



Funktechnik – Basiswissen:

Gunthard Kraus, DG 8 GB

Signal-Plaudereien,

Teil 2, Fortsetzung aus UKW-Berichte 1/2010

4. Noch etwas über Modulation

4.1. Prinzip der Amplitudenmodulation (AM)

Sie ist wohl die älteste Modulationsart überhaupt, denn damit hat man schon vor ca. 100 Jahren als „Drahtlose Telegrafie“ mit der Morsetaste angefangen und dann folgte die Übertragung von Sprache und Musik. Der Grundgedanke ist einfach: Audiosignale haben eine viel zu große Wellenlänge, um sie über Antennen mit erträglichem Wirkungsgrad drahtlos abstrahlen zu können. Also sucht man nach einem „Lastesel“ (= Trägersignal mit hoher Frequenz, damit die Antenne klein wird), dem man die „Last“ (= Information) problemlos für den Transport aufbürden kann.

Dazu wird die Amplitude des Trägers im Rhythmus der Information geändert. Mathematisch gesehen wird hier eine Multiplikation von zwei verschiedenen Signalen und eine zusätzliche Addition

durchgeführt, was hier näher betrachtet werden soll.

Das Geheimnis zeigt **Bild 18**:

Ganz oben ist die konstante Trägerspannung mit $f = 10 \text{ kHz}$ und einem Spitzenwert von 1 V zu sehen, darunter folgt die Information als Sinus mit 500 Hz und $0,5 \text{ V}$ Spitzenwert. Multipliziert man diese beiden Signale miteinander, muss das Ergebnis ein Signal mit Trägerfrequenz sein, das

- dem Amplitudenverlauf der Information folgt, aber
- jedes Mal die Phase umkehrt, wenn die Informationsspannung negativ ist.

Dieses Multiplikationsergebnis trägt den speziellen Namen „Modulationsprodukt“. Man findet es im dritten Diagramm von oben und wenn man dieses zum unmodulierten Trägersignal addiert, wird die Gesamtspannung größer, wenn das Modulationsprodukt gleichphasig mit dem Träger ist. Ebenso erhält man ein kleineres Gesamtsignal in denjenigen Abschnitten, in denen Modulationsprodukt und Träger gegenphasig zueinander sind.

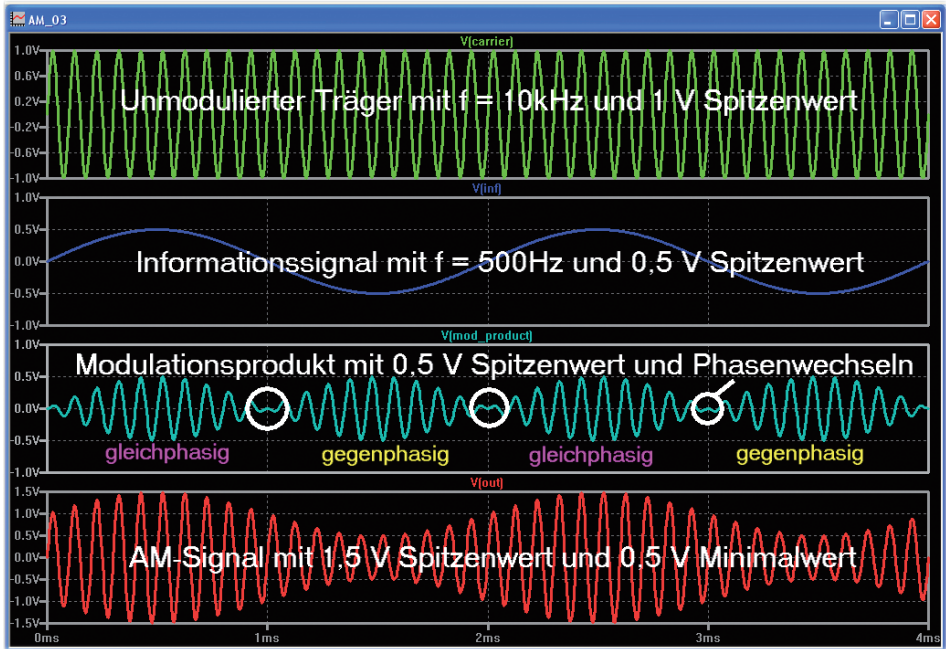


Bild 18: Hier sind alle Beteiligten der AM beieinander. Und wenn man den unmodulierten Träger (= ganz oben) zum Modulationsprodukt (drittes Signal von oben) addiert, erhält man das vollständige AM-Signal (ganz unten)

Die Gesamtspannung im untersten Diagramm, also vorliegendes AM-Signal, schwankt nun, wie gefordert im Rhythmus der Information.

