

322 - Überlagerung und Modulation /AD-Wandler

1. Aufgaben

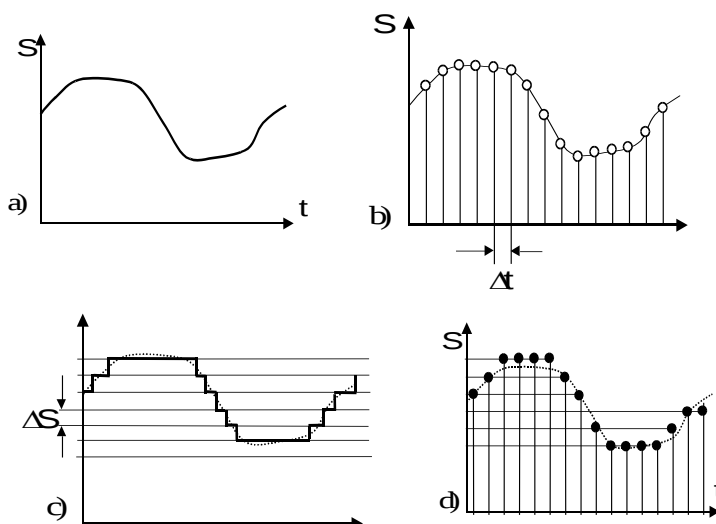
- 1.1 Digitalisieren Sie ein analoges Signal mit einem AD-Wandler und untersuchen sie den Einfluss von Abtastezeit und Sampleanzahl!
- 1.2 Überlagern Sie zwei Frequenzen und beobachten das Zeit- und Frequenzverhalten im Experiment! Benutzen Sie dazu einen AD-Wandler.
- 1.3 Erweitern Sie die Schaltung, um eine additive Modulation zu realisieren!
- 1.4 Aufbau einer Schaltung für die multiplikative Modulation.
- 1.5 Simulieren Sie die Überlagerung und die Modulationen am PC mit dem LabView-Programm!

2. Grundlagen

Stichworte: Digitalisierung mit AD-Wandler, Diode, Überlagerung von elektrischen Signalen, Amplitudenmodulation

2.1 Analog Digital Wandler (ADC)

Durch den Einsatz von Computern in fast allen Bereichen der Technik sind Analog Digital Wandler (engl. analog-to-digital converter) eine notwendige Baugruppe. Sie wandeln eine analoge Größe (meist in Form einer Spannung), in digitale Daten (Zahlenwerte), die von Computern weiterverarbeitet werden können, um.



Informationsparameter:

Δt ... Zeitintervall für Abtastung

ΔS ... Quantisierungsstufe des Informationsparameters.

Abb.1: Prinzip der A/D –Wandlung:

- a) analoger Verlauf: wert- und zeitkontinuierliches Signal
- b) Abtastung-Quantelung der Zeit: wertkontinuierliches zeitdiskretes Signal
- c) Quantisierung-Quantelung der Amplitude: wertdiskretes zeitkontinuierliches Signal
- d) Abtastung und Quantisierung: Wert- und zeitdiskretes Signal.

Damit bei der Digitalisierung eines Analogsignals keine Verluste des Signals zustande kommen, müssen bestimmte Grenzen des AD-Wandlers beachtet werden:

Samplerate:

Die zeitliche Auflösung wird als Samplerate (Abtastrate) bezeichnet (mit Einheit Sample/Sekunde oder Hz). Diese ist der wichtigste Parameter einer AD-Wandler-Baugruppe und muss dem aufzuzeichnenden Signal angepasst sein. Die wichtigste Bedingung, welche bei jeder Digitalisierung berücksichtigt werden muss, ist das **Abtasttheorem**:

Abtastbedingung = Sampling Theorem = Nyquist – Shannon – Theorem

$$f_{\text{Abtast}} > 2 \cdot f_{\text{max}}$$

Die Frequenz der Abtastung muss größer sein als das Doppelte der höchsten zu digitalisierenden Frequenz. Eine zu kleine Abtastfrequenz führt zu Abtastfehlern. Meist wird eine wesentlich größere Abtastfrequenz verwendet, dies erhöht jedoch die Menge an digitalen Daten. Übliche Werte für die Samplerate sind heute 10 kS/s bzw. 10 kHz bis 1 GS/s bzw. 1 GHz.

