit *RC* wird im engl. als Filterinstanz auch *pole* genannt). Je mehr interne Filterinstanzen (poles) vorhanden sind, desto größer ist die resultierende Flankensteilheit. Erreicht man mit einem One-Pole-Filter 6 dB, so sind es beim Two-Pole 12 dB und beim Four-Pole 24 dB (vgl. Russ 2009, 114). Einsetzen und Verlauf der Filterwirkung wird in Abb. 3.12 anhand von Filterkurven eines Hoch- und eines Tiefpassfilters gezeigt. Der dargestellte Tiefpassfilter mit einer Eckfrequenz von 1000 Hz und einer Flankensteilheit von -18 dB pro Oktav verringert entsprechend bei 2000 Hz die Amplitude um 18 dB. Der Hochpass wirkt ab 3000 Hz in entgegengesetzter Richtung.⁵³ Werden beide Filter gleichzeitig eingesetzt, so wird der Frequenzbereich zwischen Tief- und Hochpass als Bandsperre unterdrückt. Deren Mittenfrequenz liegt mit 2000 Hz zwischen den beiden Eckfrequenzen mit 1000 Hz und 3000 Hz. Ein Bandpass, bei dem der Durchlassbereich zwischen den Eckfrequenzen liegt, ist in Abb. 3.13 dargestellt. Ergänzend sei noch angemerkt, dass auch die Anordnung der Filter im Signalfluss bei Bandpass und Bandsperre unterschiedlich ist. Bei der Sperre müssen die Filter

⁵³ Seine Flankensteilheit beträgt allerdings ca. -28 dB / Oktave. Die scheinbar gleich steilen Flanken resultieren hier aus der nicht logarithmischen Skalierung der Frequenzachse.

parallel arbeiten, d.h. beide bekommen das ungefilterte Signal an den Eingang, beim Bandpass sind sie in Serie angeordnet, d.h. der zweite Filter filtert aus dem vorgefilterten Bereich das endgültige Band. Dies ist in Abb. 3.14 schematisch dargestellt. Zur Umsetzung des Fagott-Moduls im SynthEdit-Variophon sei vorweggenommen, dass auch hier eine Art Bandpass als Kombination von Hoch- und Tiefpass zum Einsatz kommt. Der Hochpass hat die Aufgabe, die untersten Teiltöne abzuschwächen, der Tiefpass reguliert den Anteil der höheren Frequenzen (auch in Abhängigkeit von der jeweiligen Dynamik). Eine weitere Stellgröße bei Filtern ist der Resonanzfaktor, auch als Q-Faktor bezeichnet. Er bestimmt, wie stark die Amplitude im Bereich der Eckfrequenz angehoben werden soll (vgl. Enders 1985, 59).

Abb. 3.15 zeigt die Kurven dreier Tiefpässe mit unterschiedlichen Q-Faktoren, die zu unterschiedlichen Anhebungen im Bereich der Eckfrequenz führen (von Null-Anhebung bis zu starker Erhöhung).

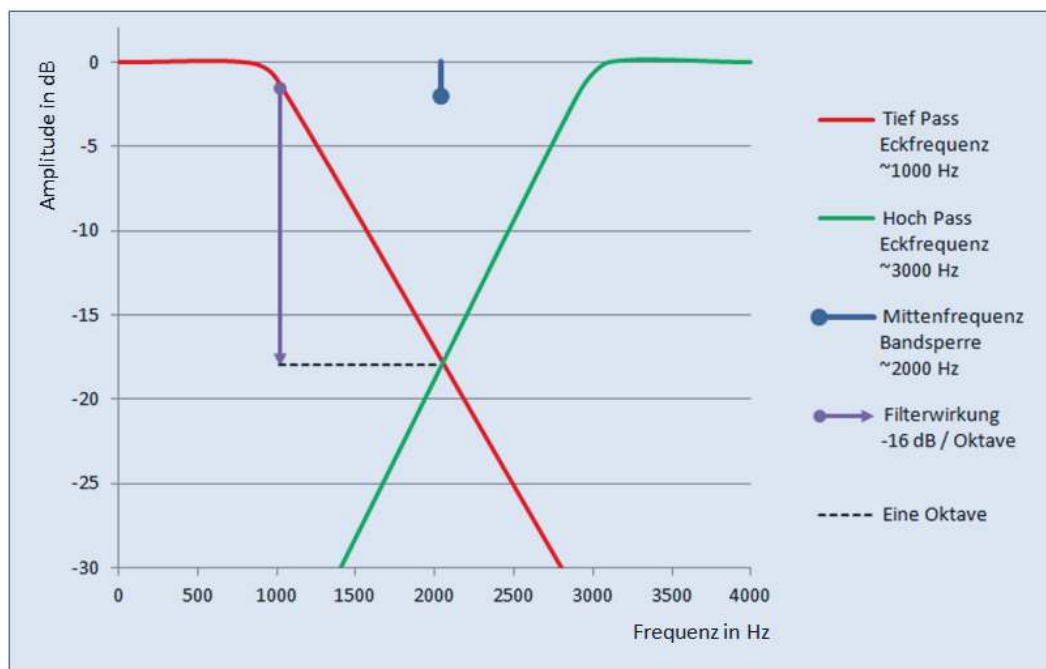


Abb. 3.12. Filterkurven eines Hochpass- und eines Tiefpassfilters. Die Flankensteilheit des Tiefpass beträgt -16 dB pro Oktave. Werden beide Filter gleichzeitig eingesetzt, erhält man eine Bandsperre, deren Mittenfrequenz zwischen den beiden Eckfrequenzen liegt. Nach Enders (1985, 56-58).

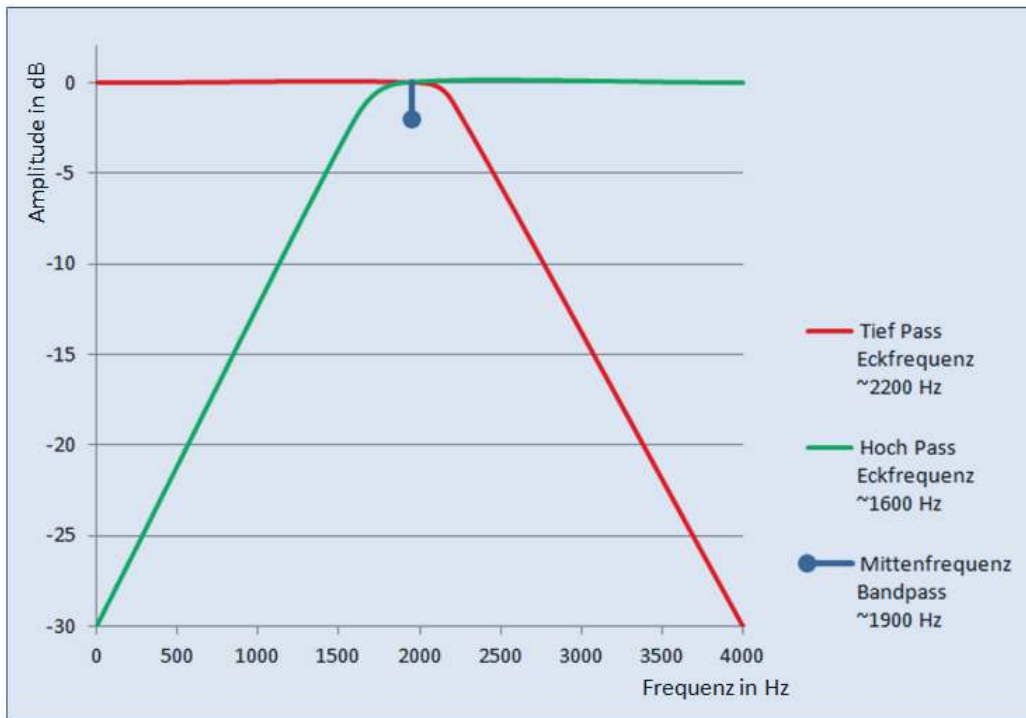


Abb. 3.13. Filterkurven eines Hoch- und Tiefpassfilters, die zusammen als Bandpass wirken. Die Mittelfrequenz des durchgelassenen Bereiches liegt auch hier zwischen den Eckfrequenzen. Nach Enders (1985, 56).

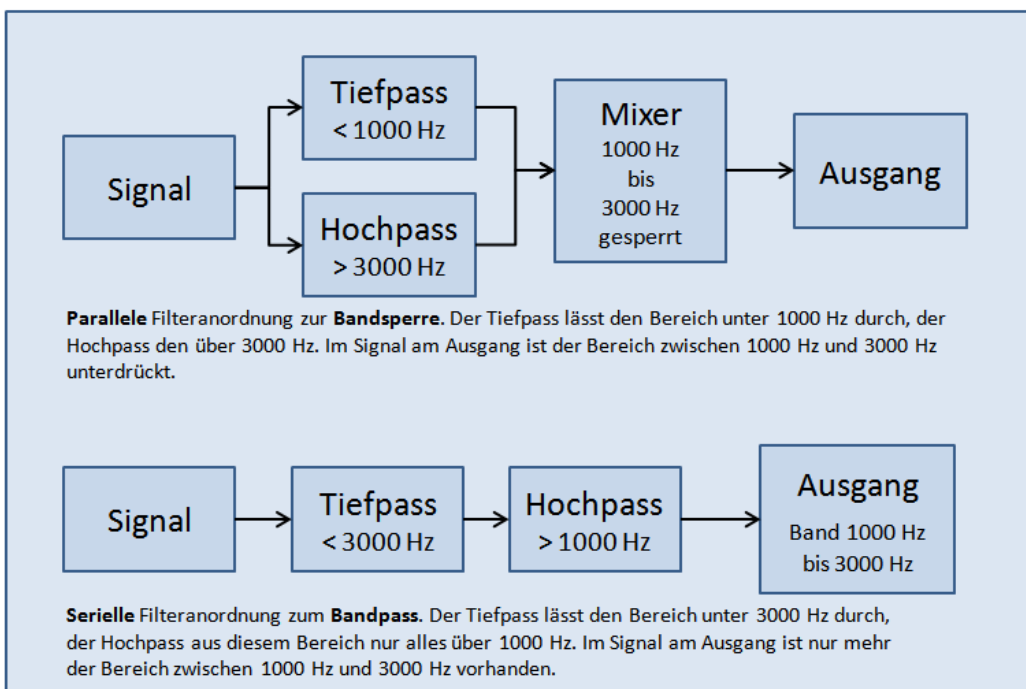


Abb. 3.14. Filteranordnungen für Bandsperre und Bandpass bei Verwendung einer Tiefpass-Hochpass Kombination. Eigenerstellung Gredler-Oxenbauer.

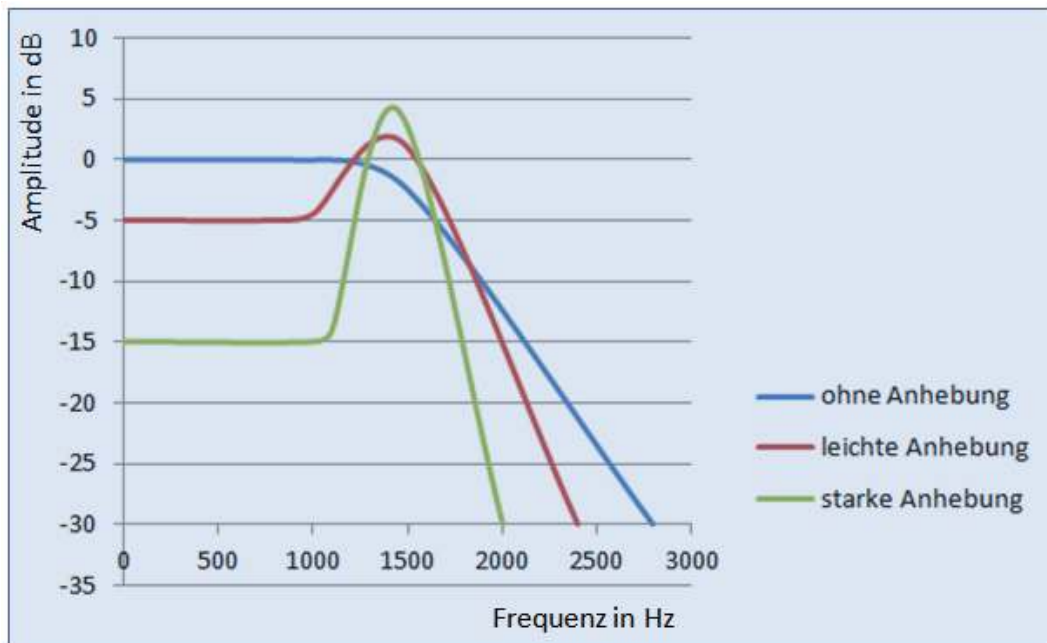


Abb. 3.15. Drei Tiefpassfilter mit unterschiedlichen Q-Faktoren bei einer Eckfrequenz von ~1500 Hz. Nach Enders (1985, 59).

3.3.3 VCA

VCA's (engl. *Voltage Controlled Amplifier*) sind Komponenten, welche die Amplitude eines Signals modifizieren. Sie sind meist keine Verstärker im Sinne von Hi-Fi-Endstufen, die ein Signal in ausreichender Verstärkung an Lautsprecher führen. Die Spannung des ausgehenden Signals kann daher maximal so hoch wie die des eingehenden Signals werden. Somit wäre es treffender, einen VCA als spannungsgesteuerten Amplitudenmodulator zu bezeichnen, weshalb VCA auch für *Voltage Controlled Attenuator* (engl. für Abschwächer) stehen kann. Man hat somit einen Baustein, der die Amplitude eines vorher erzeugten Signals gemäß der anliegenden Steuerspannung verändert. Im einfachsten Fall liegt am Volume-Eingang eine von einem Drehregler regulierte Spannung, womit eine simple Laut-Leise-Regelung realisiert wird. Bei komplexeren Anwendungen wird die Steuerspannung von vorgelagert angeschlossenen Modulen dynamisch generiert. Beispiel dafür ist die Umsetzung einer Hüllkurve, vorgegeben durch einen ADSR⁵⁴ (vgl. Enders 1997, 342-345; Jenkins 2007, 23-24).

Eine weitere Einstellungsmöglichkeit beim VCA betrifft dessen Kennlinie (engl. *response curve*).

⁵⁴ Siehe nächste Kapitel.

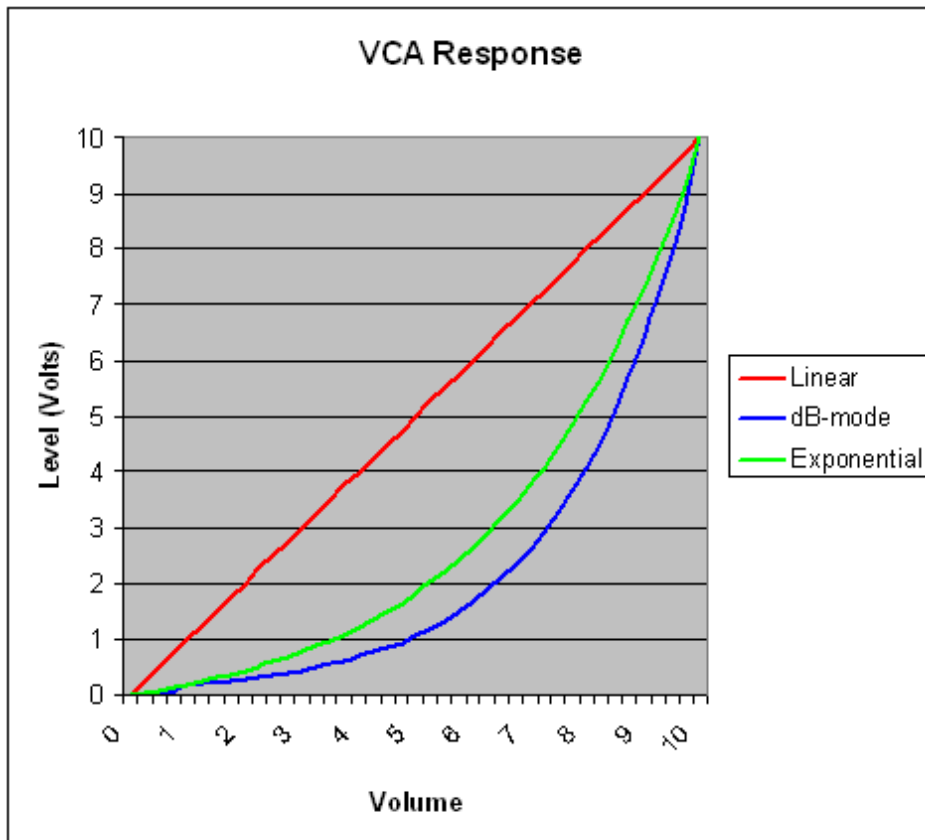


Abb. 3.16. Kennlinien eines SynthEdit VCA nach linearer, exponentieller und dB-Charakteristik. Aus der SynthEdit Help-Funktion (SynthEdit 1.1914).

Diese bestimmt das Anstiegsverhalten der Ausgangsamplitude im Verhältnis zur Eingangsamplitude. Man hat meist die Wahl zwischen einer linearen und einer exponentiellen Charakteristik. Letztere zeigt einen schnelleren Anstieg der Verstärkung bei steigender Steuerspannung und eignet sich daher besonders zur Nachstellung von perkussiven Klangverläufen mit größerer Dynamik. Abb. 3.16 zeigt die Kennlinien eines SynthEdit-VCA, neben linear und exponentiell gibt es hier zusätzlich die dB-Charakteristik (vgl. Becker 1990, 114; SynthEdit Help-Signal Level Conversions).

3.3.4 ADSR

Attack-Decay-Sustain-Release - kurz ADSR - bezeichnet eine Komponente, mit welcher Amplitudenverläufe von Schallereignissen nachgestellt werden können. Diese auch als Hüllkurvengeneratoren bezeichneten Komponenten werden gebraucht, um klangspezifische Ein- und Ausschwingvorgänge nachzubauen. Dabei werden vier wesentliche Phasen im Klangverlauf berücksichtigt. Die Attack-

Phase läuft vom Einsetzen der Tongebung bis zum Erreichen der Maximalamplitude. Die Decay-Phase ist eine erste Abfallphase, in der die Amplitude auf die Daueramplitude zurückfällt. Auf diese folgt die Sustain-Phase, sie läuft bis zum Absetzen der Tongebung. Danach erfolgt abschließend die Release-Phase, der Nachklang bis zum endgültigen Verstummen. Für Attack, Decay und Release werden jeweils Zeitspannen vorgegeben, für Sustain ein Amplitudenwert. Weiters braucht der ADSR einen Starter und eine Steuerung, die vorgibt, wie lange das Signal aktiv ist. Beides wird durch das Signal am Gate-Eingang verwirklicht. Abb. 3.17 zeigt den Verlauf einer ADSR-Hüllkurve. Ein Druck auf eine Taste des Keyboards startet über den Gate-Eingang einen ADSR-Zyklus. In der Dauer der Attack-Zeit wird die Maximal-Amplitude erreicht. Danach fällt die Amplitude auf den Decay-Level zurück, sie bleibt auf diesem Level, solange die Taste gedrückt wird, d.h. solange Spannung am Gate-Eingang liegt. Nach dem Loslassen der Taste (d.h. keine Spannung mehr am Gate) fällt die Amplitude in der Dauer der Release-Zeit auf null.

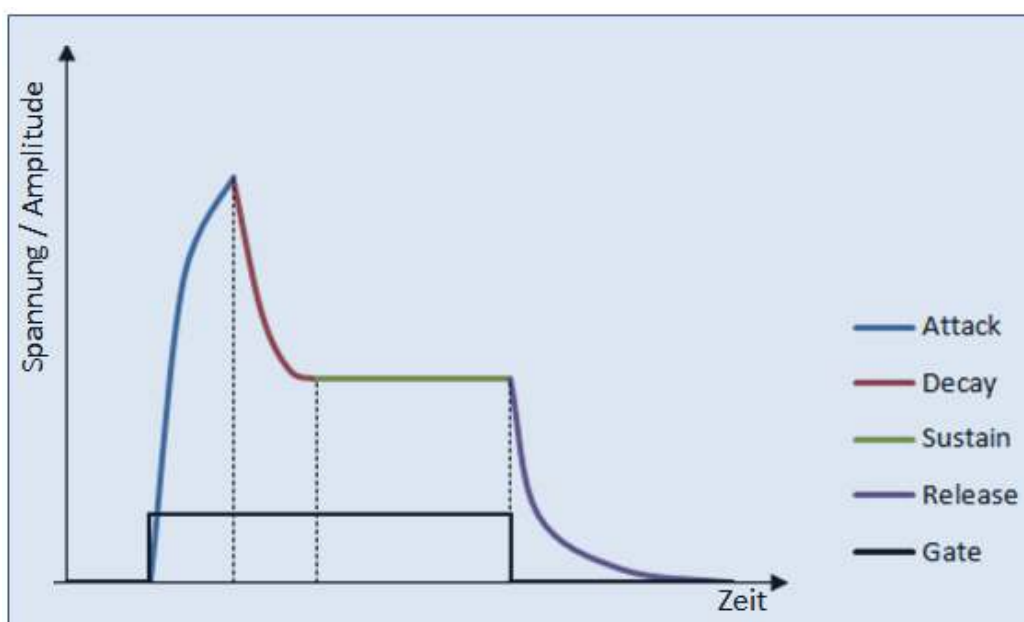


Abb. 3.17. Verlauf einer ADSR Hüllkurve. Ab dem Gate-Signal (Taste gedrückt) läuft die Attack-Phase bis zum Erreichen der Maximal-Amplitude in der vorgegebenen Zeitdauer. Danach folgt der Abfall auf die Daueramplitude in der vorgegebenen Zeitdauer (Decay). Die Sustain-Phase hält an, bis das Gate-Signal auf 0 geht (Taste losgelassen). Es folgt der Abfall auf 0 in der vorgegebenen Release-Zeitdauer. Nach Enders (1985, 90).