Man könnte sich fragen, wieviele unterschiedliche Frequenzen hier im Spiel sind, schließlich handelt es sich nicht mehr um einen konstanten Sinus! Beim Trägersignal ist es einfach, denn das ist der „konstante Sinus“ mit nur einer Linie im Spektrum. Beim Modulationsprodukt bemüht man die Mathematik, die eine Formel für die Multiplikation von zwei Sinussignalen bereithält:

$$\sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) = \frac{1}{2} [\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)]$$

Als Produkt erhält man die Summen- und die Differenzfrequenzen der beiden beteiligten Sinussignale. Träger und Information selbst tauchen darin NICHT MEHR auf!

Das muss auch die Simulation zeigen und Kapitel 3.1.2. mit seiner „Behaviour Voltage bv“ liefert das nötige Handwerkszeug zur Multiplikation der beiden Signale. Dies wird in **Bild 19** bestätigt, was die beiden Anteile zeigt:

- a. die Summenfrequenz,
also $10 \text{ kHz} + 0,5 \text{ kHz} = 10,5 \text{ kHz}$
- b. die Differenzfrequenz,
also $10 \text{ kHz} - 0,5 \text{ kHz} = 9,5 \text{ kHz}$

Sie werden als obere und untere Seitenfrequenz bezeichnet und ihre Amplitu-

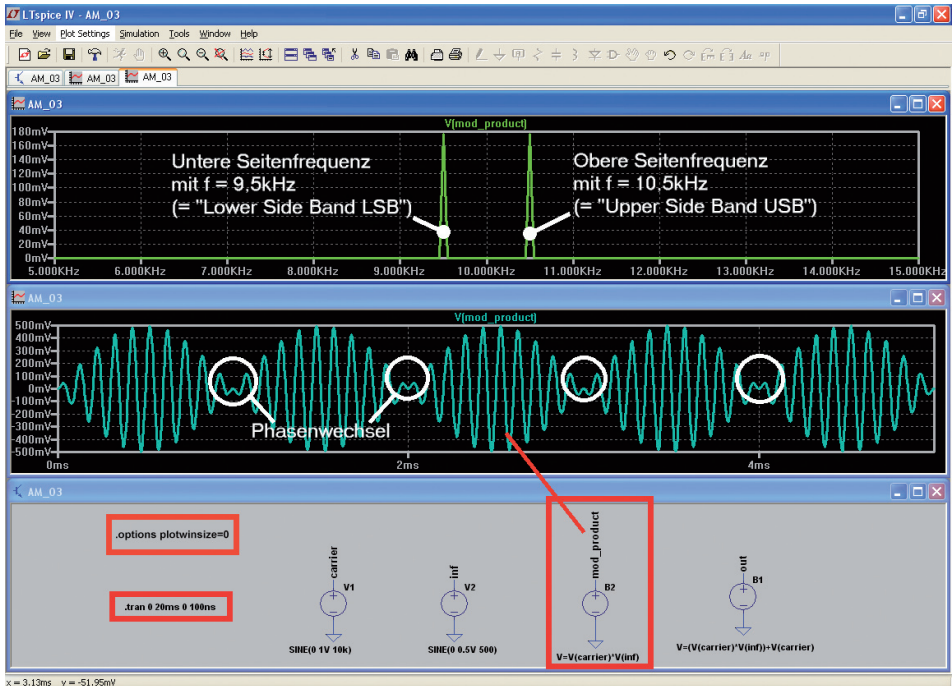


Bild 19: Das Modulationsprodukt im Detail. Das simulierte Spektrum zeigt, dass es aus zwei Einzelsignalen besteht...

den sind gleich groß. Der Spitzenwert beider Signale beträgt je 50 % der Information, also 250 mV. Und im Spektrum werden daraus - wegen der dort gültigen Effektivwert-Anzeige - ca. 180 mV.

Beim kompletten AM-Signal kommt noch das Trägersignal dazu, was man mit einer weiteren „bv-Quelle“ erledigt. Auch das ist in **Bild 20** gut zu sehen.

Abschließende Anmerkung:

Meist sind bei der Information mehrere Frequenzen oder ein komplettes Frequenzband beteiligt. Deshalb spricht man in diesen Fällen vom unteren und vom oberen Seitenband, also vom „Lower Side Band-LSB“ und „Upper Side Band-USB“ in einem AM-Signal.

4.2. Amplitude Shift Keying (ASK)

Damit ist nun wirklich die gute alte Morsetaste mit ihrem „EIN“ und „AUS“ gemeint. Diese so simple Methode hat auch heute noch ihren Platz in der modernen Übertragungstechnik, denn den beiden Zuständen werden einfach die logischen Pegel „Null“ und „Eins“ zugeordnet. Das funktioniert erstaunlich gut und leidlich störsicher (...wenn man mit zusätzlicher Begrenzung arbeitet). Außerdem hält sich der Schaltungsaufwand in Grenzen.

