Zeitschrift: Kunstmaterial
Herausgeber: Schweizerisches Institut für Kunstwissenschaft
Band: 2 (2012)

Artikel: Videotechnische Grundlagen = Basic principles of video technology
Autor: Gfeller, Johannes
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-882618

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 05.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

VIDEOTECHNISCHE GRUNDLAGEN

Johannes Gfeller

Historische Prämissen

Rund zehn Jahre nach der Erfindung der Videoaufzeichnung im Jahr 1956, kurz nach der Einführung von transportablen und unmittelbar mit der Verfügbarkeit von portablen Videogeräten, entsteht ein neues Genre: die Videokunst. Weil Videotechnik aufs engste auf der Fernsehtechnik aufbaut, ist hier der Ort, um Entwicklung und Technik des Fernsehens zu umreissen. Bestimmt wird sich der eine oder die andere Leser/in schon gefragt haben, wie es denn Fernsehen, das zu diesem Zeitpunkt seine Versuchsphasen seit den späten 1920er bis in die frühen 1950er Jahre hinter sich hat und zum regulären Betrieb übergegangen ist, ohne Video – seinem Speichermedium nämlich – überhaupt geben konnte. Fernsehen sendet doch, was mit der Videokamera aufgenommen wurde.

Die Übertragung geht der Speicherung vor

Sehen wir uns in der Geschichte der technischen Medien etwas um, so ist das zeitliche Primat der Übertragung vor der Speicherung geradezu die Regel: Die Camera Obscura, aber auch ihre Umkehrung, die Laterna Magica, gibt es lange vor dem lichtempfindlichen Material. Animierte Bilder – auch in Projektion – gibt es vor dem Zelluloidstreifen und vor der Möglichkeit, sie «nach der Natur» aufgenommen zu haben. Die Schallübertragung geht der Schallspeicherung vor, dies gar in einer technikgeschichtlichen Umkehrung: die Übertragung erfolgt bereits elektrisch, während die erst danach erfundene Speicherung noch fünf Jahrzehnte rein mechanisch funktioniert.

Parallelität von Fotografie und Telegrafie

Gründe genug, um an der üblichen Darstellung einer Genealogie von Fotografie zu Film, Fernsehen und Video Zweifel anzumelden, weil sie nämlich die eminente wissenschaftshistorische, soziokulturelle und schliesslich auch ökonomische Rolle der Telegrafie völlig ausser Acht lässt. Fotografie und Telegrafie sind aufs Jahrzehnt genau Kinder derselben Epoche, nämlich der 30er Jahre des 19. Jahrhunderts. Beide lösen sie weitgehend unabhängig voneinander je eine Entwicklung aus – die visuelle und die informatische – die heute im digitalen Zeitalter aufgegangen sind. Die Telegrafie ist übrigens ein grundsätzlich digitales Übertragungssystem, und die Benutzung ihrer Kanäle für die Übertragung analoger Signale (z. B. Telefon) erscheint bereits heute als historisches Zwischenspiel.Verifizieren wir die Sicht dieser Parallelität im Hinblick auf die Vorgeschichte des Fernsehens (und damit in gewissem Sinne auf die Vor-Vorgeschichte von Video), so präsentieren sich die Fakten wie folgt: Das jeder Bildübertragung zugrundeliegende Prinzip der streifen- und punktweisen Abtastung der Bildfläche sowie der notwendigen Synchronisation von Sender und Empfänger wird 1843 – und unabhängig von der vier Jahre zuvor der Weltöffentlichkeit übergebenen Erfindung der Fotografie – in einem Patent für einen elektrischen Bildtelegrafen beschrieben, dem Urahnen des Fax.

Parallelität von Film und Fernsehen

Die Übertragung von bewegten Bildern wird im selben Jahrzehnt konzipiert wie der Film, in den 80er Jahren des 19. Jahrhunderts. Auch hier kann von einer unabhängigen Entwicklung ausgegangen werden – als Paul Nipkow 1884 sein «elektrisches Teleskop» zum Patent anmeldet, haben sowohl Marey wie auch Muybridge nur begrenzte Folgen von fotografischen Serienaufnahmen herstellen können, nicht aber kontinuierliche Abläufe über mehrere Minuten, was erst knapp zehn Jahre später gelingt. Oder anders gesagt: Die Erfinder des Films interessierte ausschliesslich die fotografische Speicherung zwecks späterer und beliebig oft zu repetierender Wiedergabe, die Vertreter des elektrischen Teleskops dagegen die unmittelbare telegrafische Übertragung ohne Speicherung. Dass sie erst rund vier Jahrzehnte später auch technisch gelingt, stellt ideengeschichtlich keinen Widerspruch dar – Fernsehen ist ein Kind der Telegrafie und nicht des Films.

Eine erste punktuelle Berührung von Bildübertragung und Speicherung

Als in den späten 20er Jahren des 20. Jahrhunderts funktionierende Versuchsanordnungen bis zum testweisen Sendebetrieb von bewegten Bildern gebracht werden, berühren sich Übertragung und Speicherung dieser Bilder erstmals und kurzzeitig an einer Grenze, die auch den Übergang von der mechanischen zur elektromagnetischen Speicherung markiert: Die ersten Fernsehversuche werden von einem ihrer Protagonisten, John Logie Baird, noch auf Schallplatten festgehalten, während Versuche der Tonaufzeichnung mittels Magnetbändern auf Papierbasis sich eben erst im allerfrühesten Laborstadium befinden. Sie sollten die seit 1898 verwendeten Materialien Stahldraht bzw. -band ersetzen. Noch vor der Mitte der 1930er Jahre wird die Auflösung sowohl des mechanischen wie auch des dieses nun ablösenden elektronischen Fernsehens in einem Masse gesteigert, dass an eine Aufzeichnung der dadurch viel höheren Signalfrequenzen mit Audiogeräten nicht mehr zu denken war (Abb. 1).

Technische Prämissen

Mit dem Hinweis, dass das Bildsignal auf Schallplatte «mitgeschnitten» werden konnte, und der Ergänzung, dass die ersten noch sehr niedrig aufgelösten Fernsehbilder mittels Radiosendern übertragen wurden, sind nun doch einige technisch-physikalische Grundlagen darzulegen.

Übertragung und Speicherung als mehrfache Wandlung physikalischer Grössen

Bei der Ton-, und in potenziertem Masse bei der Bildübertragung, haben wir es immer mit der Umwandlung einer physikalischen Grösse in eine andere in einem definierten Zeitkontinuum zu tun. Bei ihrer Speicherung wird zusätzlich das Zeitkontinuum in einer Länge abgebildet: als Schallplattenrille, als mag-

netische Spur auf dem Tonband oder wie weiter unten erläutert als **Schrägspur** des Videobandes. Damit die Länge wieder in die ursprüngliche Zeitdauer zurückgewandelt werden kann, muss die Geschwindigkeit der Aufnahme bekannt sein. Sie ist bei der Wiedergabe so exakt und so gleichmässig wie möglich einzuhalten, damit aus der zurückgelegten Wegstrecke nicht ein narratives Erlebnis wird, sondern physikalische Zeit: Aus dem Audiobereich kennen wir alle die Qual einer ungleichmässigen Wiedergabe, auf die unser Ohr sehr empfindlich reagiert. Die Mehrzahl der auch in diesem Kompendium erläuterten Fehler entstehen genau hier: sie sind Folgen und Erscheinungen von wieder in ihre Ursprungsgrössen zurückgewandelten Zeitfehlern!

Punkt und Linie zur Fläche

In einem sehr einfachen monauralen Übertragungsmodell dürfen wir den Schall als eindimensionale Grösse in Funktion der Zeit fassen, und seine Übertragung als elektrisches Signal behält diese eine Dimension in der Zeit bei. Ein Bild hingegen hat zwei Dimensionen: Genau eine zuviel, um es durch einen einzelnen Draht bzw. Kanal zu übertragen: Es bedarf also eines Kunstgriffes! Sämtliche realisierten Übermittlungsverfahren für statische oder bewegte Bilder haben die Bildfläche in einzelne **Zeilen** zerschnitten, die nacheinander übertragen wurden. Was genau wird dabei eigentlich übertragen? Durch die punktförmige Abtastung der Motivhelligkeit entlang einer Zeile entsteht ein zeitlicher Verlauf dieser Helligkeit, der in einen zeitlichen Verlauf einer dazu analogen Signalspannung gewandelt wird. Der zeitliche Verlauf aller Zeilen des Bildes nacheinander entspricht dem «Überstreichen» der gesamten Bildfläche. Ist das Bild grau, gibt es nur einen sich nicht stark ändernden Spannungswert zu übertragen; ist das Bild fein strukturiert, ergibt dies als Signal eine diesen Veränderungen folgende Wechselspannung. Deren Amplitude ist umso höher, je stärker die Helligkeitsunterschiede an der betreffenden Bildstelle sind. Deren Frequenz dagegen ist umso höher, je feiner die Bildstrukturen an der derselben Bildstelle sind. Die obere Grenzfrequenz des Übertragungskanals bestimmt daher die mögliche **Auflösung**, angegeben in Linien(paaren) pro Zeile. Die Anzahl der Zeilen ist proportional dazu systembedingt festgelegt.

Mechanisches Fernsehen?

Vor aller Elektronik (und die gibt es 1884 noch lange nicht)[1] wird die Zerlegung des Bildes mechanisch mit der nach ihrem Erfinder Paul Nipkow benannten Scheibe bewerkstelligt. Sie weist auf einer spiralförmigen Linie in regelmässigen Winkelabständen angeordnete feine Löcher auf, die das zu übertragende Bild lückenlos so überstreichen, dass immer genau ein Loch über der Bildfläche ist und die Spur des gleich folgenden Lochs nahtlos an die Spur des vorangehenden anliegt. Das dieses jeweils einzelne Loch passierende Licht fällt auf eine Fotozelle, deren elektrisches Signal durch den einzigen Draht der Übertragungsstrecke oder über einen Sender geschickt werden kann. Es können keine Details übertragen werden, die feiner als die Zeilenbreite bzw. der Lochdurchmesser sind.
Empfängerseitig dreht exakt synchron eine identische Lochscheibe vor einer Flächenglimmlampe (später Neon), die vom übertragenen Signal gespeist wird, das ja die ursprünglichen lokalen Helligkeitswerte des Bildes repräsentiert (Abb. 2).

Elektronisches Fernsehen!

Das elektronische Fernsehen der 1930er Jahre ersetzt die Löcher in der Scheibe durch einen trägheitslos elektromagnetisch abgelenkten **Elektronenstrahl** in einer unter Hochvakuum gesetzten Kathodenstrahlröhre, und zwar sowohl in der Kamera wie auch im Bildschirm. An die Stelle der Drehbewegung der Scheibe sind Schaltkreise für die Vertikal- und Horizontalablenkung des Elektronenstrahls getreten. Sie erzeugen den **Bildraster**, der die Abtastung der Bildfläche nach genau festgelegtem **Timing** und ebenso genau festgelegter Geometrie vollführt. In der Kamera tastet der Strahl die Target genannte lichtempfindliche Schicht zeilenweise ab und wandelt die als Ladungsverteilung gespeicherte Lichtenergie – das vom Objektiv auf die Schicht projizierte Bild – in eine dazu analoge Spannung. Das Überstreichen von Hell-Dunkel-Wechseln erzeugt dementsprechende Wechselspannungen. Eine Klammerbemerkung: Die elektrischen Einstellungen des Strahls, Beam und Focus genannt, sowie die am Target angelegte Spannung haben einen entscheidenden Einfluss auf die Charakteristik des Bildes – sie bestimmen sozusagen seine Materialität, die es auf dem Weg in die digitale Zukunft unbedingt zu erinnern und zu konservieren gilt. Die Kenntnis dieser Zusammenhänge macht für die Restaurierung früher Schwarz-Weiss-Videobänder durchaus Sinn, für die Rekonstruktion und Wiederaufführung von Closed-Circuit Installationen mittels solcher Röhrenkameras gehört sie eigentlich unverzichtbar zum Handwerk.

In der Wiedergaberöhre des Monitors oder Fernsehers wird der unsichtbare Elektronenstrahl durch die Phosphorschicht des Bildschirms in sichtbares Licht gewandelt. Ein wenig leuchtet sie zwar nach, aber es ist hauptsächlich die Trägheit des Auges, welche diesen hin- und her jagenden Punkt zur Fläche schliesst. Damit das noch besser gelingt, werden pro Sekunde nicht 25 **Vollbilder**, sondern 50 **Halbbilder** übertragen. Ein Halbbild enthält nur jede zweite Bildzeile, die Lücken füllt das zweite Halbbild, das unmittelbar darauf folgt. Die Zeilen der beiden Halbbilder werden also ineinander verkämmt. Damit wird das Grossflächenflimmern verringert und unsere Standzeit vor dem Fernseher erhöht (Abb. 3).

Bildauflösung und Bandbreite

In den **PAL**/CCIR-Ländern sind, historisch-technisch bedingt an die Netzfrequenz gekoppelt, 50 Halbbilder pro Sekunde zu übertragen. Jedes davon umfasst, über die gesamte Bildhöhe verteilt, 312,5 Zeilen. Für ein Vollbild ergibt dies 625 Zeilen, von denen allerdings nur 576 Bildinhalt tragen (Abb. 4). Die einzelne Zeile dauert zwar 64 µs, sichtbar ist sie jedoch nur während

52 µs. Wird die maximale Anzahl der durch den Zeilenraster tatsächlich übertragbaren horizontalen Linien bei einem **Seitenverhältnis** der Höhe zur Breite von 3:4 umgerechnet auf die Anzahl der auf einer Zeile maximal zu übertragenden Punktepaare,[2] gibt das ungefähr 260. Der kürzeste Schwarz-Weiss-Wechsel dauert also 0.2 µs (52 µs/260). Dies entspricht einer Frequenz von 5 MHz, der **Bandbreite** des analogen TV-Signals (Abb. 5). Weshalb sind nicht alle Zeilen sichtbar, und weshalb ist die einzelne Zeile nicht während ihrer ganzen Dauer zu sehen? Die «verborgene» Zeit wird für den **Bildrücklauf** und die damit verbundene Rückkehr des Elektronenstrahls an die obere Bildkante, bzw. für den **Zeilenrücklauf**, also die Rückkehr des Strahls vom rechten Bildrand zum linken benötigt – nicht zuletzt auch ein historisches Erbe aus dem Stande der Technik der Mitte des letzten Jahrhunderts.

Bildinhalt und Synchronimpulse

Sämtliche in der Übertragungskette folgenden Geräte müssen sich strengstens an dieses Timing halten, das durch die **horizontalen** und **vertikalen Synchronimpulse** geregelt wird, welche in den Lücken zwischen den Bildern bzw. Zeilen übertragen werden. Damit sie als solche erkannt werden können, ist ihre Signalspannung unterhalb derjenigen für die Bildinhalte gelegt. Wenn ein **Videosignal** einen Spannungsunterschied von genau einem Volt umfasst, so sinken die Synchronimpulse auf 0 Volt, während der Schwarzpegel bei 0,3 Volt und der Weisspegel bei genau 1 Volt liegen. Der Bildinhalt kann nie Spannungswerte annehmen, die exklusiv den Synchronimpulsen vorbehalten sind. Daraus folgt aber auch, dass der Übertragungskanal entweder die Synchroninformation oder den Bildinhalt transportieren kann, jedoch nicht beides gleichzeitig. Für die Zeiten zwischen den Synchronimpulsen muss also die Apparatur für sich allein gleichförmig und stabil laufen. Auf einem 50 cm breiten Bildschirm braucht der Elektronenstrahl eine Mikrosekunde für einen Zentimeter Weg. Kommt er, gemessen an den vorhergehenden Zeilen, nur geringfügig zu spät oder zu früh, so hat dies ein unangenehmes Zittern oder Verwellen in seitlicher Richtung zur Folge. Zeitliche Fehler im **Helligkeits-** oder **Synchronsignal** haben bei Fernsehen und Video seitliche Verschiebungen, also horizontale Fehler zur Folge (Abb. 6a, 6b).

