

Von BAS über FBAS nach PAL

Mit den BAS-Signalen werden neben den Synchronisationssignalen lediglich Helligkeitswerte (Graustufen) übertragen. Ein typisches BAS-Signal ist in Abb. 1 dargestellt. Genaueres dazu findet man in der Präsentation über BAS-Signale. Hier soll genauer erläutert werden, wie ein Farbbild übertragen wird. Das zugehörige FBAS-Signal (*F*arb-*B*ild-*A*ustast-*S*ynchron-Signal) ist wesentlich komplexer als das BAS-Signal; dementsprechend ist es auch schwieriger zu verstehen. Hier sollen lediglich die wesentlichen und grundlegenden Ideen zur Sprache kommen. Auf technische Feinheiten soll nicht weiter eingegangen werden.

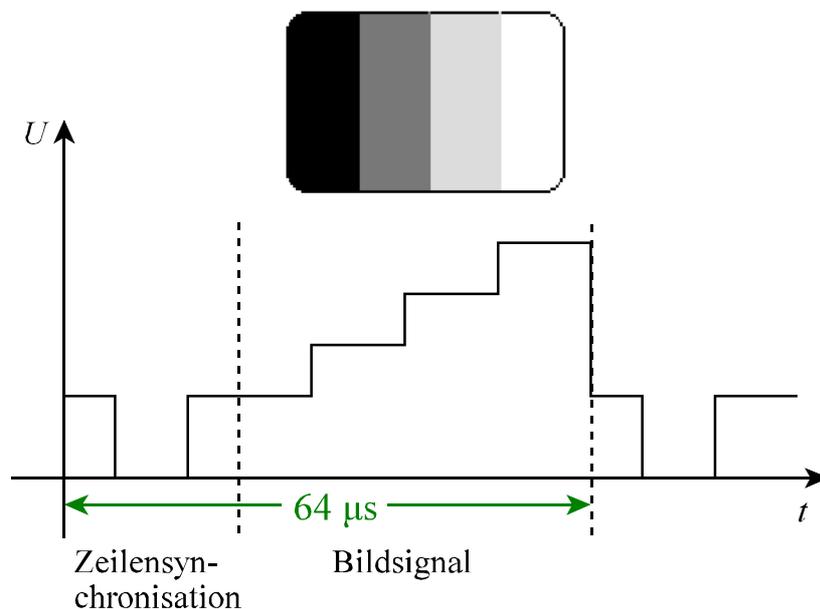


Abb. 1

Kompatibilität

Die Art und Weise, wie farbige Bilder übertragen werden, mag auf den ersten Blick merkwürdig und umständlich erscheinen; sie ist wohl dem Umstand geschuldet, dass die Entwickler des Farbfernsehens zwei Vorgaben hatten:

1. Alte Schwarzweiß-Empfänger sollten in der Lage sein, das neue Farbsignal als Schwarzweiß-Signal darzustellen; dabei sollten "helle" Farben wie z. B. Gelb als helles Grau und "dunkle" Farben wie z. B. Violett als dunkles Grau dargestellt werden.
2. Neue Farb-Fernseher sollten die alten BAS-Signale korrekt darstellen können.

Es wurde also eine doppelte Kompatibilität verlangt. Deswegen musste das neue FBAS-Signal wesentliche Elemente des alten BAS-Signals behalten, so z. B. die Synchronisationssignale. In Abb. 2 ist ein solches FBAS-Signal zu sehen. Auffällig sind das so genannte Burst-Signal im Zeilensynchronisationssignal und die hochfrequenten Schwingungen im Bildsignal.

