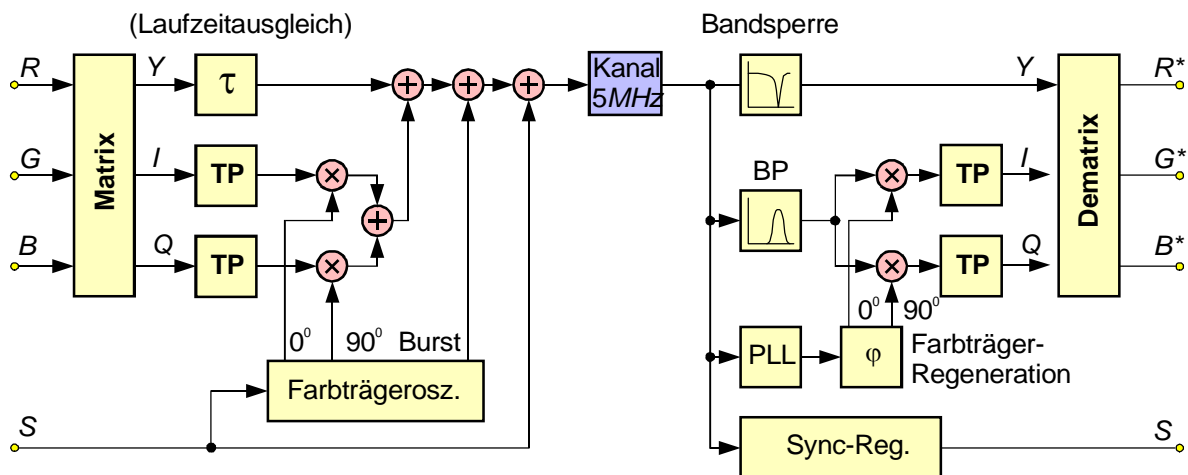


### 3. Farbcodierung

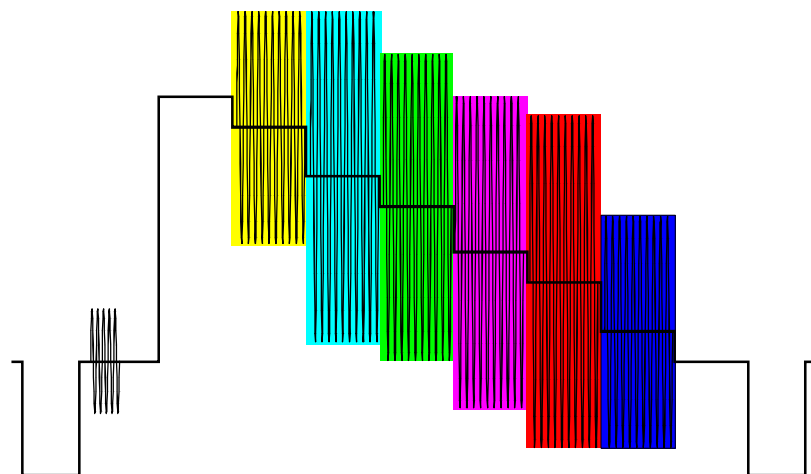
#### 3.1 NTSC

Eine etwas detailliertere Darstellung des NTSC-Verfahrens ist im folgenden Blockschaltbild des Coders (Sender) und Decoders (Empfänger) dargestellt. Insbesondere die Quadraturmodulation der beiden alternativen Chrominanzkomponenten  $I$  und  $Q$  auf eine gemeinsamen Farbräger mittels Synchronmodulation/-demodulation ist dabei zu erkennen. Weiterhin wird ein sogenannter Farbrägerburst, kurz Burst genannt, als unmodulierte Referenzpilotschwingung innerhalb der Austastlücke in das Signal addiert, die der Empfänger mittels Phasenregelstufe (PLL - Phase Locked Loop) zu einem phasengenauen Farbräger regeneriert, um eine Synchrondemodulation der Chrominanz zu gewährleisten. Weiterhin wird noch das normale Synchronsignal hinzugefügt, so dass schließlich ein FBAS (Farbe - Bild - Austattung - Sync) übertragen wird.

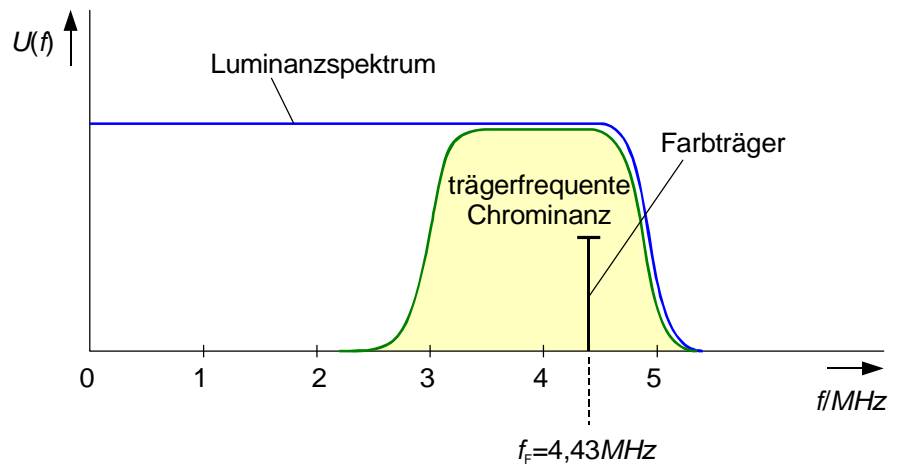
#### NTSC Coder und Decoder:



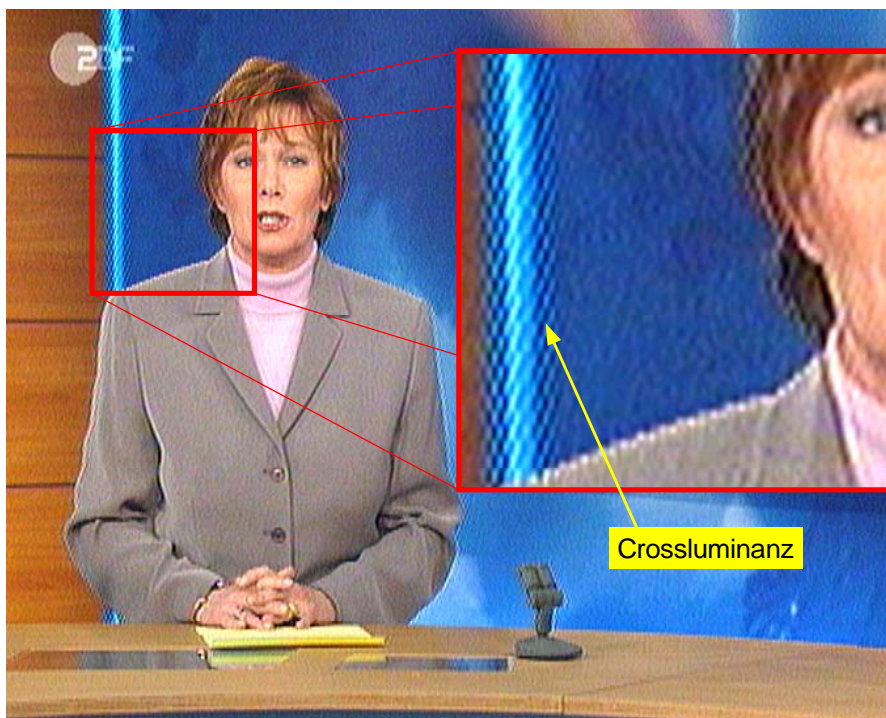
#### FBAS-Signal: (Farbbalken)



**FBAS-Spektrum:**



Der Farbräger, der zur Übertragung der Chrominanz notwendig ist, wirkt für die Luminanz als überlagerte Störung. Um die Sichtbarkeit dieser Schwingung im Bild möglichst gering zu halten, wurde die Farbrägerfrequenz möglichst hoch gewählt. Dies entspricht einer relativ feinen periodischen Musterung. Weiterhin wurde die Phasenlage des Farbrägers mit dem horizontalen Synchronsignal so verkoppelt, dass sich von Zeile zu Zeile der Farbräger in seiner Phase umkehrt. Daraus resultiert ein feines Schachbrettmuster als Farbrägerstörung, die auch Crossluminanz genannt wird (Übersprechen von Farbräger in die Luminanz). Durch das Kerbfilter im Empfänger wird zudem diese Störung in Flächen unterdrückt. Sie verbleibt nur an Farbkanten, da dort das Kerbfilter neu einschwingt, so dass dort eine Reststörung sichtbar ist. Dies ist im folgenden Bild deutlich zu sehen:



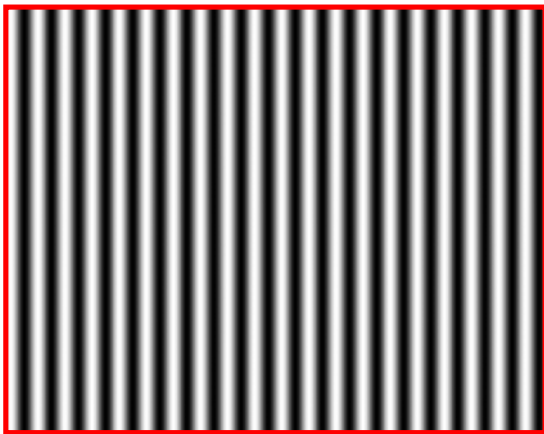
Vorteilhaft ist ferner, dass die Chrominanz und damit auch der Farbträger mit abnehmender Farbsättigung kleiner wird. Bei Schwarzweiß-Vorlagen oder in Grautonbereichen verschwindet der Farbträger vollständig und damit jegliche Crossluminanz.

Mathematisch lässt sich die genannte spezielle Farbträgerverkopplung als ungeradzahliges Vielfaches der halben Zeilenfrequenz angeben. Man nennt dies einen Halbzeilenoffset.

**Farbträgerverkopplung:**  $f_F = (2n - 1) \cdot \frac{f_H}{2} = \left(n - \frac{1}{2}\right) \cdot f_H$  (Halbzeilenoffset)

**Farbträgermuster:**

ohne Halbzeilenoffset ( $f_F = n \cdot f_H$ )



mit Halbzeilenoffset

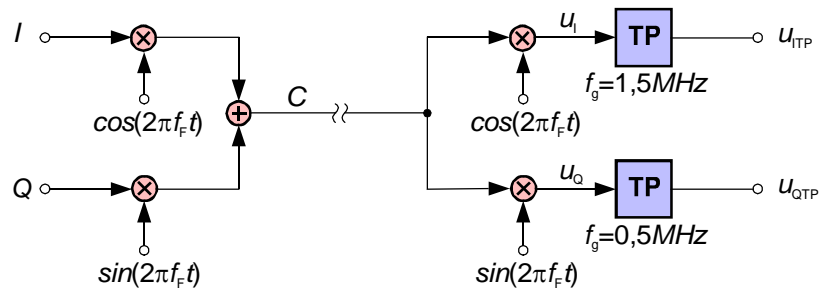


Während die in Amerika verwendete Farbträgerfrequenz bei  $3,5\text{MHz}$  liegt (bei  $60\text{Hz}$  Teilbildfrequenz und  $525$  Zeilen sowie nur  $4\text{MHz}$  Videobandbreite), läge der NTSC-Farbträger auf europäische Norm umgerechnet bei  $4,43\text{MHz}$  (für  $n=284$ ).

Die Übertragung der beiden Chrominanzkomponenten erfolgt in Quadraturmodulation, für die nur ein Träger -der Farbträger- benötigt wird. Der Grund für die Verwendung von  $I$  und  $Q$  anstelle von  $R-Y$  und  $B-Y$  wird später erläutert.

Diese spezielle Amplitudenmodulation lässt sich sehr einfach mit Multiplizierern realisieren, indem das erste Signal ( $I$ ) mit einem cosinusförmigen Träger multipliziert wird und das zweite ( $Q$ ) mit einem Sinus. Das Summensignal beider Produkte entspricht einer Quadratur-Amplitudenmodulation (QAM). Beide enthaltenen Signale  $I$  und  $Q$  können im Empfänger durch zwei sogenannte Synchrondemodulatoren wieder getrennt bzw. demoduliert werden. Diese Synchrondemodulatoren können ebenfalls durch Multiplizierer realisiert werden. Dabei wird entsprechend der Phasenlage des verwendeten sendeseitigen Trägers wieder mit cosinus- und sinusförmigem Farbträger multipliziert.