Die eigentliche Umsetzung des ADSR-Outputs erfolgt in aller Regel durch einen VCA, in dessen Volume-Eingang der Ausgang des ADSR gelegt wird. Dem

ADSR muss aber nicht zwingend ein VCA nachgeschaltet werden. Eine Vielzahl von neuen Synthesizer-Klängen und Effekten wurde erst durch Experimente mit unterschiedlichen Kombinationen von Modulen entdeckt. So ist auch eine Steuerung von Filtern durch ADSR möglich, womit durch Veränderung der Eckfrequenz des Filters entlang der Hüllkurve eine Klangfarbenmodulation bewirkt wird (vgl. Enders 1985, 87-92; Jenkins 2007, 12-13).

3.3.5 Andere Features

Bis zu dieser Stelle wurden ausschließlich Module beschrieben, die Teil der Kernfunktionalitäten von Synthesizern sind. Mit dem technischen Fortschritt der Synthesizer kam jedoch eine Reihe von Komponenten bzw. Funktionalitäten hinzu, die zu einer wesentlichen Erweiterung der Klanggestaltungsmöglichkeiten beitragen. Diese werden in Folge kurz erörtert.

3.3.5.1 Rauschgenerator

Rauschgeneratoren erzeugen unregelmäßige, nichtperiodische Signale, wobei Frequenz und Amplitude über den Zeitverlauf rein zufällig verändert werden, wodurch auch keine Tonhöhe zugeordnet werden kann. Meist können Weißes Rauschen⁵⁵ sowie Rosa Rauschen⁵⁶ generiert werden. Dies wird verwendet, um die nichtharmonischen Anteile von Schallereignissen (z.B. Geräuschanteile an Instrumentenklängen wie etwa Anblasrauschen) nachzubilden, oder auch um nur Geräusche (Wind, Donner, Regen, Wellen etc.) zu erzeugen (vgl. Becker 1990, 114; Johne 2010, 52).

3.3.5.2 Ringmodulator

Ringmodulatoren erzeugen Summen- und Differenzsignale. Sie besitzen zwei oder mehr Eingänge und einen Ausgang. Im einfachsten Fall von zwei Eingängen, an die jeweils eine Sinusschwingung gelegt wird (z.B. 300 Hz und 500 Hz), erhält man am Ausgang ein komplexes Signal, dessen Bestandteile ein Sinuston mit der Differenzfrequenz (200 Hz) und einer mit der Summenfrequenz (800 Hz) sind.

⁵⁵ Weißes Rauschen enthält gleiche Anteile aller Frequenzen.

⁵⁶ Gefiltertes Weißes Rauschen, bei dem die Anteile an höheren Frequenzen reduziert werden.

Verknüpft man einen Sinuston mit einem komplexen Ton, erhält man die Summen und Differenzen aller Teiltöne mit der Sinusfrequenz, bei Verknüpfung von zwei komplexen Klängen entsprechend Summen und Differenzen aller Teiltonkombinationen, wodurch sich völlig neue Spektren bilden lassen. In allen Fällen sind die Frequenzen der eingehenden Signale im Ausgangssignal nicht mehr enthalten. Oft entstehen so auch unharmonische Klangstrukturen, welche rau, metallisch oder glockenähnlich klingen können (vgl. Becker 1990, 115; Enders 1997, 263-264). Die Bezeichnung Ringmodulator ist laut Jenkins (2007, 27) auf die Urbauweise dieser Module zurückzuführen, die auf einer ringförmigen Anordnung von vier Dioden⁵⁷ beruht.

3.3.5.3 Mixer

Mixer werden verwendet, um die Signale mehrerer Audioquellen oder Steuerquellen (z.B. VCOs) über mehrere Eingänge zu kombinieren bzw. zu selektieren. Die einlaufenden Amplituden, bzw. Steuerspannungen werden je nach Anforderung modifiziert. Die so selektierten Anteile dieser Signale werden im Ausgang des Mixers zusammengeführt (vgl. Jenkins 2007, 41; Russ 2009, 100).

3.3.5.4 Flanger

Flanger ist ein Effekt, bei dem in den Phasenverlauf des Signals eingegriffen wird. Das Eingangssignal wird in zwei Teilsignale geteilt, von denen eines unverändert bleibt, während das andere zwischen 1 und 20 Millisekunden zeitlich verzögert wird. Die Dauer dieser Verzögerung wird durch einen LFO periodisch verändert. Beide Teilsignale werden zusammengeführt, dabei kommt es durch die Überlagerung zu Auslöschungen bzw. Lücken im resultierenden Spektrum. Die Frequenz dieser Lücken bewegt sich im Rhythmus des LFO auf und ab (vgl. Russ 2009, 442; Johne 2010, 111).

3.3.5.5 Chorus

Auch beim Chorus-Effekt wird das Originalsignal in zwei Teilsignale aufgeteilt. Der Effekt entsteht durch zyklisches Verstimmen des modifizierten Teilsignals.

⁵⁷ Elektronische Elemente, welche Ströme nur in einer Richtung durchlassen.

Dadurch kommt es zu Phasenauslöschungen, wie sie auch beim Zusammenspiel von mehreren akustischen Instrumenten entstehen, welche dieselben Noten spielen (vgl. Russ 2009, 441).

3.3.5.6 Phaser

Phaser funktionieren ähnlich wie Flanger. Der Unterschied liegt in der Modifikation des veränderten Teilsignals. Während bei Flangern mit Zeitverzögerung gearbeitet wird, verwendet man bei Phasern Phasenverschiebung (vgl. Russ 2009, 442; Johne 2010, 111).

3.3.5.7 Sequenzer

Sequenzer geben Serien von unterschiedlichen Steuerspannungen an Synthesizermodule (VCO, VCF, VCA u.a.) weiter und ermöglichen dadurch automatisierte (melodische, rhythmische) Abläufe. Geschwindigkeit und Schrittzahl einer solchen Sequenz sind einstellbar, die Gesamtlänge (Anzahl der Schritte) ist abhängig von der jeweiligen Speicherkapazität. Die Ansteuerung der Module erfolgt jeweils über einen Kanal, d.h. Geräte, die über mehrere Kanäle verfügen, können gleichzeitig mehrere Module mit unterschiedlichen Spannungswerten steuern. Sequenzen können auch in fortwährender Wiederholung abgespielt werden (vgl. Becker 1990, 116).

3.3.5.8 Sample and Hold

Mit Sample and Hold werden Sequenzen von Steuerspannungen in unterschiedlicher Höhe erzeugt. Diese Sequenzen können sowohl sich regulär wiederholende Muster (generiert durch einen LFO) als auch Abfolgen von Zufallswerten sein (generiert durch Weißes Rauschen, in diesem Fall wird die Funktionalität auch als Zufallsgenerator bezeichnet). Die Spannungswerte werden dem generierenden Prozess als Proben (samples) entnommen, wobei die Taktung der Entnahme (sampling rate) variiert werden kann. Die so gewonnenen Abfolgen von Spannungsverläufen sind wiederabrufbar. Sie werden zur Steuerung anderer Module (VCO, VCF, ADSR etc.) eingesetzt, womit recht interessante und abwechslungsreiche Effekte erzeugt werden können (vgl. Russ 2009, 135).

3.3.5.9 Oszillator-Synchronisation

Hierbei handelt es sich um eine besondere Art der Steuerung von Oszillatoren durch Oszillatoren: ein oder mehrere synchronisierte Oszillatoren werden durch einen synchronisierenden Oszillator gesteuert. Jedes Mal, wenn die Periode des steuernden Oszillators neu beginnt, werden die gesteuerten neu gestartet, d.h. unabhängig davon, welche Frequenzen bzw. Wellenformen dort aktiv sind, wird eine neue Periode synchron mit dem Steueroszillator begonnen. Durch die unvollständigen (weil abgebrochenen) Wellenformen kommt es u.a. zu aggressiven, obertonreichen Klängen (vgl. Enders 1997, 122; Johne 2010, 28-29).

3.3.5.10 Pulsweiten-Modulation

Mit der Pulsweiten-Modulation (engl. Pulse Width Modulation) wird das Verhältnis zwischen positivem Ausschlag und Periodendauer einer Rechteckwelle (Pulsweite) variiert (z.B. durch einen LFO). Dadurch kann eine (periodische) Klangfarbenänderung erzeugt werden, weil sich je nach Pulsweite das resultierende Obertonspektrum ändert (vgl. Enders 1997, 224; Jenkins 2007, 19-20). Die Möglichkeit einer dynamischen Änderung der Pulsweite ist auch eine Grundlage zur Realisierung der Impulsformung (siehe auch 3.3.1.1, S. 48 und 0, S. 83).

3.3.5.11 Kreuz-Modulation

Kreuz-Modulation (engl. cross modulation) verbindet gleichzeitig kreuzweise den Ausgang eines VCO mit dem Frequenz-Steuereingang eines zweiten VCO und den Ausgang des zweiten VCO mit dem Frequenz-Steuereingang des ersten VCO. Mit dieser gegenseitigen Frequenz-Modulation können FM-ähnliche Klangfarben (siehe auch 3.4.3, S. 64) erzeugt werden, was allerdings schwierig zu steuern ist (vgl. Russ 2009, S.139).

3.3.6 Schaltbeispiel - Ein Ton des Variophons

Einige der bis jetzt vorgestellten Synthesizerbausteine werden auch in einem ersten Schaltbeispiel (dargestellt in Abb. 3.18) verwendet. Die hier gezeigte Schaltung wurde mit SynthEdit erstellt. Sie soll einen Ton erzeugen, dessen Spektrum

annähernd dem Spektrum eines Tones entspricht, der mit dem analogen Variophon erzeugt wurde.

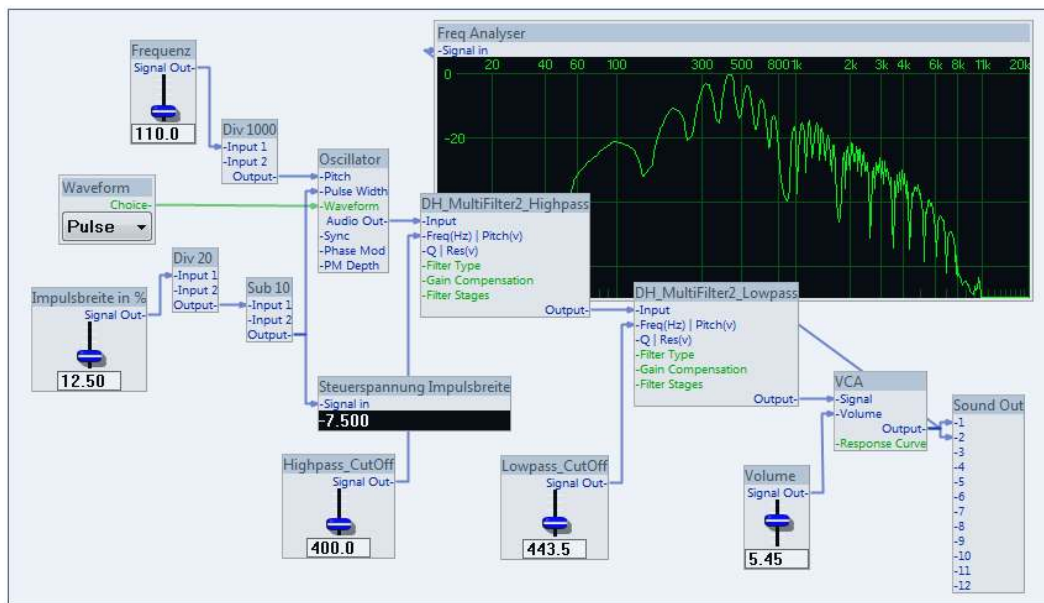


Abb. 3.18. Ein erstes Schaltbeispiel, erstellt mit SynthEdit. Die Schaltung soll einen Ton annähernd so erzeugen, wie er vom Variophon gespielt würde (A2, 110 Hz).

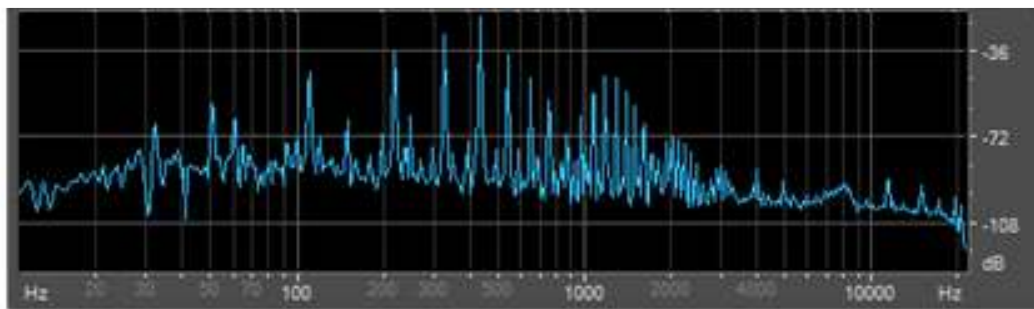


Abb. 3.19. Spektrum des A2 (110 Hz) vom Variophon gespielt.

Das Kernelement ist der Oszillator. Er ist auf Pulsschwingung eingestellt. Die Frequenz läuft als Spannung (ein Volt pro kHz) in den Pitch-Eingang. Sie wird am Schieberegler *Frequenz* eingestellt. Der Regler ist so eingerichtet, dass ein Volt pro Herz einzustellen ist. Der Regelwert wird durch 1000 dividiert (*Div 1000*) und gelangt so dezimal richtig an den Oszillator. Die Pulsweite der Pulsweite wird am Regler *Impulsbreite in %* eingestellt. Über *Div20* und *Sub10* gelangt sie mit dem entsprechenden Steuerspannungswert an den Oszillator. Das Audioausgangssignal des Oszillators läuft in einen Hochpassfilter und von diesem in einen Tiefpassfilter. Die Eckfrequenzen der Filter werden mit *Highpass CutOff*

und *Lowpass CutOff* eingestellt. Aus dem Tiefpass geht das Signal in den VCA, dessen Ausgabeamplitude über den Regler *Volume* eingestellt wird. Am Ende der Signalkette steht ein *Sound Out*, dieses Element ist die Brücke zur Außenwelt, über die das Signal an Soundkarte und Lautsprecher gelangt. Ein analoger Synthesizer würde ebenfalls mit einer Kette Pulswelle → Hochpass → Tiefpass → VCA arbeiten. Die Frequenz müsste aber direkt eingestellt werden (im Beispiel 0.11 Volt für 0.11 kHz bzw. 110 Hz), die Impulsbreite müsste mit einer Steuerspannung von -7,5 Volt an den Oszillator gelegt werden.

Bestandteil der Schaltung ist auch eine Frequenzanalyseanzeige. Das Spektrum, das sie zeigt, ist eine Annäherung an das Spektrum, wie es das Variophon ausgibt. Dieses ist in Abb. 3.19 zu sehen. Die Minima liegen beim 8., 16., usw. Teilton. Dies wird durch die Impulsbreite von 12,5% (1/8) gewährleistet und in dieser Hinsicht zeigen die Spektren Übereinstimmung. In der Folge erlauben die beiden Filter nur eine grobe Annäherung an die Originalsituation. Der zweite Formantbereich in der Nachstellung ist insgesamt zu wenig angehoben, ab dem vierten Formanten sollte nichts mehr zu sehen sein.

3.4 Synthesemethoden

Mit den Bausteinen eines Synthesizers lässt sich Klangsynthese nach unterschiedlichen Methoden betreiben. Aufgabe von Klangsynthese ist es, das jeweils geforderte Spektrum zu bilden. Im Fall einer komplexen harmonischen Schwingung bedeutet das, dass die beteiligten Teilschwingungen mit der jeweiligen Amplitude erzeugt werden müssen. Ein Synthesizer ist in der Lage sowohl unterschiedliche Wellenformen als auch elementare Sinustöne zu erzeugen (siehe 3.3.1.1, Seite 48). Je nach Syntheseansatz wird das eine oder andere zu verwenden sein. Zur Systematik von Synthesemethoden finden sich in der Literatur die unterschiedlichsten Ansätze (Oehler 2008, 107). Stellvertretend für diese Vielzahl seien die Untergliederungen von Enders, Oehler, Miranda und Russ erwähnt.

Enders (1997, 145) unterscheidet zwischen vier grundsätzlichen Methoden der Klangsynthese: Subtraktive Klangsynthese, Additive Klangsynthese, Impulsformung und direkte Klangsynthese.

Bei Oehler (2008) findet sich eine Untergliederung in *Methoden der Synthese von Blasinstrumentenklängen*: Spektrale Synthesemethoden (Additive Synthese, For-

mantsynthese), Quellenmodulierung (Quelle-Modifikator-Modelle, Wavetable Synthese, Sampling), Abstrakte Synthese (Amplitudenmodulation, Frequenzmodulation) und Physikalische Modelle (Feder-Masse-Modelle, Wellenleiter-Synthese).

Miranda (2002) unterscheidet nach Modellierungsansätzen und ordnet diesen jeweils Methoden zu: freie Modellierung (Amplitudenmodulation, Frequenzmodulation, Waveshaping, Wavetable, Walsh Synthese und binäre Instruktion), spektrale Modellierung (Additive Synthese, Formantsynthese), Quellenmodellierung (Subtraktive Synthese, Waveguide Filterung, Karplus-Strong, Physical Modelling) und zeitbasierende Ansätze (Granular Synthese, Pulsar Synthese u.a.).

Bei Russ (2009, 8-9) findet sich eine prinzipielle Unterscheidung zwischen analogen Methoden (subtraktiv, additiv und Wavetable) und digitaler Methoden (FM, Wavetable, Sample Replay, additiv, S&S⁵⁸, Physical Modelling und Software-Synthese).

Aus der Vielzahl der hier aufgezählten Methoden werden in Folge diejenigen beschrieben, die eine breite Verwendung in Synthesizern finden.

3.4.1 Additive Synthese

Die Additive Synthese setzt den zu erzeugenden Klang additiv aus dessen Einzelkomponenten zusammen. Sie arbeitet mit den kleinsten Elementen, aus denen Klänge zusammengesetzt werden – mit Sinustönen. Durch die Umsetzung des Fourierschen Theorems, wonach jede periodische Schwingungsform als Summe sinusförmiger Teilschwingungen zu verstehen ist, ist die additive Methode die präziseste und zugleich aufwendigste Vorgangsweise. Jeder der am Klang beteiligten Teiltöne muss als separat erzeugter Sinuston mit der jeweils geforderten Amplitude in den Gesamtklang einfließen. Will man den Einschwingvorgang naturgetreu nachstellen, so bedarf es zusätzlich einer Hüllkurve pro Teilton. Das erfordert für jeden einzelnen Teilton eine VCO-VCA-Einheit bzw. VCO-ADSR-VCA-Einheit. Um eine möglichst gute Annäherung an den nachzustellenden Klang zu erreichen, sollten zumindest die ersten 16 Teiltöne enthalten sein. Mit der additiven Methode ist somit rasch die Leitungsgrenze der jeweils zugrunde liegenden Systeme ausgereizt (vgl. Miranda 2002, 50; Russ 2009, 145-157).

⁵⁸ Samples and Synthesis.

3.4.2 Subtraktive Synthese

Die Subtraktive Synthese ist die (vor allem in der Frühphase der Synthesizer-Entwicklung) am häufigsten verwendete Synthesemethode. Als Ausgangsmaterial wird ein möglichst teiltonreiches Spektrum verwendet, wie es z.B. von einer Sägezahn- oder einer Pulsschwingung erzeugt wird (siehe Abb. 3.11). Mit Hilfe eines Filters bzw. des kombinierten Einsatzes von mehreren Filtern (Tiefpass, Hochpass, Bandpass, Bandsperre) wird dieses Basisspektrum nachträglich geformt, indem ein oder mehrere Frequenzbereiche gedämpft bzw. unterdrückt werden. Im Gegensatz zum additiven Ansatz ist diese Methode mit sehr geringem Aufwand umzusetzen. Man benötigt lediglich einen VCO und den entsprechenden Filtersatz. Kleine analoge Synthesizer arbeiten vorwiegend mit der subtraktiven Methode, meist nur mit einem Tiefpassfilter ausgestattet (siehe 2.4.1.2 Minimoog, S.15). Der reduzierte Aufwand führt gleichzeitig zu einer gewissen Unschärfe in der Annäherung an den nachzustellenden Klang. Auf Grund der geringen Trennschärfe von Filtern (siehe auch 3.3.2, S.50) ist ein punktgenaues Auslöschen von einzelnen Teiltönen nicht möglich (vgl. Miranda 2002, 71-74; Russ 2009, 106-144).

Die Umsetzungen der Impulsformung im analogen Variophon und in seinen Emulationen kommen ebenfalls nicht ohne Filterung aus. An das Spektrum, welches von einer dynamisch geformten Pulswelle erzeugt wird, wird nachträglich eine Hochpass- Tiefpass Kombination angesetzt, womit man streng genommen wieder bei einer Sonderform der subtraktiven Synthese gelandet ist.

3.4.3 Frequenzmodulation

Der Einsatz der Frequenzmodulation als Syntheseverfahren wurde im Wesentlichen von John Chowning beschrieben und entwickelt (vgl. Chowning 1973; Chowning & Bristow 1986). Bei dieser Methode wird die Frequenz einer hörbaren Schwingung (Träger, engl. carrier) durch eine zweite Schwingung moduliert. Wenn sich diese Modulation in einem niedrigen Frequenzbereich (bis zu 20 Hz) bewegt, so wird der resultierende Klang als Vibrato des ursprünglichen Klanges empfunden. Bewegt sich die Modulationsfrequenz in einem höheren Bereich (über 20 Hz), so tun sich im resultierenden Spektrum zusätzliche Schwingungsbereiche auf. Im einfachen Fall von jeweils einem Sinuston als Träger und Modula-

tor sind das zusätzliche Teiltöne (auch Seitenbänder genannt), die sich im Abstand der Modulationsfrequenz über und unter dem Trägerton einfinden. Bei einem Träger mit 1000 Hz und einem Modulator von 200 Hz wären das 800 Hz, 600 Hz und so fort bzw. 1200 Hz, 1400 Hz und so fort. Wenn die Trägerfrequenz ein ganzzahliges Vielfaches der Modulationsfrequenz ist, entstehen harmonische Teiltonspektren, bei komplexen Verhältnissen unharmonische Teiltonstrukturen. Synthesizer, welche mit Frequenzmodulation arbeiten (z.B. Yamaha DX7, siehe auch 2.4.1.4, S.19), können auf diese Weise Glocken- oder andere metallische Klänge erzeugen⁵⁹. Ein weiterer Faktor, der das resultierende Spektrum beeinflusst, ist die Amplitude des Modulators, auch als Modulationsindex oder Frequenzhub bezeichnet.

