



Farbanpassung einer Hochgeschwindigkeitskamera in Echtzeit

Theoretische Betrachtung und praktische Entwicklung eines effizienten
Workflows im Rahmen einer Filmproduktion

Bachelorthesis

Zur Erlangung des akademischen Grades B.Sc.

Julia Biemann

Studiengang: Medientechnik

Matrikelnummer: [REDACTED]

Erstprüfer: Prof. Dr. Roland Greule

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Johannes Dornow

Eingereicht am 29.07.2022 in Hamburg

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Department Medientechnik der Fakultät Design, Medientechnik und Information

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Einleitung	4
1.1	Problemstellung	4
1.2	Relevanz und Zielsetzung	4
1.3	Vorgehen	5
2	Grundlagen - Der Weg des Lichtes	7
2.1	Entstehung und Wahrnehmung von Licht und Farbe	7
2.1.1	Licht und Farbe	7
2.1.2	Subjektive Wahrnehmung vs. objektive Messung.....	9
2.1.3	Farbtemperatur	10
2.1.4	Spektrum und Farbwiedergabe der Leuchtmittel	10
2.2	Sensortechnologien	12
2.2.1	Wie funktioniert der Bildwandler?	13
2.2.2	CCD-Sensor	14
2.2.3	CMOS-Sensor	14
2.2.4	Sensorgößen	16
2.2.5	Farbbildwandler.....	18
2.2.6	Signalverarbeitung und Empfindlichkeit.....	19
2.3	Gamma.....	21
2.3.1	Log-Profile	25
2.4	Darstellung von Farben – Vom Spektrum zum Farbraum	27
2.4.1	CIE Farbtafel	29
2.4.2	L*a*b* Farbmodell	31
2.4.3	Delta E	32
2.4.4	RGB-Farbmodell	32
2.4.5	Farbräume im Allgemeinen	34
2.4.6	Rec.709.....	35
2.4.7	Rec.2020.....	35
2.4.8	DCI-P3	36
2.4.9	ACES.....	37
2.4.10	LUT.....	39
2.5	Look	41
2.5.1	Filmlook	41
2.5.2	TV – Look	44
2.5.3	Ästhetisch ansprechender Look	46
3	Technischer Vergleich der Kameras	49
3.1	Hochgeschwindigkeitskamera Phantom VEO4K-PL.....	49
3.1.1	Sensor	50
3.1.2	Belichtungszeit	52
3.1.3	Speicherung, Trigger.....	52
3.1.4	Cine-RAW.....	53
3.2	ARRI Alexa Mini	54
3.2.1	Sensor	55
3.2.2	Dynamikbereich und Log C.....	56
3.2.3	Farben.....	59
4	Problem: Kamera Matching und Lösungsansatz	60
5	Versuch	62

5.1	<i>Vorbereitungen</i>	62
5.2	<i>Verwendete Materialien und Aufbau</i>	63
5.2.1	Farbtafel	63
5.2.2	Requisiten	64
5.2.3	Scheinwerfer	64
5.2.4	Objektive	68
5.2.5	Technische Vorbereitungen:	69
5.2.6	Menü-Einstellungen der ARRI Alexa Mini	70
5.3	<i>Durchführung</i>	72
5.3.1	Referenzen ARRI	72
5.3.2	Angleichungsvorgang Versuch 1	73
5.3.3	Farbmatrix	74
5.3.4	Erste Anwendungen der Matrix	76
5.3.5	Resümee	78
5.4	<i>Optimierter Workflow des Angleichungsvorgangs</i>	78
5.4.1	Grautreppe	79
5.4.2	Weißabgleich	82
5.4.3	Farbmatrix	83
5.5	<i>Auswertung</i>	87
5.6	<i>Fehlerquellen und Optimierungsmöglichkeiten</i>	89
6	Fazit	90
7	Ausblick	92
8	Tabellenverzeichnis	94
9	Abbildungsverzeichnis	94
10	Abbildungsquellen	96
11	Literaturverzeichnis	99
12	Anhang	103
13	Danksagung	104
14	Eigenständigkeitserklärung	105

1 Motivation und Einleitung

Hochgeschwindigkeitskameras finden in der Filmbranche zunehmend ein vielseitiges Anwendungsgebiet. Sie kommen dort zum Einsatz, wo schnelle Bewegungen stattfinden, die für das menschliche Auge nicht zu erfassen sind. Eine Sekunde Aufnahmezeit kann auf mehrere Minuten Wiedergabezeit ausgedehnt werden, was zu einer bilddramaturgischen Betonung bestimmter Handlungsabschnitte oder Objekte führt.

Doch neben der Wiedergabegeschwindigkeit einer Aufnahme spielen auch Farbgebung und Helligkeit für den Betrachter eine wesentliche Rolle. Nur durch das Zusammenspiel vieler Parameter kann die ästhetische Qualität gesteigert werden.

1.1 Problemstellung

Wie ist es möglich unkomprimiert in Slow-Motion aufzuzeichnen und gleichzeitig in Echtzeit am Set ein kontrastreiches Bild zeigen zu können?

Um in der Nachbearbeitung die Vorteile des unkomprimierten Videomaterials ausnutzen zu können, wird überwiegend im RAW-Format aufgezeichnet. Ein RAW-Bild ohne entsprechende Korrektur erzeugt jedoch am Set einen ungesättigten und wenig dynamischen Eindruck. Zudem führt die Verwendung mehrerer Kameras oftmals zu unterschiedlichen Farbinterpretationen, wodurch Verunsicherung bei den Betrachtenden oder den Kunden entsteht. Die effiziente Anpassung des Bildes einer Hochgeschwindigkeitskamera wie der Phantom VEO4K-PL unter Zeitdruck sowie die Sicherung des Vorgangs für die Postproduktion wird somit zum Problem.

1.2 Relevanz und Zielsetzung

Aus dem genannten Grund beschäftigt sich diese Arbeit damit, wie Farbkorrekturen schon am Set vorgenommen und in der Postproduktion als Grundlage verwendet werden können, ohne das Videosignal zu komprimieren. Dieses Thema findet vielseitig Relevanz in der Werbevideo-Branche. Dem Betrachtenden wird ein farblich ansprechendes Bild präsentiert und auf der Mitarbeiterseite wird eine Kosten- und Zeitersparnis erzielt. Dies fördert das Vertrauen und die Zufriedenheit am Set und die Effizienz des Arbeitsablaufes.

Ziel ist es, ein technisch hochwertiges und optisch ansprechendes Bild bereits in der Phantom VEO4K-PL zu konzipieren. Zudem soll das Bild der Hochgeschwindigkeitskamera nah an den Sendestandards liegen und dem Look der ARRI-Kamerareihe ähneln. Im Optimalfall können die vorgenommenen Einstellungen mittels Metadaten schon mit in die Bildbearbeitungssoftware übertragen werden, um an die Postproduktion anzuknüpfen und den Arbeitsaufwand zu reduzieren.

1.3 Vorgehen

Zu Beginn der Thesis werden grundlegende videotechnische und farbmetrische Themen aufgegriffen, die für die weiteren Abschnitte vorausgesetzt werden. Es wird der komplexe Weg des Lichtes in die Kamera und die daraus resultierende Farbentstehung erläutert. Neben der Funktionsweise des Sensors, der Vielfalt der Farbräume und dem Konzipieren eines Looks werden die verwendeten Kameras thematisiert.

Aufbauend auf den Grundlagen wird im Rahmen dieser Arbeit die Farbanpassung der Hochgeschwindigkeitskamera Phantom VEO4K-PL an die ARRI Alexa Mini im Fokus stehen. Die Lösung des Problems bietet das Einbinden einer selbst erstellten RGB-Farbmatrix bereits in der Kamera. Nach dem Aufbau eines Testsets werden Referenzen mit der ARRI aufgenommen. Auf Basis der eigenständig generierten Testbilder lässt sich die Farbanpassung am Live-Bild der Phantom realisieren. Kern des Versuches ist das Konzipieren einer geeigneten Farbmatrix unter unterschiedlichen Lichtsituationen. Mit Hilfe von Vektorskopen, Histogrammen und einem Waveformmonitor können Videopegel, Farbtöne, Sättigungen und Helligkeiten ermittelt werden. Die Verwendung dieser „Scopes“ in „DaVinci Resolve“ und „vMix“ liefert Aufschluss über die Richtigkeit und die Optimierungsmöglichkeiten der Matrix und der Übertragungsfunktion.

Auf der Grundlage des Testaufbaus konnte eine erstaunlich passende Farbmatrix erstellt werden, die zumindest für die Lichtsituation mit ARRI M18 Scheinwerfern präzise Ergebnisse liefert. Durch diese Grundlage lässt sich Zeitdruck am Set vermeiden und auch ein Mehraufwand in der Postproduktion kann umgangen werden.

Abkürzungsverzeichnis

ACES	Academy Color Encoding System
CCD	Charged Coupled Device
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CRI	Color Rendering Index
EOTF	Electro Optical Transfer Function
FPN	Fixed Pattern Noise
FPS	Frames per Second
LED	Light Emitting Diode
LOG	Logarithmic Gamma Curve
LUT	Look-up Table
OETF	Optical Electro Transfer Function
PCC	Phantom Camera Control Application
RGB	Rot Grün Blau
ROI	Region of Interest

2 Grundlagen - Der Weg des Lichtes

Im Folgenden wird der „Weg des Lichtes“ von der Lichtentstehung bis zur Verwertung des entstandenen Bildes als theoretische Grundlage diskutiert. Beginnend mit der Entstehung von Licht und Farbe wird im Anschluss die Verarbeitung des eintreffenden Lichtes auf dem Kamerasensor beschrieben. Daraus resultieren Erklärungen über den farblichen Bildaufbau und die Anzeigemöglichkeiten auf dem Monitor. Hand in Hand mit dieser Thematik geht die Darstellung von Farben in unterschiedlichen Farbräumen. Anschließend werden gestalterische Themen, wie der „Look“, betrachtet. Zum Abschluss des Grundlagenkapitels werden die ARRI Alexa Mini und die Phantom VEO4K-PL unter technischen Aspekten vergleichend untersucht.

2.1 Entstehung und Wahrnehmung von Licht und Farbe

2.1.1 Licht und Farbe

Laut physikalischer Definition ist Licht elektromagnetische Strahlung, die sich als Welle einer Frequenz ausbreitet. Der für den Menschen sichtbare Bereich des Lichtspektrums erstreckt sich von 380 nm bis 780 nm, wobei jede Wellenlänge einen bestimmten Farbeindruck erzeugt. Werden alle für den Menschen sichtbaren Wellenlängen nebeneinander dargestellt, entsteht ein Farbverlauf (siehe Abbildung 1) mit den Begrenzungspunkten vom energiereichen Ultraviolett bis zum langwelligen Infrarot.¹

Farbe ist nicht die Eigenschaft eines betrachteten Objektes, sondern die Reflexionen des Lichtes einer Wellenlänge, die sowohl auf dem Gegenstand als auch im Lichtspektrum existent sind. Die anderen Wellenlängen werden von der beleuchteten Fläche absorbiert. Zur individuellen Wahrnehmung von Farben gehört auch die Verarbeitung im Auge und im Gehirn. Die Schnittstelle zwischen elektromagnetischer Strahlung und Reizempfindung bilden die Lichtsinneszellen im Auge. Die farbempfindlichen Zapfen rezipieren Licht nach der additiven Farbmischung, welche sich aus den Primärfarben Rot, Grün und Blau zusammensetzt.

¹ (Greule, Licht und Strahlung , 2021)

Neben dem Helligkeitsanteil einer Farbe wird diese durch den Farbton und die Farbsättigung beschrieben.² Die Stärke der Licht- und Farbempfindung wird als Helligkeit bezeichnet, der Farbton kennzeichnet die Art der Buntheit der Farbe. Somit ist die Buntheit die Kennzeichnung für den Grad der Farbigkeit unter Berücksichtigung der Helligkeit. Die Sättigung ist, unabhängig von der Helligkeit, ein Maß für die Farbintensität und gibt an, wie kräftig oder blass eine Farbe wirkt.³

Ein und derselbe Farbton kann (bei gleicher Helligkeit) unterschiedlich satt bzw. bunt sein, d.h. einen unterschiedlich hohen Grauanteil haben.⁴ Mittels verschiedener Intensitäten der RGB Farbwerte, lässt sich jede beliebige Farbe in der erwünschten Sättigung zusammensetzen. Entsprechend der Parameter Farbton, Helligkeit und Sättigung muss ein Modell, das alle wahrnehmbaren Farbnuancen veranschaulichen soll, dreidimensional sein. Das erste Grassmann'sche Gesetz⁵ besagt, dass zum Festlegen einer Farbe drei Bestimmungsstücke notwendig und hinreichend sind.

Die CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) legte 1931 als Basis für ein internationales farbmatisches System drei Spektralfarben als Primärvalenzen fest:

Rot = 700 nm Grün = 546 nm und Blau = 436 nm.⁶ Auf den von der internationalen Beleuchtungskommission konzipierten Spektralfarbenzug wird im Kapitel 2.4 Bezug genommen.

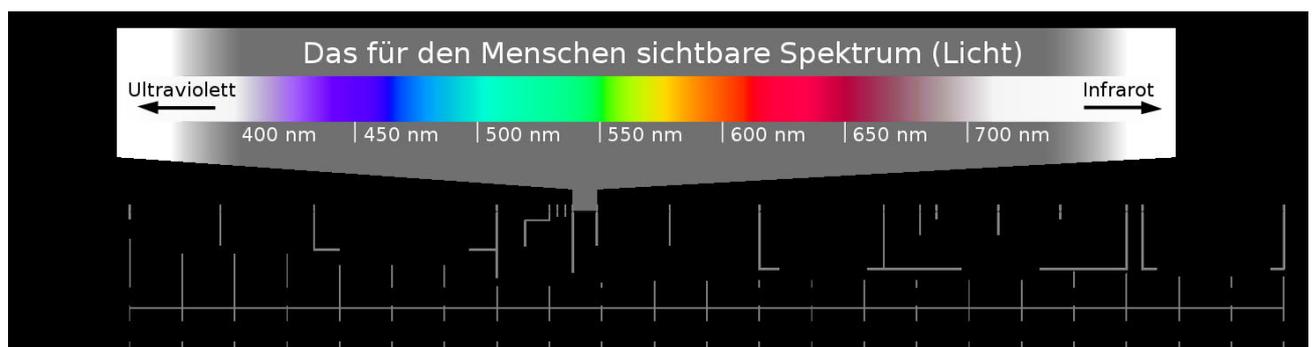


Abbildung 1: Das für den Menschen sichtbare Lichtspektrum

² Vgl. (Greule, Farbsysteme, 2013)

³ Vgl. (Greule, Farbmatische Grundlagen, 2021, S. 79)

⁴ Vgl. (Fuxjäger, 2021, S. 11)

⁵ Vgl. (Greule, Farbmatische Grundlagen, 2021, S. 83)

⁶ (Schmidt U. , 2009, S. 69,70)

2.1.2 Subjektive Wahrnehmung vs. objektive Messung

Die Farbwahrnehmung ist gegenüber der Helligkeitswahrnehmung mit geringerer räumlicher Auflösung verknüpft.⁷ Ein schwarz-weiß gestreiftes Muster wird detaillierter wahrgenommen als das identische, durch einen Buntheitskontrast eingefärbte Muster. Dementsprechend ist die Kontrastempfindlichkeit für Helligkeitsmodulation deutlich feinfühlicher, was eine Reduktion der Farbinformationen in der Bildwiedergabe zulässt. Besonders die mittleren Wellenlängen des sichtbaren Lichtes weisen für das visuelle System des Menschen eine große Empfindlichkeit auf, welches sich auch in der guten Helligkeitsempfindung der Farbe Grün niederschlägt. Wie im Kapitel 2.2.1 Farbbildwandler betrachtet wird, hat die menschliche Wahrnehmung auch in der Farbbildentstehung einen großen Einfluss. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass zurzeit keine Kamera in der Lage ist, das gesamte Farbspektrum des menschlichen Auges zu erfassen.⁸

Im Zuge der hohen Individualität und Subjektivität der Wahrnehmung, wird zur Überprüfung der Helligkeitsverteilung mit dem Waveformmonitor gearbeitet. Äquivalent gibt das Vektorskop mit einem 6-Punkt-Farbrad Auskunft über die Farbechtheit und Farbsättigung in einem Bild. Bei den sechs Punkten handelt es sich um die Primärfarben Rot, Grün und Blau und die Sekundärfarben Cyan, Magenta und Gelb. Wie aus Abbildung 2 zu entnehmen, liegen sich die Komplementärfarben in dieser Darstellung gegenüber.

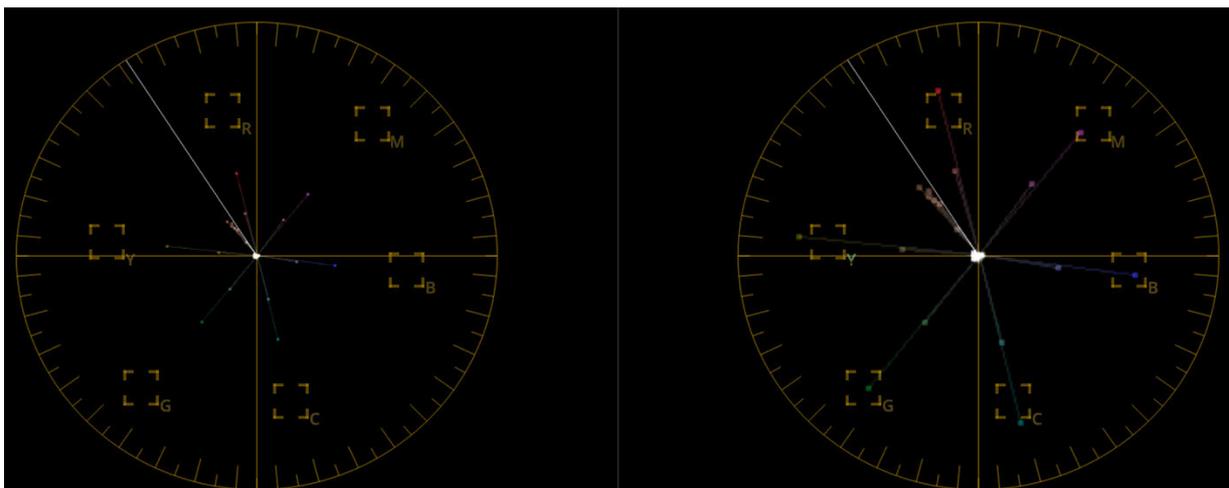


Abbildung 2: Vektorskop (rechts 2x Zoom)

⁷ Vgl. (Schmidt U. , 2009)

⁸ Vgl. (Was ist der Dynamikumfang?, kein Datum)

Die Verwendung verschiedener „Scopes“ stellt sicher, dass Farbkorrekturen technisch richtig vorgenommen werden. Durch die Möglichkeit Farbtöne und -sättigungen selektiv in den Mitten, Tiefen und Höhen zu betrachten, werden präzise Anpassungsmöglichkeiten geschaffen.

Neben der individuellen Wahrnehmung können auch der Blickwinkel auf den Monitor oder das Umgebungslicht im Hinblick auf die Farbdarstellung irreführend wirken. Oft ist der manipulierte Seheindruck auch der fehlerhaften Kalibrierung der Referenzmonitore geschuldet. Dementsprechend ist es unumgänglich, Parameter wie den Weißabgleich, den Gammawert und den Farbraum in Einklang zu bringen. Im Rahmen des praktischen Teils dieser Thesis werden zur Überprüfung der Chrominanz und Luminanz der Testaufnahmen Messgrafiken wie Vektorskope, Waveformmonitore und Histogramme verwendet.

2.1.3 Farbtemperatur

Mit der Vielfalt der Leuchtmittel gehen auch die spektralen Unterschiede einher. Im Hinblick auf den anstehenden Testaufbau ist die Wahl der Scheinwerfer entscheidend für die spektrale Verteilung und bestimmt die Farbwiedergabe. Die Farbtemperatur des Scheinwerfers definiert den wahrgenommenen Wärmegrad des abgestrahlten Lichtes. Den Ursprung der Farbtemperatur bietet ein schwarzer Titankörper, der erhitzt wird. In Abhängigkeit zum Erhitzungsgrad leuchtet dieser zu Beginn rot, dann gelb und bei hoher gemessener Temperatur blau. Die Angabe der Farbtemperatur erfolgt durch die Temperatureinheit Kelvin (K). Die Kelvin-Skala ist gegenüber der Celsius-Skala verschoben, sodass 0° Celsius 273,15 Kelvin entsprechen.⁹ Eine kalte Lichtfarbe weist eine hohe Kelvinzahl auf, eine warme Lichtfarbe eine niedrigere (siehe Abbildung 3).¹⁰



Abbildung 3: Farbtemperatur in Kelvin

2.1.4 Spektrum und Farbwiedergabe der Leuchtmittel

⁹ Vgl. (Schmidt E., 1956)

¹⁰ Vgl. (Was ist die Farbtemperatur?, kein Datum)

Das Spektrum einer Lampe bringt auch ihre Farbwiedergabequalität zum Ausdruck, genauer gesagt, gibt es auch Auskunft darüber, inwiefern die Farben unter ihrem Licht unterschieden werden können (CRI-Farbwiedergabe-Index). Wie präzise die Farbwiedergabe eines Leuchtmittels ist, kann am (mit dem Spektrometer gemessenen) Emissionsspektrum erkannt werden. Je ausgeglichener das Spektrum und je stärker es dem Tageslicht nachempfunden ist, desto besser ist die Farbwiedergabe, was an dem Farbwiedergabeindex CRI messbar ist.

Bei der Emission von Strahlung wird zwischen natürlichen Lichtquellen und künstlichen Lichtquellen unterschieden. Die verschiedenen Spektren werden unterteilt in kontinuierliche Spektren wie bei einer Glühlampe und Linienspektren (z.B. Metall dampflampe).¹¹

Heißstrahler, wie die Sonne oder eine Glühbirne, erzeugen ein ausgeglichenes Lichtspektrum und haben die bestmögliche Farbwiedergabe.¹² Leuchtmittel emittieren in Abhängigkeit der Technik ein Spektrum, welches verschiedene Farben stärker oder schwächer darstellt. Das Spektrum einer Leuchtstofflampe weist starke Spitzenausschläge bei bestimmten Farben auf, während andere Farben wenig vorhanden sind, besonders Rot. Das Spektrum einer Halogenlampe hingegen ist, wie in Abbildung 4 erkennbar, gleichmäßig ansteigend und besitzt einen großen Rotanteil. Das Fehlen spektraler Anteile wirkt sich auf die Darstellung der Farben aus. Die Farbtemperatur für Halogenscheinwerfer bewegt sich in der Regel um die 3000 K, wodurch insbesondere der warmweiße Bereich abgebildet wird.

