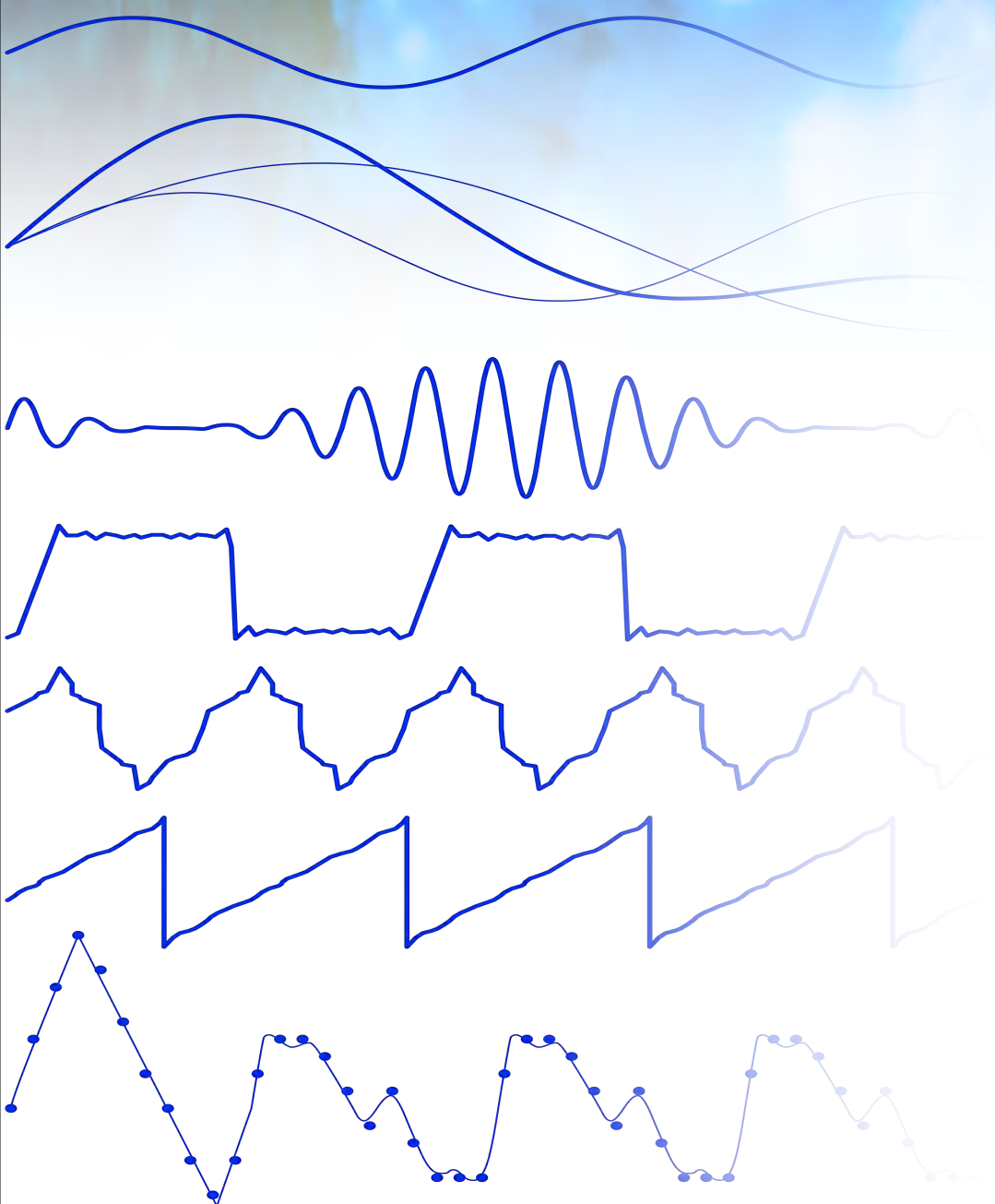


Welt der Klänge

vom Unterschied zwischen
akustisch, analog und digital
synthetisierten Sounds



Maturitätsarbeit

Janis Heim

12d, 2022/2023

betreut durch Gabriel Dalvit

Vorwort

Diese Maturitätsarbeit ist als Abschlussarbeit an der Atelierschule Zürich entstanden. Die Idee dieser Arbeit entwickelte ich in einem längeren Prozess. Da mich sowohl die Geistes- als auch die Naturwissenschaften interessieren, waren zu Beginn vielfältige Themenfelder Teil meiner Recherchen. Schlussendlich bin ich durch meine Interessen in Mathematik, Musik, Physik, Psychologie und Technik auf die Welt der Klänge und darin auf die Thematik der akustischen, analogen und digitalen Klangsynthese gestossen. Dieses Thema fesselt mich, das Themenfeld verbindet verschiedenste geistes- und naturwissenschaftliche Domänen miteinander. Klangsynthesemethoden begleiten uns tagtäglich. Wir nehmen den ganzen Tag akustische Klänge wahr. Durch analoge Technik werden wir beschallt; mit unseren Smartphones und Computern haben wir Werkzeuge zur digitalen Klangsynthese ständig bei uns. Akustische, analoge und digitale Sounds begleiten uns im Alltag. Was diese Klänge ausmacht, wie sie fachlich erklärt werden, wie sie zustande kommen, was sie unterscheidet und wie wir sie wahrnehmen, wird in dieser Arbeit dargestellt.

Ich danke allen, die mich beim Schreiben dieser Arbeit unterstützt haben. Insbesondere danke ich Dr. Ing. J. Grosse für das spannende Interview und seine Beratung, in der ich von seiner Fachexpertise profitieren konnte, dem Synthesizer-Pionier B. Spörri, der mir durch seine analoge Technik und seine Erfahrungen die Tür in die Welt der analogen Klänge geöffnet hat, meinem sehr engagierten Mentor G. Dalvit und meiner Familie, die mich immer unterstützt haben.

Abstract

Akustische, analoge und digitale Sounds sind Teil unseres Alltags. Akustisch erzeugte Klänge umgeben uns: Stimmen, Baulärm, Vogelgezwitscher... Die Erfindung des Synthesizers in den 60er Jahren ermöglichte die analoge Klangsynthese und veränderte so die Musikwelt grundlegend. Viele Hits wären ohne Synthesizer nie entstanden. Die digitale Revolution nahm in den 70er Jahren Fahrt auf und prägte die Musikbranche fortan. Digitale Klangsynthese ist seither in der Welt der Klänge nicht mehr wegzudenken. In der Maturitätsarbeit, «Welt der Klänge – vom Unterschied zwischen akustisch, analog und digital synthetisierten Sounds», wird untersucht, wie sich akustisch, analog und digital synthetisierte Klänge unterscheiden. Auf der Grundlage des erworbenen Fachwissens werden in Experimenten am Klavier, an Synthesizern und am Computer akustische, analoge und digitale Klänge erzeugt, um die Wahrnehmung dieser physikalisch unterschiedlichen Sounds zu ergründen. Konkret wird durch eine vertiefte Auseinandersetzung mit akustischer, musiktheoretischer und psychoakustischer Fachliteratur sowie durch Interviews mit Experten und durch eigene Experimente eine mehrperspektivische Herangehensweise gewählt. So gelingt es, die physikalischen, musikalischen, psychologischen und experimentellen Erkenntnisse in einen interdisziplinären Zusammenhang zu bringen, der es erlaubt, die physikalischen Unterschiede zwischen den Klangsynthesemethoden und deren Wahrnehmung umfassend zu verstehen. Die Maturitätsarbeit hat gezeigt, wie sich mit akustischen, analogen und digitalen Mitteln erzeugte Sounds physikalisch eindeutig unterscheiden. Diese physikalischen Unterschiede zeigen sich in der Wahrnehmung der Klangfarben. Eine veränderte physikalische Eigenschaft eines Klanges führt nicht zwingend zu einer anderen Wahrnehmung. Obwohl die analoge und die digitale Klangsynthese mit der Intention entwickelt wurden, die akustische Klangsynthese zu ersetzen, bieten diese nicht dieselben Möglichkeiten wie die akustische Klangerzeugung, sondern verfügen über eigene musikalische Qualitäten. Die Eigenheiten der drei Klangsynthesemethoden ermöglichen verschiedene Sounds, welche nicht in Konkurrenz zueinanderstehen müssen. Durch ihre Unterschiede ergänzen sie sich gegenseitig zur Vielfalt der Welt der Klänge.

Inhaltsverzeichnis

I.	Einleitung	1
II.	Grundlagen der Akustik	3
1.	Definition eines Tones	3
2.	Definition von Geräuschen	4
3.	Schwingungen.....	4
3.1.	Parameter einer Schwingung.....	5
3.2.	Harmonische Schwingungen.....	6
3.3.	Überlagerung von Schwingungen	7
3.4.	Longitudinale und transversale Schwingungen	8
3.5.	Dämpfung einer Schwingung.....	9
3.6.	Ausbreitung und Dämpfung von Schwingungen im Dreidimensionalen	10
3.7.	Periodische Schwingungen	10
3.8.	Aperiodische Schwingungen.....	11
3.9.	Stehende Wellen.....	14
3.10.	Resonanz.....	15
3.11.	Erzwungene Schwingung	17
3.12.	Unmögliche Wellen.....	17
4.	Schallausbreitung	18
4.1.	Huygen'sches Prinzip	18
4.2.	Reflexion	19
4.3.	Refraktion	20
4.4.	Beugung von Schall	21
4.5.	Dämpfung von Schall	22
4.6.	Dopplereffekt.....	23
5.	Erstes Zwischenfazit	24
III.	Psychoakustik, Musik und erweiterte Grundlagen der Akustik	25
1.	Tonhöhe.....	25
2.	Klangfarbe.....	27
2.1.	Obertöne.....	28
2.2.	ADSR-Klangverlauf	29
2.3.	Residualton	30

3.	Fouriertransformation.....	31
4.	Lautstärke.....	33
4.1.	Lautheit	33
4.2.	Weitere Lautstärkeeinheiten.....	35
4.3.	Schmerzgrenze unseres Gehörs	36
5.	Schwebungen	37
6.	Maskierung von Tönen.....	37
7.	Kombinationstöne	38
8.	Einfluss der Schallintensität auf die Klangfarbe	38
9.	Einfluss des Raums auf die Klangfarbe	39
10.	Hall	40
11.	Räumliches Hören	41
12.	Zweites Zwischenfazit	42
IV.	Klangsynthese, Klangmodulation und Wandlung.....	43
1.	Modulation.....	43
1.1.	Einfache Addition	43
1.2.	Schaltmodulation	43
1.3.	Amplitudenmodulation	44
1.4.	Ringmodulation	47
1.5.	Frequenzmodulation	48
1.6.	Pulsdauermodulation	50
2.	Akustische und analoge Klangsynthese.....	51
2.1.	Funktionsweise eines Musikinstruments	51
2.2.	Synthesizer	52
3.	Wandlung.....	59
3.1.	Elektroakustische Wandlung	61
3.2.	Analog-Digital-Wandlung	64
3.3.	Digital-Analog-Wandlung	77
4.	Digitale Klangsynthese	80
4.1.	Wavetable Synthese	81
4.2.	Subtraktive Synthese	81
4.3.	Additive Synthese	82
4.4.	Physical Modeling.....	82
4.5.	Synthese mit Samples.....	83
4.6.	DAW	85

4.7.	Klangsynthese durch künstliche Intelligenz	86
5.	Drittes Zwischenfazit	86
V.	Wahrnehmbare Unterschiede zwischen akustisch, analog und digital synthetisierten Sounds	87
1.	Akustische Klangsynthese.....	87
2.	Analoge Klangsynthese.....	89
3.	Digitale Klangsynthese.....	92
4.	Viertes Zwischenfazit.....	95
VI.	Fazit.....	97
	Literaturverzeichnis	99
	Abbildverzeichnis	103
	Tabellenverzeichnis	106
	Eigenständigkeitserklärung.....	107

I. Einleitung

In einem Konzertsaal gibt ein Sinfonieorchester ein Konzert. Die Streichinstrumente und die Bläser spielen, mit einem gewaltigen Crescendo erreicht das Stück seinen Höhepunkt. Einige Strassen weiter spielt eine Band aus den 80er Jahren in einer Halle. Neben Schlagzeug, Gesang und Gitarre ertönt ein Synthesizer. In einem Keller nebenan findet eine Techno-Party statt, die Lautsprecher röhren. Drei komplett verschiedene Musikerlebnisse... Die Posaunen im Sinfonieorchester bringen die Luft zum Schwingen. Die Klänge erfüllen den Raum. Die elektrischen Bauteile im Synthesizer erzeugen elektrische Wellen, die Fans hören sie durch Lautsprecher. Die in der Software designten Tracks werden vom DJ abgespielt; die Partygänger hören den Sound über die Lautsprecher, die mit dem digitalen DJ-Pult verbunden sind.

Bei diesen Beispielen werden die Klänge mit unterschiedlichen Methoden synthetisiert. Es kommen die akustische, die analoge und die digitale Klangsynthese zur Anwendung. Wie unterscheiden sich diese Klänge? Und können diese Unterschiede von uns wahrgenommen werden? Diese beiden Fragen stehen im Zentrum der vorliegenden Arbeit.

Im theoretischen Teil wird folgende Fragestellung untersucht:

- Wie unterscheiden sich akustisch, analog und digital synthetisierte Sounds?

Im praktischen Teil wird der Fragestellung nachgegangen:

- Sind Unterschiede zwischen akustisch, analog und digital synthetisierten Sounds wahrnehmbar?

Als Basis für die Analyse werden im Kapitel III die Grundlagen der Akustik beschrieben. Im Kapitel IV werden weitere Aspekte des Themas aus physikalisch akustischer, aus psychologisch psychoakustischer und aus musikalischer Perspektive untersucht. Im Kapitel V werden neben den Klangsynthesemethoden selbst Klangmodulation sowie Wandlung zwischen akustischen, analogen und digitalen Signalen erklärt. Im Kapitel VI, dem

praktischen Teil der Arbeit, wird ermittelt, wie die im theoretischen Teil der Arbeit gesammelten Erkenntnisse praktisch angewendet werden können, um zu untersuchen, ob Unterschiede zwischen akustisch, analog und digital synthetisierten Sounds wahrnehmbar sind. In einem Fazit werden abschliessend die gewonnenen Erkenntnisse festgehalten und die Fragestellungen beantwortet.

II. Grundlagen der Akustik

Die akustische, die analoge und die digitale Klangsynthese bauen auf den Grundlagen der Akustik auf. Bei all diesen Methoden nehmen wir ein akustisches Signal wahr. Ziel dieser Klangsynthesemethoden ist die Erzeugung akustischer Klänge. Aus diesem Grund bildet die Akustik die Basis dieser Arbeit.

1. Definition eines Tones

Um den Unterschied zwischen einem analog und einem digital erzeugten Sound zu analysieren, muss die Grundlage, die Akustik hinter einem analogen Sound verstanden werden. Auch digitale Töne bauen auf diesen Grundlagen auf. Doch was ist Musik, was sind Töne überhaupt? Töne sind Schall, also Schwingungen in einem Medium.¹

In der Akustik haben bestimmte Begriffe andere Bedeutungen als in der Musik. Die Begriffe in der Musik beschreiben, was beim Ohr ankommt; die akustischen Begriffe bezeichnen die Welle an sich. Ein Ton in der Akustik wird in der Musik Sinuston genannt. Ein Ton nach musikalischer Definition entspricht einem Klang in der Akustik. Ein Klang in der Musik wird in der Akustik Klanggemisch genannt.

Tabelle 1: Was in der Physik als Ton gilt, nennt man in der Musik Sinuston²

Musik	Akustik
Sinuston	Ton
Ton	Klang
Klang	Klanggemisch

Ein Ton (akustische Definition) ist eine reine Sinusschwingung. Ein Ton nach musikalischer Definition setzt sich aus mehreren Teiltönen (Töne nach akustischer Definition)

¹ vgl. Neukom, 2003, S. 48

² Neukom, 2003, S. 48

zusammen. Der Grundton, der tiefste Teilton eines Tones nach musikalischer Definition, wird von Teilschwingungen, sogenannten Obertönen, überlagert. Deshalb ist ein Ton nach musikalischer Definition keine sinusförmige Schwingung.

2. Definition von Geräuschen

Im Gegensatz zur Schallform der Töne bestehen Geräusche «[...] aus einer Summe unregelmässiger, nicht sinusförmiger Schwingungen unterschiedlicher Tonhöhen. Dies kommt daher, dass der zur Schwingung angeregte Körper keine einheitliche Materialdichte besitzt und nicht genügende Elastizität aufweist. Dies hat zur Folge, dass Teilschwingungen in keinem rationalen Verhältnis stehen»³. Dadurch ist keine Tonhöhe wahrnehmbar. Geräusche können als Rauschen definiert werden (siehe Seite 11).⁴

3. Schwingungen

Ein Ton ist nichts anderes als eine Schwingung. Die wichtigsten Schwingungen sind dabei die Sinus- und Kosinusschwingungen. Eine Schwingung wird in einer Welle dargestellt; eine Sinus- sowie auch eine Kosinusschwingung wird bestimmt durch Amplitude A , Frequenz f und Phasenwinkel φ .

³ Litzow, 2021, S. 9

⁴ vgl. Kuttruff, 2004, S. 201-202; vgl. Litzow, 2021, S. 9; vgl. Moore, 2013, S. 428

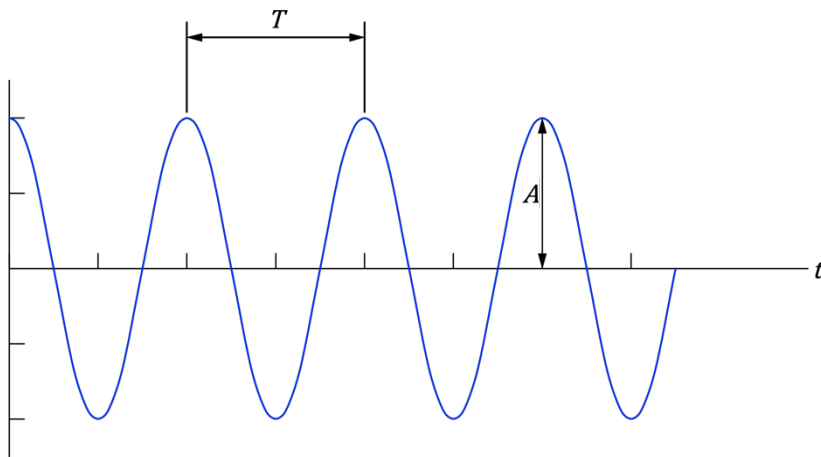


Abbildung 1: Eine Schwingung als Welle graphisch dargestellt; T =Periodendauer, A =Amplitude, t =Zeit⁵

3.1. Parameter einer Schwingung

Die Amplitude ist die maximale Auslenkung einer Schwingung und definiert die Lautstärke des Tons. Der Phasenwinkel bezeichnet den Winkel der Schwingung in einem Einheitskreis, wobei $360^\circ/2\pi$ des Einheitskreises eine Periode darstellen. Der Phasenwinkel oder auch einfach die Phase ist für die zeitliche Verschiebung zuständig. Der Nullphasenwinkel bezeichnet dabei den Phasenwinkel, bei dem die Schwingung $x = 0$ entspricht. Eine Periode T der Schwingung ist die Distanz von einer maximalen Auslenkung zur nächsten maximalen Auslenkung in dieselbe Richtung und $360^\circ/2\pi$ des Kreises, ihre Dauer entspricht der Wellenlänge δ . Die Frequenz ist die Geschwindigkeit, mit der sich die Periode wiederholt. Die Frequenz wird in Hz, also Wiederholungen der Periode pro Sekunde, angegeben; sie wird als Tonhöhe wahrgenommen. Die Frequenz kann auch in der Kreisfrequenz ω dargestellt werden, sie beschreibt den zurückgelegten Winkel im Einheitskreis pro Sekunde. Bei der Kreisfrequenz wird das Bogenmass verwendet, für die Kreisfrequenz gilt: $\omega = 2\pi * f$.⁶

⁵ Neukom, 2003, S.40

⁶ vgl. Neukom, 2003, S. 39-40; vgl. Raffaseder, 2002, S. 18-20; vgl. Strawn, 1985, S. 26-28; vgl. Taylor, 1994, S. 13-15

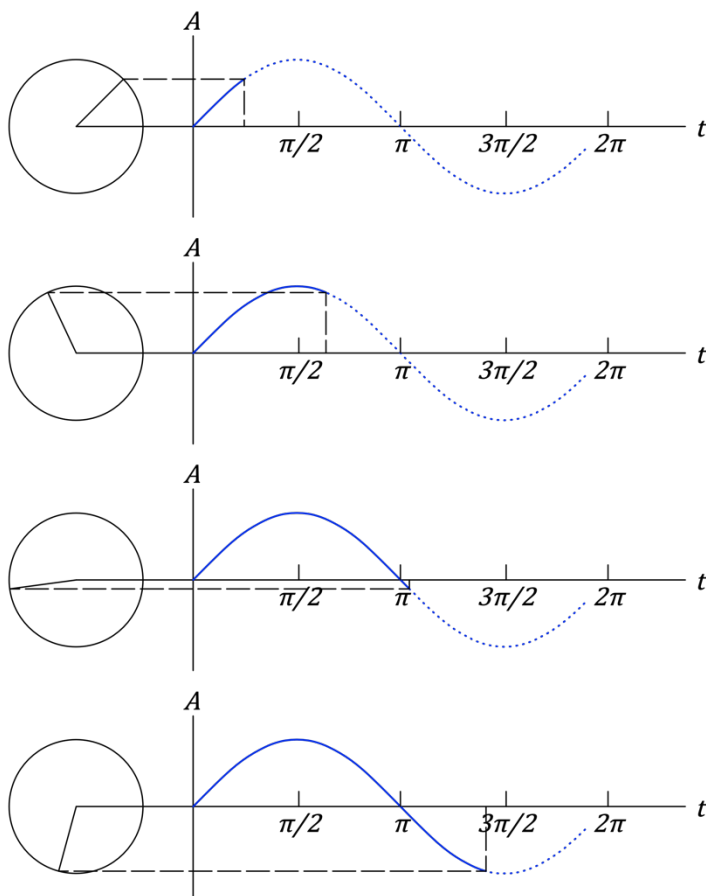


Abbildung 2: Eine Sinusschwingung kann graphisch als Welle oder auch als Kreis dargestellt werden⁷

3.2. Harmonische Schwingungen

Harmonische Schwingungen haben eine sinus- beziehungsweise kosinusförmige Wellenform. Zudem haben harmonische Schwingungen immer eine rückwirkende Kraft in die der Auslenkung entgegengesetzte Richtung proportional zur Auslenkung. Bei maximaler kinetischer Energie (Bewegungsenergie) ist die potentielle Energie gleich 0, bei maximaler Auslenkung ist die potentielle Energie 100% und die kinetische gleich 0%.⁸

⁷ Neukom, 2003, S. 39

⁸ vgl. Neukom, 2003, S. 40-41; vgl. Raffaseder, 2002, S. 34

3.3. Überlagerung von Schwingungen

Wenn sich mehrere Schwingungen überlagern, werden die Wellen addiert und es entsteht eine einzige Schwingung. Die Überlagerung, auch Superposition genannt, von mehreren Schwingungen ergibt eine Interferenz.⁹

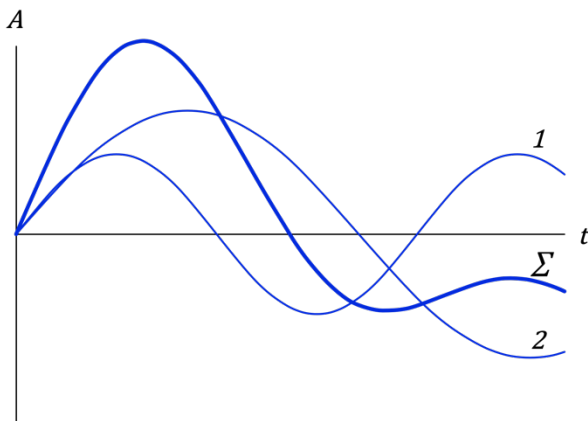


Abbildung 3: Die Superposition der Schwingung 1 und 2 ergeben die Interferenz Σ ¹⁰

Wenn sich zwei phasengleiche Schwingungen gleicher Frequenz überlagern, verdoppelt sich die Amplitude, eine konstruktive Interferenz entsteht, die beiden Schwingungen verstärken sich, die Welle bleibt aber ansonsten gleich. Wenn sich zwei frequenzgleiche Schwingungen genau phasenverschoben überlagern, der Phasenwinkel entspricht also der halben Periode, gleicht sich die Amplitude dem Wert 0 an, die beiden Schwingungen heben sich gegenseitig auf, es wird von einer destruktiven Interferenz gesprochen. Dieses Prinzip wird bei Anti-Noise-Canceling genutzt. Wenn sich zwei Schwingungen mit sehr ähnlicher Frequenz und gleicher Amplitude überlagern, verstärken sich die Schwingungen zuerst und heben sich später gegenseitig auf. Dieser Wechsel zwischen konstruktiver und destruktiver Interferenz wiederholt sich laufend. Dies führt zu den impulsartigen Geräuschen, die beim Arbeiten mit Tontechnik immer wieder auftreten. Wenn sich Schwingungen von zwei verschiedenen Klangkörpern im Zwei- oder Dreidimensionalen

⁹ vgl. Neukom, 2003, S. 42-45

¹⁰ Neukom, 2003, S. 42

überlagern, entstehen Orte, wo die Wellen sich verstärken, und Orte, wo sie sich gegenseitig schwächen oder sogar aufheben. Wenn sich Schwingungen auf einer Saite eines Musikinstruments überlagern, gibt es Stellen mit stehenden Wellen, also Orte, wo sich die Wellen stapeln, und Stellen, wo sich die beiden Schwingungen schwächen.¹¹

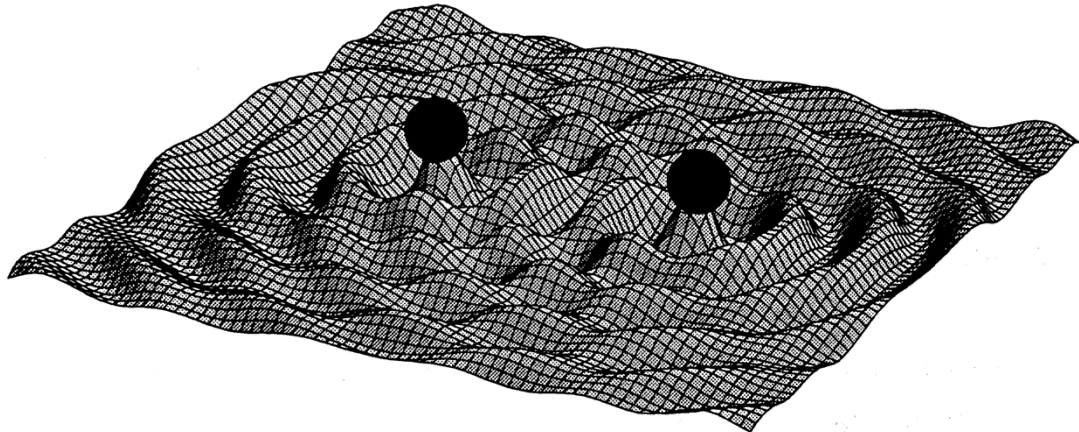


Abbildung 4: Zwei Schwingungen überlagern sich in einer Ebene¹²

3.4. Longitudinale und transversale Schwingungen

Was ist eine Schwingung? Oft wird fälschlicherweise angenommen, dass bei einer Schwingung Material des Mediums transportiert wird. Dies trifft nicht zu. Es bewegt sich lediglich Material des Mediums hin und her. Eine Schwingung entsteht, wenn ein elastischer Körper angeregt, also aus der Ruhelage gebracht wird. Der elastische Körper hat die natürliche Tendenz, wieder in der Ruhelage zurückzukehren. Die Trägheit der Masse sorgt für eine zeitliche Verzögerung, der Körper wird in die Richtung der Ruhelage beschleunigt. Aufgrund der Beschleunigung und der Massenträgheit bewegt sich der

¹¹ vgl. Muzzolini, 2004, S. 189; vgl. Neukom, 2003, S. 42-45, 61-64; vgl. Raffaseder, 2002, S. 72, 112

¹² Neukom, 2003, S. 63

Körper über seine Ruhelage hinaus in die Gegenrichtung und wieder zurück. Der Körper schwingt. Diese Eigenschwingung wird vom Körper auf ein Medium übertragen.¹³

Es gibt zwei Arten von Schwingungen. Zum einen gibt es longitudinale Schwingungen und zum anderen transversale Schwingungen. Bei longitudinalen Schwingungen bewegt sich das Medium in die Richtung der Ausdehnung der Schwingung und zurück. Wird auf eine Trommel geschlagen und so die Luft unter dem Trommelfell komprimiert, läuft diese Druckwelle als longitudinale Schwingung weiter. Schallwellen sind longitudinale Schwingungen, Luftdruckschwankungen. Bei einer transversalen Schwingung bewegt sich das Medium im rechten Winkel zur Richtung der Ausdehnung der Welle. Als Beispiel gelten Wellen im Meer. Obwohl alle Schallwellen longitudinal sind, haben transversale Schwingungen eine wichtige Bedeutung in der Musik. Jede angeregte Saite schwingt in transversalen Wellen. Erst die Klangkörper wandeln dann die transversale Schwingung in eine longitudinale Schallwelle um.¹⁴

Punkte, die sich in derselben Phase einer Welle befinden, werden phasengleich genannt und bilden im Zweidimensionalen eine Wellenfront (zum Beispiel eine Wellenfront im Meer) und im Dreidimensionalen eine Wellenfläche (zum Beispiel Schallwellen). Bei longitudinalen Schwingungen ist die Wellenfläche kugelförmig, jeder Punkt auf der Fläche hat denselben Druck.¹⁵

3.5. Dämpfung einer Schwingung

Eine sinusförmige Schwingung geht theoretisch unendlich weiter. Natürliche Schwingungen sind jedoch immer gedämpft, wegen der Reibung ihres Klangkörpers. Diese Reibung führt zu einer exponentiellen Abnahme der Amplituden beziehungsweise der Lautstärke des Tons. Der Reibungsfaktor bestimmt hierbei die Geschwindigkeit des «Verstummens» der Schwingung.¹⁶

¹³ vgl. Neukom, 2003, S. 58-60; vgl. Raffaseder, 2002, S. 17-18

¹⁴ vgl. Neukom, 2003, S. 58-60

¹⁵ vgl. Neukom, 2003, S. 58-60

¹⁶ vgl. Neukom, 2003, S.41-42

3.6. Ausbreitung und Dämpfung von Schwingungen im Dreidimensionalen

Wenn eine Schwingung von einem Punkt ausgeht, nehmen die Amplituden exponentiell mit der Distanz ab. Die Dämpfung kann mit einer Sinus- beziehungsweise Kosinusfunktion und einer Hüllkurve beschrieben werden. Die Hüllkurve, auch Einhüllende genannt, verbindet dabei die Punkte der maximalen Auslenkung jeder Periode in nur eine Richtung. Wenn die Schwingung jedoch von einer unendlich grossen Fläche ausginge, bliebe die Amplitude immer gleich, abgesehen vom Reibungsverlust.¹⁷

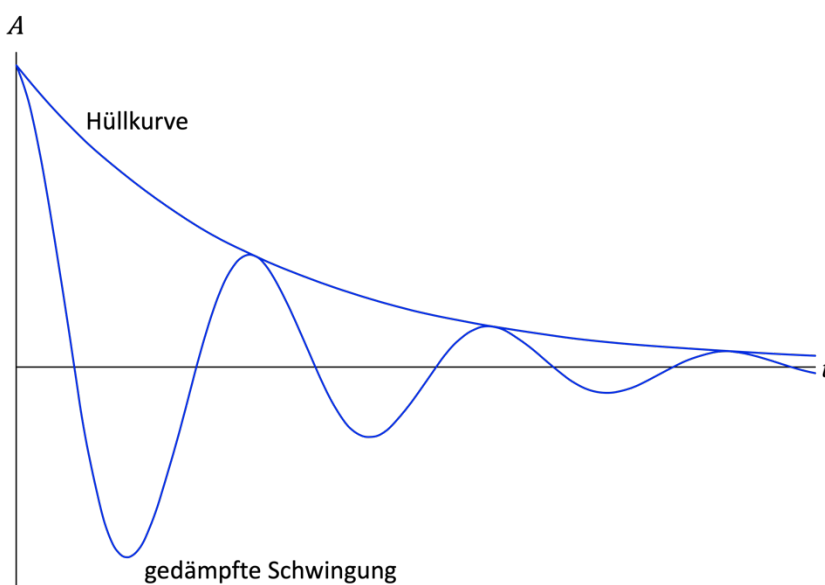


Abbildung 5: Die Dämpfung einer Sinusschwingung¹⁸

3.7. Periodische Schwingungen

Eine periodische Schwingung ist eine Schwingung, die sich wiederholt. So gilt eine ganz normale Sinusschwingung als periodisch. Werden harmonische Schwingungen addiert, entstehen also immer periodische Schwingungen. Die Periodendauer, also die Dauer

¹⁷ vgl. Neukom, 2003, S. 41-42, 58-60; vgl. Taylor, 1994, S. 92

¹⁸ Neukom, 2003, S. 41

zwischen dem Wiederholen der Schwingung, entspricht dabei der Frequenz. So lassen sich aus periodischen Schwingungen harmonische Schwingungen zusammensetzen.¹⁹



Abbildung 6: Eine periodische Schwingung; es sind drei Periodendauern abgebildet²⁰

3.8. Aperiodische Schwingungen

Es gibt auch aperiodische Schwingungen. Diese setzen sich aus mehreren sich überlagernden harmonischen Schwingungen zusammen, deren Frequenzverhältnis irrational ist. So stimmen die beiden Schwingungen ausser zu einem Zeitpunkt nie überein. Neben den zwei aperiodischen Schwingungsformen, Rauschen und Impulse, sind alle anderen periodisch.²¹