Für die Simulation benützt man wieder die „bv“-Quelle und multipliziert den Trä-

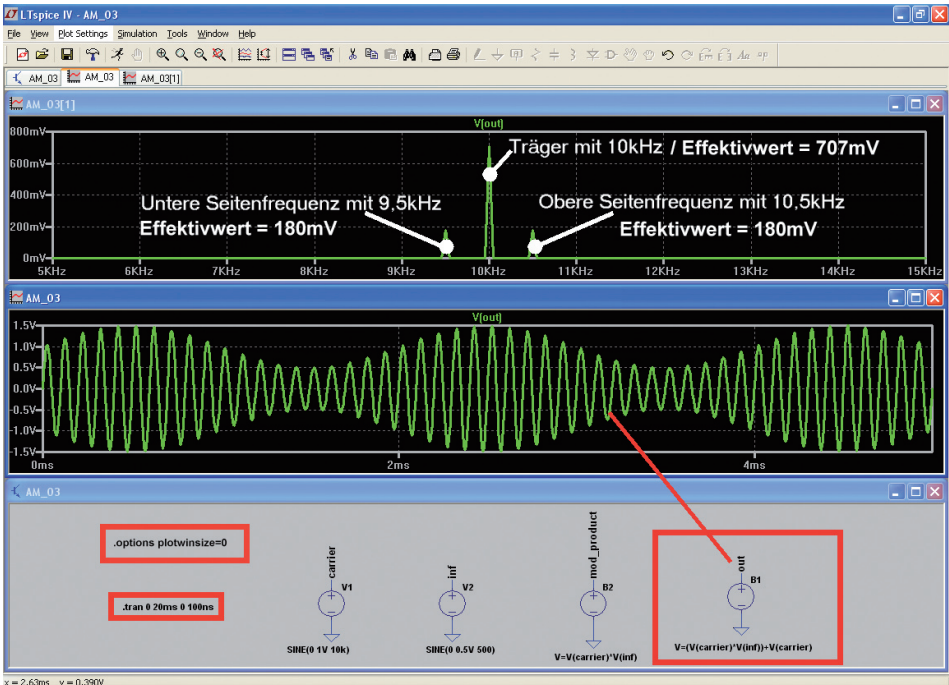


Bild 20: ...und wenn der unmodulierte Träger addiert wird, erhält man das komplette AM-Signal; das zugehörige Spektrum ist selbst erklärend

ger mit einem symmetrischen Rechtecksignal von 1 kHz als Information. Deren kleinster Spannungswert sei Null Volt, das ergibt „Taste offen“. Die Maximalspannung sei dagegen 1 V und dadurch ist „die Taste gedrückt“.

Als Trägersignal wählt man beispielsweise 455 kHz (...kommt das irgendwie bekannt vor...?) und bleibt bei einem Spitzenwert von 1 V bzw. einem Effektivwert von 0,707 V. Die erforderliche Simulationsschaltung und die Ausgangssignale der benutzten drei Spannungsquellen zeigt **Bild 21**. Das Spektrum des ASK-Signals folgt in **Bild 22** und was man da sieht, war zu erwarten. Die symmetrische rechteckförmige Information enthält

nämlich außer der Grundwelle auch alle ungeradzahigen Oberwellen von 1 kHz; das Ergebnis sind folglich ein LSB bzw. USB mit all diesen Spektralanteilen der Information, die sich links und rechts des Trägers ausbreiten.

4.3. Die Frequenzmodulation

Sie ist eine raffinierte Sache, denn man bearbeitet diesmal nicht die Amplitude des Trägers. Ja, sie ist sogar absolut unwichtig und wird z.B. in einem FM-Empfänger durch Begrenzung von allen Schwankungen und Störspitzen befreit.

