

Modulationsverfahren Teil 1

Die Übertragung von Signalen ist eine grundlegende Aufgabe der Nachrichtentechnik. Um einen zur Verfügung stehenden Übertragungskanal optimal ausnutzen zu können, müssen die zu übertragenden Nachrichtensignale in geeigneter Form an den Kanal angepaßt werden - sie werden moduliert.

Neben der in der Rundfunk- und Fernsehtechnik weit verbreiteten und allgemein bekannten Amplituden- und Frequenzmodulation gibt es noch eine Vielzahl weiterer Modulationsverfahren und Derivate, die wir in übersichtlicher Weise ausführlich in dieser Artikelserie darstellen. Dabei halten wir einen engen Bezug zu praktischen Anwendungen in Verbindung mit der Beschreibung mathematischer Zusammenhänge.

Allgemeines

Wer in unserer heutigen Informationsgesellschaft erfolgreich sein will, muß stets über alle Neuheiten und Neuigkeiten informiert sein. Dies gilt in der Wirtschaft genauso wie im privaten Bereich. Um einen schnellen Zugriff auf alle wichtigen Informationen zu haben, bedienen wir uns verschiedener Informationssysteme. Beispielsweise informiert uns das Radio- und Fernsehprogramm stets über die neuesten Ereignisse in der Welt. Das Internet stellt eine kaum überschaubare Informationsflut zur Verfügung, und mit einem Handy sind wir nahezu überall erreichbar. Das Handy wird einschaltet, die Nummer gewählt, und man erwartet, daß sich die Verbindung innerhalb von Sekunden aufbaut. Die Nutzung all dieser Informationsquellen ist für uns selbstverständlich geworden, über die sich dahinter verborgene Technik macht sich kaum jemand Gedanken. Im folgenden werden wir einige technische Grundlagen der Nachrichtenübermittlung beschreiben.

Einige grundsätzliche Definitionen zur Nachrichtenübertragung sind in Abbildung 1 dargestellt. Als einfache Anwendung dieser theoretischen Betrachtung wenden wir diese auf das Beispiel einer Rundfunkübertragung an. Als Nachrichtenquelle ist hier der Sprecher im Studio zu sehen. In der Definition Sender sind alle notwendigen Schritte zur Signalaufbereitung zusammengefaßt. So gehört hierzu z. B. das Aufnahmemikrofon, die gesamte Signalverarbeitung bis zur eigentlichen Sendestation incl. der Sendeantenne. Die Funkstrecke zwischen Sendeantenne und Empfangsantenne wird hierbei als Über-

tragungskanal definiert. Zum Empfänger gehören dann neben der Empfangsantenne wiederum alle notwendigen Signalverarbeitungen bis hin zum Lautsprecher, der dann letztlich das gesprochene Wort wiedergibt. Der Zuhörer an seinem heimischen Radiogerät kann als Nachrichtensenke aufgefaßt werden.

Multiplexverfahren

Die Engstelle in einem solchen System ist der Übertragungskanal. Dieser kann als Funkstrecke, Kabelverbindung etc. ausgeführt sein. Aber auch Speichermedien, die es erlauben, ein Nachrichtensignal zu transportieren, können als Übertragungskanal angesehen werden. Jede Übertragungsstrecke kann dabei nur eine bestimmte Menge an Informationen weitergeben.

Auch ist die Anzahl der Übertragungskanäle nicht beliebig erweiterbar. So läßt sich z. B. der Kanal Funkstrecke aus physikalischen Gründen nicht beliebig vervielfachen. Meistens schließen aber vor allem wirtschaftliche Aspekte eine beliebige Steigerung der Übertragungskanäle aus. Eine theoretisch unendliche, jedoch wirtschaftlich begrenzte Anzahl transatlantischer Verbindungsleitungen für die Telekommunikation ist nur ein Beispiel. Daher ist man stets bestrebt, einen vorhandenen Kanal so effizient wie möglich auszunutzen. Dies bedeutet in der Praxis, mehrere Nachrichtensignale verschachtelt auf dem gleichen Übertragungskanal zu übertragen. Wichtige Prinzipien zur wirtschaftlichen Mehrfachausnutzung von Übertragungskanälen sind die verschiedenen Multiplexverfahren.