3.8.1. Rauschen

Zufällige und somit aperiodische Schwingungen ergeben ein Rauschen. Wenn alle Frequenzen etwa gleich stark vertreten sind, spricht man von einem weissen Rauschen. Eine ideale Welle von weissem Rauschen entspricht einer horizontal geraden Welle. Beim weissen Rauschen ist die Amplitude bei allen Frequenzen gleich gross. Wenn nur gewisse Frequenzen stark vertreten sind, spricht man von einem farbigen Rauschen; genauso wie weisses Licht Lichtwellen vieler Frequenzen enthält und farbiges Licht vor allem aus Wellen gewisser Frequenzen besteht. Beim weissen Rauschen, sowie bei den meisten farbigen Rauschen, liegt keine gemeinsame Frequenz vor, wir hören keine Tonhöhe. Ist ein farbiges

¹⁹ vgl. Neukom, 2003, S. 48-53; vgl. Raffaseder, 2002, S. 33-34

²⁰ Neukom, 2003, S. 49

²¹ vgl. Neukom, 2003, S. 53-54; vgl. Raffaseder, 2002, S. 33-34

Rauschen jedoch auf ein sehr schmales Frequenzband reduziert, können wir eine ungefähre Tonhöhe wahrnehmen. Ein Rauschen wird durch die spektrale Leistungsdichte identifiziert. Die spektrale Leistungsdichte bezeichnet die Energie in einem 1 Hz weitem Frequenzband im Spektrum. Beim weissen Rauschen verändert sich also die spektrale Leistungsdichte nicht. Eine oft genutztes Rauschen ist das sogenannte Rosa-Rauschen; es wird als natürlicher als weisses Rauschen empfunden und steht bei vielen Synthesizern für die Klangsynthese zur Verfügung. Beim Rosa-Rauschen nimmt die Energie exponentiell mit der Frequenz ab.²²

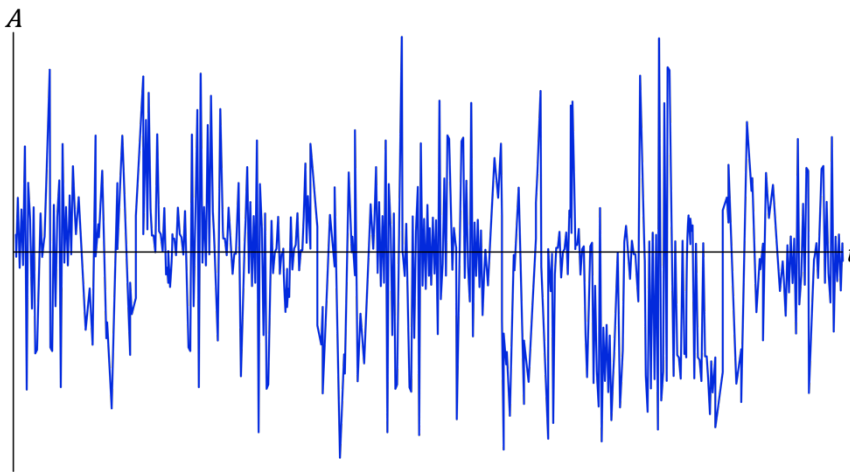


Abbildung 7: Die Welle eines weissen Rauschens²³

²² vgl. Moore, 2013, S. 6-7, 12, 428, 429; vgl. Neukom, 2003, S. 54-55; vgl. Raffaseder, 2002, S. 37-39

²³ Kuttruff, 2004, S. 202

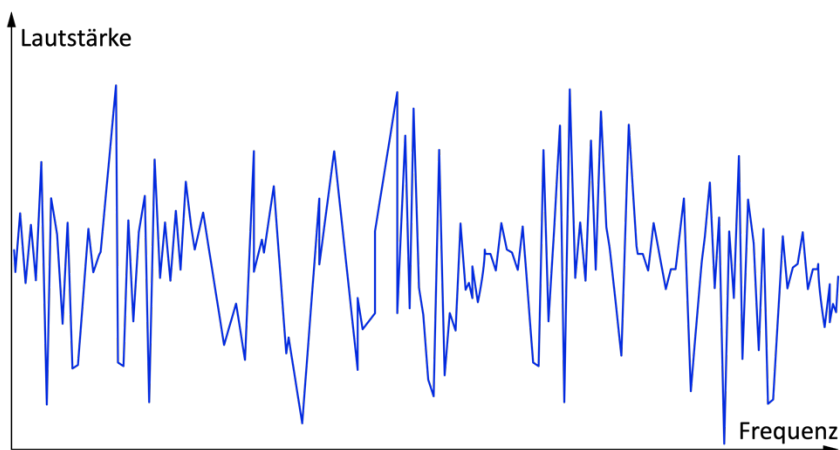


Abbildung 8: Das Spektrum eines weissen Rauschens²⁴

3.8.2. Impulse

Eine andere Art aperiodischer Schwingungen sind Impulse. Ein Impuls an sich hat keine Frequenz, keine Tonhöhe; dies liegt daran, dass sich die Frequenz der Schallwelle laufend verändert, auch deshalb nehmen wir keine Tonhöhe wahr. Es gibt zwei verschiedene theoretische Definitionen von Impulsen. Zum einen gibt es den Dirac-Impuls und zum anderen den Delta-Impuls. Der Dirac-Impuls ist ein Impuls in einem analogen Signal und lässt sich in einer zeitlichen Skala als einen einzigen Ausschlag darstellen, das Spektrum ist dabei konstant. Der Dirac-Impuls ist also unendlich hoch (laut) und gleichzeitig unendlich schmal (zeitlich kurz), was nur in der Theorie möglich ist. Der Delta-Impuls ist ein Impuls in einer digitalen Umgebung, zeitlich wird er konstant dargestellt, das Spektrum lässt sich als Ausschlag beschreiben. Beim Delta-Impuls hingegen ist der Impuls ein 1 hoch (also das Maximum der möglichen Lautstärke) und 1 Sample lang (zeitlich kürzeste Dauer). Man kann einen Impuls als Rauschen ohne zeitliche Ausdehnung verstehen.²⁵

²⁴ Neukom, 2003, S. 55

²⁵ vgl. Neukom, 2003, S. 55-56; vgl. Raffaseder, 2002, S. 48-49



Abbildung 9: Die Welle eines Impulses²⁶

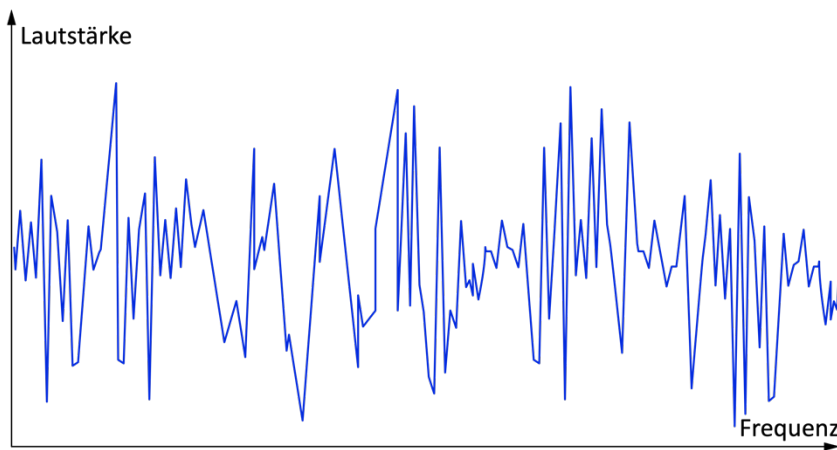


Abbildung 10: Das Spektrum eines Impulses entspricht dem eines weissen Rauschens²⁷

3.9. Stehende Wellen

Überlagern sich zwei gegenläufige Wellen gleicher Frequenz und Amplitude, entsteht ein eine stehende Welle. Eine stehende Welle entsteht zum Beispiel bei einer Saite eines

²⁶ Kuttruff, 2004, S. 26

²⁷ Neukom, 2003, S. 55

Instruments. Eine Kraft regt die Saite zu Schwingungen an, diese Schwingungen breiten sich dann auf der Saite aus und werden am Ende, einem Knotenpunkt, reflektiert. Diese reflektierte Welle gleicher Frequenz und Amplitude überlagert sich mit der eigentlichen Welle. Dadurch bewegen sich gewisse Punkte, sogenannte Schwingungsbäuche, auf der Saite ins positive und negative Maximum der Auslenkung, während sich andere Punkte, die Schwingungsknoten, gar nicht bewegen. Genauso kann auch aus Schall, der von einer Wand reflektiert wird, stehende Wellen bilden. Die Wellen sind stationär, sie stehen an denselben Punkten. Deshalb wird von stehenden Wellen oder Stehwellen gesprochen.²⁸

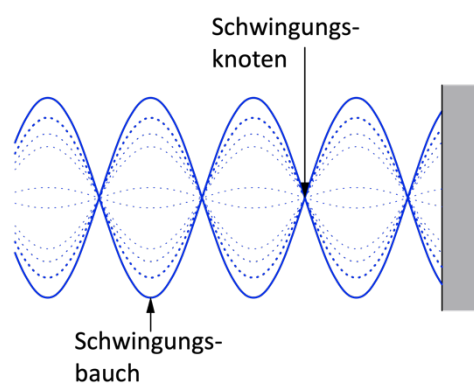


Abbildung 11: Eine Sinuswelle reflektiert an einer Wand, es entsteht eine Stehwelle²⁹

3.10. Resonanz

Wird ein elastischer Körper in Schwingung gebracht, erklingen nach dem Enden der anregenden Kraft nur gewisse Frequenzen. Diese Schwingungen werden Eigenschwingungen genannt. Die Frequenzen der Eigenschwingung hängen immer vom Körper ab. Die Punkte in der Schwingung mit Auslenkung gleich 0 werden Schwingungsknoten genannt, die Punkte mit der maximalen Auslenkung heißen Schwingungsbäuche. Die Eigenschwingung einer Saite hat immer Schwingungsknoten bei den beiden Enden der Saite. Wird eine Saite einer Gitarre angeschlagen, schwingt diese mit den Eigenfrequenzen. Die Eigenschwingungen haben immer eine Wellenlänge, die 1,

²⁸ vgl. Kuttruff, 2004, S. 100-102

²⁹ Kuttruff, 2004, S. 101

$\frac{1}{2}$ oder ein Vielfaches der Saitenlänge misst, die Anzahl der Eigenfrequenzen wächst also quadratisch zur Frequenz an. Diese Frequenzen werden auf den Klangkörper übertragen. Der Klangkörper ist ein Helmholtz-Resonator, ein akustischer Resonator. Ein Helmholtz-Resonator ist ein schwingungsfähiger Hohlraum. Dabei entscheiden Volumen, Form und Material des Resonators, welche Eigenfrequenzen der Resonator hat. Der Resonator schwingt, es werden aber nur Frequenzen, die einer Eigenfrequenz des Resonators entsprechen, verstärkt. Deshalb werden nicht alle Frequenzen einer schwingenden Gitarren Saite hörbar, da nicht all diese den Eigenfrequenzen des Klangkörpers entsprechen. Dies gilt auch für Räume. Ein Raum verstärkt beziehungsweise dämpft gewisse Frequenzen stärker als andere, was auch den Nachhall beeinflusst. So kann zum Beispiel ein Konzertsaal akustisch analysiert werden. Dabei wird auf der Bühne von einem Lautsprecher ein Impuls abgespielt. Bei den Sitzplätzen befindet sich ein Mikrofon, welches Schall, also den Impuls und die Impulsantwort des Raumes, aufnimmt. Mithilfe der Konvolution, einer mathematischen Funktion, kann nun die Impulsantwort, also der Nachhall, vom ursprünglichen Ton getrennt, analysiert und das daraus folgende Resultat auf andere Klänge übertragen werden.³⁰

Die Eigenschwingung ist auch sehr relevant bei der Entstehung von Lärm; wenn wir als Beispiel laute Schlaggeräusche bei einer Maschine hören, hören wir grösstenteils Eigenschwingungen der Teile der Maschine. Die eigentlich entstandenen Geräusche sind kurze Impulse; diese werden jedoch auf die Teile der Maschine übertragen, welche die Eigenfrequenzen aus den Spektren der Impulse verstärken. Diese durch die Teile der Maschine verstärkten Frequenzen nehmen wir am lautesten wahr, der eigentliche Impuls wird übertönt.³¹

³⁰ vgl. Kuttruff, 2004, S. 141-142, 158-171, 250-257; vgl. Muzzolini, 2004, S. 92-96, 116-118; vgl. Neukom, 2003, S. 45-47; vgl. Raffaseder, 2002, S. 55-59; vgl. Taylor, 1994, S. 53-61

³¹ vgl. Kuttruff, 2004, S. 302

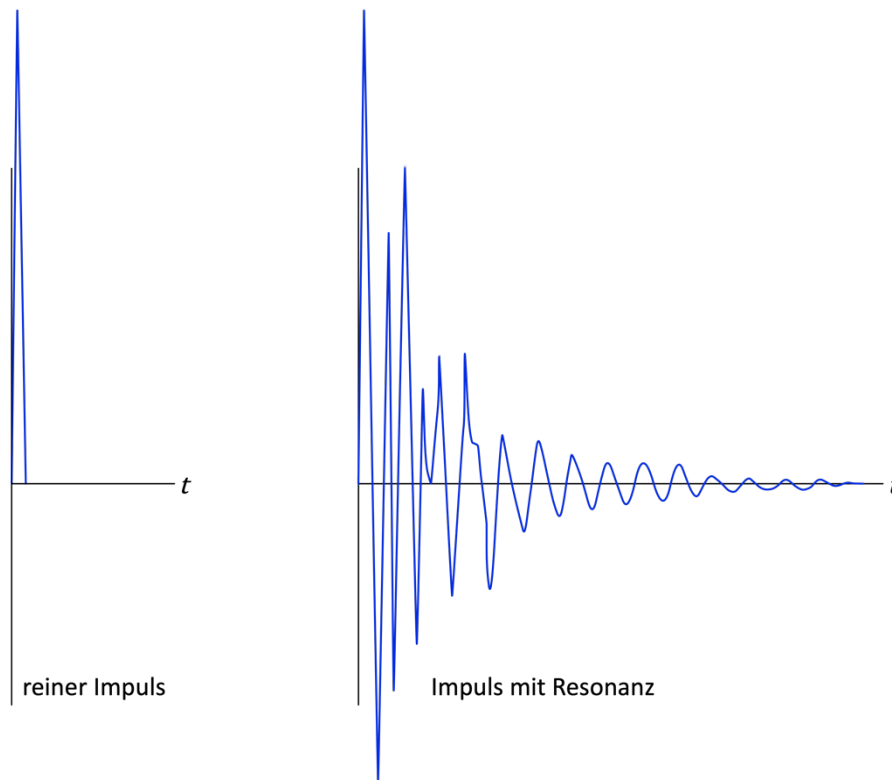


Abbildung 12: Die reine Welle eines Impulses und diese mit Resonanz³²

3.11. Erzwungene Schwingung

Bringt eine periodische Kraft einen Körper mit beliebiger Frequenz zum Schwingen, führt dies nach einer Einschwingungszeit zur erzwungenen Schwingung. Die erzwungene Schwingung ist eine Eigenschwingung, die ihren Klangkörper zu weiteren Schwingungen anregt. Auch das ist Resonanz.³³

3.12. Unmögliche Wellen

Die Welle einer Schwingung kann keine Ecken haben; denn eine Ecke in der Welle würde bedeuten, dass sich der Klangkörper unendlich schnell beschleunigen könnte. Annäherungen sind möglich; nur bei der elektronischen Klangsintese ist es jedoch

³² Kuttruff, 2004, S. 303

³³ vgl. Neukom, 2003, S. 48; vgl. Raffaseder, 2002, S. 53-54

möglich, eine solche Ecke in die Schallwelle einzuprogrammieren. Um diese Wellen dann hörbar zu machen, müssen sie in Schall umgewandelt werden, wobei Ecken abgerundet werden.³⁴

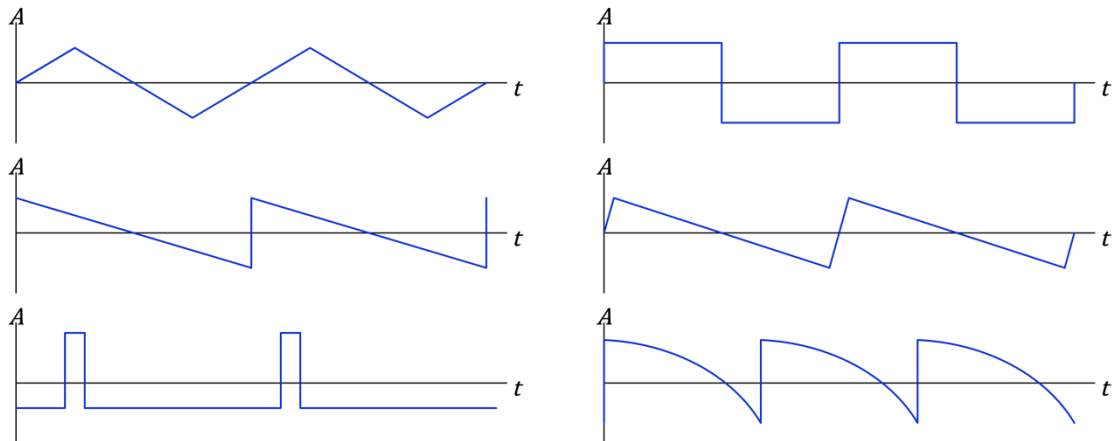


Abbildung 13: Diese eckigen Schwingungen existieren nur in der Theorie³⁵

4. Schallausbreitung

Die Schallausbreitung hängt von Raum und Medium ab. Die Geschwindigkeit, mit der sich eine Schwingung in einem Medium ausbreitet, nennt man die Phasengeschwindigkeit. Diese hängt vom Medium sowie dessen Temperatur ab. Dabei sind die Dichte und Konsistenz des Mediums zentral. Im Medium Luft beträgt die Phasengeschwindigkeit bei einer Temperatur von 20 °C rund 343 m/s.³⁶

4.1. Huygen'sches Prinzip

Das Huygen'sche Prinzip beschreibt das Verhalten von Wellen und ist somit sehr zentral in der Akustik. «Dieses Prinzip besagt, dass in jedem Moment von jedem Punkt eine neue

³⁴ vgl. Neukom, 2003, S. 49

³⁵ Neukom, 2003, S. 49

³⁶ vgl. Raffaseder, 2002, S. 20, 67-68

sogenannte Elementarwelle ausgeht und der Zustand der Welle im jeweils folgenden Moment sich aus der Einhüllenden dieser Elementarwelle ergibt»³⁷.

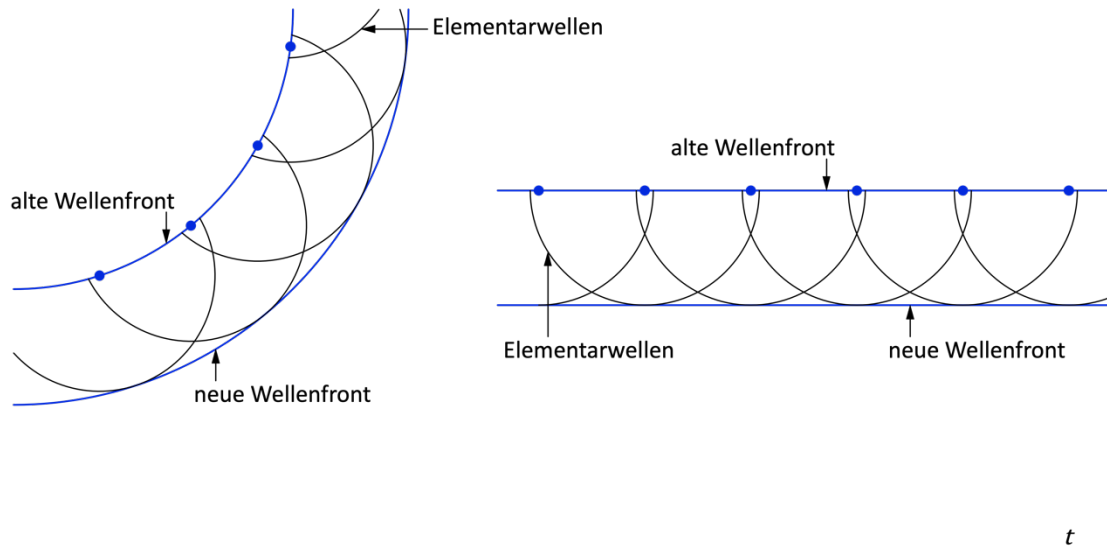


Abbildung 14: Die Elementarwellen zeigen auf, wie jeder Punkt auf einer Wellenfront expandieren will³⁸

4.2. Reflexion

«Mit dem Huygen'schen Prinzip lässt sich das Reflexionsgesetz herleiten, welches besagt, dass Einstrahlungswinkel und Abstrahlungswinkel gleich sind. Die folgende Abbildung zeigt eine gerade, von links oben kommende Wellenfront, die an einem horizontalen Hindernis reflektiert wird. Senkrecht zur Wellenfront sind einige Wellennormalen oder Strahlen a, b, c und d eingezeichnet, die das Hindernis in den Punkten A, B, C und D treffen. Bis die Welle in D eintrifft, hat sie in A, B und C das Hindernis bereits erreicht und die Elementarwellen K_a , K_b und K_c ausgelöst. Die Einhüllende der Elementarwellen ist die ausgezogene Gerade, die denselben Winkel zum Hindernis einschliesst wie die einfallende Wellenfront. Dass der Winkel gleich ist, erkennt man zum Beispiel an Strahl b, der in B die Elementarwelle K_b auslöst, deren momentaner Radius der Länge von Strahl b von der gestrichelten

³⁷ Neukom, 2003, S. 64-65

³⁸ Neukom, 2003, S. 64

Wellenfront bis B entspricht»³⁹. Sind die Oberflächen glatt, wird der Schall regelmässig reflektiert. Ist diese hingegen rau, so resultiert eine diffuse Reflexion. Ob eine Oberfläche als glatt oder rau gilt, hängt vom Verhältnis zwischen der Wellenlänge und der Oberflächenstruktur ab. Liegen die Unebenheiten einer Oberfläche in der Grössenordnung der Wellenlänge, gilt sie als rau und sorgt für diffuse Reflexionen. Deshalb werden verschiedene Frequenzen bei derselben Oberfläche unterschiedlich reflektiert.⁴⁰

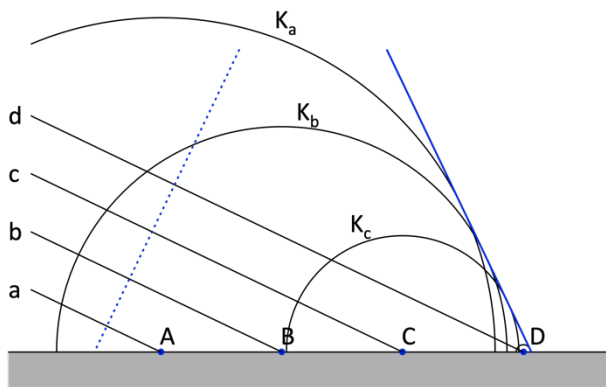


Abbildung 15: Mit dem Huygen'schen Prinzip lässt sich das Reflexionsgesetz herleiten⁴¹

4.3. Refraktion

Wenn eine Schallwelle auf ein Hindernis stösst, wird ein Teil nach dem Reflexionsgesetz reflektiert, ein weiterer Teil der Schwingung wird absorbiert und auf das Hindernis übertragen. Dieser Vorgang ist frequenzabhängig; je nach Oberfläche und Material werden gewisse Frequenzen stärker reflektiert oder auf das Hindernis übertragen. Die vom Hindernis aufgenommene Schwingung hat also das Medium gewechselt. Dies ist Refraktion beziehungsweise Absorption. Schwingungen bewegen sich in verschiedenen Medien mit unterschiedlicher Phasengeschwindigkeit. Eine Schwingung trifft auf ein Hindernis auf, ein Teil der Welle wird an der Grenzfläche reflektiert, ein anderer Teil läuft

³⁹ Neukom, 2003, S. 64-65

⁴⁰ vgl. Raffaseder, 2002, S. 73; vgl. Taylor, 1994, S. 236-237

⁴¹ Neukom, 2003, S. 65

im Medium des Hindernisses weiter, in eine neue Richtung. In der Abbildung ist die Phasengeschwindigkeit des Hindernisses tiefer als die der Luft. Deshalb ist der Radius der Elementarwelle K_b kleiner als die Länge des Strahls b von der gestrichelten Wellenfront bis B. Deshalb knicken die Strahlen a, b, c und d nach unten ein.⁴²

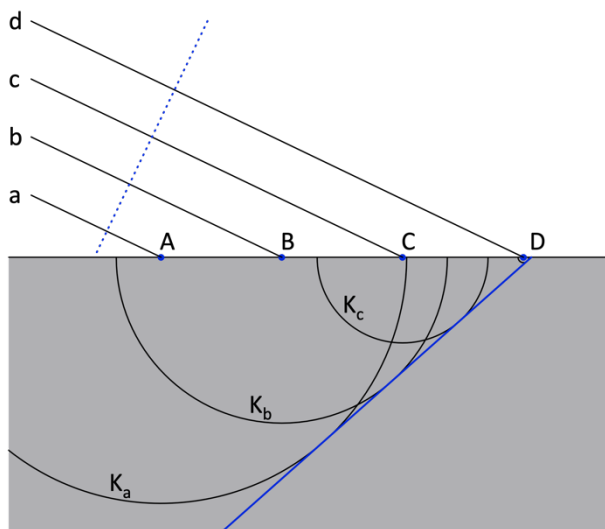


Abbildung 16: Refraktion durchs Huygen'sche Prinzip erklärt⁴³

Refraktion tritt nicht nur bei Grenzflächen auf, sondern auch bei kontinuierlichen Übergängen. So werden zum Beispiel Schallwellen in Bodennähe gekrümmt, da die Luft in Bodennähe kälter ist und deshalb eine tiefere Phasengeschwindigkeit hat. Auch dieser Faktor spielt mit, wenn ein akustischer Ton in einem Raum möglichst genau mit digitalen Mitteln synthetisiert werden soll.⁴⁴

4.4. Beugung von Schall

Mit dem Huygen'schen Prinzip lässt sich auch erklären, weshalb sich Schall um Hindernisse herumbeugt. Dabei ist die Frequenz entscheidend. Je tiefer die Frequenz, desto stärker beugt sich eine Welle. Wenn eine longitudinale Schwingung auf eine Fläche mit Spalt

⁴² vgl. Kuttruff, 2004, S. 250-255; vgl. Neukom, 2003, S. 65-66; vgl. Raffaseder, 2002, S. 73-74

⁴³ Neukom, 2003, S. 66

⁴⁴ vgl. Neukom, 2003, S. 66

auftrifft, wird ein Teil reflektiert, ein Teil auf das Hindernis übertragen und ein Teil absorbiert. Der Teil der Schwingung, der durch den Spalt kommt, läuft nicht einfach gerade aus, er streut sich. Da dieser Punkt nun neben sich keine Wellenfläche mehr hat, beugt er sich und breitet sich in alle Richtungen aus.⁴⁵

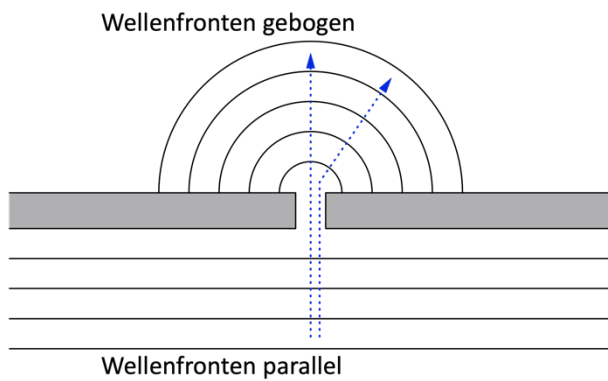


Abbildung 17: Schallwellen beugen um Hindernisse herum⁴⁶

4.5. Dämpfung von Schall

Diese Prinzipien der Reflexion, Refraktion und Beugung werden bei der Schalldämpfung genutzt. Das dämpfende Material ist sehr fein, die einzelnen Teile haben viel Luft zwischen sich. Trifft eine Schallwelle auf ein Teilchen, wird diese zu einem Teil in verschiedene Richtungen reflektiert und zu einem anderen Teil absorbiert. Die Beugung des Schalls um die Teilchen verteilen die Schallwellen weiter. So wird nur sehr wenig Schall zurückreflektiert.⁴⁷

⁴⁵ vgl. Neukom, 2003, S. 66-67; vgl. Raffaseder, 2002, S. 75-76

⁴⁶ Neukom, 2003, S. 66

⁴⁷ vgl. Kuttruff, 2004, S. 128-132

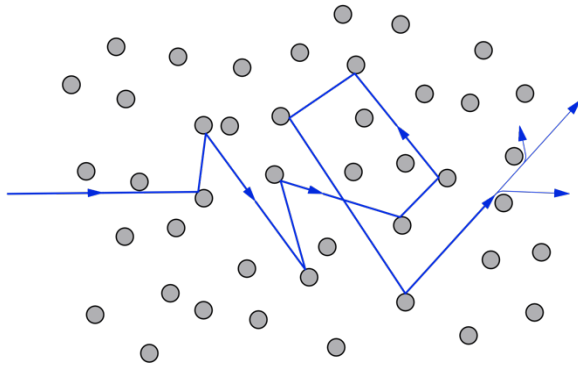


Abbildung 18: Streuung und Beugung von Schall in Schaumstoff⁴⁸

4.6. Dopplereffekt

Wenn sich Schallquelle und -empfänger aufeinander zu oder weg bewegen, ändert sich die Frequenz. Wenn sie sich nähern, erhöht sich die Frequenz, wenn sie sich entfernen, sinkt die Frequenz. Dies nennt man den Dopplereffekt.⁴⁹

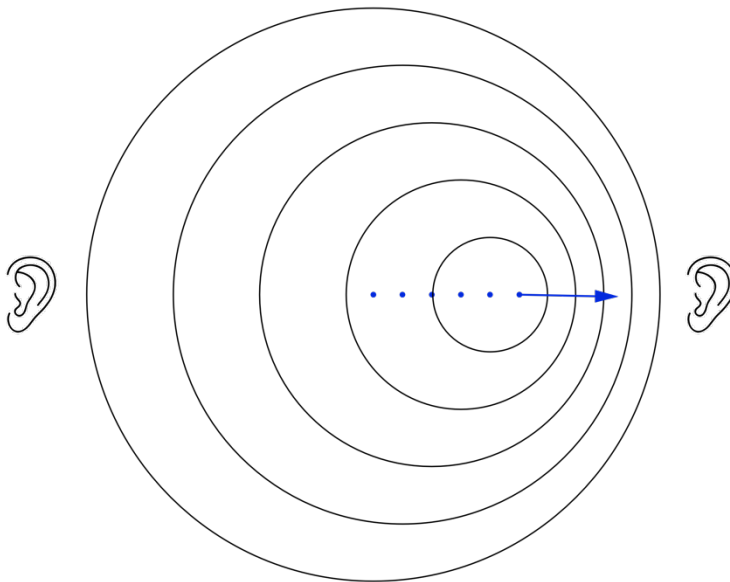


Abbildung 19: Dopplereffekt; die blauen Punkte stellen die Schallquelle im Verlauf der Zeit dar⁵⁰

⁴⁸ Kuttruff, 2004, S. 129

⁴⁹ vgl. Neukom, 2003, S. 67-68

⁵⁰ Neukomm, 2003, S. 67

Wenn sich der Sender nun gleich schnell wie die Wellen bewegt, gibt es eine Kollision zwischen einer und der folgenden Wellenfront. Daraus resultiert ein Knall, der Überschallknall.

5. Erstes Zwischenfazit

Töne und Geräusche unterscheiden sich. Während aperiodische Schwingungen durch ihr Frequenzspektrum charakterisiert werden, wird ein Ton nach akustischer Definition durch Frequenz, Amplitude und Phasenwinkel bestimmt. Komplexer sind die Ausbreitung und Überlagerung von Schall. Schall entsteht durch die Anregung eines elastischen Körpers, welcher die durch Resonanz verstärkten Schwingungen auf die Luft überträgt. Dabei bestimmt das Huygen'sche Prinzip die Ausbreitung.

Diese Grundlagen machen die Komplexität der Akustik deutlich, was den Aufwand und die Schwierigkeiten der Reproduktion akustischer Schwingungen durch analoge und digitale Klangsynthese erklärt.

