



Brandenburgische  
Technische Universität  
Cottbus - Senftenberg

# Fakultät 1 MINT - Mathematik, Informatik, Physik, Elektro- und Informationstechnik

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg

## **Bachelor-Thesis**

Untersuchung der Phasenmodulationssynthese eines digitalen  
Musiksynthesizers

vorgelegt von

**Jonas Hanika**

geboren am 27.02.1998 in Finsterwalde

Matrikelnummer: 3720014

14. Juli 2024

**Betreuer:** Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Matthias Wolff

---

## Abstract

Der Musiksynthesizer ist ein unverzichtbares Instrument in der modernen Musikproduktion. Durch zunehmende Rechenleistung wurden die anfänglich analogen Synthesizer schnell durch digitale Synthesizer verdrängt. Während analoge Synthesizer durch analoge Schaltungen Klänge erzeugen, sind in digitalen Synthesizern Synthesealgorithmen für die Klangsynthese verantwortlich. Diese Arbeit widmet sich der Analyse und Simulation der Phasenmodulationssynthese am Beispiel eines digitalen Musiksynthesizers. Als Untersuchungsgegenstand wurde der VZ-10M Synthesizer von Casio verwendet. Untersucht wurden die interne und externe Phasenmodulation des Geräts. Dabei wurden umfangreiche Analysen der Klangsynthese des Synthesizers durchgeführt und auf Grundlage der Ergebnisse Hypothesen zur Funktionalität entwickelt. Der praktische Teil umfasste die softwareseitige Nachbildung der Phasenmodulationssynthese mittels Reaktor von Native Instruments. Die in Reaktor erzeugten Signale wurden anschließend mit den Signalen des VZ-10M verglichen. Die interne Phasenmodulationssynthese, bei der sowohl das Trägersignal als auch das modulierende Signal eine Sinuswelle sind, konnte mit hoher Präzision rekonstruiert werden.

The music synthesizer is an indispensable instrument in modern music production. Increasing computational power quickly displaced initially analog synthesizers with digital synthesizers. While analog synthesizers generate sounds through analog circuits, digital synthesizers rely on synthesis algorithms for sound generation. This study focuses on the analysis and simulation of phase modulation synthesis using a digital music synthesizer as an example. The Casio VZ-10M synthesizer was chosen for investigation, specifically examining its internal and external phase modulation. Extensive analyses of the synthesizer's sound synthesis were conducted, leading to the development of hypotheses regarding its functionality based on the results. The practical component involved replicating phase modulation synthesis using software, specifically Native Instruments' Reaktor. Signals generated in Reaktor were then compared with those from the VZ-10M synthesizer. The internal phase modulation synthesis, where both the carrier signal and the modulating signal are sine waves, could be accurately reconstructed with high precision.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theorieteil</b>	<b>2</b>
2.1	Einleitung Musiksynthesizer . . . . .	2
2.2	Synthesizertypen: Analog-, Digital- und Software-Synthesizer . . . . .	4
2.3	Grundlagen der Signalverarbeitung . . . . .	5
2.4	Grundelemente . . . . .	11
2.4.1	VCO (Voltage Controlled Oscillator) . . . . .	11
2.4.2	CV (Control Voltage) . . . . .	13
2.4.3	VCA (Voltage Controlled Amplifier) . . . . .	13
2.4.4	Hüllkurven . . . . .	14
2.4.5	Sampler und Wavetable . . . . .	14
2.4.6	LFO (Low Frequency Oscillator) . . . . .	15
2.4.7	Filter . . . . .	15
2.4.8	Blockschaltbild eines einfachen Synthesizers . . . . .	17
2.5	Klangsyntheseprinzipien . . . . .	18
2.5.1	Additive und subtraktive Synthese . . . . .	18
2.5.2	Amplituden- und Ringmodulation . . . . .	19
2.5.3	Frequenz- und Phasenmodulation . . . . .	20
2.6	Casio VZ-Synthesizer . . . . .	23
2.6.1	Kurzbeschreibung . . . . .	23
2.6.2	Phasenmodulation . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Experimenteller Teil</b>	<b>25</b>
3.1	Versuchsaufbau . . . . .	25
3.1.1	Aufbau . . . . .	25
3.1.2	Vorgehensweise . . . . .	26
3.1.3	Anmerkungen . . . . .	29
3.2	Messungen und Protokolle . . . . .	31
3.2.1	Wellenformen . . . . .	31
3.2.2	Phasenmodulation . . . . .	31
3.3	Interpretation der Messergebnisse . . . . .	34
3.4	Hypothesen zur Casio-Phasenmodulation . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Praktischer Teil</b>	<b>40</b>
4.1	Simulation Phasenmodulation in MATLAB . . . . .	40
4.2	Nachbau Phasenmodulation in Reaktor (vVZ) . . . . .	41
4.3	Vergleich der erzeugten Klänge mit Originalgerät . . . . .	44
4.4	Verifikation der Hypothese . . . . .	47

<b>5 Ausblick</b>	<b>48</b>
5.1 kritische Diskussion der eigenen Ergebnisse . . . . .	48
5.2 Verbesserungs- und Erweiterungsmöglichkeiten . . . . .	48
<b>A Allgemeine Ergänzungen</b>	<b>50</b>
A.1 Ergänzungen zum Versuchsaufbau . . . . .	50
A.2 Versuchsaufbau weitere Informationen . . . . .	50
A.3 Messeinstellungen . . . . .	51
A.3.1 Messungen VZ-10M . . . . .	51
A.3.2 Messungen Reaktor . . . . .	52
<b>B Abbildungen</b>	<b>53</b>
B.1 allgemeine Abbildungen . . . . .	53
B.2 Messungen . . . . .	54
B.3 Hypothesen . . . . .	71
B.4 Vergleich VZ mit vVZ . . . . .	75
<b>C Tabellen</b>	<b>81</b>

## Abkürzungsverzeichnis

<b>ADSR</b>	Attack Decay Sustain Release
<b>CV</b>	Control Voltage
<b>DAW</b>	Digital Audio Workstation
<b>DCO</b>	Digitally Controlled Oscillator
<b>DSP</b>	Digital Signal Processor
<b>ED</b>	Envelope Depth
<b>GUI</b>	Graphical User Interface
<b>KKF</b>	Kreuzkorrelationsfunktion
<b>USB</b>	Universal Serial Bus
<b>MIDI</b>	Musical Instrument Digital Interface
<b>LFO</b>	Low Frequency Oscillator
<b>VCA</b>	Voltage Controlled Amplifier
<b>VCO</b>	Voltage Controlled Oscillator
<b>QMW</b>	Quadratischer Mittelwert

# 1 Einleitung

Der Musiksynthesizer ist aus der heutigen Musiklandschaft nicht mehr wegzudenken. Von Popmusik bis hin zu Filmmusik, es gibt wahrscheinlich kaum ein Genre in dem er nicht eingesetzt werden kann. Ob Analog-, Digital- oder Software-Synthesizer, der Alleskönner im Punkt Klangerzeugung ist längst zu einem Studio-„Must Have“ geworden. Von raumfüllendem, neuwagenteurem Studioequipment bis hin zu den heutigen, in die Hosentasche passenden Smartphone-Apps hat er im Laufe der Zeit viele verschiedene Formen angenommen. Diese Entwicklung kann man nur als spannend beschreiben. Daher lohnt es sich umso mehr, die grundsätzliche Funktionsweise dieses Instruments genauer zu betrachten.

Der Theorieteil dieser Arbeit befasst sich unter anderem mit der allgemeinen Funktionsweise von Musiksynthesizern. Es wird erläutert, welche Bauteile erforderlich sind, um einen einfachen Klang zu erzeugen, und wie man diesen modulieren kann, um komplexere Klänge zu erhalten. Zum Verständnis der Funktionalität werden zudem die notwendigen Grundlagen der Signalverarbeitung erklärt.

Ziel des experimentellen Teils ist es, eine angemessen umfangreiche Analyse und Auswertung der Klangerzeugung des Casio VZ-10M-Synthesizers anzufertigen. Dabei soll die zugrunde liegende Klangerzeugung vermessen und analysiert werden. Anhand der Messergebnisse sollen anschließend Hypothesen über die vermutete Funktionalität aufgestellt werden.

Im praktischen Teil soll schließlich ein softwareseitiger Nachbau der Phasenmodulation erfolgen, der möglichst nahe an der Phasenmodulation des VZ-10M liegt. Für diesen Zweck wird das Programm „Reaktor“ der Firma Native Instruments verwendet.

Aufgrund der Komplexität des Synthesizers und der Unkenntnis über seine genaue Funktionsweise muss der Umfang dieser Arbeit begrenzt werden. Eine vollständige Analyse aller Details des VZ-10M wird daher nicht angestrebt. Es ist nicht erforderlich, die bekannten Alias-Artefakte der Klangerzeugung oder ähnliche komplexe Eigenschaften, die bei der Analyse entdeckt werden, exakt zu reproduzieren und zu simulieren. Dadurch entfallen auch jegliche Effekt-Modulationen, wie zum Beispiel „Tremolo“ oder „Vibrato“. Der Fokus der Analyse und Simulation liegt ausschließlich auf der Phasenmodulation.

Für die Durchführung der Arbeit wurde ein physisches Exemplar des Casio VZ-10M an der BTU Cottbus/ Senftenberg am Zentralkampus installiert.

## 2 Theorieteil

### 2.1 Einleitung Musiksynthesizer

Der Musiksynthesizer ist ein musikalisches Instrument, welches sich im Laufe des 20. Jahrhunderts entwickelte. Wie auch andere Musikinstrumente zeichnet er sich dadurch aus, Schallereignisse oder Klänge zu erzeugen. Durch seinen häufig modularen und komplexen Aufbau gibt es viele verschiedene Arten von Musiksynthesizern. Was sie jedoch alle verbindet, ist, dass zur Erzeugung von Klängen Elektrizität verwendet wird. Somit zählen Musiksynthesizer, im Folgenden auch einfach nur Synthesizer genannt, zur Klasse der Elektrophone. Diese zeichnet sich nämlich dadurch aus, dass das jeweilige Instrument, unter Verwendung von elektrischem Strom, Klänge erzeugen kann. Dabei spielt es keine Rolle, ob ein Signal nur elektrisch verstärkt oder sogar komplett elektrisch erzeugt wird.

Der Synthesizer als Werkzeug zur Klangerzeugung ist deshalb im Vergleich zu anderen allgemein bekannten Musikinstrumenten, wie zum Beispiel Gitarren, Geigen, Trompeten oder Klavieren, wobei einige dieser bereits mehrere tausende Jahre alt sind, noch relativ neuartig. Die ersten Aufzeichnungen eines Elektrophons stammen vom „Clavessin Électrique“ aus dem Jahr 1759 [13, S. 3]. Dabei handelte es sich um ein glockenspielähnliches Keyboard, bei dem Metallglocken durch eine elektrostatische Aufladung zum Schwingen gebracht wurden. Durch die limitierte Klangerzeugung, die eher in die Kategorie elektrische Verstärkung eines Signals fällt, war das Clavessin Électrique jedoch noch einige Schritte von den uns heute bekannten Synthesizern entfernt. Erst im 20. Jahrhundert ist, mittels Technik und nunmehr Elektrotechnik, die Synthese von Klängen so gewaltig vorangeschritten, dass man zu Beginn des 20. Jahrhunderts von den ersten Synthesizer ähnlichen Klangerzeugern sprechen kann.

Als Vorreiter gilt das Theremin, erfunden 1919 von Lev Sergejevich Termen [1, S. 6 f]. Ähnlich wie bei Tasten-, Streich- oder Zupfinstrumenten wurde es durch Handbewegungen des Nutzers gespielt. Jedoch berührte dieser das Instrument nicht, sondern veränderte durch die Position seiner Hände gegenüber zwei Elektroden, Lautstärke und Tonhöhe.

Mitte der 1930er Jahre folgte die „Hammond Orgel“ [1, S. 8 ff], namensgebend erfunden von Laurens Hammond. Diese elektrische Orgel besaß 91 rotierende Zahnräder, welche sich nahe von magnetischen Spulen drehten und durch ihre Bewegung elektrische Schwingungen in das Magnetfeld der jeweiligen Spule induzierten. Das resultierende Signal kam einer einfachen Sinusschwingung nahe. Die Zahnräder waren dabei so gefertigt, dass sie unterschiedliche Töne erzeugten. Diese wurden dem Gesamtsignal durch Zugstangen zugeführt, ähnlich dem Prinzip der additiven Synthese. So konnten komplexere Klänge entstehen. Das Instrument war dabei mit einem Keyboard, ähnlich der Klaviatur eines Klaviers, ausgestattet und konnte so live gespielt und manipuliert

werden.

In den folgenden Jahren entwickelte die RCA (Radio Corporation of America) den RCA-Synthesizer Mark I [1, S. 10 f]. Dieser programmierbare Apparat wurde durch Lochstreifenbänder gesteuert und musste nach fertigem Abspielen eines Bandes neu programmiert werden. Aufgrund dieser Funktionsweise konnten Klangfolgen erzeugt werden, die ein Mensch physisch nicht spielen kann. Stimmgabeloszillatoren erzeugten elektrische Klänge, die elektromagnetisch abgenommen wurden. Da dieses Instrument jedoch einen gesamten Raum einnahm und recht aufwendig zu spielen und programmieren war, kam eine kommerzielle Nutzung oder Verwendung für Liveauftritte nicht in Frage.

Es dauerte deshalb noch bis in die 1960er Jahre, bis die ersten, uns heute als Synthesizer bekannten, Klangerzeuger vorgestellt wurden. Bob Moog und Don Buchla sind dabei die Pioniere, deren Namen am häufigsten in den Geschichtsbüchern auftauchen. Moog präsentierte seinen ersten Synthesizer 1964 auf dem „Audio Engineering Society“ Kongress. Die Klangerzeugung seines Instruments fand durch spannungsgesteuerte Oszillatoren statt. Diese Bauweise verfeinerte er in den kommenden Jahren. Das „Moog Modular System“ bestand dabei, wie der Name es vermuten lässt, aus verschiedenen Komponenten, die jeweils für einen Teil der Klangsynthese verantwortlich waren. So stellte sich sein Synthesizer aus „Envelope Generator“, „Oscillator“ und „Sequencer“ zusammen [1, S. 12 ff]. Gespielt wurde dieses neuartige, elektronische Instrument jedoch wieder mithilfe eines Keyboards. In diesem Punkt unterschied sich seine Philosophie zu der seines Konkurrenten. Don Buchla entwickelte nämlich etwa zeitgleich die „Buchla 100 Serie“, welche anstelle des Keyboards durch einen Sequencer gesteuert wurde. Dabei erfolgte die Eingabe durch das Programmieren einer Sequenz bestehend aus 8 Volt Schritten. Durch die feste, sich wiederholende Abfolge konnte der Nutzer sich auf das Manipulieren des Klangs des Synthesizers konzentrieren.

Im Rahmen der Entwicklung von Computerchips und des 1983 vorgestellten MIDI-Standards, der das Kontrollieren von Synthesizern per Computer ermöglichte, wurden die ersten digitalen Synthesizer vorgestellt. Ihre Klangerzeugung war zwar noch sehr begrenzt, jedoch brachte das neue Format einige Vorteile mit sich. Ein Meilenstein der Geschichte stellt der 1983 erschienene Yamaha „DX7“ dar [13, S 48 f]. Dieser digitale Synthesizer verwendete erstmalig erfolgreich Frequenzmodulation zur Klangsynthese, welche prinzipiell auch in analogen Synthesizern möglich war, jedoch nicht so zuverlässig wie in digitalen. Der DX7 setzte schnell neue Standards in der damaligen Popmusik, was zu einer Welle an digitalen Synthesizern führte, die zunehmend die analogen Synthesizer verdrängten. Dazu zählen auch die in dieser Arbeit untersuchten Casio VZ-1 und VZ-10M, welche 1988 erschienen [13, S 50 f]. Ihre Klangsynthese sollte laut Casio durch Phasenmodulation geschehen.

Seit dem sind erneut viele Jahre vergangen und die Welt der synthetischen Klangerzeugung mittels Synthesizer hat sich erneut um einiges weiterentwickelt. Heutzutage

werden immer mehr Software Synthesizer wie „Serum“ (2014) von Xfer Records oder „Massive X“ (2019) von Native Instruments in der Musikproduktion eingesetzt. Das soll jedoch nicht heißen, dass analoge oder digitale Synthesizer komplett ersetzt wurden. Man kann schon fast vom Gegenteil sprechen. Originale Synthesizer wie der DX7, Polymoog, Sequential Prophet 5 oder Juno 60 sind heute beliebt wie nie. Ihr „vintage“ Klang ist für viele eine unersetzbare Inspirationsquelle.

## 2.2 Synthesizertypen: Analog-, Digital- und Software-Synthesizer

Wie bereits in Abschnitt 1 angeschnitten, unterscheidet man zwischen 3 verschiedenen Synthesizer Bauarten: Analog-, Digital- und Software-Synthesizer. Im Allgemeinen besitzen diese viele Gemeinsamkeiten, jedoch auch einige Unterschiede, wofür sich eine detailliertere Einteilung lohnt.

Die ersten Synthesizer waren analoger Natur, was kontinuierlich oder stufenlos bedeutet. Dies beschreibt vor allem die Funktionsweise der Klasse. Analoge Synthesizer basieren auf analogen Schaltungen. Diese bestehen aus auf Physik beruhenden und aus der Analogtechnik bekannten Bauelementen, wie Kondensatoren, Spulen und Widerständen. Sie werden miteinander verbunden, sodass ein Signal, oder Stromfluss, manipuliert werden kann. Dies bedeutet auch, dass es sich um physikalische Größen handelt, die sowohl zeit- als auch wertekontinuierlich sind. Das Herzstück eines jeden analogen Synthesizers sind seine Oszillatoren. Diese erzeugen elektrische Schwingungen, oder Signale, die wir unter bestimmten Bedingungen als Klang wahrnehmen können. Sind diese durch analoge Schaltungen umgesetzt, spricht man also von einem analogen Synthesizer. Obwohl sie die Grundlage der Synthesizer bilden und eine Revolution in der Musikwelt auslösten, ist ihre Bauweise nicht perfekt. Ihre Schwäche liegt in ihrer fluktuierenden Klangsynthese. Analoge Oszillatoren können durch natürliche Einflüsse manipuliert werden, weshalb ihre Klangsynthese unter verschiedenen Bedingungen variiert. So können beispielsweise Temperaturveränderungen die Tonhöhe beeinflussen, ähnlich wie bei den Saiten einer E-Gitarre. Zwei Synthesizer der selben Bauart können aus diesem Grund auch leicht unterschiedlich klingen, oder müssen, fast schon wie Gitarren, nach einiger Zeit wieder gestimmt werden.

Digitale Synthesizer kamen mit der Entwicklung von Prozessoren und der Massentauglichkeit von Speichermedien auf. Ihre Klangsynthese besteht im Kern, salopp gesagt, aus Einsen und Nullen. Dass bedeutet, es handelt sich nicht mehr um kontinuierliche Größen, sondern um diskrete. So wird ein Signal immer in feste Zeitpunkte und Werte zerlegt. Ihr großer Vorteil gegenüber analogen Synthesizern ist die durch die Digitaltechnik gegebene Stabilität. Im Gegensatz zu analogen Synthesizern verstimmen sich digitale nämlich nicht. Die Ausgabe zweier identischer digitaler Synthesizer ist gleich. Sie besitzen jedoch auch Nachteile. Beispielsweise können durch das Abtasttheorem Alias-Artefakte entstehen, die unschön klingen und bei analogen Synthesizern nicht

aufzutreten.

Digitale- und Software-Synthesizer unterscheiden sich in der Umgebung, in der sie auftreten. Digitale Synthesizer sind oft in entsprechender Hardware integriert. In dieser physischen Umgebung durchlaufen die digital erzeugten Signale anschließend analoge Schaltungen, wodurch die Ausgabe nicht immer dem berechneten Signal entspricht. Software-Synthesizer hingegen werden in vollständig digitalen Umgebungen verwendet. Sie sind daher sehr vielseitig einsetzbar, da sie nicht an ein bestimmtes Gerät gebunden sind. Dies ermöglicht es sie mit anderer Software zu kombinieren. So ist es heutzutage üblich einen Software Synthesizer in Musikprogrammen, DAWs, wie Cubase, Ableton Live oder Logic Pro zu verwenden. Dies ermöglicht die direkte, simultane Aufnahme und Bearbeitung von Klängen.

Da digitale Synthesizer und Software-Synthesizer im Kern also durch einen DSP gesteuert werden, und sie sich lediglich in ihrer „Verpackung“ unterscheiden, werden diese im folgenden gemeinsam, außer es wird ausdrücklich separiert, unter dem Oberbegriff digitale Synthesizer zusammengefasst.

### 2.3 Grundlagen der Signalverarbeitung

Für die kommenden Abschnitte werden Grundkenntnisse über die Ausbreitung und Wahrnehmung von Schall und der Signalverarbeitung benötigt. Deshalb folgt in diesem Abschnitt eine kurze Einleitung in die wichtigsten Grundlagen.

Schall beschreibt Vibrationen von Partikeln in einem bestimmten Medium, in unserem Fall dem Medium Luft. Dieser wird durch eine Quelle erzeugt, der sogenannten Schallquelle, welche die Moleküle in der Luft erregt und in Schwingung versetzt. Dabei entstehen Gebiete der Kompression, in denen sich die Moleküle verdichten, und der Expansion, in denen sich die Moleküle voneinander entfernen. So bewegt sich bei einem Schallereignis eine Schallwelle in der Luft fort, bis sie auf das Ohr des Hörers trifft. Dort angekommen bringt sie das Trommelfell zum Schwingen, was eine Folge von weiteren biochemischen Reaktionen auslöst, welche der Einfachheit halber als Umwandlung in ein Signal im menschlichen Gehirn abgekürzt werden können [9, S. 14 ff]. Da der Mensch eine nahezu logarithmische Wahrnehmung von Schalldruck besitzt, eignet sich eine Darstellung in Dezibel [9, S. 19], wobei  $\tilde{p}$  den Schalldruck und  $p_0$  den Referenzwert für Luft beschreibt:

$$\text{Schalldruckpegel } L_p = 10 \log_{10} \frac{\tilde{p}^2}{p_0^2} \text{ dB.}$$

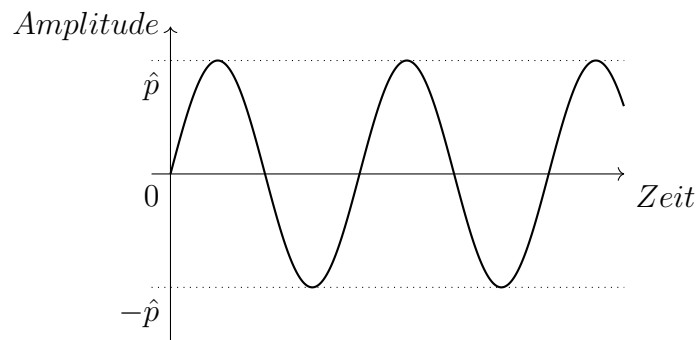


Abbildung 1: Beispiel für eine einfache Schwingung, in dem positive Amplitudenwerte die Kompression, und negative die Expansion von Luftmolekülen beschreiben

Schallereignisse lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen: periodische und nicht periodische. In der Natur kommt es auch zu komplexeren Ereignissen mit Eigenschaften beider Kategorien. Für die Zwecke dieser Arbeit ist eine Zweiteilung jedoch ausreichend.

Nicht periodische Schallereignisse nennt man auch Geräusch oder Rauschen. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Schwingungen unregelmäßig sind. Periodische Schallereignisse nennt man häufig Klang oder Ton. Sie bestehen, wie der Name es vermuten lässt, aus Sequenzen, die sich in regelmäßigen Abständen wiederholen. Die einfachste Form eines Klangs ist die Sinusschwingung, welche in Abbildung 1 zu sehen ist.

In der Signalverarbeitung werden Schallereignisse durch Signale ausgedrückt. Diese kann man im Zeit- oder Frequenzbereich darstellen.

Der Zeitbereich ist der simpelste Weg ein Signal zu beschreiben.<sup>1</sup> Für die Betrachtung von kontinuierlichen Signalen setzt er sich aus der vergangenen Zeit  $t$ , in Sekunden, und des sich ändernden Schalldrucks  $p$  zusammen, welcher abstrahiert durch die Signalwerte  $x$  ausdrückt wird. Jedem Signalwert  $x(t) \in \mathbb{R}$  wird dabei ein Zeitpunkt  $t \in \mathbb{R}$  zugewiesen. Es ergibt sich also  $x : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ .

Betrachtet man ein periodisches Signal, besitzt dies einen sich zeitlich wiederholenden Abschnitt, eine sogenannte Periode, welche durch das Formelzeichen  $T$  ausgedrückt wird. Wie bereits angedeutet, unterliegt es der Bedingung, dass sich nach einer abgeschlossenen Periode alle Signalwerte wiederholen. Dies bedeutet, dass alle  $n \in \mathbb{Z}$  Periodendurchläufe gilt:

$$x(t + nT) = x(t).$$

Die Grundfrequenz  $f$  des Signals, angegeben in Hertz (Hz), kann aus der Anzahl der Perioden pro Sekunde errechnet werden:

$$f_0 = \frac{1}{T}.$$

<sup>1</sup>Die nachfolgend genutzte Notation folgt überwiegend [15, Casio-VZ-virtual-instrument, S. 4 ff]

Sie bestimmt den fundamental wahrgenommenen Klang. Das menschliche Gehör ist dabei in der Lage, ungefähr 20 bis 20000 Schwingungen pro Sekunde wahrzunehmen, was einem Frequenzbereich von 20 bis 20 kHz entspricht [9, S. 15]. Realistisch gesehen ist dieses Intervall nur von Kleinkindern zu erreichen, denn mit zunehmenden Alter nimmt dieser Bereich ab. Hörverlust ist aber auch zu erleiden, indem man häufig oder zu lange lauten Schallereignissen ausgesetzt ist.

Betrachtet man digitale Signale werden sowohl ihr Zeitbereich, als auch ihr Wertebereich diskret. Dies liegt daran, dass bei der Umwandlung von einem analogen Signal in ein digitales, zu bestimmten Zeitpunkten Werte abgetastet werden. Diese Abtastwerte nennt man nun  $x(k)$ , wobei  $k \in \mathbb{Z}$  repräsentativ für einen bestimmten Zeitpunkt steht. So liegen zwischen den Zeitpunkten  $k$  und  $k + 1$  nun auch nicht mehr unendlich viele weitere Werte, sondern keiner.

Wie viele dieser Werte pro Sekunde abgetastet werden, bestimmt die Abtastrate. Sie beschreibt die Anzahl der gemessenen Werte pro Sekunde. Für professionelle Audioanwendungen werden mindestens 44100 Werte pro Sekunde abgetastet, was einer Abtastrate von 44,1 kHz entspricht. Die Abtastrate richtet sich nach dem Abtasttheorem:

$$f_A \geq 2 \cdot f_G,$$

wobei  $f_A$  für die Abtastfrequenz steht und  $f_G$  für die höchste, im Signal auftretende Frequenz, der Grenzfrequenz. Wie bereits erwähnt, kann der Mensch Frequenzen bis 20 kHz wahrnehmen, weshalb man als Abtastfrequenz mindestens 40 kHz anstreben sollte. Die tatsächliche Abtastfrequenz wird letztendlich durch die verwendeten Filter, die aufzunehmenden Signale und technischen Umstände festgelegt.

Durch eine nicht ideal gewählte Abtastrate können Fehler wie der Alias-Effekt entstehen. Dabei streuen Frequenzen oberhalb der Grenzfrequenz wieder in den wahrnehmbaren Bereich ein. Eine genaue Erklärung würde an dieser Stelle zu weit gehen. Für diese Arbeit ist nur wichtig, dass dies ein klanglich unerwünschtes Nebenprodukt der Abtastung ist.

Bereits aus dieser kurzen Erläuterung wird ersichtlich, dass es sich bei der Digitalisierung von Signalen um ein komplexes Fachgebiet handelt. Deshalb werden Herleitungen über diskrete Signale häufig unübersichtlicher als äquivalente über kontinuierliche Signale. Aus diesem Grund versuche ich mich im Folgendem, wenn es nicht explizit notwendig ist, auf kontinuierliche Größen zu beziehen. Dies ist vor allem auch deshalb sinnvoll, weil ein Signal am Ende immer in seiner kontinuierlichen Form vom Hörer wahrgenommen wird.

In den Abbildungen 2a und 2b sind nun einfache Sinusschwingungen zu sehen, welche

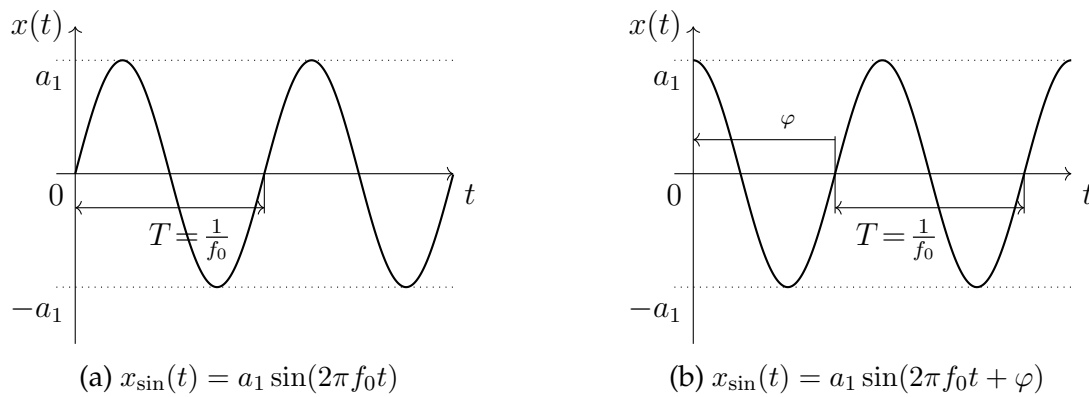


Abbildung 2: Beispiele von Sinusschwingungen

als Grundlage durch den Term

$$x_{\sin}(t) = \sin(2\pi f_0 t).$$

beschrieben werden können. Dies folgt, betrachtet man einmal die Darstellung im Einheitskreis, da eine Periode einer Schwingung eine vollständige Umdrehung im Einheitskreis durchläuft und somit einen Winkel von  $2\pi$  ergibt. Daraus folgt außerdem, dass die Kreisfrequenz  $\omega_0$  einer harmonischen Schwingung immer das  $2\pi$ -fache ihrer Frequenz  $f_0$  ist.

Mit dieser Grundlage werden nun beide Signale der Abbildung 2 mit einem Konstanten Faktor  $a_1$  multipliziert, sodass man

$$x_{\sin}(t) = a_1 \sin(2\pi f_0 t)$$

erhält. Dies führt zu einer Manipulierung der Amplitude, oder auch der wahrgenommenen Lautstärke.

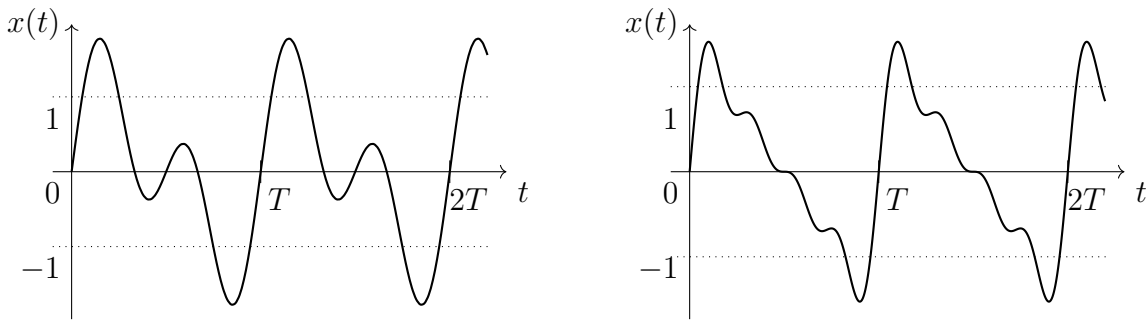
In Abbildung 2b wird außerdem noch ein Phasenwinkel von  $\varphi = \frac{\pi}{2}$  addiert. Damit gleicht diese einer Cosinusschwingung.

$$x_{\sin}(t) = a_1 \sin\left(2\pi f_0 t + \frac{\pi}{2}\right) \rightarrow x_{\cos}(t) = a_1 \cos(2\pi f_0 t)$$

Der Mensch ist nicht in der Lage, Cosinusschwingungen von Sinusschwingungen akustisch zu unterscheiden. Die Phasenverschiebung einer Sinusschwingung hat demnach keinen wahrnehmbaren Einfluss auf den Klang.

Ein Klang, der von einem Synthesizer erzeugt wird, besteht in den meisten Fällen jedoch nicht nur aus einer reinen Sinusschwingung. Während es verschiedene Methoden gibt, um komplexere Klänge zu erzeugen, ist die einfachste Methode, unterschiedliche Schwingungen zu summieren, siehe Abbildung 3.

Der Frequenzbereich eignet sich besonders gut um psychoakustische Informationen



(a) Beispiel für ein Signal, bestehend aus 2 verschiedenen Sinusschwingungen

$$x(t) = \sum_{n=1}^2 \sin(2\pi n f_0 t).$$

(b) Beispiel für ein Signal, bestehend aus 4 verschiedenen Sinusschwingungen

$$x(t) = \sum_{n=1}^4 \frac{1}{n} \sin(2\pi n f_0 t).$$

Abbildung 3: Summe verschiedener Sinusschwingungen

über ein Signal zu erhalten. So kann man z. B. die wahrgenommenen Frequenzanteile ablesen. Den Frequenzbereich erhält man, indem man das Signal in bestimmte Transformationsfunktionen einsetzt. Hierfür nutzt man, je nach vorliegendem Signaltyp, die Fourier-Reihe, -transformation oder diskrete Fourier-Transformation. Diese Transformationen sind bijektiv. Das bedeutet, dass jedem Signal im Zeitbereich genau ein Signal im Frequenzbereich zugewiesen werden kann. Ein Beispiel für eine solche Transformation eines zeitkontinuierlichen, periodischen Signals vom Zeitbereich in den Frequenzbereich, ist die Fourier-Reihe. Sie wird folgendermaßen beschrieben:

$$\underline{X}_n = \frac{1}{T} \int_T x(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \quad \text{mit } \omega_0 = 2\pi f_0. \quad (1)$$

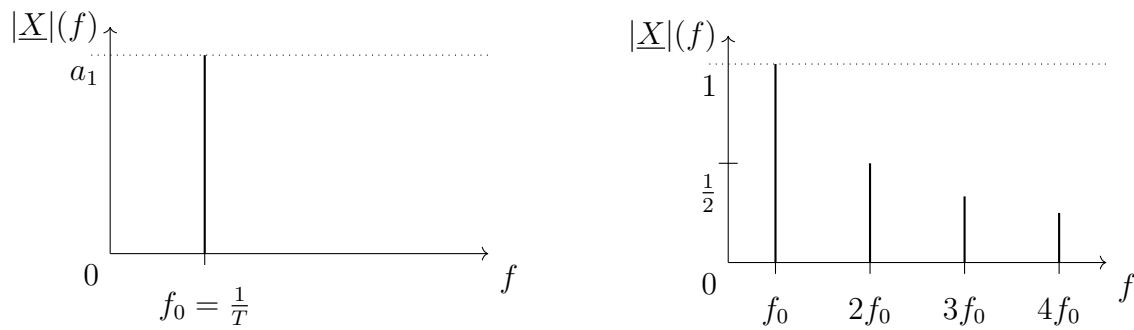
Folglich erhält man das Frequenzspektrum des Signals, indem man das Integral über eine Periode  $T$  des Signales bildet, welche mit einem komplexwertig harmonischen Träger multipliziert wird. Abzulesen ist nun, welche Sinus- und Cosinusanteile das betrachtete Signal zusammensetzen.

Das Frequenzspektrum setzt sich aus dem Betragsspektrum und dem Phasenspektrum zusammen. Im Betragsspektrum ist zu erkennen, aus welchen Frequenzanteilen das Signal besteht. Im Phasenspektrum werden die Phasenverschiebungen der Frequenzanteile dargestellt. Schaut man sich die komplexen Fourierkoeffizienten<sup>2</sup>

$$\underline{X}_n = |\underline{X}_n| \cdot e^{j \arg \underline{X}_n}$$

an, berechnet man das Betragsspektrum durch  $|\underline{X}_n|$  und das Phasenspektrum durch  $\arg \underline{X}_n$ . Das Phasenspektrum ist dabei perzeptiv vernachlässigbar. Aus diesem Grund betrachtet man häufig nur das Betragsspektrum. Auch für diese Arbeit ist nur das Betragsspektrum des Signals von Interesse. Einige Beispiele für Betragsspektren sind in Abbildung 4 zu sehen.

<sup>2</sup> $\underline{X}_n$  ist eine vereinfachte Schreibweise für  $\underline{X}(\omega)$ , wobei  $\omega = 2\pi f_0 n$ ,  $\omega \in [0, \frac{\omega_A}{2}]$ .



(a) Betragsspektrum von Abbildung 1

(b) Betragsspektrum von Abbildung 3b

Abbildung 4: Beispiele für Betragsspektren

Die in Abbildung 4b zu sehende Linie bei der Frequenz  $f_0$  kennzeichnet die bereits erwähnte Grundfrequenz, während alle ganzzahlig Vielfachen darüber Obertöne heißen, ausgedrückt durch:

$$f_n = n \cdot f_0 \quad \text{mit } n \in \mathbb{Z} \text{ und } n \neq 0.$$

Zu den Obertönen in diesem Beispiel zählen also  $2f_0$ ,  $3f_0$  und  $4f_0$ . Nimmt man an, dass eine Grundfrequenz von  $f_0 = 110$  Hz vorliegt, dann lägen die Obertöne bei  $f_1 = 220$  Hz,  $f_2 = 330$  Hz und  $f_3 = 440$  Hz.

Wie in Abbildung 4a zu sehen, besitzt eine Sinusschwingung keine Obertöne, sondern lediglich einen Grundton oder eine Grundfrequenz. Deshalb betrachtet man einfache Sinus- beziehungsweise Cosinusschwingungen als Grundlage aller Signale.

In der Musiktheorie verwendet man häufig den Begriff der Tonhöhe, um den wahrgenommenen Ton einer Frequenz auszudrücken. Diese korreliert mit der Grundfrequenz des Signals. Die Tonhöhe ist gleichzusetzen mit der musikalischen Note. Um diese zu beschreiben, nutzt man in der westlichen Musiktheorie das Zwölftonsystem, bestehend aus den Halbtönen: A, Ais, B, C, Cis, D, Dis, E, F, Fis, G und Gis. 12 aufeinanderfolgende Halbtöne bilden eine Oktave. Folgt man der wissenschaftlichen Schreibweise, entspricht die sogenannte „eingestrichene Oktave“  $C_4$  einer Frequenz von  $f_0 = 261,63$  Hz. Bei einer Frequenz von  $f_0 = 440$  Hz handelt es sich um den sogenannten Kammerton. Dieser wird durch die Note  $A_4$  ausgedrückt. Er wird in vielen musikalischen Stimmungen, welche die Frequenzverhältnisse der Schallquellen von Instrumenten festlegen, als Richtwert verwendet.

Die Tonhöhe kann außerdem, der Natur der digitalen Musikproduktion geschuldet, in Zahlenwerten ausgedrückt werden. Man verwendet den MIDI-Standard, um den Tasten des Keyboards eine Tonhöhe und einen eindeutigen numerischen Wert zuzuweisen. Die Tonhöhe, im Englischen „Pitch“ genannt, lässt sich wie folgt berechnen:

$$p = 69 + 12 \log_2 \left( \frac{f_0}{440 \text{ Hz}} \right)$$

Es werden Werte im Bereich  $0 \leq p \leq 127,99$  zugelassen, wobei der Wert  $p = 0$  die Note  $C_{-1}$  repräsentiert. Der Integer spiegelt dabei den jeweiligen Halbton wider, während die Dezimalstellen die Verstimmung angeben. Zwischen zwei Halbtönen befinden sich 100 Cent. Die Tonhöhe des Kammertons entspricht  $p = 69$ .

## 2.4 Grundelemente

Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Bauteile von Synthesizern erläutert. Wie bereits erwähnt, lassen sich Synthesizer anhand ihres Aufbaus in verschiedene Kategorien einteilen.

Grundlegend sind alle Synthesizer mit Klang-Generatoren und Modifikatoren ausgestattet. Klang-Generatoren erzeugen Klänge und Modifikatoren manipulieren diese anschließend.