In der Nachrichtentechnik sind die wichtigsten Verfahren das Frequenzmultiplex-,

das Zeitmultiplex- und das Codemultiplex-Prinzip. Wobei das bekannteste Prinzip das Frequenzmultiplex-Verfahren (FDMA = Frequency Division Multiple Access) ist, nach dem alle Übertragungen, die das Funkfeld als Übertragungskanal nutzen, arbeiten. So basiert die gesamte Rundfunktechnik auf diesem Verfahren. Die Nachrichtensignale werden dabei verschiedenen hochfrequenten Trägern aufgeprägt, die sich dann alle ohne gegenseitige Beeinflussung (theoretisch) parallel auf dem Kanal übertragen lassen. Aufgrund der unterschiedlichen Frequenzlage, lassen sich die ursprünglichen Nachrichten wieder voneinander trennen.

Beim Zeitmultiplex (TDMA = Time Division Multiple Access) werden die verschiedenen Basisbandsignale zeitlich nacheinander auf den Übertragungskanal gegeben.

Beim Codemultiplex-System (CDMA = Code Division Multiple Access) erfolgt die Unterscheidung der einzelnen Nachrichten auf dem Übertragungskanal durch verschiedene Codierungen.

Bei allen Multiplexverfahren müssen die Basisbandsignale, d. h. die zu übertragenden Nachrichtensignale in ihren ursprünglichen Frequenzbereichen, entsprechend dem verwendeten Multiplexverfahren bearbeitet werden. Diese Aufbereitung wird auch Modulation genannt. Die Modulation stellt eine Anpassung des zu übertragenden Nachrichtensignals an den Übertragungskanal dar.

Modulationsverfahren

Bei der Modulation wird ein Trägersignal im Sinne des Nachrichtensignals beeinflusst. Das Nachrichtensignal wird auch vielfach als Quellensignal oder modulierendes Signal bezeichnet, während das gesamte Signal Modulationsprodukt oder moduliertes Signal genannt wird.

Je nachdem welchen Signalparameter des Trägersignales das Quellensignal beeinflusst, unterscheidet man zwischen den verschiedenen Modulationsverfahren. Die