Auflösung:

Die Amplitudenauflösung wird in bit angegeben und ist bauelement-spezifisch, kann nicht verändert werden. Ein AD-Wandler mit N bit Auflösung kann 2^N verschiedene Spannungsstufen unterscheiden, was zusammen mit der maximalen messbaren Spannung die Spannungsauflösung vorgibt.

Üblich sind heute 10 bis 14 bit Auflösung bei AD-Wandlern.

Sampleanzahl:

Die Anzahl der Samplepunkte (also wie viele Werte aufgenommen werden) kann beim AD-Wandler eingestellt werden und entscheidet über die Aufzeichnungszeit. Diese sollte so gewählt werden, dass das komplette Signal, oder bei periodischen Signalen eine ausreichende Zahl Perioden aufgenommen wird.

2.2 Fast Fourier Transformation (FFT)

Die Fourier-Transformation (nach Jean Baptiste Joseph Fourier, 1768–1830) ist eines der wichtigsten Werkzeuge der Signalverarbeitung. Sie gestattet es, ein Signal in seine verschiedenen Frequenzbestandteile zu zerlegen.

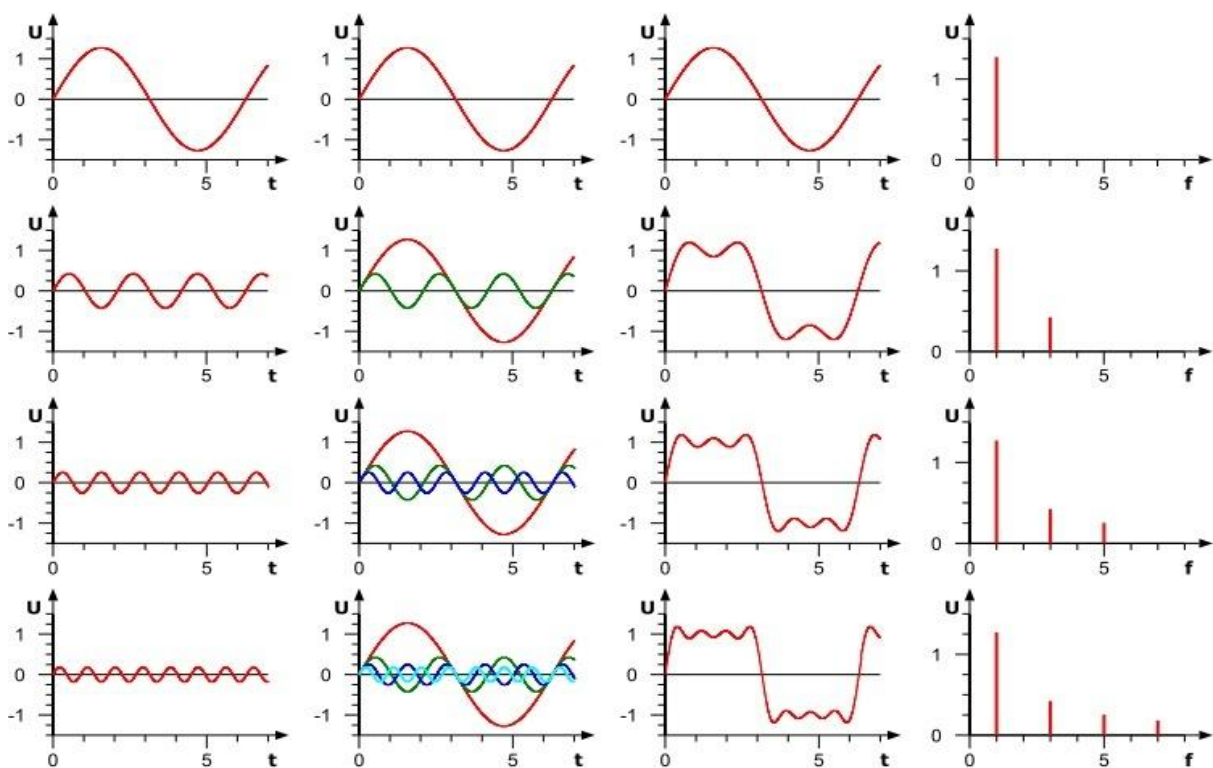
In der Physik und allen anderen Bereichen der Wissenschaft und Technik werden elektrische Signale meist als Amplituden in Abhängigkeit der Zeit (Zeitsignale) aufgenommen. Interessant und oft besser auswertbar ist eine Charakteristik der Amplitude in Abhängigkeit der Frequenz (das Frequenzspektrum). Mit Hilfe des mathematischen Verfahrens, der Fourier-Transformation, kann man beide Signale ineinander umrechnen:

$$U(t) \Leftrightarrow U(f).$$

In Computern lässt sich die (diskrete) Fourier-Transformation effizient mit einem Algorithmus namens Fast Fourier Transformation (FFT) berechnen. Zur Auswertung und Charakterisierung von Daten und Signalen hat sich insbesondere durch die Verfügbarkeit von Rechentechnik die Anwendung der FFT immer mehr durchgesetzt. Hier im Versuch wird die FFT angewendet, um das modulierte Zeitsignal in das Frequenzspektrum zu transformieren und dieses auswerten zu können. Die der Fourier-Transformation zugrundeliegende Mathematik soll hier nicht Gegenstand der Betrachtung sein, dafür gibt es genügend andere Quellen.

Als Einstieg in das Thema soll die Fourierzerlegung bzw. -synthese einer Rechteckschwingung wie in Abb. 2 betrachtet werden. Eine Rechteckschwingung der Frequenz f lässt sich aus einer Sinusschwingung derselben Frequenz sowie den ungeraden Oberschwingungen ($3 \cdot f$, $5 \cdot f$, $7 \cdot f$, ...) mit jeweils abnehmender Amplitude zusammensetzen (vgl. Abb. 2). Allgemein betrachtet lässt sich jede periodische Funktion als trigonometrische Reihe (Fourier-Reihe) darstellen, d.h. in eine Reihe harmonischer (Sinus-, Kosinus-) Funktionen mit diskreten Frequenzen entwickeln. Das, was zeitlich betrachtet eine periodische Rechteckschwingung ist, lässt sich also auch als (in diesem Fall) unendliche Folge diskreter Frequenzen darstellen, quasi als Spektrum (in Abb. 2 rechts unten, dargestellt bis $7 \cdot f$). Dem Rechteck im Zeitbereich entspricht ein bestimmtes Spektrum im Frequenzbereich. Einer reinen Sinusschwingung (Abb. 2 oben) entspricht im Frequenzbereich genau eine Frequenz, bei einem amplitudenmodulierten Signal in diesem Versuch wären es drei Frequenzen usw.

Die Fourier-Transformation ermöglicht diese Zerlegung für beliebige Signale durchzuführen und die enthaltenen Frequenzanteile darzustellen.



Quelle: Wikipedia

Abb.2: Fourierzerlegung eines Rechtecksignals.

2.3 Überlagerung

Die Überlagerung ist wie bei der Interferenz eine einfache Addition zweier (elektrischer) Signale. Es entstehen keine neuen Frequenzen.

Überlagerung zweier Schwingungen

$$U_{\text{Ü}} = U_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) + U_2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t) \quad (1)$$

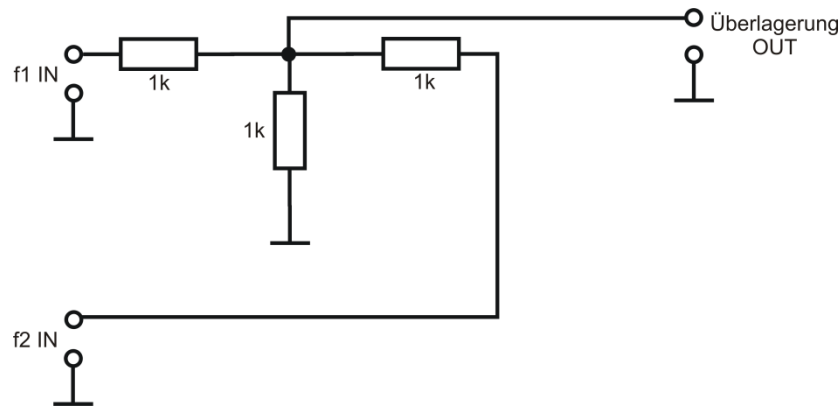


Abb.3: Schaltungsaufbau Summierglied.

Anwendung findet die Überlagerung z. B.: in der Tontechnik (Mischpult). Dort werden verschiedene Frequenzen in der Amplitude variabel zu einem Summensignal addiert. Dadurch lassen sich mehr Audioquellen (z.B. verschiedene Instrumente & Mikrofone), zu einer gemeinsamen Tonspur zusammenfügen, wobei die Lautstärke der einzelnen Kanäle zueinander eingestellt werden kann.