Unter Vernachlässigung der Addition des modulierten Farbträgers auf die Luminanz und dem im Empfänger erforderlichen Herausfiltern mittels Bandpass kann die Chrominanzmodulation und -demodulation folgendermaßen beschrieben werden:



Mathematisch lässt sich dann die QAM einfach nachvollziehen:

**Modulation:** 
$$C = I \cdot \cos(2\pi f_F t) + Q \cdot \sin(2\pi f_F t)$$

**I-Demodulation:** 
$$u_I = C \cdot \cos(2\pi f_F t) = I \cdot \cos^2(2\pi f_F t) + Q \cdot \sin(2\pi f_F t) \cdot \cos(2\pi f_F t)$$

$$u_I = I \cdot \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \cos(4\pi f_F t) \right\} + Q \cdot \frac{1}{2} \cdot \sin(4\pi f_F t)$$

bzw. hinter dem Tiefpass (doppelte Trägerfrequenz wird unterdrückt):

$$u_{ITP} = \frac{1}{2} \cdot I \sim I$$

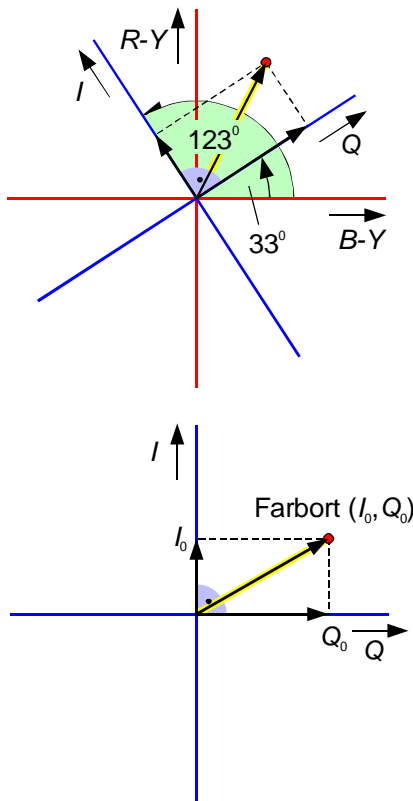
**Q-Demodulation:** 
$$u_Q = C \cdot \sin(2\pi f_F t) = I \cdot \cos(2\pi f_F t) \cdot \sin(2\pi f_F t) + Q \cdot \sin^2(2\pi f_F t)$$

$$u_Q = I \cdot \frac{1}{2} \cdot \sin(4\pi f_F t) + Q \cdot \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \cos(4\pi f_F t) \right\}$$

bzw. hinter dem Tiefpass (doppelte Trägerfrequenz wird unterdrückt):

$$u_{QTP} = \frac{1}{2} \cdot Q \sim Q$$

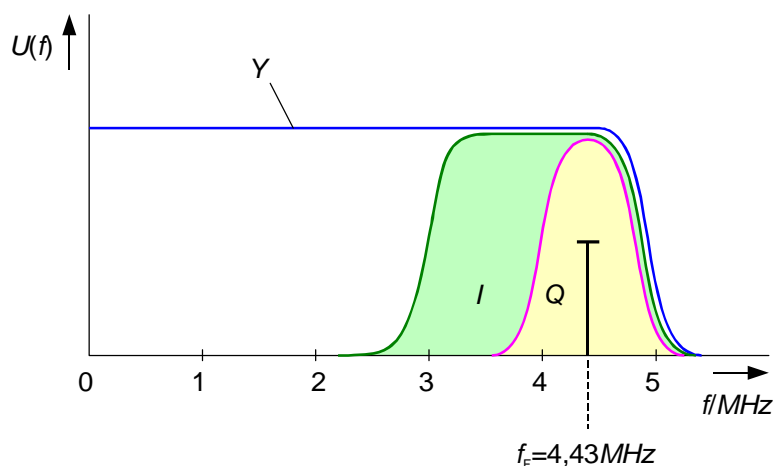
Die beschriebene Quadraturmodulation führt zu einem symmetrischen trägerfrequenten Spektrum um den Farbträger entsprechend der Bandbreite der Chrominanzkomponenten. Da aber bedingt durch die obere Bandgrenze des Videosignals bei  $5\text{MHz}$  diese Seitenbänder un-symmetrisch beschnitten werden, resultiert nur für Spektren im Bereich von  $\pm 0,5\text{MHz}$  um den Farbträger diese QAM-Bedingung. Da aber eine Chrominanzbandbreite von  $0,5\text{MHz}$  zu gering ist, musste eine spezielle Lösung gefunden werden.



Während die normalen Farbdifferenzsignale  $R-Y$  und  $B-Y$  aus subjektiven Gründen eine identische Bandbreite von ca.  $1,5\text{MHz}$  in Relation zu  $5\text{MHz}$  Luminanzbandbreite aufweisen sollten, gibt es zwei alternative Chrominanzkomponenten, für die das menschliche Auge unterschiedliche Auflösungen zulässt, ohne dass sich der Gesamtschärfeeindruck eines Farbbildes verschlechtert. Dies sind die beiden bereits genannten Komponenten  $I$  und  $Q$ . Sie lassen sich wie  $R-Y$  und  $B-Y$  aus  $RGB$ -Signalen matrixieren und entsprechen einem Koordinatensystem in der Farbebene, das um  $33^\circ$  gegen die  $R-Y / B-Y$ -Achsen gedreht ist.

Die subjektiv erforderliche Grenzfrequenz liegt hier bei  $1,5\text{MHz}$  für  $I$  und  $0,5\text{MHz}$  für  $Q$ . Dabei steht  $I$  für Inphasenkomponekte und  $Q$  für Quadraturkomponente - Bezeichnungen, wie sie bei einer Quadraturamplitudenmodulation (QAM) üblich sind.

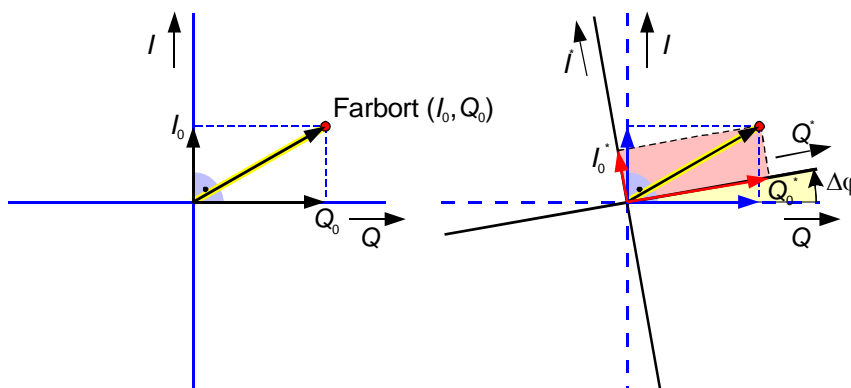
Für Chrominanzfrequenzen bis  $0,5\text{MHz}$  funktioniert eine QAM ohne Probleme. Eine Übertragung mit symmetrischem Trägerfrequenzspektrum ist sichergestellt.  $I$  und  $Q$  können fehlerfrei demoduliert und damit voneinander getrennt werden. Die  $I$ -Komponente kann nun allerdings den Farbträger breitbandiger modulieren. Das daraus resultierende un-symmetrische Trägerfrequenzspektrum entspricht oberhalb von  $0,5\text{MHz}$  einer Einseitenband-AM, bei die Modulationslehre aussagt, dass ein 100%iges Übersprechen in die Quadraturkomponente auftritt. Dieses Übersprechen liegt aber nur oberhalb von  $0,5\text{MHz}$  vor. Hier wird jedoch die demodulierte  $Q$ -Komponente durch ein geeignetes Tiefpassfilter bandbegrenzt. Damit wird der Übersprechan-teil unterdrückt.



Um eine fehlerfreie Demodulation der Chrominanz im Empfänger durchführen zu können, muss der unmodulierte Farbträger phasengenau verfügbar sein. Aus diesem Grund wird in der horizontalen Austastlücke eine kurze Referenzschwingung des senderseitig verwendeten Farbträgers in Form des sogenannten Farbträgerbursts mit übertragen, über den der Empfänger einen eigenen Quarzoszillator nachregelt und stabil an die richtige Phase anbindet (mittels einer Phasenregelschaltung „Phase Locked Loop“, abgekürzt **PLL**).

Hier tritt nun bei NTSC ein maßgebliches Problem auf. Durch unvermeidbare Nichtlinearitäten in der Übertragungskette eines Fernsehsignals -vorzugsweise in den Sendeendstufen- ergibt sich eine unterschiedliche Farbträger-Phasenbeeinflussung des FBAS-Signals in Abhängigkeit vom aktuellen Luminanzwert. Der Farbträgerburst, der um den Schwarzwert herum schwingt, wird also anders in der Phase beeinflusst als beispielsweise die Farbträgerschwingung, die einem Gelbfarbtone zuzuordnen ist, da hier der Luminanzwert bei deutlich höherer Spannung vorliegt (vgl. FBAS-Farbbalken-Testsignal).

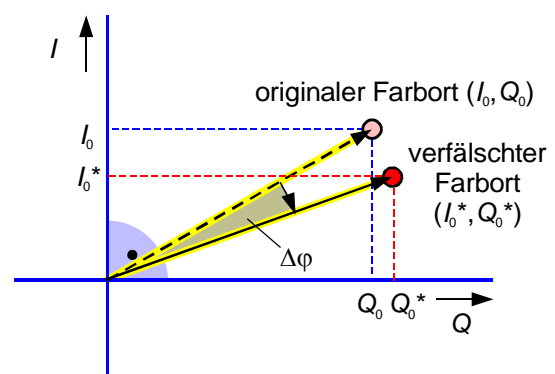
Läge nur eine pegelunabhängige Phasenbeeinflussung vor, wäre eine fehlerfreie Chrominanzdemodulation möglich, da die Phasenrelation zwischen Burst und Nutzfarbträger innerhalb der Zeile konstant erhalten bliebe. Da dies aber nicht sichergestellt ist, kommt es zu Phasenfehlern bei der Farbträgerregeneration. Daraus resultieren letztlich Farbtonverfälschungen im Bild.



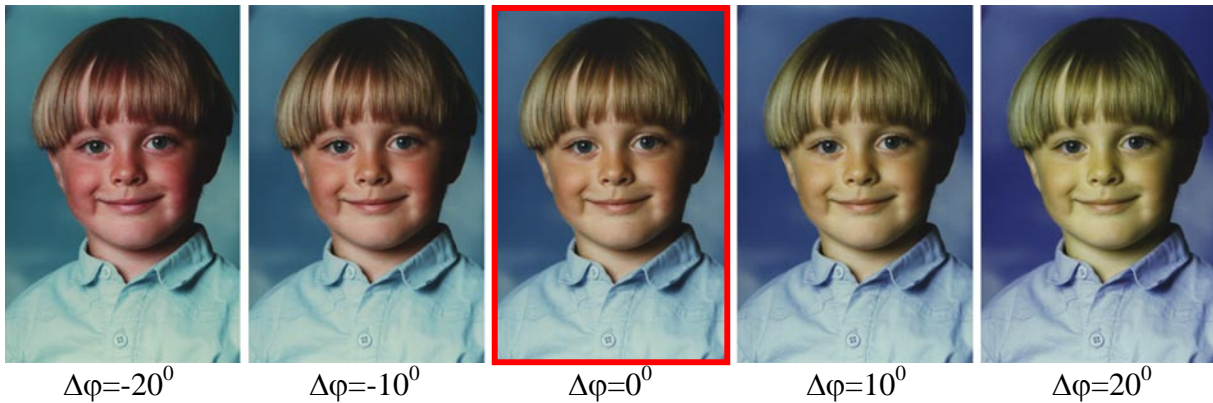
Die nebenstehende Darstellung zeigt, dass mit einem Phasenfehler von  $\Delta\varphi$  des regenerierten Farbträgers ein Farbort durch ein um genau diese Phase verdrehtes Koordinatensystem  $I^*, Q^*$  beschrieben wird.

Nimmt man das verdrehte Koordinatensystem  $I^*, Q^*$  als Bezug, kann man sehen, dass der erkannte Farbort auf der Farbebene verdreht erkannt wird. Das entspricht einem Farbtonfehler bei unverändertem Sättigungswert.