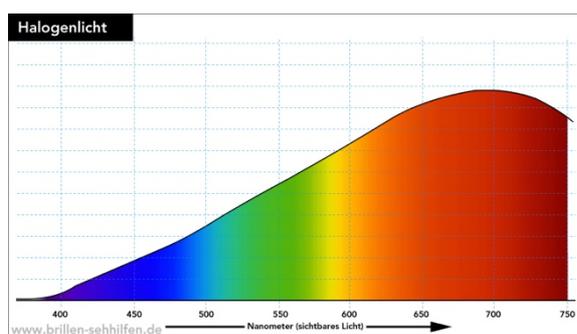


Abbildung 4: Spektrum einer Halogenlampe (links)

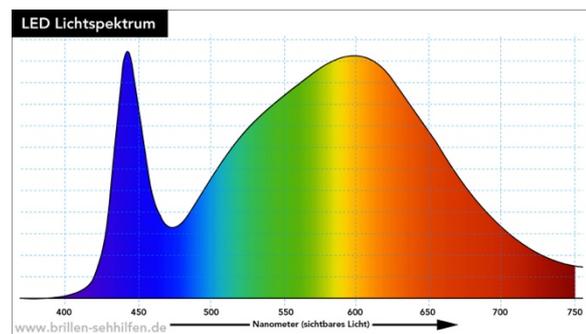


Abbildung 5: Spektrum einer LED (rechts)

¹¹ Vgl. (Greule, Licht und Strahlung , 2021, S. 7f.)

¹² (Farbwiedergabe und der Farbwiedergabeindex, kein Datum)

Neben Glühlampen und Gasentladungslampen ist die Technologie der Light-Emitting-Diode, kurz LED, heutzutage weit verbreitet. Eine Leuchtdiode besteht aus einer Anode und einer Kathode, zwischen denen der Stromfluss durch einen Bonddraht hergestellt wird. Hierüber fließt die notwendige Energie für die gewünschte Elektrolumineszenz. Der LED-Chip sitzt in einer kleinen Reflektorwanne auf der Kathode. Eine Linse aus Kunststoff (Epoxidharz) umgibt und schützt den Chip und sorgt für eine gute Lichtverteilung im Raum. Beim Chip handelt es sich um einen Halbleiterkristall, bestehend aus zwei Schichten von unterschiedlich dotiertem Halbleitermaterial. Demzufolge existiert ein Überschuss an positiven oder negativen Ladungsträgern. Durch den Stromfluss reagieren die Elektronen und es wird Energie in Form von Photonen freigesetzt, was zum Leuchten der LED führt.¹³

LEDs können in verschiedenen Farben leuchten, wobei die Lichtfarbe der Diode von der Dotierung der Schichten und der Halbleiterstoffe abhängig ist. Durch die Rekombination der Elektronen kommt es zur Freisetzung unterschiedlicher Energiemengen. Das Energielevel bestimmt die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes (siehe Abbildung 5). Mittlerweile können LEDs nahezu alle Farben wiedergeben, wobei die additive Farbmischung greift. Durch die Überlagerung der drei Primärfarben Rot, Blau und Grün entsteht weißes Licht. Die Farben Rot und Grün ergeben Gelb, aus Rot und Blau wird Magenta und Grün und Blau ergeben Cyan. Dieses Leuchtmittel überzeugt durch die geringe Größe, seine lange Lebensdauer und der hohen Leuchtstärke, trotz des geringen Stromverbrauches. Die hochpreisige LED muss bei einem defekten Leuchtmittel vollständig entsorgt werden, da dies fest verbaut ist. Im Zuge der Farbvielfalt, des im oberen Bereich liegenden Farbwiedergabeindex und ihrer Dimmbarkeit ist die LED vielseitig einsetzbar. Das Skypanel von ARRI als LED-Scheinwerfer mit einstellbarer Farbtemperatur wird im späteren Versuch eine Rolle spielen.

2.2 Sensortechnologien

In diesem Kapitel wird zunächst die grobe Funktion und der Aufbau des Kamerasensors beschrieben. Im Anschluss folgt die Erklärung zweier Sensortechnologien im Vergleich, wobei das Hauptaugenmerk auf den CMOS-Sensor gelegt wird.

¹³ Vgl. (LED, 2022)

Da diese Sensortechnologie in den im praktischen Teil verwendeten Kameras verbaut ist, wird sie Einfluss auf die Testbilder nehmen. Außerdem wird in diesem Abschnitt die Funktion des Farbbildwandlers erläutert.

2.2.1 Wie funktioniert der Bildwandler?

Der Sensor ist das lichtempfindliche Herzstück jeder Kamera. Bestehend aus vielen kleinen lichtempfindlichen Photozellen, den Senseln, ist er die Fläche, auf der das Bild entsteht. Trifft Licht in Form von Photonen auf den Sensor, lösen diese, durch den photoelektrischen Effekt¹⁴, Elektronen aus dem Halbleitermaterial heraus und setzen sie frei. Verschlusszeit und Blendenöffnung steuern die auf den Sensor treffende physikalische Lichtmenge.

Die aus den Photonen umgesetzte, elektrische Spannung gibt Auskunft über die Menge des eintreffenden Lichtes. Hierbei gibt jedoch nicht jedes Photon ein Elektron ab. Die Quanteneffizienz beschreibt den wellenlängenabhängigen Umwandlungsprozess von Photonen in Elektronen und ist ein Maß für die Empfindlichkeit des Sensors. Eine hohe, prozentual angegebene, Quanteneffizienz spricht für einen qualitativ guten Sensor. Nach dem Auslesevorgang werden die Elektronen an den Vorverstärker weitergegeben. Der Faktor, mit dem die Elemente multipliziert werden, wird Gain genannt. Die Gain-Verstärkung reguliert das Signallevel des Videobildes und definiert, bei welcher Belichtung eine bestimmte Dichte (siehe Kapitel 2.5.1) entsteht. Ebenso spiegelt eine kleiner ISO-Wert eine geringe Lichtempfindlichkeit wider, während eine höhere Zahl für eine höhere Lichtempfindlichkeit und ein stärkeres Rauschen im Bild steht. Eine Veränderung der Elektronenvorverstärkung verringert die Fähigkeit viele kleine Graustufen darzustellen und schränkt somit den Dynamikumfang ein. Weitere Qualitätsmerkmale sind die Anzahl der Fotodioden, welche die maximale Bildauflösung bestimmt, und die Maße des Sensors.¹⁵

Zu den zwei bekanntesten Sensortechnologien zählen die CCD und CMOS Sensoren, welche sich hauptsächlich in der Technologie der einzelnen Pixel unterscheiden. Im Folgenden wird der CCD Sensor lediglich zum Vergleich erläutert, da dieser nicht in den untersuchten Kameras verbaut ist und damit für diese Arbeit nicht von weiterer Relevanz ist.

¹⁴ Vgl. (Photoelektrischer Effekt, 2022)

¹⁵ Vgl. (astrophotocologie, 2017)

2.2.2 CCD-Sensor

Die Erfindung des CCD („Charged Coupled Device“) Sensors brachte einige Innovationen mit sich. In den lichtempfindlichen Bereichen des Halbleiterchips kann die Lichtintensität in jedem Bildpunkt dargestellt und als Ladungsträger ausgewertet werden. Das Abgreifen der Intensitätsinformation erfolgt über eine zeilenweise Auslesung. Die bei der Belichtung angesammelten Elektronen werden zu einem einzigen Ausleseverstärker verschoben. Die Belichtung muss dementsprechend über einen mechanischen Verschluss, den „Shutter“, gestartet und gestoppt werden. Jedoch bieten der Full-Frame-CCD und der Interline CCD Sensor unterschiedliche Transferfunktionen.¹⁶ In der Tendenz zeigen CCD-Kameras gegenüber CMOS-Kameras ein homogeneres Bild, neigen aber bei Überbelichtung zu Smearing¹⁷ und Blooming¹⁸. Der CCD-Sensor wird im Folgenden nicht weiter betrachtet, da er durch technischen Fortschritt verdrängt wurde und somit in professionellen Filmkameras heutzutage kaum noch verbaut wird.

2.2.3 CMOS-Sensor

CMOS steht für "Complementary Metal Oxide Semiconductor" und beschreibt eine, auf Transistoren basierende, elektronische Schaltung. Dieser Sensortyp weist mindestens drei Transistoren pro Pixel auf, welche zur Adressierung, Verstärkung und Ableitung der Ladung dienen. Die akkumulierten Ladungen werden bereits direkt im Pixel auf dem Chip in messbare Spannungen überführt, welche anschließend verstärkt, quantisiert und als digitale Werte ausgegeben werden. Die bei der Belichtung angesammelten Elektronen werden nicht zu einem einzigen Ausleseverstärker verschoben, sondern jedem einzelnen Bildelement ist ein Verstärker zugeordnet, der diese Kondensatorspannung dem Prozessor direkt übermittelt. Die Transistoren auf dem Chip schalten die adressierte Information auf die Leitungen. Der Spannungswert jedes einzelnen Bildpunktes kann somit frei über eine xy-Matrix adressiert und elektronisch ausgewertet werden. Durch die Verstärkung direkt am Pixel und die im Vergleich zum CCD-Sensor entfallende Ladungsverschiebung, ergibt sich ein größerer Signal-Rausch-Abstand und eine für Highspeed-Aufnahmen erforderliche höhere Geschwindigkeit.

¹⁶ Vgl. (Schmidt U. , 2009, S. 361ff.)

¹⁷ Weiße Streifen, die bei besonders hellen Lichtquellen im Bildbereich auftreten

¹⁸ Entstehung eines hellen Flecks um eine lokale Überbelichtung

Ebenfalls besteht die Möglichkeit zwischen dem progressive- oder interlaced-Ausleseverfahren zu wählen oder nur einen Teilbereich des Wandlers (ROI)¹⁹ auszulesen. Die verstärkten Elektronen durchlaufen den AD-Wandler. Aus elektrischen Signalen werden digitale Codes, die Auskunft über Grauwerte geben und von einer Bildbearbeitungssoftware gelesen werden können.²⁰

CMOS-Sensoren bestechen durch ihre präzise Bildqualität und den Dynamikgewinn in der Verarbeitung der Szenenkontraste. Der Dynamikbereich des CMOS-Sensors beträgt, basierend auf logarithmischer Spektralempfindlichkeit, ungefähr 100 000:1. Der Blooming-Effekt verringert sich gegenüber des, mit linearer Empfindlichkeit arbeitenden, CCD-Sensors, der einen Dynamikbereich von ungefähr 1000:1 mit sich bringt. Im Vergleich zu CCD-Sensoren, die nur 50 dB bis 60 dB verarbeiten können, schafft der CMOS-Sensor Szenenkontraste über 90 dB. Der Active Pixel Sensor (APS) ist für hohe Bildwechselfrequenzen ausgelegt und beeindruckt durch den nur im mV-Bereich liegenden, niedrigen²¹ Energiebedarf.²²

Komplexe CMOS-Designs mit „Global Shutter“ und Rauschreduktion basieren auf Pixelzellen mit fünf bis acht Transistoren und reduzieren damit die lichtempfindliche Fläche pro Pixel. Folglich sinkt der Füllfaktor und die aktive Sensorfläche verkleinert sich. Aufgrund der Vielzahl an Transistoren ergeben sich Varianzen in den nicht identisch nachbaubaren Teilchen, dadurch werden Ladungen mitunter nicht gleichbehandelt. Dies spiegelt sich in einem Effekt namens Fixed Pattern Noise (FPN) wider. Durch Filterprozesse auf dem Chip kann dieser unregelmäßige Effekt des örtlichen Rauschens reduziert werden.²³

Der getrennte Ablauf der Ladungssammlung und des Auslesevorgangs kann bei einem CMOS-Sensor, im Vergleich zu einem CCD-Chip, nicht garantiert werden. Das Zwischenspeichern der Ladungen ist unumgänglich, um sicherzustellen, dass diese alle aus derselben Zeitspanne stammen. Da die Funktion mit vielen zusätzlichen Transistoren und einem hohen Aufwand der Signalverarbeitung verbunden ist, hat sich der Global Shutter bisher nur teilweise durchgesetzt. Während ein Global Shutter-Sensor die gesamte Bildfläche zeitgleich belichtet, wird ein „Rolling Shutter“ in einer progressiven Bewegung freigelegt. Die einzelnen Zeilen werden somit, wie in Abbildung 6 erkennbar, zeitlich versetzt belichtet.

¹⁹ Region of Interest

²⁰ Vgl. (Schmidt U. , 2009, S. 370ff.)

²¹ Etwa 1/10 des Bedarfs eines CCD Sensors

²² Vgl. (astrophotocologne, 2017)

²³ Vgl. (Stevanovic, 2000)

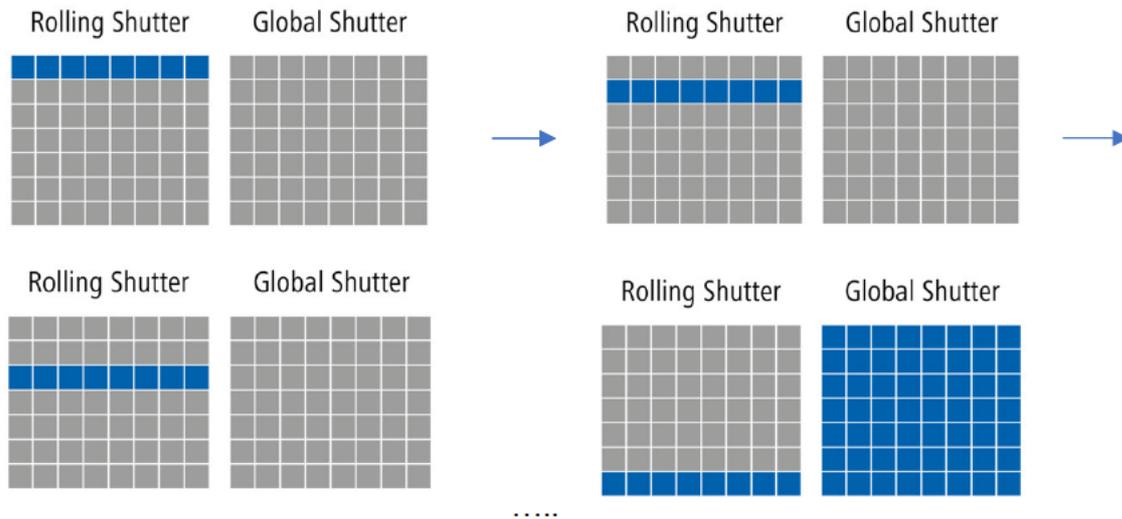


Abbildung 6: Rolling Shutter vs. Global Shutter

Da auch benachbarte Zeilen aus unterschiedlichen Belichtungsphasen stammen, kann es zur Entstehung des Rolling Shutter-Effekts kommen. Ebenso begünstigen horizontale Kameraschwenks die Abbildungsfehler in vertikalen Strukturen. Bewegt sich ein Motiv schneller als die Belichtungs- und Auslesezeit des Sensors, kann die Aufnahme aufgrund der rollierenden Belichtung verzerrt sein.²⁴

2.2.4 Sensorgrößen

Neben unterschiedlichen Bauweisen gibt es auch in der Größe des Bildwandlers Abweichungen. Die Wahl der Größe hat Auswirkungen auf die Bildqualität und ästhetische Gestaltung vom Videomaterial. Dabei determiniert die Größe des Sensors nicht zwangsläufig die Auflösung des Sensors. Jedoch resultieren kleine Sensoren mit vielen Senseln zu einer deutlich kleineren Fläche pro Photodiode. Dementsprechend kann jeder Sensel weniger Licht empfangen, was eine größere Verstärkung erfordert. Diese Verstärkung begünstigt Bildrauschen und mindert folglich die Qualität des Signals. Größere Sensel rauschen daher weniger und haben einen höheren Dynamikumfang. Ebenfalls hat die Größe des Sensors Einfluss auf die effektive Brennweite der verwendeten Optiken.

²⁴ Vgl. (Ingwer, 2016)

Diese effektive Brennweite kann, mittels des Crop-Faktors eines Sensors, berechnet werden. Der Crop-Faktor ist das Verhältnis zweier Diagonalen der Aufnahmeformate, denn in Abhängigkeit der Sensorgröße ändert sich der verwendete Bildausschnitt. Die Brennweite verlängert sich um einen bestimmten Multiplikator, der das Verhältnis des verwendeten Sensors und eines Kleinbild-Vollformatsensors (36 x 24 mm) aufzeigt. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um eine physikalische Verlängerung, sondern um eine Änderung des Bildwinkels. Misst der Sensor zum Beispiel eine kleinere Fläche, wird ein kleinerer Bereich im Bildzentrum größer gezogen. Folglich entspricht ein 50 mm Objektiv auf einer Kamera mit einem APS-C Sensor (23,6 x 15,8 mm)²⁵ mit 1,5-fachen Crop-Faktor²⁶ einer Brennweite von 75 mm.²⁷ In der folgenden Abbildung 7 wird deutlich, welchen erheblichen Einfluss die Sensorgröße verschiedener Kameras auf den Bildausschnitt hat.²⁸

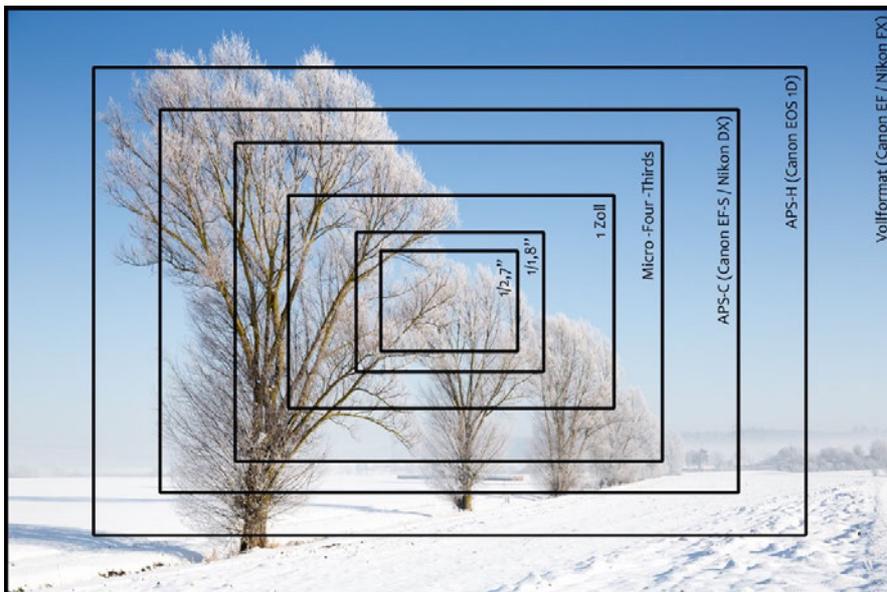


Abbildung 7: Der Einfluss unterschiedlicher Sensorgrößen auf den Bildausschnitt

Fernsehkameras und digitale Filmkameras weisen unter anderem aus gestalterischen Gründen Unterschiede in der Größe des Bildwandlers auf. Fernsehkameras verwenden überwiegend Sensoren mit einer Größe von $\frac{2}{3}$ Zoll. Digitale Filmkameras nutzen stattdessen größere Sensoren, die meistens der Größe von 35mm Film entsprechen.²⁹

²⁵ z.B. der Kamera Sony A5100

²⁶ Crop-Faktor 1,6 bei Canon

²⁷ (Crop Faktor | Einfache Erklärung, Berechnung und Tabelle, 2022)

²⁸ Vgl. (Tino, 2017)

²⁹ Vgl. (Schmidt U., 2009, S. 297ff.)

Diese Größenunterschiede haben einen erheblichen Einfluss auf bildgestalterische Parameter, wie die Schärfentiefe, der erzeugten Bilder. Die Schärfentiefe ist Maß für Ausdehnung des scharfen Bereichs im Objektraum und kennzeichnet den Bereich zwischen Nah- und Fernschärfepunkt.³⁰ Sie wird in Filmen künstlerisch genutzt, um die Aufmerksamkeit des Betrachters auf bestimmte Bereiche des Bildes zu lenken. Video- und Fernsehkameras erzeugen mit ihren kleineren Sensoren eine höhere Schärfentiefe und erleichtern dadurch die Produktion. Die großen Sensoren der digitalen Filmkameras erzeugen eine geringe Schärfentiefe den durch 35mm-Film bekannten und gewohnten „Kino-Look“.

2.2.5 Farbbildwandler

Eine Fotodiode, wie auch ein gesamter Bildsensor, kann nur Helligkeitsinformationen bzw. Graustufenbilder verarbeiten. Um die Spektralinformation einzufangen und somit zu den Farbinformationen zu gelangen, werden den Sensoren auf verschiedene Arten Farbfilter vorgeschaltet.

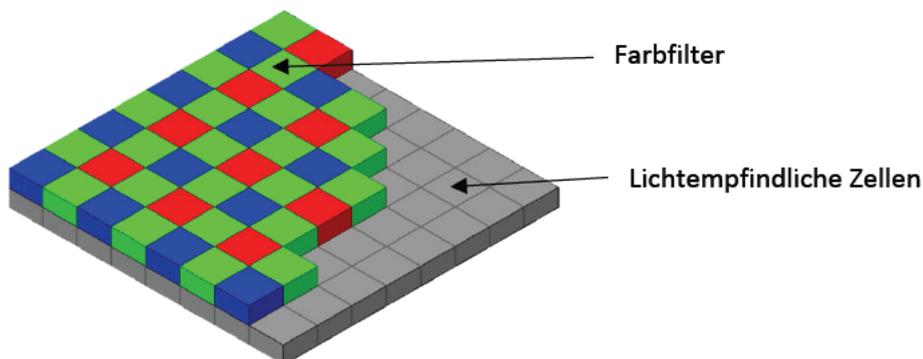


Abbildung 8: Bayer-Pattern Filter auf Sensor

Die am häufigsten verwendete Art zur Gewinnung eines farbigen Bildes ist das, nach ihrem Erfinder benannte, Bayer-Pattern. Wie in Abbildung 8 erkennbar, befindet sich vor den Pixeln eine Matrix aus winzigen Farbfiltern. Das Schachbrett ähnliche Muster besteht zu je 25% aus Rot und Blau und zu 50% aus Grün. Bei der Betrachtung der Farbfilterverteilung fällt der Grünanteil stärker gegenüber den anderen Farben ins Gewicht.

