

Modulationsverfahren zur Sprachübertragung

Florian B. Wörter

Abstract—Modulation wird bei allen gängigen Methoden der Daten- und auch Sprachübertragung genutzt. Dabei wird zum Beispiel ein niederfrequentes Audio Signal auf einen hochfrequenten Träger aufmoduliert, um die guten Eigenschaften eines hochfrequenten Signales für die Übertragung des niederfrequenten Signales, das die Informationen enthält, nutzen zu können. Diese Arbeit versucht die heute gängigen Modulationsverfahren aufzulisten, diese zu erklären, und einen kurzen Überblick über deren Einsatzgebiete zu geben.

Index Terms—Modulation, Modulationsverfahren, Amplitudenmodulation, AM, Frequenzmodulation, FM, Phasenmodulation, PM, Amplitude Shift Keying, Amplitudenumtastung, ASK, Frequency Shift Keying, Frequenzumtastung, FSK, Gaussian Frequency Shift Keying, GFSK, Phase Shift Keying, Phasenumtastung, PSK, Pulsamplitudenmodulation, PAM, Pulsocodemodulation, PCM, Differential Pulsocodemodulation, DPCM, Delta Pulsocodemodulation, Adaptive Differential Pulsocodemodulation, ADPCM

I. EINLEITUNG

UM zum Beispiel ein Sprachsignal über die Luft übertragen zu können wären sehr grosse Antennen notwendig, da diese im unteren Frequenzbereich ($< 10\text{kHz}$) angesiedelt ist und somit eine sehr grosse Wellenlänge hat. Ausserdem könnten bei einer solchen Übertragungstechnik nie mehrere Radiosender gleichzeitig senden, da sich die einzelnen Signale überlagern würden und man nichts mehr verstehen würde, weil alle Sender im gleichen Frequenzbereich senden müssten. Um diesen Problemen zu entgehen, verwendet man verschiedenste **Modulationsverfahren**. Bei der Modulation wird ein Informationssignal (z.B. ein Sprachsignal) auf eine Trägerschwingung aufmoduliert. Das heisst, man verändert gewisse Eigenschaften

der Trägerschwingung proportional zu den Eigenschaften des Informationssignals.

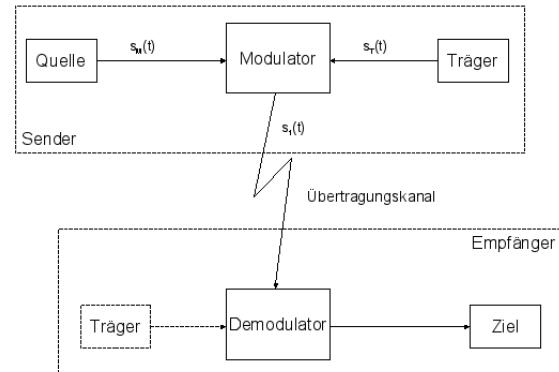


Fig. 1. Überblick Modulation

Sehen wir uns als Beispiel einen Radiosender an. Der Sprecher wäre im obigen Bild die Quelle. Sein Mikrophon erzeugt das Signal $s_M(t)$. Wie weiter oben schon beschrieben muss dieses Signal nun auf ein hochfrequentes Trägersignal $s_T(t)$ aufmoduliert werden, damit es mit vertretbarem Aufwand über die Luft übertragen werden kann. Die Frequenz für das Trägersignal befindet sich in Österreich, je nach Radiosender, zwischen 87.5 und 108.0 Mhz. Das modulierte Signal $s_1(t)$ kann nun mit vertretbarem Aufwand über die Luft übertragen werden. Es enthält sowohl das Trägersignal als auch die Informationen des zu modulierenden Signals. Beim Empfänger (z.B. das Radiogerät) wird das Informationssignal aus dem empfangenen Signal extrahiert und kann vom Hörer als Sprache wahrgenommen werden. Die Modulation erlaubt es zusätzliche Informationen, wie zum Beispiel RDS (Radio Data System), zusätzlich zum eigentlichen Audiosignal zu übertragen. Mit Hilfe von RDS werden Zusatzinformationen wie u.a. Name und Frequenz des Senders übertragen. Dadurch

ist es modernen Radios möglich, sich automatisch auf eine neue Frequenz einzustellen, sobald sie einen Sendebereich eines Senders wechseln. Diese Tatsache ist vorallem bei Autoradios sehr praktisch.

Modulationsverfahren werden jedoch nicht nur beim Übertragen von Radiosignalen eingesetzt. Sie können zum Beispiel auch zum Übertragen von digitalen Signalen über analoge Leitungen benutzt werden. Diese Technik wird u.a. bei ISDN oder DSL verwendet, um digitale Dienste über herkömmliche Telefonleitungen (zweiadrige Kupferleitungen) anbieten zu können. Weiters wird Modulation bei GPRS, GSM, EDGE, UMTS, WLAN und vielen anderen Standards eingesetzt.

II. ARTEM VON MODULATION

DIE einzelnen Modulationsverfahren kann man in verschiedene Arten unterteilen. Zum einen gibt es die rein analogen Verfahren, bei denen ein analoges Informationssignal auf eine analoge Trägerschwingung aufmoduliert wird. Diese Art der Modulation kommt zum Beispiel bei einen Radio- oder analogen Fernsehsender zum Einsatz. Zum anderen gibt es jedoch auch digitale Formen der Modulation, bei denen ein digitales Informationssignal auf einen Sinusträger aufmoduliert wird. Solche Modulationsverfahren werden zum Beispiel bei ISDN, DSL oder WLAN verwendet.

A. Rein Analoge Modulationsverfahren

Zu dieser Gattung von Modulationsverfahren wird ein analoges Informationssignal auf einen analogen Träger aufmoduliert. Hierzu zählen die herkömmliche Amplitudenmodulation (AM), die klassische Frequenz- (FM) und die eng mit ihr verwandte Phasenmodulation (PM).

B. Digitale Modulationsverfahren

Digitale Modulation wird im Englischen in der Regel als *Shift Keying* (=Umtastung) bezeichnet. Hierbei wird ein digitales Informationssignal auf einen analogen Träger (meist eine

Sinusschwingung) aufmoduliert. Diese Art von Verfahren werden meist als die modernen Modulationsverfahren bezeichnet und zu ihnen zählen u.a. *ASK* (Amplitude Shift Keying), *FSK* (Frequency Shift Keying), *GFSK* (Gaussian Frequency Shift Keying), *PSK* (Phase Shift Keying), *PAM* (Puls Amplituden Modulation), *PCM* (Puls Code Modulation) und verschiedene Varianten von ihnen.

III. DIE KLASSISCHE AMPLITUDENMODULATION

BEI der Amplitudenmodulation wird die Amplitude des Trägersignales proportional zum Augenblickswert der Amplitude des zum modulierenden Signales verändert [2]. Wir definieren das Trägersignal $s_T(t)$ als eine Schwingung:

$$s_T(t) := S_T * \cos(\omega_T * t)$$

Wir nehmen an wir wollen eine Cosinusschwingung übertragen. Daher definieren wir unser zu modulierendes Signal:

$$s_M(t) := S_M * \cos(\omega_M * t)$$

Aus Gründen der Illustration verwenden wir eine Trägerfrequenz von 100Hz und die Frequenz des zu modulierenden Signales sei 10Hz. Diese Angaben sind für ein reales Beispiel freilich viel zu nieder, jedoch lässt sich die Theorie an Hand dieser gewählten Frequenzen recht gut veranschaulichen.

$$f_T := 100Hz \quad \omega_T := 2 * \pi * f_T$$

$$f_M := 10Hz \quad \omega_M := 2 * \pi * f_M$$

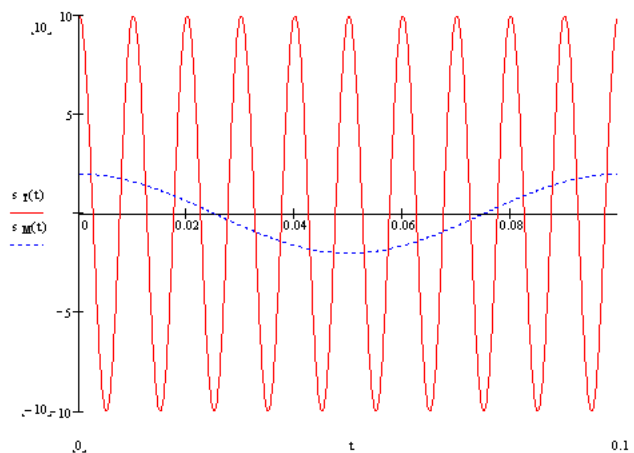


Fig. 2. AM: Träger- und zu modulierendes Signal

Ein erster naiver Ansatz, um die Amplitude der Trägerschwingung proportional zu der der zu modulierenden Schwingung zu verändern wäre, die beiden Signale zu multiplizieren.