Jeder Synthesizer besitzt als Grundlage seiner Klangsynthese mindestens einen Klang-Generator und beliebig viele Modifikatoren.

Klang-Generatoren können in die Klassen der Oszillatoren und der Sampler eingeteilt werden. Oszillatoren erzeugen periodische Schwingungen, welche als Signalgrundlage dienen. Sampler hingegen verwenden abgespeicherte Wellenformen, welche beliebig abgespielt werden können.

Die von Synthesizern generierten und verwendeten Signale können grundsätzlich in zwei Kategorien eingeteilt werden: Klangsignale und Steuersignale. Zu den Klangsignalen gehören alle Signale, die von Synthesizern erzeugt werden und sich im für Menschen wahrnehmbaren Frequenzspektrum befinden. Zu den Steuersignalen zählen Steuerspannungen und niederfrequente Signale. Eine genaue Erklärung, wie diese funktionieren und an welchen Stellen sie eingesetzt werden, folgt in diesem Abschnitt.

### 2.4.1 VCO (Voltage Controlled Oscillator)

Das erste und wichtigste Bauteil von Synthesizern kommt aus der Klasse der Klanggeneratoren. Der Oszillator stellt, wie bereits in Abschnitt 2.2 erwähnt, das Herzstück eines jeden Synthesizers dar. Im Kontext von analogen Synthesizern spricht man nun jedoch von einem spannungsgesteuerten Oszillator (*Voltage Controlled Oscillator*, VCO). Gemäß Abschnitt 2.3 können die von Oszillatoren erzeugten periodischen Schwingungen durch ihre Grundfrequenz  $f_0$  beschrieben werden. Je nach vorliegender Grundschwingung kann das erzeugte Signal anschließend als Grundlage für weitere Manipulation oder Klangsynthesen verwendet werden.

Da reine Sinusschwingungen keine Obertöne besitzen, und demnach für einige Formen der Klangsynthese nicht besonders nützlich sind (siehe Abschnitt 2.5), gibt es weitere standardmäßige Wellenformen. Einige wichtige, grundlegende Signale, welche in VCOs

eingesetzt werden, sind in Abbildung 6 zu sehen.

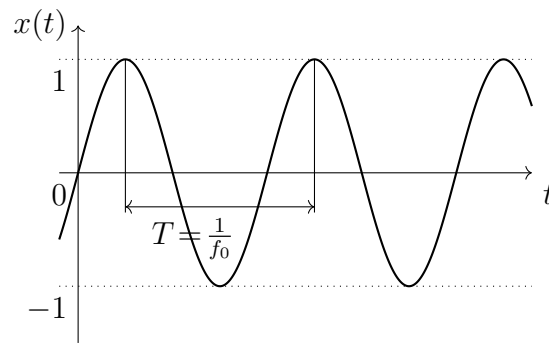
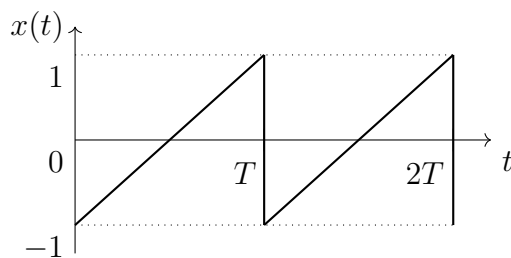
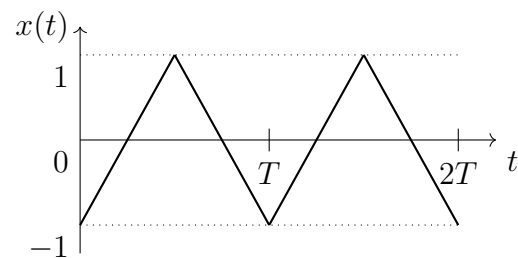


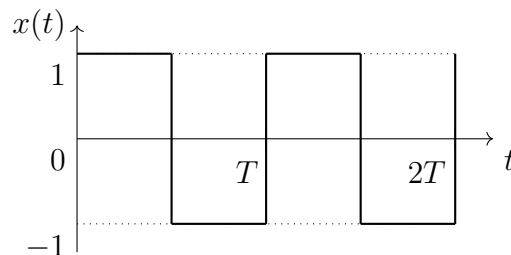
Abbildung 5: Reiner Ton mit Standardamplitude  $x \in [-1, 1]$



(a) Rampen- oder Sägezahnsignal



(b) Dreiecksignal



(c) Rechtecksignal

Abbildung 6: Beispiel für Oszillatorsignale

Als Äquivalent für digitale Synthesizer verwendet man den digital gesteuerten Oszillator (*Digitally Controlled Oscillator*, DCO). Dieser erzeugt ebenso periodische Schwingungen. Unterscheiden kann man die beiden Oszillortypen anhand ihrer Bauteile. Während VCOs durch analoge Schaltungen umgesetzt werden, verwenden DCOs eine Mischung aus elektronischen und digitalen Schaltungen [11, S. 225]. Daher wird bei ihnen mit zeit- und wertdiskreten Signalen gearbeitet. Ein DCO kann jedoch die gleichen Wellenformen wie ein VCO erzeugen, siehe Abbildung 6. Man stellt dies durch ihre Werteabhängigkeit dar. Ein VCO produziert ein kontinuierliches Signal  $x(t)$  und ein DCO ein diskretes Signal  $x(k)$ .

### 2.4.2 CV (Control Voltage)

Steuerspannungen (*Control Voltage*, CV) sind Gleichspannungen, die als Informationsquelle dienen, um Parameter zu manipulieren.

Ein möglicher Einsatz von CVs bei analogen Synthesizern besteht darin, verschiedene Tonhöhen zu erzeugen. Ein VCO, der eine einfache Sinusschwingung ähnlich der in Abbildung 5 erzeugt, kann durch eine Steuerspannung manipuliert werden. Diese beeinflusst die am Oszillator vorliegende Frequenz so, dass bei Tastenanschlag die Tonhöhe der gespielten Taste entspricht. Die Steuerspannung stellt also eine Informationsübertragung zwischen der gespielten Taste und der Tonhöhe am Oszillator dar.

Um sich einmal vorzustellen, in welcher Größenordnung sich eine solche Steuerspannung befindet, kann man sich die Konvention der Hersteller von Synthesizern anschauen. Moog und auch weitere Hersteller legten damals als Grundsatz für ihre Instrumente fest, dass bei einer Erhöhung der Steuerspannung um 1 V die am Oszillator anliegende Frequenz verdoppelt wird [1, S. 74 f]. Angenommen es liegt eine Grundfrequenz von 110 Hz, bei einer 2 V Steuerspannung, vor, dann wird bei einer Erhöhung der Steuerspannung um 1 V die Grundfrequenz des Oszillators um eine Oktave erhöht, nämlich auf 220 Hz.

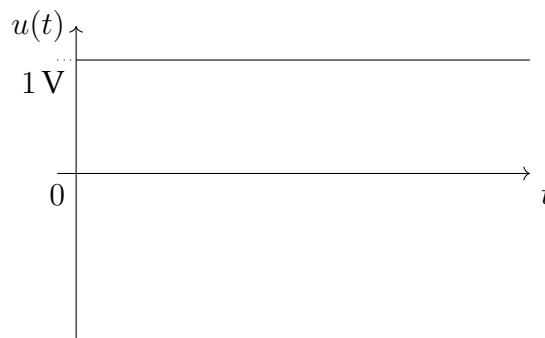


Abbildung 7: Beispiel einer Gleichspannung (CV)

### 2.4.3 VCA (Voltage Controlled Amplifier)

Ein spannungsgesteuerter Verstärker (*Voltage Controlled Amplifier*, VCA) ist in einem analogen Synthesizer dafür zuständig, ein Signal wie ein Tor (engl. gate) durchzulassen oder zu versperren. Dies ist notwendig, da ein Oszillator ein fortlaufendes Signal erzeugt, welches kontinuierlich ausgegeben wird. Soll das Signal jedoch nur bei Tastenanschlag erklingen, muss es durch eine Art Schalter an- und ausgeschaltet werden.

Die Funktionsweise von einem VCA ist recht simpel, da dieser lediglich eine Multiplikation zweier Werte durchführt:  $A \cdot B = C$  [1, S. 74]. Dabei repräsentiert  $A$  beispielsweise die Amplitude  $x(t)$  und  $B$  die Steuerspannung. Wird die von  $B$  erzeugte Steuerspannung zu  $0\text{ V}$ , ergibt sich  $A \cdot 0 = 0$ . Das resultierende Signal verstummt. Bei

Tastenanschlag springt die Spannung auf  $B = 1 \text{ V}$ , wodurch das Signal durchgelassen wird, denn  $A \cdot 1 = A$ . Um nun Amplituden zwischen 0 und 1 zu erhalten, muss man eine Steuerspannung im Intervall von  $0 \text{ V} \leq x \leq 1 \text{ V}$ , wobei  $x \in \mathbb{R}$ , zulassen. Dies ermöglicht die Detektion der Anschlagsstärke und der damit zusammenhängenden Lautstärke des Gespielten.

#### 2.4.4 Hüllkurven

Essenziell für die Wahrnehmung von Signalen ist ihre Hüllkurve. Sie bestimmt die zeitliche Veränderung der Lautstärke, welche man oft durch die Verschaltung von mehreren Steuerspannungen erreicht. So kann man die Hüllkurve eines Signals verändern, indem man dies über eine bestimmte Zeit anschwellen oder ausklingen lässt. In diesem Zusammenhang spricht man auch von Hüllkurvengeneratoren. Ihre Funktionsweise ist an dieser Stelle nicht von Bedeutung, jedoch ist es für spätere Abschnitte wichtig zu erwähnen, dass die Hüllkurve oft durch Anstiegszeit (Attack), Abklingzeit (Decay), Halteniveau (Sustain) und Abfallzeit (Release) beschrieben wird.

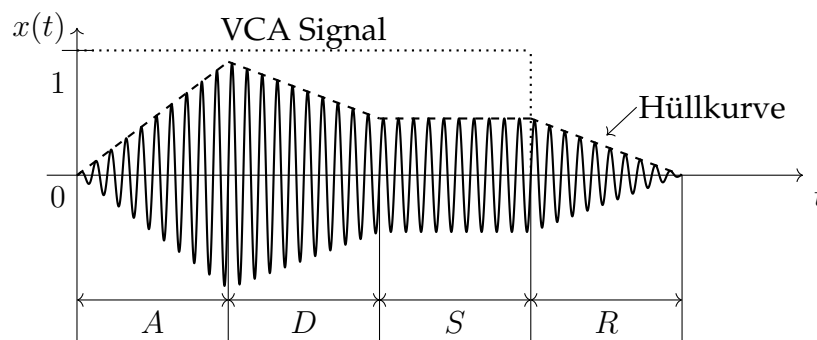


Abbildung 8: Einteilung der Hüllkurve

#### 2.4.5 Sampler und Wavetable

Neben Oszillatoren als Klangerzeuger gibt es die Klasse der Sampler. Der Vorreiter dieser Technik war das Mellotron [1, S. 14 f]. Dieses Instrument basierte auf mechanisch bewegten Tonbändern, auf denen sich aufgezeichnete Klänge befanden. Spielte man das Instrument wurden die Bänder mit einer gewissen Geschwindigkeit durch einen Apparat gezogen, woraus ein Ton resultierte. Die Aufnahme wurde abgespielt.

Digitale Sampler basieren auf der Grundlage der Abtastung, im Englischen „sampling“ genannt. Wie in Abschnitt 2.3 erwähnt, wird das Schallereignis dabei in Abtastwerte zu bestimmten Zeitpunkten zerlegt, welche abgespeichert werden können. Das nun in digitaler Form vorliegende Signal kann nach Belieben abgespielt und manipuliert werden. So lässt sich das Signal in dieser Form auch rückwärts auslesen. Außerdem ist es möglich, die Tonhöhe des Signals zu ändern, indem man das Signal schneller oder langsamer abspielt.

Die Funktionsweise von Samplern unterscheidet sich also dahingehend von Oszillatoren, dass keine periodischen Schwingungen erzeugt werden müssen und demnach auch kein Signal generiert, sondern nur ausgelesen wird.

Mit dieser Grundlage entstand der „Wavetable“-Oszillator, denn ähnlich wie andere Oszillatoren, erzeugt dieser periodische Schwingungen. Der Unterschied besteht nun darin, dass er keine Wellenform generiert, sondern lediglich die in einer Tabelle gespeicherten Amplitudenwerte eines Signals, genauer nur einer Periode eines Signals, ausliest und wiederholt. So sind, im Vergleich zum VCO und DCO, komplexere und vielfältigere Grundschwingungen möglich.

#### 2.4.6 LFO (Low Frequency Oscillator)

Ähnlich zum spannungsgesteuerten Oszillator gibt es den niederfrequenten Oszillator (*Low Frequency Oscillator*, LFO). Niederfrequente Oszillatoren funktionieren genauso wie spannungsgesteuerte Oszillatoren, mit dem Unterschied, dass die Schwingungsfrequenz niedriger liegt. Ihre Grundfrequenz liegt meist zwischen 0 Hz und 20 Hz. Demnach kann das menschliche Gehör diese nicht wahrnehmen, und sie eignen sich aufgrund ihrer vergleichsweise langsamen Oszillation sehr gut, um andere Signale zu modulieren [1, S. 68].

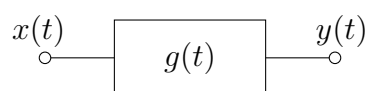
Ein LFO kann zum Beispiel die Amplitude eines VCO Signals modulieren und so für einen Tremolo Effekt sorgen. Dieser ist als Amplitudenschwankung wahrnehmbar. Das LFO Signal wird dabei nicht zusätzlich ausgegeben, sondern dient rein zur Modulation von anderen Signalen. Ein Beispiel für die Modulation eines Signals durch einen LFO ist in Abbildung 9 zu sehen.

#### 2.4.7 Filter

Neben niederfrequenten Oszillatoren, die Parameter über der Zeit verändern, werden außerdem häufig Filter eingesetzt um ein Signal zu manipulieren. Ein Filter ist dabei ein Werkzeug, welches hauptsächlich genutzt wird um die Amplitude bestimmter Frequenzen im Frequenzspektrum abzuschwächen oder zu verstärken.

Der Aufbau unterscheidet sich dabei zwischen analogen und digitalen Filtern. In analogen Filtern werden Widerstände, Kondensatoren und Spulen verwendet, um den Frequenzgang zu manipulieren. In digitalen Filtern nutzt man Logikschaltungen.

Das Systemverhalten eines Filters wird nun im Zeitbereich durch die Impulsantwort  $g(t)$ , das Eingangssignal  $x(t)$  und das Ausgangssignal  $y(t)$  beschrieben. Diese stehen in folgendem Zusammenhang:



$$y(t) = (x * g)(t)$$

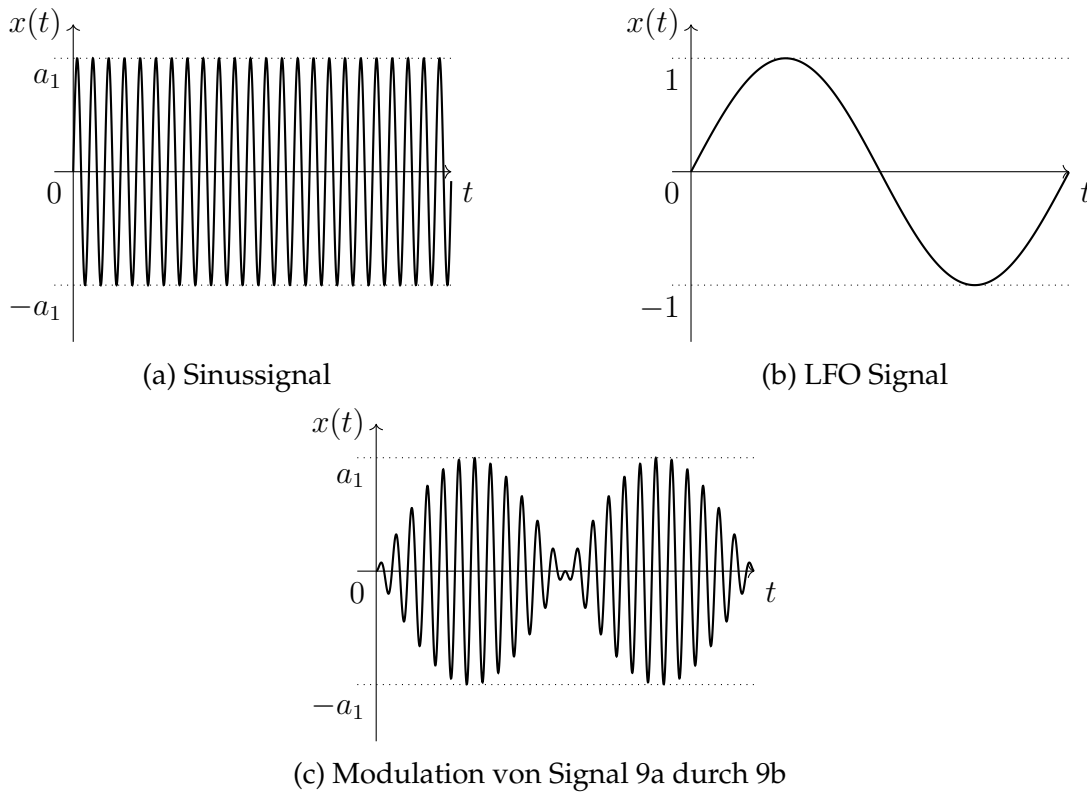
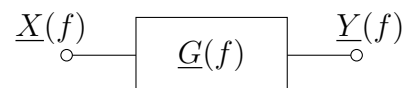


Abbildung 9: Beispiel einer Modulation durch einen LFO

Dabei steht „\*“ für den Faltungsoperator. Dieser kann durch die Integration der Multiplikation zweier Signale ausgedrückt werden, wobei die Signale die Zeitkonstante  $\tau$  erhalten und eines der Signale gespiegelt und um den Wert  $t$  verschoben wird (2).

$$(x_1 * x_2)(t) = \int_T x_1(\tau) \cdot x_2(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

Um das Systemverhalten eines Filters im Frequenzbereich ausrechnen zu können, benötigt man die Übertragungsfunktion  $\underline{G}(f)$ , das Spektrum des Eingangssignals  $\underline{X}(f)$  und das Spektrum des Ausgangssignals  $\underline{Y}(f)$ . Diese stehen in folgendem Zusammenhang:



$$\underline{Y}(f) = \underline{X}(f) \cdot \underline{G}(f)$$

An dieser Stelle kommt die bereits erwähnte Fourier-Transformation zum Einsatz<sup>3</sup>

$$\underline{X}(f) = \mathcal{F}(x(t)) := \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad \text{für } \underline{Y}(f), \underline{G}(f) \text{ äquivalent}$$

<sup>3</sup>In der Systemtheorie wird bei der Notation häufig  $\omega$  als Variable der Fourier-Transformation verwendet. Für spätere Abschnitte über Synthesizer ist es jedoch sinnvoll, an dieser Stelle  $f$  zu verwenden.

Da die Systemantwort im Zeitbereich durch Faltung berechnet wird und im Frequenzbereich lediglich durch Multiplikation, ist es sinnvoll das vorliegende Signal zuerst vom Zeit- in den Frequenzbereich zu transformieren. Dafür nutzt man die angesprochenen Transformationen. Am Ende muss das Signal natürlich wieder in den Zeitbereich rücktransformiert werden.

Filter manipulieren also den Frequenzgang eines Signals. Diese Eigenschaft allein ist nützlich in der Klangsintese. Moduliert man nun noch zusätzlich wichtige Parameter von Filtern, z. B. die Grenzfrequenz  $f_g$ , durch einen oder mehrere LFOs, macht sie das zu einem der leistungsstärksten Werkzeuge in der Klangsintese. Drei häufig verwendete Filtertypen bei Klangsintesen sind in Abbildung 10 zu sehen.

Dieser Abschnitt soll nur als kleiner Wissensexkurs zur allgemeinen Funktionsweise von Synthesizern dienen. Die VZ-Reihe besitzt nämlich keine Filter. Demnach sind diese nicht relevant für den Praktischen Teil.

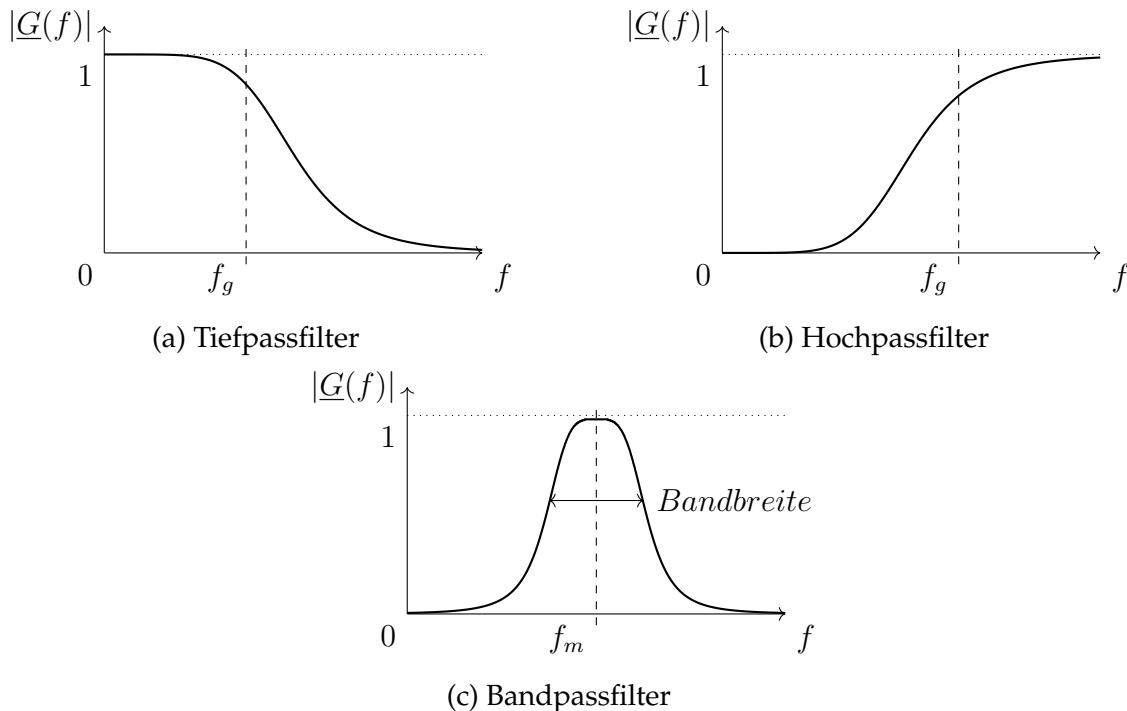


Abbildung 10: Beispiele verschiedener Filtertypen

#### 2.4.8 Blockschaltbild eines einfachen Synthesizers

Aus den vorangehenden Abschnitten kann man nun ein beispielhaftes Blockschaltbild für einen einfachen analogen Synthesizer erstellen, siehe Abbildung 11. Dazu verwendet man einen VCO als Signalgenerator. Die Tonhöhe des Oszillators wird durch eine Steuerspannung gesteuert, die durch ein Keyboard manipuliert wird. Dazu kommt ein LFO<sub>1</sub>, der die Amplitude des VCOs moduliert und damit einen Vibrato-Effekt erzeugt.

Der Ausgang des VCOs wird mit einem VCA verbunden, sodass bei Tastenanschlag ein Ton erklingt. Dieser wird durch einen weiteren LFO<sub>2</sub> moduliert, um einen Tremolo-Effekt zu erzeugen. Das gesamte Signal wird am Ende durch einen Filter geleitet, welcher beispielsweise einen Tiefpass darstellt, um hohe Frequenzanteile des Spektrums zu verringern. Ein letzter LFO<sub>3</sub> kann hier verwendet werden, um z. B. die Grenzfrequenz des Filters zu modulieren.

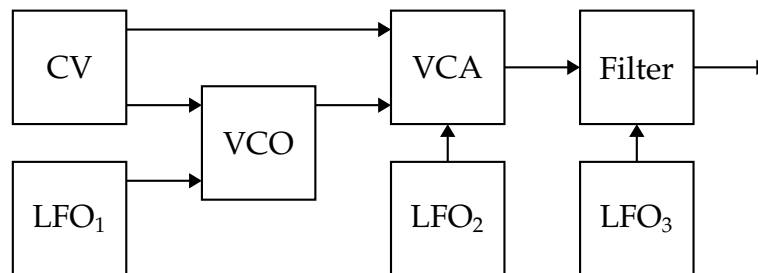


Abbildung 11: Schaltbild eines einfachen Synthesizers (nachempfunden aus [1, S. 73])

## 2.5 Klangsyntheseprinzipien

Als Klangsynthese bezeichnet man den Prozess Klänge elektronisch oder künstlich zu erzeugen. Dabei gibt es verschiedene Arten von Klangsynthesen, wobei jedem Synthesizer mindestens eine Form von Klangsynthese zugrunde liegt.

### 2.5.1 Additive und subtraktive Synthese

Die erste und wohl einfachste Form von Klangsynthese ist die additive Synthese. Aus der Einleitung in Abschnitt 2.3 geht hervor, dass Sinus- beziehungsweise Cosinus-schwingungen keine Obertöne besitzen und somit der Grundbaustein aller Signale sind. Genau diese Eigenschaft nutzt die Fourier-Transformation, um das Frequenzspektrum eines Signals zu erhalten. Und aus diesem Grund kann man, zumindest in der Theorie, jeden beliebigen Klang auch aus der Summe von verschiedenen Sinusschwingungen herstellen, siehe Abbildung 3. In der Praxis ist dies natürlich nicht immer möglich, da man einerseits nicht unendlich viele Sinusschwingungen addieren kann und andererseits die Rechenkapazität oft schon viel früher versagt. Trotzdem ist die additive Synthese ein sehr leistungsstarkes Werkzeug. So konnte bereits die Hammond-Orgel durch additive Synthese sehr umfangreiche Klänge produzieren.

Die subtraktive Synthese beschreibt hingegen den Prozess, Frequenzanteile eines Signals zu verändern, meist zu verringern. Als Grundlage dienen obertonreiche Signale, wie die in Abbildung 6. Diese werden anschließend durch Filter manipuliert, sodass bestimmte Frequenzanteile weniger Energie im Spektrum besitzen. Neben obertonreichen Signalen werden für diese Art der Synthese auch Rauschsignale verwendet. Diese

können mit verschiedenen Filtern auf bestimmte Frequenzanteile reduziert werden, was einen großen Spielraum an Flexibilität gewährt.

### 2.5.2 Amplituden- und Ringmodulation

Die nächsten Formen der Klangsynthese nutzen Modulation. Dies ist ein Prozess, welcher bereits lange vor Synthesizern in der Nachrichtenübertragung eingesetzt wurde. Dabei wird ein Trägersignal von einem modulierenden Signal, abhängig von der Zeit, beeinflusst.

Bevor man über Amplituden- und Ringmodulation sprechen kann, muss geklärt werden, was unipolare und bipolare Signale sind. Diese entscheiden darüber, welche Art von Modulation vorliegt [9, S. 225 f]. Bipolare Signale sind Signale, bei denen die Amplitude sowohl negative als auch positive Werte annehmen kann, siehe Abbildung 12. Die Werte eines unipolaren Signals hingegen sind auf eine Hälfte des Wertebereichs begrenzt. Sie besitzen daher alle das gleiche Vorzeichen, siehe Abbildung 13.

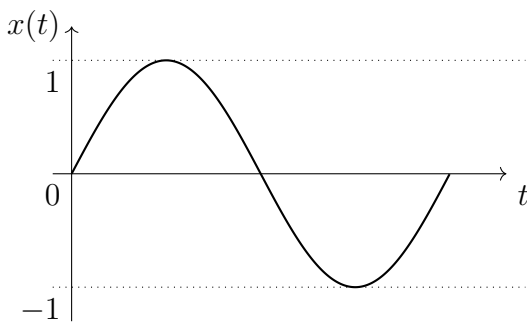


Abbildung 12: bipolares Signal

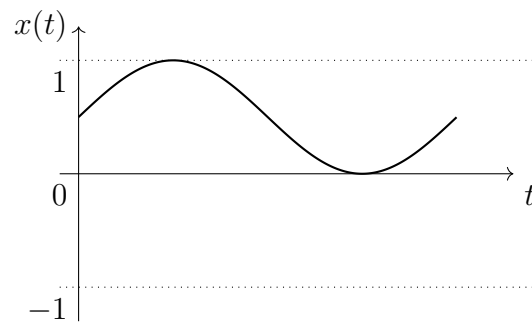


Abbildung 13: unipolares Signal

Mit dieser Information lässt sich zwischen Amplituden- und Ringmodulation differenzieren. Wie bereits erwähnt beschreibt der Vorgang der Modulation die Manipulation eines Signals durch ein zweites. Man spricht von einer Amplituden- oder Ringmodulation, wenn ein Trägersignal  $x_T(t)$  mit einem modulierenden Signal  $x_M(t)$  multipliziert wird

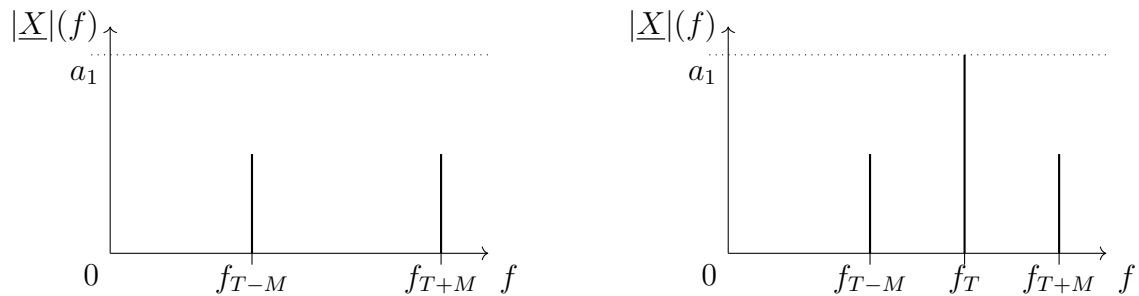
$$x(t) = x_T(t) \cdot x_M(t).$$

Es handelt sich um eine Amplitudenmodulation, wenn  $x_M(t)$  ein unipolares Signal ist. Eine Ringmodulation liegt vor, wenn beide Signale bipolar sind.

In der Musikproduktion werden meist Signale im Bereich des menschlich hörbaren Frequenzbereichs benutzt, siehe Abschnitt 2.3. Die Ausnahme bilden modulierende Signale welche von LFOs erzeugt werden, um zum Beispiel, wie in Abbildung 9 zu sehen, die Hüllkurve des Trägersignals zu verändern.

Nutzt man für die Amplituden- oder Ringmodulation modulierende Signale im hörbaren Bereich, entstehen komplexere Mischungen. Bei der Ringmodulation ist dies an den zwei Frequenzanteilen im Betragsspektrum zu erkennen, die durch die Modulation entstehen. Diese nennt man Seitenbänder [9, S. 226 ff]. Sie lassen sich durch die

Summe der Frequenzen von  $x_T(t)$  und  $x_M(t)$  und der Differenz von ihnen berechnen. Nimmt man an, dass die vorliegenden Signale einfache Sinusschwingungen der Form  $x_{\sin}(t) = \sin(2\pi ft)$  sind, und dabei  $x_T(t)$  eine Frequenz von  $f_T = 800$  Hz und  $x_M(t)$  eine Frequenz von  $f_M = 200$  Hz besitzt, dann liegen diese bei  $f_T + f_M = 1000$  Hz und  $f_T - f_M = 600$  Hz. Das dabei entstehende Betragsspektrum ist in Abbildung 14 zu sehen.



(a) Betragsspektrum einer Ringmodulation      (b) Betragsspektrum einer Amplitudenmodulation

Abbildung 14: Unterschied zwischen Amplituden- und Ringmodulation  
(Abbildung nachempfunden aus [9, S.228 ff])

### 2.5.3 Frequenz- und Phasenmodulation

Eine weitere Gruppe von Modulationsverfahren bilden die Winkelmodulationen, welche ebenfalls aus der Nachrichtenübertragung stammen. Zu den Winkelmodulationen zählen die Frequenzmodulation (FM) und Phasenmodulation (PM). Wie auch bei der Amplituden- und Ringmodulation ist es in der Nachrichtenübertragung üblich, ein Trägersignal im hörbaren Frequenzbereich auf ein modulierendes Signal im MHz- oder sogar GHz-Bereich zu modulieren. Dadurch ist es möglich, viele verschiedene Signale gleichzeitig zu übertragen, ohne dass sie sich überlagern.

Es dauerte jedoch nicht lange bis man feststellte, dass die Winkelmodulationen, mit zwei Signalen im menschlich wahrnehmbaren Spektrum, klanglich interessante Resultate liefern. So fanden sie schließlich ihren Weg in die digitale Musikproduktion. Maßgeblich verantwortlich dafür war John Chowning, der 1973 die digitale Frequenzmodulation entwickelte, welche schließlich die Grundlage des Yamaha DX7 Synthesizers bildete.

Als Signalgrundlage für die Frequenz- und Phasenmodulation werden häufig einfache Wellenformen verwendet, da die Ergebnisse der Modulationen deutlich obertonreicher und komplexer sind als die der Amplituden- und Ringmodulation. Aus diesem Grund nutzt man häufig reine Sinus- oder Cosinusschwingungen als Modulationsgrundlage. Im folgenden soll die Form des Signals jedoch allgemein gehalten werden.<sup>4</sup> Daher soll

<sup>4</sup>Die nachfolgend genutzte Notation folgt überwiegend [15, Casio-VZ-virtual-instrument, S.8 f]

das Trägersignal  $x_T(t)$  ein beliebiges, mit  $2\pi$  periodisches Signal  $w_T(t)$  sein, welches durch den Ausdruck:

$$x_T(t) = w_T(2\pi f_T t) \quad (3)$$

beschrieben werden kann.

Die beiden Winkelmodulationsverfahren hängen eng zusammen, jedoch ist es einfacher mit der Phasenmodulation zu beginnen. Diese ist im Vergleich zur Frequenzmodulation recht schnell beschrieben.

Bei der Phasenmodulation wird die Momentanphase des Trägersignals durch Addition mit einem modulierenden Signal zeitlich manipuliert.

$$x_{PM}(t) = w_T(2\pi f_T t + \phi(t)) \quad (4)$$

Die Momentanphase des Trägersignals entspricht  $2\pi f_T t$ , und kann durch die Funktion

$$p(t) = 2\pi f_T t \quad (5)$$

ausgedrückt werden. Nutzt man in Gleichung (4) als modulierendes Signal

$$\phi(t) = x_M(t) = 2\pi a_M x_M(2\pi f_M t), \quad (6)$$

wobei die Amplitude  $a_M$  die Modulationstiefe beeinflusst, erhält man also:

$$x_{PM}(t) = w_T(2\pi f_T t + 2\pi a_M w_M(2\pi f_M t)) \quad (7)$$

als Ergebnis der Phasenmodulation.

Die Frequenzmodulation unterscheidet sich nun in dem Punkt, dass sich die Frequenz zeitlich ändert. Dies führt dazu, dass neben der Momentanphase auch die Augenblicksfrequenz eingeführt werden muss. Da laut Definition die Frequenz proportional zur zeitlichen Ableitung der Phase ist, was in diesem Fall bedeutet, dass die Augenblicksfrequenz  $f_i(t)$  proportional zur zeitlichen Ableitung der momentanen Phase  $p(t)$  ist, gilt:

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} p(t) \quad (8)$$

Als Beispiel zur Veranschaulichung folgt für die Trägerfunktion, dass sich für die Augenblicksfrequenz

$$f_{i,T}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} [2\pi f_T t] = f_T \quad (9)$$

ergibt. Dies bedeutet, dass die Frequenz des Trägersignals konstant und nicht zeitabhängig ist. Schaut man sich außerdem noch an, wie die Augenblicksfrequenz der

Phasenmodulation aussieht, indem man (7) in (8) einsetzt,

$$f_{i,PM}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} [2\pi f_T t + 2\pi a_M w_M(2\pi f_M t)] = f_T + a_M \frac{d w_M(2\pi f_M t)}{dt}, \quad (10)$$

so ist zu erkennen, dass die Augenblicksfrequenz der Phasenmodulation die Trägerfrequenz plus die Modulationstiefe multipliziert mit der Ableitung der Momentanphase ist. Andersrum muss für ein frequenzmoduliertes Signal nun gelten, dass die Augenblicksfrequenz sich zeitlich ändert

$$f_{i,FM}(t) = f_T + f_M(t). \quad (11)$$

Nimmt man nun wieder ein modulierendes Signal der Form

$$f_M(t) = x_M(t) = a_M w_M(2\pi f_M t) \quad (12)$$

und setzt dies in (11) ein, so erhält man für die Augenblicksfrequenz der Frequenzmodulation den Term:

$$f_{i,FM}(t) = f_T + a_M w_M(2\pi f_M t). \quad (13)$$

Natürlich kann man nun auch die Momentanphase durch die Augenblicksfrequenz ausrechnen, indem man den Term (8) integriert. So ergibt sich für die Momentanphase ausgerechnet aus der Augenblicksfrequenz:

$$p(t) = 2\pi \int_0^t f_i(\tau) d\tau \quad (14)$$

Setzt man nun (13) in (14) ein, dann erhält man für die Momentanphase der Frequenzmodulation:

$$p_{FM}(t) = 2\pi f_T t + 2\pi a_M \int_0^t w_M(2\pi f_M \tau) d\tau, \quad (15)$$

So ergibt sich letztendlich für den frequenzmodulierten Träger:

$$x_{FM}(t) = w_T \left( 2\pi f_T t + 2\pi a_M \int_0^t w_M(2\pi f_M \tau) d\tau \right) \quad (16)$$

Abschließend lässt sich einfach zeigen, warum sich die beiden Winkelmodulationsverfahren so ähnlich sind. Dafür betrachtet man die finalen Ergebnisse beider Modulationsverfahren nebeneinander, Term (7) und (16), und lässt  $w_{\{T,M\}}$  jeweils Sinus oder Cosinusfunktionen werden. Es ist zu erkennen, dass die resultierenden Gleichungen sich darin unterscheiden, dass sie eine Phasenverschiebung von  $\frac{\pi}{2}$  voneinander besitzen. Dies gilt natürlich nicht zwingend auch für anderweitige Funktionen.

## 2.6 Casio VZ-Synthesizer

### 2.6.1 Kurzbeschreibung

Gegenstand der folgenden Untersuchungen soll der VZ-10M von Casio sein. Dieser digitale Synthesizer erschien 1988 und gehört zur Reihe der VZ-Synthesizer, welche den VZ-1, VZ-10M und VZ-8M umfasst [10]. Sie alle sind mit der von Casio entwickelten iPD (interactive Phase Distortion) Klangsynthese ausgestattet. Diese kann als Weiterentwicklung der Klangsynthese aus der 1985 erschienenen CZ-Reihe betrachtet werden. Der VZ-1 stellt dabei das Aushängeschild der Reihe dar. Er umfasst Synthesizer und Keyboard, was ihn zu einem voll funktionsfähigen, eigenständig spielbaren Instrument macht. Im Gegensatz dazu besteht der VZ-10M ausschließlich aus dem programmierbaren Synthesizer. Seine Bauform entspricht dem 13-Zoll-Rack-Standard, weshalb bei diesem kein Keyboard verbaut wurde. Der VZ-8M stellt eine noch kompaktere Variante dar, welche jedoch in ihrer Funktionalität gegenüber dem VZ-1 und VZ-10M eingeschränkt ist. Aus diesem Grund wird er in dieser Arbeit auch nicht weiter betrachtet. Wie bereits in Abschnitt 1 angeschnitten, ist Casios VZ-Reihe für ihre verwendete Phasenmodulation bekannt. Während Yamaha 1983 mit dem DX7 erstmalig erfolgreich Frequenzmodulation vermarkten konnte und sich diese auch patentieren ließ, war Casio gezwungen, andere Klangsynthesen zu entwickeln. Die Verwendung von Phasenmodulation war ihre geschickte Antwort auf die Frequenzmodulation des DX7. Neben der Phasenmodulation ist die Reihe außerdem für ihre Alias-Artefakte bekannt, die vor allem der zu dieser Zeit schwachen Rechenleistung geschuldet sind.