Helligkeitsfernsehen wird Farbfernsehen

Der Elektronenstrahl kennt keine Farben, weder für die Aufnahme noch für die Wiedergabe. Um sie dennoch übertragen zu können, bedient man sich eines aus der frühen Farbfotografie bekannten Prinzips: Anstelle einer Aufnahmeröhre nimmt man deren drei und setzt vor jede einen Farbauszugsfilter für die Grundfarben Rot, Grün und Blau. Ein hinter dem Aufnahmeobjektiv angebrachtes Strahlenteilerprisma verteilt das Bild gleichmässig auf die drei Röhren. Während im Studio fortan für jede dieser Grundfarben ein Kabel gezogen wurde, stand für das Senden nur ein Kabel bzw. ein Kanal zur Verfügung. Die Farbinformation war deshalb dem Helligkeitssignal als Komponenten beizumischen,[3] und zwar so, dass der Schwarz-Weiss-Empfang weiterhin ungestört möglich war. Ebenso sollte ein moderner Farbfernseher ein Schwarz-Weiss-Bild ohne Farbschleier wiedergeben, was durch die Trennung von Helligkeits- und **Farbsignal** technisch leicht zu bewerkstelligen war. Eine sehr hohe, bis auf die letzte Kommastelle[4] stabile **Trägerfrequenz** von 4,43 MHz (PAL) bildet die Referenz für das Farbsignal, das dem Helligkeitssignal beigemischt wird. Bei einigen Schwarz-Weiss-Monitoren kann sich die Trägerfrequenz deutlich als *>Moiré-Effekt* äussern. Die Farbsättigung ist in die Amplitude und der Farbton in die **Phase** dieses Signals gelegt, während die Trägerwelle selber nicht übertragen wird. Eine Periode dieser Frequenz dauert weniger als eine viertelmillionstel Sekunde, und während dieser Zeit wird der ganze Farbkreis einmal durchlaufen. Ein zeitlicher Fehler im Farbsignal von einigen Nanosekunden hat bereits eine sichtbare Verfälschung der Farben zur Folge! Da in fast allen Geräten von der Kamera über den **Bildmischer**, den Videorekorder und schliesslich den Wiedergabemonitor das Farbsignal an einer oder mehreren Stellen von seinem **Farbhilfsträger** getrennt bzw. wieder mit ihm zusammengeführt wird, ist leicht vorstellbar, dass sich infolge unterschiedlicher Laufzeiten solche Zeitfehler auf Schritt und Tritt einstellen und sie entsprechend korrigiert werden müssen. Die europäische **Farbfernsehnorm** PAL hat hier einen entscheidenden Vorteil gegenüber dem amerikanischen **NTSC**, weil es Farbverschiebungen infolge Zeitfehler von Zeile zu Zeile komplementär umsetzt. Noch als Signale können so die Fehler bei der Decodierung bereits korrigiert werden, indem immer eine aktuelle mit der über eine Verzögerungsleitung um haargenau eine Zeile verspätete und komplementär verfälschte Farbkomponente gemischt wird. Bleiben dennoch Verschiebungen übrig, so werden diese von unserem Auge bei genügend grossem Abstand vom Bildschirm in der ursprünglich richtigen Farbe gesehen. Bei zu geringem Abstand nehmen wir den sogenannten *>Jalousie-Effekt (PAL)* wahr. NTSC Fernseher und Monitore benötigen demgegenüber einen an der Frontseite des Gerätes gut zugänglichen Einstellknopf für den Farbton, den **Hue-Regler**.

Im Empfangsgerät muss der senderseitig unterdrückte Farbhilfsträger rekonstruiert werden, damit für die **Demodulation**[5] des Farbsignals und die Rückgewinnung der anteiligen Spannungen für Rot, Grün und Blau eine Referenz besteht. Zur Synchronisierung des Farbhilfsträgeroszillators wird ein kurzes Schwingungspaket nach jedem Zeilensynchronimpuls, aber vor dem Beginn des Bildinhalts übertragen, der sogenannte **Burst**. Mit dessen Hilfe in die richtige Phasenlage gebracht, hält der Farbhilfsträger einer Stimmgabel gleich die Farben für die Dauer einer Zeile am rechten Ort auf dem Farbkreis. Gelingt die Synchronisation nicht, so machen sich die Farben auf dem Weg vom linken zum rechten Bildrand ziemlich selbständig *(vgl. >Colour Lock-Fehler)*. Die Farbbildröhre hat im Gegensatz zur Schwarz-Weiss-Röhre drei Strahl-

systeme eingebaut, von denen jedes nur die kleinen Phosphorflächen auf dem Bildschirm treffen kann, die ihm zugeordnet sind und die den unsichtbaren Elektronenstrahl in rotes, grünes bzw. blaues Licht wandeln. Daraus kann jede Farbe gemischt werden entsprechend den anteiligen Strahlintensitäten der drei Systeme (Abb. 7).

Grundlagen der magnetischen Signalspeicherung ...

Das Prinzip der elektromagnetischen Schallaufzeichnung geht auf Valdemar Poulsen zurück, der 1898 für sein Telegraphon ein Patent erhielt. Wohl nur der Umstand, dass es zu dieser Zeit noch keine elektronischen Verstärkerschaltungen gab, hat die Entwicklung der elektromagnetischen Informationsspeicherung so zögerlich vonstatten gehen lassen.
Ein magnetisierbares Medium wird an einem Elektromagneten vorbeigezogen, der mit der via Mikrofon zur Wechselspannung gewandelten Schallenergie gespeist wird. Das Medium kann Stahldraht, Stahlband oder Blechscheibe sein. Die jeweils herrschende und analog zur Schallwelle wechselnde Nord-Süd-Polung bzw. Süd-Nord-Polung des Magnetfeldes am Pol des Elektromagneten wird bei der Fortbewegung des Trägers vom Elektromagneten weg sozusagen mitgenommen. Im Grunde genommen handelt es sich auch hier um eine Wandlung von Zeit in Länge sowie Feldstärke in Länge: die Feldlinien der gespeicherten Magnetfelder haben eine räumliche Ausdehnung, und sie werden entlang einer Wegstrecke abgelegt. Ob es sich beim Träger um ein homogenes magnetisierbares Material oder um kleinste isolierte Partikel handelt, spielt für die grundsätzliche Funktionsweise keine Rolle, obschon die Vorstellung kleinster in ein Trägermedium eingebetteter Magnetpartikel, die je für sich eine Polung weitertragen, bedeutend leichter fällt. Erst dreissig Jahre nach Poulsens Erfindung werden magnetisierbares Material und Träger getrennt; letzterer zuerst als Papierband, dann als Kunststofffolie realisiert. An der grundlegenden Funktionsweise der elektromagnetischen Speicherung hat sich bis auf den heutigen Tag und bis zur Festplatte nichts geändert – an der technischen Ausführung hingegen fast alles.

... und einige notwendige Fortschritte

In den 30er Jahren sind in Deutschland die Grundlagen der modernen Magnetbandaufzeichnung entwickelt worden: 1932 der Luftspalt-**Magnetkopf** (Eduard Schüller), 1935 das eigentliche Band mit Acetylcellulose-Träger (BASF) und 1940 die HF-Vormagnetisierung (Walter Weber). 1945 gelangten zwei Geräte und 50 Bänder in die USA und führten 1948 zum Bau des ersten amerikanischen Tonbandgerätes. Hersteller war die Firma Ampex, die dafür vom Sänger, Schauspieler und Entertainer Bing Crosby mit entsprechendem Kapital versehen wurde. Dieser war daran interessiert, seine Radiosendungen vorproduzieren zu können und nicht mehr live zum Gelingen bringen zu müssen (Abb. 8).

Vom Tonband zum Videorekorder

In den Bing Crosby Enterprises und bei Ampex[6] wurde ab 1951 die Bildaufzeichnung auf **Magnetband** entwickelt. Zwei treibende Motive sind zu nennen: die Möglichkeit der Vorproduktion von Fernsehsendungen, wie auch die in einem Land mit drei Zeitzonen sich ökonomisch aufdrängende Möglichkeit, eine Sendung um je eine Stunde versetzt noch zweimal wiederholen zu können.
Obgleich technisch verwandt, ist von der Schall- zur Bildaufzeichnung ein Quantensprung zu machen. Dazu eine Rechnung: die Bandbreite des Fernsehens beträgt damals schon 5 MHz (NTSC 4 MHz), wie weiter oben vorgerechnet wurde. Das erste Ampex Tonbandgerät wies eine Bandbreite von 15 kHz auf, das sind 0,015 MHz. Soll die Bandbreite, und damit vor allem die obere Frequenzgrenze erhöht werden, so kann dies auf einem bestimmten Stand der Verfahrenstechnik für die Herstellung von Kopf und Band eigentlich nur über die Erhöhung der **Bandgeschwindigkeit** erreicht werden. Damalige Tonbandgeräte transportierten das Band aber schon/noch mit 76 cm/sec. Eine rein rechnerisch ermittelte Bandgeschwindigkeit für Fernsehbandbreiten hätte also weit über hundert Meter pro Sekunde betragen müssen – technisch nicht machbar. Die kinetischen Probleme, die kurze Spieldauer und die dennoch unbefriedigende Qualität bei Versuchen mit Bandgeschwindigkeiten von einigen Metern pro Sekunde liessen die Versuche mit der Längsspuraufzeichnung bei Crosby, RCA (Radio Corporation of America), der BBC (British Broadcasting Corporation) und Weiteren bald enden.

Die Realisierung

Vom segmentierten Bild zur segmentierten Aufnahme

Die Lösung des Problems war eigentlich im Fernsehsignal selber angelegt: Wohl handelte es sich hierbei um eine Grössenänderung in einem sehr genau einzuhaltenden und stets zu synchronisierenden Zeitkontinuum, aber dieses Kontinuum war ja seinerseits bereits segmentiert in Zeilen- und Bilddauern. Was lag also näher, als diese Zeitsegmente im Signal auf dem Band wieder in räumliche Segmente abzulegen? Es zählte ja eigentlich nur die relative Geschwindigkeit vom Schreib/Lesekopf zum Band. Es konnten also in hoher Geschwindigkeit eng nebeneinander liegende Spuren aufgenommen werden, während das Band vergleichsweise langsam weitertransportiert wurde – genau um so viel, dass zwischen den Spuren noch etwas Zwischenraum verblieb. Vier Köpfe wurden im Winkel von je 90° auf ein Rad montiert, das sich quer zum Band mit 15 000 Rpm drehte[7] und dessen Durchmesser etwas mehr als 52 mm betrug. Das Band mit einer Breite von 2" (50,8 mm) wurde mit Unterdruck in eine genau zylindrisch geformte Hohlkehle angesaugt, in die das Kopfrad hochpräzise eingepasst war. So wies immer ein Kopf den Kontakt zum Band auf, was die Kontinuität des Signals garantierte. Das aufwendig zu wartende und teure **Querspurverfahren** war von

1956 bis in die frühen 80er Jahre in Gebrauch – in Produktionsstudios und Fernsehanstalten. Für den industriellen und auch bald schon anvisierten privaten Gebrauch hat sich in den frühen 60er Jahren das sogenannte **Schrägspurverfahren** durchgesetzt, welches bis heute das führende Prinzip für die Videoaufzeichnung geblieben ist.[8] Hier wird das Band nicht hohl gekrümmt, sondern schief um einen Zylinder geführt. Auf dieser sogenannten **Kopftrommel** sind die **Videoköpfe** platziert. Unter den wohl weit über 50 Schrägspur-Formaten[9] weisen die Mehrzahl eine 180°-Umschlingung des Bandes um die Trommel auf und ursprünglich zwei gegenüberliegende Köpfe für das Videosignal.[10] Das **Audiosignal** wird wie bei einem Tonbandgerät auf eine **Längsspur** am einen Rand des Bandes aufgezeichnet (Abb. 9).

Hohe Kopf-zu-Bandgeschwindigkeit, langsamer Bandtransport

Als Kernstück des Videorekorders kann ganz eindeutig die Kopftrommel bezeichnet werden: um sie herum dreht sich wortwörtlich (fast) alles. Das Band wird vergleichsweise langsam um sie herum geführt (einige bis wenige cm/sec), während die Köpfe mit einer Umdrehungszahl von 1500 Rpm im bzw. mit dem Zylinder drehen.[11] Abhängig vom Trommeldurchmesser ergibt das relative **Kopf-zu-Bandgeschwindigkeiten** zwischen 25,59 m/s beim 1" C-Format (1976) bis hinunter zu 3,1 m/s bei **Video8** von 1984.

Trommeldurchmesser, Spurneigung, Bandgeschwindigkeit

Gemeinsame Charakteristik aller Trommelsysteme ist das rechnerische Zusammenspiel von Trommeldurchmesser, **Spurwinkel**, Spurbreite und absoluter Bandgeschwindigkeit. Es bestehen folgende Abhängigkeiten: eine einzelne Schrägspur, welche genau ein Halbbild enthält, muss so lange sein, dass bei einem gegebenen **Kopfspalt** und ebenso gegebenen Grössen der Magnetpartikel die gewünschte obere Grenzfrequenz des Aufnahmesignals noch erreicht wird. Je enger dieser Spalt und je kleiner die zu magnetisierenden Partikel sind, desto geringer darf auch die relative Kopf-zu-Bandgeschwindigkeit ausfallen und damit die Spur kürzer werden. Weil ein engerer Spalt aber für hohe Frequenzen eine ungünstigere Charakteristik aufweist, sind hier Grenzen gesetzt, zudem müssen die Magnetpartikel eine wesentlich höhere **Koerzitivkraft** aufweisen, um noch ein genügend starkes Wiedergabesignal induzieren zu können.
Deshalb kann die einzelne Spur auch nicht beliebig schmaler gemacht werden, selbst wenn dies aus mechanischen Gründen möglich sein sollte. Die Grenzen sind nicht zuletzt durch die Störfestigkeit und den **Rauschabstand** gesetzt. Mit all diesen Faktoren lässt sich die optimale Neigung der Spur berechnen. Eine Verkürzung der Spur hat eine Verkleinerung des Trommeldurchmessers wie auch der Breite des Magnetbandes zur (gewünschten) Folge. Neigung und Breite der Spur sowie der Trommeldurchmesser ergeben die Bandgeschwindigkeit. Wir haben die Möglichkeit, im Labor die Schrägspuren optisch sichtbar zu machen und daraus den Trommeldurchmesser und die Bandgeschwindigkeit auch für ein unbekanntes Format zu ermitteln. Leider ist die Analysemethode für Originale zu riskant (Abb. 10).[12]

Luftpolster und Reibung

Während die frühen Schrägspurformate mit **Offener Spule** noch mit feststehenden unteren und oberen Trommelhälften operierten, zwischen denen sich in einem schmalen Schlitz die Videoköpfe drehten, so haben seither alle Schrägspurverfahren eine feststehende untere Trommelhälfte, während die Köpfe an der oberen, sich drehenden anderen Trommelhälfte befestigt sind. Durch die Drehung in Transportrichtung wird dank entsprechender Rillen in der Trommel ein Luftpolster erzeugt, welches die Reibung zwischen Band und Trommel herabsetzt. Dies ist eine fundamentale Voraussetzung für die Reduktion der Banddicke, welche – zusammen mit der erwähnten langsameren Geschwindigkeit – für die Kassettenformate nötig war, damit bei geringeren Abmessungen längere Aufnahmezeiten möglich wurden.

Reibung und Bandspannung

Die Reibung schwankt mit Toleranzen der Bandherstellung und mit dem Gerätezustand, aber auch mit der Temperatur und der relativen Feuchte bei der Aufnahme bzw. Wiedergabe sowie der Anzahl der Bandbewegungen im Gerät. Inzwischen natürlich auch mit der Alterung des Bandes, was aber beim Entwurf dieser Systeme vermutlich nicht abzusehen war. Es braucht also eine Kompensation für unterschiedliche Reibungen, zumal das Band um die Trommel herum eine genau definierte mechanische Spannung haben soll. Ist diese nämlich zu locker, ist der **Kopf-zu-Bandkontakt** nicht optimal, was sich in einer verminderten Signalstärke äussert und dadurch erhöhtem Rauschen. Ist die Spannung hingegen zu hoch, kann sich das Luftpolster schlecht aufbauen, und es entstehen Querkräfte, weil die untere Trommelhälfte dann stärker bremst, was die obere mit mehr Antriebskraft kompensieren muss. Zudem drückt sich der Kopf stärker in die Bandoberfläche ein, was sowohl Abnutzung von Kopf und Band wie auch den **Bandabrieb** steigert, bei tendenziell wieder abnehmender Signalstärke. Aus diesen Gründen sollte die Spannung eingangs der Trommel auch nicht zu stark abweichen von derjenigen ausgangs. Mit anderen Worten: der Reibungsverlust an der Trommel soll so gering wie möglich sein.
Jedes Schrägspursystem hat deshalb eine mehr oder weniger aufwendige **Bandzugregelung**, wie sie auch vom Tonbandgerät her bekannt ist. Eine falsche Bandspannung ist am unteren Bildrand beim Kopfwechsel als deutlicher seitlicher Verzug sichtbar. Die **U-matic**-Geräte haben einen sogenannten **Skew-Regler**, der von aussen eine mechanische Feinregelung der Bandspannung innerhalb enger Grenzen ermöglicht. Dies gilt auch für die Mehrzahl der Formate mit Offener Spule. Gealterte Videobänder können ausserhalb des Regelbereichs liegen, womit ein *>Skew-Fehler* vorliegt. Innerhalb gewisser Grenzen bleibt er tolerierbar, weil er sich nicht auf das sichtbare Bild auswirkt.

