

Die digitale Filmkamera

Prof. Peter C. Slansky
Hochschule für Fernsehen und Film
Frankenthaler Straße 23
81539 München
Tel.: 089 / 68957 - 220
Fax: 089 / 68957 - 229
slansky@hff-muc.de

Im folgenden soll eine theoretische Konzeption eines digitalen Kamerasystems in Kinoqualität und unter Berücksichtigung sämtlicher relevanter Komponenten von der Optik bis zum digitalen Aufzeichnungsformat dargestellt werden.

Nachdem die erste HDTV-Euphorie in Europa zu Beginn der 90er Jahre in einem technologischen, politischen und wirtschaftlichen Desaster endete, nimmt die Geräteindustrie gerade einen neuen Anlauf. Als neuer digitaler HD-Produktionsstandard hat sich 1920x1080 Pixel 24/25 Hz progressiv herauskristallisiert. Die Hersteller werben explizit mit der Kompatibilität zum Kinofilm.

Aktuelle Testfilmproduktionen (auch an der HFF München) zeigen jedoch, daß diese z.Zt. existierenden HD-Systeme über die noch nicht kinotaugliche Auflösung hinaus noch weitere signifikante Restriktionen aufweisen, die sie als echten Ersatz für die klassische 35mm-Filmaufnahme im Spielfilm nicht in Frage kommen lassen. Ein Grund hierfür ist ihre bisherige, strenge Orientierung an herkömmlichen Broadcast-technologien.

Die in diesem Beitrag vorgestellte Kamerakonzeption orientiert sich dagegen ganz an den spielfilmtypischen Anforderungen an kreative Gestaltungsmöglichkeiten, Bildqualität und Bedienungsweise und unterscheidet sich daher in den meisten Einzelkomponenten signifikant von den bisherigen technischen Lösungen. Es erzeugt kein standardisiertes (HD-) Videosignal, sondern vielmehr einen Rohdatenstrom, der erst in der digitalen Filmnachbearbeitung zum endgültigen Filmbild weiterverarbeitet wird.

Anforderungen an eine digitale Filmkamera

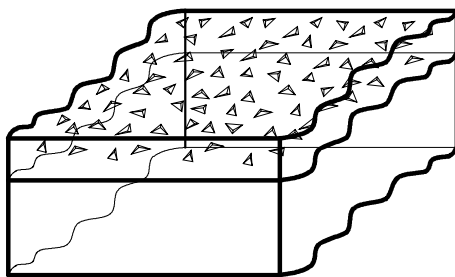
Zunächst sollen stichwortartig die Anforderungen der Directors of Photography an ihr Arbeitsgerät dargestellt werden. Im Einzelnen sind dies:

1. Auflösung mindestens wie 35mm Film
2. übertragbarer Kontrastumfang mindestens wie beim Negativfilm
3. Farbraum mindestens so groß wie beim Negativfilm
4. aliasfreies, isotropes Bild
5. Tiefenschärfe wie bei 35mm Film
6. Zeitlupe und Zeitraffer
7. Schulterfähigkeit
8. Dreh ohne Kabelverbindungen möglich (Aufzeichnung? Netz? Monitor? Ton?)
9. Verarbeitung von Kamera, Optik und Zubehör in "Filmqualität"
10. exakte Beurteilung der Schärfe im Sucher
11. Safe area im Sucher
12. Videoausspiegelung
13. Wechseloptiken mit exaktem Aufmaß

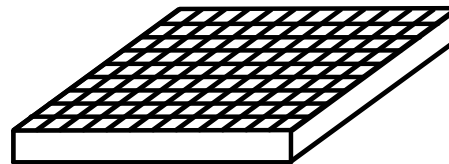
Die Punkte 1 - 6 sind dabei ganz maßgeblich für den typischen Filmlook.

Ganz allgemein treten bei der Substitution des Films durch einen elektronischen Bildwandler drei grundsätzliche Fragen auf, die die Frage nach der Isotropie des Bildes betreffen, d.h. nach der gleichen Beschaffenheit des Bildes in beliebige Richtungen.

