

Bachelorarbeit im Studiengang Audiovisuelle Medien

Die Entwicklung der Klangsintese im historischen Vergleich bis heute

Vorgelegt von: Lena Meinhardt (39146)

an der Hochschule der Medien

am 15.07.2024

zur Erhaltung des akademischen Grades eines

Bachelor of Engineering

Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt

Zweitprüfer: Phillipp Reineboth

„Hiermit versichere ich, Lena Meinhardt, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: „Die Entwicklung der Klangsynthese im historischen Vergleich bis heute“ selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der ehrenwörtlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), § 24 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester), §

23 Abs. 2 Master-SPO (3 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO (4 Semester und berufsbegleitend) der HdM) einer unrichtigen oder unvollständigen ehrenwörtlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.“

Kurzfassung

In der folgenden Arbeit wird die Entwicklung der Klangsintese untersucht. Zunächst werden analoge Instrumentenapparate, welche schon Klangsinteseprinzipien enthalten, aufgezählt und ihre Funktionsweisen erläutert. Im Weiteren wird auf die drei prägnantesten musikalischen Strömungen Mitte des 20. Jahrhunderts eingegangen, die sich der neuen Techniken bedienen: Musique concrète in Frankreich, Tape Music in den USA und Elektronische Musik in Deutschland. Alle drei haben sich aus den Neuerungen der technischen Möglichkeiten zu komponieren entwickelt. Immer wieder werden Beispiele von Pioniersstücken eingestreut.

Anschließend wird der Übergang zur digitalen Klangsintese und die Anfänge mit der Computermusik und den dafür benötigten Programmiersprachen aufgezeigt.

Wie sich diese bis heute verändert haben, wird grob skizziert.

Im letzten Kapitel werden die etabliertesten Klangsinteseverfahren ausführlich technisch beschrieben.

Abstract

The following work examines the historical development of sound synthesis. The first part lists analog instruments that already contain sound synthesis principles and explains their modes of operation. In a second part the three most influential musical movements of the mid-20th century are discussed: Musique concrète in France, tape music in the USA, and electronic music in Germany - all three developed from innovations in the technical possibilities of composing. Examples of pioneering pieces are interspersed throughout the work.

The transition to digital sound synthesis and the beginnings of computer music, as well as the programming languages required for it are then exemplified. The work then outlines how these languages have changed up to the present day.

Finally, the most established sound synthesis methods are described in detail from a technical perspective.

Die Entwicklung der Klangsynthese im historischen Vergleich bis heute

1 Einleitung

2 Entwicklung Elektronischer Musik/ analoge Instrumentenapparate als Vorreiter der digitalen Klangerzeugung

2.1. Denis d'or	2
2.2 Elektrisches Cembalo und elektromechanisches Klavier	2
2.3 Choralcello	3
2.4 Telharmonium	3
2.5 Theremin	4
2.6 Ondes Musicales	4
2.7 Trautonium	5
2.8 Hammond Orgel	7
2.9 Sackbut von Hugh Le Caine	8
2.10 Moog Synthesizer	9

3 Musikalische Strömungen

3.1 Musique concrète	12
3.2 Tape Music	18
3.3 Elektronische Musik	19

4 Klangsynthese mit dem Computer

4.1 Programmiersprachen	27
4.2 Herausforderungen und Nachteile der Komposition mit dem Computer	30
4.3 Klangsynthese heute	30

5 Klangsynthesen

5.1 Additive Klangsynthese	32
5.1.1 Fouriertransformation	33
5.2 Subtraktive Klangsynthese	35
5.2.2 Filtertypen	37

5.3 Amplitudenmodulation und Ringmodulation	38
5.4 Frequenzmodulation	40
5.5 Granularsynthese	43
6 Schluss	
7 Quellen	
8 Abbildungsverzeichnis	
9 Abkürzungsverzeichnis	

1 Einleitung

Klangsynthese ist in der heutigen Komposition und Musikproduktion nicht mehr wegzudenken. Der Frage, wie diese Synthesen funktionieren und wie ihre Anfänge aussahen, soll in der vorliegenden Arbeit nachgegangen werden. Um dies nachzuvollziehen, beginnt der Hauptteil mit den bekanntesten analogen, elektrischen Klangapparaten, die teilweise parallel und an unterschiedlichen Orten produziert wurden. Aus ihrer Bau- und Funktionsweise heraus könnte abgelesen werden, welche Grundprinzipien bei der synthetischen Herstellung von Klängen entwickelt wurden und welche sich in den darauffolgenden Geräten und später teilweise in Form von Programmierungen wiederfinden lassen. Die Prototypen und Pioniere werden so gut es geht chronologisch aufgeführt und münden in den ersten Versuchen, Klänge mit dem Computer zu generieren.

Um herauszufinden, ob diese neuen Möglichkeiten auch Einfluss auf die Musikästhetik hatten, befasst sich das zweite Kapitel mit neuen kompositorischen Strömungen dieser Zeit. Genannt werden *Musique concrète*, *Tape Music* und *Elektronische Musik*. Es werden zudem Pioniers-Stücke erwähnt, die das Zusammenspiel zwischen technischen Entwicklungen und kompositorischer Idee greifbar machen.

Die vorliegende Arbeit geht anschließend weniger auf die Entwicklung der analogen Synthesizer ein, sondern fokussiert sich auf die ersten Programmiersprachen und digitalen Klangsyntheseverfahren. Finden sich hier Prinzipien, die sich auf die analogen Vorgänger zurückführen lassen? Oder sind es ganz neue und unabhängige Möglichkeiten, die die digitale Klangerzeugung mit sich bringt?

Wie genau die Klangsynthese heute in der Musikproduktion und Komposition einfließt, wird nur grob umrissen. Stattdessen wird eine Auswahl der grundlegendsten Syntheseverfahren im letzten Kapitel ausführlich technisch beschrieben.

2 Entwicklung Elektronischer Musik/ analoge Instrumentenapparate als Vorreiter der digitalen Klangerzeugung

Bevor in der vorliegenden Arbeit über elektronische Klangerzeugung mit Hilfe von Computern gesprochen wird, sollte man zunächst auf die Anfänge elektronischer Klangerzeugung überhaupt schauen. Die Geschichte der elektronischen Klangerzeugung ist eng mit der Entwicklung elektromechanischer und elektronischer Musikinstrumente verknüpft. Neben dem technischen Aufbau der im Folgenden benannten Geräte finden wir vor allem in ihrer Funktionsweise und Struktur die Prinzipien der heute bekannten Klangsynthesen wie unter anderem der additiven Synthese, der subtraktiven Synthese und Frequenzmodulation.

2.1. Denis d'or

Die Anfänge sind nicht einmal 300 Jahre alt. Laut Ruschkowski stammen die ersten Überlieferungen aus dem Jahr 1730.¹ Sie gehen auf den tschechischen Erfinder Pater Prokopius Divis zurück, welcher ein sogenanntes Mutationsorchestron mit dem Namen „Denis d'or“ konstruierte. Es ist ein Tasteninstrument, auf welchem ziemlich alle Blas- und Saiteninstrumente nachgeahmt werden können.

„Auch war ein unzeitiger und ortswidriger Scherz dabei angebracht, indem der Spieler des Instruments so oft einen elektrischen Schlag erhielt, als der Erfinder es wollte. Das einzige Exemplar, welches Divis verfertigte, kaufte der Prälat vom Druck, Georg Lambeck, der dann, solange er lebte, zu dessen Spiele einen besonderen Tonkünstler unterhielt.“²

2.2 Elektrisches Cembalo und elektromechanisches Klavier

30 Jahre nach der Erfindung des Denis d'or beschreibt Jean-Baptiste Laborde ein „elektrisches Cembalo“, welches von ihm erfunden wurde. Es handelt sich um ein präpariertes Glockenspiel, das mithilfe elektrischer Kraftwirkungen gesteuert wird, indem die Anziehungs- und Abstoßungskraft elektrisch aufgeladener Pendel zum Anschlagen der Glocken benutzt wird. Es hat eine Tastatur und jede Glocke hat eine

¹ Vgl. Ruschkowski, A.: Elektronische Klänge und musikalische Entdeckungen. Reclam, Ditzingen, 2019, S. 16-17

² Vgl. Sachs, C.: Real-Lexikon der Musikinstrumente: zugleich ein Polyglossar für das gesamte Instrumentengebiet. Olms, Hildesheim, 1979, S. 108

eigene Taste. Das elektrische Cembalo ist der Vorreiter des 1876 in Chicago Elisha Gray entwickelten elektromechanischen Klaviers von Matthäus Hipp.

Anlässlich der Einhunderjahrfeier der Stadt Philadelphia übertrug er Schwingungen von chromatisch gestimmten Stahlzungen, welche auf elektromagnetischem Weg abgenommen wurden, mittels Telefonleitungen.

2.3 Choralcello

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts erfanden Melvin L. Severy und George B. Sinclair ein zweimanualiges Klavierinstrument namens „Choralcello“. Die Metallsaiten werden nicht durch Hammermechanik angeschlagen, sondern durch Elektromagnete in Schwingung versetzt. Klangfarbenänderungen der schwingenden Saiten sind mit Hilfe von Wechselströmen möglich, die Frequenzen liegen unter den Schwingungsfrequenzen der jeweiligen Saite.³

2.4 Telharmonium

Um 1900 stellte Thaddeus Cahill in Washington einen Prototypen einer 200 Tonnen schweren Orgelmaschine vor, die er „Dynamophone“ nannte, welches auch unter dem Namen „Telharmonium“ bekannt wurde.

Cahill kreierte seine Maschine noch bevor es elektronische Verstärker gab. Er musste für jeden Ton einen riesigen dampfgetriebenen Wechselstromerzeuger bauen, welcher ihm die sinusförmigen Ausgangsspannungen lieferte. Die Klangformung auf dem Dynamophone beruht auf dem Prinzip der additiven Synthese.⁴

Wie bei einer traditionellen Orgel können durch Schalter verschiedene Klangfarben kombiniert werden. Das Instrument produziert Klänge mit veränderbarem Obertongehalt im Bereich von fünf Oktaven.

Zur Steuerung der Parameter Tonhöhe, Klangfarbe, Lautstärke und Artikulation kann der Spielende zwei abschlagsdynamische Tasten und eine Pedaltastatur bedienen. Konzerte mit dem Prototypen in Washington wurden über das Telefon übertragen. Die ersten Konzerte zielten darauf ab Investoren anzulocken, um die Maschine weiterentwickeln zu können. Es gab zahlreiche positive Reaktionen und so wurde es möglich, ein weiterentwickeltes Dynamophone zu kreieren, welches 1906 fertiggestellt wurde. Mithilfe von mehr als 30 Eisenbahnwägen wurde es nach New York

³ Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 17 - 18

⁴ Vgl. Kapitel 5.1, Additive Klangsynthese

transportiert und in einem Saal, der „Telharmonium Hall“, aufgestellt. Von dort wurden auch Konzerte über das Telefon gespielt.

Diese kamen zu einem Ende, nachdem regelmäßig Beschwerden über Störungen und Überlastungen des Telefonnetzes kamen. ⁵

2.5 Theremin

1912 wurde von Lev Sergejewitsch Termen, einem russischen Ingenieur, das Ätherophon vorgestellt, das später als Theremin bekannt wurde. Dieses erlaubte mikrotonales Spiel. Revolutionär war damals, dass es nicht so wie sein Vorgänger, dem Tellharmonium, über eine Tastatur gesteuert wurde, sondern mit der Hand an einer vertikal angebrachten Antenne. Die Tonhöhe verändert sich stufenlos, abhängig vom Abstand zwischen Hand und Antenne. Die Spielantenne und die Hand bildeten zusammen einen Kondensator, dessen Kapazität bei geringer werdendem Abstand zunimmt.⁶

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt auch das 1930 gebaute Trautonium.⁷

Beide Maschinen verwenden einen „Schwebungssummer“ als Klangerzeuger: zwei hochfrequente, nicht hörbare Sinusschwingungen - eine fixe und eine variable - werden überlagert. Durch Schwebung entsteht schließlich ein hörbarer Ton, der Differenzton.

Trotz der Neuerungen sind die Klangfarben dieser frühen elektrischen Instrumente mit ihren harmonischen Obertonspektren noch sehr am Instrumentalklang orientiert.⁸

2.6 Ondes Musicales

Im Zeitraum der Vor-Synthesizer-Ära ist unter anderem das von Maurice Martenot am 20. April 1928 erfundene Instrument „Ondes Musicales“ zu erwähnen.

Genauso wie das Theremin und das Trautonium, funktioniert es mit einem Schwebungssummer.

Martenot entschied sich, die Steuerung über eine Seilzugkonstruktion zu realisieren, welche aus einer Metallschiene sowie einem davor angeordneten beweglichen

⁵ Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 18-22

⁶ Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 27

⁷ Vgl. Kapitel 2.7 Trautonium

⁸ Vgl. Dézsy, T. et al. eds: ANKLAENGE 2007: Zwischen Experiment und Kommerz. Zur Ästhetik elektronischer Musik. Mille Tre, 2008, S. 2

Metallband besteht. Je mehr Teile des Metallbands mit der Metallschiene zur Deckung kommen, desto größer ist die Kapazität des so entstehenden Kondensators und desto höher der erzeugte Ton.⁹

Einsätze des Instruments finden sich unter anderem bei Oliver Messiaen in der bekannten Oper Saint Francois d'Assise.¹⁰

2.7 Trautonium

Ein weiterer Meilenstein unter den Vorreitern der elektronischen Klangerzeuger ist das Trautonium. Friedrich Trautwein begann bereits 1923 mit der Konstruktion. Am 20. Juni 1930, im Rahmen eines Konzerts auf der Funkausstellung in Berlin, konnte das Instrument vorgestellt werden.

Paul Hindemith ist der erste Komponist, der Kompositionen für dieses Instrument schuf.¹¹ Das Publikum im Konzertsaal der Berliner Hochschule für Musik zeigte sich vor allem von den Klangmöglichkeiten des Trautoniums begeistert.¹²

Friedrich Trautwein beachtete bei seinen Konstruktionsüberlegungen von Anfang an die Forderung nach höchster Wirtschaftlichkeit und Zweckmäßigkeit, da er der Meinung war, diese würden über das Schicksal eines Instrumentes entscheiden.