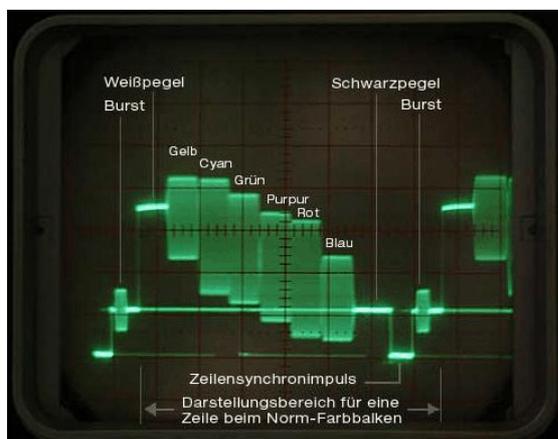


Abb. 2 (nach <http://www.dma.ufg.ac.at>)

In diesen hochfrequenten Schwingungen ist die Farbinformation kodiert. Wie, das werden wir gleich sehen. Vorweg wollen wir aber bemerken, dass man aus dem FBAS-Signal das zugehörige BAS-Signal erhält, wenn man den hochfrequenten Anteil herausfiltert bzw. ignoriert. Dadurch lässt sich die oben angesprochene Abwärtskompatibilität gewährleisten.

Farbzerlegung

Auf welche Weise wird nun die Farbinformation in diesen hochfrequenten Schwingungen untergebracht? Zunächst einmal wird in der Kamera das Bild mittels Filtern in einen Rot-, einen Grün- und einen Blau-Anteil zerlegt; die drei von der Kamera gelieferten Spannungssignale wollen wir entsprechend mit R , G und B bezeichnen. Aus diesen drei Signalen erzeugt man das so genannte Leuchtdichte-Signal Y , welches dem Grauwert beim Schwarzweiß-Fernseher entspricht. Weil das menschliche Auge für diese drei Farben unterschiedlich empfindlich ist, werden die Farbwerte hier bei der Addition unterschiedlich gewichtet:

$$Y = 0,3 R + 0,59 G + 0,11 B \quad (1)$$

Bei der Farbe Weiß haben alle Farbanteile den Maximalwert 1 V; dann ist auch der Y -Wert gleich 1 V. Sind die Farbanteile niedriger, so ist auch der Y -Wert niedriger; er entspricht dann einem Grauton.

Dieses Y -Signal wird (als niederfrequenter, s. u.) Anteil übertragen; es bildet sozusagen das Fundament des FBAS-Signals und wird von den alten Schwarzweiß-Fernsehern als BAS-Bild-Signal gedeutet. Die Farbanteile werden jetzt wie folgt verarbeitet:

Zunächst werden die Differenzsignale

$$V = R - Y \text{ und } U = B - Y \quad (2)$$

gebildet. Nur diese Signale U und V werden in dem hochfrequenten Anteil kodiert. Aus U und V lassen sich nämlich über den Y -Wert wieder R und B zurückrechnen, und aus (1) kann man dann auch den noch fehlenden G -Wert bestimmen. Auf die dazu benötigten Schaltungen soll hier nicht weiter eingegangen werden.

In der folgenden Tabelle sind zu den Mischfarben von R , G und B (mit maximaler Intensität 1) und zu Schwarz die Werte von Y , U und V angegeben.

Farbe	R	G	B	Y	V = R-Y	U = B-Y
Weiß	1	1	1	1	0	0
Gelb	1	1	0	0,89	0,11	-0,89
Cyan	0	1	1	0,7	-0,7	0,3
Grün	0	1	0	0,59	-0,59	-0,59
Magenta	1	0	1	0,41	0,59	0,59
Rot	1	0	0	0,3	0,7	-0,3
Blau	0	0	1	0,11	-0,11	0,89
Schwarz	0	0	0	0	0	0

Wenn man diese und weitere Farbkombinationen in ein U - V -Koordinatensystem einträgt, erhält man ein Diagramm der Art wie in Abb. 3. Die Tabelle zeigt, dass die Zuordnung $(U, V) \rightarrow (R, G, B)$ nicht eindeutig ist. Zum Ursprung des Koordinatensystems nimmt die Farbinsensitivität (Chrominanz) ab. Ob dem Ursprung die Farbe Weiß, ein Grauton oder Schwarz entspricht, hängt von dem Y -Wert ab.

