

Modulationsverfahren Teil 3

In diesem Teil der Artikelserie widmen wir uns den Winkelmodulationsverfahren und betrachten die Frequenzmodulation sowie gleichzeitig die sehr eng damit verknüpfte Phasenmodulation.

Winkelmodulation

Mit der Frequenz- und Phasenmodulation stellen wir zwei weitere Modulationsverfahren vor, bei denen einem sinusförmigen Träger ein analoges NF-Signal aufgeprägt wird. Mit dem Begriff „Winkelmodulation“ werden diejenigen Modulationsverfahren beschrieben, die das Argument einer Winkelfunktion beeinflussen, d. h. die Frequenz bzw. die Phasenlage verändern. Die Variation der Frequenz bzw. der Phase eines sinusförmigen Signals bei konstanter Amplitude ergibt die Frequenz- bzw. Phasenmodulation. Diese beiden Modulationsverfahren werden wir gemeinsam beschreiben, da sie sehr eng miteinander verknüpft sind und sich, wie wir später noch zeigen werden, direkt ineinander überführen lassen.

Die Winkelmodulationsverfahren gehören zu den am weitverbreitetsten Modulationsverfahren. Vor allem die Frequenzmodulation besitzt mit der UKW-Rundfunkübertragung, der Tonübertragung im deutschen Fernsehsystem und der Übertragung von Fernsehsignalen via Satellit sehr bedeutende Einsatzgebiete.

Prinzipiell funktionieren auch diese Modulationsverfahren wie das bereits vorgestellte AM-Verfahren, indem ein weiterer Parameter einer Sinusschwingung im Sinne des modulierenden Signals beeinflusst wird. Bei der Frequenzmodulation (FM) ist dies der Parameter Frequenz und bei der Phasenmodulation (PM) dementsprechend die Nullphasenlage.

Zunächst werden wir die Frequenzmodulation prinzipiell und plausibel erklären und uns anschließend in gleicher Form mit der Phasenmodulation beschäftigen.

Frequenzmodulation

Bei der Frequenzmodulation wird die Frequenz eines beliebigen sinusförmigen Trägersignals im Rhythmus des niederfrequenten Modulationssignals geändert. D. h. die Augenblicksfrequenz weicht von der ursprünglichen Trägerfrequenz um einen Betrag ab, der proportional der dem Augenblickswert der Amplitude ist. Diese Modulation läßt sich auf einfache Weise mit Hilfe eines spannungsgesteuerten Oszillators realisieren und auch anhand dessen erklären. Bei einem solchen VCO (Voltage Controlled Oscillator) ist die hochfrequente

Resonanzfrequenz (Trägerfrequenz) mit Hilfe einer Steuerspannung in gewissen Grenzen einstellbar. Die Abhängigkeit der Schwingfrequenz von einer Spannung erreicht man z. B. mittels Kapazitätsdioden, die ihre Kapazität in Abhängigkeit einer anliegenden Spannung verändern und damit die Resonanzfrequenz eines LC-Schwingkreises ändern. Wird dieser Steuerspannung ein niederfrequentes Signal (modulierendes Signal) überlagert, so erhält man eine Frequenzmodulation.

Im Bereich der Signalerzeugung, z. B. in Sinusgeneratoren, ist diese Beeinflussung nicht gewollt. Hier bewirkt ein der Abstimmspannung überlagertes NF-Signal eine störende FM, auch Störhub genannt,

die in den technischen Daten hochwertiger Sinusgeneratoren angegeben ist. In der Nachrichtentechnik wird mittels dieser FM die Übertragung von Informationssignalen realisiert. Der Oszillator für den hochfrequenten Träger wird in Abhängigkeit vom niederfrequenten, modulierenden Signal verstimmmt, d. h. das NF-Signal wird mittels dieser Modulation, wie schon bei der Amplitudenmodulation, in einen höheren Frequenzbereich verschoben.