Zur Klangerzeugung verwendete Friedrich Trautwein tonfrequente Kippschwingungen von Glühlampen. Die Kippschwingungen liefern aufgrund ihrer Sägezahnschwingung einen obertonreichen Klang und können mit Hilfe von abstimmbaren Filtern, mit sogenannten Formanten, angereichert werden. Diese werden durch zwei Schwingkreise erzeugt, mit Hilfe von zwei einstellbaren Drehkondensatoren. Die Auswahl der Formanten kann während des Spielens mit Hilfe von zwei Fußpedalen ausgeführt werden.¹³ Dieses Prinzip ist das der subtraktiven Synthese, mehr dazu weiter unten.¹⁴ Das Trautonium hat keine Tastatur, sondern ist stattdessen mit einem Bandmanual zur Tonsteuerung ausgestattet. Diese Entscheidung wurde daher getroffen, dass das Spiel praktikabel sein sollte, jedoch die physikalischen Möglichkeiten des Instruments voll

⁹ Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 48

¹⁰ Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 53

¹¹ Vgl. Stange-Elbe, J.: Computer und Musik: Grundlagen, Technologien und Produktionsumgebungen der digitalen Musik. De Gruyter Oldenbourg, Berlin Boston, 2015, S.170

¹² Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 64

¹³ Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 61

¹⁴ Vgl. Kapitel 5.2 Subtraktive Klangsynthese

ausgeschöpft werden sollten. Es soll der kontinuierliche Frequenzbereich mit der gesamten Mikrotonstruktur zur Verfügung stehen. Friedrich Trautwein kombiniert dazu die Vorteile der Interfacetechnologie eines Saiteninstrumentes und Tasteninstrumentes. Eine horizontal gespannte Saite, welche die gleichmäßigen Tonabstände der Tastatur mit der stufenlosen Griffmöglichkeit einer Saite vereint.¹⁵

Die Lautstärke des Tons wird über den Fingerdruck geregelt. Für gröbere Veränderungen der Gesamtlautstärke gibt es ein Fußpedal. Außerdem kann über einen Drehknopf die Mensurweite des Manuals eingestellt werden. Damit wird die Anzahl der Oktaven bestimmt, welche auf dem Bandmanual spielbar sind.¹⁶

Trautwein schreibt über das Trautonium:

„Mehr als drei Oktaven wird man meist auf dem Manual nicht unterbringen, weil die einzelnen Töne sonst zu eng zusammenliegen, um von der Hand noch rein abgegriffen werden zu können. Man kann aber mit Hilfe dieses Drehknopfs am Apparat die Töne auf dem Manual so weit auseinander ziehen, dass man Vierteltöne oder noch viel kleinere Intervalle mühelos abgreifen und spielen und auf diese Weise neue musikalische Möglichkeiten schaffen kann“¹⁷

Ein Grund warum das Trautonium bis heute bekannt ist, ist das große Interesse von Oscar Sala. Oscar Sala wollte eigentlich Pianist werden, macht sich aber als virtuoser Trautonium Spieler einen Namen und wird zum Protagonisten der weiteren Entwicklung des Trautoniums.¹⁸

Zwischen 1948 und 1952 konstruiert er das Mixtur Trautonium. Das Mixtur Trautonium kann eine kontinuierliche Untertonreihe erzeugen. Oscar Sala verwendet dazu vier Nebengeneratoren pro Stimme. Die Klangfarben, die wie beim Urmodell des Trautoniums mit abstimmbaren Formant Schwingkreisen geformt werden, können nun auch für alle Töne der Untertonreihe separat gesteuert werden. Das macht das Instrument zu dieser Zeit zu dem einzigen elektrischen Musikinstrument mit

¹⁵ Vgl. Stange-Elbe, 2015, S.170

¹⁶ Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 63

¹⁷ Vgl. Lion, A.: Das Trautonium. In: Die Musik. XXIV, Zweite Halbjahresausgabe. Berlin, Leipzig, 1932, S.835

¹⁸ vgl. Ruschowksi S 67

nichttemperierter gleitender Tonskala, das virtuos spielbar und zugleich mehrstimmig ist!¹⁹

Klänge des Trautoniums sind unter anderem in der Oper „Das Verhör des Lukullus“ von Harald Grenzmeier und Richard Strauss’ „Japanischer Festmusik“ zu hören.

Außerdem hat es die Klangcharakteristik bis in die Filmmusik geschafft.²⁰ Einer der bekanntesten Filme, in denen das Mixtur Trautonium zu hören ist, ist der Alfred Hitchcock Thriller „Die Vögel“ aus dem Jahre 1962.²¹

2.8 Hammond Orgel

Dadurch, dass sich das Klima für künstlerische Innovationen in Deutschland aufgrund der Nationalsozialisten und der Einführung der Reichsmusikkammer rapide verschlechterte, emigrierten viele Künstler*innen aus Deutschland in die USA. Dort waren die Verhältnisse für Komponisten*innen und Musikingenieur*innen günstiger.²² Zur gleichen Zeit wie die Vorstellung des Trautoniums in Deutschland konstruiert der Maschinenbauer und vielseitige Erfinder Charles Laurens Hammond seine berühmte „Hammond Orgel“, welche auf elektromagnetischer Basis arbeitet. Hammond hatte die Idee den damals hohen konstruktiven Aufwand für die rein elektronische Klangerzeugung mit Hilfe einer geschickten Kombination von elektrischen und mechanischen Elementen zu umgehen. Als Ergebnis seiner Überlegungen stellt er 1934 eine Orgel vor, die pro Ton eine rotierende stählerne Zahnscheibe besitzt, der in geeignetem Abstand ein elektromagnetischer Tonabnehmer zugeordnet ist. Durch Drehung der Scheibe erfolgt die Induktion einer sinusähnlichen Wechselspannung im Tonabnehmer. Die Frequenz ist dabei das Produkt aus der Anzahl der Umdrehungen pro Sekunde und der Anzahl der Zähne. Die Form der Zähne bestimmt den Obertongehalt der Wechselspannung.

Da die Anzahl der Zähne auf der Zahnscheibe nicht unendlich gesteigert werden kann, wird die temperierte Stimmung durch die entsprechenden Zähneverhältnisse nicht genau eingehalten. Die Orgel hat also den Nachteil unvermeidlicher Stimmungungenauigkeit, gleichzeitig aber auch Konstanz der einmal gegebenen Stimmung innerhalb der Orgel, da die Gesamtstimmung nur durch die Drehzahl des

¹⁹ Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 70

²⁰ Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 77

²¹ Vgl. Stange-Elbe, 2015 S.171

²² Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 84 ff

verwendeten Synchronmotors steuerbar ist. Mit einem Satz von 91 Zahnscheiben kann die Orgel Klänge über siebeneinhalb Oktaven erzeugen, welche jeweils aus maximal sieben Teiltönen bestehen.

Eine Besonderheit der Orgel ist die Möglichkeit, jeden Teilton durch stufenlosen Widerstand, die sogenannten „Zugriegel“, in seiner Stärke steuern zu können. Das Ergebnis ist die Generierung von kontinuierlich veränderbaren Klangfarben durch Regelung einzelner Obertonanteile, nach dem Prinzip der additiven Klangsynthese.²³

Klangfarben können auch voreingestellt werden und durch einen Tastendruck umgestellt werden. Im ersten Modell finden sich auch schon einige Effekte wie Tremolo und Vibrato.²⁴ Hammond begann öffentliche Präsentationen durchzuführen und bekam unter anderem von George Gershwin und dem Organisten der New Yorker St. Patricks Cathedral, Pietro a Yon, positive Meinungsäußerungen. Dies und die einfache Bedienbarkeit trugen sicherlich dazu bei, dass die Hammond-Orgel großen kommerziellen Erfolg hatte und auch Einzug in den Jazz nahm.²⁵

2.9 Sackbut von Hugh Le Caine

1945 bis 1948 entwickelte Hugh Le Caine in Kanada ein monophones, anschlagsdynamisches Keyboard-Instrument mit dem Namen „Sackbut“. Le Caine war der Meinung, dass das Ziel eines Instrumentenbauers die maximale Kontrolle der wichtigsten Parameter durch den Spielenden sein sollte, ohne dadurch das Erleben des Instruments zu verkomplizieren.

Er studierte traditionelle Orchesterinstrumente, sowie damals bekannte elektronische Instrumente wie das oben erwähnte Ondes Martenot oder das Ätherophon (Theremin). Sein Studium verhalf ihm zu der Erkenntnis, dass die subtile Kontrolle der Anschlagsdynamik über den gesamten Lautstärkebereich eines Tones, seiner Ein- und Ausschwingzeit sowie die Klangfarbe für die Expressivität eines Instruments verantwortlich sind. Durch viel Sorgfalt bei der Konstruktion des Sackbuts ermöglicht er es dem Spielenden Tonhöhen-, Lautstärke- und Klangfarbenveränderungen auch durch wechselnden seitlichen Druck der Taste während des Spiels zu verändern. Dabei kann die Kontrolle über Merkmale wie Vibrato, Intensität und Einschwingvorgänge

²³ Vgl. Kapitel 5.1 Additive Klangsynthese

²⁴ Vgl. Kapitel 5.3 Amplitudenmodulation und Ringmodulation, Kapitel 5.4 Frequenzmodulation

²⁵ Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 85 -87

ermöglicht werden, wie man sie sonst normalerweise nur mit Streich- und Blasinstrumenten oder der menschlichen Stimme erreicht. Ein Merkmal, welches das Sackbut besonders hervorhebt, ist die Verfügbarkeit eines sehr großen Bereichs musikalisch verwendbarer Klangfarben, die es dem Spielenden erlauben auch traditionelle Instrumente zu imitieren. Gerade diese Eigenschaft stößt beim Publikum auf besonderes Interesse.

Le Caine verwendet für die Konstruktion spannungsgesteuerte Oszillatoren und Verstärker sowie verschiedene Wellenformen. Auch hier wieder das Prinzip der additiven Klangsynthese.²⁶ Dadurch ist es möglich unterschiedliche Klangcharaktere zu erzeugen. Beides Techniken, welche auch bei den 20 Jahre später entwickelten Synthesizern von Robert Moog und Donald Buchala benutzt werden.²⁷

Schaut man sich das weitere Schaffen von Hugh Le Caine an, zeigen sich Parallelen zur sich gleichzeitig entwickelnden digitalen Klangsynthese. Inspiriert durch Karlheinz Stockhausens auf Sinustönen aufbauende „Studie II“ entwarf und baute Le Caine 1958 eine Oszillatorbank, welche aus zwölf Reihen zu je neun Sinuston-Oszillatoren, also insgesamt 108 Klangerzeugern besteht. Diese funktioniert auch nach dem Prinzip der additiven Klangsynthese.²⁸ Der Frequenzbereich entspricht dem menschlichen Gehör und hat eine Bandbreite von 20 - 20 000 Hz.²⁹

2.10 Moog Synthesizer

Robert Moog setzt mit seinem Instrument den Baustein für eine Ära von Synthesizern wie wir sie heute kennen. Er baute den „Moog“- Synthesizer nach dem Modularsystem, wobei für jeden Parameter eine getrennte elektrische Schaltung vorhanden ist. Tonhöhe, Klangfarbe und Lautstärke können somit getrennt geregelt werden.³⁰

Robert Moog war schon in der Schulzeit von musikalischer Technik fasziniert und nahm mit 14 Jahren Unterricht in Gehörbildung, Gesang und Musiktheorie. Zu dieser Zeit fing

²⁶ Vgl. Kapitel 5.1 Additive Klangsynthese

²⁷ Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 87 -91

²⁸ Vgl. Kapitel 5.1 Additive Klangsynthese

²⁹ Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 102

³⁰ Vgl. Anwander, F.: Synthesizer: so funktioniert elektronische Klangerzeugung. PPVMedien, Bergkirchen, 2017, S. 21

er auch an sich mit dem Bau von Radios und elektrischen Orgeln zu beschäftigen. Mit 15 Jahren baute er ein Ätherophon nach dem Prinzip von Lev Sergejewitsch Termen. Um sich fünf Jahre später sein Studium an der Cornell University zu finanzieren, bot er Ätherophon Bausätze für 50 Dollar an.

Die ersten Geräte waren noch mit Röhren bestückt. 1963 entwickelte er das Ätherophon weiter, er konstruierte transistorisierte Ätherophone und produzierte sie. Über die Verkäufe lernte Robert Moog den Komponisten Herbert Deutsch kennen. Herbert Deutsch bat Moog um die Konstruktion eines einfachen, spannungsgesteuerten Oszillators für die Erzeugung gleitender Tonhöhen. Darauf folgend wollte Herbert Deutsch die gleitenden Tonhöhen auch in der Zeit formen und Moog baute einen einfachen, spannungsgesteuerten Verstärker.

Robert Moog betrachtete dies als Gefälligkeiten für einen Freund. Die Faszination jedoch, welche seine einfachen Konstruktionen bei Musikern auslösten, brachte ihn dazu weitere Elemente zur Klangsteuerung hinzuzufügen und so folgte ein Keyboard das Steuerspannungen erzeugen kann. Dies ist der Prototyp eines modular aufgebauten elektronischen Synthesizers. Die erste Präsentation des Geräts findet im Herbst 1964 auf der Audio Engineering Society statt und Moog nennt seine Entwicklung „Voltage Controller Electronic Modules“, Modul zur Erzeugung elektronischer Musik, die durch eine von außen zugeführte Spannung in ihrer Funktion gesteuert werden kann. Damit war ein Prinzip zur Erzeugung analoger, elektronischer Klänge geschaffen, welches bis heute die technische Grundlage einer ganzen Generation von Synthesizern geblieben ist.³¹

Im Laufe der Jahre wurde das Gerät mithilfe des Feedbacks der Nutzer immer weiter verbessert. Vladimir Ussachevsky, welcher an der New Yorker Columbia Universität lehrte, wünschte sich eine Reihe von Möglichkeiten zur Kontrolle der Hüllkurve und des Oszillators. Er wollte eine durch Tastendruck triggerbare Einrichtung, die eine vierstufige, aus den Phasen Attack, Decay, Sustain und Release bestehende Hüllkurve hervorbringt und auf einen existierenden Klang angewendet werden kann. Ein weiterer Vorschlag kam von Gustav Ciamaga, ein Komponist welcher an der University of Toronto das Studio für elektronische Musik leitete. Er ist für die Ergänzung des Systems um einen spannungsgesteuerten Tiefpassfilter verantwortlich.