Dieser trägt im menschlichen Auge aufgrund der empfindlicheren Rezeption etwa 70 Prozent zur Helligkeitswahrnehmung und Interpretation von Grautönen bei.³¹

³⁰ Vgl. (Schmidt U. , 2009)

³¹ Vgl. (Kern, 2018)

Damit hat Grün einen dominierenden Anteil an der Kontrast- und Schärfewahrnehmung, weshalb doppelt so viele Pixel auf den Grün-Anteil entfallen.³² Dieser Farbfilter hat aber zur Folge, dass für jeden Pixel jeweils nur eine von drei notwendigen Farbinformationen bekannt ist und nur einen Wert für eine Farbkomponente liefert. Um ein finales Bild und somit die vollständige Bildauflösung zu erhalten, müssen die Informationen des Sensors aufbereitet werden. Dieser Vorgang wird als „Demosaicing“ oder „Debayering“ bezeichnet. Die beiden fehlenden Farbinformationen müssen aus den angrenzenden Pixeln interpoliert und dadurch wiederhergestellt werden. Für Grün werden 50 % der Pixel errechnet, bei Blau und Rot müssen 75 % der Fläche durch Berechnungen gefüllt werden. Bei der Farbinterpolation wird angenommen, dass nur ein geringer Farbunterschied zwischen zwei benachbarten Pixeln vorliegt und die Grauwerte dementsprechend voneinander abhängig sind.³³ Durch die Interpolation können Bildfehler entstehen, die als Interpolationsartefakte betitelt werden. Sind beispielweise durch Objektivfehler die Farbebenen in den Randbereichen gegeneinander verschoben, kann der Algorithmus nicht mehr korrekt greifen. Auch Streifenmuster, die die Breite eines einzelnen Pixels besitzen, führen häufig zu „Fehlentscheidungen“ des Algorithmus, wodurch Artefakte in Form von Farbüberschneidungen oder Unschärfe sichtbar werden. Auch wenn es sich bei dem Bayer-Mosaikfilter um die am häufigsten eingesetzte Farbfiltermatrix handelt, werden je nach Kamerahersteller auch alternative Varianten zur Pixelanordnung verwendet, die hier nicht weiter berücksichtigt werden.

2.2.6 Signalverarbeitung und Empfindlichkeit

Auch die Kameraelektronik hat Einfluss auf die vom Sensor ausgegebenen Signale. So kann nach der Vorverstärkung der Ladung eines Pixels in der weiteren Signalverarbeitung eine solche Ladung zusätzlich elektrisch verstärkt werden. Die in Dezibel (dB) gemessene elektrische Verstärkung wird als Gain betitelt und findet meist in festen Stufen statt. Eine Verstärkung von 6 dB ist mit einer Verdopplung (Faktor Zwei) des Wertes gleichzusetzen, wobei zu beachten ist, dass dies auch das Rauschen verstärkt.

³² Vgl. (Schmidt U. , 2009, S. 379)

³³ Vgl. (Correns, 2011)

Jede Verstärkung eines Signals korreliert naturgemäß mit der Zunahme von Rauschen. Die Öffnung einer Blende um einen Blendenwert der Optik („Stop“) verdoppelt ebenfalls die einfallende Lichtmenge.

Bei einer Verstärkung von 0 dB wird von der nativen ISO des Sensors gesprochen. Eine native ISO ist eine durch den verbauten Sensor vorgegebene Empfindlichkeit, bei der sich das Rauschen noch in einem akzeptablen Bereich befindet und das Signal des Sensors nicht verstärkt oder abgeschwächt werden muss.³⁴ Die native Lichtempfindlichkeit wird vom Kamerahersteller ermittelt und liegt bei der ARRI Alexa Mini bei EI 800.

Die Angabe der Empfindlichkeit des Sensors wird neben ISO auch ASA oder Exposure Index (EI) genannt. Der ISO-Wert ist eine Kombination aus den alten Maßzahlen ASA (American Standard Association) und DIN (Deutsches Institut für Normung). Da 12 DIN 12 ASA bzw 12/12° ISO entsprechen, gilt die 12 als Referenzwert. Aus der Umrechnungstabelle 1 lässt sich entnehmen, dass eine Erhöhung um 3 DIN einer Verdopplung des ASA-Wertes entspricht.³⁵

DIN	ASA	ISO
.....		
10	8	8/10°
11	10	10/11°
12	12	12/12°
13	16	16/13°
....		
21	100	100/21°
22	125	125/22°
23	160	160/23°

Tabelle 1: Umrechnung DIN und ASA zu ISO

³⁴ Vgl. (Ingwer, 2016)

³⁵ (Empfindlichkeit von Kameras und Filmen: Was ist der Unterschied zwischen ISO, ASA und DIN?, 2022)

Der ISO-Wert stellt die direkte Messung der Sensorempfindlichkeit dar. Im Dynamikbereich bleibt die Verteilung der „Highlights“ und „Shadows“ unabhängig von der gewählten Empfindlichkeit konstant. Der Exposure Index (EI) ist ein Maß für die effektive Empfindlichkeit des Sensors. Der EI-Wert enthält Verarbeitungsschritte, wie Metadaten, die vom System der Postproduktion interpretiert werden.

Der Dynamikbereich der Lichter und Schatten ändert sich mit jedem eingestellten EI-Wert und bietet variabelere Endergebnisse. Um eine auf die Szene optimierte Verteilung der Helligkeiten und Schatten zu erzielen, ist es sinnvoll in Kenntnis des (von der jeweiligen Empfindlichkeit abhängigen) Dynamikbereichs zu sein.³⁶

2.3 Gamma

Trifft ein Lichtstrom Φ auf eine Oberfläche mit Reflexionsgrad ρ , ergibt sich die Beleuchtungsstärke E , gemessen in Lux. Im Zuge dessen trifft eine Leuchtdichte L in $\frac{cd}{m^2}$ als lineare Größe aufs Auge.³⁷ Die menschlichen Augen hingegen adaptieren sich an das Umgebungslicht und arbeiten gemäß der logarithmischen, spektralen Helligkeitsempfindung. In dunklen Lichtverhältnissen sind Augen empfindlicher, sodass der Mensch Helligkeiten in einer dunklen Umgebung stärker empfindet. Auf das Einschalten eines Leuchtmittels in einem finsternen Raum wird der Betrachter erheblich sensibler reagieren als auf das identische Leuchtmittel im Tageslicht. In heller Umgebung ist der Mehrwert an Luminanz in Relation zum Umgebungslicht nicht maßgeblich. Die in Abbildung 9 dargestellte psychometrische Helligkeitsempfindung besagt, dass eine relative Szenenleuchtdichte von 18 Prozent Grau (Szenenluminanz) einer menschlichen Helligkeitsempfindung von 50 Prozent entspricht.³⁸ Mit „18 Prozent Grau“ ist ein Grau gemeint, welches 18 Prozent des einfallenden Lichts wieder reflektiert. Nur logarithmisch arbeitende Systeme erreichen deshalb eine aus menschlicher Sicht natürliche, konstante prozentuale Abstufung der Grauwerte, also eine hohe Kontrastauflösung von Weiß bis Schwarz.

³⁶ ARRI Alexa Mini siehe Kapitel 3.2.2

³⁷ Vgl. (Greule, Physikalische Größen, 2021)

³⁸ Vgl. (Wilkens, 2021)

Psychometrische Helligkeitsfunktion L*

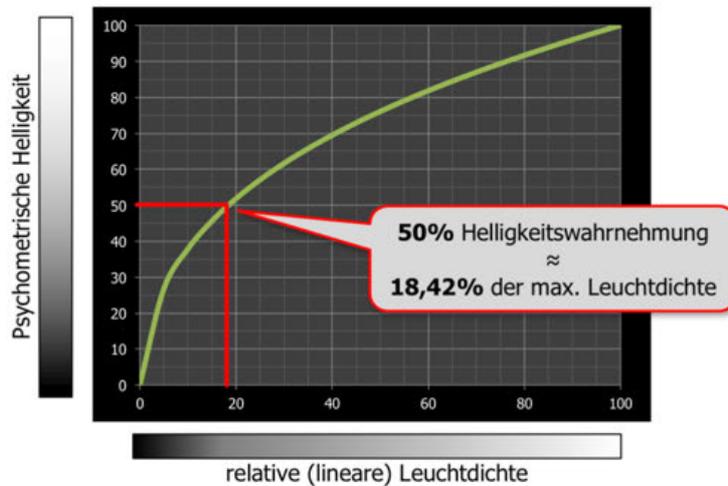


Abbildung 9: Psychometrische Helligkeitsfunktion

Um die physikalische Linearität mit der Nicht-Linearität des menschlichen Empfindens in Einklang zu bringen, wird die Gammakorrekturfunktion verwendet. Die Gammakurve ist eine mathematische Kalkulation in einer Videokamera, um die abgebildete Szene korrekt auf dem Monitor darzustellen. Dabei sollte im Hinterkopf behalten werden, dass die Kennlinie der Videotechnik theoretisch eine Gerade ist, denn hier besteht ein linearer Zusammenhang ($\text{Gamma} = 1$) zwischen Pegel und Bildhelligkeit. In der Praxis verhielten sich die Bildröhren früher nicht linear, sodass dunkle Bildteile gestaucht wurden. Dadurch gehen Helligkeitsinformationen verloren und der Detailreichtum verringert sich. Aus diesem Grund wurde die Kennlinie von digitalen Kameras so eingestellt, dass die spätere Stauchung am Monitor schon vorher kompensiert werden kann.³⁹

Die von den Kameras genutzte Transferfunktion wandelt optisches Licht in ein elektrisches Signal. Durch das „Verbiegen“ der Kamerakennlinie gelingt es, unter vorherrschenden Licht- und Kontrastverhältnissen, die Bildwiedergabe zu optimieren. Auch sehr sonnige Szenen in dunklem Ambiente können so angepasst werden, um sie optimal wiederzugeben. Diese „Optical Electro Transfer Function“ (OETF) lässt sich anhand eines Koordinatensystems darstellen, bei dem die x-Achse die relative Szenenleuchtdichte (Eingangshelligkeit) und die y-Achse den daraus resultierenden Videopegel einer elektrischen Kamera in mV abbildet.⁴⁰

³⁹ Vgl. (Schmidt U. , 2009, S. 331)

⁴⁰ Vgl. (Hamma Gamma? Was man über das Gamma wissen sollte, 2021)

Der Koordinatenursprung repräsentiert den Schwarzpunkt und der Exponent des x-Wertes definiert den nichtlinearen Gammawert. Für die Seite der Aufnahme gilt:

$$\frac{U}{U_{max}} = \left(\frac{E}{E_{max}} \right)^{\gamma_A}$$

U/U_{max} stellt das Verhältnis vom Spannungswert des Videosignals zur Maximalspannung dar und E/E_{max} wie die Beleuchtungsstärke sich zum Maximalwert verhält. γ_A steht für den Gammawert der Aufnahme und γ_W beschreibe den Gammawert auf der Wiedergabeseite. Da Videosignale in der Kamera in Abhängigkeit zur Display-Kennlinie vorentzerrt werden, ist der Gamma-Wiedergabewert entscheidend für den Gamma-Aufnahmewert.⁴¹ Alle anderen Bildquellen müssen ihre Videopegel nach der Kamerakennlinie erzeugen. Um die lineare Gesamtübertragung zu gewährleisten, muss der Wiedergabewert den Kehrwert des Aufnahmewertes bilden.⁴² Dementsprechend gilt:

$$\gamma_A = (\gamma_W)^{-1}$$

Von Kamera zum Monitor wird die EOTF benötigt. Mit dieser Umkehrfunktion wird das elektrische Signal zurück in ein optisches Signal transferiert. Die Displaykennlinie beschreibt die Wiedergabeseite:

$$\frac{L}{L_{max}} = \left(\frac{U}{U_{max}} \right)^{\gamma_W}$$

Das lineare Verhalten des auf den Kamerasensor treffenden Lichtes, lässt sich durch $y = x^1$ beschreiben, wodurch der Gammawert der Sensorkennlinie eins beträgt.

⁴¹ (Schmidt U. , 2009, S. 403f.)

⁴² (Kern, 2018)

Die Systemkennlinie „über alles“ in Abbildung 10 fasst alle drei Kennlinien in einem Diagramm zusammen. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärke einer Szene und der Leuchtdichte eines Displays.⁴³ Die obere Kennlinie zeigt den Verlauf der Kamerakennlinie, die grüne die des Displays. Mittig verläuft die blaue Sensorkennlinie linear mit einem Gammawert von Eins. Hierbei ist zu beachten, dass Abbildung 10 lediglich zur Veranschaulichung dient und die Krümmungen der Kamera- und Displaykennlinien nicht wahrheitsgetreu sind.

relative Display-Leuchtdichte

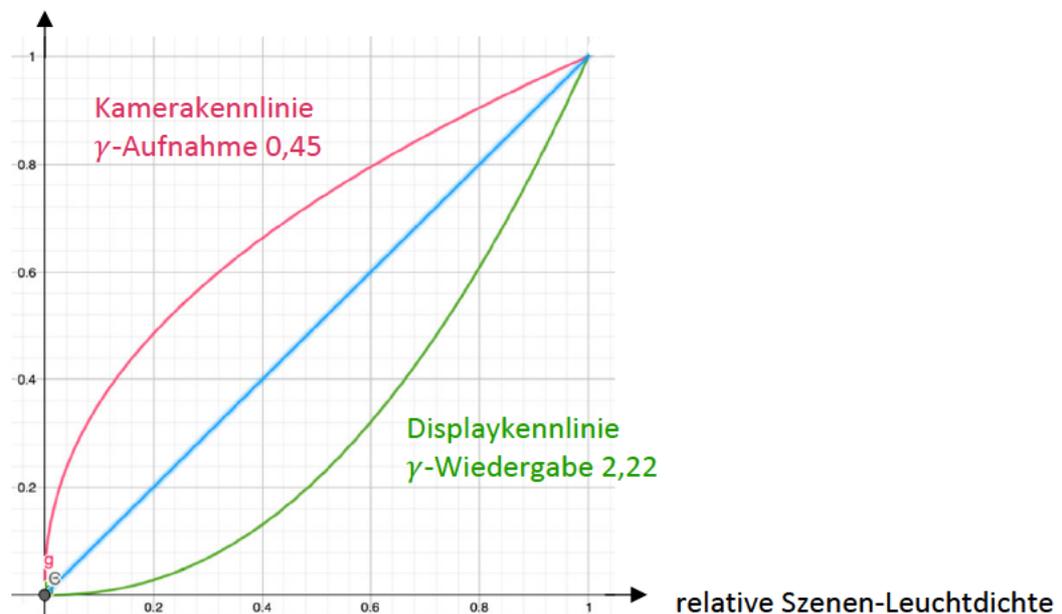


Abbildung 10: Gamma-Systemkennlinie "über alles"

Die relative Szenenleuchtdichte wird mit der relativen Displaykennlinie ins Verhältnis gebracht.⁴⁴

Eine konsistente Nutzung des Gammawertes ist für die gleiche Wiedergabe unumgänglich. Ein Video mit Gammawert von 2.4 in der Aufnahme würde auf einem Display mit 2.2 ein blässeres Bild darstellen. Der Gammawert beeinflusst den Kontrastumfang, also das Leuchtdichteverhältnis des Bildes (L_{min}/L_{max}).⁴⁵ Im Folgenden wird normkonform ein Gamma von 2.4 als Referenzwert festgelegt.

⁴³ Vgl. (Wilkens, 2021)

⁴⁴ Vgl. (Wilkens, 2021)

⁴⁵ Vgl. (Schmidt U. , 2009, S. 403)

2.3.1 Log-Profile

Neben der Nutzung von OETF und EOTF gibt es verschiedene LOG⁴⁶-Profile, die zur Aufnahme von Videomaterial häufig Anwendung finden. LOG-Profile sind logarithmische, auf die Szene bezogene Kennlinien und zeichnen sich bei der Betrachtung auf einem Display mit Gamma EOTF durch einen kontrastarmen und entsättigten Eindruck aus. Um in der Nachbearbeitung eine möglichst hohe Varianz der vom Sensor erfassten Daten zu erhalten und gleichzeitig enorme Datenmengen zu vermeiden, bilden die Belichtungskurven der analogen Filmnegative den Ursprung für Log-Kennlinien.⁴⁷

Im praktischen Umgang wird der Kontrastumfang in der Szene eher über Logarithmen zur Basiszahl Zwei statt über dekadische Logarithmen angegeben, da die Lichtmenge, die auf den Sensor fällt, durch die Blende im Objektiv der Kamera bestimmt wird. Deren Skalierung ist so gewählt, dass von Stufe zu Stufe die Lichtintensität um den Faktor Zwei geändert wird. Der Kontrastumfang wird daher meistens in Blendenstufen angegeben, wobei ein Kontrast von 1:32 fünf Blenden entspricht. Bei der Digitalisierung von Bildern werden die vorliegenden Helligkeitslevel linear in genau gleich großen Stufen abgebildet. Aufgrund des logarithmischen Empfindens fallen auf die als hell wahrgenommenen Bereiche mehr Datenpunkte als auf die Dunkleren. Dies wirkt sich besonders bei einer digitalen Umsetzung in acht Bit einschränkend aus.

Die Bittiefe spiegelt die Anzahl der Blendenstufen wider, sodass bei acht Bit linearer Aufzeichnung acht Blendenstufen Dynamikumfang festgehalten werden können. Eine acht Bit Quantisierung bietet nur 256 Abstufungen, während zehn Bit 1024 Helligkeitsstufen entsprechen. Eine feinere Abstufung schafft die technische Grundlage den höheren Kontrastumfang überhaupt speichern zu können. Im Umkehrschluss wird bei geringerer Farbtiefe, wie z.B. acht Bit, die fehlende Dynamik beim Ausspielen auf Film deutlich sichtbar.⁴⁸ Analoges Film hingegen kann weitaus mehr Blendenstufen umfassen. Um diese Werte zu vereinen, werden die Helligkeiten im Bild auf die vom menschlichen Auge empfundene Helligkeitsveränderung angepasst. Auch im analogen Film verlaufen die Kurven des Sensors in Abhängigkeit der physikalischen Grenzen.⁴⁹

⁴⁶ Logarithmic, gemeint ist die logarithmische Gamma Kurve

⁴⁷ Vgl. (Log C, 2022)

⁴⁸ Vgl. (Schmidts, 2016)

⁴⁹ Vgl. (Kodak, 2004)

Im Log-Profil werden die Abstände zwischen den Wertebereichen so gewählt, dass der Helligkeitsunterschied zum nächsten gespeicherten Wert immer einem subjektiv gleichen Anstieg in der Helligkeit entspricht.

Den linearen Messwerten des Sensors werden dazugehörige Werte in einer logarithmisch geformten Verteilung zugewiesen. Somit wird der Videopegel bei einer Belichtungsänderung um einen festgesetzten Wert erhöht oder verringert. Eine als subjektiv gleich empfundene Helligkeitsveränderung in den Schatten wird durch weniger Photonen hervorgerufen als in hellen Bereichen. Demnach wird der Helligkeitsunterschied zwischen 10 und 20 gemessenen Photonen genauso groß empfunden, wie der Unterschied zwischen 10.000 und 20.000 Photonen.⁵⁰ Die logarithmische Kennlinie ist in Anlehnung an das menschliche Auge in den dunklen Bildbereichen empfindlicher und speichert mehr Helligkeitsinformationen als in den hellen Bereichen.

In Abbildung 11 repräsentieren die 109,5% auf der Y-Achse, je nach Bittiefe, den Wert 255 (acht Bit) oder 1023 (zehn Bit). Die x-Achse stellt den Helligkeitsunterschied dar und zeigt den nach der Speicherung erhaltenen Wert. Durch die abgeflachte Kurve kann die Dynamik des Bildsensors ausgenutzt und ein irreversibles Ausbrennen der hellen Bildbereiche vermieden werden.

Jede Belichtungsänderung bringt eine gleichgewichtete Änderung der Blendenstufen in der Verteilungskurve mit sich. Alle Blendenstufen besitzen, unabhängig von der Helligkeit, die gleiche Blendenstufen-Auflösung. Der Maximalwert der Log-Kurve hängt dementsprechend vom EI-Wert ab. Wird die Belichtung beispielsweise um eine Stufe verringert, kann der Sensor eine Stufe mehr Glanzlichtinformationen erfassen.

Jedoch bringen Log-Profile auch Nachteile mit sich. Der Dynamikumfang wird verfälscht und ist in der eigentlichen Datei nicht vorhanden, sodass „Banding“⁵¹ und Rauschen entstehen können. Auch wenn sich Aufnahmen in Log sehr gut fürs Grading eignen, sehen sie leider nicht ansprechend aus und sind wenig gesättigt. Erst in der Nachbearbeitung wird entschieden, wie die Bildbereiche entwickelt werden sollen. Ein Log-Bild eignet sich demnach in keiner Weise als ein ansehnliches Vorschaubild.⁵²

⁵⁰ Vgl. (Schmidts, 2016)

⁵¹ das schlechte visuelle Ergebnis des nicht synchronen Zusammenspiels zwischen verschiedenen signalverarbeitenden Stufen

⁵² Vgl. (movie college , 2022)

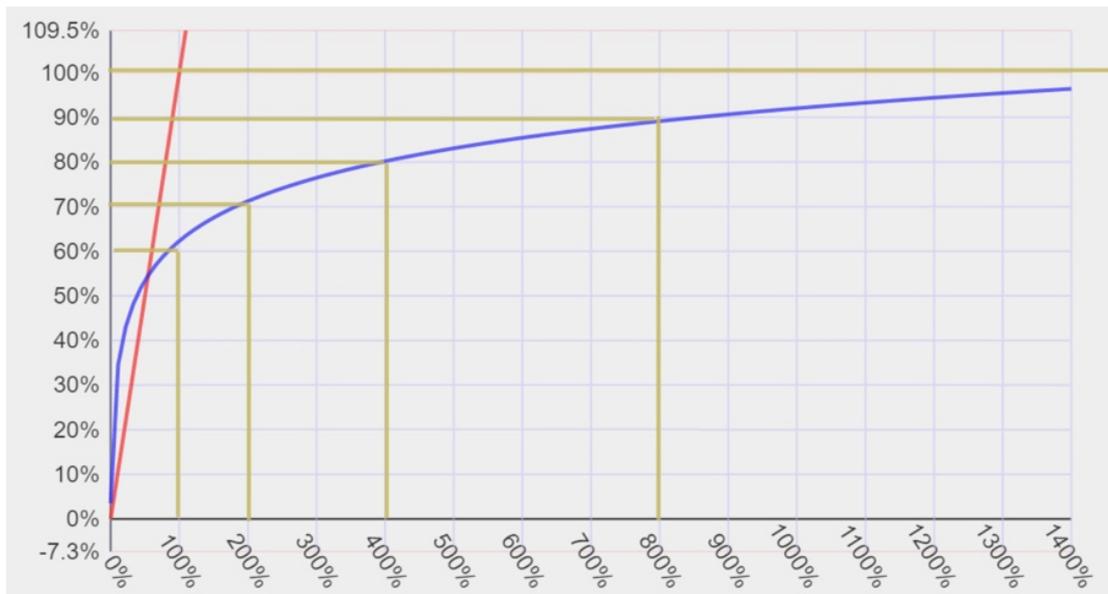


Abbildung 11: Logarithmische Kurve mit Helligkeitsunterschieden

Die Log-Kurven werden immer auf den jeweiligen Sensor abgestimmt, daher unterscheiden sich die Log-Aufzeichnungen der einzelnen Hersteller und der jeweiligen Kameras. Bei Sony gibt es „S-Log“ und bei ARRI das, für diese Arbeit relevante, „Log C“. Die Konvertierung szenenbezogener Aufnahmen ist für eine ansehnliche Darstellung auf dem Monitor unvermeidbar. Nur mit einer passenden Transformation ist es möglich, Aufnahmen im ARRI Log C-Profil als Standard-HD-Video in ITU BT.709 zu betrachten.⁵³

Näheres zu ARRI Log C findet sich im späteren Kapitel 3.2.2.