Verschmutzung, (Selbst-)Reinigung, Abnutzung

Das Luftpolster ist auch nötig, weil das Band zwar möglichst glatt und gleitfähig sein soll, damit die Zugkräfte um die Trommel verringert werden können. Andererseits muss das Band eine gewisse abrasive Wirkung haben, damit sich feinste Partikel auf den Köpfen nicht festsetzen können bzw. vom Band selber wieder weggeschliffen werden.[13] Während die Benutzer der Geräte mit offener Spule mit der regelmässigen Reinigung des Bandpfades und der Köpfe vertraut sein mussten, war die Zugänglichkeit bei Kassettengeräten nicht mehr gegeben. Zwar gab und gibt es **Reinigungskassetten**, die ein deutlich raueres Band enthalten als das übliche Videoband. Genau aus dem Grund sollten sie aber nicht zu häufig verwendet werden, damit die Köpfe nicht über Gebühr abgenutzt werden (Abb. 11a–d).

Neben den magnetischen Parametern der eigentlichen Informationsträger eines Bandes spielen also die physikalischen Eigenschaften seiner Oberfläche eine entscheidende Rolle für die Gleichmässigkeit mit der das Band um die Trommel gezogen werden kann, was wiederum direkte Auswirkungen auf die horizontale Stabilität des Bildes hat.

Sowohl **Bindemittel** als auch Gleitmittel, aber auch die Abrasiva, Antistatika und weitere Zusatzstoffe, verändern sich mit der Zeit und damit auch die Laufeigenschaften. Lagern sie sich an der Trommel und an den **bandführenden Teilen** wie **Bolzen** ab, so erhöhen sie deren Haftreibung beträchtlich und das Band beginnt zu **quietschen**, bis es schliesslich ganz festkleben kann (Abb. 12).

Geräteseitig sind Abnutzungen zu erwähnen, welche den Bandpfad verändern, aber ebenso die Haft- und Gleitreibung an Trommel und an den bandführenden Teilen (Abb. 13).

Der Bandpfad vor und nach der Trommel

Vor der Trommel wird das Band nach der Abwickelspule als erstes am Fühlhebel für die Bandzugregelung vorbeigeführt, danach am **Löschkopf** vorbei an mehreren Führungsbolzen, die den schiefen Weg über die Trommel vorgeben. Nach der Trommel folgen als erstes wieder Umlenk- und Führungsbolzen, danach kombinierter Ton- und **Kontrollkopf**, und schliesslich die Antriebsachse (**Capstan**) und die Aufwickelspule. Bei Kassettensystemen führt das Band zwischen Capstan und Aufwickelspule noch an mehreren Umlenkbolzen bzw. Rollen vorbei. Sind die sich unmittelbar am Ein- oder Ausgang der Trommel befindlichen Bolzen verbogen oder abgenützt, oder in der Höhe dejustiert, kann dies zur Folge haben, dass das Band im falschen Winkel um die Trommel geführt wird und es zu einem *>Bandführungsfehler* kommt. Oft zeigt das Oszilloskop am Eingang oder Ausgang der Trommel eine mehr oder weniger deutliche Einschnürung des FM-Signals (= verstärktes **Kopfsignal** vor der Demodulation),[14] welche sich im Bild als leicht erhöhtes Rauschen am oberen bzw. unteren Bildrand manifestieren kann. Genauso wirkt sich auch der **Edge Curl** aus, obschon der Grund ein anderer ist: durch die Verwellung gibt es einen schlechten oder keinen Kopf-zu-Bandkontakt, obschon die Spur eigentlich gehalten würde (Abb. 14, 15).

Möglichst konstante Bandgeschwindigkeit

Bei Schallplatte und Tonbandgerät sind konstante Geschwindigkeiten das A und O für eine Wiedergabe ohne Schwankungen der Tonhöhe. Dies gilt uneingeschränkt auch beim Videorekorder. Mangelnde Konstanz der Bandgeschwindigkeit und der Umdrehung der Kopftrommel führen zu *>Gleichlaufschwankungen*. Es handelt sich um Zeitfehler im Bild, die sich abhängig von der Frequenz der Schwankung als seitliche Unruhe des Bildstandes insgesamt bis hin zur mehr oder weniger engen Verwellung vertikaler Kanten bemerkbar machen. Neuere Videogeräte haben alle eine elektronische **Servoschaltung** für die Regelung der Bandgeschwindigkeit, die so funktioniert, dass sie die von der **Kontrollspur** gelesenen **Kontrollimpulse** mit einer quarzgenauen Vorgabe vergleicht. Kommen die Impulse im Vergleich zur Referenz zu langsam, wird der Motor beschleunigt, kommen sie zu schnell, wird abgebremst. Diese Regelung muss gedämpft sein, damit sich nicht Pendelbewegungen einstellen. Anderseits sollen sie so schnell wie möglich erfolgen, damit der Bildstand sich bei einer Abweichung rasch beruhigt und nach dem Start des Bandes möglichst rasch ein stabiles Bild dasteht. Eine Abnutzung des Bandpfades, der Antriebsriemen und -rollen, aber auch verschlechterte Gleiteigenschaften des Bandes bringen diesen mechanisch-elektronischen Regelkreis aus seinem optimalen Arbeitsbereich heraus, wodurch vermehrte Unstabilitäten im Bild entstehen – wir erinnern uns: die in Länge abgelegte Zeit kann nicht mehr exakt wieder in dieselbe gleichmässige reale Zeit gewandelt werden.

Möglichst konstante, aber schnell geregelte Trommeldrehung

Der zweite, noch wichtigere Regelkreis bleibt nun zu erläutern: Die Geschwindigkeit und der Drehwinkel der Kopftrommel. Bei der Aufnahme muss die Umdrehungsgeschwindigkeit an das aufzunehmende Videosignal angepasst werden. In der Regel sollen dies zwar exakte 50 Halbbilder pro Sekunde sein, dennoch muss das System geringen Abweichungen folgen können. Es ist aber nicht bloss die Geschwindigkeit dem Signal anzupassen, es muss auch dafür gesorgt werden, dass bei Beginn eines Halbbildes sich der Videokopf genau an der Stelle der Trommel befindet, an der das Band seine Umschlingung beginnt, also möglichen Kopf-zu-Bandkontakt hat. Der Durchgang des Kopfes kurz vor dieser Stelle wird magnetisch erfasst und in einen elektrischen Impuls gewandelt, der schliesslich gleichzeitig wie der Synchronimpuls im Videosignal auftreten muss. Eine allfällige Abweichung wird in eine Steuerspannung gewandelt, welche die Kopftrommel entsprechend beschleunigt oder abbremst. Auch dieser Regelkreis muss rasch, aber gedämpft funktionieren, um seitliche Stabilität zu erreichen. Die elektronische Dämpfung ist dabei genau auf die mechanische Trägheit abgestimmt. Verändern sich die mechanischen Parameter infolge Abnutzung und

Degradation, arbeitet der ganze Regelkreis nicht mehr effizient. Damit bei der Wiedergabe die Spuren überhaupt wieder gefunden werden, wird der eben erwähnte, von der Kopftrommel generierte Impuls beim Beginn einer Schrägspur auf die Kontrollspur des Videobandes aufgezeichnet, die längs und auf der gegenüberliegenden Seite der Tonspur geschrieben und gelesen wird – also unabhängig von der Kopftrommel. Im Schnittbetrieb, wenn also von einer Bandmaschine auf die andere kopiert wird, und wenn zudem Bildmischer und **TBCs** beteiligt sind, versucht man alle Geräte zentral mit einem Studiotakt zu versorgen. Sowohl bei einem Schnittbetrieb ohne Studiotakt wie auch bei einem mit, aber mit überlagerten Störungen oder zu kurzen Hochlaufzeiten der Bandgeräte, kann es zu Synchronstörungen insbesondere unmittelbar nach dem **Bildschnitt** kommen: Die Zeit, die die Servoschaltung sowohl des Capstan wie auch der Trommel braucht, um einen «holprigen» Takt auszubügeln.

Verschiedene Gründe für den Trackingfehler

Stimmt der Drehwinkel der Trommel mit ihren Köpfen nicht überein mit dem von der Kontrollspur vorgegebenen Beginn der Schrägspur, so haben wir es mit einem *>Tracking-Fehler* zu tun: Der Videokopf verfehlt die aufgezeichnete Spur ganz oder teilweise. Gerade letzteres ist gefährlich, wenn es nicht erkannt wird. Das Bild scheint bei oberflächlichem Hinsehen in Ordnung zu sein, weist aber einen geringeren Rauschabstand auf, was sich sowohl auf die Bildstruktur wie auch beispielsweise auf die Anfälligkeit auf **Dropouts** auswirkt. Für Kopierarbeiten insbesondere ab sehr alten Bändern kann deshalb der sorgfältigen Einstellung des Trackings mit dem eventuell vorhandenen Zeigerinstrument oder einem externen Oszilloskop nicht genug Aufmerksamkeit gewidmet werden, weil der Bereich der optimalen Einstellung sehr eng werden kann![15]

Es ist zu unterscheiden zwischen einem *>Tracking-Fehler*, der gerne eintritt bei Bändern, die mit einem anderen Rekorder aufgenommen wurden, und einer *>Gleichlaufschwankung*, die aufgrund einer falschen Zeitkonstante der Servoschaltung auftritt und die Störzonen periodisch zeigt. Die Gründe hierfür können mannigfaltig sein: bei älteren Geräten ohne Direktantrieb der Trommel ist es zumeist ein ausgeleierter, versprödeter oder verschmutzter Antriebsriemen. Ein Band mit verschlechterten mechanischen Eigenschaften kann ebenso dazu führen, wie eine falsche Einstellung der Servoschaltung selber. Hier können beispielsweise ausgetrocknete Elektrolytkondensatoren mit dadurch verminderter Kapazität die Zeitkonstante des Regelkreises verändern. Mechanische Abnutzung im Allgemeinen wie auch eingetrocknetes Öl in Sinterlagern sind weitere Gründe, die im Übrigen selten allein auftreten.

Zusammenhang von Tracking-Fehler und Zustand der Videoköpfe

Charakteristisch für einen *>Tracking-Fehler* im engeren Sinn ist seine gleichzeitige Auswirkung auf die gesamte Bildhöhe. Tritt er deutlich sichtbar nur in der halben oder noch schmaleren Bildhöhe auf, dann ist ihm auch ein *>Bandführungsfehler* überlagert. Beim Verstellen der Trackingregelung auf beide Seiten von der Mittelstellung lässt sich in dem Falle beobachten, wie die Störzonen auf dem Bildschirm sich verändern bzw. vertikal wandern. Dies ist eine zwar grob empirische, aber nichtsdestoweniger mit gewissem Aussagewert verbundene Methode, um den Zustand der Videoköpfe zu ermitteln: kann der Regler, am besten bei einer frischen **Testkassette** zu ermitteln, relativ weit aus der Mittelstellung bewegt werden, ohne dass sich die Bildstruktur markant verschlechtert, ist dies ein Zeichen für einen noch guten Zustand der Köpfe. Eine schmale Störzone bei Zeitlupenwiedergabe ist ein ähnliches Indiz. Dies kann allerdings nur einen Anhaltspunkt liefern, für den es etwas Erfahrung braucht. Ist das Bild leicht verrauscht, und verändert sich an dieser Tatsache nichts, wenn der **Tracking-Regler** verstellt wird, sind entweder die Köpfe abgenutzt und müssen ersetzt werden, oder sie sind verschmutzt, und müssen gereinigt werden. Abgenutzte und/oder verschmutzte Köpfe neigen auch zu häufigeren Dropouts.

Weshalb nimmt das Rauschen zu und bleibt die Helligkeit konstant?

Degradation bei fotografischen Schichten hat beinahe immer Auswirkungen auf den Kontrast, die Farbe oder die Helligkeit eines Bildes. Wieso ist dies beim Video anders, wenn ein altes Band ein schwächeres Signal abgibt oder wenn die Köpfe etwas verschmutzt sind? Die Helligkeitsinformation im Videosignal steht in direktem, beinahe linearem Verhältnis zur Motivhelligkeit. Diese Information kann so jedoch nicht auf das Band aufgezeichnet werden, weil der Kopfspalt nur für einen bestimmten Frequenzbereich optimiert ist – unterhalb und oberhalb nimmt die Signalstärke drastisch ab. Ein graues Bild hat beispielsweise einen grossen Gleichspannungsanteil im Signal, weil sich die Helligkeit ja nicht ändert. Aufgenommen werden können aber nur Wechselspannungen. Das Helligkeitssignal wird deshalb frequenzmoduliert aufs Band gebracht, d. h. einem momentanen Spannungswert am Eingang dieses Modulators entspricht eine bestimmte Frequenz am Ausgang, während die Amplitude dieses Ausgangssignals, das auf das Band aufgezeichnet wird, konstant bleibt. 0 Volt im Videosignal – die Synchronimpulse – ergibt beispielsweise 4 MHz Kopfsignal, 0,3 Volt, also Schwarz, bereits 4,5 MHz, während Weiss mit 1 Volt 5.7 MHz ergibt (variiert von einem zum anderen **Videoformat**, mit Tendenz zu höheren Frequenzen bei neueren Formaten). Die Differenz zwischen der Frequenz bei 0 Volt und derjenigen bei 1 Volt nennt man den **Frequenzhub**. Die Helligkeit des Motivs ist also in eine Frequenz umgesetzt worden. Bei schwachem Signal ist das immer noch dieselbe Frequenz, die für einen bestimmten Helligkeitswert steht. Sie kann etwas weniger sicher demoduliert werden, was zu erhöhtem Rauschanteil führt, aber die Bildhelligkeit wird nicht tangiert. Dies erleichtert auch die Signalübertragung von den Köpfen auf der drehenden Trommel zum feststehenden Vorverstärker im

Gerät mittels Schleifringen oder rotierendem Transformator: Eine amplitudenmodulierte Übertragung wäre wohl viel störungsanfälliger und würde sich im Bild deutlich als Flackern bemerkbar machen.[16] Im analogen Video, und davon handelt dieser Text ausschliesslich, führt jeder Kopierprozess zu einer Abnahme der Qualität, wir sprechen vom Generationenverlust. Am geringsten fällt dieser Verlust aus, wenn jeweils auf ein höherwertiges Format kopiert wird, dessen Begrenzungen im Frequenzgang deutlich über der zu kopierenden Information liegen, und dessen Eigenrauschen deutlich unter demjenigen liegt, das im Ausgangsmaterial schon enthalten ist. Dennoch gibt es keinen «transparenten» analogen Kanal, der nicht mit einem Verlust und einer Unlinearität behaftet wäre, und die Wahl eines jeweils höherwertigen Formats stösst an technische Grenzen, wenn die Ausgangsqualität schon hoch war, und in jedem Fall wird sie an finanzielle Grenzen stossen.

Können demgegenüber die Farben verblassen?

Es ist bekannt, dass sich die Farben verändern können. Das Farbsignal wird in einem Frequenzband unterhalb des FM-Signals für die Helligkeit aufgenommen, daher die Bezeichnung **Colour-Under-Verfahren** für den herabgesetzten Farbträger bei der grossen Mehrzahl der analogen Schrägspurverfahren.[17] Würde er nämlich bei 4,43 MHz belassen, ergäben sich unauflösbare Konflikte mit dem Helligkeitssignal, das denselben Bereich überstreicht. Der noch wichtigere Grund für die Entwicklung dieses Verfahrens war allerdings die zu geringe Konstanz der Kopf-zu-Bandgeschwindigkeit, welche zu stark veränderten oder gänzlich verlorenen Farben geführt hätte. Im Bereich der Farbe wirkt sich ein Zeitfehler im Signal nicht mehr als seitlicher Fehler aus, sondern als Farbverschiebung. Ist sie zu stark, hat dies nicht korrigierbare, unruhige Farbschleier zur Folge. Der bei der Herabsetzung gänzlich verlorene Farbhilfsträger von 4,43 MHz muss nach dem Lesen und Verstärken des in der Frequenz um den Faktor 7 (U-matic) tieferen Farbsignals rekonstruiert werden. Selbstverständlich unterliegt auch dieses Signal den Unregelmässigkeiten der Kopf-zu-Bandgeschwindigkeit, aber diese können beim Heraufsetzen besser korrigiert werden. Die im Helligkeitssignal eingebetteten horizontalen Synchronimpulse weisen nämlich denselben Zeitfehler auf, der dadurch für die Kompensation der Fehler im Farbsignal die Korrekturwerte liefern kann.

Der Farbton bleibt beim herabgesetzten Träger in die Phase des Signals gelegt, während die Sättigung in der Amplitude aufgehoben ist. Das Signal wird beim Abspielen mit einer Pegelautomatik eingemittet, aber es kann bei extremen Farbtönen, z. B. Signalrot, zu Unlinearitäten in der Sättigungskurve kommen. Zudem ist mit einer Zunahme des Farbrauschens zu rechnen.

