

FM Synthese

Ralph Holzmann
Institut für technische Informatik
Universität Heidelberg
Heidelberg, Deutschland

Michael Krieger (Betreuer)
Institut für technische Informatik
Universität Heidelberg
Heidelberg, Deutschland
michael.krieger@ziti.uni-heidelberg.de

I. EINFÜHRUNG

Die Frequenzmodulationssynthese (FM Synthese) beschäftigt sich mit der Generierung synthetischer Klänge über ein elektronisches Verfahren. Dieses Verfahren ist die Frequenzmodulation. Aus dieser Tatsache heraus, muss zunächst die Frequenzmodulation näher erläutert werden, da die Grundlagen essenziell für die Erzeugung der synthetischen Klänge sind. Die Frequenzmodulation ist jedoch ein Verfahren aus dem Gebiet der Modulation und nutzt dessen Prinzip. Daher muss die Betrachtung auch darauf gerichtet werden. Um die Frequenzmodulationssynthese also näher erläutern zu können, ist zunächst das Augenmerk auf das Gebiet der Modulation zu legen und kurz einzugehen. Hierbei stehen vor allem das Prinzip der Modulation und die verschiedenen Einteilungen der unterschiedlichen Verfahren im Vordergrund. Insbesondere zu welcher Gruppe die Frequenzmodulation zählt. Erst danach ist eine detailliertere Beschreibung der Frequenzmodulation möglich.

II. MODULATION

Die Modulation ist ein Teilgebiet der Nachrichtentechnik. Allgemein versteht man unter Modulation generell den Einfluss des Datensignals auf ein sogenanntes Trägersignal. Je nach Art des Einflusses auf das Trägersignal bzw. dessen Veränderung, bekommt die Modulation ihren charakteristischen Namen. So wird bei der Frequenzmodulation folglich die Frequenz, bei der Amplitudenmodulation, die Amplitude moduliert. Neben diesen Verfahren gibt es noch weitere Arten der Modulation. Alle Verfahren sind in verschiedene Gruppen eingeteilt. Die Einteilungen der Modulationsarten finden nach verschiedenen Merkmalen statt. Dabei sind sie hierarchisch aufgebaut. So ist zunächst ein Merkmal die Art des Trägersignals bzw. Modulationsträgers. Dieser kann harmonisch oder pulsartig sein. Ein weiteres ist, ob es sich um ein analoges oder digitales Datensignal handelt. Zuletzt kommt es noch auf den Faktor an, welcher Signalparameter des Trägersignals vom Datensignal beeinflusst bzw. moduliert werden soll. Dies kann die Amplitude, Frequenz oder Phase sein.

Zusammenfassend lassen sich also drei Merkmale für die Einteilung der verschiedenen Modulationsarten finden. Diese sind hierarchisch folgend aufgelistet:

- Art des Trägersignals bzw. Modulationsträgers (Harmonischer Träger oder Pulsträger)
- Art des Datensignals (analog oder digital)
- Wahl des Signalparameters des Trägersignals (Amplitude, Frequenz, Phase)

Durch die Merkmale lassen sich vier Gruppen in der Modulation herauskristallisieren. Sie unterscheiden sich in der Art des Datensignals und der Art des Trägersignals.

Diese vier Gruppen sind:

- Analoge Modulation eines Pulsträgers
- Digitale Modulation eines Pulsträgers
- Analoge Modulation eines harmonischen Trägers
- Digitale Modulation eines harmonischen Trägers

Die Frequenzmodulation gehört in die Gruppe der analogen Modulation eines harmonischen Trägers. Dazu zählen auch die Amplituden- und Phasenmodulation. Charakteristisch für diese Gruppe ist ein analoges Datensignal, das einer Sinus- oder Cosinusschwingung entspricht. Der harmonische Träger ist ebenfalls eine Sinus- bzw. Cosinusschwingung. Das Verfahren der Modulation wurde eingeführt, da sie einige Vorteile bei der Übertragung von Daten mit sich bringt. So ist ein großer Vorteil die Reduzierung der notwendigen Bandbreite und der benötigten Leistung um Daten über eine große Entfernung zu schicken. Dieser Vorteil ergibt sich daraus, weil das niederfrequente Datensignal auf ein hochfrequentes Trägersignal aufmoduliert wird. Der gebräuchliche Terminus vom Nutz-, Informations- bzw. Datensignal ist *Modulatorschwingung* oder auch *Modulator* und taucht mit dem Index m in den verschiedenen Gleichungen auf. Das Trägersignal hingegen wird *Carrier* genannt und mit dem Kürzel c in den verschiedenen Gleichungen abgebildet. Neben diesen beiden Deklarationen sind noch weitere Fachbegriffe genannt und teilweise mit Indizes versehen. Diese werden im Verlauf des Dokuments zum jeweiligen Zeitpunkt genauer erläutert. [3, 8, 10, 14]

III. FREQUENZMODULATION

Die Frequenzmodulation wurde bereits 1922 durch den Nachrichtentechniker John Renshaw Carson mathematisch beschrieben. Er stellte dazu seine Formel für die Berechnung der benötigten Bandbreite vor und nannte sie auch die Carson-Formel. Doch erst der Elektroingenieur Edward Howard Armstrong schaffte es 1933 die Frequenzmodulation auch schaltungstechnisch zu realisieren. Notwendig wurde das, da die damals benutzte Amplitudenmodulation einen entscheidenden Nachteil hatte. So stellte Armstrong fest, dass sich Störungen bei der Übertragung der Daten auf die Amplitude auswirkten. Also auf die charakteristische Größe, aus der die Daten später bei der Demodulation wieder gewonnen werden. Da bei der Frequenzmodulation jedoch die Amplitude nicht relevant für die Rückgewinnung der Daten ist, sondern die Frequenz, wirken sich Störungen nicht mehr nachteilig bei der Demodulation aus. Das Verfahren der Frequenzmodulation ist also störungsunempfindlicher als die Amplitudenmodulation. Bei der Frequenzmodulation handelt es sich um ein anerkanntes Modulationsverfahren in der Nachrichtentechnik. Benutzt wird das Verfahren um Daten zu übertragen oder zur Synthese von Klängen. [5, 8, 10, 17]