2.4 Darstellung von Farben – Vom Spektrum zum Farbraum

Auf der Grundlage der mathematischen und lichttechnischen Erkenntnisse von *Graßmann*, *Young*, *Maxwell*, *Helmholtz* und *Hering*, wurde immer wieder versucht, Farbordnungen zu finden, in denen alle für das menschliche Auge sichtbaren Farben systematisch angeordnet werden können.⁵⁴

⁵³ Vgl. (Schmidts, 2016)

⁵⁴ Vgl. (Greule, Farbmetrische Grundlagen, 2021)

Maxwell bewies, dass jede Farbe näherungsweise durch Licht aus drei Wellenlängen reproduziert werden kann. Diese trichromatische Theorie beschreibt einen Farbraum mit drei Grundfarben, die den Ecken eines Dreiecks zugeordnet sind. Alle anderen Farben werden als Linearkombination aus den Grundfarben bestimmt. So demonstriert das gleichschenklige Maxwell-Dreieck drei farbige Lichtquellen an den Eckpunkten, die sich additiv mischen lassen. Um ein gesättigtes Cyan zu erhalten, war jedoch die Addition von negativem Rot notwendig. Dadurch entstehen Farbvalenzen, die außerhalb des RGB-Dreiecks liegen.⁵⁵

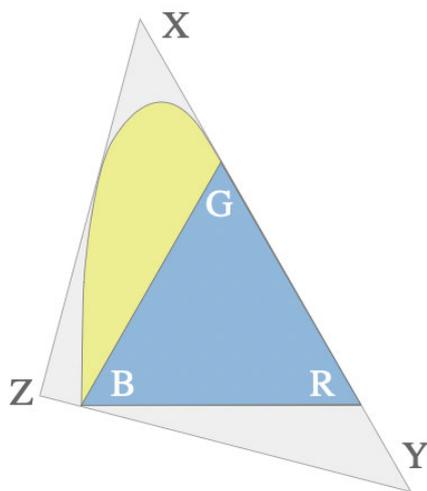


Abbildung 12: Um X,Y und Z erweitertes RGB-Dreieck

Gemeinsam mit *Graßmanns* Erkenntnis, dass jede Farbe als gewichtete Summe aus drei künstlichen, unabhängigen Grundfarben durch eine additive Mischung erzeugt werden kann, wurde das von *Maxwell* entworfene Farbdreieck durch den Spektralfarbzug ersetzt. Die CIE legte 1931 für die drei standardisierten Primärfarben mit den Bezeichnungen X, Y und Z die Wellenlängen 700 nm (Rot), 546,1 nm (Grün) und 435,8 nm (Blauviolett) fest.

Der Spektralfarbzug entsteht durch die verschiedenen, negativen Anteile an Rot für die Erzeugung von Cyan und arbeitet mit den imaginären Valenzen X, Y und Z, welche sich am Rand des Spektralfarbzuges befinden. Aus diesem Grund finden sich negative Rotanteile im Spektrum von Abbildung 13.⁵⁶ Die RGB-Werte lassen sich durch eine Matrixmultiplikation in XYZ-Werte transferieren, um negative Koeffizienten zu vermeiden, wobei die Farbtemperatur bei der Berechnung beachtet werden muss.

⁵⁵ Vgl. (Greule, Farbmétrische Grundlagen, 2021)

⁵⁶ Vgl. (Von RGB über XYZ zum Spektralfarbzug, 2017)

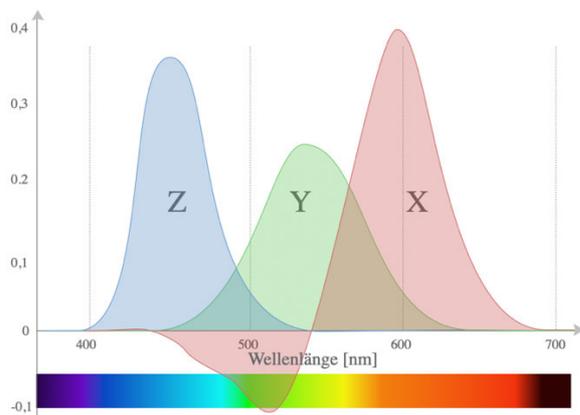


Abbildung 13: Farbmischkurven zur Bestimmung der reinen Spektralfarben

2.4.1 CIE Farbtafel

Die Basis der CIE-Normfarbtafel bilden die XYZ-Werte der reellen Farben. Werden diese Werte normiert, erhält man die reinen Farben ohne ihre Intensität. Die Normfarbwerte X, Y, Z werden somit zu den Normfarbwertanteilen x , y , z normiert. In der Folge ergibt die Summe der drei Zahlen eins.⁵⁷

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

$$x + y + z = 1$$

Unter diesen Umständen lässt sich der CIE XYZ-Farbraum auf eine zweidimensionale Normfarbtafel, beschrieben durch x und y , projizieren.⁵⁸ Das CIE Normfarbsystem bildet alle für das menschliche Auge sichtbaren Farben ab und dient dazu, eine Relation zwischen der menschlichen Farbwarnnehmung und den physikalischen Ursachen der Farbvalenz herzustellen.

⁵⁷ Vgl. (Von CIE XYZ zu xyz, 2017)

⁵⁸ Vgl. (Greule, Farbmétrische Grundlagen, 2021, S. 87)

Dargestellt sind nur die Dimensionen Farbton und Sättigung, die Dimension der Helligkeit wird ausgespart. Die Gesamtheit aller Farben wird durch eine hufeisenförmige Spektralfarbenlinie, sowie durch die untere Purpur-Linie begrenzt. Die sich am Rand des Farbdreiecks befindenden Spektralfarben weisen die höchste Sättigung auf. Der Farbton wird durch den Ort auf dem Spektralfarbenzug angegeben, die Sättigung durch den Abstand vom etwa in der Mitte liegenden Weißpunkt. Das ist der Punkt, an dem alle Wellenlängen mit gleicher Strahlungsenergie wirken. Der Weißpunkt für reines weiß (Gleichenergieweiß E) liegt im Inneren des Farbdreiecks und kann durch die Koordinaten $x = y = z = 0,33$ beschrieben werden. Die Normlichtart D65 (Daylight 6504 Kelvin) liegt in der Nähe dieses Wertes und hat die Koordinaten $x = 0,3127$ und $y = 0,3290$.⁵⁹

Farbräume können unterschiedliche Weißpunkte besitzen. So ist es möglich, dass zwei gleichgroße Farbräume unterschiedliche Weißwerte definieren und sich im Zuge dessen alle Farben verschieben. Auf der Grundlage des Farbsystems ist das Angleichen der Farben aneinander möglich. Um alle Geräte in Einklang bringen zu können, müssen diese einem Standard entsprechen, der sich auf die Normlichtfarben bezieht.⁶⁰

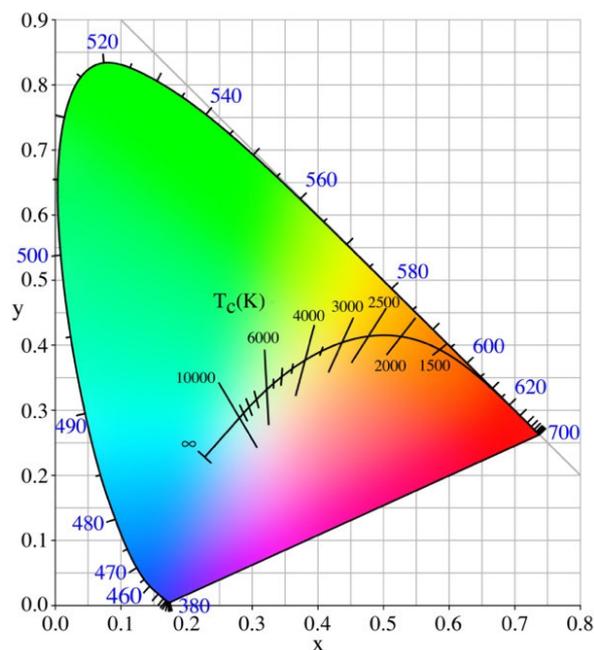


Abbildung 14: CIE Normfarbtafel

⁵⁹ Vgl. (Schmidt U. , 2009, S. 75)

⁶⁰ Vgl. (Schmidt U. , 2009, S. 73)

2.4.2 L*a*b* Farbmodell

Im Jahr 1976 hat die internationale Beleuchtungskommission das L*, a*, b* Farbkoordinatensystem angegeben, das Farben als drei Zahlenwerte beschreibt.

Die L*-Achse kann als Neutralgrau-Achse bezeichnet werden, da sie in Anlehnung an die psychometrische Helligkeitsfunktion über die Endpunkte Schwarz (L=0) und Weiß (L=100) verfügt und die Zwischenwerte unbunte Grautöne aufzeigen. Die Wahl der Farbachsen richtet sich nach der Gegenfarbtheorie von Ewald Hering. Die a* Achse erstreckt sich von Grün nach Rot und die b* Achse verläuft von Blau nach Gelb. Durch diese drei Koordinaten ist ein räumliches Schema (Abbildung 15) gegeben, das den L*a*b*-Farbraum vereinfacht als Kugel darstellen lässt.⁶¹

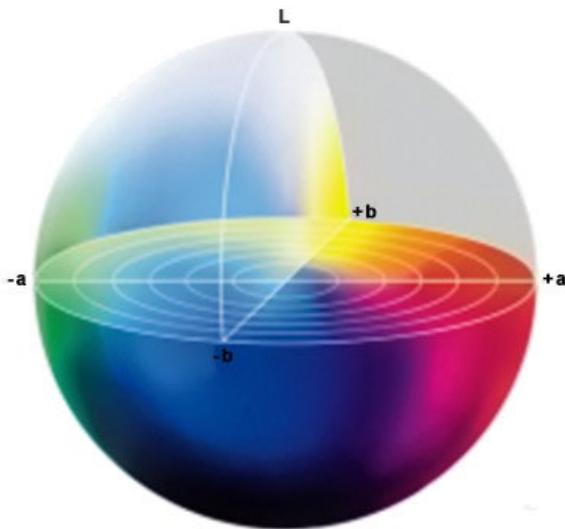


Abbildung 15: Darstellung des L*a*b* Farbraumes

Ein Merkmal des CIELAB-Modells ist die Gleichabständigkeit, sodass gleich empfundene Farbunterschiede im Farbraum numerisch gleich große Distanzen aufweisen. Der Farbraum definiert keine absoluten Farbwerte, sie werden relativ zum Weißpunkt des aus dem CIE-XYZ konvertierten Farbraum festgelegt und dargestellt. Im Zuge dessen resultiert der Vorteil einer geräteunabhängigen Betrachtung der Farben.

Dabei ist zu beachten, dass dieser Farbraum auch imaginäre Farben enthält und über die Möglichkeit der wahrnehmbaren Farben hinausgeht.⁶²

⁶¹ Vgl. (Greule, Farbmtrische Grundlagen, 2021, S. 92)

⁶² Vgl. (Budde, 1999)

2.4.3 Delta E

Zwei gleiche Farben bzw gleiche Farbvalenzen zu erreichen, gestaltete sich neben der Subjektivität besonders durch verschiedene Monitore und andere Umwelteinflüsse sehr schwierig. Um den optischen Abstand zweier Farben beschreiben zu können, wird aus diesem Grund die Farbabstandsformel für Delta E (ΔE) verwendet. Der euklidische Abstand Delta E beschreibt⁶³ den Abstand zwischen zwei Farborten im L*a*b* Farbraum.

Im Folgenden werden die absoluten Differenzen der drei Wertepaare quadriert, addiert und die Wurzel gezogen, um den Farbabstand zu erhalten:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$$

Die Werte ΔL^* , Δa^* und Δb^* sind jeweils die Unterschiede zwischen den zwei zu vergleichenden Werten im CIE L*a*b*-Farbraum.⁶⁴

2.4.4 RGB-Farbmodell

Das RGB-Farbmodell basiert auf der Theorie, dass alle sichtbaren Farben aus einer Mischung von drei primären Farben – Rot, Grün und Blau – erzeugt werden können. Bei der additiven Farbmischung im RGB-Raum addieren sich die Grundfarben zu Weiß. Demnach wird die Mischung mit steigendem Anteil aller drei Farben zunehmend heller. Jede beliebige Farbe kann innerhalb eines Würfels anhand der RGB-Koordinaten festgelegt werden.⁶⁵ Wird von acht Bit Farbtiefe ausgegangen, steht beispielsweise (255, 0, 0) für Rot und (255, 255, 255) für Weiß.

⁶³ nach EN ISO 11664-4

⁶⁴ Vgl. (Possel, kein Datum)

⁶⁵ Vgl. (Schiele, 2012, S. 29ff.)

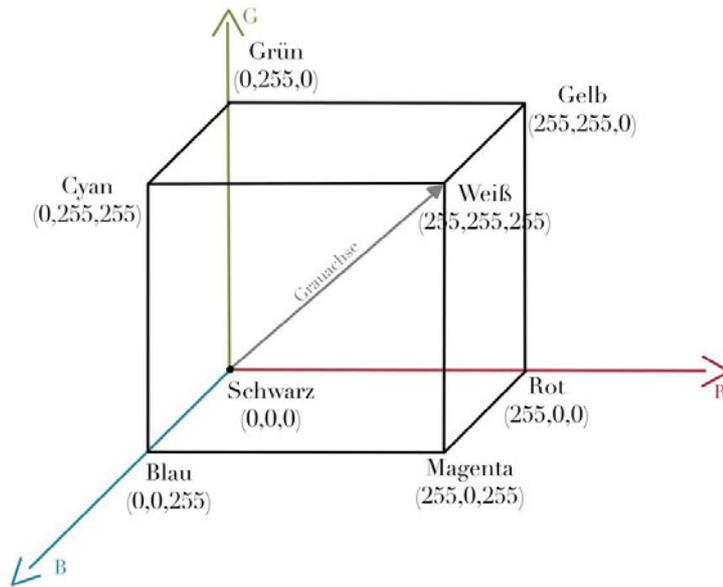


Abbildung 16: Farbwürfel

Drei Farbkomponenten werden in einem Farbvektor zusammengefasst. Oftmals folgt die Normierung der Farbwerte auf Eins, sodass die Werte für Rot, Grün und Blau jeweils zwischen Null und Eins liegen. Für Weiß gilt entsprechend $R=G=B=1$.

Normierung am Beispiel des Rottones (204,0,51)

$$r = \frac{R}{R+G+B} \qquad g = \frac{G}{R+G+B} \qquad b = \frac{B}{R+G+B}$$

$$r = \frac{204}{204+51} = 0.8 \qquad g = \frac{0}{204+51} = 0 \qquad b = \frac{51}{204+51} = 0.2$$

Daraus ergeben sich die RGB-Werte des Rottones (0.8,0,0.2). Die normalisierten Werte des RGB-Farbraums werden z.B. für Berechnungen, wie Transformationen in einen anderen Farbraum, gebraucht. Je nach Wahl der Grundfarben ergeben sich verschieden große und unterschiedlich positionierte Farbräume⁶⁶, die als Arbeitsfarbraum bezeichnet werden.

⁶⁶ Z.B. sRGB oder AdobeRGB

2.4.5 Farbräume im Allgemeinen

Innerhalb der Normfarbtafel lassen sich durch die Festlegung der Eckpunkte dreieckige Ausschnitte als Farbräume definieren. Ein Farbraum beschreibt das begrenzte Sortiment der Farben, die auf einem Gerät wie einem Monitor existent sind und vom Menschen erfasst werden können.

Im Inneren des, durch die Primärfarben begrenzten, Dreiecks liegen alle möglichen Farben des Farbraumes. Dementsprechend werden so die Grenzen des spezifischen Gerätes definiert und die Erzeugung anderer Farben ist nicht möglich. Ein größerer Farbraum ermöglicht somit die Darstellung von mehr Farbtönen. Die Menge aller Farben eines Farbraumes wird als Gamut bezeichnet.⁶⁷

Bei der Arbeit in einem bestimmten Farbraum sollte auf die konsistente Nutzung geachtet werden. Oftmals wird aufgenommenes Material in der Nachbearbeitung in einen anderen Farbraum transferiert. Der in der Kamera verwendete Farbraum sollte dementsprechend in der Postproduktion bekannt sein, um einen einheitlichen Workflow beizubehalten und optimal und farbkorrekt auf das Ausgangsmaterial reagieren zu können. Der Farbraum kann mit Hilfe einer Lookup-Tabelle in andere Farbräume transformiert werden. Darauf wird im späteren Verlauf Bezug genommen (siehe Kapitel 2.4.10).

Kameraaufnahmen können display- oder szenenbezogen sein. HDTV- Aufnahmen beispielweise sind displaybezogen und farbmetrisch so ausgelegt, dass eine unmittelbare Betrachtung auf dem Display möglich ist.⁶⁸ Der Transformationsprozess in den Farbraum findet bereits in der Kamera statt. Aufnahmen in den displaybezogenen Farbräumen Rec.709, Rec.2020, und DCI-P3 benötigen nicht zwangsweise eine Farbkorrektur und bringen eine unkomplizierte Herangehensweise im Bearbeitungsprozess mit sich.⁶⁹ Die Helligkeitsinformationen müssen über den Gammawert interpretiert werden.⁷⁰

Konträr dazu bringen szenenbezogene Aufnahmen wie ARRI-RAW oder RED-RAW einen deutlich größeren Dynamikumfang mit. Szenenbezogene Farbräume wie ARRI Log C oder Canon Cinema Gamut sind zur Aufnahme gedacht (Wide Gamuts).

⁶⁷ Vgl. (ARRI, 2022)

⁶⁸ Vgl. (Hamma Gamma? Was man über das Gamma wissen sollte, 2021)

⁶⁹ Vgl. (Kern, 2018)

⁷⁰ Vgl. (Eberhard Hasche, 2016, S. 69)

Der Aufnahmefarbraum sollte mit Bedacht gewählt werden, da dieser die Farbvielfalt einschränkt. Farben, die die Grenzen des gewählten Farbraumes überschreiten, können nicht gespeichert werden und müssen zur nächstbesten Farbe verändert werden. Das Verschieben einiger Farbwerte bringt den Verlust der Originalfarben mit sich. Daraus ergibt sich die Erkenntnis, dass die Optionen für den Coloristen durch die Grenzen des Farbraumes gesetzt werden.

2.4.6 Rec.709

Seit Einführung von HDTV (High Definition Television) liegt weltweit erstmals ein einheitlicher Farbstandard für die Betrachtung von HD-Material vor. Dieser wird mit ITU-R BT.709 beschrieben und nennt sich Rec.709. Dieser Farbraum ist in Bezug auf die Menge an Farbe, die er darstellt, ziemlich begrenzt und deckt nur 35,6% des visuellen Spektrums ab.⁷¹

An dieser Stelle ist zu berücksichtigen, dass die für Rec.709 ausgelegten Kameras technische Einschränkungen gegenüber den heutigen Kameras aufweisen. Moderne HD-Kameras bringen einen höheren Dynamikbereich und einen größeren Farbumfang mit sich. Trotz des ständigen technischen Fortschrittes bleibt Rec.709 mehrheitlich der Betrachtungsstandard der Bildschirme und wird in allen gängigen Anzeigetechnologien unterstützt. Die meisten HDTV- und UHD-Fernseher sind nicht dazu gedacht, Farben anzuzeigen, die über die in diesem Bereich enthaltenen Farben hinausgehen. Der Industriestandard für HD unterstützt eine Framerate von bis zu 50 FPS, ein Gamma von 2.4 und eine Bittiefe von acht bis zehn Bit.

2.4.7 Rec.2020

Rec.2020 bringt im Vergleich zu Rec.709 ein breiteres Farbspektrum mit sich (Abbildung 17, Abbildung 18). Dieser Codierungsfarbraum eignet sich für UHD-Material und verspricht durch die hohe Verfügbarkeit an Farbwerten brillante Bilder. Der Standard Rec.2020 unterstützt eine Framerate von bis zu 120 FPS, ein Gamma von 2.4 und eine Bittiefe von 10-12 Bit. Jedoch kommt häufig bei der Aufzeichnung ein Codec zur Kompression der Videodaten zum Einsatz, der sich auf die Anzahl der Helligkeitsabstufungen auswirkt. Dementsprechend können herkömmliche Produktionsdisplays maximal acht Bit darstellen und sind technisch qualitativ nicht ausreichend, um die Wiedergabe in Rec.2020 im vollen Umfang zu unterstützen.

⁷¹ Vgl. (Burosch, 2009)

Infolgedessen wird die Farbvielfalt einer UHD Aufnahme⁷² in Rec.2020 bei der Wiedergabe auf einem auf Rec.709 kalibrierten Monitor entsprechend einschränkt werden.

Kommende Medien, die die größeren Farbräume nutzen und HDR-Displays zur Betrachtung verwenden, bieten mehr Vielfalt für die Farbe, mehr Details und ein realistisches Bild.