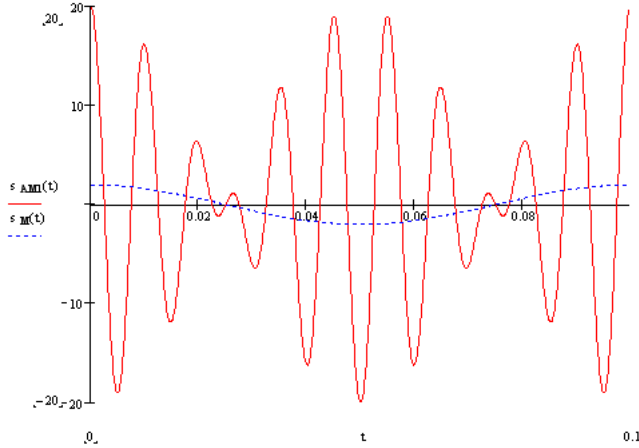


Fig. 3. AM: Zu einfacher Ansatz: Multiplikation von $s_M(t)$ und $s_T(t)$

Wie wir sehen funktioniert das, solange das zu modulierende Signal ($s_M(t)$) positiv ist. Sobald es negativ wird, bewirkt dies eine zusätzliche Phasendrehung von 180° beim Ausgangssignal $s_{AM}(t)$. Dadurch ist dieser Ansatz für die reine Amplitudenmodulation unbrauchbar.

Man geht daher so vor, dass man zur Momentanamplitude des Trägersignales den Momentanwert des zu modulierenden Signals addiert. Dadurch erreicht man folgenden, richtigen, Ansatz:

$$s_{AM}(t) := (S_T + s_M(t)) * s_T(t)$$

Wenn wir nun die Klammer ausmultiplizieren und für $s_T(t)$ und $s_M(t)$ die Funktionen einsetzen, erhalten wir:

$$s_{AM}(t) := S_T * S_T * \cos(\omega_T * t) + S_M * \cos(\omega_M * t) * S_T * \cos(\omega_T * t)$$

Zusätzlich definieren wir den Modulationsgrad m als Verhältnis von der Amplitude des zu modulierenden Signales zur Amplitude des Trägersignales.

$$m := \frac{S_M}{S_T}$$

Ausserdem kennen wir die triviale trigonometrische Beziehung:

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

Nach Umformen der Formel für $s_{AM}(t)$, Anwenden der trigonometrischen Beziehung, Einsetzen von $S_M = m * S_T$ und kleinen kosmetischen Änderungen erhalten wir die Zeitfunktion der Amplitudenmodulation als

$$s_{AM}(t) := S_T * [\cos(\omega_T * t) + \frac{m}{2} * \cos[(\omega_M + \omega_T) * t] + \frac{m}{2} * \cos[(\omega_M - \omega_T) * t]]$$

Mit Hilfe dieser Funktion können wir die Amplitudenmodulation für das von uns gewählte Beispiel durchführen.

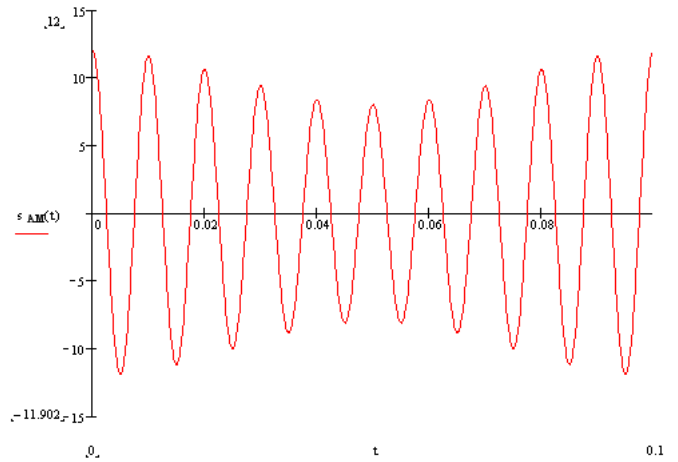


Fig. 4. Amplituden moduliertes Signal

Als Resultat erhalten wir eine Schwingung mit der Frequenz der Trägerschwingung, dessen Amplitude sich jedoch verhält wie die zu modulierende Schwingung.

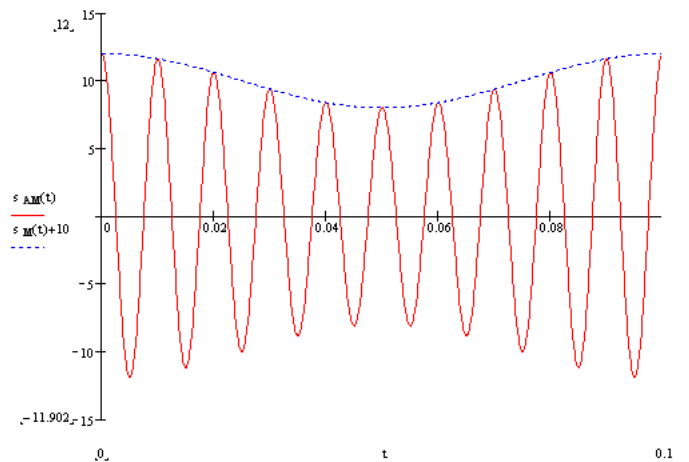


Fig. 5. Amplituden moduliertes Signal mit Modulationssignal

Bei obiger Abbildung sehen wir zusätzlich zu $s_{AM}(t)$ das

um S_T nach oben verschobene Signal $s_M(t)$. Man kann dabei sehr gut erkennen, dass sich die Amplitude des Trägersignales wirklich der des zu modulierenden Signals anpasst.

Unsere Betrachtungen sind ausgehend von der Annahme, dass $m < 1$ ist. Bei $m=1$, was bedeutet dass die Amplitude des Trägersignales gleich der Amplitude des zu modulierenden Signals ist, erfolgt eine Auslöschung des Trägers.

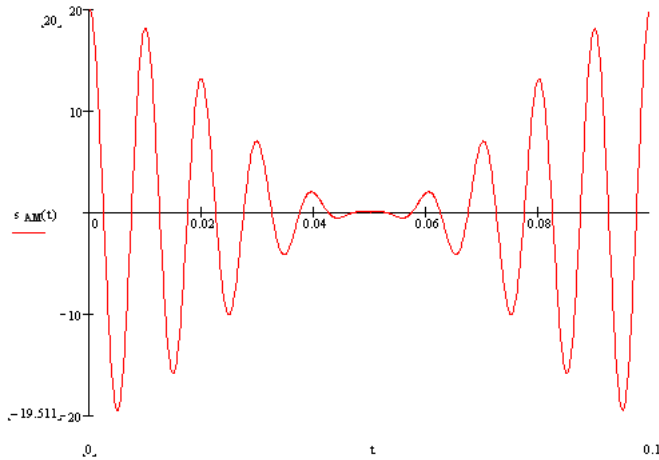


Fig. 6. AM: Auslöschung des Trägersignals bei $m=1$

Bei einen noch grösseren Modulationsgrad erfolgt eine Umpolung des amplitudenmodulierten Signals.

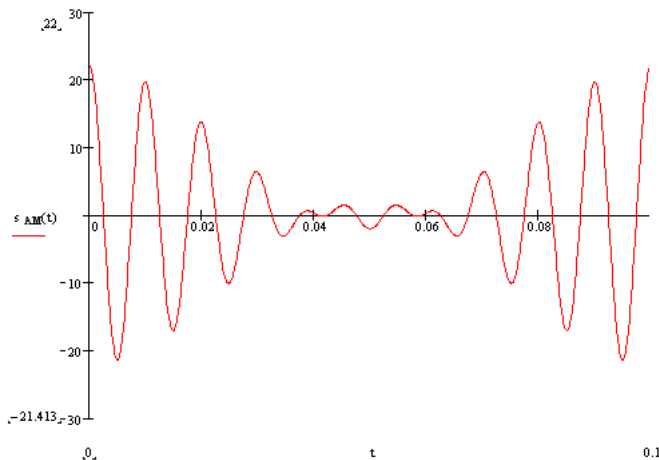


Fig. 7. AM: Unbrauchbares AM Signal bei $m > 1$

Dadurch wird das Signal unbrauchbar. In der Praxis achtet man bei der Amplitudenmodulation deswegen stets darauf, dass der Modulationsgrad stets kleiner als 1 ist. Die Amplitude

des Trägers muss daher immer grösser als die maximale Amplitude des zu modulierenden Signals sein.