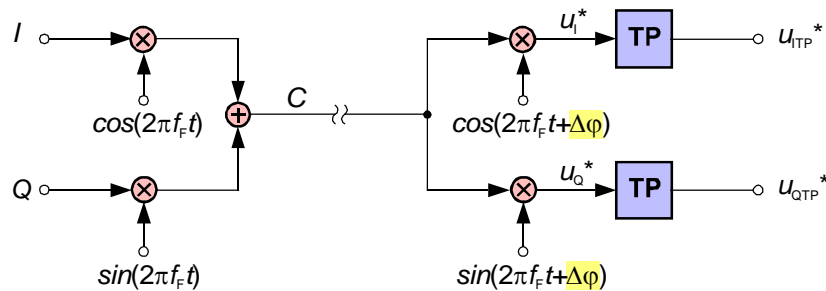
Die Auswirkung von Phasenfehlern durch die genannten nichtlinearen Einflüsse bei der Fernsehsignalübertragung in Form von Farbtonveränderungen sind besonders in wiedergegebenen Hauttönen kritisch. Während die Farbnuancen von grünem Ra-



sen, roten Früchten oder blauem Himmel relativ breit gestreut in natürlichen Szenen auftreten können, sind Gesichtsfarben sehr eng toleriert und vor allem absolut aus der Erfahrung des Betrachters her bekannt.



Die mathematische Beschreibung der Chrominanzdemodulation mit Fehlerphase  $\Delta\varphi$  lässt sich an folgendem Modell darstellen:



**Modulation:**  $C = I \cdot \cos(2\pi f_F t) + Q \cdot \sin(2\pi f_F t)$

**I-Demodulation:**  $u_I^* = C \cdot \cos(2\pi f_F t + \Delta\varphi)$   
 $= I \cdot \cos(2\pi f_F t) \cdot \cos(2\pi f_F t + \Delta\varphi) + Q \cdot \sin(2\pi f_F t) \cdot \cos(2\pi f_F t + \Delta\varphi)$

$$u_I^* = I \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cos(\Delta\varphi) + \frac{1}{2} \cdot \cos(4\pi f_F t + \Delta\varphi) \right\} + \dots$$

$$\dots + Q \cdot \left\{ \frac{1}{2} \sin(-\Delta\varphi) + \frac{1}{2} \cdot \sin(4\pi f_F t + \Delta\varphi) \right\}$$

bzw. hinter dem Tiefpass (doppelte Trägerfrequenz wird unterdrückt):

$$u_{TP}^* = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \cos(\Delta\varphi) - \frac{1}{2} \cdot Q \cdot \sin(\Delta\varphi) \quad (\text{Übersprechen aus } Q)$$

**Q-Demodulation:**

$$\begin{aligned}
 u_Q^* &= C \cdot \sin(2\pi f_F t + \Delta\varphi) \\
 &= I \cdot \cos(2\pi f_F t) \cdot \sin(2\pi f_F t + \Delta\varphi) + Q \cdot \sin(2\pi f_F t) \cdot \sin(2\pi f_F t + \Delta\varphi) \\
 u_Q^* &= I \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot \sin(\Delta\varphi) + \frac{1}{2} \cdot \sin(4\pi f_F t + \Delta\varphi) \right\} + \dots \\
 &\quad \dots + Q \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot \cos(\Delta\varphi) - \frac{1}{2} \cdot \cos(4\pi f_F t + \Delta\varphi) \right\}
 \end{aligned}$$

bzw. hinter dem Tiefpass (doppelte Trägerfrequenz wird unterdrückt):

$$u_{QTP}^* = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot \cos(\Delta\varphi) + \frac{1}{2} \cdot I \cdot \sin(\Delta\varphi) \quad (\text{Übersprechen aus } I)$$

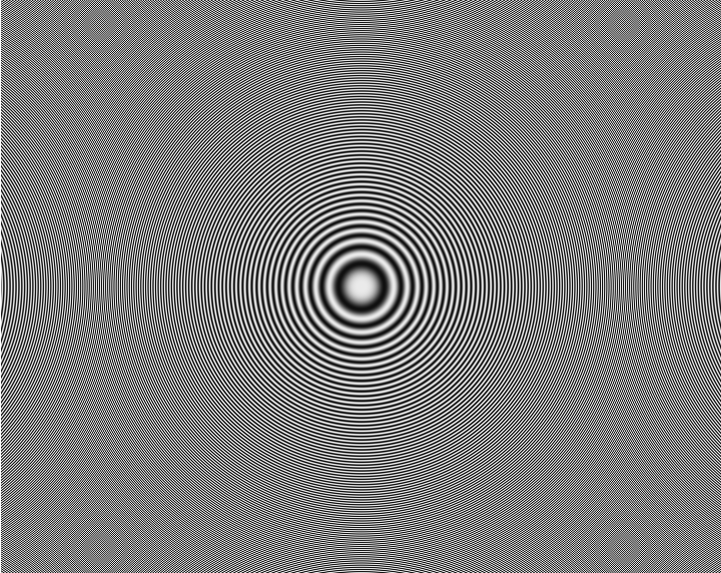
Während die Farbtonverfälschung durch nichtlineare Einflüsse auf die Farbträgerphase ein typisches NTSC-Problem darstellt, das in Europa durch die Entwicklung von den alternativen Systemen PAL und SECAM gelöst werden konnte, bleiben für alle analogen farbträgerbasierenden Farbcodierverfahren zwei grundsätzliche Fehler sichtbar:

**Crossluminanz**      Übersprechen der trägerfrequenten Chrominanz in die Luminanz (bereits dargestellt). Durch das einfache Addieren des modulierten Farbträgers in die Luminanz ergibt sich ein Störmuster im Bild. Durch ein Kerbfilter im Luminanzkanal des Empfängers reduziert sich diese Störung auf Farbkanten (Ein- bzw. Umschwingen des Kerbfilters). Je geringer die Farbsättigung, desto geringer die Farbträgeramplitude und um so kleiner die Sichtbarkeit von Crossluminanz. In Grautonbereichen (unbunt) ist kein Übersprechen mehr sichtbar, da dort die Farbträgeramplitude Null ist.

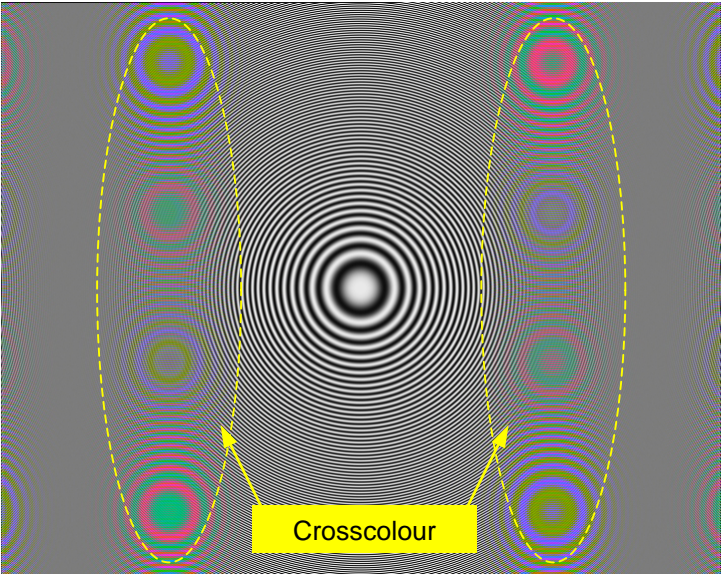
**Crosscolour**      Übersprechen hochfrequenter Luminanz in die Chrominanz. Tritt auf, wenn feine schwarzweiße Strichraster (hochfrequente Luminanz) im spektralen Bereich des Farbträgers liegen. Diese Signale passieren den Chrominanzbandpass des Empfängers und werden als Chrominanz interpretiert. Es ergeben sich im Bereich dieser feinen Strichraster gröber strukturierte farbig schillernde Störüberlagerungen.

**Entstehung von Crosscolour am Beispiel eines Kreistestbildes:**

**Original-Testbild**



**Wiedergegebenes Testbild**



### 3.2 SECAM

Aufgrund der Unzulänglichkeiten von NTSC in Form von Farbtonverfälschungen durch Phasenfehler im Übertragungsweg suchte man in Europa nach einer alternativen Möglichkeit der Farbcodierung. In Frankreich verfolgte Henry de France die Idee, die Chrominanz in Frequenzmodulation einem Farbträger aufzomodulieren, so dass jegliche fehlerhaften Phaseneinflüsse ohne Auswirkungen bleiben mussten. Da anders als bei QAM auf einem Träger nur *ein* Signal in Frequenzmodulation übertragen werden kann, wurden die beiden vorhandenen Chrominanzsignale *R-Y* und *B-Y* zeilensequentiell nacheinander auf den Farbträger moduliert und übertragen. Als Besonderheit musste dazu der Empfänger einen Zeilenspeicher enthalten, um beide Chrominanzkomponenten gleichzeitig darstellen zu können. Daraus leitet sich auch der Name des Systems ab: **SECAM** (**S**équentielle **c**ouleur **a**vec **m**émoire - sequentielle Farbe mit Speicher), Entwicklungsjahr 1957.

Bei der Entwicklung von SECAM musste man jedoch im Detail mit sehr vielen anderen Problemen kämpfen, die die Frequenzmodulation mit sich brachte. Dies betraf vor allen Dingen den zunächst unzureichenden Störabstand der Chrominanz, da mit relativ kleinem Frequenzhub gearbeitet werden musste. Der Grund liegt darin, dass der Farbträger nur  $0,5\text{MHz}$  unterhalb der Grenzfrequenz des FBAS-Signals liegt, daher konnte der Frequenzhub also bestenfalls zu  $0,5\text{MHz}$  gewählt werden. Normalerweise nutzt man FM zur Störabstandsverbesserung. Dies funktioniert allerdings unter der Bedingung, dass der Frequenzhub i.a. deutlich größer als die Bandbreite des Modulationssignals gewählt wird (siehe UKW-Rundfunk:  $75\text{kHz}$  Hub zu  $15\text{kHz}$  Signalbandbreite). Im vorliegenden Fall liegt aber der Hub mit  $0,5\text{MHz}$  in Relation zu  $1,5\text{MHz}$  Chrominanzbandbreite genau entgegengesetzt. Aus Linearitätsgründen war man sogar gezwungen, den Frequenzhub auf  $0,25\text{MHz}$  zu reduzieren, was die Störabstandsproblematik weiter verschärfte.

Der zweite kritische Punkt war die Sichtbarkeit des frequenzmodulierten Farbträgers, also die Crossluminanz, die natürlich im Vergleich zu NTSC nicht störender in Erscheinung treten sollte. Während bei NTSC die Farbträgeramplitude und eine damit mögliche Crossluminanz nur proportional der Farbsättigung vorliegt, ist der SECAM-Farbträger grundsätzlich auch bei unbunten Bildinhalten mit voller Amplitude vorhanden.

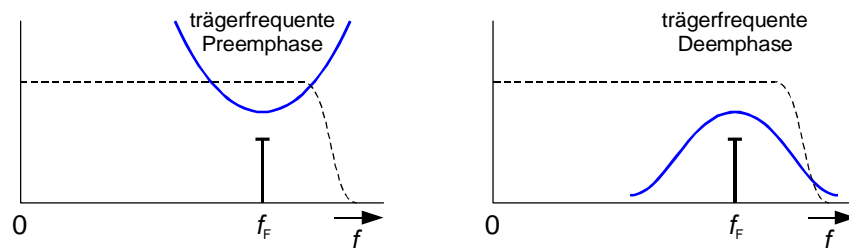
Folgende Entwicklungsstufen mussten durchlaufen werden, um die Probleme Chrominanzstörabstand und Crossluminanz so zu lösen, dass der subjektive Bildeindruck nicht schlechter ist als beim vorhandenen NTSC-System, allerdings unter Vermeidung der Farbtonfehler:

**SECAM I:** Hub bei  $0,25\text{MHz}$ , daher schlechter Störabstand in der Chrominanz.  
Farbträger musste in der Amplitude reduziert werden, um die Crossluminanz in Grenzen zu halten. Das wiederum verschlechterte nochmals den Chrominanzstörabstand.

**SECAM II**

Es wurde eine trägerfrequente Pre-/Deemphase um den Farbträger herum verwendet. Der Farbträger liegt dabei in seiner Ruhefrequenz (unbunt) mit kleinerer Amplitude vor, bei zunehmender Frequenzabweichung wird seine Amplitude größer (Frequenzganganhebung proportional zur Frequenzdifferenz zum Farbträger).

Im Empfänger wird ein gegenläufiges Filter verwendet, das mit zunehmender Frequenzdifferenz zum Farbträger dämpft. Es hat eine glockenförmige Bandpasscharakteristik und wird daher Cloche-Filter genannt.