1. Abtastung:



statistisch verteilte
Silbersalzkrystalle:
isotropes Bild

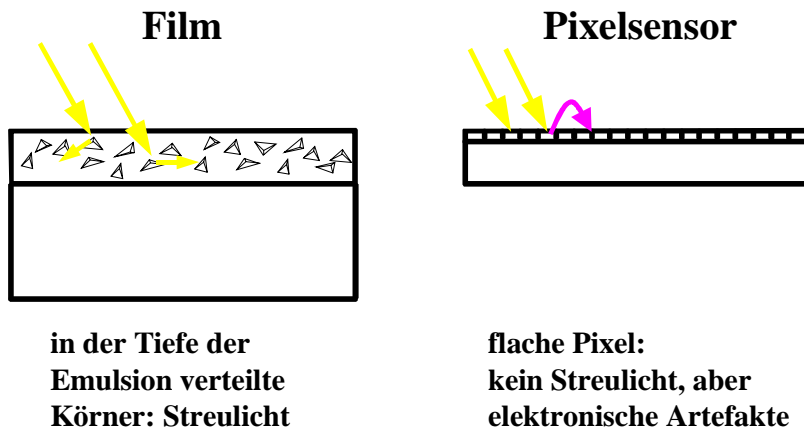


rechtwinkliges
Pixelraster:
anisotrope Auflösung
anisotrope Artefakte



Die statistisch in der Filmemulsion verteilten Silbersalzkörner haben keine bevorzugte Ausrichtung. In der Folge ist das Bild isotrop: sämtliche Bildeigenschaften sind in alle Richtungen innerhalb des Bildes gleich; es gibt keine bevorzugte oder benachteiligte Winkellagen. Beim Pixelsensor dagegen ergibt das orthogonale Raster die höchste Auflösung entlang der Vertikalen und der Horizontalen; in der Diagonalen dagegen ist die Auflösung um den Faktor 0,7 geringer. Auch Aliasartefakte weisen eine derartige Anisotropie auf. Dem menschlichen Auge erscheinen anisotrope Bildartefakte grundsätzlich störend – schließlich sind die Sehzellen auf der Netzhaut ebenfalls statistisch und isotrop verteilt.

2. Spitzlichtartefakte:



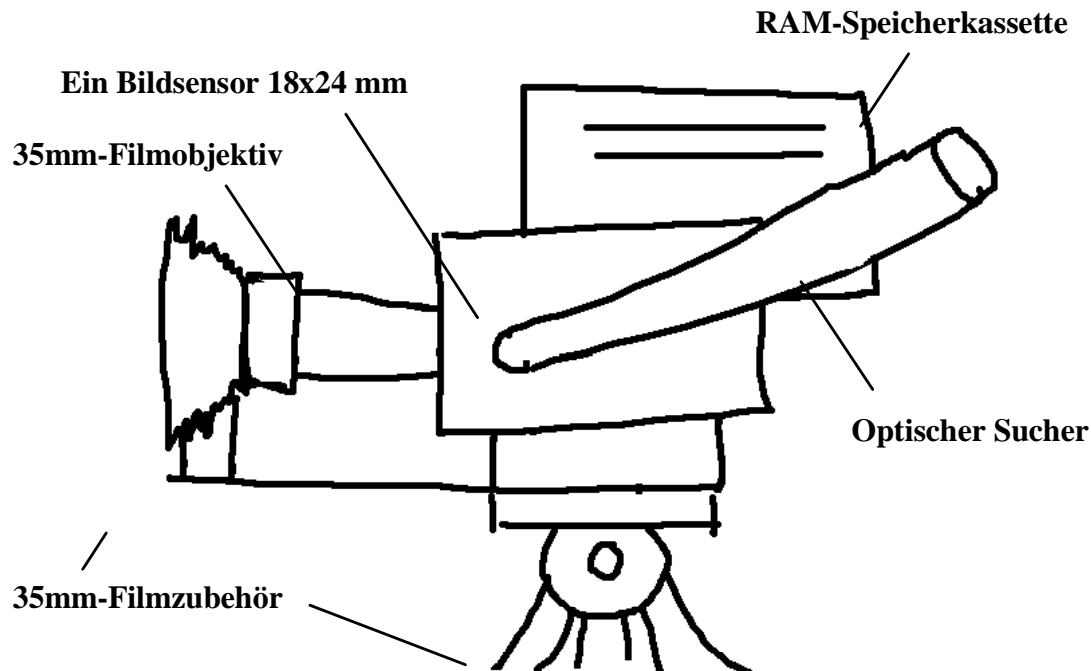
Spitzlichter führen bei der Abbildung auf eine Filmemulsion zu Lichthöfen. Diese werden durch die innere Streuung an den in der Tiefe der Emulsion verteilten Silbersalzkrnern verursacht. Dieser Artefakt ist isotrop und organisch; er wirkt also bis zu einer gewissen Grenze natürlich und daher nicht störend. In einem Pixelsensor dagegen tritt wegen der flachen fotoelektrisch wirksamen Schichten kein internes Streulicht auf. Dafür können elektronische Artefakte auftreten, die grundsätzlich anisotrop sind. Ein besonders störend wirkendes Beispiel hierfür ist der Smeareffekt.

3. Auflösung:

Die Erfahrungen haben gezeigt, daß zur Gewinnung der *vollständigen* Information eines 35mm-Originalnegativbildes eine Abtastung in "4k-Qualität" mit 4096 x 3072 Pixel erforderlich ist. Aus Kostengründen wird normalerweise aber lediglich in "2k-Qualität" mit 2048 x 1536 Pixel gearbeitet. Als Machbarkeitskompromiss für die Dimensionierung einer digitalen Filmkamera wird daher ein Bildsensor mit "3k-Qualität" mit 2960 x 2160 Pixel angesetzt. U.a. auch im Hinblick auf das Cinemascope-Format wurde ein Bildseitenverhältnis von 4:3 gewählt. Der bestehende

HD-Standard mit 1920 x 1080 Pixel für das 16:9-Format erfüllt die Forderung nach Kinoqualität dagegen nicht vollständig.