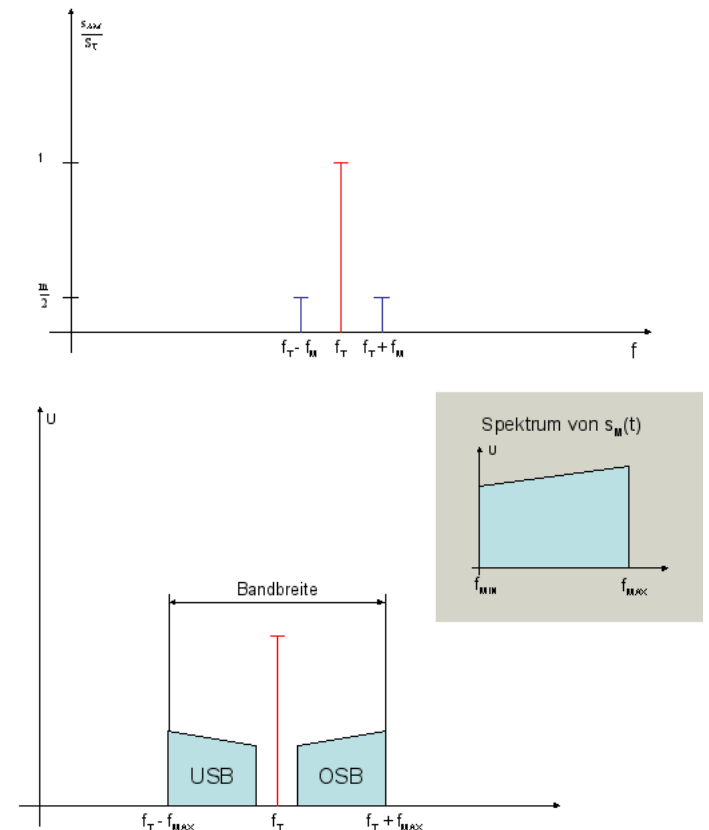


Fig. 8. Frequenzspektrum der Amplitudenmodulation

Im Frequenzspektrum sieht ein amplitudenmoduliertes Signal sehr schlank aus. Der Hauptanteil des Signales liegt bei der Trägerfrequenz. Zusätzlich gibt es ein oberes und unteres Seitenband (OSB und USB) an den Stellen $f_T + f_M$ und $f_T - f_M$. Da bei der Amplitudenmodulation nur die Trägerfrequenz und die Frequenzen des zu übertragenden Signals vorkommen, ist der Bandbreitenbedarf äusserst gering. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Amplitudenmodulation sehr leicht umzusetzen ist. Jedoch ist sie auf Grund der Tatsache, dass die Information in der Amplitude des Signals $s_{AM}(t)$ steckt, sehr störanfällig gegenüber atmosphärischen Einflüssen. Der Wirkungsgrad ist sehr gering, da ein Grossteil der Sendeleistung dafür aufgebracht werden muss, den Träger zu übertragen, der keine Information enthält. Ausserdem wird die selbe Information im oberen und gespiegelt im unteren Seitenband übertragen,

was eine zusätzliche Verschlechterung des Wirkungsgrades bedeutet.

IV. DIE KLASSISCHE FREQUENZMODULATION

BEI der Frequenzmodulation wird nicht wie bei der Amplitudenmodulation die Amplitude des Trägersignals, sondern dessen Frequenz in Abhängigkeit zum Momentanwert des zu modulierenden Signals verändert. Wir definieren wiederum das Trägersignal als eine Schwingung:

$$s_T(t) := S_T * \cos(\omega_T * t)$$

Wir nehmen an, wir wollen eine Cosinusschwingung übertragen. Daher definieren wir unser zu modulierendes Signal:

$$s_M(t) := S_M * \cos(\omega_M * t)$$

Aus Gründen der Illustration verwenden wir wie beim Beispiel der Amplitudenmodulation wieder eine Trägerfrequenz von 100Hz und die Frequenz des zu modulierenden Signals sei 10Hz. Diese Angaben sind für ein reales Beispiel freilich viel zu niedrig, jedoch lässt sich die Theorie an Hand dieser gewählten Frequenzen recht gut veranschaulichen.

$$f_T := 100Hz \quad \omega_T := 2 * \pi * f_T$$

$$f_M := 10Hz \quad \omega_M := 2 * \pi * f_M$$

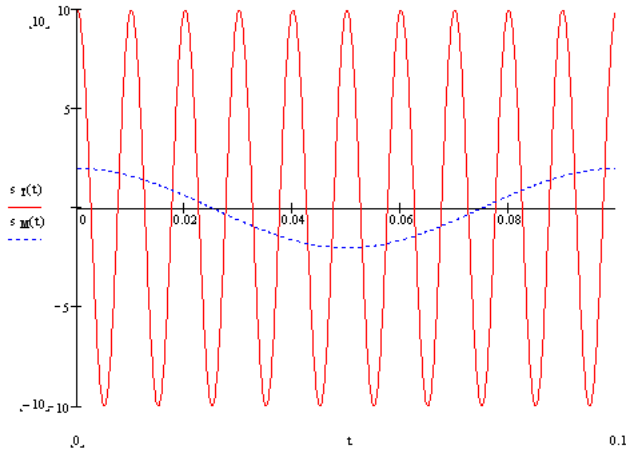


Fig. 9. FM: Träger- und zu modulierendes Signal

Bei der Frequenzmodulation weicht die Augenblicksfrequenz Ω von der Kreisfrequenz ω_T des Modulationsträgers um einen Betrag ab, der proportional dem Augenblickswert des zu modulierenden Signals ist. Daher könnten wir schreiben:

$$\Omega(t) := \omega_T + \alpha_F * s_M(t)$$

α_F wird als Modulationskonstante bezeichnet und ist ein konstanter Faktor.

Der Augenblicksphasenwinkel hängt sehr eng mit der Augenblicksfrequenz zusammen. Darauf gründet auch die enge Verwandtschaft zwischen Frequenz- und Phasenmodulation.

$$\Psi_{FM}(t) := \omega_T * t + \Phi + \alpha_F * \int_0^t (s_M(t))dt$$

$\Psi_{FM}(t)$ ist der Augenblicksphasenwinkel. Dieser ist abhängig von der Frequenz des Trägersignals ($\omega_T * t$), einer Phasenverschiebung Φ und dem bestimmten Integral von 0 bis zum aktuellen t-Wert der zu modulierenden Schwingung. Somit ist bei der Frequenzmodulation, bei der man die Augenblicksfrequenz des Trägersignals verändert, der Augenblicksphasenwinkel abhängig vom Integral der zu modulierenden Schwingung und man erhält folgende Formel für die Grundformel der Frequenzmodulation:

$$s_{FM}(t) := S_T * \sin(\Psi_{FM}(t)) = S_T * \sin[\omega_T * t + \Phi + \alpha_F * \int_0^t (s_M(t))dt]$$

In unseren Beispiel gehen wir von einer Phasenverschiebung von 0 aus, dadurch fällt für uns das Φ in obiger Formel weg. Mit dieser Formel erhalten wir nun folgenden Signalverlauf für das frequenzmodulierte Signal:

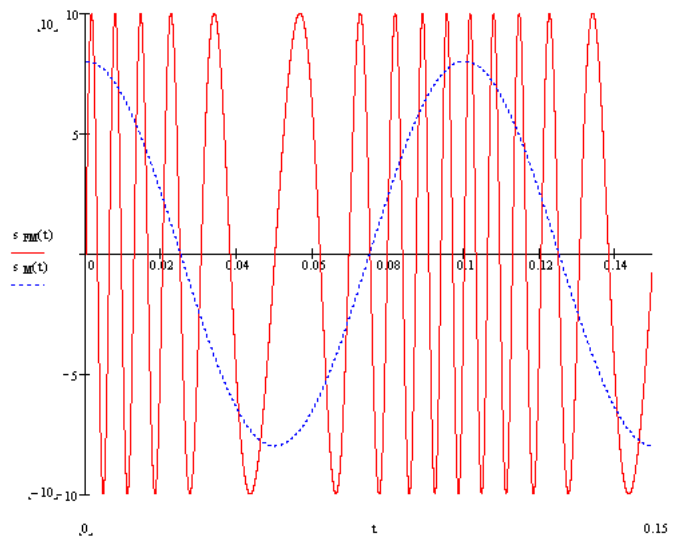


Fig. 10. Frequenzmoduliertes Signal

Man kann deutlich erkennen, wie sich die Frequenz des Trägersignals in Abhängigkeit zum zu modulierenden Signal ändert.