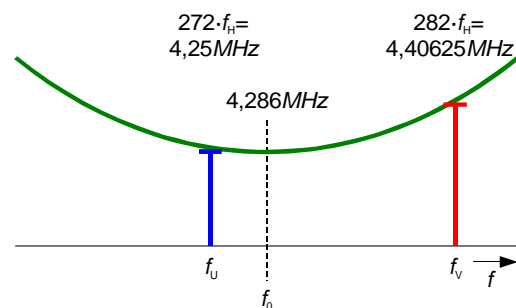


**SECAM IIIa**

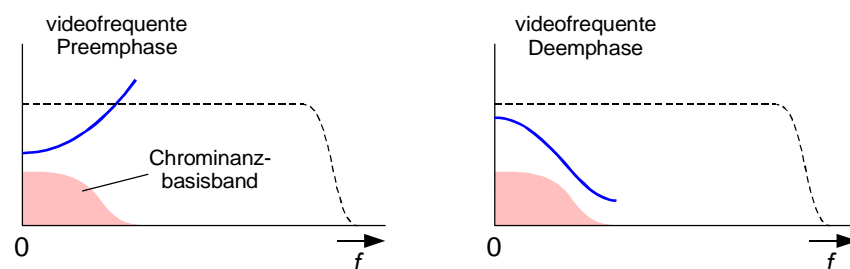
Die Mittenfrequenz von Pre- und Deemphase wurde von der Farbträgerfrequenz  $f_F$  für unbunt (Chrominanz Null) zu einer Frequenzlage verschoben, die durch die statistisch häufigste Chrominanz bestimmt ist. Dadurch konnte die Farbträgeramplitude und damit Crossluminanzstörung statistisch weiter reduziert werden.

**SECAM IIIb**

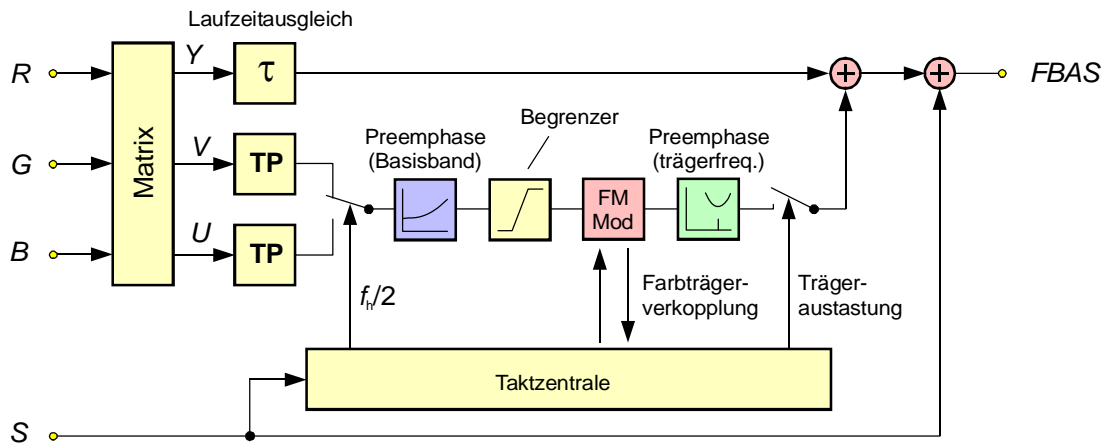
Diese endgültige Version, auch SECAM IIIopt genannt, nutzt letztlich zwei unterschiedliche Farbträgerlagen  $f_U$  für  $B-Y$  und  $f_V$  für  $R-Y$  zeitsequentiell nacheinander, um die Crossluminanz in der Sichtbarkeit weiter zu verwischen (siehe auch Detailschaltung weiter unten).



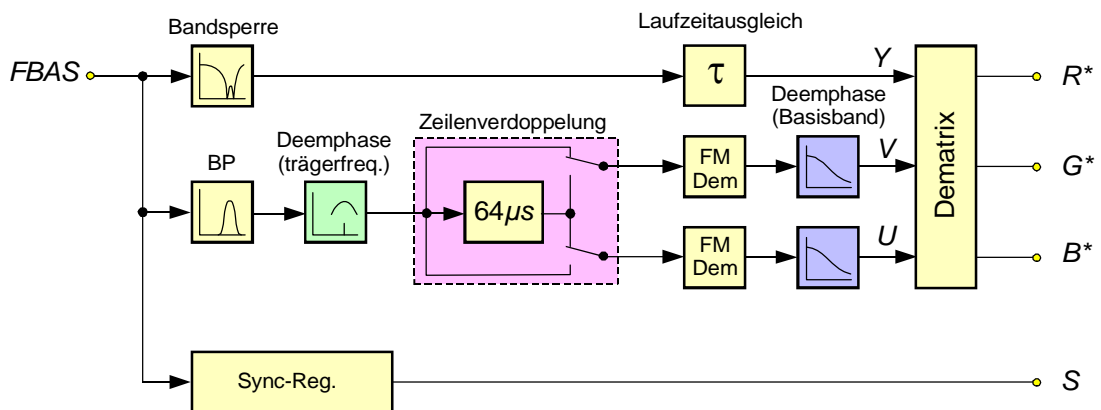
Außerdem wurde noch eine videofrequente Pre- und Deemphase eingefügt, also eine Frequenzganganhebung vor dem FM-Modulator im Coder bzw. ein gegenläufiger Tiefpassfrequenzgang hinter dem FM-Demodulator im Empfänger.



**Blockschaltbild SECAM-Coder:**

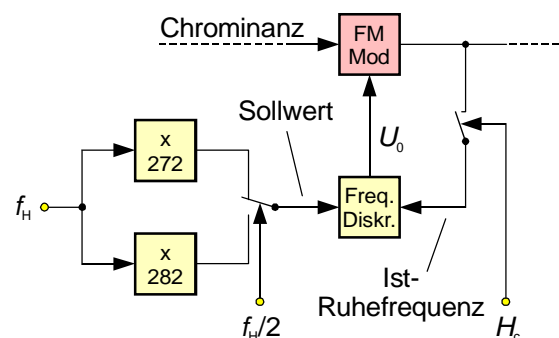


**Blockschaltbild SECAM-Decoder:**



**Detailschaltung zur Farbträgerfrequenz:**

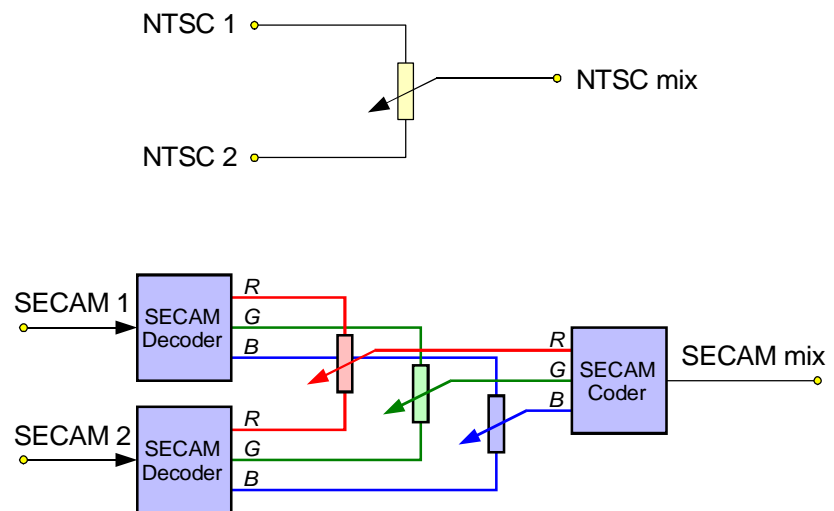
Die beiden Ruhefrequenzen für  $B-Y$  und  $R-Y$  werden zeilenverkoppelt mit  $272 \cdot f_H$  bzw.  $282 \cdot f_H$  dargestellt. Ein Frequenzdiskriminator vergleicht die jeweilige Ruhefrequenz mit dem Sollwert. Über den Impuls  $H_c$  wird dazu im Bereich der Austastlücke (Chrominanz Null) der vorliegende Farbträger auf den Frequenzdiskriminator (Vergleicher) gelegt und eine Steuerspannung  $U_0$  zum Nachstimmen der Ruhefrequenz an den FM-Modulator gegeben.



## Grundsätzliche Eigenschaften von SECAM

**Vorteil:** keinerlei Farbtonverfälschungen oder andere nachteilige Effekte durch Phasenfehler

**Nachteil:** keine Überblendung von SECAM-Signalen möglich, da der frequenzmodulierte Farbträger sich nicht linear überblenden lässt. Die einzige Lösung besteht in der Decodierung von SECAM nach *RGB* oder *YUV*, einer dreikanaligen Überblendung und anschließender Remodulation bzw. Codierung nach SECAM. Bei NTSC ist eine direkte Überblendung zweier FBAS-Signale möglich, da sich die beiden enthaltenen Farbträger vektoriell zur Mischfarbe (Chrominanz) mitteln.



Ein weiterer -allerdings unbedeutender- Nachteil ist die reduzierte vertikale Chrominanzauflösung durch die zeilensequentielle Übertragung von *U* und *V*.

Crosscolour und Crossluminanz sind unverändert vorhanden und in ihrer Störwirkung vergleichbar zu NTSC.

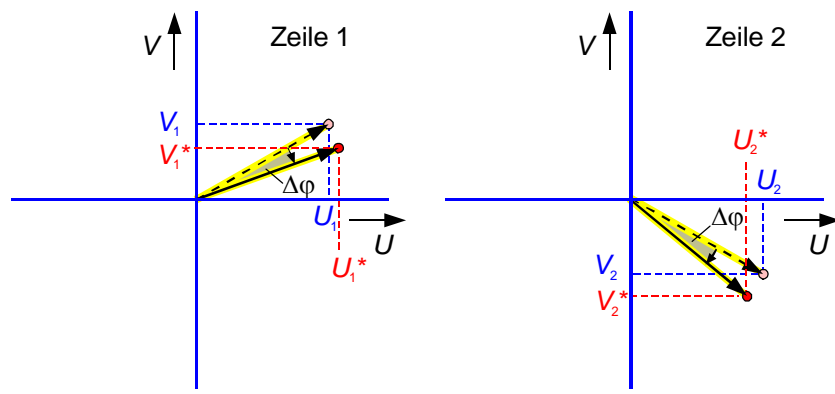
### 3.3 PAL

Die Unzulänglichkeiten des NTSC-Systems in Bezug auf die Farbtonfehler bei nichtlinearen Übertragungsfehlern in der Phase waren der Grund für weitergehende Überlegungen in Europa. Neben der in Frankreich vorangetriebenen Entwicklung einer Farbcodiersystems auf Basis eine frequenzmodulierten Farbträgers (SECAM) wurde in Deutschland das NTSC-System an der entscheidenden Stelle so modifiziert, dass sich ein in der Übertragung vorhandener Phasenfehler nicht mehr auf den wiedergegebenen Farbton auswirken konnte. Der Nachteil von SECAM in Bezug auf das Mischen zweier FBAS-Signale sollte vermieden werden.

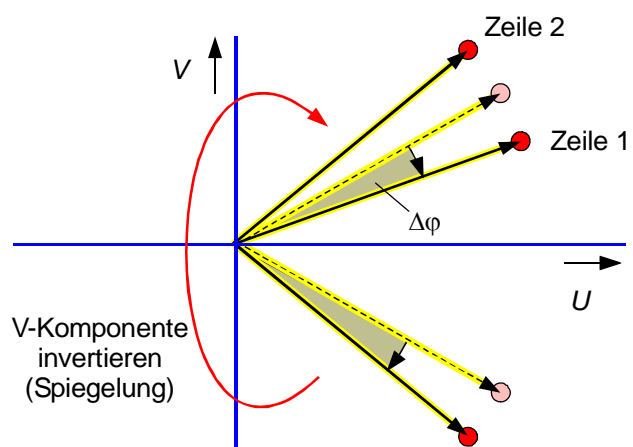
Die Grundidee, auf die der Erfinder Prof. Bruch (Telefunken) stieß, lag in der einfachen zeilensequentiellen Invertierung der  $R$ - $Y$  Komponente (auch  $V$ -Komponente) coderseitig. Dies muss im Empfänger angepasst ebenfalls wieder in jeder zweiten Zeile durch eine weitere Invertierung rückgängig gemacht werden. Dadurch wirkt sich ein Phasenfehler in zwei benachbarten Zeilen gegenläufig aus, so dass sich im Mittel über zwei Zeilen eine Kompensation ergibt.