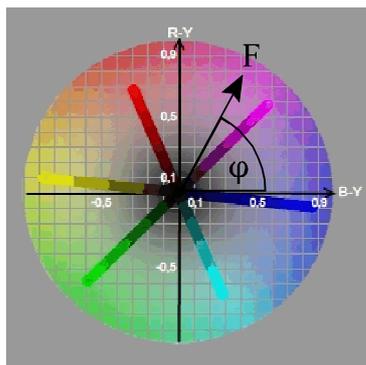


Abb. 3 Farbkreis nach www.elektroniktutor.de

Das Farbsignal

Nun müssen wir nur noch erklären, wie die beiden Signale U und V übertragen werden. Dies geschieht durch Modulation mit einem hochfrequenten Bildträgersignal T von 4,43 MHz (genau-

er: 4,43361875 MHz). Weiter unten werden wir noch verdeutlichen, warum gerade diese Frequenz gewählt wird. Zunächst wollen wir aber das Modulationsverfahren selbst verdeutlichen. In Wirklichkeit benutzt man nicht ein einziges Bildträgersignal, sondern zwei: Sie haben zwar dieselbe Frequenz f_T und auch dieselbe Amplitude, sie sind aber um 90° phasenverschoben. Während das U -Signal mit einem Sinus-Signal moduliert wird, wird das V -Signal mit einem (invertierten) \cos -Signal moduliert.

Diese beiden Signale werden addiert und bilden das hochfrequente Farb-Signal F , welches nun seinerseits zum Y -Wert addiert wird.

In Abb. 4 sind diese Signale (außer Y) in einem Zeit-Spannungsdiagramm wiedergegeben; dabei ist das U -Signal rot, das invertierte V -Signale blau und deren Summe grün eingezeichnet. Außerdem ist dargestellt, wie man sich dieses Diagramm mithilfe rotierender Zeiger erzeugen vorstellen kann: Alle drei Zeiger rotieren mit der Kreisfrequenz $\omega_T = 2\pi f_T$ im Gegenuhrzeigersinn. Die Projektion der Zeiger auf die vertikale Achse geben die jeweiligen Spannungswerte an. Der F -Zeiger ergibt sich als Vektorsumme des U - und des V -Zeigers. Dieses Zeigerdiagramm darf aber nicht mit dem Farbdigramm in Abb. 3 verwechselt werden.

In Abb. 4 ist die Zeigerposition für $t = 1$ s angegeben. Der Übersichtlichkeit halber wurde hier $\omega = 2/s$ angenommen.

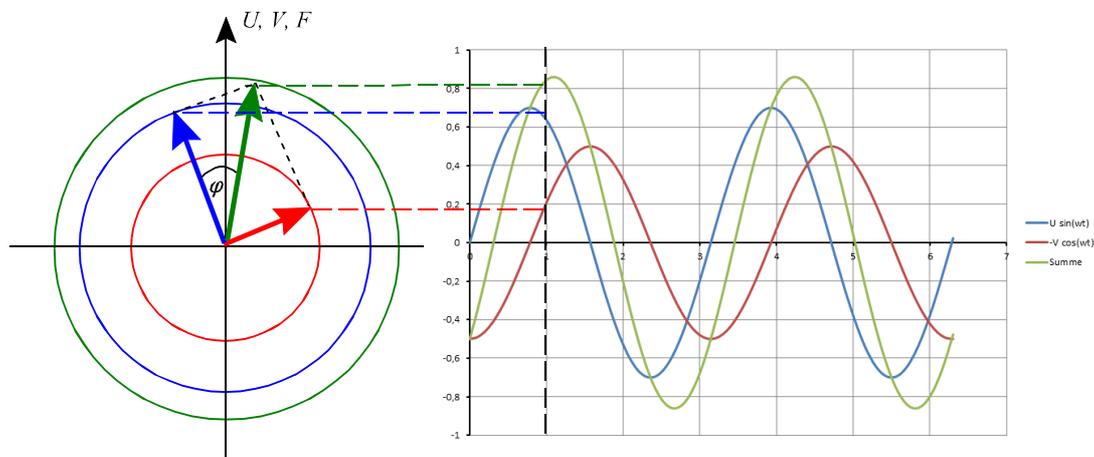


Abb. 4

Das F -Signal ist gegenüber dem U -Signal um φ (nach rechts) phasenverschoben. Nach dem Additionstheorem für trigonometrische Funktionen ist dann