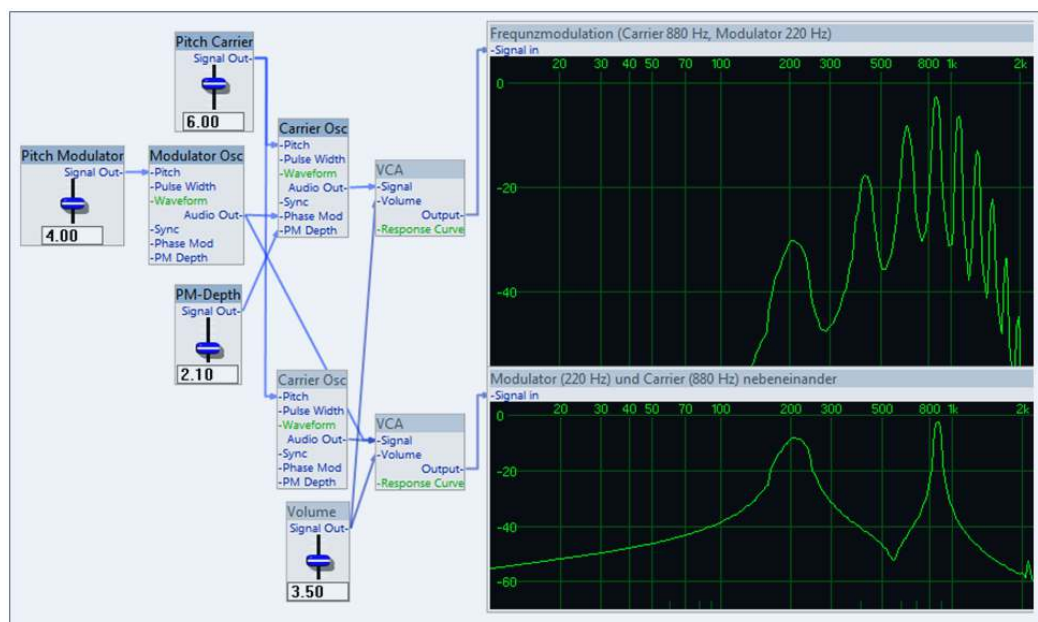


Abb. 3.20. SynthEdit Schaltung zur Realisierung einer Frequenzmodulation. Nach Fortune et al. 2007, 168.

Abb. 3.20 zeigt die Nachstellung einer Frequenzmodulation mit SynthEdit. Im oberen Frequenzanalysefenster ist das resultierende Spektrum mit Teiltönen im 220 Hz-Abstand zur Trägerfrequenz von 880 Hz zu sehen, das untere Fenster zeigt das ‘Ausgangsmaterial’, einen Trägersinus mit 880 Hz und einen Modula-

⁵⁹ Wenn das Verhältnis zwischen Träger- und Modulatorfrequenz leicht von einem ganzzahligen Verhältnis abweicht.

torsinus mit 220 Hz⁶⁰. Diese Schaltung zeigt den einfachsten Fall einer FM. Es gibt einen Carrier und einen Modulator (der untere, unmodulierte Carrier ist nur für Demonstrationszwecke notwendig). Der Ausgang des Modulators geht in einen speziellen Modulations-Eingang des Carrier (Phase Mod). Auch für den Modulationshub (über den Regler PM-Depth einstellbar) gibt es einen speziellen Eingang (PM-Depth). FM lässt sich auch aus komplexeren Kombinationen von Oszillatoren generieren, so kann beispielsweise ein bereits modulierter Carrier als Modulator für einen weiteren Carrier eingesetzt werden. Die jeweils als Carrier oder Modulator eingesetzten Elemente werden auch als Operatoren bezeichnet, eine Anordnung dieser Operatoren wird Algorithmus genannt (vgl. Fortune et al. 2007, 168-171).

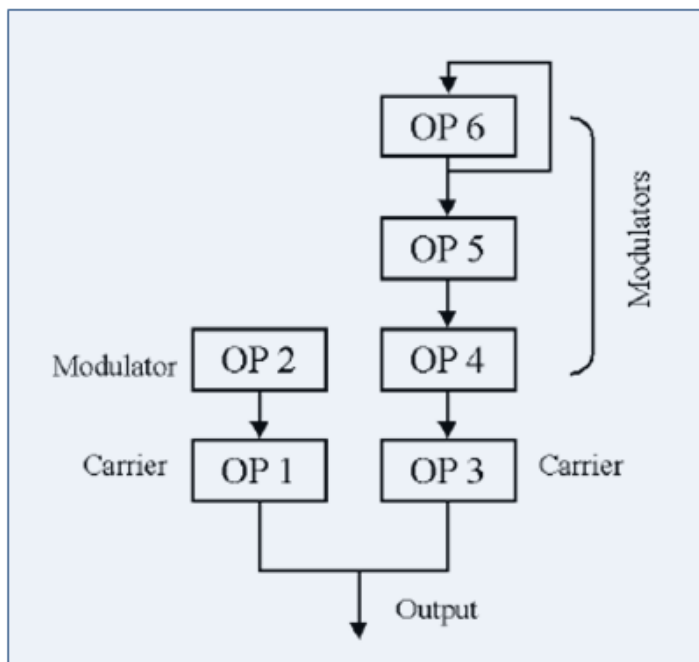


Abb. 3.21. Algorithmus zur FM-Synthese (eingesetzt im Yamaha DX7). Aus Fortune et al. 2007, 170.

In Abb. 3.21 ist ein solcher Algorithmus abgebildet. Nur OP1 und OP3 erzeugen einen hörbaren Klang. Alle anderen Operatoren modulieren. OP2 moduliert OP1 (was auch der Konstellation in Beispiel Abb. 3.20 entspricht). OP6 moduliert OP5 und sich selbst (via Feedbackschleife). OP5 moduliert OP4, OP4 den zweiten Car-

⁶⁰ Die Frequenz der Oszillatoren wird hier mit Volt/Oktave geregelt, wobei 5 Volt 440 Hz entsprechen, 6 Volt 880 Hz, 4 Volt 220 Hz usw.

rier OP3. Dieses ausgeklügelte Schema wird im Yamaha DX7 zur Erzeugung von komplexen Klangfarben eingesetzt (vgl. Fortune et al. 2007, 170).

3.4.4 Sampling

Als Sampling bezeichnet man die Verwendung natürlicher Klänge, die als Klangbausteine in digitalisierter Form vorliegen. Dieser Klangvorrat wird mit den gängigen digitalen Aufnahmeverfahren gewonnen (siehe auch 3.2.1.2, S. 33). Die analogen Amplitudenwerte des Quellenklanges werden in schneller Abfolge erfasst und als diskrete Zahlenwerte gespeichert. Die Erfassungsgeschwindigkeit (engl. *sampling rate*) liegt gewöhnlich bei 44,1 kHz. Bei den ersten Synthesizern mit Sampling-Fähigkeit war die Kapazität des dahinterliegenden Speichers noch auf zwei bis vier MB beschränkt. Der rasante Fortschritt in der digitalen Speichertechnologie öffnet dem Sampling inzwischen schier unerschöpfliche Möglichkeiten. Die Speicherung ermöglicht obendrein das nachträgliche Editieren der gesampelten Klänge mit einem Sample-Editor. Dieser bietet Nachbearbeitungsmöglichkeiten wie den Einbau von Loops, Ein- und Ausblenden von Sequenzen, das Unterlegen von Hüllkurven, die Normalisierung von Schallpegeln, zeitliche Dehnung oder Stauchung bei gleichbleibender Tonhöhe und das Entfernen von unerwünschtem Rauschen. Eine annähernd naturgetreue Nachstellung eines Instrumentes kann mit Sampling realisiert werden, allerdings nur mit hohem Aufwand. So muss jede Tonhöhe in allen möglichen unterschiedlichen Spielarten, Lautstärken, Klangfarbengestaltungen u.v.m. in einen digitalen Klangbaustein überführt werden (vgl. Russ 2009, 316-335; Huber 2010, 225-226).

3.4.5 Physical Modeling

Physical Modeling setzt direkt bei der primären Klangerzeugung an. Diese digitale Methode versucht nicht den Klang eines Instrumentes nachzubilden, sondern dessen Art der Klangbildung auf virtueller Ebene nachzustellen. Dabei werden alle akustischen Eigenschaften eines Instrumentes als Parameter rechnerisch bestimmt und in beliebig veränderbarer Form geführt. Ein dermaßen gestaltetes virtuelles Instrument kann flexibel gespielt werden, indem die Vielzahl der Parameter durch Verwendung von Controllern (Blaswandler, Pedal, Modulationsrad

u.v.m.) modifiziert wird, was in Echtzeit meist nur mit einem sehr hohen Rechenaufwand zu bewerkstelligen ist (vgl. Miranda 2002, 80-96; Russ 2009, 284-291).

3.4.6 Granularsynthese

Eine Beschreibung der Granularsynthese findet sich bei Miranda (2002, 101-110), nach dieser wurde die folgende Zusammenfassung erstellt.

Während traditionelle Syntheseformen Spektren nur in der Frequenzdimension konstruieren (d.h. nach Fourier und Helmholtz als eine Zusammensetzung von Sinusschwingungen in unterschiedlicher Intensität entlang der Frequenzachse), berücksichtigt die Granularsynthese auch die Zeitdimension. Klänge sind auch durch Veränderungen im spektralen Gefüge entlang der Zeitachse charakterisiert und werden auch anhand dieser Veränderungen unterschieden. Bei Miranda (2002, 103) werden 10 bis 30 Millisekunden als Mindestzeitspanne, die das Gehör zum Erkennen eines Klanges benötigt, erwähnt. Bei Reuter (1995, 31-35) werden in diesem Zusammenhang drei Integrationszeiten genannt: in der ersten (ca. 10 ms) werden die Frequenzgruppen aufgebaut, in der zweiten (ca. 50 ms) werden Einzelereignisse zu einem Gesamt ereignis zusammengefasst und es kann Tonhöhe wahrgenommen werden, in der dritten (ca. 250 ms) kann Schall als periodischer Klang mit harmonischer Teiltonstruktur und fester Tonhöhe aufgefasst werden.

Das wird in der Granularsynthese berücksichtigt, indem Klänge in kleinste Zeitintervalle (engl. grains) zerlegt werden. Erst diese Intervalle werden einer Fourier-Analyse unterzogen. Die Synthese kann dann nach unterschiedlichen Ansätzen erfolgen: Aneinanderreihung der grains ohne Überlappung (sequentiell approach), simultane Streuung (scattering approach / sound cloud) und wahlloses Aneinanderreihen von einem oder mehreren grains, die aus unterschiedlichen Abschnitten des gesampelten Klanges gewonnen wurden (granular sampling approach).

3.4.7 Impulsformung

Die Impulsformung ist die Umsetzung des Klangformungsprinzips von Blasinstrumenten. Konstante Öffnungszeiten bei der primären Tongenerierung (z.B. Rohrblatt) führen unabhängig von der jeweils gespielten Tonhöhe zu gleichförmigen und gleichlangen Impulsen. Diese erzeugen im resultierenden Spektrum Bereiche, in welchen die Teiltöne besonders hervorgehoben werden: die Formanten,

die das Klangbild eines Blasinstrumentes entscheidend prägen. Da die Impulsformung unmittelbar bei der primären Klangerzeugung ansetzt, kann sie auch als frühe Form des Physical Modeling bezeichnet werden. Eine detaillierte Beschreibung der Impulsformung findet sich 3.1.3, S. 28.

4 Das Variophon

4.1 Das analoge Variophon

In diesem Kapitel soll eine detaillierte Beschreibung des analogen Variophons gemacht werden. Die Funktionsweise und das Zusammenwirken seiner Hauptbestandteile werden erklärt. Ein besonderes Augenmerk ist dabei dem dynamischen Verhalten des Gerätes gewidmet, da dieses zu dessen größten Stärken zählt.

Das Variophon wurde zwischen 1979 und 1983 in Deutschland von der Firma Realton gebaut und vertrieben. Die Entwicklung des Variophons basiert auf Erfahrungen mit dem Vorläuferinstrument, der *Martinetta*. Diese wurde 1975 entwickelt und bis 1979 von der Ernst Martin KG produziert. 1979 wurden die Rechte am Patent an die Firma Realton verkauft, die das Instrument in Variophon umbenannte. In der *Martinetta* und im Variophon wurde erstmalig das Klangerzeugungsprinzip der Impulsformung umgesetzt. An der Entwicklung waren neben anderen Jürgen Schmitz und Wolfgang Voigt wesentlich beteiligt. Eines der ersten Instrumentenmodule, das Fagott-Modul basiert auf Grundlagen, die Voigt in seiner Dissertation (Voigt 1975) erarbeitet hat (vgl. Oehler 2008, 25).

4.1.1 Die Funktionsweise des analogen Variophons

Die Funktionsweise des analogen Variophons wurde von Michael Oehler (2008, 141-166) detailliert beschrieben. Die Beschreibung beruht auf Erkenntnissen, die durch technische (elektronische) Analysen des Gerätes gewonnen wurden. Diese Analysen mussten von Oehler selbst durchgeführt werden. Durch das jähe Ende der Herstellerfirma waren weder Schaltpläne noch andere Dokumente verfügbar. Grundlegende Information konnte vorab in persönlichen Gesprächen mit ehemaligen Mitarbeitern der Produktion bzw. Entwicklung erarbeitet werden. Die hier gemachte Beschreibung soll nur einen zusammenfassenden Überblick geben. Auf elektronische Details soll daher nicht tiefer eingegangen werden. Alle Angaben beziehen sich hier auf das Modell Variophon Spot, wobei anzumerken ist, dass die grundlegende Funktionsweise in allen drei Modellen gleich ist. Ein Exemplar des Variophon Spot hat Prof. Christoph Reuter freundlicherweise aus seiner Sammlung für die vorliegende Arbeit zur Verfügung gestellt.

4.1.2 Hauptteile des analogen Variophons

Das Variophon besitzt drei Funktionseinheiten: Steuergerät, Instrumentenmodul(e) und Controller. Das Zusammenwirken dieser Einheiten ist in Abb. 4.1 dargestellt.

Der Controller ist ein Tastenblasinstrument, das direkt an die Steuereinheit angeschlossen wird. Über die Tastatur des melodikaähnlichen Teils gelangt die Tonhöheninformation an das Steuergerät: der Anblasdruck am Mundstück steuert die Dynamik. Alternativ zum Tastenblasinstrument kann eine Klaviatur verwendet werden. In diesem Fall erfolgt die Dynamiksteuerung über einen Blaswandler ohne Tastatur, der an diese Klaviatur angeschlossen wird.

Das Steuergerät empfängt die Signale des Controllers, bereitet diese für die angeschlossenen Module auf und gibt sie an diese Module weiter. Die Aufbereitung umfasst Feinstimmung, Transposition, Modulationsempfindlichkeit sowie Beigabe von weißem Rauschen (z.B. beim Saxophon). Von den Modulen empfängt das Steuergerät wiederum das finale Signal. Dieses kann nur mehr über Lautstärken-, Tiefen-, Mitten- und Höhenregler verändert werden, bevor es an den Endverstärker (beim Variophon Spot extern) gelangt.

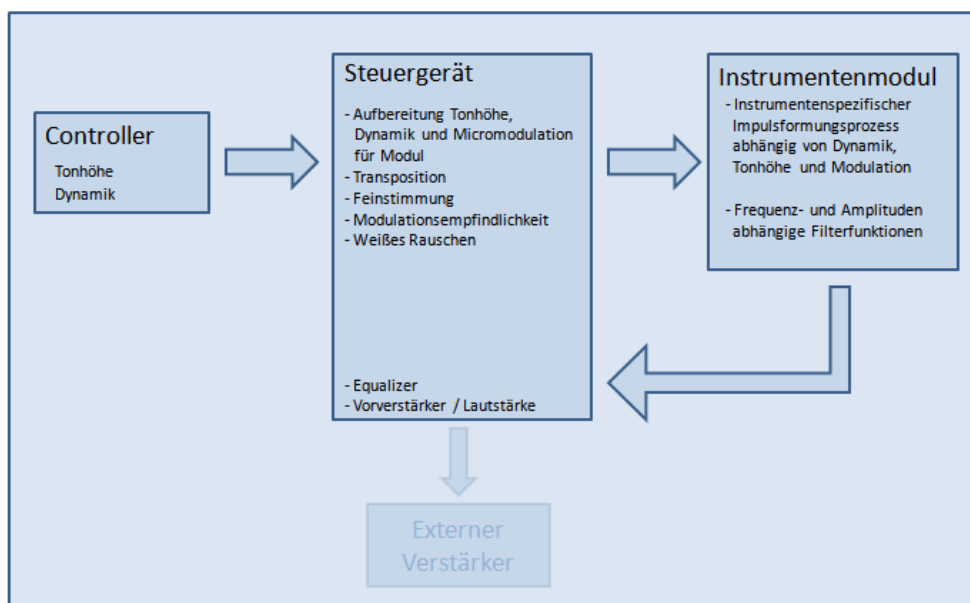


Abb. 4.1. Die Haupteinheiten des Variophon Spot und ihr Zusammenwirken.

In den Modulen findet die eigentliche instrumentenspezifische Klangerzeugung statt. Ein Instrumentenmodul enthält die elektronische Umsetzung des jeweiligen

Blasinstrumentes, d.h. eine analoge Schaltung, die den jeweils instrumentenspezifischen Impulsformungsprozess realisiert. Dabei werden abhängig von Tonhöhe und Dynamik die Impulsbreiten der verwendeten Rechteckwelle modifiziert. Um Filterfunktion und Abstrahlverhalten der Röhren der simulierten Blasinstrumente nachzubilden, werden frequenz- und amplitudenabhängige Filterfunktionen eingesetzt. Die Module sitzen in Einschubschächten des Steuergerätes, diese Schächte (vier im Variophon Spot) können wahlfrei belegt werden. In der Folge wird ausschließlich das Fagott-Modul erläutert.

4.1.3 Dynamik

Die Dynamik wird vom Controller - beeinflusst durch den Anblasdruck - gesteuert. Oehler weist in seiner Analyse 23 unterschiedliche Dynamikstufen aus. (Oehler 2008, 160 ff). Diese Stufen werden mittels einer Steuerspannung zwischen 1 und 3,2 Volt in 100mV-Schritten angesteuert. Abhängig von Tonhöhe und Dynamikstufe setzt die Schaltung eine Öffnungszeit in Millisekunden, aus der sich letztlich die entsprechende Impulsbreite ergibt. Dabei bewirkt die Dynamik in jeder Stufe eine Veränderung, während es für die Tonhöhe drei Bereiche gibt, die unterschiedliche Werte ergeben: ein tiefes, ein mittleres und ein hohes Register. Entsprechend hat Oehler mittels Regression pro Register eine eigene Formel ermittelt (siehe Abb. 4.2)

Dynamikabhängige Impulsbreiten pro Register beim Variophon-Fagott-Modul		
Tiefes Register	$i = -0,00009x^3 + 0,0053x^2 - 0,1292x + 2,4576$	
Mittleres Register	$i = -0,00001x^3 + 0,0011x^2 - 0,0419x + 1,4832$	
Hohes Register	$i = -0,000004x^3 + 0,0004x^2 - 0,0213x + 1,083$	
x → Dynamikstufe von 1 bis 23		
i → Impulsbreite in Millisekunden		
Registergrenzen		
Tiefes Register	A1 bis Cis3	55Hz bis 138,6Hz
Mittleres Register	D3 bis Gis3	146Hz bis 207,7 Hz
Hohes Register	A3 bis E4	220 Hz bis 329,6Hz

Abb. 4.2. Impulsbreitenformel pro Register für das Fagott nach Oehler (2008, 162).

Über einen weiteren Kanal gelangt zusätzliche Dynamiksteuerinformation an das Modul. Das entsprechende Signal teilt dem Modul mit, wie schnell bzw. wie stark eine Änderung in der Dynamik, also eine Änderung des Anblasdrucks am Controller ist. Damit werden Micromodulationen, wie etwa Vibrato erkannt und verarbeitet. Das Ausmaß, in dem auf diese Modulationen reagiert wird, lässt sich mit dem Modulationsregler am Steuergerät einstellen.

4.1.3.1 Versuchsanordnung zur Messung des dynamischen Verhaltens

Aus dem Wissen um die 23 Dynamikstufen ergab sich das Anliegen, die Spektren, die vom Variophon bei unterschiedlicher Dynamik erzeugt werden, näher zu betrachten. Dafür war es notwendig, die Dynamik kontrolliert zu steuern. Mit dem Blastasteninstrument oder dem an die Klaviatur angeschlossenen Blaswandler ist es allerdings nicht möglich, kontrollierte d.h. konstante Steuerspannungen zu erzeugen. Hier gab es freundliche Unterstützung durch Arnold Esper, der eine modifizierte Variophon-Klaviatur zur Verfügung stellte. Anstelle des Blaswandlers wurde von ihm auf der Klaviatur ein Drehpotentiometer fix eingebaut. Mit diesem Regler und einem zusätzlich angeschlossenen Voltmeter kann die Dynamiksteuerspannung per Hand präzise eingestellt werden. Die Versuchsanordnung ist in Abb. 4.3 schematisch dargestellt.

4.1.3.2 Dynamikstufen

Eine erste akustische Bewertung sowie die den Stufen entsprechenden LED-Anzeigen am Steuergerät sind in Tab. 4.1 zusammengefasst.