A. Grundprinzip

Das Grundprinzip der Frequenzmodulation basiert auf der Tatsache, dass der Modulator die Frequenz des Carriers verändert. Dabei ist allerdings zu beachten, dass man von einem unmodulierten und modulierten Carrier spricht. Je nach dem an welcher Stelle des Prozesses die Betrachtungsweise auf dem Carrier liegt. Die Modulation des Modulators und des unmodulierten Carriers geschieht im Frequenzmodulator. Der verantwortliche Parameter für die Beeinflussung ist die sinusförmige Amplitude. Wenn die Amplitude des Modulators ihr Maximum erreicht hat, ergibt sich für die Frequenz des modulierten Carriers ein Maximum. Hingegen ist beim Minimum der Amplitude des Modulators auch die Frequenz des modulierten Carriers minimal. Die Frequenz des modulierten Carriers ändert sich also kontinuierlich zwischen den beiden Bereichen der minimalen und maximalen Frequenz. Gegebenenfalls das sogar während einer Periode. Außerdem bestimmt die Höhe der Amplitude den Frequenzunterschied zwischen dem Minimum und Maximum. Je höher die Amplitude ist, desto größer ist der Frequenzunterschied des modulierten Carriers. Die Höhe der Amplitude entspricht zum Beispiel dabei der Lautstärke bei Audiosignalen. Durch die permanente Frequenzänderung bei der Frequenzmodulation, ist auch der Winkel der Sinusschwingung des modulierten Carriers in jedem Moment anders. Dies ist durch die Abhängigkeit der Frequenz mit dem Winkel gegeben. Daher spricht man auch von Winkelmodulation. Allerdings wird der Winkel auch von der Phase beeinflusst. Daher zählt auch die Phasenmodulation zur Winkelmodulation. Aus dem Grund sind beide Modulationsarten sehr nah miteinander verwandt. Unter Umständen ist es sogar möglich, dass man aus dem modulierten Carrier nicht zurückschließen kann, ob es sich um eine Frequenz- oder Phasenmodulation handelt. Durch die Verwandtschaft können beide jeweils mit der anderen

Modulationsart erzeugt werden. So ist es möglich, dass die Phasenmodulation durch den Frequenzmodulator erzeugt wird, in dem man den Modulator über einen Differentiator gibt. Umgekehrt muss der Modulator über einen Integrator gegeben werden damit man aus einem Phasenmodulator eine Frequenzmodulation erzeugen kann. Ein weiterer Effekt durch die stetige Frequenzänderung ist die nicht eindeutige Bestimmung der Frequenz des modulierten Carriers. Da in jedem Augenblick die Frequenz unterschiedlich ist, spricht man auch von der Augenblicks- oder Momentanfrequenz. Allerdings kann man nur davon sprechen, wenn zumindest in einer Periode die Frequenz konstant bleibt. Sollte dies noch nicht mal der Fall sein, so kann die momentane Frequenz nur aus der Steigung der Schwingung des modulierten Carriers im Nulldurchgang erschlossen werden. [2, 3, 4, 7, 24]

B. Mathematisches Modell

In der Frequenzmodulation lassen sich mehrere mathematische Formeln aufstellen um die Modelle zu beschreiben bzw. darzustellen. So sind zunächst die Betrachtungen auf beide Eingangssignale des Frequenzmodulators zu legen. Der Modulator ist beispielsweise eine Sinusschwingung und wird mit folgendem mathematischem Ausdruck erläutert:

$$U_m = \hat{U}_m * \sin(\omega_m t + \varphi_m)$$

- U_m : momentaner Wert des Modulators
- \hat{U}_m : Amplitude des Modulators
- $\omega_m = 2\pi * f_m$ [Hz]: Kreisfrequenz des Modulators [rad/s]
- φ_m : Phase des Modulators
- t : Zeit in Sekunden [s]

U_m steht dabei für den momentanen Amplitudenwert des Modulators zum Zeitpunkt t . Errechnet wird dieser Wert aus den Komponenten der maximalen Auslenkung der Amplitude \hat{U}_m , der Kreisfrequenz ω_m und der Phase φ_m . Die Kreisfrequenz ω_m ist dabei das Produkt aus 2π mal der Frequenz f_m in Hertz. Angegeben ist sie in der Einheit rad/s. Wenn nun der unmodulierte Carrier beispielsweise einer Cosinusschwingung entspricht, wird ein ähnlicher mathematischer Ausdruck wie beim Modulator verwendet. Allerdings sind auch die Indizes an den unmodulierten Carrier angepasst.

$$U_c = \hat{U}_c * \cos(\omega_c t + \varphi_c)$$

- U_c : momentaner Wert des Carriers
- \hat{U}_c : Amplitude des Carriers
- $\omega_c = 2\pi * f_c$ [Hz]: Kreisfrequenz des Carriers [rad/s]
- φ_c : Phase des Carriers
- t : Zeit in Sekunden [s]