III. Psychoakustik, Musik und erweiterte Grundlagen der Akustik

Die Psychoakustik beschreibt die Wahrnehmung von Schall. Dabei stehen Tonhöhe, Klangfarbe und Lautheit im Zentrum. Hören wir einen Ton, so können wir diesen anhand von Tonhöhe, Klangfarbe und Lautstärke identifizieren. Diese Faktoren werden durch die Akustik bestimmt und mithilfe von Musiktheorie systematisiert.⁵¹

1. Tonhöhe

Was hören wir überhaupt? Das menschliche Ohr kann alle Töne und Geräusche mit einer Frequenz zwischen 16 und 20'000 Hz wahrnehmen. Davon gelten 25 bis 5'000 Hz als musikalische Frequenzen, manche Instrumente erreichen sogar 12'000 Hz. Eine Änderung der Tonhöhe können wir in optimalen Frequenzbereichen bei 0.3% Unterschied der Frequenz wahrnehmen. Bei den optimalen Frequenzen von 1'000 bis 3'000 Hz sind es 3 bis 9 Hz. Bei 100 Hz können wir nur noch einen Unterschied von 3% wahrnehmen, was 3 Hz entspricht.⁵²

Wenn die Frequenz eines Tons verdoppelt wird, liegt der folgende Ton eine Oktave höher. Wird die Frequenz erneut verdoppelt, so nehmen wir die Tonhöhe erneut als eine Oktave höher wahr. Wir hören also bei einer exponentiellen Zunahme der Frequenz eine lineare Zunahme der Tonhöhe. Bei einer linearen Frequenzzunahme steigt die Tonhöhe also logarithmisch.⁵³

⁵¹ vgl. Raffaseder, 2002, S. 21-23

⁵² vgl. Litzow, 2021, S. 10-11; vgl. Neukom, 2003, S. 68; vgl. Raffaseder, 2002, S. 95-98; vgl. Taylor, 1994, S. 10-12, 20

⁵³ vgl. Kuttruff, 2004, S. 235; vgl. Litzow, 2021, S. 12; vgl. Neukom, 2003, S. 68-69

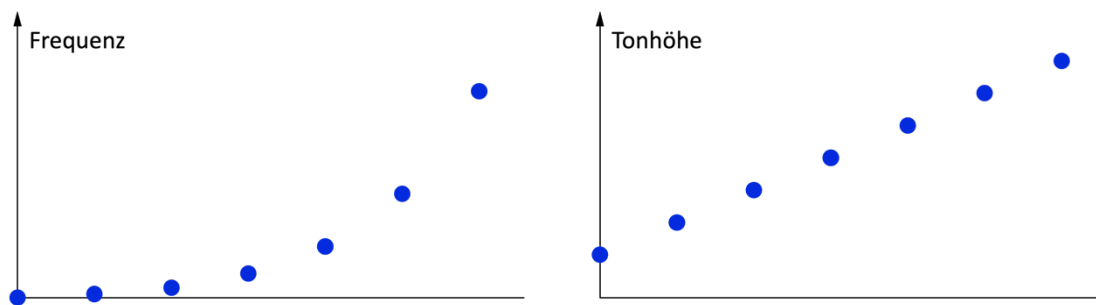


Abbildung 20: Bei einer exponentiellen Zunahme der Frequenz nehmen wir eine lineare Zunahme der Tonhöhe wahr⁵⁴

Differenzen der Tonhöhe werden im diatonischen System in Intervallen gemessen. Intervalle sind nichts anderes als Verhältnisse von Frequenzen zweier Töne. So hat die Oktave das Verhältnis 2: 1; es wird die Frequenz des Grundtons also verdoppelt. Bei einer Quinte gilt das Verhältnis 3: 2.⁵⁵

Tabelle 2: Verhältnis von Intervallen⁵⁶

Reine Prim	Kleine Sekunde	Grosse Sekunde	Kleine Terz	Grosse Terz	Reine Quart	Tritonus	Reine Quinte	Kleine Sext	Grosse Sext	Kleine Septime	Grosse Septime	Reine Oktave
1: 1	16: 15	9: 8, 10: 9	6: 5	5: 4	4: 3	25: 18	3: 2	8: 5	5: 3	9: 5	15: 8	2: 1

Doch das diatonische System ist nicht perfekt. Werden 12 reine Quinten addiert, sollten eigentlich 7 Oktaven resultieren. Dies ist jedoch nicht der Fall: $\left(\frac{3}{2}\right)^{12} / 2^7 = 129.746337890625/128$. Also eine Abweichung von $\frac{81}{80}$, die syntonisches Komma heisst. Dies ist ein «Fehler» in unserer Musiktheorie. Er wurde damit behoben, dass Instrumente in die temperierte Stimmung umgestimmt wurden. Es werden keine reinen Quinten (3:2) gespielt, sondern gleichschwebend temperierte Quinten (1,49831: 1). So ist die Abweichung des syntonischen Kommas auf 12 Quinten verteilt.

⁵⁴ Neukom, 2003, S. 68

⁵⁵ vgl. Litzow, 2021, S. 12-18; vgl. Neukom, 2003, S. 70-72; vgl. Taylor, 1994, S. 195-197

⁵⁶ Litzow, 2021, S. 16, 25

Auch alle anderen Intervalle werden gleichschwebend temperiert gestimmt; so sind zwar die Intervalle nicht ganz exakt, was jedoch fast nicht hörbar ist. Auf der anderen Seite geht dafür das System der Intervalle auf.⁵⁷

Das menschliche Unterscheidungsvermögen von Frequenzen beziehungsweise das Erkennen von Intervallen in extremen Lagen ist eingeschränkt. So empfinden wir Intervalle mit hohen Frequenzen als zu klein. Bei grosser Lautstärke klingen hohe Töne noch höher und tiefe noch tiefer (siehe Seite 38).⁵⁸

2. Klangfarbe

Die Klangfarbe, auch Timbre genannt, ist physikalisch schwieriger zu definieren als Tonhöhe oder Lautstärke. Dies liegt daran, dass die Klangfarbe eines Tones durch viele verschiedene physikalische Eigenschaften bestimmt wird. Es gibt sehr viele verschiedene Klangcharakteren; ihre Einteilung und Beschreibungen sind subjektiv. Die Klangfarbe wird nicht nur durch die Form der Welle charakterisiert, sondern hauptsächlich durch das Spektrum an Frequenzen und deren zeitliche Entwicklung. Beim Spektrum einer Schallwelle spricht man von den verschiedenen Frequenzen der Wellenkomponenten im Zusammenhang mit ihrer Lautstärke. Wird ein Spektrum graphisch dargestellt, entspricht die X-Achse der Frequenz und die Y-Achse der Amplitude, selten auch der Intensität, der Leistung oder dem Pegel. Für die Klangfarbe ist es entscheidend, welche Frequenzen sich wie weit im Spektrum der Obertöne erstrecken, welche von diesen stark sind und wie sich diese im Verlauf der Zeit entwickeln.⁵⁹

⁵⁷ vgl. Muzzolini, 2004, S. 18-20; vgl. Raffaseder, 2002, S. 102-104; vgl. Taylor, 1994, S. 198-200

⁵⁸ vgl. Neukom, 2003, S. 83-84

⁵⁹ vgl. Kuttruff, 2004, S. 201-203, 23-27; vgl. Litzow, 2021, S. 11; vgl. Moore, 2013, S. 6-9, 429; vgl.

Muzzolini, 2004, S. 108-111, 183, 200, 263; vgl. Neukom, 2003, S. 72-74; vgl. Raffaseder, 2002, S. 104-109;

vgl. Strawn, 1985, S. 35-36

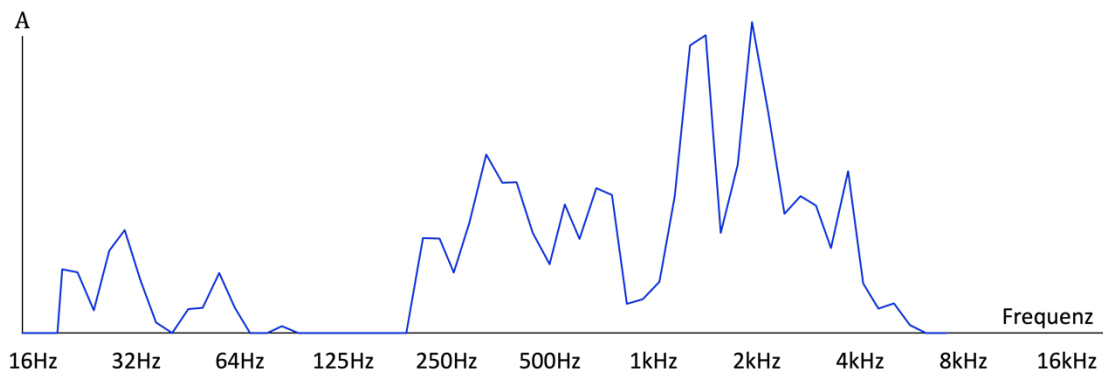


Abbildung 21: Spektrum eines schrillen, quietschenden Klanges (eigene Darstellung)

2.1. Obertöne

Bei einem Ton schwingen immer neben dem Grundton auch Obertöne mit. Diese haben eine höhere Frequenz und eine kleinere Amplitude als der Grundton. Lautere, starke Obertöne bestimmen die Klangfarbe. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Obertöne phasenverschoben sind, ausser mehrere befinden sich innerhalb derselben kritischen Bandbreite (siehe Seite 37). Formanten spielen dabei eine grosse Rolle. Verschiedene Klangkörper verstärken verschiedenen Obertöne unterschiedlich stark. Die am meisten durch den Klangkörper verstärkten Obertöne werden Formanten genannt.⁶⁰

Bei allen Klängen treten dieselben Obertöne auf, nur werden diese Sinustöne verschieden verstärkt. Der tiefste Oberton ist die Oktave relativ zum Grundton. Der danach nächst höhere Oberton ist eine Quint höher, der nächste eine Quart. Die Frequenzen der Obertöne sind also ein ganzzahliges Vielfaches der Frequenz des Grundtons.⁶¹

⁶⁰ vgl. Litzow, 2021, S. 12; vgl. Neukom, 2003, S. 74; vgl. Raffaseder, 2002, S. 34-35, 52; vgl Taylor, S. 67-70

⁶¹ vgl. Litzow, 2021, S. 12; vgl. Muzzolini, 2004, S. 255-257; vgl. Neukom, 2003, S. 74

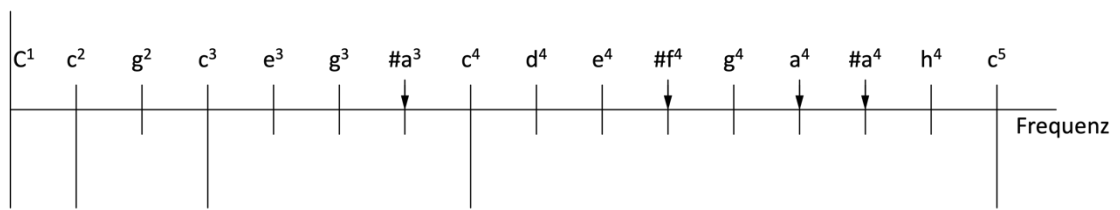


Abbildung 22: Obertonreihe auf der Skala der Frequenz⁶²

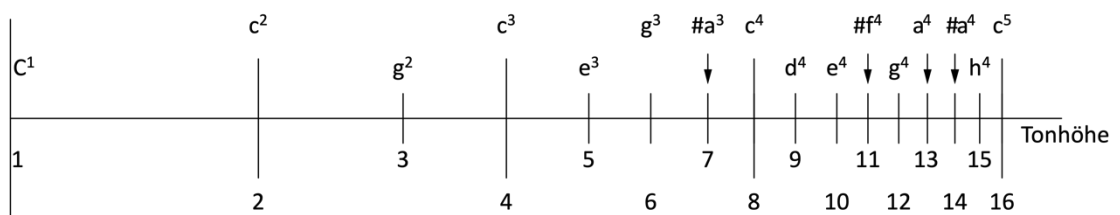


Abbildung 23: Obertonreihe auf der Skala der Tonhöhe⁶³

2.2. ADSR-Klangverlauf

Nicht nur das Spektrum eines Klanges, also die Obertöne an sich, ist entscheidend für die Klangfarbe; auch dessen Entwicklung im Verlauf der Zeit prägt die Klangfarbe sehr. Der Verlauf der Lautstärke eines erklingenden Tones kann durch eine Hüllkurve dargestellt werden. Diese Hüllkurve wird zeitlich in 4 Phasen eingeteilt. Die erste Phase wird Attack genannt und beinhaltet den Einschwingvorgang. Während dieser Phase steigt die Hüllkurve des Tons steil an, auf den höchsten Wert des Tons. Darauf folgt die Decay Phase. Während dieser Phase fällt die Hüllkurve ab. Weiter kommt die Sustain Phase. Die Sustain Phase wird durch das Aushalten des Tons definiert, die Höhe der Hüllkurve bleibt konstant. Die letzte Phase ist die Release Phase. Die Release Phase bezeichnet das Ausklingen des Tons, die Hüllkurve sinkt und gleicht sich der Amplitude 0 an. Aus diesem Grund wird der Verlauf eines Tons ADSR-Verlauf genannt. Neben dem ADSR-Klangverlauf gibt es auch den

⁶² vgl. Litzow, 2021, S. 12

⁶³ Litzow, 2021, S. 12

AD- sowie den ASD-Verlauf. Alle Schallsignale, welche durch eine einmalige Anregung ausgelöst worden sind, also alle perkussiven Klänge, haben einen AD-Verlauf, ihre Hüllkurve besteht nur aus Attack und Decay Phase. Die ASD-Hüllkurve wird von verschiedensten Synthesizern benutzt und stellt eine Vereinfachung des ADSR-Verlaufs dar. Die ADSR-Hüllkurve beeinflusst den Klang eines Tones stark. Vor allem die Attack Phase beeinflusst die Wahrnehmung eines Klanges. Während dieser Phase verändert sich das Spektrum der Frequenzen stark. Die Attack Phase dauert kann von wenigen Millisekunden bis zu 0.2 Sekunden dauern. Die Attack Phase ist sehr wichtig für unser Hörempfinden, wir können einen Ton schon während des Einschwingvorgangs erkennen; laut Taylorschem Paradoxon sind alle Unterschiede im Klang in der Einschwingphase lokalisierbar. Umgekehrt haben wir Mühe, einen Ton, bei dem der Einschwingvorgang fehlt, zu identifizieren. Während des ADSR-Klangverlaufs verändert sich nicht nur die Lautstärke, sondern vor allem die Zusammensetzung des Spektrums massiv.⁶⁴

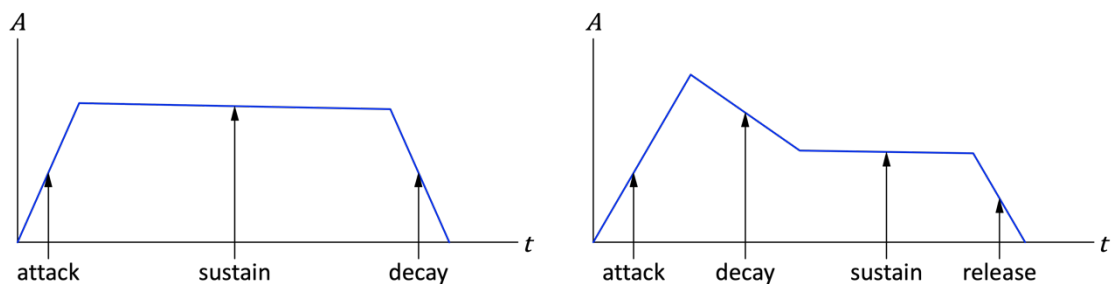


Abbildung 24: Beispiele für ASD- und ADSR-Hüllkurven⁶⁵

2.3. Residualton

Unser Ohr identifiziert die Tonhöhe nicht nur durch die Frequenz des Grundtones, sondern auch durch die mitklingenden Obertöne. Es erkennt die Tonhöhe durch die Periodendauer.

⁶⁴ vgl. Muzzolini, 2004, S. 113; vgl. Neukom, 2003, S. 74-75; vgl. Raffaseder, 2002, S. 41-42; vgl. Taylor, 1994, S. 92-96

⁶⁵ Neukom, 2003, S. 75

Erklingen mehrere Sinustöne, deren Frequenzen alle ein Vielfaches einer gemeinsamen Frequenz f sind und somit der Obertonreihe der gemeinsamen Frequenz f angehören, hören wir den Ton mit der Frequenz f , obwohl dieser selbst gar nicht erklingt. Dieser in der Realität gar nicht erklingende Ton nennt man Residualton. Ein Residualton nehmen wir auch bei geringer Lautstärke wahr, im Gegensatz zum Fall, wenn der Grundton wirklich erklingt. Auch haben wir nicht dieses Druckgefühl auf den Ohren, wenn wir einen Residualton «hören», der normal wäre, wenn der Grundton wirklich erklingen würde. So können wir bei einem Telefongespräch, bei dem tiefe Frequenzen nicht übertragen werden, trotzdem die Tonlage des Sprechenden erkennen. Bei manchen Instrumenten sind die eigentlichen Grundtöne nicht hörbar, so zum Beispiel bei tiefen Orgelpfeifen. Auch hier hören wir durch das Phänomen des Residualtons den Grundton. Das Phänomen des Residualtons wird zum Beispiel bei Smartphones genutzt, um tiefe Töne zu imitieren, da in den Geräten kein Platz für einen Basslautsprecher vorhanden ist, um den Ton wirklich zu erzeugen.⁶⁶

3. Fouriertransformation

Der Grundton und die dazugehörigen Obertöne werden von unserem Gehör als ein einzelner Klang wahrgenommen. Nicht alle Sinustöne verschmelzen zu einem Klang. Wenn unser Ohr Schall wahrnimmt, analysiert unser Gehör diesen, es nimmt im Wesentlichen eine Fouriertransformation vor. Die Fouriertransformation ist eine mathematische Funktion, mit der viele Probleme gelöst werden können. In der Akustik wird sie gebraucht, um aus Klängen, also der Superposition von vielen Tönen, die einzelnen (Sinus- und Kosinus-)Töne zu erkennen.⁶⁷

⁶⁶ vgl. Kuttruff, 2004, S. 234-235; vgl. Muzzolini, 2004, S. 309-311; vgl. Neukom, 2003, S. 77

⁶⁷ vgl. Muzzolini, 2004, S. 257-261

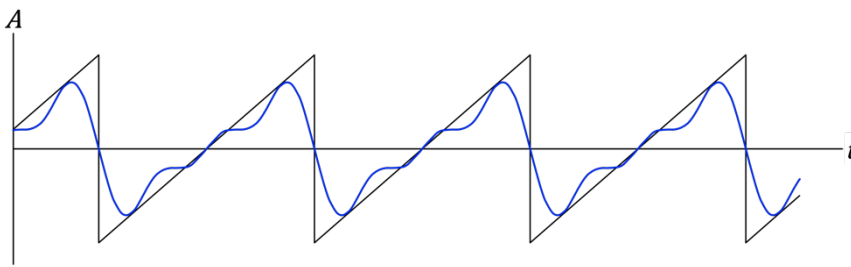


Abbildung 25: Die Fourierzerlegung einer Sägezahnwelle durch drei Teilfrequenzen⁶⁸

Bei der Fouriertransformation wird davon ausgegangen, dass jede Schwingung periodisch ist; wenn auch nur in der Unendlichkeit. Dadurch ist es möglich, jede Schwingung als Superposition unendlich vieler Sinus- und Kosinusschwingungen zu verstehen. Diese einzelnen Teilschwingungen werden Fourierkomponenten genannt. Es gibt die kontinuierliche Fouriertransformation; ein theoretisches, analoges Modell. Diese kann nicht mathematisch umgesetzt werden, es können nicht unendlich viele sich überlagernde Töne errechnet werden. Aufgrund dessen kommt die DFT, die diskrete Fouriertransformation ins Spiel. Diese funktioniert durch ein digitales Prinzip. Bei dieser wird mit einer bestimmten Abtastrate, auch Samplerate genannt, die Schwingung analysiert. Die maximale Frequenz der errechneten Töne kann maximal die Hälfte der Samplerate betragen, wie die Nyquisttheorie besagt (siehe Seite 75). Bei einer typischen Samplerate von 44'100 Hz, wie beispielsweise bei CDs, können also Töne mit maximal 22'050 Hz errechnet werden, also klar über dem hörbaren Bereich. Um die diskrete Fouriertransformation effizient umsetzen zu können, wurde die FFT, die Fast-Fourier-Transformation, geschaffen; eine effiziente Software zur Fourieranalyse. Mithilfe der Fouriertransformation können zum Beispiel bei einem digitalen Equalizer gewisse Frequenzen herausgefiltert, gestärkt oder gedämpft werden. Im Fall unseres Ohrs können wir verschiedene Töne wahrnehmen, nicht nur einen einzigen Klang, wie das akustische Ohm'sche Gesetz besagt. Grundtöne verschmelzen trotzdem mit ihren natürlichen Obertönen zu einem Klang. Bei elektronischer Musik, insbesondere bei statischen Tönen, ist die Zuordnung der Obertöne zum Grundton oft unklar. Je isolierter die Obertöne im

⁶⁸ Kuttruff, 2004, S. 24

Spektrum sind, desto eher nehmen wir sie als einzelne Töne wahr. Wenn ein Oberton zuerst isoliert ist und nach und nach von weiteren Obertönen eingebettet wird, verschmelzen die zuerst einzeln wahrgenommenen Töne zu einem Klang.⁶⁹

4. Lautstärke

Schallwellen transportieren Energie; je mehr transportierte Energie vorhanden ist, desto lauter nehmen wir ein Ton wahr. Die von ihnen abgegebene Energie pro Sekunde wird Schallleistung genannt und in Watt gemessen. Die Schallleistung beim Sprechen entspricht etwa 0.00001 Watt, während sie bei einem Konzertflügel etwa 0.2 Watt beträgt. Der Schall verteilt sich im Raum, es kommt also nur ein kleiner Teil der Energie beim Trommelfell an. Die auf einer Fläche, hier dem Trommelfell, ankommende Energie ist die Schallstärke, auch Schallintensität genannt. Diese wird in Watt pro Quadratcentimeter gemessen. Bereits 10^{-12} Watt/cm² Schallintensität kann bei Menschen zu Hörempfindungen führen; dieser Punkt wird Gehörschwelle genannt. Die Schallstärke ist proportional zum Quadrat der Amplitude A und zum Quadrat der Frequenz f . Es gilt also: Schallintensität = $A^2 * f^2$. Wenn also die Frequenz verdoppelt wird, ist die Schallstärke bei gleicher Amplitude vierfach so gross. Da die Schallstärke proportional zum Quadrat der Entfernung abnimmt und proportional zum Quadrat der Amplitude ist, nimmt die Amplitude proportional zur Entfernung ab.⁷⁰

4.1. Lautheit

Es gibt die Lautstärke und die Lautheit. Die Lautstärke ist der effektive Schalldruck, die Lautheit beschreibt die empfundene Lautstärke. Die Lautstärke wird in dB(SPL) gemessen.

⁶⁹ vgl. Hussmann, 2014, S. 2-18, abgerufen von

<https://www.medien.ifi.lmu.de/lehre/ws1314/dm/vorlesung/dm2a.pdf>; vgl. IMG Stageline, 2022, abgerufen von <https://www.img-stageline.de/magazin/nyquist-shannon-theorem#:~:text=Das%20Nyquist%2DShannon%2DTheorem%2C,sp%C3%A4ter%20wieder%20h%C3%B6rbar%20gemacht%20werden>; vgl. Kuttruff, 2004, S. 22-28; vgl. Moore, 2013, S. 4-9, vgl. Muzzolini, 2004, S. 257-261, 349-352; vgl. Neukom, 2003, S. 76-77; vgl. Raffaseder, 2002, S. 34-35, 39-40; vgl. Taylor, 1994, S. 80-83; vgl. Strawn, 1985, S. 20-30, 37-39

⁷⁰ vgl. Neukom, 2003, S. 78; vgl. Raffaseder, 2002, S. 70-72; vgl. Taylor, 1994, S. 20-22

dB(SPL) bedeutet Decibel Sound Pressure Level, auf deutsch Dezibel Schalldrucklevel. Dezibel ist eine relative Einheit. Die aktuelle Lautstärke wird dabei ins Verhältnis mit einem Vergleichswert gesetzt. Dieser liegt bei dB(SPL) bei $2 \mu\text{pa}$ beziehungsweise $2 * 10^{-5} \text{pa}$, also 0.00002 Pascal. Dies entspricht der Hörschwelle, umgerechnet in die Schallintensität also $10^{-12} \text{ Watt/cm}^2$. Unser Gehör empfindet Lautstärke frequenzabhängig. Bei der gleichen Lautstärke empfinden wir einen Ton mit etwa 4'000 Hz als am lautesten. Es gilt grob: Je weiter weg die Frequenz eines Tones von 4'000 Hz liegt, desto leiser empfinden wir ihn. Die empfundene Lautstärke wird in Phon gemessen; 40 dB(SPL) entsprechen bei 1'000 Hz 40 Phon. Eine Verdopplung der Schallstärke entspricht einer Verdopplung der Energie der Schallwelle, jedoch nicht des dB-Wertes. +3 dB entspricht einer Verdopplung der Energie; +6 dB entspricht einer Verdopplung der Amplitude, diese ist also exponentiell von der Energie abhängig. +10 dB entsprechen einer Verdopplung der wahrgenommenen Lautstärke beziehungsweise Lautheit. Um den unpraktischen Fakt zu umgehen, dass eine Verdopplung der Lautheit nicht der Verdopplung der Phon entspricht, sondern eben +10 Phon, wurde die Einheit Sone eingeführt. 1 Sone entspricht dabei 40 Phon. Eine verdoppelte Lautheit, also 50 Phon, entsprechen einer Verdopplung des Sone-Wertes, also 2 Sone. Die Hörschwelle entspricht allerdings 0 Sone.⁷¹

⁷¹ vgl. Kuttruff, 2004, S. 237-241; vgl. Muzzolini, 2004, S. 266-268; vgl. Neukom, 2003, S. 79-80; vgl. Raffaseder, 2002, S. 90-93; vgl. Taylor, 1994, S. 23-24

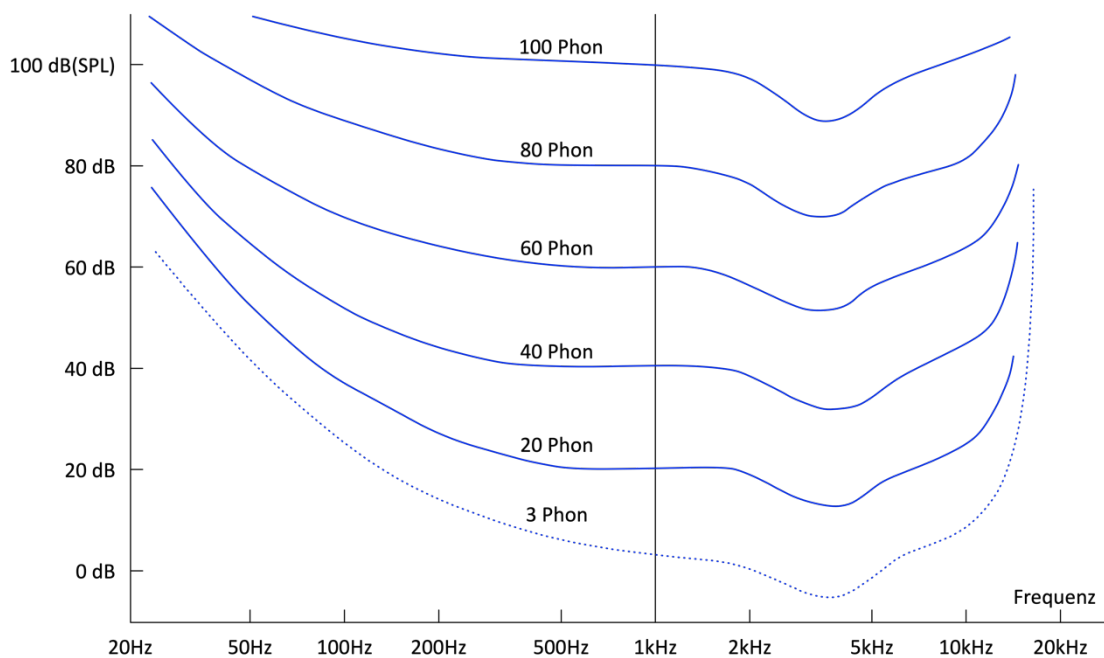


Abbildung 26: Kurven gleicher Lautstärke⁷²

4.2. Weitere Lautstärkeeinheiten

Neben dem dB(SPL), dem Schalldruck, gibt es auch dB(A), dB(C) und weitere Dezibel Einheiten, die eine spezielle Fachanwendung haben. dB(A) wird oft benutzt, es soll die Lautheit nachempfinden. Dabei entspricht dB(A) der Kurve von 40 Phon. Deshalb ist die Angabe von dB(A) nur bei 40 Phon der Lautheit entsprechend, was nicht selten missbraucht wird. So weichen alle Angaben in dB(A) bei anderen Frequenzen als 1'000 Hz ausser 40 dB(A) von der dB(SPL) wie auch der Phon Skala ab und entsprechen somit weder der Lautstärke noch der Lautheit. So entspricht zum Beispiel ein 40 dB(A) lauter Ton mit einer Frequenz von 50 Hz 40 Phon, während derselbe Ton mit 80 dB(A) etwa 100 Phon entspricht. dB(C) entspricht der Kurve von 80 Phon, es wird bei lauten Geräuschen verwendet, zum Beispiel bei Lärmangaben von Flugzeugen.⁷³

⁷² Kuttruff, 2004, S. 237

⁷³ vgl. Neukom, 2003, S. 78-79

4.3. Schmerzgrenze unseres Gehörs

Die Schmerzgrenze unseres Gehörs liegt etwa bei 120-130 dB(SPL). Der Unterschied zwischen minimalem und maximalem Pegel wird als Dynamik bezeichnet und in Dezibel gemessen. Die Dynamik beim Sprechen beträgt zum Beispiel 50 dB, während diese bei einem Orchester etwa 70 dB entspricht.⁷⁴

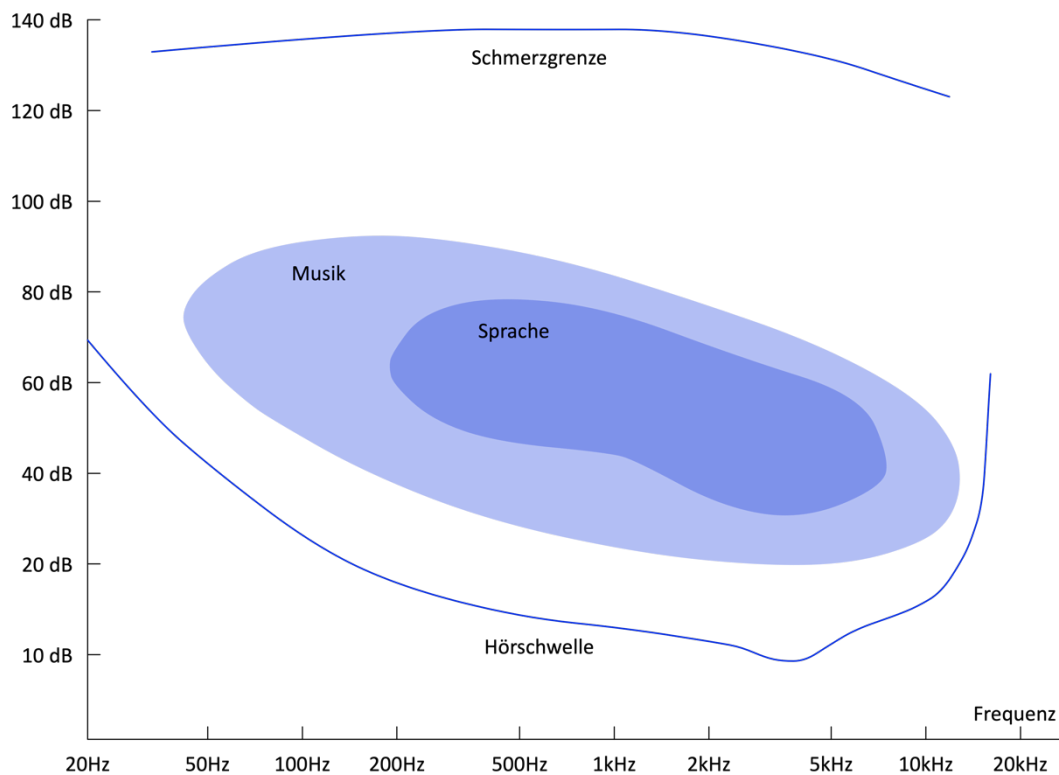


Abbildung 27: Hörschwelle und Schmerzgrenze sowie der von der Musik und Sprache belegte Frequenz-Laustärke-Bereich⁷⁵

⁷⁴ vgl. Neukom, 2003, S. 78-79

⁷⁵ Kuttruff, 2004, S. 236

5. Schwebungen

Wenn zwei Töne mit sehr ähnlicher Tonhöhe gleichzeitig erklingen, nehmen wir beide Töne als einen Ton mit Schwebungen und einer gewissen Rauheit wahr. Wir hören also einen rauen Ton mit der Tonhöhe der Mittelfrequenz, der an- und abschwelt. Dies passiert, wenn ein Ton in der kritischen Bandbreite eines anderen Tones ist. Die kritische Bandbreite entspricht bei Frequenzen über 500 Hz etwa 15-20% der Mittelfrequenz. Dies beeinflusst auch die Klangfarbe. Liegen mehrere Obertöne in einer kritischen Bandbreite, so wirken diese nicht als einzelne Obertöne, sondern gemeinsam.⁷⁶

6. Maskierung von Tönen

Töne können andere Töne überdecken; dies wird Maskierung genannt. Ein lauterer Ton maskiert dabei einen leiseren, die Gehörschwelle, um andere Töne wahrzunehmen, steigt also. Dabei spielen zwei Faktoren eine wichtige Rolle. Die Lautstärke und die Frequenz der Töne. Je lauter ein Ton ist, desto stärker überdeckt er leisere Töne. Zudem gilt auch: Je näher die Frequenz eines Tones an der Frequenz des lautereren Tones ist, desto stärker wird dieser überdeckt. Dieses Phänomen wird spektrale Maskierung genannt.⁷⁷

Kurze Töne können leise Töne maskieren. Wenn ein kurzer Ton erklingt, so maskiert dieser leisere Töne kurz vor, während und kurz nach dem Erklingen; man spricht von einer zeitlichen Maskierung.⁷⁸

⁷⁶ vgl. Neukom, 2003, S. 80-81; vgl. Raffaseder, 2002, S. 72, 88; vgl. Taylor, 1994, S. 37

⁷⁷ vgl. Neukom, 2003, S. 81-82; vgl. Raffaseder, 2002, S. 93

⁷⁸ vgl. Neukom, 2003, S. 82; vgl. Raffaseder, 2002, S. 93-94

7. Kombinationstöne

Es können sogenannte Kombinationstöne entstehen als Ergebnis von zwei sich überlagernden Tönen. Ihre Entstehung ist noch nicht geklärt. Kombinationstöne sind leiser als die beiden sich überlagernden Töne. Die Frequenz der Kombinationstöne ergibt sich aus der Summe oder Differenz des Vielfachen der Frequenzen beider Ursprungstöne. Dabei kommen Sekundärtöne am meisten vor; andere treten selten auf.⁷⁹