Für den Ton A2 (110 Hz) in den Stufen 7(pp), 15(mf) und 21(ff) wurden mit der in Abb. 4.3 dargestellten Versuchsanordnung Frequenzanalysen mit Adobe Audition erstellt. Die dabei ermittelten Spektren sind in Abb. 4.4, Abb. 4.5 und Abb. 4.6 zu sehen. Es fällt auf, dass mit steigender Dynamik die Teiltöne mit höherer Frequenz an Amplitude gewinnen, was den Schumannschen Gesetzen entspricht.

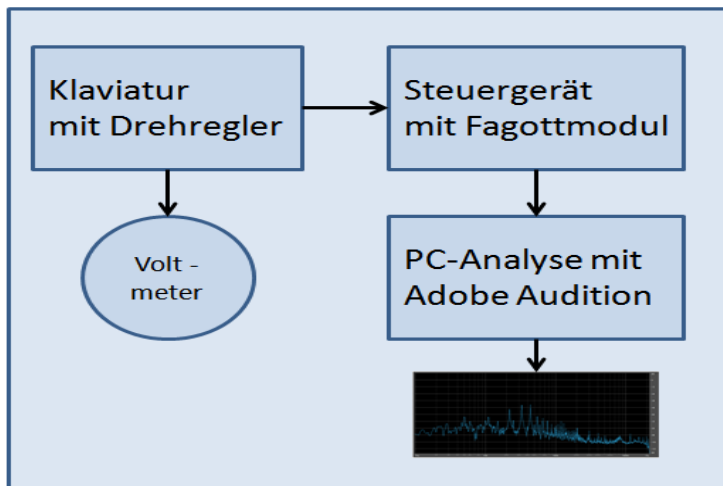


Abb. 4.3. Messung des dynamischen Verhaltens.

<u>Dynamikstufe</u>	<u>Steuerspannung (Volt)</u>	<u>Led</u>	<u>Dynamik</u>	<u>Messlinie</u>	<u>Anmerkung</u>
1	1,0	0			zu leise
2	1,1	0			.
3	1,2	0			.
4	1,3	0			.
5	1,4	0			.
6	1,5	0			zu leise
7	1,6	1	pp	D07	
8	1,7	1	pp		
9	1,8	1	pp		
10	1,9	1	pp		
11	2,0	1	pp		
12	2,1	2	p		
13	2,2	2	p		
14	2,3	2	p		
15	2,4	3	mf	D15	
16	2,5	3	mf		
17	2,6	4	f		
18	2,7	4	f		
19	2,8	5	ff		
20	2,9	5	ff		
21	3,0	5	ff	D21	
22	3,1	5			übersteuert
23	3,2	5			übersteuert

Tab. 4.1. Dynamikstufen und ihre Wahrnehmung bzw. Anzeige am Steuergerät.

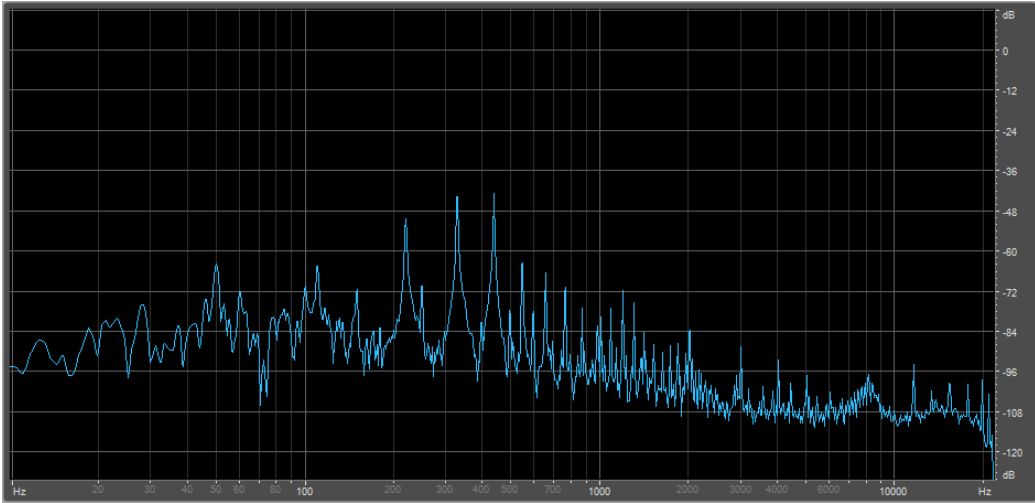


Abb. 4.4. Frequenzdiagramm A2 (110 Hz), Dynamikstufe 07 (pp).

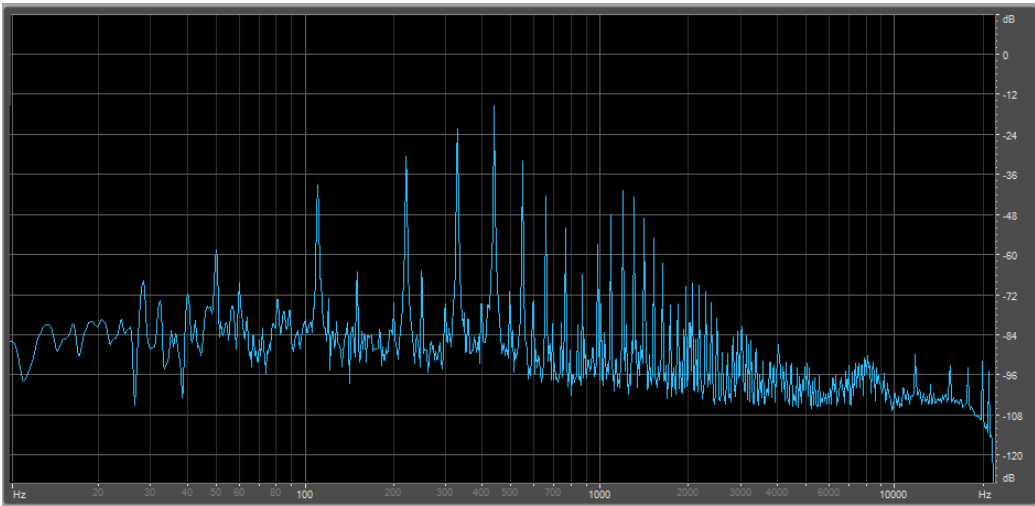


Abb. 4.5. Frequenzdiagramm A2 (110 Hz), Dynamikstufe 15 (mf).

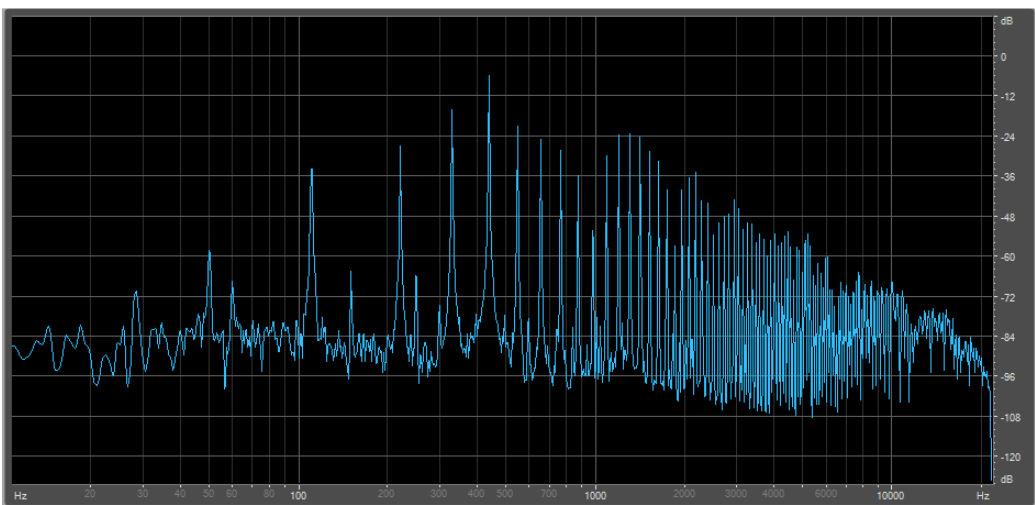


Abb. 4.6. Frequenzdiagramm A2 (110 Hz), Dynamikstufe 21 (ff).

4.2 Das virtualisierte Variophon

Die Realisierung eines virtualisierten Variophons erfolgt unter SynthEdit. Aus mehreren Gründen fiel die Wahl auf diese Plattform. Zum einen ist SynthEdit allgemein zugängliche Freeware, zum anderen bietet es hohe Flexibilität in der optischen Umsetzung. So war es möglich, dem Modul das Aussehen eines Variophon-Spot zu geben und im Weiteren die wesentlichen Bedienungselemente so zu gestalten, wie sie auf dem reellen Gerät aussehen. Der akustische Teil der Umsetzung orientiert sich zum größten Teil an den Erkenntnissen von Oehler (2008).

4.2.1 Das Hauptmodul

In Abb. 4.7 ist das Hauptmodul des SynthEdit-Variophons mit seinen Komponenten sowie der Kontrollfluss zwischen diesen zu sehen. Neben den Hauptelementen sind eine Reihe von Kleinelementen wie Drehknöpfe oder Anzeigen direkt im Hauptcontainer gelagert. Dies weil sie sich nur von dort individuell im GUI positionieren lassen; ein Umstand unter dem die Übersichtlichkeit des Hauptcontainers etwas leidet. Aus diesem Grund sind in der Folge einige Strukturen zusätzlich zur abgebildeten SynthEdit-Struktur in schematischer Darstellung gezeichnet. Zu Beginn steht die MIDI-Unit. Diese gibt alle relevanten Spielinformationen (z.B. Tonhöhe und Dynamik) an die Endstufe (End-VCA) und an das Switch-Modul (Switch-Box) weiter.

Die Switch-Box schaltet die nachgelagerten Instrumenten-Module ein oder aus und versorgt aktive Instrumentenmodule mit relevanter Steuerinformation. In der aktuellen Umsetzung gibt es zwei Instrumentenmodule (Fagott und Oboe), diese können einzeln oder zusammen (unisono) aktiviert werden. Die Architektur ist offen für zusätzliche (noch zu entwickelnde) Instrumentenmodule. Die bereits vorhandenen Module realisieren die instrumentenspezifische Umsetzung der Impulsformung basierend auf den Formeln für Fagott und Oboe von Oehler (2008, 162 u. 165) und den Einsatz von instrumentenspezifischen Filtern,

Das fertige Signal eines Moduls gelangt schließlich in die Endstufe (End-VCA). Hier erfolgen noch die endgültige Lautstärkeregelung, Einsatz eines Dreiband-Equalizers und das Beimischen von Nachhall.

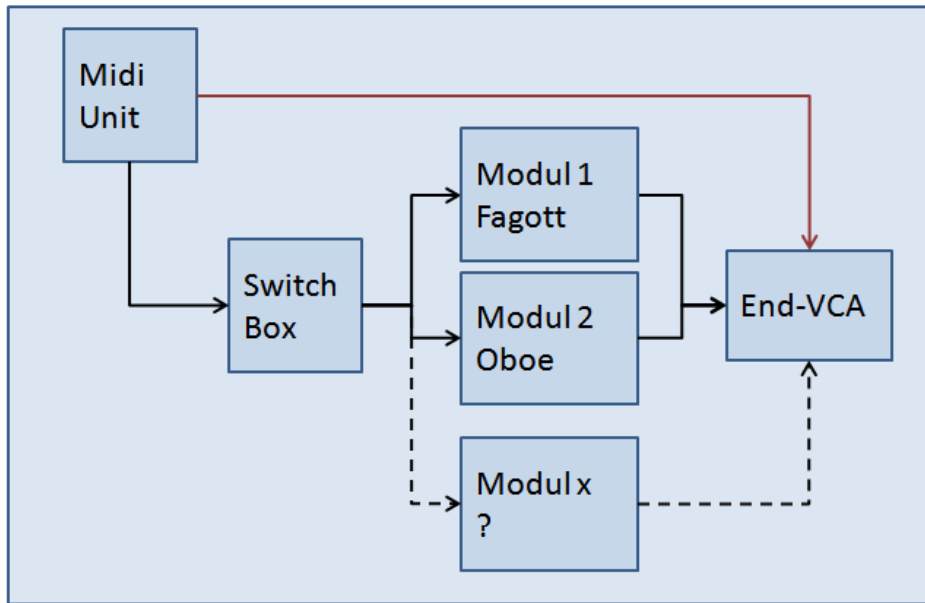


Abb. 4.7. Hauptelemente des SynthEdit-Variophons im Hauptmodul.

4.2.2 Die Hauptelemente im Detail

In diesem Kapitel werden die Hauptelemente der Emulation im Detail erklärt. Pro Element werden dessen Funktion und dessen Verbindungen zur Außenwelt dargestellt und beschrieben. Die Funktionsschemata werden in separat erstellten Grafiken gezeigt, womit jeweils eine Überblicksdarstellung der Grundfunktionalität des gezeigten Hauptelementes geboten wird. In diesen Darstellungen sind alle relevanten Ein- und Ausgänge enthalten⁶¹. Dort, wo Instrumenten-Module im Spiel sind, wird zusätzlich ein Modul X inkludiert. Dieses dient als Platzhalter für noch zu entwickelnde weitere Instrumenten-Module, d.h. um zu illustrieren, dass die vorliegende Lösung ein Hinzufügen neuer Instrumente auf flexible Art zulässt. Zwecks Übersichtlichkeit und Modularität sind alle Hauptelemente als SynthEdit-Container ausgeführt. Ein solcher Container ist ein gekapselter Verbund von SynthEdit-Elementen (die auch weitere Container sein können), er ist mit dem IC⁶² in elektronischen Schaltkreisen vergleichbar. Die Verbindungen eines Containers nach außen werden über IO-Module realisiert, diese entsprechen den oben erwähnten Ein- und Ausgängen.

⁶¹ Diese werden mit einem > gekennzeichnet, z.B.: > Transponieren als Eingang bzw. Dynamik > als Ausgang.

⁶² Integrated Circuit, elektronischer Bauteil, der auf kleinstem Raum eine Vielzahl elektronischer Basiselemente (Transistor, Widerstand, Kondensator) integriert.

4.2.2.1 Die MIDI-Unit

In Abb. 4.8 ist die MIDI-Unit mit ihren Verbindungen zu sehen. Die MIDI-Unit gibt die primären Spielinformationen, die über MIDI einlangen, in aufbereiteter bzw. modifizierter Weise (Transponieren oder Stimmen) weiter. Gespielt wird das SynthEdit-Variophon über ein internes Keyboard, das in der MIDI-Unit liegt und über Tastatur oder Maus gesteuert werden kann. Alternativ kann ein externes USB-MIDI-Keyboard über eine MIDI-In Schnittstelle eingesteuert werden. Hier könnte auch jedes beliebige andere MIDI-Gerät über USB angeschlossen werden. So lässt sich beispielsweise das Casio Digital Horn über ein MIDI-to-USB Kabel verbinden. Dabei können die MIDI-Signale des Casio-Blaswandlers direkt an die Dynamik-Steuerung geleitet werden. Kommt keine Dynamik-Information von außen, so wird der Wert übernommen, der am internen Dynamik-Regler eingestellt ist. Der Transponierschalter (Umschaltung C, B, Es) und Stimmregler gehen beide an den Eingang *Transponieren*. Sie bewirken, dass im Inneren des Moduls die ursprüngliche MIDI-Tonhöhe modifiziert wird.

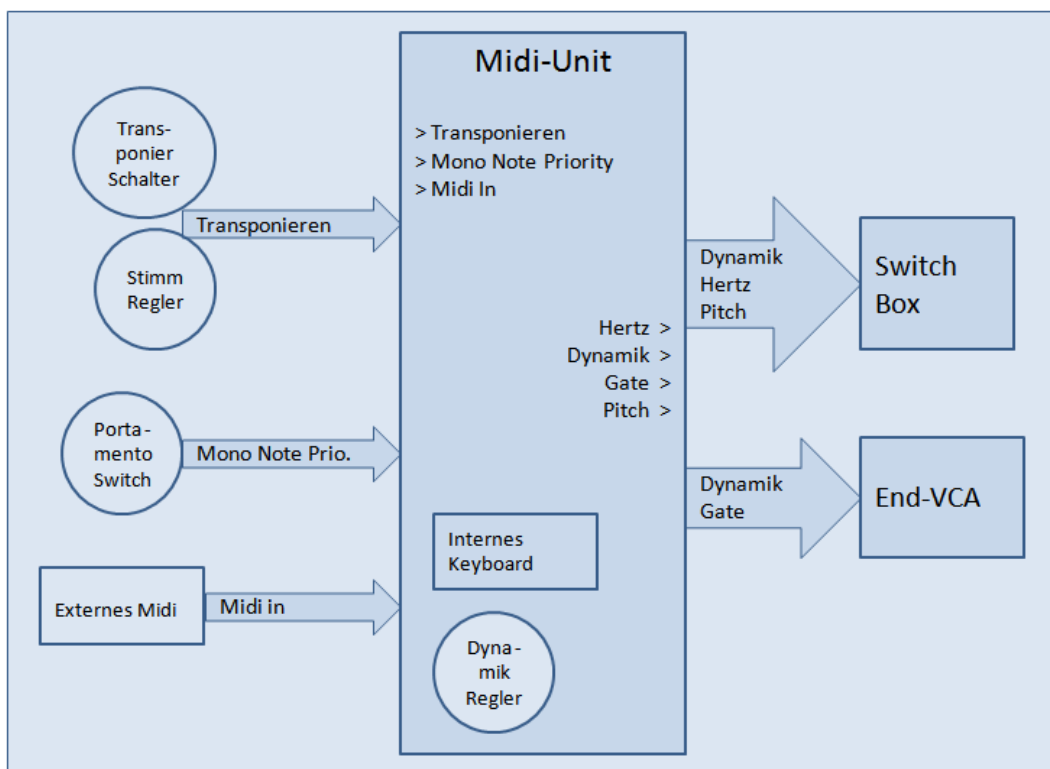


Abb. 4.8. MIDI-Unit mit ein- und ausgehenden Verbindungen.

Der Portamento-Switch steuert, welche Taste bei gleichzeitigem Anschlag Priorität hat. Die Ausgänge *Hertz*, *Pitch* und *Dynamik* laufen in die Switch-Box. Am Ausgang *Hertz* liegt die Frequenz (1 Volt / Hertz), am Ausgang *Pitch* liegt ebenfalls die Frequenz (in Volt pro Oktave, 5 Volt = 440 Hz). Der Grund für die Doppelführung der Frequenz sind die unterschiedlichen Ansteuerungsvarianten. Bei diversen Berechnungen wird direkt mit dem Frequenzwert (*Hertz*) gearbeitet, für die Oszillator-Steuerung wird *Pitch* verwendet. Die Dynamik⁶³ (1 bis 23 Volt, also ein Volt pro Stufe, siehe Tab. 4.1) geht einmal an die Switch-Box und ein zweites Mal direkt an den End-VCA. Dort wird sie einbezogen in die Kalkulation der endgültig ausgegebenen Lautstärke.

4.2.2.2 Die MIDI-Steuerung

Obwohl SynthEdit sich in seiner Grundfunktionalität an den frühen analogen modularen Synthesizern orientiert, wollte man eine vernünftige, systemunabhängige Steuerung von außen gewährleisten. Dafür bot sich vor allen anderen die Verwendung von MIDI an. Das hat man auch während der Entwicklung von SynthEdit erkannt und MIDI konsequent eingebunden. Die Verfügbarkeit von MIDI kommt dadurch auch dem SynthEdit-Variophon zugute. Die MIDI-Ansteuerung erfolgt in der vorher beschriebenen MIDI-Unit. Hier soll ein generelles Schema des Kontrollflusses vom MIDI-Gerät (Keyboard) bis zur internen Umsetzung der Signale innerhalb der MIDI-Unit gezeigt werden. Abb. 4.9 zeigt den Kontrollfluss von den externen physischen Geräten bis zum Vorliegen von virtuellen Steuerspannungen. Externe physische MIDI-Geräte werden direkt an einen USB-Eingang des Computers angeschlossen. Falls diese keinen USB-Ausgang besitzen, kann die Anbindung mit einem MIDI-To-USB-Adapter gemacht werden. SynthEdit leitet die MIDI-Signale über ein MIDI-In-Modul in die jeweilige Anwendung. Dort müssen diese Signale über Konverter bzw. Controller umgewandelt bzw. selektiert werden. Das passiert einmal im MIDI-To-CV (CV = Control Voltage), wo Tonhöhe und Gate ermittelt werden. Ein Note_On schaltet das Gate ein und legt die Tonhöhe, die als Nummer von MIDI kommt, als Kontrollspannung (in Volt pro Oktave: 5 Volt = 440 Hz) an den Pitch-Ausgang. Ein Note_Off schaltet

⁶³ In der SynthEdit-Emulation wird die Dynamik in einem Bereich zwischen 1 und 23 Volt (1 Volt pro Stufe) dargestellt, im analogen Vorbild laufen diese Stufen zwischen 1,0 und 3,2 Volt (siehe auch Tab. 4.1).

das Gate wieder ab. Neben Tonhöhe und Lautstärke (die hier nicht über die in Note_On enthaltenen Daten gesteuert wird) können auch beliebige andere Kontrollinformationen abgefragt werden.