Die Realisierung der Überlagerung erfolgt im einfachsten Fall über ein Summierglied mit Widerständen (Abb. 3).

2.4 Modulation

Die Modulation von Signalen ist ein wesentlicher Bestandteil in allen Bereichen von elektrischen Signalen, um Informationen übertragen zu können. Angewendet wird diese z. B. beim klassischen Rundfunk (Radio & Fernsehen), Mobilfunk (GSM, LTE, 5G) oder anderen drahtlosen Datenübertragungsverfahren (WLAN, Bluetooth, NFC/RFID), aber auch kabelgebundener Datenübertragung (z. B. DSL oder Internet über Fernsehkabel).

Sämtliche Übertragungen von Informationen beruhen auf der Modulation von Signalen. Nur dadurch ist es möglich, die spezifischen Nutzdaten in einem bestimmten zur Verfügung stehenden Frequenzbereich zu übertragen. In allen Wellenlängenbereichen, auch im optischen Bereich, muss moduliert werden, um einem Trägersignal das Nutzsignal aufzuprägen.

Bei der Modulation wird das Nutzsignal, welches die zu übertragende Information (also z. B. die Sprache & Musik beim Radio oder digitale Datenpakete bei WLAN) enthält, in einen definierten höheren Frequenzbereich "verschoben", indem es auf ein höherfrequentes Trägersignal auf moduliert wird. Das durch die Modulation entstandene Signal enthält alle Informationen des Nutzsignals und lässt sich gut (z. B. als Radiowelle) zum Empfänger der Information übertragen.

Beim Empfänger wird das Nutzsignal durch sog. Demodulation aus dem Trägersignal wieder extrahiert. So wandelt ein Radioempfänger die vom Radiosender erzeugten modulierten Radiowellen durch Demodulation wieder in ein Audiosignal um.

Modulation kann auf viele verschiedene Arten realisiert werden, die spezielle Eigenschaften haben und in verschiedenen Anwendungen zum Einsatz kommen. Es gibt sowohl Modulationsverfahren, die analoge Signale wie ein Audiosignal auf einen Träger modulieren können, als auch Modulationsverfahren, die für digitale Nutzdaten ausgelegt sind.

Eine der technisch am einfachsten zu realisierenden Modulationsarten ist die sog. Amplitudenmodulation.

2.5 Amplitudenmodulation

Als Amplitudenmodulation (AM) bezeichnet man die periodische Änderung der Amplitude einer Schwingung in Abhängigkeit der Zeit. Die Amplitudenmodulation war lange Zeit das wichtigste Modulationsverfahren für Radio- und Funkkommunikation, da die technische Realisierung im Sender und Empfänger relativ einfach zu handhaben war. Heutzutage wird für Radioübertragung und Funkkommunikation meist andere Modulationsmethoden angewendet, die bessere Qualität ermöglichen. Im Flugfunk ist die Amplitudenmodulation aber auch heute noch Standard. In der Messtechnik ist eine Amplitudenmodulation des Messsignals nötig, um das wichtige Messverfahren, die Lock-In-Technik, zur Messung schwacher Signale anwenden zu können.

Man unterscheidet die **additive und multiplikative** Amplitudenmodulation (letztere wird auch Zweiseitenbandmodulation genannt).

Das Nutzsignal kann ein beliebiges Signal sein. Das Trägersignal ist sinnvollerweise eine sinusförmige Schwingung, welche von der Frequenz meist deutlich über dem Nutzsignal liegt. Dieses Trägersignal wird im einfachsten Fall (additive Amplitudenmodulation) mit übertragen, und ermöglicht dem Empfänger eine vereinfachte Demodulation, enthält aber selbst keine Information. Bei der multiplikativen Amplitudenmodulation ist das Trägersignal im resultierenden Signal nicht enthalten und wird nicht mit übertragen.

2.5.1 Additive Amplitudenmodulation

Dies ist die einfachste zu realisierende Variante: Zunächst werden die zu modulierenden Signale ω_1 =Nutzfrequenz und ω_2 =Trägerfrequenz überlagert. Anschließend wird dieses Signal an einem Bauteil mit nicht-linearer I-U-Kennlinie (z. B. einer Diode oder einem Transistor) verzerrt. Durch diese Verzerrung entstehen neue Frequenzen.

