

Eberhard Hasche

In diesem Kapitel werden die bisher vorgestellten Themen der Farbverarbeitung aufgegriffen und im Zusammenhang mit praktischen Anwendungen diskutiert. In Arbeitsabläufen bei Film- und Fernsehproduktionen haben sich in den letzten Jahren grundlegende Änderungen ergeben. Dieser Prozess ist noch lange nicht abgeschlossen und erfordert von allen Beteiligten, das eigene Handeln an die neuen internationalen Standards anzupassen. So steht besonders der Unterschied zwischen einer *displaybezogenen* (engl. *display-referred*) und einer *szenenbezogenen* (engl. *scene-referred*) Herangehensweise im Mittelpunkt der Diskussion in diesem Kapitel, da hier das größte Entwicklungspotenzial für Veränderungen im Workflow vorhanden ist.

## Kapitelübersicht

Das Kapitel beginnt mit dem traditionellen Filmworkflow, in dem das Filmnegativ im Zentrum steht und den gesamten Arbeitsablauf vom originalen Kameranegativ über *Dailies* (*Rushes*), der Nullkopie (engl. *answer print*), dem Zwischenpositiv (engl. *intermediate positive*), den Zwischennegativen (engl. *intermediate negative*) hin zu den Verleihkopien (engl. *release prints*) bestimmt. Wichtige Aspekte in diesem Workflow sind das Scannen des Negativs mit Filmscannern oder Data-Telecines und das darauf folgende Codieren in Kodaks *Cineon Print-Density-Format*.

Als Beispiel eines displaybezogenen Workflows werden die Arbeitsabläufe in einer HDTV-Produktion vorgestellt. Bei einer solchen Produktion ist das Ziel, ästhetisch und technisch optimale Bilder in Bezug auf die spätere Darstellung auf einem Display aufzunehmen. Die einzelnen Themen sind Aufnahmestrategien, die Verarbeitung in der Kamera, Konvertierung in den Zielfarbraum, die Codierung im BT.709-Farbraum und die Darstellung auf einem Monitor.

Der im nächsten Abschnitt vorgestellte szenenbezogene Workflow ist darauf gerichtet, die originale Lichtsituation der Szene in den aufgenommenen Bildern linear zu repräsentieren. Er erfordert somit die Entfernung aller herstellereigenen Funktionen und Kurven aus den Aufnahmen. Auch

hier ist die Aufnahmestrategie von großer Wichtigkeit. Das Codieren der Bildsequenzen erfolgt im OpenEXR-Format, das im Folgenden vorgestellt wird. Großen Raum nimmt die Diskussion der Bearbeitungen des Ausgangsmaterials ein, da durch die hohe Dynamik und Auflösung verschiedene Workarounds notwendig werden. Da das Konzept eines scene-referred Workflows nicht in erster Linie auf die Darstellung des Bildmaterials zielt, muss diesem Aspekt in einer Produktion besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Der Abschnitt schließt mit der Vorstellung der *Color-Decision-List (CDL)* und des *Open-Color-IO-Workflows*.

Im nächsten Abschnitt wird das Konzept des *Picture-Renderings* und des *Image-States* vorgestellt.

Es folgt die Darstellung des Digital Intermediate – dem finalen Arbeitsschritt in der Filmpostproduktion. Eng mit diesem verbunden sind Farbkorrekturen und das Mastering des Materials für verschiedene Ausgabeformate. Diese unterschiedlichen Workflows mit den dazugehörigen Codierungsstrategien werden vorgestellt. Auf der technischen Seite steht die Situation der Bildbetrachtung im Mittelpunkt. Hier werden Parameter des Referenz-, Master- und Exhibition-Projektors, die Beleuchtungssituation im Studio und die Beschaffenheit der Filmleinwand und der Kinoumgebung diskutiert.

Das Kapitel wird abgeschlossen mit einer Einführung in die Bildarchitektur des *Image-Interchange-Frameworks (IFF)* der Academy of Motion Picture Arts and Sciences (AMPAS). Hier werden der Workflow des *Academy-Color-Encoding-System (ACES)* und dessen einzelne Bestandteile diskutiert.

## 2.1 Workflow mit analogem Filmnegativ

### 2.1.1 Originales Kamera-Negativ (OCN)

#### Dreischichtfarbfilm

Dreischichtfarbfilme bestehen aus Schichten einer Fotoemulsion, die sich vor allem aus Silberbromid-Kristallen

	Schutzschicht
Blau-sensitive Schicht	kuppelt Gelb
Gelbfilter	
Grün-sensitive Schicht	kuppelt Magenta
Rot-sensitive Schicht	kuppelt Cyan
	Lichthoschutzschicht
	Trägerschicht

Abb. 2.1 Dreischichtfarbfilm vor und nach der Entwicklung

zusammensetzt. Dabei reagiert die oberste Schicht auf die blauen Anteile des Lichtspektrums, die mittlere auf die grünen und die unterste auf die roten Bestandteile. Ebenfalls in den Schichten des Farbnegativs befinden sich farblose oder mit Azofarbstoffverbindungen versehene Substanzen, die sogenannten Farbkuppler.

Idealerweise absorbieren die Farbschichten nur Licht im Spektrum, für das sie ausgelegt sind. Faktisch wird auch Energie anderer Wellenlängen aufgenommen, was typischerweise zu einer Entsättigung und Farbverschiebungen führt. Um dieses zu vermeiden, werden die Farbkuppler eingesetzt, die auf chemisch-physikalische Weise bestimmte Farbkorrekturen ausführen. Mithilfe dieser Substanzen erzeugt (kuppelt) die oberste Schicht im Farbnegativ Gelb, die mittlere Schicht kuppelt Purpur (Magenta) und die unterste Schicht erzeugt Blaugrün (Zyan). Zwischen der blauempfindlichen Schicht und der grünempfindlichen Schicht befindet sich noch eine gelbe Filterschicht, die verhindert, dass blaue Anteile weitergeleitet werden (siehe Abb. 2.1).

Die sich in den Filmschichten befindenden Silberhalogenide werden opak, wenn sie belichtet werden. Je länger die Belichtung dauert, desto mehr Photonen fallen auf die Moleküle. Der Film wird dadurch dichter und undurchlässiger. Das Resultat ist ein Bild, bei dem der tonale Bereich und die Farben invertiert sind.

### Charakteristik eines Farbnegativs

Die charakteristischen Kurven für ein Farbnegativ werden in Abb. 2.2 gezeigt. Traditionell werden Filmkurven als Dichte/Schwärzung gegen die Belichtung logarithmisch in beiden Achsen dargestellt. Die drei Kurven repräsentieren die aufgenommenen roten, grünen und blauen Farbwerte, die durch die gelben, purpurnen und blaugrünen Farbschichten reproduziert werden. Die drei Kurven haben durch das Wirken der Farbkuppler einen vertikalen Versatz, was zu einer orangefarbenen Maskierung führt. Dies wird im Print-Prozess (s. u.) entfernt. Es sei noch festzustellen, dass die rote Schicht traditionell leicht unscharf ist, weshalb die Rottöne vor allem der Haut und im Gesicht etwas weichgezeichnet sind, was einen durchaus willkommenen Effekt darstellt, da die Haut weicher und glatter erscheint.

Der Belichtungsumfang (engl. *exposure latitude*) ist definiert als der gesamte Bereich der Belichtung zwischen dem

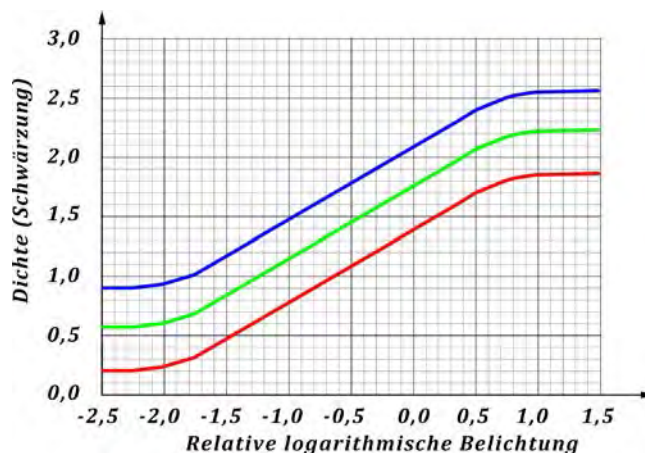


Abb. 2.2 Farbkurven eines Kodak-Filmnegativs. (Nach Kodak 1995, S. 2)

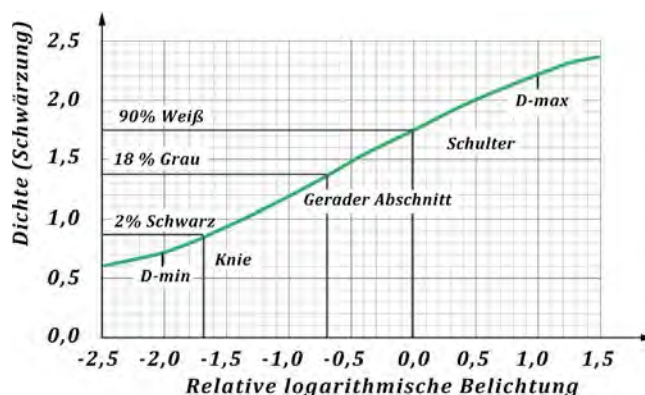


Abb. 2.3 Charakteristische Belichtungskurve eines Filmnegativs. (Nach Kennel 2007, S. 12)