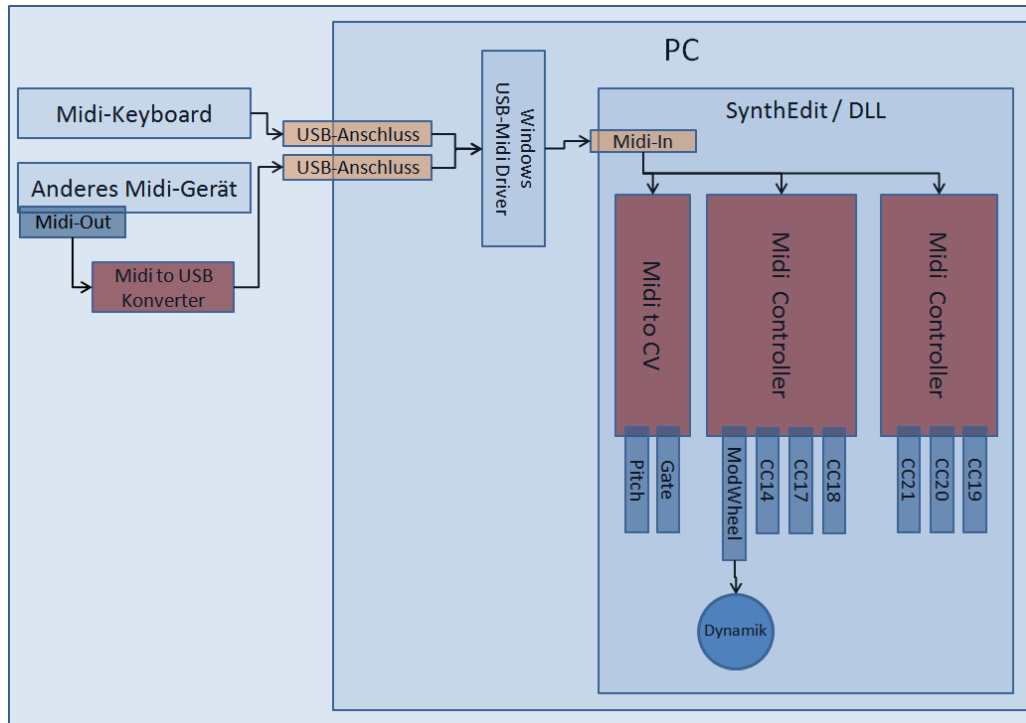


Abb. 4.9. MIDI-Kontrollfluss vom externen MIDI-Gerät bis zur Selektion und Umwandlung in Steuerspannungen. Mit Hilfe von zwei SynthEdit-Controllern werden die Steuerwerte des Modulationsrades sowie Werte von Drehknöpfen am Keyboard selektiert und in Steuerspannung umgewandelt. All diese Signale kommen über Control-Change herein. Die elementaren MIDI-Parameter Pitch und Gate werden direkt vom Konverter *MIDI to CV* weitergegeben.

Das Alesis QX49 Keyboard verfügt u.a. auch über acht Drehregler (K1 bis K8), die wahlfrei verfügbar sind. Diese sind MIDI-Controller, welche ihre Werte über Control-Change-Messages weitergeben (siehe auch 3.2.2). Um die Einstellung eines solchen Drehreglers abzufragen, muss dessen MIDI-Befehl inklusive Datenbyte 1 aus dem Datenstrom gefiltert werden. Die Filterung erfolgt durch SynthEdit-Kontrollelemente, die ebenfalls als MIDI-Controller bezeichnet werden. Ein solcher SynthEdit-MIDI-Controller kann bis zu vier unterschiedliche MIDI-Befehle selektieren und deren Werte, die zwischen 0 und 127 liegen, als Steuerspannung ausgeben. Pro Befehl, der selektiert werden soll, muss die Befehlsnummer zugeordnet werden. Die Drehregler K1 bis K8 liefern die MIDI-Befehle CC14 bis CC21⁶⁴. Controller 1 filtert der Befehl für das Modulationsrad, (geht an

⁶⁴ CC steht für Control Change.

die Dynamik-Steuerung), CC14 (Hall), CC17 (Stimmen) und CC18 (Lautstärke). Controller 2 filtert CC19 (Tiefenregler), CC20 (Mitten) und CC21 (Höhen). Die hier angeführten Regelwerte können auch direkt am Computer, d.h. über das jeweilige Element am GUI eingestellt werden (dies ist z.B. notwendig, wenn ein externes Keyboard ohne zusätzliche Drehknöpfe verwendet wird). Die grafischen Elemente sind mit den physischen Reglern gekoppelt, d.h. ein Drehen am reellen Knopf bewirkt ein synchrones Mitdrehen des Drehknopfes am GUI. Wie diese Kopplung im Detail funktioniert, wird bei der Beschreibung der grafischen Umsetzung erläutert (siehe 4.2.3).

4.2.2.3 Die Switch-Box

Aufgabe der Switch-Box ist es, die nachgelagerten Instrumenten-Module ein- oder auszuschalten (siehe Abb. 4.10). Wird ein Modul eingeschaltet, laufen Pitch, Hertz und Dynamik in das Modul. Ist das Modul ausgeschaltet, wird zusätzlich dessen Anzeige-Panel im unteren Teil des GUI ausgeblendet. Die Box enthält auch eine Anzeige für Frequenz und Dynamik. Die angezeigte Frequenz entspricht dem Wert, der von der MIDI-Unit nach etwaigem Transponieren und Stimmen ausgegeben wird. Diese Frequenz wird je nach Oktavlage von den jeweiligen Instrumenten-Modulen nach oben oder nach unten oktaviert. Einen Blick in das Innere der Switch-Box zeigt Abb. 4.11. Sie enthält die Kernstücke der Modul-Ein-Ausschaltung, pro Instrumenten-Modul einen On/Off-Container. Das On/Off-Element für das Fagott ist in Abb. 4.12 abgebildet. Die On-Information kommt als Boolescher Wert, wird über `DH_BoolToVoltage` in einen Spannungswert konvertiert, zusammen mit dem Master-On in ein Multiply geleitet. Dessen Ausgang steht nur dann auf 1, wenn beide Eingänge auf 1 stehen, also Master-On und Fagott-On auf on stehen. Der Ausgang des ersten Multiply wird in den Eingang der folgenden Multiplies gelegt. Diese multiplizieren jeweils Hertz, Pitch und Dynamik mit 1 oder 0, je nachdem ob on oder off vorliegt. Für das generelle Abschalten des Fagott-Panels im GUI wird nochmal über `DH_VoltageToFloat` und `DH_FloatToBool` ein Boolescher Wert für den On(F)-Ausgang erzeugt. Das On/Off-Element für die Oboe ist analog aufgebaut (als Kopie mit eigenen Labels). Für jedes weitere Instrumenten-Modul muss in die Switch-Box das dazugehörige On/Off-Element eingefügt werden, dessen Eingänge mit den Eingängen

und dessen Ausgänge mit einem neuen Satz von Ausgängen des Switch-Box-Containers verbunden werden.

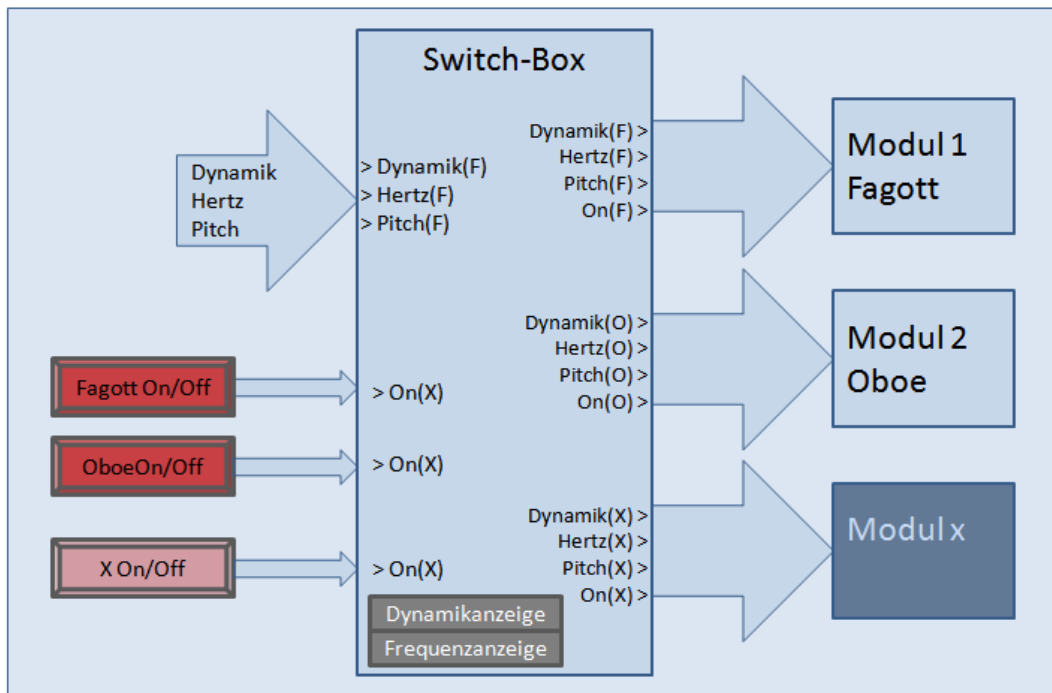


Abb. 4.10. Schematische Darstellung der Switch-Box mit ein und ausgehenden Verbindungen.

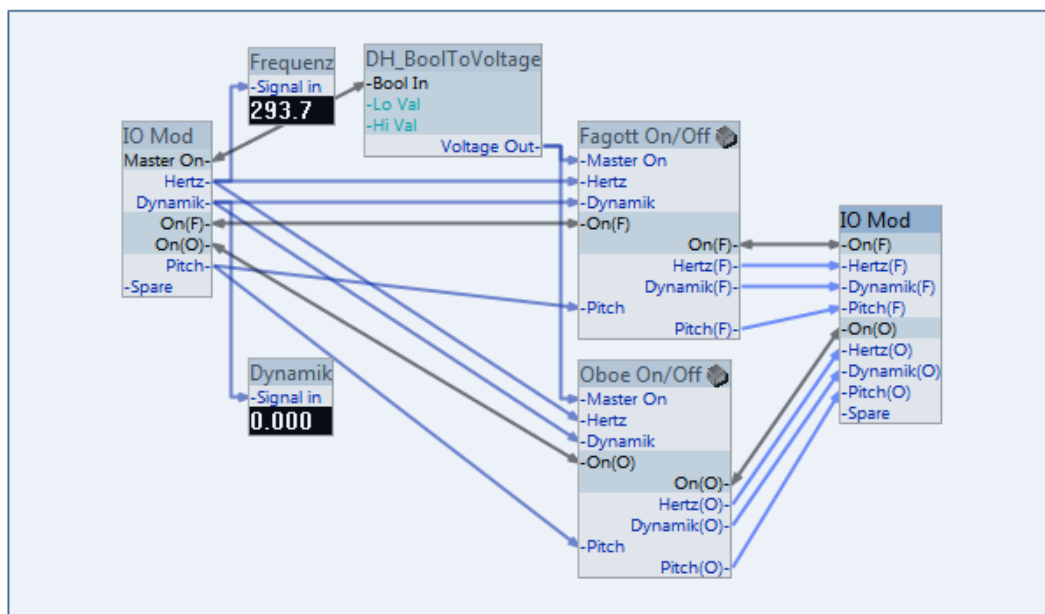


Abb. 4.11. Der SynthEdit-Container Switch-Box.

4.2.2.4 Das Instrumenten-Modul

Am Beispiel des Fagott-Moduls soll die Arbeitsweise eines Instrumenten-Moduls beschrieben werden. Im Modul werden die instrumentenspezifischen Impulsdauern berechnet (in Abhängigkeit von Dynamik und Tonhöhe bzw. Registerlage). Am Ausgang des Moduls liegt das fertige Signal, es wird von einer Oszillatoreinheit erzeugt, die ebenfalls Teil eines jeden Instrumentenmoduls sein muss. Ursprünglich war angedacht im gesamten SynthEdit-Variophon nur eine Oszillatoreinheit zu verwenden. Damit wäre aber ein gleichzeitiges Spielen von mehreren Modulen nicht mehr möglich gewesen, da ein Oszillator jeweils instrumentenspezifisch angesteuert werden muss. Der Oszillator selbst erzeugt eine Rechteckwelle, das aus dieser Welle resultierende Spektrum variiert abhängig von der einlaufenden Impulsweitengröße. Um die richtige Steuergröße weiterzugeben, muss der Wert, der vorerst in Millisekunden vorliegt, in eine virtuelle Spannung umgerechnet werden, die zwischen -10 und +10 Volt liegt. In diesem Steuerbereich entsprechen 0 Volt einem Anteil der Impulsdauer an der Periodendauer von 50 Prozent, -10 Volt 0 Prozent, +10 Volt 100 Prozent.

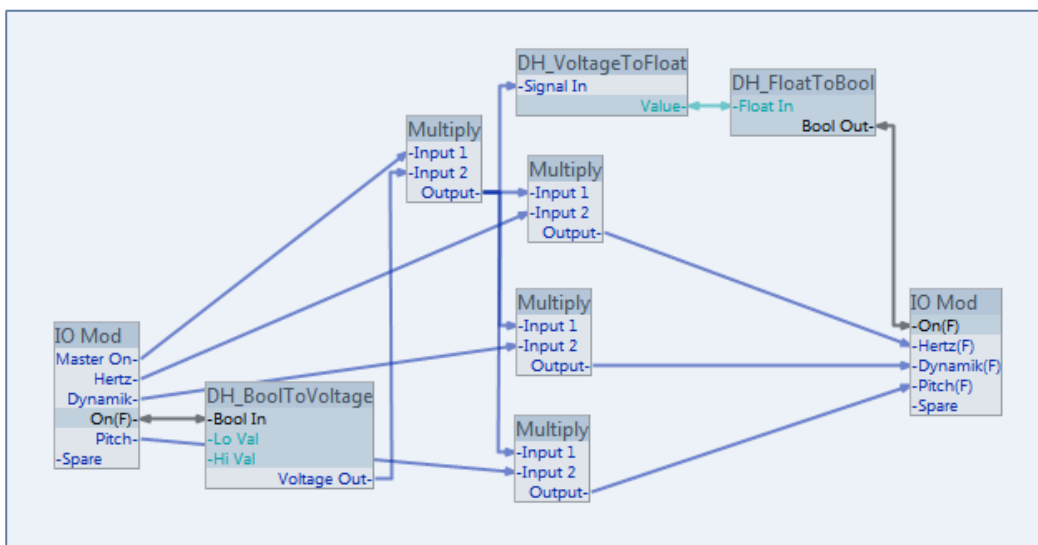


Abb. 4.12. Der SynthEdit-Container Fagott On/Off.

Die Kalkulation des Steuerwertes erfolgt in zwei Schritten. Zuerst wird der Prozentanteil errechnet, dann wird dieser in die geforderte virtuelle Spannung transformiert.⁶⁵ In Abb. 4.13 ist das Fagott-Modul schematisch dargestellt. So wie je-

⁶⁵ Dazu ein Beispiel: Bei einer Frequenz von 110 Hz beträgt die Periodendauer 9,09 ms. Für die Dynamikstufe 12 errechnet sich eine Impulsdauer von 1,51 ms, das sind 16,67 Prozent von 9,09.

des Instrumenten-Modul besitzt es einen Hertz-, einen Pitch- und einen Dynamik- eingang. Am Dynamikeingang liegt ein Wert zwischen 1 und 23, generiert in der MIDI-Unit. Pro Register des Fagotts wird eine Impulsdauer in ms errechnet. Diese Dauer ist für alle Tonhöhen eines Registers dieselbe.

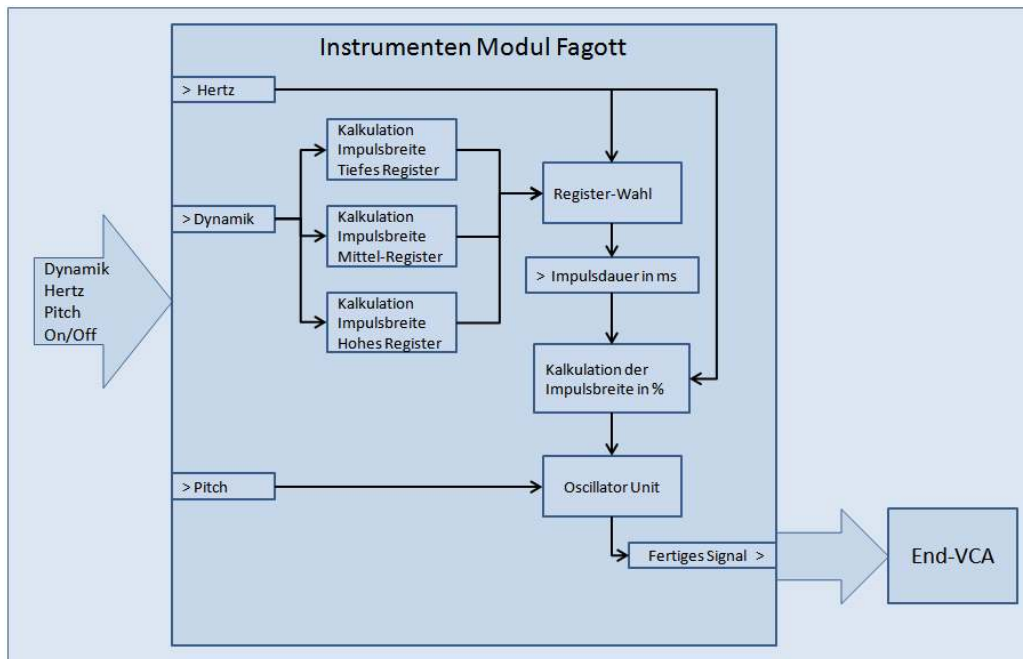


Abb. 4.13. Schematische Darstellung des Fagott- Instrumenten-Moduls.

Die Formeln zur Berechnung wurden von Oehler übernommen (2008, 162).⁶⁶ Pro Register gibt es einen Berechnungscontainer, das Ergebnis wird im Container Registerwahl (gesteuert durch die Frequenz *Hertz*) ausgewählt. Die gewählte Impulsdauer (*d*) wird zusammen mit der Frequenz (*f*) für die Berechnung der Impulsbreite (*IB*) in Prozent herangezogen. Diese wird nach der Formel

$$IB = 100 * d / (1000 / f)$$

Formel 4.1

berechnet, wobei $1000 / f$ die Periodendauer der Frequenz *f* ist. Der Prozentwert *IB* und die Tonhöhe *Pitch* laufen in den Container Oscillator-Unit, dieser liefert das fertige Signal. Der Wert(*w*) für den Steuereingang der Pulsweite am Oszillator wird aus dem Prozentwert(*p*) nach der Formel

Um das in das -10/+10 Volt Schema umzurechnen ermittelt man vorerst den Wert zwischen 0 und 20, also 16,67 Prozent von 20, das sind $16,67 \times 0,2$, das sind $\sim 3,34$. Davon zieht man noch 10 ab, erhält -6,66. Das ist der Wert, der an den Eingang *Pulsewidth* des Oszillators gelangen muss.

⁶⁶ Siehe Tab. 4.1, S. 74.

$$w = p * 0,2 - 10$$

Formel 4.2

berechnet. In Abb. 4.14 ist die SynthEdit-Struktur des Fagott-Moduls zu sehen. In *Div2* wird die einlangende Frequenz durch zwei dividiert, um die Oktavlage des Fagotts zu korrigieren. Im Oboenmodul wird an dieser Stelle mit zwei multipliziert, womit die Oktavlage der Oboe nach oben korrigiert wird.⁶⁷ In *Periodendauer in ms* wird die Periodendauer in Millisekunden (1000 / Frequenz) berechnet.

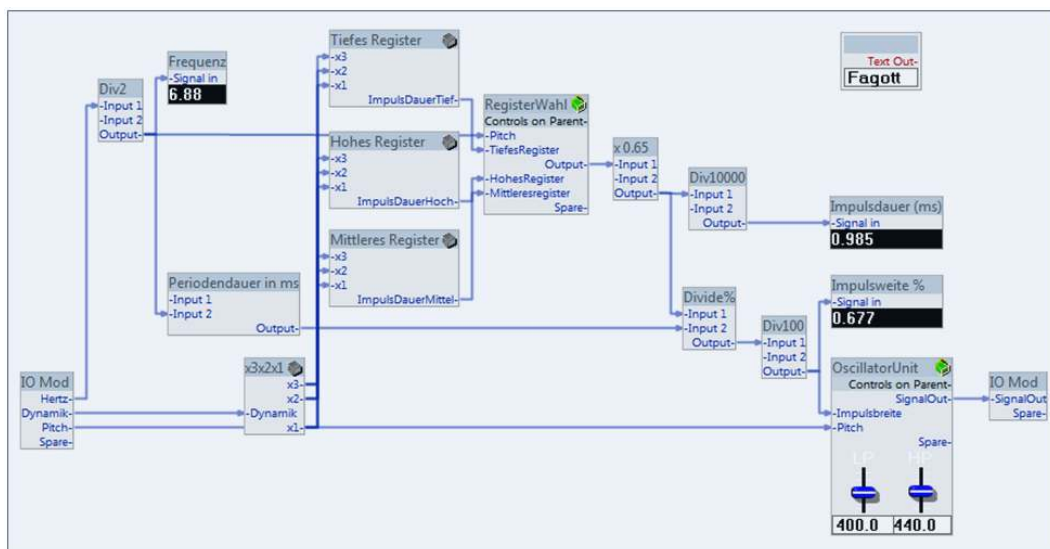


Abb. 4.14. SynthEdit-Struktur des Fagott-Instrumenten-Moduls.

Die Berechnung der Impulsweiten erfolgt pro Register in den Containern *Tiefes Register*, *Mittleres Register* und *Hohes Register*. Da alle drei Registerformeln mit dem Dynamikwert x , dessen Quadrat x^2 und dessen Kubik x^3 arbeiten, werden diese Werte in *x3x2x1* einmal berechnet und an die Eingänge X1, X2 und X3 aller drei Container gelegt. Um eine möglichst hohe Rechengenauigkeit zu erzielen, wird dort Impulsdauer in ms/10000 berechnet. Dadurch ist der Wert, der von

⁶⁷ Man könnte das auch direkt auf der Midi-Tastatur mittels Oktav-Shift steuern, allerdings wäre dann eine gleichzeitige Verwendung von mehreren Instrumentenmodulen nicht möglich, die Oboe würde beispielsweise mit 55 Hz statt 220 Hz angesteuert, im umgekehrten Fall das Fagott mit 440 Hz statt 220 Hz.

Divide% ausgegeben wird, um den Faktor 100 zu hoch, das wird durch *Div100* richtig gestellt.⁶⁸

Am Panel des Moduls werden Frequenz, Impulsdauer und Impulsbreite in % angezeigt.