Die VZ-1- und VZ-10M-Modelle, siehe Abbildung 32 (Anhang B.1), sind dabei mit 8 Oszillatoren ausgestattet, die bei einer Klangeinstellung (im Englischen patch) simultan angeschaltet sein können. Diese 8 Oszillatoren werden in vier Zweiergruppen eingeteilt:  $A = \{M_1, M_2\}$ ,  $B = \{M_3, M_4\}$ ,  $C = \{M_5, M_6\}$  und  $D = \{M_7, M_8\}$ . Die Oszillatoren einer Gruppe können entweder eine Mischung, Ringmodulation oder Phasenmodulation der von ihnen generierten Signale erzeugen. Ihnen zugrunde liegen die Wellenformen SINE, SAW1, SAW2, SAW3, SAW4, SAW5, NOISE1 und NOISE2. Die Synthesizer bieten recht umfangreiche Einstellungsmöglichkeiten für die Manipulation der Hüllkurve des Signals. Für die Modulation stehen außerdem zwei LFOs zur Verfügung, die für Vibrato und Tremolo sorgen.

Ein weiteres Merkmal stellt das Display dar, über das alle Einstellungen angezeigt werden können. Manche Einstellungen geben sogar grafisches Feedback bei der Veränderung von Parametern. Umfangreichere Effekt-Modulationen, wie zum Beispiel Hall oder Chorus, besitzt das Instrument jedoch nicht.

Im folgenden soll sich bei Verwendung des Begriffs „VZ-Reihe“ auf die Modelle des VZ-1 und VZ-10M bezogen werden.

### 2.6.2 Phasenmodulation

Die Phasenmodulation der VZ-Reihe ist über Menü 1, 00: LINE zu erreichen, und kann sowohl intern als auch extern verwendet werden.

Bei interner Phasenmodulation manipuliert die erste Stimme einer Gruppe die Phase der zweiten Stimme und wird selbst nicht direkt ausgegeben. Im Nutzerhandbuch des VZ-10M [3] wird die Phasenmodulation sinngemäß übersetzt wie folgt beschrieben:

„Die zwei Wellenformen in LINE A (M1 und M2) können auch über PHASE ausgegeben werden, nach dem folgenden Schema:

PHASE: M2(M1)

In diesem Format kann nur einer der Oszillatoren gehört werden, während der andere diesen moduliert. In diesem Fall wird M2 generiert, indem M1 genutzt wird, um die Phase der M2 Wellenform auszulesen.“

Bei externer Phasenmodulation wird das Signal der vorangehenden Gruppe zur Modulation der Phase der zweiten Stimme der folgenden Gruppe verwendet, als Beispiel siehe Abbildung 15. Auch hier gibt es im Handbuch eine kurze Beschreibung:

„Wenn das EXTERNAL PHASE Format ausgewählt ist, wird der LINE Ausgang der zwei Module (M1 und M2 in unserem Beispiel) als Phase des zweiten Moduls der darauffolgenden internen LINE verwendet, M4 in LINE B in unserem Beispiel.“

Dies bedeutet, dass man beispielsweise in der Lage ist, die Phase von Stimme 8 durch alle vorangehenden Stimmen zu modulieren.

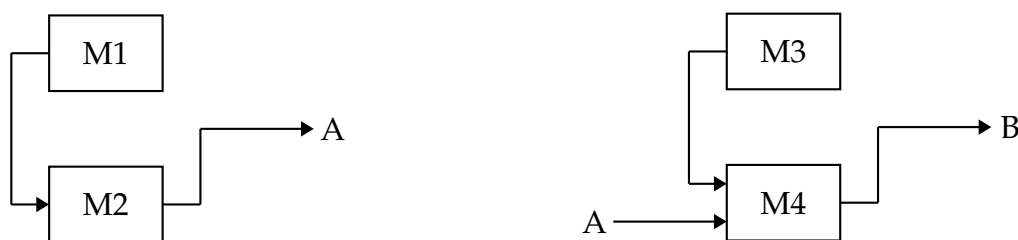


Abbildung 15: Signalfluss der Oszillatoren bei interner (links) und externer (rechts) Phasenmodulation, nach Vorlage von [2, S 13]

## 3 Experimenteller Teil

Ziel des experimentellen Teils ist es, eine angemessene Analyse der Klangerzeugung der VZ-Reihe anzufertigen. Dies bezieht sich vor allem auf das Erfassen der Wellenformen und der Phasenmodulation, die zur Synthese auf die Wellenformen zugreift. Im folgenden Abschnitt beschreibe ich meine Vorgehensweise und alle Utensilien, die ich verwendet habe, um das Instrument zu analysieren. Dazu gehören der mir vorliegende Versuchsaufbau, die Messungen, die unter Verwendung dieses Aufbaus entstanden sind, und die dadurch erhaltenen Ergebnisse.

### 3.1 Versuchsaufbau

Für die folgenden Untersuchungen stand ein physisches Exemplar des VZ-10M-Synthesizers zur Verfügung.<sup>5</sup> Dieses soll repräsentativ für die Klangerzeugung der VZ-Reihe dienen, da sich der VZ-1 und VZ-10M desselben Synthesialgorithmus bedienen.

Für den folgenden Versuchsaufbau habe ich versucht, möglichst wenige Komponenten zu verwenden. Dies soll zum einen Fehlerquellen vermeiden, die sich durch verschiedenste Hardware einschleichen können (siehe Anhang A.1), und zum anderen die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit verbessern.

#### 3.1.1 Aufbau

Im Zentrum des Versuchsaufbaus steht der VZ-10M-Synthesizer von Casio. Eine erste wichtige Beobachtung ist, dass dieses Modell der VZ-Reihe kein Keyboard besitzt. Aus diesem Grund muss das Gerät über seinen MIDI-Anschluss angesteuert werden, um Töne erzeugen zu können. Dazu verwende ich das Alesis V Mini-Keyboard [7], welches über eine USB-Schnittstelle verfügt. Dieses kann daher nicht direkt an den Synthesizer angeschlossen werden, sondern muss mit einem Computer verbunden werden. Auf diesem läuft eine Software, die MIDI-Informationen ausgeben kann. Hierfür nutzte ich Reaktor 6.<sup>6</sup> Der Computer wird anschließend mit dem Focusrite Scarlett 8i6 1st Gen-Audiointerface [5] über seine USB-2.0-Schnittstelle verbunden. Von diesem aus gelangt das Signal von der MIDI OUT-Schnittstelle des Interfaces zur MIDI IN-Schnittstelle des Synthesizers, siehe Abbildung 16.

---

<sup>5</sup>Das Modell wurde gebraucht erworben und war nach dem Versand nicht direkt funktionstüchtig. Es gab ein Problem mit dem Netzteil, das nicht für die 230-Volt-Netzspannung im deutschen Raum ausgelegt war. Nachdem dieses ausgetauscht wurde, hat das Gerät jedoch wieder einwandfrei funktioniert. An dieser Stelle vielen Dank an Herrn Richter.

<sup>6</sup>Grundsätzlich hätte man sich den Signalweg über Reaktor sparen können, indem man ein MIDI-kompatibles Keyboard verwendet. Jedoch war das Keyboard von Alesis bereits vorhanden, und somit musste kein neues Gerät angeschafft werden. Letztendlich spielt es keine Rolle, ob man den Synthesizer durch ein MIDI-kompatibles Keyboard oder per Software steuert, da dort jegliche Tonhöhen- und Anschlagsdynamiken auf einen festen Wert gesetzt werden.

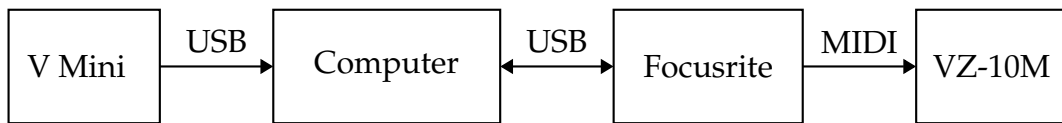


Abbildung 16: Signalfluss zur Steuerung des VZ-10M

Als nächstes werden die vom Synthesizer erzeugten Signale abgegriffen. Dazu werden die Line-Ausgänge des VZ-10M mit den Eingängen des Oszilloskops verbunden. LINE OUT 1 ist dabei an den Kanal 1 des Oszilloskops angeschlossen und LINE OUT 2 an den Kanal 2. Das verwendete Oszilloskop ist ein LeCroy WaveRunner 604Zi [12]. Zuletzt erfolgt, bevor das Signal in das Oszilloskop gelangt, eine Abzweigung über einen Adapter zum Focusrite Scarlett 8i6, siehe Abbildung 18. Dabei wird das Signal von LINE OUT 1 mit dem Kanal 1 des Focusrite verbunden und das Signal von LINE OUT 2 mit dem Kanal 2, siehe Abbildung 17. Dies ermöglicht es, das Signal auf dem Computer aufzuzeichnen. Abbildung 18 zeigt den gesamten Aufbau.

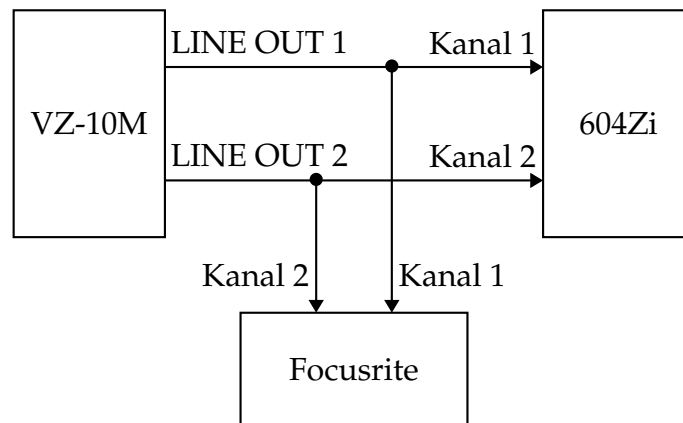


Abbildung 17: Signalfluss der Ausgänge vom VZ-10M

Für weitere detaillierte Informationen über die jeweiligen Bauteile, Einstellungen und Softwareversionen siehe Anhang A. Dort sind außerdem die verwendeten Aufnahmemethoden beschrieben.

### 3.1.2 Vorgehensweise

Die Funktionsweise des VZ-10M wird leider nur sehr oberflächlich im Nutzerhandbuch [2] beschrieben. Zusätzlich konnten, selbst nach ausführlicher Recherche, keine weiterführenden Unterlagen gefunden werden. Daher ist es notwendig, die Klangerzeugung des VZ-10M von Grund auf zu analysieren. Zu diesem Zweck sollen Messungen durchgeführt und Hypothesen über seine Funktionalität aufgestellt werden.

Um Messungen durchführen zu können, müssen die Stimmen des Synthesizers konfiguriert werden, sprich der Klang muss eingestellt werden. Dafür wird ein neuer Patch



Abbildung 18: Versuchsaufbau

angelegt, in dem die Einstellungen der verwendeten Tongeneratoren und deren Modulation festgelegt werden.

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei dem Gerät um ein gebrauchtes Modell. Deswegen ist es sinnvoll, dieses vor dem Erstellen des ersten Patches auf seine Werkseinstellungen zurückzusetzen.<sup>7</sup> Die Werkseinstellungen erhält man, indem man den Anweisungen im VZ-10M-Handbuch [2, S. 90] folgt.

Ein Patch soll die aufgelisteten Kriterien erfüllen:

1. Der Patch soll möglichst neutrale Anschlagsdynamiken besitzen, sprich: seine Amplitudenhüllkurve (*amplitude envelope*, AMP ENV) soll etwa der eines Rechtecks entsprechen. Dies soll dafür sorgen, dass das Signal bei Tastendruck sofort auf seine maximale Amplitude springt, solange auf dieser bleibt, solange die Taste gedrückt wird, und sofort wieder auf 0 zurückspringt, wenn die Taste losgelassen wird.
2. Der Patch soll unabhängig von der Noteneingabe eine feste, vorher definierte Note spielen. Dies soll dafür sorgen, dass nicht versehentlich unterschiedliche Noten bei der Messung angeschlagen werden. Außerdem stellt dies sicher, dass die Eingabe unabhängig vom angeschlossenen Steuerelement erfolgt.
3. Der Patch soll nur die notwendige Anzahl an Oszillatoren verwenden. Diese hängt vom jeweiligen Einsatzzweck ab. Für die reine Messung der grundlegenden

<sup>7</sup>Dies soll verhindern, dass der Vorbesitzer Einstellungen verändert hat, die kritisch für neutrale Messungen sein könnten. Außerdem wird so eine nachvollziehbare Grundlage geschaffen. Das angestrebte Verhalten ist, dass das Gerät unabhängig vom Nutzer und vom Standort immer die gleichen Ergebnisse liefert.

Wellenformen des Synthesizers ist zum Beispiel nur ein Tongenerator notwendig (M1). Die restlichen sieben sind zu diesem Zeitpunkt auszuschalten.

4. Der Patch soll keine Effekte enthalten. Dies betrifft sowohl die Tonhöhenhüllkurve (*pitch envelope*, PITCH ENV) als auch durch LFO manipulierte Parameter wie Frequenz und Lautstärke, respektive VIBRATO und TREMOLO.

Nach dem Initialisieren eines Patches erfüllen bereits viele Einstellungen die gewünschten Kriterien. Die folgenden Parameter müssen nun noch angepasst werden und bilden die Grundeinstellungen für alle Messungen:

Tabelle 1: Grundeinstellungen des VZ-10M

Menü, Seite	Parameter	Wert
1, 00: LINE	INT LINE	MIX
1, 01: WAVE FORM	FORM	*WF
1, 02: DETUNE	PITCH FIX	ON
	OCT	01
	NOTE	00
	FINE	09
1, 09: AMP ENV	S1 RATE	99
	S1 LEV	99
	S1	SS
	S2 RATE	99
	S2 LEV	00
	S2	ED
1, 10: ENV DEPTH	ENV DEPTH	99
2, 01: PORTM/SOLO	SOLO	ON
3, 00: TUNE/TRANSP	TUNE (A4)	440.0

\*WF  $\in \{SINE, SAW1, SAW2, SAW3, SAW4, SAW5\}$

Für die Analyse sollen nur die Wellenformen SINE, SAW1, SAW2, SAW3, SAW4 und SAW5 betrachtet werden. NOISE1 und NOISE2 sind in diesem Kontext nicht relevant, da es sich um Rauschsignale handelt, die keine brauchbaren Ergebnisse für die Phasenmodulation liefern würden.

Die Einstellungen im Menüpunkt DETUNE sorgen dafür, dass bei jedem Tastenanschlag eine feste Note gespielt wird, die die Grundfrequenz  $f_0$  festlegt. Diese sollte sich am unteren Ende des menschlich wahrnehmbaren Frequenzbereichs befinden, um Verzerrungen durch interne Filterung nahe der Nyquist-Frequenz zu vermeiden. Außerdem verändern sich die Wellenformen bei zunehmender Tonhöhe, was die tatsächlichen Wellenformen verfälschen könnte (siehe Abschnitt 3.3 für weitere Details). Für die Wahl der Grundfrequenz folge ich hier der Empfehlung von Matthias Wolff [15], der bereits umfassende Aufzeichnungen zum VZ-1 angefertigt hat. Eine zu niedrige Grundfre-

quenz wäre auch nicht repräsentativ für die menschliche Wahrnehmung. In seinen Versuchen verwendet er eine Abtastfrequenz von 48 kHz und eine Periodenlänge von 1024 Abtastwerten. Es ergibt sich eine Grundfrequenz von

$$f_0 = \frac{f_A}{K} = \frac{48000 \text{ Hz}}{1024} = 46,875 \text{ Hz},$$

welche der Note F#1 + 23 ct entspricht. Diese liegt damit am unteren Ende des wahrnehmbaren Frequenzspektrums und erfüllt somit die Bedingungen.

Der Parameter ENV DEPTH beeinflusst die Modulationstiefe der Phasenmodulation.

Die Einstellung SOLO im Menüpunkt PORTM/SOLO sorgt für ein konstantes Verhalten der Wellenformen. Der Synthesizer scheint nämlich mehr als eine Variante pro jeweiliger Wellenformen zu besitzen, dazu ebenfalls in Abschnitt 3.3 mehr.

### 3.1.3 Anmerkungen

Das Ziel der Arbeit ist es, die Phasenmodulationssynthese des VZ-10M-Synthesizers zu untersuchen und Hypothesen zur Funktionsweise dieser aufzustellen. Dafür ist es notwendig, eine Darstellung der Signale zu wählen, bei der die Eigenschaften zweier Signale miteinander vergleichbar sind. Dafür bietet sich der Zeitbereich an. Wenn zwei Signale im Zeitbereich übereinstimmen, dann klingen sie gleich.

Einige spezifische Eigenschaften von Signalen sind nur im Betragsspektrum erkennbar. An geeigneten Stellen soll diese Darstellung dann Aufschluss über die Wahrnehmung des Klangs bieten. Wenn zwei Signale in ihren Betragsspektren übereinstimmen, werden sie auch klanglich als gleich wahrgenommen, selbst wenn sie im Zeitbereich nicht übereinstimmen.

Aufgrund der fehlenden Beschreibung zur internen Funktionalität des Geräts sollen zu Beginn die grundlegenden Wellenformen aufgezeichnet werden. Durch einige vorangegangene Experimente ist jedoch bereits ersichtlich, dass diese sich unregelmäßig verhalten. Dies könnte im schlimmsten Fall bedeuten, dass jeder erzeugbare Klang gemessen werden muss, um eine angemessene Hypothese über das Verhalten des Geräts aufzustellen.

Für eine hundertprozentige Abdeckung aller erzeugbaren Klänge müsste man nun anfangen, für jede Wellenform jeden möglichen Ton aufzuzeichnen. Das bedeutet, dass allein für eine Wellenform  $63 \text{ FINE} \cdot 12 \text{ NOTE} \cdot 11 \text{ OCT} = 8316$  verschiedene Messungen angestellt werden müssten.

Als nächstes würde die Phasenmodulation folgen, bei der die Modulationstiefe eingestellt werden muss. Diese kann einen natürlichen Wert von 0 bis 99 annehmen. Es wird recht schnell klar, dass eine hundertprozentige Abdeckung nicht möglich ist oder zumindest mit großem Aufwand verbunden wäre. Dieses Ziel wird nicht angestrebt. Entsprechend dem Umfang der Arbeit müssen daher an dieser Stelle Einschränkungen

festgelegt werden.

1. Die grundlegenden Wellenformen sollen gemessen werden. Dazu soll der Vorgehensweise in Abschnitt 3.1.2 gefolgt werden.
2. Das Verhalten der Wellenform *SAW5* in Abhängigkeit von der Tonhöhe soll beispielhaft untersucht werden.
3. Die Phasenmodulation soll untersucht werden. Die Modulation, bei der sowohl das Trägersignal als auch das modulierende Signal die *SINE*-Wellenform verwenden, wird priorisiert. Alle weiteren Kombinationen von Träger- und modulierenden Signalen werden entsprechend dem Umfang der Arbeit ausgewählt.
4. Für die Phasenmodulation soll die Modulationstiefe *ENV DEPTH* in regelmäßigen und repräsentativen Abständen gemessen werden.

Zum Abschluss möchte ich noch einmal auf die Art der Messungen hinweisen. Obwohl die Klangerzeugung des Synthesizers digital erfolgt, wird das Signal letztendlich über einen analogen Ausgang ausgegeben. Die VZ-Reihe besitzt keine digitalen Ausgänge. Daher durchläuft das Signal nach der Synthese im Synthesizer mindestens eine analoge Schaltung: einmal zur Filterung des Signals zur Unterdrückung einer Gleichspannung und eine weitere zur Verstärkung auf einen genormten Pegel, siehe Abbildung 19.<sup>8</sup> Wie genau die Verschaltung im Inneren des Synthesizers aussieht ist ungewiss. Sicher ist nur, dass die besagten Komponenten einen Einfluss auf das Resultat haben, da die Frequenz- und Phasengänge der Bauelemente höchstwahrscheinlich nicht linear sind.

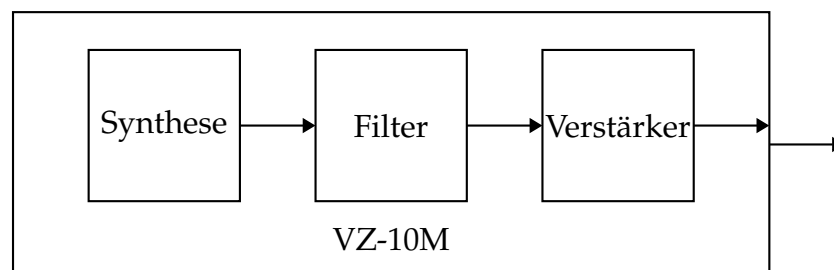


Abbildung 19: möglicher Signalfluss innerhalb des VZ-10M

<sup>8</sup>Im analogen Audiosektor werden häufig die Einheiten *dBu* (*Dezibell units*, *dBu*) und *dBV* (*Dezibell voltage*, *dBV*) verwendet. Dabei sind  $0 \text{ dBu} = 0,775 \text{ V}$  und  $0 \text{ dBV} = 1 \text{ V}$  als Referenzwerte. Typischerweise benutzt man einen Pegel von entweder  $+4 \text{ dBu} = 1,228 \text{ V}$  für professionelle Ton- und Beschallungstechnik und  $-10 \text{ dBV} = 0,3162 \text{ V}$  für Konsumentenelektronik [6].

## 3.2 Messungen und Protokolle

### 3.2.1 Wellenformen

#### Grundlegende Wellenformen

Diese erhält man, indem man den Einstellungen aus Tabelle 1 folgt. In Abbildung 20 werden die gemessenen, grundlegenden Wellenformen dargestellt.

#### Betrachtung der Tonhöhen

Diese Messungen zeigen die Wellenformen bei steigender Tonhöhe und sollen Aufschluss über das Verhalten der Wellenformen über der gespielten Grundfrequenz geben. Aufgrund des Umfangs der Arbeit wurde hier nur die am stärksten ausgeprägte Wellenform, SAW5, gemessen.

Es wurden sowohl eine Oktave detailliert betrachtet, indem alle Halbtöne einer Oktave aufgezeichnet wurden, als auch die Töne in aufsteigenden Oktaven. Dafür wurden folgende Einstellungen verwendet:

Tabelle 2: Einstellungen für Messungen zur Tonhöhe, wenn aufeinanderfolgende Töne einen Halbton voneinander entfernt sind

Menü, Seite	Parameter	Wert
1, 01: WAVE FORM	FORM	SAW5
1, 02: DETUNE	NOTE	* <i>note</i>

\**note* = {00; 01; 02; 03; 04; 05; 06; 07; 08; 09; 10; 11}

Tabelle 3: Einstellungen für Messungen zur Tonhöhe, wenn aufeinanderfolgende Töne eine Oktave voneinander entfernt sind

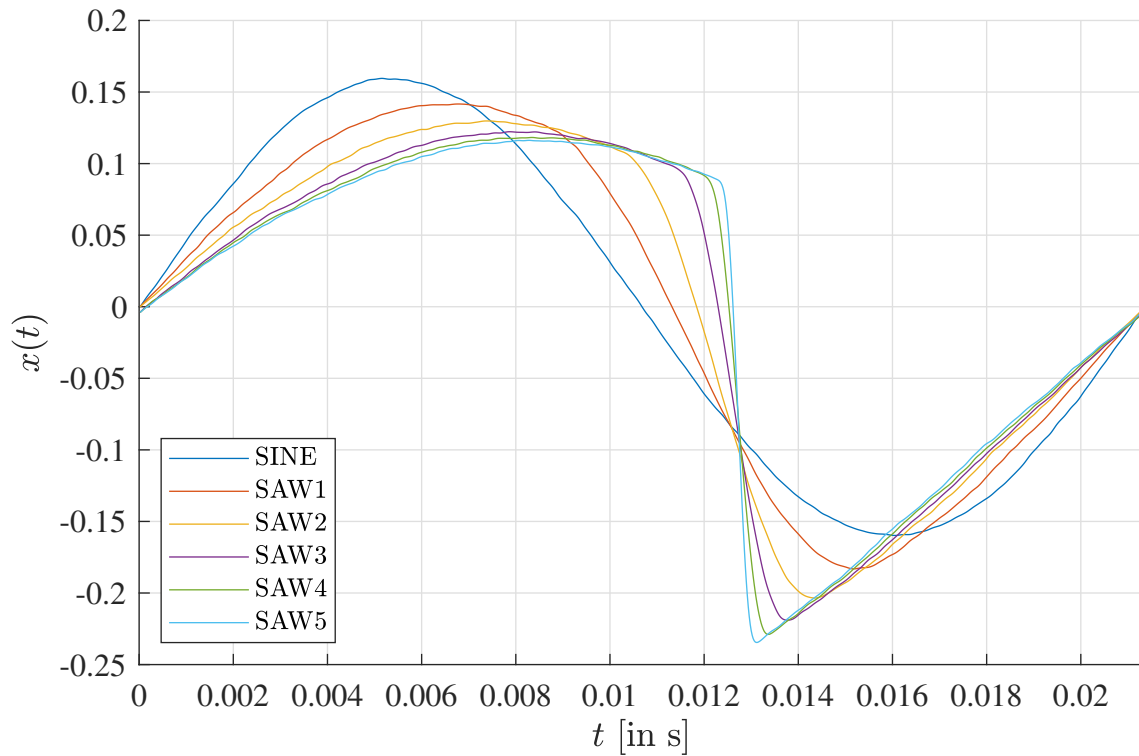
Menü, Seite	Parameter	Wert
1, 01: WAVE FORM	FORM	SAW5
1, 02: DETUNE	OCT	{01; 02; 03; 04; 05}

Die Abbildungen 40 und 41 (Anhang B.2) zeigen das Verhalten der Wellenformen bei Änderungen der Tonhöhe.

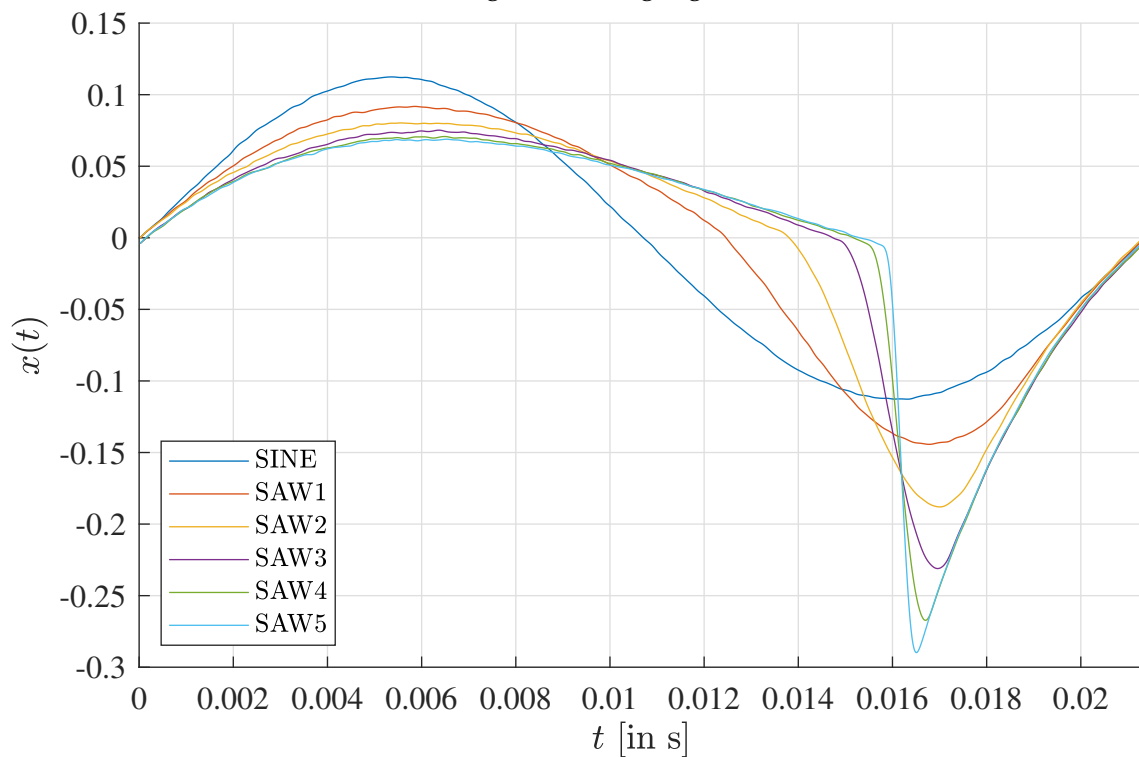
Die Wellenformen SAW1, SAW2, SAW3 und SAW4 verhalten sich ähnlich wie die Wellenform SAW5. Je schwächer die Wellenform ausgeprägt ist, desto geringer werden die Kürzungen.

### 3.2.2 Phasenmodulation

Die Funktionsweise der Phasenmodulation angemessen zu erfassen, gestaltet sich etwas schwieriger. Aufgrund der Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten zwischen Träger-



(a) Messungen am Ausgang LINE OUT 1



(b) Messungen am Ausgang LINE OUT 2

Abbildung 20: Grundlegende Wellenformen des VZ-10M

und modulierenden Signalen, internen und externen Modulationen des Geräts sowie der jeweiligen Modulationstiefe, müssen an dieser Stelle Einschränkungen vorgenommen werden.

Zur Erinnerung der Funktionsweise der Phasenmodulation:

$$x_{PM}(t) = w_T(2\pi f_T t + 2\pi a_{M\mu} \cdot w_M(2\pi f_M t))$$

Das Ergebnis der Phasenmodulation ist abhängig von den verwendeten Wellenformen  $w$ . Besitzen diese schnelle Amplitudenänderungen, wird das Ergebnis schwerer zu interpretieren. Deshalb eignen sich einfache Wellenformen für die Modulation. Aus diesem Grund soll immer mindestens eines der Signale eine Sinuswelle sein. Das Ergebnis der Modulation ist am besten zu erkennen, wenn sowohl das Trägersignal  $x_T(t)$  als auch das modulierende Signal  $x_M(t)$  eine Sinuswelle sind.

Die betrachteten Modulationstiefen  $Env\ Depth$ , im Folgenden durch  $ED$  abgekürzt, sollen sein:  $*ED \in \{00, 20, 40, 59, 79, 99\}$ . Sie sind aus [15, Casio-VZ-virtual-instrument] übernommen, da sie einen ausreichend großen Abstand bieten, um eindeutige Änderungen der Modulation erkennen zu können.

In den folgenden Abschnitte wird der Schreibweise des Handbuches (Abschnitt 2.6.2) gefolgt. Dabei wird die interne Phasenmodulation durch M2 (M1) ausgedrückt, wobei M2 das Trägersignal und M1 das modulierende Signal darstellt. Dies gilt auch für die externe Phasenmodulation, die durch M4 (M1) beschrieben wird.

Folgende Einstellungen wurden verwendet:

Tabelle 4: Einstellungen für Messungen zur internen Phasenmodulation M2 (M1)

Stimme	Menü, Seite	Parameter	Wert
M1, M2	1, 00: LINE	INT LINE	PHASE
M1	1, 01: WAVE FORM	FORM	*WF/SINE
M1	1, 10: ENV DEPTH	ENV DEPTH	*ED
M2	1, 01: WAVE FORM	FORM	SINE/*WF

Tabelle 5: Einstellungen für Messungen zur externen Phasenmodulation M4 (M1)

Stimme	Menü, Seite	Parameter	Wert
M1	1, 00: LINE	INT LINE	MIX
M4	1, 00: LINE	INT LINE EXT PHASE	MIX ON
M1	1, 01: WAVE FORM	FORM	*WF/SINE
M1	1, 10: ENV DEPTH	ENV DEPTH	*ED
M4	1, 01: WAVE FORM	FORM	SINE/*WF

\*WF  $\in \{SAW1, SAW3, SAW5\}$

Eine Auswahl von Messungen der hier aufgelisteten Einstellungen ist in Abbildung 42

Tabelle 6: erfasste Werte zur Messung der Phasenmodulation

<i>WF/ED</i>	0	20	40	59	79	99
SINE (SINE)	X	X	X	X	X	X
SINE (SAW1)	X	X	X	X	X	X
SAW1 (SINE)	X	X	X	X	X	X
SINE (SAW2)						
SAW2 (SINE)						
SINE (SAW3)	X	X	X	X	X	X
SAW3 (SINE)	X	X	X	X	X	X
SINE (SAW4)						
SAW4 (SINE)						
SINE (SAW5)	X	X	X	X	X	X
SAW5 (SINE)	X	X	X	X	X	X

und 43 zu sehen (Anhang B.2). Alle Aufzeichnungen sind im digitalen Anhang in den MATLAB-Dateien zu finden.

Aus den Messungen zu den Wellenformen geht hervor, dass es zwei verschiedene Versionen der jeweiligen Wellenform gibt. Betrachtet werden soll nur die am Ausgang `LINE OUT 1` vorliegende Wellenform, eine Begründung folgt in Abschnitt 3.3.

### 3.3 Interpretation der Messergebnisse

Der Messprozess hat sich als umfangreicher erwiesen als ursprünglich angenommen. Dies liegt daran, dass die Funktionsweise der VZ-Reihe komplexer ist, als abzusehen war. Die Gründe dafür sind die folgenden:

#### Wellenformen

Die grundlegenden Wellenformen des VZ-10M sind in zwei verschiedene Versionen eingeteilt. Die 5 unterschiedlichen SAW-Wellenformen besitzen jeweils zwei eindeutig unterscheidbare Signalverläufe im Zeitbereich, während die Versionen der SINE-Wellenform unterschiedliche Amplituden besitzen. Dies ist vor allem in den Abbildungen 34 bis 39 (Anhang B.2) zu sehen.

Nach mehreren Tests ist anzunehmen, dass nach 8 aufeinanderfolgenden Tastenanschlägen die abgespielte Version einer Wellenform wechselt. Dabei wird eine Version der Wellenform über den Ausgang `LINE OUT 1` ausgegeben und die andere über den Ausgang `LINE OUT 2`. Nach 8 Tastenanschlägen tauschen diese die Kanäle, sodass Version 1 über den Ausgang `LINE OUT 2` und Version 2 über den Ausgang `LINE OUT 1` ausgegeben wird. Dieses Verhalten scheint stabil zu sein, sodass das Gerät nach einem Neustart und der Initialisierung eines Patches jeweils die entsprechende Version der

Wellenform an einem bestimmten Ausgang ausgibt.

Trotz der unterschiedlichen Signalverläufe wurden die Wellenformen nicht zufällig gewählt. In den Abbildungen 34 bis 39 sind die jeweiligen Betragsspektren der Wellenformen dargestellt. Es ist leicht zu erkennen, dass sie nahezu genau übereinstimmen. Dadurch sind sie perzeptiv, zumindest für den Menschen, nicht unterscheidbar. Dies ermöglicht auch einen Stereo-Effekt: Wenn eine der Wellenformen über den rechten Kanal und die andere über den linken Kanal ausgegeben wird, entsteht ein räumlicher Klang. Möglicherweise erklärt dies auch, warum die Wellenformen nach 8 Tastenanschlägen die Kanäle wechseln. Unterschiede im Signalverlauf könnten den Klang aus unterschiedlichen Richtungen kommen lassen.

Aus diesem Grund habe ich für diese Arbeit festgelegt, dass Version 1, die Wellenform die nach Initialisierung am Ausgang `LINE OUT 1` vorliegt, siehe Abbildung 20a, als die standardmäßige Wellenform für die Phasenmodulation zu betrachten ist.

### Betrachtung der Tonhöhen

Die grundlegenden Wellenformen verkürzen sich mit zunehmender Tonhöhe. Dies lässt sich besonders in den Abbildungen 41a und 41b (Anhang B.2) erkennen. Es fällt auf, dass die Wellenformen trotz der Skalierung der Endpunkte auf einen gemeinsamen Punkt nicht übereinander liegen.

In der digitalen Audioverarbeitung kann die Tonhöhe durch die Abspielgeschwindigkeit des Audiomaterials manipuliert werden. Wenn man die Abspielgeschwindigkeit verdoppelt, verdoppelt sich die Grundfrequenz. Dies lässt sich erreichen, indem man jeden zweiten Abtastwert löscht.<sup>9</sup> In diesem Fall sollten die Extrempunkte der Signale, wenn die Wellenform auf die doppelte Länge skaliert wird, wieder übereinander liegen. Bei den Messungen zeigt sich jedoch, dass dies nicht der Fall ist. Die Wellenformen verkürzen sich mit zunehmender Tonhöhe. Bei der Wellenform `SAW5` wird die steigende Flanke immer kürzer, bis sie bei sehr hohen Tönen fast einer Sinuswelle gleicht, wodurch sich auch der Klang des Signals verändert.

Ähnlich zu diesem Verhalten wird die fallende Flanke der Wellenformen mit zunehmender Tonhöhe immer mehr gerundet. Dieses Verhalten könnte auf das interne Tiefpassfilter zurückzuführen sein, das durch die Nyquist-Frequenz begrenzt ist.

### Phasenmodulation

- Die Messungen der internen und externen Phasenmodulation zeigen unterschiedliche Ergebnisse, siehe Beispiele Abbildung 42 und 43, zu finden im Anhang B.2. Daraus lässt sich schließen, dass verschiedene Synthesealgorithmen verwendet

<sup>9</sup>Liegen genug Abtastwerte vor, und wird das Abtasttheorem eingehalten, kann der Mensch klanglich keinen Unterschied feststellen.

werden. Vermutlich wurde die interne Phasenmodulation aufgrund der wenigen manipulierbaren Parameter auf dem Gerät gespeichert. Dadurch muss sie nicht live berechnet werden und benötigt weniger Ressourcen. Bei der externen Phasenmodulation ist dies jedoch unwahrscheinlich, da sie alle Parameter der vorangehenden Gruppe an Oszillatoren kennen müsste. Dies würde einen erheblichen Speicheraufwand erfordern, insbesondere zur damaligen Zeit.

- Beim Verändern der Tonhöhe von M1 bei interner Phasenmodulation verändert sich das Ergebnis der Modulation nicht. Diese scheint gesperrt zu sein und ist nicht mehr kontrollierbar. Es gilt:  $f_{M1} = f_{M2}$ .
- Die interne Phasenmodulation, bei der als modulierendes Signal eine der SAW-Wellenformen verwendet wird, siehe Beispiel M2 (M1) = SINE (SAW5) in Abbildung 43, verhält sich nicht wie zu erwarten wäre. Bei einer Modulationstiefe von  $ED = 00$  ist nicht das Trägersignal, sondern das modulierende Signal zu erkennen. Nach der Formel:

$$x_{PM}(t) = \sin(2\pi f_0 t + 0 \cdot (2\pi \cdot w_{SAW5}(2\pi f_0 t + \phi))) = \sin(2\pi f_0 t)$$

sollte jedoch eine reine Sinuswelle entstehen.

- Besonders interessant ist die Modulation von M2 (M1) und M4 (M1), bei der sowohl M2, als auch M4 die Wellenform SAW5 annehmen. Bei einer Modulationstiefe von  $ED = 00$  sollten wieder die SAW5-Wellenformen zu erkennen sein. Dies ist in der Abbildung 46 (Anhang B.2) nicht der Fall. Die entstandenen Wellenformen ähneln der SAW5-Wellenform, besitzen jedoch deutliche Abweichungen in den Signalverläufen.

Im Betragsspektrum ist zu erkennen, dass die neue Wellenform ähnliche Frequenzanteile wie die originale Wellenform besitzt, mit dem Unterschied, dass alle geraden Frequenzanteile, also  $2n \cdot f_0$  mit  $n \in \mathbb{Z}$ , zu 0 werden. Demnach entsteht ein nahezu symmetrischer Verlauf des Signals.

Das gleiche Verhalten ist bei den restlichen SAW-Wellenformen zu beobachten. Vermutlich wurden diese Wellenformen extra für die Phasenmodulation gewählt, damit bei der Modulation kein Gleichanteil entsteht.

### 3.4 Hypothesen zur Casio-Phasenmodulation

Am einfachsten ist es mit einer festen Modulationstiefe der M2 (M1) = SINE (SINE) Modulation zu beginnen. Diese soll einer vollständigen Modulation entsprechen, nämlich

$\mu = 1 \hat{=} ED = 99$ .<sup>10</sup> Für die folgenden Abschnitte gilt  $f_0 = 46,875$  Hz.

$$x_{PM}(t) = \sin(2\pi f_0 + 2\pi\mu \cdot \sin(2\pi f_0 t + \phi))$$

Beim Betrachten der Messungen wird klar, dass die Phasenmodulation der VZ-Reihe keiner einfachen Phasenmodulation entspricht. Im direkten Vergleich der beiden Synthesen, zu sehen in Abbildung 21, sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Sowohl die Anzahl der Extrempunkte in einer Periode als auch der charakteristische Verlauf stimmen nicht überein, unabhängig von der Phase des modulierenden Signals. Dies lässt darauf schließen, dass die modulierende Funktion zusätzlich manipuliert wird.