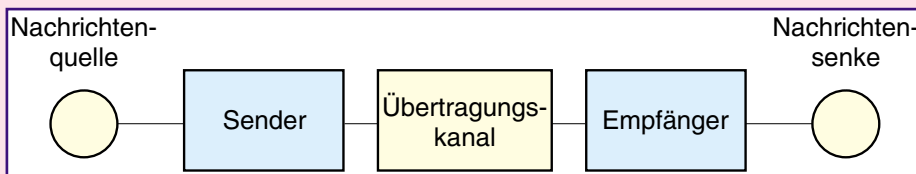


Bild 1: Grundprinzip der Nachrichtenübertragung

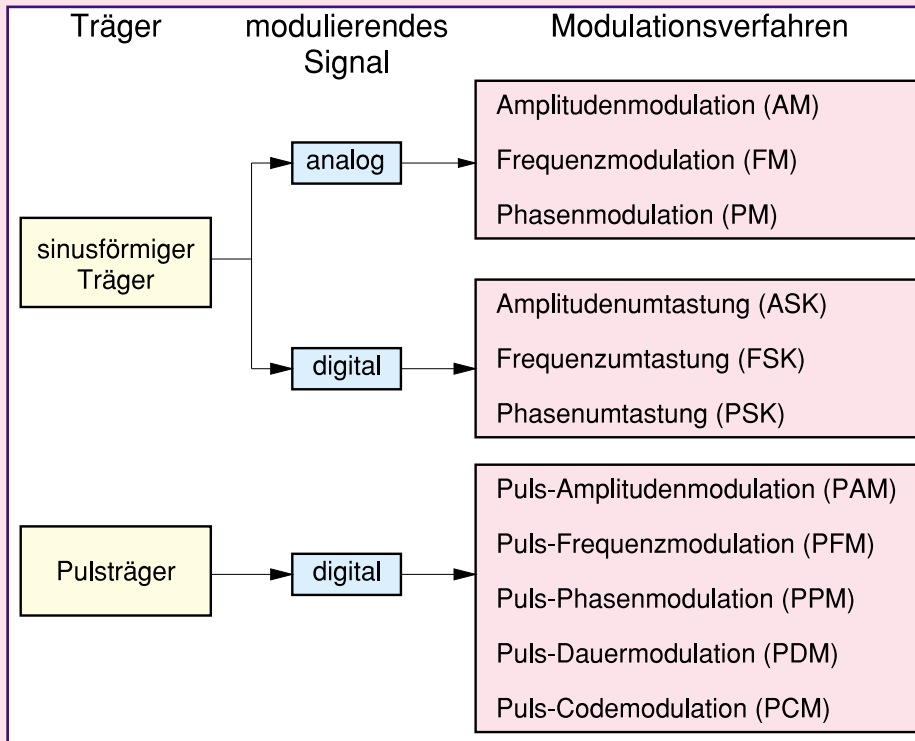


Bild 2: Einteilung der Modulationsverfahren

Abbildung 2 gibt einen Überblick über die am weitesten verbreiteten Modulationsverfahren. Eine grobe Unterscheidung wird zunächst durch die Signalform des Trägers gemacht. Anschließend teilt die Art des modulierenden Signals diese Darstellung weiter auf.

Nach dieser allgemeinen Einführung wenden wir uns nun den einzelnen Modulationsverfahren zu und werden, um den praktischen Bezug nicht zu verlieren, typische Einsatzgebiete der vorgestellten Verfahren nennen. Zunächst beschäftigen wir uns in diesem Artikel mit der Amplitudenmodulation.

Amplitudenmodulation (AM)

Wir haben die Modulation grundsätzlich als eine Beeinflussung eines Trägersignals in Abhängigkeit vom Quellen- bzw. modulierenden Signal kennengelernt. Ein Parameter, der auf relativ einfache Weise beeinflusst werden kann, ist die Amplitude des Trägersignals, man spricht dann von einer Amplitudenmodulation.

Die Amplitude eines hochfrequenten Trägersignales wird im Sinne des niederfrequenten Quellensignals, des modulierenden Signals, verändert. Mathematisch betrachtet handelt es sich dabei um eine einfache Multiplikation beider Signale. Diese Amplitudenmodulation ist noch mit einfacher Mathematik beschreibbar.

Ein sinusförmiges Trägersignal lässt sich mit

$$s(t) = s \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \quad (\text{Gl.1})$$

beschreiben. Setzt man die Amplitude willkürlich auf $s = 1$, so ergibt sich das Trägersignal zu:

$$s(t) = \cos(\omega_0 \cdot t) \quad (\text{Gl.2})$$

Um die Formeln so übersichtlich wie möglich zu gestalten, geben wir die Kreisfrequenz ω an, die über $\omega = 2\pi f$ mit der Frequenz f verknüpft ist.

Legt man ein Quellensignal mit

$$f(t) = a \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) \quad (\text{Gl.3})$$

zugrunde, so erhält man durch die Multiplikation beider Signale eine Amplitudenmodulation. Für das modulierte Signal ergibt sich:

$$m(t) = f(t) \cdot s(t) = a \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \quad (\text{Gl.4})$$

Der Term $a \cdot \cos(\omega_1 \cdot t)$ kann als „neue“ Amplitude des Trägers interpretiert werden. Die lineare Abhängigkeit vom Quellensignal lässt sich erkennen, man spricht dann von linearem Modulationsverfahren. Die Verteilung der Signale im Frequenzbereich, d. h. die spektrale Darstellung kann aus der Gleichung 4 nicht ohne weiteres abgelesen werden. Daher wenden wir ein Theorem der Trigonometrie an:

$$\frac{1}{2} (\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)) \quad (\text{Gl.5})$$

Angewandt auf die Gleichung 4 ergibt sich für das Modulationssignal:

$$m(t) = \frac{1}{2} a \cdot \cos((\omega_0 - \omega_1) \cdot t) + \frac{1}{2} a \cdot \cos((\omega_0 + \omega_1) \cdot t) \quad (\text{Gl.6})$$

Diese Gleichung zeigt, daß eine Verschiebung des Quellensignals stattgefunden hat. In Abbildung 3 sind die Signale im Frequenzbereich entsprechend dargestellt. Aus der Betrachtung kann man erkennen, daß zwei neue Frequenzen entstanden sind, die um die Signalfrequenz ω_1 vom ursprünglichen Träger ω_0 verschoben sind. Hierbei handelt es sich um die sogenannten Seitenbänder, das untere Seitenband mit $\omega_0 - \omega_1$ und das obere mit $\omega_0 + \omega_1$.