Tabelle 3: Frequenzen möglicher Kombinationstöne⁸⁰

Sekundärtöne	$f_1 - f_2$	$f_1 + f_2$	$2 * f_1, 2 * f_2$
Tertiärtöne	$2 * f_1 - f_2$	$2 * f_1 + f_2$	$3 * f_1, 3 * f_2$
Quartärtöne	$2 * f_1 - 2 * f_2, 3 * f_1 - f_2$	$2 * f_1 + 2 * f_2, 3 * f_1 + f_2$	$4 * f_1, 4 * f_2$

8. Einfluss der Schallintensität auf die Klangfarbe

Die Schallintensität beeinflusst die Klangfarbe; besonders tiefe Töne mit vielen Obertönen gleichbleibender Intensität empfinden wir bei unterschiedlichen Lautstärken verschieden. Dies liegt daran, dass bei hoher Intensität Töne aller Frequenzen ähnlich laut klingen, während bei niedriger Intensität Töne verschiedener Frequenzen verschieden laut empfunden werden.⁸¹

⁷⁹ vgl. Muzzolini, 2004, S. 208-210; vgl. Neukom, 2003, S. 82-83; vgl. Taylor, 1994, S. 37-41

⁸⁰ Neukom, 2003, S. 83

⁸¹ vgl. Neukom, 2003, S. 84

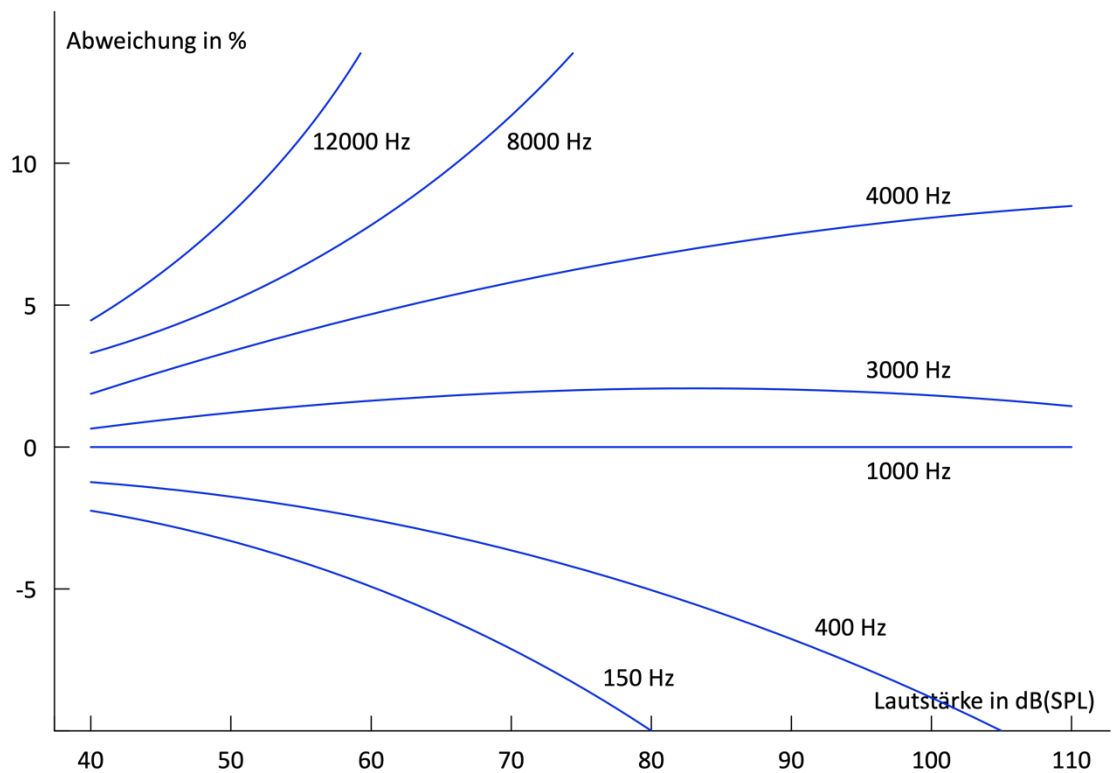


Abbildung 28: Abweichung der wahrgenommenen Tonhöhe in Abhängigkeit von der Lautstärke⁸²

9. Einfluss des Raums auf die Klangfarbe

Die Eigenschaften des Raums und die Position von Schallquelle und Hörerin beziehungsweise Hörer haben einen grossen Einfluss auf die Klänge. Diese Einflüsse müssen bei der Klangsynthese berücksichtigt werden. Musiker sprechen oft von der guten oder schlechten Akustik eines Raums. Die räumlichen Eigenschaften der Klänge sind oft Bestandteil der Komposition, eine gute räumliche Darstellung der Klänge ermöglicht ein dreidimensionales Erlebnis der Musik. Die Realisierung von räumlichen Effekten ist komplex; sie hängt neben der Komposition vom Raum und der Lage von Lautsprechern

⁸² Neukom, 2003, S. 84

und Publikum im Raum ab. Mithilfe von Software, die die Konvolution (mathematische Funktion) benutzt, können räumliche Effekte digital einfacher umgesetzt werden.⁸³

10. Hall

Schallwellen werden zu einem grossen Teil von Hindernissen reflektiert, dies nach dem Reflexionsgesetz «Einfallswinkel entspricht Ausfallswinkel» (siehe Seite 19). In geschlossenen Räumen bilden die Reflexionen einen grossen Anteil des Schalls, der die Hörerin beziehungsweise den Hörer erreicht. Der Schall, der uns direkt erreicht, wird Direktschall genannt. Schall, der zuerst noch reflektiert wird, heisst Sekundärschall. Erreichen einzeln wahrnehmbare Reflexionen das Ohr, nehmen wir ein Echo wahr; erreichen nicht einzeln wahrnehmbare Reflexionen unser Gehör, nehmen wir ein Nachhall wahr. Nachdem der Direktschall das Publikum erreicht, kommen mehrere leise, immer lauter werdende Reflexionen an. Diese Phase wird Anhallzeit genannt. Die Anhallzeit wird mit der stärksten Reflexion beendet; dies ist eine direkte Reflexion, der Schall ist nur einmal reflektiert, an einer grossen Fläche, meist an einer Wand oder Decke. Nach der Anhallzeit kommt die Nachhallzeit. Während dieser Phase erreichen direkte und indirekte Reflexionen unser Ohr, sie werden mit der Zeit exponentiell mehr und leiser. Hall kann künstlich mit analogen und digitalen Mitteln imitiert werden. Dieser künstliche Halleffekt wird Reverb genannt.⁸⁴

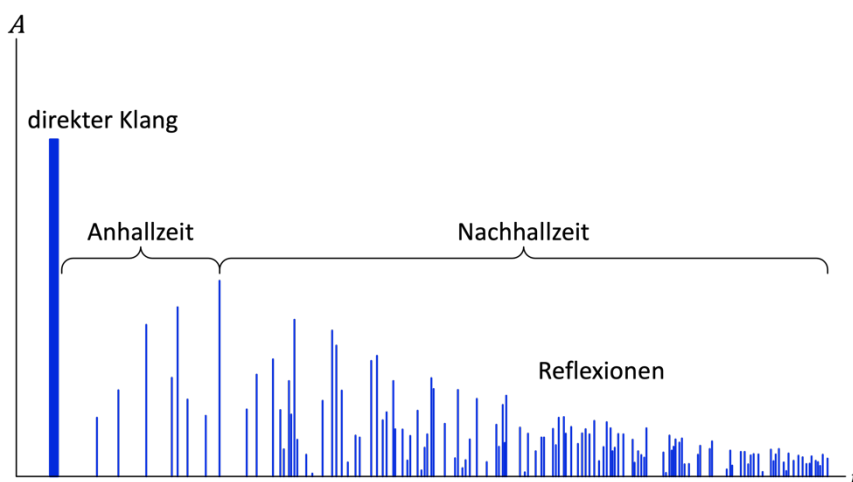


Abbildung 29: Hall; die Impulsantwort eines Raumes⁸⁵

11. Räumliches Hören

Unser Gehör kann Töne und Geräusche räumlich einordnen. Wir nehmen die Zeit- und Lautstärkedifferenz zwischen dem rechten und dem linken Ohr wahr und können so im Idealfall den Winkel der Schallquelle zur Symmetrieebene unseres Kopfes auf 2° genau einordnen. Die zeitliche Differenz entsteht, da ein Ohr näher an der Schallquelle liegt, die Lautstärkedifferenz entsteht, da das eine Ohr vom Kopf abgeschirmt ist und so nur Reflexionen dieses Ohr erreichen. Bei hohen Tönen ist der Lautstärkeunterschied das Hauptkriterium zur Bestimmung der Richtung. Bei tiefen Tönen ist der Zeitunterschied entscheidend, da tiefe Töne sich stärker um Gegenstände, in diesem Fall unseren Kopf, beugen. Zeit- und Lautstärkedifferenz allein liefern keine Informationen, ob sich die Schallquelle bei gleichem Winkel zur Symmetrieebene des Kopfes vorne, hinten, oben oder unten befindet. Diese Zuordnung funktioniert dank der Veränderung des Spektrums und dank Sekundärschall, welcher nicht im selben Winkel zur Symmetrieebene unseres Kopfes einfällt.⁸⁶

Bei zunehmender Distanz nimmt die Lautstärke ab. Ein leiser Ton kann entweder von einer nahen, leisen Schallquelle stammen oder von einer weit entfernten, lauten Schallquelle. Trotzdem können wir bei natürlichen Klängen die Distanz ungefähr erkennen. Bei den meisten Klängen nimmt der Anteil an hohen Frequenzen bei steigender Lautstärke zu. So können wir darauf schliessen, dass bei einem tieferen Anteil hoher Frequenzen die Schallquelle nah bei uns und leise ist und bei einem hohen Anteil weit entfernt und laut. Dagegen wirkt jedoch, dass hohe Frequenzen über Distanz stärker an Lautstärke verlieren als tiefere. Auch das Verhältnis zwischen den Lautstärken vom direkten Klang und Nachhall sind von der Distanz abhängig. Es verändert sich also die Klangfarbe bei veränderter Distanz zwischen Schallquelle und Hörerin beziehungsweise Hörer.⁸⁷

⁸³ vgl. Neukom, 2003, S. 85; vgl. Raffaseder, 2002, S. 80-81

⁸⁴ vgl. Kuttruff, 2004, S. 263-264; vgl. Neukom, 2003, S. 85-86, vgl. Raffaseder, 2002, S. 77-80, 214-216

⁸⁵ Neukom, 2003, S. 86

⁸⁶ vgl. Kuttruff, 2004, S. 245-249; vgl. Neukom, 2003, S. 86-87

⁸⁷ vgl. Neukom, 2003, S. 88; vgl. Raffaseder, 2002, S. 22

12. Zweites Zwischenfazit

Tonhöhe, Klangfarbe und Lautheit bestimmen unsere Wahrnehmung von Tönen. Dabei spielen verschiedene Phänomene wie Residualtöne und Schwebungen eine Rolle; auch der Raum, in dem sich die Töne ausbreiten, beeinflusst unsere Wahrnehmung.

Diese psychoakustischen Faktoren beeinflussen unsere akustische Wahrnehmung stark und müssen bei der analogen und digitalen, aber auch bei der akustischen Klangsynthese berücksichtigt werden.

IV. Klangsynthese, Klangmodulation und Wandlung

In diesem Kapitel wird die Klangmodulation, die akustische und die analoge Klangsynthese beschrieben. Weiter werden die elektroakustische und die Analog-Digital- sowie Digital-Analog-Wandlung behandelt. Darauf aufbauend werden die Prinzipien und Umsetzungen digitaler Klangsynthese erläutert.

1. Modulation

Klangmodulation bezeichnet die Kombination zweier Wellen. Dabei beeinflusst eine Welle physikalische Eigenschaften der anderen. Es gibt verschiedene Methoden zur Modulation. Die einfache Addition, die Schalt-, die Amplituden-, die Ring-, die Frequenz- sowie die Pulsdauermodulation werden hier genauer besprochen.⁸⁸

1.1. Einfache Addition

Die einfache Addition funktioniert nach dem Superpositionsprinzip und beschreibt die Überlagerung zweier Wellen. Sie kann akustisch, elektrisch und elektronisch umgesetzt werden.⁸⁹

1.2. Schaltmodulation

Bei der Schaltmodulation wird eine Welle genutzt, um das Signal der anderen Wellen an- und abzuschalten. Unterschreitet das Signal der schaltenden Welle, das Modulationssignal, einen Grenzwert, so wird das Signal der geschalteten Welle, das Trägersignal, unterbrochen. Steigt das Signal der schaltenden Welle wieder über den Grenzwert, wird die geschaltete Welle wieder übertragen. Weder die schaltende Welle noch die geschaltete Welle müssen periodisch sein. Der Grenzwert kann bestimmt werden. Die Schaltmodulation kann elektrisch und elektronisch realisiert werden.⁹⁰

⁸⁸ vgl. Berg und Stork, 1982, S. 118-119

⁸⁹ vgl. Berg und Stork, 1982, S. 119

⁹⁰ vgl. Berg und Stork, 1982, S. 119

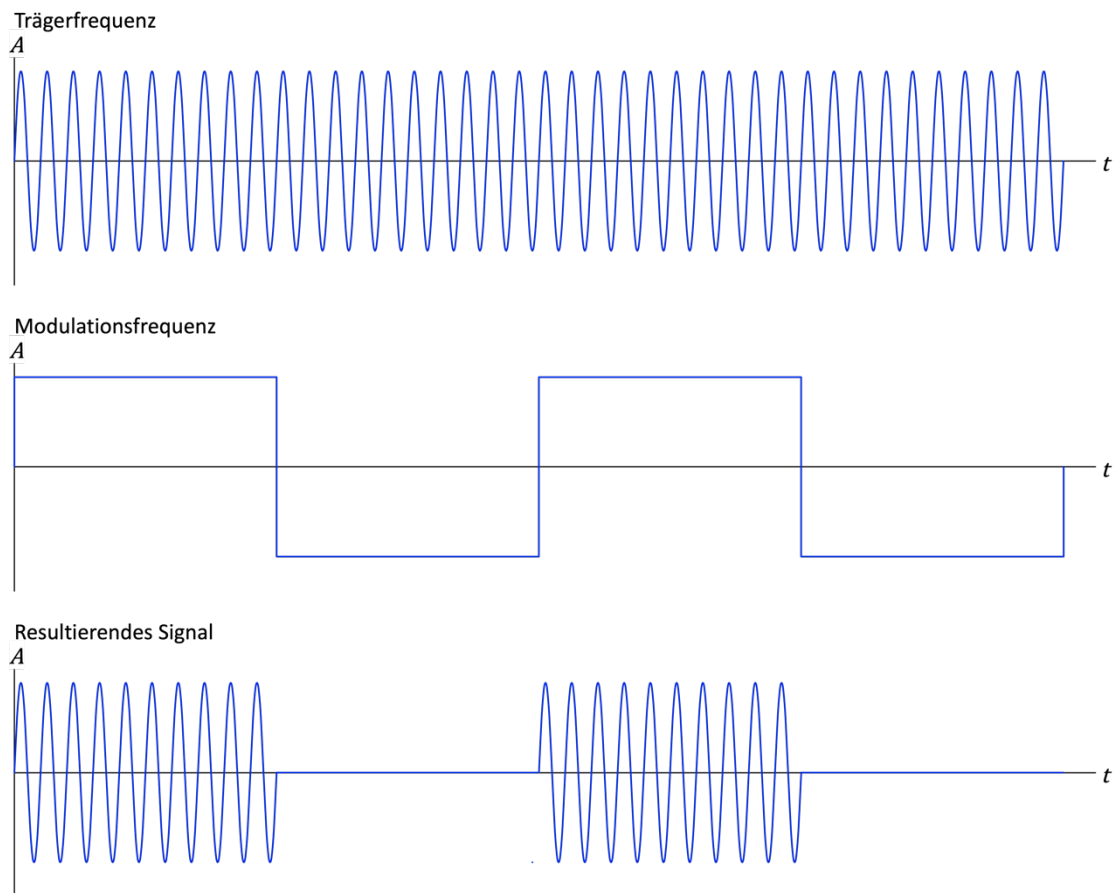


Abbildung 30: Schaltmodulation; eine sinusförmige Trägerfrequenz durch eine rechteckiges Modulationssignal geschaltet⁹¹

1.3. Amplitudenmodulation

Bei der Amplitudenmodulation, kurz AM, ändert eine Welle die Amplitude einer anderen Welle. Die tiefere Frequenz wird dabei Modulationssignal genannt, die höhere Trägersignal. Hier werden nicht einfach wie bei der Schaltmodulation das Trägersignal an- und abgeschaltet, das Modulationssignal bestimmt die Amplitude des Trägersignals. Dabei entspricht die Hüllkurve der modulierten Frequenz dem Modulationssignal, das Offset Level mit eingerechnet. Das Modulationssignal wird so weit nach oben, beziehungsweise

⁹¹ Berg und Stork, 1982, S. 119

nach unten, verschoben, sodass das Modulationssignal nicht die Amplitude 0 überschreitet. Die Grösse dieser Verschiebung wird Offset Level genannt. Bei einem Offset von 100% berühren die untere und obere Hüllkurve des modulierten Signals die Zeitachse mit der Amplitude 0 gleichzeitig. Ist der Offset grösser als 100%, liegt eine Übermodulation vor, liegt er unter 100%, spricht man von einer Untermodulation. Wird ein Trägersignal im hörbaren Bereich durch eine Frequenz zwischen 1 und 10 Hz moduliert, nehmen wir das Trägersignal mit wechselnder Lautstärke wahr. Dieses Pulsieren wird in der Musik Tremolo genannt. Die Amplitudenmodulation wird meist elektrisch oder elektronisch umgesetzt. Neben der Anwendung in der Musik in Synthesizern und Effektgeräten wird die Amplitudenmodulation bei den AM-Radios zur Übertragung von Signalen verwendet. Dabei wird ein Trägersignal mit einer Frequenz zwischen 500 und 1800 kHz durch das zu übertragende Signal moduliert. Das resultierende Signal wird von einem Radiosender ausgestrahlt und durch die Radiogeräte empfangen. Darauf wird die Trägerfrequenz entfernt, die zu übertragende Welle wird durch einen Lautsprecher hörbar gemacht.⁹²

⁹² vgl. Berg und Stork, 1982, S. 119-122

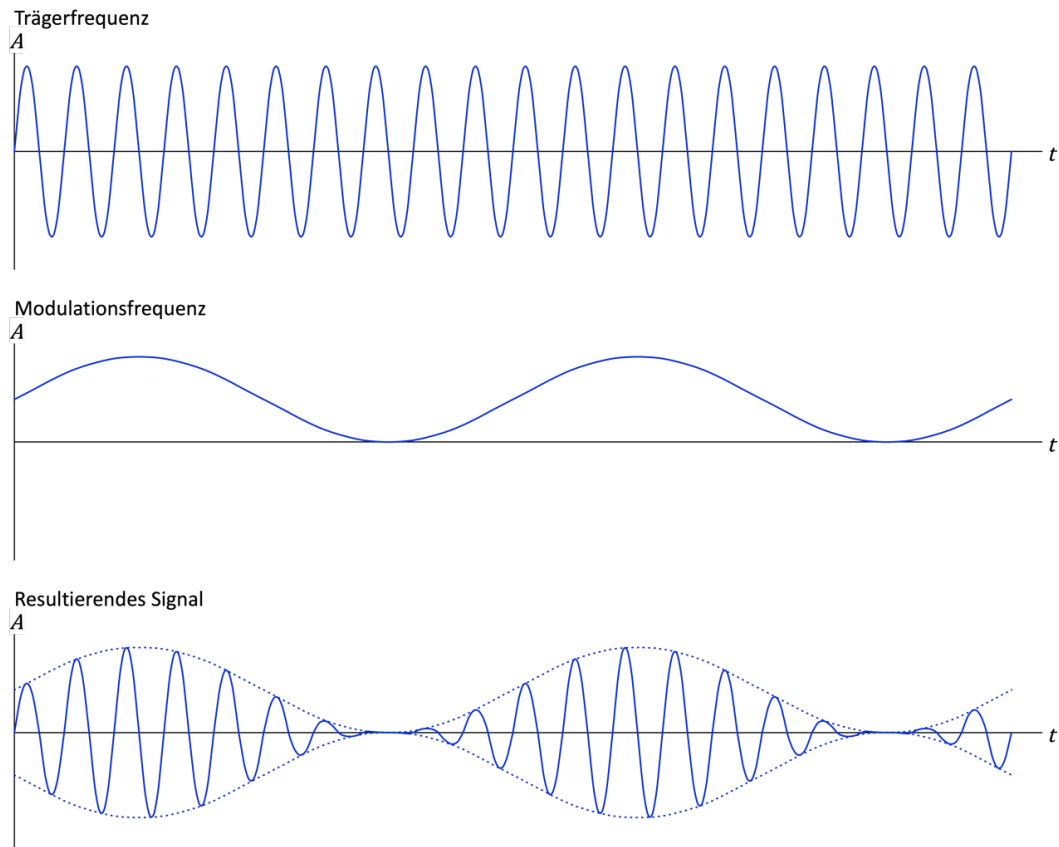


Abbildung 31: Amplitudenmodulation; das Trägersignal wird durch das Modulationssignal frequenzmoduliert⁹³

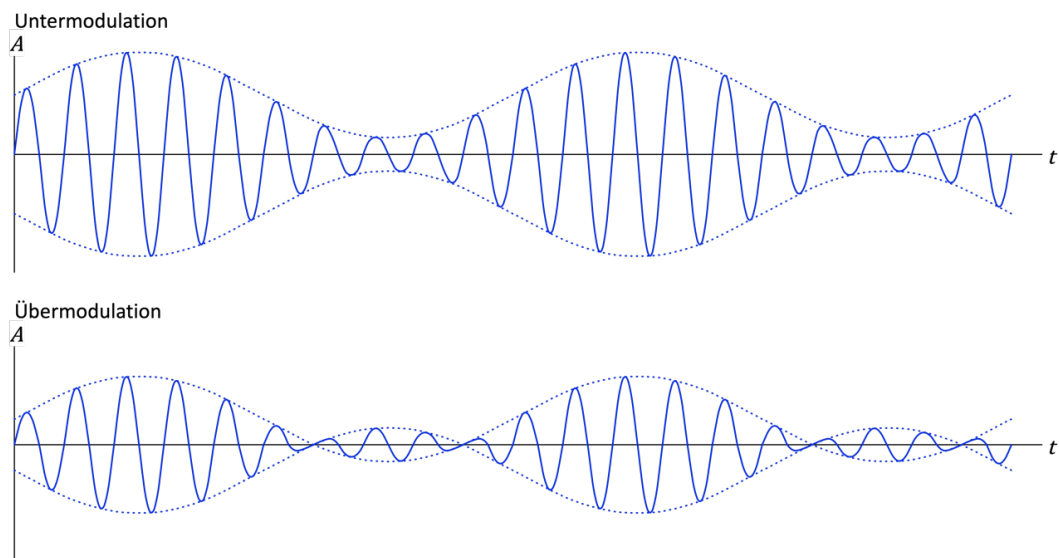


Abbildung 32: Bei der Untermodulation liegt der Offset Level unter 100%; bei der Übermodulation liegt er über 100%⁹⁴

⁹³ Berg und Stork, 1982, S. 121

⁹⁴ Berg und Stork, 1982, S. 120-121

1.4. Ringmodulation

Bei der Ringmodulation werden die Amplituden zweier Signale kontinuierlich multipliziert. Dabei wird auch hier die höhere Frequenz Trägersignal und die tiefere Modulationssignal genannt. Die resultierende Welle besteht aus Summe und Differenz beider Signale. Die obere und untere Hüllkurve der modulierten Frequenz bestehen aus einer Kombination zwischen der Modulationsfrequenz und der phasenverschobenen Modulationsfrequenz. Wird die Ringmodulation mit einer Trägerfrequenz im hörbaren Bereich und mit einer Modulationsfrequenz unter dem hörbaren Bereich umgesetzt, nehmen wir wie bei der Amplitudenmodulation einen pulsierenden Ton, ein Tremolo, wahr. Dabei entspricht die Tonhöhe der Trägerfrequenz. Findet eine Ringmodulation mit einer Träger- und Modulationsfrequenz im hörbaren Bereich statt, entstehen komplexere Töne. Stehen die beiden Frequenzen in einem harmonischen Verhältnis, ergibt sich ein harmonischer Klang, wobei wir die Frequenzen nicht einzeln wahrnehmen können. Die Ringmodulation kann elektrisch sowie auch elektronisch umgesetzt werden.⁹⁵

⁹⁵ vgl. Berg und Stork, 1982, S. 122-123, vgl. HdM Stuttgart, abgerufen von https://curdt.home.hdm-stuttgart.de/PDF/Klangsynthese_Schraffenberger.pdf

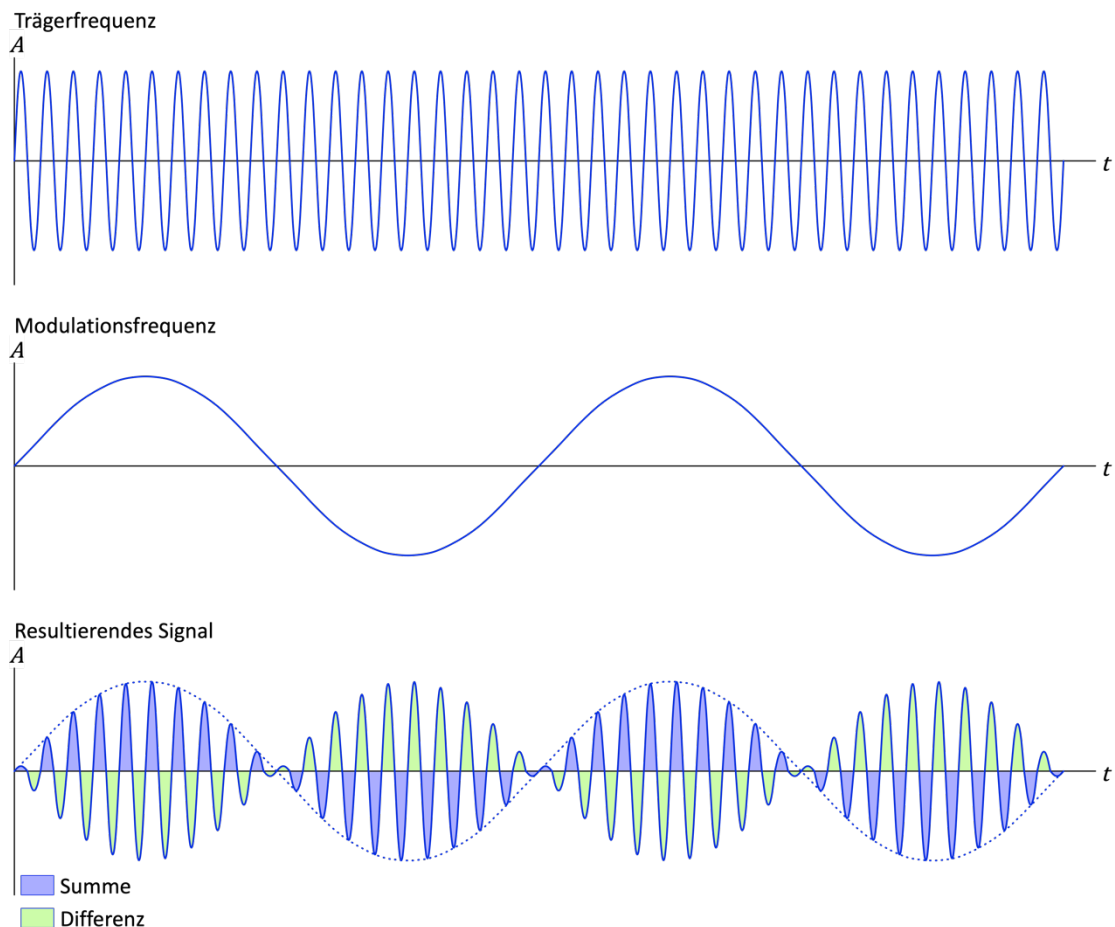


Abbildung 33: Ringmodulation; das Trägersignal wird mit dem Modulationssignal multipliziert⁹⁶

1.5. Frequenzmodulation

Bei der Frequenzmodulation, kurz FM, wird die Frequenz des Trägersignals durch das Modulationssignal verändert. Die Amplitude des Trägersignals bleibt dabei unverändert. Schneidet das Modulationssignal die Zeitachse mit der Amplitude 0, so entspricht die Frequenz des resultierenden Signals der Trägerfrequenz. Steigt die Amplitude des Modulationssignals in den positiven Bereich, so wird die Frequenz des Ausgangssignals der Amplitude des Modulationssignals entsprechend erhöht. Sinkt die Amplitude des

⁹⁶ vgl. Berg und Stork, 1982, 122; vgl. HdM Stuttgart, abgerufen von https://curdt.home.hdm-stuttgart.de/PDF/Klangsynthese_Schraffenberger.pdf

Modulationssignals unter 0, so sinkt die Frequenz des Ausgangssignals unter die Trägerfrequenz. Je grösser die Amplitude der Modulationsfrequenz, desto grösser die Differenz zwischen der Trägerfrequenz und der Frequenz des resultierenden Signals. Liegt die Trägerfrequenz im hörbaren Bereich und die Modulationsfrequenz darunter, so hören wir einen Ton mit konstanter Lautstärke und leicht schwankender Tonhöhe. Dieser Effekt wird in der Musik Vibrato genannt. Die Frequenzmodulation wird meist elektrisch oder elektronisch umgesetzt, das Konzept kann jedoch auch auf den akustischen Bereich übertragen werden. Die Frequenzmodulation findet neben der elektrischen Klangsynthese Anwendung bei den FM-Radios, welche die AM-Radios schon länger abgelöst haben. Dabei wird von einer Radiosendestation eine Trägerfrequenz um 100 MHz durch das zu sendende Signal frequenzmoduliert. Das resultierende Signal wird ausgestrahlt und von FM-Radiogeräten empfangen, die Trägerfrequenz wird entfernt und das Signal durch Lautsprecher hörbar gemacht. Verschiedene Radiosender benutzen verschiedene Trägerfrequenzen. Dadurch können verschiedene Signale durch dieselbe Technik empfangen werden.⁹⁷

⁹⁷ vgl. Berg und Stork, 1982, S. 123-125; vgl. Raffaseder, 2002, S. 236-237

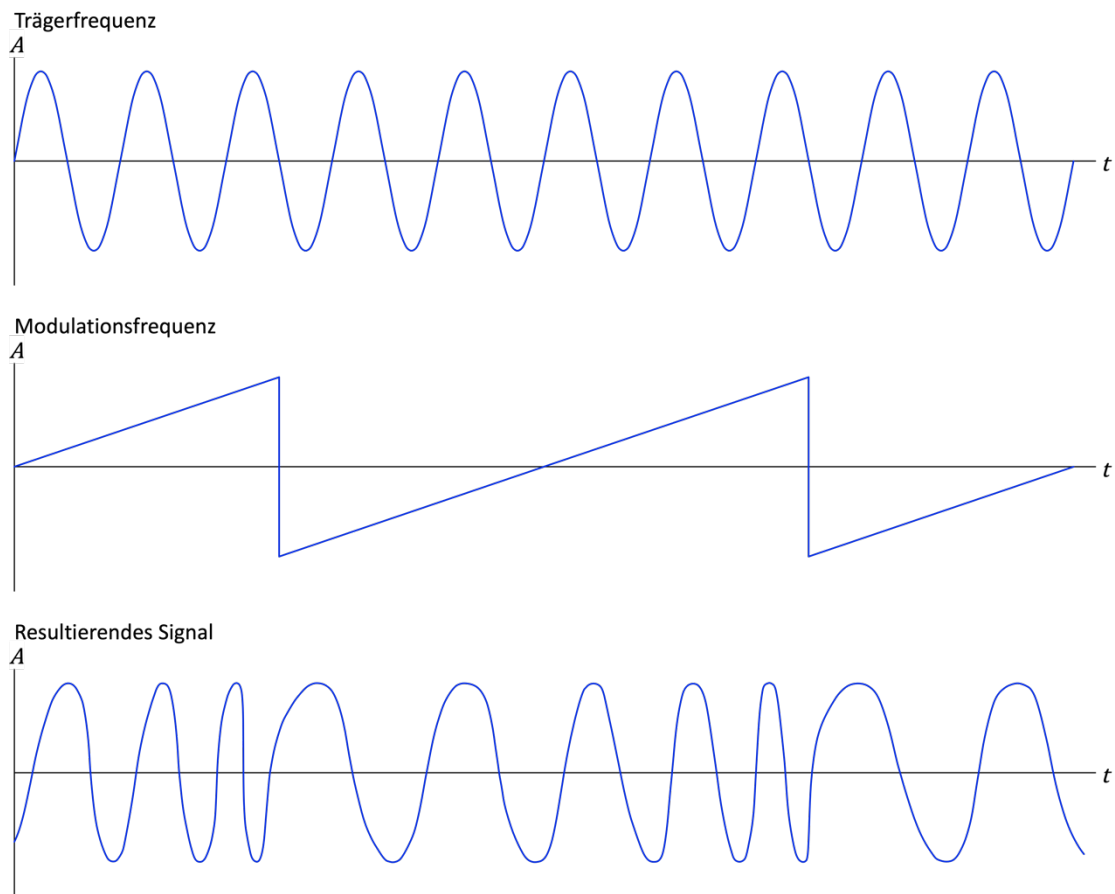


Abbildung 34: Frequenzmodulation; das Modulationssignal moduliert die Frequenz des Trägersignals⁹⁸

1.6. Pulsdauermodulation

Bei der Pulsdauermodulation, kurz PWM (Puls-Width-Modulation), wird durch ein Modulationssignal die Dauer der maximalen Auslenkung des Trägersignals verändert. Dabei wird meist eine Rechteckwelle als Trägersignal verwendet. Die Pulsdauermodulation verändert die Klangfarbe der Trägerfrequenz. Die Pulsdauermodulation kann elektrisch und elektronisch realisiert werden. Die Pulsdauermodulation findet in verschiedensten Synthesizern Anwendung. Dadurch können einzigartige Klänge synthetisiert werden. Weiter wird die Pulsdauermodulation zur Steuerung der Helligkeit von LEDs genutzt.⁹⁹

⁹⁸ Berg und Stork, 1982, S. 124

⁹⁹ vgl. Berg und Stork, 1982, S. 125-126

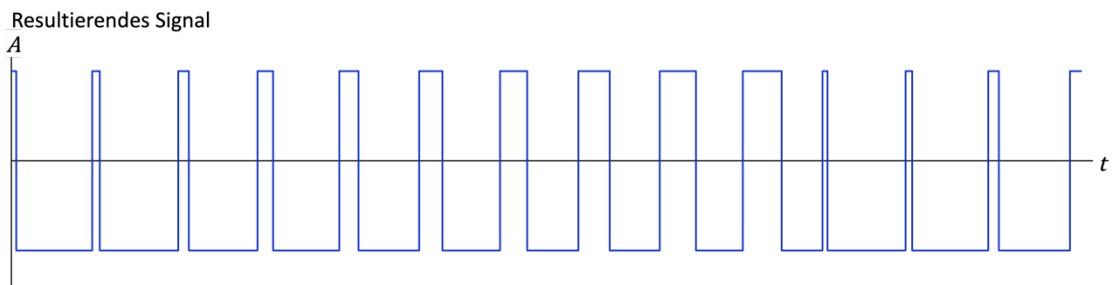


Abbildung 35: Pulsdauermodulation; das Modulationssignal bestimmt die Dauer der maximalen Auslenkung des Trägersignals¹⁰⁰

2. Akustische und analoge Klangsynthese

Um den Unterschied zwischen akustisch, analog und digital synthetisierten Klängen zu verstehen, ist die Funktionsweise dieser Methoden von Klangsynthese Basis für das Verständnis. Diese werden nachfolgend ausgeführt.