Technische Lösung

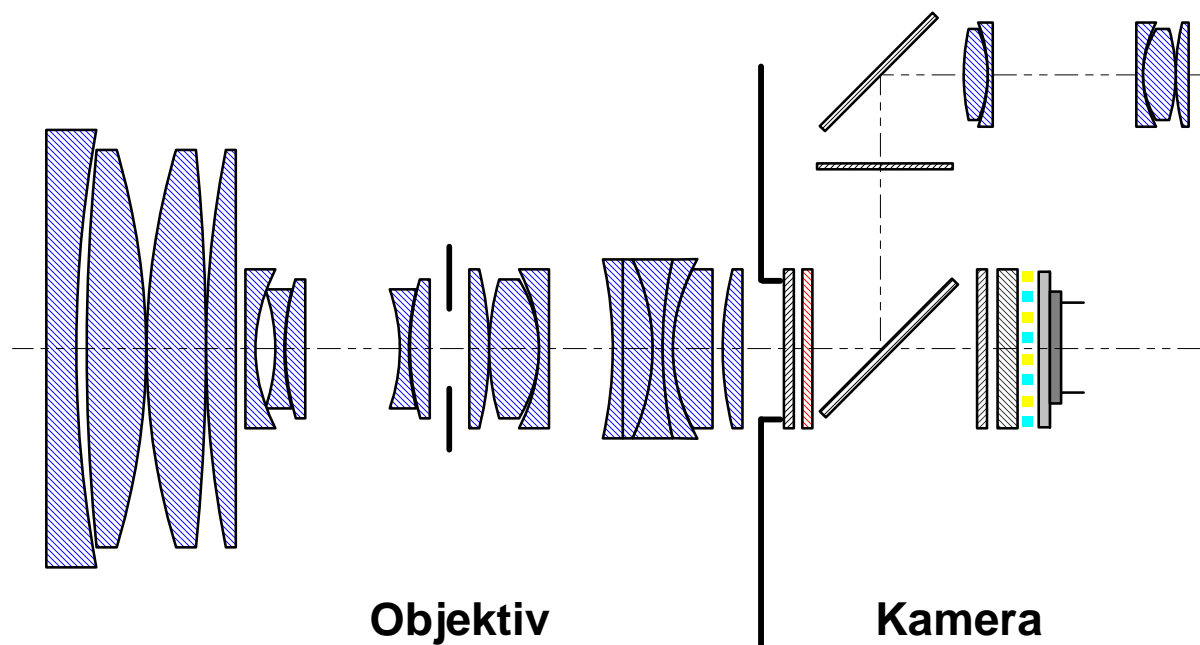


Die wichtigsten Eigenschaften der vorgeschlagenen technischen Lösung sind:

- Verwendung eines Bildsensors im Format 18 x 24 mm
- Verwendung von 35mm Filmobjektiven plus Zubehör
- optischer Sucher
- Farbseparation auf dem Bildsensor
- Subpixel-Shuffling gegen Aliasfehler
- Diffusionsfilter direkt vor dem Bildsensor
- übertragbarer Kontrastumfang 11 Blendenstufen ohne Knie oder Blackstretch
- Erzeugung eines unkomprimierten 12 Bit-Filmdatenstroms (kein HDTV-Signal)
- Endgültiges Bild-Grading erst in der Postproduktion

- Ausgabe eines Preview-Signals in HDTV oder SDTV
- Metadatenübertragung vom Preview-System zum Bild-Grading
- Signalspeicherung von maximal 11 Min. auf RAM-Wechselkassette (entsprechend einer 300-Meter Filmkassette)
- Preview-System mit RAM-Interface, Festplattenarray und Back up System