Führt man die auch in der Abbildung dargestellten negativen Frequenzen ein,

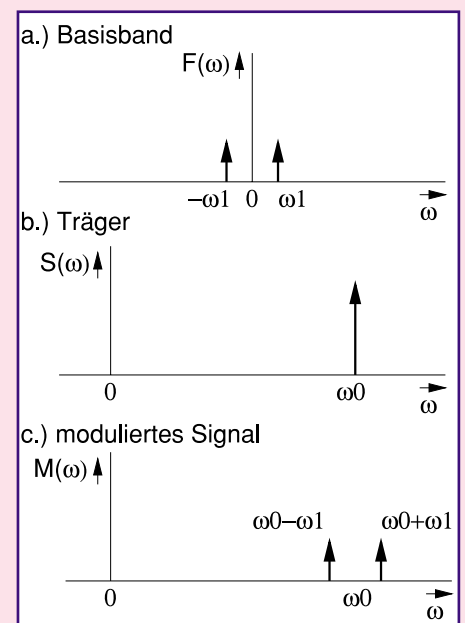


Bild 3: Doppelseitenband-AM mit unterdrücktem Träger und sinusförmigem Quellensignal

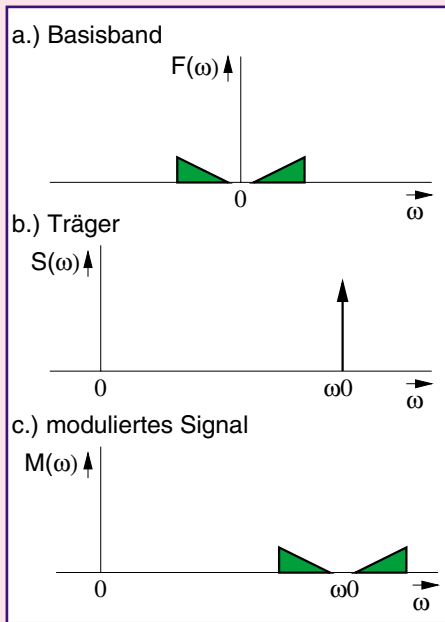


Bild 4: Doppelseitenband AM mit unterdrücktem Träger und breitbandigem Quellsignal

die nur als theoretisches Hilfsmittel gedacht sind und in der Praxis nicht vorkommen, kann man leicht erkennen, daß es sich bei diesem Modulationsverfahren nur um eine Frequenzverschiebung des Basisbandes an die Position des Trägers im Frequenzbereich handelt.

In obigem Rechenbeispiel ist das modulierende Signal eine Sinusschwingung. Diese Betrachtung läßt sich aufgrund des linearen Zusammenhangs mit der dann erlaubten Überlagerung auf einen breiteren Frequenzbereich, dem gesamten Basisband, verallgemeinern. In Abbildung 4 ist die Modulation für ein beliebiges Basisbandssignal dargestellt. Die Darstellung des Basisbandes als Dreieck ist allgemein üblich, dies soll aber nicht einen unterschiedlichen Pegel widerspiegeln, sondern nur als optische Hilfe für die Lage des Spektrums dienen. Nach der Modulation ergibt sich dann die in Abbildung 4c dargestellte spektrale Verteilung. Auch hier ist die Frequenzverschiebung gut zu erkennen. Die Bezeichnung der neuen Frequenzen als Seitenbänder ist hier eher zutreffend. Zu beachten ist bei dieser Modulationsart, daß das eigentliche Trägersignal aus dem Spektrum verschwunden ist. Aufgrund der beiden Seitenbänder und dem fehlenden Träger nennt man dieses Verfahren Doppelseitenband-AM (DSB = Double Sideband) mit unterdrücktem Träger.