Die qualitativen Mängel sowohl des Direct-Colour- wie auch des Colour-Under-Verfahrens hat die Komponentenaufzeichnung überzeugend, allerdings mit entsprechend hohem Aufwand, gelöst: Die Farbinformation, die als **Komponenten-Signal** zuzuführen ist, wird in einem komprimierten Zeitabschnitts-Multiplexverfahren auf eine eigene Schrägspur unmittelbar neben derjenigen für die Helligkeit aufgezeichnet – es werden also zwei zusätzliche Köpfe auf der Trommel benötigt. Die beiden **Farbdifferenzsignale** teilen sich damit die Bandbreite dieser Spur.[18] Die Komponentenaufzeichnung war 1982 der Quantensprung innerhalb der analogen Schrägspuraufzeichnung, welche auch die gesamte Studio- und Produktionsumgebung verändert hat. Der nächste epochale Wechsel erfolgte mit dem Beginn der Digitalaufzeichnung wenige Jahre danach und ihrer breiten Durchsetzung ab der Mitte der 1990er Jahre. Das Prinzip der Schrägspuraufzeichnung wird beibehalten, aber die Fehler und Störungen äussern sich nun gänzlich anders: Bis zu einem gewissen Grade bleiben sie unterschwellig, weil sie dank Redundanz in der Codierung weitgehend korrigiert werden können. Über dieser Grenze, auch als «digital cliff» bezeichnet, manifestieren sie sich dann häufig dramatischer als zahlreiche der hier beschriebenen analogen Störungen – bis hin zum Totalverlust des Signals.

1 Bauelemente der Elektrik wie Kondensator, Widerstand und Induktivität sind zu dieser Zeit bereits bekannt und in Gebrauch, jedoch gibt es noch keine aktiven Bausteine wie z. B. die im ersten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts entwickelte Verstärkerröhre, mit deren Hilfe eine schwache Signalspannung einen deutlich stärkeren Stromfluss zu steuern vermag – Voraussetzung für die Nachrichtentechnik und die in den 1920er Jahren allmählich aufkommende Unterhaltungselektronik.

2 Die Punktepaare auf einer Zeile ergeben in der Bildfläche vertikale Linienpaare, die bei der Angabe der horizontalen Auflösung in Linien immer gemeint sind. Ein Linienpaar entspricht im Signal einer Schwingung mit positivem (weiss) und negativem (schwarz) Maximum. Die Linien- bzw. Punktepaare sind nicht mit den Pixeln der digitalen Medien zu verwechseln. Sie stehen in einem ähnlichen Verhältnis zueinander wie die Zeilen des Bildrasters zu den tatsächlich maximal darstell- baren horizontalen Linien eines Bildinhaltes im analogen Fernsehen bzw. Video. In der Praxis liegt der Faktor bei knapp 0,7.

3 Dies ergibt das sogenannte **Composite-Signal**, also ein aus den Helligkeits- und Farbkomponenten zusammengesetztes Signal, welches über eine Leitung geführt und mit entsprechender **Modulation** auch gesendet werden kann. Die Komponenten-Verbindung benötigt dagegen drei Leitungen, weil es sich um ein Derivat der RGB-Verbindung handelt: Summe von RGB (Helligkeit) sowie Rot minus Helligkeit und Blau minus Helligkeit. Die folgenden Ausführungen gelten für die Composite-Verbindung, und der Einfachheit halber steht Sender und Empfänger auch für die Quelle und das Ziel dieser Verbindung, ob moduliert und gesendet oder direkt mit Kabel im Closed Circuit des Studios verbunden.

4 Genau: 4,43361875 MHz.

5 (Farb-)Demodulation und Decodierung werden annähernd synonym verwendet. Auch bei der Decodierung handelt es sich ursprünglich um einen rein analogen Vorgang im entsprechenden Schaltkreis.

6 Akronym für Alexander M. Poniatoff Excellence.

7 Gilt für PAL. In NTSC-Maschinen waren es 14 400 Rpm.

8 Und zwar auch für die digitale Videoaufzeichnung. Abgelöst wird die Aufzeichnung auf Band nun durch diejenige auf Harddisk, laseroptische Medien wie DVD oder Blu-ray sowie nichtflüchtige Halbleiterspeicher wie zum Beispiel die auch aus der Digitalfotografie bekannte Compact Flash Card und zahlreiche weitere Kartenformate.

9 Andere «Schätzungen» geben über 100 an, von denen allerdings zahlreiche wohl nur als Prototypen existiert haben dürften.

10 Prominente Ausnahme bildet **VHS-C** mit seiner für Camcorder im Durchmesser verringerter **Kopftrommel**. Damit gleich lange Spuren geschrieben werden können beträgt die Umschlingung der Trommel 270°, und es sind mindestens 2 Kopfpaare notwendig. Mehrere Videosysteme zeichnen den Ton analog frequenz- oder digital pulscodemoduliert (**FM-** bzw. **PCM-Ton**) auf und benötigen dafür ein weiteres Kopfpaar. Bei Hi8 und **Betacam** wird für den PCM-Ton die Spur leicht verlängert, womit die Umschlingung ebenfalls etwas mehr beträgt als 180°. Weitere Ausnahmen: die Mehrzahl der 1" Formate mit 360°-Umschlingung und einem Kopf.

11 Gilt für PAL und Zweikopfsysteme mit 180° Umschlingung. Bei NTSC sind es 1800 Rpm.

12 Es handelt sich um eine Schwarz-Weiss-Aufzeichnung, die Farbigkeit der Felder ist reiner Zufall und ist eine Interferenzerscheinung der Magnetpartikel des Ferrofluids, die sich an den Feldlinien des aufgezeichneten FM-Signals orientieren. Bei einer moderneren Aufzeichnung mit höheren Frequenzen können deshalb die Interferenzen aus dem sichtbaren Spektrum hinaus gelangen. Präparierung des Bandes: Patrícia Falcão.

13 Die sogenannten Dropouts sind kurzzeitige Signalausfälle infolge Verschmutzung oder Abrieb der magnetischen Schicht an der betreffenden Stelle. Ein Rechenbeispiel: Ein kurzer Blitz, der auf einem 70 cm Bildschirm 3 mm lang ist, dauert ¼ µs. Auf einer durchschnittlichen Schrägspur von 10 cm Länge (**VHS**) entspricht dies einer Ausdehnung von knapp mehr als einem Tausendstel mm! Länger dauernde Ausfälle breiten sich immer entlang der Zeile in horizontaler Richtung aus – im Gegensatz zum Film, wo wir es eher mit vertikalen Kratzern oder flächigen Verschmutzungen zu tun haben.

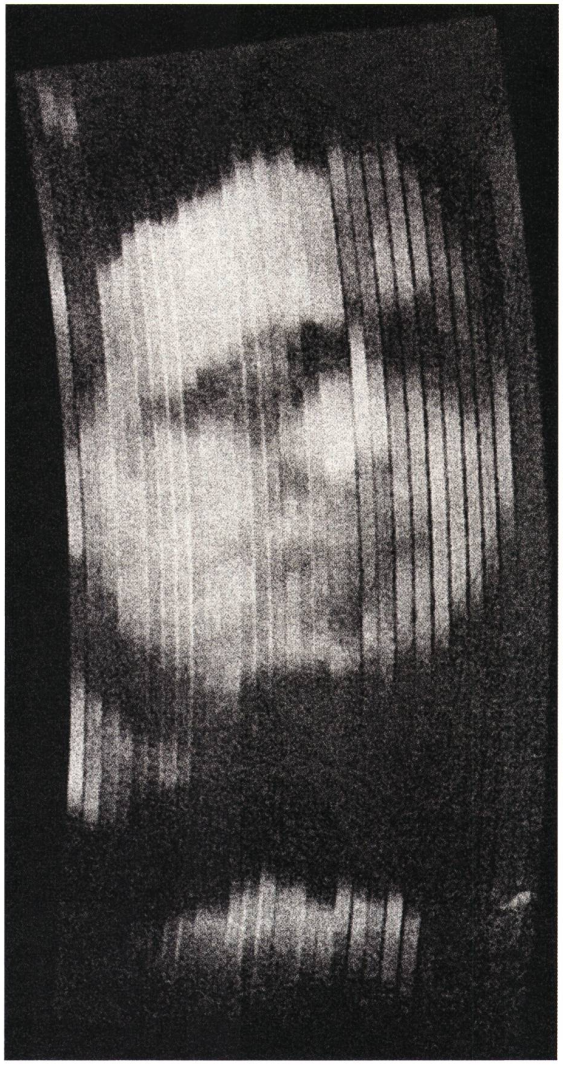
14 Dieses Signal kann bei Studiomaschinen mit RF Off-Tape Buchse ohne Eingriff ins Gerät auf einen Waveform-Monitor oder ein Oszilloskop geleitet werden und dient der exakten, manuellen Trackingregelung.

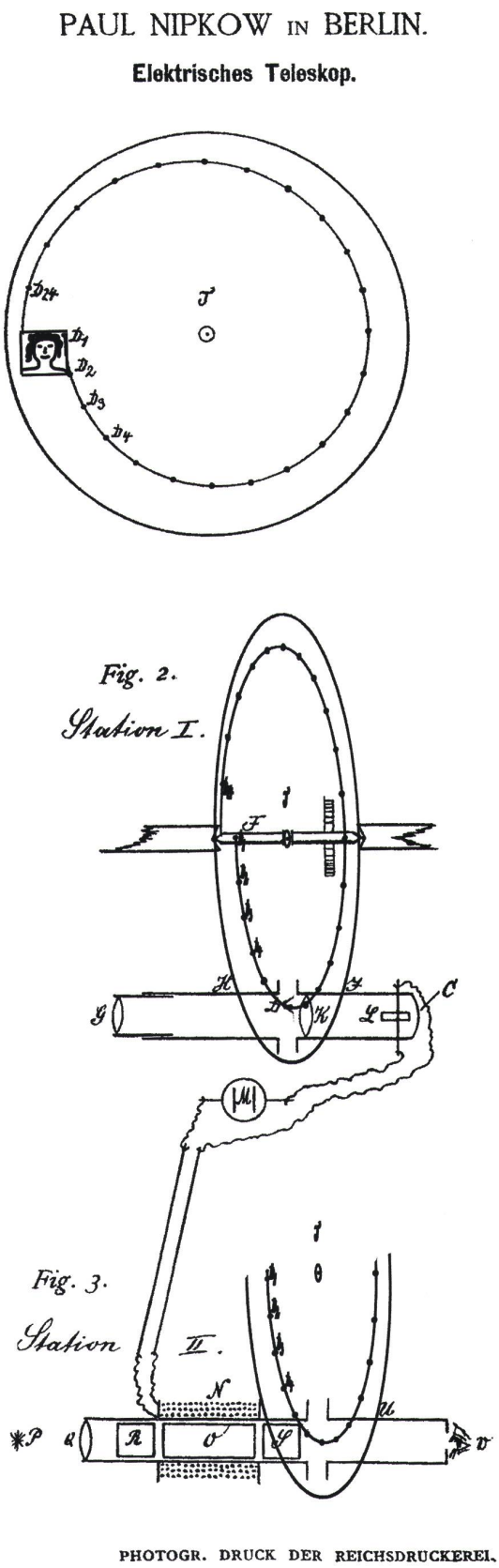
15 Vgl. Anm. 14.

16 Wir kennen die beiden Prinzipien vom Radio, wo ein deutlicher Qualitätsunterschied zwischen UKW (FM) und Mittelwelle (AM) liegt.

17 Nur wenige hochstehende Broadcast-Formate haben das unveränderte Composite-Signal insgesamt frequenzmoduliert aufgezeichnet (direct colour), während die grosse Mehrzahl der Industrie- oder Consumerformate (auch U-matic) den Farbträger herabgesetzt und unterhalb des Frequenzbandes für die Luminanz aufgezeichnet haben.

18 Damit die zwei Farbdifferenzsignale ohne Modulationsverfahren sicher auseinandergehalten werden können, müssen sie nacheinander auf diese eine Spur geschrieben werden. Ihre Dauer wird dazu in einem Speicherbaustein je auf die Hälfte komprimiert, was bei der Wiedergabe bedeutet, dass sie wieder auf die originale Länge gedehnt werden müssen. Bei diesem Vorgang wird auch der Informationsgehalt der beiden Farbdifferenzsignale je halbiert. Dieser Sachverhalt spiegelt sich in der Proportion 4:2:2 wieder, welche der Signalspezifikation «Komponenten» häufig folgt, und welche besagt, dass das Helligkeitssignal mit der vierfachen Taktrate des Farbhilfsträgers übertragen bzw. digitalisiert wird, die Farbdifferenzsignale jedoch mit nur je der doppelten.





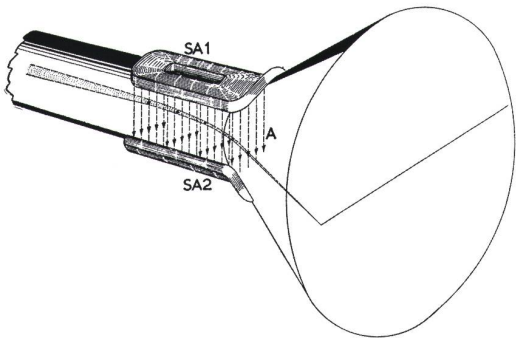


ABB. 1, LINKS OBEN
Die älteste bekannte Fotografie eines Bewegtbildes von Baird's «Televisor», um 1926 (abgebildet ist Baird's Geschäftspartner Oliver Hutchinson), Abb. in: Donald F. McLean, *Restoring Baird's Images*, London 2000, S. 41

FIG. 1, TOP LEFT
The first known photograph of a moving image produced by Baird's 'televisor', c. 1926 (the subject is Baird's business partner Oliver Hutchinson), fig. in: Donald F. McLean, *Restoring Baird's Images*, London 2000, p. 41

ABB. 2, RECHTS
Nipkow-Scheibe, http://histv2.free.fr/nipkow/patent5.pdf

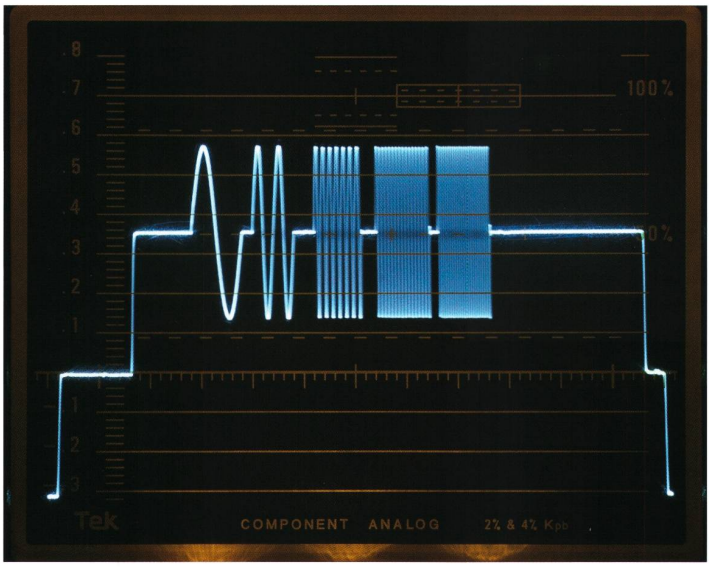
FIG. 2, RIGHT
Nipkow disk, http://histv2.free.fr/nipkow/patent5.pdf

ABB. 3, LINKS UNTEN
Die Bildröhre im Schnitt (nur Horizontalablenkung), Archiv des Autors

FIG. 3, BOTTOM LEFT
Cross-sectional view of a picture tube (horizontal deflection only), author's archive

ABB. 5
Vertikale Linien in abnehmender Breite repräsentiert im Zeilensignal, Foto: Johannes Gfeller

FIG. 5
Vertical lines of decreasing width represented in the line signal, photo: Johannes Gfeller



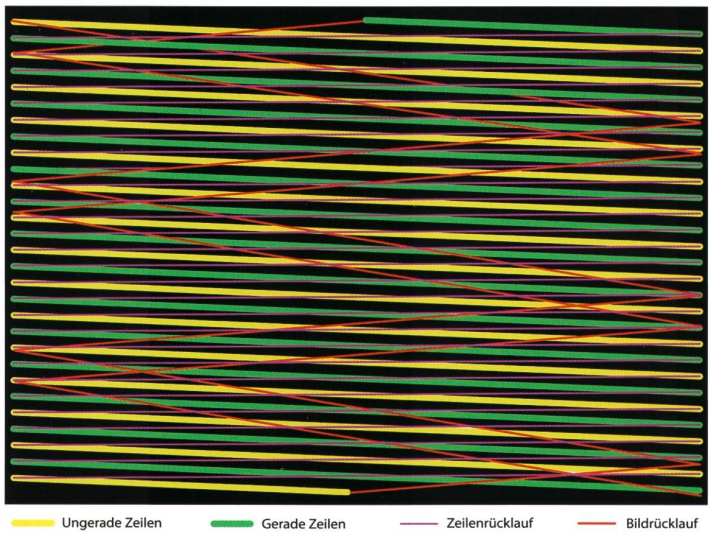


ABB. 4
Der Bildraster (vereinfacht dargestellt), Illustration: Johannes Gfeller

FIG. 4
Simplified depiction of the picture raster, illustration: Johannes Gfeller