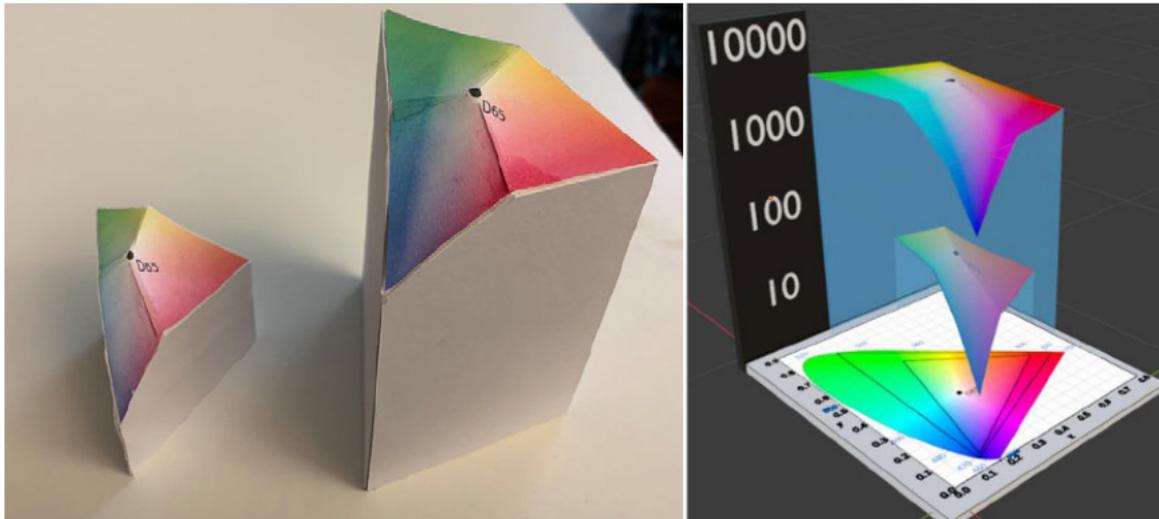


Abbildung 17: 3D-Modell der Farbräume Rec.709 und Rec.2020 (links)

Abbildung 18: Rec.709 und Rec.2020 im Vergleich (rechts)

2.4.8 DCI-P3

DCI-P3 ist ein beliebter RGB-Farbraum, der 2010 von der Organisation Digital Cinema Initiatives (DCI) definiert wurde und gegenüber Rec.709 einen wesentlich größeren Farbumfang aufweist. Gemäß dem CIE 1931 Farbraum deckt DCI-P3 45,5% aller für den Menschen wahrnehmbaren Farben ab.⁷³ Wie der Name vermuten lässt, ist DCI-P3 der Farbraum, der von der Filmindustrie für digitale Filmproduktionen am häufigsten verwendet wird. Er ist so konzipiert, dass er genau der gesamten Bandbreite von Farbfilmen entspricht. Die meisten professionellen Referenzmonitore, sowie alle Digital Cinema-Projektoren, können den gesamten DCI-P3-Farbumfang anzeigen. Außerdem wird dieser Farbraum von Unternehmen wie Apple, Samsung, Google und Anderen im Bereich mobiler Geräte angewandt. Trotzdem ist er im Allgemeinen kein Verbraucherstandard und wird hauptsächlich für Inhalte verwendet, die für die digitale Projektion bestimmt sind.

⁷² 3840 x 2160 Bildpunkte

⁷³ Vgl. (Fuxjäger, 2021)

Der Hauptunterschied zwischen DCI-P3 und Rec.709 besteht in der höheren Anzeigevielfalt der Grüntöne. Auch die Anzahl der Rottöne nimmt im DCI-P3 leicht zu, nur die der Blautöne bleibt unverändert. Die signifikante Steigerung der Bildqualität fällt insbesondere bei der Darstellung von gesättigten Rottönen auf. Bei einem Blick auf Abbildung 19 wird deutlich, dass trotz des gesteigerten Farbumfanges noch viele der tiefen Grüntöne nicht vorhanden sind.⁷⁴

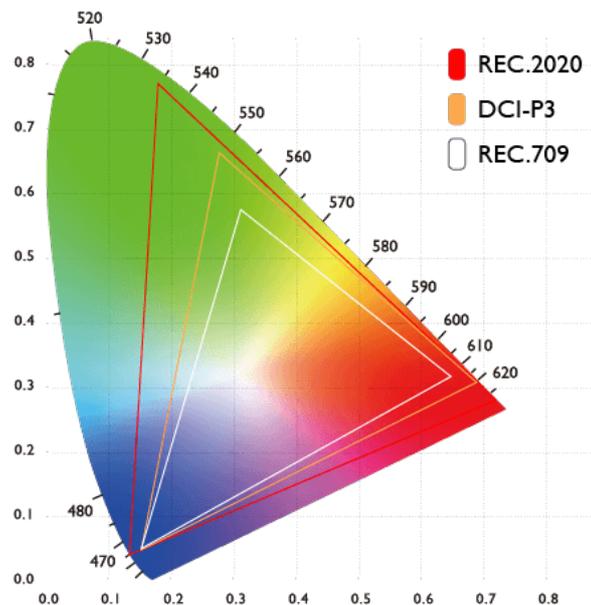


Abbildung 19: CIE Normfarbtabelle mit den eingezeichneten Farbräumen Rec.709, DCI-P3 und Rec.2020

2.4.9 ACES

Die „Academy of Motion Picture Arts and Sciences“ (AMPAS) hat einen Standard für die Verwaltung von Farben während des gesamten „Workflows“ einer Film- oder Fernsehproduktion definiert, das „Academy Color Encoding System“ (ACES).

Von der Bildaufnahme über die Bearbeitung und Archivierung steht ACES für ein konsistentes Farbmanagement. Die weltweit wachsende Vielfalt an verwendeten Digitalkameras vervielfältigt ebenfalls die Format-, Wiedergabe-, und Archivierungsmöglichkeiten. Um gemeinsam genutzte Bilddateien nicht zu verfälschen, löst das frei zugängliche und geräteunabhängige ACES einige Produktionsprobleme.

⁷⁴ Vgl. (Fuxjäger, 2021)

Das Farbmanagement- und Bildaustauschsystem bietet durch seine großzügige Farbraumauslegung neue Möglichkeiten für verschiedene Produktionen. Mit dem Ziel, für alle zukünftigen Entwicklungen gerüstet zu sein, handelt es sich auch um einen Versuch die Technologien zu standardisieren und in Einklang zu bringen. Die in dem freien und offenen Standard ACES2065-1 verwendeten APO Primärfarben umfassen über den gesamten sichtbaren Spektralort auch Bereiche, die für das menschliche Auge nicht sichtbar sind. Neben dem breiten Farbspektrum bringt ACES2065-1 auch einen hohen Dynamikbereich mit.⁷⁵

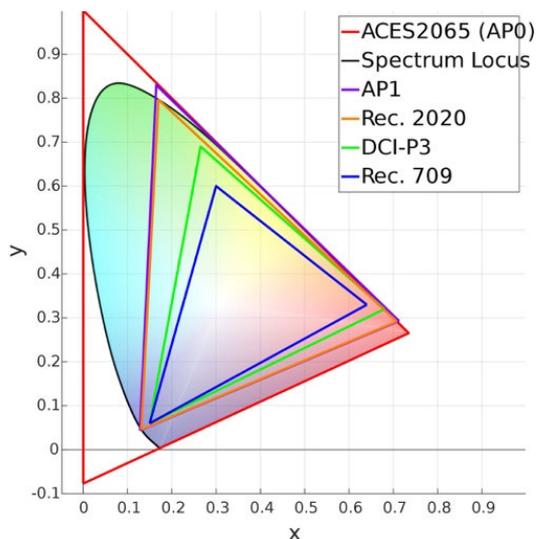


Abbildung 20: ACES-Farbraum im Vergleich

Da die Funktionalität des großen und linearen Farbraumes nur bedingt in der Bearbeitungssoftware greift, wurden ACEScc und ACEScct zur Farbkorrektur entwickelt. Die beiden Ansätze verfügen über eine logarithmische Codierung, wodurch sich die Bilddaten besser verarbeiten lassen. Zudem umfassen ACEScc und ACEScct durch die AP1 Vorauswahl einen ähnlichen Farbraum wie Rec2020.⁷⁶

Die Verarbeitung des Eingabematerials aus der Kamera wird über Input Device Transforms (IDT) realisiert. Die Eingangstransformationen konvertieren die Farbwerte aus einem Eingabefarbraum in einen gemeinsamen, szenenbezogenen und linearen Arbeitsfarbraum, ACES2065-1.⁷⁷

⁷⁵ Vgl. (ACES explained in a simple way, 2022)

⁷⁶ Vgl. (Academy Color Encoding System (ACES), 2012-2019)

⁷⁷ Vgl. (ACES explained in a simple way, 2022)

Im Zuge des ACES-Workflows werden neben Look-Modifikations-Transformationen auch Output-Transformationen definiert, die für die Anzeige von ACES-Bilddaten auf verschiedenen Displays erforderlich sind. An dieser Stelle werden keine tiefgehenden Betrachtungen angestellt, da die Verwendung von ACES in diesem Versuch ausbleibt.

2.4.10 LUT

Eine LUT steht für „Look-up Table“ (oder Lookup Tabelle) und ist eine kleine Datei, die bestimmte Informationen enthält und eine Übersetzungstabelle beschreibt. Durch eine Reihe von Anweisungen werden die Pixelwerte des Ausgangsmaterials neu zugeordnet und somit beliebig verändert.

Die Transformation hilft auch dabei, logarithmisch aufgenommenes Videomaterial in einen anderen Farbraum umzuwandeln. Durch das Importieren einer passenden LUT in ein Bearbeitungsprogramm kann auch ARRI Log C Material in ein sichtbares Format wie ITU-R BT.709 konvertiert werden. Die Wahl der LUT setzt die Kenntnis über den Aufnahmefarbraum der Kamera voraus und ist für diesen konzipiert.

Die eingeladene Datei ändert bei Bedarf die Sättigung, den Farbton und die Luminanz des Videos, um zu einer finalisierten Color Grading Version zu gelangen oder schon am Set Farbkorrekturen vorzunehmen. Eine LUT kann die Ausgangssituation für Anpassungen in einer Grading Software erheblich verbessern und den Produktionsablauf vorantreiben.⁷⁸

LUTs werden ein- oder dreidimensional realisiert. In beiden Fällen wird der Eingangswert durch die Anwendung einer Transformation in den Ausgangswert überführt. 1D-LUTs bieten begrenzte Anpassungsmöglichkeiten, da sie aus nur drei verschiedenen Datenmappings (Rot, Blau, Grün) bestehen.

Nehme man als Ausgangsmaterial ein acht Bit Bild mit 256 Graustufen, würde im ersten Schritt für eine eindimensionale LUT jeder Helligkeitswert in dem Pixel ermittelt und auf den Zielwert angepasst werden. Zusätzlich gibt es pro Pixel drei Kanäle für Rot, Grün und Blau und dementsprechend auch drei Ausgangswerte. Jede Farbe wird separat behandelt, sodass sich die Verstärkung von Rot nicht auf Grün und Blau auswirken würde (siehe RGB-Werte in Abbildung 21). Daher ist die 1D-LUT für komplexe Farbkorrekturen ungeeignet.⁷⁹

⁷⁸ Vgl. (Was ist eine LUT und wie funktioniert sie?, 2016-2022)

⁷⁹ Vgl. (Shipsides, 2012)

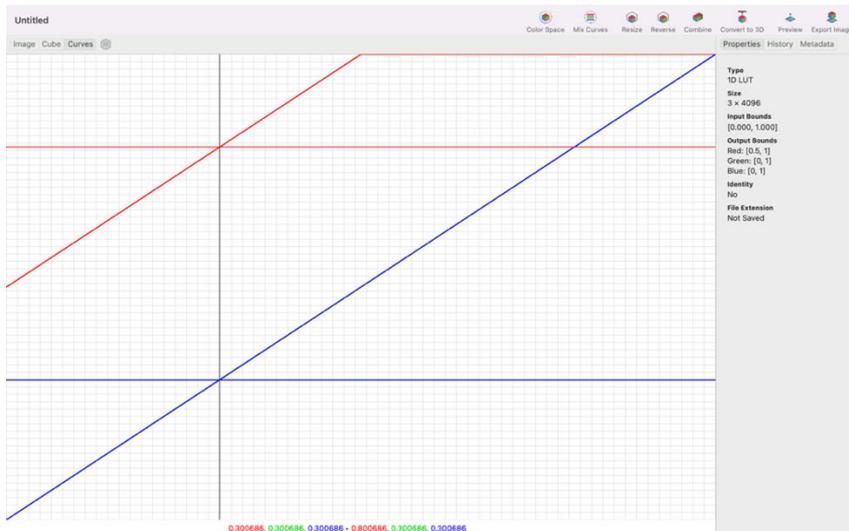


Abbildung 21: Kurve einer 1D-LUT mit verändertem Rot-Wert

3D-LUTs sind komplexer und basieren auf einem dreidimensionalen Farbwürfel. Jeder Punkt in dem Würfel präsentiert eine Farbe, was ein viel größeres Anpassungspotenzial bietet. Die Pixel werden mittels einer Transformation an einen anderen Ort verschoben, wodurch eine Farbänderung erzielt wird. Die LUT Datei wäre jedoch unpraktisch groß, wenn jeder beliebige Punkt angesteuert werden könnte. Somit wird nicht, wie bei der 1D-LUT, jeder Eingabewert auf einen Ausgabewert abgebildet, sondern eine reduzierte Auswahl verwendet.

Daher sind nicht alle Werte adressierbar, sondern es finden sich feste Punkte auf den jeweiligen Achsen. Oftmals sind dies 17, 33 oder 64 Knotenpunkte pro Achse, die durch Interpolation erreicht werden können. Die in einem Programm wie „Lattice“ einstellbare Anzahl der Knoten bestimmt die Auflösung und dementsprechend die Qualität der LUT. Bei der Wahl von wenigen Knotenpunkten kann es zu streifenförmigen Banding Artefakten im Bild kommen.

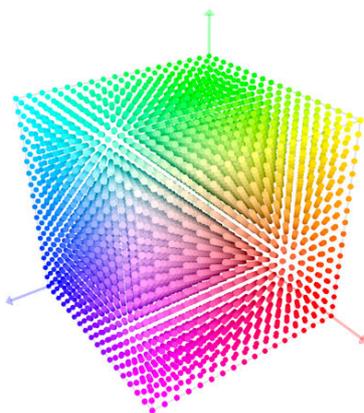


Abbildung 22: 3D Farbwürfel mit 17 Knotenpunkten pro Achse - Screenshot aus Lattice

2.5 Look

Jeder Hersteller hat seine eigene Vorstellung davon, wie die aufgenommenen Farben des Sensors repräsentiert werden sollen. Auch das Verhalten in den Highlights, wie der später thematisierte Roll-Off der ARRI Alexa Mini, ist herstellergetrieben. Die Sensorgröße, die Brennweite und die Blende werden bewusst eingesetzt, um einen bestimmten Look zu kreieren. Ebenso das Bild-Seitenverhältnis und die Bewegung der Kamera tragen maßgeblich zu den bildgebenden Parametern bei.

Im folgenden Abschnitt werden der „Filmlook“ und der „TV-Look“ anhand konkreter Aspekte verglichen und der Frage nach einem ästhetisch ansprechenden Erscheinungsbild nachgegangen.

2.5.1 Filmlook

Der Kinolook, Filmlook oder auch „Cineloook“ zeichnet sich durch mehrere, charakteristische Eigenschaften aus. Der Begriff des klassischen Filmlooks definiert sich aus unterschiedlichen Faktoren, die sowohl aus dem technischen als auch dem künstlerischen Bereich stammen. Bei klassischen Kinofilmen ist die Framerate auf 24 FPS festgelegt, wodurch vor allem in actionreichen Szenen Bewegungsunschärfe entstehen kann. Das pulsierende Licht der Projektoren im Zusammenspiel mit der niedrigen Framerate und einer Belichtungszeit von $1/48$ s erzeugt den filmtypischen Flimmereindruck. Während der zeitliche Faktor einen individuellen Standard verfolgt, lässt sich dies ebenfalls auf die Abmessungen beziehen.

Mit dem Blick auf die Leinwand fällt das horizontal dominante Bildseitenverhältnis von 2,39:1 auf, was in etwa 21:9 entspricht.⁸⁰

Das als Cinemascope beschriebene Format sorgt für ein anderes Seherlebnis im Vergleich zum klassischen 16:9 und eröffnet neue Möglichkeiten für besondere Bildkompositionen. Insbesondere Landschaftsaufnahmen und Actionszenen wirken im Superbreitbildformat eindrücklicher und intensiver als im Standardformat.

⁸⁰ Vgl. (Kopatz, 2009)

Den Ursprung für den filmischen Look, und die dadurch veränderten Sehgewohnheiten des Zuschauenden, bildet das Filmkorn (Grain). Das Filmkorn ist ein Effekt, dessen Ursache auf die organische Struktur des Filmmaterials zurückgeht. Bei der Herstellung eines Films wird eine lichtempfindliche Schicht auf ein Trägermaterial aufgetragen.

Die später sichtbaren Körner sind Silberhalogenide, die bei der Herstellung des Filmmaterials während des Prozesses einer Emulsion auf das Trägermaterial des Filmes aufgegossen werden. In der Kamera ballen sich diese Silberatome zu sich in der Größe unterscheidenden Clustern zusammen. Diese Kristalle werden besonders bei großen Flächen mit mittlerem Grauwert im Bild sichtbar und sind charakteristisch für den Filmlook.⁸¹

Die Körnigkeit des Filmes ist abhängig von der Empfindlichkeit. Die Dauer der Belichtung spielt im chemischen Prozess eine maßgebliche Rolle und je empfindlicher der Film ist, desto stärker neigt er zur Körnung. Besonders graue Flächen im Bild sind nicht homogen und weisen eine unregelmäßige Verteilung der kleinen, chemischen Partikel auf. Bei Farbfilmen treten an die Stelle des Filmkorns die Farbstoffwolken, die mit sinkender Filmempfindlichkeit an Größe verlieren.

Wird ein Film stark vergrößert, insbesondere von einem kleinen Filmformat wie Super 8 oder Super 16 auf eine große Leinwand projiziert, wird das Filmkorn als optisches Rauschen sichtbar. Die organischen Eigenschaften eines Filmkornes werden, wie in Abbildung 23 sichtbar, entsprechend ebenfalls vergrößert.⁸²



Abb. 5.13. Filmbildaus-
schnitte bei verschie-
denen Vergrößerungen [113]

Abbildung 23: Filmkörnigkeit bei verschiedenen Vergrößerungen

⁸¹ Vgl. (Kopatz, 2009)

⁸² Vgl. (Schmidt U. , 2009, S. 294)

Die Körnung führt jedoch nicht zu Störungen, sondern wird meistens als angenehm empfunden. Im Gegensatz zu quadratischen Pixeln beim digitalen Film, wandert das Filmkorn nach dem Zufallsprinzip leicht von Bild zu Bild. Das Filmbild erscheint lebendiger, natürlicher und sehr dynamisch. Digitale Aufnahmen hingegen wirken sehr leblos, steril, kalt und extrem scharf.

In der Nachbearbeitung mit einem Programm wie DaVinci Resolve kann nachträglich ein Grain-Effekt angewandt werden. In diesem lassen sich Unterschiede in den Grain-Einstellungen in Bezug auf die Körnigkeit finden. Da das Bild auf der Kinoleinwand stark vergrößert projiziert wird, ist jedoch die Zeichnung in den Details für den cinematischen Look wichtig. Das Ausreizen des Detailreichtums erzeugt oder verstärkt lokale Kontraste. In der Nachbearbeitung wird entsprechend neben der Grain-Einstellung Wert auf Textur und Dichte gelegt.

Die besondere Ästhetik im Kinofilm ergibt sich unter anderem durch den warmen Charakter der Farben und die Dominanz der dunklen Szenen. Stilistisch ist die Farbgebung auffallend „moody“, wodurch ein greller Farbeindruck vermieden wird. Die Betrachtung des Materials mit einem Waveformmonitor spiegelt diesen Eindruck ebenfalls wider. Um ein Ausbrennen und Übersteuern zu vermeiden, wird dem Vorhandensein von ausreichend „Headroom“ in den Highlights eine essenzielle Rolle zugespielt.

Ein aktueller Negativfilm bietet einen sehr hohen Kontrastumfang. Je nach Material und ISO-Wert beträgt dieser ca. 12 Blenden⁸³, also einen Unterschied von 1:10.000 zwischen den dunkelsten und hellsten Bildteilen. Der hohe Dynamikumfang unterstützt Farb- und Helligkeitskontraste, wobei das Bild durch die „Breite“ der Abstufungen sehr weich und ausgewogen in der Zeichnung wirkt. Aufnahmen, die weniger Blendenstufen enthalten, wirken demnach hart und kontrastreich.

Ein weiteres charakteristisches Merkmal ist der Umgang mit Schärfe. Das menschliche Gehirn sucht automatisch die scharfen Bildzonen, wodurch sich der Blick des Zuschauers lenken lässt. Die Schärfe wird über den Kamerasensor und die Objektivselektoren bestimmt. In den entsprechenden Digitalfilmkameras sind in der Regel große Sensoren (36x24mm) verbaut, die wenig Rauschen mit sich bringen.

⁸³ (Kodak, 2004)

Das aus der Sensorgröße resultierende geringe Maß an Schärfentiefe wird verwendet, um das Hauptaugenmerk des Betrachtenden auf den Protagonisten zu lenken. Infolgedessen weist der Hintergrund wenig Zeichnung auf und der Kontrast zwischen den scharfen und unscharfen Bildbereichen ist sehr hoch. Unterstützend führen auch offene Blenden und Teleobjektive zu einem kleinen Schärfebereich, während weitwinkliger Objektiv flache Bilder fördern.⁸⁴

In Kinofilmen tritt die Zoom-Bewegung nur selten auf, da das menschliche Auge über die Fähigkeit der Bildausschnittsvergrößerung ohne Annäherung nicht verfügt. Demnach wird vorrangig die Kameraposition verändert, wenn ein veränderter Bildwinkel erzeugt werden soll. Jedoch wird selten eine Bewegung ohne eine erklärbare, durch die Filmhandlung bedingte oder erzählerische Motivation vorgenommen. Auch Kamerafahrten werden behutsam eingesetzt, um die Realitätsnähe zu wahren.

All die genannten Parameter tragen maßgeblich zu einem einzigartigen, vom Rezipienten geschätzten Kinolook bei. Im Zuge der fortschreitenden Technik ist der klassische Filmlook laut Matthias Kopatz nicht mehr zeitgemäß. Das bedeute aber nicht, dass er komplett aufgegeben werden müsse. Der Filmlook könne als Vorbild in Zeiten der voranschreitenden Digitalisierung fungieren, sodass trotz des technischen Fortschrittes der Filmcharakter erhalten bleiben könne.⁸⁵

2.5.2 TV – Look

Im Gegensatz zum Filmlook ist das klassische Fernsehen überwiegend durch einen flachen und hellen Look geprägt. Im Vordergrund einer Nachrichtensendung oder „Talkshow“ stehen, wie der Name vermuten lässt, die verbalen Informationen. Vom Zuschauenden wird Konzentration verlangt, die nicht von farbig hervorstechenden Details vermindert werden soll. Im Gegensatz zu Kinofilmen wird das Hineinversetzen des Betrachtenden in die Szene nicht als Ziel einer Nachrichtensendung angesehen. Bei Fernsehsendungen nimmt der Betrachtende eine zuschauende Rolle ein. Besonders in Gesprächsrunden mit mehreren Personen wird der konservative Stil sich wiederfinden.