4.2.2.4.1 Die Oscillator-Unit im Fagott-Modul

Abb. 4.15 zeigt die SynthEdit-Struktur der Oscillator-Unit. Die eingehende Impulsbreite in Prozent wird zunächst gemäß Formel 4.2 (S.85) umgerechnet (*Div5*, *Sub10*).⁶⁹ Dieser Wert geht an den Pulsweitereingang (Pulse Width) des Oszillators. An den Pitch-Eingang wird zusätzlich eine Spannung von -1 Volt gelegt. Damit wird das Signal um eine Oktav vermindert, da der Eingang in Volt/Oktav gesteuert wird.

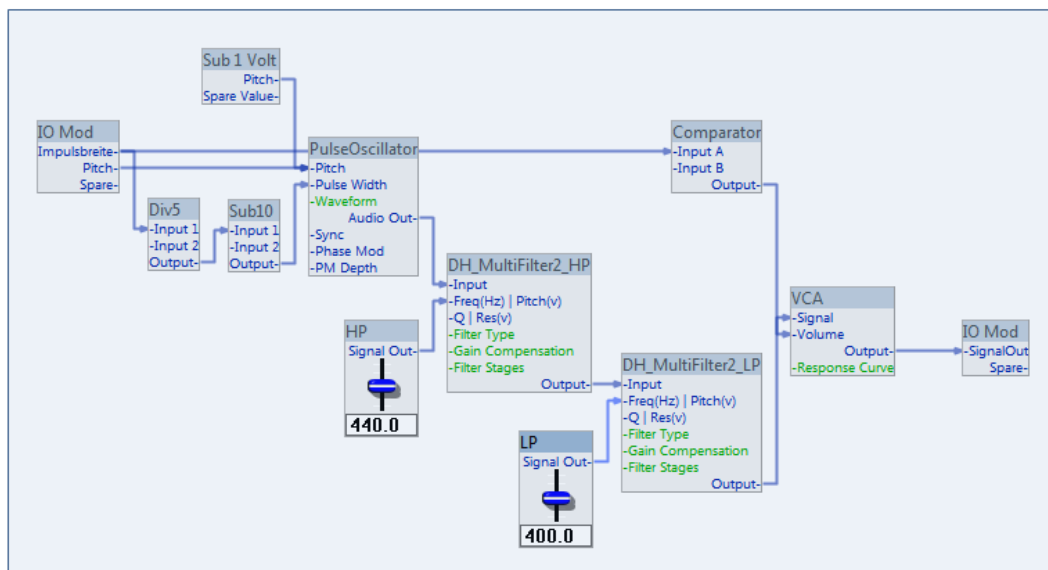


Abb. 4.15. Die Oscillator-Unit des Fagott-Instrumentenmoduls.

Der VCA vor dem Ausgang hat Sperrfunktion. Vom Comparator erhält er 0 oder 10 Volt im Volume-Eingang, abhängig davon, ob das Modul angesteuert wurde oder nicht. Wurde es nicht angesteuert, liegen 0 Volt am Eingang Impulsbreite, 0 Volt am Ausgang des Comparators, 0 Volt am VCA-Volume. Somit gibt es kein Ausgangssignal. Oszillatoren sind immer aktiv und verursachen undefinierte Stör-

⁶⁸ Beispielsweise wird eine Impulsweite von 1,51488 ms als Wert 15148,8 ausgegeben. Dies durch 9,09 ms (= Periodendauer 110 Hz) dividiert ergibt 1666,37. Nach der Division durch 100 erhält man 16,6637 Prozent.

⁶⁹ Div5 (Division durch 5) entspricht einer Multiplikation mit 0,2.

signale, wenn sie keine Ansteuerung erhalten. Mit der Blockierfunktion des VCA werden derartige Störgeräusche unterdrückt.

4.2.2.4.2 Registerberechnung und Registerwahl

Die Berechnung der Impulsbreite wird beispielhaft für das tiefe Register vorgestellt. Die SynthEdit-Struktur für die Berechnung der Impulsbreiten im untersten Register und die Registerwahl sind in Abb. 4.16 zu sehen.

Der Container *Tiefes Register* erhält vom Container *XIX2X3* (ebenfalls in Abb. 4.16) den Dynamikwert (zwischen 1 und 23), dessen Quadrat und dessen Kubik. Im Berechnungscontainer wird die Formel

$$i = -0,00009x^3 + 0,0053x^2 - 0,1292x + 2,4576$$

Formel 4.3. Impulsbreite i für tiefes Fagottregister abhängig von Dynamikstufe x (Oehler 208, 162).

verwendet.

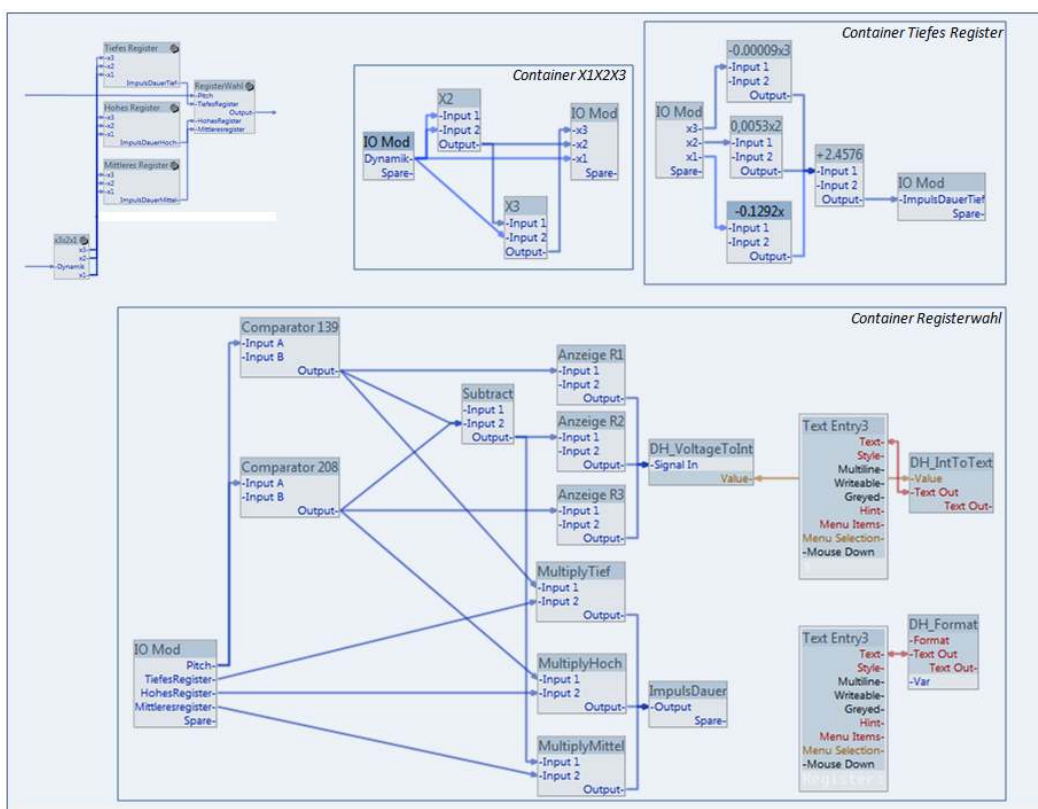


Abb. 4.16. Tiefes Register und Registerwahl.

Da ein Wert von $-0,00009$ zu ungenau berechnet würde (SynthEdit rechnet mit zu wenigen Nachkommastellen), wird die gesamte Berechnung in Millisekunden / 10000 durchgeführt. Daher wird $-0,9x^3 + 53x^2 - 1292x + 24576$ gerechnet. Für die Dynamikstufe $x = 10$ ergibt das $-900 + 5300 - 12920 + 24576 = 16056$ (also 1,6056 ms). Wie bereits in 0 erwähnt wird dieser Wert in der Folge als Wert in 1/10000 Millisekunden verarbeitet. Die Entscheidung, mit welchem der für alle drei Register berechneten Impulsbreitenwerte weitergerechnet werden soll, fällt im Container Registerwahl. Dieser erhält die Frequenz und pro Register einen Wert. Am *Comparator139* wird 1 ausgegeben, wenn die Frequenz unter 139 Hz liegt (tiefes Register bis incl. Gis3 mit 138,6 Hz). Diese Eins schaltet über *MultiplyTief* den Impulsbreitenwert für das tiefe Register an den Ausgang *Impulsdauer*>, die anderen Registerwerte werden mit 0 multipliziert und kommen daher nicht durch. Ist die Frequenz höher als 208 (alle höher als Gis3, 207,7 Hz), erhält *MultiplyHoch* eine 1 vom *Comparator208* und legt den Impulsbreitenwert des hohen Registers an den Ausgang. Liegt die Frequenz zwischen 139 Hz und 208 Hz, liefern beide Komparatoren 0, diese 0 wird in *Subtract* von 1 abgezogen, die resultierende 1 an *MultiplyMitte* weitergegeben und somit das mittlere Register durchgeschaltet. In allen anderen Fällen erhält *Subtract* eine 1 entweder vom oberen oder vom unteren Komparator und liefert $1 - 1 = 0$. Zugleich mit den *Multiply*s erhalten auch die Anzeige-*Multiply*s eine 1 oder 0, diese wird mit 1, 2 oder 3 multipliziert und als Register-Nummer am Panel angezeigt (1 = tief, 2 = mittel, 3 = hoch). Die Bausteine *DH_VoltageToInt*, *DH_IntToText* und *TextEntry3* werden für die Umwandlung in diese Registeranzeige benötigt. Die beiden isoliert stehenden Bausteine *TextEntry3* verbunden mit *DH_Format* werden benötigt, um den Text "Register" am Panel auszugeben.

4.2.2.5 End-VCA

In diesem Container finden alle nachgelagerten Prozesse statt, die unabhängig von instrumentenspezifischen Parametern sind: ADSR, endgültiges Volume (resultierend aus Volume vom Lautstärkereglern und Dynamikstufe, Dreiband-Equalizer und Hall. Abb. 4.17 zeigt die SynthEdit-Struktur des Containers. Die Dynamikstufe (>*Dynamik*) wird durch einen fixen Wert dividiert (2,3) und mit dem Wert der Lautstärke (>*Volume*) multipliziert. Dies ist ein vereinfachtes und damit noch

zu verbesserndes Verfahren, um eine brauchbare Lautstärke bei unterschiedlichen Einstellungen der Lautstärke in Kombination mit variierenden Dynamikstufen zu erhalten. Hohe Dynamik bei hoher Lautstärke führt schnell zum Übersteuern, niedrige Dynamik mit wenig Lautstärke birgt die Gefahr, dass fast nichts zu hören ist. Hier gilt es einen Mittelweg zu finden. Am reellen Variophon existiert diese Problemstellung ebenfalls. Auch dort kann man weder mit voller Lautstärke und Maximaldynamik noch mit geringer Lautstärke und niedriger Dynamik einen brauchbaren Klang erzeugen.

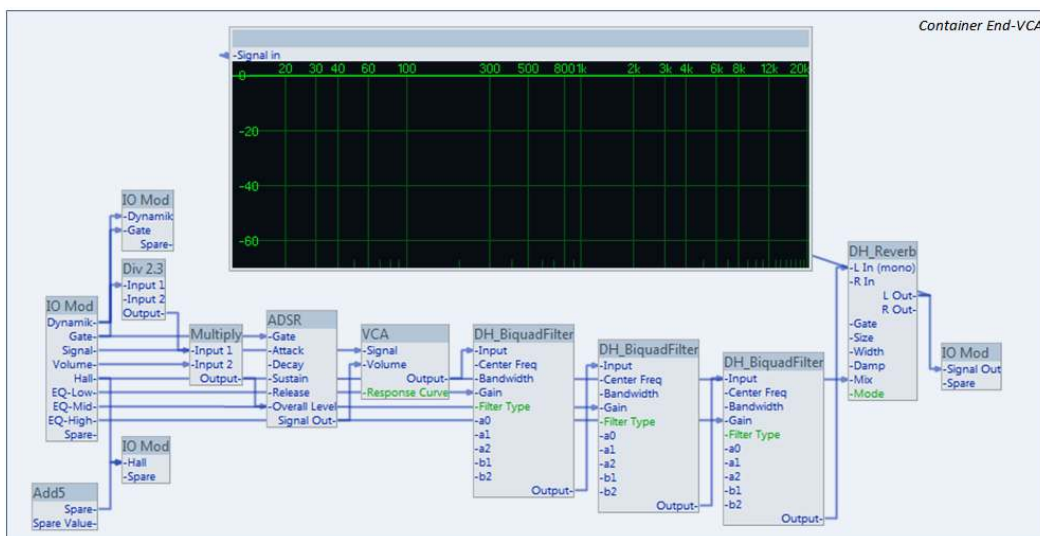


Abb. 4.17. End-VCA. Container, der alle nachgelagerte Prozesse enthält.

Der von Multiply erzeugte endgültige Lautstärkewert geht zusammen mit dem Gate-Signal in den ADSR und von dort in den VCA. Das Signal das in den VCA läuft kommt direkt vom Eingang >Signal; es ist das fertige Signal aus einem oder mehreren Instrumentenmodulen. Nach dem VCA liegen die Tiefen-, Mittel- und Höhenstufe eines Dreiband-Equalizers. In diese Stufen laufen auch jeweils die Werte der dazugehörigen Regler von außerhalb des Containers. Nach der letzten EQ-Stufe liegt noch das Hall-Element *DH_Reverb*. Es sorgt für mehr oder weniger Nachhall (in der Regelstellung 0 gibt es keinen Hall), gesteuert über >Hall, den Regeleingang vom außen liegenden Hall-Regler. Im Panel des End-VCA liegt ein Freq-Analyser, eine Anzeige für das ausgegebene Spektrum. Die Werte für Hall, Gate, Dynamik und die EQ-Einstellwerte werden zusätzlich auch wieder aus dem Container heraus geschleift, um die außerhalb des Containers liegenden Anzeigen, wie etwa die fünfstufige Dynamik-Led-Anzeige, zu bedienen.

4.2.3 Die grafische Umsetzung

Zu den Stärken von SynthEdit zählen dessen grafische Möglichkeiten. Diese erlauben, die nachgestellten Geräte als GUI zu gestalten, das optisch dem Original entspricht. Auch die Bedienungselemente (Drehknöpfe, Schalter, Taster, LED-Anzeigen u.v.m.) können so integriert werden, dass sie - mit der Maus gesteuert - dieselben Funktionen ausüben bzw. Anzeigen liefern wie die Bedienungselemente des reellen Vorbilds. Wie bereits früher erwähnt, ist es auch möglich, die Regler auf dem GUI mit reellen Reglern auf einem Peripheriegerät (z.B. Controller auf einem MIDI-Keyboard) zu koppeln, d.h. ein Bewegen des externen Reglers verändert auch die Stellung des korrespondierenden Elementes im GUI. Um dem GUI das Aussehen des nachzustellenden Gerätes zu geben, muss eine Aufnahme dieses Gerätes als *Skin* - damit wird in SynthEdit die Hintergrundgrafik eines Moduls bezeichnet - in einem eigenen Ordner⁷⁰ abgelegt werden. Danach kann das Skin einem Modul zugeordnet werden. In Abb. 4.20 ist die SynthEdit Struktur des Hauptcontainers Variophon abgebildet. Diesem ist ein Foto des Variophon Spot als Skin zugeordnet. Will man Bedienungselemente des Gerätes beweglich machen und diese zur Steuerung verwenden, so muss man sie als Subcontrol (siehe 4.2.3.1) zu Verfügung stellen und so auf dem Panel des Moduls positionieren, dass es das ursprüngliche Element überdeckt. Das komplette GUI ist in Abb. 4.21 abgebildet.

4.2.3.1 Subcontrols

Subcontrols sind SynthEdit-Funktionseinheiten (Spezialform von Controls), die in Module eingesetzt werden, welche bewegliche Elemente enthalten. Bewegt bzw. verändert können diese Elemente sowohl mit der Maus als auch durch von außen angelegte Steuerung. Im Gegensatz zu den Standardelementen (controls), die eine nichtveränderbare vorgegebene Struktur besitzen, lassen sich Module mit Subcontrols nach eigenen Bedürfnissen gestalten. Dies betrifft sowohl Optik als auch Funktionalität dieser Elemente. Als Beispiel dafür wird der Lautstärkereger (Volume) im Detail beschrieben. Dieser kann sowohl mit der Maus als auch von au-

70 ...\\SynthEdit\\skins\\NameDesSkins.

ßen über einen MIDI-Drehregler gedreht werden. Abb. 4.18 zeigt das Innenleben dieses Reglers. Über ein IO-Modul gelangt der MIDI-Wert des korrespondierenden MIDI-Controllers am Keyboard (CC18) in das Subcontrol. Das *Mul 0.3*-Element setzt diesen Wert auf 30 Prozent seiner ursprünglichen Größe (was hier nicht von Belang ist). Anschließend wird die virtuelle Spannung über *DH_VoltageToFloat* in einen Floatingpoint-Wert konvertiert. Dies ist erforderlich, weil die meisten Kontrollflüsse innerhalb eines Subcontrols über Float laufen, was im Gegensatz zur virtuellen Spannung auch bi-direktional möglich ist. *PatchMemory Float3* ist ein Subcontrol-Element, das solche bi-direktionalen Flüsse ermöglicht. Gelangt ein Wert aus dem ExtMIDI-Eingang des Moduls an den Value-Eingang des Patch-Elementes, so wird dieser gleichzeitig an das *Image2* (in Animation Position) geschickt, wodurch sich die Drehstellung des in mehreren Bildern vorhandenen Drehreglers ändert.

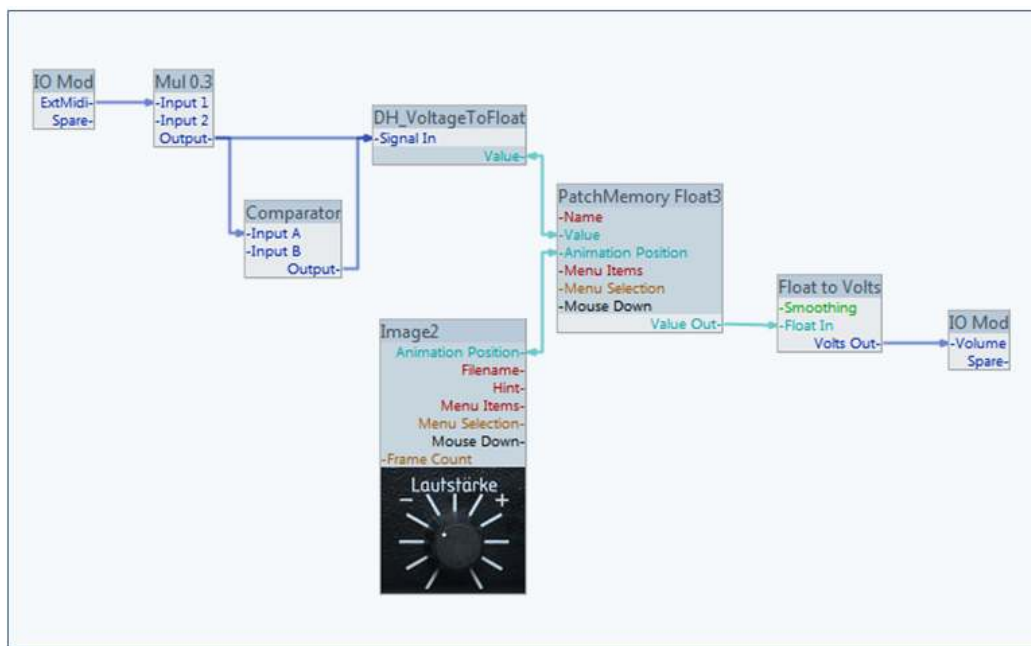


Abb. 4.18. Der Container Volume, der den Gesamtlautstärkereglter enthält. Der Comparator sichert eine Lautstärkeneinstellung von einem Drittel bei Programmstart.

Bewegt man den Drehregler im GUI mit der Maus, so wird der Wert von Animation Position an das Patch-Element geschickt. Somit kann das Patch-Element von zwei Quellen angesteuert werden. Die jeweils letzte Ansteuerung bestimmt den Wert im Patch-Element, der physische Regler bestimmt zusätzlich die Stellung des Reglers am GUI. Der Regler am GUI kann allerdings nicht die Stellung des

externen Reglers beeinflussen. Bei Programmstart erhält der Container über den ExtMIDI-Eingang null Volt, dadurch wäre die Lautstärke immer auf null gestellt, wenn das Programm neu anläuft. Um das zu verhindern, ist ein Comparator zwischen *Mul-03* und *DH_VoltageToFloat* gelegt. Liegen null Volt an dessen oberen Eingang, so gibt er ein Volt an das nächste Element weiter. Damit wird bei Programmstart die Lautstärke automatisch auf ein Drittel der möglichen Gesamtlautstärke (drei Volt) eingestellt. Diese Vorgangsweise wurde auch für die Tiefen-, Mitten, Höhen- und Stimmregler gewählt, die dadurch beim Start in Mittenstellung einrasten. Der Hallregler bleibt beim Start in Nullstellung.

4.2.3.2 Bewegliche Elemente

Die Grafik von beweglichen Elementen wird in SynthEdit durch das Subcontrol *Image2* eingebunden. Dieses besitzt einen Parameter für den Filenamen des entsprechenden Bitmap-⁷¹ oder JPEG⁷² - Files. Ein solches File enthält ein Bild pro möglicher Darstellung des beweglichen Elementes, im Falle des Drehreglers pro möglicher Drehstellung. Es sind also alle Stellungen des Reglers in einer Serie von hintereinanderliegenden Bildern gleicher Größe innerhalb des Grafikfiles gespeichert. Zu jedem Grafikfile gehört ein gleichnamiges Textfile, das auch im gleichen Verzeichnis liegen muss. Es enthält Information über die Größe eines Bildes (Länge x Breite in Pixeln) innerhalb der Bilderkette und Angaben, wie das bewegliche Element auf die Maus reagieren soll (drehen, vor – zurück, nur Maus-klick u.a.). Aus der Größenangabe errechnet sich SynthEdit die Anzahl der Bilder und damit unterschiedlichen Positionen pro Drehstellung. Je mehr Bilder und damit Positionen enthalten sind, desto runder und flüssiger wird beispielsweise eine Drehbewegung dargestellt. Beispielhaft ist in Abb. 4.19 das Grafikfile abgebildet, das für die Darstellung des Drehreglers verwendet wird. Im Container Volume besitzt das Element *Image2* einen bi-direktionalen Anschluss (*Animation Position*). Dieser sendet eine mit der Maus veränderte Position nach außen oder empfängt einen Wert zur Positionsänderung und setzt diesen um, indem das entsprechende Bild aus der Bilderkette zur Anzeige gebracht wird. Im Falle der Drehregler wurde pro Regler jeweils nur ein Bild verwendet, das aus dem Ge-

⁷¹ Windows Bitmap, Format zur Speicherung von Grafik mittels zweidimensionaler Rasterung.