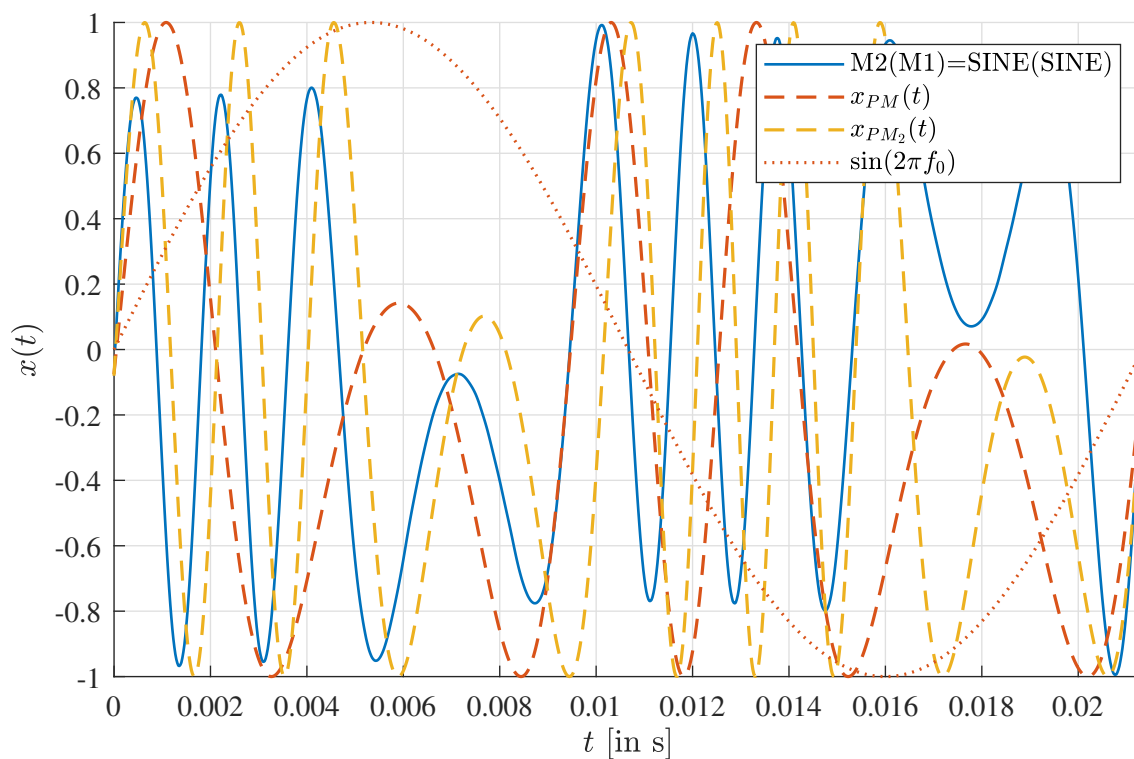


Abbildung 21: Vergleich der Hypothese mit gemessenem Signal

### Idee 1

Die Anzahl der durchschwingenden Wellen erhöht sich, indem man die Amplitude der modulierenden Funktion  $x_M(t)$  mit einem konstanten Faktor multipliziert. Am besten scheint eine Amplitude von 2 zu funktionieren:

$$x_{PM_2}(t) = \sin(2\pi f_0 t + 2\pi \cdot 2 \cdot \mu \sin(2\pi f_0 t + \phi))$$

Dadurch entsteht die gewünschte Anzahl an Schwingungen, und auch der Signalverlauf sieht nun recht ähnlich aus, siehe Abbildung 21. Eine genaue Übereinstimmung ist so

<sup>10</sup>Außerdem soll für die Modulationstiefe  $\mu$  gelten:  $ED = 00 \hat{=} \mu = 0$ ;  $ED = 20 \hat{=} \mu = 0,2$ ;  $ED = 40 \hat{=} \mu = 0,4$ ;  $ED = 59 \hat{=} \mu = 0,6$ ;  $ED = 79 \hat{=} \mu = 0,8$

jedoch noch nicht erreicht.

### Idee 2

Das VZ-Signal scheint gleichspannungsfrei zu sein. Dementsprechend könnte man versuchen das modulierende Signal zu quadrieren oder den Betrag zu bilden:

$$x_{Abs}(t) = \sin(2\pi f_0 t + 2\pi \cdot 2 \cdot \mu |\sin(2\pi f_0 t + \phi)|)$$

$$x_{Quad}(t) = \sin(2\pi f_0 t + 2\pi \cdot 2\mu \cdot (\sin(2\pi f_0 t + \phi))^2)$$

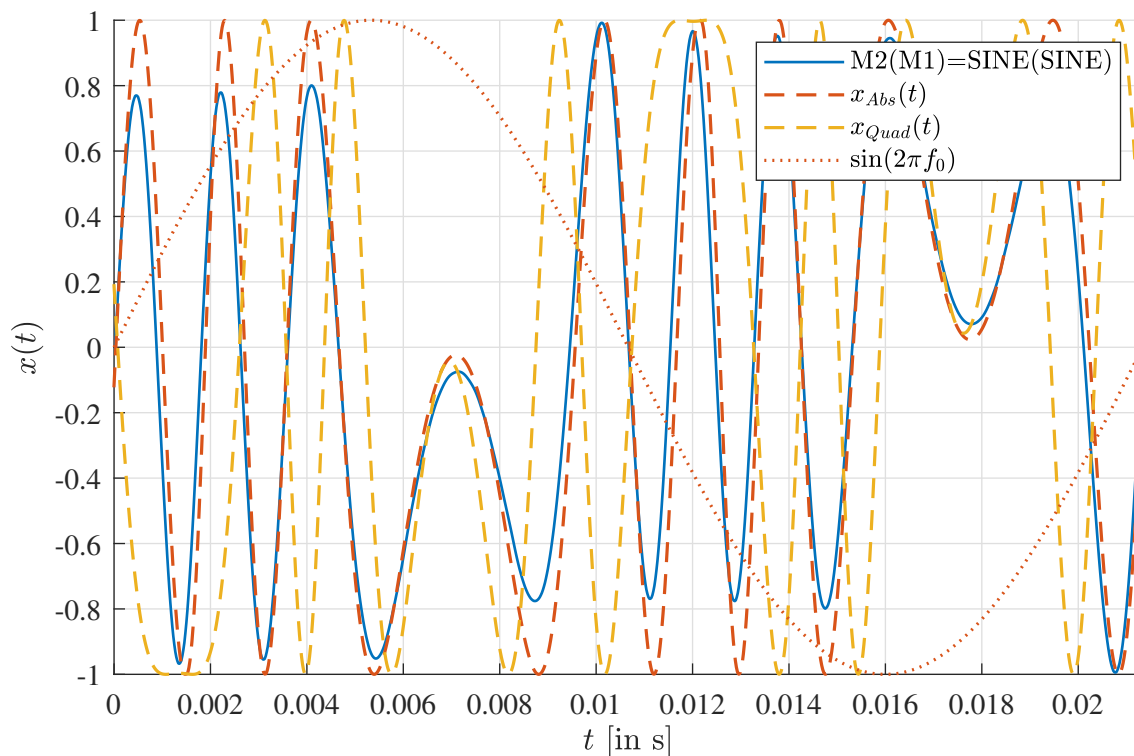


Abbildung 22: Vergleich der Phasenmodulationssynthesen

Für eine Modulationstiefe von  $\mu = 1$  stimmt der Verlauf der  $x_{Abs}(t)$ -Hypothese bereits sehr gut überein, siehe Abbildung 22. Bei niedrigeren Modulationstiefen ändert sich dies. Dort entstehen zunehmend stärkere Sprünge im Signal, die durch das Verhindern des Vorzeichenwechsels bei der Betragsbildung verursacht werden, siehe Abbildung 47 (Anhang B.3). Außerdem sind bei niedrigeren Modulationstiefen zu viele Schwingungen im Signal.

### Idee 3

Es liegt nahe, eine Kombination der beiden Hypothesen zu bilden und sowohl den Exponenten, die Amplitude als auch die Phase des modulierenden Signals in Abhängigkeit

der Modulationstiefe zu setzen.

$$x_{AbsQuad}(t) = \sin(2\pi f_0 t + 2\pi \cdot a \cdot \mu (|\sin(2\pi f_0 t + \phi)|)^n)$$

Nach einigen manuellen Einstellungen, gekennzeichnet durch den Index „prob“, haben sich folgende Kennlinien für den Exponenten  $n$ , die Amplitude  $a$  und die Phase  $\phi$  näherungsweise ergeben:

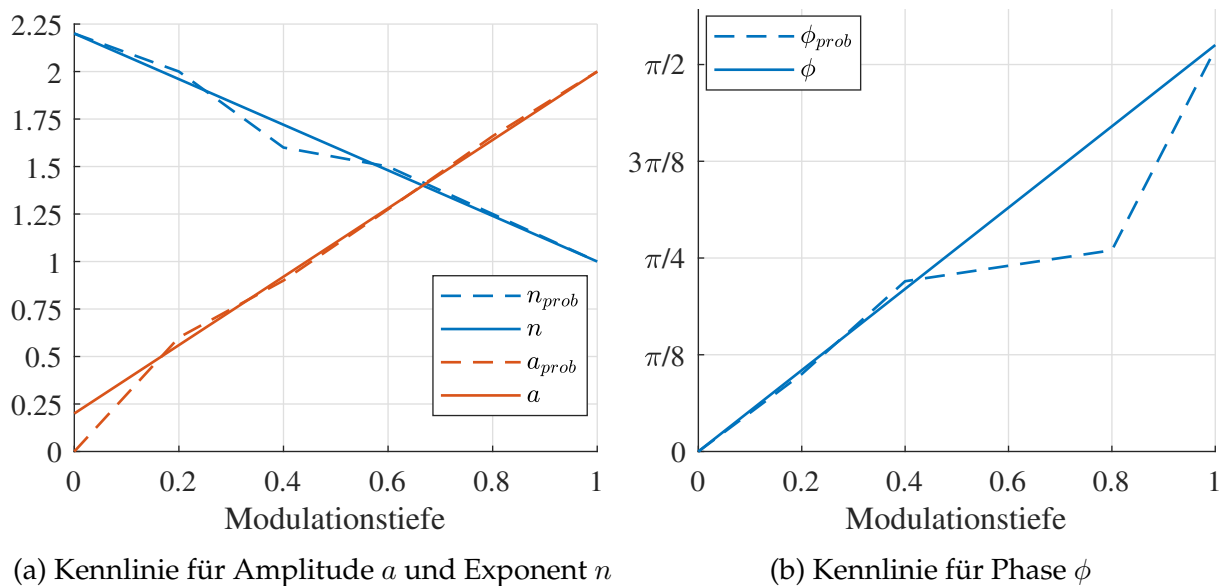


Abbildung 23: Kennlinien der  $x_{AbsQuad}(t)$  Hypothese

Das Ergebnis ist in Abbildung 48 zu sehen. Die gemessenen Modulationstiefen stimmen sehr gut mit den errechneten überein. Abweichungen rund um die halbe Modulationstiefe können durch die erwähnten analogen Schaltungen entstehen, daher sind diese nicht unbedingt zu modellieren. Die finale Hypothese lautet:

$$x_{AbsQuad}(t) = \sin(2\pi f_0 t + 2\pi \cdot (0,2 + 1,8\mu) \cdot \mu |\sin(2\pi f_0 t + (1,65\mu \cdot 2\pi))|^{2,2-1,2\mu}) \quad (17)$$

Die Kennlinien der Phase  $\phi$  und des Exponenten  $n$  sind nicht optimal. An der Stelle des Exponenten ist dies vernachlässigbar. Die der Phase hingegen hat stärkere Auswirkungen auf das finale Resultat. Diese könnte weiter verbessert werden, jedoch sollte der Ansatz hier vorerst linear bleiben. Da die Funktion der Hypothese bereits komplex genug ist, versuche ich dies an dieser Stelle zu vermeiden. Für den Nachbau im Reaktor ist es jedoch möglich, die Kennlinie in einer Tabelle abzulegen. Dies sollte bessere Ergebnisse hervorbringen.

## 4 Praktischer Teil

Im folgenden Abschnitt wird die Übereinstimmung der Hypothese mit den gemessenen Signalen untersucht. Außerdem erfolgt eine softwareseitige Nachbildung der Phasenmodulations-synthese des VZ-Synthesizers. Als Grundlage dient die zuvor aufgestellte Hypothese. Anschließend werden die Messungen des Originals mit denen des Software-Synthesizers verglichen.

### 4.1 Simulation Phasenmodulation in MATLAB

Bis zu diesem Punkt wurde die Hypothese nur unter Verwendung einfacher Sinuswellen betrachtet. Die in Abschnitt 3.4 entwickelte Hypothese<sub>AbsQuad</sub> soll jedoch auch mit den SAW-Wellenformen bestmöglich übereinstimmende Ergebnisse liefern.

Optimal wäre es, wenn die Hypothese sowohl die interne als auch die externe Phasenmodulation bei allen Modulationstiefen mit allen Kombinationen von Wellenformen beschreiben könnte. Allerdings:

1. Wie bereits in Abschnitt 3.3 festgestellt wurde, verwendet der Synthesizer unterschiedliche Synthesealgorithmen für die interne und externe Phasenmodulation. Da nur die interne Phasenmodulation als Richtwert für die Hypothese verwendet wurde, ist es wahrscheinlich, dass die externe Phasenmodulation nicht durch die Hypothese beschrieben werden kann.
2. Die interne Phasenmodulation verhält sich bei einer Modulationstiefe von  $ED = 00$  nicht wie erwartet. Daher werden voraussichtlich nicht alle Modulationstiefen erfasst.
3. Bei der Untersuchung von M2 (M1) und M4 (M1), wobei M2, M4=SAW5 und  $ED = 00$ , entstanden neue Wellenformen, die nicht zu den grundlegenden Wellenformen gehören. Offenbar verwendet die VZ-Reihe einen weiteren Satz von Wellenformen für die Phasenmodulation, wodurch sich die erzeugten Signale unterscheiden.

Zum Vergleichen wurde ein MATLAB-Script verwendet, das die aufgestellte Hypothese simuliert und dabei auf alle grundlegenden Wellenformen zugreifen kann.<sup>11</sup>

In Tabelle 7 sind alle erfolgreich simulierten Modulationstiefen mit „X“ gekennzeichnet, und alle nicht erfolgreich simulierten frei gelassen. Wie erwartet deckt die aufgestellte Hypothese nur einen kleinen Teil der Modulation ab. Eine mögliche Verbesserung könnte durch die Verwendung der angesprochenen SAW-Wellenformen, die speziell

<sup>11</sup>Die SAW-Wellenformen wurden von Matthias Wolff implementiert [15], sodass sie als Funktionen in MATLAB genutzt werden können.

für die Phasenmodulation genutzt werden, erreicht werden. Dies muss noch überprüft werden.

Tabelle 7: erfolgreich durch die  $x_{AbsQuad}(t)$  Hypothese beschriebene Modulationswerte für M2, M4(M1)

	int	ext	int	ext	int	ext	int	ext
<i>ED/WF</i>	M1=SINE		M1=SAW1		M1=SAW3		M1=SAW5	
00	X							
20	X							
40	X							
59	X							
79	X							
99	X							

Für den weiteren Verlauf bedeutet dies, dass nur die interne Modulation unter Verwendung der SINE-Wellenform rekonstruiert werden kann.

## 4.2 Nachbau Phasenmodulation in Reaktor (vVZ)

Für einen geeigneten Vergleich sollen die Signale der Hypothese von einem Software-Synthesizer erzeugt werden. Als Programmierumgebung wurde Reaktor von Native Instruments verwendet.

Reaktor ist eine Software zur Realisierung von Software-Synthesizern und -Effekten. Die Programmierung erfolgt in zwei Strukturebenen [8]:

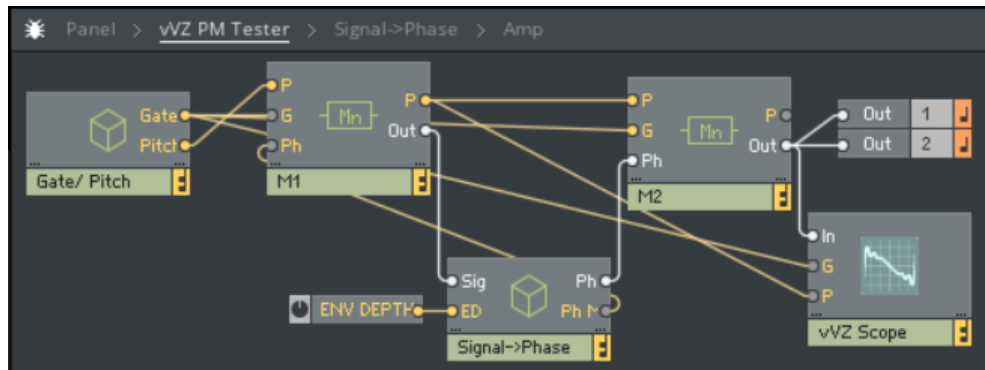
Primary: Dies ist die oberste Strukturebene des Systems, in der der gesamte Signalfluss dargestellt wird. Auf dieser Ebene werden alle Parameter, Events, MIDI- und OSC-Daten verarbeitet, und die Klänge werden mithilfe von Primary-Makros und Modulen erzeugt.

Core: Dies ist eine tiefere Strukturebene mit einem Runtime-Compiler für Audio-Anwendungen. Sie enthält eine Bibliothek von DSP-Komponenten und eignet sich für die Entwicklung individueller DSP-Algorithmen.

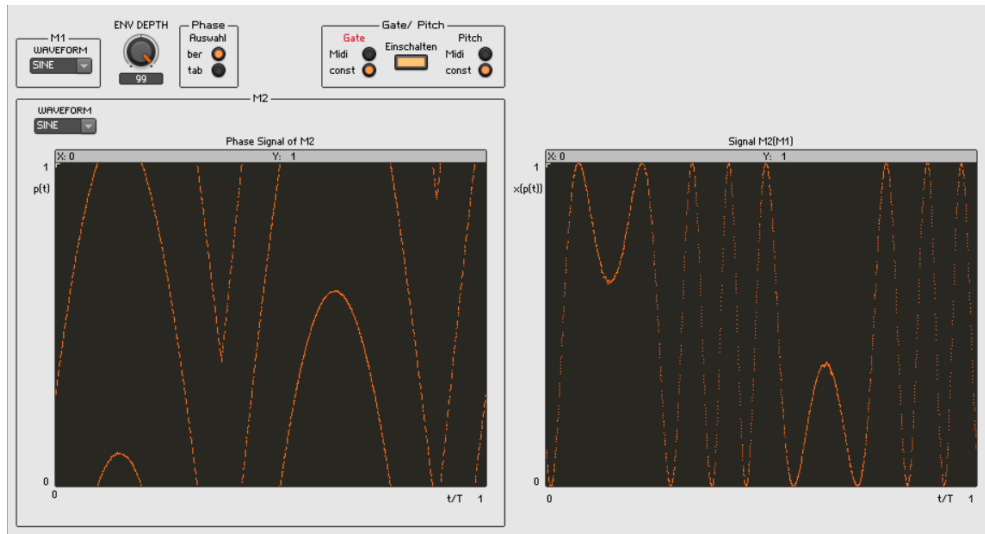
Mir wurde ein Reaktor-Projekt<sup>12</sup> zur Verfügung gestellt, welches bereits grundlegende Funktionen beinhaltet [15], siehe Abbildung 24. Das Projekt besitzt die zwei Module *M1* und *M2*. Sie sollen die Funktionsweise der Oszillatoren der VZ-Reihe simulieren, und können alle grundlegenden Wellenformen erzeugen.

Der Aufbau soll die interne Phasenmodulation der VZ-Reihe simulieren, weshalb *M1* und *M2* so verschaltet sind, dass der Ausgang von *M1* die Phase von *M2* moduliert. Außerdem wird das von *M1* erzeugte Signal durch das Makro *Signal->Phase* manipuliert.

<sup>12</sup>Für die folgenden Abschnitte soll der Index „vVZ“ die in Reaktor modellierten Signale beschreiben.



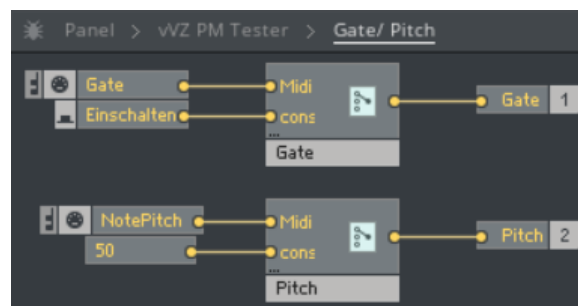
(a) Blockschaltbild



(b) GUI

Abbildung 24: Blockschaltbild und GUI des vorgegebenen Reaktor Projekts

*Gate* und *Pitch* sind Steuersignale, die lediglich zur Bedienung des Synthesizers dienen und im Makro *Gate/Pitch* zusammengefasst sind. Die Option „Midi“ im GUI ermöglicht es dem Nutzer, Tonhöhe und Anschlagsstärke über die MIDI-Steuerung einzugeben. Bei der Option „const“ wird ein konstanter Wert angenommen. Das *Gate*-Signal nimmt den Wert 1 an, wenn es eingeschaltet ist, oder 0, wenn es ausgeschaltet ist. Es simuliert einen VCA. Das *Pitch*-Signal besitzt einen konstanten Wert, sodass eine Grundfrequenz von  $f_0 = 46,875$  Hz erzeugt wird.

Abbildung 25: Makro *Gate/Pitch*

## Eigenanteil

Meine Aufgabe war es das Makro *Signal->Phase* zu implementieren. In diesem wird das modulierende Signal so manipuliert, dass es der Hypothese aus Gleichung 17 entspricht. Es soll gelten<sup>13</sup>:

$$x_M(k) = a \cdot \mu |w_M(f_0 k + \phi)|^n.$$

Das am Ausgang von *M1* vorliegende Signal lautet:

$$x_M(k) = w_M(f_0 k)$$

Das Makro *Signal->Phase* ist wie folgt aufgebaut:

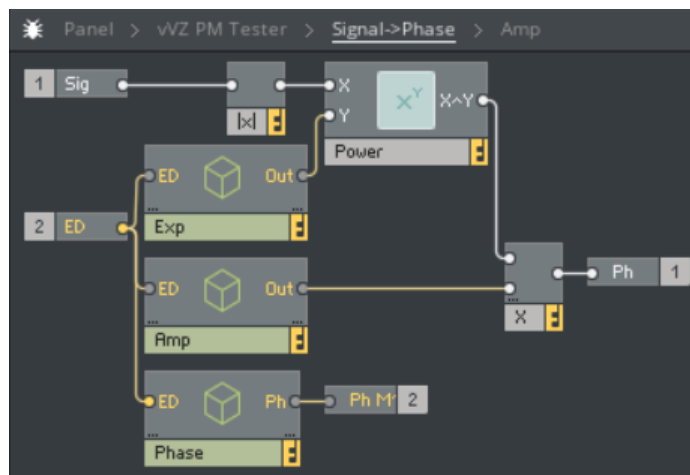
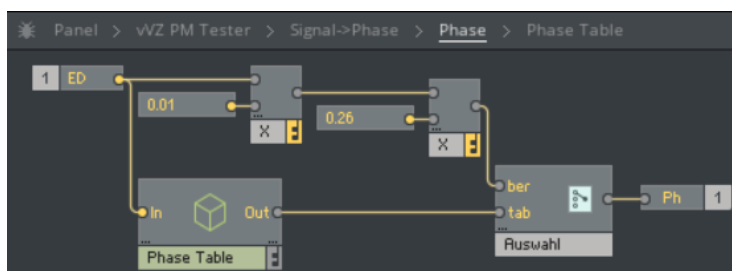


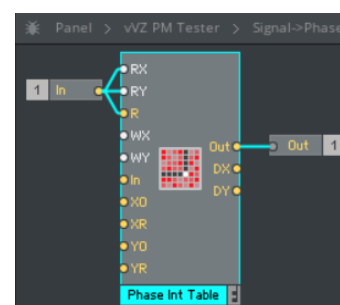
Abbildung 26: Makro *Signal->Phase*

1. Phase  $\phi$  im Argument addieren:  $x_M(k) = w_M(f_0 k + \phi)$ ,  $\phi$  ist entweder  $\mu \cdot 0,26$  oder entspricht den Werten aus Tabelle 10 (in Anhang C)

In der GUI kann zwischen den beiden Berechnungsverfahren umgeschaltet werden. Die Einstellung „ber“ verwendet die Berechnung und die Einstellung „tab“ die in der Tabelle abgelegten Werte.



(a) Makro *Phase*



(b) Makro *Phase Table*

Abbildung 27: Makro *Phase*

<sup>13</sup>In der Umsetzung des Reaktor-Projekts wurde auf die Kreisfrequenz normiert. Dadurch wird der Faktor  $2\pi$  weggelassen.

2. Betragbildung:  $x_M(k) = |w_M(f_0k + \phi)|$  (Abbildung 26)

3. Exponenten mit Faktor  $n$  multiplizieren:  $x_M(k) = |w_M(f_0k + \phi)|^{22-\mu \cdot 12}$



Abbildung 28: Makro *Exp*

4. Multiplikation mit der Amplitude  $a$ :  $x_M(k) = (0,2 + \mu \cdot 1,8) \cdot |w_M(f_0k + \phi)|^{22-\mu \cdot 12}$

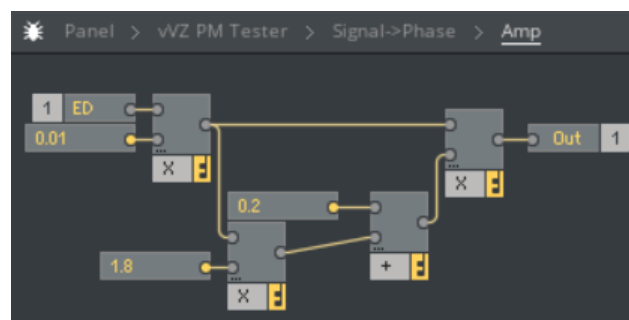


Abbildung 29: Makro *Amp*

5. Multiplikation mit der Modulationstiefe  $\mu$ :

$$x_M(k) = (0,2 + \mu \cdot 1,8) \cdot \mu \cdot |w_M(f_0k + \phi)|^{02+\mu \cdot 18} \text{ (Abbildung 29)}$$

### 4.3 Vergleich der erzeugten Klänge mit Originalgerät

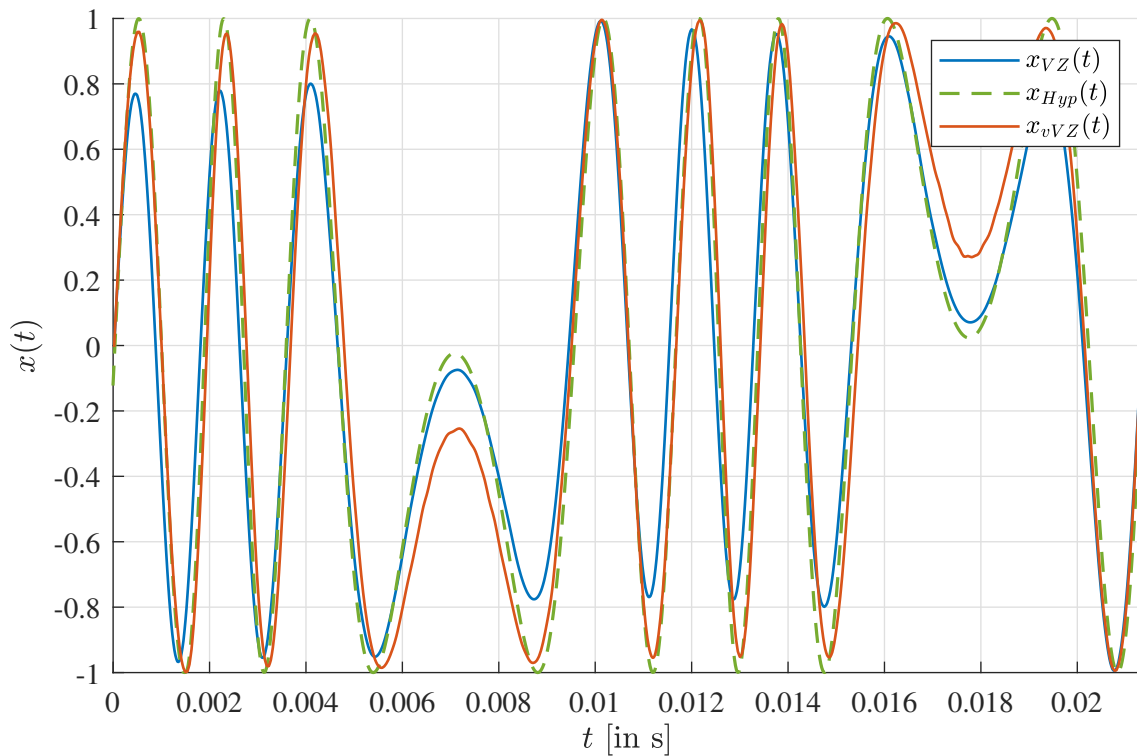
Das Ergebnis bei einer Modulationstiefe von  $ED = 99$  ist in Abbildung 30 zu sehen. Alle weiteren erzeugten Klänge sind in den Abbildungen 49 bis 53 (Anhang B.4) zu sehen. In den Abbildungen ist jeweils der Signalverlauf der VZ-Reihe und des vVZ zu sehen, sowie deren Betragsspektren.

#### Signalverläufe im Zeitbereich

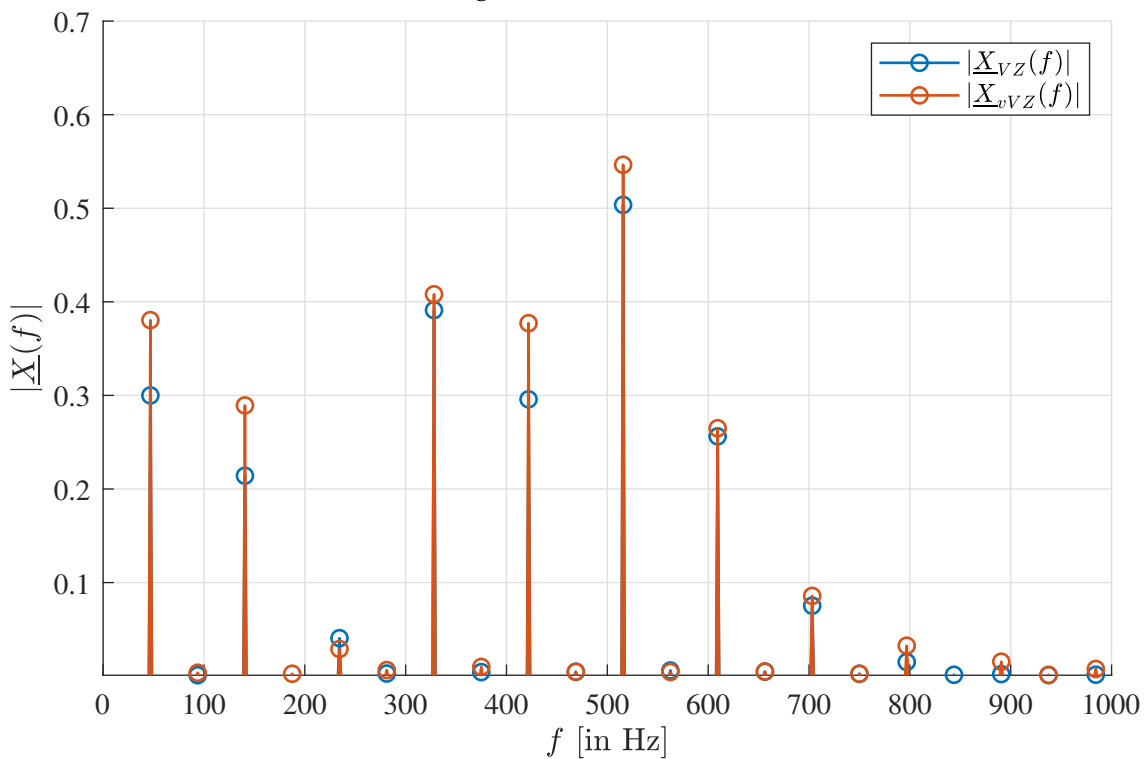
Es ist deutlich zu erkennen, dass die erzeugten und gemessenen Signale bei Modulationstiefen bis einschließlich  $ED = 40$  sehr gut übereinstimmen. Die in Tabelle 8 dargestellten Quadratischen Mittelwerte (*Quadratischer Mittelwert*, QMW)  $\tilde{x}$  der Signale zeigen dies ebenfalls. Die Differenz der QMW<sup>14</sup>  $\Delta\tilde{x}$  weichen weniger als 0,02 voneinander ab, teilweise sogar weniger als 0,007. Auch die jeweiligen Kreuzkorrelationen<sup>15</sup> (*Kreuzkorrelationsfunktion*, KKF) (Abbildung 54) besitzen Maxima von über 0,99. Damit

<sup>14</sup>Berechnung der Abweichung:  $\Delta\tilde{x} = \tilde{x}_{VZ} - \tilde{x}_{vVZ}$

<sup>15</sup> $\hat{\psi}_{VZ,vVZ}(k) = \frac{1}{\sqrt{\psi_{VZ,vVZ}(0)\psi_{vVZ,vVZ}(0)}}\psi_{VZ,vVZ}(k), \psi_{vVZ,vVZ}(k)$  durch `xcorr(x,y)` in Matlab berechnet



(a) Signalverlauf im Zeitbereich

(b) Betragsspektrum <sup>a</sup><sup>a</sup> $|X(f)|$ -Achse beginnt bei 0,001Abbildung 30: Vergleich VZ-Hypothese<sub>AbsQuad</sub>-vVZ mit  $ED = 99$ 

stimmen sie sehr gut überein.

Bei höheren Modulationstiefen weichen die Hypothese und die erzeugten Signale etwas

stärker von den gemessenen ab. Das liegt daran, dass die Extrempunkte der VZ-Signale nicht immer bis  $\pm 1$  schwingen. Dieses Verhalten ist wahrscheinlich der Limitierung der Hardware im Vergleich zur eigentlichen Berechnung im Synthesizer geschuldet. Trotzdem liegen die Maxima der jeweiligen Kreuzkorrelation über 0,96.

Außerdem ist zu beobachten, dass der Signalverlauf der Hypothese an einigen Stellen besser über das Original passt als die erzeugten Signale und vice versa. Beispielsweise liegt die Hypothese von  $ED = 59$  bei  $0,004 \leq t \leq 0,005$  Sekunden näher am Original, als das erzeugte Signal. Dabei ist der Anstieg der steigende Flanke des erzeugten Signals etwas schwächer. Beim erzeugten Signal schwingen die Extrempunkte jedoch nicht immer bis  $\pm 1$  durch, wie es beim Original der Fall ist, wenn auch deutlich stärker. Die erzeugten Signale scheinen die Einwirkungen der physischen Signalkette etwas besser modellieren zu können.

### Betragspektren

Die zugehörigen Betragsspektren bestätigen diese Erkenntnisse. Bei den Modulationstiefen  $ED = 00, 20$  sind die Betragsspektren nahezu identisch. Sowohl die Frequenzanteile als auch die Energien der Anteile stimmen überein. Perzeptiv sind somit die Grundfrequenz als auch die Obertöne sehr ähnlich.

Bei  $ED = 40, 59$  beginnen sich die Energien der Frequenzanteile zu unterscheiden, jedoch halten sich die Unterschiede in einem Intervall von  $[-0,1; 0,1]$  auf. Die Energien der Grundfrequenz und Obertöne stimmen jedoch noch recht gut überein.

Bei den letzten beiden untersuchten Modulationstiefen von  $ED = 79, 99$  sind deutlichere Unterschiede zu erkennen. Vor allem bei  $ED = 79$  weichen die Betragsspektren der gemessenen und erzeugten Signale voneinander ab. Die Energie der Frequenzanteile schwankt zwischen positiven und negativen Abweichungen, was einen wahrnehmbaren Unterschied machen kann. Trotzdem stimmen die Frequenzen der Obertöne der gemessenen Signale mit denen der erzeugten überein.

Tabelle 8:  $\Delta\tilde{x}$  und  $\max[\hat{\psi}_{\text{VZ},\text{vVZ}}(k)]$  der gemessenen und erzeugten Signale

$ED$	$\tilde{x}_{\text{VZ}}$	$\tilde{x}_{\text{vVZ}}$	$\Delta\tilde{x}$	$\max[\hat{\psi}_{\text{VZ},\text{vVZ}}(k)]$
00	0,7063	0,7049	0,0014	0,9997
20	0,6912	0,6845	0,0068	0,9997
40	0,5281	0,5114	0,0167	0,9916
59	0,6237	0,6966	-0,0729	0,9608
79	0,5964	0,6921	-0,0956	0,9650
99	0,5931	0,6768	-0,0837	0,9808

## 4.4 Verifikation der Hypothese

Ziel der Arbeit ist es, anhand von Messungen des VZ-10M eine Hypothese für die Phasenmodulations-synthese der VZ-Reihe zu entwickeln. Betrachtet man die aufgestellte Hypothese<sub>AbsQuad</sub> unter dieser Voraussetzung, dann ist diese unzureichend. Unter anderem deshalb, weil es zwei unterschiedliche Phasenmodulationen gibt: intern und extern.

Die Hypothese deckt selbst bei Verringerung der Betrachtung auf nur die interne Phasenmodulation nur einen kleinen Teil der Synthese ab. Dies liegt unter anderem am unerwarteten Verhalten der Synthese bei einer Modulationstiefe von  $ED = 00$ . Demnach ist es nicht möglich, mit einer einzigen Hypothese alle Einstellungsmöglichkeiten der VZ-Reihe umfassend zu beschreiben.

### Ergebnis

Die Hypothese:

$$x_{AbsQuad}(t) = \sin(2\pi f_0 t + 2\pi \cdot (0,2 + 1,8\mu) \cdot \mu |\sin(2\pi f_0 t + \phi)|^{22-12\mu}) \quad \text{mit } f_0 = 46,875 \text{ Hz}$$

beschreibt die interne Phasenmodulationssynthese mit den Einstellungen:

Tabelle 9: Einstellungen, die durch Hypothese<sub>AbsQuad</sub> beschrieben werden

Stimme	Menü, Seite	Parameter	Wert
M1, M2	1, 00: LINE	INT LINE	PHASE
M1	1, 01: WAVE FORM	FORM	SINE
M1	1, 10: ENV DEPTH	ENV DEPTH	*ED
M2	1, 01: WAVE FORM	FORM	SINE

\*ED  $\in \{00, 20, 40, 59, 79, 99\}$  und  $\phi$  entsprechend den Werten aus der Tabelle 10.

Alle anderen Einstellungen werden nicht durch sie beschrieben.<sup>16</sup>

<sup>16</sup>Es bleibt zu überprüfen, ob unter Verwendung der Wellenformen aus den Abbildungen 44, 45 und 46 die Hypothese mit der internen Phasenmodulationssynthese übereinstimmt.

## 5 Ausblick

### 5.1 kritische Diskussion der eigenen Ergebnisse

Die Untersuchungen am VZ-10M haben sich als komplizierter herausgestellt als ursprünglich erwartet. Aufgrund der vielen Eigenheiten des Synthesizers mussten im Laufe der Arbeit immer mehr Einschränkungen vorgenommen werden. Es bleibt die Frage offen, ob es sich bei dem untersuchten Gerät um ein defektes Gerät handelt. Möglicherweise sind einige der gemessenen Eigenschaften nicht vom Hersteller beabsichtigt gewesen. Um dies zu klären, wäre eine Untersuchung mehrerer Geräte, sowohl VZ-1 als auch VZ-10M, erforderlich. Außerdem war das untersuchte Synthesizermodell bereits einige Jahre alt und hatte einen Vorbesitzer. Es ist unwahrscheinlich, jedoch nicht auszuschließen, dass dieser Modifikationen an der internen Hardware vorgenommen hat.

Es ist fraglich, ob der gewählte Versuchsaufbau die Messergebnisse möglicherweise verfälscht hat. Ein erster Versuchsaufbau zeigte, dass die Signalkette schnell gestört werden kann, was möglicherweise zu Beeinträchtigungen geführt haben könnte.

Die Hypothese stimmt nicht vollständig mit den Messungen überein, insbesondere bei hohen Modulationstiefen. Interessanterweise zeigt sich, dass selbst die Hypothese nicht exakt mit den erzeugten Signalen übereinstimmt.