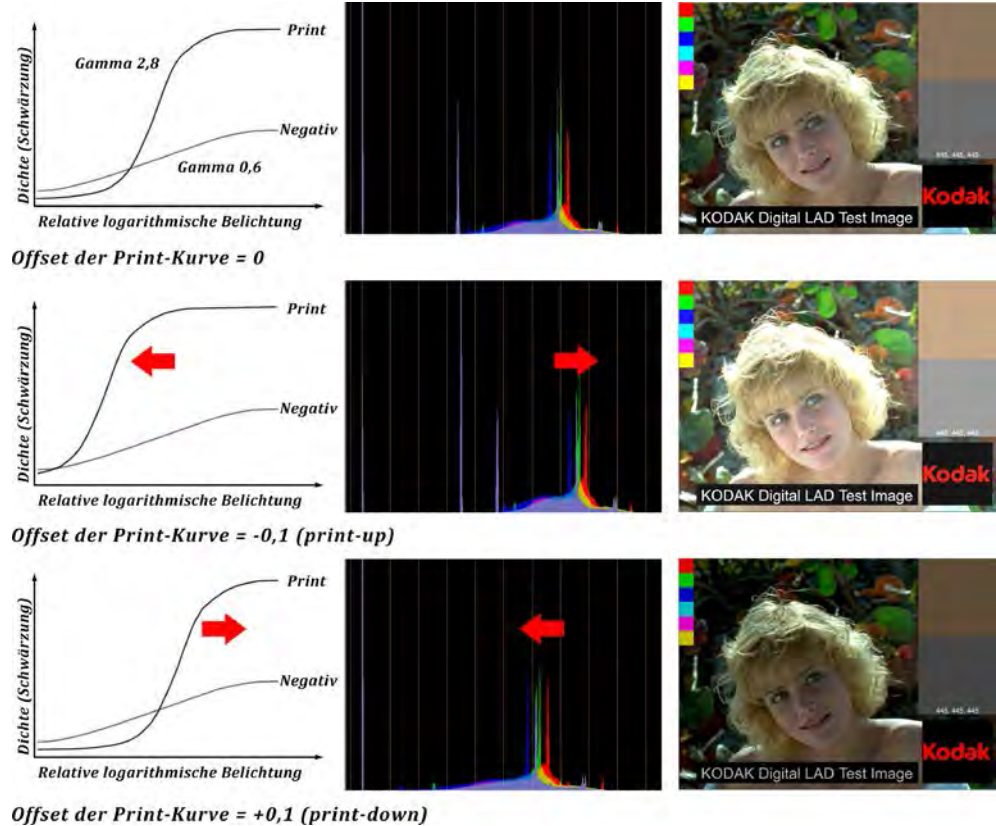
dunkelsten und hellsten Bildteil und wird durch die entsprechende Dichte des Filmnegativs repräsentiert. Je höher die Dichte, desto mehr Licht wird bei der Darstellung eines Negativs blockiert. Der Belichtungsumfang eines typischen Filmnegativs ist logarithmisch 3,0 – der Kontrastumfang einer Szene beträgt somit 1000 : 1 und umfasst circa 10 Belichtungsstufen.

Abbildung 2.3 zeigt den Dichteverlauf eines Filmnegativs. Die Dichte  $D$  ist definiert als der negative Logarithmus der Übertragungsfähigkeit des Films und wird in beiden Achsen logarithmisch dargestellt. Das zentrale Element ist der Wert der 90%igen Weißreferenzkarte, bei deren Verwendung die Belichtung so eingestellt wird, dass diese den Wert  $\log 0,0$  erhält. Weitere wichtige Referenzwerte sind die der 2%-Schwarztafel und der 18%-Grautafel. Der Wert für die 18%-Grautafel ist vor allem für Material wichtig, das für einen szenenbezogenen Workflow verwendet werden soll.

Die charakteristische Kurve eines typischen Filmnegativs hat fünf Regionen (vgl. Kennel 2007, S. 12):

1. *D-min (minimum density)*: Hier befinden sich Belichtungs-  
werte von weniger als 1% des Wertes der Weißreferenz-

**Abb. 2.4** Erzeugen eines Filmpositivs. (Nach Shaw 2009a, S. 5 ff)



tafel oder sieben Belichtungsstufen darunter (logarithmisch -2,0).

2. **Knie:** Das Knie (engl. *toe*) ist der Bereich, in dem die Kurve mit zunehmenden Belichtungswerten graduell ansteigt. Da hier keine lineare Beziehung zwischen Dichte und Belichtung vorliegt, wird der Tiefenbereich maßvoll komprimiert.
3. **Gerader Abschnitt:** Das ist der Bereich der Kurve mit konstantem Anstieg. Für eine optimale Weiterverarbeitung sollten alle relevanten Bildinformationen in diesem Abschnitt liegen. Der Anstieg wird auch als *Gamma* des Films bezeichnet und ist für ein Filmnegativ 0,6.
4. **Schulter:** Das ist der Bereich, in dem der Anstieg der Kurve mit zunehmenden Belichtungswerten graduell abnimmt. Die Schulter sorgt für eine maßvolle Komprimierung der Spitzenwerte der Belichtung und somit für einen natürlicheren Verlauf der charakteristischen Kurve als es bei digitalen Video- und Filmkameras – die naturgemäß harte Übergänge erzeugen – der Fall ist.
5. **D-max (maximum density):** Dies ist der Wert, der drei Belichtungsstufen ( $\log 1,0$ ) über dem Wert der Referenzweißtafel liegt. Der Bereich zwischen Referenzweiß und D-max sorgt für eine weiche Komprimierung der spekularen Glanzlichter der Szene.

## 2.1.2 Traditioneller Film-Workflow

### Erzeugen des Filmpositivs

Ein analoges Filmnegativ (engl. *original camera negative – OCN*) besitzt einen hohen Dynamikbereich, aber einen niedrigen Kontrast ( $\text{Gamma} = 0,6$ ). Dementsprechend muss die Kopierkurve für die Erstellung eines Positives einen hohen Gammawert (3,0) haben, um einen für die Betrachtung geeigneten Kontrast ( $\text{Gamma} = 1,8-1,7$ ) zu erhalten (siehe Abb. 2.4, obere Zeile). Diese Kurve ist s-förmig mit einem kurzen geraden Abschnitt. Durch Erhöhen oder Verringern des zur Belichtung des Positives benötigten Lichtpegels wird der Kontrast des Positives beeinflusst. Ist der Lichtpegel gering, werden nur die weniger dichten Bildteile belichtet. Dies kann durch Verschieben der Kopierkurve nach links in den Schattenbereich korrigiert werden. Dadurch werden die dort vorhandenen Details aufgehellt. Dieser Vorgang heißt im Englischen *print-up* (siehe Abb. 2.4, mittlere Zeile).

Im Gegensatz dazu kann die Kopierkurve nach rechts verschoben werden und dunkelt die Glanzlichter ab. Dieser Vorgang heißt *print-down* (siehe Abb. 2.4, untere Zeile). Im Ergebnis des Printprozesses kommt es zu einer 50%igen Anhebung des Gammawertes, verglichen mit dem Original, was notwendig ist, da das Positiv naturgemäß in einer sehr dunklen Umgebung gezeigt wird (siehe Abschn. 2.4.5). Indem die Kopierkurve in eine Richtung verschoben wird, bewegt sich das logarithmisch dargestellte Histogramm in



**Abb. 2.5** Traditioneller analoger Filmworkflow

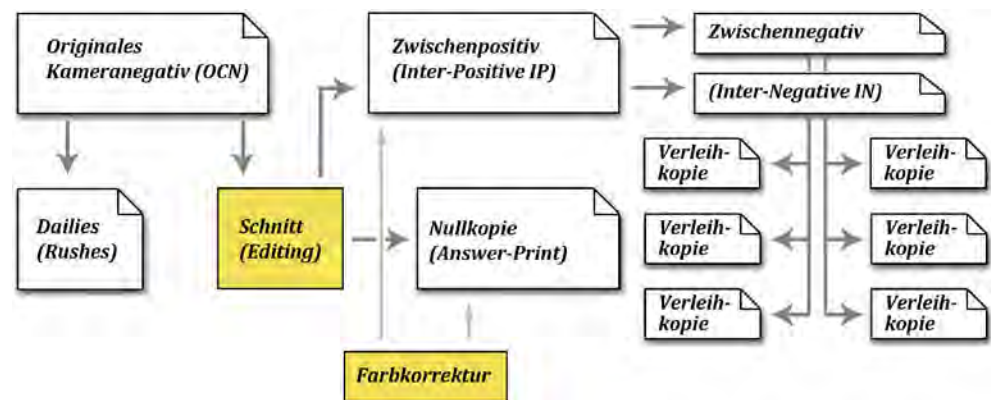


Abb. 2.4 in die Gegenrichtung. Dies hellt das Testbild entweder auf oder dunkelt es ab.

Das hier verwendete *KODAK-Digital-LAD-Test-Image (Laboratory Aim Density)* ist ein von Kodak zur freien Verwendung zur Verfügung gestelltes digitales Referenztestbild, um digitale Film-Recorder für ein korrekt belichtetes digitales Negativ einzustellen. Es ist in der Film- und Video-Community als *Marcie* bekannt und dient hier lediglich zur Verdeutlichung der analogen Vorgänge.

Der logarithmische Kontrast der gesamten Filmsequenz (engl. *peak contrast*, *sequential contrast*) – im Gegensatz zum Kontrast in einem Einzelframe, der nur bei etwa 200:1 liegt –, kann ermittelt werden, indem der Wert für D-min vom Wert von D-max abgezogen wird. Ein guter Wert für den Dichtebereich eine Serie von Filmpositiven ist 3,2. Dieser Wert repräsentiert ein Kontrastverhältnis von 1600.

### Überblick über den Filmworkflow

Der traditionelle Filmworkflow (siehe Abb. 2.5) beginnt mit der Belichtung des originalen Kameranegativs (OCN). Zur Sichtung des am Tage aufgenommenen Materials werden Positive (USA: *dailies*, GB: *rushes*) mit einer rudimentären Farbkorrektur und synchronisiertem Ton erzeugt, vor allem, um die Qualität des Materials in künstlerischer und technischer Hinsicht zu evaluieren. In diesem Schritt kann die Ausgabe auch durch von *Telecines* (s. u.) generierte Videobänder erfolgen. Im nächsten Schritt wird das Negativ physikalisch geschnitten und gemäß den Intentionen des Regisseurs in der beabsichtigten Reihenfolge wieder zusammengefügt. Danach wird das geschnittene Negativ mit dem Ton synchronisiert und das gesamte Material farbkorrigiert (engl. *color grading*, *color timing*). Dazu werden die Notizen des Farbkorrektors über die Einstellungen der Kopierlichter auf ein Papierband übertragen, das mit dem geschnittenen OCN und dem Positivmaterial in den Printer geladen wird. Das Ergebnis ist das Answer-Print-Positiv (dt. *Nullkopie*).