Genau wie beim Modulator steht U_c für den momentanen Amplitudenwert des unmodulierten Carriers zum Zeitpunkt t . Die Formel zur Berechnung ähnelt der dem

Modulator sehr. Da es sich aber um eine Cosinusschwingung und nicht um eine Sinusschwingung handelt, wird anstatt dem Sinus hier der Cosinus benutzt. Aus beiden Gleichungen lässt sich nun das mathematische Modell der Frequenzmodulation erzeugen. Zunächst lautet ganz allgemein die Formel für die Darstellung der Frequenzmodulation so:

$$e = \sin(\omega_c t + \int_0^t f(t) dt)$$

Aus der Formel ist zu erkennen, dass der Ausgang e sich nur aus einem Term zusammensetzt. Es handelt sich dabei um die Schwingungsform des unmodulierten Carriers. In diesem Fall entspricht der unmodulierte Carrier einer Sinusschwingung und dessen Argument in der Klammer. Der Term $\omega_c t$ steht für den Winkel der Sinusschwingung. Das Integral in dem Argument hingegen ist für die kontinuierliche und steigende Änderung des Winkels über die Zeit t zuständig. Wenn der Modulator einer Cosinusschwingung und der unmodulierte Carrier einer Sinusschwingung entspricht, dann ergibt sich folgender mathematische Ausdruck für die Berechnung der Frequenzmodulation:

$$e = A * \sin(\omega_c t + \eta * \cos(\omega_m t))$$

- e : momentaner Amplitudenwert des modulierten Carriers
- A : Amplitude des modulierten Carriers
- $\omega_c = 2\pi * f_c$ [Hz]: Kreisfrequenz des unmodulierten Carriers [rad/s]
- η : Modulationsindex
- $\omega_m = 2\pi * f_m$ [Hz]: Kreisfrequenz des Modulators [rad/s]
- t : Zeit in Sekunden [s]

e steht hier für den momentanen Amplitudenwert des modulierten Carriers. Berechnet wird er durch die Komponenten der maximalen Auslenkung der Amplitude A , der Kreisfrequenz des Carriers und dem Produkt aus dem Modulationsindex und der Kreisfrequenz des Modulators. Beide Kreisfrequenzen sind in der Einheit rad/s angegeben. Alternativ kann die Kreisfrequenz auch mit der Formel 2π mal der Frequenz des jeweiligen Parameters in Hertz umschrieben werden. Der Modulationsindex spielt hierbei eine ganz zentrale Rolle. Er ist einer der Kenngrößen in der Frequenzmodulation. [1, 13, 14, 26]

IV. KENNGRÖßEN DER FREQUENZMODULATION

A. Frequenzhub

Der Frequenzhub ist die Differenz aus der minimalen sowie der maximalen Frequenz gegenüber der ursprünglichen Frequenz des unmodulierten Carriers. Die Durchschnittsfrequenz des modulierten Carriers entspricht dabei der Frequenz des unmodulierten Carriers. Es ist also die Frequenzabweichung zur Frequenz des unmodulierten Carriers. In der Abbildung 1 ist der Zusammenhang nochmals verdeutlicht.

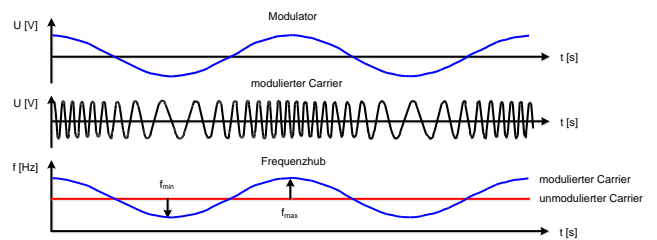


Abbildung 1: Frequenzhub

Die genaue Formel für die Berechnung des Frequenzhubs zwischen der minimalen sowie der maximalen Frequenz des modulierten Carriers gegenüber der Frequenz des unmodulierten Carriers lautet:

$$\Delta F = \frac{1}{2} (f_{max} - f_{min})$$

- ΔF : Frequenzhub
- f_{max} : maximale Frequenz des modulierten Carriers
- f_{min} : minimale Frequenz des modulierten Carriers

Der Frequenzhub wird umso größer, je größer die Amplitude des Modulators ist. Somit ist der Frequenzhub auch ein gewisses Maß für die Höhe der Amplitude des Modulators. Es gilt also:

$$\Delta F \sim \hat{U}_m$$

Doppelt so hohe Amplitude des Modulators bewirkt einen doppelt so hohen Frequenzhub. [7, 16, 19]

B. Modulationsindex

Der Modulationsindex ist eine der wichtigsten Kenngrößen bei der Frequenzmodulation. In vielen für die Frequenzmodulation wichtigen mathematischen Ausdrücken, bestimmt diese Größe entscheidend das Ergebnis. Umgänglich kann man auch beim Modulationsindex von der Feinheit bzw. Auflösung der Frequenzmodulation sprechen. Dabei gilt, je größer der Index, desto feiner oder auflösender ist die Frequenzmodulation. Er errechnet sich aus dem Frequenzhub und der Frequenz des Modulators. Der Kennbuchstabe für den Modulationsindex ist der griechische Buchstabe η , eta. Außerdem ist er gleichzeitig auch der Phasenhub der Frequenzmodulation. Der Phasenhub ist ähnlich wie der Frequenzhub definiert. Es handelt sich um die Differenz aus der minimalen sowie der maximalen Phase gegenüber der ursprünglichen Phase des unmodulierten Carriers. In der Abbildung 2 ist der Phasenhub genauer gezeigt.