Ein Nachteil dieses Verfahrens ist, daß bei der Zurückgewinnung des Quellsignals im Empfänger (Demodulation) das verwendete Trägersignal zur Verfügung stehen muß, man spricht dann von einer erforderlichen kohärenten Demodulation. Weiterhin hat sich die Bandbreiteneffizienz

verschlechtert, d. h. der Bandbreitendeckungsfaktor β wird größer. Dieser Parameter beschreibt, um welchen Faktor der vom modulierten Signal beanspruchte Frequenzbereich größer ist, als der des Basisbandssignals (Quellsignals). Bei dem vorgestellten Verfahren hat sich die belegte Bandbreite verdoppelt, es gilt $\beta = 2$.

Die Doppelseitenband-AM mit unterdrücktem Träger wird im UKW-Stereo-Rundfunk eingesetzt. Dort wird das Differenzsignal (linker Kanal - rechter Kanal) auf einen 38kHz-Träger aufmoduliert. Der Träger, der zur korrekten Demodulation notwendig ist, wird als 19kHz-Stereo-Pilotton übertragen und durch eine Frequenzverdopplung im Empfänger zurückgewonnen.

Um den Träger nicht wieder separat zu setzen zu müssen und um den Empfänger so einfach wie möglich gestalten zu können, verwendet man bei der „normalen“ Rundfunkübertragung im Lang-, Mittel- und Kurzwellenbereich eine abgewandelte Form der oben beschriebenen AM mit unterdrücktem Träger. Man verhindert die Unterdrückung des Trägers, indem dem Quellsignal $f(t)$ ein Gleichanteil A hinzugefügt wird. Für das Trägersignal gilt weiterhin Gleichung 2, das modulierende Signal wird durch den additiven Gleichanteil zu:

$$f(t) = A + a \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) \quad (Gl.7)$$