⁸⁴ Vgl. (Wie du ein Video im Filmlook drehst, 2022)

⁸⁵ Vgl. (Kopatz, 2009)

Gegensätzlich zum Filmlook werden oftmals Kameras mit kleinen Sensoren verwendet, die einen großen Schärfebereich abbilden können. Dies erzeugt weniger Tiefe und erleichtert in Liveübertragungen die Arbeit für den „Focus Puller“⁸⁶. Bei hoher Schärfentiefe ist ein großer Teil der Szene scharf, ganz gleich, welches Objekt fokussiert wird.

Im Vergleich zu Kinofilmen werden in Fernsehsendungen häufig langsame Zooms verwendet, die den Bildwinkel ändern. Diese unmenschliche Vergrößerung des Bildausschnittes schafft Distanz zum Zuschauenden und bekräftigt die Position als Außenstehenden.

Während im Film eine Schulterkamera für eine Actionszene verwendet wird, finden sich in Nachrichtensendungen fast ausschließlich Kameras auf Stativen wieder. Fernsehsendungen enthalten dadurch meist wenig Geschwindigkeit und erzeugen ein ruckelfreies Bild. Zudem wird eine Person aus vielen Perspektiven abgebildet. Die oftmals auf Roll,- oder Pumpstativen verwendeten Kameras mit Zoomobjektiven bieten viele Variationen der spontanen Kamerabewegungen. So können wackelfreie horizontale und vertikale Fahrten und Zooms aus verschiedenen Perspektiven vorgenommen werden.

Einen weiteren Unterschied zum Kinolook stellt die Art des Bildaufbaus dar. Im Fernsehen werden statt eines gesamten Bildes zwei Halbbilder übertragen. Durch dieses Zeilensprungverfahren, englisch Interlace, können 50 Halbbilder in der Sekunde übertragen werden, was für das menschliche Auge flüssiger erscheint als 25 Vollbilder. Auch wenn das Aktualisieren jeder zweiten Zeile für das Auge nicht zu einer Verschlechterung der Bildqualität führt, können dadurch Fehler an horizontalen Kanten entstehen. Sofern die Bandbreite außer Betracht gezogen werden kann, ist die Wahl des progressiven Bildaufbaus von Vorteil.⁸⁷

Einen bestimmten Fernsehlook zu definieren ist jedoch unmöglich, da das Fernsehprogramm weit über Nachrichtensendungen hinaus geht. Jede Sendung arbeitet mit einem eigenen Look, der ständig im Wandel ist. Die oben genannten Punkte beziehen sich nur auf die klassischen Nachrichtensendungen im Fernsehen und spiegeln einen subjektiven Eindruck wider. Ein für die Leinwand produzierter Kinofilm wird auf einem Fernsehmonitor eines Normalverbrauchers nicht das gleiche Erlebnis erzeugen können. Dies soll allerdings keine Wertung der Qualität des Looks darstellen, denn jeder Look ist auf die Gruppe der Rezipienten optimiert.

⁸⁶ das Ziehen der Schärfe

⁸⁷ Vgl. (Wölk, kein Datum)

2.5.3 Ästhetisch ansprechender Look

Auf der Suche nach dem „perfekten Look“ für die Werbevideobranche ergeben sich schnell Konflikte im Zuge der individuellen Wahrnehmung. Dementsprechend ist es nicht möglich generationen- und geschlechterübergreifend, sozial und politisch eine Vereinheitlichung zu finden. Im ersten Augenblick der Betrachtung eines Bildes tragen die Farben stark zum Seheindruck bei. Die Wirkung der Farbe ist direkt mit den Emotionen gekoppelt und hat einen hohen Einfluss auf das Befinden.

Das folgende Zitat von Welsch/Liebmann (Norbert Welsch, 2004) unterstreicht die Wichtigkeit des Wahrnehmungsparameters Farbe:

„Wahrnehmungsforscher gehen seit mehr als einem Jahrzehnt davon aus, dass der Mensch in der Alltagswahrnehmung mindestens vierzig Prozent aller visuellen Informationen durch Farben entschlüsselt. Dies belegt die Wichtigkeit einer professionellen Farbgestaltung auch für Maßnahmen mit Bewegtbild.“⁸⁸

Die Decodierung von Farben ist neben gelernten geschlechterspezifischen Vorlieben auch durch soziale Positionierungen und kulturelle Faktoren bedingt, wodurch unterschiedliche Wirkungen hervorgerufen werden. Dementsprechend existiert nicht die eine Farbe, die jedes Produkt erstrahlen lässt und weltweit die Konsumfreude anregt. Die Kunst liegt darin, Farben zu nutzen, um die Erwartungen von Kunden an Produkte und Marken zu erfüllen. Diese Kommunikation auf visueller Ebene ist überzeugender und zugleich manipulativer als auf verbaler Ebene. So kann der Betrachtende durch die Farbwahl des Produktes davon überzeugt werden, dass es z.B. frischer schmeckt als dasselbe Produkt in einer anderen Farbe. Rot beispielweise regt den Stoffwechsel und den Blutdruck des Zuschauenden an und eignet sich aufgrund der appetitanregenden Wirkung gut für Restaurantschilder. Blau hingegen steht für Ruhe, Entspannung, Stabilität und Frieden und eignet sich für Dienstleistungen oder Schutzkleidung. Ein blauer Helm oder eine blaue Bank ruft bei den Konsumierenden Gelassenheit und Vertrauen hervor – und diese Eigenschaften werden sie auf das Produkt projizieren.⁸⁹

⁸⁸ (Norbert Welsch, 2004)

⁸⁹ Vgl. (Harjes, 2021)

Die Wahl der Farbe erstreckt sich somit in Abhängigkeit des zu betrachtenden Inhaltes. Für die Kameratechnologien bedeutet dies, jeden Farbton möglichst wahrheitsgetreu darzustellen und das Augenmerk nicht auf die Perfektionierung eines bestimmten Farbtones zu richten. Besonders im Werbebereich müssen die Anforderungen an bunte Farben und hohe Kontraste erfüllt werden. Voraussetzung dafür ist es, den Weißabgleich richtig einzustellen, um ein klares, sauberes und strahlendes Weiß zu generieren.

Nach einigen Rückfragen⁹⁰ wurden gehäuft strahlende Farben und natürliche Hautfarben in Bezug auf die Vorstellung eines ästhetisch ansprechenden Bildes erwähnt. Ein steriler Eindruck sollte dabei jedoch vermieden werden. In einem hochqualitativen Look sind Schönheitsideale erwünscht, die jedoch gleichzeitig Natürlichkeit vermitteln sollen.

Neben den Farben lässt sich das Auge durch die scharfen Bildbereiche lenken. Der Betrachtende wünscht sich eine inhaltlich aufregende Bildkomposition im Film oder Werbespot. Durch eine kurzzeitige Orientierungslosigkeit wird die Spannung des Zuschauenden gehalten und der Überraschungseffekt erreicht. So ist es dramaturgisch aufregend, wenn nur bestimmte Bildausschnitte gezeigt werden.

Der Look wird auch durch altersbedingte Vorlieben gesteuert. Besonders die jüngere Generation Z, ab dem Jahr 2000, ist das Aufbrechen des 16:9 Bildverhältnisses gewohnt. Diese „Smartphone-Generation“ ist durch Social Media Plattformen wie „Instagram“ oder „TikTok“ an das Hochformat gewöhnt. Der Trend geht vom Horizontalen ins Vertikale und wird insbesondere für Werbung auf dem Handy eher auf 1:1 oder sogar 9:16 ausgelegt. Die Aufmerksamkeitsspanne der jugendlichen Generation verkürzt sich durch die immer kürzer werdenden Videoabschnitte wie auf „TikTok“.⁹¹ Unmittelbar nach der Betrachtung eines, meist unter zehn Sekunden andauernden Videos, werden dem Konsumenten durch ein „Scrollen“ neue Inhalte präsentiert. Langatmige Werbespots finden folglich wenig Anklang in der jüngeren Generation.

Letztendlich werden Produkthersteller und mögliche Käufer nicht durch eine technische Richtigkeit überzeugt, sondern durch das in-Szene-setzen eines Produktes.

⁹⁰ Im Kreis von Familie und Freunden

⁹¹ Vgl. (Baccus, 2022)

Das Ziel ist es, die bestmögliche Abbildung zu schaffen und sich von der Masse abzuheben, aber gleichzeitig die Natürlichkeit und Authentizität zu bewahren. Klare, zum Produkt oder zur Szene passende Farben sind ein wichtiger Bestandteil eines gelungenen (Werbe)Filmes.

Die Zielgruppe sollte sich angesprochen fühlen und je nach der Art des zu vermarktenden Produktes müssen die Kameraeinstellungen darauf angepasst werden. Der Werbe-Look ist ständig im Wandel und nicht klar definierbar. Durch die „Werkzeuge“ in der Kamera und auch in der Nachbearbeitung sind dem gewünschten Look wenige Grenzen gesetzt.

3 Technischer Vergleich der Kameras

Im Folgenden werden die bereits genannten technischen Grundlagen auf die zwei relevanten Kameras bezogen. Neben den Kamerasensoren, der Aufnahmeformate und den Farbanpassungsmöglichkeiten wird auch der Dynamikbereich und die Kamerasteuerung thematisiert. Dieser Abschnitt wird im Hinblick auf den anstehenden Versuch die technischen Grenzen der Kameras aufzeigen.

3.1 Hochgeschwindigkeitskamera Phantom VEO4K-PL

Die Verwendung der Industriekamera Phantom VEO4K-PL wird zunehmend zweckentfremdet im Werbebereich attraktiver, um in Zeitlupe Produkte einzufangen und abzubilden. Im Kinofilm werden Hochgeschwindigkeitskameras zur bilddramaturgischen Betonung bestimmter Handlungsabschnitte eingesetzt. Durch die Zeitdehnung wirken dargestellte Handlungen (oder z.B. brennende Gegenstände) größer und mächtiger als das Originalmotiv. Gleichzeitig wird die ästhetische Qualität einiger Vorgänge durch die Aufnahme mit Hochgeschwindigkeitskameras gesteigert. Die hohe Bildrate liefert besondere Ansprüche an die im Versuch verwendete Phantom VEO4K-PL.



Abbildung 24: Phantom VEO4K-PL

3.1.1 Sensor

Im Gegensatz zu einer Videokamera mit einer Bildrate von 25 FPS, arbeitet die Phantom mit wesentlich mehr Bildern pro Sekunde. Es handelt sich um eine Hochgeschwindigkeitskamera, die bis zu 938 FPS in voller Auflösung von 4096 x 2304 Pixel aufzeichnen kann.⁹² Eine Reduzierung der Auflösung erhöht die Geschwindigkeit weiterhin, wie in der folgenden Darstellung erkennbar:

Auflösung	FPS
4096 x 2304	938
4096 x 2160	1.000
4096 x 1152	1.850
2048 x 2048	1.050
2048 x 1152	1.850
2048 x 1080	1.970

Abbildung 25: Auflösung und Framerate der Phantom VEO4K-PL

Die Bilddaten können parallel an bis zu 40 Stellen im Sensor abgegriffen werden. In einer üblichen Videokamera werden Bilder zeilenweise ausgelesen und seriell in Elektronik übertragen.⁹³ Der Datenfluss vom Sensor aufs Speichermedium hat erhebliche Auswirkungen auf die finanzielle Komponente der Kamera. Heutige hochauflösende Kamerasysteme verfügen meist über CMOS-Sensoren, die hohe Auflösung bei geringer Größe sowie geringer Leistungsaufnahme und Wärmeentwicklung ermöglichen.

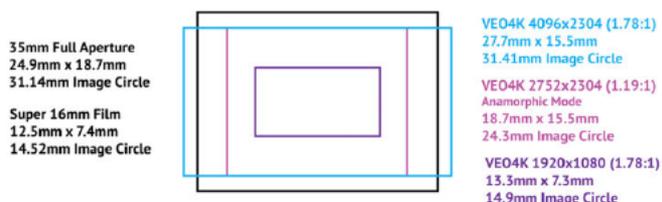


Abbildung 26: Sensorgrößen 35 mm vs. Phantom VEO4K

⁹² Vgl. (VEO4K-PL, 2022)

⁹³ Vgl. (Schmidt U. , 2009, S. 363f.)

Die Phantom VEO ist mit einem Super 35 mm CMOS Sensor bestückt (27.6 mm x 15.5 mm), der auch bei hohen Bildraten qualitativ hochwertige und rauscharme Ergebnisse erzielt.⁹⁴ In Abbildung 26 sind die Maße des genannten Sensors (hellblau) in Relation zu einem 35 mm-Sensor und weiterer Phantom-Modelle dargestellt. Dabei fällt ins Auge, dass der Sensor der Phantom VEO4K-PL bei einer Auflösung von 4096 x 2304 Pixeln einem 35 mm-Sensor am stärksten ähnelt und dementsprechend einen geringen Crop-Faktor mit sich bringt.

Der Hersteller wirbt mit der cinematischen Sensorgröße und den daraus resultierenden filmischen Eigenschaften:

„Bei 4K-Auflösung bietet die Phantom VEO4K ein Super-35-mm-Sichtfeld und Tiefenschärfe.“⁹⁵

Der CMOS-Sensor erlaubt einen Betrieb im Global Shutter- oder Rolling Shutter-Modus, um den Dynamikbereich zu erhöhen und die Notwendigkeit schwarzer Referenzen zu beseitigen. Im Rolling Shutter-Modus ist ein Dynamikbereich von 12.5 Blendenstufen im Datenblatt angegeben. Der Global Shutter-Modus hingegen arbeitet mit 9 Blendenstufen und dem in Abbildung 27 ersichtlichen Signal-zu-Rausch Abstand. Der empfohlene native Exposure Index liegt bei einem EI von 800-1000, während sich der ISO-Wert nach dem Shutter-Modus richtet.

Imaging Specifications:

The VEO4K-PL employs a 4K 12-bit CMOS sensor with 6.75 micron pixels, and supports both global shutter and rolling shutter modes. Optical low pass filter (OLPF) is included. The ISO and dynamic range changes based on the shutter mode:

	Global Shutter	Rolling Shutter
Base ISO*	640 (Color)	320 (Color)
Recommended Exposure Index Range**	EI 800-1000	EI 800-1000
Dynamic Range	54.8 dB, 9-stops	71.6 dB, 12-stops

* ISO is measured according to ISO 12232:2006 method.

** Recommended Exposure Index (E.I.) range is specified. Set with On-camera controls or PCC software. Higher EI settings are possible with additional image processing.

Abbildung 27: Global Shutter und Rolling Shutter im Vergleich

⁹⁴ Vgl. (VEO4K-PL, 2022)

⁹⁵ (VEO4K-PL, 2022)

3.1.2 Belichtungszeit

Die Phantom VEO4K als Hochgeschwindigkeitskamera erfordert aufgrund der hohen Bildraten sehr kurze Belichtungszeiten. Während handelsübliche Kameras mit Belichtungszeiten im Millisekunden-Bereich arbeiten, liegen die Belichtungszeiten der verwendeten Kameras, abhängig von der Aufnahmegeschwindigkeit, im Mikrosekunden-Bereich. Demnach ist die Belichtungszeit für jedes Einzelbild sehr kurz, sodass mit zunehmender Bildzahl immer stärkere Lichtquellen benötigt werden.

Die zu filmenden Objekte werden meist für den Aufnahmezeitpunkt sehr stark ausgeleuchtet, um die entsprechende Helligkeitsdynamik zu erreichen. Durch die Trägheit des menschlichen Auges sind kurze Helligkeitsunterbrechungen einer Lichtquelle teilweise nicht wahrnehmbar. Kameras hingegen reagieren empfindlicher und können ein „unsichtbares“ Flimmern zum Problem werden lassen. Dementsprechend sind helle und flackerfreie Lichtquellen unumgänglich für ein optimales Ergebnis. Nicht selten führt das intensive Licht für Hochgeschwindigkeitskameras dazu, dass die zu filmenden Objekte aufgrund der hohen Wärmeentwicklung schmelzen oder in Brand geraten. Auch die Temperatur des Kameragehäuses und in erster Linie des Sensors müssen stets unter Beobachtung stehen, um Schäden zu vermeiden. Außerdem bedingen Temperaturschwankungen Bildänderungen durch unterschiedliches Rauschverhalten.

3.1.3 Speicherung, Trigger

Die Kamerasteuerung geschieht über die Phantom Camera Control Application (PCC). Da die Aufnahmen mit Hochgeschwindigkeitskameras wie der Phantom enorm große Datenmengen mit sich bringen, verfügen diese über einen Ringspeicher. Die Kamera befindet sich auf Knopfdruck im aufnahmebereiten Zustand. Über ein Trigger-Signal wird der Kamera mitgeteilt, dass der aufzunehmende Vorgang bald stattfinden wird oder bereits stattgefunden hat. Bevor der Trigger ausgelöst wurde, läuft der Ringspeicher fortlaufend durch und wird stets überschrieben, sobald ein Durchlauf vollendet wurde. Nach Betätigung des Trigger-Buttons wird der noch verbleibende Ringspeicher mit Inhalt gefüllt und nach Ablauf der Aufnahmevorgang beendet.

Die Phantom VEO4K-PL verfügt über eine 10 Gigabit Ethernet-Leitung, um eine schnelle Datenübertragung zu gewährleisten. Über diese Leitung ist es möglich 400-500 MB/s zu übertragen, was aufgrund der hohen Datenraten unumgänglich ist. Da ausgehend von der Sensorauflösung die maximale Datenrate der begrenzende Faktor ist, kann in geringeren Auflösungen mit proportional höheren Bildraten aufgezeichnet werden.

Beispielhaft wird die Datenrate für ein kurzes Video errechnet:

Dauer: 10 Sekunden

Auflösung: 4096x2304 Pixel

Bittiefe 10 Bit

Framerate: 938 FPS

$$\frac{(4096 * 2304 \text{ Pixel}) * 938 \text{ FPS} * 10 \text{ Bit} * 10 \text{ Sekunden}}{8 \text{ Bit}} = 111 \text{ GB}$$

Im Zuge der hohen Auflösung bietet es sich an, nur den relevanten Videoabschnitt zu exportieren, um Speicherplatz zu sparen und eine schnellere Datenübertragung zu gewährleisten. An Speicherformaten werden u.a. Cine-RAW, Cine Compressed, AVI, h.264 mp4 und Apple ProRes gelistet.⁹⁶

3.1.4 Cine-RAW

Eine RAW-Datei ist das digital umgewandelte Abbild eines Filmsensors zu einem bestimmten Zeitpunkt seiner Belichtung. Das unkomprimierte Videosignal enthält alle wichtigen Informationen wie Farb-, und Helligkeitswerte in Reinform und bietet somit verlustfreie Korrekturmöglichkeiten. Abgesehen von den physikalischen Grundbedingungen wie Blende, Brennweite, Lichtsituation und Verschlusszeit kann nachträglich auf alle Bildparameter Einfluss genommen werden.

Durch die bei der Aufnahme erfassten Bildinformationen, liefern RAW-Dateien mehr Bilddetails und zeichnen sich durch ihre große Farbtiefe aus.

⁹⁶ Vgl. (VEO4K-PL, 2022)

Die unaufbereiteten Daten des Bildsensors erfordern einen hohen Speicherbedarf. Außerdem funktioniert die Verarbeitung der Rohdaten anders als mit Standardformaten. Das Dreikanalbild wird nicht bereits in der Kamera in einen Arbeitsfarbraum konvertiert. Zur Betrachtung ist eine Interpolation der fehlenden Farbpixeln, auch Debayering genannt, nötig. Der Debayer codiert mit Hilfe von Metadaten den rohen Datenstrom des digitalen Filmsensors in ein abspielbares Videoformat um. Das Debayering und die Umrechnung der RAW-Daten kann mit Hilfe eines Interpolationsalgorithmus in einem externen Programm vorgenommen werden.⁹⁷

Der größte Vorteil des RAW-Formates ist, dass viele, lineare Luminanzwerte und mehr Lichtinformationen gespeichert werden. Daraus resultieren unscheinbare Übergänge vom dunkelsten zum hellsten Wert, wodurch Artefakte und Banding minimiert werden können. Weitere Informationen können in dem beigefügten Datenblatt der Phantom VEO4K-PL eingesehen werden.

3.2 ARRI Alexa Mini

Die Wahl der Masterkamera fiel auf die ARRI Alexa Mini. Die vom weltweit angesehenen Hersteller ARRI produzierte Kamera konnte sich erneut als Standard etablieren. Die ARRI Alexa Mini verfügt über einige Parameter, die die Phantom VEO4K-PL als Industriekamera nicht in dieser Perfektion der Alexa Mini aufweist. Während die Phantom den Schwerpunkt auf eine hohe Bildrate legt, ist die Framerate der ARRI Alexa Mini auf maximal 200 Bilder pro Sekunde begrenzt. Ihre Besonderheiten liegen unter anderem in der präzisen Darstellung von Farb-, und Hauttönen und deren hohe Dynamik. Aus diesen Gründen wird die ARRI Alexa Mini in Werbevideoproduktionen eingesetzt. In den nachfolgenden Abschnitten werden diese und weitere technischen Merkmale und Vorteile erörtert.