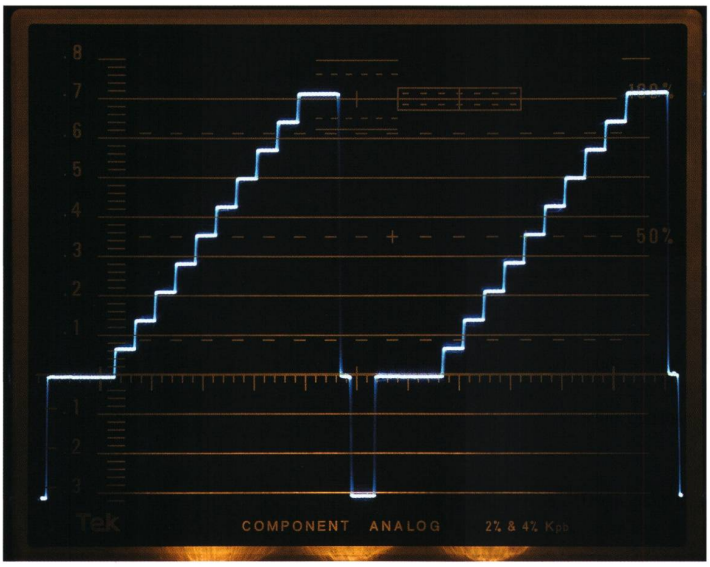


ABB. 6A
Oszillogramm einer einzelnen Zeile (Grautreppe), Foto: Johannes Gfeller

FIG. 6A
Oscillogram of a single scan line (grey-scale), photo: Johannes Gfeller

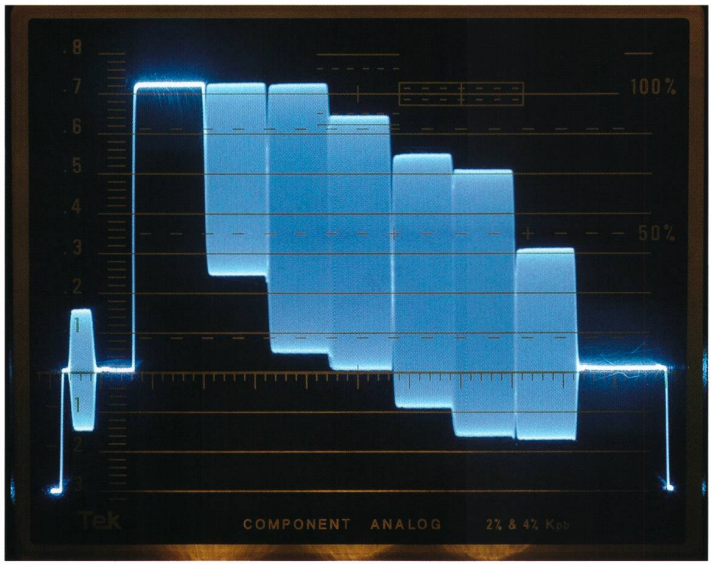


ABB. 6B
Oszillogramm einer einzelnen Zeile (Farbbalken), Foto: Johannes Gfeller

FIG. 6B
Oscillogram of a single scan line (colour bars), photo: Johannes Gfeller

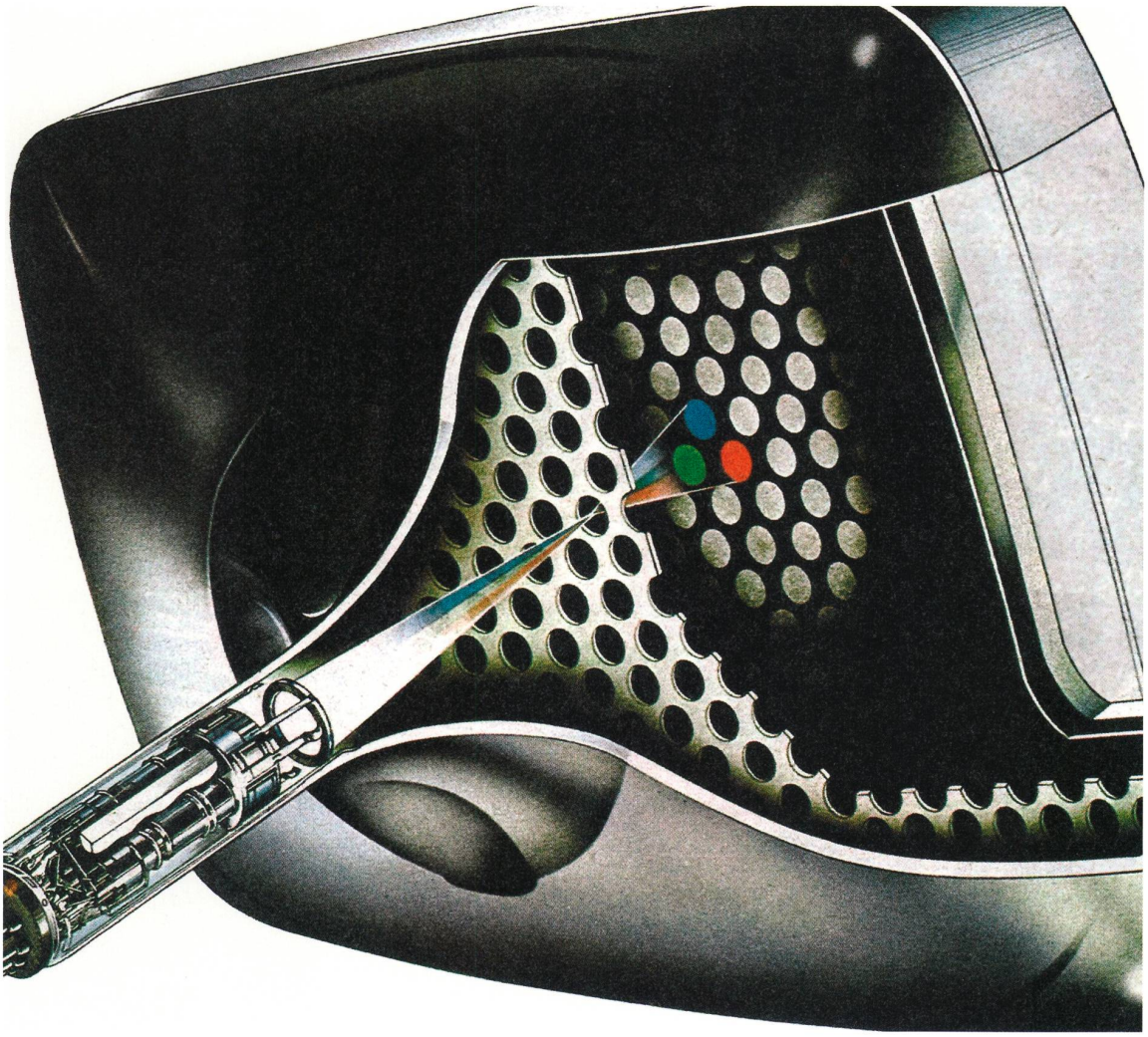


ABB. 7
Farbbildröhre im Schnitt,
Abb. in: Walter Bruch / Heide Riedel, *PAL – Das Farbfernsehen*, Berlin: Deutsches Rundfunk-Museum, 1987, S. 40

FIG. 7
Cross-sectional view of a colour picture tube, fig. in: Walter Bruch / Heide Riedel, *PAL – Das Farbfernsehen*, Berlin: Deutsches Rundfunk-Museum, 1987, p. 40

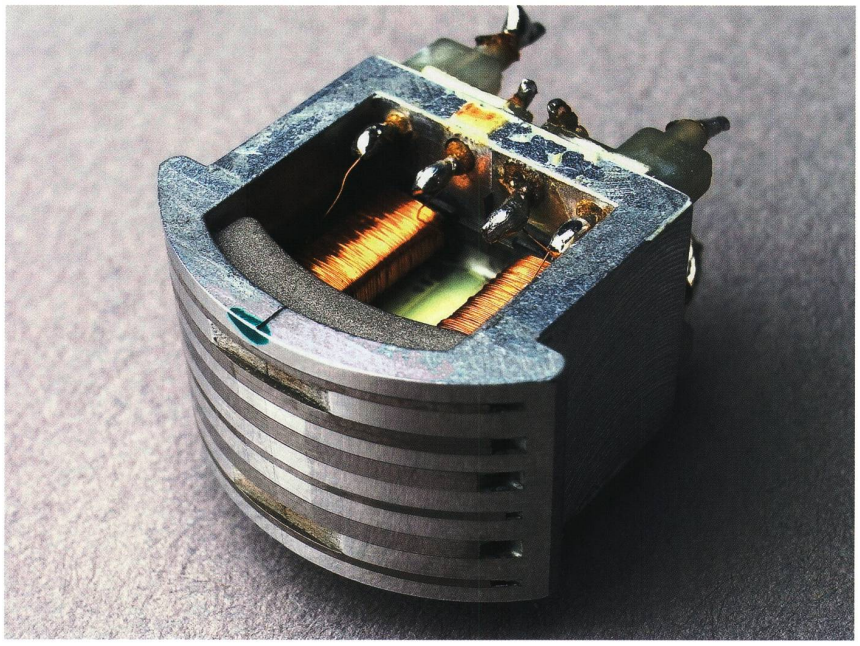
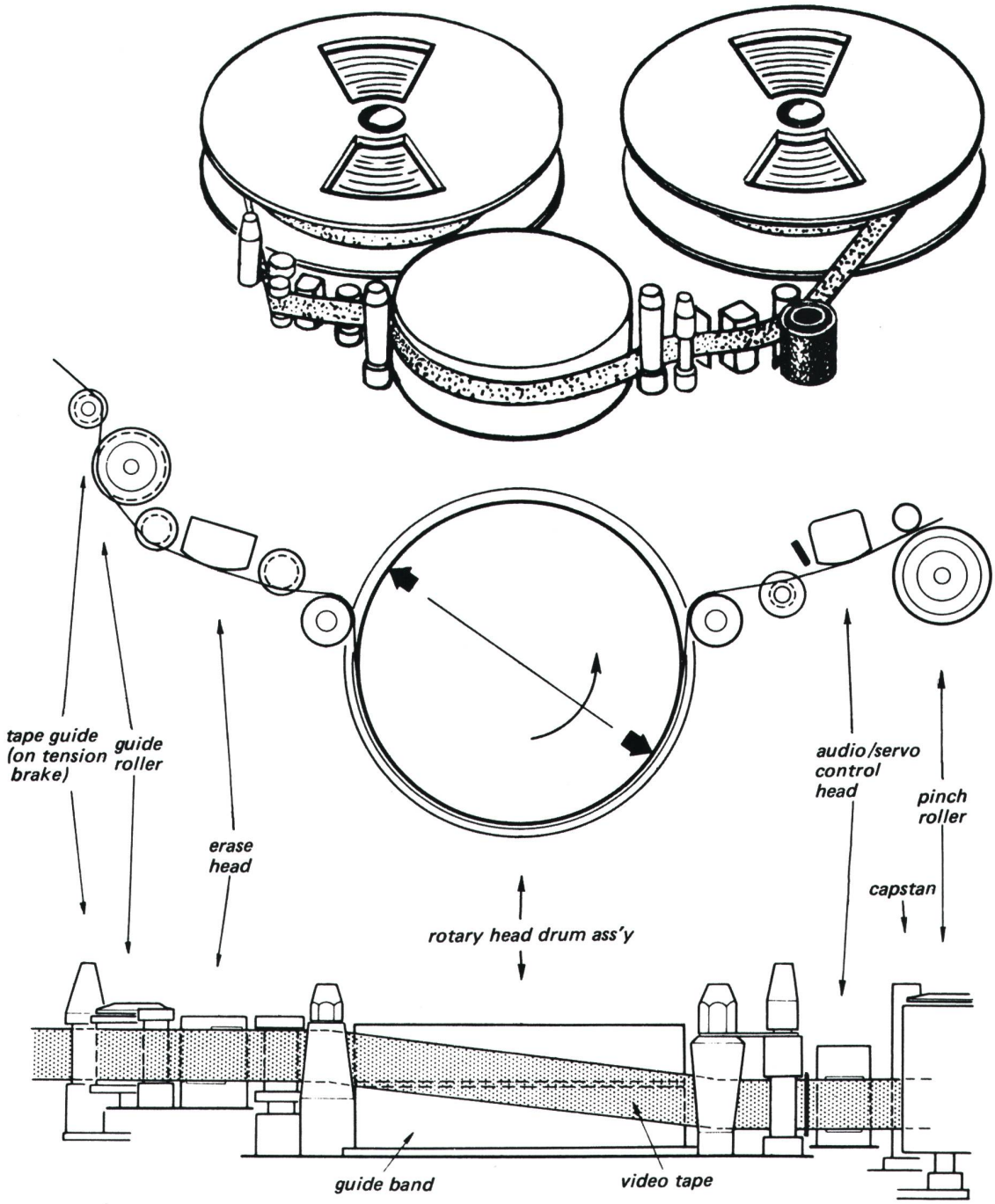


ABB. 8
Magnettonkopf geöffnet,
Foto: Johannes Gfeller

FIG. 8
Inside a magnetic audio head,
photo: Johannes Gfeller

ABB. 9
Der Bandpfad in Schrägsicht, von oben, von vorne (Sony CV-5600), Abb. in: *Service Manual Sony CV 5600*, o. J. [1967], S. 2-1, vom Autor bearbeitet

FIG. 9
The tape path viewed at an angle / from above / from below (Sony CV-5600), fig. in: *Service Manual Sony CV 5600*, n. d. [1967], p. 2-1, revised by the author



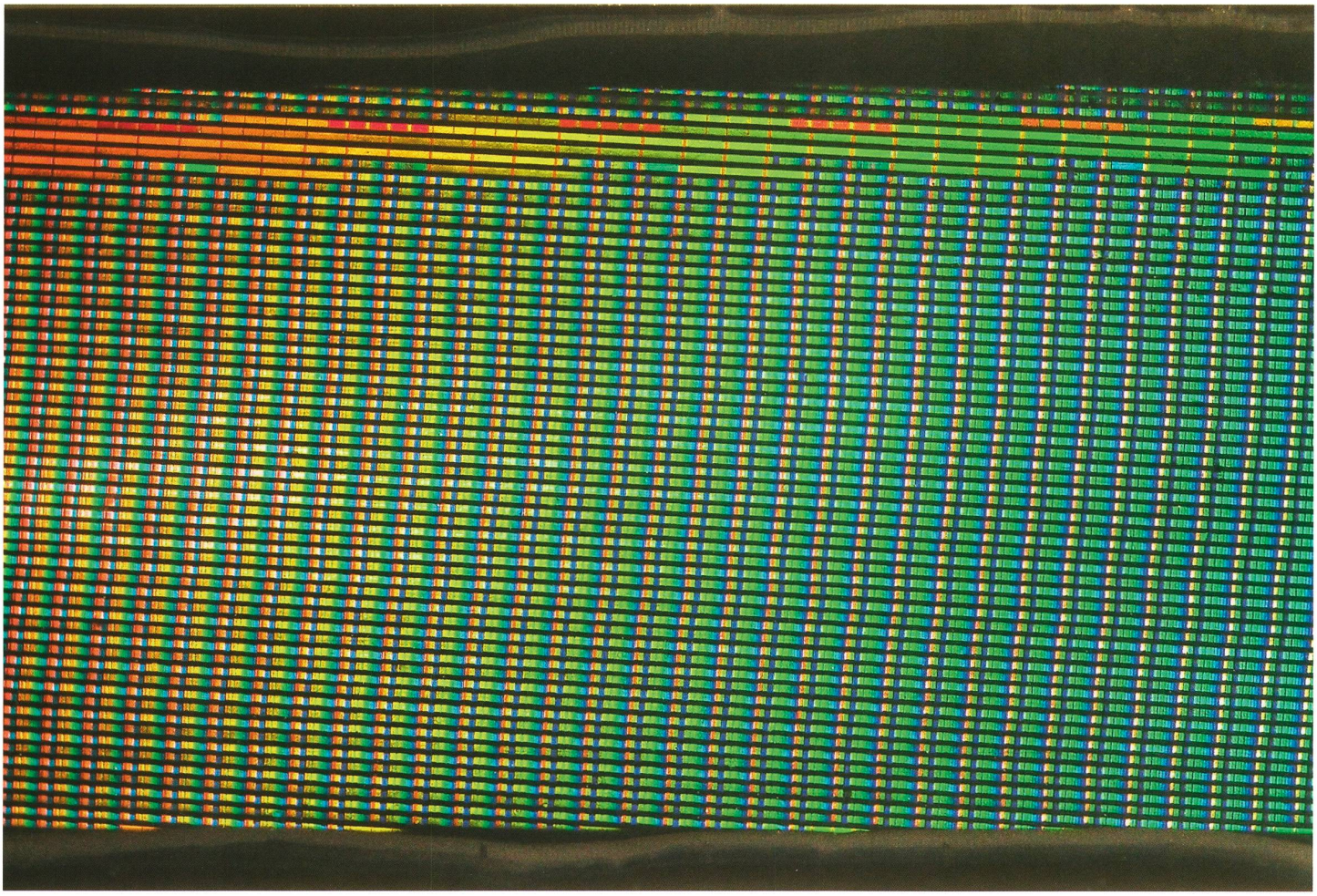


ABB. 10
Sichtbarmachung der einzelnen Spuren mittels Ferrofluid: Die Synchronpulse und die Felder der aufgenommenen Grautreppe können identifiziert werden, Foto: Johannes Gfeller