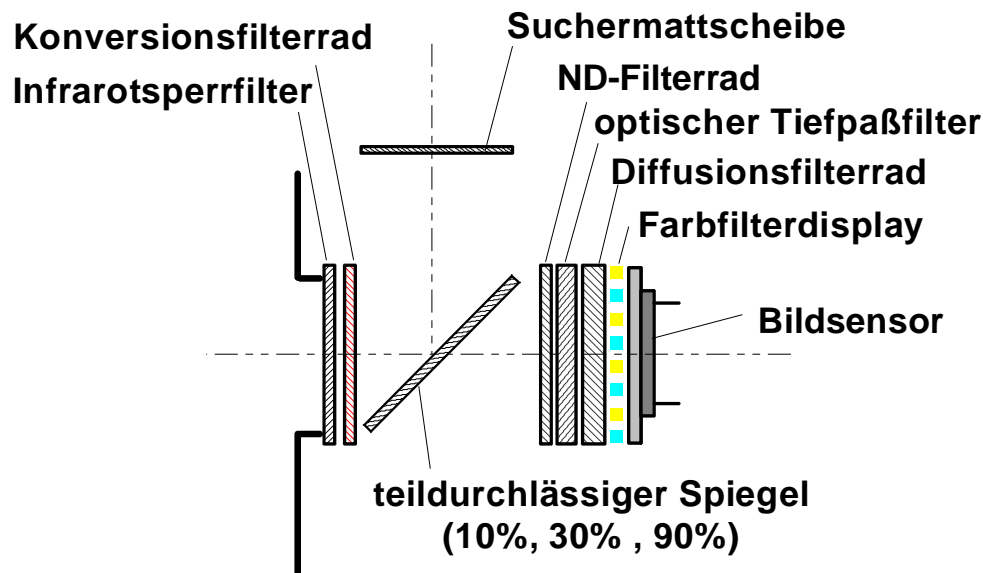
Das optische System



Die Grundkonzeption beruht auf der Verwendung nur eines Sensors in einem Format 18 x 24 mm und einer Farbseparation auf dem Sensor. Nur so ist die Möglichkeit eines optischen Suchers gegeben, der eine exakte Beurteilung der Schärfe und der Farben im Bild und außerdem ein Safe Area, d.h. ein Sucherbild größer als das Aufnahme Fenster, ermöglicht. Der elektronische Schwarzweißsucher wie er bei Broadcastkameras üblich ist, ist überflüssig. Jedes Super-35-Objektiv kann eingesetzt werden; auch das Cinemascopeformat kann durch anamorphotische Objektive bedient werden. Die Tiefenschärfe, ein

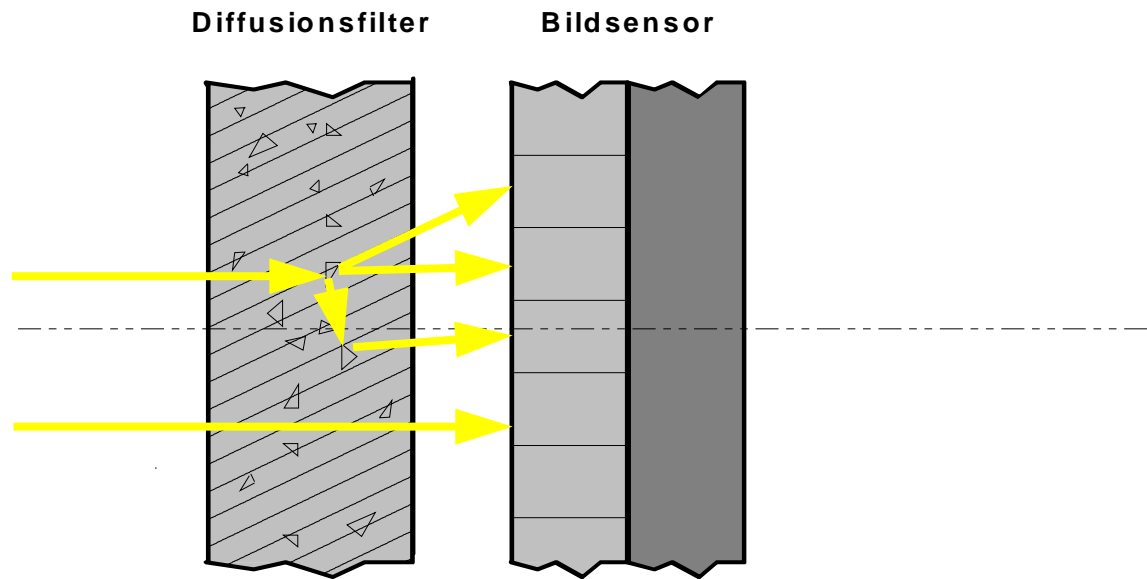
wichtiger Gestaltungsparameter, entspricht grundsätzlich der einer 35mmAufnahme.

Die Art des Sensors wird hier nicht thematisiert. Es könnte dies ein – erst noch zu entwickelnder - CMOS-Typ sein.