Bei einem Bauteil mit exponentieller Kennlinie wie einer Diode, entstehen dabei im Idealfall zwei neue Frequenzen (Seitenbänder): $\omega_2 - \omega_1$, $\omega_2 + \omega_1$ (siehe Anhang 1). Bei der additiven Amplitudenmodulation bleibt die Trägerfrequenz ω_2 erhalten (siehe Abb. 4).

Das Entstehen der Summen und Differenzfrequenzen der Eingangssignale wird auch als (multiplikative) Mischung der Eingangssignale bezeichnet, die entsprechende Baugruppe als Mischer.

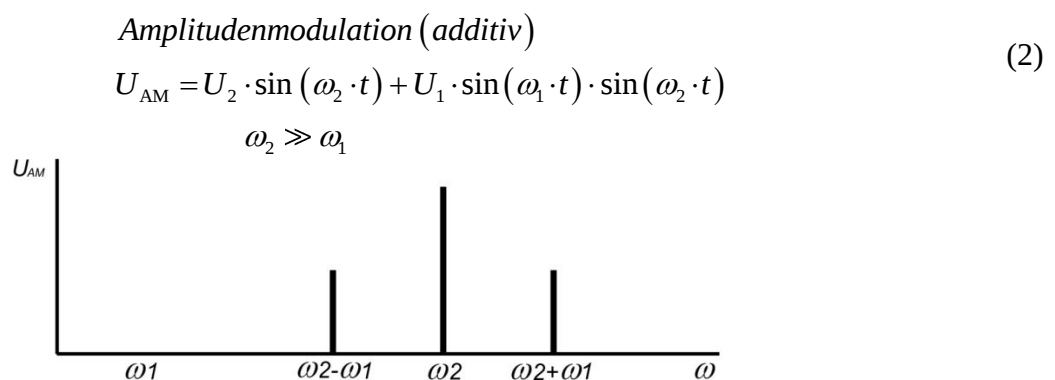


Abb. 4: Spektrum Amplitudenmodulation additiv.

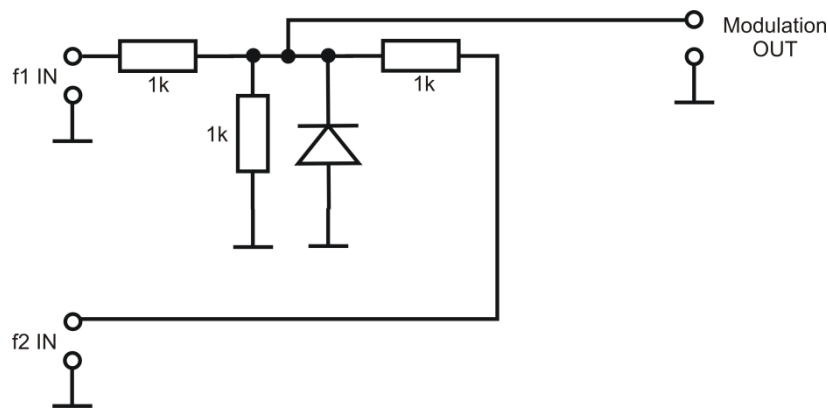


Abb.5: Schaltung für eine additive Amplitudenmodulation:
 f_1 ... Nutzfrequenz, f_2 ... Trägerfrequenz.