⁹⁷ Vgl. (Künne, 2007)

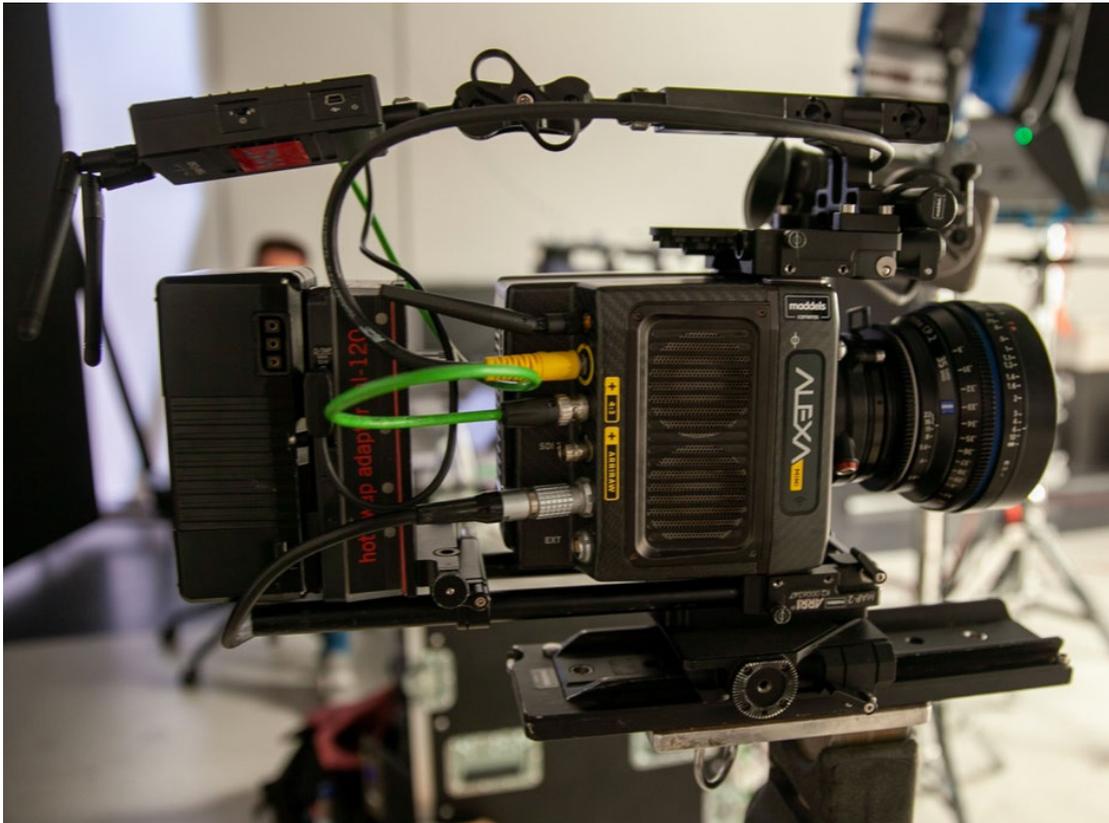


Abbildung 28: ARRI Alexa Mini

3.2.1 Sensor

Die ARRI Alexa Mini ist mit einem Alev III Sensor ausgestattet, der im Rolling Shutter-Modus betrieben wird. Hierbei handelt es sich um einen CMOS-Sensor mit Bayer-Muster-Farbfilerarray⁹⁸, der in seiner Größe und dem Verhalten an den Super 35 mm Filmsensor angelehnt ist. Der Sensor weist Abmessungen von 28.25 mm x 18.17 mm auf. Die auf dem Chip dotierten Pixel sind verhältnismäßig groß und können dadurch viel Licht einfangen. Hinter der komplexen Wissenschaft des Sensors sind die Verwendung großer Fotozellen und eine Dual Gain-Architektur seine beiden Hauptprinzipien. Von jedem Pixel führen zwei separate Auslesepfade mit unterschiedlicher Verstärkung in den A/D-Wandler der Kamera. Ein stark verstärktes und ein nur geringfügig verstärktes Signal werden zu einem einzigen 16-Bit-Bild mit hohem Dynamikumfang kombiniert.⁹⁹

⁹⁸ Vgl. (Bildverarbeitung, 2022)

⁹⁹ Vgl. (Alev Sensoren, 2022)

Diese Dual-Gain-Architektur in Kombination mit den großen Pixeln wirkt sich positiv auf die Leistung bei schlechten Lichtverhältnissen aus. Ebenfalls wird der Dynamikbereich und die Empfindlichkeit maximiert und das Rauschen minimiert. Der Kamerahersteller ARRI wirbt, ähnlich wie der Hersteller der Phantom, mit folgendem Satz:

„Die Super 35 mm Breite ermöglicht eine filmisch geringe Schärfentiefe“¹⁰⁰

Auch dieser Sensor erfüllt die Voraussetzungen, um einen Filmlook zu erzeugen. Wie aus den Berechnungen in Kapitel 5.1 entnommen werden kann, ähneln sich die Sensoren in Bezug auf die Abmessungen und das filmische Verhalten.

3.2.2 Dynamikbereich und Log C

Der Dynamikumfang der ARRI Alexa Mini wird mit 14 Blendenstufen angegeben. Dieser ist, laut ARRI, unabhängig von der eingestellten Sensorempfindlichkeit, sodass der hohe Dynamikbereich bei allen Empfindlichkeitsstufen beibehalten werden kann.¹⁰¹

Der Bereich der Empfindlichkeit reicht vom Belichtungsindex EI 160 bis EI 3200. Ab einem Exposure Index von 200 stellt der Sprung zur nächsten Belichtungsstufe eine Verdopplung der vorherigen dar. Abbildung 29 zeigt, dass die gleichmäßigste Verteilung dieser Blendenstufen bei einem Belichtungsindex von 800 erreicht ist. Daher wird diese Einstellung des nativen Exposure Index für den Vergleich der Modelle im Versuch verwendet.

¹⁰⁰ (Alev Sensoren, 2022)

¹⁰¹ Vgl. (Bildverarbeitung, 2022)

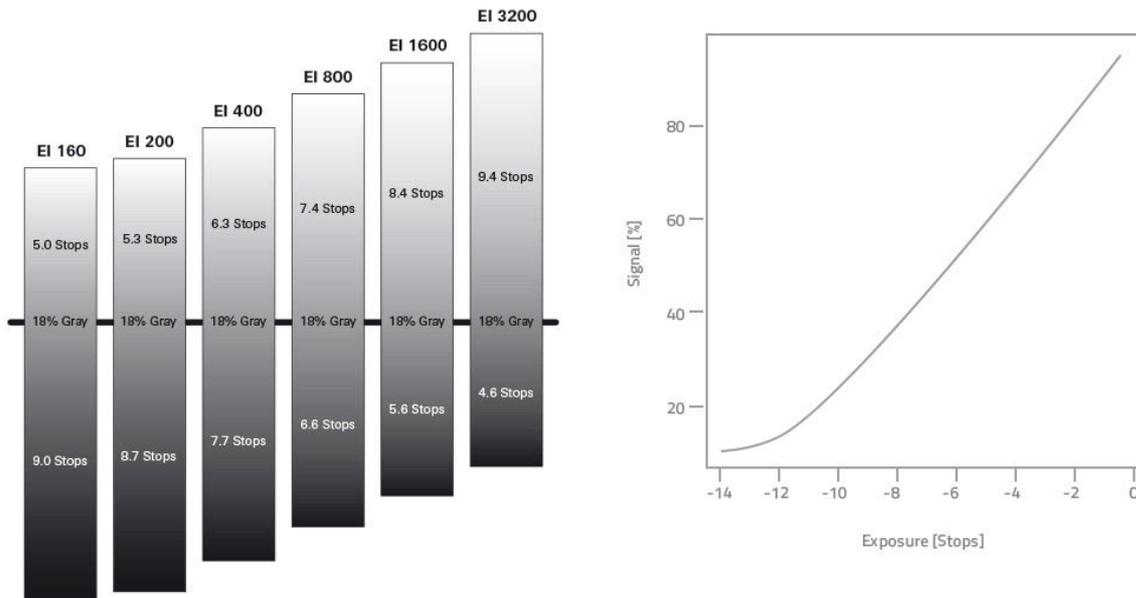


Abbildung 29: Dynamikumfang ARRI

Wie in der folgenden Abbildung 30 zu erkennen ist, hat ARRI Log C mehrere Übertragungsfunktionen¹⁰², die abhängig von den verschiedenen Exposure Indizes unterschiedlich verlaufen:

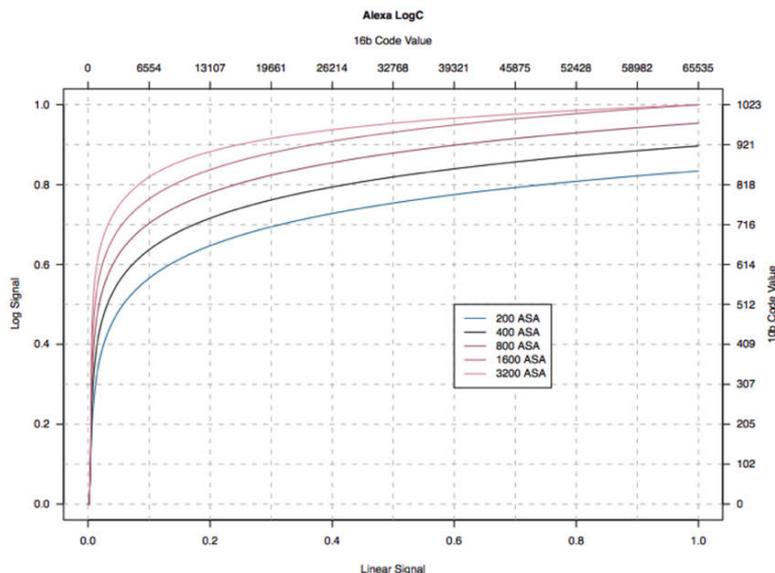


Abbildung 30: Log C-Übertragungsfunktionen für verschiedene Empfindlichkeitsstufen des Sensors

¹⁰² Vgl. (Alev Sensoren, 2022)

Jede Kurve bildet das Sensorsignal, das 18 % Grau entspricht, auf den Log C-Wert von 0,391 ab, welcher 400/1023 repräsentiert. Das 10-Bit Signal bietet einen Gesamtwertbereich von 0 bis 1023, die x-Achse repräsentiert das Sensorsignal. Durch die Beschränkung auf das 10-Bit Signal, muss sich das Ausgangssignal des Sensors mit den Gegebenheiten arrangieren.¹⁰³ An dieser Stelle lässt sich anschaulich darlegen, warum 8 Bit ab einer gewissen Sensordynamik zum Problem wird. Bei einem Sensor mit 14 Blenden Dynamik können je Stufe (256/14) lediglich 18 Helligkeitsunterschiede gespeichert werden. Dies ist knapp an der Grenze zur sichtbaren Treppenbildung in weichen Helligkeitsverläufen. Bei 10 Bit resultiert bei gleichen Rahmenbedingungen mit etwa $73 \left(\frac{1024}{14}\right)$ Helligkeitsstufen eine viermal höhere Blendenstufen-Auflösung.

Der Maximalwert der Log C-Kurve variiert mit dem jeweiligen EI-Wert. Dies begründet ARRI durch die zusätzlichen, zur Aufnahme verfügbaren, Werte in den hellen Bildbereichen bei der Verringerung um eine Belichtungsstufe. ARRI schreibt:

„Since the LogC output represents scene exposure values, the maximum value needs to be higher.“¹⁰⁴

Wenn das Objektiv um eine Belichtungsstufe geschlossen und die EI-Einstellung von beispielsweise 800 auf 1600 erhöht wird, erfasst der Sensor eine Stufe mehr Highlight-Informationen. Da die Log C-Ausgabe Szenenbelichtungswerte darstellt, erhöht sich der Maximalwert. Wenn man die Belichtung verringert, beispielsweise um eine Stufe, erfasst der Sensor eine Stufe mehr Glanzlichtinformationen. Da Log C-Werte Szenenbelichtungswerte darstellen, muss der Maximalwert höher sein.

Die Kurven für die höheren Empfindlichkeitsstufen von EI 1600 und EI 3200 haben einen Roll-Off eingebaut und verlaufen somit flacher, um die maximalen Log C-Werte im verfügbaren Bereich von 10 Bit zu halten. Der Roll-Off bewirkt bei den Log C-Kurven ein „Super Knee“ und erweitert nochmals den Dynamikumfang.

Die Abflachung am unteren Ende tritt auf, weil der Sensor niedrige Lichtpegel nicht mit der gleichen Quantisierung wie höhere Pegel erkennen kann. Die Gesamtform der Kurve ähnelt den Belichtungskurven von Filmnegativen.

¹⁰³ Vgl. (Log C, 2022)

¹⁰⁴ (Brendel, 2017)

3.2.3 Farben

ARRI-Kameras zeichnen Bilder mit dem großen Log C-Farbraum auf, wodurch alle vom Sensor erfassten Farbinformationen transportiert und der hohe Dynamikbereich erhalten bleiben kann. Der ALEV-Sensor überzeugt außerdem durch seine hervorragende Farabtrennung und die Fähigkeit, gemischte Farbtemperaturquellen aufzulösen. Die Farbwiedergabe und die Hauttondarstellung fallen sehr natürlich und optisch ansprechend aus.¹⁰⁵ Bei Korrekturwünschen in der Farbgebung besteht die Möglichkeit, kameraintern 3D-LUTs in die Kamera einzubinden. ARRI bietet außerdem in der ARRI Look Library ein Repertoire von 87 vordefinierten kreativen Farbkorrekturen in jeweils drei Intensitäten an.¹⁰⁶

Durch diese Optimierung des Farbmanagements am Set, kann Zeit und Geld in der Postproduktion gespart werden. Für den weiteren Verlauf sind die Anpassungsmöglichkeiten in der ARRI Alexa Mini jedoch nicht interessant, da sie als Masterkamera fungiert.

¹⁰⁵ Vgl. (Alev Sensoren, 2022)

¹⁰⁶ Vgl. (Log C, 2022)

4 Problem: Kamera Matching und Lösungsansatz

Jeder Kamerahersteller hat seine eigene Vorstellung davon, wie die aufgenommenen Farben des Sensors repräsentiert werden sollen. Auch wenn dies teilweise ästhetische Gründe hat, kann es für den Betrachtenden oder im Color Grading zum Problem werden. Farbliche Differenzen unterschiedlicher Kameras fallen vorrangig auf, wenn diese den gleichen Inhalt präsentieren. Die Verwendung mehrerer Kameras fordert folglich die Anpassung der Looks aneinander, um ein stimmiges Gesamtergebnis zu erzielen.

In der Praxis wird für die Adaption viel Zeit benötigt und der Faktor Zeit ist, insbesondere am Set, ein kostspieliger Aspekt. Aus diesem Grund ist es unabdingbar, sich bereits im Vorfeld Gedanken über die Anpassung zu machen, um den Vorgang effizient und zur Zufriedenheit der Kunden zu gestalten. Die hauseigene Kamera bei Aufträgen mit geringem Budget zu nutzen und den Look einer anderen Kamera zu implementieren, ist sehr attraktiv für das Unternehmen. Demzufolge wird die ARRI Alexa Mini als Master fungieren und die Phantom VEO4K-PL soll an diese angepasst werden. Die unterschiedlichen technischen Limits der Kameras sorgen jedoch für Probleme. Während die Phantom VEO4K-PL ab einem gewissen Grad anfängt, zu „clippen“ und keine Helligkeitsinformationen mehr darstellen kann, bringt die ARRI Alexa Mini mit 14 Blendenstufen einen enorm hohen Dynamikumfang mit. Clippt das Weiß, welches sich additiv aus RGB zusammensetzt, clippen einzelne Farbkanäle bereits vor dieser Grenze. Aufgrund dessen ist der Look der ARRI Alexa Mini nicht bedingungslos auf jede andere Kamera anwendbar. Die Dynamikeigenschaften der Masterkamera können nicht imitiert werden, da dies den Dynamikumfang der Hochgeschwindigkeitskamera verfälschen und zu einem farblich ungleichmäßigen Ausbrennen führen würde.

Im Folgenden wird versucht, den Look bestmöglich anzugleichen, ohne dabei technische Rahmenbedingungen außer Acht zu lassen. Für die Umsetzung des Versuches wird ein Test-Set hergerichtet, das vorrangig eine gut ausgeleuchtete Farbtafel enthält und darüber hinaus mit einigen Requisiten ausgestattet ist. Im Zuge des Versuches werden mit der ARRI Alexa Mini Referenzen aufgenommen. Für den Test werden hauseigene Scheinwerfer der Firma verwendet, die im folgenden Kapitel aufgeführt werden.

Der Lösungsansatz für die Farbanpassung beinhaltet, nach dem Helligkeits- und Weißabgleich, eine Veränderung der Farbmatrix in der Phantom. Es handelt sich um eine 3 x 3 RGB Farbmatrix, in der sechs von neun Felder über die PCC veränderbar sind (siehe Kapitel 5.4.3 Farbmatrix). Die Matrix greift bereits in der Kamera, wodurch sie im Gegensatz zu einer LUT direkt eingebettet ist. Der Farbanpassungsvorgang schafft eine Grundlage für die Bearbeitung des aufgenommenen Bildes in der Postproduktion, wodurch der Aufwand reduziert werden kann.

5 Versuch

Im Folgenden wird der Versuchsaufbau, die verwendeten Mittel und die Durchführung des Versuches zur Angleichung der Phantom an die ARRI beschrieben. Anschließend folgt die Darstellung der Messwerte und die Sicherung der Ergebnisse.

5.1 Vorbereitungen

Im Vorfeld war es nötig, sich mit den technischen Daten der zwei Kameras vertraut zu machen. Nur durch die Berücksichtigung der physikalischen Grenzen können optimale Vergleichsmöglichkeiten geschaffen werden. Da die Kameras über unterschiedliche Sensoren verfügen, wird zunächst der Crop-Faktor berechnet, um den gleichen Bildausschnitt darstellen zu können.

Die Abmessungen des Sensors der Phantom VEO4K-PL betragen 27,6 mm in der Breite und 15,5 mm in der Höhe.¹⁰⁷ Zur Errechnung der Sensordiagonale der Phantom wird der Satz des Pythagoras angewendet. Dementsprechend ergibt sich die Sensordiagonale D_P aus der Wurzel der Summe der quadrierten Sensorbreite und -höhe.

$$D_P = \sqrt{(27,6 \text{ mm})^2 + (15,5 \text{ mm})^2}$$

$$D_P = 31,65 \text{ mm}$$

Der Alev Sensor, welcher in der ARRI Alexa Mini verbaut ist, weist nach gleicher Rechnung folgende Diagonale auf:

$$D_A = \sqrt{(28,25 \text{ mm})^2 + (18,17 \text{ mm})^2}$$

$$D_A = 33,59 \text{ mm}$$

Daraus resultiert der Crop-Faktor:

$$\text{Crop-Faktor} = \frac{D_A}{D_P} = \frac{33,59 \text{ mm}}{31,65 \text{ mm}} = 1,06$$

¹⁰⁷ (VEO4K-PL, 2022)

Aus der Berechnung des Crop-Faktors lässt sich schließen, dass bei der Verwendung eines 35 mm-Objektives für die ARRI Alexa Mini eine Brennweite von 33 mm für die Phantom notwendig ist, um den gleichen Bildausschnitt darzustellen. Da der Sensor der Phantom kleiner ist, wird der Bildausschnitt durch den Crop-Faktor vergrößert. Demzufolge wäre ein weitwinkligeres Objektiv angebracht. Da diese Abweichung nur einen marginalen Einfluss auf den Bildausschnitt hat, und die äußeren Bildränder keine wichtigen Informationen für den Versuch liefern, wird die gleiche Kameraposition für beide Kameras gewählt.

5.2 Verwendete Materialien und Aufbau

5.2.1 Farbtafel

Grundsätzlich ist die Verwendung einer Grautafel unumgänglich, um die Farben zweier Kameras aneinander anzupassen. Im Folgenden wird der „ColorChecker Video“ der Marke „xrite“ mit 32 Farbwerten verwendet. Bei dem Gebrauch einer Farbtafel ist zu berücksichtigen, dass schon minimal-divergente Winkel zu unterschiedlichen Einfallswinkel- und Abstrahlwinkeln des Lichtes führen. Aus diesem Grund sollte diese fest im Set positioniert werden. Außerdem müssen Reflektionen im Schwarz vermieden werden, um die Messwerte nicht zu verfälschen. Eine digitale Referenz (siehe Abbildung 31) der vorliegenden Farbtafel wurde in das Bearbeitungsprogramm DaVinci Resolve eingeladen.



Abbildung 31: Digitale Referenz der Farbtafel

5.2.2 Requisiten

Im Zuge des Versuches wurde ein Testset mit einigen Accessoires errichtet (siehe Abbildung 32). Da im späteren Verlauf Referenzen mit Hauttönen geschossen werden sollen, wird dies im „Framing“ berücksichtigt und der Raum wird nicht vollständig ausgenutzt. Neben der Farbtafel werden verschiedene, bunte Materialien im Set positioniert. Unter anderem befinden sich dort mehrere Vasen, Girlanden, Gießkannen, Stoffe und Pflanzen. In erster Linie sollen die Primärfarben abgedeckt werden, da diese bei der Betrachtung des Testbildes eine wichtige Rolle spielen. Im Anschluss wird ein Stativ in Hüfthöhe aufgebaut und vor dem eingeleuchteten Set platziert.



Abbildung 32: Testset

5.2.3 Scheinwerfer

Um das Verhalten der Farben mit unterschiedlichen Lichtquellen zu betrachten, wird die Farbtafel mit beiden Kameras unter vier unterschiedlichen Lichtsituationen aufgenommen. Dabei werden Farbtemperaturen im Bereich von sowohl Tageslichtweiß als auch von Kunstlichtweiß für die Messungen abgedeckt. Abbildung 33 zeigt drei verschiedene Leuchten, die links vor dem Testset positioniert werden.

Von den verwendeten Scheinwerfern werden mindestens zwei der gleichen Bauweise links und rechts des Sets platziert, um eine gleichmäßige, flächige Ausleuchtung der Farbtafel zu gewährleisten. Hinzu kommt beidseitig ein WD-Rahmen (White Diffusion), der horizontal vor allen Scheinwerfern steht und gerichtete Lichtquellen weicher auf das Testset strahlen lässt. Alle Scheinwerfer werden unter Vollast betrieben, um eine sich ändernde Farbtemperatur zu vermeiden.



Abbildung 33: Die drei verwendeten Scheinwerfer im Testset

5.2.3.1 ARRI Skypanel

Für den Aufbau werden ein großes ARRI Skypanel S360 als „Toplight“¹⁰⁸ und zwei ARRI Skypanel S60 jeweils rechts und links positioniert. Diese Scheinwerfer bieten gegenüber konventionellen Halogen-Stufenlinsen den Vorteil, dass die Farbtemperatur eingestellt werden kann. Außerdem bleibt die Farbtemperatur bestehen, wenn die Lampe gedimmt wird, sodass es nicht zu Änderungen auf der Farbtafel kommt. Getestet wird mit zwei eingestellten Farbtemperaturen von 3200 K (Kunstlicht) und 5600 K (Tageslicht).

¹⁰⁸ Eine von oben strahlende Lichtquelle

5.2.3.2 ARRI - HMI M18

Des Weiteren werden zwei HMI Scheinwerfer¹⁰⁹, ebenfalls vom Hersteller ARRI, verwendet. Es handelt sich um den in Abbildung 34 dargestellten M18 1.8 kW Scheinwerfer, eine Halogenmetaldampflampe aus der Gruppe der Hochdruck-Gasentladungslampen. Ein Vorschaltgerät ist für diesen Scheinwerfertypen immer erforderlich. Nach einer Messung mit dem „Oppe Light Master“, konnte eine Farbtemperatur von etwa 6000 K ermittelt werden. Wie sich aufgrund der Farbtemperatur vermuten lässt, erstrahlt das Testset im Betrieb dieser Lichtquelle in einem Tageslichtweiß (siehe Abbildung 35).