FIG. 10
Using ferrofluid to make individual tracks visible (sync pulses and individual grey-scale fields can be identified), photo: Johannes Gfeller

ABB. 11a
Sauberer Videokopf,
Foto: Johannes Gfeller

FIG. 11a
Clean video head,
photo: Johannes Gfeller

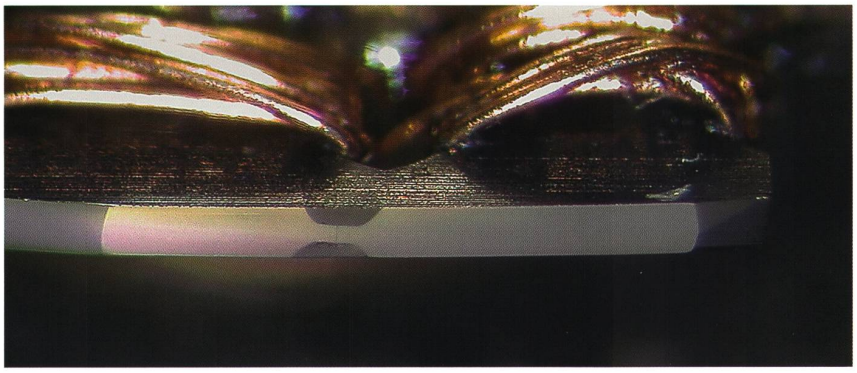


ABB. 11b
Verschmutzter Videokopf,
Foto: Johannes Gfeller

FIG. 11b
Dirty video head,
photo: Johannes Gfeller

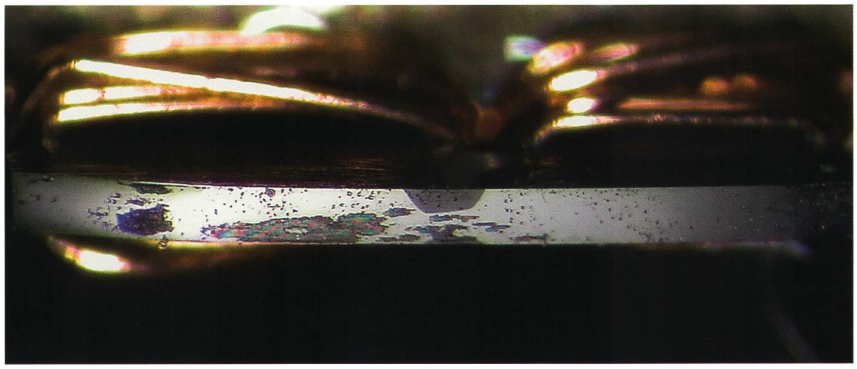


ABB. 11c
Völlig zugesetzter Videokopf,
Foto: Johannes Gfeller

FIG. 11c
Clogged video head,
photo: Johannes Gfeller

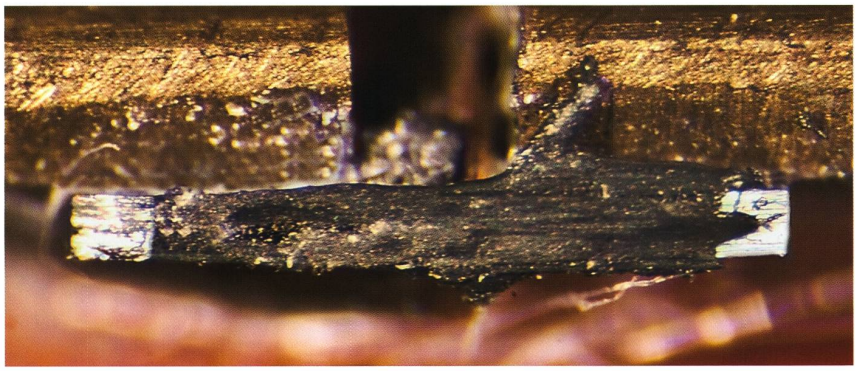


ABB. 11d
Ausgebrochener Videokopf,
Foto: Johannes Gfeller

FIG. 11d
Damaged head gap,
photo: Johannes Gfeller

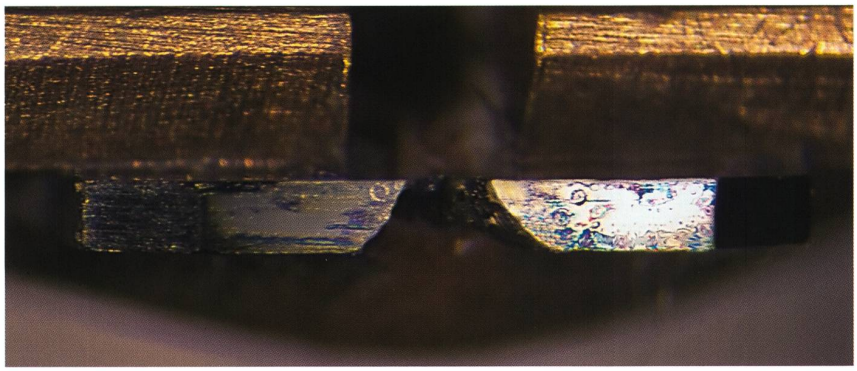


ABB. 12
Verschmutzter Umlenkbolzen beim Trommeleinlauf (Sony AV-3670), Foto: Johannes Gfeller

FIG. 12
Dirty guide pin on the feed side of the drum (Sony AV-3670), photo: Johannes Gfeller

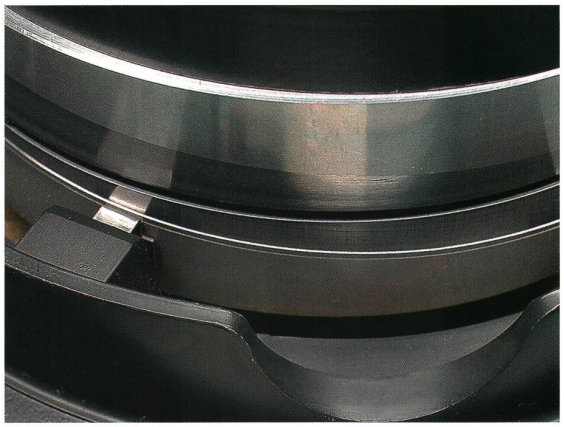


ABB. 13
Bandpfad um die Trommel mit deutlich sichtbaren Gebrauchsspuren, die hier aber noch im «grünen» Bereich liegen, Foto: Johannes Gfeller

FIG. 13
Tape path round the drum showing clear signs of wear (here still well within acceptable tolerances), photo: Johannes Gfeller

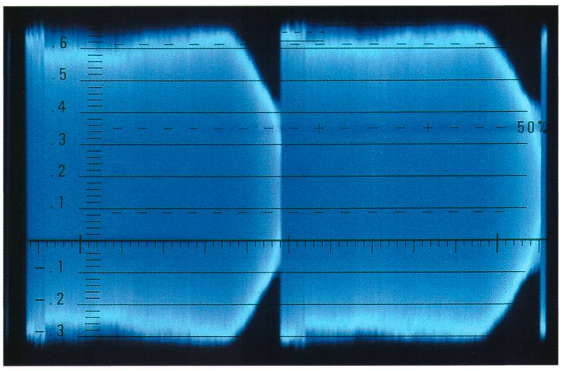


ABB. 14
Einschnürung des FM-Signals am Ende des Bandpfades um die Trommel, Foto: Johannes Gfeller

FIG. 14
Contraction of the FM signal at the end of the tape path around the drum, photo: Johannes Gfeller

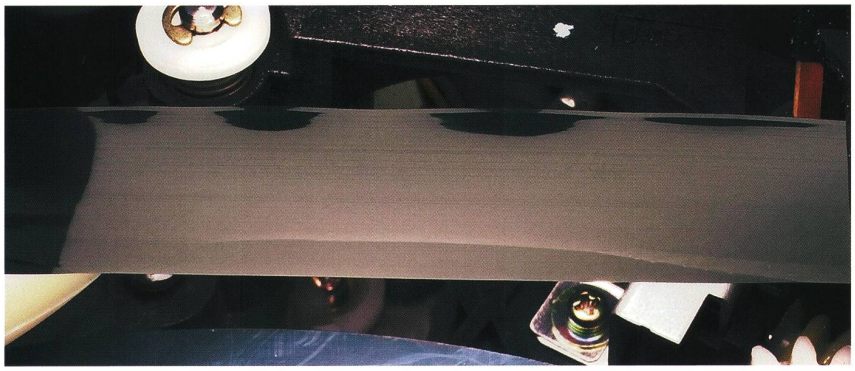


ABB. 15
Edge Curl (Aufnahme einer authentischen Situation in einem U-matic Player, für die Sichtbarmachung entsprechend ins Licht gesetzt), Foto: Johannes Gfeller

FIG. 15
Edge curl (photograph of a genuine situation in a U-matic player, spot-lit for greater clarity), photo: Johannes Gfeller

BASIC PRINCIPLES OF VIDEO TECHNOLOGY

Johannes Gfeller

Historical background

Some ten years after video recording was invented in 1956, shortly after the introduction of transportable video systems and immediately after the first truly portable video device became available, a new genre was born: video art. Because video technology is so closely bound up with television technology, we will start by taking a brief look at the development and technical underpinnings of television.

Some of our readers will already have asked themselves how television – which by this time had already passed through an experimental phase stretching from the late 1920s to the early 1950s and become a regular feature of everyday life – was able to exist without a storage medium such as video. After all, television simply transmits content that was originally recorded using a video camera.

Transmission precedes storage

If we take a good look at the history of technical media, we find that transmission almost always precedes storage. The camera obscura – but also its opposite number, the laterna magica – existed long before light-sensitive media. Animated (moving) pictures – also popular with projectionists – existed before celluloid strips, and indeed before there was any means of recording them 'from nature'.
Sound transmission precedes sound storage, and in fact presents an interesting paradox in the history of technology: sound was already being transmitted electrically before suitable storage was invented, and the latter remained mechanical in operation for another five decades.

Parallels between photography and telegraphy

These are already good reasons for questioning the traditional portrayal of a natural evolution from photography to film, then to television and finally to video, quite simply because this viewpoint takes no account of the significant role played by telegraphy in scientific, socio-cultural and economic development. Photography and telegraphy are both children of the same era, born in the same decade: the 1830s. Each of them, more or less independently, triggered a separate chain of developments – the visual and the informational – which have converged and culminated in today's digital age. Furthermore telegraphy is in essence a digital transmission system, and the use of telegraphic communication to transmit analogue signals (such as telephony) already appears as something of a historical interlude.
If we verify this parallel development by taking a closer look at the early history of television (which effectively represents the ancient history of video), we uncover the following facts: the principle that underlies every picture transmission – namely the scanning of an image area as a series of lines and dots and the accompanying (indispensable) synchronisation of transmitter and receiver – was described in a patent for an electrical telegraph capable of transmitting images, an ancestor of the fax, in 1843. This was quite independent of the invention of photography, which had been announced to the world (as a 'gift from France') some four years previously.

Parallels between film and television

The transmission of moving pictures was first considered seriously in the same decade as film: the 1880s. Once again, we find two separate development streams – in 1884, as Paul Nipkow applied for a patent for his 'electric telescope', both Marey and Muybridge had succeeded in reproducing motion using limited series of photographs, but had not yet managed to produce moving sequences lasting several minutes: this achievement took another 10 years. In other words, the inventors of film were interested purely in photographic storage so that later they could play back the captured images as often as they wished. Proponents of the electric telescope, on the other hand, were interested in direct, unmediated telegraphic transmission. That they only achieved technical success some four decades later does not contradict this interpretation of the history of ideas – television is the offspring of telegraphy, not of film.

The transmission and storage of pictures converge for the first time

In the late 1920s, efforts to run working tests finally culminated in the experimental transmission of moving pictures – a moment at which the transmission and storage of motion pictures briefly but simultaneously touched on a frontier that marked the transition from mechanical to electromagnetic storage. These first experimental television transmissions were still being stored by one of their leading proponents – John Logie Baird – on phonograph records, while at the same time the first experiments to record sound on paper-based magnetic tape were entering the very earliest laboratory stage. It was hoped that magnetic tape would replace the steel wire and steel tape that had been used since 1898. Even before the mid-1930s, the resolution of both mechanical television and its successor, electronic television, had increased to the extent that recording the consequently much higher signal frequencies on audio apparatus was no longer remotely feasible (fig. 1).

Technical background

While it had proved possible to 'cut' video signals onto phonograph records, and indeed to broadcast the first, very low-resolution television pictures over standard radio transmitters, nevertheless it is important to be clear about some of the physical principles that constrain television engineering.

Transmission and storage both involve multiple conversions of physical state

When sound is transmitted – and, to an even greater extent, when images are transmitted – we are dealing with the transformation of a signal from one physical

state to another over a given period of time. Furthermore, when the signal is stored, the period of time is expressed as a unit of length: as the groove on a record, as the magnetic track on a tape, or – as explained later – as the **helical track** on a videotape. To turn the unit of length back into the original period of time, we need to know the speed at which the recording was made. When playing back the recording, we maintain this speed as precisely and evenly as possible so that the unit of length does not become a narrative experience in its own right, but instead turns back into physical time. We are all familiar with the unpleasant experience of listening to audio played back at uneven speeds, and the negative impact on our sensitive ears. This phenomenon accounts for the majority of the image errors described in this reference guide: they are the symptoms and consequences of timing errors transformed back into their original physical states!

From one-dimensional dot and line to two-dimensional surface

If we take a grossly simplified monaural transmission model, sound could be defined as a one-dimensional extension in time; transmitted as an electrical signal, it would retain this one-dimensionality as a function of time.

A picture, on the other hand, has two dimensions: precisely one too many for it to be transmitted over a single wire or channel. Which is why an ingenious workaround is required...

All successful methods for transmitting static or animated pictures have divided the image area into individual lines which are transmitted sequentially, one after another. So what exactly is being transmitted? The dot-shaped sampling of the subject's brightness along one line produces a chronological sequence for this brightness, which is then transformed into the chronological sequence of an analogous signal voltage. The chronological sequences of all the lines that successively compose the picture correspond to a scan of the entire image area (picture).

If the picture is grey, only a single very slightly varying voltage value needs to be transmitted; if the picture structure is more sophisticated, the resulting signal will comprise an alternating voltage that tracks all the different changes. The greater the range of brightness (**luminance**) across a specific area of the picture, the higher the signal amplitude will be. The more complex the picture structures are across the same area, the higher the signal frequency will be.

Thus the upper threshold frequency of the transmission channel is what determines the possible resolution of the transmitted picture, as specified in (vertical) line pairs per (horizontal) **scan line**. **Resolution** is proportional to the number of lines, as determined by the system's specifications.

Mechanical television?

Prior to the advent of electronics (still a very distant prospect back in 1884)[1] the picture was broken down mechanically using a disk named after its inventor, Paul Nipkow. The disk is perforated by fine holes arranged at evenly spaced angular distances in a spiral, in such a way that they pass smoothly and seamlessly over the picture to be transmitted: there is always exactly one hole immediately above the surface of the picture and each successive hole follows along the same track as its predecessor. The projected light passes through each hole in turn and hits a photocell, which emits an electrical signal that can be relayed either down a single-wire transmission link or wirelessly, via a transmitter. This system cannot transmit any details finer than the width of a line, which is equal to the diameter of a hole.

At the receiving end an identical disk is spinning – precisely synchronised with the first disk – in front of a surface glow lamp (later replaced by neon) powered by the transmitted signal which, as we remember, represents the local luminance values in the original picture (fig. 2).

Electronic television!