In Abbildung 13 ist ein solches frequenzmoduliertes Signal dargestellt, wobei die Signale so gewählt sind, daß das Prinzip dieses Modulationsverfahrens deutlich erkennbar ist. In der Praxis ist die Modulation weniger stark ausgeprägt, so

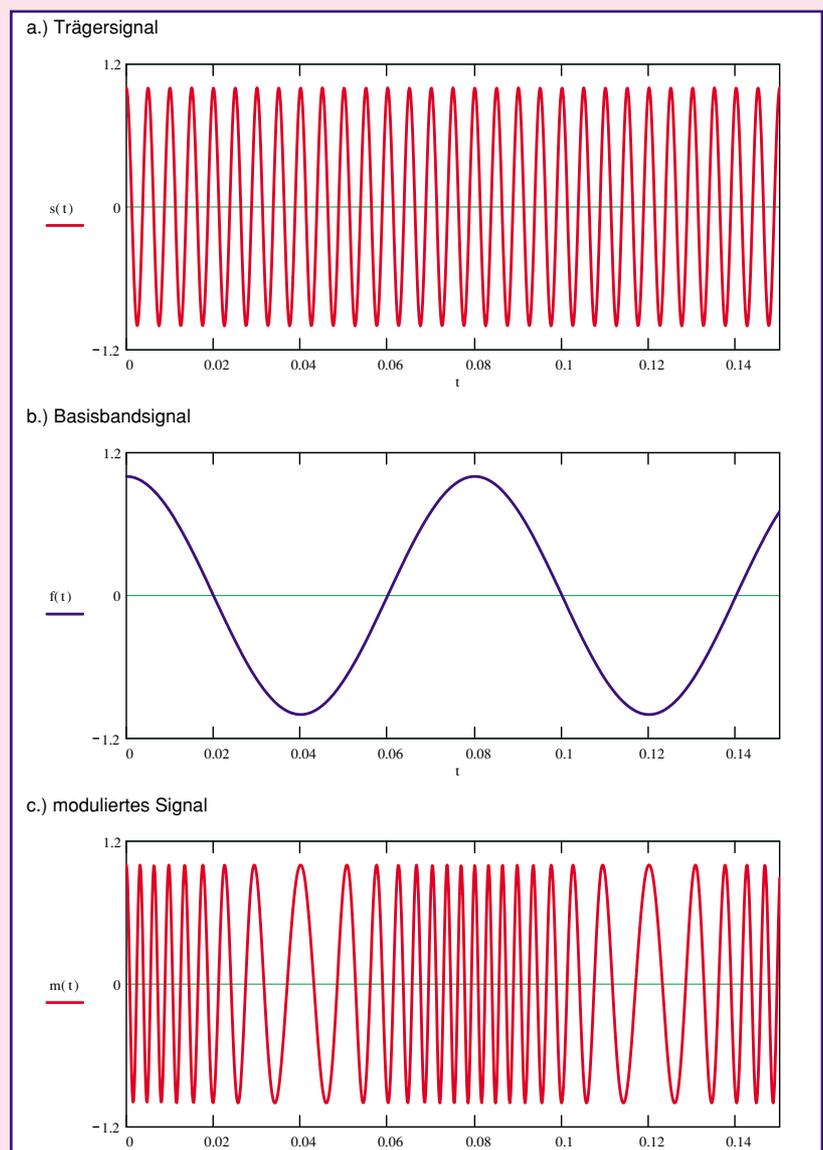


Bild 13: Frequenzmodulation im Zeitbereich

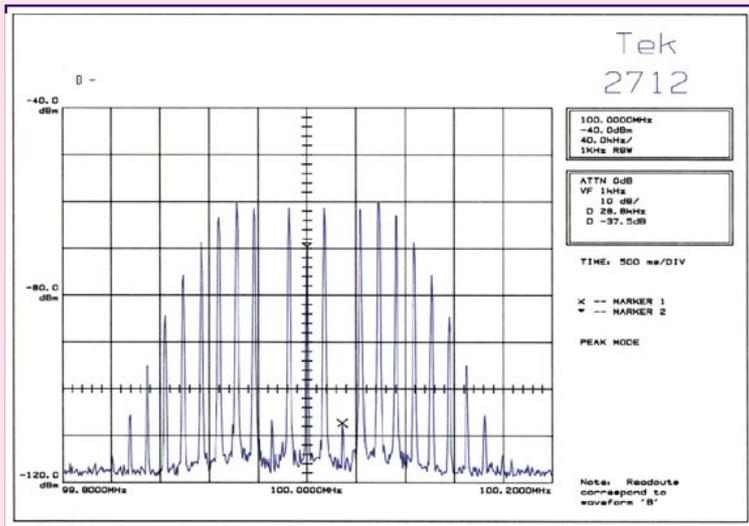


Bild 14:
FM-Signal im
Frequenz-
bereich

daß die Frequenzänderung im Zeitbereich nicht sichtbar wird. Das hier dargestellte Trägersignal (13a) wird durch das Basisbandsignal (13b) in der Frequenz verändert und es entsteht das Ergebnis der Modulation (13c). Anhand dieser Abbildung ist die Funktionsweise leicht nachvollziehbar: Ist das Basisbandsignal gleich Null, d. h. hier im Nulldurchgang, so ist die Frequenz des modulierten Signals (13c) gleich der Trägerfrequenz (13a). Steigt die Amplitude des Basisbandsignals an (z. B. im Bereich von $t = 0,06$ bis $0,1$), so erhöht sich auch die Frequenz des modulierten Signals wie in Bild 13c dargestellt. Erreicht das NF-Signal seinen maximalen Amplitudenwert (z. B. bei $t = 0,08$), so ist auch die Frequenzabweichung des Trägers am größten. Sinkt umgekehrt die Amplitude des modulierenden Signals, so wird auch die Frequenz des Trägers kleiner. Im Minimum (z. B. bei $t = 0,04$) hat dann das FM-Signal seine kleinste Augenblicksfrequenz. Wie leicht zu erkennen ist, ist die Frequenzabweichung des Trägers proportional zur Amplitude des NF-Signals.