$$\begin{aligned}
 F(t) &= \hat{F} \sin(\omega t - \varphi) \\
 &= \hat{F} \sin(\omega t) \cos(\varphi) - \hat{F} \cos(\omega t) \sin(\varphi) \\
 &= \hat{U} \sin(\omega t) + \hat{V} (-\cos(\omega t))
 \end{aligned}$$

mit

$\hat{U} = \hat{F} \cos(\varphi)$, $\hat{V} = \hat{F} \sin(\varphi)$ und $\tan(\varphi) = \frac{\hat{V}}{\hat{U}}$. Die Phasenverschiebung φ entspricht also dem

Winkel φ im Zeigerdiagramm. Der Winkel φ taucht auch im Farbkreis (Abb. 3) auf: Er bestimmt den Farbton.

Der Zeiger F beschreibt das Chrominanzsignal. Die Amplitude dieses Signals ist die Länge dieses Zeigers:

$$\hat{F} = \sqrt{\hat{U}^2 + \hat{V}^2}$$

Je größer \hat{F} ist, desto intensiver ist die Farbe und desto mehr nähern wir uns dem Rand des Farbkreises in Abb. 3. Im Zentrum des Farbkreises ist $\hat{F} = 0$; dies entspricht einem Grauton (s. o.).

Im Laufe einer Zeile verändern sich die Werte von Y, \hat{F} und dem Phasenwinkel φ je nach Helligkeit und Farbe. Die Änderungen von Y und \hat{F} kann man gut in Abb. 2 erkennen; der Phasenwinkel φ , welcher wesentlich für die Farbe ist, lässt sich - zumindest in dieser Auflösung - nicht ablesen.

Bleibt noch zu klären, wie der Farb-Fernseher nun aus dem hochfrequenten Farbsignal den U - und den V -Anteil isoliert. Dazu hat der Farb-Fernseher ein Sinussignal mit der exakten Bildträgerfrequenz als Referenzsignal zur Verfügung. Jedesmal, wenn dieses Sinussignal sein Maximum erreicht, also bei Phasenwinkeln $\omega_T t = 90^\circ + k \cdot 360^\circ$ ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$), wird der Wert des Farbsignals durch eine elektronische Schaltung für kurze Zeit festgehalten; dieser Wert entspricht gerade dem U -Wert. In der Summe $\hat{U} \sin(\omega_T t) + (-\hat{V}) \cos(\omega_T t)$ hat jetzt nämlich der Betrag vom Sinus den Wert 1 und der Cosinus den Wert 0. Auf ähnliche Weise kann auch der momentane V -Wert bezogen werden: Jetzt werden die Stellen des Farbsignals gesampelt, für die der Phasenwinkel $k \cdot 360^\circ$ beträgt.

Das Burstsignal

Es ist klar, dass es für eine korrekte Bestimmung der U - und V -Werte durch den Fernseher von entscheidender Bedeutung ist, dass Sampling des F -Signals genau zu den richtigen Zeitpunkten erfolgt. Das kann nur gelingen, wenn das Referenzsignal absolut phasenkorrekt sein. Selbst ein Quarz kann dies zumindest über eine längere Zeit nicht gewährleisten. An dieser Stelle kommt das Burst-Signal ins Spiel: Durch dieses Signal wird im Fernseher ein Schwingkreis mit Quarz angestoßen; der stellt das Referenzsignal zur Verfügung. Da dieses zu Beginn jeder Zeile durch das FBAS-Signal von neuem synchronisiert wird, braucht es nur für die Dauer einer Zeile diese Genauigkeit aufweisen.