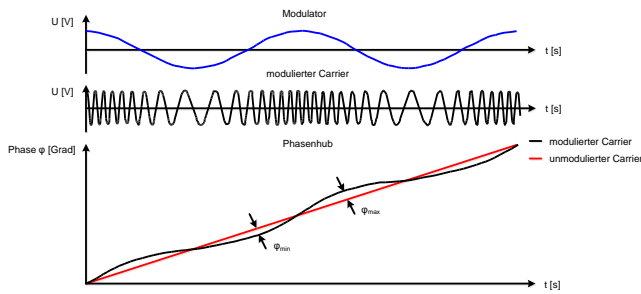


Abbildung 2: Phasenhub

Die Formel zur Berechnung des Modulationsindizes lautet:

$$\eta = \frac{\Delta F}{f_m}$$

- η : Modulationsindex
- ΔF : Frequenzhub
- f_m : Frequenz des Modulators

Aus der Formel geht hervor, dass der Modulationsindex proportional zum Frequenzhub ist. Der Modulationsindex ist aber auch wiederum proportional zur Amplitude des Modulators und es gilt:

$$\eta \sim \Delta F \sim \widehat{U}_m$$

Der Modulationsindex kann also durch die Amplitude des Modulators beeinflusst werden. [2, 3, 7, 16]

C. Frequenzspektrum

Das Frequenzspektrum zeigt ein Spektrum der auftretenden Frequenzen bei einer Frequenzmodulation. Die Darstellungsform ist dazu das Koordinatensystem. Dabei sind die zwei wichtigsten Größen im Frequenzspektrum der Frequenzbereich und die Amplituden der einzelnen auftretenden Frequenzen. Auf der X-Achse werden die Frequenzen und auf der Y-Achse die Amplituden der jeweiligen Frequenzen aufgetragen. Bei der Frequenzmodulation sind neben den Frequenzen des modulierten Carriers und des Modulators auch noch andere Frequenzen im Spektrum zu sehen, deren Existenz in den weiteren Unterkapiteln näher erläutert werden. Außerdem ist noch beim modulierten Carrier zu beachten, dass aufgrund der stetigen Frequenzänderungen, es sich hierbei um ein Frequenzband und nicht um eine einzelne Frequenz handelt. [7, 13]

D. Seitenbänder

Als Seitenband versteht man die auftretende Frequenz im Frequenzspektrum neben den eigentlichen und zu erwartenden Frequenzen. Diese sind in der Frequenzmodulation natürlich der modulierte Carrier und der Modulator. Das Seitenband ist also eine Nebenfrequenz, welche in der näheren Umgebung der bedeutsamen Frequenzen liegt. Generell lässt sich in der Frequenzmodulation sagen, dass es unendlich viele Seitenbänder und somit auch unendlich viele Frequenzen gibt. Diese entsprechen allerdings einem ganzzahligen

Vielfachen der Frequenz des Modulators. Die auftretenden Seitenbänder sind somit Spektralanteile des Modulators. Der Faktor für das ganzzahlige Vielfache n ist auch gleichzeitig die Ordnung der Seitenbänder. In der Abbildung 3 ist das Frequenzspektrum mit den Seitenbändern sowie dem modulierten Carrier und dem Modulator zu sehen. [3, 31]

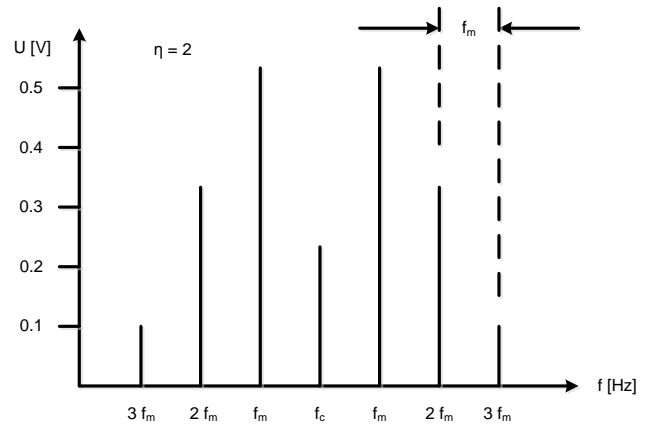


Abbildung 3: Seitenbänder

Die genaue Formel dazu lautet:

$$f_c \pm n * f_m$$

- c : Frequenz des modulierten Carriers
- n : ganzzahlige Vielfache
- m : Frequenz des Modulators

Die Seitenbänder besitzen aufgrund des ganzzahligen Vielfachen der Frequenz des Modulators den gleichen Abstand zueinander und werden sowohl zur Frequenz des modulierten Carriers addiert wie auch subtrahiert. [2, 3, 7, 13]

E. Besselfunktionen

Die Besselfunktionen dienen dazu, die Amplituden der einzelnen Frequenzen im Frequenzspektrum zu errechnen. Bei diesen handelt es sich insbesondere um den modulierten Carrier sowie die Seitenbänder, da sie Spektralanteile des Modulators sind und unterschiedliche Amplituden aufweisen. Mit dem folgenden mathematischen Ausdruck lassen sich die Amplituden der einzelnen Seitenbänder und des modulierten Carriers bestimmen:

$$e = A \{ J_0(\eta) \sin(\omega_c) t + J_1(\eta) [\sin(\omega_c + \omega_m) t - \sin(\omega_c - \omega_m) t] + J_2(\eta) [\sin(\omega_c + 2\omega_m) t + \sin(\omega_c - 2\omega_m) t] + J_3(\eta) [\sin(\omega_c + 3\omega_m) t - \sin(\omega_c - 3\omega_m) t] + \dots + J_n(\eta) [\sin(\omega_c + n\omega_m) t \pm \sin(\omega_c - n\omega_m) t] \}$$