Robert Moog gründete für die Herstellung und Vermarktung eine eigene Firma und 1966 waren die ersten Modelle verfügbar. Walter Carlos, Physiker und Toningenieur,

³¹ Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 109 - 111

half Robert Moog bei der weiteren Perfektion seines Synthesizersystems. Er hatte die Idee einer speziellen Filterbank mit festen Filterfrequenzen, um den elektronischen Klang mit zusätzlichen Formantfrequenzen anzureichern.³² Ziel dieser Entwicklung war die Schaffung einer Methode zur Herstellung elektronischer Versionen bekannter Orchesterinstrumente. Das Ergebnis war eine LP, auf der einige populäre Kompositionen von Johann Sebastian Bach mit dem neuen Synthesizersystem eingespielt wurden. Die Schallplatte trägt den Titel „Switched-on Bach“ und demonstriert die Leistungsfähigkeit des neuen Instruments. Es wurden über eine Million Platten verkauft.³³

Dies war im Jahr 1986 und Robert Moog wurde mit Aufträgen überhäuft. Um den „Moog“ transportabler zu gestalten, die ersten Modelle waren fünf Zentner schwer, und auch für Live und Bühnen anzupassen, entwickelte Moog mit dem Ingenieur Jim Scott den „Minimoog“ welcher bis heute als DER analoge Synthesizer gilt.³⁴

³² Vgl. Kapitel 5.2 Subtraktive Klangsintese

³³ Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 111- 114

³⁴ Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 114 -116

3 Musikalische Strömungen

3.1 Musique concrète

Parallel zur Entwicklung und Forschung in den USA nach den Möglichkeiten Klänge mit dem Computer zu generieren, lässt sich um 1950 eine neue Strömung in Frankreich beobachten, die auf die sich verändernde Musikästhetik hinweist.

Ausgangspunkt der Kompositionen dieser Zeit waren akustische Ereignisse und Geräusche ohne musikalische Herkunft welche auf Platte, später Tonband, fixiert wurden und mithilfe von Tonbandmanipulationen weiterverarbeitet wurden. Es war die erste Form der Verwendung von Samples. Der Name „Musique concrète“ leitet sich daher ab, sich „konkreter“ Klänge zu bedienen.³⁵

Grundsätzlich wurde der traditionelle Kompositionsvorgang, bei dem sich am Anfang eine künstlerische Idee befindet und über Zwischenschritte zur Partitur entwickelt, umgekehrt. Ein konkretes Klangobjekt wurde durch Manipulation seiner Eigenschaften zu einer abstrakten Struktur verändert, bis die ursprüngliche Herkunft des Klanges nicht mehr erkennbar ist.³⁶

1943 gründete Pierre Schaeffer den „Club d’Essai“ als Forschungsstelle für Radiophone Kunst. Radiophone Kunst ist eine Kunstform, die den Bedingungen der Rundfunkübertragung angepasst ist und sie bereits in die Konzeption einbezieht. Dieser Club zog die Europäische Avantgarde wie ein Magnet in den folgenden Jahren an und ließ Komponist*innen der Zeit neue Verbindungen untereinander knüpfen. Karlheinz Stockhausen, welcher Anfang 1952 nach Paris kam um bei Olivier Messiaen zu studieren, traf im Club auf Pierre Boulez, der dort an zwei „konkreten“ Etüden arbeitete. Schon im Dezember 1952 war er vertraut mit den Arbeitsmethoden und komponierte eine eigene Etüde aus konkreten Klängen.

³⁵ Vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 179 - 180

³⁶ Vgl. Essl, Karlheinz. Wandlungen der elektroakustischen Musik, 2007, S.5

Als Geburtsstunde der Musique concrète gilt die Ausstrahlung des Programms „Concept bruits“ am 5. Oktober 1948. Es beinhaltete Studien mit Titeln wie „Etude aus chemins de fer“, „Etude aux tourniquets“ und „Etude pathétique“.³⁷

Diese Ausstrahlung ist eines der zwei revolutionären Ereignisse, welche beide im Abstand von zwei Jahren in zwei unterschiedlichen Rundfunkstudios stattgefunden haben. Das zweite Ereignis fand in Köln, im damaligen Nordwestdeutschen Rundfunk, statt: der Startpunkt der elektronischen Musik.³⁸

Am 18. März 1950 fand in der Pariser École Normale de Musique ein Konzert statt, bei dem erstmalig keine Instrumentalist*innen auf der Bühne waren, sondern nur Lautsprechersäulen.³⁹

Schaeffer beschreibt die Idee der Musique concrète so:

„Wendet die technische Revolution, von der die Musik ergriffen wird, tatsächlich nur neue Mittel an, um wie bisher ‚Musik zu machen‘, oder führt sie uns zur Entdeckung neuer Arten von Musik, die wir noch nicht zu machen und noch weniger zu hören verstehen?“⁴⁰

Als musikalisches Material dienten alle Schallereignisse, welche mit einem Mikrofon aufzufangen waren: Blätterrauschen, Autolärm, Züge, Grillenzirpen, ..

In der Anfangsphase der Musique concrète wurden die Aufnahmen keiner weiteren Bearbeitungen unterzogen, sondern nur auf Schallplatte festgehalten und meist bis zu acht Schallplatten gleichzeitig abgemischt. Erst später, Anfang der 50er Jahre, als Tonbandgeräte zur Verfügung standen, wurden die Klänge transformiert. In der Anfangsphase wurde auf jegliche Kompositionsregeln verzichtet, die Klangphantasie stand im Vordergrund und das subjektive Hörurteil galt als oberstes Kriterium.⁴¹

³⁷ Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 207

³⁸ Vgl. Schaeffer, P.: Musique concrète: von den Pariser Anfängen um 1948 bis zur elektroakustischen Musik heute. Klett, Stuttgart, 1974, S. 13

³⁹ Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 207 - 211

⁴⁰ Vgl. Schaeffer, 1974, S. 8

⁴¹ Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 208 - 211

Diese Orientierung stellt die Musique concrète in den krassen Gegensatz zum sich Anfang der 50er entwickelnden Kölner Konzept der elektronischen Musik.⁴²

Mit der Einführung des Magnettonbands 1951 wuchsen die Bearbeitungstechniken der Musique concrète. Es konnten Geschwindigkeitstransformationen und dadurch gezielte Tonhöhenveränderungen sowie vielfältige Schnittmöglichkeiten integriert werden. Die enorm verfeinerten Möglichkeiten der Klangbeeinflussung wirkten sich auch auf das kompositorische Denken aus. Komplexere Bearbeitungsformen ersetzen die Wiederholungen.

Schaeffer unterteilt die Musique concrète in drei verschiedene Etappen:

- eine poetische
- Eine barocke
- Eine expressionistische⁴³

Die poetische Zeit umfasst etwa die Zeit bis 1950. Pierre Henry gilt als einer der wichtigsten Komponisten der frühen Musique concrète. Ein Hauptwerk der frühen Zeit ist die „Symphonie pour un Homme Seul“, an welcher Schaeffer und Henry gemeinsam arbeiteten. In der Symphonie finden sich viele der ursprünglichen Intentionen und Arbeitstechniken.⁴⁴ Als Klangmaterial verwendeten sie ausschließlich menschliche Geräusche, das heißt klangliche Resultate der Organtätigkeiten wie Atmen und Herzschlag sowie bewusster Akte wie Summen, Pfeifen, Musizieren und so weiter. Auf die Verwendung der menschlichen Geräusche bezieht sich die zweite Hälfte des Titels. Inhaltlich bewegt sich die Symphonie in der Nähe zum Hörspiel, dennoch handelt es sich nicht um Programmmusik, sondern um eine Dichtung aus Geräuschen und Klängen, aus Splittern von Texten und Musik.⁴⁵

Nach Vollendung der Symphonie trennten sich die Wege der beiden Komponisten und jeder folgte seiner persönliche Inspiration. Pierre Henry suchte im Klang nach „Außer-sich-Geratens“, die Heftigkeit in der Schrecken erregenden Wirkung einer Freisetzung des musikalischen Unterbewussten. Pierre Schaeffer dagegen versuchte eher die Musik

⁴² Vgl. Kapitel 3.3 Elektronische Musik

⁴³ Vgl. Schaeffer, 1974, S. 21

⁴⁴ Vgl. Schaeffer, 1974, S. 24

⁴⁵ Vgl. Ruschkowski, 1974, S. 211 - 216

der Gehörbildungsklassen mit denen der Konservatorien, des Orchesters und der Oper zu verknüpfen.⁴⁶

1953 wurde von Pierre Henry das Monumentalwerk „Orphée 53“ komponiert, welches als Höhepunkt der barocken Phase gilt. Bei diesem Werk agieren ein „konkretes“ und ein klassisches Orchester nebeneinander. Nach einer Aufführung bei den Donaueschinger Musiktagen am 10. Oktober 1953 bekam das Stück viel negative Kritik. Zuviel Dramatik, das Publikum war überrascht und entrüstet.⁴⁷

In der expressionistischen Phase lässt sich eine Suche nach unmittelbarer Klangwirkung beobachten. Diese findet man beispielsweise in emotionalen menschlichen Lustäußerungen, Schreien, Seufzen und vielem mehr. Bei der Arbeit mit diesen Klängen wurde klar, dass Assoziationen aus der Alltagswelt zu sehr vom Musikerlebnis ablenkten. Je weiter die Klänge modifiziert wurden und je mehr Klänge zusammengehäuft wurden, desto besser war das musikalische Ergebnis. An diesem Punkt sind die Klänge nicht mehr Zeichen für etwas, sondern artikulieren sich durch sich selbst.⁴⁸

1951 gründete Schaeffer innerhalb seines „Club d'Essai“ die „Groupe de Recherches de Musique concrète“, welche er 1953 nach der Aufführung von Orphée 53 bei den Donaueschinger Musiktagen wieder verließ. Die Leitung der Gruppe übernahm Pierre Henry.

1957 kehrte Pierre Schaeffer zurück, nachdem Pierre Henry das Studio der Gruppe verlassen hatte, um sein eigenes Institut „Apsome“ zu gründen.

Im Studio arbeiteten sowohl jüngere als auch ältere Komponist*innen. Unter ihnen bekannte Namen wie: Luc Ferrari, Francois-Bernard Mache, Ivo Malec, Michel Philippot, Francois Bayle und Iannis Xenakis.

Schaeffer war beflügelt und begeistert von der Dynamik in der Gruppe. Auch Schaeffers empirisch-experimenteller Ansatz begann sich zu wandeln. 1956/57 trat auch bei ihm der Gedanke nach einem vermittelbaren System in der Komposition in den Vordergrund und er forderte die Ergänzung der emotional bestimmten

⁴⁶ Vgl. Schaeffer, 1974, S. 24

⁴⁷ Vgl. Schaeffer, 1974, S. 25

⁴⁸ Vgl. Ruschkowksi, 2019, S. 211 - 216

Kompositionsweise durch systematische Forschung vor allem im Bereich der musikalischen Akustik.

1958 änderte die Gruppe ihren Namen in „Groupe des Recherches Musicales.“⁴⁹

Schaeffer gelang durch die Arbeit im Studio zu der Überzeugung, dass in der Musik zwei Phänomene getrennt nebeneinander liegen:

- physikalische bis physiologische Akustik aus der Welt der wissenschaftlichen Forschung
- Ästhetische Erfahrungen, Herstellung musikalischer Objekte bis zu ihrer Integration in den Bereich der musikalischen Sensibilität

Als Resultat ergeben sich daraus zwei Arbeitsfelder, welche jeweils die Extrempunkte des Zugangs verkörpern:

zum einen die Untersuchung der Elemente, welche am Aufbau von Strukturen beteiligt sind und zum anderen die Untersuchung der Strukturen selbst.

Diese Spezifizierung der gestaltpsychologischen Zusammenhänge erfolgte erst über fünfzehn Jahre nach Veröffentlichung der ersten *Musique concrète* Studien, also im Jahr 1966.⁵⁰

„Die Analyse der Klangbearbeitung ließ Schaeffer sechs verschiedene Stufen unterteilen:

1. Die Montage, das heißt die Auswahl, Ordnung, Systematisierung und handwerkliche Aufbereitung der zu bearbeiteten Klangobjekte,
2. Die Regulierung der Lautstärke, heißt die dynamische Formung der Klangmaterie
3. Die Frequenzbeeinflussung, heißt eine Klangveränderung zum Beispiel mittels Filter oder Entzerren
4. Die Mischung, also Überlagerung und/oder Verkettungen von separaten Klangobjekten zu größeren Einheiten
5. Die Transposition, heißt die Änderung des Frequenzspektrum durch Modifikation der Abspielgeschwindigkeit von Klangobjekten. Sowie
6. die planvolle Mischung der Verläufe einzelner Klangobjekte zum Werk und die - in der Regel - mehrkanalige - Saalübertragung.“⁵¹

⁴⁹ Vgl. Ruschkowksi, 2019, S. 218 - 219

⁵⁰ Vgl. Ruschkowksi, 2019, S. 218

⁵¹ Ruschkowksi, 2019, S. 226

Schaeffer starb am 20. August 1995, jedoch setzte die Groupe des Recherches Musicales ihre Arbeit fort und sie existiert noch heute. Sie hat ihren Sitz im Pariser Maison Radio de France als Teil des Institut National de l'Audiovisuel. Sie zählt zu den führenden Studios für elektronische Musik. Analoge Gerätschaften wurden durch computergesteuerte ersetzt. Das Festhalten an der ursprünglichen Konzeption der Bearbeitung konkreter Klänge blieb jedoch bis heute erhalten.⁵²

⁵² Vgl. Ruschkowksi, 2019, S 227 -228

3.2 Tape Music

In New York gab es eine ähnliche Bewegung wie in Frankreich, die sogenannte „Tape Music“. Das Ehepaar Louis und Bebe Barron experimentierte 1948 mit Magnettonbändern. Als Manipulationstechniken benutzen sie Vorwärts- und Rückwärts abspielen aufgenommener Instrumentalklänge, auch Schneiden und Kleben wird benutzt um in die Struktur einzugreifen. John Cage wurde 1951 auf Ihre Arbeit aufmerksam und gründete eine Gruppe mit dem Namen „Music for Magnetic Tape“ welche als Ziel hatte, Musik für Magnettonband zu erarbeiten. John Cage hat die Magnettonbandtechnik für kompositorische Einsätze schon Ende der 1940er Jahre bei Pierre Schaeffer kennengelernt, begann jedoch erst selbst mit dieser Technik Stücke zu komponieren mit der Gründung seiner Gruppe.