Das Verhältnis zwischen der maximalen Amplitude des Quellsignales a und dem

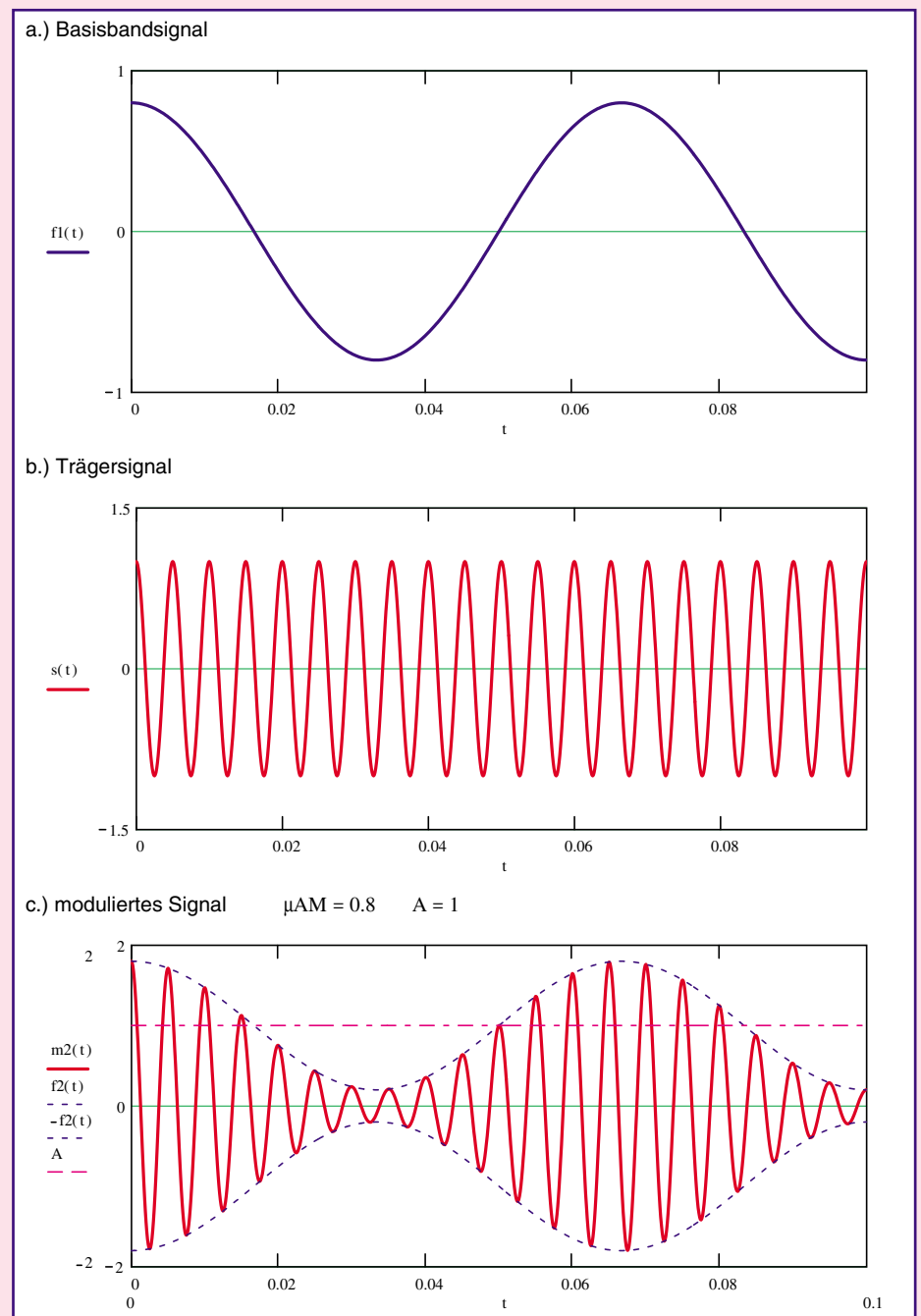


Bild 5: Amplitudenmodulation mit Träger im Zeitbereich

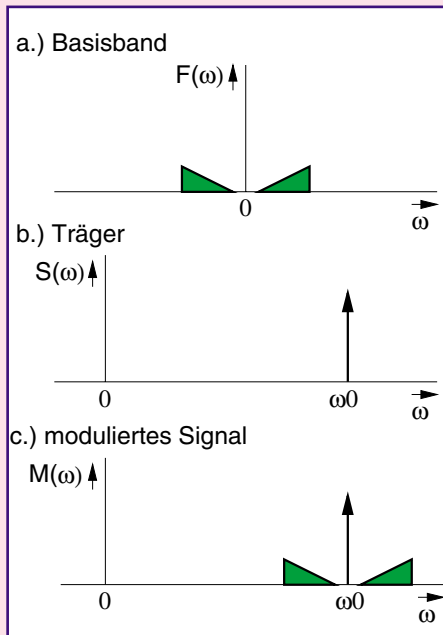


Bild 6: Amplitudenmodulation mit Träger im Frequenzbereich

$\omega_0 + \omega_1$ und $\omega_0 - \omega_1$. Eine vektorielle Addition aller Zeiger ergibt dann die Amplitude des Momentanwertes des modulierten Signals. Reduziert man gedanklich die Rotation der Zeiger um die Kreisfrequenz des Trägers ω_0 , so erhält man einen stehenden Trägerzeiger und zwei mit der Kreisfrequenz ω_1 drehende Seitenbandzeiger. Die Unterscheidung der Seitenbänder erfolgt durch die gegensinnige Drehrichtung dieser Zeiger. Die jetzt vereinfachte vektorielle Addition der drei Zeiger ergibt den resultierenden Zeiger, der den Momentanwert des modulierten Signals angibt. Aufgrund der gegensinnigen Drehrichtung der Seitenbandzeiger liegt die Resultierende immer in Phase mit dem Trägerzeiger, nur die Amplitude ändert sich.

Vor allem die Illustration im Frequenzbereich (Bild 6) zeigt sehr deutlich die Verteilung der Amplituden und somit auch die Leistungsverteilung. Die Gesamtleistung P_{AM} teilt sich auf die Trägerleistung P_T und die Leistung in den Seitenbändern P_{SB} auf, wobei die Verteilung je nach Modulationsgrad variiert. Das Verhältnis von Seitenbandleistung zur Trägerleistung ist:

$$\frac{P_{SB}}{P_T} = \frac{\mu_{AM}^2}{2} \quad (Gl.12)$$

Geht man vom maximalen Modulationsgrad $\mu_{AM} = 1$ aus, so wird von der gesamten zur Verfügung stehenden Sendeleistung 2/3 für die Übertragung des Trägers und nur 1/3 für die Seitenbänder aufgebracht. Wenn man dann noch bedenkt, daß beide Seitenbänder eigentlich die gleiche Information tragen, dann verschlechtert sich die Effizienz dieses Modulationsverfahrens noch weiter.