- e : momentaner Amplitudenwert des modulierten Carriers
- A : Amplitude des modulierten Carriers

- J_0 : Amplitude der Frequenzlinie des modulierten Carriers
- J_{1-n} : Amplitude der Frequenzlinie der n-ten Ordnung der Seitenbänder.
- η : Modulationsindex
- $\omega_c = 2\pi * f_c$ [Hz]: Kreisfrequenz des unmodulierten Carriers [rad/s]
- $\omega_m = 2\pi * f_m$ [Hz]: Kreisfrequenz des Modulators [rad/s]
- t : Zeit in Sekunden [s]

e steht auch hier wieder für den momentanen Amplitudenwert des modulierten Carriers. Neben den bekannten Termen wie die maximale Auslenkung der Amplitude A , der Modulationsindex η , die Kreisfrequenzen des unmodulierten Carriers sowie des Modulators, sind weitere Terme aufgelistet. J_0 ist die Amplitude des modulierten Carriers. J_{1-n} sind die Amplituden der Seitenbänder. Der Index weist auf die Ordnung der Seitenbänder hin. Mit steigendem Modulationsindex η werden die Amplituden des modulierten Carriers und der Seitenbänder kontinuierlich kleiner. Die Besselfunktionen mit der Abhängigkeit der Amplituden zum Modulationsindex η sind in der Abbildung 4 nochmal näher veranschaulicht. [1, 2, 3, 7]

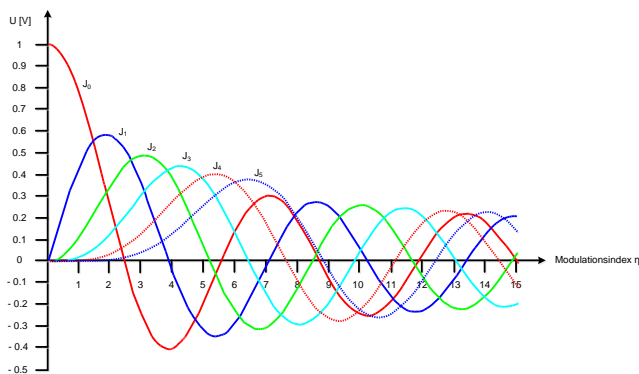


Abbildung 4: Besselfunktionen

V. ANWENDUNGEN

Die Anwendungen der Frequenzmodulation sind in der Technik vielfältig. Dabei liegt die Hauptanwendung in der Übertragung von Daten. Ursprünglich wurde die Frequenzmodulation als Alternative zur damaligen verbreiteten Amplitudenmodulation entwickelt. Ihr Einsatzgebiet war die Übertragung mittels Radio. Auch heutzutage sind die Informationen, die über das UKW (Ultrakurzwelle) Radio versendet werden, noch frequenzmoduliert. Eine weitere Anwendung ist in der Fernsehtechnik zu finden. Bei Röhrenfernsehern war der Begleitton des zugehörigen Fernsehbildes mittels der Frequenzmodulation auf einen Tonträger aufmoduliert worden. In der Videotechnik kam die Frequenzmodulation als Verfahren zum Einsatz, um das Luminanzsignal, das die Helligkeitsinformationen jedes Bildpunktes enthält, zu

modulieren bevor es auf ein analoges Magnetband gespeichert wurde. Hierbei machte sich das Verfahren den Vorteil zu Nutze, dass es auf Rauschen der Amplitude unempfindlich gegenüber der Amplitudenmodulation reagiert. Ein wichtiges Kriterium gerade bei Magnetbändern. Zu den analogen Magnetbändern zählen unter anderem auch die VHS-Kassetten, die damals bei den Videorekordern als gängiges Speichermedium eingesetzt wurden. Außerdem lässt sich auch mit Hilfe der Frequenzmodulation Klänge synthetisch erzeugen. Diese spezielle Anwendung ist heutzutage in Keyboards bzw. elektrischen Pianos oder auch Synthesizern genannt, zu finden. [10, 25]