Ein weiterer Aspekt ist die unzureichende Menge an Messungen der Phasenmodulationssynthese, selbst wenn nur die interne Phasenmodulation betrachtet wird. Es ist nicht klar, wie sich der Synthesizer bei nicht gemessenen Modulationstiefen verhält.

Zuletzt sind die Interpolationen der Signale in MATLAB zu erwähnen. Durch das Halbieren der gemessenen Abtastwerte kann die Genauigkeit der Messungen ebenfalls verringert werden.

### 5.2 Verbesserungs- und Erweiterungsmöglichkeiten

Aufgrund des unerwarteten Umfangs wurden viele Abstriche gemacht, die zu einem weniger zufriedenstellenden Ergebnis geführt haben. Einige Verbesserungs- und Erweiterungsmöglichkeiten wären:

#### Verbesserungen

- Es könnten mehr Messungen angestellt werden. Dies würde die Evaluation der Genauigkeit der Hypothese verbessern. Vor allem wäre es sinnvoll mehr Modulationstiefen zu messen, um eine bessere Abdeckung zu erhalten.
- Es könnten Messungen zum Verhalten der Phasenmodulation bei steigender Tonhöhe angestellt werden. Da sich die Wellenformen bei steigender Tonhöhe

verändern, könnte dies zu unerwarteten Ergebnissen bei der Phasenmodulation führen.

- Es könnte untersucht werden, ob bei der Phasenmodulation ebenfalls zwei verschiedene Versionen pro grundlegender Wellenform verwendet werden.
- Es könnten weitere VZ-10M-Synthesizer vermessen werden, um Fehler am Gerät auszuschließen.

### **Erweiterungen**

- Es könnte überprüft werden, ob die Hypothese<sub>AbsQuad</sub> mit den nur für die Phasenmodulation verwendeten SAW-Wellenformen eine bessere Übereinstimmung aufweist.
- Die externe Phasenmodulation könnte erweitert untersucht werden. Dafür müsste eine weitere Hypothese aufgestellt werden.
- Man könnte den Synthesizer aufschrauben und den Signalweg im Inneren untersuchen. Falls es eine Möglichkeit gäbe, diesen zu vermessen oder im besten Fall direkt auf den DSP des VZ-10M zuzugreifen, könnte man die tatsächlich errechneten Signale erhalten.

## A Allgemeine Ergänzungen

### A.1 Ergänzungen zum Versuchsaufbau

Ein erster Versuchsaufbau führte zu unbrauchbaren Messergebnissen. Dabei war der MIX OUTPUT des Synthesizers mit dem Audiointerface verbunden, und wurde von dort aus an das Oszilloskop weitergeleitet. Abbildung 33 (Anhang B) zeigt, dass die Signale trotz der Rauschunterdrückung des Oszilloskops von Rauschen beeinträchtigt waren. Außerdem befand sich bei allen Aufnahmen ein unerklärlicher Sprung im Signal, der am Beispiel der Wellenform SAW5, beginnend bei ungefähr 2100 Abtastwerten, zu sehen ist. Dieser scheint durch eine Störung in der Signalkette verursacht worden zu sein.

### A.2 Versuchsaufbau weitere Informationen

#### Synthesizer

Modell: Casio VZ-10M

Seriennummer: 000774

#### Computer

System: Windows 11 Pro

Version: 23H2

Prozessor: Intel(R) Core(TM) i5-10210U CPU @ 1.60GHz 2.11 GHz

Systemtyp: 64-Bit-Betriebssystem, x64-basierter Prozessor

#### Audiointerface

Modell: Focusrite Scarlett 8i6 1st Gen

Menü	Menüpunkt	Einstellung
Device Information	Versions: Firmware	608 Driver: 4.119.13
Streaming Settings	Sample Rate	48000
	Buffer Size	512
	Clock Source	Internal
	Clock Satus	SYNCED
Latency Information	Round-Trip-Latency	47.6 ms - (2282 samples)
	Safe Mode	ON

#### Reaktor

Version: 6.5.0

Abtastrate: 48 kHz

**Oszilloskop**

Modell: LeCroy WaveRunner 604Zi

Model Number: WR604Zi

Serial Number: Waverunner2

Firmware Version: 7.2.0.5 (build 189444)

Operating System: Microsoft Windows 7 Service Pack 1

**Audacity**

Version: 3.0.0

Projekt-Rate (Hz): 48000

**A.3 Messeinstellungen**

Es sind zwei verschiedene Arten von Messungen durchgeführt worden. Zum einen wurden die Ausgänge vom Synthesizer, zum anderen die Ausgänge des Audiointerfaces mithilfe des Oszilloskop gemessen.

**A.3.1 Messungen VZ-10M**

Es wurden folgende Einstellungen verwendet, wenn Messungen vom Synthesizer ange stellt wurden:

Der Schieberegler für VOLUME am Synthesizer ist auf die Stufe MAX gestellt. Das Ein gangssignal von Kanal 1 wird in C1 angezeigt, das Eingangssignal von Kanal 2 in C2.

**Einstellungen für C1 und C2**

Menü	Menüpunkt	Einstellung
Pre Processing	Averaging	1 sweep
	Interpolation	Linear
	Deskev	0.00 $\mu sek$
	Noise Filter	+3 bits (-3dB @ 2.000 kHz)
Trigger	Trigger	Auto
	Source	C1
	Slope	erste Einstellung
	Coupling	DC

**Horizontale und Vertikale Auflösung von C1 und C2**

Horizontal: 10.0 ms/div - 25kS und 250 kS/s

Vertikal: 100 mV/div - Verschiebung: 0.00mV

**Export**

Stop -> File -> Save Waveform -> Data Format -> Save Now!

Data Format: Format: ASCII

SubFormat: Amplitude Only

Delimiter: Space

**A.3.2 Messungen Reaktor**

Es wurden folgende Einstellungen verwendet, wenn Messungen des Reaktor-Projekts angestellt wurden:

Der Line-Ausgang 1 des Focusrite Audiointerfaces wurde an den Kanal 1 des Oszilloskops angeschlossen.



Abbildung 31: Signalfluss für Messungen von Reaktor

**Einstellungen für C1**

Menü	Menüpunkt	Einstellung
Pre Processing	Averaging	1 sweep
	Interpolation	Linear
	Deskev	0.00 $\mu$ sek
	Noise Filter	+3 bits (-3dB @ 2.000 kHz)
Trigger	Trigger	Auto
	Slope	erste Einstellung
	Coupling	DC

**Horizontale und Vertikale Auflösung von C1**

Horizontal: 2ms/div - 1.25 MS/s

Vertikal: 50 mV/div - Verschiebung: 0.00mV

**Export**

Stop -> File -> Save Waveform -> Data Format -> Save Now!

Data Format: Format: ASCII

SubFormat: Amplitude Only

Delimiter: Space

## B Abbildungen

### B.1 allgemeine Abbildungen



(a) VZ-1



(b) VZ-10M

Abbildung 32: Casio VZ-1 und VZ-10M Synthesizer, Bildquellen: [10]

## B.2 Messungen

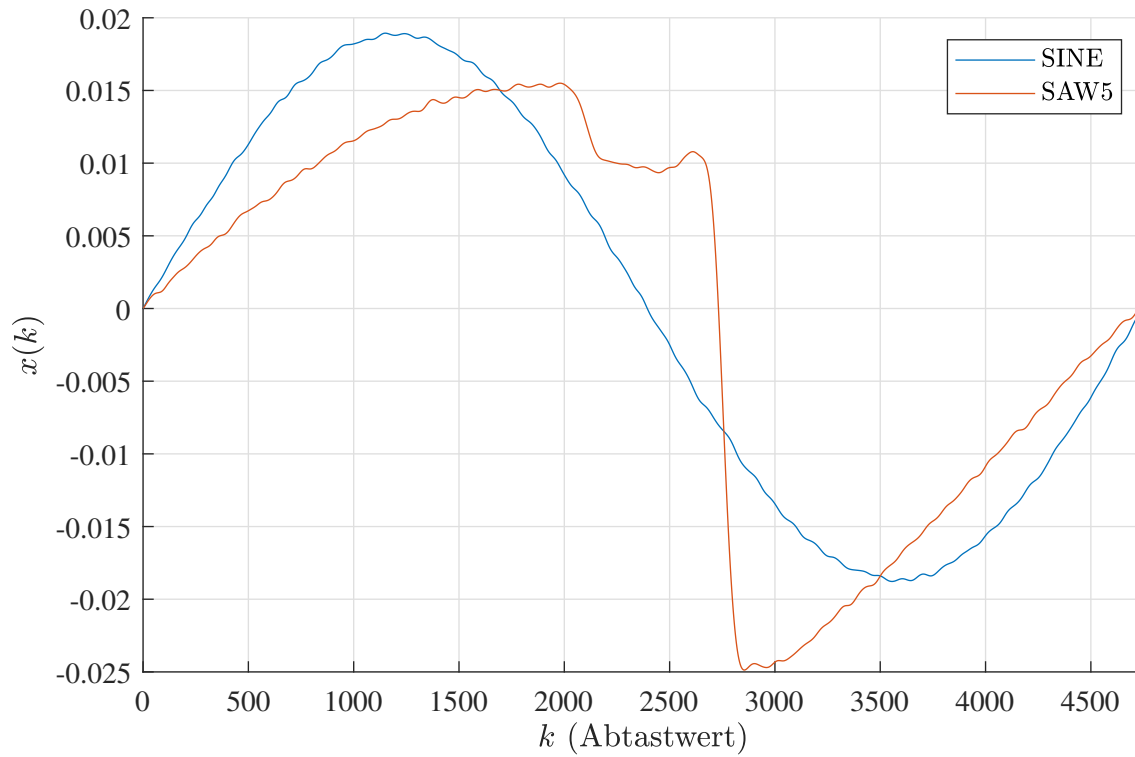
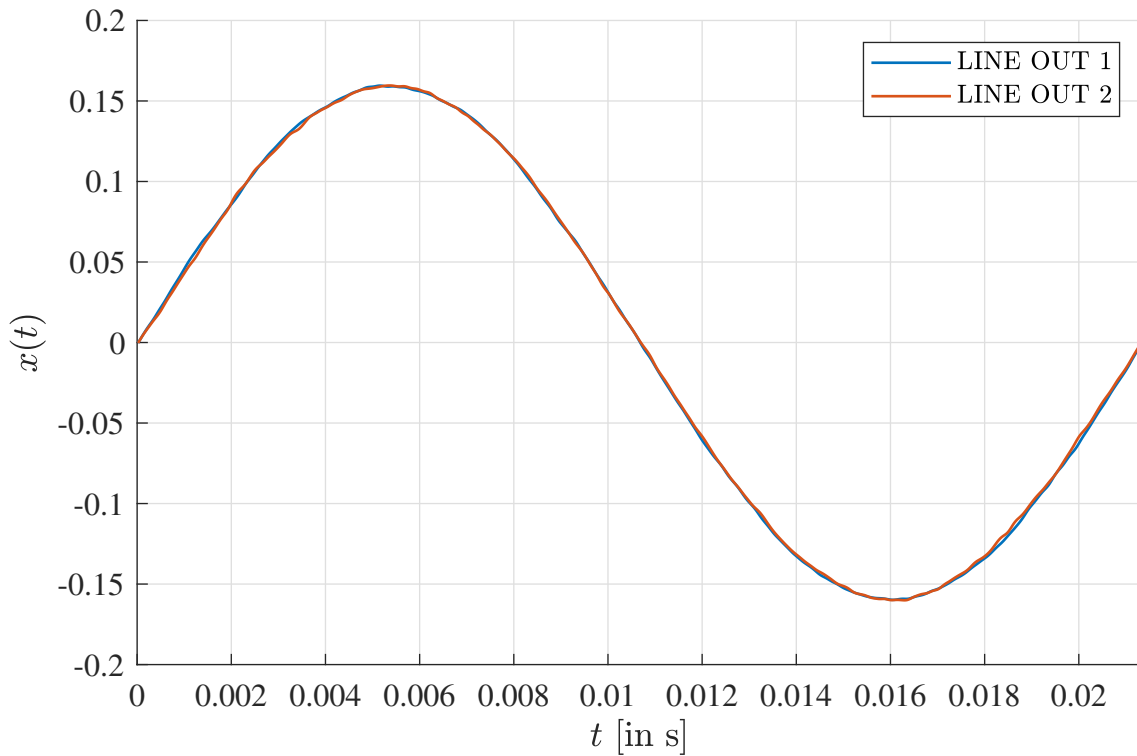
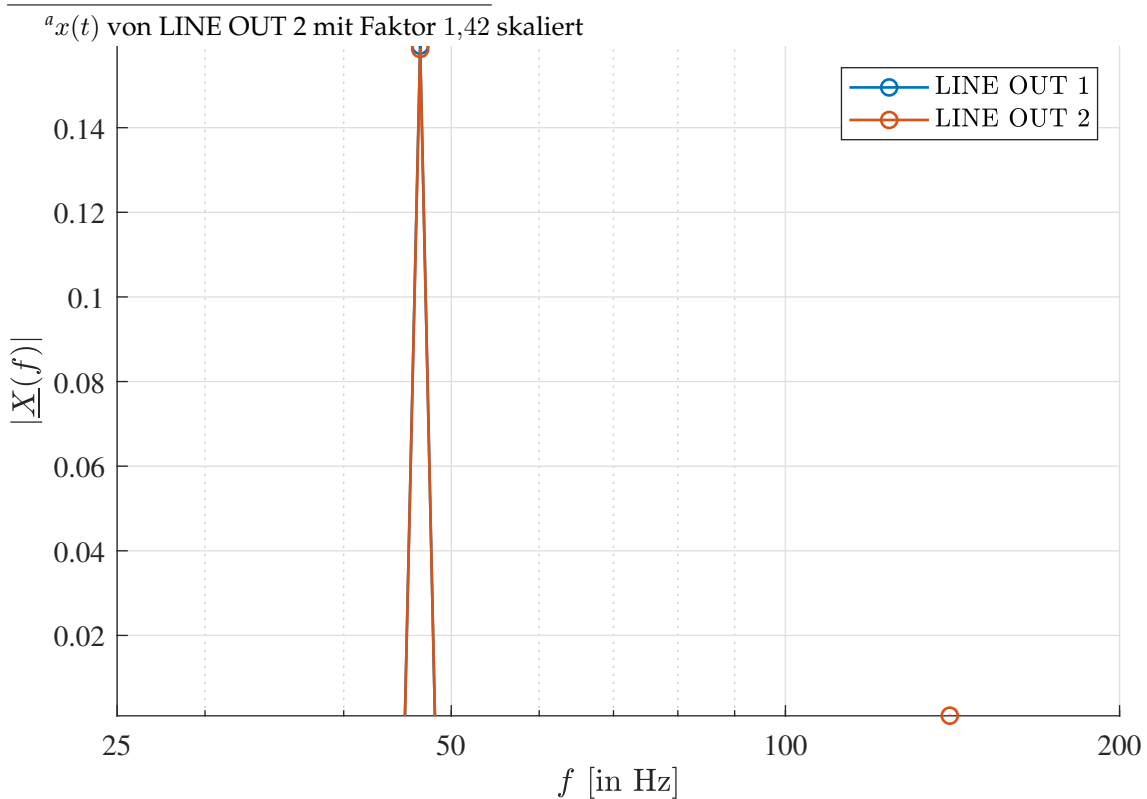


Abbildung 33: verrauschte und fehlerhafte Wellenformen des ersten Versuchsaufbaus



(a) Signalverlauf im Zeitbereich <sup>a</sup>

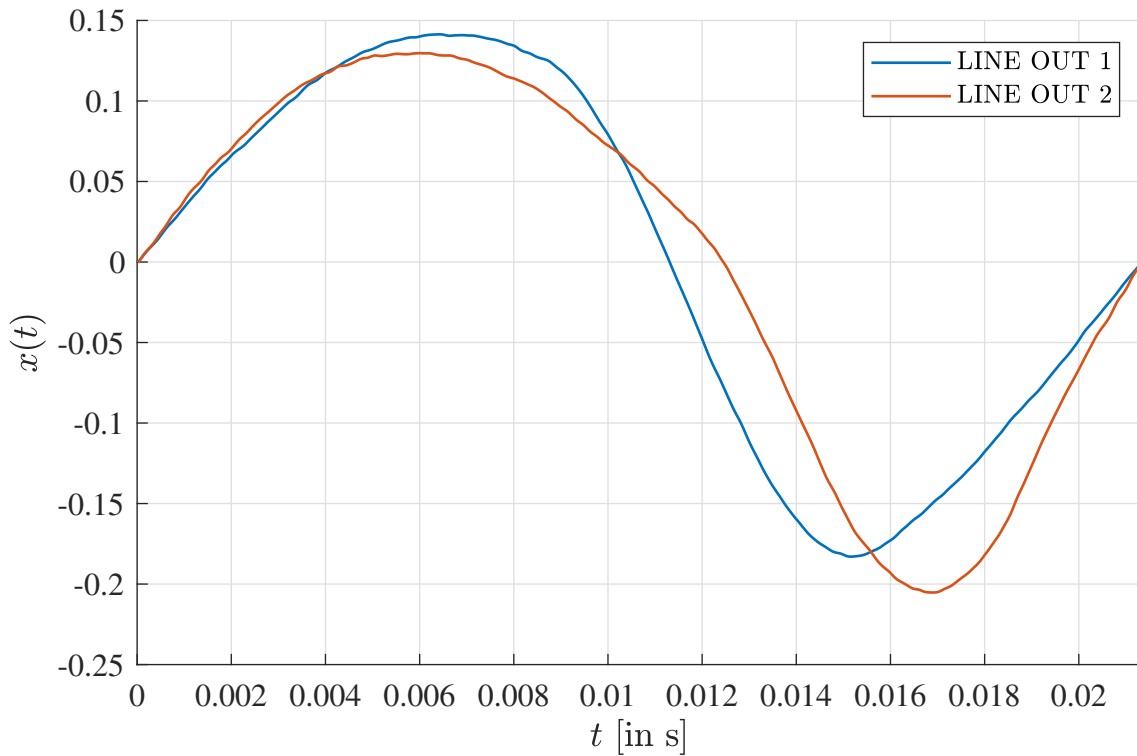


(b) Betragsspektrum <sup>a b</sup>

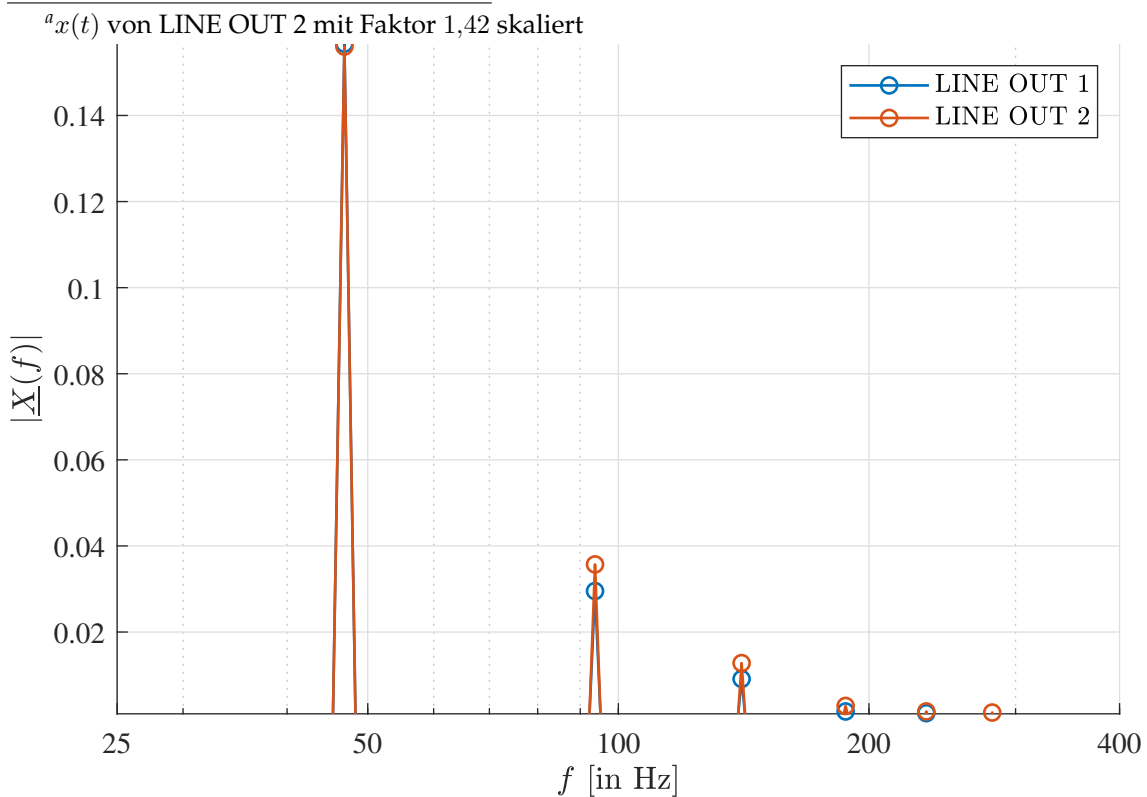
<sup>a</sup> $|X(f)|$ -Achse beginnt bei 0,001

<sup>b</sup> $|X(f)|$  von LINE OUT 2 mit Faktor 1,42 skaliert

Abbildung 34: SINE Wellenform am LINE OUT 1 und LINE OUT 2



(a) Signalverlauf im Zeitbereich <sup>a</sup>

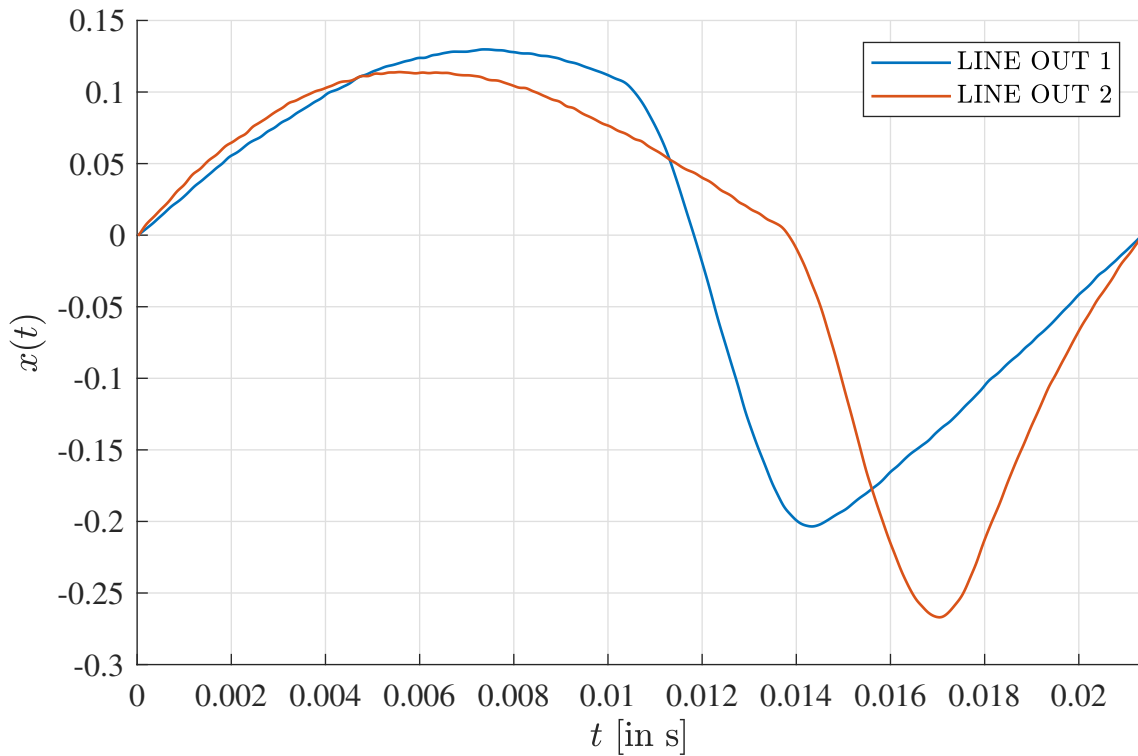


(b) Betragsspektrum <sup>a b</sup>

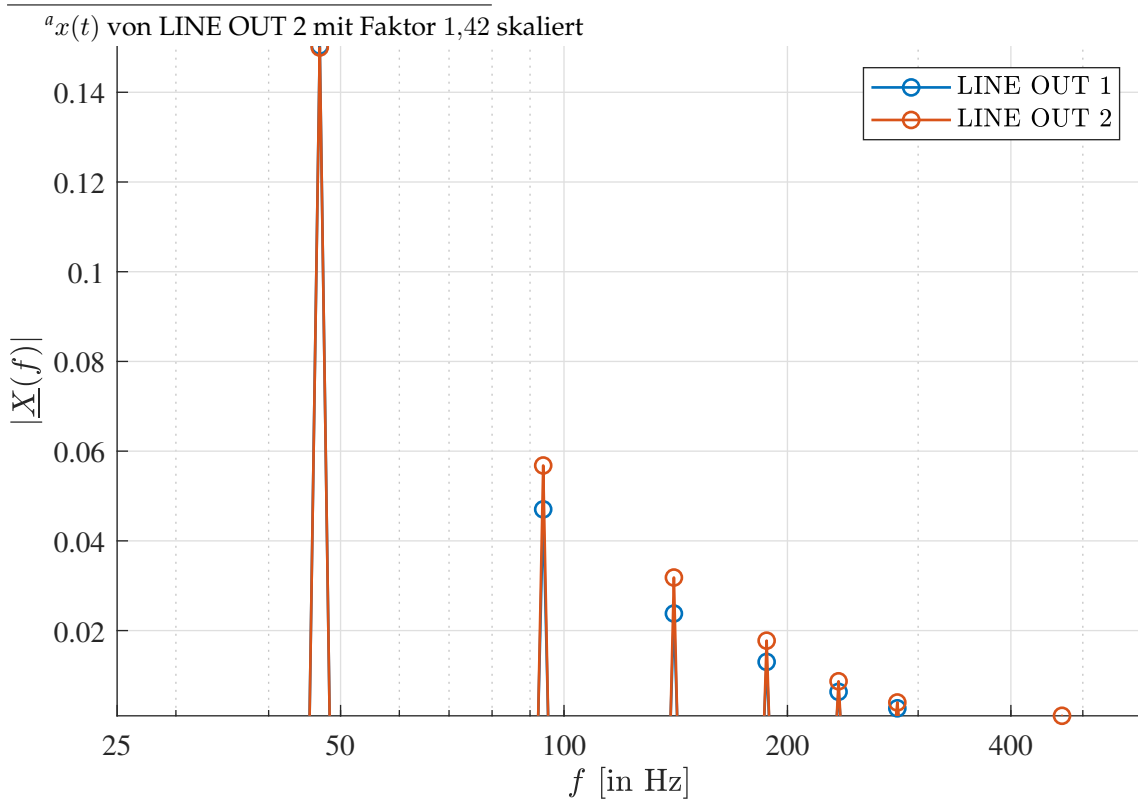
<sup>a</sup> $|X(f)|$ -Achse beginnt bei 0,001

<sup>b</sup> $|X(f)|$  von LINE OUT 2 mit Faktor 1,42 skaliert

Abbildung 35: SAW1 Wellenform am LINE OUT 1 und LINE OUT 2



(a) Signalverlauf im Zeitbereich <sup>a</sup>

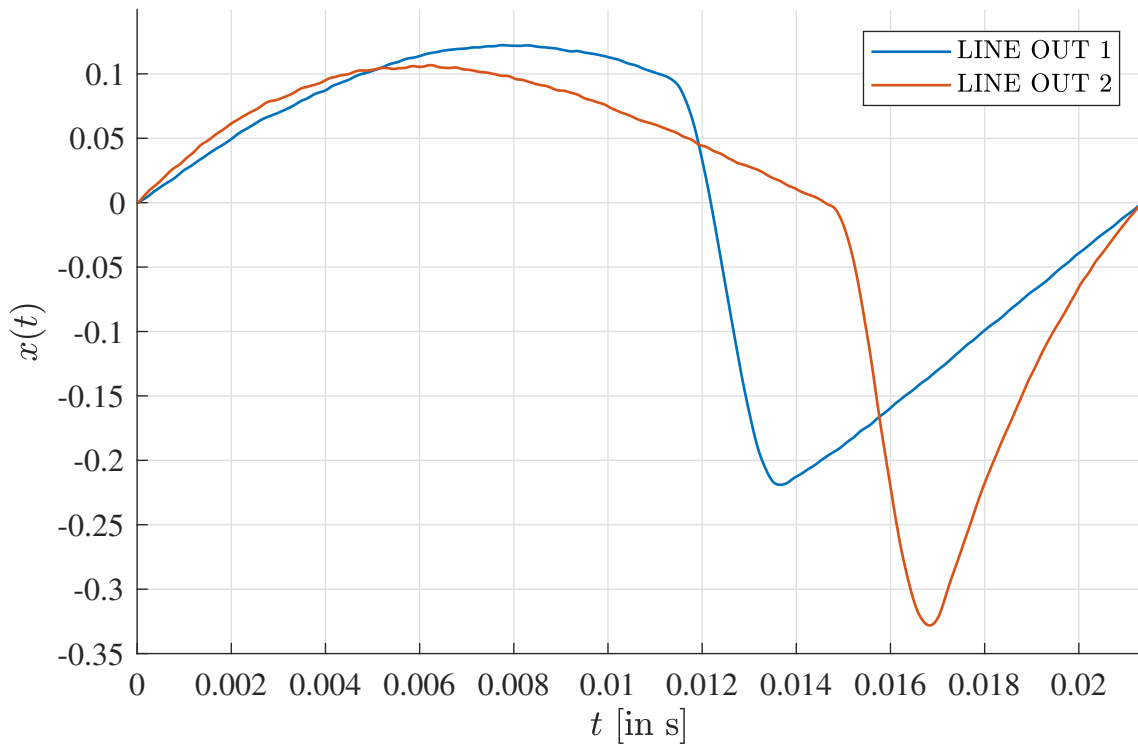


(b) Betragsspektrum <sup>a b</sup>

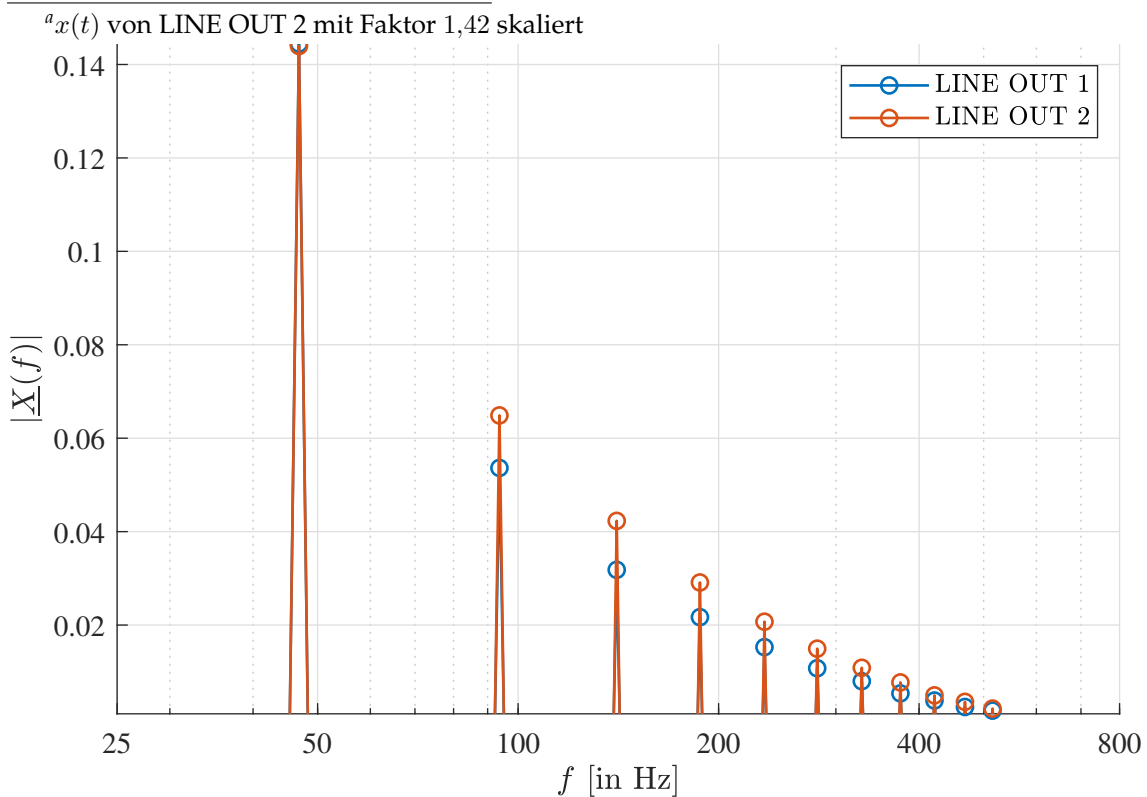
<sup>a</sup> $|X(f)|$ -Achse beginnt bei 0,001

<sup>b</sup> $|X(f)|$  von LINE OUT 2 mit Faktor 1,42 skaliert

Abbildung 36: SAW2 Wellenform am LINE OUT 1 und LINE OUT 2



(a) Signalverlauf im Zeitbereich <sup>a</sup>

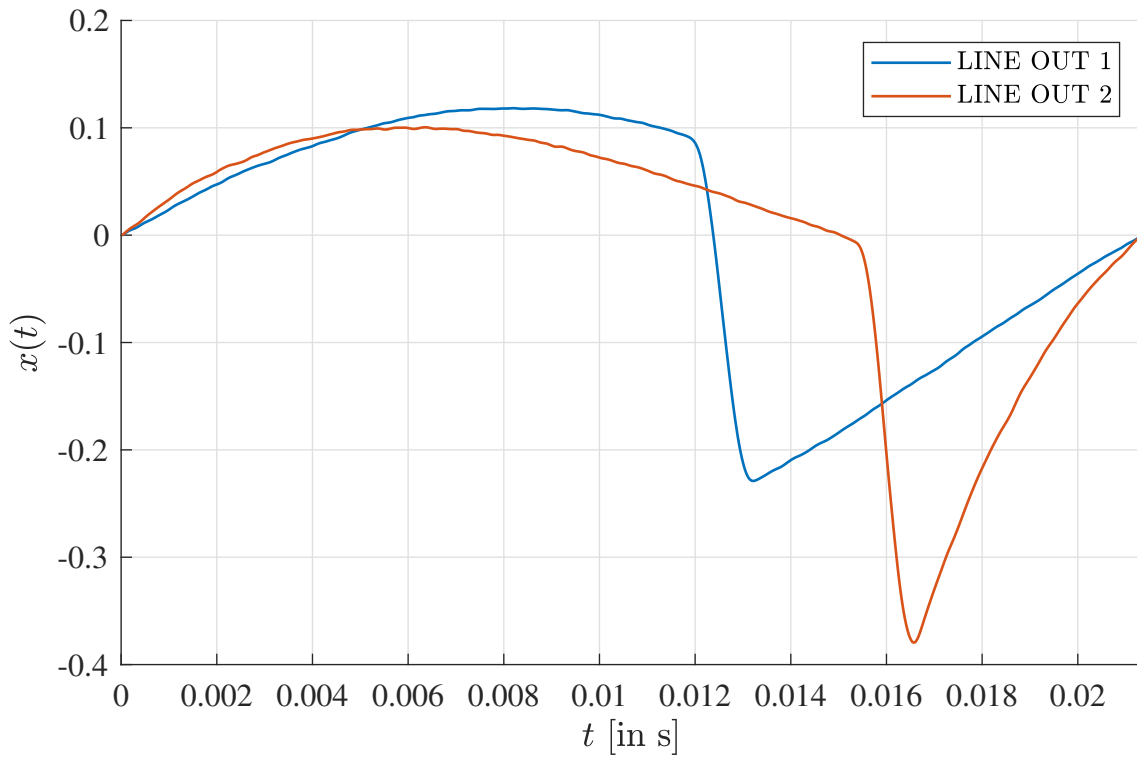


(b) Betragsspektrum <sup>a b</sup>

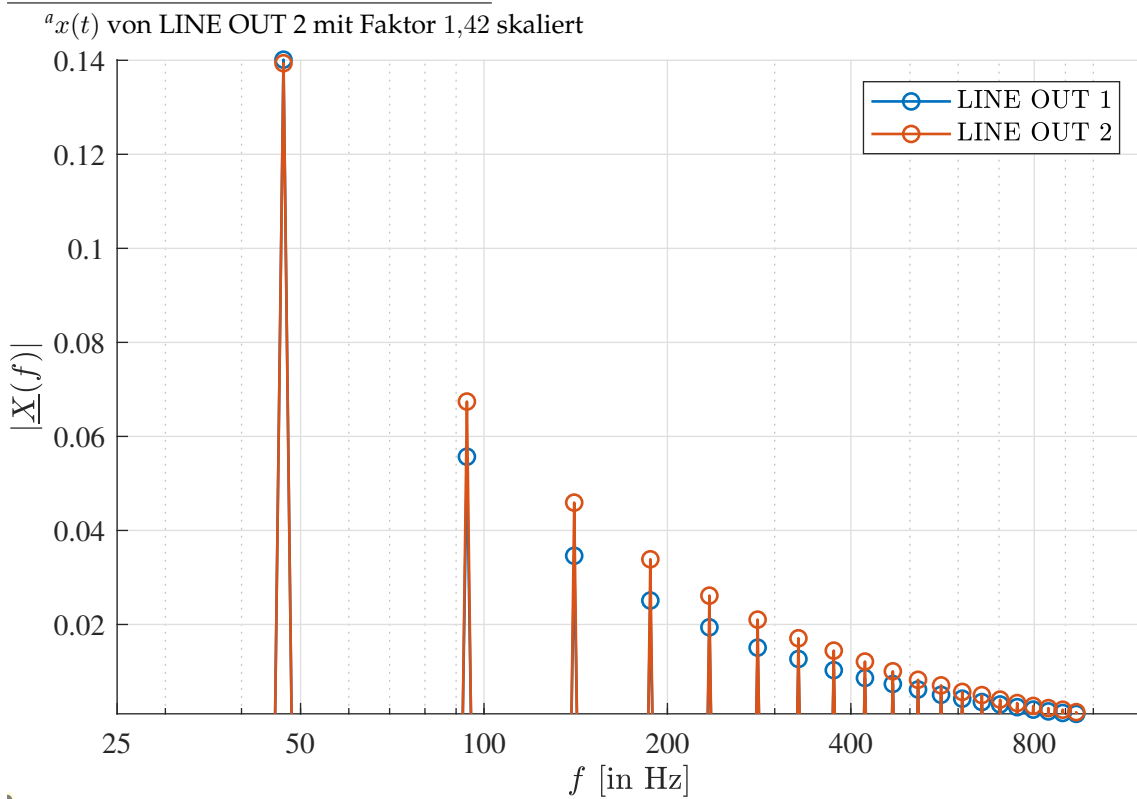
<sup>a</sup> $|\underline{X}(f)|$ -Achse beginnt bei 0,001