PAL

Durch Fehler in der Übertragung oder in der Verarbeitung des FBAS-Signals kann es geschehen, dass das reale Farbsignal dem Soll-Signal vorausseilt. Der wirkliche F -Zeiger eilt also dem Soll- F -Zeiger um φ voraus. Dies führt zu einer Verfälschung der Farbe (vgl. Abb. 3 und Abb. 5). Das PAL-Verfahren (*Phase Alternating Line*) begegnet diesem Problem folgendermaßen: In jeder zweiten Zeile (in Abb. 5 als PAL-Zeile bezeichnet) wird nicht der Wert V , sondern der Wert $-V$ übertragen. Der zugehörige Zeiger ist gegenüber der vorangehenden Zeile im Farbkreis (Abb. 3) an der U -Achse gespiegelt. Auch dieser Zeiger wird wieder mit demselben Fehler behaftet sein, weil sich die physikalischen Bedingungen so schnell nicht ändern; deswegen wird auch er dem Soll- F -Zeiger um $\Delta\varphi$ vorausseilen. Der Fernseher macht natürlich diese Spiegelung wieder rückgängig. Der so rekonstruierte F -Zeiger läuft nun dem Soll- F -Zeiger um $\Delta\varphi$ hinterher (vgl. Abb. 5). Der Mittelwert der zwei aufeinander folgenden realen F -Zeiger hat nun keinen Phasenfehler mehr! Der PAL-Fernseher merkt sich deswegen die U - und V -Werte (die Komponenten des F -Zeigers) der verschiedenen Bildpunkte einer Zeile und mittelt sie mit den Werten der darunter liegenden Bildpunkten aus der nächsten Zeile. Dadurch leiden sowohl Auflösung als auch Sättigung der Farbe etwas, aber in der Hinsicht ist das menschliche Auge deutlich weniger empfindlich als bei den durch Phasenfehlern bedingten Farbverschiebungen. Ähnliche Überlegungen gelten natürlich auch für den Fall, dass das reale Farbsignal dem Sollsignal hinterherläuft.

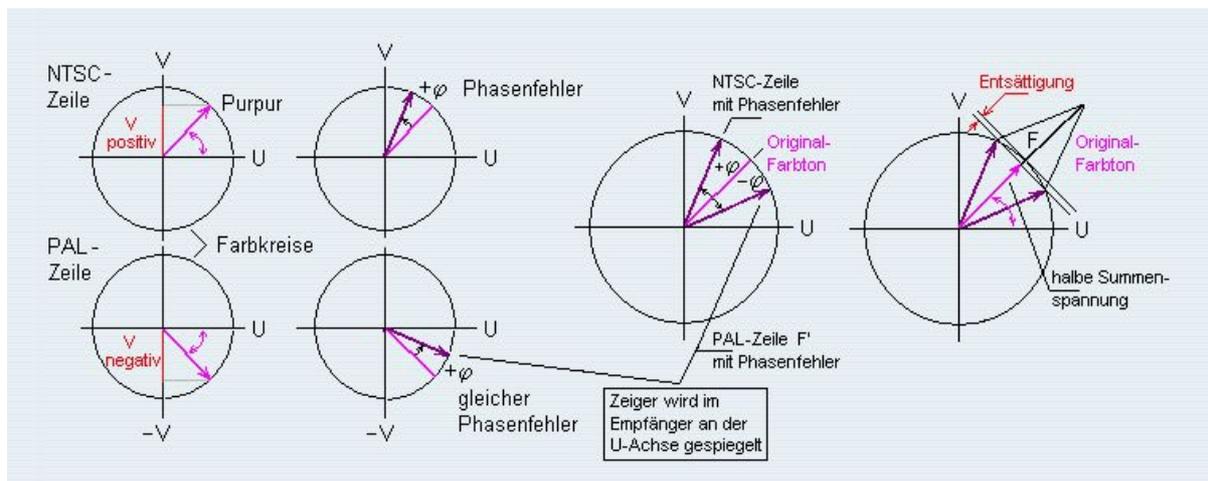


Abb. 5: Hier wird der Phasenfehler mit φ und nicht wie im Text mit $\Delta\varphi$ bezeichnet. (Nach www.elektroniktutor.de/techno/pal_ffs.html)

Das in Amerika verbreitete NTSC-Signal besitzt diese automatische Farbkorrektur nicht. Die Zeilen, welche ohne Invertierung übertragen werden, heißen in Abb. 5 deswegen NTSC-Zeilen.