Eine Frequenzmodulation läßt sich durch verschiedene Parameter exakt beschreiben. Einer dieser charakteristischen Werte ist die maximale positive oder negative Abweichung der Augenblicksfrequenz von der Träger-Nullfrequenz (Trägerfrequenz ohne Modulation). Dieser Parameter wird als Frequenzhub ΔF bezeichnet. In allen Anwendungen der FM-Übertragung ist dieser Wert festgelegt. So gilt z. B. im UKW-Ton-Rundfunk ein maximaler Frequenzhub von $\Delta F = \pm 75$ kHz und bei der Tonübertragung im Fernsehsystem ist der maximale Hub auf ± 50 kHz festgelegt. Das bedeutet, daß sich, z. B. bei einem UKW-Sender (Mono) mit einer Trägerfrequenz von 98,1 MHz, bei Vollaussteuerung Augenblicksfrequenzen im Bereich von 98,025 MHz bis 98,175 MHz ergeben.

Aus dem obigen Gedankenexperiment zur Erzeugung der FM mittels eines span-

nungsgesteuerten Oszillators läßt sich leicht folgern, daß je größer die Amplitude des überlagerten, modulierenden Signals wird, desto größer auch die maximale Abweichung von der Träger-Nullfrequenz wird. Die Amplitude des modulierenden Signals erscheint somit als maximaler Frequenzhub im modulierten Signal. Die Frequenz des Basisbandsignals läßt sich im zeitlichen Abstand zwischen den Frequenzminima im FM-Signal wiederfinden, d. h. die Anzahl der maximalen positiven oder negativen Frequenzhübe pro Zeiteinheit ergibt die Frequenz des NF-Signals.