Die Eigenschaft, dass die Amplitude für die Rückgewinnung der Information aus dem Signal nicht von Bedeutung ist, macht dieses Verfahren sehr viel robuster in Bezug auf Störanfälligkeit. Ausserdem sind bei diesem Verfahren dynamischere Modulationssignale erlaubt als zum Beispiel bei der Amplitudenmodulation, da u.a. keine Einschränkung einer maximalen Amplitude erfolgt. Daher wird diese Technik zum Beispiel bei der Radioübertragung vorwiegend verwendet. Bei dieser teilt man das verfügbare Frequenzband von 87.5 bis 108.0 Mhz in 300 kHz breite Kanäle ein, in denen ein Sender senden darf. Jedoch haben heute die Sender teilweise nur noch Abstände von ca. 100 kHz. Für sehr beliebte Radiosender ist man jedoch bemüht möglichst grosse Abstände zu seinen Frequenznachbarn zu halten, um die Qualität der Übertragung zu maximieren.

V. DIE PHASENMODULATION

WIE die Frequenzmodulation gehört auch die Phasenmodulation zur Familie der Winkelmodulationen. Bei der Phasenmodulation wird nicht die Augenblicksfrequenz, sondern der augenblickliche Phasenwinkel des Trägersignals proportional zum Augenblickswert des zu modulierenden Signals verändert. Der Phasenwinkel Ψ des Modulationsproduktes weicht von dem $\omega_T * t$ des Modulationsträgers um einen Betrag ab, der proportional dem Augenblickswert des modulierenden Signals ist. Wir definieren für den Augenblickswert des Phasenwinkels:

$\Psi_{PM}(t) := \omega_T * t + \alpha_P * s_M(t)$, wobei α_P die Modulationskonstante der Phasenmodulation genannt wird.

Für die Zeitfunktion der Phasenmodulation erhalten wir dadurch folgende Gleichungen:

$$s_{PM}(t) := S_T * \sin(\Psi_{PM}(t)) = S_T * \sin(\omega_T * t + \alpha_P * s_M(t))$$

$s_M(t)$

Für das Beispiel, das wir auch schon zur Demonstration der Amplituden- und Frequenzmodulation verwendet haben, würde die Phasenmodulation wie in folgender Abbildung aussehen:

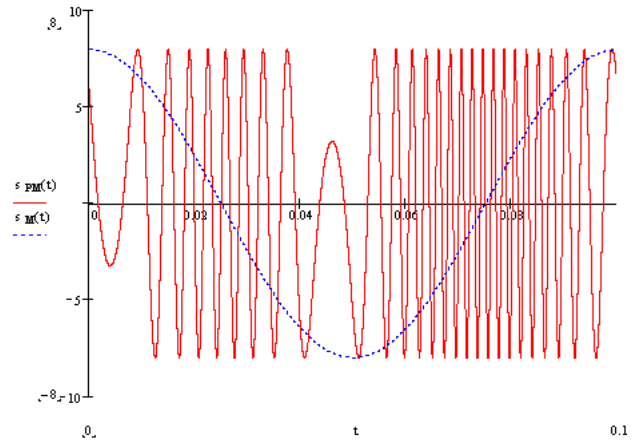


Fig. 11. Phasenmoduliertes Signal

Die Zeitfunktion ist aber für die Demonstration des Prinzips der Phasenmodulation eher ungeeignet, da man darin die momentane Phasenverschiebung nur sehr schlecht erkennen kann. Zu Demonstrationszwecken ist ein Zeigerdiagramm viel besser geeignet.

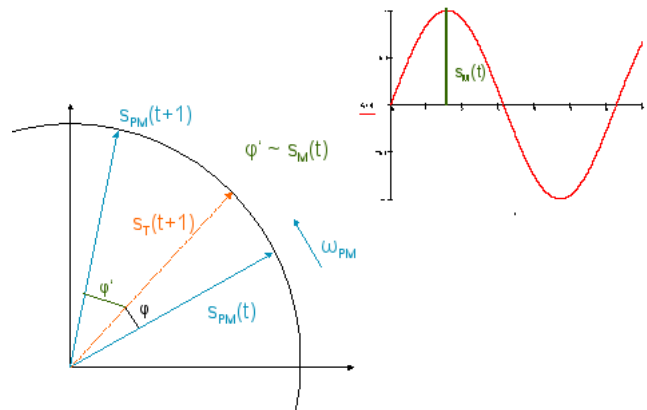


Fig. 12. Phasenmodulation im Zeigerdiagramm

In der obigen Abbildung ist die Funktionsweise der Phasenmodulation gut zu erkennen. Wir sehen das Signal $s_{PM}(t)$ als untersten Zeiger eingezeichnet. Wäre die Schwingung unmoduliert, so würde sich $s_{PM}(t)$ in einen Zeitschritt über

den Winkel φ fortbewegen und wäre deckungsgleich mit dem Zeiger $s_T(t+1)$. Da das Signal aber phasenmoduliert ist, erfolgt eine zusätzliche Phasenverschiebung um den Winkel φ' , der proportional zum Augenblickswert des zu modulierenden Signals ist.

Diese Phasenmodulation hat im analogen Bereich wenig Bedeutung. Wenn Sie weiterlesen, werden Sie jedoch sehen, dass die Phasenmodulation für digitale Anwendungen sehr wichtig ist.

VI. AMPLITUDE SHIFT KEYING (ASK)

A MPLITUDE SHIFT KEYING ist die digitale Form der Amplitudenmodulation. Dabei wird die Amplitude des Trägersignals dem zu modulierenden Bitstrom entsprechend verändert. Das heisst den digitalen Werten 0 und 1 sind jeweils bestimmte Amplitudenwerte zugeordnet.

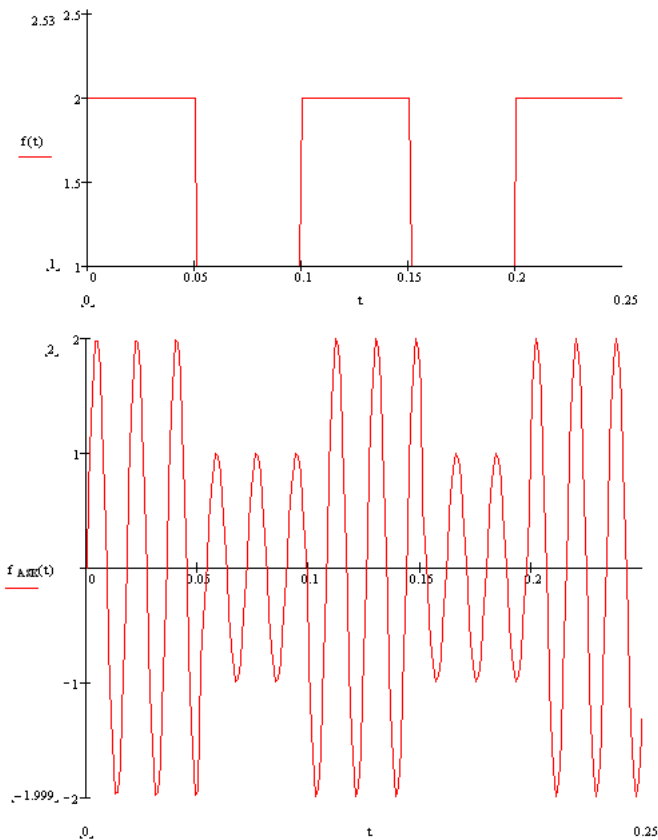


Fig. 13. Amplitude Shift Keying

Die einfachste Form von ASK ist das sogenannte On Off

Keying (OOK), bei dem, wie der Name schon sagt, bei einer digitalen 1 ein Sinusträger übertragen wird und bei einer digitalen 0 nicht. Dies hat unter vielen anderen den Nachteil, dass man nicht sicher erkennen kann, ob der Sender ausgefallen ist, oder ob wirklich ein Bitstrom mit nur Nullen übertragen wird. Deshalb wird hier häufig nicht das digitale Bit, sondern ein Bitübergang übertragen.

Man kann den Durchsatz zusätzlich erhöhen, indem man mehrere Amplitudenstufen verwendet. Nimmt man zum Beispiel vier Amplitudenstufen, so kann man pro Takt zwei Bits auf einmal übertragen. Man braucht nur eine Amplituden für 00, eine andere für 01, eine weitere für 10 und eine vierte um 11 repräsentieren zu können.

Amplitude Shift Keying wird heutzutage zum Beispiel noch für das DCF77 Signal verwendet. Dieses Signal ist ein langwelliges Signal (77.5 kHz), das die meisten Funkuhren in Mitteleuropa mit einer genauen Uhrzeit versorgt. Umgangssprachlich wird dieser Sender auch als Atomuhr bezeichnet, obwohl der Sender selber nichts mit einer Atomuhr zu tun hat. Bei diesen Zeitsignal erfolgt die Abschwächung der Amplitude im Sekundentakt. Dadurch ist eine genaue Synchronisation der Uhren möglich. Zusätzlich wird pro Abschwächung jeweils ein Bit ASK moduliert übertragen. Nach einiger Zeit hat die Uhr genügend Bits zusammen, um sich daraus die für sie wichtigen Informationen zu extrahieren. Ansonsten findet die Amplitudenumtastung heutzutage nur wenig Einsatz. Jedoch ist sie für Synchronisationsaufgaben optimal, da die Frequenz des Trägers gleich bleibt.