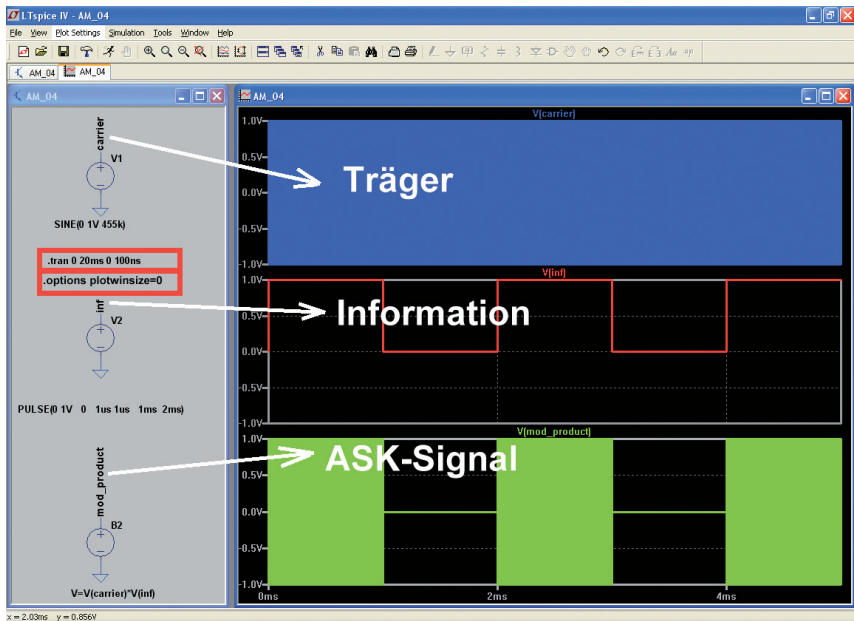


Bild 21: Sowohl gedanklich als auch in der Simulation macht ASK mit einem Rechtecksignal keine Mühe

Dafür ändert man die Trägerfrequenz im Rhythmus der Informationsspannung. Das kostet zwar deutlich mehr Bandbreite und bedeutet wesentlich höheren technischen Aufwand, aber der Erfolg ist überzeugend - man muss sich nur einmal auf UKW gute Musik anhören.

Schön ist, dass LTspice dafür sogar drei Bauteile zur Verfügung stellt:

- Man kann bei der schon oft verwendeten Spannungsquelle („voltage“) auf FM-Erzeugung (= „SFFM“) umschalten. Dabei wird ein sinusförmiger Träger erzeugt und automatisch eine sinusförmige Information vorausgesetzt.
- Weiter gibt es einen fertigen FM-AM-Generator, den man als „modulate“ im Unterordner „Special Functions“ findet.

Er eignet sich auch für andere Informations-Kurvenformen.

c. Und endlich gibt es im gleichen Unterordner noch den FM-AM-Generator „modulate2“, der Quadraturausgänge besitzt (= zwei getrennte Ausgänge, an denen um 90 Grad verschobene Trägersignale zur Verfügung stehen).

4.3.1. Erzeugung eines FM-Signals mit der Spannungsquelle „voltage“

Dazu sollte man **Bild 23** genauer betrachten. Die Frequenz der Trägerschwingung wird bei der positiven Halbwelle der Information höher, bei der

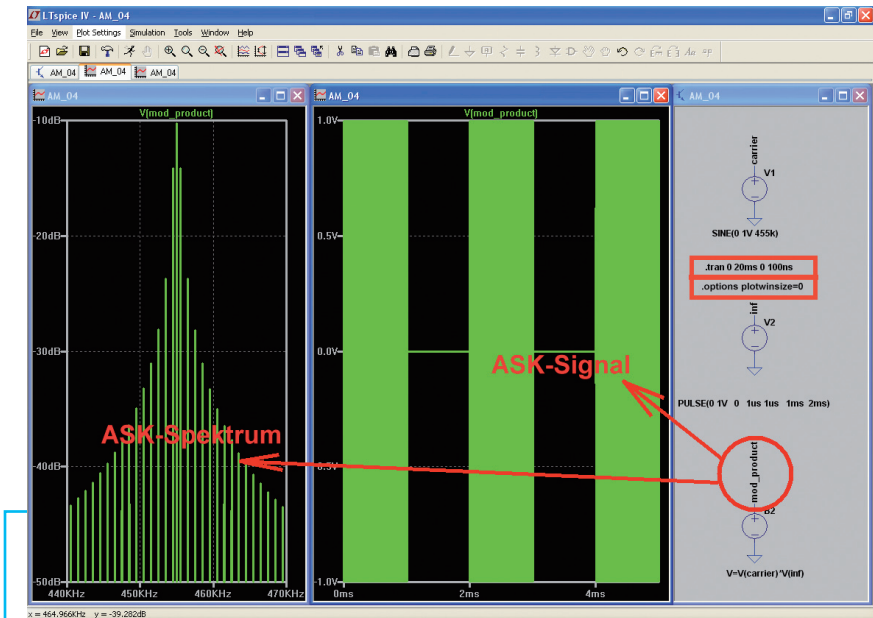


Bild 22: Richtig interessant wird dagegen das Spektrum des ASK-Signals, denn die Oberwellen des Rechtecks bilden nun die Seitenbändern (links und rechts vom Träger)

negativen Halbwelle dagegen tiefer. Leider lässt sich bei dieser Betriebsart die modulierende Informationsspannung NICHT zusätzlich in einem getrennten Diagramm darstellen. Die Datenkompression ist - wie immer! - abgeschaltet. Simuliert wird über 20 ms (Auflösung: 100 ns), aber zum besseren Verständnis ist nur ein kurzer Abschnitt herausvergrößert. Den Rest ersieht man aus der Programmierung der SFFM-Quelle. Dort findet man die Zeile