2.1. Funktionsweise eines Musikinstruments

Die Wirkungsweise eines Musikinstruments kann durch wenige Funktionselemente beschrieben werden. Am Anfang steht ein primärer Schwingungserzeuger, bei einem Saiteninstrument die auf die Saite einwirkende Kraft. Dieser mechanische Schwingungsgenerator überträgt die Schwingungen auf ein Grundtonhöhe bestimmendes Element, bei einem Saiteninstrument die Saite, bei anderen der Klangkörper, also Resonator. Das die Grundtonhöhe bestimmende Element regt den Schwingungserzeuger weiter an, Rückkopplung findet statt, Resonanz. Das nächste Funktionselement ist der Klangfarbefilter, bei vielen Instrumenten der Klangkörper. Dieser hat bestimmte Eigenfrequenzen, es werden also nur diese Frequenzen verstärkt und andere gedämpft. So werden die ursprünglich erzeugten Frequenzen gefiltert. Diese Frequenzen werden dann in die Luft übertragen. Dieses Prinzip kann auch auf das menschliche Sprachorgan

¹⁰⁰ Berg und Stork, 1982, S. 126

übertragen werden. Der Schwingungserzeuger ist dabei die Luft, welche die Stimmlippen, oft als Stimmbänder bezeichnet, anregen. Der Kehlkopf dient als das die Grundtonhöhe bestimmende Element. Wenn wir flüstern, bleiben die Stimmlippen ausser Funktion, das durch die vorbeiziehende Luft entstehende Rauschen wirkt als Schwingungserzeuger, es wird keine Grundtonhöhe bestimmt, da das Rauschen aperiodisch ist und so keiner Frequenz entspricht. Deshalb können wir Flüstern keine klare Tonhöhe zuordnen. Rachen-, Mund-, Nasenhöhle inklusive Zunge und Lippen wirken als Klangfarbenfilter. Durch Änderung in Rachen-, Mund- und Nasenhöhle entstehen andere Klangfarben, andere Laute; denn diese unterscheiden sich voneinander durch ihre Klangfarbe. Rachen-, Mund-, Nasenhöhle, Zunge und Lippe sind massgebend für die Klangfarbe, so können Vokale mit geschlossenem Mund nicht ausgesprochen oder gesungen werden.¹⁰¹

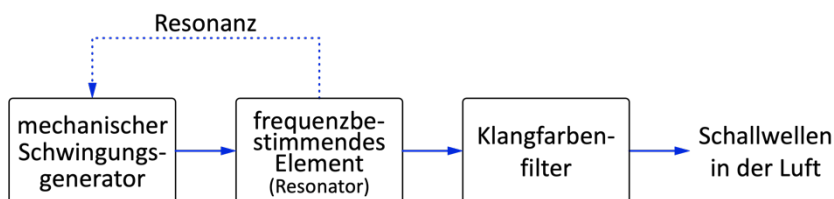


Abbildung 36: Funktionsschema eines Musikinstruments¹⁰²

2.2. Synthesizer

Synthesizer bezeichnen Instrumente, welche durch analoge Klangersynthese Klänge erzeugen. Im Allgemeinen ist ein Synthesizer ein Instrument, jedoch unterscheidet sich die Klangentstehung bei einem Synthesizer massiv von anderen Musikinstrumenten. Während der Klang bei akustischen Instrumenten durch die Schwingung von Körpern entsteht, werden die Wellen beim Synthesizer elektrisch erzeugt. Im Vergleich zu herkömmlichen, akustischen Instrumenten sind Synthesizer eine neuere Erscheinung. 1955 wurde der erste Synthesizer entwickelt. Dieser erste RCA-Synthesizer war ein Teil eines Musikstudios, er

¹⁰¹ vgl. Kuttruff, 2004, S. 206-224; vgl. Raffaseder, 2002, S. 62-66; vgl. Taylor, 1994, 188-193

¹⁰² Kuttruff, 2004, S. 206

wurde dank grosser Fortschritte in der Elektrotechnik möglich. Die Nutzung des Ursprungsgeräts sowie auch die seiner Weiterentwicklung, RCA-Synthesizer-Mark-II, gestaltete sich durch die Programmierung über Lochkarten als komplexe und umständliche Prozedur. Der analoge Klangerzeuger unter digitaler Kontrolle ermöglichte den Zugriff auf externe Schallquellen wie auch die Einspeisung von kurzen Schallsignalen, eine frühe Form des Samplings (siehe Seite 83). Der erste Synthesizer, wie wir ihn heute kennen, wurde 1964 auf Anregung des deutschen Komponisten Herbert Deutsch vom amerikanischen Erfinder Robert A. (Bob) Moog entwickelt. Dieser Synthesizer konnte durch eine Klaviertastatur bedient werden. Die Bezeichnung Synthesizer erhielt das Gerät erst im Jahr 1967. Gleichzeitig und unabhängig von Moog wurde von Donald Buchla ebenfalls ein Synthesizer entwickelt. Dieser war jedoch erst 1966 spielbereit. 1968 erzielte der Musiker Walter Carlos mit seinem Album Switch-On Bach einen grossen Erfolg, was dem Moog-Synthesizer zum Durchbruch verhalf. Daraufhin entwickelte Moog mithilfe anderer Ingenieure den Minimoog Model D, einen kompakteren, erschwinglicheren Synthesizer, der jedoch nicht ganz so viele Funktionen hatte. Der Minimoog konnte nicht mehr nur in Musikstudios verwendet werden, nun war es möglich, einen Synthesizer auf die Bühne zu bringen. Aufgrund des Erfolgs des Minimoogs wurde Moog ein Synonym für Synthesizer. Seitdem wurden die Synthesizer fortlaufend verbessert und populärer, es stiegen viele Firmen ins Synthesizer-Geschäft ein. In den 80er Jahren erlebten Synthesizer eine Blütezeit. Heute werden Synthesizer nicht mehr nur in Musikstudios verwendet, sie sind ein wichtiges Element der Live-Musik. Im Unterschied zu anderen Musikinstrumenten können sie verschiedenste Klangfarben erzeugen und sind nicht wie akustische Instrumente auf nur sein Timbre beschränkt. Anfangs waren Synthesizer durch die an der Entwicklung der ersten Synthesizer beteiligten Musikerinnen und Komponisten geprägt. Zum einen bestand bei den Synthesizern die Idee, mehrere Einzelgeräte eines elektronischen Studios in einem Instrument, dem Synthesizer, zusammenzufügen und zu verschalten, um den technischen Aufwand der Musikproduktion zu minimieren. Zum anderen wurden und werden bis heute Synthesizer verwendet, um akustische Instrumente zu imitieren. Weiter wurde die Synthese von neuartigen Klängen möglich, die durch akustische Instrumente nicht erzeugt werden können. Synthesizer zeichnen sich dadurch aus, dass Künstlerinnen und Künstler mit ihnen elektrische Klangsynthese in Echtzeit betreiben und sie durch ein geeignetes Interface wie eine Tastatur oder einen

Klangregler kontrollieren können. Es gibt einstimmige (monophonic) und mehrstimmige (polyphonic) Synthesizer. Bei einem einstimmigen Synthesizer kann nur eine Taste auf einmal gedrückt werden, während bei einem mehrstimmigen Synthesizer der Anzahl Stimmen entsprechend durchs Drücken mehrerer Tasten gleichzeitig mehrere Töne synthetisiert werden können. Die Entwicklung von Synthesizern wurde durch die «Erfindung» der subtraktiven Klangsynthese möglich.¹⁰³

2.2.1. Aufbau eines Synthesizers

Ein analoger Synthesizer besteht aus Oszillatoren, Filter, Verstärker, Hüllkurvengeneratoren, LFOs, Bedienelementen und je nach Modell aus weiteren Bauteilen. Dabei ist der Oszillator für die Klangsynthese selbst verantwortlich, die anderen Bauteile werden zur Klangmodulation und Steuerung benötigt. Der Oszillator erzeugt eine Wellenform; meist wird eine obertonreiche Wellenform verwendet. Die vom Oszillator erzeugte Wellenform wird durch Filter geleitet. Diese können manuell oder durch die Hüllkurvengeneratoren und Low-Frequency-Oscillators angesteuert werden.¹⁰⁴

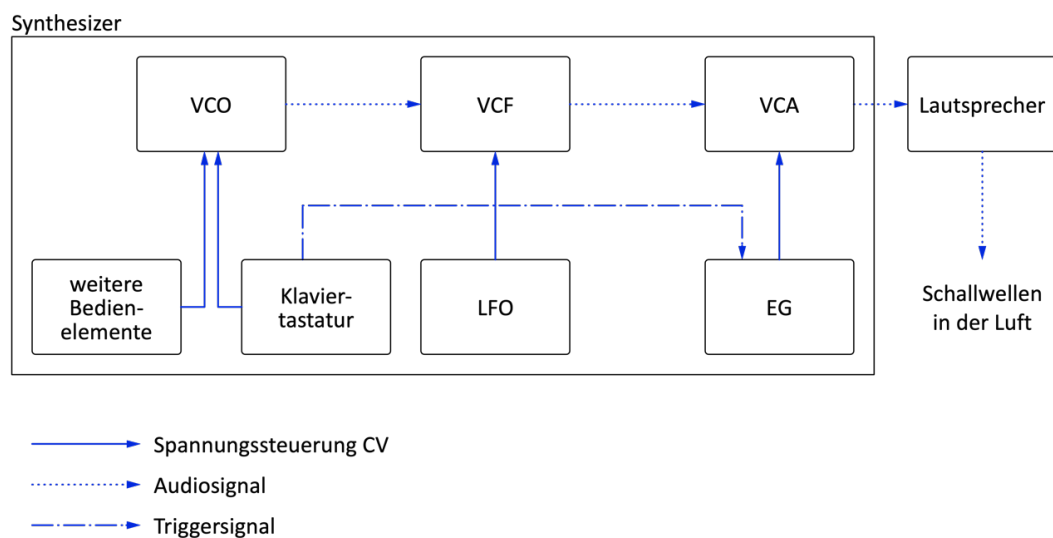


Abbildung 37: Schema eines subtraktiven Synthesizers¹⁰⁵

¹⁰³ vgl. Raffaseder, 2002, S. 223-226; vgl. Spörri, 1974, S. 1-6; vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 187-196; vgl. Taylor, 1994, S. 203-211

¹⁰⁴ vgl. Raffaseder, 2002, S. 227; vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 189-196

¹⁰⁵ vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 191

Voltage-Controlled-Oscillator

Bei Synthesizern wird ein spannungsgesteuerter Oszillator VCO (Voltage-Controlled-Oscillator) von einem Interface angesteuert, meist einer Klaviertastatur. Das Interface sendet an den VCO eine variable Gleichspannung, die Steuerspannung CV (Control-Voltage). Steigt diese CV des VCOs um 1 Volt, so wird die Ausgangsfrequenz verdoppelt. Sinkt die Steuerspannung um 1 Volt, wird die Ausgangsfrequenz halbiert. 1 Volt Veränderung der CV entspricht also einer Veränderung der Tonhöhe des Ausgangs um 1 Oktave. Durch $\frac{1}{12}$ Volt Schritte wird also ein Synthesizer mit einer gleichschwebend temperierten Tonleiter erreicht. Diese Steuerspannung wird meist mit der Tastatur kontrolliert; sie kann oft durch ein Pitch-Wheel manipuliert werden. Durch weitere Bedienelemente wird die vom Oszillator generierte Wellenform bestimmt. Rechteck-, Sägezahn- und Dreieckwellen sowie Varianten von diesen können als Wellenformen gewählt werden. All diese Wellenformen sind Produkte der Addition verschiedenster Sinuswellen der Obertonreihe. Die Sinusschwingung allein ist auch eine Option, wird aber eher selten genutzt, da diese keinerlei Obertöne besitzt. Auch Rauschen und Impulsabfolgen werden genutzt. Bei den meisten Synthesizern gibt es mehrere Oszillatoren. So kann zwischen den verschiedenen Oszillatoren gewechselt werden; sie können auch parallel geschaltet werden.¹⁰⁶

¹⁰⁶ vgl. Raffaseder, 2002, S. 35-37, 227; vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 191-192

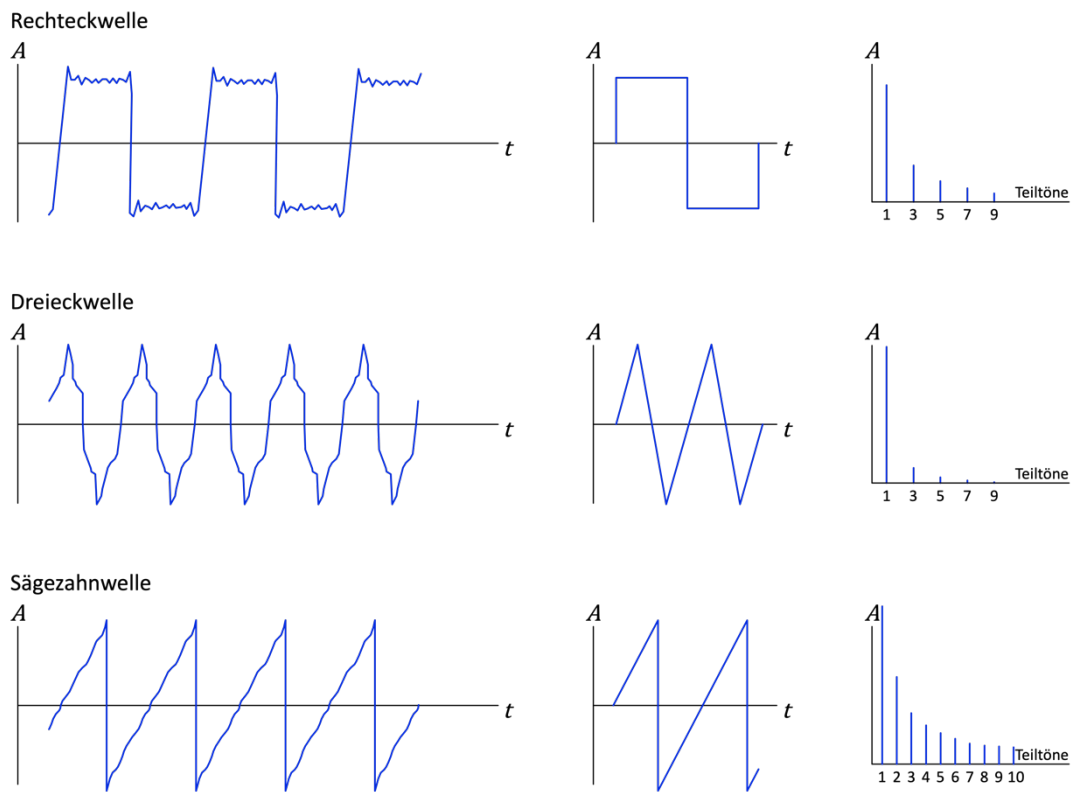


Abbildung 38: Durch ein VCO generierte Wellenformen und ihr Teiltenspektrum¹⁰⁷

Klangmanipulation

Die vom Oszillator erzeugte Schwingung wird durch spannungsgesteuerte Filter VCF (Voltage-Controlled-Filter) und durch spannungsgesteuerte Verstärker VCA (Voltage-Controlled-Amplifier) geleitet und dadurch manipuliert, also verändert.¹⁰⁸

Voltage-Controlled-Filter

Bei den VCF gibt es verschieden Varianten. Es gibt die Tief-, die Hoch-, die Bandpass- und die Bandsperfilter. Tiefpassfilter löschen Frequenzen über einer bestimmten Frequenz aus, Hochpassfilter eliminieren hingegen Frequenzen unter einer bestimmten Grenzfrequenz. Bandpassfilter entfernen alle Frequenzen, die sich ausserhalb eines bestimmten Frequenzbandes befinden und Bandsperfilter löschen alle Frequenzen

¹⁰⁷ Stange-Elbe, 2015, S. 189-190

¹⁰⁸ vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 192-196

innerhalb eines bestimmten Frequenzbandes aus. Diese Filter werden durch Steuerspannungen CV gesteuert. Dabei kann die Intensität des Filters reguliert werden, so werden bei einer tiefen Intensität die Frequenzen nicht ausgelöscht, sondern nur gedämpft. Auch die Grenzfrequenz beziehungsweise das Frequenzband kann durch die CV gesteuert werden. Die VCF sind also für die Frequenzmanipulation verantwortlich. Die Steuerspannungen CV werden durch Bedienelemente, wie Regler, durch Hüllkurvengeneratoren oder LFOs gesteuert.¹⁰⁹

Voltage-Controlled-Amplifier

Spannungsgesteuerte Verstärker VCAs funktionieren ähnlich wie VCFs. Auch sie werden durch eine Steuerspannung CV kontrolliert; je grösser die CV, desto stärker wird verstärkt. Die VCA sind für die Amplitudenmodulation AM verantwortlich. Ihre CV wird wie bei den VCF durch Bedienelement beziehungsweise Hüllkurvengeneratoren oder LFOs gesteuert.¹¹⁰

Envelope-Generator

Der Hüllkurvengenerator EG (Envelope-Generator) ist für den ADSR-Klangverlauf verantwortlich. Sobald eine Taste auf der Tastatur gedrückt wird, startet der Hüllkurvengenerator die Attack Phase. Den Einstellungen des EGs entsprechend folgt die Decay und darauf die Sustain Phase. Die Sustain Phase wird so lange ausgehalten, bis die gedrückte Taste losgelassen wird. Darauf folgt die Release Phase. Manche Hüllkurvengeneratoren generieren keine ADSR-Kurve, sondern eine AD- oder ASD-Hüllkurve. Die vom EG erzeugte Hüllkurve wird als Spannung ausgegeben und kann als Steuerspannung CV bei VCFs und VCAs dienen. Wird die durch den EG generierte Steuerspannung in den VCA gespiesen, so erhält der auf dem Synthesizer gespielte Ton den eingestellten ADSR-Klangverlauf, was diesen Ton je nach Einstellungen der Parameter des EGs musikalisch breit anwendbar macht. Die Dauer der Sustain Phase kann durchs

¹⁰⁹ vgl. Raffaseder, 2002, S. 48, 228; vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 192-193

¹¹⁰ vgl. Raffaseder, 2002, S. 228; vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 193

Drücken des Sustain-Pedal verlängert werden. Meist sind mehrere EGs in einem Synthesizer eingebaut, um die verschiedenen Parameter zu steuern.¹¹¹

Low-Frequency-Oscillator

Der Low-Frequency-Oscillator LFO ist ein Oszillator, der Schwingungen mit Frequenzen unter 16 Hz und somit unter dem hörbaren Bereich erzeugt. Er funktioniert wie ein normaler Oszillator, eine Steuerspannung CV kontrolliert die Frequenz, auch die Wellenform kann meist gewählt werden. Diese Parameter werden jedoch nicht von der Tastatur gesteuert, sondern durch andere Bedienelemente. Die Frequenz des LFOs kann meist durch ein Modulation-Wheel noch zusätzlich verändert werden. Die resultierende Schwingung kann wie beim EG als Steuerspannung CV für beliebige Parameter verwendet werden. Wird zum Beispiel ein Bandpass-VCF durch ein LFO gesteuert, so sinkt und steigt die Frequenz des erzeugten Tones der Frequenz des LFOs entsprechend, es findet also Frequenzmodulation statt.¹¹²

2.2.2. Weitere Verfahren zur elektrischen Klangsynthese

Neben dem subtraktiven Klangsyntheseverfahren wurde auch das weitere Verfahren wie das additive Verfahren entwickelt. Beim additiven Verfahren können neben dem Grundton alle Frequenzen der Obertonreihe manuell hinzugefügt werden. Um dies zu erreichen, werden für alle Teiltöne einzelne Oszillatoren eingesetzt. Dadurch ist die elektrische Umsetzung des additiven Verfahrens sehr aufwändig. Durch dieses Verfahren ist auch Resynthese möglich. Bei der Resynthese wird das Spektrum eines akustischen Klages analysiert und mit dem additiven Verfahren nachkonstruiert. Dabei sind gezielte Veränderungen des Spektrums möglich. Weiter gibt es die AM- und FM-Synthese. Bei diesen wird ein Rauschen durch ein Signal von einem Oszillator durch Amplituden- beziehungsweise Frequenzmodulation verändert und ähnelt dadurch dem subtraktiven Verfahren. Dieser Vorgang wird entweder mit dem resultierenden Signal wiederholt oder

¹¹¹ vgl. Raffaseder, 2002, S. 232-233; vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 193

¹¹² vgl. Raffaseder, 2002, S. 229, 233; vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 194-195

findet parallel mit mehreren Oszillatoren statt. Dadurch können komplexe Klangspektren geschaffen werden.¹¹³

2.2.3. Analoges Synthesizer mit Speicher

Analoge Synthesizer ermöglichen ein riesiges Spektrum an Klängen. Anfangs mussten, um einen anderen Klang zu erzeugen, eine Menge Regler und Schalter verändert werden. Klänge konnten nicht eingespeichert werden, es sei denn, die Regler wurden mit Klebestreifen fixiert. Das führte dazu, dass einige bekannte Musikerinnen und Musiker für jeden Klang einen anderen Synthesizer benutzten. 1975 kam schließlich der erste Synthesizer mit einer Speicherfunktion auf den Markt. Einstellungen konnten nun abgespeichert und auf Knopfdruck wieder aktiviert werden. Mit der Speicherfunktion konnte auch die Steuerspannung eines gespielten Motivs gespeichert werden, was die Arpeggiator-Funktion ermöglichte.¹¹⁴

3. Wandlung

Für das Verständnis der digitalen Klangsynthese ist die Wandlung von akustischen zu analogen zu digitalen Signalen und umgekehrt zentral.¹¹⁵

¹¹³ vgl. Raffaseder, 2002, S. 234; vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 197-211; Tremml, 2014, S. 39-43

¹¹⁴ vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 195-196

¹¹⁵ vgl. Raffaseder, 2002, S. 159-160

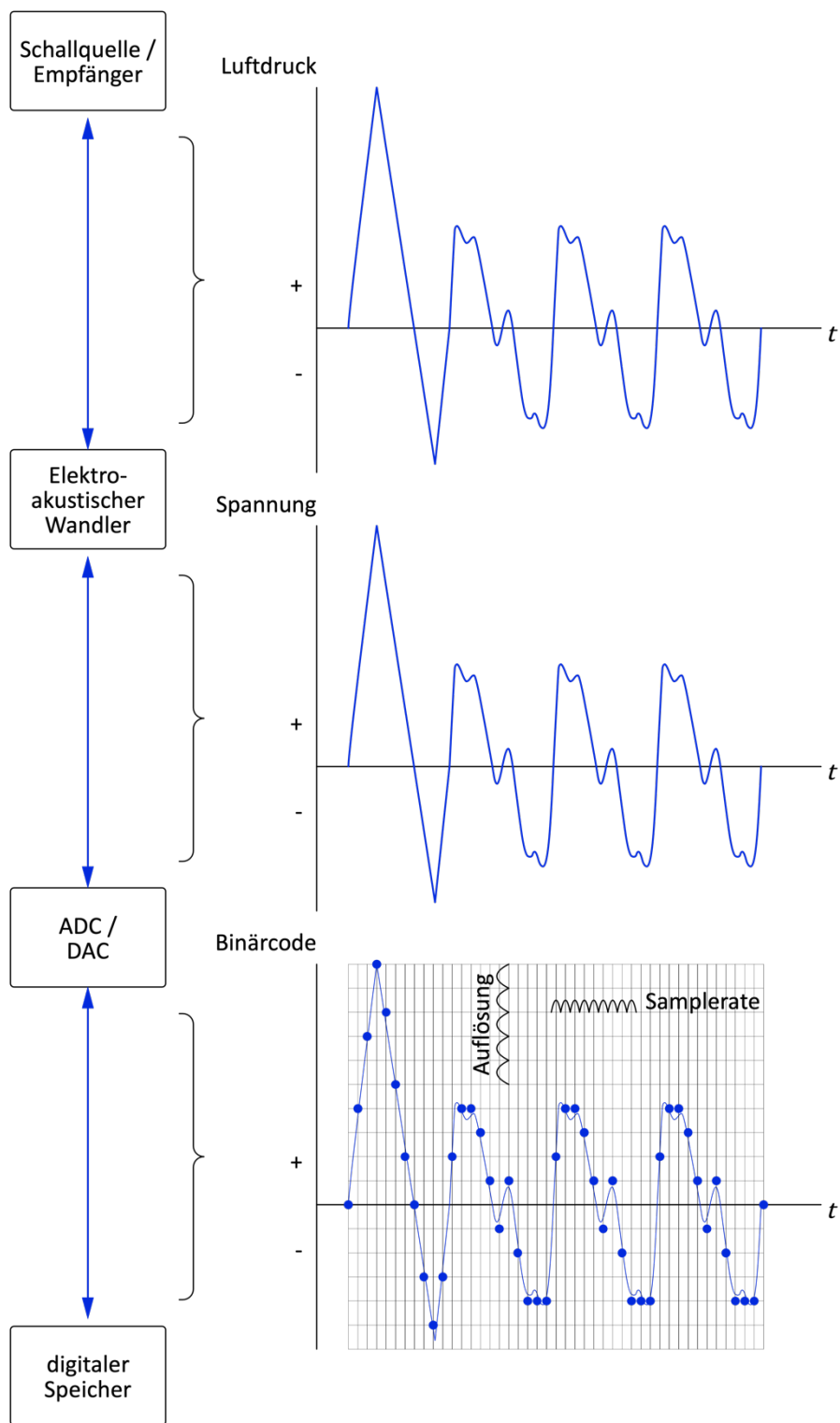


Abbildung 39: Schema der elektroakustischen und Analog-Digital- sowie der Digital-Analog-Wandlung¹¹⁶

¹¹⁶ vgl. Strawn, 1985, S. 31

3.1. Elektroakustische Wandlung

Die elektroakustische Wandlung beschreibt die Wandlung von Schall in ein elektrisches Signal sowie von einem elektrischen Signal in ein akustisches. Die Wandlung von Schall in ein elektrisches Signal wird durch Mikrofone realisiert, die Wandlung eines elektrischen Signals in ein akustisches wird durch Lautsprecher umgesetzt. Ein akustisches, natürliches Signal wird über die Luft in Form einer longitudinalen Welle übertragen. Wird diese Luftdruckschwankung graphisch dargestellt, so entspricht ein Überdruck einer positiven Auslenkung und ein Unterdruck einer negativen Auslenkung. Bei einem elektrischen Signal entspricht die Spannung der Amplitude. Eine positive Auslenkung bedeutet dabei einem Spannungsanstieg, eine negative Auslenkung einem Spannungsabfall.¹¹⁷

3.1.1. Verfahren zur elektroakustischen Wandlung

Es gibt elektrisch und mechanisch verschiedene Konzepte für die Umwandlung von akustischen Signalen in elektrische und umgekehrt. Die verschiedenen Mikrofon- und Lautsprechertypen haben dadurch unterschiedliche Stärken und somit unterschiedliche Anwendungsbereiche. Es gibt zwei Grundprinzipien der elektroakustischen Wandlung. Zum einen gibt es die E-Wandler, die durch elektrische Felder funktionieren; zum anderen gibt es M-Wandler, welche mit magnetischen Feldern arbeiten. Bei den E-Wandlern gibt es piezoelektrische und elektrostatische Wandler, letzterer wird auch Kondensatorwandler genannt. Der piezoelektrische Wandler basiert auf dem piezoelektrischen Effekt. Im Hörschallbereich konkurriert er mit allen anderen Wandler-Prinzipien, während er im Ultraschallbereich der Wandler schlechthin ist. Der elektrostatische Wandler nutzt Kondensatoren, daher der Name, und braucht eine Vorspannung, auch Phantomspannung genannt, um zu funktionieren. Bei den M-Wandler gibt es den dynamischen, den magnetischen und den magnetostatischen Wandler. Der dynamische Wandler basiert auf der Lorenzkraft. Der magnetische Wandler (im engeren Sinne) ist ein sehr effizienter Wandler, weshalb der früher vermehrt eingesetzt wurde, da damals die Verstärkertechnologie noch nicht so weit fortgeschritten war. Der magnetostatische Wandler nutzt den magnetostatischen Effekt; früher wurde er

¹¹⁷ vgl. Raffaseder, 2002, S. 160-161

hauptsächlich im Ultraschall eingesetzt, heute nur noch im Hörschallbereich. All diese Wandlungsprinzipien werden in der Mikrofon- und Lautsprechertechnik eingesetzt.¹¹⁸

3.1.2. Mikrofone

Neben dem elektrischen Prinzip spielt auch die mechanische Umsetzung eines Mikrofons eine Rolle. Jedes Mikrofon besteht aus einer Membran, welche die Schwingungen in der Luft aufnimmt und einem oben besprochenen elektroakustischen Wandler. Ziel eines Mikrofones ist eine möglichst genaue Wandlung von akustischem Signal in ein elektrisches. Es gilt grundsätzlich, je einfacher der mechanische Aufbau eines Mikrofons ist, desto präziser ist dieses, da jedes mechanische Bauteil das Signal verfälscht. Wichtige Mikrofontypen sind das Kondensatormikrofon, das piezoelektrische und das dynamische Mikrofon sowie früher das Kohlemikrofon. Wichtige Kenngrößen eines Mikrofons sind Empfindlichkeit, Frequenzabhängigkeit und Richtcharakteristik. Je nach Bauweise ist ein Mikrofon empfindlicher für gewisse Frequenzen. Die meisten Mikrofone haben eine kugelförmige Richtcharakteristik, während Richtmikrofone aufgrund ihrer Konstruktion für Schallwellen aus einer Richtung empfindlicher sind.¹¹⁹

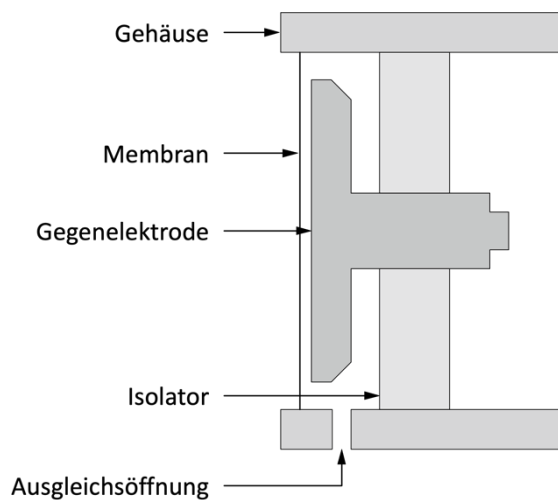


Abbildung 40: Schema eines Kondensatormikrofones¹²⁰

¹¹⁸ vgl. Kuttruff, 2004, S. 349-368, 391-399

¹¹⁹ vgl. Kuttruff, 2004, S. 369-384, vgl. Raffaseder, 2002, S. 163-169

¹²⁰ Kuttruff, 2004, S. 374

3.1.3. Lautsprecher

Auch bei Lautsprechern ist neben dem elektrischen Prinzip die mechanische Umsetzung der Lautsprecher entscheidend. Jeder Lautsprecher besteht aus einer Membran, welche die generierten Schwingungen auf die Luft überträgt. Verbunden mit dieser Membran ist einer der oben besprochenen elektroakustischen Wandler. Die mechanische Umsetzung ist so optimiert, dass möglichst geringe Wandlungsverluste entstehen. Die dynamischen Lautsprecher, die Kondensatorlautsprecher sowie früher die magnetischen Lautsprecher sind die wichtigsten, meist genutzten Lautsprechertypen. Dabei gibt es für verschiedene Frequenzbereiche verschiedene Umsetzungen dieser Lautsprechertypen. Im hörbaren Bereich wird zwischen dem Tiefton-, Mittelton- und Hochtonbereich unterschieden, jedoch gibt es auch Lautsprecher für den Ultraschall Bereich. Mehrere Lautsprecher für die verschiedenen Frequenzbereiche zu haben, bringt mehrere Vorteile mit sich. Überträgt ein einzelner Lautsprecher hohe und tiefe Frequenzen gleichzeitig, so werden die hohen Frequenzen durch die tiefen verzerrt. Der schwingende Teil des Lautsprechers hat wie jeder Körper eine Eigenfrequenz, die besonders verstärkt wird. Liegt diese Eigenfrequenz im wiedergegebenen Frequenzbereich, so dominiert die Eigenfrequenz des Lautsprechers den Klang. Deshalb sollte die Eigenfrequenz des schwingenden Teils des Lautsprechers unter dem wiederzugebenden Frequenzbereich liegen. Deshalb werden Lautsprecher mit einer grossen Membran für tiefe Frequenzen genommen, da eine grössere Membran generell eine tiefere Eigenschwingung hat. Da Lautsprecher mit einer grossen Membran hohe Frequenzen nicht so genau wiedergeben können, werden im Hochtonbereich kleinere Membrane eingesetzt. Deshalb gibt es Lautsprecher für Tief-, Mittel- und Hochtonbereich. Zudem gibt es Lautsprecher mit weiteren Spezialisierungen. So gibt es Kopfhörer, welche auf ein breites Frequenzspektrum bei kleiner Amplitude bei möglichst kleiner Grösse ausgelegt sind. Weiter gibt es Richtlautsprecher, welche den Schall gebündelt in eine bestimmte Richtung ausstrahlen.¹²¹

¹²¹ vgl. Kuttruff, 2004, S. 391-412; vgl. Raffaseder, 2002, S. 179-184

3.2. Analog-Digital-Wandlung

Soll ein analoges, elektrisches Signal in ein digitales, elektronisches umgewandelt werden, so wird ein Analog-Digital-Konverter ADC verwendet. Der ADC wandelt ein kontinuierliches elektronisches Signal in eine Folge von diskreten Werten um, codiert in Null und Eins. Dabei wird mit einer gewissen Geschwindigkeit, der Abtastrate, auch Samplerate genannt, das analoge Signal abgetastet, die Spannung wird abgelesen und digital codiert. Die Abtastrate wird in Hz angegeben. Bei einem Beispiel mit einer Abtastrate von 48 kHz werden also pro Sekunde 48'000 Stellen vom analogen Signal in einen diskreten Wert umgewandelt. Bei jeder Abtastung wird ein unendlich genauer analoger Wert quantisiert; der Spannungswert wird also in einen digitalen Wert umgewandelt. Zwischen dem minimal und maximal möglichen Wert liegen Abstufungen, der Auflösung entsprechend. Bei einer Auflösung von 8 Bits sind es $2^8 = 256$ mögliche Werte und somit 255 Abstufungen. Aufgrund dieser Abstufungen gibt es den Quantisierungsfehler (siehe Seite 74). Deshalb gibt es bei der Analog-Digital-Wandlung immer Verluste. Ein Bit ist 1 Ziffer, die entweder 0 oder 1 entspricht; dies sind $2^1 = 2$ Möglichkeiten. Kommt ein Bit dazu, sind es $2^2 = 4$ Möglichkeiten. Die Auflösung steht im Verhältnis zur Zweierpotenz der Anzahl Bits: $\text{Auflösung} = 2^{\text{Anzahl Bits}}$. Die CD-Auflösung beträgt 16 Bits, was $2^{16} = 65'536$ möglichen Werten entspricht, während HD-Audio eine Auflösung von 24 Bit hat, also $2^{24} = 16'777'216$ mögliche Werte. Das digitale Signal besteht also nicht aus einer zeitlich kontinuierlichen Funktionen, sondern aus diskreten Werten im Verlauf der Zeit. Es können mehrere ADCs parallel eingesetzt werden, um eine mehrkanalige Aufnahme zu generieren. Dadurch sind Stereo- sowie Surroundsound möglich. Die Abtastrate in Hz multipliziert mit der Auflösung in Bits und der Anzahl Kanäle ergibt die Bitrate in Bits/s, der Datenmenge pro Sekunde. Je grösser diese ist, desto mehr Speicherplatz wird benötigt, denselben Zeitabschnitt abzuspeichern. Die CD-Qualität beinhaltet eine Abtastrate von 44'100 Hz, eine Auflösung von 16 Bits und zwei Kanälen und deshalb eine Bitrate von 1'411'200 Bits/s. Eine 1 Stunde lange Aufnahme in CD-Qualität braucht also 5'080'320'000 Bits beziehungsweise 935 Megabyte Speicherplatz.