Mitglieder der Gruppe waren unter anderem: Das Ehepaar Barron, Earle Brown, Morton Feldmann, David Tudor und Christian Wolff. Zwei Jahre arbeitete die Gruppe im Studio der Barrons.

Während dieser Zeit entstand John Cages Stück „Imaginary Landscape no.5“. Die Techniken der Tonbandmanipulation waren vergleichbar mit denen der „Musique concrète“ jedoch nicht der musikalische Ideenhintergrund. So basiert zum Beispiel das Stück „Imaginary Landscape no 5“ auf Zufallsoperationen mit dem Buch des „i Ching“.

Parallel zum Schaffen der Gruppe arbeitete in New York Vladimir Ussachevsky mit Tonbandgeräten. Die ersten Experimente fanden dort 1951 im Experimental Music Studio, später das Tape Music Studio der Columbia University, statt. Die ersten Tonband-Experimente wurden dort am 9. Mai 1952 präsentiert.⁵³

⁵³ Vgl. Supper, M.: Elektroakustische Musik und Computermusik: Geschichte, Ästhetik, Methoden, Systeme. Wiss. Buchges, Darmstadt, 1997, S. 18

3.3 Elektronische Musik

Parallel zur Strömung der *Musique concrète* in Frankreich und der *Tape Music* in den USA, gab es in Deutschland, genauer gesagt im elektronischen Studio des Westdeutschen Rundfunks - damals Nordwestdeutscher Rundfunk - in Köln, die Entwicklung der Elektronischen Musik.

Auch bekannt als „Kölner Schule“.⁵⁴ Zwei grundlegende Säulen der "Elektronischen Musik" waren die additive⁵⁵ und die subtraktive⁵⁶ Klangsynthese. Als zwei gegensätzliche Prinzipien wurden bei der additiven Synthese Sinussschwingungen addiert, um einen Klang zu generieren, bei der subtraktiven Synthese hingegen wurde der Klang durch Filter aus Rauschen extrahiert.

Rauschen und Sinuston sind dabei die beiden Extremwerte des Kontinuums, in dem jedes mögliche Klangspektrum virtuell schon enthalten ist. Alles spielt sich im Rahmen dieser Dialektik ab: der Sinuston als eindeutig determinierte periodische Schwingung, das Rauschen, in dem die Gleichzeitigkeit aller Frequenzen enthalten sind, das völlig ungeordnet erscheint. In diesem Spannungsfeld zwischen Ordnung und Zufall findet nun der kompositorische Prozess statt.⁵⁷

Der Ausdruck der Elektronischen Musik stammt von Werner Meyer Eppeler, welchen er für diese bestimmte Art des Komponierens mit technischen Mitteln vorschlug, um eine Abgrenzung zu den bisherigen Entwicklungen der elektronischen Klangerzeugung zu schaffen. Die neue elektronische Arbeitsweise hat ihre Wurzeln in den Kompositionstechniken der seriellen Kompositionsweise und dient als Fortsetzung und Erweiterung. So wird der technische Begriff der elektronischen Musik auch dazu eingesetzt, eine bestimmte mit elektronischen Geräten realisierte Kompositionstechnik zu bezeichnen.

Zur Begrifflichkeit ist hinzuzufügen, dass der Begriff „elektronische Musik“ heute auch oft in der Populärmusik verwendet wird. Demgegenüber wird in der zeitgenössischen

⁵⁴ Vgl. Supper, 1997, S 22

⁵⁵ Vgl. Kapitel 5.1 Additive Klangsynthese

⁵⁶ Vgl. Kapitel 5.2 Subtraktive Klangsynthese

⁵⁷ Vgl. Essel, 2007, S. 8

E - Musik heute auch zunehmend der Begriff elektroakustische Musik verwendet; zur Abgrenzung von den Entwicklungen der Populärmusik als auch als Hinweis der mittlerweile überwundenen Trennung zur *Musique concrète*.⁵⁸

Die zwei Pioniere der Elektronischen Musik sind Herbert Eimert und Karlheinz Stockhausen. In Westeuropa dominierte zu dieser Zeit die serielle Zwölftontechnik, welche sich ursprünglich auf die Tonhöhe beschränkte. Sie wurde auf weitere Parameter erweitert: Dauer, Lautstärke und Klangfarbe. Jedoch war es schwer die Klangfarbe einer seriellen Struktur unterzuordnen, da die Spektren konventioneller Instrumente sich nur in sehr engen Grenzen verändern lassen, da die Klangstruktur direkt mit der Bauform zusammenhängt.

Genau dort knüpften Karlheinz Stockhausen und Herbert Eimert mit der elektronischen Klangerzeugung an. Durch Verwendung der additiven Klangsynthese⁵⁹ war es möglich, die Klangfarben in die musikalische Reihenbildung als Parameter zu integrieren.⁶⁰ Das Ziel der „Kölner Schule“ war weniger eine quantitative Erweiterung des bis dato vorhandenen Klangbereichs um unerhörte Klänge, sondern vielmehr ein Gefügigmachen der Klangfarbe zu einem seriell gestaltbaren Kontinuum. Durch die Komposition beliebig zusammensetzbarer aber eindeutig definierter Schallerereignisse sollte jede elektronische Komposition ihre eigene einmalige Klangwelt erhalten.

Herbert Eimert baut das kompositorische System der elektronischen Musik auf fünf musiktheoretischen Grundbegriffen auf:

Ton, Klang, Tongemisch, Geräusch und Zusammenklang.

Die Definition in der elektronischen Musik bestimmt hierbei einen Ton lediglich aus einer obertonlosen Sinuskomponente, wobei im Gegenzug ein Klang aus einem Sinus Grundton mit harmonischem Obertonspektrum besteht. Ein Tongemisch hingegen besteht aus einem Sinus Grundton mit nicht harmonischen Obertönen und ein Geräusch enthält unharmonische Teiltöne, welche feldartig dicht beieinander liegen. Den Zusammenklang definiert Eimert so, dass mindestens zwei der genannten Tonbeziehungsweise Klangobjekte kombiniert sind.⁶¹

⁵⁸ Vgl. Ruschkowksi, 2019, S. 228 -231

⁵⁹ Vgl. Kapitel 5.1 Additive Klangsynthese

⁶⁰ Vgl. Ruschkowksi, 2019, S. 232

⁶¹ Vgl. Ruschkowksi, 2019, S. 232

Bevor im Nordwestdeutschen Rundfunk das eigentliche Studio eingerichtet wurde, fanden in anderen Räumen des Kölner Funkhauses erste Experimente statt. Die Klangerzeuger waren ein Melochord, ein Monochord nach Trautwein und zwei Magnettonbandgeräte.

1953 wurde nach den Vorstellungen von Meyer-Eppler und dem damaligen Leiter der Meß- und Prüftechnik des NWDR, Fritz Enkel, das eigentliche Studio eingerichtet. Die Gerätschaften zur Klangmanipulation bestanden dann aus einem Rauschgenerator, einem Schwebungssummer, einem Ringmodulator⁶² und zwei Hörspielverzerrern, sowie wie schon gehabt, Magnettonbandgeräte, ein Melochord und ein Trautwein Monochord. 1953 ersetzte Stockhausen das Melochord und Monochord durch Sinusgeneratoren aus der Meßtechnikabteilung. Außerdem wurde 1953 Herbert Eimert Leiter des Studios.⁶³

Tongeneratoren, welche sinusförmige Ausgangsspannungen lieferten, erweisen sich als universelle Arbeitsmittel, besonders in Kombination mit Rechteck-, Impuls-, und Rauschgeneratoren, Filtereinrichtungen sowie den damals üblichen Rundfunk-Magnetbandgeräten.

Um mit den neuen Mitteln zu komponieren war handwerkliches Geschick von Vorteil. Nach der Herstellung der Klangereignisse durch Kombination der Tongenerator-Frequenzen und Aufzeichnung auf Magnetband im ersten Schritt wurden die Klänge weiteren Bearbeitungsprozeduren unterzogen. Dabei dominierten vor allem Bandschnittverfahren. Im dritten Schritt begann die Synchronisation, also das Zusammenfügen in der Zeit der verschiedenen kompositorischen Schichten. Hierbei wurden durch umkopieren zweier oder mehrerer Bandspuren auf eine neue gemeinsame Spur zusammengefügt.⁶⁴

Einige Komponist*innen ließen ihre Stücke vollständig von einem/r Tonmeister*in, einem/r Tontechniker*in oder versierten Komponist*innenkollegen umsetzen. Andere Komponist*innen realisierten Ihre Stücke komplett allein im Studio. Zwischen den beiden Extremen gab es die verschiedensten Abstufungen der Realisation eines elektroakustischen Werks. Es wird die Problematik deutlich, dass sich der Einfluss der Studiomitarbeitenden auf die Komposition auswirkt.⁶⁵

⁶² Vgl. Kapitel 5.3 Amplituden- und Ringmodulation

⁶³ Vgl. Supper, 1997, S. 22-23

⁶⁴ Vgl. Ruschkowksi, 2019, S. 233-235

⁶⁵ Vgl. Supper, 1997, S. 24

Als offizielle Geburtsstunde der Elektronischen Musik gilt der 26. Mai 1953, als vier Stücke von Rober Beyer und Herbert Eimert beim „Neuen Musikfest“ vorgestellt wurden. Diese Aufführung beendete auch die prekäre Situation, in der sich die elektronische Musik seit ihrer Gründung befand. Eine neue Musikrichtung, welche auf sich aufmerksam machen wollte, ohne ein einziges Stück vorzuweisen.⁶⁶

Eines der Pioniersstücke der seriellen Elektronischen Komposition sind Studie I und Studie II von Karlheinz Stockhausen. Karlheinz Stockhausen brachte beste Voraussetzungen mit ins Studio, da er 1952 in Paris bei Oliver Messiaen schon das neue musikalische Material kennenlernen konnte. Im August 1953 stellte er in Köln seine Studie I fertig, welche nur aus Sinustönen zusammengesetzt war. Es war das erste realisierte Stück, welches den theoretischen Intentionen der Elektronischen Musik entsprach. Anstatt einer neuen Klangqualität und Verschmelzung der Sinustöne zu neuen komplexeren Klängen wurden die Sinuston-Komponenten separat hörbar und damit leicht identifizierbar. Klanglich wird es verglichen mit einfachen Musikinstrumenten zwischen Flöte und Pfeifenorgel und Stockhausen erntete negative Kritiken. Er begann die Klangsynthese zu verfeinern und wollte den dominierenden statischen Höreindruck abschwächen. Dies realisierte er, indem er die Sinuston-Spektren nach der Synthese zusätzlich noch durch einen Hallraum schickte. Die einzelnen Sinusschwingungen wurden so verzerrt, dass als Ergebnis rauschähnliche Schallvorgänge mit mehr oder weniger dichter Zusammensetzung entstanden, die im Vergleich zur Studie I mehr Kraft und Intensität aufweisen.⁶⁷

Das Besondere an Studie II ist, dass Karlheinz Stockhausen 1954 als erster Komponist überhaupt eine Partitur zu einer elektronischen Komposition veröffentlichte.⁶⁸

Stockhausen schreibt in seiner Einleitung: „ Sie gibt dem Tontechniker alle für eine klangliche Realisation nötigen Daten und möge Musikern und Liebhabern als Studienpartitur dienen, vor allem in Verbindung mit der Musik.“⁶⁹

In dieser Partitur hat Stockhausen adäquate Formen der Notation entwickelt, welche er weiter erläutert.

⁶⁶ Vgl. Ruschlowksi, 2019, S. 236

⁶⁷ Vgl. Ruschlowksi, 2019, 236- 240

⁶⁸ Vgl. Essl, 2007, S.8

⁶⁹ Vgl. Stockhausen, K.: Studie II, 1954, in: Wißkirchen, H., (2005), S. 4

Er unterteilt in Tonhöhe, Schallstärken, Zeitdauer sowie Realisation.

Bei den Tonhöhen unterteilt er eine 81- stufige Frequenzskala mit der konstanten Intervalleinheit $\sqrt[25]{5}$. Die tiefste und Startfrequenz sind 100 Hz.

Das Kölner Studio und Karlheinz Stockhausens Arbeiten wurden Anziehungspunkt für zahlreiche Komponist*innen. Zur frühen Generation gehören Karel Goeyvaerts, Pierre Boulez, Michael Fano und Henri Pousseur.⁷⁰

⁷⁰ Vgl. Supper, 1997, S. 25

4 Klangsynthese mit dem Computer

1957 begann in den USA die Verwendung von Computern im musikalischen Kontext. Forscher*innen in den Bell Telephone Laboratories in Murat Hill New Jersey führten erste Experimente zur digitalen Klangsynthese durch. Zu ihnen gehörten David Mathews und Henk McDonald. Mathews und seine Kollegen bewiesen zunächst, dass ein Computer im Stande sein müsse, Klänge entsprechend jeder Tonhöhenkala oder Wellenform einschließlich variierender Frequenz und Amplitudenhüllkurven zu synthetisieren. Um dies umzusetzen, mussten die Forscher von New Jersey nach New York City reisen, denn ihre ersten Programme wurden als Maschinenanweisungen für einen riesigen IBM 704-Computer geschrieben, den es in den Bell Labs nicht gab. Sie kehrten schließlich mit einem Magnetband zurück, aus dem sie dann mit Hilfe eines 12-Bit-Vakuumröhren-Wandlers ein hörbares Signal erzeugen konnten. Es war der erste Digital-Analog-Klangwandler der Welt.⁷¹

Dieses Experiment legte das Fundament, den Computer als Klangerzeuger einzusetzen. So war der Computer „an sich“ noch kein musikalisches Instrument mit bestimmten Klangeigenschaften, sondern fungierte eher als ein offenes System, das neu eingegrenzt und definiert werden musste.⁷²

Ein weiterer Pionier der ersten Klangsynthesen mit dem Computer, neben Mathews und seinen Kollegen, war Jean-Claude Risset, ein französischer Komponist und Wissenschaftler. Jean-Claudes erste Experimente mit synthetischen Klängen realisierte er mittels additiver Klangsynthese.⁷³ Er besuchte 1964 die Bell Labs, nachdem er Mathews' Paper über die Möglichkeit der Erzeugung von Klängen durch den Computer gelesen hatte. In seinen ersten Versuchen begann er das Timbre von Trompeten mit Analyse und Synthesetechniken in MUSIC IV⁷⁴ zu untersuchen. Bei seinen Studien fand er heraus, dass Einschwingvorgänge und nicht nur die spektrale Zusammensetzung essenziell sind, um Klänge Instrumenten wie zum Beispiel den einer Trompete zuzuordnen.