#### Zeilensequentielles Invertieren der $V$ -Komponente

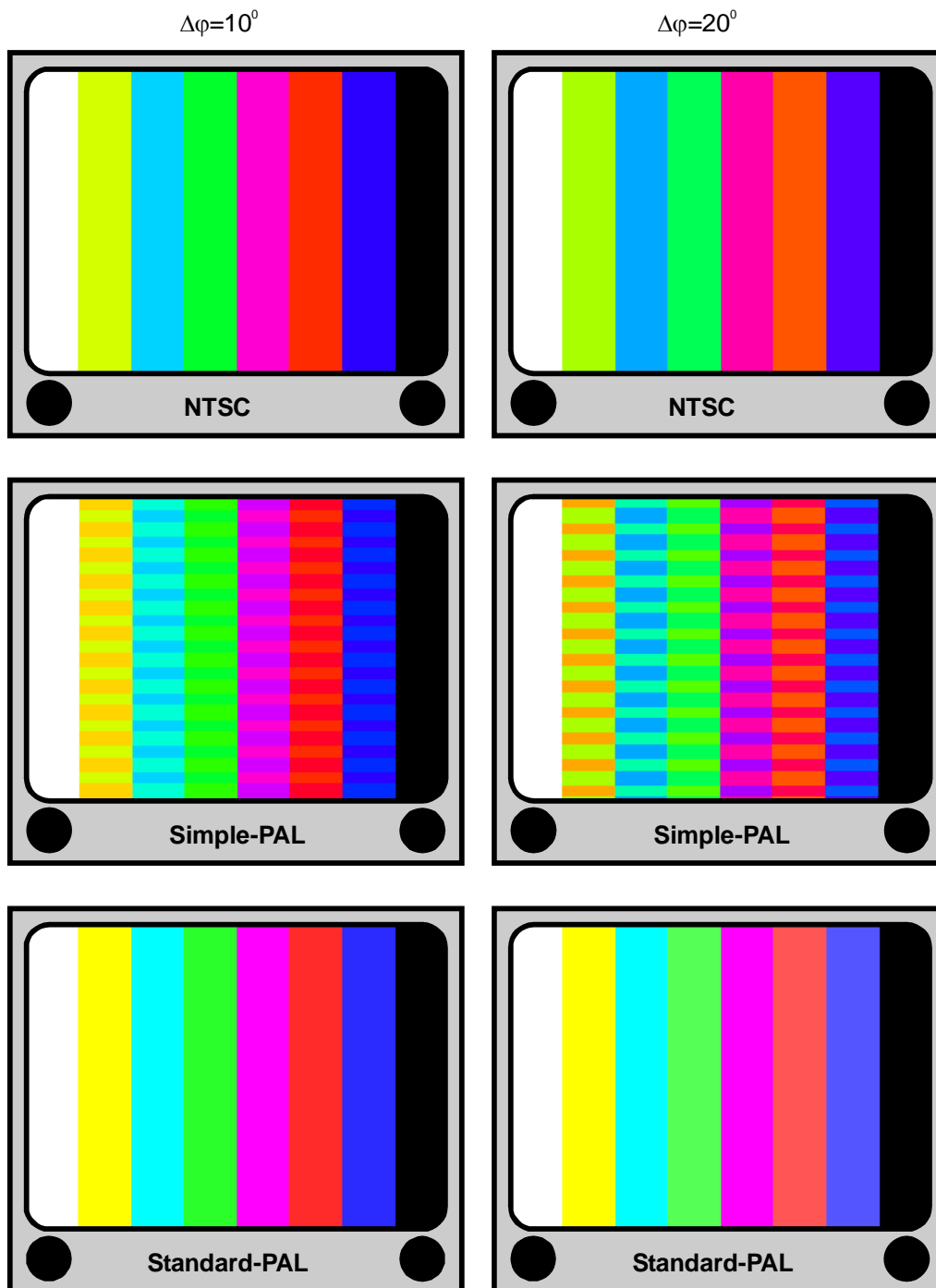
Definition:  
 $V = R - Y$   
 $U = B - Y$



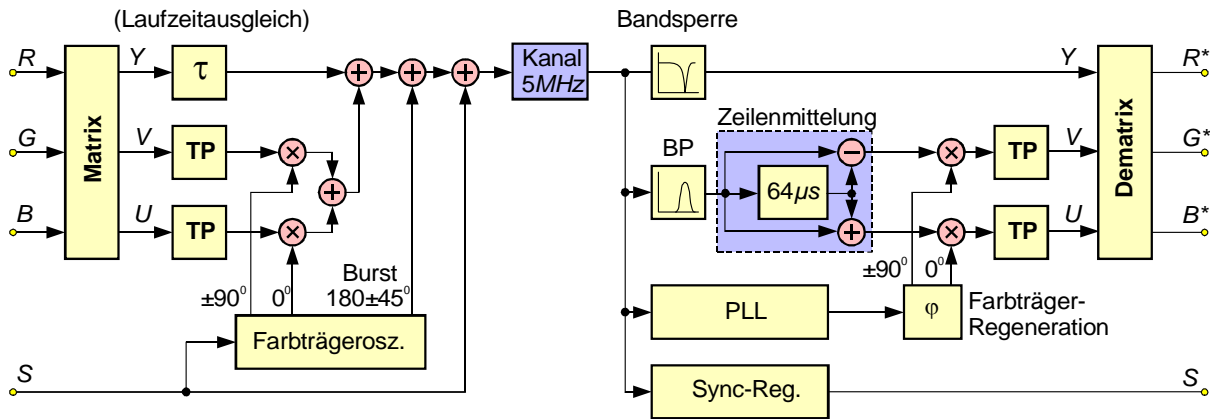
#### Kompensation des Farbtonfehlers



Da benachbarte Zeilen in der V-Komponente abwechselnd invertiert/nichtinvertiert gesendet wurden, also um  $180^\circ$  phasenalternierend, erhielt das Farbcodiersystem als Namen die Abkürzung PAL (Phase Alternation Line). Zwei benachbarte Zeilen mitteln also den Farbtonfehler heraus. Anfangs überließ man diese Mittelung dem Auge, das die benachbarten Zeilen mit gegenläufigem Farbtonfehler optisch ausintegrieren musste. Dieses als Simple-PAL bezeichnete Verfahren wurde jedoch zugunsten einer Lösung mit elektronischer Mittelung über zwei Zeilen weiterentwickelt, so dass keine störende Zeilenstruktur zurückblieb.



Der PAL-Coder und -Decoder lassen sich als Erweiterung zum NTSC-System folgendermaßen darstellen:



Im Coder werden nicht mehr  $I$  und  $Q$  als Chrominanz verarbeitet, sondern die normalen Chrominanzsignale  $V=R-Y$  und  $U=B-Y$ . Dies ist bei PAL deshalb möglich, weil durch das zeilensequentielle Invertieren von  $V$  das Übersprechen zwischen den beiden Chrominanzanteilen um den Farbträger herum eliminiert wird. Die QAM weist hier zwar das gleiche Problem auf wie bei NTSC, jedoch ist das Übersprechen wegen der  $V$ -Umschaltung von Zeile zu Zeile gegenphasig und mittelt sich vergleichbar dem Phasenfehler des Farbträgers heraus.

Anstelle die  $V$ -Komponente zeilensequentiell zu invertieren, wird üblicherweise im PAL-Coder der Farbträger um insgesamt  $180^\circ$  geschaltet. In Referenz zum Farbträger für  $U$  ( $0^\circ$ ) entspricht das einer Modulation von  $V$  mit  $\pm 90^\circ$  Farbträgerphase. Der Burst wird um seine Ruhelage ( $180^\circ$ ) ebenfalls zeilensequentiell um  $\pm 45^\circ$  variiert, was als Kennung der aktuellen  $V$ -Schaltphase dient.

Im PAL-Decoder erfolgt die Chrominanzdemodulation unter Nutzung der eben genannten Burstmodulation mit den zugehörigen Farbträgerphasen  $\pm 90^\circ$  für  $V$  und  $0^\circ$  für  $U$ . Die Zeilenmittelung erfolgt dabei mit einer Zeilenverzögerung um  $64 \mu s$  und zusätzlichem Addierer und Subtrahierer noch vor der Chrominanzdemodulation (PAL-Laufzeit-Decoder). Auf das Funktionsprinzip wird später noch genauer eingegangen.

Die Festlegung der exakten Farbträgerfrequenz in Relation zur Zeilenfrequenz muss gegenüber NTSC bei PAL modifiziert werden. Dies liegt an der zeilensequentiellen Schaltphase des Farbträgers für Bildinhalte mit hauptsächlich  $V$ -Anteilen, z.B. in Rotflächen. Dies ist schematisch in folgender Grafik zu erkennen, in der das resultierende Farbträgermuster (Crossluminanz) basierend auf dem NTSC-Halbzeilenoffset sowohl für die  $U$ -Komponente (z.B. Blaufläche) als auch für die  $V$ -Komponente (z.B. Rotfläche) dargestellt ist. Zur einfacheren Beschreibung wird ein Fernsehbild mit 7 Zeilen zugrunde gelegt.

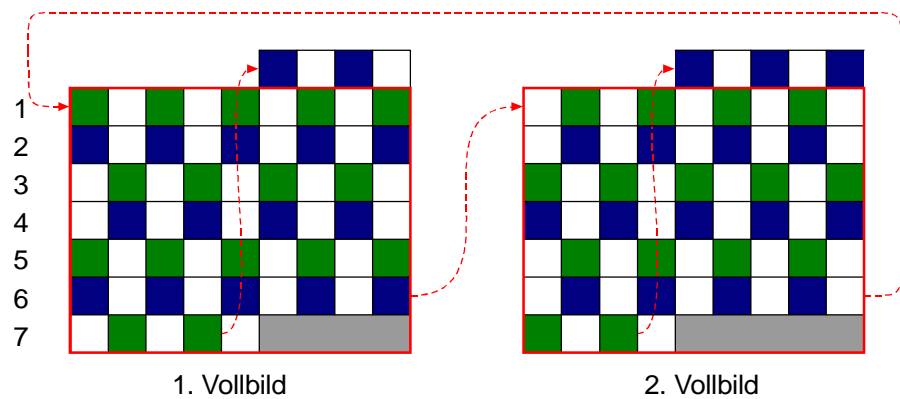
**Halbzeilenoffset für PAL**

Zeilenzahl:  $z=7$

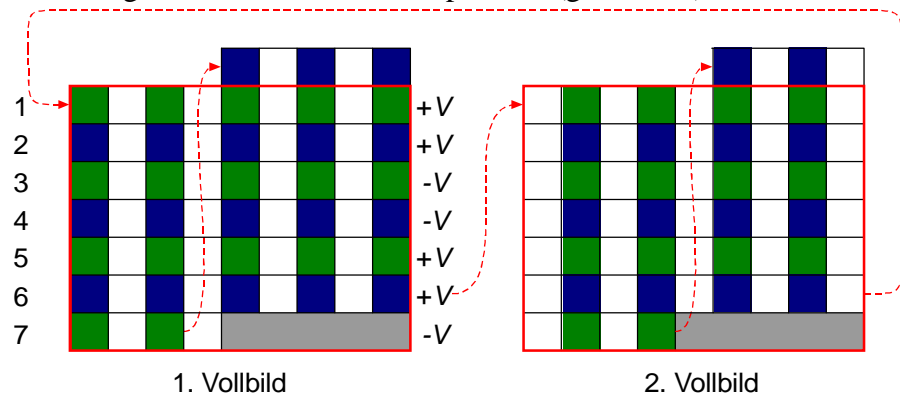
Verkopplung:  $f_F = (n - \frac{1}{2}) \cdot f_H$  mit  $n=5$

(entspricht 4,5 Schwingungen pro Zeile)

Farbträgermuster für die U-Komponente (nicht geschaltet)



Farbträgermuster für die V-Komponente (geschaltet)



Durch die V-Schaltphase wird das Schachbrettmuster des Halbzeilenoffsets in eine deutlich störendere vertikale Streifenstruktur gewandelt.