Bei einer Stereoaufnahme in Studioqualität von 192'000 Hz/32 Bits beansprucht die gleich lange Aufnahme 5.5296 Gigabyte.¹²²

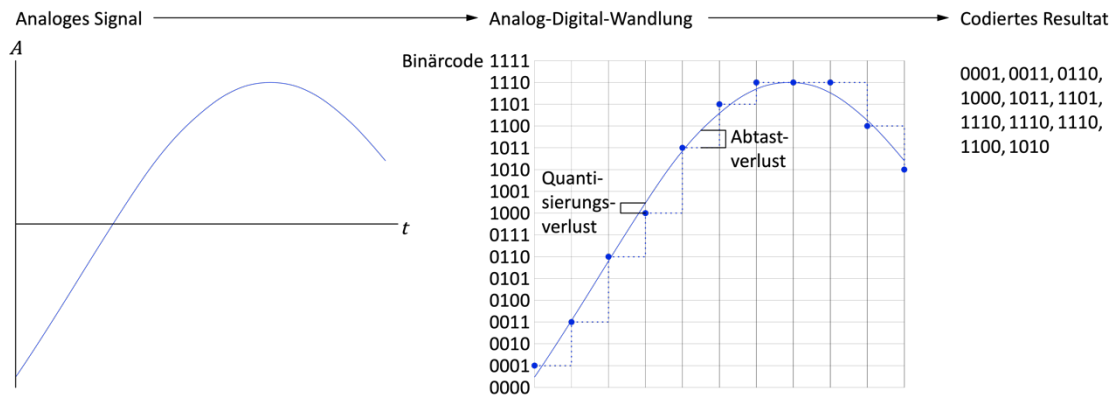


Abbildung 41: Schema der Analog-Digital-Wandlung¹²³

3.2.1. Verfahren zur Analog-Digital-Wandlung

Es gibt verschiedene ADC-Verfahren. Sie unterscheiden sich elektronisch sowie in ihren Merkmalen Auflösung, Abtastgeschwindigkeit, Dynamikbereich, Genauigkeit und Preis. Der Dynamikbereich bezeichnet den Bereich der möglichen Eingangsspannung, zwischen der minimalen und maximalen Spannung. Grundsätzlich gibt es zwei Klassen von ADC-Verfahren, das direkte und das indirekte. Beim direkten Verfahren wird die Spannung des Eingangssignal selbst gemessen, beim indirekten Verfahren wird eine zur Spannung des Eingangssignals proportionale Größe gemessen. Zu den direkten Verfahren zählen das Parallelverfahren (Flash, Half Flash und Multistep Wandler), das Wägeverfahren

¹²² vgl. Baumann, 2022, abgerufen von <https://www.baumannmusic.com/de/2012/sampleratehz-und-khz-aufloesung-bit-und-bitrate-kbits/>; vgl. Lattmann, S. 1-2, abgerufen von https://www.swisseduc.ch/informatik/hardware/analog_digital_wandler/docs/script.pdf; vgl. Raffaseder, 2002, S. 118-125; vgl. Strawn, 1985, S. 30-33; vgl. Taylor, 1994, S. 215-216

¹²³ vgl. ITWissen.info, 2022, <https://www.itwissen.info/Quantisierung-quantization.html>; vgl. Lattmann, S. 1, abgerufen von https://www.swisseduc.ch/informatik/hardware/analog_digital_wandler/docs/script.pdf

(sukzessive Approximation), und das Sigma-Delta-Verfahren. Indirekte Verfahren sind die Zählverfahren, Single-Slope sowie Dual-Slope.¹²⁴

Parallelverfahren I: Flash

Das Parallelverfahren ist ein einfaches ADC-Verfahren. Dabei vergleichen Komparatoren das positive, analoge Eingangssignal mit der Referenzspannung V_{REF} . Da ein einziger Komparator nur auf 1 Bit auflösen kann, werden mehrere Komparatoren parallel geschaltet; auf dem Leiter der Referenzspannung liegen zwischen den verschiedenen Komparatoren gleiche Widerstände R , so fällt also die V_{REF} vom ersten Komparator beginnend in gleichmässigen Schritten ab, sodass beim letzten die tiefste Referenzspannung ankommt. Der letzte Komparator stellt fest, ob die Spannung zwischen 0 V und der ersten Abstufung liegt, der zweitletzte ob diese zwischen der ersten und der zweiten Abstufung liegt und so fort. Der erste Komparator stellt also fest, ob die Spannung des Eingangssignals zwischen der höchsten und der zweithöchsten Abstufung liegt. Liegt eine Spannung des Eingangssignals V_{IN} an, liefern alle Komparatoren, deren V_{REF} geringer ist als V_{IN} eine Eins und alle anderen eine Null. Diese Werte werden im Haltereister zwischengespeichert und vom Prioritätscodierer in eine Binärzahl umgewandelt. Dadurch dass die Komparatoren alle gleichzeitig arbeiten, liefert dieses Verfahren bei jedem Takt ein Resultat und ist dadurch extrem schnell, mehrere GHz sind möglich. Durch die Veränderung der V_{REF} kann der Dynamikbereich verändert werden. Da dieses Verfahren für jede Abstufung einen Komparator benötigt, ist dieses Wandlerverfahren schon bei geringer Auflösung sehr teuer; die Obergrenze der Auflösung beträgt 10 Bit. Wegen seiner tiefen Auflösung und seinem hohen Preis wird der Flash Wandler nur sehr beschränkt in der Musiktechnik verwendet, Hauptanwendungen sind Bild- und Videobearbeitung sowie Radar und Sonar.¹²⁵

¹²⁴ vgl. Elektronik für Embedded Systems, S. 1, abgerufen von

http://www.controllersandpcs.de/lehrarchiv/pdfs/elektronik/ees05_01.pdf; vgl. Lattmann, S. 2-9, abgerufen von https://www.swisseduc.ch/informatik/hardware/analog_digital_wandler/docs/script.pdf

¹²⁵ vgl. Elektronik für Embedded Systems, S. 1-2, abgerufen von

http://www.controllersandpcs.de/lehrarchiv/pdfs/elektronik/ees05_01.pdf; vgl. Lattmann, S. 5, abgerufen von https://www.swisseduc.ch/informatik/hardware/analog_digital_wandler/docs/script.pdf

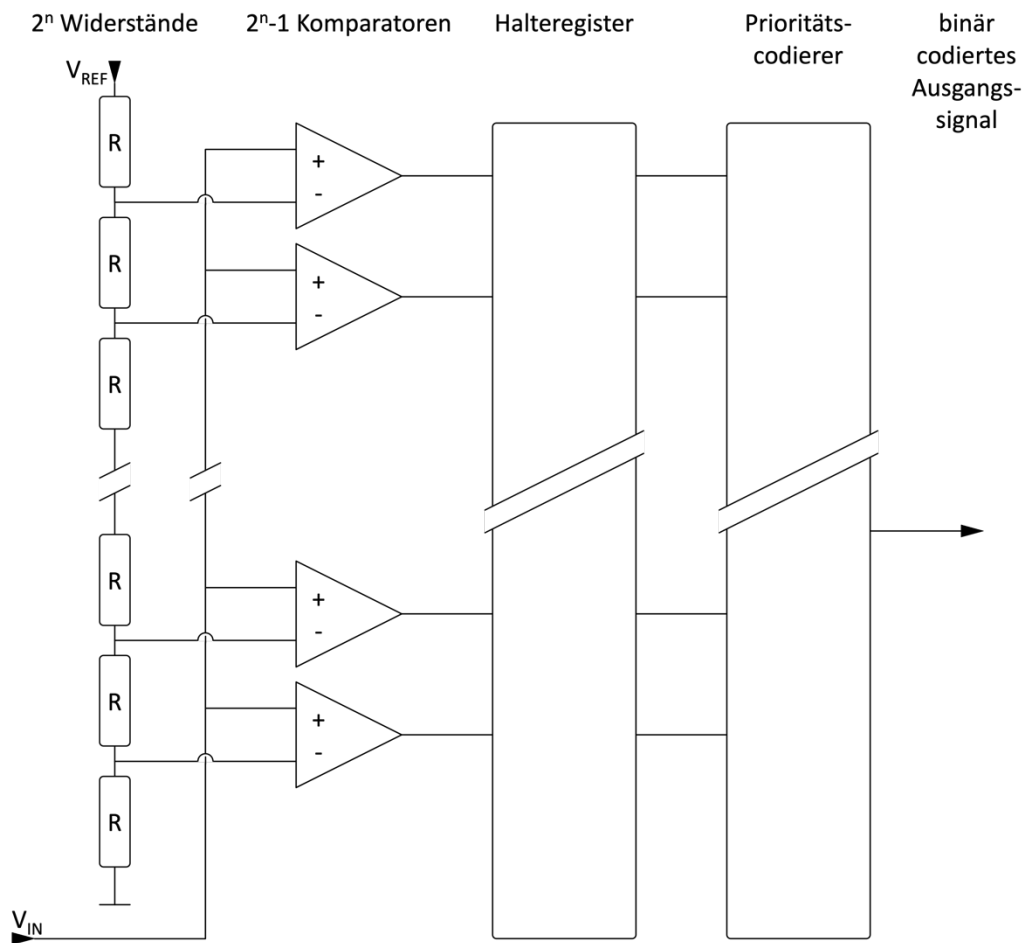


Abbildung 42: Schema eines Flash ADCs¹²⁶

Parallelverfahren II: Half-Flash

Um das Problem der niedrigen Auflösung des Flash Wandlers zu beheben, wurde das Half Flash Verfahren entwickelt. Bei diesem wird das Eingangssignal grob «vordigitalisiert», bei 7 Bit also in 128 Bereiche eingeteilt. Der daraus resultierende Binärwert wird in einen DAC geleitet, die vom DAC kommende Spannung wird dann vom originalen Eingangswert abgezogen, die entstehende Spannung wird dann von einem normalen Flash Wandler digitalisiert. So können die Komparatoren effizienter genutzt werden, es wird nur ein Bruchteil der Komparatoren für eine höhere Auflösung von 10 Bits und höher benötigt. Da

¹²⁶ Elektronik für Embedded Systems, S. 1, abgerufen von

http://www.controllersandpcs.de/lehrarchiv/pdfs/elektronik/ees05_01.pdf

die Digitalisierung in einem Takt abläuft, braucht dieses Verfahren eine sequentielle Ablaufsteuerung und ist zudem weitaus langsamer als ein Flash Wandler, jedoch immer noch sehr schnell.¹²⁷

Parallelverfahren III: Multistep

Das Multistep Verfahren ähnelt dem Half Flash Verfahren. Es verwendet eine noch gröbere «Vordigitalisierung» und einen Flash Wandler. Am Anfang wird das Eingangssignal in beispielsweise vier Spannungsbereiche einsortiert. Zwischen dem Analogsignal und Flashwandler werden dem Spannungsbereich entsprechend Widerstände dazwischengeschaltet. So kann der Multistep Wandler schnellere Geschwindigkeiten erreichen, als mit dem Half Flash Verfahren möglich sind, dazu mit einer besseren Auflösung als beim normalen Flashverfahren.¹²⁸

Zählverfahren I: Single-Slope

Beim Zählverfahren Single-Slope generiert ein Sägezahngenerator eine Spannung, die in einem festgelegten Takt um eine Abstufung erhöht wird. Bei jedem Takt wird durch ein Komparator diese Spannung mit der Eingangsspannung verglichen. Die Zeit, bis die beiden Spannungen gleich sind, wird gemessen und das Resultat codiert. Die Quantisierung dauert je nach Spannung lange, deshalb ist dieses Verfahren sehr langsam. Die Genauigkeit hängt vom Sägezahngenerator ab. Da dieses Verfahren bei Spannungen nahe der Grenzen des Dynamikbereichs seine Präzision verliert, ist diese Methode nicht sehr genau.¹²⁹

¹²⁷ vgl. Elektronik für Embedded Systems, S. 2-3, abgerufen von

http://www.controllersandpcs.de/lehrarchiv/pdfs/elektronik/ees05_01.pdf

¹²⁸ vgl. Elektronik für Embedded Systems, S. 3-4, abgerufen von

http://www.controllersandpcs.de/lehrarchiv/pdfs/elektronik/ees05_01.pdf

¹²⁹ vgl. Elektronik für Embedded Systems, S. 4-5, abgerufen von

http://www.controllersandpcs.de/lehrarchiv/pdfs/elektronik/ees05_01.pdf; vgl. Lattmann, S. 6, abgerufen von https://www.swisseduc.ch/informatik/hardware/analog_digital_wandler/docs/script.pdf

Zählverfahren II: Dual-Slope

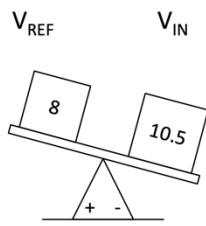
Das Dual-Slope-Verfahren ist eine verbesserte Variante des Single-Slope-Verfahrens und vermeidet den Nachteil der tiefen Genauigkeit des Single-Slope-Verfahrens. In der ersten Phase wird ein Kondensator mit der Eingangsspannung aufgeladen. In der zweiten Phase wird dieser mit der entgegengesetzt gepolten V_{REF} entladen, die Zeit, bis der Kondensator entladen ist, wird gemessen und das Resultat binär codiert. Dadurch ist das Dual-Slope-Verfahren zwar langsamer als das Single-Slope, aber dafür einiges genauer. Zudem sind beide sehr kostengünstig.¹³⁰

Wägeverfahren

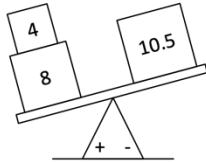
Ein weiteres Prinzip ist das Wägeverfahren, auch sukzessive Approximation genannt. Bei diesem Verfahren wird die aus einem DAC stammenden Referenzspannung V_{REF} mit der Eingangsspannung verglichen. Als erstes nimmt die V_{REF} den $\frac{1}{2}$ Wert der maximal möglichen Spannung an. Liegt diese Spannung über der Eingangsspannung, wird diese wieder entfernt, liegt sie unter dieser, gibt der DAC diese weiterhin aus. Als nächstes wird ein $\frac{1}{4}$ Wert der maximal möglichen Spannung dazu addiert und es wird wieder geprüft, ob diese Spannung höher oder tiefer als die Eingangsspannung liegt. Dieser Prozess wird der Auflösung entsprechend wiederholt. Dadurch ist dieses Verfahren schneller als das Zählverfahren.¹³¹

¹³⁰ vgl. Elektronik für Embedded Systems, S. 5-7, abgerufen von http://www.controllersandpcs.de/lehrarchiv/pdfs/elektronik/ees05_01.pdf; vgl. Lattmann, S. 9, abgerufen von https://www.swisseduc.ch/informatik/hardware/analog_digital_wandler/docs/script.pdf

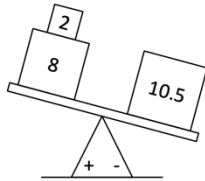
¹³¹ vgl. Elektronik für Embedded Systems, S. 7-8, abgerufen von http://www.controllersandpcs.de/lehrarchiv/pdfs/elektronik/ees05_01.pdf; vgl. Lattmann, S. 7-8, abgerufen von https://www.swisseduc.ch/informatik/hardware/analog_digital_wandler/docs/script.pdf



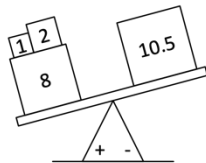
V_{IN} wird mit V_{REF} verglichen. Zum Start entspricht V_{REF} der Hälfte der maximal möglichen Eingangsspannung (16, also 8). Liegt V_{IN} über V_{REF} , wird V_{REF} um die Hälfte erhöht (+4). Der Vergleich beginnt von Neuem.



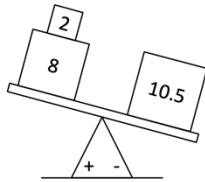
V_{REF} liegt über V_{IN} . Die Hälfte der oben zugefügten Erhöhung wird zurückgenommen (-2). Der Vergleich beginnt von Neuem.



V_{REF} liegt nun unter V_{IN} . Die Hälfte der zuletzt abgezogenen Spannung wird wieder zugefügt (+1). Der Vergleich beginnt von Neuem.



V_{REF} liegt wieder über V_{IN} . Die vorherigen Prozesse werden der Anzahl Bits entsprechend wiederholt.



Der Vorgang endet, wenn die Prozesse der Anzahl Bits entsprechend wiederholt worden sind. Weil hier im Beispiel V_{IN} nun wieder unter V_{REF} liegt, wird der letzte Schritt rückgängig gemacht. Das Resultat wird binär codiert.

Abbildung 43: Wägeverfahren: Das Prinzip der sukzessiven Approximation¹³²

Sigma-Delta-Verfahren

Das wichtigste ADC-Verfahren ist das Sigma-Delta-Verfahren, auch Delta-Sigma-Verfahren genannt. Dieses komplexere Verfahren ermöglicht Auflösungen von bis zu 32 Bits mit einer Abtastrate bis zu 192 kHz bei guter Genauigkeit. Bei diesem Verfahren wird die Eingangsspannung durch einen Differenzverstärker Δ und danach durch einen Integrator geleitet und von einem 1 Bit ADC in einen 1 Bit Bit-Stream umgewandelt. Dabei wird das Ausgangssignal des Integrators vom Komparator mit der Spannung von 0 Volt verglichen.

¹³² Lattmann, S. 7, abgerufen von

https://www.swisseduc.ch/informatik/hardware/analog_digital_wandler/docs/script.pdf

Der D-Flipflop gibt dem resultierenden Signal den Takt der Oversamplingrate. Dieses digitale Signal wird von einem 1 Bit DAC in eine Spannung umgewandelt, die $+V_{REF}$ oder $-V_{REF}$ entspricht. Diese Spannung wird wieder in zum Differenzverstärker Δ geleitet, wo diese Spannung von der Eingangsspannung abgezogen wird. Das resultierende Signal wird erneut in den Integrator geleitet, der als Tiefpassfilter funktioniert und dem Signal durch seinen Kondensator einen zeitlich kontinuierlich ändernden Charakter gibt, ähnlich der Frequenzmodulation. Das Resultat wird wieder vom 1 Bit ADC umgewandelt und bildet das nächste Bit im Bit-Stream. Dieser Kreislauf wird mit einer hohen Frequenz, der Oversamplingrate, wiederholt. Dabei entspricht der durchschnittliche Wert des Bitstreams dem Wert des analogen Eingangssignals, je länger der Kreislauf wiederholt wird, desto genauer gleicht sich dieser durchschnittliche Wert des Bitstreams an V_{IN} an. Deshalb wird der Bitstream vom Counter gezählt, der den Bitstream in ein digital codiertes Signal wandelt. Dieser Teil des Sigma-Delta-ADCs wird Sigma-Delta-Modulator genannt und bildet das Kernstück des ADCs. Das digitale Signal vom Counter wird durch den digitalen Tiefpassfilter und danach durch den Decimator geleitet. Der Tiefpassfilter entfernt die zu hohen Frequenzen des Signals, um Aliasing (siehe Seite 75) zu verhindern. Der Decimator nimmt in einem Takt, der der Abtastrate des ADCs entspricht, aus dem digitalen Signal den Durchschnitt und codiert diesen entsprechend der Auflösung des DACs. Das resultierende Signal hat nun eine viel tiefere Abtastrate als der Sigma-Delta-Modulator. Dieses Verhältnis zwischen Oversamplingrate und Abtastfrequenz wird Oversamplingratio genannt und bestimmt, wie viele Bits aus dem Bitstream vom Decimator auf einmal zusammengefasst werden. Je grösser der Oversamplingratio ist, desto höher ist die Oversamplingrate im Verhältnis zur Abtastrate und desto genauer ist der ADC generell. Durch Oversampling des Sigma-Delta-Modulators, dadurch dass pro eigentlicher Abtastung des ADCs dem Oversamplingratio entsprechend mehr abgetastet wird, erreicht der Sigma-Delta-ADC eine sehr hohe Genauigkeit bei einer hohen Abtastrate. Das Oversampling verhindert zusammen mit dem digitalen Tiefpassfilter nicht nur das Aliasing, sondern minimiert auch das Störgeräusch, wodurch Sigma-Delta-ADCs einen tiefen SNR (siehe Seite 77) erreichen. Aus diesen Gründen wurden die Sigma-Delta-ADCs seit der

Jahrtausendwende immer populärer und werden heute in fast allen Bereichen der Audiotechnik verwendet.¹³³

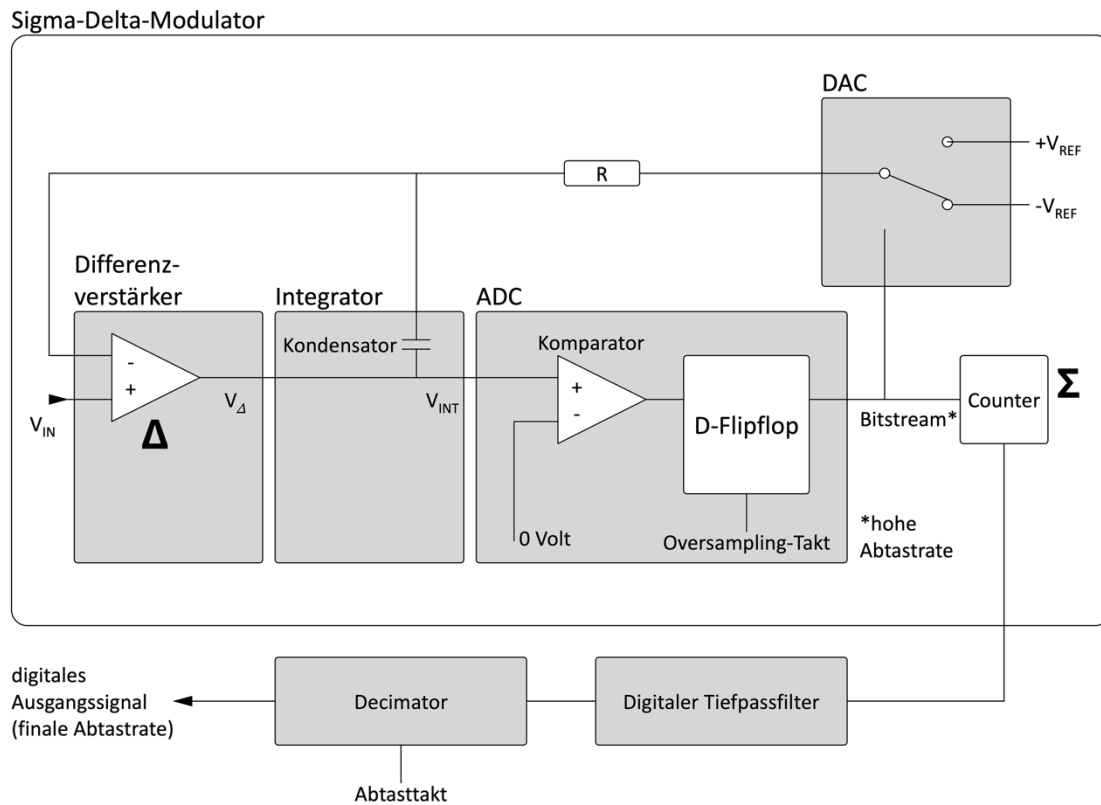


Abbildung 44: Schema eines Sigma-Delta-ADCs¹³⁴

¹³³ vgl. IFE-TU Graz, 2021, abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=M5Vx-X66seg>; vgl. <https://www.youtube.com/watch?v=NrkFd7h6R2Y>; vgl. Texas Instruments, 2021, abgerufen von https://www.youtube.com/watch?v=U_Yv69IGAfQ; vgl. Zigunov, 2020, abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=NrkFd7h6R2Y>

¹³⁴ vgl. IFE-TU Graz, 2021, abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=M5Vx-X66seg>; vgl. Texas Instruments, 2021, abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=NrkFd7h6R2Y>; vgl. Zigunov, 2020, abgerufen von https://www.youtube.com/watch?v=U_Yv69IGAfQ

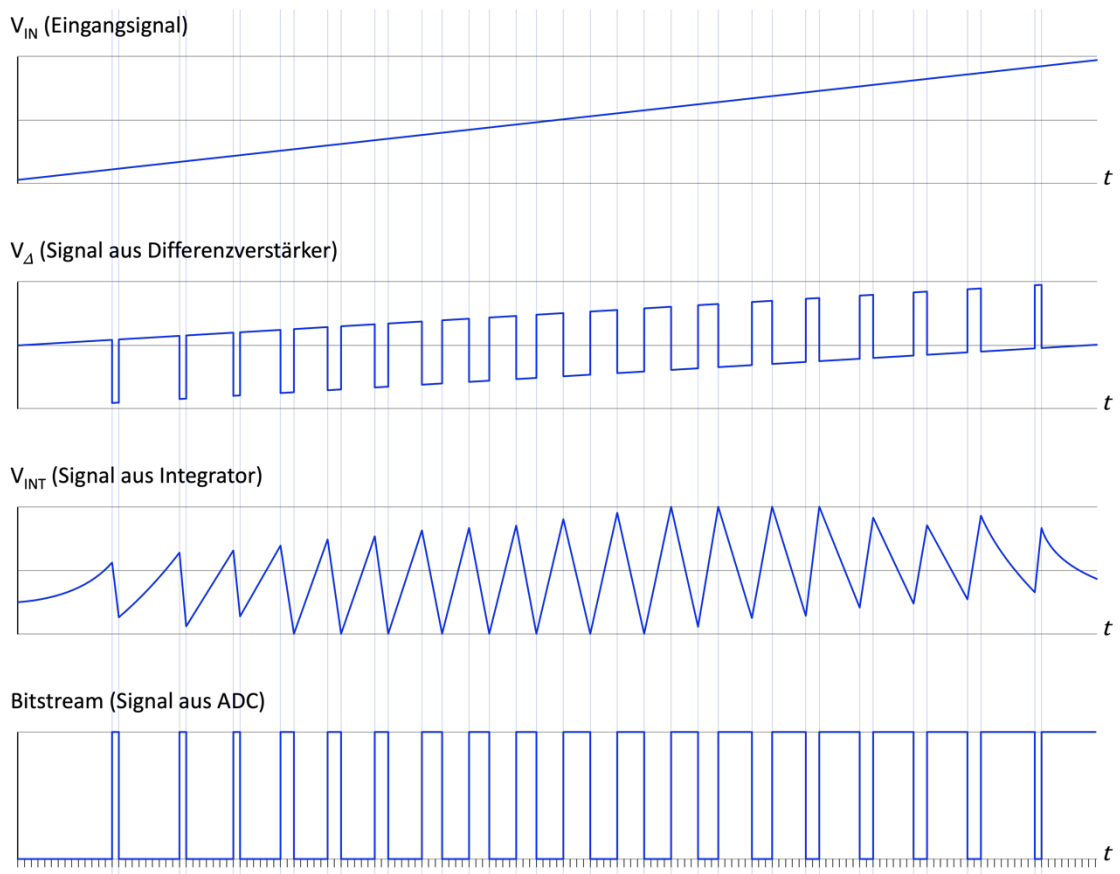


Abbildung 45: Verschiedene Signale eines Sigma-Delta-Modulators¹³⁵

3.2.2. Fehler bei der Analog-Digital-Wandlung

Bei der Analog-Digital-Wandlung entstehen durch Fehler immer Verluste, bei allen Wandlungsmethoden. Diese Fehler gilt es zu minimieren, um die Genauigkeit des ADCs zu steigern. Die Genauigkeit eines ADCs wird durch die Summe aller Fehler definiert.¹³⁶

¹³⁵ vgl. Texas Instruments, 2021, abgerufen von https://www.youtube.com/watch?v=U_Yv69IGAfQ; vgl. Ziginov, 2020, abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=NrkFd7h6R2Y>

¹³⁶ vgl. Kamdem, 2011, S. 57-62; vgl. Raffaseder, 2002, S. 123

Quantisierungsfehler

Bei jedem ADC-Verfahren gibt es den Quantisierungsfehler. Da die Auflösung nicht unendlich genau sein kann, muss immer auf- und abgerundet werden. Es ist Zufall, ob ein Wert auf- oder abgerundet werden muss, was sich im Quantisierungsrauschen äussert. Wie stark auf oder abgerundet werden muss, hängt von der Auflösung ab, deshalb sorgt eine höhere Auflösung für einen kleineren Quantisierungsfehler.¹³⁷

Offsetfehler und Verstärkungsfehler

Ein weiterer Fehler ist der Offsetfehler. Der Offsetfehler bezeichnet die Verschiebung des digitalen Ausgangs- vom analogen Eingangssignal. Durch die Abweichung bei 0 V lässt sich die Stärke des Offsetfehlers feststellen und durch die Kalibrierung des ADCs kann dieser behoben werden. Weiter gibt es den Verstärkungsfehler. Der Verstärkungsfehler beeinflusst die Steilheit der Kurve. Auch dieser kann durch Kalibrierung des ADCs behoben werden.¹³⁸