Nach Beendigung der Postproduktion wird unter Verwendung der Farbkorrekturinformationen des Answer-Prints das *Intermediate-Positiv (IP, dt. Zwischenpositiv)* erzeugt und aus diesem das als Grundlage für die Verteilung dienende *Inter-*

*mediate-Negativ (IN, dt. Zwischennegativ)*. Hierfür verwendet man speziell auf die Anforderungen des Intermediate-Prozesses ausgelegtes Filmmaterial, das einen Gammawert von 1,0 hat, sodass die beiden Stufen des Duplikationsprozesses den Kontrast nicht verändern. Von einem Inter-Positiv können dabei vier bis zehn Zwischennegative generiert werden.

Der letzte Schritt im analogen Filmworkflow ist die Erstellung der *Release-Prints* (dt. *Verleihkopien*). Dabei kann ein entsprechend haltbares Inter-Negativ 500–1000 oder bei sorgfältiger Handhabung sogar bis zu 2000 Verleihkopien erzeugen (ziehen). Diese werden auf speziellen Filmkopierern produziert, die mit Geschwindigkeiten von 500 m pro Minute und mehr laufen. Analoge Verleihkopien haben eine Auflösung von lediglich 1,2k horizontal – weitaus weniger als digitales Filmmaterial (vgl. Kennel 2007, S. 141 f.). Sind sie sorgfältig angefertigt, entsprechen sie der Farbe und dem Kontrastumfang des Answer-Prints. In der Realität wird dies in den seltensten Fällen erreicht, da die Qualitätsparameter im Kopierprozess schwanken und auch die Projektionslampe über den Verlauf ihrer Lebenszeit stark an Lichtstärke abnimmt.

### 2.1.3 Scannen des Filmnegativs

Die Digitalisierung eines Filmnegatives kann mit drei Verfahren realisiert werden.

#### 1. Telecine

Mit einer *Telecine* wird ein Film optisch abgetastet, um ein Videosignal zu gewinnen, das geeignet ist, mit Videoequipment, das heißt Fernsehmonitoren, Videorecordern, DVDs, Blu-rays oder Computern dargestellt zu werden. Die Resultate der Farbkorrektur werden in die Bilder geschrieben. Dies stellt oft ein Problem dar, da dies nicht im Kontext mit beim späteren Schnitt vorhergehenden und nachfolgenden Sequenzen erfolgt.

#### 2. Data-Telecine

*Data-Telecines* sind speziell ausgelegte Telecines, die zusätzlich zur Videoausgabe auch hoch aufgelöste Scan-Daten

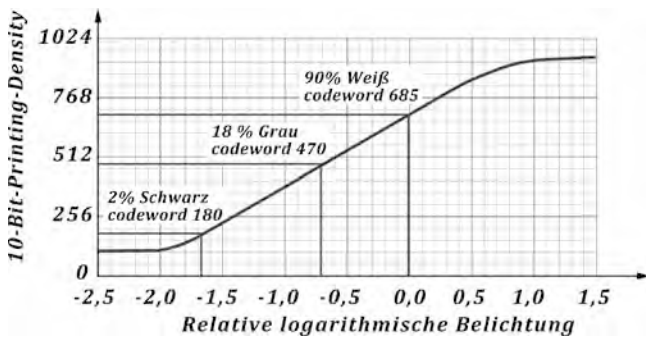


Abb. 2.6 Digitales Cineon-Negativ

des Filmnegativs liefern, die nach der Bearbeitung wieder auf Film zurückbelichtet werden können. Die Ausgabe erfolgt in RGB im DPX-Format in 2k oder 4k, wobei 2k mit  $2048 \times 1556$  Pixeln aufgelöst ist.

### 3. Filmscanner

Filmscanner werden im größeren Maßstab bereits seit den 1980er-Jahren vor allem zur Produktion von Bildmaterial für den VFX-Prozess verwendet. Sie waren in der Anfangszeit relativ teuer und sehr langsam. Mittlerweile wurden sie so weiterentwickelt, dass sie auch zur Digitalisierung für Featurefilme eingesetzt werden können. Ein großer Vorteil ist, dass jedes Frame mithilfe der Perforationslöcher individuell fixiert werden kann (engl. *pin-registered*). Der Film wird dann mit CCD-, CMOS oder CRT-Sensoren abgetastet. Die drei Farbsignale werden elektronisch bearbeitet und farbkorrigiert. Dabei wird eine 3D-LUT (3D-Look-Up-Table) auf die RGB-Kanäle angewendet und das Ergebnis in DPX-Dateien in Auflösungen von 2k bis 4k codiert.

Die Qualität des resultierenden Bildes hängt in hohem Maße von der Auflösung ab, mit der es eingescannt wird (siehe Diskussion des Nyquist-Sampling-Theorems in Abschn. 2.2.3). Bei der Erstellung von 2k-Material sollte die Sampling-Frequenz des Film-Scanners deshalb zunächst mindestens 4k sein, um hochfrequentes Detail korrekt zu erfassen und Moiréartefakte zu vermeiden. Für 2k-Material wird ein Tiefpassfilter verwendet, der das Material an der Sampling-Frequenz glättet. Verwendet die Negativvorlage nicht den gesamten Bereich zwischen den vier Perforationslöchern, wird trotzdem zumeist das gesamte Frame eingescannt und später beschnitten. Die native Bit-Tiefe eines Scanners liegt bei 12 bis 14 Bit. Das eingescannte Material wird zumeist logarithmisch in 10 Bit codiert.

#### 2.1.4 Kodak-Cineon-Print-Density-Format

Das Cineon-Print-Density-Format wurde Anfang der 1990er-Jahre von Kodak vorgestellt und entwickelte sich zum Quasi-Standard für das Speichern von digitalisierten Filmnegativen. Es wurde dabei so gestaltet, dass es die typischen Eigenschaf-

Tab. 2.1 Werte der Graustufentafeln eines 10-Bit-codierten Cineon-Negativs

Graustufentafel	Code Value
D-max	1023
90 % Weiß	685
18 % Grau	470
Digital LAD	445
2 % Schwarz	180
D-min (1 % Schwarz)	95

ten eines Filmnegativs digital repräsentiert und soviel wie möglich von der Charakteristik des Negativs enthält, ohne die Effizienz der Speicherung zu vernachlässigen. Die Lichtquelle und die Farbfilter der Cineon-Scanner wurden so ausgelegt, dass das effektive spektrale Verhalten der Scanner dem eines Print-Films entspricht.

#### Kontrastbereich

Der Kontrastbereich eines Filmnegativs liegt bei ca. 1000 : 1 oder bei drei (logarithmischen) Dichteeinheiten. Der Cineon-Scanner ist so kalibriert, dass er einen 2048 : 1-Kontrastbereich abdeckt und Spielraum an beiden Enden der Skala zulässt. Besonders über dem nominalen Weißpunkt befindet sich so viel Headroom, dass überbelichtete Negative oder Szenen mit hohem Kontrastbereich ausreichend wiedergegeben werden können. Wird ein typischer Dynamikbereich des Negativs von 2,0 (D-min – D-max) mit 10 Bit codiert, beinhaltet eine Quantisierungsstufe (Codewort) einen Dichtewert von 0,002.

#### Cineon-Spezifikation

Die charakteristische Kurve für ein Cineon-Negativ wird in Abb. 2.6 dargestellt.

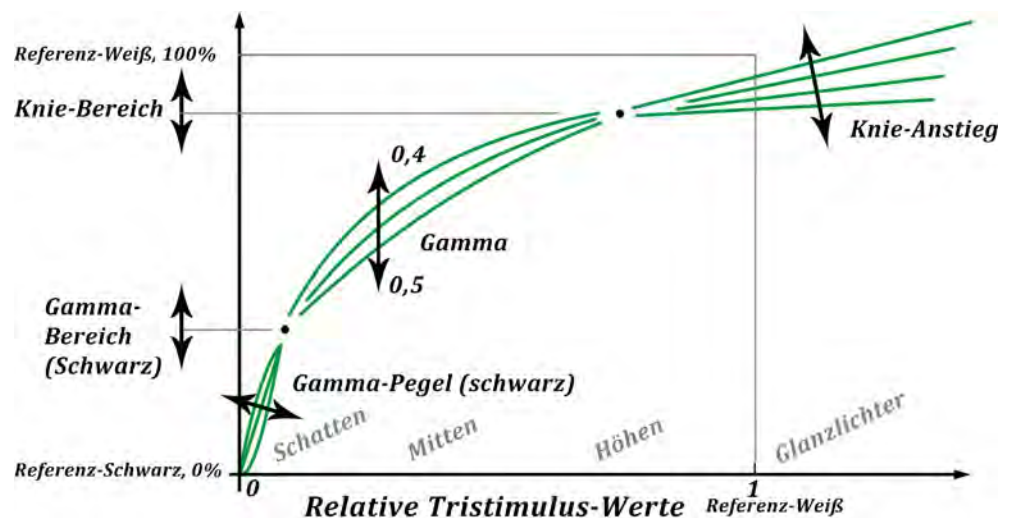
Für einen normal belichteten Negativfilm werden folgende Graustufentafeln codiert (Tab. 2.1).

Da die Lichtquelle des Scanners auf den D-min-Wert des Negativs eingestellt wird, weist das resultierende digitale Bild eine neutrale Farbbalance auf. Das gescannte Negativ wird invertiert und als Positiv dargestellt. Im Scanningprozess kann auch die orangefarbene Maskierung entfernt und damit die drei Farbkanäle als eine *Print-Density-Kurve* dargestellt werden. Die durchschnittliche Grunddichte des Negativs (D-min) wird mit dem Codewort 95 angegeben. Damit wird vermieden, dass Pixel, deren individuelle Dichte unter diesem Wert liegen, abgeschnitten werden. Für digitale Negative, deren Auflösung von 10 auf 8 Bits reduziert ist, wird der Bereich von 95–685 im Bereich von 0–255 abgebildet (vgl. Kodak 1995, S. 4 f.).