*Hinweis:*

*Reihenfolge beim Schreiben der Zeilen 1 - 3 - 5 - 7 (1. Teilbild),  
2 - 4 - 6 (2. Teilbild).*

Um für den Farbräger der *V*-Komponente ein Offsetmuster zu erhalten, würde für *U* ein vertikales Streifenmuster resultieren. Als Kompromiss wird daher der Viertelzeilenoffset für die exakte Farbrägerverkopplung mit der Horizontalfrequenz verwendet, der sowohl für *U* als auch für *V* ein versetztes Crossluminanzmuster liefert, das subjektiv nicht so stört wie ein vertikales Streifenmuster.

**Viertelzeilenoffset für PAL**

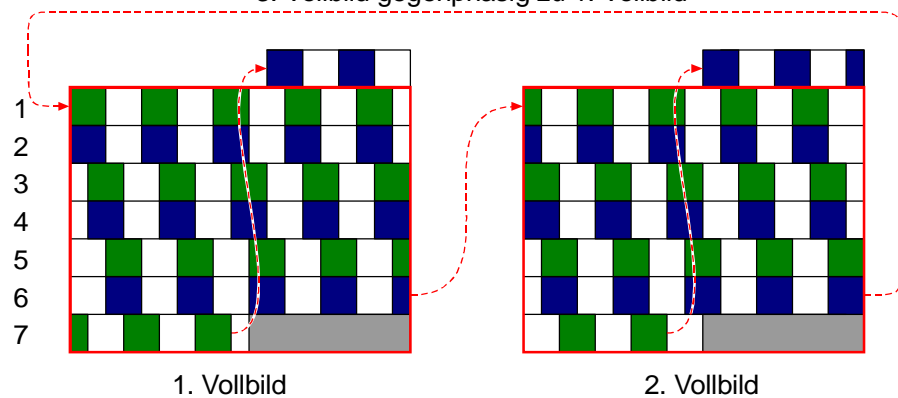
Zeilenzahl:  $z=7$

Verkopplung:  $f_F = (n - \frac{1}{4}) \cdot f_H$  mit  $n=5$

(entspricht 4,75 Schwingungen pro Zeile)

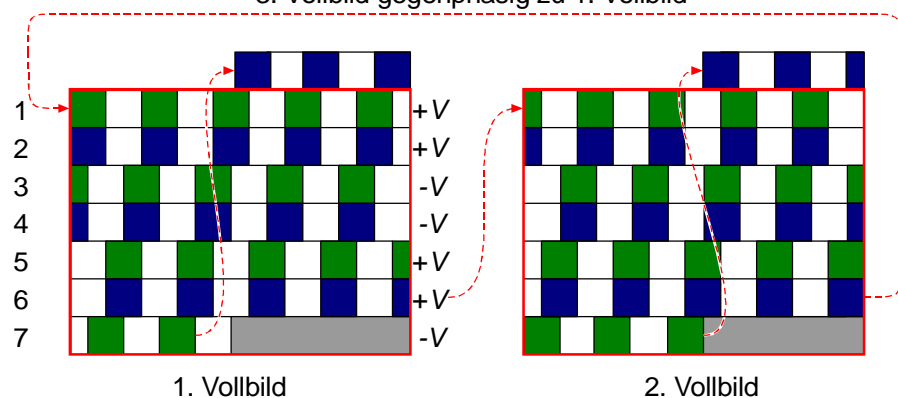
Farbträgermuster für die *U*-Komponente (nicht geschaltet)

3. Vollbild gegenphasig zu 1. Vollbild



Farbträgermuster für die *V*-Komponente (geschaltet)

3. Vollbild gegenphasig zu 1. Vollbild



Da das 3. Vollbild ein gegenphasiges Farbträgermuster zum 1. Vollbild aufweist, ergibt sich erst nach insgesamt 4 Vollbildern bzw. 8 Teilbildern wieder die ursprüngliche Phasenlage. Man nennt dies daher **Achtersequenz**.

Um die Sichtbarkeit von Crossluminanz weiter zu minimieren, wird der Farbträger zusätzlich in seiner Frequenz um 25Hz erhöht (25Hz-Versatz). Daraus resultiert eine zusätzliche Bewegung des Farbträgermusters, das ohnehin nur an Farbkantengängen sichtbar ist. In farbigen Flächen unterdrückt das Kerbfilter im Luminanzkanal des Empfängers den Farbträger ohnehin vollständig.

**Exakte Farbträgerfrequenz:**  $f_F = (n - \frac{1}{4}) \cdot f_H + 25Hz$

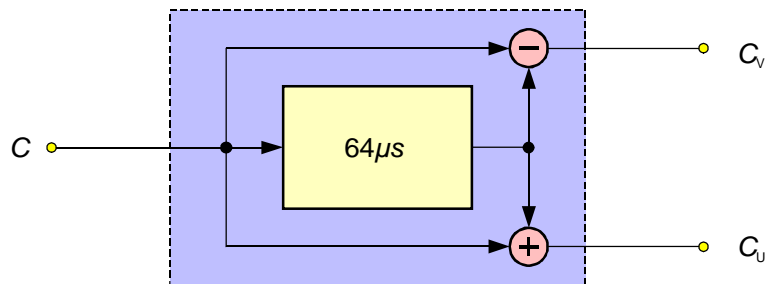
ergibt mit  $n=284$  schließlich

$$f_F = 283,75 \cdot 15,625kHz + 25Hz$$

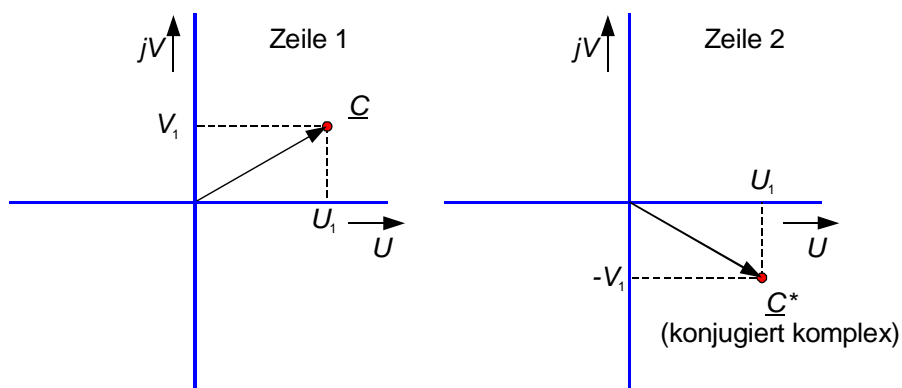
$$= 4,433.618.75MHz$$

Abschließend ist noch die Funktion des PAL-Laufzeit-Decoders zu beschreiben, der neben der elektronischen Mittelung der Chrominanz benachbarter Zeilen auch gleichzeitig vorab eine Trennung von trägerfrequenter  $U$  und  $V$ -Komponente bewirkt.

**Laufzeit-Decoder:**

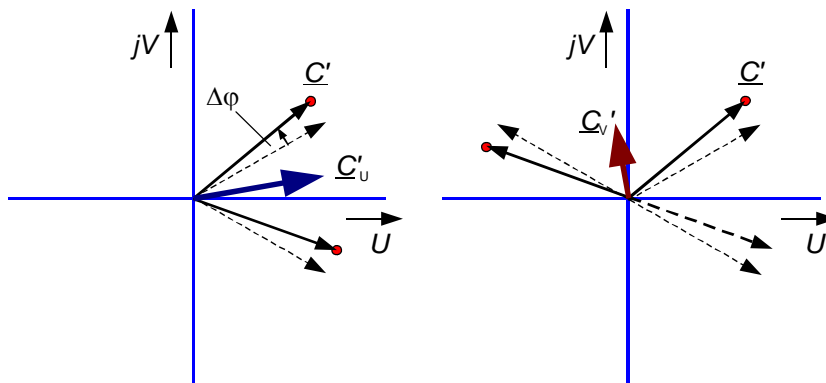
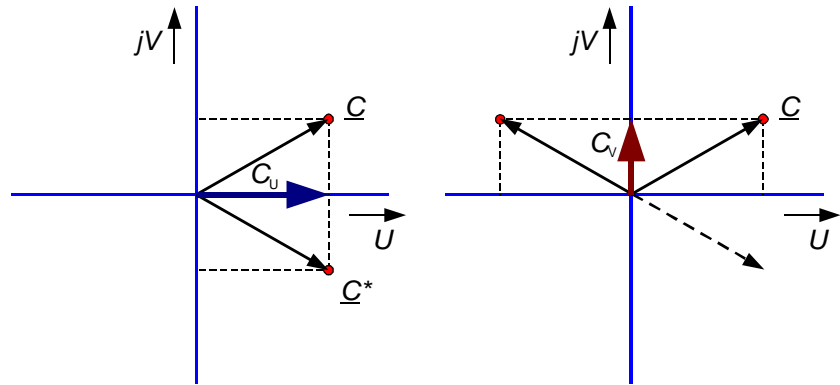


Die Funktion des Laufzeit-Decoders ergibt sich am anschaulichsten aus einer vektoriellen Betrachtung des Farbträgers. Das entspricht auch der Beschreibung mit komplexen Zeigern, wobei  $U$  dem Realteil und  $V$  dem Imaginärteil gleichzusetzen ist.



**Summen- und Differenzsignale am Laufzeit-Decoder:**

In der komplexen Beschreibung stehen die Zeiger mit ihrer Länge und Orientierung für Amplitude und Phase der zugeordneten Schwingung, hier also der Farbtägerschwingung.  $C_U$  entspricht also immer noch einer trägerfrequenten Schwingung, aber ausschließlich von  $U$  moduliert und in Phasenlage  $0^\circ$ .  $C_V$  ist ausschließlich von  $V$  moduliert und liegt in Phasenlage  $90^\circ$  des Farbtägers vor. Die Demodulation hiervon erfolgt mittels Multiplizierer und Tiefpass (vgl. PAL-Coder/Decoder Blockschaltbild).



Für den Fall einer Fehlerphase  $\Delta\phi$  führt die Schaltung in der komplexen Ebene auf entsprechend verdrehte Zeiger für  $\underline{C}$  und  $\underline{C}^*$ . Die nachfolgende Synchrondemodulation liefert die Projektion auf die  $U$ - bzw.  $V$ -Achse.

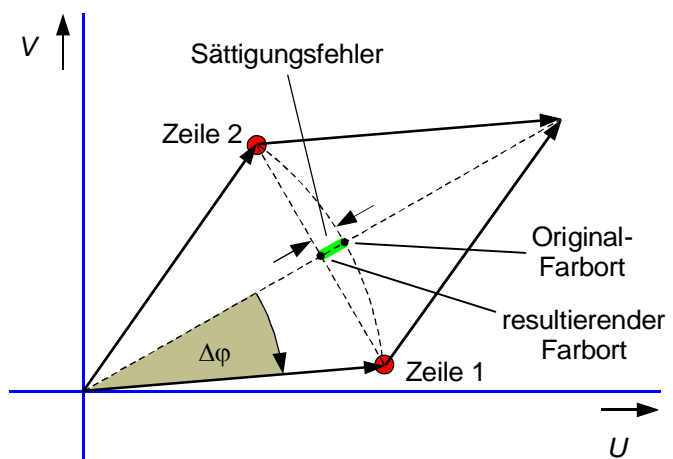
**Mathematische Beschreibung:**

$$\underline{C}' = \underline{C} \cdot e^{j\Delta\phi}$$

$$\underline{C}'_U = C_U \cdot e^{j\Delta\phi} \quad \text{bzw.} \quad \underline{C}'_V = j \cdot C_V \cdot e^{j\Delta\phi}$$