VI. REALISIERUNG ALS ELEKTRONISCHE SCHALTUNG

A. Blockschaltbild

Die Realisierung der Frequenzmodulation als digitale elektronische Schaltung findet über einen Sinusgenerator statt. Der Sinusgenerator ist generell ein Oszillator, der auf unterschiedlichste Weise realisiert werden kann. Die Funktionsweise jedes Oszillators basiert auf dem gleichen Prinzip, dass er über eine bestimmte Größe beeinflusst bzw. gesteuert wird und so eine feste Frequenz generiert. Je nach Art der beeinflussenden Größe bekommt der Oszillator seinen charakteristischen Namen. Der Oszillatortyp, der als Sinusgenerator in der Frequenzmodulation zur Erstellung einer Sinusschwingung mit definierter Frequenz fungiert, ist der numerisch gesteuerte Oszillator, kurz NCO oder auch im Englischen unter dem Begriff numerically controlled oscillator bekannt. Der numerisch gesteuerte Oszillator erzeugt eine Sinusschwingung in dem er in einem ROM-Speicher Werte enthält, die eine Sinusschwingung abbilden. Bei diesen Werten handelt es sich um einzelne Punkte, die in definierten Abständen von einer Sinusschwingung erstellt wurden. Bei der Erzeugung der Sinusschwingung werden die Werte aus dem ROM-Speicher gelesen und ausgegeben. Der ROM arbeitet somit als eine Look-Up Tabelle. Im ROM-Speicher sind meistens nur die Werte bis zu einer Phase von $\frac{1}{2}\pi$ für eine Sinusschwingung enthalten, da die restliche Phase bis 2π dieselben Werte gebraucht um die Sinusschwingung vollends abzubilden. Damit lässt sich der benötigte Speicher des ROM auf $\frac{1}{4}$ kürzen. Ein Verfahren, in dem der numerisch gesteuerte Oszillator eingesetzt wird, ist die sogenannte direkte digitale Synthese, kurz DDS oder auch Direct Digital Synthesizer im englischen Sprachgebrauch genannt. Neben dem Oszillator sind weitere Komponenten enthalten. So besteht die Synthese auch aus einem Phasenakkumulator, einem D/A Wandler und einem Tiefpassfilter. Als Eingangssignal liegen das Steuerwort und der Modulator am Sinusgenerator an. Das Ausgangssignal ist dann der modulierte Carrier. Der Phasenakkumulator sendet dem numerisch gesteuerten Oszillator binäre Phasenwerte zu, der diese in Amplitudenwerte umwandelt. Nach der Umwandlung werden die Amplitudenwerte über einen D/A Wandler gegeben. Dadurch entsteht eine sinusförmige Treppenstufe. Man nennt es auch eine quantisierte Sinusschwingung da nur vereinzelte Punkte die Sinusschwingung beschreiben. Mit dem Tiefpassfilter wird daraus eine harmonische und tatsächliche Sinusschwingung.

DDS Bausteine haben heutzutage einen Phasenakkumulator mit 32 bis 40bit Auflösung in einem Frequenzbereich von bis zu 300MHz. Somit lassen sich Frequenzen von mehreren hundert Megahertz erzeugen. Die Auflösung der Frequenz beträgt dabei 0.001 Hertz. In der Abbildung 5 ist der Aufbau eines Sinusgenerators nach dem DDS Verfahren gezeigt. [6, 15, 18, 21, 22, 23, 27, 28]

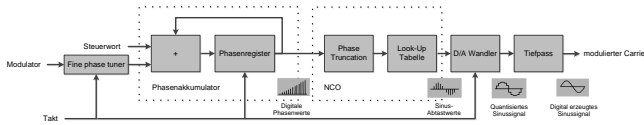


Abbildung 5: Aufbau der DDS

B. Sinusgenerator

Bei der Erzeugung der quantisierten Sinusschwingung durch den D/A Wandler entstehen Fehler aufgrund der endlichen Auflösung. Diese Fehler bezeichnet man als Quantisierungsfehler. Durch diesen Fehler kommt es auch zu einem Quantisierungsrauschen am Ausgang, das sich negativ auf die Klangqualität auswirkt. Eine Lösung um dieses Rauschen zu vermindern, ist die Auflösung des D/A Wandlers zu erhöhen, denn es gilt: Je größer die Auflösung des D/A Wandlers, desto geringer ist der Quantisierungsfehler und somit auch das Quantisierungsrauschen. Allerdings ist dies wiederum mit einem größeren Schaltungsaufwand verbunden. Es gibt außer der Ursache für ein Quantisierungsrauschen noch eine Weitere. Deren Lösung ist im Kapitel "Verbesserung der Schaltung" beschrieben. Bei dieser Lösung wird der Schaltungsaufwand nicht größer und dennoch reduziert sich die Bitbreite auf ein Minimum. Die quantisierte Sinusschwingung ist in der Abbildung 6 dargestellt. [22]

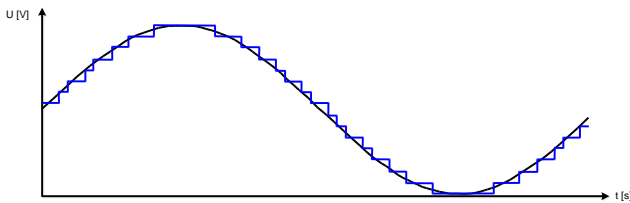


Abbildung 6: Quantisierung einer Sinusschwingung

C. Phasenakkumulator

Der Phasenakkumulator ist aus zwei Elementen aufgebaut. Diese sind ein Addierer sowie ein Phasenregister. Die Funktionsweise des Phasenakkumulators beruht auf der Grundlage, dass die Phase einer Sinusschwingung sich linear ändert. Dabei durchläuft die Phase vom Anfangswert Null bis zum Endwert 2π . Die Phasenschrittweite aus dem Steuerwort, das einem ganzzahligen Wert entspricht, wird mit der vorherigen Phase aus dem Phasenregister addiert und wieder neu in das Phasenregister geschrieben. Diese Prozedur wiederholt sich bis eine Periode einer Sinusschwingung durchlaufen ist. Die Phasenschrittweite bestimmt die erzeugte Frequenz. Das Phasenregister ist getaktet und gibt die maximal mögliche, zu erzeugende, Frequenz vor. Das Verfahren des Phasenakkumulators lässt sich folgendermaßen beschreiben:

neuer Phasenwert = alter Phasenwert + Phasenschrittweite

Die zu erstellende Frequenz lässt sich mit diesem mathematischen Ausdruck berechnen:

$$f = \frac{phs * f_{takt}}{2\pi}$$

- f: Erzeugte Frequenz [Hz]
- phs: Phasenschrittweite des Steuerworts [bit]
- f_{takt} : Taktfrequenz des Phasenregisters [Hz]
- 2π : Eine Periode einer Sinusschwingung