#### Datenstruktur

Eine Cineon-Datei enthält ein Drei-Kanal-RGB-Bild, das mit 10-Bit pro Kanal in der 32-Bit-Struktur gespeichert ist. Kodak

**Abb. 2.7** Mögliche Kamera-Kontrollelemente. (Nach Poynton 2010, S. 7)



verwendet einen speziellen Farbraum, der das Verhalten des Filmnegativs zum einfallenden Licht imitiert (*Log-Space*). Die Datei bietet allerdings keine Garantie, dass tatsächlich logarithmische Daten gespeichert sind. Es ist möglich, das Bild mithilfe einer kalibrierten Look-Up-Table (LUT) auf einem kalibrierten Monitor zu betrachten. Im Scanningprozess festgelegte LUTs können mit den Daten gespeichert werden und als Startpunkt für eine spätere Farbkorrektur verwendet werden.

### DPX und ADX

Das *Digital-Picture-Exchange-Format* (DPX) ist ein von der SMPTE standardisiertes Dateiformat (ANSI/SMPTE 268M-2003), das auf Kodaks Cineon-Print-Density-Format aufbaut. Es bildet die Grundlage für Spielfilmproduktionen, die digitale Negative verwenden und üblicherweise den Digital-Intermediate-Prozess durchlaufen. DPX unterstützt eine Reihe von Auflösungen (u. a. 32-Bit-Fließkomma), wird aber zumeist mit unkomprimierten logarithmisch codierten 10-Bit-Dateien assoziiert, wobei 16-Bit-DPX-Dateien zunehmend Verwendung finden. Das DPX-Format hat im Gegensatz zum Cineon einen Statusindikator (engl. *flag*), der gesetzt werden kann, wenn das Material logarithmisch codiert wurde.

Das *Academy-Density-Exchange-Encoding-Format* (ADX) wurde als Teil des *Image-Interchange-Frameworks* (IFF) der *Academy of Motion Picture Arts & Sciences* (AMPAS) entwickelt (siehe Abschn. 2.6) und adressiert das Problem, dass neuere Entwicklungen bei der Herstellung von Filmmaterial (Kodak 5219) dazu führten, dass vor allem Highlights nicht mehr codierbar waren und abgeschnitten wurden. ADX arbeitet mit 16 Bit und hat einen Spitzenwert der Dichte von 8192 über der Grunddichte (D-min). Die Quantisierungsstufe hat somit einen Wert von 0,000125D. Gleichzeitig können die drei Farbkanaäle individuell skaliert werden, wobei aufrechterhalten wird, dass ein jeweils gleicher Wert in den Farbkanaelen ein neutrales Grau impliziert.

## 2.2 HDTV-Farbworkflow

### 2.2.1 HDTV als displaybezogener Workflow

High-Definition-Television-Aufnahmen (HDTV) werden mit der Absicht gemacht, sofort auf einem Display in ausreichender Qualität dargestellt zu werden. Deshalb ist dieser Workflow displaybezogen (engl. *display-referred*). Die Aufnahmen verfügen über einen hohen Kontrast und einen geringen Dynamikbereich. Würde mit höherer Dynamik aufgenommen, liefen die Highlights Gefahr, abgeschnitten (engl. *to clip*) zu werden. Auch die Tiefen würden gestaucht (engl. *to crush*). Der hohe Kontrast der Aufnahmen wird außerdem notwendig, da – im Gegensatz zum Kino, in dem die Umgebung sehr dunkel ist – die Umgebungsbeleuchtung in einem typischen Wohnzimmer relativ hell ist (siehe Abschn. 2.4.1).

Vor Beginn der HDTV-Aufnahmen erfolgt ein Schwarzabgleich. Je nach Beleuchtungssituation wird auch vor den einzelnen Einstellungen oder vor einer Sendung die Kamera mit einer 90%-Referenzweiß-Tafel abgeglichen. Für die Wiedergabe des Bildes auf einem Display zu Kontrollzwecken oder für die Übertragung zum Zuschauer wird versucht, den Wert, der das Referenzweiß repräsentiert, so nahe wie möglich an die maximale Luminanz des Displays heranzufahren, um dessen Dynamikumfang auszunutzen. Um zu vermeiden, dass die Glanzlichter abgeschnitten werden, haben bei Fernsehkameras der Bildingenieur und sein Team, bzw. der Kameramann an seiner ENG-Kamera (engl. *electronic news gathering*), die Möglichkeit, durch Justierung der entsprechenden Kontrolleinheiten (Sony: Dynamic Contrast Control, Panasonic: u. a. Knee Settings) die Highlights und Tiefen in den vorhandenen Dynamikumfang einzupassen. Bestimmte Gamma-Einstellungen dürfen von den Kameramännern und -frauen nicht weiter verändert werden, da sich über die Parametereinstellungen unter anderem auch der Look der jeweiligen Sendeanstalt definiert. Abbildung 2.7



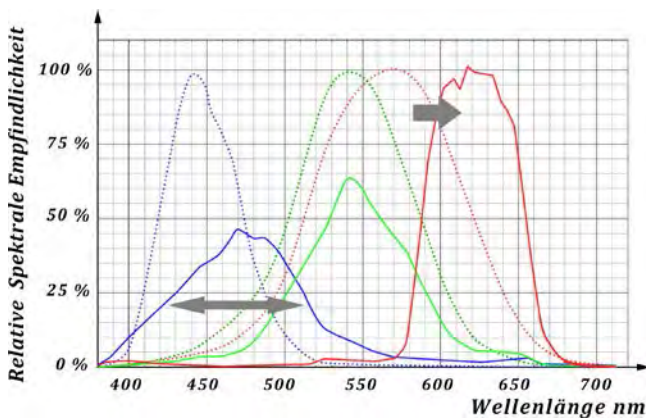


Abb. 2.8 Anordnung der Kamerafarbfilter

zeigt die Beeinflussung der Aufnahmeurve durch verschiedene Gammaparameter.

Der Vorteil der displaybezogenen Herangehensweise besteht in deren Unkompliziertheit. Das Bildmaterial kann einerseits sofort betrachtet werden, andererseits ist es einfach, Farbkorrekturen auszuführen und direkt in das Bildmaterial zu schreiben (engl. *to bake in*), sodass es sofort sendefähig ist. Von Nachteil ist, dass viel Detail der originalen Szene verloren geht und in der Postproduktion nicht wiederhergestellt werden kann. Dadurch sind auch die künstlerischen Möglichkeiten, das Material nach der Aufnahme zu gestalten, begrenzt, vor allem, da der Headroom in der Belichtung im Gegensatz zum Film sehr gering ist.

## 2.2.2 Verarbeitung der Daten in der Kamera

### Kamerafarbfilter

Wie in Abschn. 3.2 noch genauer ausgeführt wird, messen die Photoelemente des Sensors in der digitalen Kamera das Licht der Szene auf lineare Weise. Die Lichtenergie, die ein Photon besitzt, reicht aus, um genau ein Elektron freizusetzen, das im Potenzialtopf des CCD- oder CMOS-Photoelements (engl. *potential well*) gespeichert und schließlich gezählt wird.

Um das einfallende Licht zu separieren und auf die drei Farbkanäle aufzuteilen, müssen Farbfilter in der Kamera angewendet werden. Die Aufgabenstellung ist hierbei die gleiche wie bei der Gestaltung eines Farbsystems: Die Filter müssen so ausgelegt sein, dass sie die physiologischen Eigenschaften der Farbrezeptoren im menschlichen Auge so genau wie möglich simulieren. Im Gegensatz zu den CIE Color-Matching-Functions werden hier aber Filterkurven verwendet, die eher dem Absorptionsspektrum der Zapfen (LMS-Kurven) des menschlichen Auges ähneln.

Es werden drei Filter für die einzelnen Farbkanäle Rot, Grün und Blau verwendet. Die beiden Kurven für mittelwelliges und langwelliges Licht überlappen sich sehr stark. Da die Überlappung zu erhöhtem Bildrauschen führen würde,

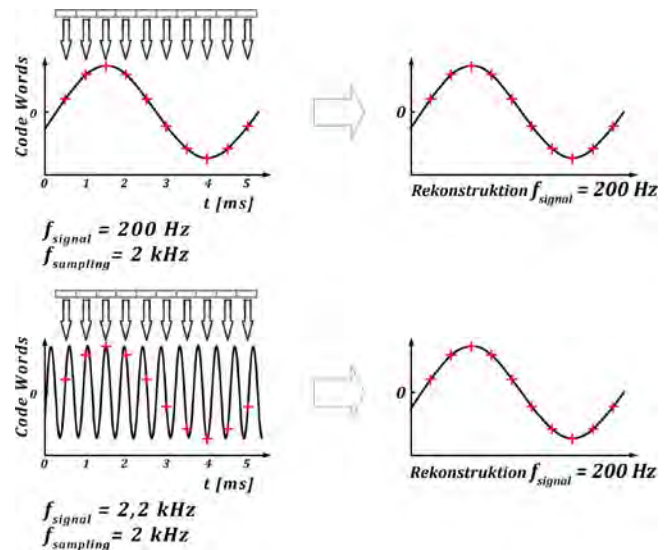


Abb. 2.9 Artefakte nahe der Nyquist-Frequenz

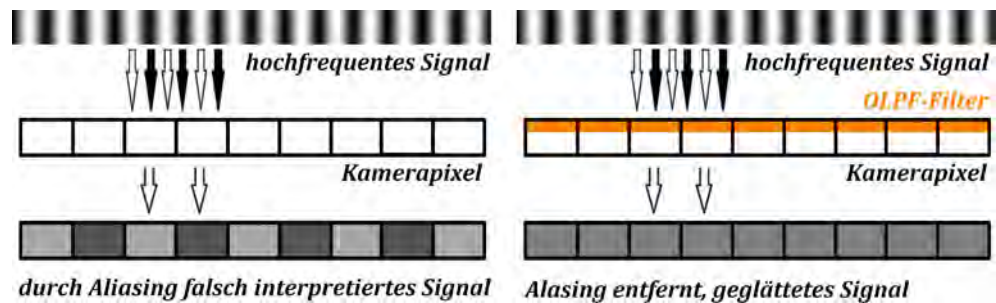
wird in den digitalen Kameras die rote Kurve um ca. 30 nm nach rechts versetzt. Sie darf aber nicht zu weit in den infraroten Bereich geschoben werden, da diese Lichtanteile vom Menschen nicht erkannt und deshalb nicht im roten Farbkanal abgebildet werden dürfen. Zusätzlich wird der blaue Filter gegenüber der originalen Zapfenkurve ein wenig gestreckt, um mehr Photonen aufnehmen zu können (siehe Abb. 2.8). Im Ergebnis wird zwar das Rauschen verringert, das Verfahren ist aber kolorimetrisch nicht exakt und verfälscht die Farbwiedergabe etwas. Dies ist in der Regel jedoch tolerierbar.