**Resultierender Effekt:**

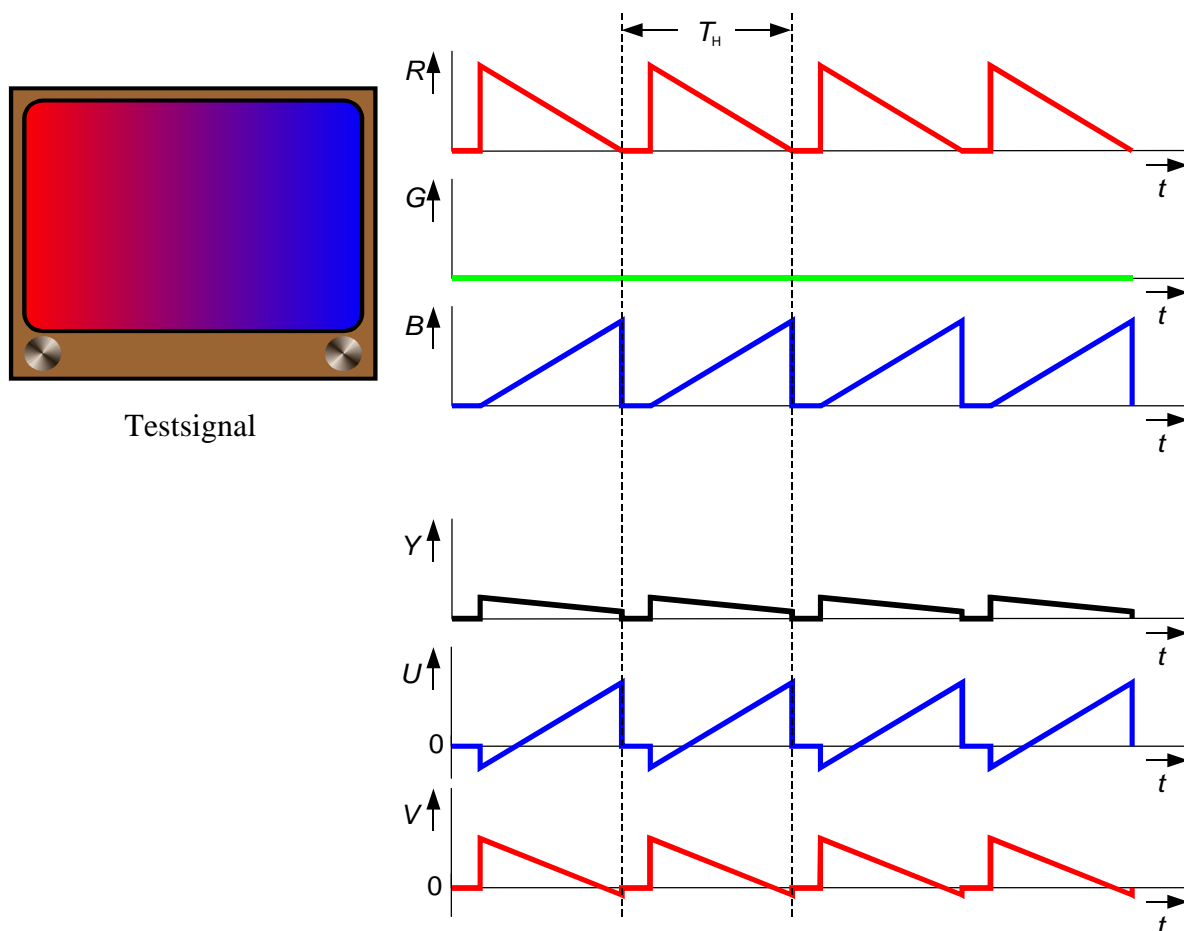
Die Auswirkung eines Phasenfehlers, der bei NTSC zu einem Farbtonfehlers führt, wird bei PAL in einen Farbsättigungsfehler überführt. Dies ist in der subjektiven Wahrnehmung praktisch nicht mehr störend.



### Spektrum des FBAS-Signals (Luminanz-Chrominanz-Verkämmung)

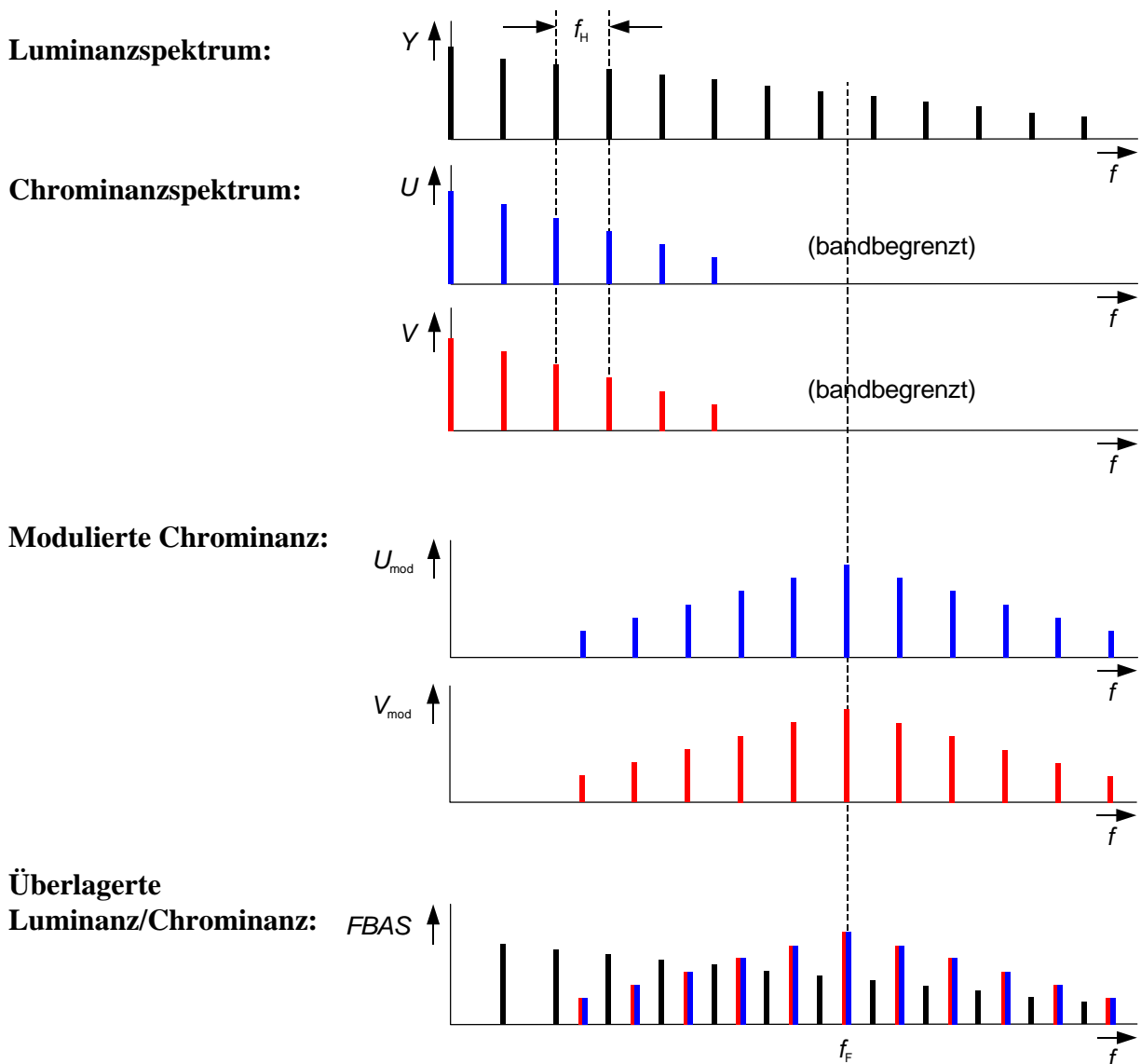
Bei PAL ergibt sich durch die Überlagerung von Luminanz und trägerfrequenter Chrominanz ein gegenseitiges Übersprechen, das als Crossluminanz und Crosscolour bezeichnet wird und das bei SECAM und NTSC in gleicher Weise auftritt. Während der Farbträger bei SECAM durch die Frequenzmodulation je nach Amplitude in  $U$  oder  $V$  beliebige momentane Phasen- und Frequenzzustände innerhalb des Chrominanzbandes einnimmt, ergibt sich durch die QAM des Farbträgers bei NTSC und PAL ein deutlich strukturierteres Spektrum, das auch am Crossluminanzmuster im Ortsbereich erkennbar ist (vgl. S.41 und 42).

Besonders einfache Bedingungen zur Abschätzung des Spektrums eines FBAS-Signals erhält man, wenn von einem Bildinhalt ausgeht, der sich in vertikaler Richtung nicht ändert. Damit ist das Signal in jeder Zeile gleich. Im folgenden sei ein Rot/Blau-Verlauf angenommen:



Es ist zu erkennen, dass sowohl die RGB-Signale als auch YUV-Signale streng periodisch mit dem Zeilenintervall  $T_H$  vorliegen, wenn einmal von der vertikalen Austastlücke abgesehen wird. Das zugehörige Spektrum für Luminanz und Chrominanz muss also linienförmig (diskret) sein mit der Zeilenfrequenz  $f_H$  als Grundwelle und den entsprechenden Vielfachen davon als Harmonische. Die Einhüllende über diese Linien beschreibt das normale Videospektrum, das sich bei der Luminanz bis  $5MHz$  erstreckt und bei der Chrominanz bei etwa  $1,5MHz$  endet. Im folgenden sei zunächst NTSC und ein Halbzeilenoffset zugrunde gelegt, die Farbträgerfrequenz entspricht also  $(2n-1) \cdot f_H/2$  bzw.  $(n-1/2) \cdot f_H$ :

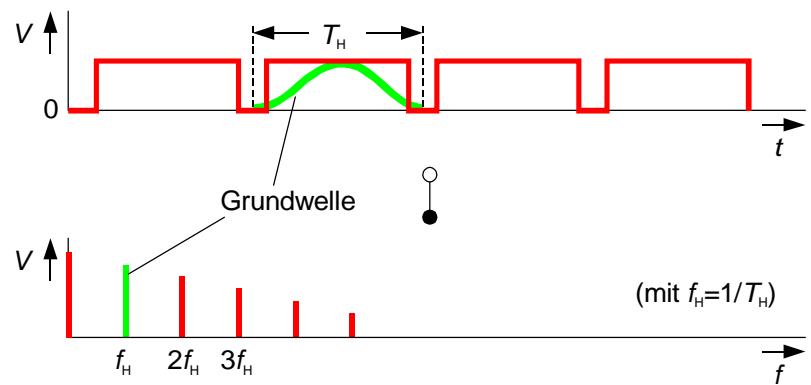
**Spektren für NTSC-Signal mit Halbzeilenoffset:**



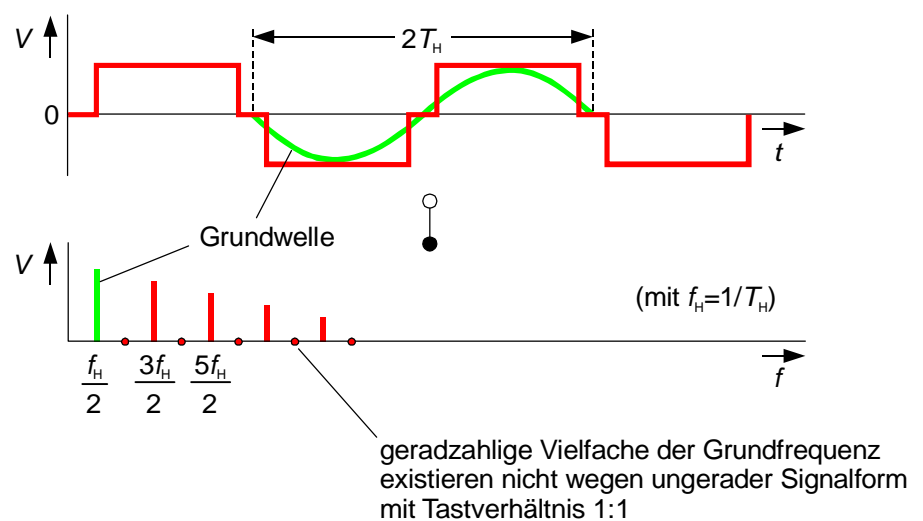
Die modulierte Chrominanz fügt sich symmetrisch um den Träger in das Luminanzband so ein, dass sich die Spektrallinien verkammen. Beim Halbzeilenoffset liegen die trägerfrequenten Chrominanzlinien also exakt in der Mitte zwischen den Luminanzlinien. Diese Verkammung kann man mit speziellen sogenannten Kammfiltern rückgängig machen. Sie werden später genauer dargestellt.