<sup>b</sup> $|\underline{X}(f)|$  von LINE OUT 2 mit Faktor 1,42 skaliert

Abbildung 37: SAW3 Wellenform am LINE OUT 1 und LINE OUT 2



(a) Signalverlauf im Zeitbereich <sup>a</sup>

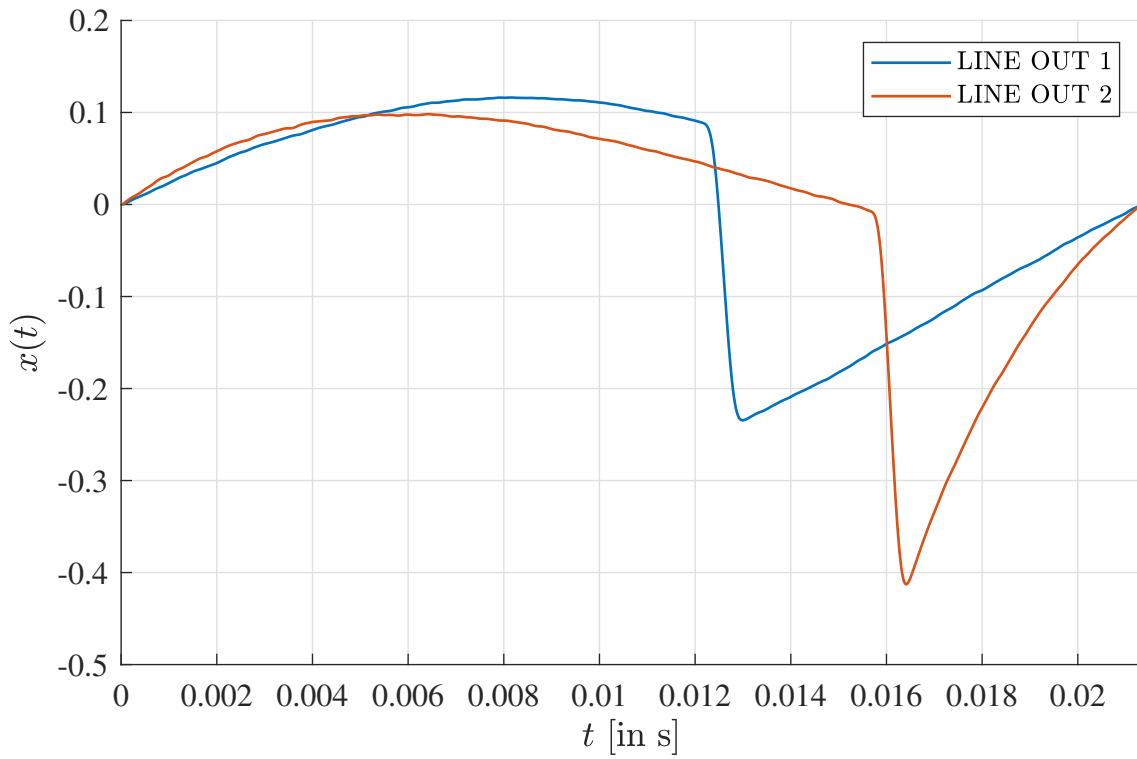


(b) Betragsspektrum <sup>a b</sup>

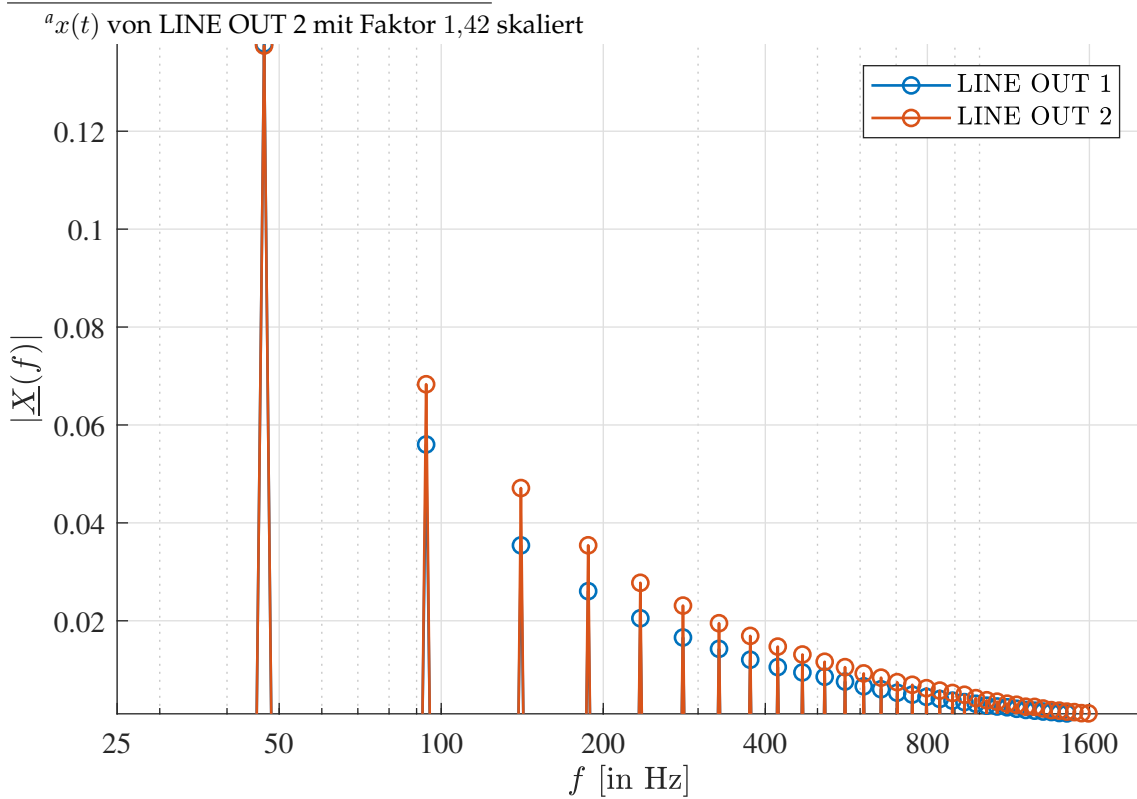
<sup>a</sup> $|\underline{X}(f)|$ -Achse beginnt bei 0,001

<sup>b</sup> $|\underline{X}(f)|$  von LINE OUT 2 mit Faktor 1,42 skaliert

Abbildung 38: SAW4 Wellenform am LINE OUT 1 und LINE OUT 2



(a) Signalverlauf im Zeitbereich <sup>a</sup>

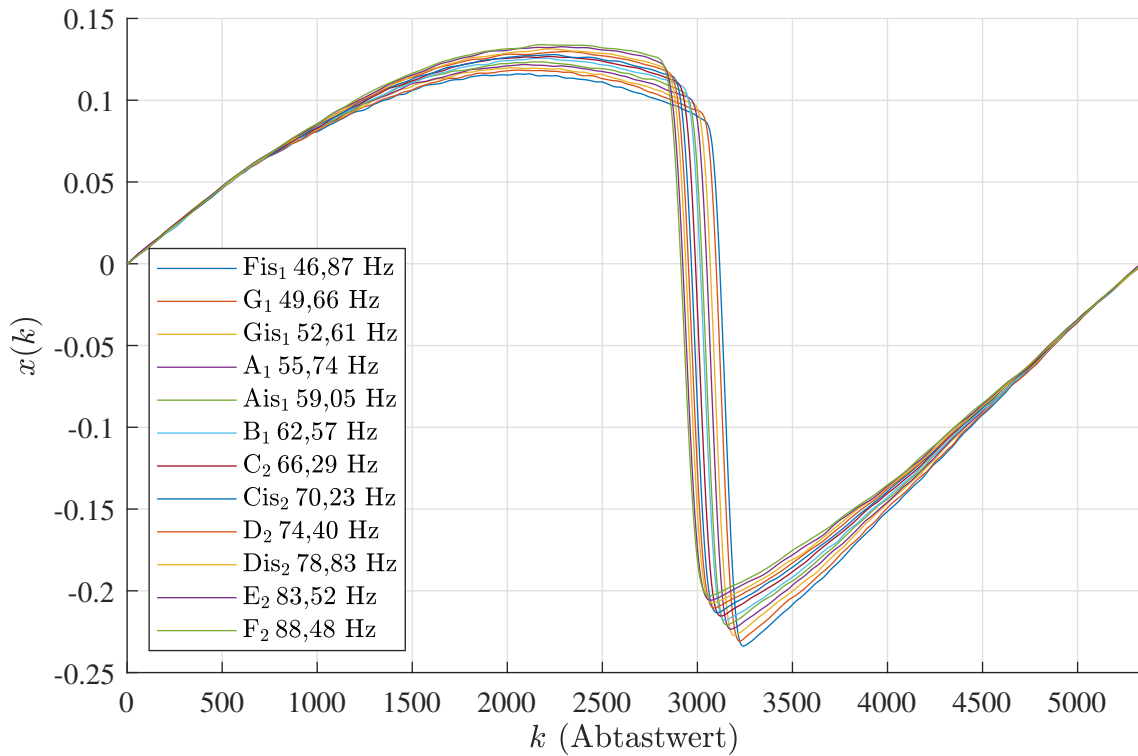


(b) Betragsspektrum <sup>a b</sup>

<sup>a</sup> $|X(f)|$ -Achse beginnt bei 0,001

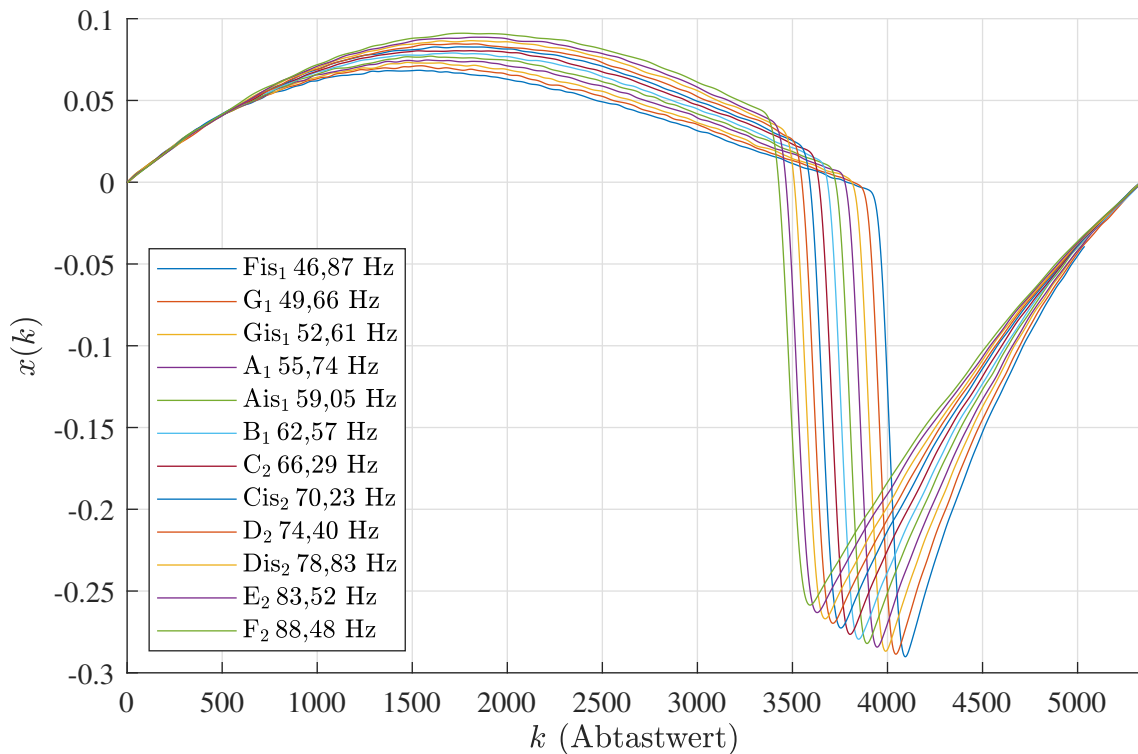
<sup>b</sup> $|X(f)|$  von LINE OUT 2 mit Faktor 1,42 skaliert

Abbildung 39: SAW5 Wellenform am LINE OUT 1 und LINE OUT 2



(a) Messungen<sup>a</sup> am LINE OUT 1

<sup>a</sup>alle Tonhöhen sind jeweils um +23 Cent verschoben



(b) Messungen<sup>a</sup> am LINE OUT 2

<sup>a</sup>alle Tonhöhen sind jeweils um +23 Cent verschoben

Abbildung 40: Verhalten der SAW5 Wellenform bei Erhöhung der Tonhöhe um jeweils einen Halbton (auf festen Endpunkt skaliert)

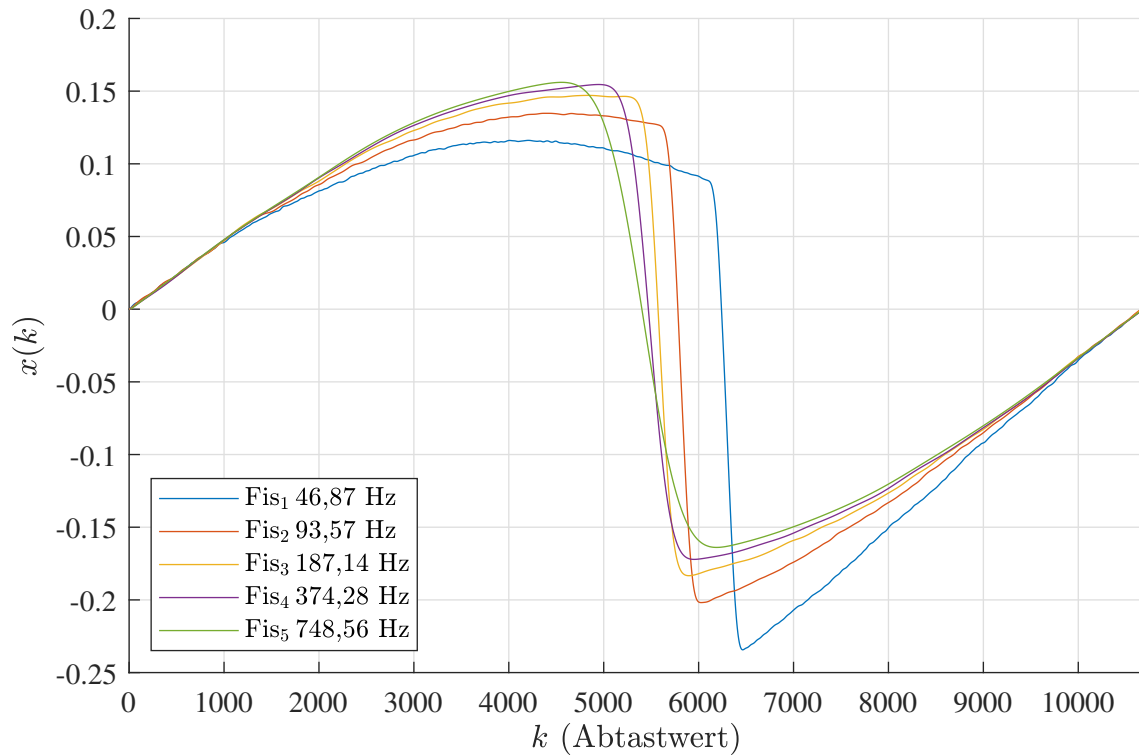
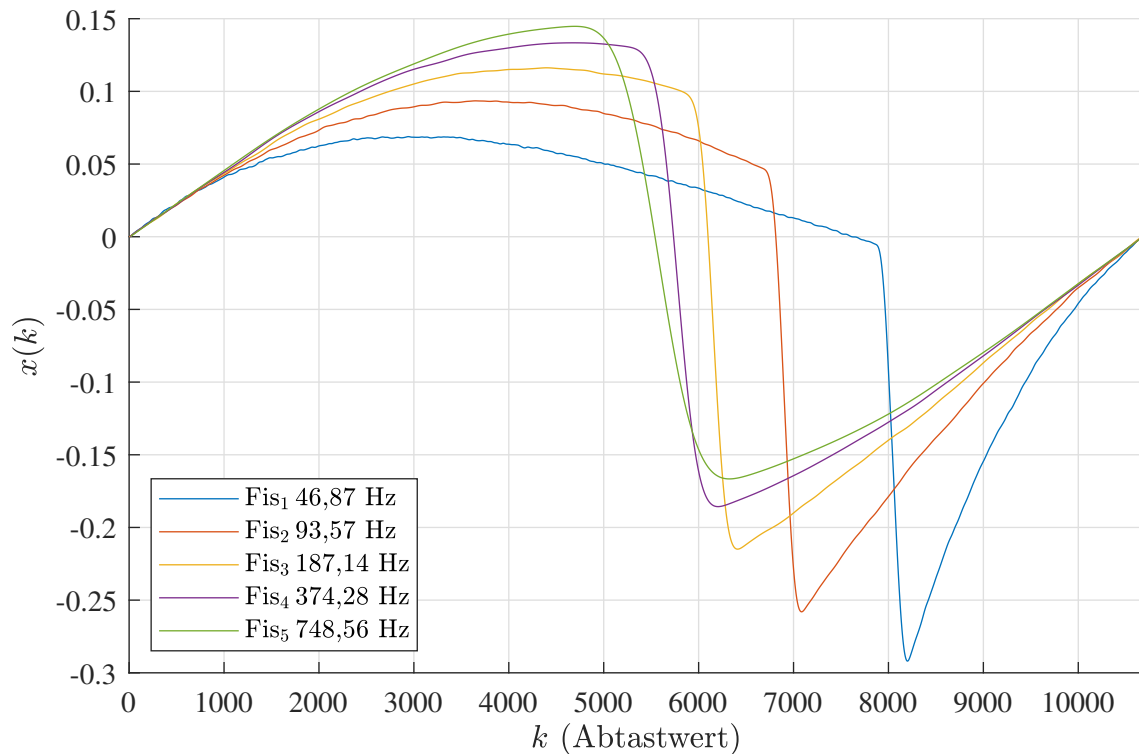
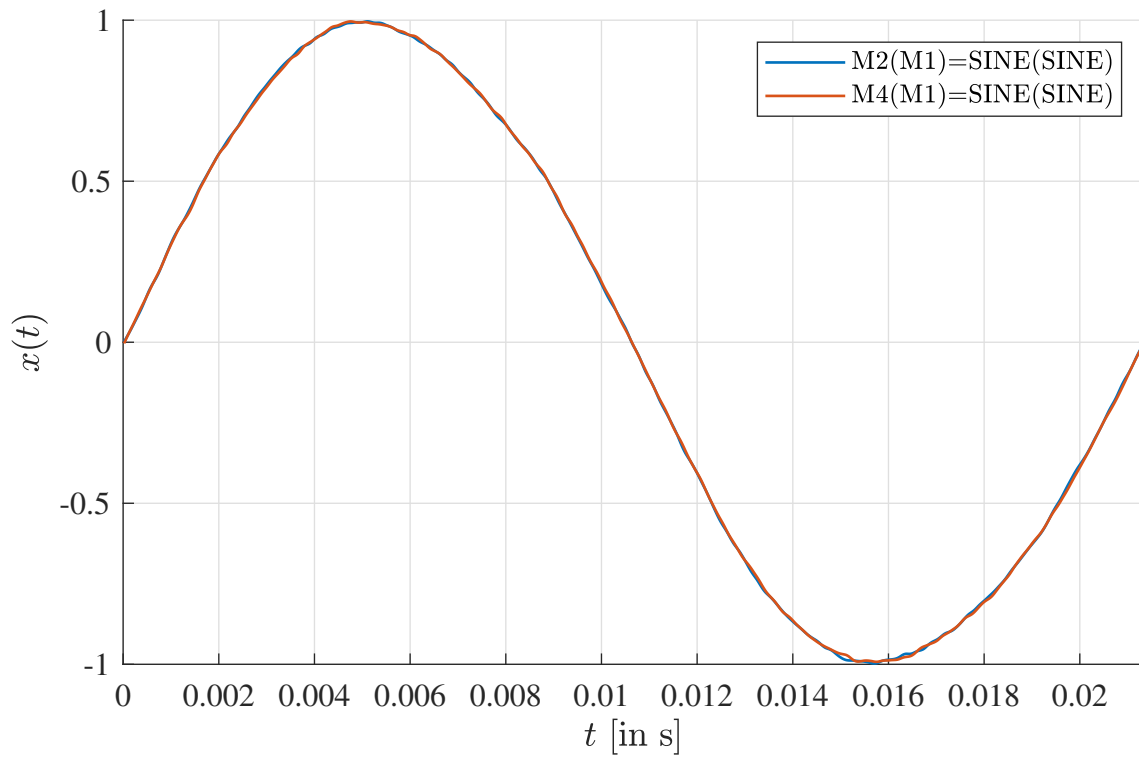
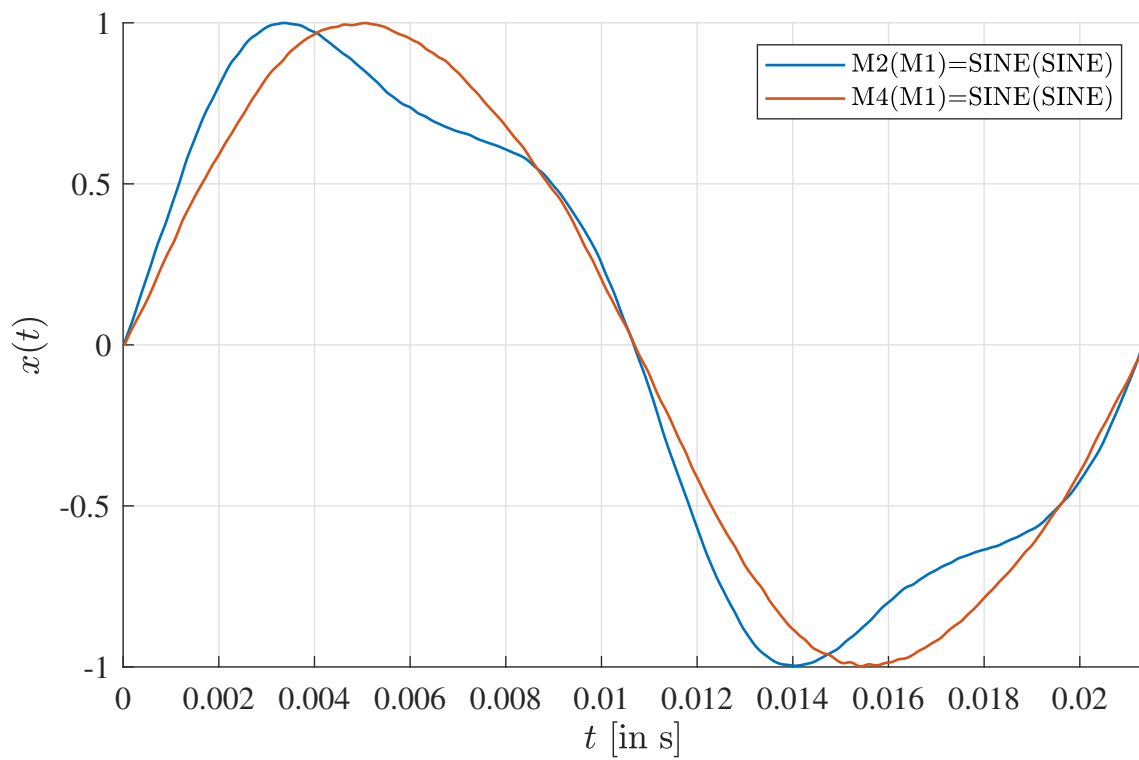
(a) Messungen<sup>a</sup> am Ausgang LINE OUT 1<sup>a</sup>alle Tonhöhen sind jeweils um +23 Cent verschoben(b) Messungen<sup>a</sup> am Ausgang LINE OUT 2<sup>a</sup>alle Tonhöhen sind jeweils um +23 Cent verschoben

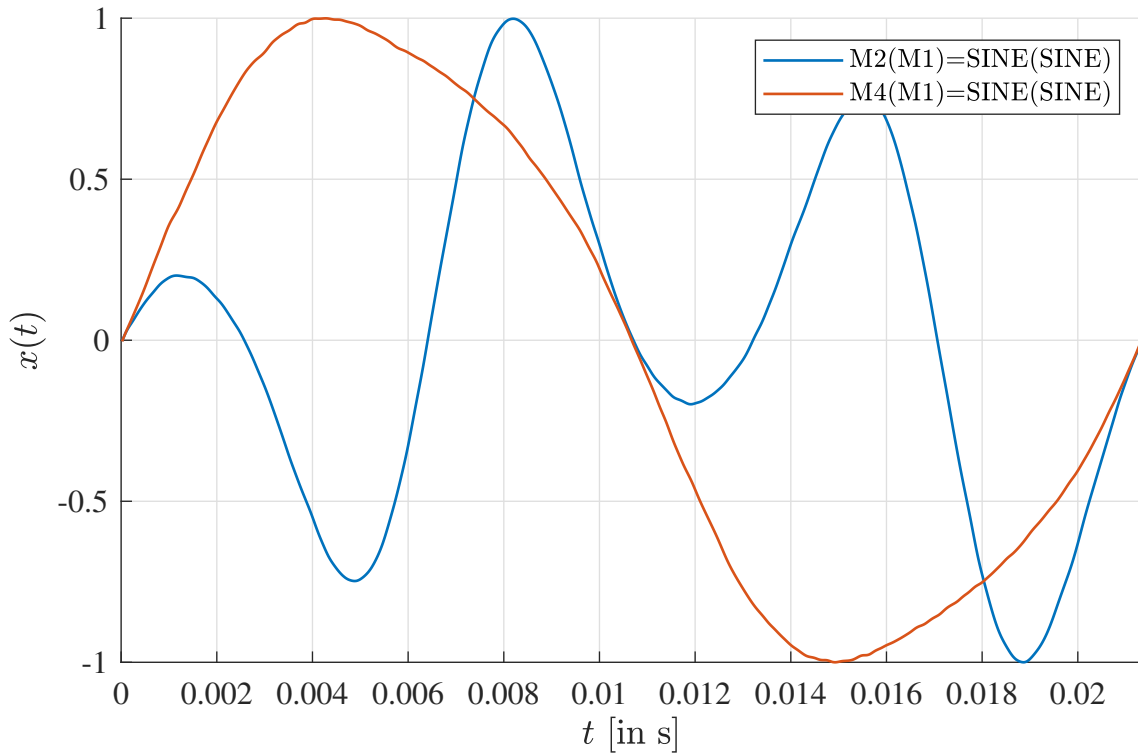
Abbildung 41: Verhalten der SAW5 Wellenform bei Erhöhung der Tonhöhe um jeweils eine Oktave (auf festen Endpunkt skaliert)



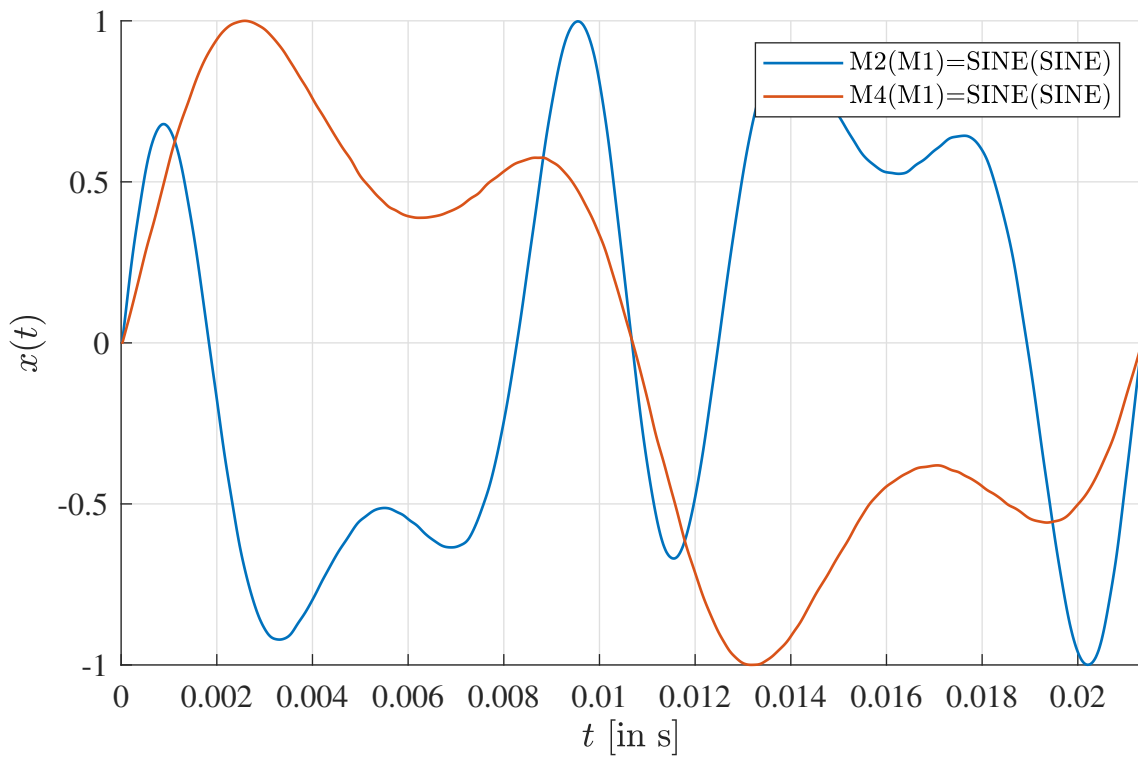
(a) ENV DEPTH=00



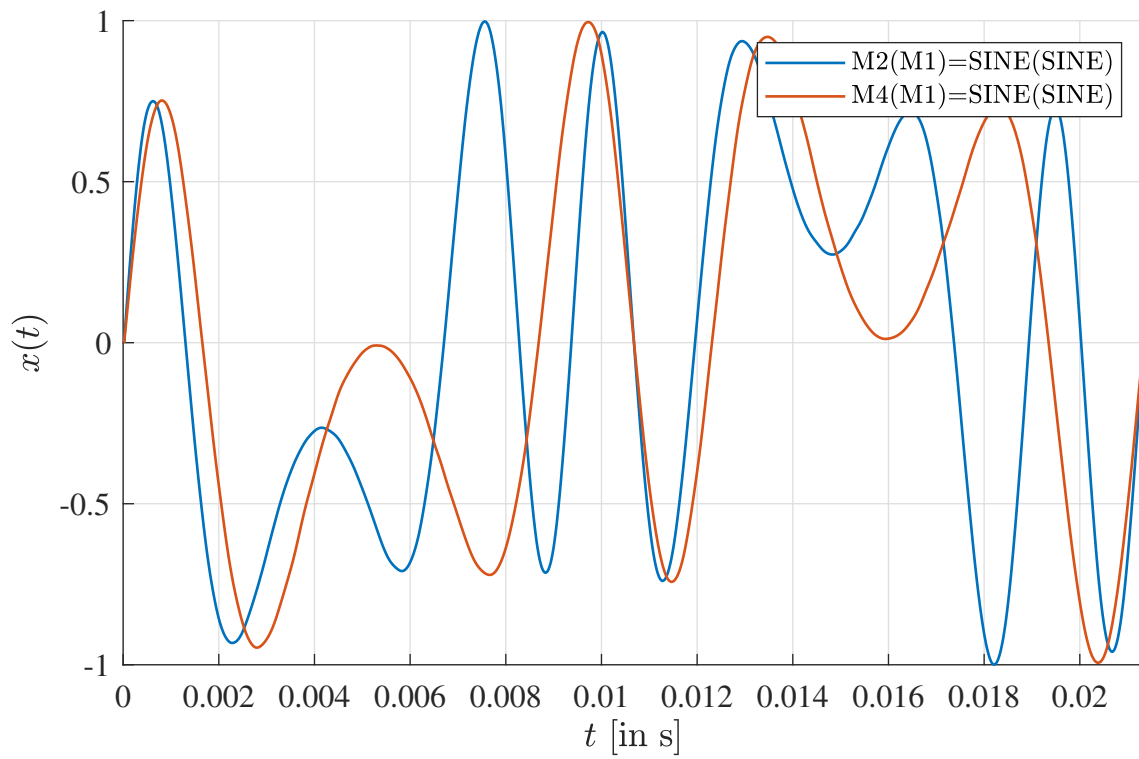
(b) ENV DEPTH=20



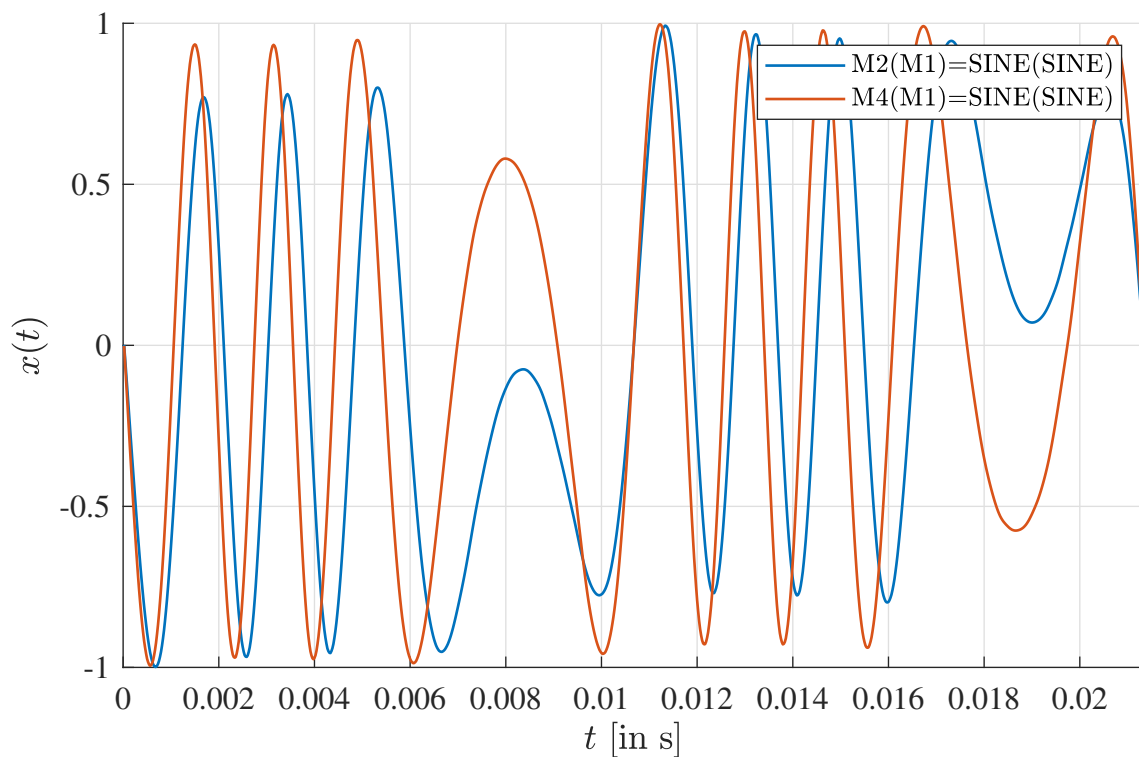
(c) ENV DEPTH=40



(d) ENV DEPTH=59

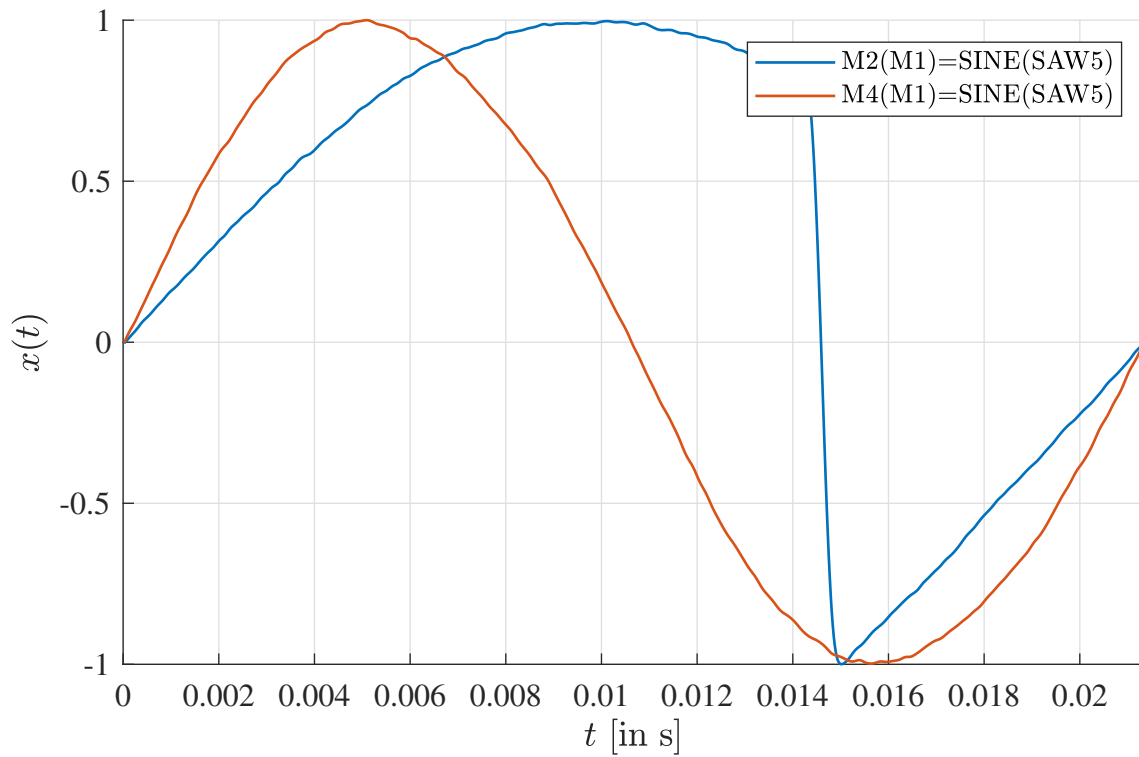


(e) ENV DEPTH=79

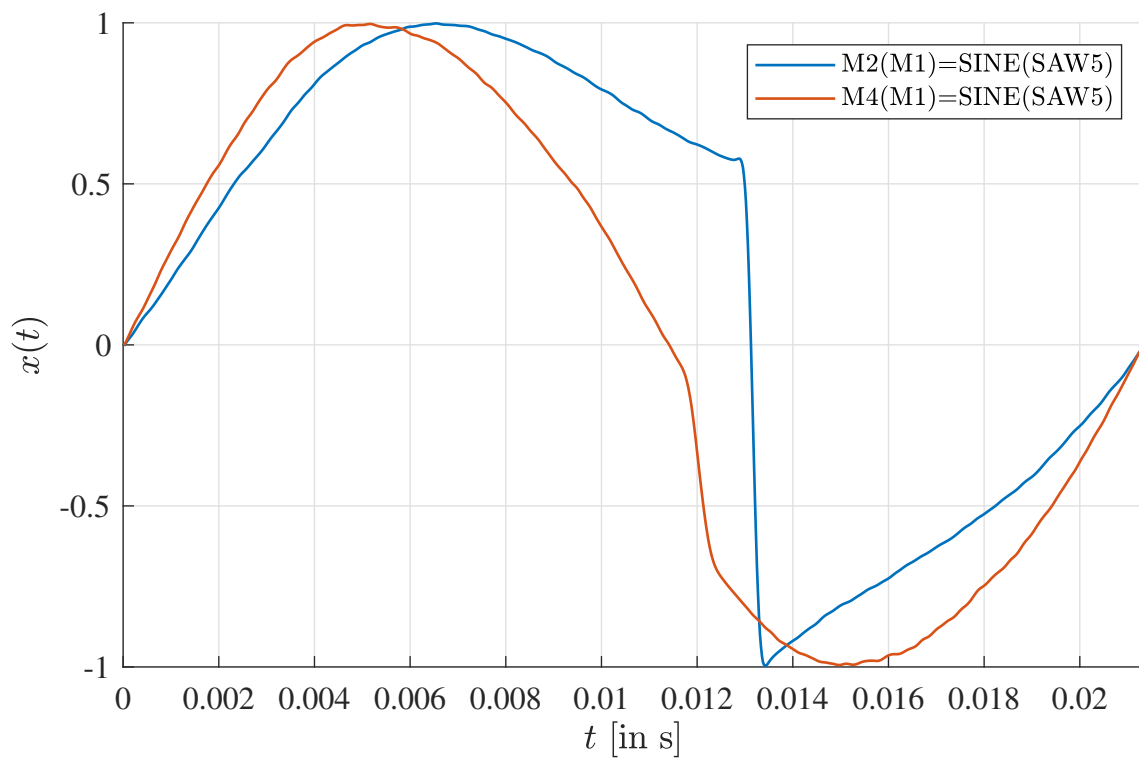


(f) ENV DEPTH=99

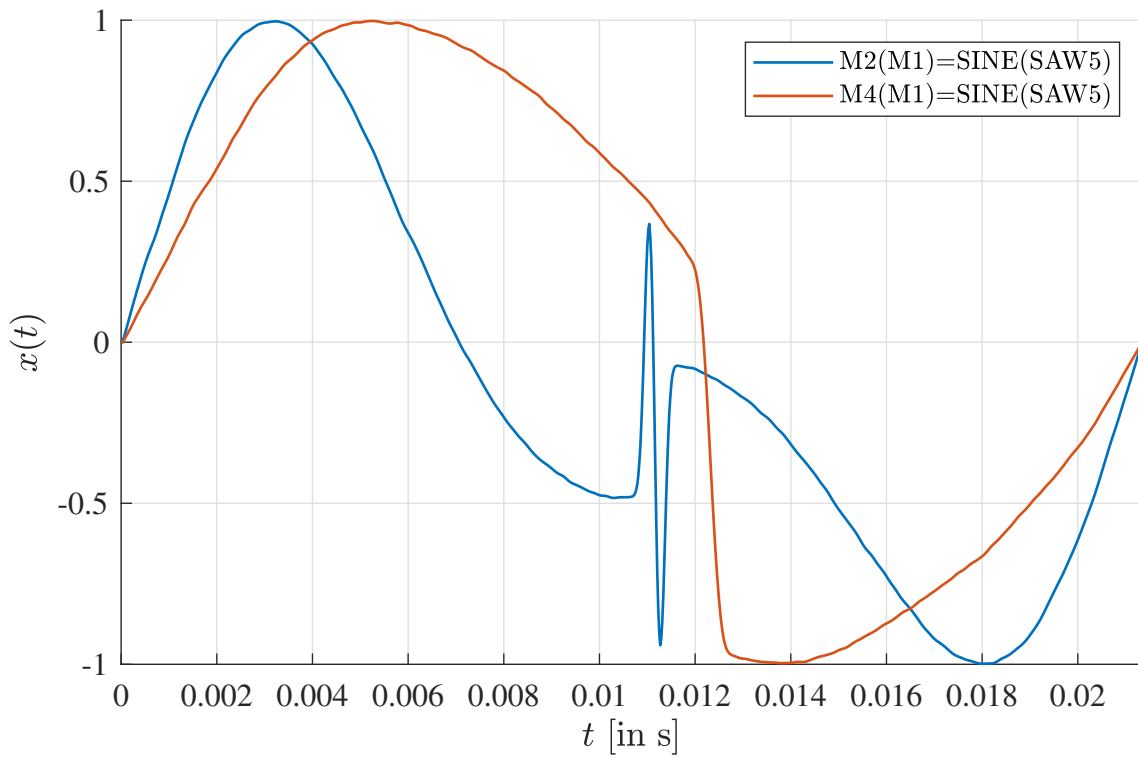
Abbildung 42: Vergleich  $M2(M1)$  und  $M4(M1)$  mit jeweils  $SINE(SINE)$