⁷¹ Vgl. Roads, C.: The computer music tutorial. MIT Press, Cambridge, Mass, 2011, S. 85

⁷² Vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 181

⁷³ Vgl. Kapitel 5.1 Additive Klangsynthese

⁷⁴ Vgl. Kapitel 4.1 Programmiersprachen

Risset war der erste, der mittels additiver Synthese synthetische Glockenklänge generierte und durch seine Vorstudien konnte er die Bedeutung der Amplitudenhüllkurve jedes Teiltons verstehen.

Risset leistete Pionierarbeit bei der Kombination der Disziplinen Akustik, Klangsynthese und Psychoakustik, bei denen das mathematische Verständnis musikalischer Klänge und die Reproduktion mittels Computern eng mit der Art und Weise verbunden sind wie Klänge von Menschen wahrgenommen werden.

1968 komponierte Risset das Stück „Little boy“. In diesem Stück zeigt er auch mittels additiver Synthese das „Sheppard Glissando“, welches die Illusion erzeugt, von einem nie endenden steigenden - oder fallenden-Glissando.⁷⁵

Ein weiterer von Mathews' Paper beeinflusster Pionier der Computermusik war John Chowning,⁷⁶ welcher unter anderem bei Nadja Boulanger Komposition studierte.⁷⁷ Chowning kam 1962 als junger Doktorand nach Stanford und sein Interesse für elektronische Musik wurde geweckt, nachdem er Konzerte in Paris, unter anderem von Pierre Boulez, besucht hatte. Die Idee, dass ein Computer im Gegensatz zu herkömmlichen musikalischen Instrumenten unbegrenzte Klangmöglichkeiten bietet faszinierte Chowning.⁷⁸

Hierbei ist noch anzumerken, dass sich auf klanglicher Ebene zwei unterschiedliche Positionen gegenüberstanden:

- die Imitation bekannter akustischer Klänge
- Klänge, welche nur mit dem Computer erzeugt werden konnten, völlig neu und andersartig ⁷⁹

Chowning war an der Entwicklung der Programmiersprachen beteiligt⁸⁰ und er entdeckte während er mit Kombinationsoszillatoren spielte die Klangsynthesetechnik

⁷⁵ Vgl. Serafin, Computer generation and manipulation of sounds. In N. Collins & J. d'Esquivan (Eds.), *The Cambridge Companion to Electronic Music* (pp. 201–217)., 2007, S. 187

⁷⁶ Vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 182

⁷⁷ Vgl. Ruschcowksi, 2019, S. 308

⁷⁸ Vgl. Serafin, 2007, S. 187

⁷⁹ Vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 182

⁸⁰ Vgl. Kapitel 4.1 Programmiersprachen

Frequenzmodulation.⁸¹ Hierbei experimentierte er mit Vibratofrequenzen jenseits der üblichen 4-8 Hz. Bei Erreichen der Vibratofrequenz von 20Hz und höher bemerkte er eine Veränderung der Klangfarbe.⁸² Durch die Änderung dieser Frequenz konnte ein gleitender Wechsel zwischen harmonischen und inharmonischen Spektren festgestellt werden, wobei die Amplitude der Vibratofrequenz, also die Intensität der Modulation, mit der erzeugten spektralen Bandbreite korrelierte.⁸³

Chowning veröffentlichte einige Stücke, in denen er Frequenzmodulation anwandte. Eines der bekanntesten ist „Turenas“ aus dem Jahr 1972, bei welchem er spektrale Transformationen von harmonischen zu inharmonischen Obertonspektren erzeugte und weiter untersuchte.

Frequenzmodulation war zu dieser Zeit insofern sehr interessant, da es nicht mehr unzählige Oszillatoren benötigte, um komplexe Klänge zu generieren, sondern lediglich zwei.⁸⁴

⁸¹ Vgl. Serafin, 2007, S. 187

⁸² Vgl. Kapitel 5.4 Frequenzmodulation

⁸³ Vgl. Bartetzki, A.: Klangsynthese. In: Weinzierl, S. (ed.) Handbuch der Audiotechnik. pp. 1– 30 Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2022, S. 17

⁸⁴ Vgl. Serafin, 2007, S. 187

4.1 Programmiersprachen

Zur digitalen Klangsynthese von musikalischen Strukturen und Klängen benötigt es Programmiersprachen. Die Programmiersprachen dienen als Vermittler zwischen menschlicher Absicht und den entsprechenden Bits und Anweisungen, die für einen Computer notwendig sind.⁸⁵ Sie können als Grundlage der musikalischen Programmierung angesehen werden. Hierbei ist zu beachten, dass in den Anfängen für jeden Computer eine eigene Sprache benötigt wurde. Max V Mathews wird auch als „Vater der Computermusik“ bezeichnet, da er enormen Einfluss hatte und an sehr vielen Programmiersprachen beteiligt war. Er war der Schöpfer der MUSIC-N Sprachen. Die beiden ersten Sprachen, die er 1957 und 1958 in den Bell Laboratories entwickelt hat, waren „MUSIC I“ und „MUSIC II“. Beide liefen auf einem IBM 704.⁸⁶

MUSIC I erzeugte eine einzige Wellenform: die Dreieckschwingung. Der Benutzende hatte die Möglichkeit Tonhöhen und Dauern anzugeben. Eine Komposition die damit realisiert wurde war die Etüde mit dem Titel „In a Silver Scale“, komponiert am 17. Mai 1957 von Newmann Guttman.⁸⁷

MUSIC II lief schneller als sein Vorgänger. Es war schon möglich kompliziertere Synthese Algorithmen zu implementieren. Vier Klangstimmen waren gleichzeitig verfügbar.⁸⁸

Darauffolgend entwickelte Mathews MUSIC III für die IBM 7049 Computer, welches auf dem Konzept der Einheitsgeneratoren beruht, kurz UGens. UGens sind atomare, in der Regel vordefinierte Bausteine für die Erzeugung oder Verarbeitung von Audiosignalen.

Zusätzlich zur Steuerung der Ein- und Ausgänge sind UGens in der Lage eine Reihe von Steuereingängen zu unterstützen, die Parameter steuern welche mit dem UGen verbunden sind. Ein Beispiel für einen UGen ist ein Oszillator, der eine periodische Wellenform bei einer bestimmten fundamentalen Frequenz ausgibt. Dieser Oszillator kann Steuereingänge enthalten, welche Frequenz und Phase kontrollieren.

Weitere Beispiele für UGens sind Filter, Panner und Hüllkurvengeneratoren zur Steuerung der Amplitudenkonturen über die Zeit.

⁸⁵ Vgl. Wang, G.: A History of Programming and Music, 2008, S. 1

⁸⁶ Vgl. Stange-Elbe, S. 183

⁸⁷ Vgl. Roads, 2011, S. 89

⁸⁸ Vgl. Roads, 2011, S. 89

Multiplizieren wir die Ausgabe eines Sinus-Oszillators mit der eines Hüllkurvengenerators, erzeugen wir ein drittes Signal: eine Sinuswelle mit zeitvariabler Amplitude. Bei der geordneten Verbindung dieser Einheitsgeneratoren erstellen wir ein sogenanntes „Instrument“ oder „Patch“. Der Begriff kommt von analogen Synthesizern, bei denen durch den Anschluss von Komponenten mit Patchkabeln Parameter der Klänge konfiguriert werden können. Das Patch kontrolliert die hörbaren Qualitäten eines Klangs.

In der MUSIC-N Welt ist eine Sammlung von Instrumenten ein „Orchester“. Um das Orchester zum Erstellen von Musik zu verwendenden, muss der/ die Programmierer*in / Komponist*in eine Art von Eingabe erstellen, welche mit Zeitstempel versehene Notensequenzen enthält oder Signaländerungen steuert, die als Partitur bezeichnet werden.

Die Beziehung; das Orchester definiert wie Sound generiert wird und die Partitur diktiert dem Orchester wann was zu („spielen“) generieren ist, haben den Entwurf von Musikprogrammiersystemen und wiederum die Art und Weise wie Computermusik heute programmiert wird wesentlich beeinflusst.⁸⁹

Es folgte MUSIC-IV auch für IBM 7049 aber in einer neuen „Assemblersprache“ umcodiert. Bell Labs teilte seinen Quellcode mit Computerforschern an der Princeton Universität. Die ebenso auch einen IBM 7049 besaßen. Es folgten Verbesserungen und Ergänzungen und von Godfrey Winham und Hubert Howe. Daraufhin wurde schließlich MUSIC-IV-B veröffentlicht.

Zur gleichen Zeit reiste John Chowning zu den Bell Labs, um Max Mathews zu treffen. Chowning holte sich eine Kopie von MUSIC-IV. Kopie bedeutete in dem Fall eine Schachtel mit etwa dreitausend Lochkarten und eine Notiz mit der Aufschrift „Good Luck!“. Chowning und seine Kollegen schafften es, MUSIC-IV auf einem Computer laufen zu lassen. Dieser teilte sich den Speicher mit einem zweiten Computer, welcher die Konvertierung vom Digitalen ins Analoge durchführte. Auf diese Weise schufen sie eines der ersten „integrated computer music systems“. Einige Jahre später schlossen Chowning und seine Kollegen eine Neufassung ab mit dem Namen MUSIC 10, angelehnt an den PDP-10 Computer auf dem es lief.⁹⁰

⁸⁹ Vgl. Wang, 2008, S. 2-3

⁹⁰ Vgl. Wang, 2008, S. 2-3

1969 wurde MUSIC-V von Max Mathews entwickelt. Es war der Höhepunkt seiner Forschungen. Er schrieb es fast ausschließlich in „Fortran IV“ einer Standard Computersprache, es konnte somit auf jedes Computersystem importiert werden. Anfang der 1970er Jahre wurde es an dutzende Labore und Universitäten weitergegeben und war für viele Komponist*innen, darunter auch Curtis Roads, eine Einführung in die Kunst der digitalen Klangsynthese. Darauf aufbauend wurden noch einige weitere Syntheseprogramme entwickelt wie zum Beispiel: Music 360, Csound, Common Lisp Music.⁹¹

MUSIC-V war die letzte und ausgereifteste der Max Mathews Bell Lab Syntheseprogramme dieser Ära und möglicherweise die einflussreichste. Zu ihren direkten Nachkommen gehören MUSIC 360 und MUSIC 11 von Barry Vercoe und Kollegen am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge.⁹²

MUSIC 11 behielt das Prinzip von Mathews prinzipieller Teilung in Orchestra und Score File bei, konnte jedoch die Verarbeitungsgeschwindigkeit erheblich steigern. Im Laufe der achtziger Jahre leitete Vercoe das Programm Csound ab, welches vollständig in der Programmiersprache C geschrieben ist und relativ leicht auf verschiedene Computertypen wie Unix-Systeme, Macintosh oder DOS Rechner implementierbar ist.⁹³

Csound existiert dank seiner Flexibilität bis heute.⁹⁴ Mittlerweile ist es eine frei zugängliche Open Source Programmiersprache.⁹⁵

⁹¹ Vgl. Roads, 2011, S. 89-90

⁹² Vgl. Wang, 2008, S. 2-3

⁹³ Vgl. Ruschko, 2019, S. 303

⁹⁴ Vgl. Bianchini, R., Cipriani, 2000, Vorwort

⁹⁵ Vgl. csound.com

4.2 Herausforderungen und Nachteile der Komposition mit dem Computer

Um einen Computer als Kompositionswerkzeug zu benutzen, müssen die Komponist*innen ihre musikalischen Vorstellungen als Algorithmen in einer entsprechenden Programmiersprache formulieren⁹⁶. Dies hatte zur Folge, dass das Schreiben der Partitur und das Gestalten von digitalen Klangerzeugern auf der Programmierenebene vereint wurden und parallel stattfanden. Digitale Klangsynthese und serielles Komponieren verschmolzen.

Die Produktion von Computermusik war meist an große universitäre Einrichtungen gekoppelt und der Zugang war nur einem kleinen auserwählten Kreis von Komponist*innen zugänglich. Außerdem erforderte die Produktion der Klänge zum Teil enge Zusammenarbeit zwischen Komponist*innen, Forscher*innen und Programmier*innen. Die Kommunikation der unterschiedlichen Bereiche Technik, Kunst und Wissenschaft führte zum Teil zu Missverständnissen untereinander.⁹⁷ Die Erzeugung von ein paar Sekunden Klang erforderte oft mehrere Stunden Rechenleistung.⁹⁸

4.3 Klangsynthese heute

Heutzutage ist die Anzahl der mit Klangsynthese produzierten Kompositionen enorm gewachsen. Dies liegt einerseits daran, dass Hardware zu einem erschwinglichen Preis verfügbar ist.⁹⁹ Sowie der Entwicklung von „high level“ Programmiersprachen wie zum Beispiel Max/MSP, PD, SuperCollider und Csound.¹⁰⁰

Programme wie Max/MSP haben die Art und Weise wie Komponist*innen mit dem Computer agieren radikal verändert. Von einem mühsamen Werkzeug, das viel Zeit erforderte für ein bescheidenes Ergebnis ist der Computer zu einem musikalischen

⁹⁶ Vgl. Kapitel 4.1 Programmiersprachen

⁹⁷ Vgl. Essl, 2007, S. 12

⁹⁸ Vgl. Serafin, 2007, S. 185

⁹⁹ Vgl. Serafin, 2007, S. 198

¹⁰⁰ Vgl. Essl, 2007, S. 13

Werkzeug geworden, das sogar in Echtzeit bei Aufführungen verwendet werden kann. Komponist*innen verwenden bestehende Klangsynthese Algorithmen ausgiebig.¹⁰¹ Cipriani und Giri schreiben in ihrer Einleitung des Buchs „Electronic Music an Sound Design“ folgendes:

„One might say that while the traditional composer working with traditional instruments composes using sounds, the electronic composer composes the sounds themselves.“¹⁰²

Schauen wir beispielhaft auf die Software Csound, können wir einige Parallelen entdecken, welche schon in den MUSIC-N Sprachen vorhanden waren.