Diese einfache Analyse des modulierten Signales funktioniert so aber nur bei „einfachen“ Basisbandsignalen wie z. B. Sinus- oder Rechteckfunktionen (Abbildung 13), bei komplexeren Signalformen wie z. B. Sprachsignalen lassen sich die Parameter der FM aus dem zeitlichen Verlauf des FM-Signals nicht mehr ablesen.

Neben dem zeitlichen Verlauf eines FM-Signals gibt die spektrale Darstellung, d. h. die Darstellung im Frequenzbereich, Aufschluß über die verschiedenen Modulationsparameter. In Abbildung 14 ist das Betragsspektrum eines FM-Signals dargestellt. Ein 100MHz-Trägersignal ist hier mit einem NF-Signal von 14,4 kHz moduliert, wobei der Frequenzhub $\Delta F = 75$ kHz beträgt. In dieser Abbildung sind die bei der Modulation entstandenen Seitenbänder gut zu erkennen. Die Seitenbandsignale treten im Abstand der Frequenz des modulierenden Signals, hier 14,4 kHz, auf. Im Gegensatz zur Amplitudenmodulation, wo bei einem solchen modulierenden Signal nur eine Spektrallinie im Seitenband erscheint (siehe „ELVjournal“ 5/98, Bild 3), ist bei der FM ein breites Linienspektrum sichtbar. Hieraus erkennt man, daß die für die Übertragung benötigte Bandbreite im HF-Bereich wesentlich größer ist als bei einer AM.

Theoretisch betrachtet benötigt eine Frequenzmodulation eine unendliche Bandbreite, wie wir später noch nachweisen

werden. In der Praxis ist dies aber nicht realisierbar, so daß diese theoretische Bandbreite auf die sogenannte Carson-Bandbreite beschnitten wird. Diese ist definiert über:

$$\Delta f = 2 \cdot (\Delta F + f_G) \quad (\text{Gl. 24}).$$

Dabei gibt f_G die obere Grenzfrequenz des modulierenden Signals an. Diese Begrenzung der Bandbreite im HF-Bereich bewirkt eine nichtlineare Verzerrung des NF-Signals nach der Demodulation. Die gewählte Bandbreite stellt dabei einen Kompromiß zwischen den sich entgegenstehenden Forderungen nach minimalen Verzerrungen und kleiner HF-Bandbreite dar. Läßt man eine quasi unendliche Bandbreite zu, so würden sich die systembedingten Verzerrungen minimieren, man könnte aber nur ein NF-Signal übertragen, die Übertragung mehrerer Signale im Frequenzmultiplex wäre nicht möglich.

Ein weiterer wichtiger Parameter der Frequenzmodulation ist der Modulationsindex μ_{FM} . Dieser ist definiert als Quotient von Frequenzhub zu Signalfrequenz, d. h. es gilt:

$$\mu_{FM} = \frac{\Delta F}{f_1} \quad (\text{Gl. 25}).$$

Dieser Parameter gibt im Prinzip die „Stärke“ der Modulation an. Bei UKW-Rundfunk liegt der Index bei maximal 5 (75 kHz Hub und 15 kHz max. Signalfrequenz) und bei der Übertragung des TV-Tonsignals bei 3,33 (50 kHz Hub und 15 kHz max. Signalfrequenz). Wird ein größerer Modulationsindex zugelassen, so vergrößert sich auch die Bandbreite. Kombiniert man die Gleichungen 24 und 25, kann man die HF-Bandbreite (Carson-Bandbreite) auch wie folgt definieren:

$$\Delta f = 2 \cdot (\mu_{FM} + 1) \cdot f_G \quad (\text{Gl. 26}).$$

Aus den vorherigen Definitionen läßt sich dann auch leicht der Bandbreitendehnungsfaktor β , der die Vergrößerung der benötigten HF-Bandbreite gegenüber der Bandbreite des Basisbandsignals beschreibt, berechnen. Dieser ist vom Modulationsindex abhängig und läßt sich wie folgt bestimmen:

$$\beta = 2 \cdot (\mu_{FM} + 1) \quad (\text{Gl. 27}).$$

Vergleicht man die Bandbreitendehnung der FM, die z. B. bei $\mu_{FM} = 5$ einen Wert von 12 annimmt, so ist dabei der enorme „Verbrauch“ an HF-Bandbreite bei den Winkelmodulationsverfahren erkennbar. Gegenüber einer „einfachen“ Amplitudenmodulation ($\beta = 2$) wird die 6fache Bandbreite benötigt. Dies ist der Preis, den man für die bessere Übertragungsqualität bei der Frequenzmodulation zahlen muß.