When electronic television emerged in the 1930s, the mechanical perforated disk was replaced by an electromagnetically deflected **electron beam** in a high-vacuum cathode ray tube: a technique used henceforth in both cameras and picture tubes. The rotating disk was replaced by electronic circuitry that controls the vertical and horizontal deflection of the electron beam and generates the **picture raster** produced by scanning the picture according to precisely defined **timing** and equally precisely defined geometry. In a camera, the electron beam scans the light-sensitive layer – known as the target – line by line, converting the light energy stored as a distributed charge (i.e. the picture projected from the lens onto the photosensitive layer) into an equivalent voltage. The scanning of light-dark transitions produces corresponding changes in voltage. An aside: the electrical settings of the electron beam, that is, the beam intensity and focus, combined with the voltage applied to the target, have a decisive influence on the picture's characteristics – they determine its 'look and feel', as it were, something which it is vitally important to remember and preserve as we move swiftly into a digital future. It makes good sense to be aware of these relationships when restoring early black-and-white videotapes, or when reconstructing and replaying images from closed-circuit installations that rely on such CRT cameras – this artistic awareness is an essential part of the craft.

In the display tube of the monitor or television set, the invisible electron beam is turned into visible light by the phosphor coating on the screen. There is some limited afterglow, but it is primarily the persistence of vision of the human eye that converts this single dot, as it dashes to and fro, into a two-dimensional surface. To enhance this effect still further, the system does

not simply transmit 25 pictures (full frames) per second, but instead breaks them down into 50 half-frames or **fields**.[2] Each field only contains every other scan line; the gaps in the first field are filled up by the information contained in the second field, which is transmitted immediately after it. This means that the lines of both fields are interlaced – odd-numbered lines followed by even-numbered lines. This reduces the large-area flicker associated with slower frame rates, and increases the amount of time we are able to watch television (fig. 3).

Picture resolution and bandwidth

In countries that use the **PAL**/CCIR standard, 50 fields per second have to be transmitted for historical reasons relating to the mains power frequency. Each field consists of 312.5 scan lines distributed over the vertical height of the picture. Thus a full frame consists of 625 scan lines, of which only 576 actually carry picture content (fig. 4). While each line lasts for 64 µs, it is only actually visible for 52 µs. If the maximum number of horizontal lines that can be transmitted via the line scanning pattern is translated at an **aspect ratio** of 4:3 into the maximum number of dot pairs that can be transmitted on a single line[3], the result is approximately 260. Thus the shortest black-to-white change-over lasts just 0.2 µs (52 µs / 260). This corresponds to a frequency of 5 MHz, the **bandwidth** of the analogue TV signal (fig. 5).

Why can we not see all the lines; and why can we not see a single line for its full duration? The 'hidden time' is needed for the **vertical flyback** (retrace), i.e. the return of the electron beam to the top of the picture, and also for the **horizontal flyback** (retrace), i.e. the return of the beam from the right-hand edge of the picture back to the left-hand edge – this too represents a legacy of what was state-of-the-art engineering in the middle of the last century.

Picture content and sync pulses

All downstream devices in the transmission chain must adhere strictly to this timing, controlled by the **horizontal** and **vertical sync pulses** that are transmitted in the gaps between the pictures or scan lines. So each system can easily identify the sync pulses, they have a lower signal voltage than the voltage of the picture content. If a **video signal** had a difference in potential of exactly one volt, then the sync pulses would be zero volts, the black level would be 0.3 volts and the white level would be exactly one volt. Picture content should never be assigned to voltage levels that are exclusively reserved for sync pulses! However, this also means that the transmission channel can carry either the sync information or the picture content, but not both at the same time. Thus during the periods between the sync pulses, the equipment must be capable of operating on its own in an absolutely stable, predictable way. On a 50 cm screen, the electron beam needs one microsecond to travel one centimetre. If it arrives – in relation to the preceding lines – even fractionally too early or too late, the result is an unpleasant jitter or lateral distortion of the picture. Time base errors in the **luminance** or **synchronisation signals** cause lateral displacement of television and video pictures – in short, produce horizontal errors (figs. 6a, 6b).

From grey-scale to colour TV

An electron beam is not colour-sensitive, either during recording or during playback. So in order to transmit colour, a principle first discovered in the early days of colour photography was used. Instead of one pickup tube there were three, and in front of each tube was positioned a colour separation filter for one of the primary colours: red, green and blue. At the rear of the camera lens was a beam splitter that divided the picture into three equal parts, one for each tube. In a studio, a separate cable could be dedicated to each of these primary colours, but for broadcasting purposes only a single wire or channel was available. For this reason, the colour (chrominance) information had to be merged with the brightness (luminance) signal as a signal component[4]; moreover in such a way that black-and-white reception would also still be possible. A modern CRT colour television should be able to reproduce a black-and-white picture without a colour halo, thanks to the separation of the luminance signal from the **chrominance signal** – technically a relatively straightforward solution. A very high **carrier frequency** of 4.43 MHz (PAL), stable to the last decimal point[5], provides the reference for the chrominance signal that is combined with the luminance signal. In certain black-and-white monitors, the carrier frequency is clearly visible as a *>Moiré Effect*. Colour saturation is expressed by the signal's amplitude, and hue by the signal's **phase**, while the carrier itself is not transmitted. One cycle at this frequency has a period of less than one quarter-millionth of a second, during which time the signal can represent the entire colour spectrum. Thus a timing error of just a few nanoseconds in the chrominance signal will visibly falsify the picture's colours. Because the chrominance (colour) signal is separated from and then recombined with the **colour subcarrier** at various points in the transmission chain – this occurs in almost every video recording or playback device, from camera to **vision mixer** (or video production switcher) to video recorder to playback monitor – it is easy to see how different transit times could cause such timing errors to be introduced at each stage in the process: they would then have to be corrected. This is where the European broadcast standard PAL has a distinct advantage over the American **NTSC** standard, because it compensates for colour shifts caused by timing errors by offsetting them from one line to the next. This means that the errors can be corrected while they are still signals, during the decoding process, because the system always mixes the most recent colour component with a second component that has been delayed by exactly one line and shifted in the opposite direction. Any residual colour shifts in the picture are normally perceived by the human eye in the original (correct) colour, provided the viewer is positioned at a sufficient distance from the screen. Viewers who are

too close to the screen see what is known as a *>Venetian-blind Effect* (PAL). NTSC televisions and monitors, by contrast, need an easily accessible control knob on the front of the set so that hue settings can be adjusted: the **hue control**.[6]
The colour subcarrier that was suppressed at the transmission end must be reconstructed by the receiving device in order to provide a reference for the **demodulation**[7] of the colour signal, i.e. the recovery of the proportionate voltages for red, green and blue. In order to synchronise the colour subcarrier's oscillator, a brief signal is transmitted after each line sync pulse but before the start of the picture content: this is known as the colour **burst**, or simply burst. The signal is used to position the colour subcarrier at the correct phase angle, so that – rather like a tuning fork – it can maintain the colours at the proper place in the colour spectrum for the duration of one scan line. If synchronisation is unsuccessful, the colour hues shift from the left-hand side to the right-hand side of the picture more or less autonomously (cf. *>Loss of Colour Lock*).
In contrast to a black-and-white tube, a colour picture tube has three beam systems built into it, each one only capable of hitting the small phosphor-coated areas on the screen that have been allocated to it, which transform the invisible electron beam into red, green or blue light. These primary colours can be mixed to produce any colour, according to the relative intensity of the beams from each of the three systems (fig. 7).

How magnetic signals are stored ...

The principle of electromagnetic sound recording dates back to Valdemar Poulsen, who was awarded a patent for his telegraphone in 1898. Alas, electronic amplifier circuits had not yet been invented, which probably explains why the subsequent development of electromagnetic information storage was so slow to get off the ground.
A magnetisable medium is drawn past an electromagnet, which is fed with sound energy that has been converted to alternating voltage by a microphone. The recording medium may be steel wire, steel band or even a metal disc. As the carrier medium moves past the electromagnet, it carries away with it the north-south or south-north polarity of the magnetic field at the electromagnet's pole, which is constantly changing in response to the electrical signal from the sound wave. Once again, time is basically being transformed into a unit of length, as is the electromagnet's field strength: the lines of force of the stored magnetic fields are physically extended as they are laid down along a length of recording medium. It makes no difference whether the recording medium consists of homogeneous magnetisable material or tiny isolated particles – the operating principle remains the same, although it is perhaps easier to imagine millions of minute magnetic particles embedded in a carrier medium, each carrying its own individual polarity. Only some thirty years after Poulsen's invention was the information-carrying magnetisable material separated from the passive substrate. Initially paper tape was used as a substrate; later on it was replaced by plastic tape. The basic principle of electromagnetic storage remains essentially unchanged to the present day and the advent of the hard disk drive. The technical execution, however, has changed out of all recognition.

... and the challenges that were overcome

The principles of modern magnetic tape recording were developed in Germany during the 1930s: in 1932 Eduard Schüller invented the air-gap **magnetic head**; in 1935 BASF perfected the actual tape using a cellulose acetate substrate, and in 1940 Walter Weber invented HF (also known as a.c.) biasing. In 1945 two tape recorders and 50 tapes were taken to the USA, which resulted in the construction of the first American audiotape recorders in 1948. These were built by Ampex and funded by singer, actor and entertainer Bing Crosby, who was interested in pre-recording his radio broadcasts so that he would no longer have to produce them live (fig. 8).

From audiotape to video recorder

From 1951, Bing Crosby Enterprises and Ampex[8] worked on recording video signals onto **magnetic tape**. There were two major incentives: first, the possibility of pre-recording television broadcasts, and second, the financially motivated desire – in a country that straddles three time zones – to be able to broadcast two repeats of a program an hour apart.
Although they are technically related, a quantum leap separates audio recording from video recording. It helps to illustrate this gulf mathematically: even at that time, television was operating at a bandwidth of 5 MHz (NTSC 4 MHz), as mentioned earlier. The first Ampex tape recorder supported a bandwidth of just 15 kHz – that is, 0.015 MHz. At a given level of process engineering for manufacturing magnetic heads and tapes, the only way to increase the bandwidth – and crucially, the upper frequency limit in particular – is to increase the **tape speed**. However, tape recorders at the time were already transporting tape at 76 cm/sec. A simple mathematical calculation shows that the tape speed required for television-standard bandwidths would be well over one hundred metres per second – a technical impossibility. Various experiments were made with tapes running at speeds of several metres per second, but the physical problems, abbreviated recording time and unsatisfactory quality of the recordings meant that development work on longitudinal track recording by Crosby, RCA (Radio Corporation of America), the BBC (British Broadcasting Corporation) and other innovators soon came to an end.

Success at last!

From segmented picture to segmented recording

In fact, the solution to the problem lay in the television signal itself: it is true that this involved a change of state into a time continuum that needed constant synchronisation and extraordinarily stringent precision, but on the other hand, this continuum had already been subdivided into line and frame durations. What

could be more obvious, then, than to transcribe these time segments in the signal onto tape again in the form of linear segments with a physical extension in space? After all, the only thing that mattered was the relative speed of the recording/playback head in relation to the tape. This meant that tracks could be recorded at high speed while the tape was transported round the system at relatively low speed – better still, the tracks could be positioned adjacent to each other, with just a narrow gap of unrecorded tape between each one. Four heads were mounted on a wheel, positioned at 90° to each other. The wheel, which had a diameter of slightly more than 52 mm, was positioned at right-angles to the tape and rotated at a speed of 15,000 rpm.[9] A partial vacuum sucked the 2" wide tape into a groove that was exactly cylindrical in shape so that the head wheel fitted into it precisely. Thus one head was always in contact with the tape, guaranteeing the continuity of the signal. This **transverse scan method**,[10] although difficult to construct and expensive to maintain, remained in use from 1956 until the early 1980s – but only by production studios and television broadcasters.

In the early 1960s the **helical scan method** was introduced for industrial use; later it also appeared in consumer devices. It is still the leading method of tape-based video recording today.[11] Here the tape is no longer curved into a hollow cylinder, but guided at a slanting angle around a cylinder known as the **head drum**. The **video heads** are mounted on this drum. There are well over 50 different helical formats,[12] but the majority of them are characterised by a 180° angle of tape wrap around the drum and a pair of video heads positioned opposite each other for recording and playing back the video signal.[13] As in an audio tape recorder, the **audio signal** is recorded on a **longitudinal track** that runs along one edge of the tape (fig. 9).

Fast head-to-tape speed, slow tape transport

The head drum can be definitively described as the heart of a video recorder: almost everything turns around it – more or less literally. The tape is guided relatively slowly round the drum (at just a few cm/sec), while the heads spin at a rotational speed of 1,500 rpm[14] either inside a (stationary) upper drum or mounted on a (rotating) upper drum. Depending on the drum's diameter, the relative **head-to-tape speed** in a video recorder ranges from 25.59 m/s for 1" C-format tape (1976) down to 3.1 m/s for **Video8** tape (1984).

Drum diameter, track angle, tape speed

A feature shared by all drum-based systems is the mathematical relationship between the drum's diameter, the **track angle**, the track width and the absolute tape speed. This interdependency may be described as follows: a single helical (diagonal) track, which contains exactly one field (= half-frame), must be long enough for a system with a given **head gap** and magnetic particles of a given size to attain the maximum threshold frequency required for the recorded signal. The narrower the gap and the smaller the particles to be magnetised, the lower the relative head-to-tape speed can be, which in turn means each track can be shorter. But because a narrower gap exhibits undesirable characteristics at high frequencies, certain constraints apply; in addition, the magnetic particles must have substantially higher **coercivity** (coercive force) in order to be able to induce a sufficiently strong playback signal.

This is also why individual tracks cannot be made arbitrarily narrow, even when this is mechanically feasible. Noise immunity and **signal-to-noise ratio** both impose limits on recording parameters. All these factors together can be used to calculate the optimum angle of inclination of the tracks. A (desirable) consequence of shortening the helical tracks is a reduction of both the diameter of the drum and the width of the magnetic tape. The angle and width of the track, plus the drum's diameter, together determine the tape speed. In the laboratory, it is possible to make helical tracks visible, hence to calculate the drum diameter and tape speed of a format even if the format is unknown. Unfortunately this method of analysis is too risky to use with original recordings (fig. 10).[15]

Friction and air cushions

Early helical track formats on **open reel** systems used fixed lower and upper drums; the video heads rotated in the narrow slit that separated the two halves of the drum. Since then, all helical scanning devices use a fixed (stationary) lower drum, with the heads mounted on a rotating upper drum assembly. As the upper drum rotates in the same direction as the tape transport, suitable grooves in the drum's surface produce a cushion of air that reduces friction between drum and tape. This is also a fundamental prerequisite for reducing the thickness of the tape, which – combined with the previously mentioned decrease in tape speed – was an essential step in reducing the size of cassette formats while simultaneously increasing their recording times.

Friction and tape tension

Friction varies, depending on tape manufacturing tolerances and the condition of the recording or playback equipment – but also as a function of temperature and relative humidity during recording or playback, as well as the number of tape movements in the machine. Another factor is, of course, the aging of the tapes, although when these systems were first designed this was probably not easy to assess. Hence some kind of compensatory mechanism for handling varying degrees of friction is required, especially since the tape is supposed to have a precisely defined mechanical tension as it winds round the drum. If the tape is too slack, the **head-to-tape contact** will be less than optimal, resulting in reduced signal strength and increased noise. Conversely if the tension is too great, the air cushion may not form properly. This will generate (undesirable) lateral forces because the lower drum section will exert an increased braking effect, for which the spinning upper drum must then compensate by exerting more force. This will also cause the heads to press harder against the surface of

the tape, exacerbating the wear on both heads and tape and producing more **debris**, while simultaneously attenuating the signal strength. For these reasons the tape tension at the upstream side of the drum should not deviate significantly from the tension at the downstream side. In other words: friction loss at the drum should be minimised.
This is why every helical scan system has a more or less sophisticated **tape tension regulator**, similar to that found in audio tape recorders. Incorrect tape tension appears as a clearly visible lateral distortion along the bottom edge of the picture whenever the heads switch. **U-matic** machines have what is known as a **skew control**, which allows the user to make fine mechanical adjustments to the tape tension (within narrow limits). This also applies to the majority of open-reel formats. Degraded videotapes may fall outside the control range, in which case they will suffer from *>Skew Error*. Skew error is tolerable within certain boundaries because it does not have a direct impact on the visible picture.