Die maximale Frequenzauflösung errechnet sich durch diese Formel:

$$f_{max} = \frac{f_{takt}}{2\pi}$$

- f_{max} : maximale Frequenzauflösung [Hz]
- f_{takt} : Taktfrequenz des Phasenregisters [Hz]
- 2π : Eine Periode einer Sinusschwingung

Um nun mit dem Sinusgenerator eine Frequenzmodulation durchzuführen, wird vor dem Addierer des Phasenakkumulators ein Block installiert, der sich fine phase tuner nennt. An diesem Block liegt der Modulator an. Nun addiert der Phasenakkumulator nicht nur die Phasenschrittweite mit der vorherigen Phase aus dem Phasenregister zusammen, sondern auch noch zusätzlich die Phasenwerte des Modulators. Durch den fine phase tuner lassen sich die zu ergebenden Phasenwerte feiner einstellen, da nun die Schrittweite der Phase nicht mehr ganzzahlig ist. Aufgrund des Vorgangs mit der zusätzlichen Addition des Modulators besitzt das Ausgangssignal keine konstante Frequenz, sondern schwankt um den Phasenwert des Modulators. [15, 22]

D. Hüllkurvengenerator

Bei der Erzeugung eines Tons durch ein Instrument entstehen Schwingungen, die mit der Zeit langsam abklingen. Hingegen ist beim Verfahren der Frequenzmodulationssynthese, das elektrisch die Schwingungen synthetisiert, der Ton abrupt zu Ende wenn das Signal wieder abgeschaltet wird. Der Hüllkurvengenerator behebt diese Problematik und lässt den elektrisch erzeugten Ton genauso abklingen wie es bei einem Instrument der Fall ist. Der Ton wirkt dadurch dynamischer und harmonischer als ohne den Generator, bei dem sich der Klang sehr hart aufgrund des abrupten Endes anhört. Die Realisierung des Hüllkurvengenerators als Schaltung ist im häufigsten Fall ein Tiefpass. Der Name Hüllkurve bezeichnet den charakteristischen Verlauf bzw. die Kurve der Schwingung in Abhängigkeit der Zeit t. Die Hüllkurve ist in der Abbildung 7 detaillierter gezeigt. [29, 30]

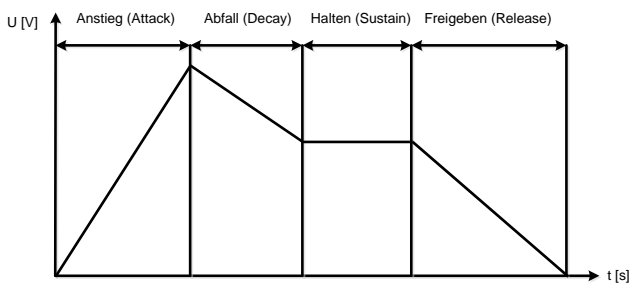


Abbildung 7: Hüllkurve

E. Verbesserung der Schaltung

Die Verbesserung der Schaltung um das Quantisierungsrauschen zu vermindern, erfolgt in der Phase Truncation. Die Funktionsweise des Phase Truncation ist die Verminderung der Bitbreite aus dem Phasenakkumulator in dem das niederwertigste Bit abgeschnitten und dem Adressbereich der Look-Up Tabelle angepasst wird. Durch dieses Verfahren entsteht ebenfalls das Quantisierungsrauschen. Die Reduzierung des Rauschens erfolgt über die Addition des niederwertigsten Bit (L) aus dem Phasenakkumulator mit dem Wert aus der Addition der Bitdifferenz, das aus der Subtraktion des niederwertigsten Bit mit dem höchstwertigen Bit (M) stammt und dem vorherigen Bitwert aus dem Register zur Taktperiode (F_{clk}). Das Ergebnis ist dann das höchstwertige Bit $y_M(t)$ zur Zeit t , welches zur Look-Up Tabelle geht. $X_L(t)$ steht für das niederwertigste Bit zum Zeitpunkt t und $X_{L-M}(t)$ ist der Differenzwert aus dem niederwertigsten Bit und dem höchstwertigen Bit auch zum Zeitpunkt t . Die Schaltung ist in der Abbildung 8 nochmal gezeigt. [15]

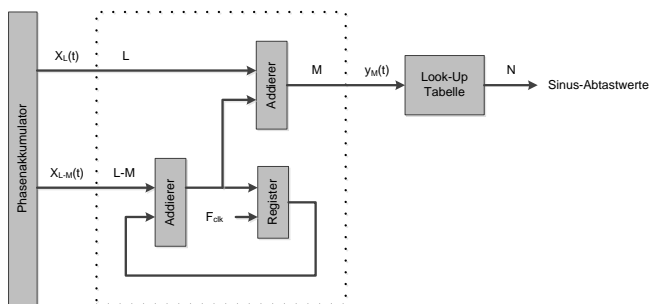


Abbildung 8: Verbesserung der Schaltung

VII. FREQUENZMODULATIONSSYNTHESE

Bei der Frequenzmodulationssynthese handelt es sich um den Gebrauch der Frequenzmodulation zur Synthese von Klängen. Insbesondere sind hierbei Schlag- und Effektinstrumente wie Akustikgitarren, Bassgitarren und E-Pianos zu nennen. Entwickelt und patentiert wurde dieses Verfahren von John M. Chowning 1973 an der Universität Stanford. Er fand heraus, dass bei der Frequenzmodulation Seitenbänder entstehen, die sehr obertonreich sind. Mit dem Begriff Oberton versteht man Frequenzen, die dem Vielfachen einer Grundfrequenz entsprechen. Die Grundfrequenz ist dabei der Modulator. In der Musik sind für alle Instrumente die Töne gleich. Allein die Obertöne ergeben den charakteristischen Klang eines Instruments.