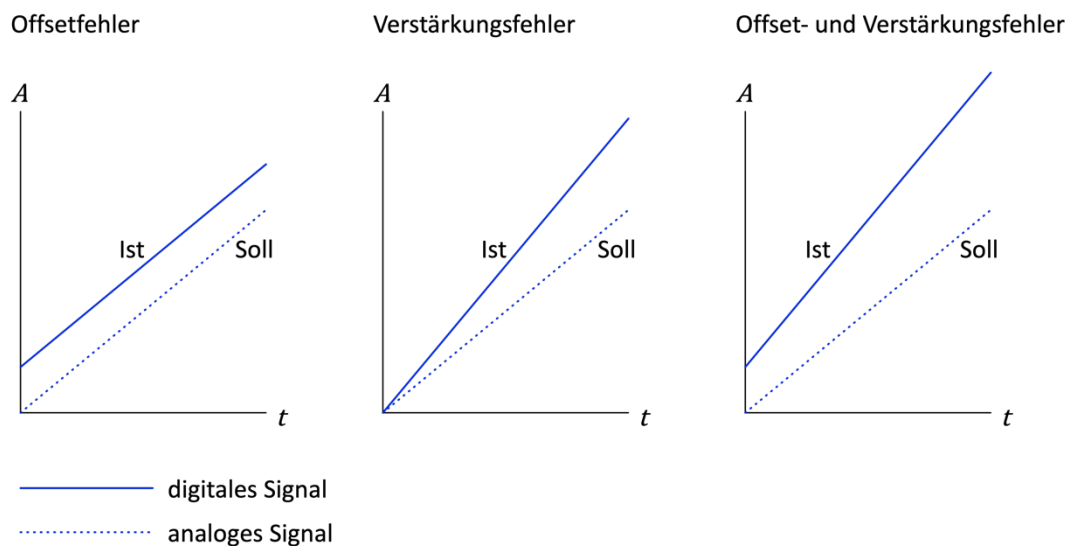


Abbildung 46: Offset- und Verstärkungsfehler¹³⁹

¹³⁷ vgl. Kamdem, 2011, S. 57-62; vgl. Raffaseder, 2002, S. 123-124

¹³⁸ vgl. Kamdem, 2011, S. 57-62

¹³⁹ Kester, 2004, S. 5.3

Differentielle Nichtlinearität und Missing Codes sowie integrale Nichtlinearität

Die differentielle Nichtlinearität bezeichnet einen weiteren Fehler. «Die differentielle Nichtlinearität DNL ist ein Maß für den relativen Fehler einer Stufenbreite beziehungsweise Codebreite der Übertragungsfunktion. Sie kennzeichnet die Abweichung einer Stufenbreite von dem idealen Wert...»¹⁴⁰. Eine starke DNL kann zu sogenannten «Missing Codes» führen. Die integrale Nichtlinearität INL bezeichnet die maximale Abweichung der realen Übertragungsfunktion von der idealen. Die DNL sowie die INL wird in LBS gemessen und entspricht einer Codebreite, beziehungsweise Abstufung der Quantisierung.¹⁴¹

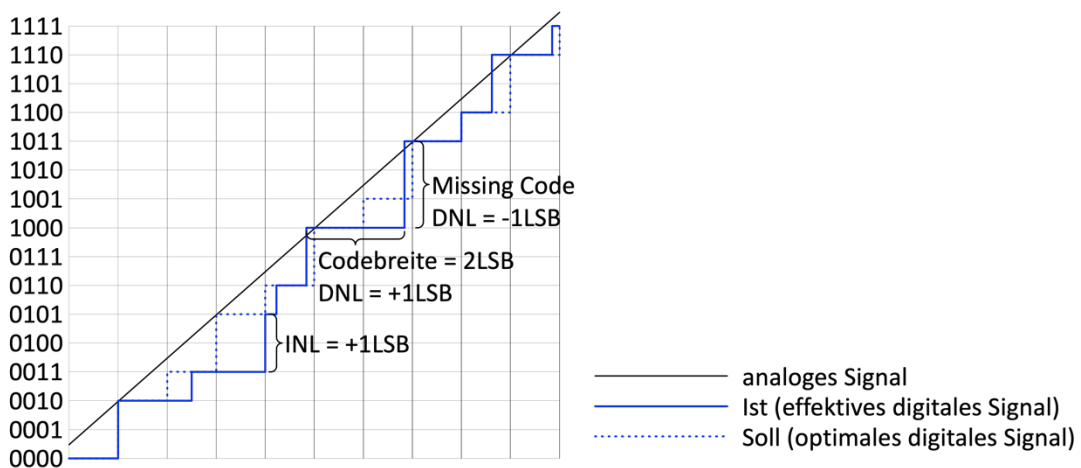


Abbildung 47: Differentielle und integrale Nichtlinearität sowie Missing Codes¹⁴²

Aliasing

Eine weitere Fehlerquelle ist der Aliaseffekt, das sogenannte Aliasing. Überschreitet die höchste Frequenz des Eingangssignals die halbe Nyquistfrequenz $\frac{1}{2} f_s$, die Frequenz der

¹⁴⁰ Kamdem, 2011, S. 60

¹⁴¹ vgl. Kamdem, 2011, S. 57-62; vgl. Lattmann, S. 16-17, abgerufen von

https://www.swisseduc.ch/informatik/hardware/analog_digital_wandler/docs/script.pdf; vgl. Lundberg, 2002, S.1-6; vgl. Strawn, 1985, S. 30-33

¹⁴² Lattmann, S. 17, abgerufen von

https://www.swisseduc.ch/informatik/hardware/analog_digital_wandler/docs/script.pdf

Abtastrate, kommt es zum Aliasing, wie die Nyquisttheorie besagt. In diesem Fall wird die zu hohe Frequenz f_a als eine deutlich tiefere Frequenz f interpretiert. Dieses falsche Signal wird Aliased Signal genannt und hat eine Frequenz $f = f_s - f_a$. Um diesen Fehler zu vermeiden, wird vor den eigentlichen ADC ein Tiefpassfilter geschaltet, der alle zu hohen Frequenzen wegfiltert. Bei Sigma-Delta-ADCs wird das Aliasing zusätzlich durch das Oversampling unterbunden.¹⁴³

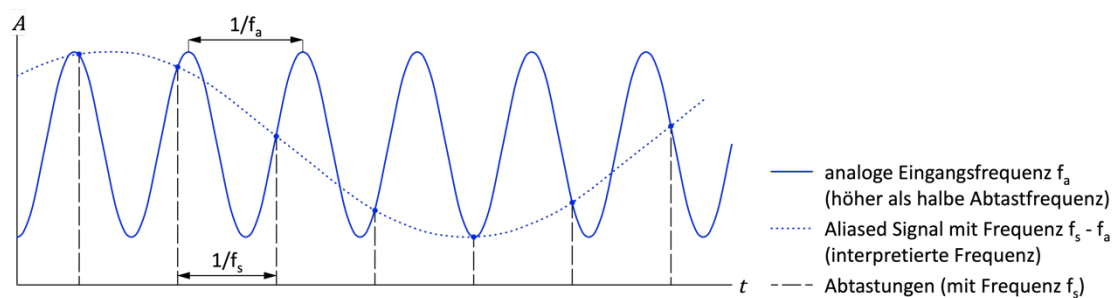


Abbildung 48: Aliasing¹⁴⁴

Clipping

Liegt die Spannung des Eingangssignals nicht im dynamischen Bereich des ADCs, also unter oder über dem zulässigen Bereich, so findet Clipping statt. In diesem Fall liegen die Auslenkungen des analogen Signals unter oder über dem Dynamikbereich des ADCs, was dazu führt, dass diese Auslenkungen des analogen Signals nicht vollständig aufgezeichnet werden können; sie werden abgeschnitten. Dadurch verliert die das aufgezeichnete Signal die Wellenform von V_{IN} . Diese Verzerrungen werden deutlich hörbar und sind daher sehr störend. Durch ein Reduzieren der Amplitude des Eingangssignals kann das analoge Signal in den zulässigen Spannungsbereich gebracht und so das Clipping verhindert werden.¹⁴⁵

Weitere Fehlerquellen

¹⁴³ vgl. Kamdem, 2011, S. 62-63; vgl. Kester, 2004, S. 2.27-2.31; vgl. Raffaseder, 2002, S. 120; vgl. Strawn, 1985, S. 30-33

¹⁴⁴ Kester, 2004, S. 2.28

¹⁴⁵ vgl. Raffaseder, 2002, S. 122

Weitere Fehler können durch schlechte Bauteile, fehlende elektromagnetische Abschirmungen und falsche Masseführung verursacht werden.¹⁴⁶

3.2.3. Genauigkeit

Die Genauigkeit eines ADCs wird durch die Summe der oben beschriebenen Fehler bestimmt. Diese Summe der Fehler ist zufällig und äussert sich deshalb als Rauschen. Dieses Rauschen wird mit dem Signal-Rausch-Verhältnis SNR/SNDR (signal-to-noise-and-distortion-ratio) beschrieben. Je nach ADC-Verfahren ist das Rauschen immer gleich laut, oder proportional zur Lautstärke des Eingangssignals. Deshalb wird das Eingangssignal bei manchen ADC zuerst verstärkt und erst dann umgewandelt. Das SNR wird bei der Hälfte, der maximal möglichen Lautstärke des Eingangssignals gemessen. Je grösser das SNR, desto geringer die Genauigkeit. Bei keinem ADC kann das SNR=0 sein, jedoch gibt es grosse Unterschiede zwischen den verschiedenen Verfahren und Bauarten.¹⁴⁷

3.3. Digital-Analog-Wandlung

Um ein digitales Signal wieder in Schall umzuwandeln, muss dieses in zuerst in ein analoges Signal gewandelt werden. Dies wird von einem Digital-Analog-Wandler DAC umgesetzt. Hierbei werden viele diskrete, binär codierte Werte in ein kontinuierliches analoges Signal umgewandelt. Ein DAC ist technisch einfacher umzusetzen als ein ADC. Ein DAC mit n Bits Auflösung wandelt ein digitales Signal mit n Bit Auflösung in 2^n verschiedene Ausgangsspannungen um, welche in regelmässigen Abstufungen zwischen der minimalen und maximalen Ausgangsspannung liegen.¹⁴⁸

¹⁴⁶ vgl. Lattmann, S. 16, abgerufen von

https://www.swisseduc.ch/informatik/hardware/analog_digital_wandler/docs/script.pdf

¹⁴⁷ vgl. Lundberg, 2002, S. 7; vgl. Raffaseder, 2002, S. 46, 123-124

¹⁴⁸ vgl. Elektronik für Embedded Systems, S. 9-10, abgerufen von

http://www.controllersandpcs.de/lehrarchiv/pdfs/elektronik/ees05_01.pdf; vgl. Kester, 2004, S. 3.1-3.2;

vgl. Taylor, 1994, S. 215-216

3.3.1. Verfahren zur Digital-Analog-Wandlung

Auch hier gibt es verschiedene Verfahren mit verschiedenen Stärken. Generell hängt die Genauigkeit eines DACs jedoch immer von der Genauigkeit der Referenzspannung V_{REF} und von der Qualität der Bauteile ab.¹⁴⁹

Parallelverfahren

Das Parallelverfahren kann auch bei DACs angewendet werden, es funktioniert fast wie ein invertierter Flash-Wandler. In der Theorie wird bei einem DAC mit n Bits Auflösung eine Spannungsquelle mit der Referenzspannung V_{REF} an eine Widerstandskette mit 2^n Widerständen angeschlossen, sodass die Spannung in regelmässigen Abstufungen gesenkt wird. Zwischen jedem Widerstand sowie vor dem ersten und nach dem letzten befindet sich ein Schalter, der an den Ausgang V_{OUT} verbunden ist. Praktisch werden jedoch 2^n geschaltete Stromquellen verwendet, da so viele Widerstände kostenintensiv sind und ihr Innenwiderstand von V_{REF} abhängt. Dieser DAC-Typ wird Kelvin-Spannungsteiler oder String-DAC genannt.¹⁵⁰

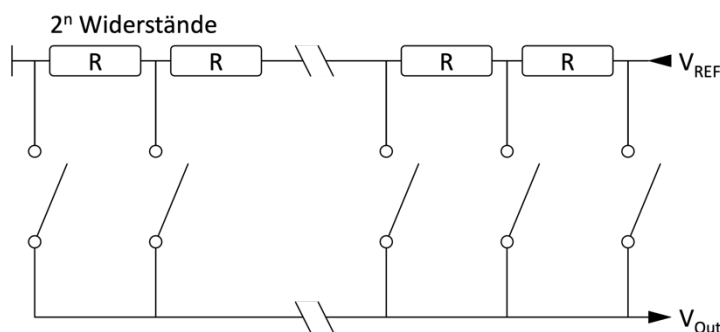


Abbildung 49: Schema eines String-DACs¹⁵¹

¹⁴⁹ vgl. Elektronik für Embedded Systems, S. 9-15, abgerufen von

http://www.controllersandpcs.de/lehrarchiv/pdfs/elektronik/ees05_01.pdf; vgl. Kester, 2004, S. 3.1-3.2

¹⁵⁰ vgl. Elektronik für Embedded Systems, S. 10, abgerufen von

http://www.controllersandpcs.de/lehrarchiv/pdfs/elektronik/ees05_01.pdf; vgl. Kester, 2004, S. 3.4-3.6

¹⁵¹ vgl. Elektronik für Embedded Systems, S. 9, abgerufen von

http://www.controllersandpcs.de/lehrarchiv/pdfs/elektronik/ees05_01.pdf

Stromsummationsverfahren

Ein weiteres Verfahren ist das Stromsummationsverfahren, was grob einer Umkehrung des Wägeverfahrens entspricht. Hierbei schaltet jedes Bit, jede Binärstelle einen Widerstand ein oder aus, welche auf der einen Seite mit einer Stromquelle U_{REF} und auf der anderen mit einem Strom-Spannungs-Wandler verbunden sind. Die erste Binärstelle schaltet einen Widerstand R , die zweite Stelle einen von $2R$ und so weiter, sodass beim ersten Widerstand $\frac{1}{2}$ des maximalen Stromes fließen, bei zweitem $\frac{1}{4}$ und so weiter. Insgesamt fließt also die Summe der binär gewichteten Teilströme in den Strom-Spannungs-Wandler, der den Strom in ein Spannungssignal umwandelt. Mit diesem Verfahren kann nur eine sehr tiefe Genauigkeit erreicht werden, weshalb es nur für DACs mit tiefer Auflösung in Frage kommt.¹⁵²

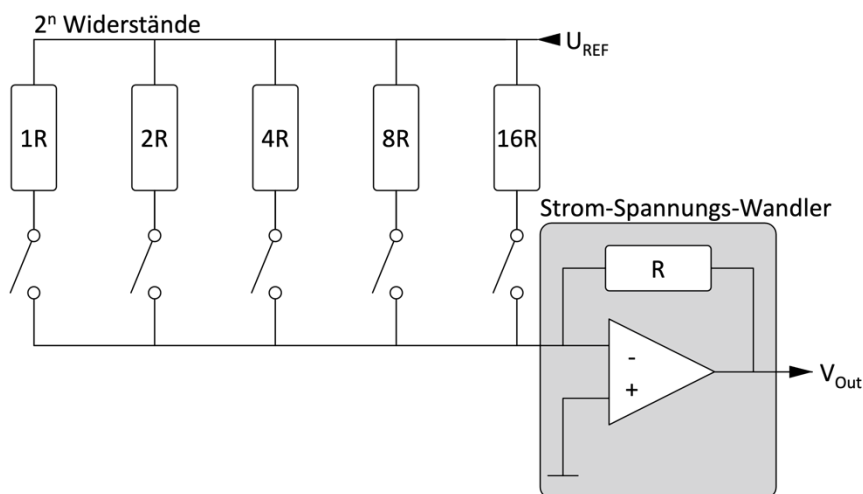


Abbildung 50: Schema eines Stromsummations-DACs¹⁵³

¹⁵² vgl. Elektronik für Embedded Systems, S. 10-11, abgerufen von

http://www.controllersandpcs.de/lehrarchiv/pdfs/elektronik/ees05_01.pdf

¹⁵³ Elektronik für Embedded Systems, S. 11, abgerufen von

http://www.controllersandpcs.de/lehrarchiv/pdfs/elektronik/ees05_01.pdf

Sigma-Delta-Verfahren

Das am weitesten verbreitete Verfahren ist wie bei den ADCs das Sigma-Delta-Verfahren. Es wird ein ähnliches Prinzip wie bei den Sigma-Delta-ADCs verwendet, jedoch wird anstelle des analogen Modulators ein digitaler verwendet, der digitale Filter durch einen analogen ersetzt. Das binäre Eingangssignal mit einer bestimmten Samplerate wird mithilfe eines Interpolationsfilters mit ganz vielen Nullen auf eine höhere Frequenz, der Oversamplingrate «ergänzt». Auf das resultierende Signal wird ein digitaler Filteralgorithmus angewendet, sodass ein binäres Signal mit einer höheren Samplerate entsteht. Dieses wird dann vom Sigma-Delta-Modulator in einen Bit-Stream umgewandelt, das Prinzip des Sigma-Delta-Modulators vom ADC invertiert. Dieser Bit-Stream wird durch einen 1 Bit DAC umgewandelt und durch einen analogen Tiefpassfilter geleitet. Der 1 Bit DAC kann durch einen DAC mit mehreren Bits ersetzt werden, was das Verfahren deutlich komplizierter, jedoch auch genauer macht. Dank des Fortschritts der Elektrotechnik sind Sigma-Delta-DACs sehr genau und nicht mehr so kostenaufwändig. Dadurch sind Sigma-Delta-DACs wie auch ihre ADC-Gegenstücke im Audibereich sowie bei Messtechnik sehr populär.¹⁵⁴

3.3.2. Fehler bei der Digital-Analog-Wandlung

Bei DACs gibt es genauso wie bei ADCs den Verstärkungs- und den Offsetfehler. Das Konzept der differentiellen, der integralen Nichtlinearität, des Signal-Rausch-Verhältnisses SNDR/SNR und des Aliasing kann von den ADCs auf die DACs übertragen werden.¹⁵⁵

4. Digitale Klangsynthese

Mit der Erfindung von Computern kam die Idee von digitaler Klangsynthese auf. Erste digitale Synthesizer kamen in den 80er Jahren auf den Markt. Bald darauf folgten die ersten Software-Synthesizer. Software-Synthesizer sind Programme zur digitalen Klangsynthese. Ein Software-Synthesizer errechnet der Eingabe entsprechend eine Reihe diskreter Werte, welche digital als Audiodatei gespeichert und durch DACs in ein zeitlich

¹⁵⁴ vgl. Kester, 2004, S. 3.23-3.24, 3.133-3.135

¹⁵⁵ vgl. Kester, 2004, S. 5.1-5.45

kontinuierliches Signal gewandelt werden, sodass durch Lautsprecher die erzeugten Klänge abgespielt werden können. Im Verlauf der Digitalisierung wurden verschiedenste Software-Synthesizer entwickelt, welche unterschiedliche Synthesemethoden nutzen. Früher dauerte es mehrere Tage, um einen einzigen Klang zu synthetisieren. Der Fortschritt in der Halbleitertechnik beschleunigte diesen Prozess, sodass es heute möglich ist, live, ohne Verzögerung, digitale Klangsynthese zu betreiben. Digitale Synthesizer sowie auch Software-Synthesizer werden meist durch eine MIDI-Tastatur oder durch Eingabe mit Maus und Computertastatur gesteuert, selten auch durch weitere Eingabegeräte wie zum Beispiel Joysticks. Eine MIDI-Tastatur ist eine Klaviertastatur, welche ein Signal der gedrückten Taste entsprechend inklusive Intensität des Anschlages an den digitalen Synthesizer beziehungsweise Computer weitergibt.¹⁵⁶

4.1. Wavetable Synthese

Die Wavetable Synthese basiert auf der subtraktiven Synthese, doch an der Stelle des Oszillators befindet sich ein Digital-Analog-Wandler. Der Nutzer wählt aus der Bibliothek von verschiedensten, komplexen Wellenformen eine aus, welche vom DAC in ein elektrisches Signal umgewandelt wird. Die Wellenform kann vorwärts und rückwärts wiedergegeben werden. Dieses Signal wird dann wie bei einem subtraktiven Synthesizer weiterverarbeitet. Manche Wavetable Synthesizer ersetzen die LFOs und EGs ebenso mit DACs, wodurch weitere Möglichkeiten entstehen. Im Unterschied zu analogen Synthesizern wird die Klangfarbe nicht mehr hauptsächlich durch die Filter bestimmt, sondern auch durch die zugrunde liegende Wellenform.¹⁵⁷

4.2. Subtraktive Synthese

Die subtraktive Software-Synthesizer waren durch die analogen Synthesizer inspiriert und nutzen das Konzept der subtraktiven Klangsynthese. Bei dieser Art von Software-Synthesizern wird durch die Software ein Signal von einem Oszillator oder Rauschgenerator nachgeahmt. Die Software simuliert die verschiedenen Bauteile eines

¹⁵⁶ vgl. Raffaseder, 2002, S. 225-227, 241-242; vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 197

¹⁵⁷ vgl. Raffaseder, 2002, S. 235; vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 197-211

analogen Synthesizers und verändert so das zuvor erzeugte Signal. Da die Software-Synthesizer nicht wie ihre analogen Pendanten an die Grenzen elektronischer Bauteile gebunden sind, konnten die ersten subtraktiven Software-Synthesizer die komplexen Eigenschaften der elektrischen Bauteile eines analogen Synthesizers nur schlecht nachahmen. Gleichzeitig wurden bisher ungehörte Klänge möglich. Aktuelle subtraktive Software-Synthesizer kommen analogen Synthesizern sehr nahe und sind preislich viel attraktiver.¹⁵⁸

4.3. Additive Synthese

Additive Software-Synthesizer nutzen dasselbe Prinzip wie analoge, additive Synthesizer. Wie bei analogen Synthesizern generiert die Software der Eingabe entsprechend Teiltöne. Da bei den additiven Software-Synthesizern keine Oszillatoren für jeden einzelnen Teilton nötig sind, haben diese den Vorteil gegenüber ihren analogen Pendanten, dass sie nicht viele komplexe elektrische Bauteile benötigen, was sie preislich attraktiver macht. Zudem kann so theoretisch eine beliebige Anzahl von Obertönen generiert werden. Weiter ist es möglich, für jeden Teilton einen eigenen ADSR-Klangverlauf zu programmieren. Deshalb ersetzen additive Software-Synthesizer zum allergrößten Teil ihre analogen Pendanten.¹⁵⁹ Oft werden additive Software-Synthesizer zur Resynthese verwendet. Wie auch beim analogen Pendant wird das Spektrum eines Klanges analysiert und nach Bedarf gezielt verändert.¹⁶⁰

4.4. Physical Modeling

Physical Modeling ist ein neuer Ansatz der Klangsynthese und wurde mit den Erfindungen von Software-Synthesizern und Programmen zur 3D-Simulation möglich. Beim Physical Modeling wird ein schwingender Körper simuliert, zum Beispiel eine Saite. Anhand dieser Simulation wird dann ein Klang errechnet. Nicht nur der schwingende Körper selbst kann simuliert werden, sondern auch Anschlag, Anstreichen beziehungsweise Anblasen sowie

¹⁵⁸ vgl. Raffaseder, 2002, S. 225-227, 234-235, 241-242

¹⁵⁹ vgl. Raffaseder, 2002, S. 234; vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 198-199

¹⁶⁰ vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 199

Klangkörper und die Umgebung. Dabei können mit wenigen Klicks die Materialeigenschaften der verschiedenen Teile der Simulation verändert werden. Dadurch sind überraschend authentisch klingende Imitationen von Musikinstrumenten sowie auch neuartige Klänge möglich. Das Physical Modeling basiert auf der mathematischen Analyse des Baus und der Funktionen eines Musikinstruments. Da Physical Modeling einen hohen Rechenaufwand verursacht, waren anfangs nur einfache Simulationen möglich. Heute sind jedoch auch sehr komplexe Simulationen mit mehreren virtuellen Schallquellen realisierbar.¹⁶¹

4.5. Synthese mit Samples

Die Klangsynthese auf Basis von Samples bezeichnet die Klangerzeugung durchs Abspielen von Samples. Samples sind Aufnahmen von Klängen, meist von akustischen Instrumenten. Diese Klänge werden dann entsprechend einer Eingabe, zum Beispiel durch eine Klaviertastatur, abgespielt. Die Klangsynthese auf Basis von Samples ist nur schwer zu vergleichen mit den anderen Klangerzeugungsmethoden, da diese im engeren Sinne gar nicht einer Klangsynthese entspricht, da schon einmal erzeugte Töne neu in anderen Zusammenhängen abgespielt werden. Auch wenn es schon Versuche mit analoger Technik gab, wurde die Synthese mit Samples erst mit der Digitalisierung vollumfänglich möglich.¹⁶²

4.5.1. Sampling

Beim Sampling wird ein kurzer Klang als Sample, als Muster, genommen. Wird eine Taste auf der Tastatur gedrückt, wird dieses Sample abgespielt. Die Tonhöhe wird dabei der Taste angepasst. Wird also eine Taste gedrückt, die eine Oktave höher liegt, wird das Sample doppelt so schnell abgespielt, was die Tonhöhe des Samples um eine Oktave anhebt. Das Sample kann auch umgekehrt oder geloopt wiedergegeben werden. Loopen bedeutet, das Sample in einer Schleife laufen lassend. Dabei kann der Loop, die Schleife, so ausgewählt werden, dass der Loopteil in der Sustain Phase liegt. Dadurch können

¹⁶¹ vgl. Raffaseder, 2002, S. 240-241; vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 213-215

¹⁶² vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 207-208

höhere Töne, bei denen das Sample schneller abgespielt wird, trotzdem gleich lange klingen. Das resultierende Signal wird durch digital virtuelle oder analoge VCFs und VCAs geleitet, um eine der Tasteneingabe entsprechende ADSR-Kurve zu erreichen. Bei neueren Sampling-Synthesizern sowie bei Sampling-Software-Synthesizern ist für jede Taste mindestens ein einzelnes Sample gespeichert. Dadurch muss das Sample bei veränderter Tonhöhe nicht schneller abgespielt werden. Dadurch kann verhindert werden, dass neben der Grundfrequenz des Samples auch alle Obertöne mitverschoben werden, denn die Frequenzen der Formanten eines Instruments bleiben bei unterschiedlichen Grundfrequenzen gleich. Bei weiter fortgeschritteneren Sampling Synthesizern sind für alle Tasten mehrere Samples unterschiedlicher Intensität gespeichert, sodass ein feines oder starkes Drücken der Tasten nicht nur in der Lautstärke, sondern auch in der Klangfarbe einen Unterschied macht. Durch diese fortgeschrittenen Formen des Samplings können ganze Orchester ziemlich authentisch imitiert werden.¹⁶³

4.5.2. Linear-Arithmetische-Synthese

Die LA-Synthese (Linear-Arithmetische-Synthese) wurde Ende der 80er Jahren entwickelt und ist eine Kombination aus Sampling (siehe Seite 83) und der subtraktiven Klangsynthese. Mit der LA-Synthese wurden erstmals Samples als Ausgangspunkt für die Klangerzeugung verwendet. Da in den 80er Jahren der für Samples benötigte Speicherplatz sehr teuer war, konnte nicht einfach auf Tastendruck ein Sample abgespielt werden, da ein so «lange» klingendes Sample viel zu viel Speicher benötigt hätte. Deshalb wird bei einem LA-Synthesizer auf Tastendruck nur während der Attack Phase ein Sample abgespielt. Während den Phasen des Decay, Sustain und Release erklingt eine statische, durch einen Oszillator erzeugte Wellenform, welche durch eine Hüllkurvengenerator gesteuert wird. Da unser Gehör den Charakter von Tönen schon in der Attack Phase erkennt, kann unser Gehör durch ein signifikantes Sample in der Attack Phase «getäuscht» werden. Dadurch nehmen wir so erstaunlich authentisch klingende Imitationen von Instrumenten wahr.¹⁶⁴

¹⁶³ vgl. Raffaseder, 2002, S. 237-239; vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 208-212; vgl. Taylor, 1994, S. 211-213

¹⁶⁴ vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 208

4.5.3. Granularsynthese

Die Granularsynthese basiert auf Samples, welche in kleine Abschnitte mit einer Dauer von wenigen Millisekunden zerlegt werden. Diese kleinen Abschnitte des Samples werden in einer beliebigen Abfolge aneinandergereiht oder ineinander übergeblendet, sodass die sonst hörbaren Amplitudenunterschiede eliminiert werden. Das Resultat erhält durch einen digitalen Hüllkurvengenerator seine ADSR-Kurve. Durch diese Methode verschmilzt der Klang des eigentlichen Samples zeitlich.¹⁶⁵

4.5.4. Wavesequenzung

Das Wavesequenzung Verfahren funktioniert ebenfalls mit Samples. Aus einer Auswahl von Samples von verschiedensten, komplexen Wellenformen werden mehrere Millisekunden lange Samples aneinandergereiht. Die Samples folgen hart aufeinander oder werden ineinander übergeblendet. Das resultierende Signal erhält durch einen Hüllkurvengenerator seine ADSR-Kurve. Da jedes Sample mit seiner Wellenform eine eigene Klangfarbe hat, ändert sich die Klangfarbe ständig. Dadurch sind Klänge mit einer kontinuierlich ändernden Klangfarbe möglich. Die verschiedenen Wellenformen der Samples erinnern an die Wavetable Synthese, das Prinzip der Aneinanderreihung der kurzen Samples kommt von der Granularsynthese.¹⁶⁶

4.6. DAW

Aus den einzelnen Software-Synthesizern entwickelte sich die Digital-Audio-Workstation DAW. Wie der Name vermuten lässt, ist eine DAW eine digitale Werkstatt zur Musikproduktion. Ein DAW ist ein Programm, welches Audio durch Computer und entsprechende Peripherie aufnehmen, digital synthetisieren, speichern, verändern und wiedergeben kann. Dabei ersetzt es Bandmaschine, Mischpult, Effektgeräte, Synthesizer und andere Instrumente sowie Sequenzer. Durch Plugins, zusätzliche Programme, welche das DAW ergänzen, können weitere Funktionen hinzugefügt werden. So sind die meisten Software-Synthesizer keine eigenständigen Programme, sondern Plugins für DAWs. DAWs

¹⁶⁵ vgl. Raffaseder, 2002, S. 239; vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 212-213

¹⁶⁶ vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 213

revolutionierten die Studioteknik und erfüllen nur mit Computer, einer DAW-Software sowie Peripherie wie MIDI-Tastatur, DAC, ADC, Mikrofon und Lautsprecher die Funktionen eines Musikstudios.¹⁶⁷

4.7. Klangsynthese durch künstliche Intelligenz

Klangsynthese durch künstliche Intelligenz ist der nächste grosse Schritt der digitalen Musikproduktion und steht aktuell noch am Anfang seiner Entwicklung. Jedoch gibt es bereits heute verschiedene Algorithmen, welche durch künstliche Intelligenz ganze Musikstücke schaffen. Dabei übernimmt die Software die Komposition sowie die Klangsynthese. Die künstliche Intelligenz wird mit tausenden von Beispielen trainiert und kann diesen ähnelnd neue Musikstücke generieren. Die generierten Stücke kommen erstaunlich nahe an menschlich kreierte Stücke heran. Künstliche Intelligenz steckt noch in den Kinderschuhen, doch ihre Entwicklung schreitet mit hoher Geschwindigkeit voran und wird der Musikindustrie eine weitere Revolution bescheren.¹⁶⁸

5. Drittes Zwischenfazit

Bei der akustischen, natürlichen Klangsynthese entstehen Töne durch das Schwingen eines elastischen Körpers, die von diesem auf ein Medium übertragen werden. Bei der analogen, elektrischen Klangsynthese werden durch elektrische Bauteile Signale erzeugt und durch elektroakustische Wandlung wahrnehmbar gemacht. Bei der digitalen, elektronischen Klangsynthese werden durch Software Signale erzeugt, welche zu analogen Wellen und weiter zu akustischen Schwingungen gewandelt und so hörbar gemacht werden.

Diese verschiedenen Klangsynthesemethoden ermöglichen verschiedene Sounds. Manche Klänge können durch akustische, analoge und digitale Synthese erzeugt werden, während andere Klänge gewissen Methode vorbehalten sind.

¹⁶⁷ vgl. Stange-Elbe, 2015, S. 5-7

¹⁶⁸ vgl. Eckardt, 2021, abgerufen von https://www.elektronik-klangkunst.de/de_DE/anke-eckardt-ki-3; vgl. Schlechtriemen, 2022, abgerufen von <https://www.hhv-mag.com/feature/popmusik-und-kuenstliche-intelligenz/>

V. Wahrnehmbare Unterschiede zwischen akustisch, analog und digital synthetisierten Sounds

Im praktischen Teil dieser Arbeit wird beschrieben, welche der im theoretischen Teil besprochenen Unterschiede zwischen akustisch, analog und digital synthetisierten Sounds wahrnehmbar sind. Dafür habe ich ein Motiv ausgewählt, welches ich mit einem Klavier akustisch synthetisierte. Darauf versuchte ich mit analogen Synthesizern durch die subtraktive Synthese und mit Softwaresynthesizern durch die additive Synthese den Klang des auf dem Klavier gespielten Motivs zu imitieren. Wahrnehmbare Unterschiede zwischen diesen Ansätzen werden im Zwischenfazit des Kapitels diskutiert.

1. Akustische Klangsynthese

Bei der akustischen Klangsynthese habe ich mich für das Klavier entschieden. Das Klavier ist ein populäres Musikinstrument, es wird in verschiedensten Genres gespielt. Auch technisch ist das Klavier sehr interessant. Obwohl es einen nicht all zu komplex tönenden Klang hat, ist der Sound eines Klaviers technisch schwer zu erfassen, was die Reproduktion des Klanges durch analoge oder digitale Klangsynthese deutlich erschwert. Das Klavier deckt mit meist 88 Tasten einen Bereich von 7 Oktaven ab. Insgesamt können wir 10 Oktaven wahrnehmen, in der Dimension der Tonhöhe deckt ein Klavier also über 70% des hörbaren Bereiches ab.