VII. FREQUENCY SHIFT KEYING (FSK)

D IESES Verfahren ist die digitale Version der Frequenzmodulation. Die Frequenz des Trägersignals wird dem Eingangsbitstrom entsprechend verändert.

Die wichtigsten Parameter dieser Modulationsart sind *Frequenzhub* und *Modulationsindex*. Der Frequenzhub beschreibt

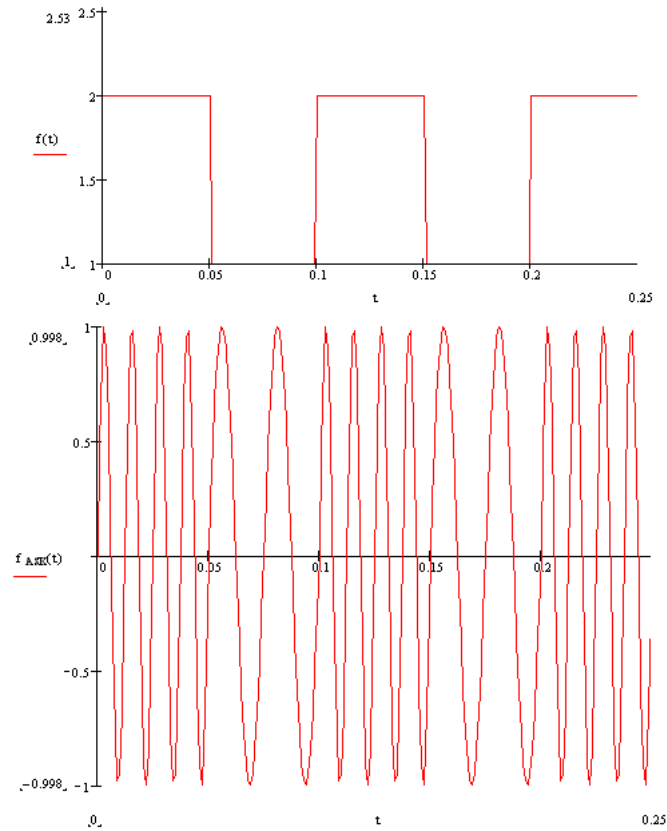


Fig. 14. Frequency Shift Keying

den Unterschied zwischen den diskreten Frequenzausprägungen der dargestellten, digitalen, Bitausprägungen. Der Modulationsindex ist das Verhältnis von Frequenzhub zu Modulationsindex. Frequency Shift Keying mit dem Modulationsindex 0.5 wird auch als MSK (*Minimum Shift Keying*) bezeichnet.

Um die Übertragungsrate zu erhöhen, kann man mehrere diskrete Frequenzwerte verwenden. Benutzt man zum Beispiel vier unterschiedliche Frequenzen, so kann man zwei Bits auf einmal übertragen.

In Bild 15 sehen wir, wie den vier verschiedenen diskreten Frequenzen zwei Bits zugeordnet werden.

Die wohl älteste Anwendung dieser Modulationstechnik ist die drahtlose Telegraphie. Ansonsten wird FSK in den verschiedensten Varianten sehr vielseitig in der Telekommunikationstechnik eingesetzt.

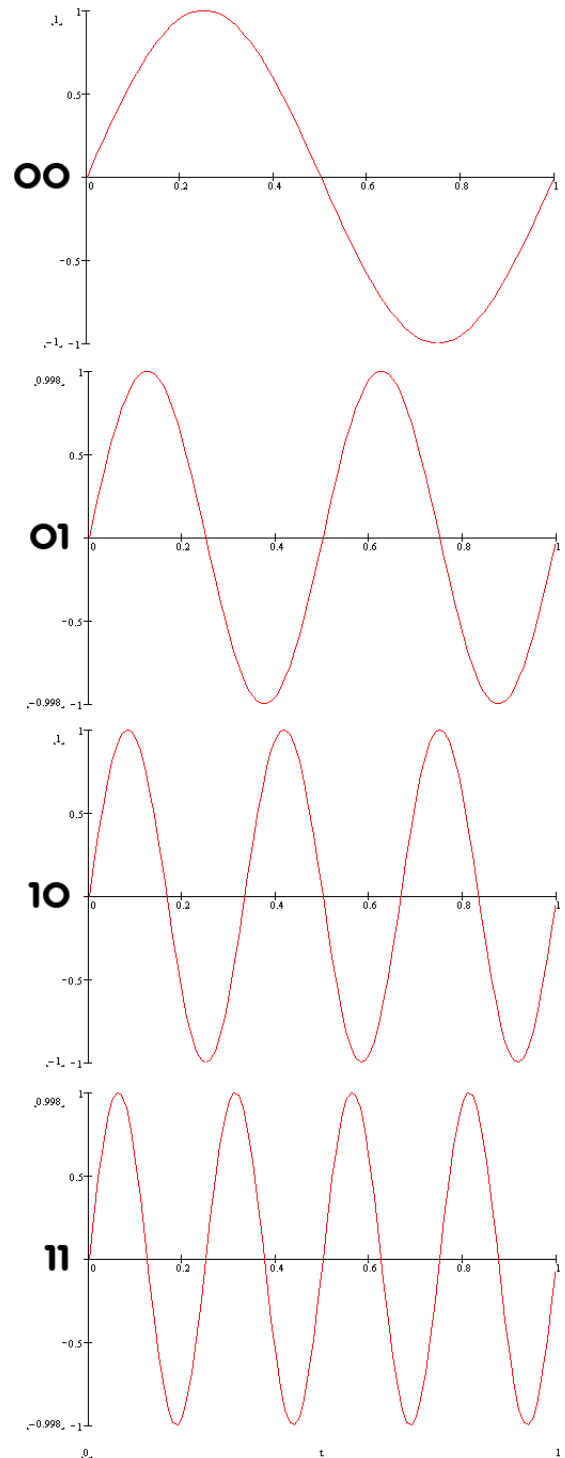


Fig. 15. FSK: Zuordnung von Bitkombinationen zu diskreten Frequenzen

A. Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK)

Das Problem bei den diskreten Frequenzübergängen ist, dass sie den Rechtecksimpuls widerspiegeln. Da ein Rechteck theoretisch eine unendliche Bandbreite besitzt, würde auch das FSK Signal theoretisch eine unendliche Bandbreite in Anspruch nehmen.

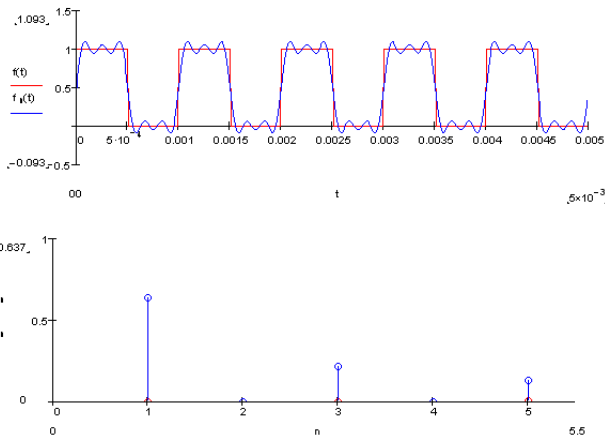


Fig. 16. Fourieranalyse eines Rechtecksignals

Wie wir bei obiger Fourier-Analyse sehen, wird das Rechteckssignal mit fünf Oberschwingungen nicht sehr genau dargestellt. Man braucht theoretisch unendlich viele Oberschwingungen, damit man das Rechteckssignal perfekt annähern kann. Im unteren Teil der Abbildung sehen wir die Anteile der einzelnen Oberschwingungen eingetragen. Der Anteil bei 1 entspricht der Grundschwingung, der bei 2 der ersten Oberschwingung usw. Theoretisch hat ein Rechteckssignal bei jeden ungeraden Vielfachen der Grundschwingung einen immer kleiner werdenden, aber nie wirklich verschwindenden, Anteil.