Das Spektrum des PAL-Signals

Jedes BAS-Zeilensignal hat eine Länge von $64 \mu\text{s}$ (vgl. Abb. 1). Eine Folge von solchen Zeilensignalen kann als quasi-periodisches Signal mit der Periode $64 \mu\text{s}$ angesehen werden. Nach Fourier besitzt ein solches Signal ein quasi-diskretes Frequenzspektrum mit der Grundschnit-

gung mit $f_1 = \frac{1}{64 \mu\text{s}} = 15625 \text{ Hz}$ und den Oberschwingungen $f_k = k \cdot f_1$ mit $k = 2; 3; 4; \dots$. Weil das Zeilensignal i. A. eine sehr feine Struktur hat, hat unser Zeilensignal Beiträge von recht hohen Oberfrequenzen, etwa bis zur Ordnung $k = 350$. Damit können bis etwa 700 vertikale Streifen dargestellt werden. Ein typisches Spektrum hat ein kammartiges Aussehen wie in Abb. 6. Allerdings haben wir uns hier auf 5 Ordnungen beschränkt.

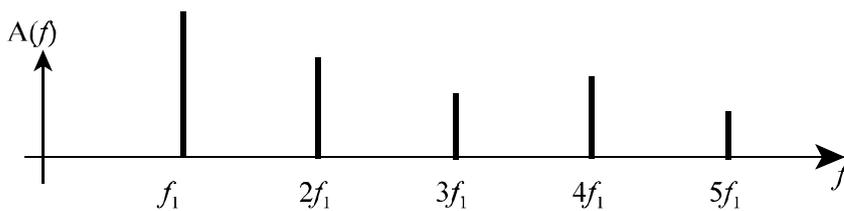


Abbildung 6

Auch die (niederfrequenten) Farbsignale U und V haben dieselbe Periodenlänge und dementsprechend ein vergleichbares Spektrum. Wenn die Trägerfrequenz f_T mit diesen Signalen moduliert werden, entstehen zwei Frequenzkämme, einer oberhalb von f_T , einer unterhalb von f_T . Um dies plausibel zu machen, betrachten wir zunächst ein Signal S mit der Frequenz f . Dieses Signal lässt sich durch $S(t) = \hat{s} \sin(\omega t)$ mit $\omega = 2\pi f$ beschreiben. Zur Vorbereitung der Amplitudenmodulation addieren wir ein konstantes Offset s_0 . Unser neues Signal ist nunmehr $S(t) = \hat{s} \sin(\omega t) + s_0$.

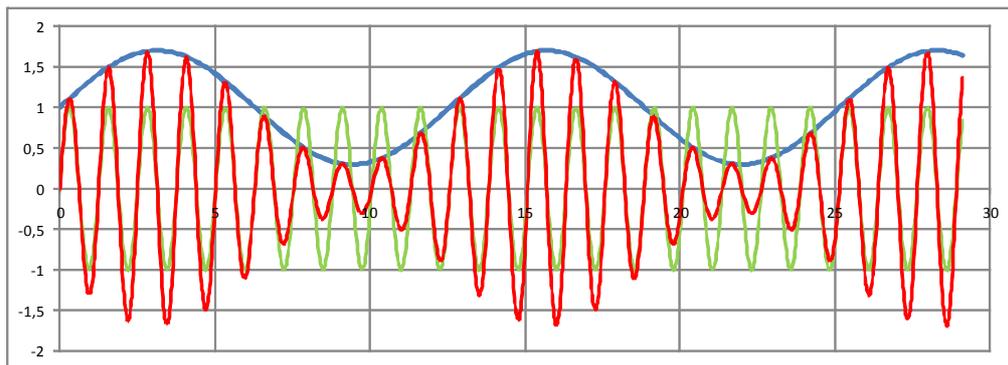


Abb. 7

Wird das Trägersignal $\sin(\omega_T t)$ mit dem S -Signal moduliert, erhalten wir ein Signal wie in Abb. 7, welches sich folgendermaßen formelmäßig darstellen lässt:

$$S_{AM}(t) = S(t) \cdot \sin(\omega_T t) = (\hat{s} \sin(\omega t) + s_0) \cdot \sin(\omega_T t)$$