Abbildung 51: Ein Klavier ist technisch sehr komplex (eigenes Bild)

Beim Klavier ist die anregende Kraft der Tastenanschlag, der einen von 88 Hämmern auf die entsprechenden zwei bis drei Klaviersaiten aufschlagen lässt, denn ein Klavier hat pro Ton zwei Saiten, bei hohen Tönen sogar drei. Durch diesen Anschlag geraten die Saiten in Schwingung, die Grundtonhöhe wird grundsätzlich durch die Saitenlänge bestimmt. Der anschlagende Hammer bleibt jedoch genügend lange auf den Saiten, sodass diese beim Aufschlagspunkt des Hammers «geteilt» werden, am entsprechenden Punkt entsteht ein Knotenpunkt. Dadurch werden die beiden Teile der Saiten für diesen Augenblick voneinander abgekoppelt, auf beiden Seiten des Aufschlagspunkts breiten sich also verschiedene Frequenzen aus. Der Aufschlagspunkt des Hammers hängt vom Klavier und dem jeweiligen Ton ab und teilt die Saiten in Verhältnisse zwischen $\frac{1}{7}$ und $\frac{1}{15}$. Die Grundfrequenzen der in den Teilen der Saite entstanden Schwingungen sind voneinander sowie von der Grundfrequenz der ganzen Saite unabhängig. Nach einem Bruchteil einer Sekunde entfernt sich der anschlagende Hammer wieder, die Schwingungen auf beiden Teilen der Saiten kollidieren miteinander. Durch die Saitenlänge definiert, schwingt sich dann eine Grundtonhöhe mit der Wellenlänge $\delta = \frac{1}{2}$ der Saitenlänge ein. Die zwei, beziehungsweise drei schwingenden Saiten eines Tones beeinflussen sich gegenseitig,

auch bringen sie die anderen 232/231 Saiten sehr leicht zum Schwingen. Die schwingenden Saiten übertragen ihre Frequenzen auf den Klangkörper des Klaviers. Dieser verstärkt die Schwingungen und überträgt sie auf die Luft. Durch all diese sich gegenseitig beeinflussenden Komponenten entsteht bei einem Klavier ein sehr komplexer Klang, was ihn einzigartig, jedoch schwierig auf andere Weise reproduzierbar macht.¹⁶⁹



Abbildung 52: Das Motiv (eigene Darstellung)

Ich wählte ein einfaches, vielseitiges Motiv, sodass möglichst viele Unterschiede wahrnehmbar werden. Im Motiv gibt es verschiedene Tonlängen und eine kurze Pause. Zwischen den ersten beiden Tönen liegt eine kleine Terz, zwischen den zweiten, dritten und vierten eine grosse Sekunde. Diese imperfekten und dumpfen Intervalle habe ich gewählt, um die Aufmerksamkeit weg von den Intervallen zur Klangfarbe zu lenken.

Um den Klang des Klaviers möglichst unverändert wiedergeben zu können, nahm ich das durch Gabriel Dalvit gespielte Klavier mit einem guten Mikrofon und einem guten ADC mit einer Abtastrate von 192'000 Hz und einer Auflösung von 24 Bit auf. Die Aufnahme fand in einem kleineren Kellerraum statt, was zu erheblichem Hall führte. Diese räumliche Umgebung wurde dadurch zu einem entscheidenden Faktor bei der akustischen Klangsynthese (zu hören auf Stick, akustische Klangsynthese).

2. Analoge Klangsynthese

Für die analoge Klangsynthese wird ein analoger Synthesizer benötigt. Da ich keinen zur Verfügung hatte, durfte ich auf Anfrage bei Bruno Spörri, dem Musiker und Synthesizer-Pionier der Deutschschweiz, mein Motiv analog synthetisieren. Ich durfte zwei verschiedenen Synthesizer benutzen. Zum einen konnte ich den legendären ARP 2600

¹⁶⁹ Reid, 2002, abgerufen von <https://www.soundonsound.com/techniques/synthesizing-pianos>

Synthesizer von ARP Instruments benutzen, zum anderen den Prophet-6 von Sequential Circuits, der Nachfolger des berühmten Prophet-5.

Der ARP 2600 ist ein einstimmiger, analoger Synthesizer aus den 1970er Jahren, der sich durch seine Vielfalt an möglichen Klängen grosser Beliebtheit erfreut. Dieser Synthesizer verfügt über drei Oszillatoren, zwei zur Klangsynthese und einer für die Klangmodulation. Diese können im hörbaren sowie im LFO-Bereich arbeiten. Des Weiteren ist ein Vorverstärker, ein Rauschgenerator, eine Sample and Hold (Zufallsgenerator) Sektion, einen VCA, eine Sektion für die Spannungsfiler, ein VCF, eine Sektion zur Formung des ADSR-Klangverlaufs, eine Mixer Sektion, ein analoger Hall und zwei interne Lautsprecher eingebaut.



Abbildung 53: ARP 2600 (eigenes Bild)

Der komplexe Klang eines Klaviers hat sehr viele Obertöne. Deshalb liess ich den ersten und den dritten Oszillator Sägezahnwellen generieren, diese sind sehr obertonreich. Den zweiten Oszillator benutzte ich zur Modulation. Ich stellte eine ADSR-Kurve ein, welche grob der eines Klaviers entspricht. Durch Experimentieren und Tipps vom Experten Bruno Spörri näherte ich mich immer näher an den Klang eines Klaviers an. Schlussendlich gab ich noch Hall dazu, um den kleineren Kellerraum der Aufnahme der akustischen Klangsynthese zu simulieren. Dieser analoge Hall funktioniert mithilfe einer Feder. Wird der Synthesizer bewegt, schwingt diese Feder, es wird ein hallendes Signal ausgegeben (ebenfalls zu hören auf Stick; analoger Hall). Ich experimentierte weiter, jedoch erreichte ich den Klang des Klaviers nur im Ansatz (zu hören auf Stick; analoge Klangsynthese ARP

2600). Die Tonhöhe traf ich nicht ganz, da ich diese von Hand mit Schiebereglern bei beiden Oszillatoren einzeln einstellen musste.

Also wendete ich mich noch dem zweiten Synthesizer, dem Prophet-6 zu. Der Prophet-6 von Sequential Circuit ist ein analoger, mehrstimmiger Synthesizer auf Basis des Prophet-5. Wie auch der ARP 2600 verfügt er über zwei Oszillatoren zur Klangsintese, einen Rauschgenerator, eine ADSR-Sektion, eine Mixer Sektion und einen VCA. Zudem verfügt er über einen Voltage-Controlled-Low-Pass-Filter sowie über einen Voltage-Controlled-High-Pass-Filter und einen dedizierten LFO. Im Gegensatz zu Prophet-5 hat der Prophet-6 digitale Steuer- und Speicherfunktionen, zudem auch digitale Effekte. Diese benutzte ich bei der Klangsintese jedoch nicht.



Abbildung 54: Prophet-6 (eigenes Bild)

Wie mit dem ARP 2600 benutzte ich die Sägezahnwelle bei beiden Oszillatoren dank ihrer vielen Obertöne. Durch Anpassen der ADSR-Kurve sowie der Filter konnte ich mich dem Klang eines Klaviers immer stärker annähern. Einen Hall konnte ich nicht hinzufügen, da der Prophet-6 nicht über einen analogen Hall Effekt verfügt. Das Endresultat liegt näher an einem Klavier als die Aufnahme des ARP 2600 (zu hören auf Stick; analoge Klangsintese Prophet-6).

Obwohl beides analoge Synthesizer sind und ich mir dasselbe Ziel gesetzt hatte, gelang es mir mit dem Prophet-6 besser, den Klang des Klaviers zu imitieren. Dies liegt daran, dass bei den beiden Synthesizern verschiedene elektrische Bauteile verbaut und verbunden sind, was zu unterschiedlichen Klängen führt.

3. Digitale Klangsynthese

Bei der digitalen Klangsynthese setzte ich auf das additive Verfahren, da dadurch keine komplexe, nicht nachvollziehbare Software zum Zuge kommt. Zur Klangsynthese nutzte ich den digitalen Synthesizer Alchemy in der DAW Logic Pro X von Apple. Mit einem Spektrum Analysator untersuchte ich die ADSR-Verläufe der verschiedenen Teiltöne des aufgenommenen Klaviers. Dabei konnte ich 18 Teilfrequenzen feststellen; der Grundton, die Obertöne mit der 2 bis 17-fachen Frequenz sowie der Oberton mit der 21-fachen Frequenz der Grundfrequenz.

Ich unterteilte die zu analysierende Aufnahme in 0,04 Sekunden lange Stücke und las so bei jedem Stück die Amplitude der Teiltöne ab. So konnte ich für jeden einzelnen Oberton einen eigenen ADSR-Verlauf erstellen. Um diese ADSR-Verläufe anwenden zu können, erstellte ich 18 Spuren, für jeden Teilton eine. So konnte ich bei jedem Teilton die passende ADSR-Kurve einstellen. Durch diese Kurven konnte ich auch das Lautstärkeverhältnis zwischen den Teiltönen festlegen. Nachdem alles fertig eingestellt war, fügte ich die 18 Spuren mit einem Bus zusammen, sodass ich alle parallel mit einer an den Computer angeschlossenen MIDI-Tastatur bedienen konnte. Ich spielte das Motiv ein und legte mit der DAW einen digitalen Hall Effekt über die Aufnahme, um den Kellerraum der Aufnahme des Klaviers zu simulieren. Das Resultat liegt nicht sehr nahe an der Aufnahme der akustischen Klangsynthese (zu hören auf Stick; digitale Klangsynthese).

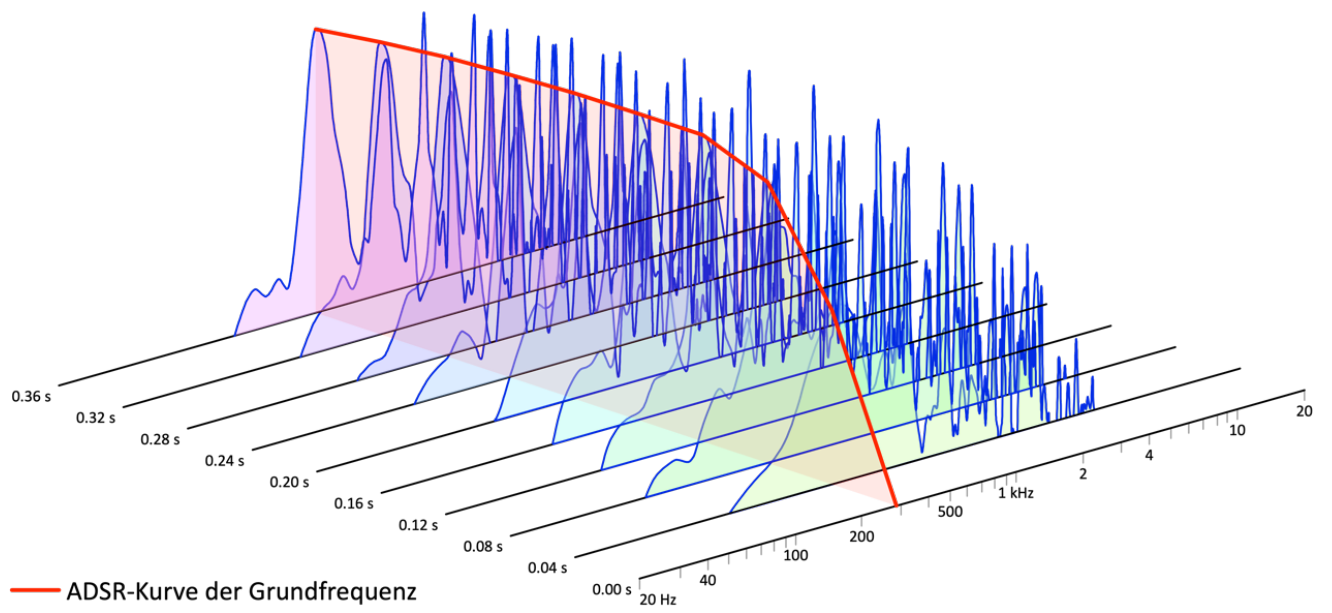


Abbildung 55: Der zeitliche Verlauf des Spektrums des durch das Klavier gespielten Motivs (eigene Darstellung)

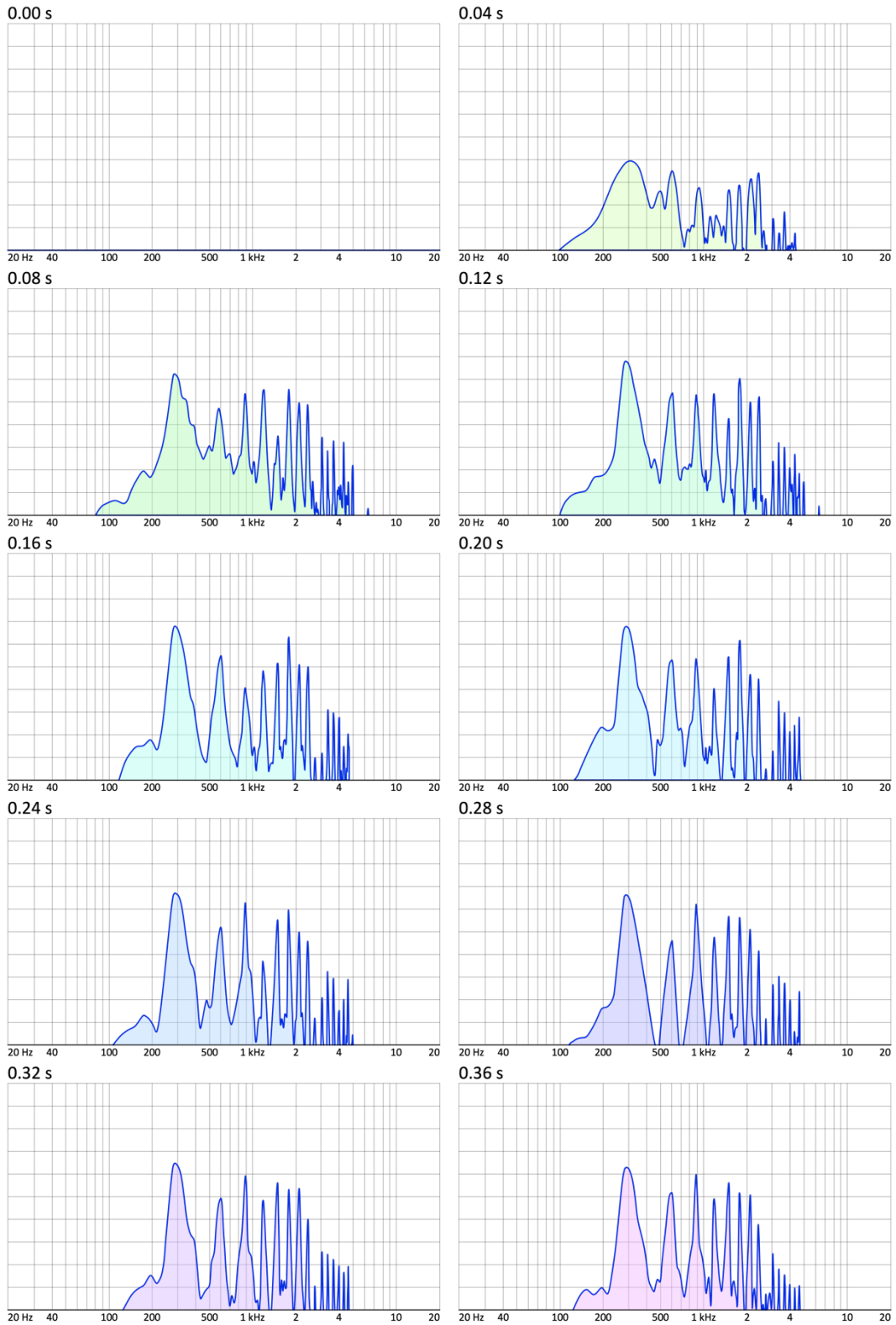


Abbildung 56: Spektren der Aufnahme, des durch das Klavier gespielten Motivs, im Abstand von 0.04 Sekunden (eigene Darstellung)

4. Viertes Zwischenfazit

Hört man die Aufnahmen der akustischen, analogen und digitalen Klangsintese, so sind klare Unterschiede wahrnehmbar (zu hören auf Stick; synthetisierte Sounds). Bei der akustischen Klangsintese tönt das Klavier natürlich, man erkennt klar den Klang eines Klaviers. Während der Attack und der Decay Phase erscheint das Spektrum sehr ausgeglichen, tendenziell geprägt durch die tieferen Teiltöne. Dies ändert sich während der Sustain Phase, hohe Teiltöne dominieren das Spektrum, der Ton wird «bissiger» wahrgenommen. Diese Dominanz der höheren Obertöne bleibt während des fast 15 Sekunden langen Ausklings bestehen. Dabei erscheint der Hall natürlich. Beim Hören der Aufnahme der analogen Klangsintese vom ARP 2600 kann man in der Klangfarbe die Grundstruktur der Sägezahnwelle erahnen, was an ein Streich- oder Blasinstrument erinnern kann. Während der Attack Phase erinnert der Klang des ARP 2600 an eine Mischung zwischen Klavier und einem Blasinstrument. Während der Decay Phase dominieren höhere Teiltöne, bei der Sustain Phase kommt die Grundfrequenz wieder in den Vordergrund, während der Release Phase gleicht sich das Spektrum aus, es tönt ein bisschen natürlicher. Das Ausklingen tönt durch seine Länge natürlich, obwohl diese Phase nicht so lange andauert wie beim Klavier. Der Hall tönt nach einem grösseren Raum und klingt in meinen Ohren nicht ganz so authentisch wie der Hall bei der akustischen Klangsintese. Hört man die Aufnahme der analogen Klangsintese vom Prophet-6, so nimmt man einen natürlicheren, helleren Klang wahr als beim ARP 2600. Die Sägezahnwellen lassen sich nicht erkennen in dieser Aufnahme. Die Attack Phase dauert bei der Aufnahme lange an, was trotz des natürlich klingenden Spektrums für ein Klavier zu einem zu «weichen» Klang führt. Während der Decay Phase bleibt das Verhältnis zwischen den Teiltönen ausgeglichen, was zu einem Klang nicht allzu weit weg von einem Klavier führt. Während der Sustain und der Release Phase dominieren die Grundfrequenz und der erste Oberton, was zu einem trockeneren Klang führt. Die Release Phase ist nicht kurz, jedoch nicht ansatzweise 15 Sekunden lang. Das Fehlen des analogen Halls beim Prophet-6 distanziert diese Aufnahme weiter von der Aufnahme der akustischen Klangsintese. Trotzdem liegt diese Aufnahme näher am akustischen Sound als die des ARP 2600. Die Aufnahme von der digitalen Klangsintese unterscheidet sich klar wahrnehmbar vom Klang der akustischen Sintese und erinnert an eine Orgel. Während

der Attack Phase ähnelt die Klangfarbe einem Klavier, jedoch etwas «leerer». Das Spektrum bleibt während der Decay und der Sustain Phase relativ konstant, die mittleren Teiltöne gewinnen leicht an Dominanz. Während des Ausklingens fallen alle Teiltöne ab, die tieferen Teiltöne klingen etwas länger. Der digitale Hall tönt wie der vom ARP 2600 nach einem grösseren Raum, wirkt jedoch durch die kurze Ausklingzeit nicht sehr realistisch.

Durch die akustische, die analoge und die digitale Klangsintese versuchte ich ähnliche Klänge zu synthetisieren. Die mir zur Verfügung stehenden technischen Mittel haben es mir erlaubt, Klangresultate zu erzeugen, die nicht sehr weit vom Klavier abweichen, aber sich trotzdem ganz eindeutig in ihrer Klangfarbe unterscheiden. Dies erscheint aufgrund der theoretischen Grundlagen nicht allzu erstaunlich. Doch die Erfahrungen mit der akustischen, analogen und digitalen Klangsintese haben mir gezeigt, wie sehr sich diese in ihren Spektren der möglichen Klänge voneinander unterscheiden.

VI. Fazit

In dieser Maturitätsarbeit bin ich den Fragestellungen nachgegangen, wie sich akustisch, analog und digital synthetisierte Sounds unterscheiden und ob Unterschiede zwischen akustisch, analog und digital synthetisierten Sounds wahrnehmbar sind. Es wurde deutlich, dass sich die akustische, analoge und digitale Klangsynthese in ihren Möglichkeiten unterscheiden. Die akustische Klangsynthese ist an einen schwingenden Körper gebunden. Diese Methode ist von den verschiedenen Funktionselementen, dem primären Schwingungserzeuger, dem grundtonbestimmenden Element sowie dem Klangfarbfilter, abhängig. Durch diese Einschränkungen ist es praktisch unmöglich, analog sowie digital synthetisierte Sounds zu imitieren.

Bei der analogen Klangsynthese erlauben die elektrischen Bauteile des Synthesizers eine grössere Vielfalt an Klängen. Der Oszillator generiert eine Wellenform, welche durch weitere elektrische Bauteile verändert werden kann. Die elektrischen Bauteile eines Synthesizers unterliegen im Gegensatz zu ihren akustischen Pendants, den Funktionselementen, nicht so vielen Einschränkungen. So muss der Oszillator bei der analogen Klangsynthese nicht denselben Regelmässigkeiten wie der primäre Schwingungserzeuger bei der akustischen Klangsynthese folgen. Deshalb sind durch analoge Synthesizer zwar eine vielfältige Auswahl von Klängen möglich, gleichzeitig ist es aber schwierig, ohne die Einschränkungen der akustischen Klangsynthese diese zu imitieren.

Die digitale Klangsynthese ist rein von der Software abhängig. Deshalb können jegliche Varianten von Schall synthetisiert werden. Durch diese endlosen Möglichkeiten der digitalen Klangsynthese ist es jedoch schwierig, akustische Klänge genau zu synthetisieren. Durchs Simulieren der akustischen Einschränkungen kann dieser Prozess jedoch vereinfacht werden. Die Resynthese von analogen Sounds ist hingegen einfacher, da die elektrischen Bauteile eines Synthesizers leichter zu simulieren sind. Beim Sampling wird es hingegen wesentlich einfacher, akustisch synthetisierte Klänge präzise zu resynthetisieren. Hierbei sollte aber nicht mehr von Synthese gesprochen werden, da hier schon einmal synthetisierte Klänge erneut abgespielt werden. Mit Samples ist es relativ einfach, einen

akustischen Klang genau zu reproduzieren. Die Anpassungen der Samples an bestimmte Faktoren wie Tonhöhe und Intensität stellen sich hingegen als schwieriger heraus.

Akustisch synthetisierte Sounds folgen verschiedenen Grundsätzen der Akustik. So sind alle Teiltöne eines Klanges von einem Saiteninstrument in der Obertonreihe des Grundtons vertreten. Diese und weiter besprochene Gesetzmässigkeiten gelten für die analoge und die digitale Klangsynthese nicht. Dies erschwert die analoge und digitale Resynthese akustisch synthetisierter Sounds.

Bei akustischer Klangsynthese entsteht Schall, bei den beiden anderen Methoden jedoch nicht. Deshalb müssen bei der analogen und der digitalen Klangsynthese die Signale in Schall gewandelt werden. Bei der analogen Klangsynthese sowie auch bei der akustischen resultiert ein kontinuierliches Signal. Bei der digitalen Klangsynthese entstehen im Gegensatz zu diesen eine Reihe an diskreten Werten. Diese müssen zuerst in ein analoges, kontinuierliches Signal umgewandelt werden, bevor sie durch elektroakustische Wandlung als Schall wahrnehmbar gemacht werden. Diese Digital-Analog- sowie die elektroakustische Wandlung bringen immer Verluste mit sich. Nur schon anhand dessen kann durch analoge und digitale Klangsynthese ein akustischer Klang nie perfekt reproduziert werden. Durch den Fortschritt der Technik wurde und wird dieser Verlust allerdings immer kleiner.

Die akustische, die analoge und die digitale Klangsynthesemethode unterscheiden sich eindeutig. Doch durch eine entsprechende Herangehensweise an die analoge sowie auch die digitale Klangsynthese ist es mit passenden Mitteln möglich, das Produkt der Klangsynthese den akustisch synthetisierten Klängen anzunähern, wie die Resultate des praktischen Teils dieser Arbeit zeigen (zu hören auf Stick; synthetisierte Sounds). Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob durch analoge und digitale Klangsynthese akustische Klänge überhaupt imitiert werden sollten. Die akustische, analoge und digitale Klangsynthese haben ihre je eigenen Qualitäten und können deshalb für sich stehen. Durch alle drei Klangsynthesemethoden sind verschiedene Sounds herstellbar, welche nicht in Konkurrenz zueinanderstehen müssen. Durch ihre Unterschiede ergänzen sie sich gegenseitig zur Vielfalt der Welt der Klänge.

Literaturverzeichnis

Baumann, J. (2022). Samplerate (Hz und kHz), Auflösung (Bit) und Bitrate (kBit/s) für Musik und Audio. Abgerufen von <https://www.baumannmusic.com/de/2012/sampleratehz-und-khz-aufloesung-bit-und-bitrate-kbits/> am 06.11.2022.

Berg R. E. und Stork D. G. (1982). The Physics of Sound. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

Eckardt, A. (2021). KI & Musik/Klangkunst Teil 3: How Black is the box? Abgerufen von https://www.elektronik-klangkunst.de/de_DE/anke-eckardt-ki-3 am 08.01.2023

Elektronik für Embedded Systems. (o. D.). Mikrocontroller — PCs — Embedded Electronics. Abgerufen von http://www.controllersandpcs.de/lehrarchiv/pdfs/elektronik/ees05_01.pdf am 09.11.2022.

HdM Stuttgart. (o. D.). Digitale Klangersynthese [Vorlesungsfolie]. Abgerufen von https://curdt.home.hdm-stuttgart.de/PDF/Klangersynthese_Schraffenberger.pdf am 01.01.2023

Hussman, H. (2014). Digitale Codierung und Übertragung [Vorlesungsfolie]. Ludwig-Maximilians-Universität München. Abgerufen von <https://www.medien.ifi.lmu.de/lehre/ws1314/dm/vorlesung/dm2a.pdf> am 02.11.11.2022.

IFE-TU Graz. (2021). Analog-Digital Konverter (ADC) - Charge-Balancing (Ladungsausgleichs) und Delta-Sigma ADCs [Video]. Youtube. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=M5Vx-X66seg> am 12.11.2022.

IMG Stageline. (2022). Nyquist-Shannon-Theorem – Ein Meilenstein in der Digitalisierung. Abgerufen von <https://www.img-stageline.de/magazin/nyquist-shannon-theorem#:~:text=Das%20Nyquist%2DShannon%2DTheorem%2C,später%20wieder%20hö%20gemacht%20werden> am 02.11.2022.

ITWissen.info. (2022). Quantisierung. Abgerufen von <https://www.itwissen.info/Quantisierung-quantization.html> abgerufen am 09.11.2022

Kamdem, A. T. (2011). Verfahren zum eingebauten Selbsttest von analogen und gemischt analog-digitalen integrierten Schaltungen. Dissertationsschrift, Technische Universität München.

Kester, W. (2004). Analog-Digital-Conversion. Wilmington: Analog Devices.

Kuttruff, H. (2004). Akustik. Stuttgart: Hirzel.

Lattmann, M. (o. D.). Digitaltechnik. SwissEduc. Abgerufen von https://www.swisseduc.ch/informatik/hardware/analog_digital_wandler/docs/script.pdf am 09.11.2022.

Litzow, W. (2021). Die Physik der Musik. Düren: Shaker.

Lundberg, K. H. (2002). Analog-to-Digital Converter Testing. Massachusetts Institute of Technology.

Moore, B. C. J. (2013). Psychology of Hearing. Leiden: Koninklijke Brill.

Moore, F. R. (1985). An introduction to the mathematics of digital signal processing. In Strawn, J. (Ed.), Digital Audio Signal Processing (p. 1-67). Los Altos: William Kaufmann.

Muzzolini, D. (2004). Genealogie der Klangfarbe. Dissertationsschrift, Universität Zürich.

Neukom, M. (2003). Signale, Systeme und Klangsynthese. Bern: Peter Lang.

Raffaseder, H. (2002). Audiodesign. München, Wien: Carl Hanser.

Reid, G. (2002). Synthesizing Pianos. Abgerufen von <https://www.soundonsound.com/techniques/synthesizing-pianos> am 23.12.2022

Schlechtriemen, N. (2022). Verändert künstliche Intelligenz die zeitgenössische Musik? Abgerufen von <https://www.hhv-mag.com/feature/popmusik-und-kuenstliche-intelligenz/> am 08.01.2023

Spörri, B. (1974). Die Synthesizer-Story. Zürich: Eigenverlag, Bruno Spörri.

Stange-Elbe, J. (2015). Computer und Musik. Berlin, Boston: Walter de Gruyter.

Taylor, C. (1994). Der Ton macht die Physik. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg.

Texas Instruments. (2021). SAR and delta-sigma: Basic Operation [Video]. Youtube. Abgerufen von https://www.youtube.com/watch?v=U_Yv69IGAfQ am 12.11.2022

Treml, A. (2014). Digitale Klangsynthese. Bachelorarbeit, Universität Passau.

Zigunov, F. (2020). Delta-Sigma Modulator Basics [Video]. Youtube. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=NrkFd7h6R2Y> am 12.11.2022

Abbildverzeichnis

Abbildung 1: Eine Schwingung als Welle graphisch dargestellt; T =Periodendauer, A =Amplitude, t =Zeit.....	5
Abbildung 2: Eine Sinusschwingung kann graphisch als Welle oder auch als Kreis dargestellt werden	6
Abbildung 3: Die Superposition der Schwingung 1 und 2 ergeben die Interferenz Σ	7
Abbildung 4: Zwei Schwingungen überlagern sich in einer Ebene	8
Abbildung 5: Die Dämpfung einer Sinusschwingung.....	10
Abbildung 6: Eine periodische Schwingung; es sind drei Periodendauern abgebildet.....	11
Abbildung 7: Die Welle eines weissen Rauschens.....	12
Abbildung 8: Das Spektrum eines weissen Rauschens.....	13
Abbildung 9: Die Welle eines Impulses	14
Abbildung 10: Das Spektrum eines Impulses entspricht dem eines weissen Rauschens ..	14
Abbildung 11: Eine Sinuswelle reflektiert an einer Wand, es entsteht eine Stehwelle.....	15
Abbildung 12: Die reine Welle eines Impulses und diese mit Resonanz	17
Abbildung 13: Diese eckigen Schwingungen existieren nur in der Theorie.....	18
Abbildung 14: Die Elementarwellen zeigen auf, wie jeder Punkt auf einer Wellenfront expandieren will	19
Abbildung 15: Mit dem Huygen'schen Prinzip lässt sich das Reflexionsgesetz herleiten..	20
Abbildung 16: Refraktion durchs Huygen'sche Prinzip erklärt	21
Abbildung 17: Schallwellen beugen um Hindernisse herum	22
Abbildung 18: Streuung und Beugung von Schall in Schaumstoff.....	23
Abbildung 19: Dopplereffekt; die blauen Punkte stellen die Schallquelle im Verlauf der Zeit dar	23
Abbildung 20: Bei einer exponentiellen Zunahme der Frequenz nehmen wir eine lineare Zunahme der Tonhöhe wahr	26
Abbildung 21: Spektrum eines schrillen, quietschenden Klages (eigene Darstellung)....	28
Abbildung 22: Obertonreihe auf der Skala der Frequenz.....	29
Abbildung 23: Obertonreihe auf der Skala der Tonhöhe	29
Abbildung 24: Beispiele für ASD- und ADSR-Hüllkurven	30

Abbildung 25: Die Fourierzerlegung einer Sägezahnwelle durch drei Teilfrequenzen	32
Abbildung 26: Kurven gleicher Lautstärke	35
Abbildung 27: Hörschwelle und Schmerzgrenze sowie der von der Musik und Sprache belegte Frequenz-Laustärke-Bereich	36
Abbildung 28: Abweichung der wahrgenommenen Tonhöhe in Abhängigkeit von der Lautstärke.....	39
Abbildung 29: Hall; die Impulsantwort eines Raumes	40
Abbildung 30: Schaltmodulation; eine sinusförmige Trägerfrequenz durch eine rechteckiges Modulationssignal geschaltet	44
Abbildung 31: Amplitudenmodulation; das Trägersignal wird durch das Modulationssignal frequenzmoduliert.....	46
Abbildung 32: Bei der Untermodulation liegt der Offset Level unter 100%; bei der Übermodulation liegt er über 100%.....	46
Abbildung 33: Ringmodulation; das Trägersignal wird mit dem Modulationssignal multipliziert	48
Abbildung 34: Frequenzmodulation; das Modulationssignal moduliert die Frequenz des Trägersignals	50
Abbildung 35: Pulsdauermodulation; das Modulationssignal bestimmt die Dauer der maximalen Auslenkung des Trägersignals.....	51
Abbildung 36: Funktionsschema eines Musikinstruments.....	52
Abbildung 37: Schema eines subtraktiven Synthesizers	54
Abbildung 38: Durch ein VCO generierte Wellenformen und ihr Teiltonspektrum	56
Abbildung 39: Schema der elektroakustischen und Analog-Digital- sowie der Digital-Analog-Wandlung.....	60
Abbildung 40: Schema eines Kondensatormikrophones	62
Abbildung 41: Schema der Analog-Digital-Wandlung	65
Abbildung 42: Schema eines Flash ADCs.....	67
Abbildung 43: Wägeverfahren: Das Prinzip der sukzessiven Approximation	70
Abbildung 44: Schema eines Sigma-Delta-ADCs	72
Abbildung 45: Verschiedene Signale eines Sigma-Delta-Modulators	73
Abbildung 46: Offset- und Verstärkungsfehler	74
Abbildung 47: Differenzielle und integrale Nichtlinearität sowie Missing Codes	75

Abbildung 48: Aliasing	76
Abbildung 49: Schema eines String-DACs.....	78
Abbildung 50: Schema eines Stromsummations-DACs	79
Abbildung 51: Ein Klavier ist technisch sehr komplex (eigenes Bild).....	88
Abbildung 52: Das Motiv (eigene Darstellung).....	89
Abbildung 53: ARP 2600 (eigenes Bild).....	90
Abbildung 54: Prophet-6 (eigenes Bild).....	91
Abbildung 55: Der zeitliche Verlauf des Spektrums des durch das Klavier gespielten Motivs (eigene Darstellung)	93
Abbildung 56: Spektren der Aufnahme, des durch das Klavier gespielten Motivs, im Abstand von 0.04 Sekunden (eigene Darstellung).....	94

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Was in der Physik als Ton gilt, nennt man in der Musik Sinuston	3
Tabelle 2: Verhältnis von Intervallen	26
Tabelle 3: Frequenzen möglicher Kombinationstöne	38

Eigenständigkeitserklärung

Eigenständigkeitserklärung zur Maturitätsarbeit von Janis Heim.

Ich bestätige mit meiner Unterschrift, dass die vorliegende Maturitätsarbeit von mir erstellt wurde und alle fremden Informationen und Gedanken (auch Bilder und Tabellen) als solche gekennzeichnet und zitiert worden sind.

Ich nehme Kenntnis davon, dass die Arbeit einer Schülerin oder eines Schülers, der oder dem betrügerisches Verhalten nachgewiesen wird, als ungenügend bewertet wird.

Ort, Datum

Winterthur, 16. Januar 2023

Unterschrift