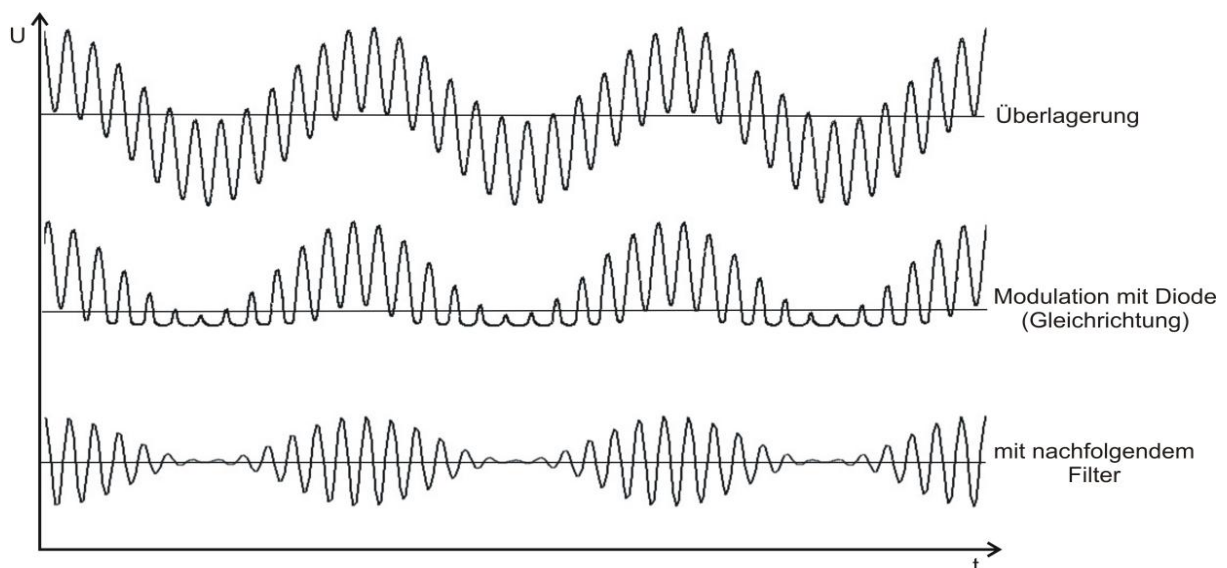


Abb.6: Signalverläufe für die additive Amplitudenmodulation (Schaltung in Abb.5).

Wird die additive Amplitudenmodulation wie in Abb. 4 mittels einer Diode realisiert, so kann die Gleichrichtung der Diode zu einem „Abschneiden“ der negativen Halbwelle der überlagerten Signale führen (siehe Abb. 6).

Dies und andere Abweichungen vom idealen Verhalten sorgen dafür, dass neben den erwünschten Frequenzen auch noch weitere unerwünschte Frequenzen und Oberwellen entstehen. Mit passenden Filtern kann man diese unterdrücken.

2.5.2 Multiplikative Amplitudenmodulation

Diese häufiger in der Praxis eingesetzte Variante kann mit Diodenringmodulatoren (auch Ringmischer genannt) realisiert werden (Schaltbild siehe Abb. 8). Vorteil hierbei ist, dass die Trägerfrequenz nicht mit erzeugt wird und alle anderen unerwünschten Nebenfrequenzen besser unterdrückt werden. Es entstehen im Idealfall zwei neue Frequenzen $\omega_2 - \omega_1$, $\omega_2 + \omega_1$. Die Trägerfrequenz ω_2 wird aber unterdrückt. Es entsteht ein Spektrum wie in Abb. 7.

Amplitudenmodulation (multiplikativ)

$$U_{AM} = U_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) \cdot U_2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t)$$

(3)

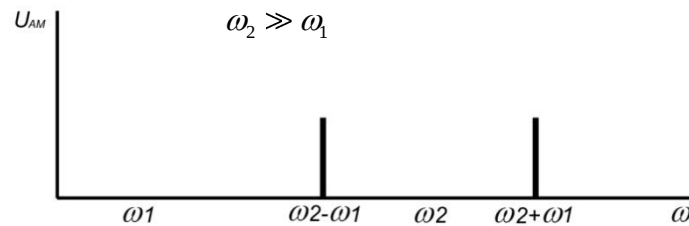


Abb.7: Spektrum Amplitudenmodulation multiplikativ.

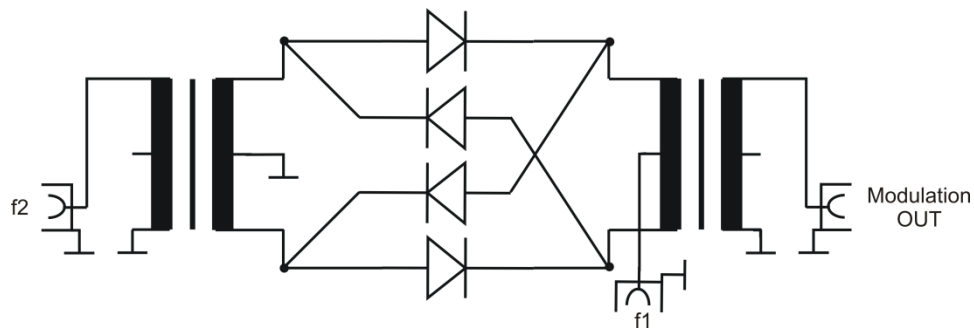


Abb.8: Schaltung für eine multiplikative Modulation mit Diodenringmodulator.