Clogging, (self) cleaning, wear and tear

The above-mentioned air cushion is also necessary because while the tape is supposed to be as smooth and frictionless as possible (to minimise tensile forces round the drum), it is also expected to be very slightly abrasive, so that very fine particles of dust or dirt either do not settle on the heads or are wiped off by the tape[16]. Whereas users of open-reel systems soon got into the habit of regularly cleaning the tape path and video heads, cassette tape machines are much less accessible. Of course there were – and still are – head **cleaning tapes** containing tape that is much more abrasive than standard videotape. But precisely because of their abrasive effect they should not be used too often, so that the heads are not abraded unnecessarily (figs. 11 a–d).
Thus in addition to the magnetic parameters of the actual information carriers in a tape, the physical characteristics of its surface play a key role in determining how smoothly and evenly the tape can be drawn round the drum, and this in turn has a direct effect on the picture's horizontal stability.
The various tape constituents – which include **binders** and lubricants, but also abrasives, antistatic agents and other additives – all change over time, in the process changing the tape's operating characteristics. If these agents build up round the drum and **tape guides** (angle **pins**, posts, etc.), they increase the static friction significantly so that the tape begins to squeak or **squeal**; eventually it may even seize up completely (fig. 12).
Wear and tear in the recording/playback equipment may also affect the tape path, as well as the static and sliding friction round the drum and tape guides (fig. 13).

The tape path upstream and downstream of the drum

Upstream of the drum, the tape is drawn from the supply reel past the tension sensor (which regulates tape tension), then past the **erase head**, then past a number of angled guide pins that pitch the tape at the right angle to pass round the head drum. Downstream of the drum the tape is drawn past several guide pins and rollers, then past a combined audio and **control head** and finally past the **capstan** drive onto the take-up reel. In cassette systems, the tape travels past a number of additional guide pins and rollers between the capstan and the take-up reel. If the guide pins positioned immediately before and after the head drum are bent or worn, or their height is misaligned, the tape may be wrapped round the drum at the wrong angle, which produces the symptoms associated with *>Tape Misalignment*. An oscilloscope will often show a more or less distinct contraction of the FM signal (= amplified head signal prior to demodulation) as the tape enters or leaves the drum,[17] which may show up in the picture as a slight increase in noise along the top or bottom edges. **Edge curl** manifests precisely the same symptom, although the reason is different: a tape that is curled along the edges may have poor or non-existent head-to-tape contact, even though the head is tracking correctly (figs. 14, 15).

Tape speed – steady as she goes

For gramophone records and audiotape, a constant playback speed is a critical prerequisite for the reproduction of sound without variations in pitch. The same is true – to an even greater extent – of video recorders. Any unevenness in the tape speed or head drum rotation will result in a *>Time Base Error*. Depending on the frequency of the fluctuation, time base errors may manifest themselves as lateral distortion over the picture as a whole, or as a more or less wavy distortion of any vertical edges in the picture. Newer video players all have an electronic **servo circuit** that controls the tape speed: this works by comparing **control pulses** from the tape's **control track** with a quartz-stabilised reference signal. If the pulses are too slow compared to the reference signal, the servo causes the capstan drive motor to accelerate; if they are too fast, it slows the motor down. The controller is damped so that it does not cause a see-saw effect, but is designed to react as fast as possible so the picture is quickly stabilised after a deviation, and also so that a stable picture appears as soon as possible after the 'Play' button is pressed. Wear along the tape path, or deterioration of the drive belt or rollers, or degradation of the frictional properties of the tape, all cause this electromechanical control loop to work outside its optimum operating parameters, which in turn produces more instability in the picture. The underlying problem (as we learned earlier) is that time, stored on tape as physical length, can no longer be accurately converted back to its original, uniform, real-time self.

Steady-speed drum rotation, fast-reacting compensation

We should now turn our attention to the second, even more important control circuit: the one that controls the speed and angle of rotation of the head drum. During recording, the rotational speed of the drum

must be adjusted to match the video signal that is being recorded. As a rule, this should be exactly 50 fields (half-frames) per second, but the system should be able to react to minor variations. Speed is not the only thing that must be adjusted to match the signal – it is also important to ensure that at the start of each field, the video head is positioned at precisely that point on the drum where the tape starts to wrap round the drum, i.e. where the head-to-tape interface begins. The motion of the head immediately before it arrives at this point is captured magnetically and transformed into an electrical pulse that should coincide exactly with the sync pulse in the video signal. Any deviation is converted into a control voltage that speeds up or slows down the head drum as appropriate. Again, this control loop is supposed to react very quickly, albeit with appropriate damping, in order to avoid lateral instability. The electronic damping system is precisely attuned to the mechanical inertia of the head assembly and tape drive. If the mechanical parameters alter as a result of wear and tear or degradation, the entire control circuit will stop working efficiently. So that the tracks on a tape can be found again during playback, the above-mentioned pulse generated by the head drum at the start of each helical track is recorded onto the videotape's control track – which runs lengthwise along the tape on the opposite side from the soundtrack – where it is recorded and played back completely independently of the head drum. During editing, when a tape is being copied from one tape machine to another and vision mixers (video production switchers/special effect generators) and time base correctors (**TBCs**) are also connected into the circuit, the interconnected equipment is generally supplied with a centralised studio clock pulse. When **editing** is attempted without a central clock pulse, or if a clock pulse is present but overridden by interference, or if the tape machine's ramp-up time is too abrupt, synchronisation errors may appear – immediately after an editing cut in particular. This represents the time required by the servo circuit, the capstan and the drum to rectify an uneven clock pulse.

Causes of tracking errors

If the angle of rotation of the drum and its heads does not coincide with the start of the helical track as indicated by the sync pulse on the control track, the result is a *>Tracking Error*: the video head either completely fails to find the recorded track, or only comes into partial contact with it. Partial contact is actually more dangerous if it is not identified immediately. On a superficial viewing the picture appears to be acceptable, but in practice the signal-to-noise ratio is reduced, with a corresponding impact on the picture structure and its susceptibility to, for example, **dropouts**. This is why, when copying content from very old tapes in particular, it is vitally important to be as painstakingly precise as possible when adjusting tracking settings using whatever pointer-type instrument or external oscilloscope is available – the acceptable range for the optimum setting may be very narrow indeed![18]

We should avoid confusing a *>Tracking Error*, which often occurs when tapes have been recorded on another machine, with a *>Time Base Error*, which appears because of an incorrect time constant in the servo loop and periodically displays noisy areas. There are many possible reasons for this: in older tape machines without direct drive to the drum, it is often due to a worn-out, brittle or dirty drive belt. The symptom may also be produced by a tape with impaired mechanical properties, or by an incorrect setting in the servo circuit itself. For example, the reduced capacity of dried-out electrolytic capacitors may modify the control circuit's time constant. Other causes include general mechanical wear and tear, or oil that has dried into sintered bearings. One thing is almost always true: very few of these phenomena occur in isolation!

The connection between tracking errors and the condition of the video heads

A *>Tracking Error* in the narrower sense is characterised by its simultaneous impact on the entire picture, from top to bottom. If it is only clearly visible over half the height of the picture or less, a *>Tape Misalignment* is superimposed over it. In this case, if the tracking control is moved to either side of its neutral position, it is easy to see how the on-screen zones of interference change or drift vertically up or down. This also represents a crudely empirical but more or less valid method for determining the condition of the video heads, ideally using a fresh **test cassette**: if the control can be moved a relatively long way from neutral without causing marked deterioration in the picture structure, this generally indicates that the heads are still in good condition. A narrow zone of noise during slow-motion playback acts as a similar indicator. However, both symptoms only provide clues; experience is required to interpret them correctly. If the picture is slightly grainy, and this doesn't change even when the **tracking control** is adjusted, either the heads are worn and should be replaced, or they are dirty and should be cleaned. Worn and/or dirty heads are also prone to more frequent dropouts.

Why does noise increase but luminance remain constant?

When photographic film degrades, this almost always has an impact on the picture's contrast, colour and brightness. Why is this different in videos, when older tapes emit weaker signals or heads are slightly dirty? The luminance information in the video signal bears a direct, almost linear relationship to the brightness of the subject. However, this information cannot be recorded on tape just as it is, because the head gap is only optimised for a specific frequency range – above and below this range the signal strength decreases drastically. A grey picture, for example, has a large direct voltage component in the signal, because the brightness (luminance) does not change. But only alternating voltages can be recorded.

This is why the luminance signal is recorded to tape in frequency-modulated form, i.e. a transient voltage

level at the modulator's input corresponds to a specific frequency at the modulator's output, whereas the amplitude of the output signal – the signal that is recorded on tape – remains constant. 0 volts in the video signal – representing the sync pulses – produce a 4 MHz head signal, for example, whereas 0.3 volts (black level) produce a 4.5 MHz signal, while white peak, at 1 volt, produces a 5.7 MHz signal (this varies from one **video format** to another, with later formats tending to higher frequencies). The difference between the frequency produced at 0 volts and the frequency produced at 1 volt is known as the frequency deviation, or **frequency swing**. Thus the brightness of the subject is converted into a frequency. Even if the signal is weak, the frequency that represents a given level of brightness always remains the same. While the quality of the demodulation may vary, resulting in increased noise, the picture brightness itself is not affected. This also makes it easier to transfer the signal from the heads on the rotating head drum to the stationary head amplifier in the video player via slip rings or a rotary transformer: an amplitude-modulated relay would be much more susceptible to interference, which would be clearly visible as a flickering effect in the picture[19]. In analogue video – which is the exclusive topic of this book – each copy operation causes the picture quality to degrade, a process referred to as generational loss. This loss is kept to a minimum if each copy is always made onto a higher-quality format, with frequency response limits significantly superior to those of the information to be copied and background noise levels significantly lower than those already found in the source material. Even so, there is no such thing as a 'transparent' analogue channel – i.e. one that is not affected by loss or non-linearity – and attempts to record onto a higher-quality format every time a copy is made will, sooner or later, run into technical constraints (especially if the original quality was already high), not to mention the inevitable financial constraints.

But could the colours fade?

We all know that colours can change. The chrominance signal is recorded in a frequency band below that of the frequency-modulated luminance signal, hence the description **colour-under method** for the stepped-down colour carrier used in the majority of analogue helical scanning systems.[20] Left at 4.43 MHz, it would have conflicted irreconcilably with the luminance signal, which overlaps with the same frequency band. But an even more important reason for developing this method was the relatively inconsistent head-to-tape speed in most systems, which would have resulted in substantial changes to or even complete loss of the picture's colours. A timing error in the signal across the colour band does not appear as a lateral distortion, but as a colour shift – if it is too pronounced, it will produce a persistent but very nervous halo effect.

The 4.43 MHz colour subcarrier, which is completely lost when the signal is stepped down, must be recovered once the chrominance signal – which is lower down the frequency range by a factor of 7 (**U-matic**) – has been scanned and amplified. Of course this signal is also subject to any irregularities in the head-to-tape speed, but these variations are easier to correct once the signal is remodulated to a higher frequency. This is because the horizontal sync pulses embedded in the luminance signal are characterised by the same time base error, which can therefore provide the corrective values to compensate for the errors in the chrominance signal.

When the carrier is modulated down, the hue is preserved in the signal's phase while the saturation is encoded in the amplitude. During playback, the signal is centred by an automatic level compensator, but extreme hues such as fire-engine red may produce non-linearities in the saturation curve. Similarly, an increase in colour noise is to be expected.

The qualitative inadequacies of both the direct-colour and colour-under methods were convincingly resolved by component recording, albeit at a correspondingly high cost: the chromatic information – which must self-evidently be supplied as a **component signal** – is recorded using a compressed time-division multiplexing process on a separate helical track immediately adjacent to the luminance track: this means that two additional heads are required on the video drum. The two **colour difference signals** share the bandwidth of this track.[21] Introduced in 1982, component recording represented a quantum leap in analogue helical scanning that also transformed the entire studio and production landscape. The next major shift took place with the advent of digital recording a few years later, followed by its widespread adoption from the mid-1990s onwards. The principle of helical scanning was preserved, but digital errors and distortion are manifested in completely different ways: to some extent they remain subliminal, because redundancy built into the encoding methods largely compensates for them. If they should exceed this threshold, however – sometimes referred to as the 'digital cliff' – they tend to express themselves more dramatically than many of the analogue distortions described in these pages, up to and including a total loss of signal.

1 At this period, key features of electricity such as capacitance, resistance and inductance were already understood and exploited, but active components such as the amplifier tube – developed in the first decade of the 20th century as a way of enabling a weak signal voltage to control a significantly stronger flow of current – had not yet been developed. Such components were a prerequisite for telecommunications and consumer electronics as they gradually started to spread through society during the 1920s.

2 NTSC: 30 frames, 60 fields.

3 The pairs of dots on a line produce vertical line pairs in the picture field; when we talk about horizontal resolution in terms of lines, this is what we are referring to. In the signal, one pair of lines corresponds to a waveform with a positive (white) peak and a negative (black) peak. The pairs of lines or dots should not be confused with the pixels in digital media: they bear the same relationship to each other as the lines in the picture raster bear to the maximum number of horizontal lines of picture content that can actually be displayed in analogue television or video. In practice the multiplying factor is just under 0.7.

4 This produces what is known as a **composite signal**, i.e. a signal comprised of the luminance component combined with the chrominance components that can be relayed over a single wire and can also be broadcast if suitably **modulated**. In contrast, a component connection requires three wires, because it is essentially derived from an RGB connection, consisting of the sum of the RGB signals (luminance) plus red less luminance and blue less luminance. The following explanations apply to composite connections, and for the sake of simplicity will treat transmitter and receiver (i.e. a modulated and transmitted signal) as identical to connection source and target (i.e. a signal relayed over a cable that is directly connected to a studio's closed circuit).

5 In actual fact, state stable to the last decimal point would be 4.43361875 MHz.

6 Some further explanation may be helpful for those interested in the technical detail: in the PAL system, the colour subcarrier phase switches 180° between successive lines. This has one major advantage: a transmission path phase distortion in one line will cause a phase error in the opposite direction in the next line. If these are displayed on a TV set without compensation, the human eye tends to 'average out' the errors and perceive the correct colour. Prosumer and professional decoders are fitted with electronic systems that eliminate these errors.

7 The terms (colour) demodulation and decoding are used more or less synonymously. Originally, decoding was also a purely analogue process in the relevant switching circuit.

8 AMPEx: acronym for Alexander M. Poniatoff Excellence.

9 True of PAL. In NTSC machines it rotated at 14,400 rpm.

10 Known as 2-inch quadruplex videotape (also called 2" quad, or just quad).

11 Not just for analogue, but also for digital recording. However, recording on tape is rapidly giving way to recording on hard disk, on optical storage media such as DVD and Blu-ray, and on non-volatile solid-state storage media like the Compact Flash Card format familiar to digital camera users. New card formats have come up in the last years.

12 Some estimates suggest there are over 100 formats, although many of them probably only ever existed as prototypes.

13 With a reduced-diameter **head drum** designed for camcorders, **VHS-C** is a prominent exception. To make sure each recorded track is the same length, the angle of wrap around the drum is 270° and at least two pairs of heads are required. Several video systems record audio as analogue frequency-modulated or digital pulse-code-modulated signals (**FM** and **PCM audio** respectively), hence require an extra pair of heads. In the case of Hi8 and **Betacam**, each track is slightly extended for the PCM audio component, which means that the angle of wrap is slightly greater than 180°. Further exceptions: most of 1"-formats with 360° wrap and one head.

14 This is true of PAL and dual-head systems with a 180° angle of wrap. NTSC head drums spin at 1,800 rpm.

15 Widely known as Edi-view in the UK and USA. The recording is black-and-white; the colour of the fields is accidental – a symptom of interference by the magnetic particles in the ferrofluid, which orientate themselves to the lines of force in the recorded FM signal. In a more modern recording at higher frequencies, this interference may extend out of the visible spectrum. Tape preparation: Patrícia Falcão.

16 Dropouts are brief signal outages caused by dirt or abrasion at the relevant point on the magnetic layer. An arithmetical example: a short streak, say 3 mm long on a 70 cm screen, lasts ¼ µs. On an average helical track 10 cm in length (VHS), this corresponds to a smear or abraded area just over one thousandth of a millimetre in length! Prolonged outages always extend horizontally along the line – in contrast to film, which is more commonly afflicted by vertical scratches or areas of surface dirt.

17 In studio machines with an RF off-tape jack, this signal can be relayed to a wave-form monitor or oscilloscope without opening up the player, and can be used for precise manual control of the tracking.

18 Cf. note 16.

19 We are familiar with both principles from the world of radio, where there is a clear difference in quality between ultra-short-wave (FM) and medium-wave (AM).

20 It is worth mentioning that while typical broadcast videotape recorders (VTRs) record the entire composite signal (i.e. luminance plus chrominance signal) onto a single carrier (direct colour), most industrial and consumer formats are colour-under systems (e.g. U-matic).

21 So that the two colour difference signals can be kept safely apart without resorting to modulation, they must be written sequentially to this single track. To do this, their duration is compressed by 50% and stored in a memory chip, which means that during playback they must be expanded back to their original lengths. During this process the information content in each of the two colour difference signals is also reduced by 50%. This state of affairs is reflected in the 4:2:2 ratio frequently used to describe the component signal specification; this essentially means that the luminance signal is being transmitted or digitised at four times the clock speed of the colour subcarrier, whereas each of the colour difference signals is only transmitted/digitised at twice the clock speed.