⁷² Standard für Komprimierungs- und Kodierungsmethoden zur Speicherung von Grafik.

sambild des Variophons herausgeschnitten wurde. Dadurch wurden optische Bruchstellen vermieden, die durch die Verwendung unterschiedlicher Aufnahmen zwangsläufig entstünden. Die unterschiedlichen Positionen werden durch weiße Punkte visualisiert, die mit einem Grafikbearbeitungsprogramm ergänzt wurden.



Abb. 4.19. Das Grafikfile zur Darstellung des Höhenreglers. Pro Regelstellung wird ein Bild benötigt. SynthEdit wählt das zu jeder Regelstellung (die mit Maus oder extern über MIDI verändert wird) korrespondierende Bild innerhalb der Grafik aus und bringt es zur Anzeige auf dem GUI.

Das ist eine Kompromisslösung: die Flexibilität von SynthEdit lässt zu, die grafischen Elemente zu einem späteren Zeitpunkt zu wechseln ohne Änderungen an der Programmstruktur vorzunehmen. Wenn es also mit der entsprechenden fotografischen Ausrüstung gelingt die jeweiligen Reglerpositionen als Einzelbilder aufzunehmen, die keine Unterschiede in Größe oder Helligkeit aufweisen, bekäme man eine noch wirklichkeitsnähere Darstellung des Variophons.

Am Variophon gibt es außer den Drehreglern noch drei andere Arten von Bedienelementen. Die Taster haben ein rotes Kontroll-Led, das bei Einschaltung leuchtet. Hier werden nur zwei Bilder benötigt, eines mit dunkler und eines mit heller Led. Die Dynamikanzeige besteht aus fünf Leds, von welchen keines bis alle leuchten können, dafür werden sechs Bilder benötigt. Der Auswahlschalter für die Portamento-Variante wird mit zwei Bildern (links oder rechts) dargestellt.

In Abb. 4.20 ist der Hauptcontainer Variophon zu sehen. Aus diesem wird auch das VST-Modul zur externen Verwendung erzeugt. Das dazugehörige GUI ist in Abb. 4.21 zu sehen.

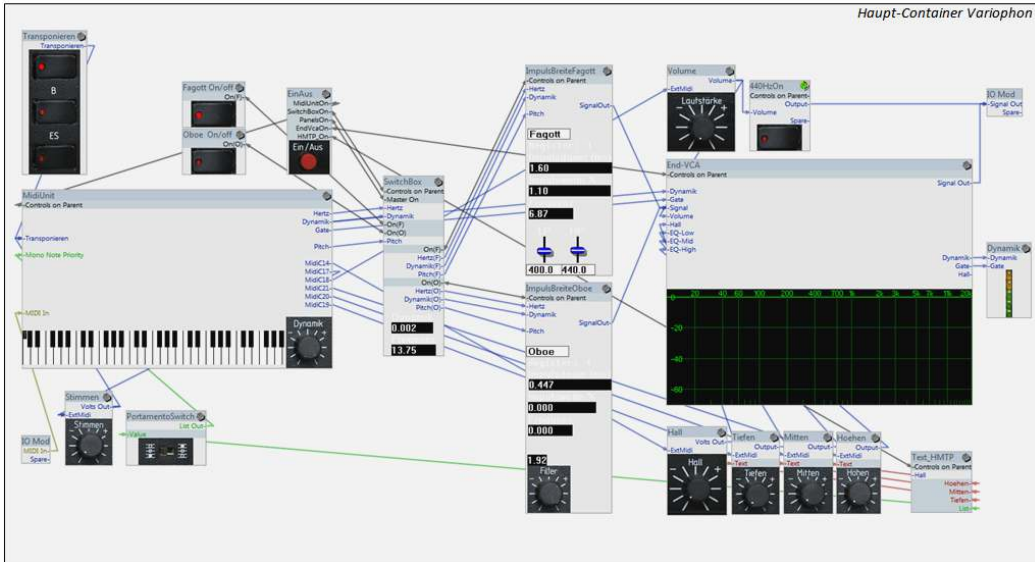
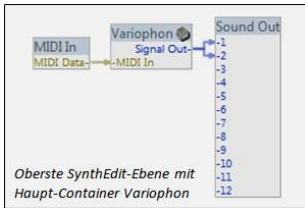


Abb. 4.20. Der Hauptcontainer Variophon. Neben den Hauptmodulen enthält dieser Container auch diverse Steuerknöpfe und Schalter. Diese müssen im Hauptcontainer platziert werden um im GUI positioniert werden zu können.



Abb. 4.21. Das GUI des SynthEdit-Variophon. Im oberen Teil entspricht es dem Variophon Spot. Drehknöpfe, Tasten und Tastatur lassen sich mit der Maus bedienen. Die Drehknöpfe drehen synchron mit den Knöpfen der MIDI-Tastatur. Im unteren Teil finden sich zusätzliche Anzeigen, die es am analogen Variophon nicht gibt: Dynamik-Stufe, Frequenzen, Impulsdauer, Impulsweite, EQ-Filter-Werte, Nachhall und Portamento-Einstellung sowie ein Frequenzanalysator. Die Anzeigen für Register, Impulsdauer, Impulsweite, Frequenz (des Instrumentes), LP (Low Pass) und HP (High Pass) werden nur für jeweils aktive Module (in der Abbildung für das Fagott) angezeigt.

5 Bewertung und Ausblick

Die Bewertung der SynthEdit-Emulation des Variophons bezieht sich auf die gegenwärtig vorliegende Version. Diese kann als erster Meilenstein auf dem Weg zu einer endgültigen Umsetzung angesehen werden.

Im akustischen Bereich wird (zunächst bei der Erstellung des Fagott-Moduls) eine möglichst enge Annäherung an das Original angestrebt. Ein erster akustischer Vergleich nach Gehör ermöglicht nur eine grobe Bewertung der Unterschiede. Eine präzisere Bewertung erlauben vergleichende Analysen auf spektraler Ebene. Diese werden mit Hilfe von Adobe Audition bewerkstelligt. Dabei werden mehrere Durchgänge von Vergleichsanalyse und Nachjustierung durchlaufen.

Das Spektrum der in der Pulsweite modifizierten Rechteckwelle kann nur als Basis für den endgültigen Klang verwendet werden. Beim analogen Variophon werden deshalb frequenz- und amplitudenabhängige Filterfunktionen eingesetzt, die das instrumententypische Abstrahlverhalten bzw. die Filterfunktion der Röhre simulieren (vgl. Oehler 2008, 153). Auch die Emulation arbeitet mit einem Hochpassfilter der im tiefen Bereich die Teiltonamplituden senkt, da diese auch beim natürlichen Vorbild der Fall ist. Der Grund dafür liegt darin, dass die meisten Blasinstrumente zu klein für die Abstrahlung ihrer niedrigsten Frequenzen sind (vgl. Fricke 1989). Auch die Abschwächung der hohen Teiltöne, die mit einer Abrundung der der Impulsform einhergeht, muss mit einem Tiefpassfilter nachgebessert werden, wobei die Eckfrequenz dieses Filters abhängig von Dynamikstufe nach oben oder unten verschoben werden muss (vgl. Oehler 2008, 176). Vor allem die Parametrisierung und Feinjustierung dieser beiden Filter wird mit Hilfe der spektralen Vergleiche vorgenommen.

5.1 Variophon vs. SynthEdit

Zur Erstellung der Spektren wird mit Adobe Audition⁷³ gearbeitet. Die Testtöne des analogen Variophons werden über den analogen Soundeingang des Rechners aufgenommen (Sampling Rate 44100 Hz, 16 Bit). Sie liegen als Wave-Files, erzeugt von Audition, vor. Die Testtöne des SynthEdit-Variophons können als Wave-Files direkt mit SynthEdit erzeugt werden (ebenfalls 44100 Hz, 16 Bit). Ein

⁷³ Verwendet wurde Adobe Audition 3.0.

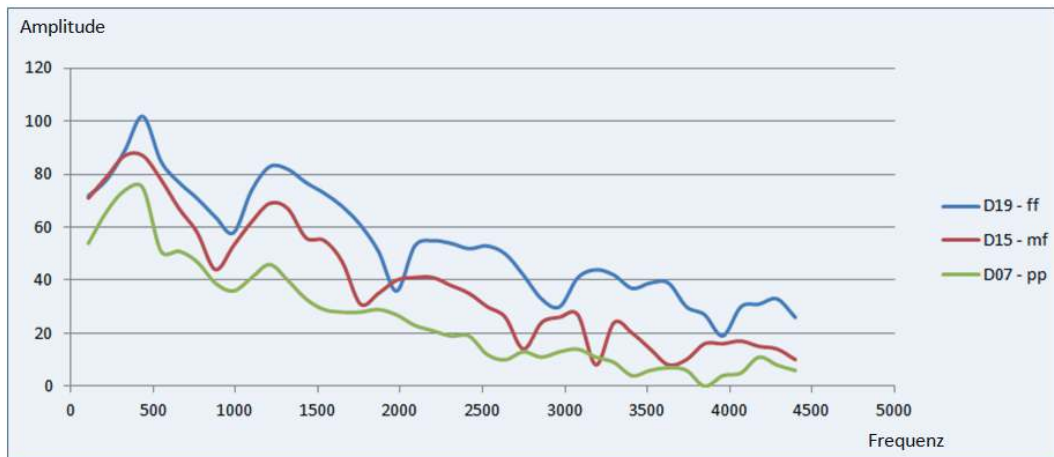


Abb. 5.1. Spektraler Amplitudenverlauf für A2 (110 Hz) in drei unterschiedlichen Dynamikstufen gemessen am Variophon Spot.

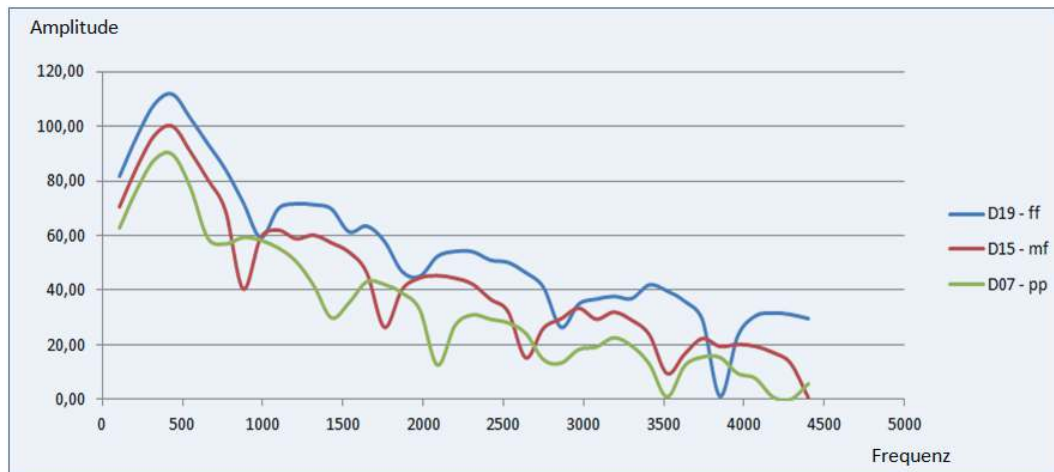


Abb. 5.2. Spektraler Amplitudenverlauf für A2 (110 Hz) in drei unterschiedlichen Dynamikstufen erzeugt mit der SynthEdit-Emulation.

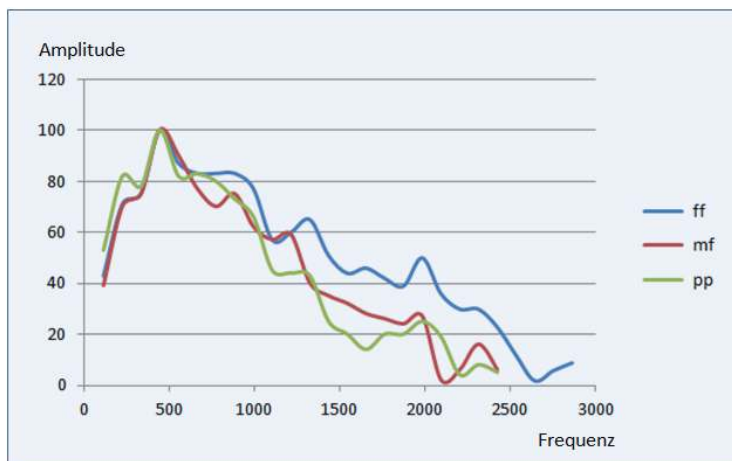


Abb. 5.3. Spektraler Amplitudenverlauf für A2 (110 Hz) nach den Messungen von Voigt (1975, Anhang II, 2-4). Der höchste Teilton für den (im ff) ein Messwert vorliegt ist der 26. Teilton (2860 Hz).

erster Vergleich wurde für das A2 (110 Hz) mit jeweils drei Dynamikstufen vorgenommen (D07 - pp, D15 - mf, D19 - ff). Die Amplitudenwerte der Teiltöne (110 Hz bis 4400 Hz) wurden aus der Audition-FFT (FFT-Größe 65535) extrahiert und nach Microsoft Excel geladen, um die Amplitudenverläufe der Teiltöne grafisch darzustellen. Die Ergebnisse dieser ersten Vergleichsreihe sind in Abb. 5.1 (Variophon) und Abb. 5.2 (SynthEdit) zu sehen. Für die beiden oberen Dynamikstufen (15 und 19) zeigt sich in den drei ersten Formantbereichen eine annähernde Übereinstimmung. Die untere Stufe (07) zeigt mehr Unterschiede, vor allem eine Übereinstimmung in Bezug auf Formantgrenzen ist in dieser Stufe nicht festzustellen. Als weitere Referenz können die Messungen von Voigt (1975) an einem reellen Fagott herangezogen werden. Nach dessen Messwerten wurden die Amplitudenverläufe der Obertöne, die in Abb. 5.3 gezeigt werden, erstellt (ebenfalls für A2, 110 Hz). Die Formantgrenzen, welche die drei ersten Formanten trennen, liegen in etwa dort, wo sie auch beim analogen bzw. virtualisierten Variophon zu sehen sind.

5.2 Ausblick

Die hier gezeigten und kurz diskutierten Vergleichsergebnisse beziehen sich nur auf einen Ton des Fagotts im tiefen Register in drei Dynamikstufen. Das soll als Beispiel für umfassendere Überprüfungen im Lauf der weiteren Entwicklung dienen. Diese sollten den gesamten Ton- und Dynamikumfang umfassen.

Wie schon erwähnt, kann der gegenwärtige Entwicklungsstand der Emulation nur als Basisversion betrachtet werden, sie beinhaltet register- und dynamikabhängig errechnete Impulsbreiten sowie eine Grobfilterung, die vor allem den ersten Formanten korrigiert. Ein dynamisches Verschieben der Eckfrequenzen der Filter (abhängig von Tonhöhe und ev. auch Dynamikstufe) ist noch zu entwickeln. Das Klangfarbenvibrato, welches beim analogen Variophon abhängig von der Geschwindigkeit der Änderung und der Einstellung am Modulationsregler moduliert wird, fehlt noch zur Gänze. Während die dynamische Filterjustierung mit den gängigen SynthEdit-Bausteinen verwirklicht werden kann, ist das Klangfarbenvibrato nur mit zusätzlichem Programmieraufwand zu bewerkstelligen⁷⁴.

⁷⁴ SynthEdit erlaubt die Erstellung von selbstgeschriebenen Modulen (Programmiersprache C).

6 Literaturverzeichnis

- Becker, Matthias: Synthesizer von gestern. MM-Musik-Media-Verlag, Augsburg 1990.
- Becker, Matthias: Synthesizer von gestern Vol.2. MM-Musik-Media-Verlag, Augsburg 1995.
- Chowning, John: The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation, in: *Journal of the Audio Engineering Society*, 21(7), 526-534. 1973
- Chowning, John & Bristow, David: FM Theory and Applications. Yamaha Music Foundation, Tokyo 1986.
- Donhauser, Peter: Elektrische Klangmaschinen. Die Pionierzeit in Deutschland und Österreich. Böhlau Verlag, Wien 2007.
- Dräger, Hans Heinz: Prinzip einer Systematik der Musikinstrumente. Bärenreiter, Kassel 1948.
- Enders, Bernd: Die Klangwelt des Musiksynthesizers. Die Einführung in die Funktions- und Wirkungsweise eines Modulsynthesizers. Franzis, München 1985.
- Enders, Bernd: Lexikon Musikelektronik. Erweiterte, völlig überarbeitete Neuauflage. Schott, Mainz 1997.
- Fortune, H. G.; Schoffhauzer, Peter; Haupt, David: Visual VST/i-Programming. A Comprehensive Guide to Creating VST-FX and Instruments with SynthEdit. Wizoobooks 2007.
- Fransson, Frasse: The source spectrum of double-reed wood-wind instruments. I.: The Bassoon. STL-QPSR, 4, 35-37. 1966.
- Fransson, Frasse: The source spectrum of double-reed wood-wind instruments. II.: The Oboe and the Cor Anglais. STL-QPSR, 1, 25-27. 1967.
- Fricke, Jobst Peter: Formantbildende Impulsfolgen bei Blasinstrumenten, in: *Fortschritte der Akustik*, DAGA 1975, 407-411. Physik-Verlag, Weinheim, 1975.
- Fricke, Jobst Peter: Die Impulsformung: ein Erklärungsmodell für Klangentwicklung und Klangideal bei Holzblasinstrumenten. In G. Widholm & M. Nagy (Hrsg.), *Das Instrumentalspiel. Beiträge zur Akustik der Musikinstrumente, Medizinische und Psychologische Aspekte des Musizierens* (S. 109-118). Doblinger, Wien 1989.
- Huber, Miles David: *Modern Recording Techniques*. Focal Press, Oxford 2010.
- Huff, Howard R.: *Into the Nano Era. Moore's Law Beyond Planar Silicon CMOS*. Springer-Verlag, Berlin 2009.

- Jenkins, Mark: Analog Synthesizers. Understanding, performing, buying: from the legacy of Moog to software synthesis. Focal Press, Oxford 2007. ()
- Johne, Raik: Keine Angst vorm Synthesizer. Theoretische und praktische Erläuterungen aus der Welt der elektronischen Klangerzeugung. Books on demand, Norderstedt 2010.
- Mertens, Paul Heinrich: Die Schumannschen Klangfarbengesetze und ihre Bedeutung für die Übertragung von Sprache und Musik. Verlag Erwin Bochinsky, Frankfurt/M., 1975.
- Miranda, Eduardo Reck: Computer Sound Design. Synthesis Techniques and Programming. Focal Press, Oxford 2002.
- Moog, Robert: Voltage controlled electronic Music Modules, in: Journal of the Audio Engineering Society, 13(3), 200-206. 1965.
- Oehler, Michael: Die digitale Impulsformung als Werkzeug für die Analyse und Synthese von Blasinstrumentenklängen. Lang, Frankfurt/Main 2008.
- Oehler, Michael & Reuter, Christoph: Virtual wind instruments based on pulse forming synthesis, in: Journal of the Acoustical Society of America, 120 (5), 3333. 2006.
- Reuter, Christoph: Der Einschwingvorgang nichtperkussiver Musikinstrumente. Peter Lang, Frankfurt am Main 1995.
- Reuter, Christoph: Klangfarbe und Instrumentation. Geschichte – Ursachen - Wirkung. Peter Lang, Frankfurt am Main 2002.
- Ruschkowski, André: Elektronische Klänge und musikalische Entdeckungen. Reklam, Stuttgart 1998.
- Russ, Martin: Sound Synthesis and Sampling. Focal Press, Oxford 2009.
- Schumann, Erich: Physik der Klangfarben. Habilitationsschrift, Berlin 1929. Korrektorexemplar in Xerokopie, Leipzig.
- Vail, Mark: Vintage Synthesizers. Miller Freeman Books, San Francisco 2000.
- Voigt, Wolfgang: Untersuchungen zur Formantbildung in Fagotten und Dulzianen. Bosse, Regensburg 1975.
- Weinzierl, Stefan: Handbuch der Audiotechnik. Springer, Berlin 2008.

7 Anhang

7.1 Auszug aus der Instrumentensystematik

Eine aktuelle Version der Instrumentensystematik nach Hornbostel und Sachs⁷⁵ wird von MIMO (Musical Instruments Museums Online) betreut. MIMO ist ein von der Europäischen Union unterstütztes Projekt, das einen zentralen Zugang zu Online-Information über Instrumentensammlungen eines Konsortiums Europäischer Museen zur Verfügung stellt. Der in Folge gelistete Auszug der Elektrophone (Hauptgruppe 5) wurde der online verfügbaren Systematik⁷⁶ entnommen.

5 ELECTROPHONES

Instruments that use materials generating acoustic sounds, mechanically-driven signal sources, electronically stored data or electronic circuitry to produce electrical signals that are passed to a loudspeaker to deliver sound. (Unmodified acoustic instruments with attached microphones or pickups are classed within groups 1-4, according to the primary source of sound.)