### Das Nyquist-Sampling-Theorem

Da die Digitalisierung von Analogmaterial diskret und nicht kontinuierlich verläuft, spielt die Samplingfrequenz eine entscheidende Rolle, da hier festgelegt wird, wann Proben des Ausgangsmaterials genommen werden. Hier besagt das whittaker-kotelnikow-shannonsche Abtasttheorem – zumeist als Nyquist-Theorem bezeichnet –, dass die Abtastfrequenz mindestens doppelt so hoch sein muss wie die höchste Frequenz des abzutastenden Signals. Ist die Abtastfrequenz zu gering, treten Artefakte bei hochfrequenten Mustern nahe und über der Samplingfrequenz auf. Dies können Aliasing-artefakte (Treppentufen), aber auch Interferenzpattern (wie Moirémuster) sein.

Abbildung 2.9 zeigt eine solche Fehlinterpretation eines Sinussignals. Bei einer Signalfrequenz von 200 Hz und einer Abtastfrequenz von 2 kHz kann das von den diskreten digitalen Stützpunkten (Samples) abgebildete Signal problemlos als Sinuswelle interpretiert werden (obere Zeile). Wird die Signalfrequenz bei gleicher Abtastfrequenz auf 2,2 kHz – das 1,1-Fache der Abtastfrequenz – erhöht, werden die gleichen Samples wie bei der 200-Hz-Welle übertragen. Der Interpreter reproduziert eine 200-Hz-Sinuswelle, die nicht im ursprünglichen Signal vorhanden war (untere Zeile). Um dies

**Abb. 2.10** Anwendung eines Optischen-Low-Pass-Filters (OLPF). (Nach RED 2015)



zu vermeiden, werden steiflankige Tiefpassfilter angewendet, die verhindern, dass Frequenzen über der halben Abtastfrequenz die Digitalisierungseinheit erreichen.

### Filtern der hochfrequenten Informationen in der Kamera

Das hier beschriebene Aliasingproblem gilt für alle Arten von Digitalisierungen – zum Beispiel auch für Audiomaterial. Die damit einhergehenden Artefakte sind nicht nur störend für die Bildbetrachtung, sondern haben auch großen Einfluss auf Codierungsalgorithmen und verringern die mögliche Kompressionsrate. Um hochfrequente Bildinformationen schon vor dem Sensor zu entfernen, werden sogenannte optische Tiefpassfilter (engl. *optical low-pass filter* – OLPF) verwendet. Diese glätten diejenigen Details der Bilder, die größer als die Auflösung der Sensoren sind.

Abbildung 2.10 zeigt das Prinzip. Nehmen wir an, dass im Tierpark eine in der Tiefe gestaffelte Zebraherde gefilmt wird. Ein Tier ist so weit von der Kamera entfernt, dass jeweils drei Streifen des Fells von einem Pixel abgebildet werden. Ohne Tiefpassfilter erhält das Photoelement  $n$  im Sensor die Lichtinformationen von zwei weißen und einem schwarzen Streifen, das nachfolgende Element  $n+1$  erhält Licht von zwei schwarzen und einem weißen Streifen. Da die Lichtinformationen durch Zählen der eintreffenden Photonen gemittelt werden, wird das Pixel  $n$  mit 66 % Grau und das Pixel  $n+1$  mit 33 % Grau dargestellt. Während im Original drei Zyklen Weiß-Schwarz vorhanden sind, wird nach der Aufnahme nur noch ein im Kontrast verringerter Zyklus abgebildet. Durch Anwendung eines OLP-Filters wird das einkommende optische Signal geglättet und als neutrales Grau gewertet.

Auf die Gestaltung dieser OLP-Filter wird großer Wert gelegt. Obwohl sie sich an der Art und Weise orientieren, wie das menschliche visuelle System die Umgebung wahrnimmt, wird das Bild nicht nur im hochfrequenten Bereich, sondern auch bei angrenzenden Pixeln ein wenig geglättet, was aber praktisch gesehen tolerierbar ist.

### Sensor-RAW

Das durch den OLP-Filter geglättete Material wird nun von den Photoelementen auf dem Sensor analog erfasst und dann digitalisiert. Digitale Filmkameras und auch Spiegelreflexkameras verwenden zur Aufnahme eine immer wiederkehrende Anordnung dieser Elemente, die jeweils einen der LMS-

Farbfilter besitzen. Das passierende Licht ergibt zumeist das Bayer-Muster (siehe Abschn. 3.2.4), bei dem in einem  $2 \times 2$ -Pixel-Bereich die Anordnung Rot-Grün und Grün-Blau wiederholt wird (Mosaik). Diese vier Farbkanäle werden je nach Kamerahersteller und Ausgabemodus separat oder gemeinsam, verlustlos oder verlustbehaftet komprimiert. Bei verlustbehafteter Komprimierung wird dabei oft der Begriff *visuell verlustfrei* verwendet. Eine Farbkorrektur findet nicht statt. Es werden nur fehlende Pixel durch benachbarte interpoliert.

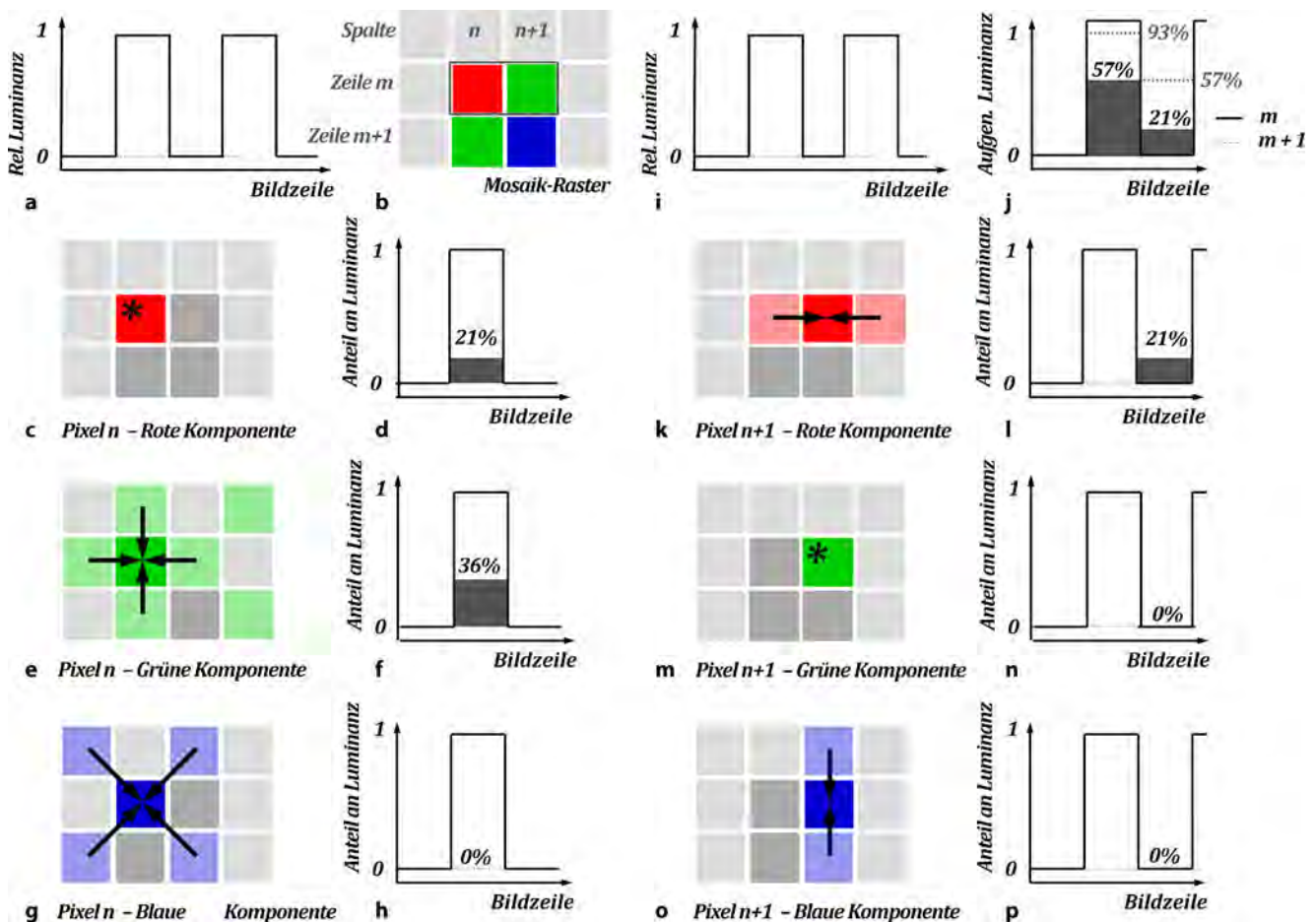
Es sei erwähnt, dass 3-Chip-Kameras (siehe Abschn. 3.2.1), die zumeist im HDTV-Bereich verwendet werden, kein Mosaik besitzen und alle drei Farbkanäle in voller Auflösung aufnehmen. Die Luminanz der Aufnahmen ist in der Regel 1,5 Belichtungsstufen höher. Allerdings ist die Auflösung begrenzt, und bei Kameras mit  $2/3''$ -Sensoren sind die roten Sensorelemente zumeist in einer anderen Entfernung von der Linse angeordnet als die anderen beiden Farbkanäle – dies stellt Objektivhersteller vor nicht unerhebliche Probleme. Abgesehen vom Demosaicing sind aber alle anderen Schritte im Workflow gleich.