Die einzelnen optischen Komponenten der Kamera sind in der Richtung des Lichtweges:

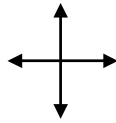
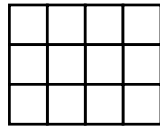
- ein Infrarotsperrfilter
- ein Filterrad mit mehreren Konversionsfiltern für eine grobe Vorfilterung der Farbtemperatur
- ein teildurchlässiger Spiegel zur Ausspiegelung des Sucherbildes, der zur Anpassung an unterschiedliche Szenenhelligkeiten in verschiedenen Transmissionsgraden umschaltbar ist
- ein Filterrad mit verschiedenen ND-Filtern
- ein optischer Tiefpassfilter zur Minimierung von Aliasfehlern
- ein Filterrad mit verschiedenen Diffusionsfiltern dicht vor dem Bildsensor zur Nachbildung des Streueffekts der Filmemulsion
- ein Farbfilterdisplay direkt auf dem Bildsensor



Alternativ zum teildurchlässigen Spiegel zur Sucherbildauspiegelung kann auch eine rotierende verspiegelte Umlaufblende erwogen werden. Diese bietet sich jedoch nur an, wenn Sensoren verwendet werden, die zum Auslesen abgedunkelt werden müssen. Ansonsten sprechen der optische Wirkungsgrad und die Flimmerfreiheit für die zuerst genannte Variante.

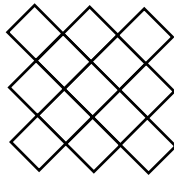
Sensorgeometrie

orthogonal ?

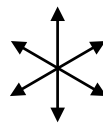
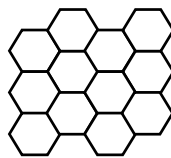


Bildsensor 18 x 24 mm

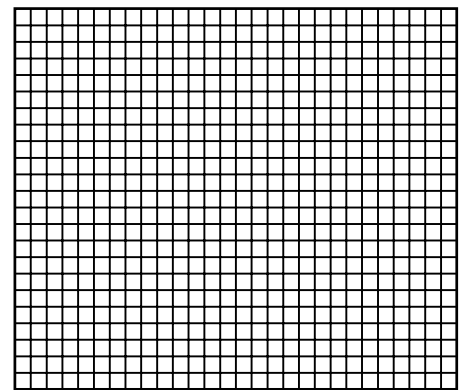
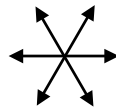
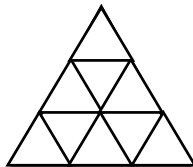
diagonal ?



hexagonal ?



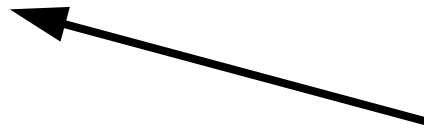
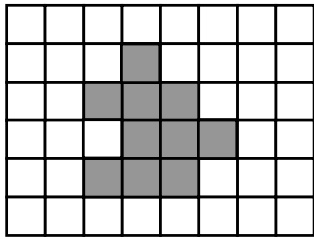
tetragonal ?



Grundsätzlich muss überdacht werden, ob das herkömmliche orthogonale Pixelraster für die Kinoanwendung die günstigste Lösung darstellt. Ein orthogonales Raster weist, wie auch ein diagonales, die grösste Anisotropie des Bildes auf. Günstiger könnten hier hexagonale oder trigonale Raster sein, die bei ebenfalls vollständiger Flächenfüllung drei statt lediglich zwei bevorzugte Achsen besitzen. Der Einfachheit der Darstellung halber wird im Folgenden weiterhin von einem orthogonalen Raster ausgegangen; alle Folgeüberlegungen wären aber leicht für andere Rasterformen modifizierbar.

1 Pixel = 9 Subpixel

Bildsensor 18 x 24 mm



**einzelbildweises
Subpixel-Shuffling
per Zufallsschleife**

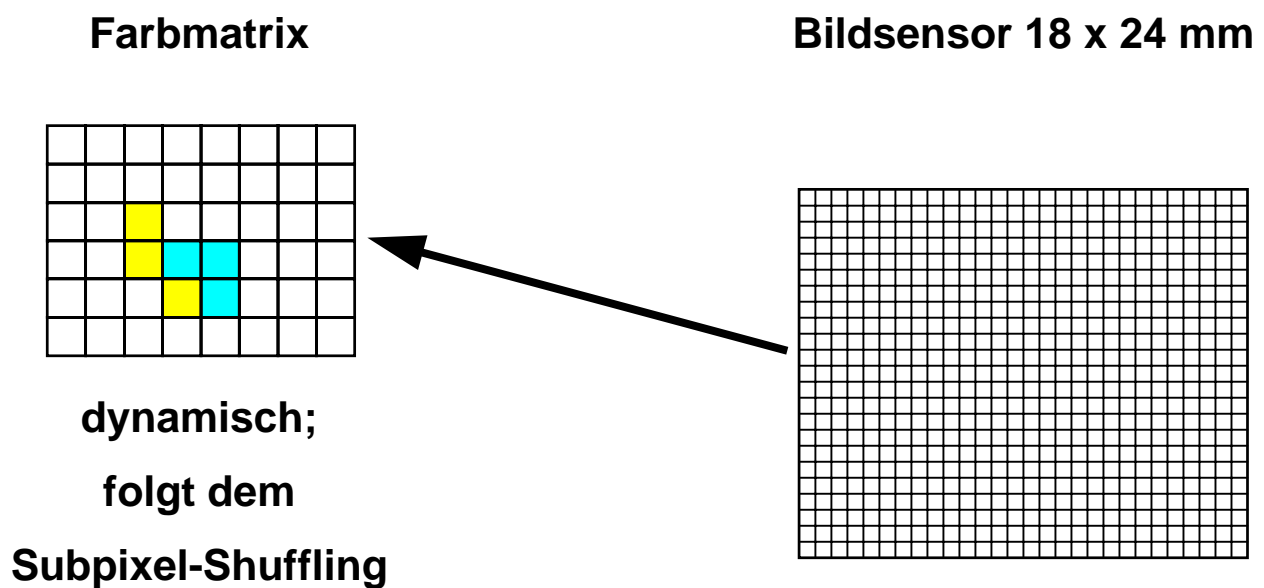
Jeder Pixel besteht aus 9 Subpixels. Die Subpixel sind jedoch nicht starr einander zugeordnet, vielmehr wechseln einzelne der 8 äußeren Pixel Bild für Bild nach einem Zufallsprinzip zwischen zwei Pixels hin und her. Um eine Zuordnung der Bildinformation zu ermöglichen, geschieht dies in einer definierten Zufallsschleife.