Diese Besonderheit nutzte John M. Chowning bei seiner Entdeckung der Obertöne in der Frequenzmodulation aus um synthetische Klänge herzustellen. Die Firma Yamaha lizenzierte das Verfahren im Jahre 1974 und brachte mit dem DX7 den ersten digitalen programmierbaren Synthesizer auf den Markt. Dieser hob sich von den damaligen analogen Synthesizern akustisch deutlich ab und prägte damit die Pop- und Rockmusik in den 1980er Jahren. Bekannte Lieder, die mit dem digitalen Synthesizer DX7 produziert wurden, sind beispielsweise von der Künstlerin Whitney Houston „The Greatest Love of All“ oder von der Band Chicago „Stay the Night“. Auch die Band Depeche Mode bediente sich den Funktionen des DX7 für ihre damaligen Alben. Gerade in diesen Liedern ist der synthetisch hergestellte Klang der Instrumente deutlich zu hören. Im Lied „Stay the Night“ von der Band Chicago ist der Klang eines Pianos immer wieder wahrzunehmen. [9, 11, 12]

VIII. REFERENZEN

1. The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation (John M. Chowning, J. Audio Eng. Soc. 21, 7, 1973.)
2. Winkel-Modulation (Prof. Dr.-Ing. Dietmar Rudolph, TFH Berlin – Telekom TT – IBH)
3. Modulation (Fritz Dellsperger, Alfred Kaufmann, Berner Fachhochschule, 2004)
4. Modulation (Technik) (Wikipedia Deutschland)
5. Die Entstehung von Informationskonzepten in der Nachrichtentechnik (Friedrich-Wilhelm Hagemeyer, Dissertation Berlin 1979)
6. A Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis (Analog Devices, Inc., 1999)
7. Modulationsverfahren (Prof. Dr.-Ing. W.-P. Buchwald, FH Wolfenbuettel)
8. Frequency Modulation (Wikipedia Englisch)
9. Frequency Modulation Synthesis (Wikipedia Englisch)
10. Frequenzmodulation (Wikipedia Deutschland)
11. FM-Synthese (Wikipedia Deutschland)
12. Yamaha DX7 (Wikipedia Deutschland)
13. Klangsynthese durch Frequenzmodulation (<http://www2.ak.tu-berlin.de/Studio/FM/>, TU Berlin)
14. An Introduction to FM (<https://ccrma.stanford.edu/software/snd/snd/fm.html>, Bill Schottstaedt, Stanford)
15. A Numerically Controlled Oscillator with a Fine Phase Tuner and a Rounding Processor (In-Gi Lim, Whan-Woo Kim, ETRI Journal, Volume 26, Number 6, December 2004)

16. Frequenzmodulation
(<http://www.elektroniktutor.de/signale/fm.html>,
Detlef Mietke)
17. Die FM-Story
(<http://www.wabweb.net/radio/radio/fm.htm>, Walter
Brummer, Austria)
18. Direct Digital Synthesis [Stanford Research
Systems, Application Note #5]
19. Frequenzmodulation
(<http://www.techniklexikon.net/d/frequenzmodulation/frequenzmodulation.htm>, Ariel Misholi)
20. FM-Synthese
(<http://www.itwissen.info/definition/lexikon/FM-Synthese-FM-synthesis.html>, DATACOM
Buchverlag GmbH)
21. DDS zum selbermachen
(<http://www.dl8nci.de/DDS-001.html>, Dr. Matthias
Jordan)
22. DDS Signalgeneratoren praktisch aufbauen und
anwenden (Franzis, Ernst Schmid,
<http://books.google.de/books?id=EaS9f-kjookC&pg=PA21&lpg=PA21&dq=phasenakkumulator&source=bl&ots=Of0qiQQVvC&sig=R4FDyIJFsqvqk-kuvUXk-YDMMjk&hl=de&sa=X&ei=dJfsUIOKYXesgbxioGIAw&ved=0CEsQ6AEwAw#v=onepage&q=phasenakkumulator&f=false>)
23. Mini DDS
(<http://www.myplace.nu/avr/minidds/index.htm>,
Jesper Hansen)
24. Amplituden- und Frequenzmodulation (Hans Peter
Weibel, BBZ Biel, <http://www.bbzb-iel.ch/Berufskunde/Elektronik/HF-Technik/ModulationsArten/ModulationsArten.html>)
25. FBAS - was ist das? (<http://www.comptech-info.de/component/content/article/47-technik-infos/163-fbas-was-ist-das>, Holger Franz)
26. Parameter einer Sinusschwingung
(http://www.ingobartling.de/physik/klasse11/html/fourier/Arbeitsblaetter/1_sinusschwingung-allg.html, Judith Preiner)
27. Low-Spur Numerically Controlled Oscillator Using
Taylor Series Approximation (XI International PhD
Workshop OWD 2009, 17–20 October 2009,
Grzegorz Popok, Marian Kampik, Silesian
University of Technology, Gliwice, Poland)
28. Numerically Controlled Oscillator IP Core User's
Guide (Lattice Semiconductor Corp., 2010)
29. Hüllkurvengenerator
(<http://www.roxikon.de/instrumente/huellkurvengenerator/>, Dr. Bernward Halbscheffel)
30. ADSR (Wikipedia Deutschland)

31. Seitenband (Wikipedia Deutschland)