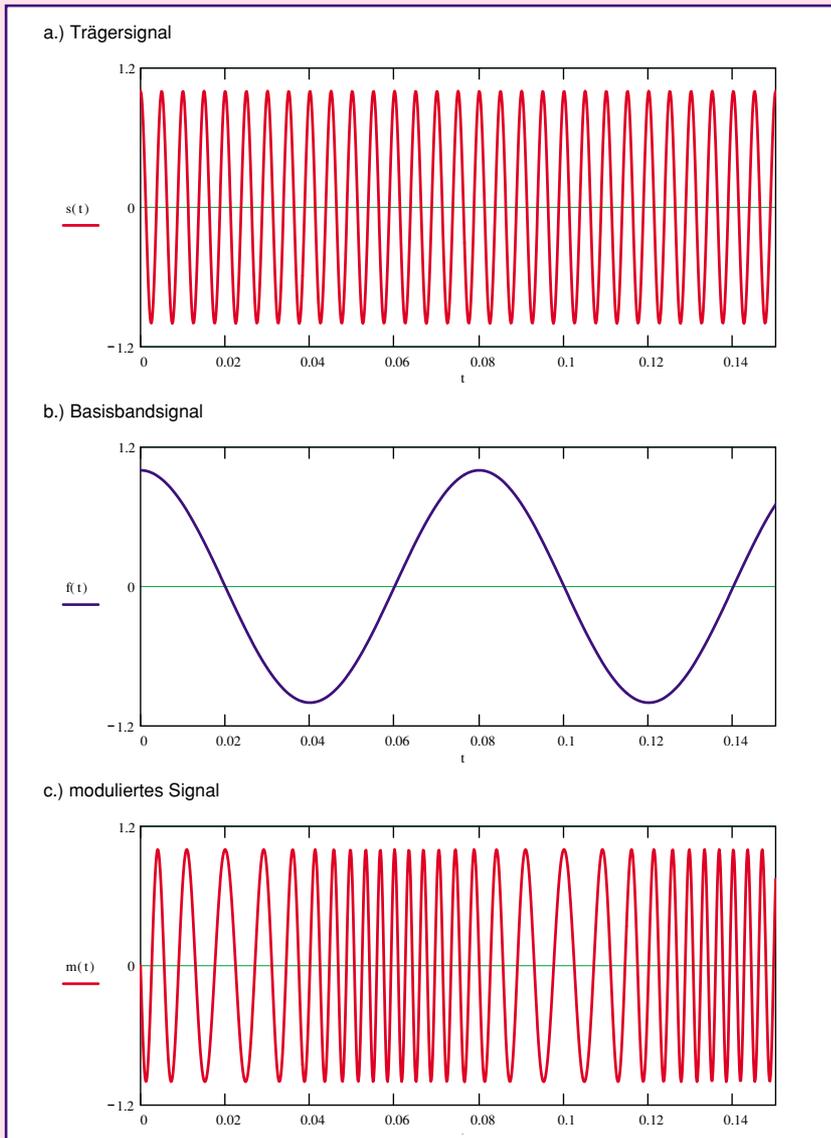


Bild 15: Phasenmodulation im Zeitbereich

Phasenmodulation

Genauso wie bei der Frequenzmodulation wird auch bei der Phasenmodulation das Argument einer Winkelfunktion verändert. Hier wird die Phasenlage eines beliebigen sinusförmigen Trägersignales im Rhythmus des niederfrequenten Modulationssignales geändert, d. h. der Phasenwinkel des Modulationsproduktes weicht vom Phasenwinkel des Trägers um einen Betrag ab, der proportional zum Augenblickswert der Amplitude des modulierenden Signals ist. Die Darstellung in Abbildung 15 zeigt ein solches PM-Signal, wobei auch hier die Signale so gewählt sind, daß das Prinzip der Phasenmodulation deutlich erkennbar ist. Das Trägersignal (15a) wird hier durch das Basisbandsignal (15b) in der Phase verändert und es entsteht das Ergebnis der Modulation (15c). Anhand dieser Abbildung ist die Funktionsweise zwar leicht nachvollziehbar, bedarf aber einiger genauerer Überlegungen: Im Nulldurchgang (z. B. $t = 0,06$) des Basis-

bandsignals kommt es zu keiner Beeinflussung, die Phasenwinkel des Trägers ($\varphi = 0$) und des modulierten Signals ($\varphi = 0$) sind identisch. Mit steigender Amplitude des Basisbandsignals verändert sich auch die Phasenlage des modulierten Signals. In diesem Fall sind, zur besseren Veranschaulichung, die Parameter der Phasenmodulation so gewählt, daß sich eine Phasenänderung von $2,5\pi \triangleq 450^\circ$ ergibt, wenn das

Basisbandsignal $f(t) = 1$ ist. In diesem Fall, z. B. bei $t = 0,08$, erkennt man im modulierten Signal 15c genau eine Phasenverschiebung von $\Delta\varphi = \pi/2 \triangleq 2,5\pi$ gegenüber dem Träger. Umgekehrt muß sich bei $f(t) = -1$ eine Phasenänderung von $-2,5\pi \triangleq -\pi/2$ ergeben, die sich auch bei $t = 0,12$ ablesen läßt. Bei allen Amplituden, die zwischen diesen Extremwerten liegen, ergibt sich eine entsprechende Phasenänderung, die zwischen diesen Werten liegt.