SFFM(0 1V 10k 6.28 1k)
und das bedeutet nacheinander:

- 0 = kein DC-Anteil
- 1 V = Spitzenwert des Trägers
- 10 kHz = unmodulierte Trägerfrequenz
- 6,28 = Modulationsindex
- 1 kHz = sinusförmige Information mit $f = 1 \text{ kHz}$

Hier ist natürlich noch ein Wort zum Modulationsindex nötig. Wird die Trägerfrequenz höher, kann man das auch als ein Voreilen der Phase gegenüber dem unmodulierten Zustand deuten. Ebenso bedeutet eine tiefere Augenblicksfrequenz ein Nacheilen der Phasenlage gegenüber dem unmodulierten Trägersignal.

Dieses Vor- und Nacheilen der Phase drückt der Modulationsindex aus. Er stellt nichts anderes dar, als die maximale Phasenverschiebung gegenüber dem Ruhezustand und man gibt diese Phasenabweichung im Bogenmaß an.

Bei vorliegendem Beispiel steht dort „6,28“ und das ist schlicht und einfach der Umfang eines Kreises mit dem Radius „1“. Also gehören zu einem solchen Vollkreis maximal 360 Grad an Voreilung

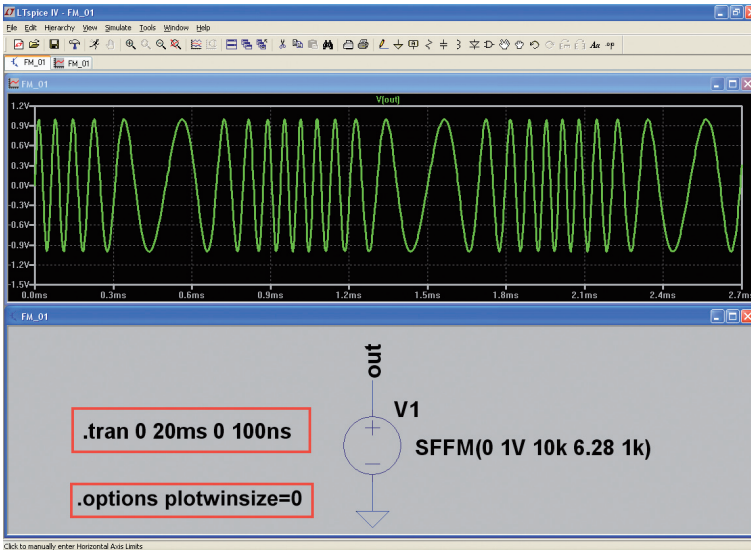


Bild 23:
So schön und so einfach kann man ein frequenzmoduliertes Signal erzeugen. Leider lässt sich die modulierende (sinusförmige) Informationsspannung nicht getrennt darstellen

bzw. Nacheilung! So einfach ist das...

Abgeschlossen werden soll dieses Kapitel mit der FFT, also der Simulation des zugehörigen Spektrums mit 131 072 Samples (**Bild 24**). Man kann erkennen, dass das gesamte Spektrum mit Linien belegt ist, die voneinander den Abstand der Informationsfrequenz haben. Bei der Amplitudenverteilung und beim Hüllkurvenverlauf bekommt man es mit den „Bessel-Funktionen“ zu tun. (Eigentlich nicht schwer zu verstehen, wenn man sich eingehend damit beschäftigt. Die Bandbreite, die das fertige FM-Signal belegt, steigt einfach mit dem Modulationsindex, aber der Hüllkurvenverlauf und die Anzahl der Spektrallinien verändern sich dabei entsprechend einer solchen Funktion). Hier gibt es Extremfälle, bei denen sogar beim Steigern des Modulationsindex der unmodulierte Träger kurz zu Null wird.

Noch ein Wort zum so genannten „Frequenzhub“. Er gibt die maximale Ab-

weichung der Augenblicksfrequenz gegenüber dem unmodulierten Zustand an und hängt natürlich mit dem Modulationsindex (für den bisweilen auch die Bezeichnung „Phasenhub“ benutzt wird) zusammen.

Als Beispiel: beim UKW-Rundfunk im Bereich von 88 bis 108 MHz wird mit maximal „± 75 kHz“ Frequenzhub gearbeitet. Das erscheint sehr wenig, aber es darf nicht mehr sein, da sonst die maximal zulässige Kanalbandbreite (300 kHz) überschritten und damit der Sender im Nachbarkanal gestört wird.