Geht man von einer 3k-Auflösung und einem Bildformat von 18x24 mm aus, so ergibt sich eine Pixelbreite von 8,1 μm und einer Subpixelbreite von 2,7 μm . Bei 1920 x 1080 Pixel wären es 12,1 μm bzw. 4 μm .

Farbseparation

Bei herkömmlichen Videokameras wird ein Strahlenteilerprisma mit dichroitischen Schichten zur Farbseparation eingesetzt. Neben seinen Vorteilen hat dieses Prinzip auch eine Reihe von Nachteilen: Der lange Glasweg durch das Prisma zwingt bei den Objektiven zu extremen Retrofokuskonstruktionen. Filmobjektive sind daher an Kameras mit Strahlenteiler grundsätzlich nicht einsetzbar. Die winkelabhängige Wirkung der dichroitischen Schichten bringt weitere anisotrope Bildartefakte mit sich wie etwa Fokusshading.

In der hier beschriebenen technischen Lösung wird nur ein großer Bildsensor verwendet. Die Farbseparation findet durch ein Filtrerraster direkt vor dem Bildsensor statt. Um die Vorteile des zuvor beschriebenen Subpixelshuffling ausschöpfen zu können, muss dieses Filtrerraster dem Subpixelshuffling dynamisch folgen. Bei jedem Einzelbild werden wechselnd immer 3 bzw. 4 Subpixel mit einem Filter in einer der drei Grundfarben Weiß, Gelb oder Cyan abgedeckt. Dies könnte beispielsweise durch ein LCD-Filtrerraster geschehen.



Das Raster wechselt dabei einzelbildweise nach der selben Zufallschleife wie das Subpixelshuffling. Das Prinzip des einzelbildweisen Subpixelshufflings mit gleichsinnig wechselnder Farbfiltermatrix verringert Aliaseffekte und bildet die statistisch wechselnde Struktur des Filmkorns nach. Es ist mithin ein wichtiges Mittel zur Erzeugung eines Filmlooks.

Die Grundfarben Weiß (klar), Gelb und Cyan werden gewählt, da es die hellsten Farben sind. Dieses Prinzip bringt Vorteile hinsichtlich des optischen Wirkungsgrades mit sich und wurde bereits vor 25 Jahren bei Einröhrenkameras angewendet. Für die weitere Signalverarbeitung

werden die Grundfarben Rot, Grün und Blau benötigt, die sich aber durch simple Addition oder Subtraktion daraus bilden lassen:

$$R = W - Cy$$

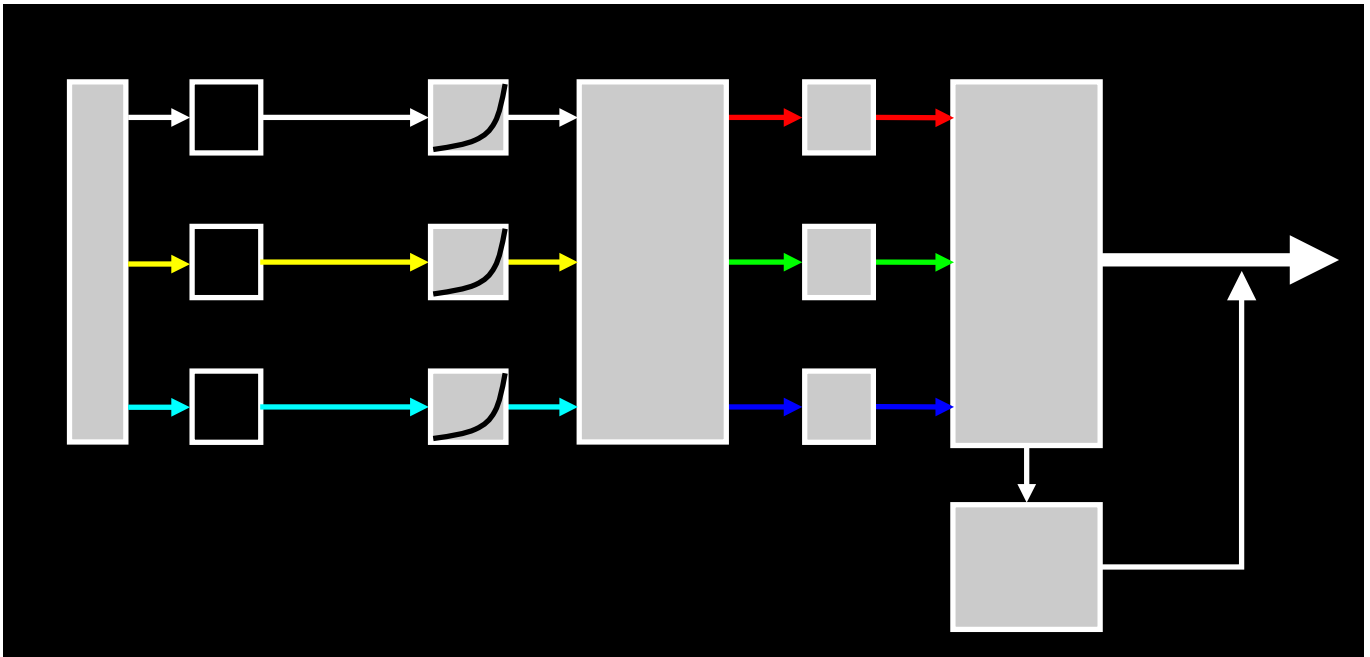
$$B = W - YI$$

$$G = YI + Cy - W$$

Quantisierung

Laut Datenblatt ist ein aktuelles mittelempfindliches Farbnegativmaterial in der Lage, einen Motivkontrast von 3.5 logarithmischen Einheiten, d.h. $11 \frac{1}{3}$ Blendenstufen zu differenzieren. Dies entspricht einem Kontrast von 2500:1. Es soll daher davon ausgegangen werden, dass die digitale Filmkamera ebenfalls 11 Blendenstufen Kontrastumfang bewältigen können soll. Bei einem Helligkeitslogarithmischen Signal und einer Quantisierung mit 12 Bit wird jede Blendenstufe mit 372 Helligkeitsstufen dargestellt. Zum Vergleich: eine Broadcastkamera mit 10 Bit Quantisierung kann unter günstigen Voraussetzungen 8 Blendenstufen differenzieren; dabei würde jede Blendenstufe durch 128 Helligkeitsstufen dargestellt.

Blockschaltbild



Der Bilddatenstrom errechnet sich für 4:3 und 3k-Qualität wie folgt:

$2960 \times 2160 \text{ Pixel} \times 3 \text{ Farben} \times 24 \text{ Bilder/Sek} \times 12 \text{ Bit} = 5,52 \text{ GBit/S}$

Für 16:9 und 2k-Qualität ergeben sich

$1920 \times 1080 \text{ Pixel} \times 3 \text{ Farben} \times 24 \text{ Bilder/Sek} \times 12 \text{ Bit} = 1,8 \text{ GBit/S.}$

Damit fallen für 4:3 und 3k-Qualität folgende Datenmengen an:

1 Frame: 29 MByte

11 Min. Film (= eine Kassette): 455 GByte

90 Min. Film: 3,8 Tbyte

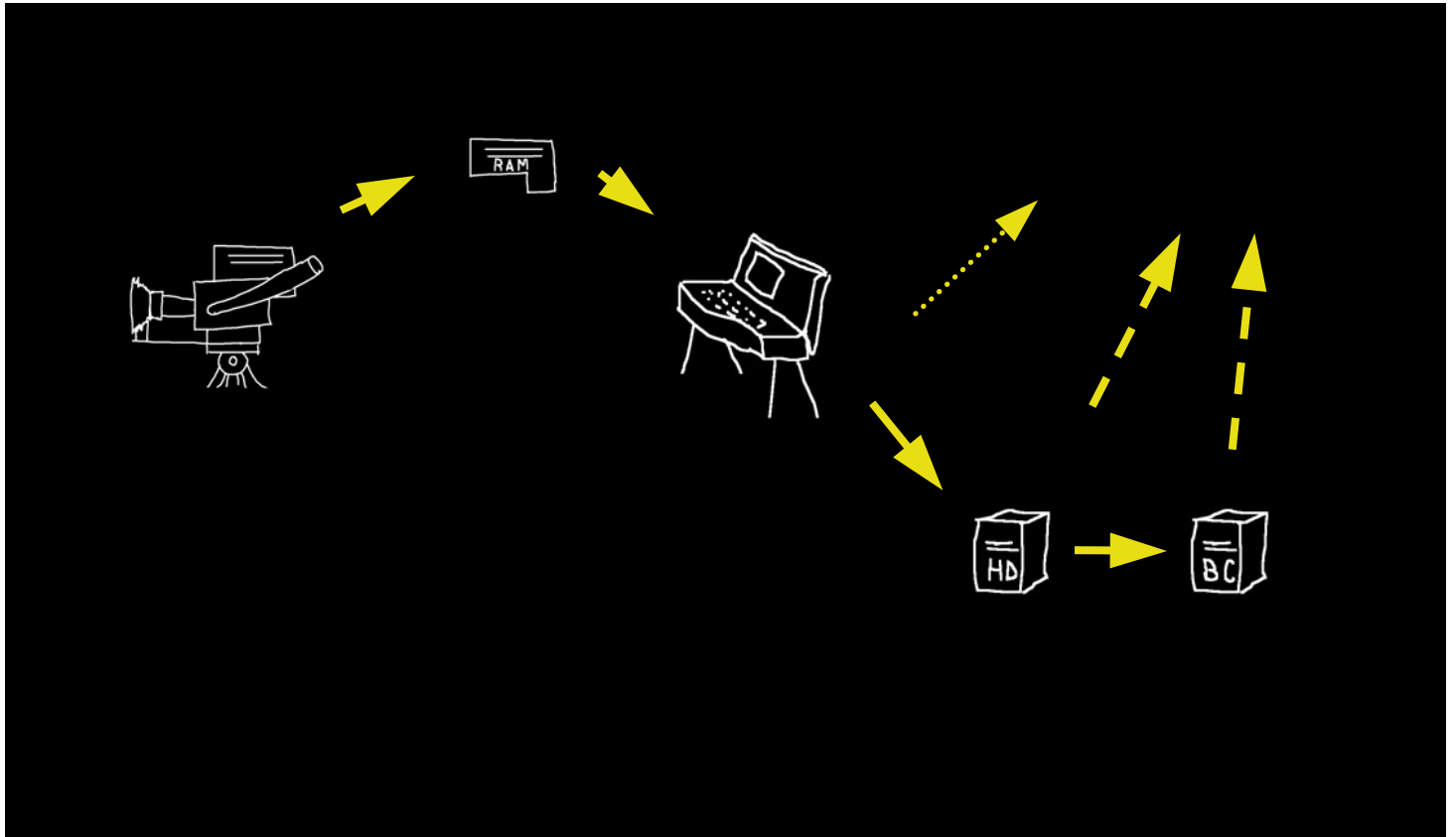
Für 16:9 und 2k-Qualität ergeben sich:

1 Frame: 9,3 MByte

11 Min. Film: 148 GByte

90 Min. Film: 1,2 TByte

Workflow



Die in der Kamera aufgenommenen Rohdaten werden auf der RAM-Kassette abgespeichert. Die volle Kassette wird an das Previewsystem angeschlossen und die Daten werden auf ein Festplattenarray überspielt. Am Previewsystem kann bereits eine Vorsortierung des Materials vorgenommen werden und nicht benötigte Takes gelöscht werden. Außerdem kann in einem Pregrading ein erster Look des Bildes erstellt werden. Die Metadaten hierzu werden gemeinsam mit den Bilddaten abgespeichert. Die Bilddaten können außerdem auf einem Backup-System gesichert werden. In stationären Aufnahmesituationen kann der Bilddatenstrom unter Umgehung der RAM-Kassette auch direkt über Kabel auf das Previewsystem übertragen werden. Am Ende gehen die Bilddaten zusammen mit den Metadaten des Pregradings über das Festplattenarray oder über das Backupsystem an das digitale Filmkopierwerk.

Zusammenfassung

Viele der vorgeschlagenen Detaillösungen wurden in anderer oder ähnlicher Form bereits anderweitig realisiert. Andere erforderliche Komponenten existieren in den beschriebenen Spezifikationen noch nicht. Die vorgeschlagene technische Lösung einer digitalen Filmkamera löst sich von bereits bestehender HD-Broadcasttechnologie und beschreitet einen der Filmproduktion fürs Kino angepassten eigenen Weg. Hierzu kombiniert sie neue und alte Detaillösungen neu.

Die Vorteile wären:

- Auflösung wie 35mm Film
- übertragbarer Kontrastumfang wie beim Negativfilm
- Farbraum so groß wie beim Negativfilm
- aliasfreies, isotropes Bild
- Tiefenschärfe wie bei 35mm Film
- Zeitlupe und Zeitraffer
- Schulterfähigkeit
- Dreh ohne Kabelverbindungen möglich
- Verarbeitung von Kamera, Optik und Zubehör in "Filmqualität"
- exakte Beurteilung der Schärfe im Sucher
- Safe area im Sucher
- Filmoptiken mit exaktem Auflagemaß verwendbar

Zürich, 20.6.2002

Peter C. Slansky