Neben den bisher beschriebenen Verfahren existieren weitere Abwandlungen, die alle auf einer Amplitudenmodulation beruhen. Mit diesen Varianten beschäftigen wir uns im nächsten Teil dieser Artikelserie. **ELV**

Gleichanteil A wird als Modulationsgrad μ_{AM} bezeichnet. Dieser Parameter gibt an, wie stark der Träger moduliert ist. $\mu_{AM} = 0$ entspricht keiner Beeinflussung des Trägers, während bei $\mu_{AM} = 1$ die maximal ohne Verzerrungen mögliche Modulation erreicht wird. Für eine lineare Modulation muß immer gelten $\mu_{AM} \leq 1$. Es gilt die Definition:

$$\mu_{AM} = \frac{a}{A} \quad (Gl.8),$$

wodurch Gleichung 7 zu

$$f(t) = A + \mu_{AM} \cdot A \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) \quad (Gl.9)$$

wird.

Der Träger lt. Gleichung 2 wird mit dem oben beschriebenen Signal moduliert. Die mathematische Multiplikation ergibt dann folgendes Ergebnis:

$$\begin{aligned} m(t) &= f(t) \cdot s(t) \\ &= A \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \\ &\quad + A \cdot \mu_{AM} \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \end{aligned} \quad (Gl.10)$$

Wenden wir auch hier auf den zweiten Term das obige Theorem der Trigonometrie an, so ergibt sich:

$$\begin{aligned} m(t) &= A \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \\ &\quad + \frac{A \cdot \mu_{AM}}{2} \cos((\omega_0 - \omega_1) \cdot t) \\ &\quad + \frac{A \cdot \mu_{AM}}{2} \cos((\omega_0 + \omega_1) \cdot t) \end{aligned} \quad (Gl.11)$$

Der erste Term ist die nicht unterdrückte Trägerfrequenz, während die beiden weiteren Terme die Seitenbänder angeben. Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 5 ein solches amplitudenmoduliertes Signal im Zeitbereich dargestellt. Bild 5c. zeigt deutlich, daß sich das modulierende Quellensignal in der Einhüllenden des modulierten Signals wiederfinden läßt. Abbildung 6 zeigt die entsprechenden Signale im Frequenzbereich.

Eine sehr anschauliche Darstellung dieser Modulationsart ist das Zeigerdiagramm in Abbildung 7. Der Trägerzeiger rotiert mit ω_0 und die Seitenbänder jeweils mit

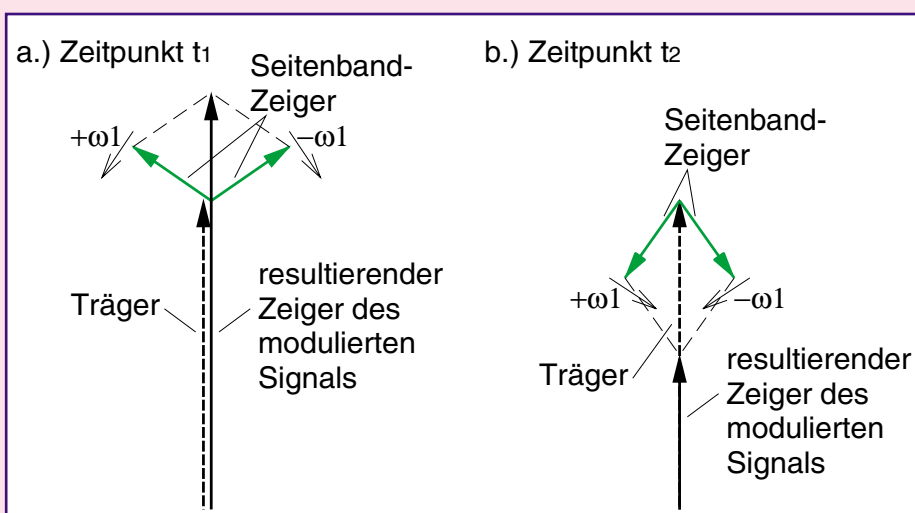


Bild 7: Zeigerdiagramm einer Amplitudenmodulation mit Träger