51 Electro-acoustic instruments and devices Modules and configurations of acoustic, vibratory mechanisms (often resembling traditional acoustic instruments) and electronic circuitry such as transducers and amplifiers. The acoustic or mechanical vibration is transduced into an analogue fluctuation of an electric current. All instruments built or structurally modified to deliver a signal to an amplifier and loudspeaker are classed as electrophones, even if they have some capability of sounding acoustically

511 Electro-acoustic idiophones Fender-Rhodes, Wurlitzer electric piano, Hohner Electra Piano

512 Electro-acoustic membranophones

513 Electro-acoustic chordophones Electric guitar, Neo-Bechstein electric piano, Yamaha Electric Grand, electric violin

514 Electro-acoustic aerophones

515 Transducers Microphones, pick-ups, loudspeakers

52 Electromechanical instruments and devices Configurations of (electrically excited) silent, mechanical moving parts with encoded patterns, and electronic circuitry. The movement enables the encoded patterns to be transduced into an analogue fluctuation of an electric current

521 Tone wheel instruments Electromagnetic, electrostatic, photoelectric etc.) Hammond tone wheel organ

522 Photoelectric electromechanical instruments

523 Record/playback devices (Electromechanical, electromagnetic etc.), Tape recorder EMI BTR/2

524 Electromechanical samplers Mellotron, Chamberlin

525 Electromechanical sound processing devices Spring line reverberation unit, tape echo (Watkins/WEM CopiCat tape echo unit)

53 Analogue electronic instruments, modules and components. Continuously varying electrical signals are passed to a loudspeaker to produce sound. The electrical signals are generated using electronic circuitry. Modules and configurations containing analogue

⁷⁵ Erich M. von Hornbostel and Curt Sachs. 'Systematik der Musikinstrumente. Ein Versuch'. Zeitschrift für Ethnologie, xlvii 1914, 553-590.

⁷⁶ <http://www.music.ed.ac.uk/euchmi/cimcim/uyms03.pdf>, Zugriff am 19.11.2012, 16:00.

fully electronic devices used to produce, process and communicate electronic sound signals and/or sequences of signals

- 531 Analogue synthesizers and other electronic instruments with thermionic valve (vacuum-tube) or solid state circuitry (transistor and/or analogue integrated circuitry) generating and/or processing electric sound signals
 - 531.1 Analogue synthesizers and other electronic instruments with electronic valve/vacuum tube based devices generating and/or processing electric sound signals Trautonium, Theremin, ondes Martenot, Ondioline, Clavioline
 - 531.2 Analogue synthesizers and other electronic instruments with solid state circuitry (transistor and/or integrated circuitry) generating and processing electric sound signals
 - 531.21 Analogue synthesizers with solid state circuitry based devices generating and processing electric sound signals using additive synthesis
 - 531.22 Analogue synthesizers with solid state circuitry based devices generating and processing electric sound signals using subtractive synthesis
 - 531.221 Modular analogue synthesizers with solid state circuitry based devices generating and processing electric sound signals using subtractive synthesis
 - 531.222 Preset analogue synthesizers with solid state circuitry based devices generating and processing electric sound signals using subtractive synthesis
 - 531.222.1 Preset, monophonic analogue synthesizers with solid state circuitry based devices generating and processing electric sound signals using subtractive synthesis
 - 531.222.2 Preset, partially or fully polyphonic analogue synthesizers with solid state circuitry based devices generating and processing electric sound signals using subtractive synthesis
 - 531.23 Analogue synthesizers using hybrid subtractive and additive synthesis
 - 532 Voltage control sources
 - 532.1 Voltage control sources - control voltage sequence generators (Envelope generator, low frequency oscillator, sequencer, slew generator, peak amplitude follower/envelope follower, sample and hold) Analogue sequencer
 - 532.2 Voltage control sources - controllers and interfaces Human interface devices, keyboards, foot switches, sensors, wheels, touchpad
 - 533 Other analogue modules or configurations
 - 533.1 Analogue modules: audio signal generators; analogue signal combining, modifying, reproducing and processing devices
 - 533.11 Analogue modules: audio signal generators (oscillators producing sine, square and saw tooth waves, beat frequency oscillator and heterodyne systems); Ring modulator
 - 533.12 Analogue modules: signal modifiers or processors analogue signal combining, modifying, reproducing and processing devices (mixers, sum/difference/multiple output generator etc. timbre modifier, filter devices; amplitude modifier, amplifier device, reverb modifier)
 - 533.2 Analogue configurations: mixer consoles (also containing filters, ring modulators etc.), sequencer based configurations, experimental configurations, sound sculptures BBC Mark III Radio Mixing Desk, Funktionsgenerator
 - 533.3 Modules communicating between devices/signal convertors other than transducers

54 Digital instruments, modules and components. Electrical signals are generated in the form of quantized sequences of pulses. These are converted to continuous signals that activate a loudspeaker. Modules and configurations containing devices to digitally design and process electronic sound signals and/or sequences of signals

- 541 Digital synthesizers
 - 541.1 Digital synthesizers using frequency modulation synthesis
 - 541.11 Digital synthesizers using frequency modulation synthesis without fixed keyboard controllers
 - 541.12 Digital synthesizers using frequency modulation synthesis with fixed keyboard controllers Yamaha DX7
 - 541.2 Digital Synthesizers using additive synthesis
 - 541.21 Digital Synthesizers using additive synthesis without fixed keyboard controllers
 - 541.22 Digital Synthesizers using additive synthesis with fixed keyboard controllers Kawai K
 - 541.3 Digital synthesizers using phase distortion techniques

- 541.31 Digital synthesizers using phase distortion techniques without fixed keyboard controllers
 - 541.32 Digital synthesizers using phase distortion techniques with fixed keyboard controllers
Casio CZ series
 - 541.4 Digital synthesizers using physical modelling techniques
 - 541.41 Digital synthesizers using physical modelling techniques without fixed keyboard controllers
 - 541.42 Digital synthesizers using physical modelling techniques with fixed keyboard controllers
Yamaha VL70
 - 542 Digital control sources and interfaces Human interface devices, keyboards, joysticks/wheels, touchpad/touch screen, foot switches, sensors, detectors of environmental change. Digital sequencer, MIDI controller
 - 543 Digital signal mixing, modifying, reproducing and processing devices Timbre modifier, filter device, amplitude modifier, amplifier device, reverb modifier Mixer, PA, digital delay, Effects box
 - 544 Digital samplers and sampling synthesizers Korg DSS-1
 - 545 Digital record/playback devices
 - 546 Other digital modules, components or configurations
 - 547 Digital modules communicating between devices/signal convertors
- 55 Hybrid analogue/digital configurations Devices with analogue oscillators and digital filters etc.**
- 56 Software**

7.2 Synthesizer von 1964 bis 2002

Die folgende tabellarische Übersicht von Synthesizern zwischen 1964 und 2002 wurde nach Becker (1990; 1995) erstellt. Sie ist eine Zusammenfassung der jeweils in den einzelnen Gerätebeschreibungen gegebenen Informationen. Diese wurden zum Teil ergänzt durch Angaben von Vail (2000), Jenkins (2007) und Russ(2009).

Der Preis in DM bezieht sich jeweils auf Beckers Angaben für den Verkaufspreis, wobei nicht unterschieden wird, ob es sich um den Preis im Erscheinungsjahr des jeweiligen Gerätes oder um den für eine spätere Version handelt. Dennoch ist damit ein grundlegender Eindruck der jeweiligen Größenordnung bzw. Käuferschicht möglich. Ebenfalls werden die von Becker in einigen Fällen erwähnten Produktionsstückzahlen angeführt. MIDI wird nur bei Geräten angegeben, welche in ihrer Erstvariante MIDI-fähig sind⁷⁷. Die numerischen Angaben bei Sequenzern beziehen sich auf Kanäle (bzw. Tracks und Speicherschritte), z.B. 3x12 für 3 Kanäle zu 12 Schritten, bzw. 8/670 für 8 Kanäle zu insgesamt 670 Schritten. Ist nur eine Anzahl angegeben, so bezieht sich diese auf die Schrittzahl.

⁷⁷ In manchen Fällen wurde MIDI in späteren Modell-Varianten hinzugefügt, bzw. erschienen Interface-Module von Drittanbietern am Markt.

Synthesizer	Jahr	Preis in DM	Stückzahl	Stimmen	analog digital hybrid	Midi	Speicherplätze	Presets	programmierbar	Sequenzer	externe Datenspeicherung	Besonderheiten
Mellotron	1964	10.000			mechanisch							kein Synthesizer, Urmodell eines Samplers, arbeitete mit Tonband-Endlosschleifen
Moog Modularsystem 55	1965	80.000		1	analog							größtes serienmäßig gefertigtes Modulsystem von Moog
Buchla Box	1966	38.000		1	analog					analog		in kleinen Stückzahlen für Hochschulen und Elektronikstudios gefertigt
Ems VCS3 / Synthi A	1969		4.000	1	analog							Kreuzschienensteckfeld (Patchmatrix)
Minimoog	1970	4.000	13.000	1	analog							erster kommerziell erfolgreicher Kompaktsynthesizer
ARP 2500	1970	22.000		1	analog					3 x 10		Kreuzschienensteckfelder (Patchmatrix)
ARP 2600	1970	11.000		1	analog							interne Verkabelung, zusätzliche Verbindungsmöglichkeit über Patchkabel
EMS Synthi 100	1971	84.000	28	2 x 2	analog					digital, 256		größtes in Serie gebautes Modulsystem
ARP Odyssey	1972	4.000		2	analog							verkleinerte Weiterentwicklung des ARP 2600, direkte Konkurrenz zum Monimoog
Moog Sonic Six	1972	5.500		1	analog							Kleingerät im Koffer, geplant als Nachfolger des Minimoog (scheiterte)
E-mu Modularsystem	1972	35.000	100	2	analog		Memorymodul		ja	digital, 8		bis zu 40 Module möglich, digitale Komponenten wie Memory- und Logik-Module
ARP Pro Soloist	1974	2.000		1	analog			30				Reines Presetinstrument, 5 Sounkategorien auf Knopfdruck abrufbar
Oberheim Four Voice	1975			4	analog							erstes polyphones Gerät mit einem kompletten Synthesizer pro Stimme
RMI Keyboard Computer KC-II	1975	11.500			digital							Alle Klänge rein digital erzeugt, Additive Synthese, Lockkarten als Speichermedium
Roland System 100 M	1975			1/4	analog							erstes Modulsystem für kleine Budgets
Roland SH-3 (SH2000)	1976			1	analog			30				SH-2000 als Presetsynthesizer, SH-3 für experimentelle Einsätze
Roland SH-5	1976	3.100		1	analog							Japanische Alternative zu ARP Odyssey und Minimoog
Polymoog	1976			71	analog			8				Vollpolyphonie (71 Stimmen) realisiert durch Frequenzteiler-Schaltung

Synthesizer	Jahr	Preis in DM	Stückzahl	Stimmen	analog digital hybrid	Midi	Speicherplätze	Presets	programmierbar	Sequenzier	externe Datenspeicherung	Besonderheiten
PPG1003 Sonic Carrier	1976		10	2	digital		50		ja			lt. Prospekt erster speicherprogrammierbarer Synthesizer mit rein digitalen Bauelementen. Trotz geringer Stückzahl impulsgebend für weitere Entwicklungen.
Roland System 700	1976	40.000		1	analog					analog 3x12		Einzig ernstzunehmendes analoges Großmodulsystem aus Japan (46 Module)
Sequential Circuits Prophet5	1978	13.500			analog		40/120		ja		Kassetteninterface	zum Zeitpunkt d. Erscheinens das am übersichtlichsten programmierbare Gerät
Moog Multimoog	1978			1	analog							Weiterentwicklung des Minimoog (u.a. Sample&Hold, Pulsbreitenmodulation und Oszillator-Sync.)
Korg MS-Serie	1978	1.200		1	analog					(SQ-10) 3x12/1x24		Basissystem (intern verdrahtet) modular erweiterbar (via Patchkabel)
Korg PS-Serie	1978	12.000		poly			16		nur PS3200 limitiert			teilmodular, bereits vollpolyphon (Master-Osz. mit Frequenzteiler)
Yamaha CS-50, CS-60, CS-80	1978	6.500		4/8	analog		1					1 Pseudo-Memory (2. Satz an Reglern)
Roland Jupiter 4 und Promars	1978			4	analog		8		ja			einer der ersten polyphonen Synthesizer
Yamaha SY1	1978			1	analog			28	limitiert			Yamahs erster Synthesizer
Oberheim OB1	1978	3.300		1	analog		8		ja		Kassetteninterface	einer der ersten programmierbaren Synthesizer
Roland SH7	1978	3.200		1	analog							Versuch einer Annäherung an Minimoog oder ARP Odyssey
Steiner Electronic Valve Instrument	1978	1.050		1	analog							Analoger Blasinstrument, Emulation von Blasinstrumenten (subtraktive Synthese)
Yamaha CS30	1979			1	analog					analog 8		umständlich zu bedienen, aber große Klangvielfalt
Korg Sigma	1979	2.400		1	analog		8	11	ja			Presets können kombiniert werden
Arp Quadra	1979	7.500		4	analog		16		ja			VierSektionen mit jeweils eigener Klangart
Fairlight CMI	1979	#####		8	digital	ab 1983			ja			Urahn der digitalen Sampler, Computer-Workstation 1979 !
Yamaha CS-40M	1980	4.800		2	analog		20		ja			Yamahas erster wirklich programmierbarer Synthesizer

Synthesizer	Jahr	Preis in DM	Stückzahl	Stimmen	analog digital hybrid	Midi	Speicherplätze	Presets	programmierbar	Sequenzier	externe Datenspeicherung	Besonderheiten
Oberheim OB-Xa	1980	12.000		4/6/8	analog		32		ja			
Oberheim OB-SX	1980	8.000		4/5/6	analog			24 - 56				Preset-Version des OB-Xa
Roland SPV-355	1980			1	analog							Rolands 1. Racksynthesizer, Pitch-to-Voltage Converter, auch durch andere Instrumente steuerbar
Moog Prodigy	1980	900		1	analog							abgespeckter (daher günstiger) Minimoog
Korg Trident	1981	7.900		3 x 8	analog							Drei achtstimmige, separat registrierbare Klangerzeugungssektionen
Roland Jupiter 8	1981			8	analog		64		ja		Tape Dump	DCB (Roland MIDI Vorläufer)
Sequential Circuits Pro One	1981	2.200		1	analog							spätes analoges, monophones Gerät, dafür preisgünstig
E-mu Emulator 1	1981	30.000	300	2/4/8	digital							kein Synthesizer, aber erstes auf reines Sampling spezialisiertes Gerät
Korg Poly Six	1982	3.400	50.000	6			32		ja			Preis 3400,- DM !!! - spätes Konkurrenzprodukt zum Prophet 5
Korg Mono/Poly	1982	2.400		1 / 4								kleine, nicht programmierbare Variante des Poly Six, monophon, bei Bedarf 4-stimmig
Roland Juno 60	1982	3.200		6	analog		56		ja		Tape Dump	DCB
Rhodes Chroma	1982	12.000			A+D		50		ja			Analoge Komponenten, digitale Steuerung. Von CBS aus ARP-Konkursmasse übernommen
Memorymoog	1982	10.000		6	analog		100		ja			Als polyphoner Minimoog konzipiert
PPG Wave 2.2 und 2.3	1982 1985	14.200			digital	ja	20	174	ja	monophon 8		digital gespeicherte Wellenformen
Digital Keyboards Synergy	1982	13.500		+8	digital		4	48		polyphon 1860		ähnlich DX7 aber komplexere Möglichkeiten, umfangreiche Klangbibliotheken
Roland TB-303	1982	2.500		1	analog					monophon 7x65		Monophoner, analoger Bass-Synthesizer mit Sequenzer
SCI Prophet 600	1982	4.000		6	hybrid	ja	100			2-track		Erster Synthesizer mit serienmäßiger MIDI-Schnittstelle

Synthesizer	Jahr	Preis in DM	Stückzahl	Stimmen	analog digital hybrid	Midi	Speicherplätze	Presets	programmierbar	Sequenzier	externe Datenspeicherung	Besonderheiten
Roland JX-3P	1983			6	analog	ja	32	32	ja	polyphon 128		Einer der ersten mit serienmäßiger MIDI-Schnittstelle
Roland Jupiter 6	1983	6.400		6	analog	ja	48	32	ja			Einer der ersten mit serienmäßiger MIDI-Schnittstelle
Korg Poly-61	1983	3.200			digital	ja	64		ja		Kassetten-interface	2 DCO's pro Stimme
Yamaha DX7	1983	4.700	200.000	16	digital	ja	32	128	ja			einer der erfolgreichsten Synthesizer, v.a. wegen FM-Synthese
Prophet T8	1983	13.000		8	analog	ja	128			polyphon 8/670		Weiterentwicklung des Prophet 5
Böhm Soundlab	1983	1.500		2	analog							Modulares System u. Mitarbeit von Bernd Enders (Uni Osnabrück) entwickelt, DSM (Dig.Sound Memory für Sample and Hold)
Elka Synthex	1984	7.900		8	analog	ja	40	40	ja	4/128		später analoger Synthesizer
Korg Poly 800	1984	1.600		8	analog	ja	64		ja	256		Konkurrenzprodukt zum Roland Juno 106 (kostete nur halb soviel)
Oberheim Xpander	1984	10.000		6	hybrid	ja	200		ja		Kassetten-interface	ohne Keyboard, FM (nur 2 Op / Stimme), Multimode-Filter
Roland D-50	1987			16	hybrid	ja	64		ja			8 Bit PCM ("LAS") Sampling, Konkurrenz zu DX7
Korg M1	1988			16	digital	ja	4MB		ja	digital 8/7700		Erste kommerziell erfolgreiche Workstation die S&S einsetzt
Korg Wavestation	1990			32	digital	ja	xMB	2MB	ja			Einsatz von wave-sequencing, Speichern von wave, patch, performance
Roland JD-800	1991			24	digital	ja	64	6	ja			LAS (=S&S) Synthese, anwenderfreundlich zu programmieren
Alesis Andromeda A6	2000	6.300		6	analog	ja	128	256	ja	monophon 16		Analoges Retrogerät mit digitalen Elementen (hybrid).
Minimoog Voyager	2002	6.500		1		ja	128		ja			programmierbarer Retro-Minimoog mit MIDI

7.3 Abstract

In den 1970-er Jahren wurde in Deutschland für kurze Zeit ein elektronisches Instrument gebaut, das in seiner Art einzigartig ist: das Variophon, ein, analoger Blassynthesizer, der in der Lage war, etliche unterschiedliche Blasinstrumente nachzustellen. Die überzeugende Nähe zum Originalklang der emulierten Instrumente erreichte das Variophon u.a. durch die Umsetzung der Impulsformung. Obwohl diese Synthesemethode als ein exaktes Modell der Klanggenerierung von Blasinstrumenten angesehen werden kann, wurde sie sonst in keinem anderen elektronischen Klangerzeuger eingesetzt. Diese Arbeit befasst sich mit dem Variophon und seinen digitalen Emulationen. Eine erste virtuelle Version existiert seit 2007, sie wurde von Michael Oehler im Rahmen einer Analyseplattform zur digitalen Impulsformung entwickelt. Eine weitere Virtualisierung, die mit Hilfe von frei zugänglicher Software entwickelt wird, liegt in einer ersten Version vor. Diese enthält auch eine komplette optische Umsetzung des Originalgerätes, im akustischen Bereich orientiert sie sich an den Erkenntnissen von Oehler. Zwischen dem analogen Gerät und den digitalen Versionen liegen vier Jahrzehnte des Fortschrittes in elektronischer Klangerzeugung und Audibearbeitung. Dazu zählen die konstante Verbesserung der Synthesizer, die Ablösung analoger Verfahren durch digitale und die breite Verfügbarkeit von Softwarelösungen, die mit der rasanten Entwicklung des Personal Computers auch im privaten Bereich genutzt werden können. Gemeinsam mit den elektrischen bzw. elektronischen Klangerzeugern der Vor-Synthesizer-Zeit und den Synthesizern selbst zählt der erwähnte Fortschritt zum Vorfeld, auf dem die Entwicklung der digitalen Versionen basiert. Diesem Vorfeld ist auch ein Teil dieser Arbeit gewidmet. Die historische Entwicklung der elektronischen Klangerzeuger, im speziellen der Synthesizer wird zusammengefasst. Die Funktionsweise einzelner Synthesizer-Bausteine und deren Zusammenspiel werden beschrieben. Die Impulsformung als theoretische Grundlage zur Erzeugung von Blasinstrumentenklingen wird ebenfalls erklärt. Neben dieser werden auch alle anderen gängigen Synthesemethoden erläutert. Dies alles soll den Zugang zum Kernthema dieser Arbeit erleichtern: der vom Verfasser erstellten Emulation des Variophons mit MIDI-Steuerung, die als VST verfügbar ist und derzeit Basisversionen von Fagott und Oboe enthält.

7.4 Lebenslauf

Name: Ludwig Gredler-Oxenbauer
Geburtsdatum: 11. Februar 1961
Familienstand: verheiratet,
3 Söhne: Paul (1986), Jakob(1987) und Stefan(1995).

wohnhaft in Wien

- 1967-1979 Besuch von Volksschule und Gymnasium in Wien.
- 1973-1979 Instrumentalunterricht (Violoncello), bis heute als Amateurmusiker in Laienorchestern und Kammerensembles aktiv.
- 1979 Ablegung der Reifeprüfung (Neusprachliches Gymnasium).
- 1979-1980 Ableistung des Präsenzdienstes in Wien.
- 1982 Angestellter in einem Bankinstitut, Ausbildung zum Programmierer.
- 1985 Wechsel zu einem Marktforschungsinstitut, bis heute dort als Entwickler von Software, Analytiker und Datenbankdesigner tätig, seit 2005 auch Betreuer dieser Bereiche in der Schweizer Niederlassung des Unternehmens.
- 1988-2000 Projektleitung der Jahr-Zweitausend-Umstellung im Unternehmen.
- 2000-2003 Mitarbeit an einem internationalen Großprojekt des Unternehmens in Paris und Cergy (Frankreich).
- 2006 Beginn des Studiums der Musikwissenschaften an der Universität Wien.
- 2011 Beginn der Erstellung des virtualisierten Variophons im Rahmen des Studiums.
- 2012 Eine Basisversion des virtualisierten Variophons liegt vor und wird als Diplomarbeitsthema akzeptiert.