### Demosaicing

Da das Raster des Color-Filter-Arrays (CFA) in ein anschauliches Bild umgewandelt werden muss, finden weitere Filterungen statt, die die Auflösung reduzieren. Dieses Thema wird in der Community breit und kontrovers diskutiert. Abbildung 2.11 zeigt eine schematisch stark vereinfachte Darstellung dieses Filterprozesses. Da der Mensch Schärfe und damit Auflösung in Form der Luminanz wahrnimmt und für Farbunterschiede weniger sensitiv ist, soll hier die mit dem Bayer-Mosaik aufgenommene Luminanz betrachtet werden. Luma  $Y'$ , die gammakorrigierte Luminanz, wird für HD-Systeme nach ITU-R. BT 709 (ITU-R 2015) mit Gl. 2.3 berechnet. Sie besagt, dass sich das Luma-Signal aus etwa 72 % Grün, 21 % Rot und 7 % Blau zusammensetzt. Um den Prozess nicht zu verkomplizieren, verwenden wir hier lineare – nicht-gammakorrigierte – Werte für die Bildung der Luminanz.

Die Kamera ist nun wieder auf die Zebraherde und hier auf ein Tier gerichtet, das näher zur Kamera steht. Die Kamera wird so positioniert, dass ein Streifen des Zebrafells genau mittig auf einer Pixelspalte dargestellt wird. Dadurch wechselt die Luminanz pixelweise zwischen Referenzweiß und





**Abb. 2.11a-p** Luminanz-Rekonstruktion beim Demosaicing

Schwarz (siehe Abb. 2.11a). Im Folgenden wird nun die Rekonstruktion der Luminanz des Pixels  $n$  in Zeile  $m$  betrachtet. Dabei werden die vier als Sensor-RAW gespeicherten Farbkanaäle (b) ausgewertet und ihr Anteil an der Luminanz für das infrage kommende Pixel betrachtet.

Zuerst wird der rote Farbkanal betrachtet (c). Da an der Position des Pixels ein Sensorelement mit einem Filter vorhanden ist, der den langwelligen roten Bereich passieren lässt, kann der direkt aufgenommene Wert des roten Kanals verwendet werden. Er nimmt 100% des roten Anteils im Frequenzgemisch auf. Da der Anteil des roten Kanals am Luminanzpegel 21% beträgt, werden auch 21% zum Luminanzwert hinzugefügt (d). Der grüne Farbkanal (e) ist an dieser Pixelposition null, da vom Farbfilter des Sensorelements alle grünen mittelwelligen Anteile herausgefiltert wurden. Diese müssen nun im Demosaicing-Prozess aus den Werten der benachbarten Pixel generiert werden.

Wenn wir voraussetzen, dass die grünen direkt aufgenommenen Farbwerte der vier umliegenden Pixel zu jeweils 25% in den rekonstruierten grünen Farbwert eingehen, hat dieser 50% des originalen Lichtwertes, da die beiden horizontal gewichteten Farbwerte null sind und die vertikal gewichteten 100%. Der Anteil der Luminanz des grünen Farbkanaals be-

trägt 50% von 72% der Luminanzgleichung, also 36% (f). Der Anteil des blauen Farbkanaals ist null, da kein direkter Wert aufgenommen wurde und der rekonstruierte Wert sich aus den vier umgebenden Farbwerten zusammensetzt, die alle ebenfalls null sind, da sie den schwarzen Streifen des Zebrafells abbilden (g, h). Durch die Addition der drei Anteile der Farbkanaäle ist die Luminanz für das Pixel  $n$ ,  $m$  nach dem Demosaicing 21% und 36% = 57% (Bild j).

Betrachten wir nun die Berechnung des Luminanzwertes des Pixels  $n+1$  in der Zeile  $m$ .

Der Wert für den grünen Kanal wird direkt aufgenommen (m). Da hier der schwarze Streifen des Zebrafells abgebildet wird, ist der Farbwert und damit auch der Anteil an der Luminanz null (n). Der Wert für den roten Kanal ist nicht vorhanden und muss aus zwei roten Farbwerten der horizontal umliegenden Pixel rekonstruiert werden (k). Da beide den weißen Fellstreifen abbilden, ist der Farbwert 100% und der Anteil an der Luminanz des Pixels, den der rote Kanal liefert, wieder 21% (l). Der Wert für den blauen Farbkanal muss aus den Farbwerten der beiden umliegenden vertikalen Pixel rekonstruiert werden (o). Beide bilden einen schwarzen Fellstreifen ab, sodass der resultierende Farbwert und Anteil am Luminanzwert jeweils null sind.

**Abb. 2.12** Lage der Macbeth-Farbfelder nach Kameraaufnahme korrigiert und nicht korrigiert. (Nach Poynton 2014, Class 06)

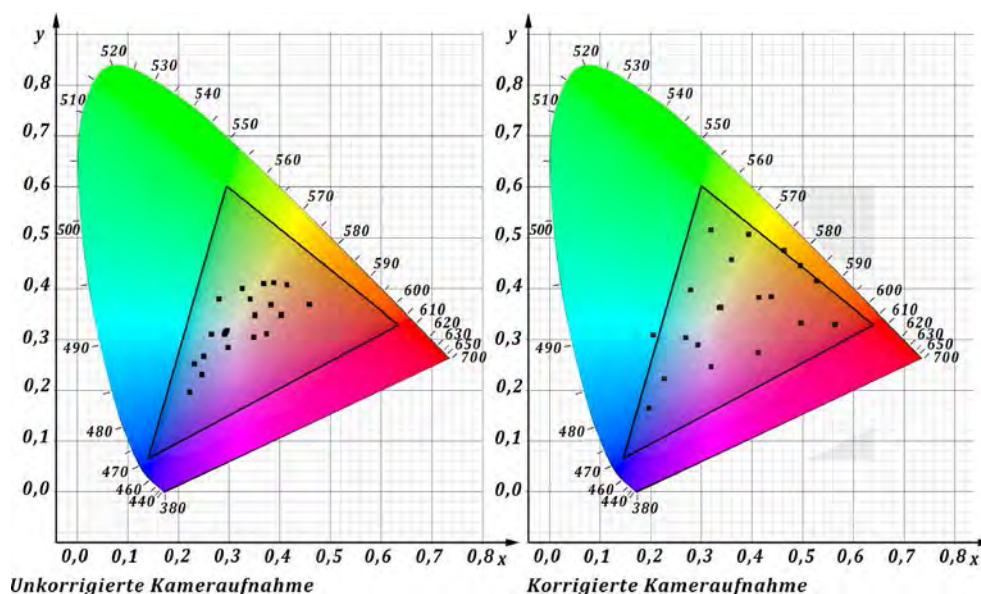


Bild j in Abb. 2.11 zeigt die nach dem Demosaicing rekonstruierte Luminanz für die Pixel  $n$  und  $n+1$  der Zeile  $m$ . Obwohl die ursprüngliche Luminanz der Szenen mit 100 % zu 0 % nicht wiedergegeben wird, bleibt doch ein gewisser Kontrast (57 zu 21 %) erhalten. Dieser wird auch in der nächsten Zeile  $m+1$  mit 93 zu 57 % abgebildet.

Da bei dieser Filteranordnung viele Farbwerte der direkt umgebenden Pixel verwendet werden, erinnert das Resultat an die Wirkung eines Boxfilters, der in Abschn. 8.5.4 noch genauer diskutiert wird und für eine Weichzeichnung des Bildes sorgt.

Natürlich sind die Demosaicing-Filter in der Realität komplexer und verwenden je nach implementierten Algorithmen andere Filterkerne und Gewichtungen. Trotzdem kann ein gewisser Teil der ursprünglichen Luminanz der Szene auch in der angegebenen Auflösung (zum Beispiel 4k) wiedergegeben werden.

### 2.2.3 Konvertierung in den Zielfarbraum

Nach dem Demosaicing müssen die inzwischen drei Farbkanaäle Rot, Grün und Blau so aufbereitet werden, dass sie von einem Display korrekt dargestellt werden können. Dies erfolgt gewöhnlich in zwei Schritten, die je nach Kamerahersteller oder Ablauf in der Nachbearbeitung jedoch auch zu einem Schritt zusammengefasst werden können. Der erste Schritt besteht in der Konvertierung der RGB-Kanäle nach dem Demosaicing in den nativen Kamerafarbraum (Kamera-RGB). Hierbei wird vor allem die Sättigung der Farben erhöht. Im zweiten Schritt werden die Farbkanaäle des Kamerafarbraums in den Zielfarbraum konvertiert.