Für die einfache Darstellung der Phasenmodulation eignet sich auch die Zeigerdarstellung, die schon bei der Beschreibung der AM im „ELVjournal“ 5/98 zur Verdeutlichung des Modulationsverfahrens herangezogen wurde. In Abbildung 16 ist ein phasenmoduliertes Signal mit kleinem Phasenhub dargestellt. Der Zeiger des Trägersignals dreht sich mit der Frequenz ω_0 . Wird dieser Träger in der Phase moduliert, verändert sich der Winkel um den eingezeichneten Phasenhub $\Delta\Psi$, wobei der resultierende Zeiger weiterhin mit der Kreisfrequenz ω_0 rotiert.

Bei analogen Basisbandsignalen ergibt sich bei der Phasenmodulation eine kontinuierliche Änderung des Phasenwinkels, was prinzipiell einer Veränderung der Frequenz gleichkommt. Ein Vergleich der PM im Zeitbereich (Abbildung 15) mit der in Abbildung 13 dargestellten Frequenzmodulation ergibt daher auch nur die veränderte Phasenlage zwischen dem modulierenden Signal und den Frequenzminima und -maxima im modulierten Signal. Es ist deutlich zu erkennen, daß das modulierte Signal der Phasenmodulation im Zeitbereich nicht von der Frequenzmodulation zu unterscheiden ist, wenn das Basisbandsignal nicht bekannt ist. Gleiches gilt im Frequenzbereich, auch hier sind Frequenz- und Phasenmodulation nicht zu unterscheiden. Daher stellt Abbildung 14 gleichzeitig auch die spektrale Darstellung eines phasenmodulierten Signals dar. Diese enge Verwandtschaft zwischen Frequenz- und Phasenmodulation werden wir im nächsten Teil dieser Artikelserie mit Hilfe der mathematischen Betrachtung dieser Modulationsverfahren darlegen. **ELV**

Bild 16: Zeigerdiagramm einer Phasenmodulation mit kleinem Hub