Dies hat den Nachteil, dass bei einen solchen FSK Signal (man spricht dann von der "harten FSK") sehr viele neue Frequenzen entstehen würden, die auch alle mitübertragen werden müssten, obwohl sie nichts zur Information, die übertragen werden soll, beitragen. Daher verwendet man heute an Stelle der harten FSK eine weiche FSK, nämlich die GFSK. Beim Gaussian Frequency Shift Keying wird der digitale

Rechtecksimpuls vor der Modulation durch einen GauSS-Filter geschickt. Dadurch verformt sich das Rechteck zu einer GauSS-schen Glockenkurve, die sehr viel bessere Übertragungseigenschaften aufweist, da sie schon mit der Grundschwingung recht passabel angenähert ist.

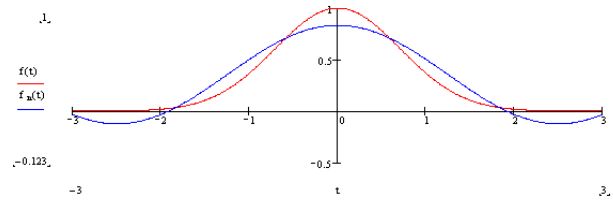


Fig. 17. Grundschwingung der GauSS Kurve

Nimmt man noch zwei Oberschwingungen hinzu, so hat man die Kurve schon perfekt angepasst.

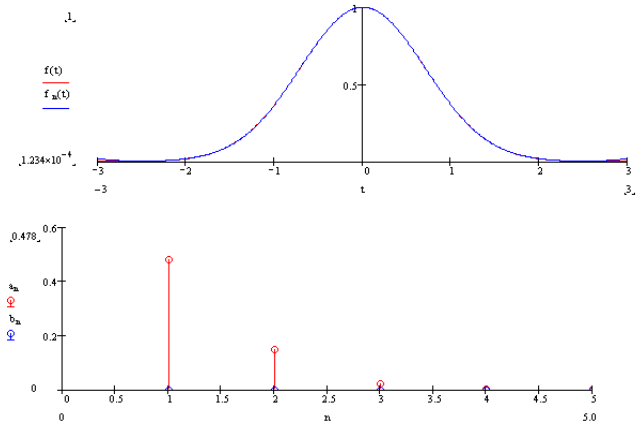


Fig. 18. Fourieranalyse der GauSS'schen Glockenkurve

In der unteren Abbildung kann man erkennen, dass dieses Signal nach der 1. Oberschwingung schon fast keine weiteren Anteile mehr aufweist. Dadurch ist es auch viel besser für die Übertragung geeignet, da der Bandbreitenbedarf auf einen Bruchteil zurückgeht. GFSK ist in den Varianten 4-GFSK und 8GFSK üblich. Dabei gibt es 4 bzw. 8 verschiedene Frequenzen und es können 2 bzw. 3 Bits aufeinmal übertragen werden.

Anwendung findet diese Technik zum Beispiel bei GSM (Global System for Mobile Communications) oder beim Wireless LAN.

VIII. PHASE SHIFT KEYING (PSK)

BEI diesem Modulationsverfahren wird anstatt der Amplitude oder der Frequenz die Phasenlage des Signals dem digitalen Bitstrom entsprechend verändert. Es ist somit das digitale Pendant zur klassischen Phasenmodulation.

Eine Gruppe von m Bits lässt sich mit einem Träger übertragen, der $n = 2^m$ unterschiedliche Phasenzustände kennt übertragen. Für $n = 4$ ergibt sich 4-PSK, in der englischsprachigen Literatur auch unter *QPSK* bekannt.

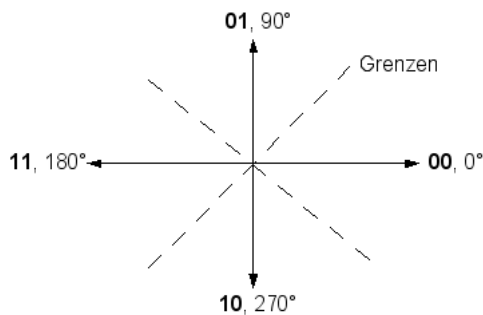


Fig. 19. PSK: Phasenlage und Zuordnung der Bit-Kombinationen

In der obigen Abbildung sehen wir die bei dem Verfahren für die einzelnen Bitkombinationen (fett) verwendeten Phasenlagen. In der Regel kommt es vor, dass bei der Übertragung durch äussere Störeinflüsse die Phasenlage des Signals schwankt. Ein idealer Empfänger kann das digitale Signal wiederherstellen, solange die gestrichelt eingezeichneten Grenzen nicht überschritten werden. Je mehr Bits man mit einem Phasenzustand darstellen will, desto kleiner werden die Toleranzgrenzen für die Phasenlage und desto wahrscheinlicher werden folglich Bitfehler in der Übertragung.

Die GSM Erweiterung EDGE verwendet 8-PSK als Modulationsverfahren, womit gleichzeitig 3 Bits übertragen werden können. Die Zuordnung zwischen Phasenlage und Bitkombination ist dabei gleichmässig über 360° verteilt. Damit steht einer Bitkombination eine Phasenwinkeltoleranz von 45° zur Verfügung, was für eine atmosphärische Übertragung relativ

wenig ist. Aus diesen Grund musste bei EDGE das Signal-Rauschleistungsverhältnis gegenüber GSM erhöht werden, was bedeutet, dass im EDGE Standard eine höhere Sendeleistung als im GSM Standard vorgesehen ist.

Phasendifferenzcodierung (DPSK)

Die Zuordnung von Phasenzuständen und übertragener Nachricht kann auf zwei Arten erfolgen. Zum einen kann jede mögliche Kombination von m Bits genau einer festgelegten absoluten Phasenlage zugeordnet sein. Dadurch wird auf der Empfängerseite zur Demodulation das Trägersignal mit korrekter Nullphase zur Synchronisation benötigt. Zum anderen gibt es die Möglichkeit, dass die Bit-Information in der Differenz der Phasenlagen aufeinanderfolgender Schritte steckt. Wird das zweite Verfahren verwendet, so spricht man von der *Phasendifferenzcodierung*.

Als Demodulationsverfahren kommen dabei die *Differenzdemodulation* und die *Synchrondemodulation* in Frage. Beim ersten Verfahren wird die absolute Phasenlage des Signals in zwei aufeinanderfolgenden Schritten verglichen und deren Differenz berechnet. Daraus schliesst man auf die im Signal enthaltene Bitkombination. Das Problem an dieser einfachen Methode ist, dass man einen relativ grossen Störabstand benötigt, da beide Signalphasenlagen Störbeiträge enthalten. Bei der Synchrondemodulation erfolgt die Demodulation mit Hilfe eines aus dem empfangenen Signal abgeleiteten Referenzträgers. Die absolute Phasenlage des abgeleiteten Referenzträgers kann ebenfalls mit Störungen behaftet sein. Das spielt jedoch aufgrund der Phasendifferenzcodierung keine Rolle, da nur die Differenz der Phasenlagen und nicht die absolute Phasenlage von Bedeutung ist.

IX. PULSAMPLITUDENMODULATION (PAM)

DIE Pulsamplitudenmodulation ist ein analoges Modulationsverfahren, bei dem nur Bruchstücke des zu übertragenden Signals wirklich übertragen werden. Ich erwähne

dieses Verfahren nur, weil es eine Vorstufe zur Pulscode Modulation ist, die wir gleich anschliessend besprechen werden.

Bei der Pulsamplitudenmodulation wird das zu übertragende Signal in einen fixen Zeitraster abgetastet. Das heisst, der Wert des analogen Signals wird alle x Millisekunden genommen. Dadurch entsteht ein zeitdiskretes, wertkontinuierliches Signal.

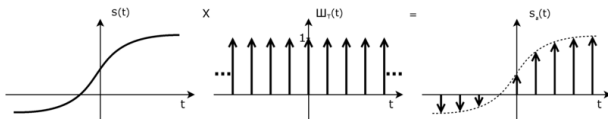


Fig. 20. PAM: Abtastung eines analogen Signals [5]

Im obigen Bild sehen wir links das abzutastende Signal $s(t)$. In der Mitte sind die einzelnen Triac-Impulse dargestellt. Immer wenn ein solcher Impuls auftritt, wird ihm der aktuelle Amplitudenwert des abzutastenden Signals zugeordnet. Rechts können wir das Ergebnis sehen.

Dieser Zeitraster muss natürlich fein genug sein, um das Signal noch als solches erfassen zu können (*Nyquist-Shannon Abtasttheorem*). Durch die zeitdiskrete Eigenschaft dieses entstandenen Signals ist es möglich, mehrere Signale parallel zu übertragen. Man überträgt den ersten Impuls des ersten Signals und hat in der Zeit bis zum zweiten Impuls noch genug Zeit Impulse anderer Signale zu übertragen. Die Anzahl der Signale, die parallel übertragen werden können, ist abhängig von der maximalen in einem Signal vorkommenden Frequenz.