Csound hat sich aus den MUSIC-N Sprachen heraus entwickelt.¹⁰³

Es ist mittlerweile eine Open Source Software. Das Programm ist in der C - Sprache geschrieben, es kann jede Art von Klangsynthese implementiert werden. Die generierten Files können als Audiodatei exportiert werden.¹⁰⁴

In der Software werden zwei Textdateien erstellt um Klang zu erzeugen: das „Orchestra“ (File.orc) und der „Score“ (File.sco). Die Textdateien enthalten alle nötigen Informationen, die benötigt werden, um die „virtuelle Maschine“ zu beschreiben und die Operationen, die ausgeführt werden sollen. Nach dem Speichern der Orchestra und Score Files wird der Csound compiler verwendet, um die Textdateien auszuführen. Der Compiler gibt eine Sounddatei zurück.¹⁰⁵

Csound ist wie bereits erwähnt nur eine von vielen, sehr unterschiedlichen „high level“ Programmiersprachen, die sich aufbauend auf den ersten Sprachen im Laufe der Zeit entwickelt haben. Aus den vielfältigen Bedürfnissen heutiger Komponist*innen, Klangkünstler*innen und Musikproduzent*innen heraus entstanden sowohl visuelle als auch textbasierte Programmiersprachen. Ebenso ist der Markt an analogen und halbanalogen, erschwinglichen Synthesizern über die Jahre gewachsen und hat sich ausdifferenziert.

¹⁰¹ Vgl. Serafin, 2007, S. 185

¹⁰² Vgl. Cipriani/ Giri, 2016, S. 3

¹⁰³ Vgl. Kapitel Programmiersprachen

¹⁰⁴ Vgl. Cipriani, A., Giri, M.: Electronic music and sound design. 1. ConTempoNet, Rome, 2016, Vorwort

¹⁰⁵ Vgl. Cipriani/ Giri, 2016, S. 1 -11

Dies alles hier im Detail zu erwähnen und die verschiedenen Unterschiede zu beschreiben würde den Rahmen der Arbeit sprengen. Allen gemeinsam sind jedoch einige grundlegende Prinzipien, die im folgenden Kapitel ausgeführt werden.

5 Klangsynthesen

5.1 Additive Klangsynthese

Eines der Grundlegendsten Syntheseverfahren der elektronischen Musik ist die additive Klangsynthese.¹⁰⁶ Sie ist schon unter anderem bereits im Telharmonium, der Hammond Orgel und dem Sackbut zu finden.¹⁰⁷

Ausgangspunkt der additiven Klangsynthese ist das Fourier-Theorem. Nach dem Fourier Satz lässt sich jede periodische Schwingung als die Überlagerung, reiner harmonischer Schwingungen darstellen. Die Frequenzen der Obertöne sind ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz, deren Periodendauer und Periode des betrachteten Signals im Zeitbereich entspricht. Damit ist jede beliebige Klangstruktur aus verschiedenen Sinusschwinungen zusammensetzbar, da jede Schwingungsform als Summe sinusförmiger Teilschwingungen zu verstehen ist.¹⁰⁸

Bei der additiven Klangsynthese wird jede Teilschwingung mit einem eigenen Oszillator realisiert.¹⁰⁹ Bei jedem Oszillator müssen die Parameter Frequenz und Amplitude individuell gesteuert werden. Diese müssen nicht statisch, sondern können auch veränderbar sein. Im Falle der Amplitude wird dies oftmals durch Hüllkurvengeneratoren realisiert.¹¹⁰

Durch die additive Klangsynthese konnte die Klangfarbe in der Computermusik als kompositorischer Parameter eingeführt werden und die bewusste Gestaltung einer

¹⁰⁶ Vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 177-178

¹⁰⁷ Vgl. Kapitel 2 Analoge Instrumentenapparate

¹⁰⁸ Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 305

¹⁰⁹ vgl. Bartetzki, S. 6

¹¹⁰ vgl. Bartetzki, S.7

Obertonstruktur durch die Addition von Sinuswellen mit unterschiedlichen Amplituden und Hüllkurven geschaffen werden.¹¹¹

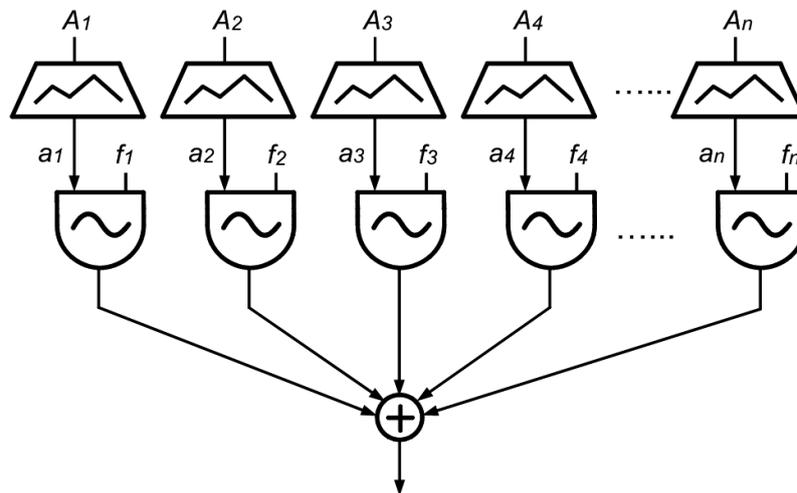


Abb. 1 Additive Synthese mit n gleichen Blöcken aus je einem Hüllkurvengenerator und einem Sinusoszillator für die Erzeugung von n Teiltönen mit anschließender Summierung
Quelle: Bartetzki, 2022, S. 7

Ein Sinuston kann nur elektronisch erzeugt werden. In der frühen Phase der Elektroakustischen Musik gilt er als die einfachste Form eines akustischen Ereignisses und galt daher auch als „Atom“ einer möglichen Klangfarbe.¹¹²

„Die Elektronische Musik wird nicht mehr gespielt, sie wird nur komponiert, wobei das Kompositionsverständnis ein grundlegend anderes ist. Das traditionelle Komponieren wird durch Montage ersetzt, bei der ausgehend von einzelnen Klängen eine Gesamtkomposition erstellt wird. Bei dieser Konzeption ist das Hauptanliegen der Elektronischen Musik das bewusste Auskomponieren der Klangfarbe. Damit wurde eine musikalische Utopie des beginnenden 20. Jahrhunderts eingelöst, das Resultat führte zu einer ganz eigenen Klangästhetik.“¹¹³

5.1.1 Fouriertransformation

¹¹¹ Vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 177-178

¹¹² Vgl. Supper, 1997, S. 38

¹¹³ Vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 174

Um das Prinzip der Additiven Klangsynthese zu verstehen, muss man auf das Prinzip der Fouriertransformation eingehen. Die Fouriertransformation wurde von Jean Baptiste Joseph Fourier in seinem Aufsatz „Memoire sur la propagation de la chaleur dans le corps solide“ beschrieben und ist die mathematische Realisierung der Fourieranalyse. In diesem Aufsatz stellt er die These auf, dass sich jede periodische Schwingungsform aus einer Reihe von sich überlagernden Cosinus- und Sinusschwingungen darstellen lässt. Diese Fourierreihe lässt sich in allgemeiner Form in folgender Gleichung darstellen, wobei die Fourierkoeffizienten a_k und b_k die Amplituden der einzelnen Teilschwingungen sind.

$$f(t) = \sum_{k=1}^N a_k \cdot \cos(k\omega t) + b_k \cdot \sin(k\omega t)$$

Die Fourierreihe kann im Prinzip auch als Reihe notiert werden, welche nur Cosinusschwingungen enthält, da sich Sinusschwingungen auch als eine um 90 Grad verschobene Cosinusschwingung darstellen lassen. Für die eindeutige Beschreibung einer Schwingung müssen Amplitude, Frequenz und Phasenlage jeder Teilschwingung angegeben werden.

$$f(x) = \sum_{k=1}^N A_k \cdot \cos(k\omega t - \phi)$$

Die Fourierkoeffizienten lassen sich auch in Abhängigkeit von der Frequenz als eine Funktion darstellen. Diese wird Spektrum genannt. Hierzu wird für jedes k der Betrag oder die Phasenlage berechnet.

Um einmal die Fourierreihenbildung zu veranschaulichen, kann man sich ein System mit Tongeneratoren vorstellen, welche an ein Mischpult angeschlossen sind. Jede Cosinus- bzw Sinusfunktion entspricht einem Tongenerator, bei welchem die Frequenzen und Phasenlagen eingestellt werden. Die Amplituden werden am Mischpult eingestellt und dort zu einer Schwingung zusammengemischt. ¹¹⁴

¹¹⁴ Vgl. Steppat, M.: Audioprogrammierung: Klangsynthese, Bearbeitung, Sounddesign ; mit 66 Listings, 33 Tabellen ... und 48 Übungsaufgaben. Hanser, München, 2014, S. 103 - 104

5.2 Subtraktive Klangsynthese

Die Subtraktive Klangsynthese ist quasi das Gegenstück zur Additiven Klangsynthese.¹¹⁵ Durch die frühe Synthesizertechnologie wurde die subtraktive Klangsynthese bekannt.¹¹⁶ Zum Beispiel Friedrich Trautwein benutze die Technik zur Klangerzeugung in seinem Trautonium.¹¹⁷

Grundlegendes Prinzip ist die Veränderung der spektralen Hüllkurve eines gegebenen Klangs.¹¹⁸ Mittels Filtern werden aus sehr obertonreichen Spektren Teile entnommen. Es steht also nicht die Generierung oder Zusammensetzen von Klängen im Fokus, sondern deren Bearbeitung und Zerlegung.

Geeignete Wellenformen sind Rechteckwellen, Dreieckswellen, Sägezahnwellen und Rauschen oder Impulsfolgen. Die Sinusschwingung ist für diese Art der Synthese ungeeignet, da sie keine Obertöne enthält.¹¹⁹ Eine ideale Sägezahnförmige Schwingung enthält alle Harmonischen. Deren Amplituden fallen umgekehrt proportional zur Teiltonnummer ab. Dieses Spektrum ist einer gestrichenen Saite ähnlich. Im Gegensatz dazu fehlen bei einer symmetrischen Rechteckschwinung die geradzahigen Harmonischen. Dieses Spektrum ähnelt einer Klarinette in tiefer Lage. Ebenfalls bei der Dreiecksschwingung sind nur ungeradzahige Harmonische vorhanden. Die Amplituden fallen mit dem Quadrat ihrer Ordnungszahl ab. Das Spektrum ähnelt einem flötenähnlichen Klang.¹²⁰

Für die Subtraktive Klangsynthese kann das zu bearbeitende Material synthetisch und nichtsynthetisch sein. Durch das Syntheseverfahren bekommt der/ die Hörende einen Eindruck über das Ausgangsmaterial. Sprachaufnahmen, die bis zur Nichtverständlichkeit gefiltert werden, sodass nur noch der Sprachrhythmus übrig

¹¹⁵ Vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 189

¹¹⁶ Vgl. Supper, 1997, S. 40

¹¹⁷ Vgl. Kapitel 2.7 Trautonium

¹¹⁸ Vgl. Bartetzki, 2022, S. 8

¹¹⁹ Vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 189

¹²⁰ Vgl. Bartetzki, 2022, S.8

bleibt waren beliebt: „Epitaph für Aikichi Kuboyama“ aus dem Jahr 1962 von Herbert Eimert ist ein frühes Beispiel dafür.¹²¹

Gemeinsam mit dem Sampling steht die subtraktive Klangsintese daher den Klangbearbeitungstechniken im Tonstudio am nächsten. Sie ist eine der am verbreitetsten und am häufigsten verwendeten Verfahren der Klangsintese, schon in der analogen als auch in der digitalen Musikelektronik.¹²²

¹²¹ Vgl. Supper, 1997, S. 41

¹²² Vgl. Bartetzki, 2022, S. 8

5.2.2 Filtertypen

In der Praxis der Subtraktiven Klangsynthese ist der mit Abstand am häufigsten verwendete Filtertyp der Tiefpass. Der Tiefpass lässt unterhalb einer Grenzfrequenz spektrale Komponenten weitgehend unverändert passieren. Oberhalb der Grenzfrequenz werden die Amplituden je nach Güte des Filters reduziert. Das bedeutet, dass höhere Teiltöne eines vom Oszillator generierten Signals unterdrückt werden; die ursprüngliche Wellenform wird somit verändert.

Bei per Klaviatur angesteuerten Subtraktiven Synthesizern folgt die Filterfrequenz mittels „Key Tracking“ der angeschlagenen Tonhöhe in einem bestimmten einstellbaren Intervall und betrifft dadurch immer den gleichen Obertonbereich des vom Oszillator generierten Signals. Die Grenzfrequenz kann allerdings auch unabhängig von der Grundfrequenz des zu filternden Klangs eingestellt werden. Beide Frequenzen, also Grundfrequenz und Grenzfrequenz des Filters, stehen dann in keinem festen Verhältnis zueinander und somit beeinflusst der Filter je nach Grundfrequenz des Signals immer andere Obertonbereiche. Dies entspricht im einfachen Quelle-Filter-Modell einem von der Quelle unabhängigen Modul mit eigenen akustischen Eigenschaften. Es ist vergleichbar mit dem Korpus von Saiteninstrumenten, der die sehr obertonreichen und spektral relativ gleichförmigen Klänge der verschiedenen Saiten unabhängig der Tonhöhe auf charakteristische Weise überformt. ¹²³

Die mathematische Beschreibung eines einfachen Tiefpassfilters sieht wie folgt aus:

$$y(n) = x(n) + x(n - 1)$$

Wobei $x(n)$ die Filter Input Amplitude zur Zeit n ist und $y(n)$ die Ausgabe Amplitude zur Zeit n . Da n in Samples angegeben wird, errechnet sich also die Amplitude als Summe der aktuellen Filter Input Amplitude und der ein Sample zuvor aufgezeichneten Filter Input Amplitude. ¹²⁴

¹²³ Vgl. Bartetzki, 2022, S. 10

¹²⁴ Vgl. Smith, J.O. Introduction to Digital Filters with Audio Applications, <http://ccrma.stanford.edu/~jos/filters/>, online book, 2007 edition, abgerufen am 10.06.2024

Für die Subtraktive Klangsintese können neben dem Tiefpass auch noch der Hochpass, der Bandpass, die Bandsperre und weitere Filtertypen eingesetzt werden. ¹²⁵

5.3 Amplitudenmodulation und Ringmodulation

Amplitudenmodulation funktioniert nach dem Prinzip des Tremolo-Effekts, es ist eine periodische Lautstärkeschwankung des Klangs.¹²⁶ Beim klassischen Tremolo überschreitet der Modulator in der Regel nicht 20 Hz und es wird ein Low Frequency Oszillator zur Modulation eingesetzt.