Als Faustformel gilt:
Erforderliche FM-Kanalbandbreite = 2 x (Frequenzhub + Informationsfrequenz)

Wen es interessiert: aus dem Frequenzhub und der Informationsfrequenz kann man den Phasenhub, also den vorhin diskutierten Modulationsindex in „rad“, leicht ausrechnen:

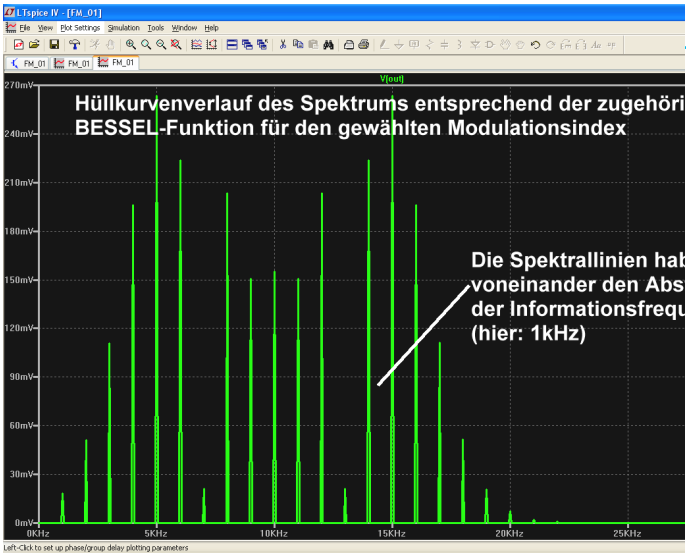


Bild 24:
Ein FM-Spektrum ist am Anfang schon etwas verwirrend: es sind unzählige Spektrallinien im Abstand der Informationsfrequenz vorhanden. Und ihre Amplituden ändern sich nicht logisch, sondern nach Bessel-Funktionen, wenn man irgendwelche Details ändert

$$\text{Modulationsindex} = \frac{\text{Frequenzhub}}{\text{Informationsfrequenz}}$$

Sieht man sich diese Formel genauer an, erkennt man sofort den Unterschied zwischen den beiden Betriebsarten der Frequenzmodulation und der Phasenmodulation. Es gilt nämlich:

- Bei der Frequenzmodulation hält man den Frequenzhub konstant. Nach der obigen Formel MUSS dann der Modulationsindex und damit der maximale Phasenhub mit steigender Informationsfrequenz ABNEHMEN. Das verschlechtert leider den Signal-Rausch-Abstand bei hohen Tönen...
- Bei der Phasenmodulation hält man dagegen den Modulationsindex = Phasenhub konstant. Nach obiger Formel vergrößert sich der Frequenzhub mit steigender Informationsfrequenz was wiederum die belegte Bandbreite erhöht.

4.3.2. FSK = Frequency Shift Keying

Hier handelt es sich um eine digitale Betriebsart (manchmal auch als Frequenzumtastung bezeichnet), die den beiden Zuständen „log 0“ und „log 1“ zwei unterschiedliche Frequenzen zuordnet. Ihre Wurzeln liegen schon weit zurück, nämlich in der damaligen Fernschreiber-technik. Das einzige, was davon übrig geblieben ist, sind die beiden Bezeichnungen „mark“ für die höhere Frequenz und „space“ für die tiefere Frequenz. Immerhin benötigt man diese beiden Angaben für die Programmierung des erwähnten AM-FM-Generators „modulate“ aus der LTSpice-Vorratskiste!

Dabei ist leider etwas Aufwand erforderlich. Wenn man sich das Bauteil auf den Schirm holt, fehlt nämlich im Normalfall

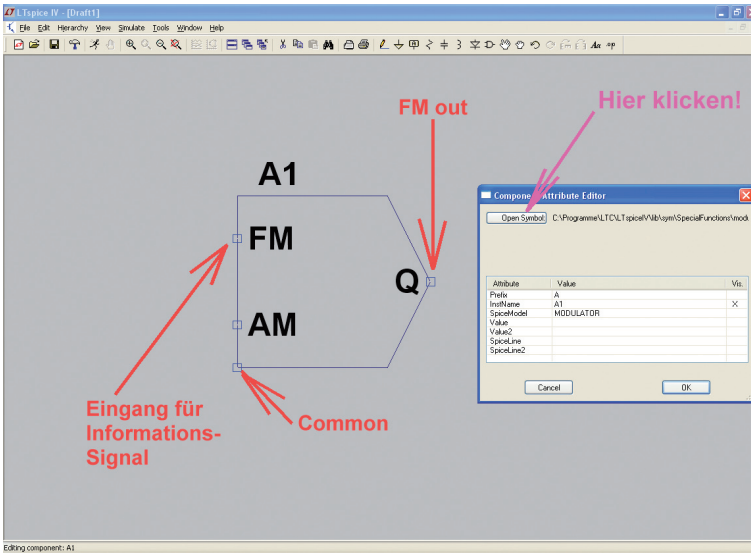


Bild 25:
So ein fertiger FM-AM-Generator ist schon ein „hübsches“ Spielzeug; allerdings erfordert die Programmierung und Bedienung etwas Aufwand (siehe Text)