X. PULSCODE MODULATION (PCM)

EIN wie oben besprochenes PAM Signal ist ein zeitdiskretes, aber wertkontinuierliches Signal. Das heisst, dass es unendlich viele analoge Werte gibt, die eine Amplitude eines solchen Signals annehmen kann.

Durch die Technik der *Quantisierung* kann man mehrere Amplitudenklassen erstellen und die auftretende Amplitude dann einer Klasse zuordnen. Da die Anzahl an Amplitudenklassen nicht unendlich ist, kann man jede Klasse einer

Binärzahl zuordnen. Dadurch entsteht ein sogenannter Code, der Information über die Höhe der Amplitude eines Signals enthält. Wie viele verschiedene Amplitudenklassen es gibt wird von der Samplingtiefe bestimmt. Genauer gesagt ist die Samplingtiefe die Anzahl der Bits, die für die Unterscheidung der Amplitudenklassen verwendet werden. Eine Samplingtiefe von zum Beispiel 3 würde also $2^3 = 8$ unterscheidbaren Amplitudenklassen entsprechen.

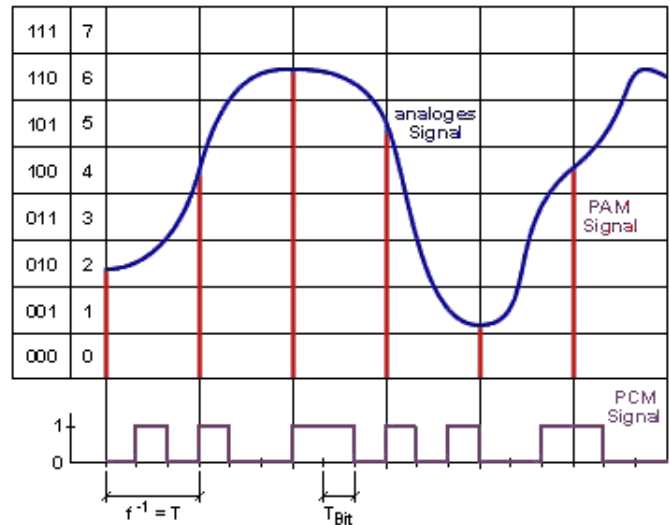


Fig. 21. Pulscode Modulation [5]

Das obige Bild zeigt ein analoges Signal und die dazugehörigen PAM Impulse. Links sehen wir nach oben die Amplitudenklassen binär und dezimal aufgetragen. Im unteren Bereich der Abbildung sieht man das entstehende PCM Signal, welches der binären Amplitudenklasse entspricht.

Der entstandene Code kann beispielsweise seriell über einen Übertragungskanal übertragen werden und der Empfänger braucht nur noch zwei Amplitudenzustände zu unterscheiden (digital 0 oder 1). Dadurch wird dieses Verfahren extrem störungsunentfindlich, benötigt aber auch sehr viel Bandbreite zur Übertragung. Wurde ein Codewort vollständig empfangen, so wird an der Empfängerseite ein Spannungswert ausgegeben, der der Mitte der entsprechenden Amplitudenklasse entspricht. Die mit jedem Codewort auftretende mehr oder weniger grosse Differenz zwischen richtigen analogen Wert des zu übertragenden

den Signals auf der Senderseite und den generierten Spannungen auf der Empfängerseite wird Quantifizierungsverzerrung genannt. Die Bestimmung der Amplitudenklassenbreite erfolgt durch Vorgabe einer maximalen Quantifizierungsverzerrung. Aus dieser Vorgabe kann man leicht die maximale Amplitudenklassenbreite und somit die Anzahl der Klassen berechnen. [1].

Es liegt auf der Hand dass man für reale Anwendungen (zum Beispiel eine Sprachübertragung) mit 8 Amplitudenstufen (entsprechend 3 bit langen Codewörtern) nicht auskommt. Für die Sprachübertragung verwendet man daher meist eine Codewortlänge zwischen 10 und 12 Bit. Um die Qualität einer Cd zu erreichen, benötigt man 16 Bit lange Codewörter.

Die Qualität der Übertragung kann durch die sogenannte *Kompondierung* verbessert werden. Die Kompondierung ist ein in der Nachrichtentechnik bekanntes Prinzip, bei dem grössere Amplituden schwächer verstärkt werden als kleine Amplituden. Diese MaSSnahme macht man auf der Empfängerseite wieder rückgängig. Dadurch schafft man es bei der Pulscode Modulation das Störgeräusch, das durch die Quantisierungsverzerrung entsteht, konstant über die Amplitudenwerte zu verteilen. Ansonsten würden kleinere Amplituden viel mehr mit Quantisierungsfehlern behaftet sein, als grosse. Durch diese Verteilung auf die verschiedenen Amplitudenklassen wird die Quantisierungsverzerrung von einem menschlichen Hörer weitaus weniger wahrgenommen als ohne die Kompondierung.

Wie auch bei der Pulsamplitudenmodulation betreibt man bei der Pulscode modulation Multiplexing. Laut [2] entnimmt man bei PCM Fernsprechübertragung alle $\frac{1}{8000Hz} = 125\mu s$ eine Amplitudenprobe und codiert diese mit 8 Bit. Dadurch entsteht eine Bitrate von 64 kb/s. Die Bandbreite der verfügbaren Übertragungswege sind in der Regel jedoch wesentlich grösser. Wenn man die Dauer für die Übertragung eines Bits

reduziert, entstehen somit in der Übertragung freie Plätze, die genutzt werden können, um andere Gespräche zu übertragen (vergleiche Zeitmultiplexing bei PAM). Will man über einen solchen Übertragungsweg zum Beispiel 32 Kanäle parallel übertragen, so benötigt man eine Bitrate von $8000s^{-1} * 32 = 2,048$ Mbit/s. Die Gesprächspartner der 32 parallel übertragenen Gespräche merken natürlich nichts von den jeweils anderen, praktisch gleichzeitig geführten, Gesprächen.

XI. DIFFERENTIAL PULSCODEMODULATION (DPCM)

WIE wir weiter oben festgestellt haben, ist ein PCM Signal zwar sehr robust gegen Störeinflüsse, braucht jedoch für die Übertragung sehr viel Bandbreite. Die Deltapulscode modulation versucht dieses Problem zu lösen, indem sie nicht die absolute Amplitude des Signales, sondern nur Änderungen zur Vorgängeramplitude überträgt.

Ein PCM Signal birgt sehr viel Redundanz in sich, da sich aufeinanderfolgende Amplitudenwerte oft nur geringfügig, wenn überhaupt, voneinander unterscheiden und trotzdem immer das gesamte Codewort übertragen werden muss. Bei der Differential Pulscode modulation überträgt man nicht ständig die gesamte Amplitudenmodulation sondern vielmehr die Differenz der aktuellen Amplitude zu der des vorhergehenden Schnapsschusses.

Delta Pulscode modulation

Man spricht von der Delta Pulscode modulation wenn man die Differenz zwischen den Amplitudenwerten nur mit einem Bit codieren. Wir übertragen praktisch nur das Vorzeichen der Änderung. Auf der Empfängerseite entsteht dadurch eine Treppenkurve, die das eigentliche Signal nachahmt.

Bei sehr schnellen Änderungen auf der Senderseite, kann es sein, dass die Treppenkurve auf der Empfängerseite nicht mit dem steilen Signalverlauf mithalten kann. Ist dies der Fall, so spricht man von einer *Steigungsüberlastung (slope overload)*.

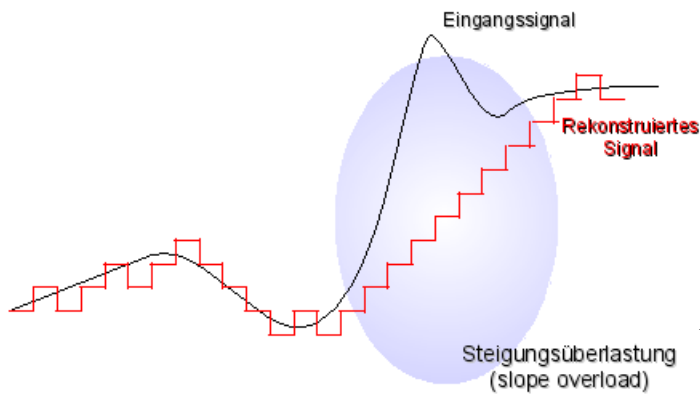


Fig. 22. DPCM mit teilweiser Steigungsüberlastung

Um diesen Effekt zu verhindern, kann man die Samplingrate des analogen Signals erhöhen, da so die empfängerseitige Treppenkurve eine grössere Steigung haben kann.