3. Versuchsdurchführung

Zur Digitalisierung der Signale steht Ihnen der PC-gesteuerte AD-Wandler USB1208FS und die LabView Software „Spektrum-Analyzer (USB1208FS)“ zur Verfügung.

An USB1208FS bitte A-In CH0 als Eingang verwenden. Damit der AD-Wandler bei den verwendeten Eingangsspannungen nicht übersteuert wird, achten Sie auf die Einstellung: **Input Range=+-10V**.

Für Ihr Protokoll übernehmen Sie bitte aussagekräftige Darstellungen bzw. Bilder (Funktion „Drucken auf“ in der LabView-Software oder Screenshots). Aussagekräftig bedeutet, dass man die relevanten Effekte in Zeit und Frequenzbereich gut erkennen kann, dazu muss evtl. der Zoom/Bereich der Diagramme angepasst werden!

- 3.1.1 Bei einer eingestellten **Samplerate von 50 kS/s** und einer **Samplezahl von 20 kSamples**, digitalisieren Sie mit dem AD-Wandler verschiedene Sinusfrequenzen:

400 Hz, 510 Hz, 6 kHz, 24 kHz, 30 kHz!

Als Quelle benutzen Sie einen Funktionsgenerator. Stellen Sie die Signalform Sinus-Wechselspannung (Taste "Wave") und 8V_{ss} (Regler "Amplitude") ein! Das entspricht etwa der Stellung des „AMPL“ Reglers =1/2. Die Angabe V_{ss} ist die Spitze-Spitze-Spannung in Volt und kann mit der Software gemessen werden. Das Signal liegt dann am Ausgang „Output 50Ω“ an.

Passen Sie den Bildbereich vom zeitlich dargestellten Signal so an, dass sich die Form der gemessenen Signale gut erkennen lässt, und drucken sie die Signalverläufe aus.

Diskutieren Sie wie sich die Form des abgetasteten Signals und die enthaltenen Frequenzanteile mit steigender Frequenz verändern. Überlegen Sie sich welche Samplerate für jede Frequenz mindestens notwendig wäre, um Abtastfehler zu vermeiden? Wie äußert sich eine Verletzung des Abtasttheorems im abgetasteten Signal?

- 3.1.2 Stellen Sie wieder eine Sinusfrequenz von 1000 Hz am Generator ein und untersuchen Sie die Auswirkung der Samplezahl auf das gemessene Signal!

Was verändert sich, was bleibt gleich, wenn Sie die Samplezahl erhöhen bzw. reduzieren? Achten Sie dabei insbesondere auf das Frequenzspektrum!

Beachten Sie beim Erhöhen der Samplezahl, dass die Aufnahmezeit (AQ-Zime) nicht größer als einige Sekunden wird!

- 3.2 Für alle weiteren Experimente (3.2 bis 3.4) verwenden Sie bitte folgende empfohlene Parameter für den AD-Wandler, welche in der Software einstellbar sind:

Samplerate: 50 k S/sek
Samples: 20 kSamples
Zeit-Bereich Zoom: 0...10 ms
FFT-Bereich Zoom: 200 Hz ... 7 kHz.

Überlagern Sie zwei Frequenzen im Experiment (Schaltung nach Abb.3) mit folgenden Parametern für die Funktionsgeneratoren:

$$f_1 = 400 \text{ Hz} \quad U_1 = 4 \text{ Vss} \quad f_2 = 5 \text{ kHz} \quad U_2 = 8 \text{ Vss.}$$

Verwenden Sie Widerstände zur Summation der Spannungen (siehe Schaltung Abb.3). Digitalisieren Sie mit dem AD-Wandler das Ausgangssignal und übernehmen ein aussagekräftiges Bild für Ihr Protokoll (Funktion „Drucken auf“ in der LabView-Software).

- 3.3 Erweitern Sie die Schaltung für die Überlagerung zweier Frequenzen um eine Diode und realisieren damit eine additive Modulation (Schaltung nach Abb.4; Parameter für Amplitude und Frequenz wie in 3.2.)!

Beobachten und beschreiben Sie die Veränderung im Zeitbereich und im Frequenzbereich! Mit welcher Baugruppe könnte man die unerwünschten Nebenfrequenzen beseitigen?

Ändern Sie die Orientierung der Diode, indem Sie sie in ihrem Aufbau um 180° drehen! Was verändert sich? Ist die Orientierung wichtig für die Realisierung der additiven Amplitudenmodulation?