die „Grundeinstellung“ dieses VCOs (= voltage controlled oscillator). Um das zu ergänzen, klickt man mit der rechten Maustaste auf das Schaltzeichen und öffnen es damit im „Component Attribute Editor“. Durch einen Klick auf den Button „Open Symbol“ wechselt man automatisch zum eigentlichen Symboleditor (erkennbar an den kleinen roten Kreisen an den Enden der einzelnen Linien, die im Schaltzeichen auftauchen und Fangpunkte darstellen) und kann es bearbeiten. Über den Pfad „Edit / Attributes / Edit Attributes“ kommt man an den „Symbol Attribute Editor“ heran und öffnet ihn (**Bild 25**). In der Zeile „value“ legt man mit dem Eintrag „mark=10k space=5k“ die Steuereckennlinie des VCOs fest:

Damit erhält man mit einer Spannung von Null Volt am FM-Eingang die Ausgangsfrequenz „Space“ von 5 kHz. Mit einer Spannung von 1 V an FM dage-

gen wird die „Mark“-Frequenz von 10 kHz erzeugt.

Ein Neuling tut sich bei diesem Eintrag etwas schwer: man muss zuerst auf die Zeile „value“ klicken und dann OBERHALB der Tabelle in dem kleinen Fenster diese Zeile „mark=10k space=5k“ eintippen. Mit OK wird der Eintrag übernommen - aber er ist nicht auf dem Bildschirm zu sehen! Dazu ruft man nochmals einen Pfad auf: „Edit / Attributes / Attribute Window“. Klickt man in dieser Tabelle auf „value“ und OK, hängt sofort die „Mark-Space-Programmierung“ am Cursor und kann neben dem Schaltzeichen platziert werden. Jetzt muss nur noch dieses geänderte Symbol am richtigen Ort in der Bauteilbibliothek gespeichert werden (es war der Pfad „LTspiceIV / lib / sym / Special Functions / modulate“) und man hat diesen VCO zur Verfügung, aber erst wenn man alle Fenster geschlossen und

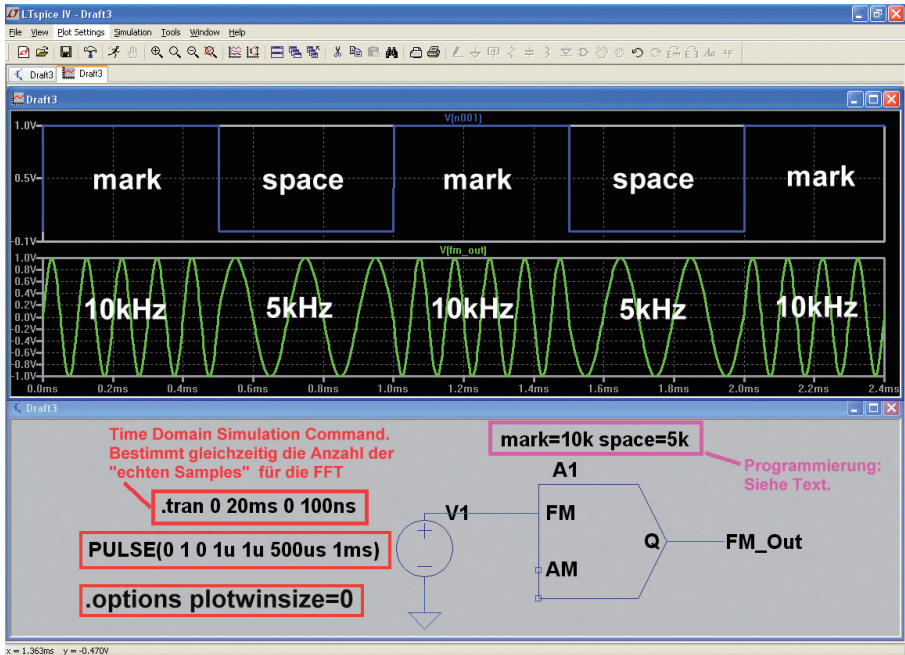


Bild 26: Dafür ist das Ergebnis der Simulation überzeugend, sobald alles klappt; auch die Informationsspannung bekommt man hier zu sehen!

das Programm neu gestartet und ein neues Projekt angelegt hat, denn sonst weiß das Programm nichts vom geänderten Symbol.