Für ein PAL-Signal sind die Bedingungen durch die V-Schaltphase und den Viertelzeilenoffset des Farbträgers mit  $(4n-1) \cdot f_H/4$  bzw.  $(n-1/4) \cdot f_H$  etwas anders. Zunächst ergibt sich das Spektrum für das zeilensequentiell invertierte V-Signal in modifizierter Form (Beispiel für eine Rotflache mit konstanter V-Amplitude über einer Zeile):

V-Komponente nicht geschaltet:

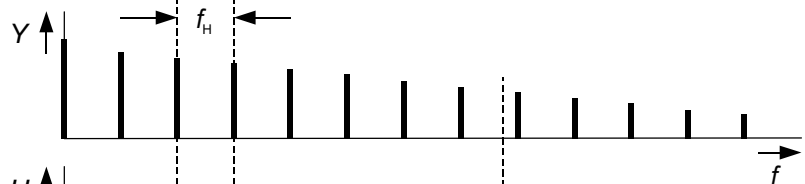


V-Komponente geschaltet:

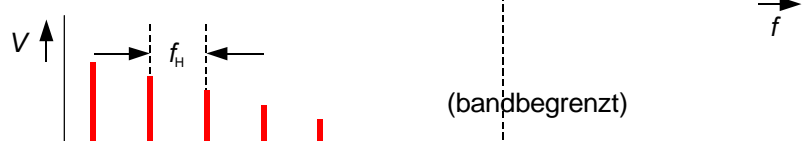
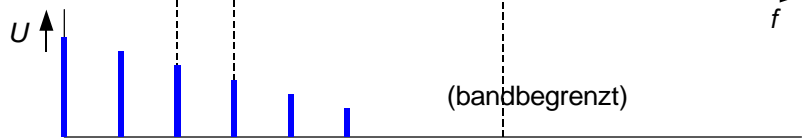


**Spektren für PAL-Signal mit Viertelzeilenoffset:**

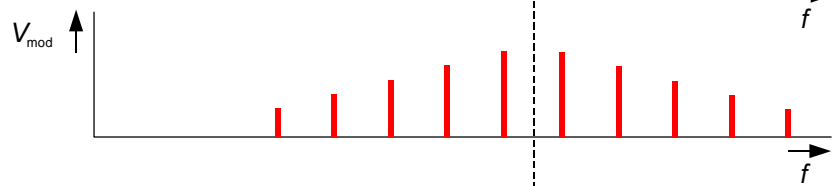
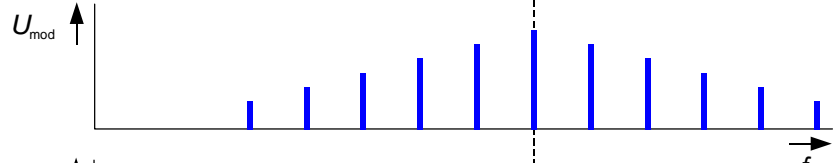
**Luminanzspektrum:**



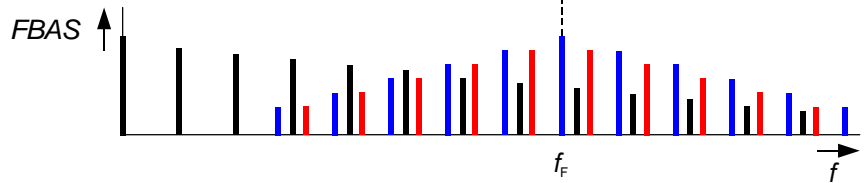
**Chrominanzspektrum:**



**Modulierte Chrominanz:**



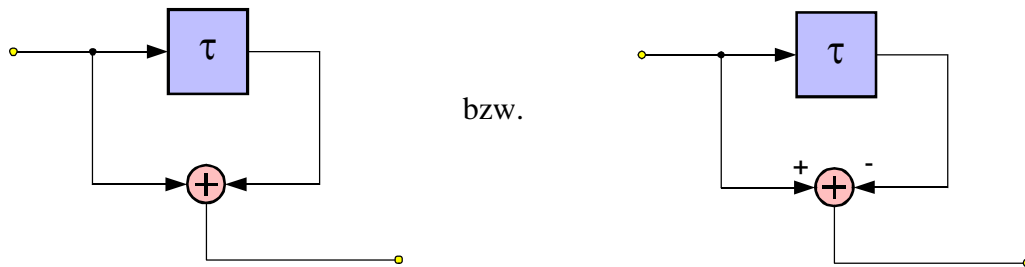
**Überlagerte Luminanz/Chrominanz:**



Die Chrominanzkomponenten verkämmen sich durch den Viertelzeilenoffset so mit den Luminanzlinien, dass sich einerseits  $U$  und  $V$  nicht aufeinander abbilden und zudem im Abstand  $\pm f_H/4$  neben den Luminanzlinien auftreten.

Da die Luminanz- und Chrominanzspektren verkämmt auftreten und nicht einfach additiv überlagert sind, ist eine Trennung mit speziellen Kammfiltern möglich, die einen periodischen Frequenzgang mit abwechselnden Durchlass- und Sperrbereichen aufweisen.

**Aufbau eines Kammfilters allgemein:**



**Impulsantwort allgemein:**

$$h(t) = \delta(t) + \delta(t - \tau) \quad \text{bzw.} \quad h(t) = \delta(t) - \delta(t - \tau)$$



**Übertragungsfunktion:**

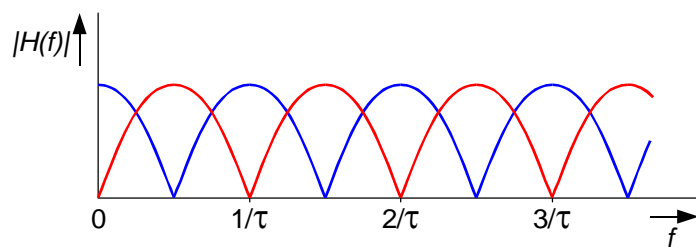
$$H(f) = 1 + e^{-j2\pi f\tau} = \{e^{+j\pi f\tau} + e^{-j\pi f\tau}\} \cdot e^{-j\pi f\tau}$$

$$= 2 \cdot \cos(\pi f\tau) \cdot e^{-j\pi f\tau}$$

bzw.

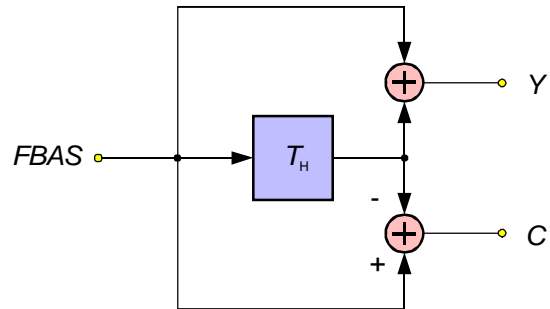
$$H(f) = 1 - e^{-j2\pi f\tau} = \{e^{+j\pi f\tau} - e^{-j\pi f\tau}\} \cdot e^{-j\pi f\tau}$$

$$= 2j \cdot \sin(\pi f\tau) \cdot e^{-j\pi f\tau}$$

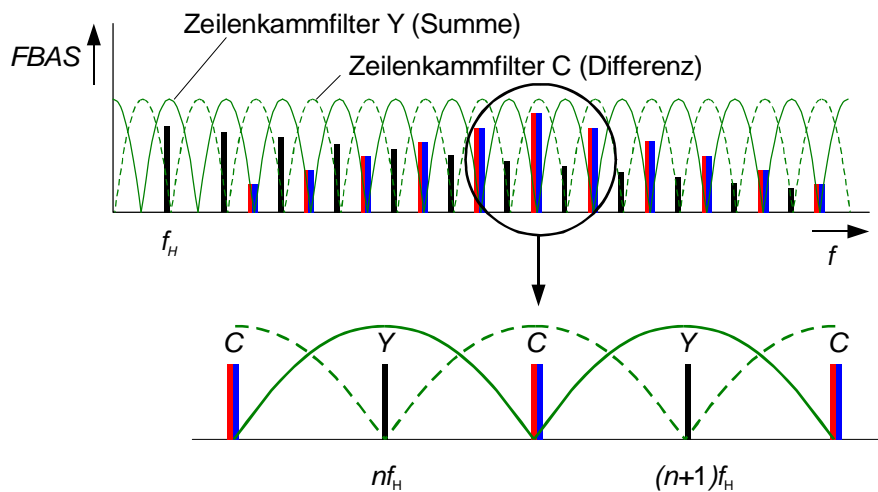


Zur Trennung von Luminanz und Chrominanz bei NTSC mit Halbzeilenoffset muß die Verzögerung genau einer Zeilendauer  $T_H$  entsprechen. Damit werden alle Luminanzlinien als Vielfache von  $f_H=1/T_H$  durchgelassen und alle dazwischenliegenden Chrominanzlinien unterdrückt. Das Kammfilter heißt dann Zeilenkammfilter. Wird im Filter anstelle der Summe die Differenz gebildet, ergibt sich hingegen ein sinusförmiger Frequenzgang und damit ein Durchlass der Chrominanzlinien mit Sperrung der Luminanz.

**Y/C-Trennung mit Zeilenkammfilter:  
(NTSC, Halbzeilenoffset)**

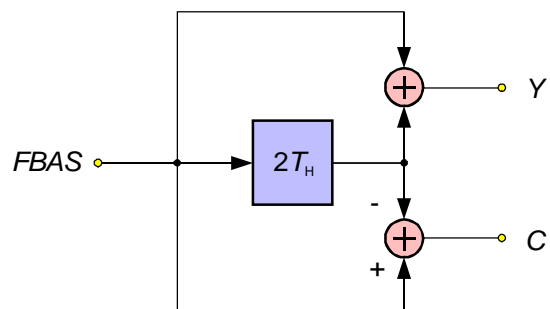


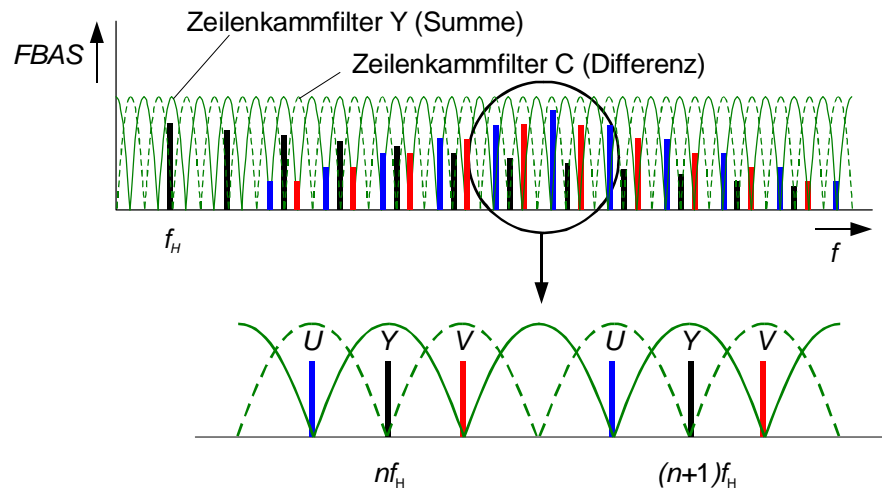
**Spektren:**



Für PAL kann das dargestellte Zeilenkammfilter nicht benutzt werden, da die Chrominanzlinien durch den Viertelzeilenoffset nicht in der Mitte zwischen den Luminanzlinien auftreten, sondern im Abstand von  $\pm 1/4 f_H$  symmetrisch darum herum. Hier muss das Zeilenkammfilter so modifiziert werden, dass als Verzögerung zwei Zeilen  $2T_H$  vorgesehen werden müssen.

**PAL-Zeilenkammfilter:  
(Viertelzeilenoffset)**



**Spektren:**

Als Nachteil von Zeilenkammfiltern ist die vertikale Unschärfe zu nennen, die sich aufgrund der Addition bzw. Subtraktion des direkten FBAS-Signals mit dem um eine oder zwei Zeilen verzögerten Signals ergibt. Für NTSC reicht wegen des Halbzeilenoffsets *eine* Zeilenverzögerung im Kammfilter aus. Der Einfluss auf die vertikale Schärfe (z.B. Kanten) ist hier noch tolerierbar. PAL benötigt *zwei* Zeilenverzögerungen. Hierdurch werden die vertikalen Kanten zu stark als Doppelkonturen wiedergegeben, also die vertikale Auflösung unzulässig verschlechtert, so dass man i.a. auf Zeilenkammfilter im PAL-Decoder verzichten muss.

Generell ist anzumerken, dass die optimale Trennung von Luminanz und Chrominanz nur dann mit Zeilenkammfiltern möglich ist, wenn in aufeinanderfolgenden Zeilen gleiche Inhalte vorliegen, also wenn es vertikal keine Änderungen im Bild gibt (z.B. Multiburst-Testbild, Farbbalken usw.). Sobald es diagonale Muster bzw. allgemeine Bildinhalte gibt, ist das Videospektrum nicht mehr exakt linienförmig. Alle bisher dargestellten Spektrallinien für Luminanz und Chrominanz weichen dann auf und haben jeweils eine zunehmend glockenförmige Charakteristik. Damit ist eine exakte Trennung nicht mehr möglich und es bleibt ein Rest Übersprechen zurück (Crossluminanz und Crosscolour).