Mit der Formel $\sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) = \frac{1}{2} (\sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta))$ ergibt sich daraus:

$$S_{AM}(t) = s_0 \sin(\omega_t t) + \frac{\hat{s}}{2} (\sin((\omega_t - \omega) \cdot t) + \sin((\omega_t + \omega) \cdot t)).$$

Das Spektrum zu diesem Signal ist in Abb. 8a wiedergegeben. Hat das modulierende Signal S weitere Oberschwingungen $\omega_2, \omega_3, \dots$, so erhält man das Spektrum aus Abb. 8b. Die Trägerfrequenz selbst enthält keine Bildinformation; deswegen wird sie unterdrückt. Auf diese Weise erhält man ein Spektrum wie in Abb. 8c.

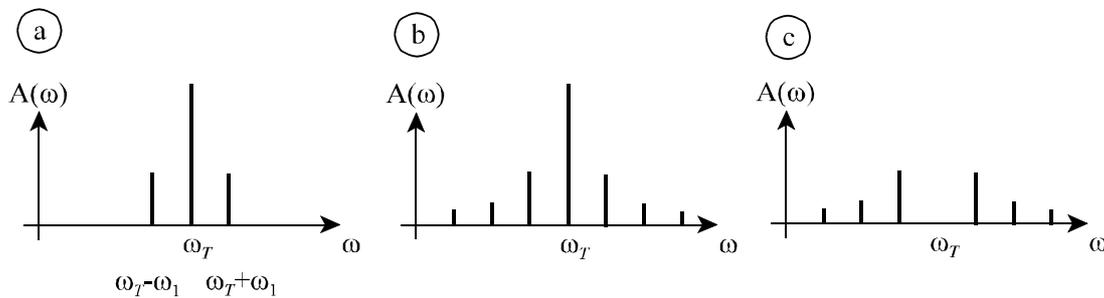


Abb. 8

Sowohl das BAS-Signal (Y) als auch das hochfrequenten Farbsignale U und V haben ein kammartiges Spektrum. Die permanente Umschaltung beim V -Signal wirkt wie eine zusätzliche Modulation mit halber Zeilenfrequenz. Die Abstände zwischen den einzelnen Kammzähnen sind in allen Fällen gleich (nämlich ω_1); der U -Kamm ist gegenüber dem V -Kamm um $\omega_1/2$ verschoben. Damit sich Y - und U - bzw. V -Signal nicht stören sorgt man dafür, dass U und V -Kamm so gegenüber dem Y -Kamm verschoben werden, dass die Maxima des Y -Kamms gerade genau zwischen zwei benachbarte Maxima der anderen beiden Kämmen fallen.

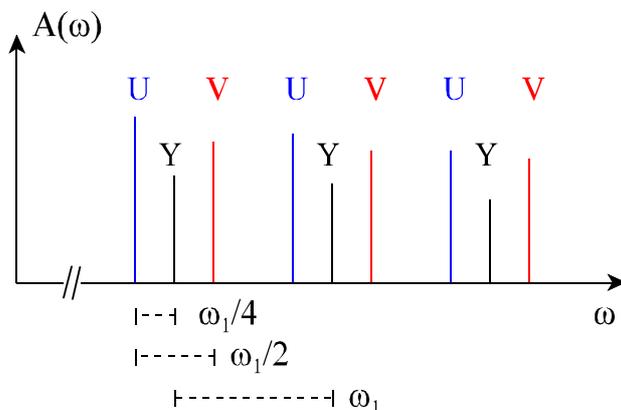


Abb. 9

Dies lässt sich erreichen, indem man ω_T als ganzzahliges Vielfaches von ω_1 wählt, vermindert um $\omega_1/4$. Bei PAL wählt man $n = 284$. Damit gilt für die Trägerfrequenz: $f_T = 283,75 \cdot 15625 \text{ Hz} = 4433593,75 \text{ Hz}$. Zu diesem Wert wird bei Pal im Rahmen eines Fine-Tunings noch 25 Hz addiert. Man gelangt dann zu dem weiter oben schon angegebenen Wert von $f_T = 4,43361875 \text{ MHz}$.