Weiter geht es jetzt mit **Bild 26**. Da wird eine Impulsspannung mit $f = 1 \text{ kHz}$ ($U_{\min} = 0 \text{ V} / U_{\max} = 1 \text{ V}$) an den FM-Eingang angelegt und am Ausgang (der mit dem Fähnchen „FM_Out“ versehen wurde) die Spannung simuliert. Außerdem sorgt man (über einen rechten Mausklick auf das Diagramm und „Add Plot Pane / Add Trace“) dafür, dass zusätzlich die Informationsspannung dargestellt wird. Wegen der folgenden FFT wurden die Einstellungen „20 ms Simulationszeit bei einem „Maximum Time Step“ von 100 ns“

gewählt, um 200 000 echte Samples zu erhalten. Und weiterhin wird ohne Datenkompression gearbeitet.

Als Abschluss folgt in **Bild 27** noch das mit 131 072 Samples simulierte, linear dargestellte Frequenzspektrum. Es weist zwei Maxima auf, nämlich eines im „Mark“-Bereich und eines im „Space“-Bereich - eine bekannte Tatsache, die man in der Fachliteratur nachlesen kann. Und es belegt eben doch eine beträchtliche Bandbreite bei einer Übertragung, denn so etwa 20 kHz sollten es wohl sein.

... soviel zu diesem Thema.

Nun noch einige Übungen für den aktiven Leser, der bis hierher am Rechner durchgehalten hat:

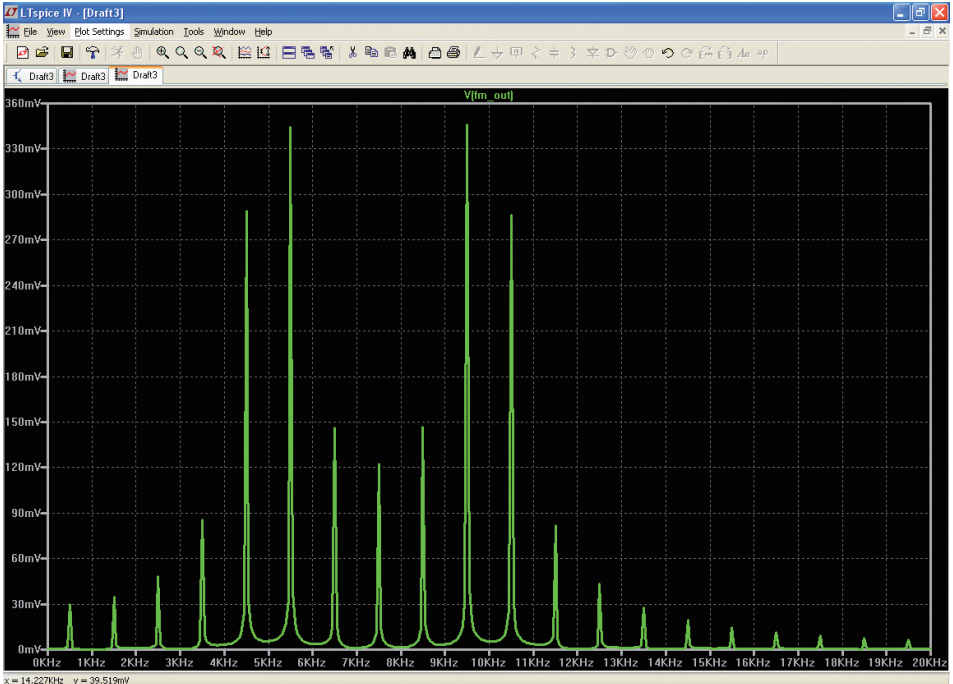


Bild 27: Vorschriftsmäßig, wie aus dem Lehrbuch: bei einem FSK-Signal mit Rechteckmodulation bekommt man zwei Maxima, jeweils bei „Mark (= um 5 kHz herum)“ bzw. „Space“ (um 10 kHz herum)

- a. Verändern Sie am Informationseingang die minimale und maximale Impulsamplitude. Prüfen Sie, ob auch negative Spannungswerte zulässig sind.
- b. Verwenden Sie als Information anstelle des Impulssignals ein Sinussignal mit 1 kHz. Wählen Sie die Informationsamplitude so groß, dass exakt die „mark“- und „space“-Grenzfrequenzen erreicht werden und verwenden Sie dazu einen Offset beim Sinus. Vergleichen Sie die jetzt belegte Bandbreite mit den Verhältnissen bei der Impulsübertragung.
- c. Benützen Sie als Information eine Dreiecksspannung mit derselben Frequenz von 1 kHz.

7. Literatur

Zu diesem Thema findet man sowohl im Internet, als auch in der Literatur Hinweise und Quellen, u.a diese:

- [1] Homepage von LINEAR TECHNOLOGY mit der Möglichkeit „LTSpice“ herunterzuladen: www.linear.com
- [2] Gunthard Kraus: „Simulation von HF-Schaltungen mit LTSpiceIV, Teil 1“. UKW-Berichte 4/ 2009, Seite 195