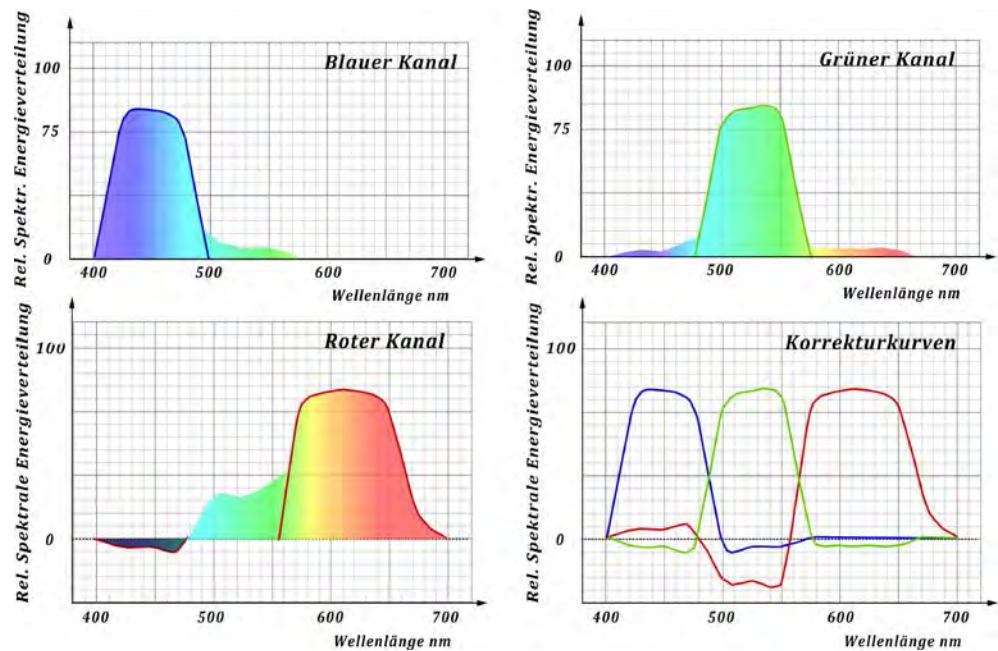
#### Kamera-RGB

Schließt man die Kamera nach dem Demosaicing an einen Monitor an, werden die Felder einer aufgenommenen Farbtabelle wie im linken Bild der Abb. 2.12 dargestellt. Sie sind im Umkreis des Weißpunktes angeordnet und stark entsättigt. Die Aufgabe im nächsten Schritt der Farbverarbeitung in der Kamera besteht darin, diese wieder an ihre normalen Position in der CIE-Normfarbtabelle zu platzieren (siehe Abb. 2.12, rechtes Bild).

Ursache für die Entsättigung sind die Überlappungen zwischen den Farbkanaälen, da die Farbfilter vor den Sensorelementen die Spektralbereiche nicht sauber genug trennen können. Das Ergebnis ist schematisch in Abb. 2.13 dargestellt. Der blaue Farbkanal nimmt geringe Anteile mittelwelligen Lichts auf, der grüne Farbkanal nimmt geringe Anteile des kurz- und langwelligen Lichts auf und der rote Kanal nimmt größere Anteile des mittelwelligen grünen Lichts auf. Letzteres vor allem, da die beiden Kurven (ML) für mittelwelliges grünes und kurzwelliges rotes Licht stark überlappen. Außerdem fehlen im roten Kanal die sehr kurzwelligen violetten Anteile, die zur akkuraten Farbwiedergabe notwendig sind.

Um die Sättigung der Farben wieder zu erhöhen, müssen die unerwünschten Anteile in den einzelnen Farbkanaälen entfernt werden. Dies erfolgt durch die Subtraktion von Anteilen der jeweiligen überlappenden Farbkanaäle. So wird der mittelwellige (grüne) Anteil im roten Farbkanal entfernt, indem der grüne Farbkanal skaliert und vom roten Kanal abgezogen wird. Diese komplexen  $3 \times 3$ -Matrizenoperationen führen zu Kurven mit negativen Bereichen (siehe Abb. 2.13, Bild rechts unten). Diese negativen Werte repräsentieren aber keine tatsächlichen Pixelwerte, sondern sind lediglich Korrekturkurven. Diese Kurven subtrahieren die Energie aus den benachbarten Wellenlängen, sodass die in Abb. 2.13 stark umrandeten Kurven erzeugt werden.

**Abb. 2.13** Korrigieren der Farbk채n채 nach dem Demosaicing



Die  $3 \times 3$ -Matrix rekonstruiert die Farben nicht vollständig, aber in einem für praktische Anwendungen ausreichenden Maße. Das Bildmaterial liegt nach diesem Schritt in einem Farbraum, der zumeist als *Kamera-RGB* bezeichnet wird. Dieser Begriff ist weder geschützt, noch eindeutig definiert, sodass die Hersteller darunter nicht immer das Gleiche verstehen. Prinzipiell ist Kamera-RGB ein Farbraum mit weitem Gamut. Das darin liegende Bildmaterial wurde von den überflüssigen Frequenzbändern des Spektrums bereinigt. Es erfolgte aber noch keine Anpassung an die Primärvalenzen des Displays. Dieser Vorgang wird auch als *Purification* bezeichnet.

### Zielfarbraum

Digitale Kameras sind in der Lage, Farben in einer größeren Palette (engl. *wide gamut*) aufzunehmen, als Monitore darstellen können. Dieser erweiterte Farbraum muss in den begrenzten Farbraum eines Monitors konvertiert werden. Dabei können folgende Farbräume als Zielfarbraum fungieren: *ITU-R BT.709* für HDTV, *DCI P3* für Digital-Cinema oder *sRGB* für Internetanwendungen. Dieser Transformierungsprozess findet sehr früh in der Farbpipeline – bereits in der Kamera – statt, sodass alle anderen Arbeiten in einem displaybezogenen Farbraum stattfinden.

Zumeist werden mit oder ohne Verwendung eines Tone-Mapping-Algorithmus der größere Farbraum und der höhere Dynamikbereich der Kamera in den kleineren Farbraum und den geringeren Dynamikbereich des Monitors komprimiert. Das führt zur Erhöhung des Kontrasts und zur Zunahme der Sättigung. Auch für diese Konvertierung wird eine  $3 \times 3$ -Matrix angewendet. Gleichung 2.1 zeigt als Beispiel die  $3 \times 3$ -Matrix, die Arri für die Konvertierung von Bildmaterial der

*Alexa(SUP 3.x)*-Kamera verwendet. Dabei wird das Material unter Verwendung von Tone-Mapping (siehe Abschn. 2.3.5) aus dem weiten nativen Kamerafarbraum in den ITU-R BT. 709-Farbraum konvertiert.

$$\begin{bmatrix} R_{BT.709} \\ G_{BT.709} \\ B_{BT.709} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,485007 & -0,401216 & -0,083791 \\ -0,033732 & 1,282887 & -0,249155 \\ 0,010776 & -0,122018 & 1,111242 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{Arri} \\ G_{Arri} \\ B_{Arri} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

### 2.2.4 $Y'C_B C_R$ -Codierung

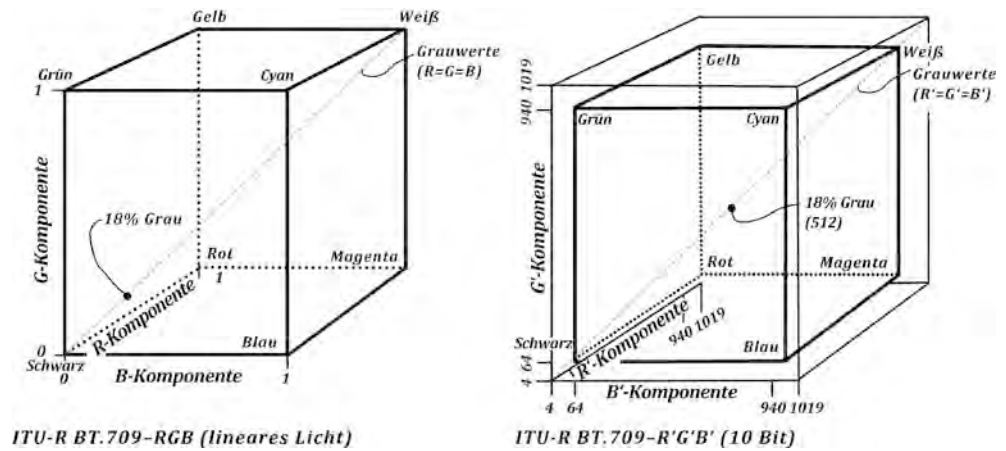
Im Video- und TV-Bereich wird das Bildsignal in ein Luminanzsignal und zwei Farbdifferenzsignale aufgespalten. Dies hat zum einen seine Ursache darin, dass beim Einführen des Farbfernsehens ein Graustufensignal für die weiterhin vorhandenen Schwarz-Weiß-Fernseher gesendet werden musste, andererseits ermöglicht diese Aufteilung der Signale, die Bandbreite der Farbdifferenzkanäle zu verringern, da der Mensch weniger sensitiv für Differenzen in der Farbe ist als für Unterschiede in der Luminanz.

#### Anwenden der Opto-Elektronischen-Übertragungsfunktion (OECF)

Das Farbmodell für digitales Video und SD-/HD-TV ist  $Y'C_B C_R$ . Es wird entweder in den ITU-R BT. 601-Farbraum für Standard-Television (SD) (ITU-R 2011b) oder den ITU-R BT. 709-Farbraum für HDTV übertragen. Im ersten Schritt der Konvertierung werden die RGB-Daten, die sich nun im Zielfarbraum des Displays befinden, einer Gammakorrektur



**Abb. 2.14** ITU-R BT.709-RGB zu ITU-R BT.709 10Bit-R'G'B'. (Bearbeitet nach Poynton 2012a, Class 07)



unterzogen. Die klassische Farbwissenschaft würde zuerst eine weitere  $3 \times 3$ -Matrix anwenden, um die RGB-Werte in Luminanz und Farbdifferenzen aufzuspalten und dann die OECF zur Gammakorrektur anwenden. In der Videotechnik wird der umgekehrte Weg verfolgt, da sich am Ende der traditionellen Kette ein Monitor befindet, der baulich bedingt eine inverse Gammakorrektur vornimmt. Um die Konvertierungen technisch richtig auszuführen, muss deshalb die Gammakorrektur vor der Farbkonvertierung stattfinden (vgl. Poynton 2012b, S. 111). Die OECF-Funktion für ITU-R BT. 709 wird in Gl. 2.2 angegeben.

$$V = \begin{cases} 1,099 L^{0,45} - 0,099 & 1 \geq L > 0,018 \\ 4,500 L & 0,018 > L > 0,018 \end{cases} \quad (2.2)$$

Abbildung 2.14 zeigt den Vorgang der Skalierung des RGB-Würfels vor und nach der Gammakorrektur. Außerdem werden die Interfacewerte der 10-Bit-Codierung nach ITU-R BT. 709 dargestellt. Dabei sind Videodaten zwischen 4 und 1019 codiert und Zeitreferenzdaten zwischen 0 und 3 bzw. 1020 und 1023. Der Schwarzpegel ist mit 64 festgelegt und die Maximalwerte von R', G' und B' mit jeweils 960. Lineares 18%iges Grau (engl. *achromatic*) hat den Wert 512.