Die Amplitudenmodulation ist eine der elementarsten Operationen im Bereich der Klangsintese und wird durch Multiplikation mit einem anderen Signal realisiert. Bei der Amplitudenmodulation mit Audiosignalen betrachtet man allgemein das ursprüngliche Audiosignal als Modulator und das Signal des zusätzlichen Oszillators als Träger. In der Regel wird also von einem sinusförmigen Signal die Amplitude mit einem komplexeren Signal moduliert.¹²⁷ Befindet sich die Trägerschwingung im Bereich von 0,01 - 20Hz, erfährt dieser Klang in Abhängigkeit der Modulations-Frequenz und Stärke rhythmische Veränderungen, was sich als der klassische Tremolo Effekt zeigt. Bei Überschreitung der 20Hz ändert sich der Klang zu einem dichten Gemisch aus harmonischen und unharmonischen Teiltönen, deren Amplitude nicht mehr wahrnehmbar ist, dazwischen wird ein Zwischenbereich durchschritten, welcher sich durch „Rauigkeit“ beschreiben lässt. ¹²⁸

Beim einfachsten Fall der Amplitudenmodulation mit einem sinusförmigen Träger f_c und einer ebenfalls sinusförmigen Modulation f_m von dessen Amplitude entstehen zusätzlich zur Trägerfrequenz zwei neue sogenannte Seitenfrequenzen. Die Seitenfrequenzen sind die Summe von Träger- und Modulatorfrequenz, sowie deren Differenz. Der Modulationsindex I , welcher im Bereich zwischen 0 und 1 liegt, bestimmt die Amplitude der Seitenfrequenzen:

¹²⁵ Vgl. Bartetzki, 2022, S. 10

¹²⁶ Vgl. Ruschcowksi, 2019, S. 319

¹²⁷ Vgl. Bartetzki, 2022, S. 14

¹²⁸ Vgl. Ruschcowksi, 2019, S. 319

$$y(t) = (1 + I * \sin(2\pi f_m t)) * \sin(2\pi f_c t)$$

In dieser Form ist Amplitudenmodulation eine Zwei-Quadranten-Multiplikation, da das Trägersignal bipolar ist, durch die Addition von 1 wird jedoch der Modulationsterm in den positiven Bereich verschoben.

Bei komplexeren Modulationssignalen entstehen Seitenbänder um die Trägerfrequenz deren Summe und Differenzen sich aus allen Teiltönen des modulierenden Signals berechnet. Die Seitenbänder werden also je nach Modulationssignal komplexer. Die Seitenbänder sind eine Kopie, welche an der Trägerfrequenz gespiegelt sind.

Die Ringmodulation ist eine Variante der Amplitudenmodulation, bei der das Trägersignal unterdrückt wird. Mathematisch lässt sich die Ringmodulation als Multiplikation der Momentanwerte zweier Sinussignale darstellen:

$$y(t) = (\sin(2\pi f_m t)) * \sin(2\pi f_c t)$$

Beziehungsweise Allgemein:

$$y(t) = A(t) * B(t)$$

Auch bei der Ringmodulation handelt es sich um eine Vier-Quadranten-Multiplikation, beide Signale sind üblicherweise bipolar. Da hier beide Signale vertauschbar sind, spricht man in der Regel nicht von Träger und Modulator.

In der Praxis der Ringmodulation werden oft breitbandige Audiosignale mit Sinussignalen moduliert. Beispielsweise die menschliche Stimme oder Instrumentenklänge.

Enthält das breitbandige Signal Frequenzen, deren Amplitude die des Sinussignals übersteigen, ist die Differenzfrequenz kleiner als Null. Eine negative Frequenz entspricht einer um 180° phasengedrehten Schwingung.

$$A \sin(-\pi) = A \sin(\pi)$$

Diese Frequenzen werden von der Null Achse wieder in den positiven Bereich reflektiert und überlagern die anderen positiven Seitenbänder. Je nach Frequenzverhältnis der beiden Schwingungen zueinander, können sich dadurch Seitenbänder verstärken,

dämpfen oder auslöschen. Fallen die rückgespiegelten Frequenzen zwischen die anderen Seitenfrequenzen, ergeben sich inharmonische, rauhe Klangeindrücke. Bei digitalen Systemen existiert zur Null Linie noch eine weitere Spiegelungsachse im Frequenzbereich, die Nyquist Frequenz. Alle Frequenzen, die die halbe Samplingfrequenz übersteigen, werden hier zurückgespiegelt und auch dadurch entstehen inharmonische Obertöne im Klangspektrum.¹²⁹

Eines der bekanntesten Stücke, in denen Ringmodulation verwendet wird, ist „Mantra“ von Karlheinz Stockhausen.

5.4 Frequenzmodulation

Die Frequenzmodulation ist ein Syntheseverfahren, bei dem mit nur wenigen Bausteinen und Parametern eine große Vielfalt an harmonischen und inharmonischen Klängen generiert werden kann. Das grundlegende Prinzip der Frequenzmodulation ist aus der Nachrichtentechnik bekannt. Es ist ein Verfahren zur störungsarmen Aufzeichnung oder Übertragung von Informationen.¹³⁰ In der Nachrichtentechnik liegt das Trägersignal im Hochfrequenzbereich, außerhalb des menschlichen Hörvermögens. John Chowning wandte das Prinzip im hörbaren Bereich an.¹³¹ Grundsätzlich lässt es sich so beschreiben, dass eine Trägerschwingung von einer Modulationsschwingung beeinflusst wird. Aus den Summen- und Differenzfrequenzen von Träger und Modulator, sowie Vielfachen des Modulators, entstehen neue Signale, sogenannte Seitenbänder.¹³² Die Frequenz des Modulators bestimmt die Änderungsrate und die Amplitude des Modulators die maximale Frequenzabweichung der Trägerschwingung. Die ursprüngliche Trägerfrequenz wird also periodisch mit der Modulationsfrequenz nach oben und unten entsprechend des aktuellen Momentanwerts der Modulationsfrequenz verschoben. Der Mittelwert bleibt gleich. Dieses Prinzip gilt für lineare Frequenzmodulationen.¹³³

¹²⁹ Vgl. Bartetzki, 2022, S. 15 -16

¹³⁰ Vgl. Bartetzki, 2022, S. 17

¹³¹ Vgl. Kapitel 4 Klangsynthese mit dem Computer

¹³² Vgl. Ruschkowski, 2019, S. 308

¹³³ Vgl. Bartetzki, 2022, S. 17

Anders als bei der Amplituden- oder Ringmodulation entstehen nicht nur Summen- oder Differenzfrequenzen.¹³⁴ Stattdessen tauchen oberhalb und unterhalb der Trägerfrequenz Seitenbänder auf, die sich aus der Differenz von Trägerfrequenz und den ganzzahligen Vielfachen der Modulatorfrequenz ergeben.

Die Anzahl der hörbaren Seitenbänder lässt sich vom so genannten Modulationsindex I ableiten, der das Verhältnis von maximaler Frequenzabweichung d und Modulationsfrequenz f_m darstellt:

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

Die Gleichung für eine Frequenzmodulation mit zwei sinusförmigen Signalen lautet:

$$y(t) = A \sin(2\pi f_c t + I \sin(2\pi f_m t))$$

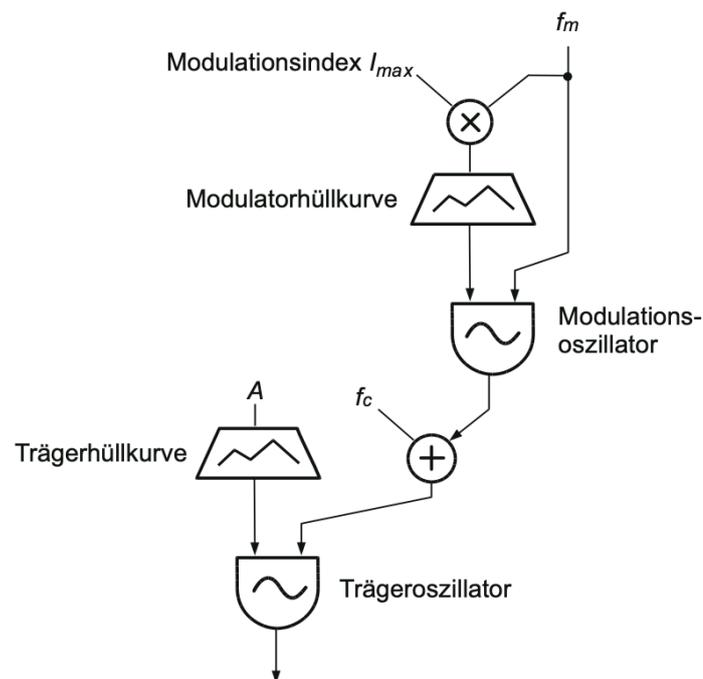


Abb. 2 Einfache FM-Schaltung mit jeweils einem Sinusoszillator und einem Hüllkurvengenerator.
Quelle: Bartetzki, 2022, S. 18

¹³⁴ Vgl. Kapitel 5.3 Amplituden- und Ringmodulation

So sind rund $I + 1$ Seitenfrequenzen oberhalb und unterhalb der Trägerfrequenz zu vermerken. Die gesamte Bandbreite in Hz ergibt sich aus der Multiplikation dieser Anzahl mit der Modulationsfrequenz.

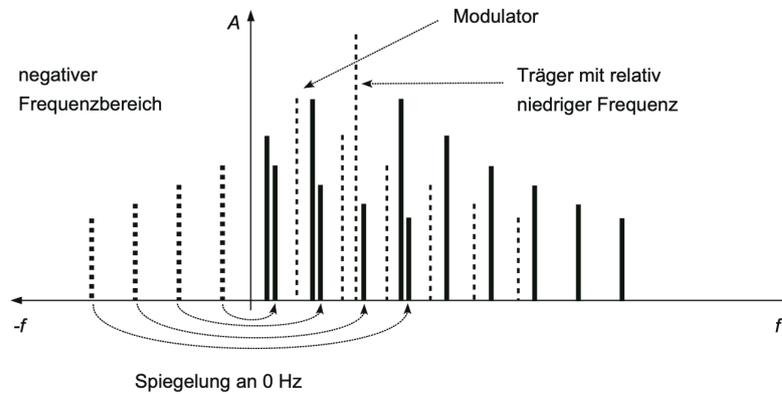


Abb. 3 Reflektierte Seitenfrequenzen (ohne Berücksichtigung der Phasenumkehrung).
Quelle: Bartetzki, 2022, S. 16

Auch wenn sich die Anzahl der Seitenbänder mit steigendem Modulationsindex erhöht, ändern sich nicht gleichermaßen die Amplituden dieser Schwingungen. Stattdessen können sie mit Hilfe von Bessel Funktionen erster Art und n-ter Ordnung berechnet werden. n ist hierbei das jeweilige ganzzahlige Vielfache der Modulationsfrequenz. Nun kommt hinzu, dass sich bei den unteren Seitenfrequenzen negative Werte ergeben, die dann oberhalb von 0 Hz zurückgespiegelt werden.

Ist n ungerade, bilden sich bei den unteren Seitenfrequenzen zudem Phasendrehungen um 180° . Um einen instrumentenähnlichen Klang zu erzeugen, bewegen sich die Werte des Modulationsindex etwa im Bereich 0 - 30. Die spektrale Bandbreite folgt dem Modulationsindex, das klangliche Innenleben sowie die Stärke der Teiltöne untereinander ist jedoch wesentlich komplexer, aufgrund der Bessel Funktionen, deren

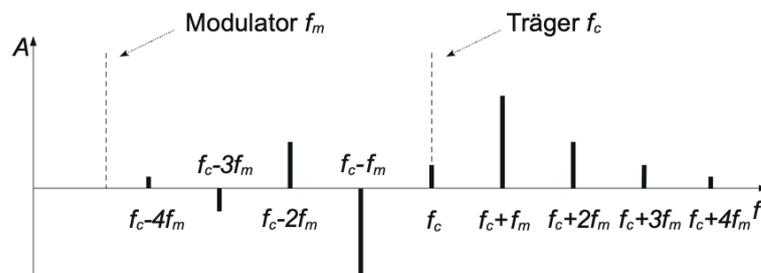


Abb. 4 FM-Spektrum aus zwei Sinussignalen und den ersten vier oberen und unteren Seitenfrequenzen unter Berücksichtigung der Phasenumkehrung im unteren Seitenband
Quelle: Bartetzki, 2022, S. 18

Amplituden mit dem Index quasi periodisch schwanken und durch die Rückspiegelung, welche für Auslöschung und Verstärkung einiger Frequenzen sorgt.

Dies alles führt zu einem lebendigen Zusammenspiel der Partialtöne, sobald sich der Modulationsindex ändert, was die Frequenzmodulation schnell populär gemacht hat. Was zudem eine für die Komposition sehr hilfreiche Eigenschaft ist, ist die Tatsache, dass sich die Amplitude des Trägers unabhängig von der spektralen Änderung modulieren lässt. Vergleicht man dies mit der subtraktiven Synthese, bei der sich die Amplitude durch die Filterung ändert oder mit der additiven Synthese, bei der durch die Summation die Amplitude größer wird, ist die Amplitude bei der Frequenzmodulation konstant und dadurch technisch leichter zu kontrollieren.

Nach dem Vorbild der additiven Synthese lassen sich mehrere Träger parallel schalten, deren Frequenzen jeweils durch einen eigenen oder gemeinsamen Modulator geändert werden. Außerdem können die Modulatoren zusammenaddiert einen gemeinsamen Träger modulieren oder auch kaskadieren. Auf diese Weise lassen sich noch komplexere Klänge realisieren und zum Beispiel Formanten herausarbeiten.