Eine weitere Möglichkeit wäre zum Beispiel die Stufenhöhe der Treppenkurve zu erhöhen, wenn öfters das selbe Vorzeichen hintereinander übertragen wurde. Es gibt eine Menge von verschiedenen *adaptiven Modulationsverfahren*, die u.a. versuchen das Problem des slope overload zu lösen.

Adaptive Differential Pulscodemodulation (ADPCM)

ADPCM ist ein Verfahren, bei dem Prädiktion (Vorhersage) eine groSse Rolle spielt. Es gibt eine Vorhersageeinheit, die mit Hilfe verschiedenster Algorithmen schätzt, wie der weitere Signalverlauf aussehen wird. Wichtig dabei ist, dass die Senderseite weiss, wie die Schätzung der Empfängerseite für das Signal aussieht, was durch die Verwendung des selben Algorithmus auf der Sender- sowie auf der Empfängerseite jedoch technisch kein Problem darstellt. Übertragen wird nur die Differenz zwischen geschätzten und realen Signalverlauf. Da diese Differenz in der Regel viel kleiner ist, als das Signal selbst, genügt eine kleinere Anzahl von Amplitudenklassen.

Wie der Name schon sagt passt sich dieses Verfahren an. Die Länge der Codewörter ist also nicht fix. Die Anzahl der Amplitudenklassen wird der Grösse der Differenz entsprechend

angepasst. Mit Hilfe dieses Verfahrens benötigt man bei gleicher Qualität weit weniger als 50% der Bandbreite, die PCM benötigen würde.

XII. EINIGE ANWENDUNGEN VON MODULATIONSVERFAHREN

A. GSM / GPRS / EDGE / UMTS

In den letzten 20 Jahren hat die mobile Telekommunikation ein extremes Wachstum erfahren. *“First-generation mobile systems such as AMPS, TACS, and NMT using analog transmission for speech services were introduced in the early 80s. Second-generation systems, which use digital transmission, were introduced in the late 1980s. Global System for Mobile Communications (GSM), Personal Digital Cellular (PDC), IS-136, and IS-95 are second-generation systems.”*[8]. Die Standards der zweiten Generation haben, wenn überhaupt, nur sehr begrenzt Services zur Datenübertragung, mit geringen Übertragungsraten, angeboten. Erweiterungen der Standards der zweiten Generation machten es möglich auch höhere (wenn auch nicht unbedingt schnelle) Übertragungsraten anzubieten. Diese Erweiterungen werden in der Literatur manchmal auch als *Generation 2.5* bezeichnet.

Als Modulationsverfahren wird beim herkömmlichen GSM Standard GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying, siehe **7. Frequency Shift Keying**) verwendet. Dabei wird pro Zeiteinheit 1 Bit übertragen. Mitunter ein Grund für die niedrige Übertragungsraten bei GSM.

GPRS (*General Packet Radio Service*) ist eine paketorientierte Erweiterung zum GSM Standard. Zum ersten Mal werden paketorientierte Dienste als Erweiterung von GSM angeboten. Mit Hilfe von GPRS können auch zum Beispiel Laptops, wenn auch nur sehr schmalbandig, im Internet surfen. Die maximale Übertragungsrate von GPRS Diensten beträgt theoretisch bei der Nutzung aller 8 zur Verfügung stehenden GSM Timeslots 171.2 kbit/s. Praktisch wird man aber kaum

über eine Übertragungsrate von 56 kbit/s hinauskommen, was nicht unbedingt wahnsinnig schnell ist.

EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*) ist eine Weiterentwicklung des GSM / GPRS Standards und bietet höhere Transferraten an. Dies wird durch das Wechseln von GMSK auf 8-PSK als Modulationsverfahren erreicht (Siehe **8. Phase Shift Keying**). Ein wichtiges Kriterium bei der Planung von EDGE war, dass sich der Standard einfach in das bestehende GSM Netz eingliedern lässt und dass er alte, noch nicht EDGE fähige Geräte nicht stört. Das neue Modulationsverfahren wird nur auf Kanälen verwendet, die von EDGE Geräten belegt sind. Die maximale Übertragungsrate kann mit Hilfe von 8-PSK auf 45 kbit/s (wenn nur ein Timeslot belegt wird) gesteigert werden, was einer Übertragungsrate von 384 kbit/s bei Belegung aller 8 GSM Timeslots entspricht [6]. Das ist mehr als eine Verdoppelung der Übertragungsrate verglichen zu GPRS.

Wir befinden uns zur Zeit in der dritten Generation von mobilen Standards. **UMTS** (*Universal Mobile Telecommunications System*) ist derzeit Stand der kommerziell verfügbaren Telekommunikationstechnik. UMTS erweitert die multimedialen Möglichkeiten bei der mobilen Übertragung ungemein. Mit Hilfe dieses Standards ist es erstmals möglich, mobiles Internet auf einen halbwegs brauchbaren Niveau anzubieten. In Österreich bietet A1 seit Sommer 2005 UMTS in Kombination mit EDGE als "*A1 UMTS + EDGE*" an. Als Übertragungstechnologie wird bei UMTS das sogenannte WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) verwendet. Dabei kann die Codelänge variieren. Je länger der Code ist, desto kleiner ist die Nettodatenrate, aber desto weniger Energie wird für das Senden der Nachricht benötigt. Bei einer Bruttodatenrate von 30 kb/s werden 256 Bit lange Codewörter und 4-PSK als Modulationsverfahren verwendet.

B. WLAN

Auch bei den verschiedenen Wireless LAN Standards werden Modulationsverfahren auf vielseitige Art und Weise eingesetzt. Hauptsächlich wird 2-GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*), 4-GFSK, DPSK (*Differential Puls Shift Keying*), DQPSK (*Differential 4-PSK*) und CCK (*Complementary Code Keying*) eingesetzt. Dabei beträgt die maximale Sendeleistung 1 Watt in den USA bzw. 100 mW in Europa. Complementary Code Keying ist eine äusserst interessante Technik, die in [9] sehr gut beschrieben wird.

XIII. ZUSAMMENFASSUNG

ZIEL dieser Arbeit war es einen kleinen Einblick in die verschiedensten Techniken der Modulation zu geben. Wie man sieht gibt es sehr viele Arten von Modulationsverfahren. Prinzipiell werden bei der Modulation eine oder mehrere Eigenschaften einer Trägerschwingung dem zu modulierenden Signal entsprechend angepasst. Mögliche Eigenschaften sind die Amplitude, die Frequenz und die Phasenlage einer Schwingung.

Wir haben uns zunächst die analogen Vertreter der Modulationsverfahren angesehen: Die klassische Amplitudenmodulation, die Frequenzmodulation und die Phasenmodulation. Anschliessend sind wir zu den digitalen Modulationsverfahren gewechselt und haben die wichtigsten Vertreter kurz beleuchtet: ASK, FSK, PSK und die ein oder andere abgewandelte Spezialform dieser Vertreter. Speziell in diesen Bereich ändert sich die Technik sehr rasch. Es werden ständig neue Modulationsverfahren auf den Markt gebracht, die spezielle Teilanwendungen sehr gut meistern.

Leider hatte ich nicht Zeit auf alle Verfahren ausführlich einzugehen, ich hoffe jedoch sehr, dass ich zumindest einen kleinen Überblick über die wichtigsten Vertreter der gängigen Modulationsverfahren liefern konnte.

XIV. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] G. Rahmig (1972). Niederfrequenz-Übertragungstechnik. Berliner Union/Kohlhammer Stuttgart 1972.
- [2] E. Herter, W. Lörcher (2000). Nachrichtentechnik 8. Auflage. Hanser Verlag München Wien 2000.
- [3] PD Dr.-Ing. W. Schiffmann, Dipl.-Phys. R. Schnitz (1999). Technische Informatik 2: Grundlagen der Computertechnik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1999, pp. 216 ff.
- [4] U. Tietze, Ch. Schenk (1999). Halbleiter-Schaltungstechnik. 10. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1993.
- [5] Wikipedia. <http://de.wikipedia.org>
- [6] Ashkan Mashhour (1999). Understanding Offset 8-PSK Modulation for EDGE. Microwave Journal, Oct. 1999, pp. 78-92.
- [7] Mohamed-Slim Alouini, Xiaoyi Tang and Andrea Goldsmith (1998). An Adaptive Scheme for Simultaneous Voice and Data Transmission over Fading Channels. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'98), Ottawa, Ontario, Canada. 1998.
- [8] Tero Ojanperä, Ramjee Prasad (1998). An Overview of Third-Generation Wireless Personal Communications: A European Perspective. Personal Communications, IEEE Vol. 5, No. 6. (1998), pp. 59-65.
- [9] Bob Pearson (2001). Complementary Code Keying Made Simple. Intersil Application Note November 2001, AN9850.2.