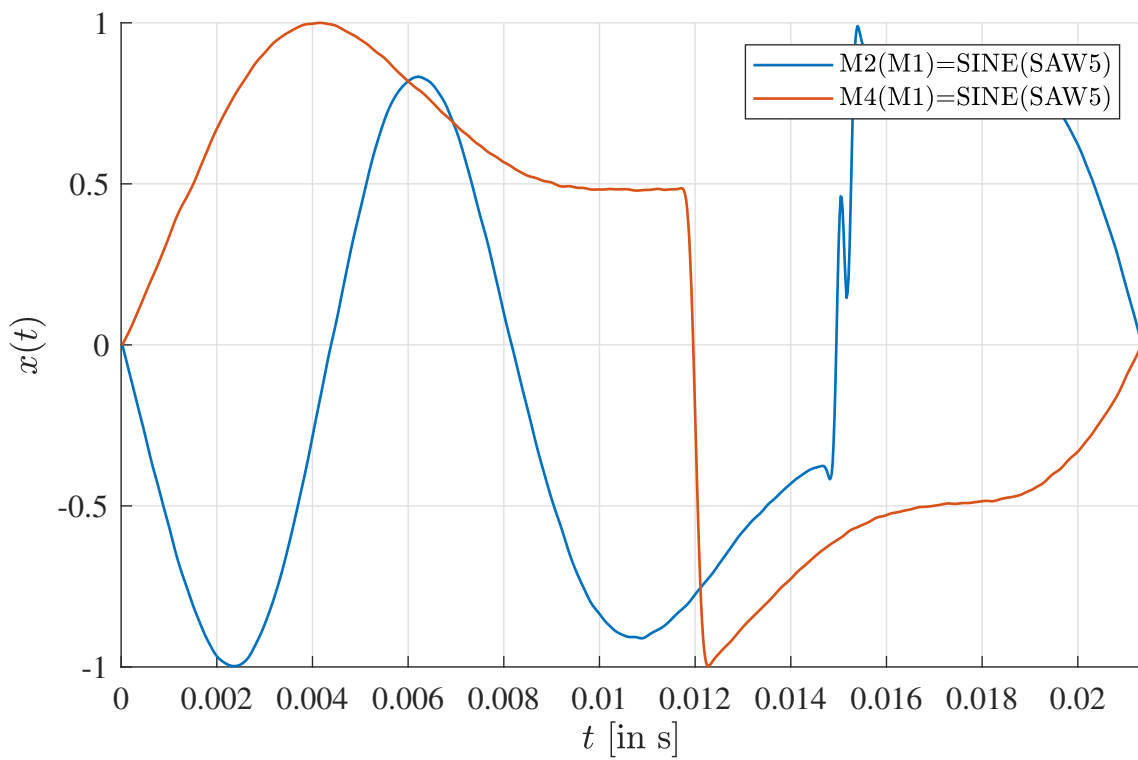
(a) ENV DEPTH=00



(b) ENV DEPTH=20



(c) ENV DEPTH=40



(d) ENV DEPTH=59

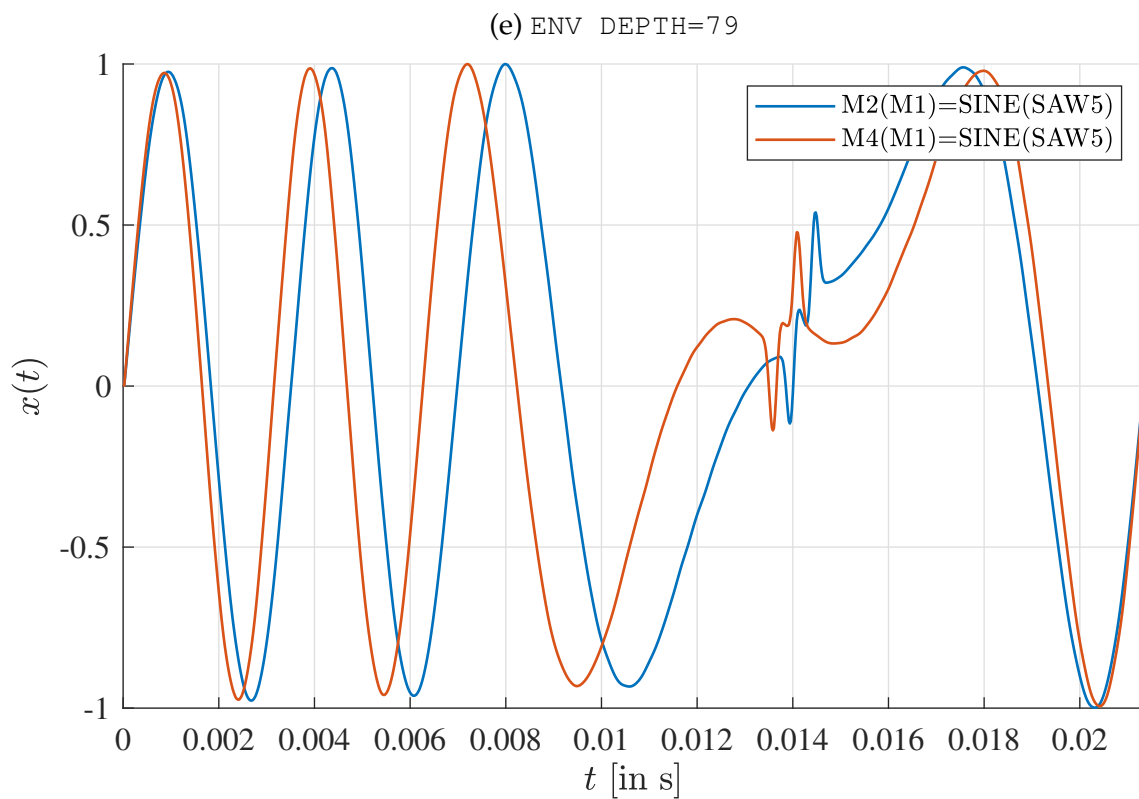
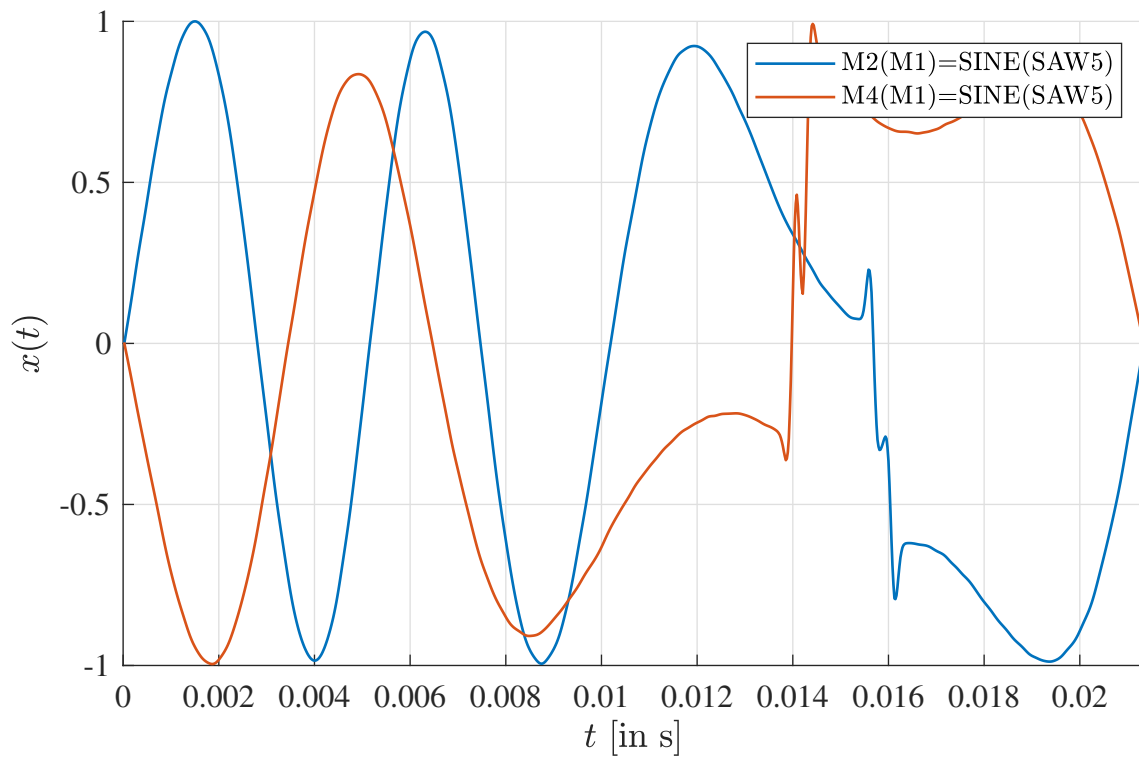


Abbildung 43: Vergleich unterschiedlicher Modulationstiefen der internen und externen Phasenmodulation mit SINE (SAW5)

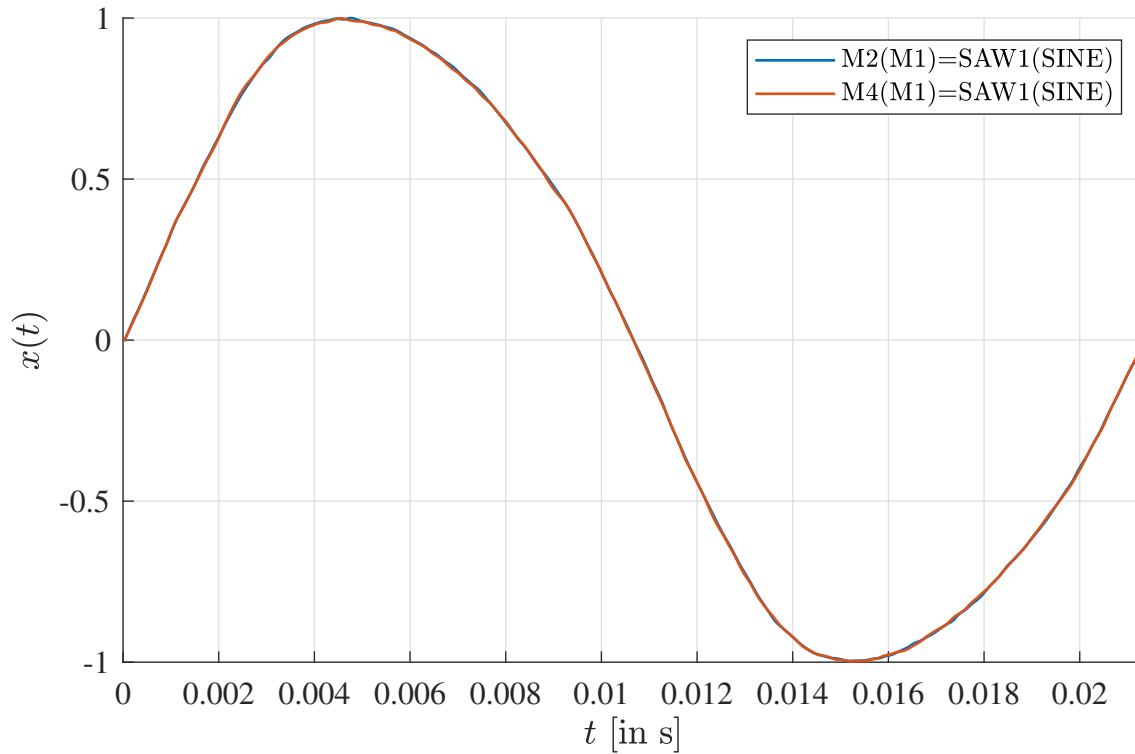


Abbildung 44: Vergleich M2 (M1) und M4 (M1) mit M2, M4=SAW1 und ENV DEPTH=00

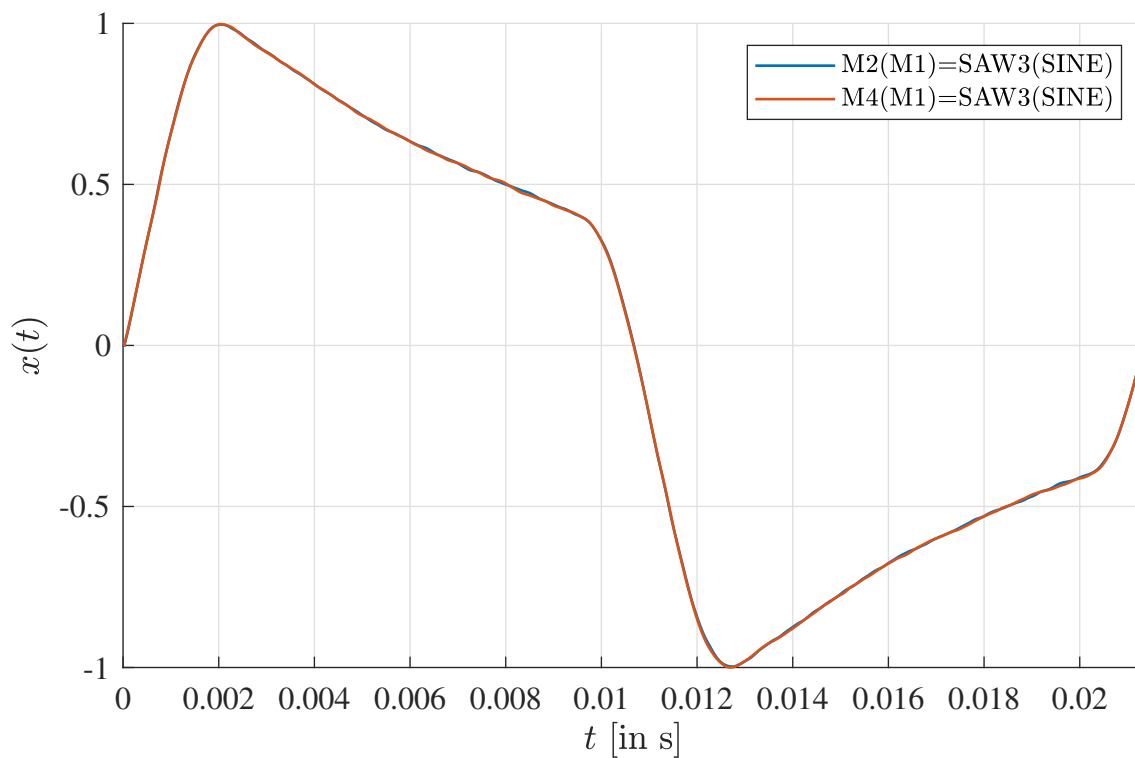
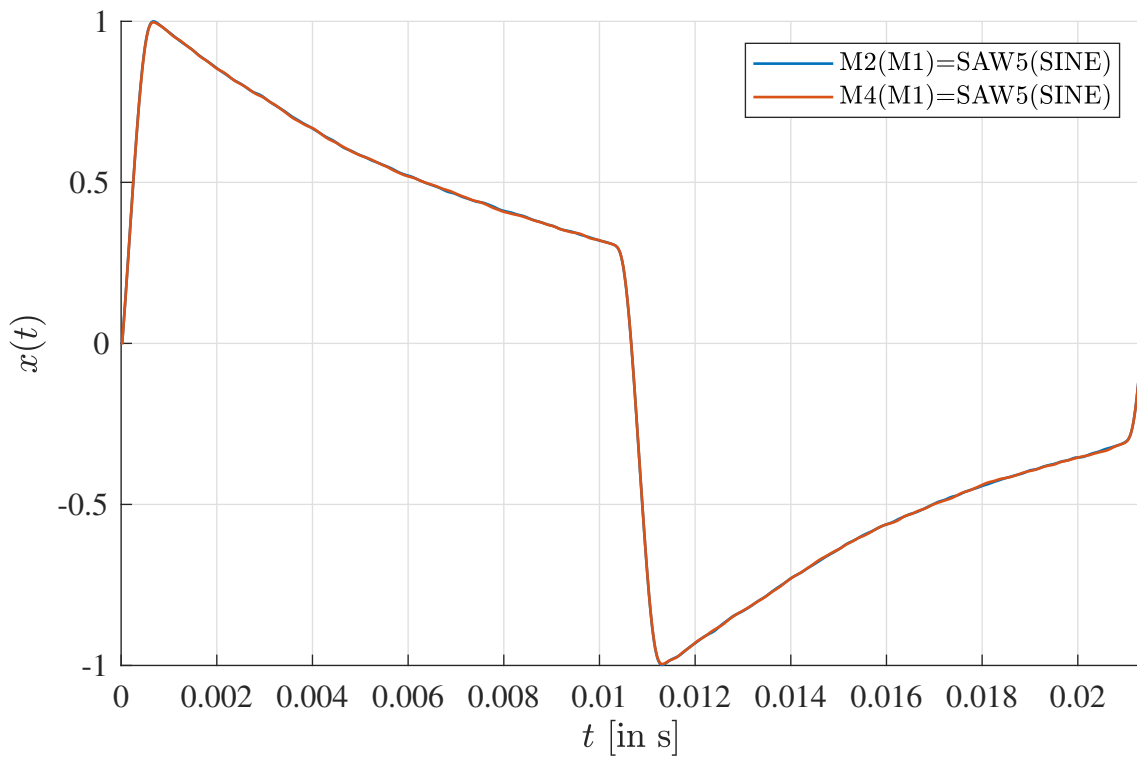
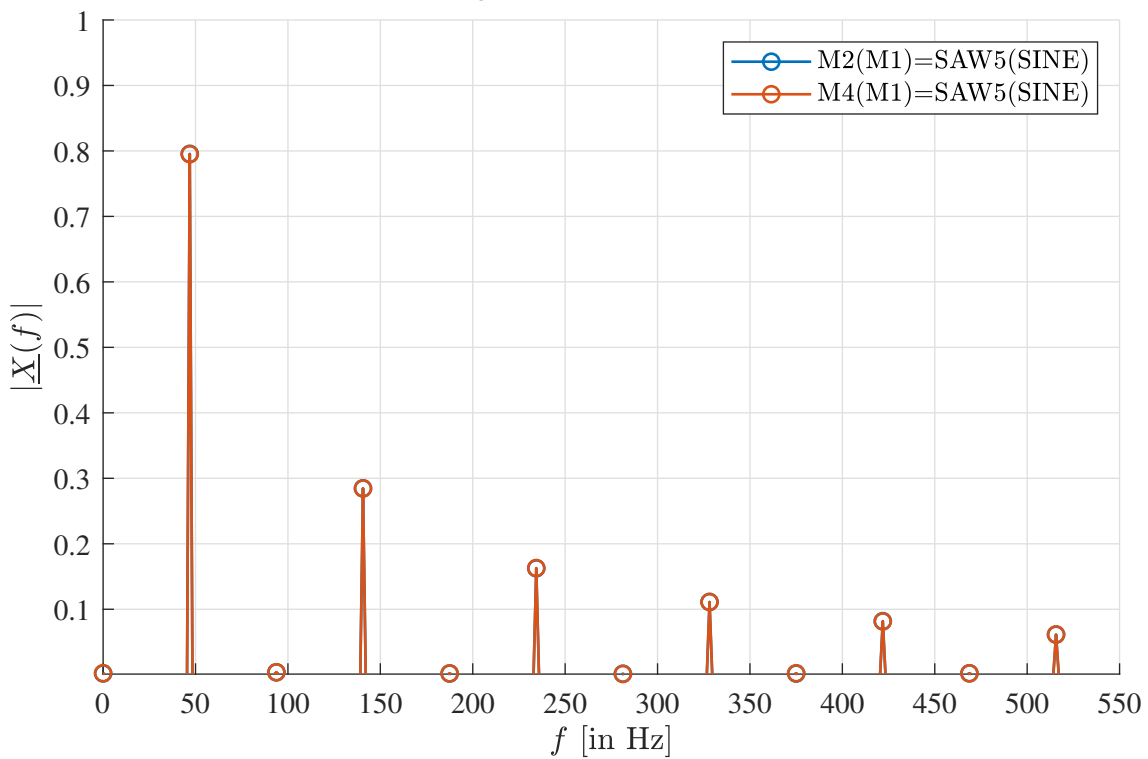


Abbildung 45: Vergleich M2 (M1) und M4 (M1) mit M2, M4=SAW3 und ENV DEPTH=00



(a) Signalverlauf im Zeitbereich



(b) Betragsspektrum <sup>a</sup>

<sup>a</sup> $|\underline{X}(f)|$ -Achse beginnt bei 0,001

Abbildung 46: Vergleich M2 (M1) und M4 (M1) mit SAW5 (SINE) und ENV DEPTH=00

### B.3 Hypothesen

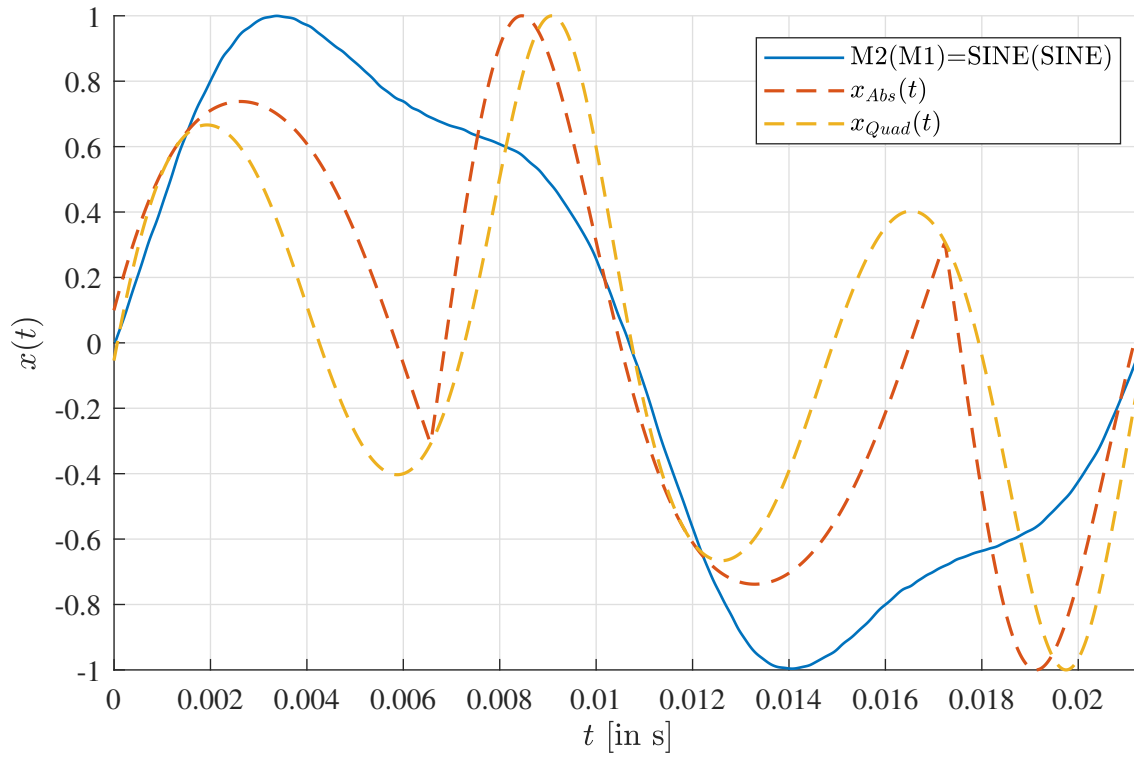
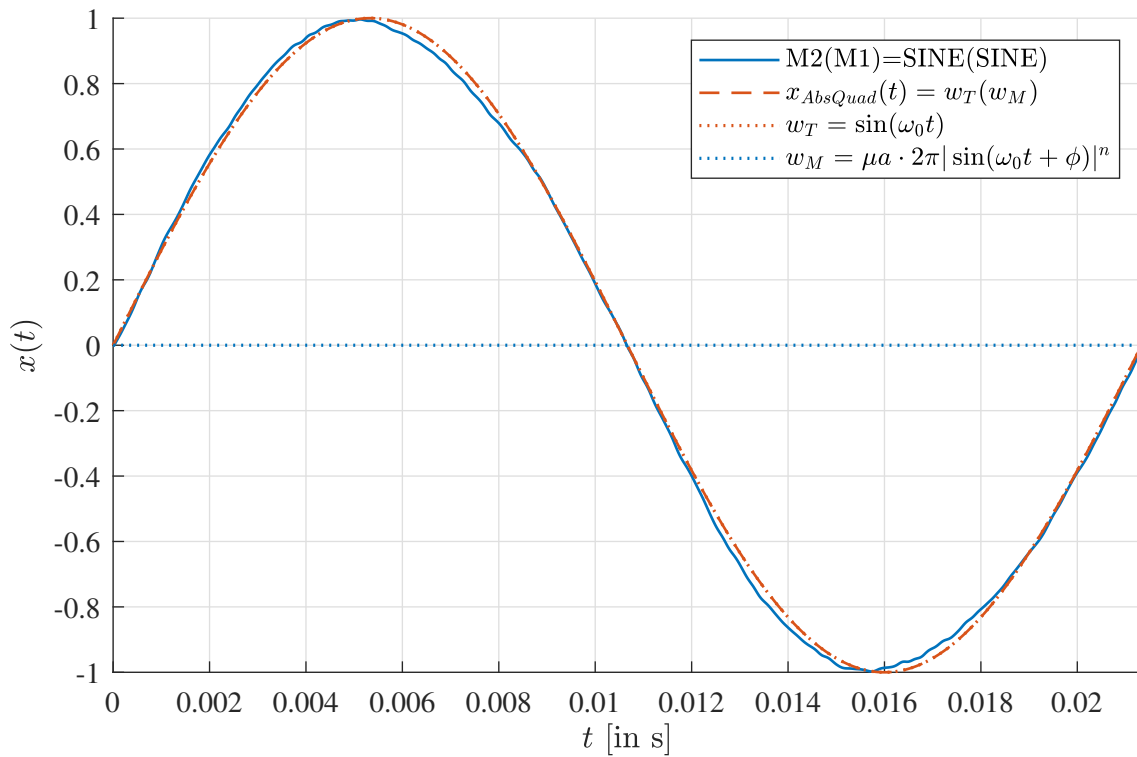
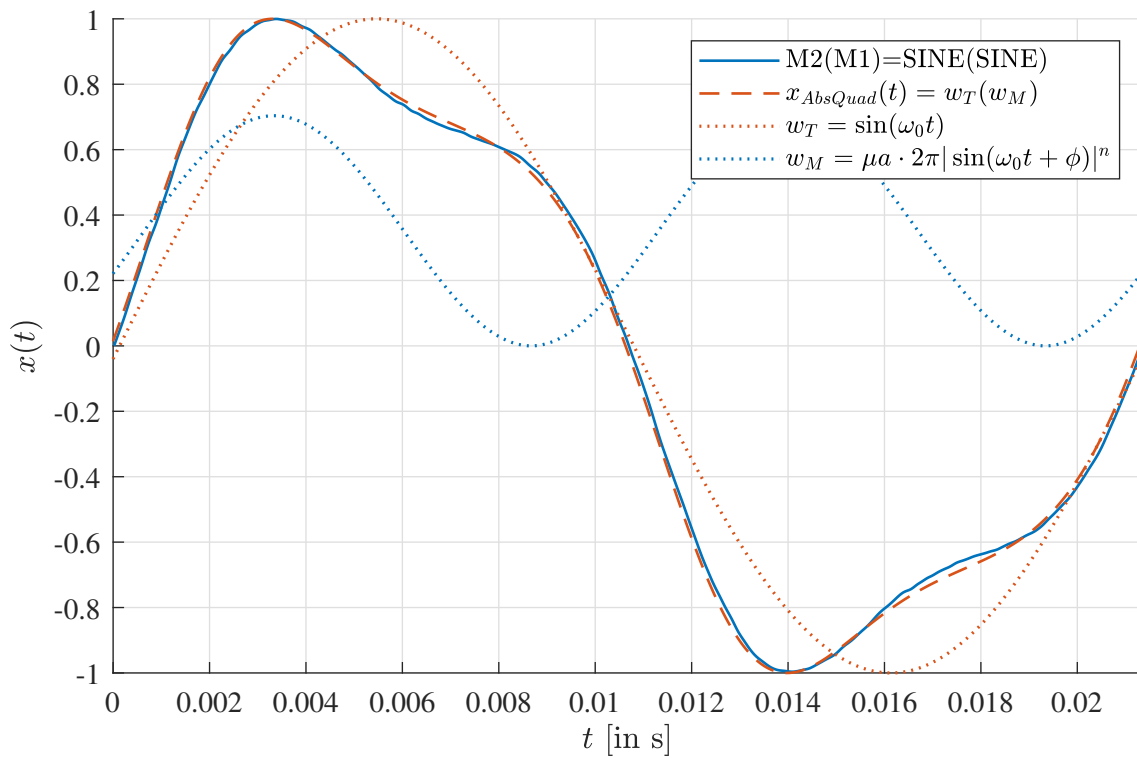


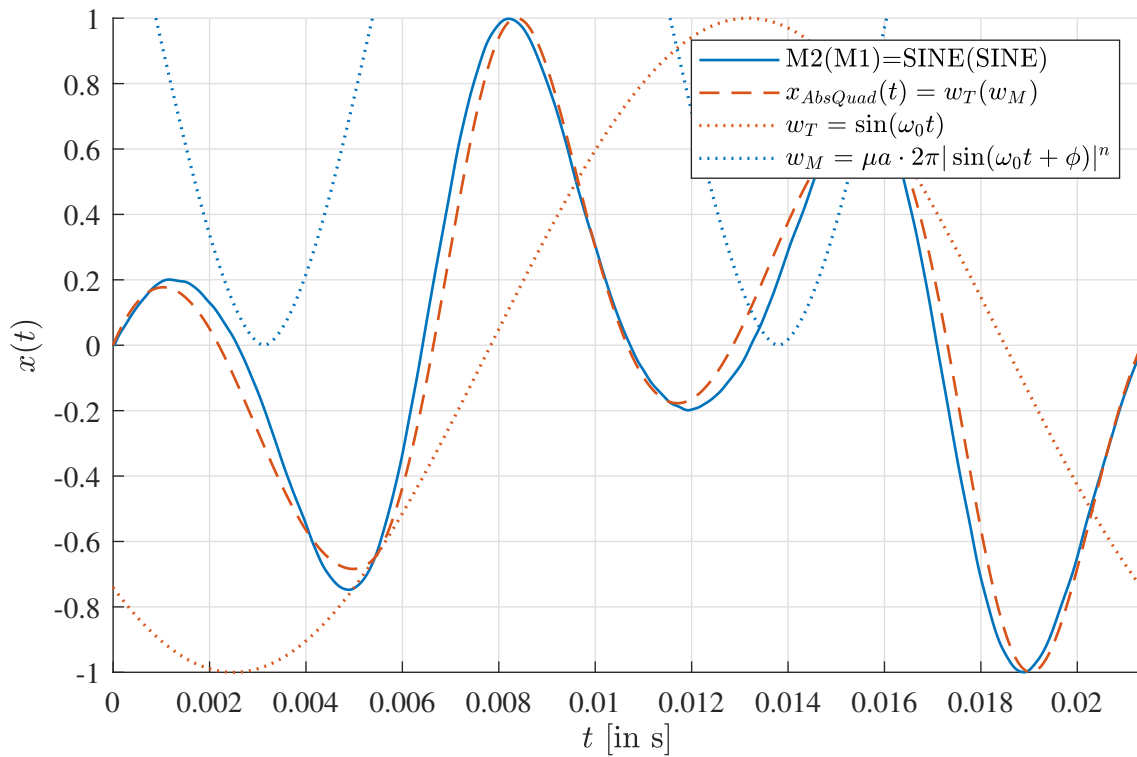
Abbildung 47: Vergleich der anfänglichen Hypothesen mit  $ED = 20$