### Codieren von Luma

Nach der Anwendung der OECF (Gamma) ist der lineare Bezug zum Licht der Szene verloren gegangen. Dies wird durch Hinzufügen der Apostrophe (engl. *prime*) zu den Farbkanälen gekennzeichnet. Das Bildmaterial befindet sich in einem gleichabständigen Farbraum und damit in einem displaybezogenen Arbeitsumfeld. Im nächsten Schritt wird aus den gewichteten Anteilen der R'G'B'-Kanäle mit Gl. 2.3 Luma erzeugt. Die Verwendung des Begriffs (Luma) kennzeichnet den Verlust der linearen Relation zur ursprünglichen Luminanz der Szene.

$$E'_Y = 0,2126 E'_R + 0,7152 E'_G + 0,0722 E'_B \quad (2.3)$$

Auffällig ist der hohe Anteil (72%) des grünen Kanals am Gesamtergebn.

### Codieren von Chroma

Nachdem Luma (Y') festgelegt wurde, können die beiden Farbdifferenzkanäle berechnet werden, indem der Wert von Luma einerseits vom nichtlinearen blauen Kanal und andererseits vom nichtlinearen roten Kanal abgezogen wird (Gln. 2.4 und 2.5).

$$E'_{CB} = \frac{E'_B - E'_Y}{1,8556} \quad (2.4)$$

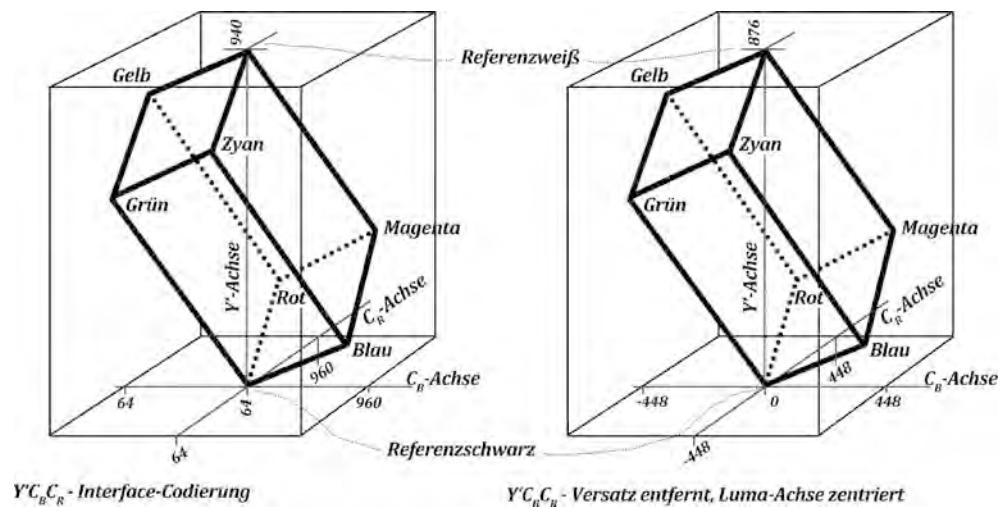
$$E'_{CR} = \frac{E'_R - E'_Y}{1,5748} \quad (2.5)$$

Im Ergebnis dieser Berechnungen entsteht ein rhombischer Farbraum, der aufgrund der Tatsache, dass die Luma-Achse senkrecht steht, im RGB-Raum rotiert wird. Der  $Y'C_B C_R$ -Farbraum wird gemäß ITU-R BT.709 codiert, im Consumerbereich in der Regel mit 8 Bit und im Studiobereich mit 10 Bit. Luma wird zwischen den Werten 64 und 940 codiert, die beiden Farbdifferenz-Kanäle mit Werten zwischen 64 und 960 (siehe Abb. 2.15, linkes Bild). Für arithmetische Berechnungen muss der Versatz entfernt werden. Dazu wird Schwarz auf das Codewort 0 gesetzt.

Für das Interface werden nur positive ganzzahlige Werte verwendet. In einem anderen Konzept wird Luma zwischen Referenzschwarz 0 und Referenzweiß 1 (10-Bit-Codeworte 0 bis 876) dargestellt und daraus der Bereich von  $C_B$  und  $C_R$  abgeleitet. Da die Luma-Achse und damit die Graustufenwerte an der Position  $C_B = C_R = 0$  liegen, werden die Achsen für  $C_B$  und  $C_R$  zwischen  $-0,5$  und  $+0,5$  (10-Bit-Codeworte  $-448$  bis  $448$ ) aufgespannt. Die Projektion des so entstehenden Rhombus auf die 2D-Ebene ergibt ein Hexagramm. Gegenüber der vollständigen Auflösung 0 bis 1023 bzw.  $-512$  bis  $511$  wird ausreichend Foot- und Headroom für die Codierung anderer Elemente belassen.

Der BT.709- $Y'C_B C_R$ -Farbraum verwendet ca. 20% des umgebenden RGB-Würfels. Es sei darauf hingewiesen, dass alle Codeworte innerhalb dieses Würfels gültig sind, auch die außerhalb des Rhombus liegenden. Diese können zum Bei-

**Abb. 2.15** ITU-R BT.709-  
Y'CBCR – 10-Bit-Codierung.  
(Bearbeitet nach Poynton 2004,  
S. 5)



spiel verwendet werden, um einen größeren Farbraum (*wide gamut*) zu codieren.

### Codieren des Schwarzpegels

Da in der  $Y'CbCr$ -Codierung<sup>1</sup> ein gewisser Foot- und Headroom belassen wird, kann nicht die gesamte zur Verfügung stehende Auflösung genutzt werden. Insbesondere bei 8-Bit-Codierung (Codewörter 16 bis 235 für Luma, 16 bis 240 für Chroma) ist der Dynamikbereich stark eingeschränkt. Bestrebungen, diesen zu erweitern (engl. *extended range*), werden breit und kontrovers diskutiert (vgl. Okun und Zwermann 2010, S. 205; Selan 2012, S. 21; Seymour 2012) und sollen hier etwas genauer vorgestellt werden.

Der Dynamikumfang von Kameras mit digitalem Sensor liegt im Bereich zwischen dem Signal mit der niedrigsten messbaren Stärke und dem höchsten aufnehmbaren unverzerrten Pegel. Dieser Bereich wird im Film und in der Fotografie in Belichtungsstufen (engl. *f-stops*) oder Dezibel angegeben. Der niedrigste Wert wird durch das Eigenrauschen der Elektronik im Sensor, an dem kein Nutzsignal anliegt, definiert. Um den Dynamikbereich auszunutzen und die Kamera einzustellen, ist es unerlässlich, den Schwarzpegel festzulegen. Dieser wird durch den Durchschnitt der vorhandenen Rauschenergie gebildet. Dieses Rauschen wird einerseits durch die Elektronik in der Kamera und andererseits durch den Lichttransport selbst verursacht und erzeugt in den digitalen Kameras ein mehr oder weniger fixiertes Muster.

Für das Eigenrauschen der Kamera zeichnen die Photoelemente der Sensoren verantwortlich, die auch eine Zunahme des Rauschens bei Erwärmung verursachen. Um die Intensität des Eigenrauschens zu ermitteln, werden einzelne, an den Rändern des Sensors verteilte Photoelemente mit Aluminium abgedeckt, sodass kein Licht eindringt. Die dort durch die Wärmeenergie freigesetzten Elektronen werden gemessen und deren Anzahl gemittelt. Dieser Wert beschreibt den mitt-

leren Pegel des Eigenrauschens, der dann von den gemessenen Werten jedes einzelnen Photoelements abgezogen wird. Dadurch wird der Schwarzpegel mit dem Wert null ermittelt. Durch die Differenzbildung können in den einzelnen Pixeln Werte auftreten, die negativ sind und unterhalb des Schwarzpegels liegen.

Abbildung 2.16 zeigt im oberen linken Diagramm den Ausschnitt aus einer Sensorzeile und die von den Photoelementen gemessene Anzahl von Elektronen, die von den Lichtphotonen freigesetzt wurden sowie den gemittelten Pegel (rot) des Eigenrauschens. Im linken unteren Diagramm wurde das Sensorrauschen abgezogen und der Schwarzpegel (0) festgelegt. Dieser repräsentiert den durchschnittlichen Rauschpegel, das heißt, es addieren sich die negativen und positiven Werte zu null.

Die Frage ist nun: Wie codiert man den Schwarzpegel? Hierzu gibt es unterschiedliche Auffassungen. Eine Herangehensweise codiert ihn auf einem geringen positiven Wert (siehe Abb. 2.16, Diagramm unten rechts). Der Vorteil ist, dass der Abstand des Rauschpegels zu den ersten erkennbaren Bildinformationen, die hier zufällig auf dem größten positiven Wert des Rauschens (Pixel 6) liegen, nicht verändert wird (sechs Codewörter in dem Beispiel). Der Nachteil ist, dass die Auflösung besonders bei 8-Bit-Codierung nicht komplett zur Verfügung steht.

Eine zweite Herangehensweise, die unter dem Begriff *extended range* rangiert, codiert den Schwarzpegel auf null, um den gesamten Bereich der Auflösung zu verwenden. Der Nachteil dieser Methode liegt darin, dass der Rauschpegel erhöht wird. Da die negativen Werte abgeschnitten werden, steigt der neue durchschnittliche Rauschpegel und der Abstand zu den Bildinformationen wird geringer (hier fünf Codewörter).

Welcher Herangehensweise der Vorzug gegeben wird, ist dem Nutzer überlassen. Prinzipiell möchten die Kamerahersteller Rauschen vermeiden und codieren den Schwarzpegel auf einen geringen positiven Wert, lassen aber auch die an-

<sup>1</sup> Das gilt bei digitalen Kameras auch für den jeweiligen RGB-Farbraum

Game of Colors: Moderne Bewegtbildproduktion  
Theorie und Praxis für Film, Video und Fernsehen  
Hasche, E.; Ingwer, P.  
2016, XXIX, 401 S. 608 Abb. in Farbe., Hardcover  
ISBN: 978-3-662-43888-6