- 3.4 Realisieren Sie die multiplikative Modulation mit einem Diodenringmodulator (fertiges Modul mit Schaltung nach Abb.8) mit folgenden Parametern für die Sinusgeneratoren:

$$f_1 = 400 \text{ Hz} \quad U_1 = 1 \text{ Vss} \quad f_2 = 5 \text{ kHz} \quad U_2 = 1 \text{ Vss} \quad !$$

Welche Unterschiede ergeben sich im Vergleich zur additiven Amplitudenmodulation in der Signalform und dem Frequenzspektrum?

- 3.5 Simulieren Sie die Überlagerung, additive und multiplikative Amplitudenmodulation mit dem LabView-Programm! Gehen Sie dazu in den Tab „Simulation“ und wählen Sie „freie Eingabe“! Nutzen Sie die Formeln der verschiedenen Methoden (Abb. 3, 4 & 7), um die theoretisch zu erwartenden Signalformen und Spektren zu simulieren! Verwenden Sie für die Simulation die gleichen Parameter für Spannungen und Frequenzen wie in den Messaufgaben, um möglichst gute Vergleichbarkeit zu erzielen.

Vergleichen Sie die simulierten Signalverläufe und Spektren für alle drei Verfahren mit den gemessenen Daten und diskutieren Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede!

Anhang 1: Herleitung der entstehenden Frequenzen bei Schaltung mit einer Diode (für Interessierte)

In vielen Fällen lässt sich der Zusammenhang zwischen Eingangssignal x und Ausgangssignal y einer Baugruppe (z. B. einer Schaltung mehrere Bauteile, eines Verstärkers, etc.) durch eine Taylorreihe annähern:

$$y = a x + b x^2 + c x^3 + d x^4 + \dots$$

Betrachtet man nun ein Eingangssignal das nur zwei Frequenzen ω_1 und ω_2 enthält (also eine einfache Überlagerung der Sinussignale), lässt sich das Eingangssignal als

$$x(t) = \sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t$$

darstellen. Nach der Baugruppe erhält man damit also ein Ausgangssignal der Form

$$y(t) = a (\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t) + b (\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t)^2 + c (\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t)^3 + \dots$$

Enthält die Baugruppe nur lineare Bauteile (wie z. B. Widerstände, Kondensatoren, Induktivitäten), dann gilt $y = a x$, bzw. $b = c = d = \dots = 0$. Damit ist auch das resultierende Ausgangssignal

$$y(t) = a (\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t) = a \sin \omega_1 t + a \sin \omega_2 t$$

Eine lineare Baugruppe verursacht also nur eine Skalierung (oder Phasenverschiebung bei komplexen a) der Eingangssignale, es gibt allerdings weiterhin nur die Frequenzen des Eingangssignals. Es entstehen keine neuen Frequenzen.

Ist eine Baugruppe allerdings nicht-linear und enthält quadratische Anteile (wie z.B. die Diode mit ihrer exponentiellen I-U-Kennlinie), so ist $b \neq 0$ und im Ausgangssignal ist ein Anteil

$$y_2 = b (\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t)^2 = b [\sin^2 \omega_1 t + \sin^2 \omega_2 t + 2 \sin \omega_1 t \sin \omega_2 t]$$

enthalten (die Umformung ist Anwendung der 1. binomischen Formel).

Durch Anwendung der trigonometrischen Multiplikationsregeln lässt sich zeigen, dass diese Multiplikationen von Sinustermen neuen Frequenzen entsprechen:

- $\sin^2 \omega_1 t = \frac{1}{2}(1 - \cos 2 \omega_1 t)$, bzw. $\sin^2 \omega_2 t = \frac{1}{2}(1 - \cos 2 \omega_2 t)$: Diese Anteile verursachen Frequenzen mit dem Doppelten der Eingangsfrequenzen ($2\omega_1$, bzw. $2\omega_2$)
- $2 \sin \omega_1 t \sin \omega_2 t = \cos(\omega_1 - \omega_2) - \cos(\omega_1 + \omega_2)$: Dieser Anteil verursacht die neuen Frequenzen $\omega_1 - \omega_2$ und $\omega_1 + \omega_2$. Dies sind genau die Frequenzen, die für Mischung bzw. Amplitudenmodulation erwünscht sind.

Enthält die Übertragungsfunktion noch nicht-Linearitäten höherer (also dritter, vierter, etc.) Ordnung, so führen diese in einer ähnlichen Art zu weiteren zusätzlichen Frequenzen.