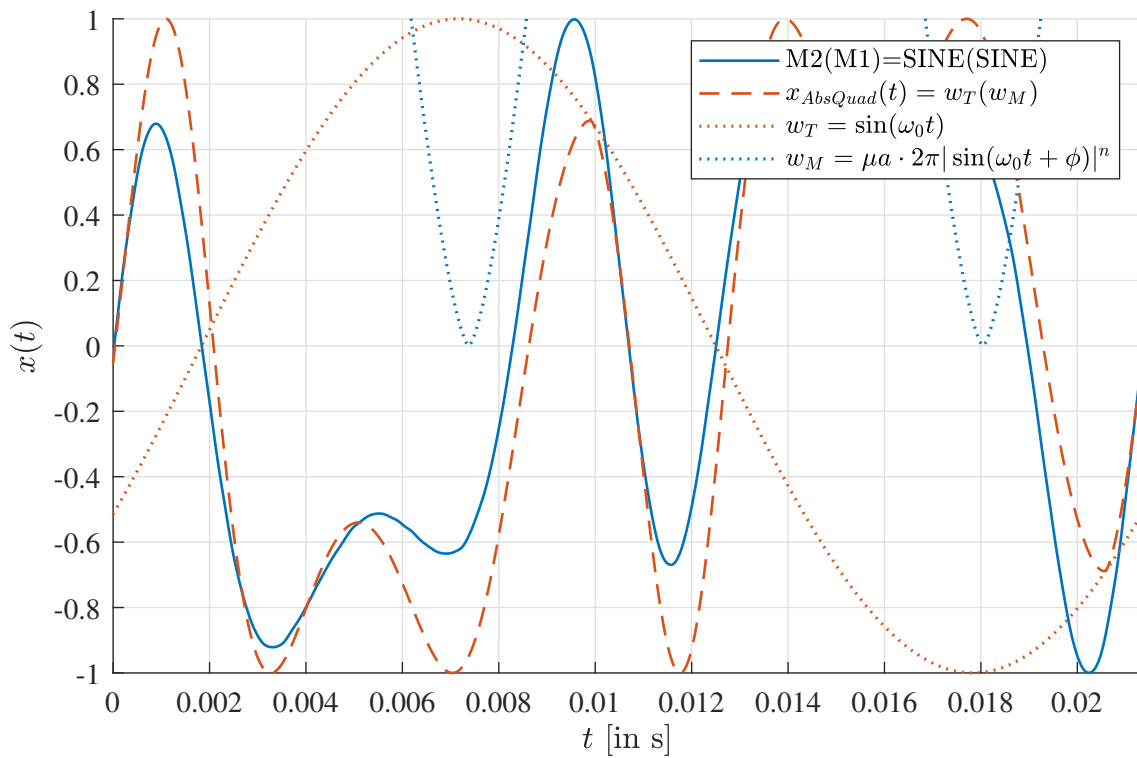
(a)  $ED = 00$



(b)  $ED = 20$



(c)  $ED = 40$



(d)  $ED = 59$

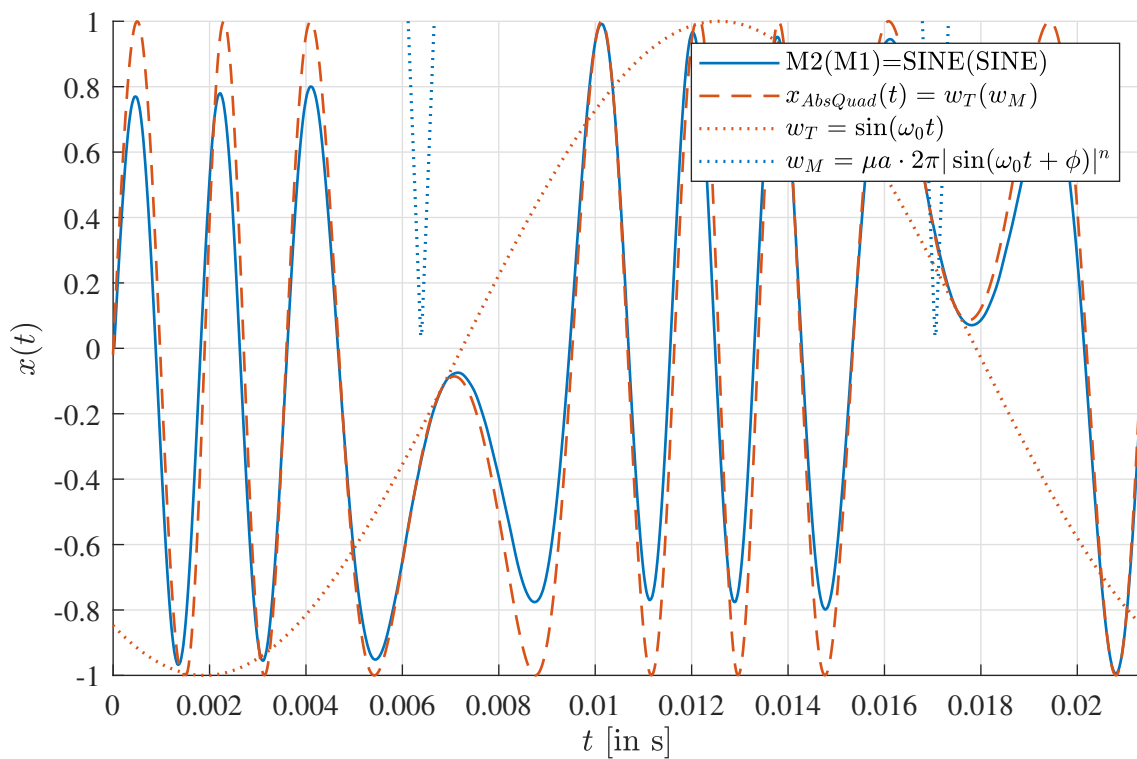
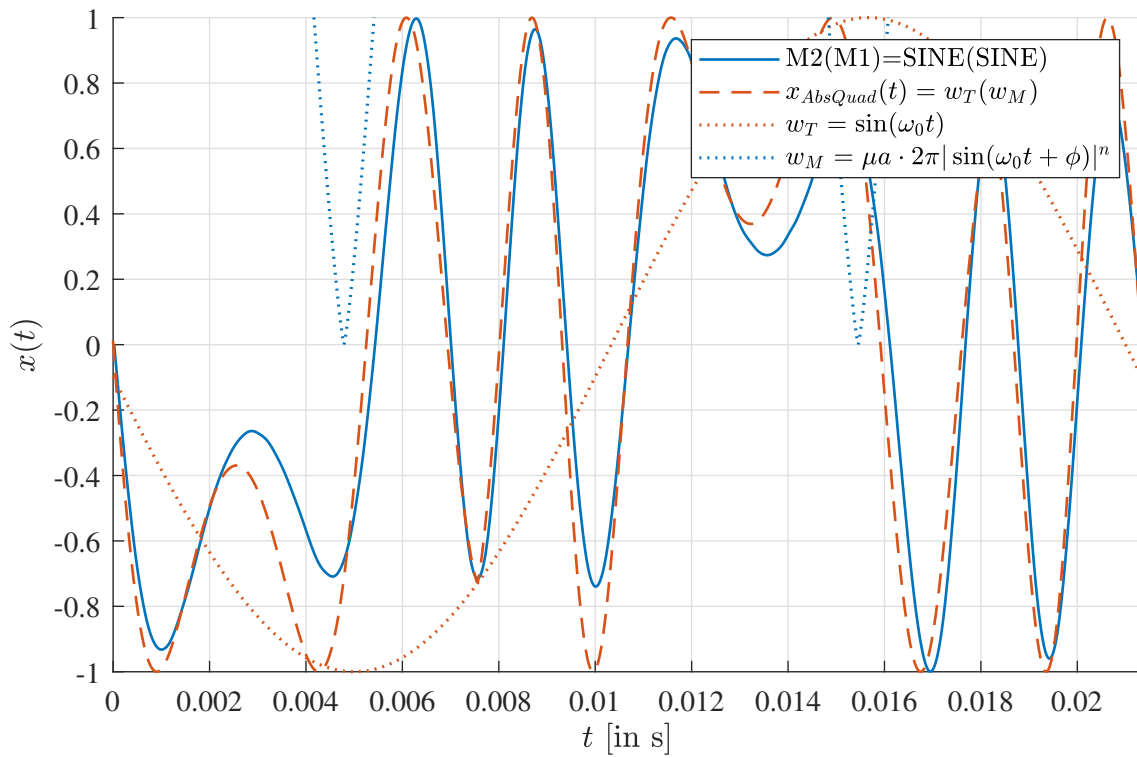
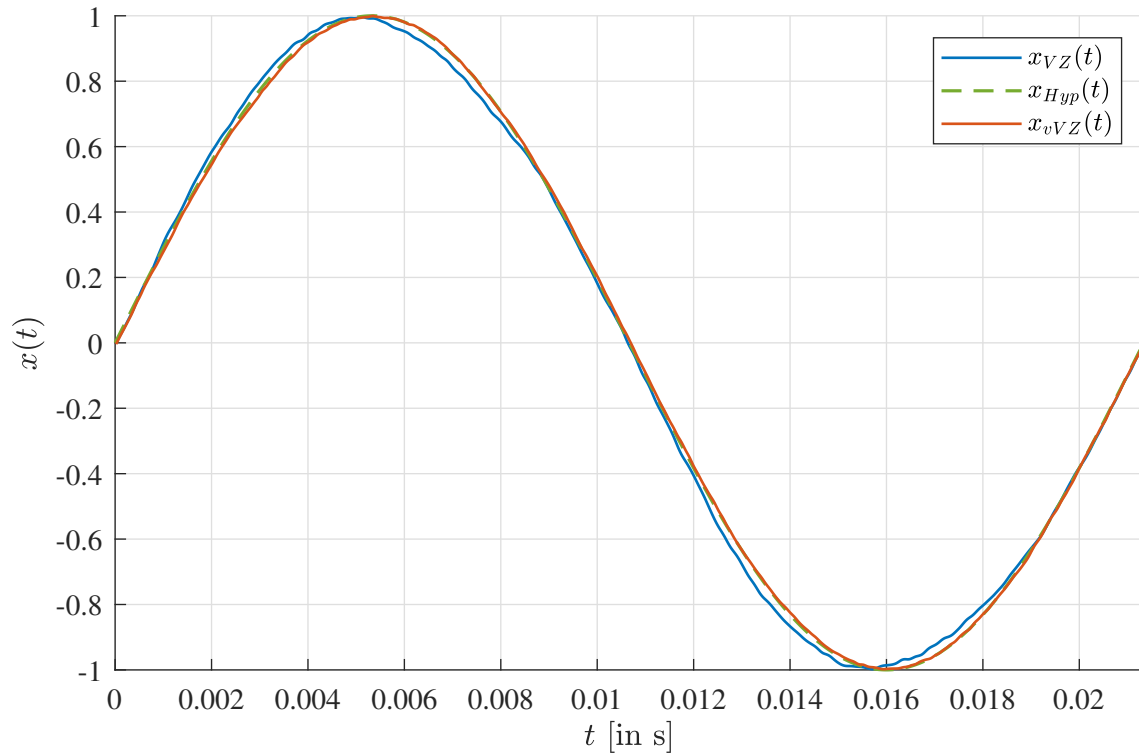
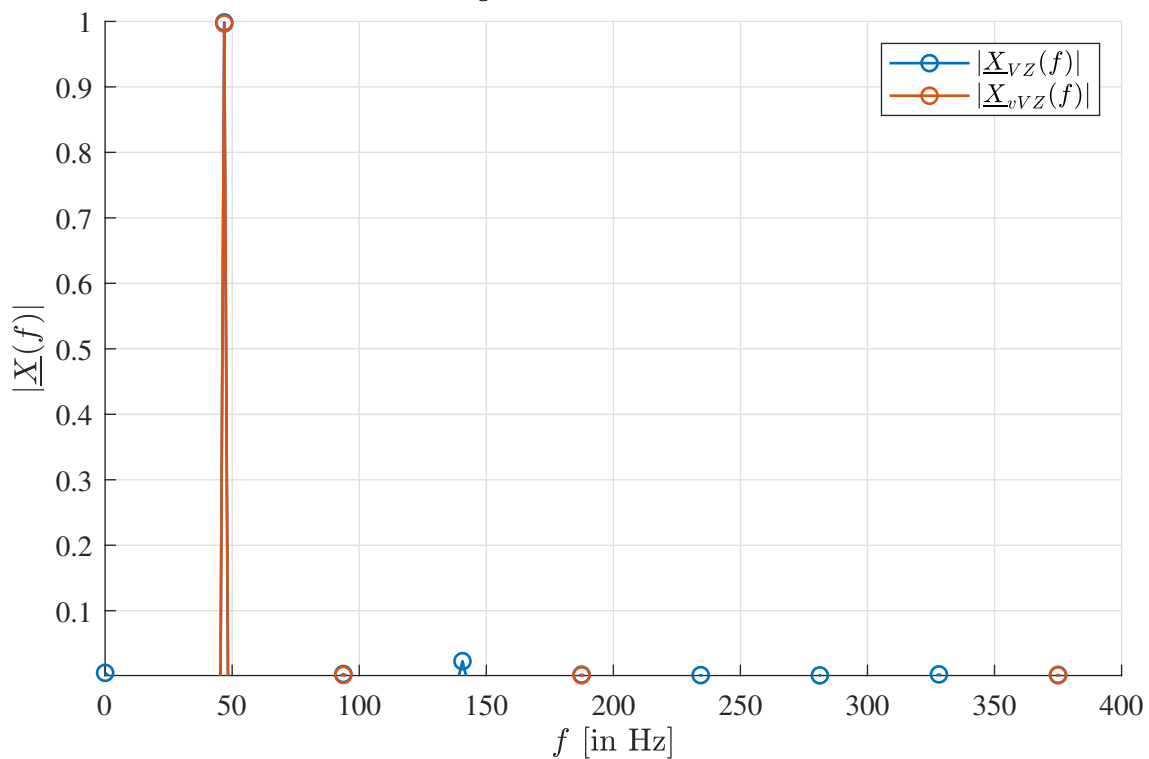


Abbildung 48: Hypothese  $x_{AbsQuad}(t)$

### B.4 Vergleich VZ mit vVZ



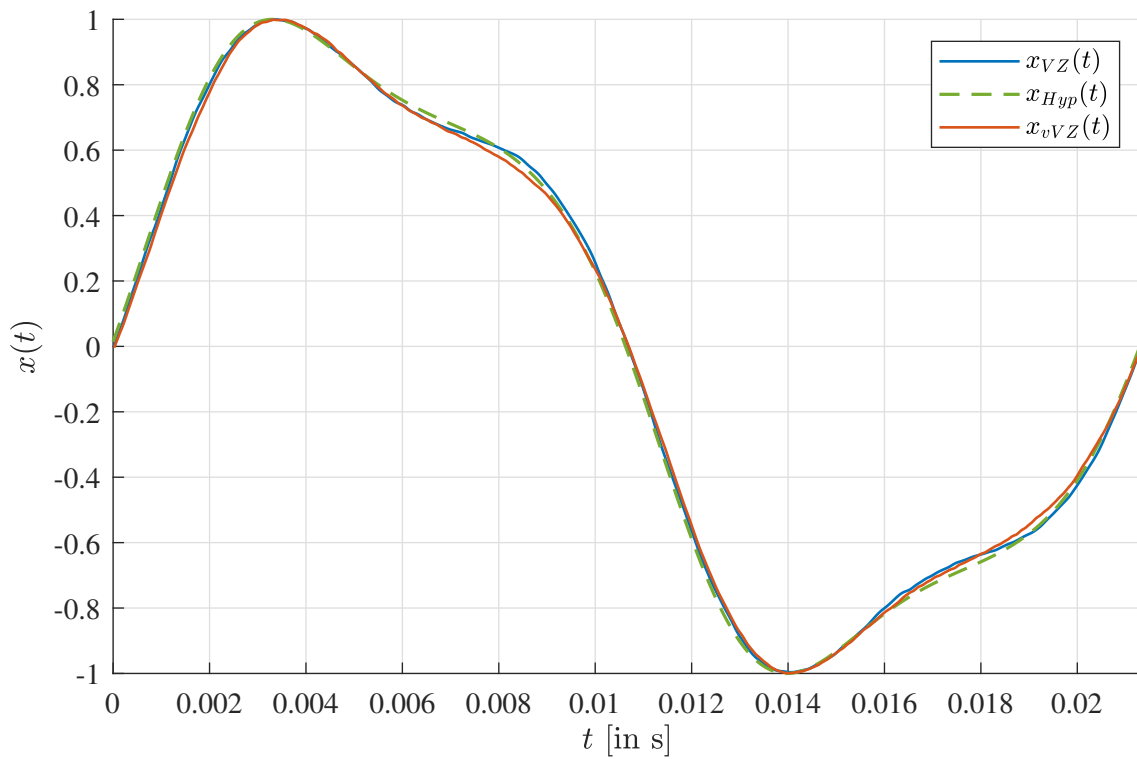
(a) Signalverlauf im Zeitbereich



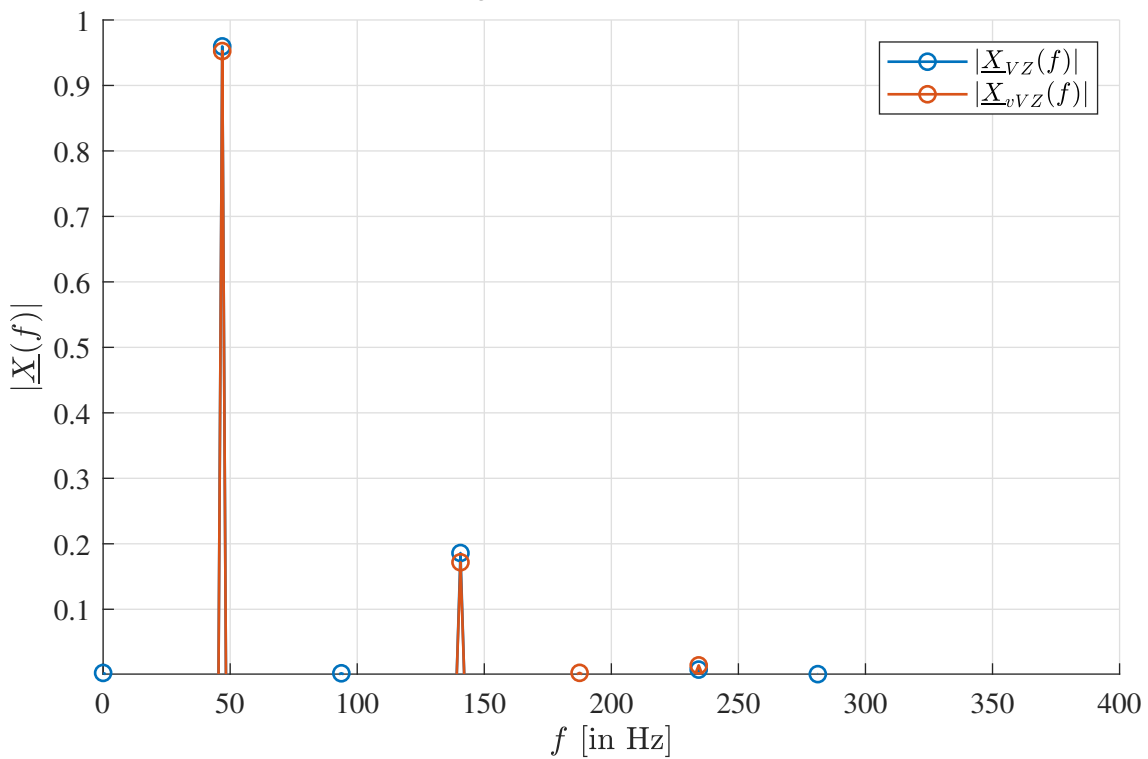
(b) Betragsspektrum <sup>a</sup>

<sup>a</sup> $|X(f)|$ -Achse beginnt bei 0,001

Abbildung 49: Vergleich VZ-Hypothese<sub>AbsQuad</sub>-vVZ mit  $ED = 00$



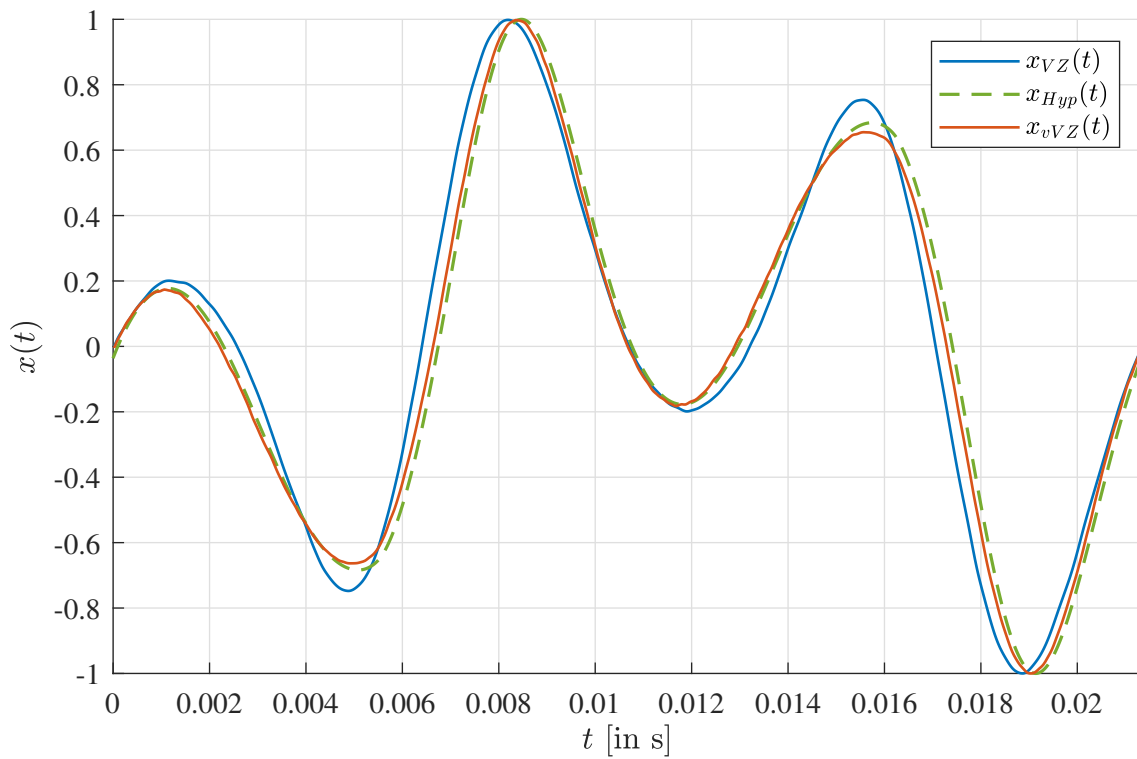
(a) Signalverlauf im Zeitbereich



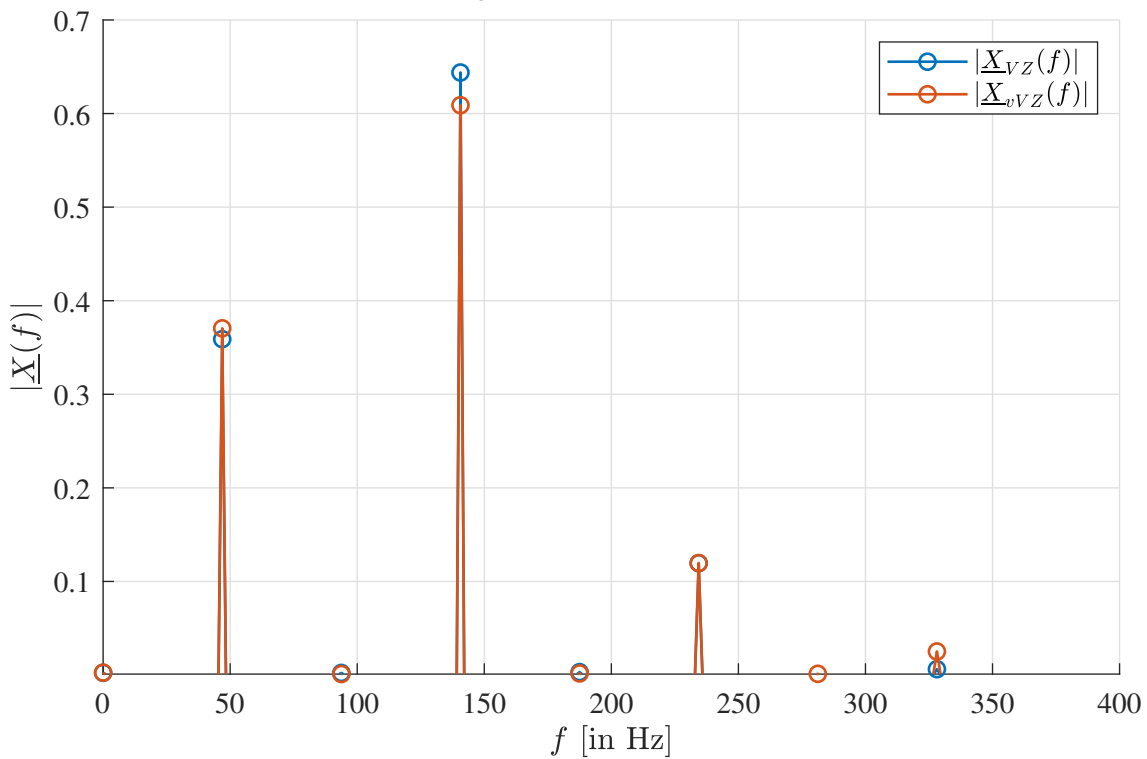
(b) Betragsspektrum <sup>a</sup>

<sup>a</sup> $|X(f)|$ -Achse beginnt bei 0,001

Abbildung 50: Vergleich VZ-Hypothese<sub>AbsQuad</sub>-vVZ mit  $ED = 20$



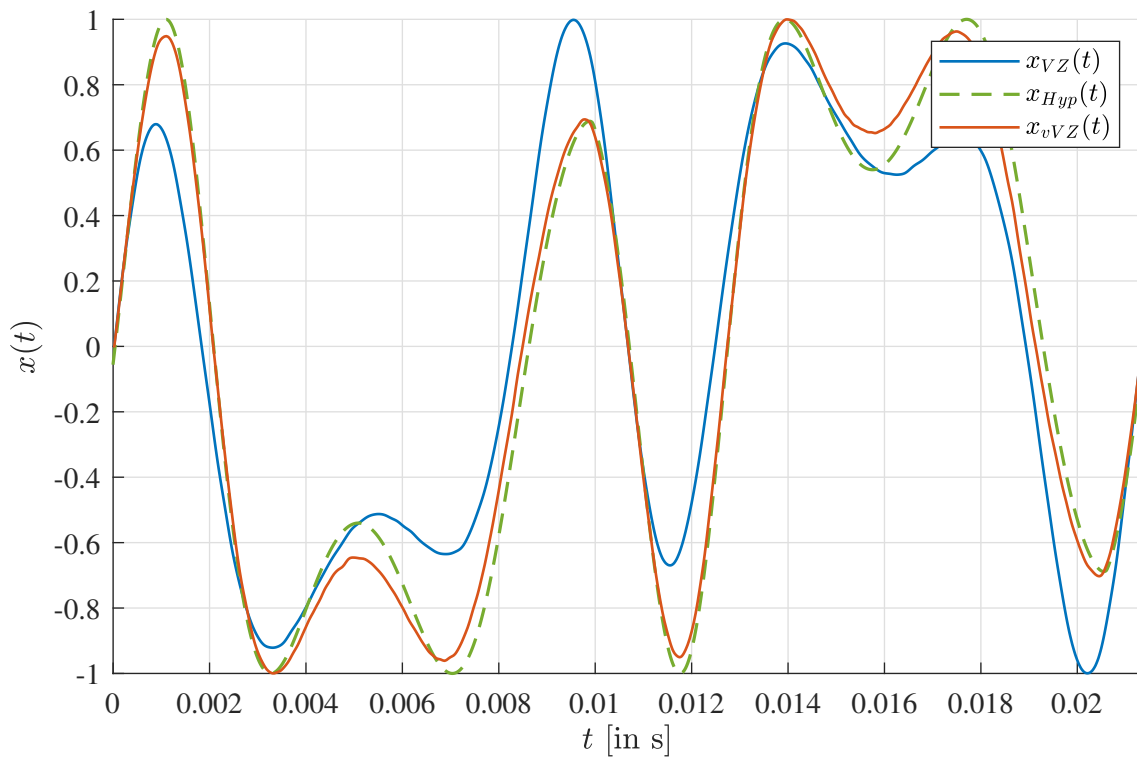
(a) Signalverlauf im Zeitbereich



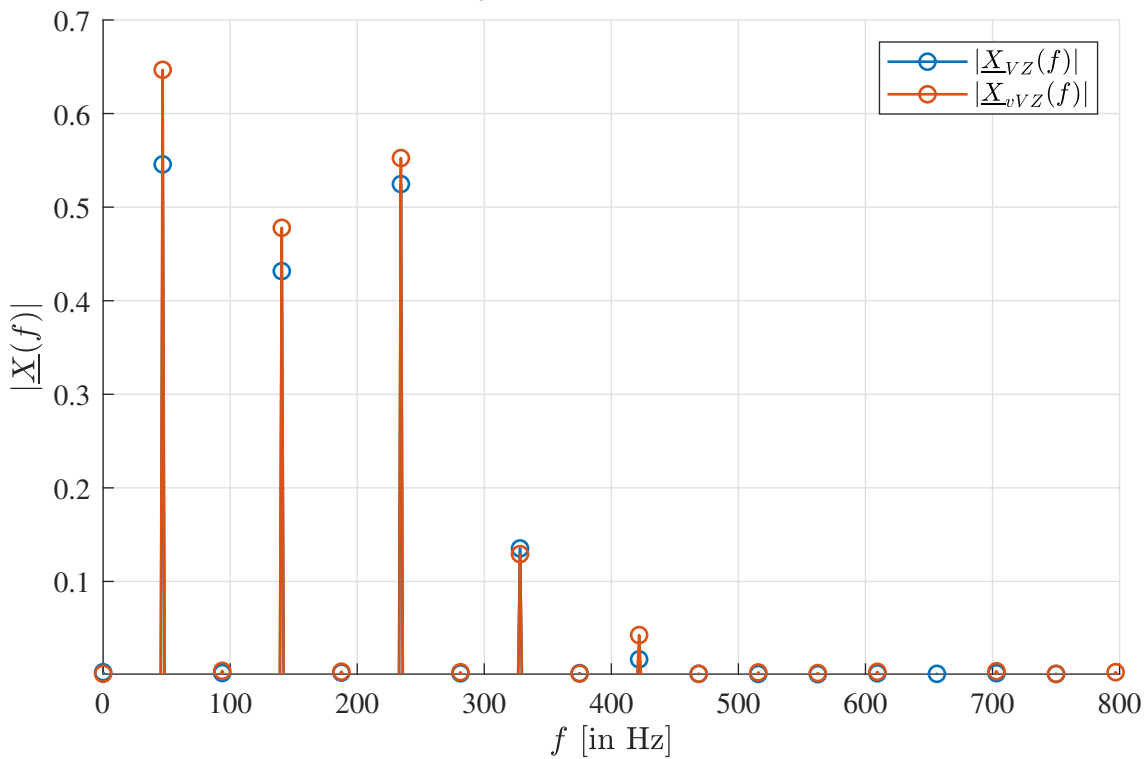
(b) Betragsspektrum <sup>a</sup>

<sup>a</sup> $|\underline{X}(f)|$ -Achse beginnt bei 0,001

Abbildung 51: Vergleich VZ-Hypothese<sub>AbsQuad</sub>-vVZ mit  $ED = 40$



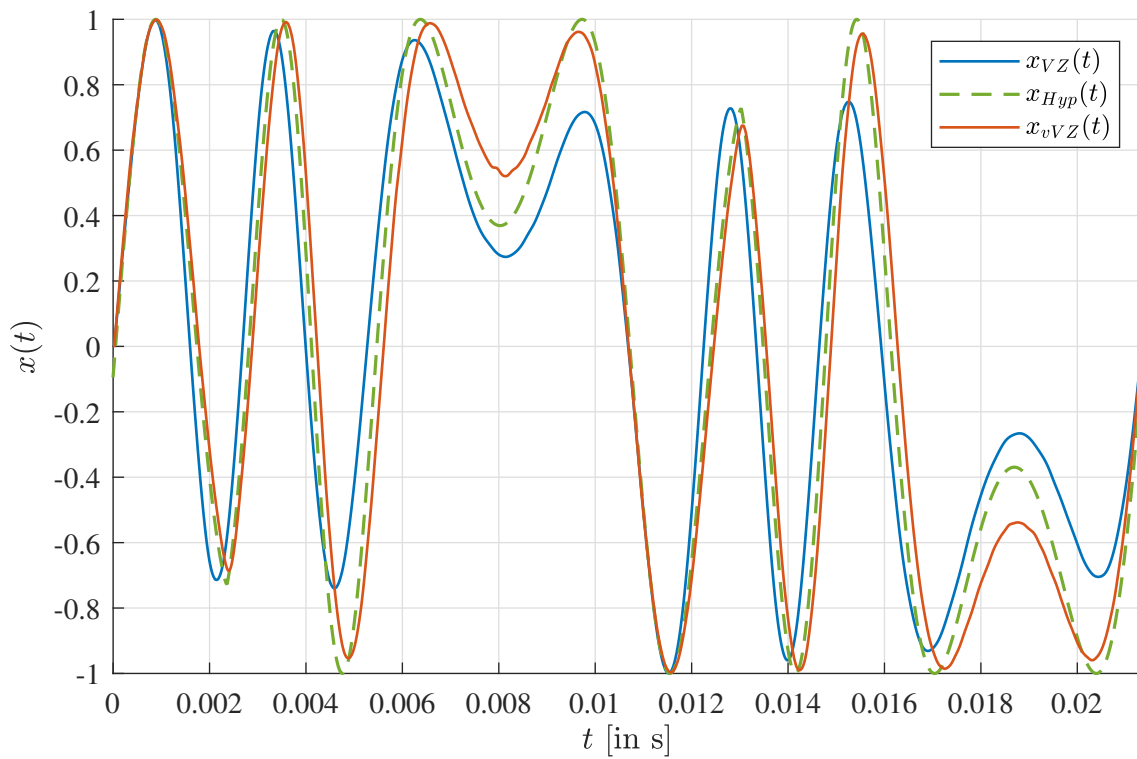
(a) Signalverlauf im Zeitbereich



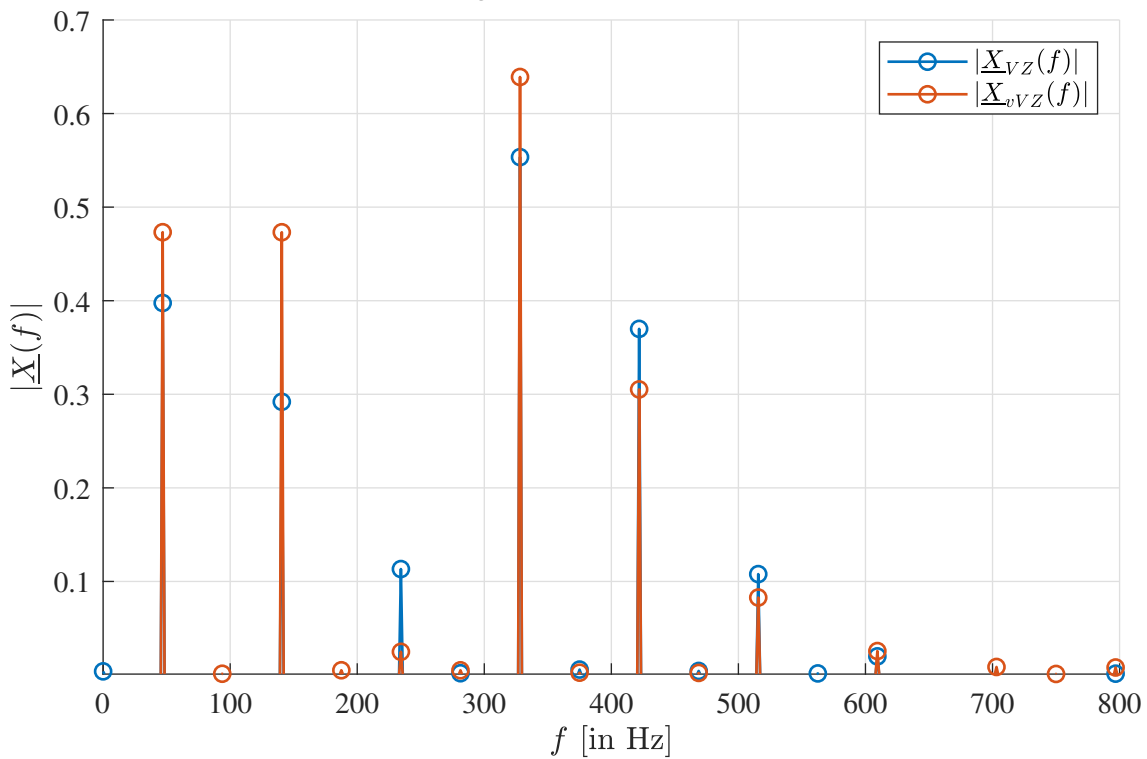
(b) Betragsspektrum <sup>a</sup>

<sup>a</sup> $|\underline{X}(f)|$ -Achse beginnt bei 0,001

Abbildung 52: Vergleich VZ-Hypothese<sub>AbsQuad</sub>-vVZ mit  $ED = 59$



(a) Signalverlauf im Zeitbereich



(b) Betragsspektrum <sup>a</sup>

<sup>a</sup> $|\underline{X}(f)|$ -Achse beginnt bei 0,001

Abbildung 53: Vergleich VZ-Hypothese<sub>AbsQuad</sub>-vVZ mit  $ED = 79$

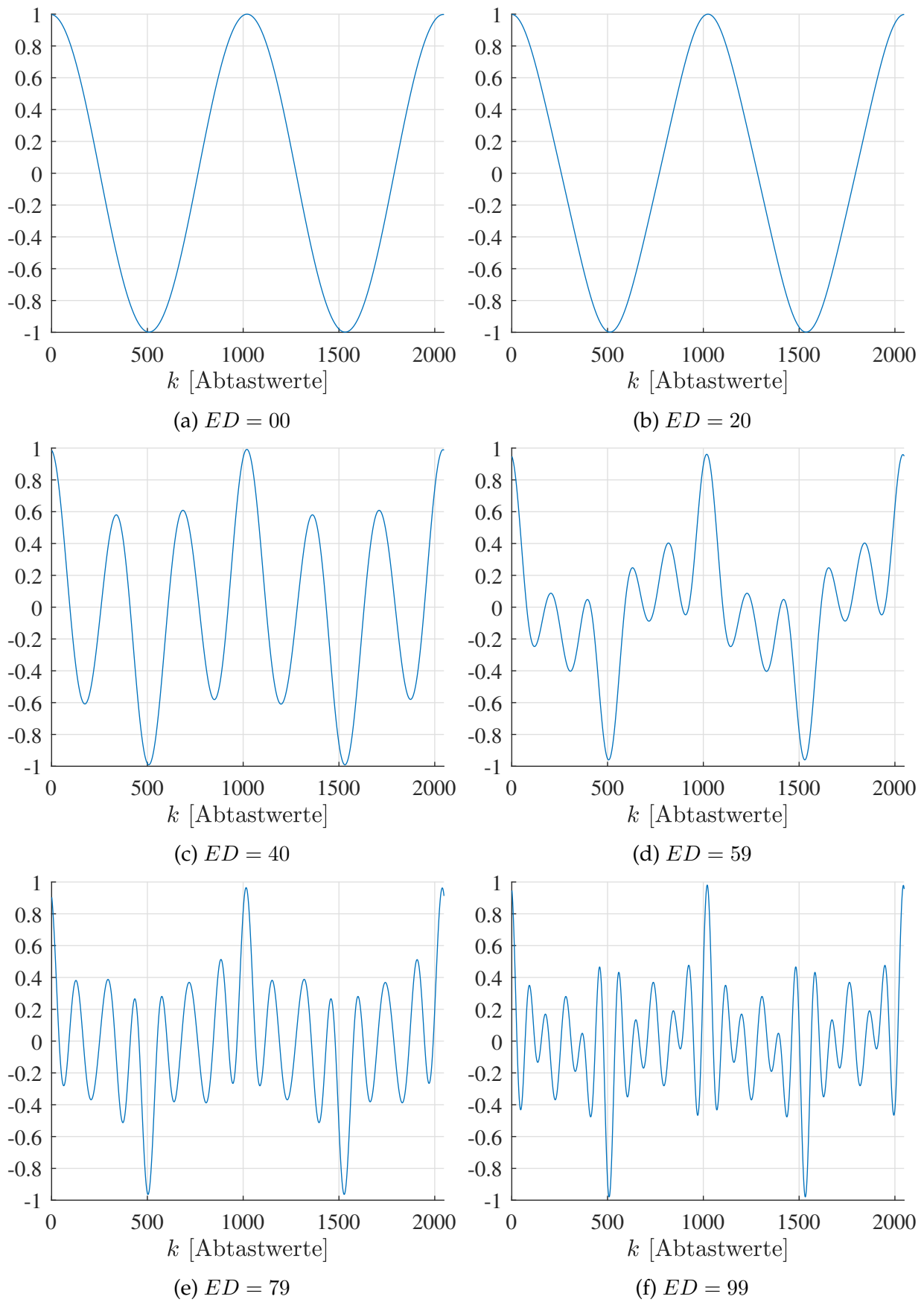


Abbildung 54:  $\psi_{vZ,vZ}(k)$  mit  $M2 (M1) = \text{SINE} (\text{SINE})$

## C Tabellen

Tabelle 10:  $\phi$  in Abhängigkeit von  $ED$ 

<b>ED</b>	$\phi$
00	0
01	0,00252525252525253
02	0,00505050505050505
03	0,00757575757575758
04	0,0101010101010101
05	0,0126262626262626
06	0,0151515151515152
07	0,0176767676767677
08	0,0202020202020202
09	0,0227272727272727
10	0,0252525252525253
11	0,0277777777777778
12	0,0303030303030303
13	0,0328282828282828
14	0,0353535353535354
15	0,0378787878787879
16	0,0404040404040404
17	0,0429292929292929
18	0,0454545454545455
19	0,047979797979798
20	0,0506060606060606
21	0,0536363636363636
22	0,0566666666666667
23	0,0596969696969697
24	0,0627272727272727
25	0,0657575757575758
26	0,0687878787878788
27	0,0718181818181818
28	0,0748484848484849
29	0,0778787878787879
30	0,0809090909090909
weitergef. auf der nächsten Seite	

Tabelle 10 – weitergef. von der vorherigen Seite

ED	$\phi$
31	0,083939393939394
32	0,086969696969697
33	0,09
34	0,093030303030303
35	0,0960606060606061
36	0,0990909090909091
37	0,102121212121212
38	0,105151515151515
39	0,108181818181818
40	0,1102020202020202
41	0,11070707070707071
42	0,111212121212121
43	0,11171717171717172
44	0,112222222222222
45	0,11272727272727273
46	0,113232323232323
47	0,11373737373737374
48	0,114242424242424
49	0,11474747474747475
50	0,115252525252525
51	0,11575757575757576
52	0,116262626262626
53	0,116767676767677
54	0,117272727272727
55	0,117777777777778
56	0,118282828282828
57	0,118787878787879
58	0,119292929292929
59	0,1197979797979798
60	0,1203030303030303
61	0,120808080808081
62	0,121313131313131
63	0,121818181818182
weitergef. auf der nächsten Seite	

Tabelle 10 – weitergef. von der vorherigen Seite

ED	$\phi$
64	0,122323232323232
65	0,122828282828283
66	0,123333333333333
67	0,123838383838384
68	0,124343434343434
69	0,124848484848485
70	0,125353535353535
71	0,125858585858586
72	0,126363636363636
73	0,126868686868687
74	0,127373737373737
75	0,127878787878788
76	0,128383838383838
77	0,128888888888889
78	0,129393939393939
79	0,12989898989899
80	0,135252525252525
81	0,141818181818182
82	0,148383838383838
83	0,154949494949495
84	0,161515151515152
85	0,168080808080808
86	0,174646464646465
87	0,181212121212121
88	0,187777777777778
89	0,194343434343434
90	0,200909090909091
91	0,207474747474747
92	0,214040404040404
93	0,220606060606061
94	0,227171717171717
95	0,233737373737374
96	0,24030303030303
weitergef. auf der nächsten Seite	

Tabelle 10 – weitergef. von der vorherigen Seite

<b>ED</b>	$\phi$
97	0,246868686868687
98	0,253434343434343
99	0,26

## Literatur

- [1] Scott B. Metcalfe Andrea Pejrolo. *Creating Sounds from Scratch - A Practical Guide to Music Synthesis for Producers and Composers*. Oxford University Press, 1st edition, 2017. ISBN: 978-0-19-992189-8.
- [2] Casio Computer Co., Ltd. *Casio VZ-1 User Manual*, 1988. Available online: <https://www.manualslib.com/manual/358586/Casio-Vz-1.html#product-VZ-1>.
- [3] Casio Computer Co., Ltd. *Casio VZ-10M Operation Manual*, 1988. Available online: <https://www.manualslib.com/manual/3324802/Casio-Vz-10m.html>.
- [4] Nick Collins. *Introduction to Computer Music*. John Wiley and Sons Ltd, 1st edition, 2010. ISBN: 978-0-47-071455-3.
- [5] Focusrite. *Scarlett 8i6 user guide*. [https://fael-downloads-prod.focusrite.com/customer/prod/downloads/scarlett\\_8i6\\_user\\_guide\\_en.pdf](https://fael-downloads-prod.focusrite.com/customer/prod/downloads/scarlett_8i6_user_guide_en.pdf), 2011. Zuletzt abgerufen: 19 April 2024.
- [6] Lynn Fuston. *Understanding signal levels in audio gear*. <https://www.sweetwater.com/insync/understanding-signal-levels-audio-gear/>, 2022. Zuletzt abgerufen: 18 Juni 2024.
- [7] LLC inMusicBrands. *Alesis vmini*. <https://www.alesis.com/products/view/vmini>, 2024. Zuletzt abgerufen: 19 April 2024.
- [8] Native Instruments GmbH. *Reaktor 6 Modular DSP Lab*. Online: <https://www.native-instruments.com/en/products/komplete/synths/reaktor-6>. Zuletzt abgerufen: 30 August 2024.
- [9] Curtis Roads. *The Computer Music Tutorial*. MIT Press, 2nd edition, 2023. ISBN: 978-0-262-04491-2.
- [10] Peter Grandl Robert Skerjanc. *GREEN BOX: CASIO VZ-1, VZ-10M, VZ-8M, HOHNER HS-2/E*. Online: <https://www.amazona.de/green-box-casio-vz-1-vz-10m-vz-8m-hohner-hs-2-e/>, 2018. Zuletzt abgerufen: 17 April 2024.
- [11] Martin Russ. *Sound Synthesis and Sampling*. Focal Press, 3rd edition, 2008. ISBN: 978-0-240-52105-3.
- [12] Inc Teledyne LeCroy. *Operator's manual hro / waverunner 6 zi oscilloscopes*. <https://cdn.teledynelecroy.com/files/manuals/>

waverunner-6zi-operators-manual.pdf, 2017. Zuletzt abgerufen: 19 April 2024.

- [13] Mark Vail. *The Synthesizer - A Comprehensive Guide to Understanding, Programming, Playing, and Recording the Ultimate Electronic Music Instrument*. Oxford University Press, 1st edition, 2014. ISBN: 978-0-19-539481-8.
- [14] vintagesynth. Casio VZ-1. Online: <https://www.vintagesynth.com/casio/vz-1>. Zuletzt abgerufen: 24 Januar 2024.
- [15] Matthias Wolff. Casio-VZ-virtual-instrument - A virtual replica of the Casio VZ-1/VZ-10M music synthesizer. Online: <https://github.com/matthias-wolff/Casio-VZ-virtual-instrument>, 2019. Zuletzt abgerufen: 16 April 2024.

# Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

---

(Ort, Datum)

(Unterschrift)