Abschließend zur Frequenzmodulation ist zu erwähnen, dass Yamaha das Prinzip der Frequenzmodulation in einem ihrer berühmtesten Synthesizern verwendete, dem DX7 welcher 1983 herausgebracht wurde. ¹³⁵

5.5 Granularsynthese

Im Gegensatz zu Syntheseverfahren, bei denen die spektrale Beschreibung und Erzeugung des Klangs im Fokus steht, und zeitliche Aspekte des Klangs beziehungsweise seiner Änderung erst im Nachhinein durch zeitliche variable Modifikation der Parameter hinzugefügt werden, zum Beispiel mittels Hüllkurven, ist die zeitliche Ebene hier der ausschlaggebende Parameter. Die Granularsynthese bezieht sich auf eine Theorie, welche von Dennis Gabor in seiner „Theorie der akustischen Quanten“ in den 1940er Jahren beschrieben wird. ¹³⁶

¹³⁵ Vgl. Bartetzki, 2022, S. 16 - 19

¹³⁶ Vgl. Bartetzki, 2022, S. 25

Dennis Gabor erweitert in dieser Theorie das Fourier-Theorem um eine zeitliche Beschreibungsebene.¹³⁷ Er entwarf eine Maschine, mit der Sound in kleine Teile zerlegt wurde und entkoppelte die Dauer eines Klangs von seiner Tonhöhe.¹³⁸ Damit gibt Gabor den Anstoß für die Entwicklung der Granularsynthese. Die von Gabor beschriebenen „Elementarsignale“ werden in der Granularsynthese als „Grains“ bezeichnet.¹³⁹

Ein Grain ist ein kurzes mikroakustisches Ereignis mit einer Dauer nahe der Schwelle der menschlichen Hörwahrnehmung, typischerweise zwischen 1-100ms. Jedes Grain erhält eine Amplitudenhüllkurve.¹⁴⁰ Über diese Hüllkurve, welche in Gabors ursprünglichem Konzept eine glockenförmige Kurve ist, die mit der Gauß - Methode erzeugt wird,¹⁴¹ wird das Signal ein- und ausgeblendet, beziehungsweise kann es bezogen auf die Kurzzeit-Fourier-Transformation auch als Fensterfunktion betrachtet werden. Bei Gabor ist das Signal selbst sinus- oder cosinusförmig, in der gängigen Granularsynthese sind auch diverse andere Audiosignale wie Rauschen oder Tonaufnahmen üblich.

Je nach Dauer des Grains wird ein isoliertes Grain nur als Klick oder perkussiver Ton wahrgenommen. Durch eine längere Folge sich überlappender gleichartiger Grains ergibt sich ein kontinuierlicher Klang.¹⁴² Dies geschieht durch die Trägheit unseres Ohres. Zeitliche Änderungen in der Grainebene können vernachlässigt werden und die Klangfarbe kann abhängig gemacht werden nur von der Frequenz und Intensität der einzelnen Klangimpulse (Grains). Ein Grain kann quasi als „Momentaufnahme“ betrachtet werden. Ruft man diese Momentaufnahmen wie im „Daumenkino“ rasch nacheinander ab, entsteht eine zeitliche Klangänderung, welche allein von den Grains und ihrer Klangimpulsverteilung bestimmt wird.¹⁴³ Sehr kurze Grains unter 5 ms halten den Eindruck einer Tonhöhe zurück, zwischen 5-25 ms ist die Tonhöhe sehr vage und ab 25 ms kann das Ohr sicherer eine Tonhöhe zu erkennen.¹⁴⁴

¹³⁷ Vgl. Bartetzki, 2022, S. 25

¹³⁸ Vgl. Roads, C.: *Microsound*. MIT Press, Cambridge, Mass, 2001, S. VIII

¹³⁹ Vgl. Bartetzki, 2022, S. 25

¹⁴⁰ Vgl. Roads, 2001, S. 86

¹⁴¹ Vgl. Roads, 2001, S. 87

¹⁴² Vgl. Bartetzki, 2022, S. 25

¹⁴³ Vgl. Ruschcowksi, 2019, S. 329

¹⁴⁴ Vgl. Roads, 2001, S. 87

Aufbauend auf Gabors Ansatz entwickelte Iannis Xenakis die kompositorische Theorie, dass jeglicher Schall als Kombination von elementaren Klangpartikeln anzusehen sei. Jedes musikalische Ereignis ist somit als Ansammlung einer großen Zahl elementarer Klangimpulse zu betrachten, deren Zusammensetzung sich im zeitlichen Verlauf ändern.

Um diese Theorie kompositorisch nutzbar zu machen, begann Curtis Roads Mitte der 70er Jahre an der Universität von Kalifornien in San Diego diese Methode zur Klangerzeugung systematisch zu untersuchen.¹⁴⁵

Die Granularsynthese erfordert eine hohe Anzahl an Steuerdaten. Wenn n die Anzahl der Parameter pro Grain und d die Dichte der Grains pro Sekunde ist, benötigt man $n * d$ Parameterwerte um eine Sekunde Klang zu spezifizieren. Es wird schnell deutlich, dass eine globale Organisationseinheit benötigt wird: n ist in der Regel größer als Zehn und d kann über 1000 betragen.¹⁴⁶

Zur Lösung dieses Problems entwickelte Roads eine grafisch orientierte Eingabeform, welche dem/ der Komponist*in die Möglichkeit bietet, seine Anweisungen in einer der Maschine „verständlichen“ Form einzugeben und gleichzeitig leicht zu erleben, um einen niederschweligen Zugang zum künstlerischen Prozess zu gewährleisten.¹⁴⁷ So kann der/die Komponist*in den Klang global spezifizieren, während der Granularsynthese-Algorithmus die Details ausführt.

Die Eingabe in den Algorithmus erfolgt nach „Events“, wie sie Roads bezeichnet. In den Events können alle musikalischen Parameter festgelegt werden. Diese variablen Parameter beinhalten generelle Bestimmungen wie Zeitdauer des Klangs bis hin zu veränderbaren Größen innerhalb des Klangs. Innerhalb des Klangs veränderbare Größen sind zum Beispiel Tonhöhe, welche sich aus der Abspielgeschwindigkeit des Grains ableitet und Lautstärke sowie Parameter, die das Grain selbst betreffen, genauso deren Dichteverteilungen.¹⁴⁸

„Half-life“ aus dem Jahr 1998/ 1999 ist eine Komposition in der Curtis Roads Granularsynthese verwendet.¹⁴⁹

¹⁴⁵ Vgl. Ruschcowksi, 2019, S. 329

¹⁴⁶ Vgl. Roads, 2001, S. 87

¹⁴⁷ Vgl. Ruschcowksi, 2019, S. 330

¹⁴⁸ Vgl. Roads, 2001, S. 87

¹⁴⁹ Vgl. Roads 2001, S. 156

6 Schluss

Klangsynthesen haben seit ihrer Entstehung eine deutliche Entwicklung durchgemacht. Die vorliegende Arbeit fasst zusammen, welche unterschiedlichen Formen elektronischer Klangerzeugung ab 1730 erfunden wurden und wie diese in die Erzeugung von Klängen mit Hilfe des Computers übergeht. Es wird aufgezeigt welche musikalischen Strömungen sich um 1950 abzeichnen und welche Komponist*innen und Stücke beispielhaft herangezogen werden können um diese Entwicklung zu veranschaulichen. Im letzten Kapitel werden die etabliertesten Klangsyntheseverfahren, wie sie heute unterschieden werden, technisch ausgeführt und fasst damit die Grundprinzipien wie sie schon in den vorangegangenen Geräten und Programmiersprachen aufgetaucht sind zusammen. Durch die Auflistung wird vor allem klar, wann und wo welche Entwicklungen stattgefunden haben und wo welche Prinzipien der Klangerzeugung wiederkehren.

Im ersten Kapitel der elektronischen Klangapparate ist beim Denis d'or, dem elektrischen Cembalo und dem Choralcello die Bauweise sehr an analogen Instrumenten angelehnt. Lediglich die Anregung des Klangs wird elektrisch umgesetzt. Beim Tellharmonium, dem Theremin, dem Ondes Musicales, dem Trautonium, dem Sackbut und der Hammond Orgel finden sich die Prinzipien der additiven und subtraktiven Klangsynthese wieder. Deutlich wird, dass unter anderem Sinusschwingungen, Schwebungssummer, Kippschwinger und Filter die Klangfarben bestimmen. Bei Moog kommt der spannungsgesteuerte Verstärker hinzu. Generell wurden bei den Vorreitern der digitalen Klangsynthese die Klangfarben sehr an den analogen Instrumenten orientiert.

Mitte des 20ten Jahrhunderts lassen sich in Frankreich, den USA und Deutschland drei neue musikalische Strömungen erkennen. Bei denen nach einer neuen Klangästhetik gesucht wird. Besonders die elektronische Musik aus Deutschland ist unmittelbar mit der additiven und subtraktiven Synthese verbunden. Bei dieser neuen Art zu komponieren wird vor allem versucht den Serialismus auf die Klangfarbe als Parameter und zu übertragen.

Die Klangsynthese mit dem Computer Ende der 1950er baut zunächst auf das Prinzip der additiven Klangsynthese. Durch John Chowning, welcher Experimente mit Vibrati durchführt entsteht die Frequenzmodulation, welche schon aus der Nachrichtentechnik bekannt ist als neue Form der Klangsynthese. Revolutionär war daran, dass mit einzig zwei Sinusoszillatoren komplexe Klangfarben generiert werden können.

Parallel entwickeln sich auch die Programmiersprachen, um musikalische Ideen in den Computer einzugeben weiter. Sogenannte UGens werden eingeführt, und damit war es möglich Klänge zu generieren aufbauend auf einem Baukasten Prinzip. Innerhalb der Weiterentwicklung der Programmierung zur digitalen Klangsynthese wird klar, dass die Ursprünge in der Analogtechnik liegen. Es werden Bezeichnungen wie „Patch“ und „Orchestra“ in die Programmierungen übernommen. Diese Begriffe haben sich bei der Open Source Software Csound bis heute erhalten.

Klangsynthesen haben sich in der heutigen Neuen Musik und Kompositionsszene fest etabliert.

Als Ausblick ist festzuhalten, dass die Liste der Synthesen durch Künstliche Intelligenz erweitert wird.

7 Quellen

Anwander, F.: Synthesizer: so funktioniert elektronische Klangerzeugung. PPVMedien, Bergkirchen (2017).

Bartetzki, A.: Klangsynthese. In: Weinzierl, S. (ed.) Handbuch der Audiotechnik. pp. 1–30 Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg (2022). https://doi.org/10.1007/978-3-662-60357-4_9-1.

Bianchini, R., Cipriani, A.: Virtual sound: sound synthesis and signal processing: theory and practice with csound. Contempo, Rome (2000).

Cipriani, A., Giri, M.: Electronic music and sound design. 1. ConTempoNet, Rome (2016).

Dézszy, T. et al. eds: ANKLAENGE 2007: Zwischen Experiment und Kommerz. Zur Ästhetik elektronischer Musik. Mille Tre (2008). <https://doi.org/10.2307/j.ctvdjrnrq6>.

Essl, K.: Wandlungen der elektroakustischen Musik. In: Zwischen Experiment und Kommerz. Zur Ästhetik elektronischer Musik, hrsg. von Thomas Dézszy, Stefan Jena und Dieter Torkewitz (2007)

Essl, K.: Algorithmic composition. In: Collins, N. and d'Esquivan, J. (eds.) The Cambridge Companion to Electronic Music. pp. 107–125 Cambridge University Press (2007). <https://doi.org/10.1017/CCOL9780521868617.008>.

Lion, A.: Das Trautonium. In: Die Musik. XXIV, Zweite Halbjahresausgabe. Berlin, Leipzig. (1932) https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?84623971X_024|LOG_0248

Roads, C.: Microsound. MIT Press, Cambridge, Mass (2001).

Roads, C.: The computer music tutorial. MIT Press, Cambridge, Mass. (2011).

Ruschkowski, A.: Elektronische Klänge und musikalische Entdeckungen. Reclam, Ditzingen (2019).

Sachs, C.: Real-Lexikon der Musikinstrumente: zugleich ein Polyglossar für das gesamte Instrumentengebiet. Olms, Hildesheim (1979).

Schaeffer, P.: Musique concrète: von den Pariser Anfängen um 1948 bis zur elektroakustischen Musik heute. Klett, Stuttgart (1974).

Serafin, S. (2007). Computer generation and manipulation of sounds. In N. Collins & J. d'Esquivan (Eds.), *The Cambridge Companion to Electronic Music* (pp. 201–217). chapter, Cambridge: Cambridge University Press. Presented at the .

Smith, J.O. Introduction to Digital Filters with Audio Applications, <http://ccrma.stanford.edu/~jos/filters/>, online book, 2007 edition, abgerufen am 10.06.2024

Stange-Elbe, J.: Computer und Musik: Grundlagen, Technologien und Produktionsumgebungen der digitalen Musik. De Gruyter Oldenbourg, Berlin Boston (2015).

Steppat, M.: Audioprogrammierung: Klangsynthese, Bearbeitung, Sounddesign ; mit 66 Listings, 33 Tabellen ... und 48 Übungsaufgaben. Hanser, München (2014).

Stockhausen, K.: Studie II, 1954, in: Wißkirchen, H., (2005) <http://www.wisskirchen-online.de/downloads/stockhausenstudieii.pdf>

Supper, M.: Elektroakustische Musik und Computermusik: Geschichte, Ästhetik, Methoden, Systeme. Wiss. Buchges, Darmstadt (1997).

Wang, G.: A History of Programming and Music, <http://rgdoi.net/10.13140/2.1.1720.5129>, (2008).

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Additive Synthese mit n gleichen Blöcken aus je einem Hüllkurvengenerator und einem Sinusoszillator für die Erzeugung von n Teiltönen mit anschließender Summierung, S. 33

Quelle: Bartetzki, 2022, S. 7

Abbildung 2 Einfache FM-Schaltung mit jeweils einem Sinusoszillator und einem Hüllkurvengenerator, S. 41

Quelle: Bartetzki, 2022, S. 18

Abbildung 3 Reflektierte Seitenfrequenzen (ohne Berücksichtigung der Phasenumkehrung), S. 42

Quelle: Bartetzki, 2022, S. 16

Abbildung 4 FM-Spektrum aus zwei Sinussignalen und den ersten vier oberen und unteren Seitenfrequenzen unter Berücksichtigung der Phasenumkehrung im unteren Seitenband, S. 42

Quelle: Bartetzki, 2022, S. 18

9 Abkürzungsverzeichnis

E-Musik	ernste Musik
°	Grad
Hz	Herz
ms	Millisekunden
NWDR	Nordwestdeutscher Rundfunk
Vgl.	Vergleiche