Abbildung 34: Links: ARRI M18 mit Vorschalter, Rechts: ARRI M18 in Betrieb

5.2.3.3 Pollux 5 kW

Die vierte Lichtstimmung erzeugen zwei 5 kW Kunstlichtlampen vom Hersteller Pollux. In diesem Scheinwerfer ist eine fresnel'sche Stufenlinse verbaut. Unter Vollast erreicht dieser Scheinwerfer eine Farbtemperatur von 3200 K, wodurch eine warmweiße Lichtstimmung erzeugt wird (siehe Abbildung 36). Beim Pollux-Scheinwerfer ist der lange Einschaltvorgang zu beachten, denn erst 10-15 Minuten nach der Zündung kann die volle Leistung erreicht und die Messung gestartet werden.

¹⁰⁹ Datenblatt siehe Anhang



Abbildung 35: Beleuchtetes Testset mit zwei ARRI M18



Abbildung 36: Beleuchtetes Testset mit zwei Pollux 5 kW Scheinwerfern

5.2.4 Objektive

Um Objektivfehler und bauteilbedingte Abweichungen auszuschließen, werden zwei Festbrennweiten der gleichen Reihe verwendet. Da die Phantom VEO4K-PL und auch die ARRI Alexa Mini über eine PL-Fassung verfügen, ist kein zusätzlicher Adapter nötig. Im Grunde wäre ein einziges Objektiv ausreichend, da die Kameras zu keinem Zeitpunkt parallel betrieben werden sollten. Interessehalber werden die Messwerte jedoch mit einem 35 mm und einem 50 mm Objektiv dokumentiert.

Es handelt sich hierbei um die zwei folgenden Zeiss-Objektive der „Compact Prime CP.2 Super Speed“-Reihe:

- 35 mm Zeiss CP.2 Super Speed T1.5
- 50 mm Zeiss CP.2 Super Speed T2.1

Die Optiken finden sich aufgrund der qualitativen Stärken häufig am Drehort wieder und bieten dementsprechend eine nachhaltig sinnvolle Grundlage für den Versuch. Der Hersteller Zeiss betont die vielschichtigen Einsatzmöglichkeiten dieser Objektive:

„Egal ob Werbeproduktionen mit hohen Erwartungen an einzigartige Farbwiedergabe und hohem Kontrast oder intensiv, dramatische Szenen mit wenig Licht, ZEISS Compact Prime Super Speed Objektive bieten Ihnen immer die Leistung, welche Sie für das beste Ergebnis benötigen.“¹¹⁰



Abbildung 37: 35 mm Zeiss CP.2 Super Speed

¹¹⁰ (ZEISS Kinematographie, 2022)

Die Kombination aus Kamera und Objektiv hat einen großen Einfluss auf die Messergebnisse. Folglich gestaltet sich der Versuch nur für die verwendeten Objektive gleich. Ein Objektivglas eines anderen Herstellers würde die Spektralanteile unterschiedlich stark brechen. Die Verwendung desselben Objektivs führt zu den am besten vergleichbaren Resultaten. In der gleichen Objektivreihe werden Änderungen nur marginal ins Gewicht fallen¹¹¹, während ein Objektivwechsel innerhalb eines Produzenten größere Abweichungen mit sich bringt. Die Verwendung zweier Objektive unterschiedlicher Hersteller würde zu erheblichen Differenzen führen, die die Ergebnisse des Versuches verfälschen.

5.2.5 Technische Vorbereitungen:

Um im Verlauf des praktischen Vergleiches erste Eindrücke für die visuellen Differenzen der beiden Kameras zu bekommen, werden die Kamerasignale einem Bildmischer zugeführt. Für die Übertragung der Kamerasignale wird SDI¹¹² verwendet. Das Ausgangssignal der ARRI Alexa Mini wird, wie die grüne Verbindung in Abbildung 38 verdeutlicht, in einen Input der Kreuzschiene gesteckt. Dadurch kann das Kamerasignal in der Software vMix und dem Programm DaVinci Resolve betrachtet werden.

Das Kamerabild der Phantom VEO4K-PL wird zunächst zu der Station (rot) geführt, um in der Phantom Camera Control Application Änderungen vorzunehmen. Von dort wird das Signal abgegriffen und in einen weiteren Eingang der Kreuzschiene gesteckt. Für akkurate Betrachtungen wird mit dem Wipe-Effekt ein Mischbild erzeugt, sodass die Graustufen oder die Farbfelder unmittelbar miteinander verglichen werden können. Die zur Betrachtung der Kamerabilder verwendeten Monitore werden auf einen Gammawert von 2.4 kalibriert. Als Weißpunkt wird „Daylight 65“ mit einer Farbtemperatur von 6504 K festgelegt. Abgesehen von dem ARRI Skypanel 360 wird der vollständige Versuchsaufbau in der kommenden Abbildung demonstriert:

¹¹¹ Siehe Messwerte im Anhang

¹¹² Serial Digital Interface

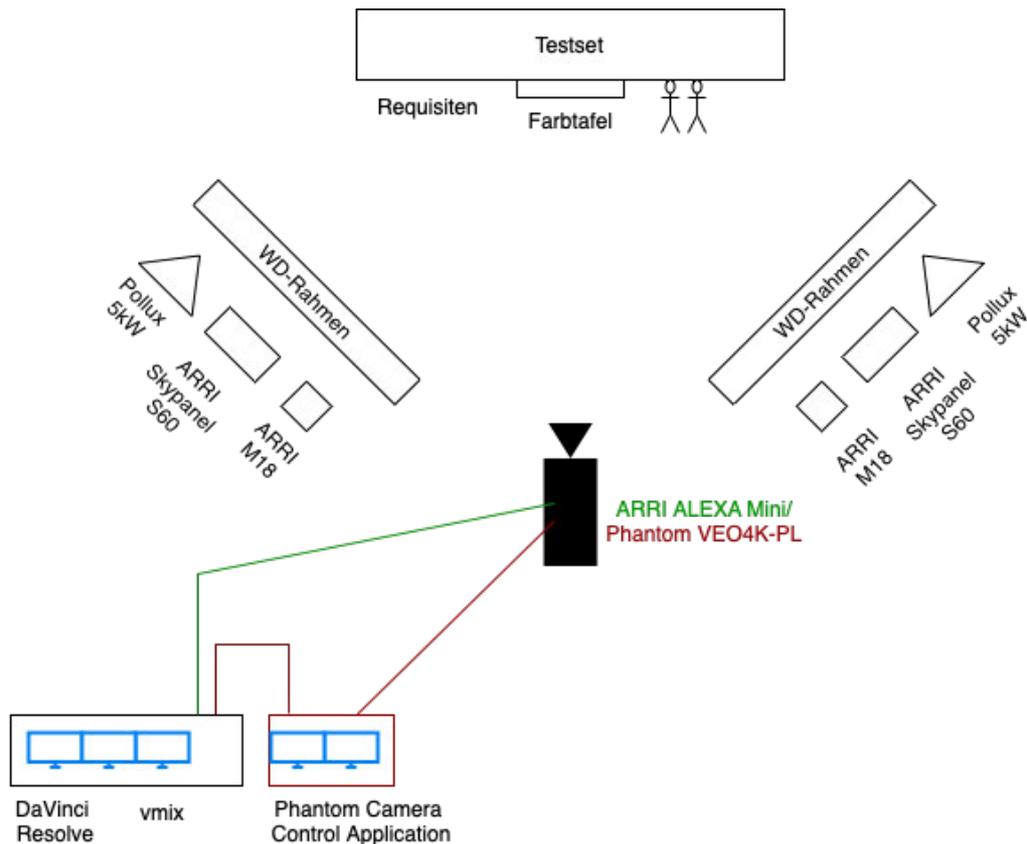


Abbildung 38: Vollständiger Versuchsaufbau

5.2.6 Menü-Einstellungen der ARRI Alexa Mini

Die Einstellungen in der Kamera sollten mit Bedacht gewählt werden, da sie erheblichen Einfluss auf das Ergebnis haben. Zuerst werden die Einstellungen in der ARRI Alexa Mini vorgenommen, da die Referenzen chronologisch vorrangig erfasst werden müssen. Die Einstellungen werden in Anlehnung an einen gängigen Dreh gewählt. Es wurde sich für 25 FPS mit progressiver Abtastung in High Definition¹¹³ entschieden. Für die Empfindlichkeit der ARRI Alexa Mini wurde der native ISO-Wert, welcher bei 800 liegt, verwendet.

Außerdem fiel die Wahl auf den großen Farbraum ARRI Log C, um Möglichkeiten bei der Bearbeitung im Grading offenzulassen. Eine Aufnahme in Rec.709 würde dafür sorgen, dass Originalfarbwerte verloren gehen. Die Transformation in den Farbraum zur Endausgabe sollte nach Möglichkeit am Ende der Workflows geschehen. ARRI stellt eine beliebte LUT „ARRI Log C to Rec.709“ für die Farbbearbeitung zur Verfügung. Des Weiteren besteht die Möglichkeit selbstständig generierte LUTs in die Kamera einzubetten.

¹¹³ 1920 x 1080 Pixel

Die Farbtemperatur variierte je nach Lichtumgebung von 3000 K bis 6500 K. 3200 K entspricht in etwa der Farbtemperatur, die der Pollux 5 kW Scheinwerfer unter Vollast erreicht.



Abbildung 39: Simulierte Kameraeinstellungen in der Alexa Mini

5.3 Durchführung

5.3.1 Referenzen ARRI

Vor Versuchsbeginn wird pro Lichtsituation ein Weißabgleich in der Kamera vorgenommen, um gleiche, neutrale Bedingungen zu schaffen. Im Folgenden wird der Weißabgleich exemplarisch für die Lichtsituation der zwei ARRI M18 Halogenmetall dampflampen erläutert. Für die Realisierung des Weißabgleiches ist eine bildfüllende Abbildung des ColorCheckers nötig. Da die ARRI HMI M18 Scheinwerfer eine Farbtemperatur von etwa 6000 K aufweisen, wurde diese in der ARRI Alexa Mini verwendet. Anschließend werden die RGB Kanäle auf dieselben Videopegel eingestellt. Für diesen Vorgang wurde das Kamerabild der ARRI Alexa Mini mit „Resolve Live“ in die Software implementiert und mit dem digitalen Referenzbild (Abbildung 31) des ColorCheckers in der Waveform (Abbildung 40) betrachtet. Da die Korrektheit der Videopegel in den mittleren Grautönen besonders wichtig ist, dienen zwei Hilfslinien dazu, die Alexa Mini und die Phantom VEO4K-PL auf den gleichen Videopegel zu bringen, den die Referenz der Farbtabelle aufweist.

Das Live-Tool in Resolve ermöglichte das direkte Feedback in der RGB-Waveform bei manuellen Veränderungen der Blende oder des Kelvin-Wertes in der Kamera.

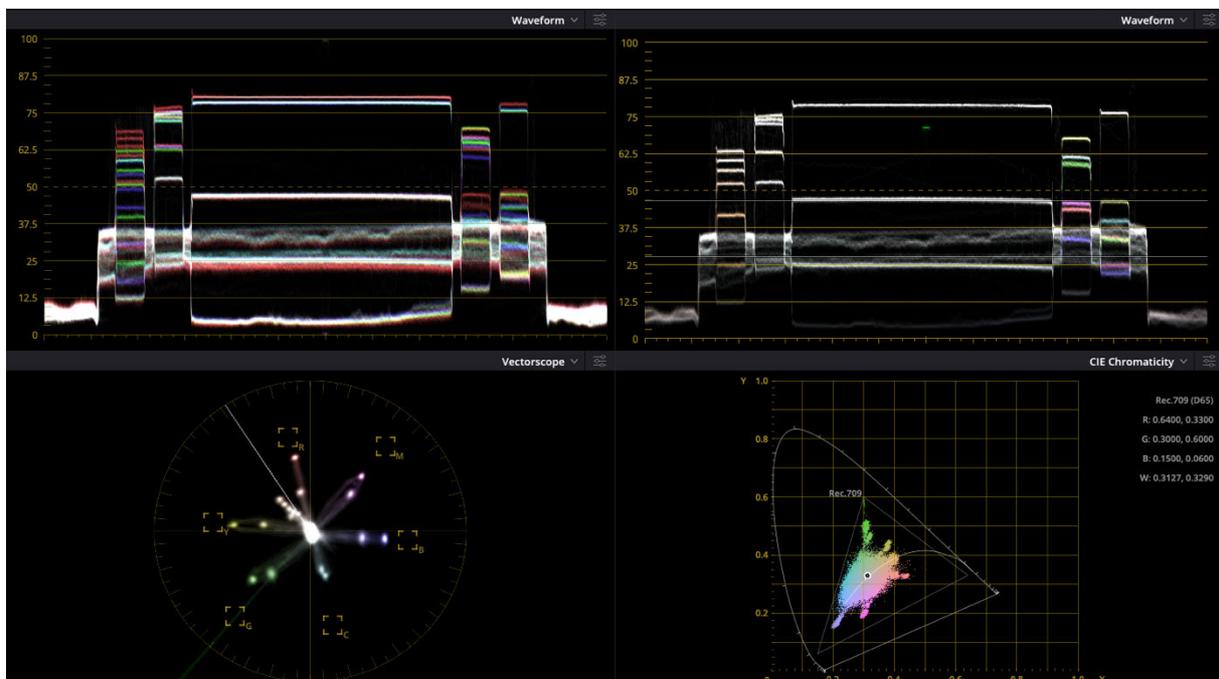


Abbildung 40: Weißabgleich der Alexa Mini mit M18

Nachdem die Blendeneinstellungen richtungsweisend vorgenommen wurden, wurde der Kelvinwert justiert. Kleinschrittige Veränderungen der Farbtemperatur in der Kamera und die parallele Betrachtung der Waveform führten zu einem passenden Weißabgleich. Der Grün-Magenta-Kanal ließ sich durch den „Tint“ beeinflussen. Das Verschieben des Tint-Wertes in den negativen Bereich lässt den grünen Kanal dominieren und reduziert den Magenta-Kanal. Tint-Werte auf der positiven Skala bewirken das Gegenteil, wodurch die Farben Richtung Magenta verschoben werden. Nach der Vollendung des jeweiligen Weißabgleiches für die vorliegende Lichtstimmung wurden kurze Referenzvideos aufgenommen. Außerdem wurden mit Hilfe einer Pipette¹¹⁴ in DaVinci Resolve die RGB-Werte verschiedener Farben abgelesen und dokumentiert. Dabei wurden die gesättigten und ungesättigten Primär- und Sekundärfarben des ColorCheckers, sowie einige Hauttöne auf der Farbtafel, in die Messwertebetrachtung mit aufgenommen (RGB-Werte befinden sich im Anhang).

5.3.2 Angleichungsvorgang Versuch 1

Nachdem die vier Referenzvideos aufgenommen und die jeweiligen RGB-Werte der ausgewählten Farben dokumentiert wurden, wurde die ARRI Alexa Mini durch die Phantom VEO4K-PL ersetzt. Dabei wurde die gleiche Kameraposition gewählt und das identische Zeiss-Objektiv verwendet. Für die Entfernung zum Set war maßgeblich entscheidend, dass dieses in einer Totalen erfasst wird und in beiden Kameras ein ähnlicher Bildausschnitt erreicht wird.

Über die Programme vMix und DaVinci Resolve Live konnte das Livebild der Phantom mit den zuvor hinzugefügten Aufnahmen der ARRI unmittelbar verglichen werden. Zunächst wurde für die erste Lichtsituation ebenfalls ein Weißabgleich durchgeführt, um neutrale Ausgangsbedingungen für den Versuch herzustellen. Auch in dieser Kamera konnte der Weißabgleich über die Farbtemperatur und den Tint-Wert eingestellt werden. Zwei Hilfslinien in der Waveform dienten der Orientierung der Pegel.

¹¹⁴ Unter der Pipette versteht man in DaVinci ein Tool, das die RGB-Werte eines beliebigen Pixels anzeigt

Nach abgeschlossener Einstellung des Weißabgleiches wurde ein Video ohne Farbanpassungen in der Kamera bei einem ISO von 800 aufgenommen. Hierzu platzierten sich zwei Personen am Rand des Testsets, um reale Hauttöne abzubilden. In DaVinci Resolve konnten die Aufnahmen unter „Lichtstimmung eins“ (HMI M18) der ARRI und das Livebild der Phantom im Splitscreen verglichen werden. Das Ablesen der RGB-Farbwerte einiger im Vorfeld ausgewählten Farben der Farbtafel lieferte auch für die Phantom erste numerische Werte. Durch die vorausberechneten Tabellen in Excel konnten erste Farbdifferenzen abgelesen und eine Tendenz der Verschiebung ermittelt werden. Delta R, Delta G und Delta B wiesen die absolute Differenz auf und die Summe des Kanals zeigte, welcher Wert besonders starke Abweichungen mit sich brachte. Die Farbdifferenzen stellten eine richtungsweisende Grundlage für die Anpassung der Farbmatrix dar.

5.3.3 Farbmatrix

Im Mischbetrieb zweier Kameras ist eine farbliche Anpassung an die Masterkamera im Vorfeld nötig. Oft dient dazu eine in einer Software generierte LUT, die in die Kamera eingeladen wird. Die Phantom VEO4K-PL verfügt über eine 3x3 RGB-Farbmatrix, die sich über die PCC manuell ändern lässt. Die Matrix entscheidet über die Darstellung der Primärfarben, ohne dabei die Eigenschaften des RAW-Materials einzuschränken.

In den Voreinstellungen nimmt die Matrix die Form einer Einheitsmatrix an, deren Elemente auf der Hauptdiagonale einen Wert von Eins besitzen und ansonsten Null sind (siehe Tabelle 2).

	R	G	B
R	1	0	0
G	0	1	0
B	0	0	1

Tabelle 2: unveränderte Farbmatrix

Horizontal sind die Ausgangswerte der jeweiligen Farben abzulesen. Die erste Zeile repräsentiert die Zusammensetzung des Rot-Wertes, die zweite die Mischung des Grüns und die dritte die Zusammensetzung von Blau. Um die Farbhelligkeiten mit der Farbmatrix nicht zu beeinflussen, müssen die Farbanteile jeder Zeile in Summe Eins ergeben. Aus diesem Grund sind nur sechs der neun Felder variabel einstellbar und „Rot in Rot“, „Grün in Grün“ und „Blau in Blau“ ändern sich in Abhängigkeit der zwei anderen Werte.

Experimentell wurden die Primärfarben im Programm Lattice über eine LUT entsättigt. Eine Zunahme der, im Vektorskop gegenüberliegenden, Komplementärfarben bedingt eine Entsättigung. So lässt sich beispielweise Rot durch Cyan (also Blau und Grün) entsättigen. Eine Veränderung der Primärfarben wird sich ebenfalls auf die von ihnen abhängigen Sekundärfarben auswirken. Solange die Einträge auf der Hauptdiagonale um den entsprechenden Wert verringert werden, bleiben der Schwarzpunkt (schwarzer Pfeil in Abbildung 41) und die maximale Helligkeit (gelber Pfeil) unverändert bestehen.

	R	G	B
R	0.8	0.1	0.1
G	0.1	0.8	0.1
B	0.1	0.1	0.8

Tabelle 3: Entsättigte Farbmatrix

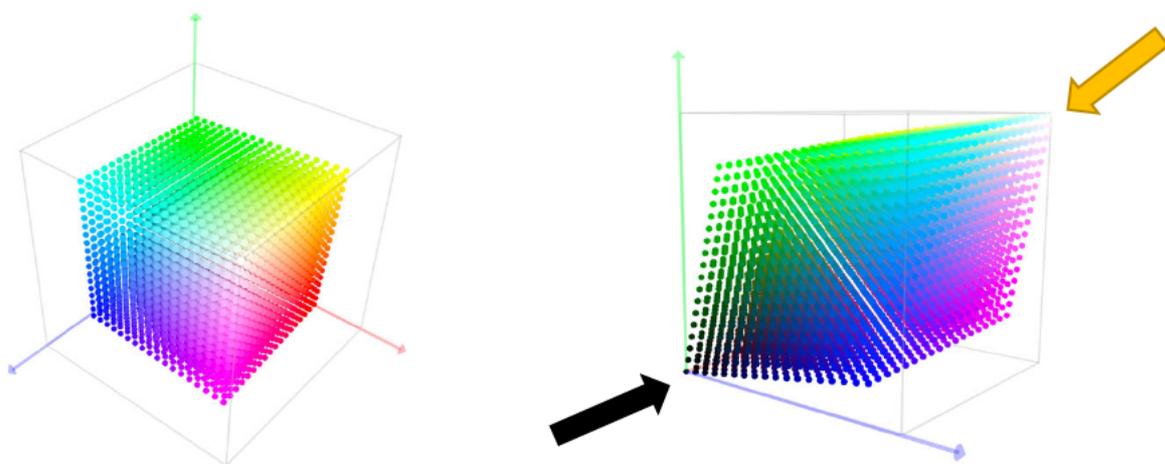


Abbildung 41: Entsättigter Würfel, auf den die Farbmatrix in Lattice angewendet wurde

5.3.4 Erste Anwendungen der Matrix

Durch die hilfreiche Option, das Live-Bild und die Referenz unmittelbar nebeneinander zu betrachten, fielen große Farbdifferenzen bereits ohne Vektorskop und Waveform-Monitor auf. Da die Primärfarben die Sekundärfarben bedingen, wurde in erster Linie das Augenmerk auf die RGB-Werte im Vektorskop gerichtet. Zusätzlich wurde die RGB-Zusammensetzung der Primärfarben in DaVinci Resolve mit der Pipette betrachtet und mit den dokumentierten Farbwerten der ARRI Alexa Mini verglichen.

Sobald eine sichtbare Verbesserung durch das Eingeben der Zahlenwerte in der Matrix stattgefunden hatte, wurden die RGB-Werte erneut für Grauwerte, gesättigte und ungesättigte Farben notiert. Diese wurden in ein Excel-Dokument eingebunden, das durch die vorausgerechneten Werte unmittelbar einen Abweichung pro Farbkanal ausgab.

Das Berechnen der Summe der Differenzen erwies sich ebenso als hilfreich, um zu erkennen, welche Farbe besonders große Abweichungen verursachte. Dieser Vorgang wurde mehrfach wiederholt und verbesserte die Matrix stetig.

	R	G	B
R	0.81	0.22	-0.03
G	-0.09	1.34	-0.25
B	0.04	0.04	0.92

Tabelle 4: Matrix „M1“

	R	G	B
R	0.9	0.2	-0.1
G	-0.09	1.54	-0.45
B	0.05	0.04	0.91

Tabelle 5: Matrix „M2“

	R	G	B
R	1.0	0.1	-0.1
G	-0.09	1.54	-0.45
B	-0.05	0.08	0.97

Tabelle 6: Matrix „M3“

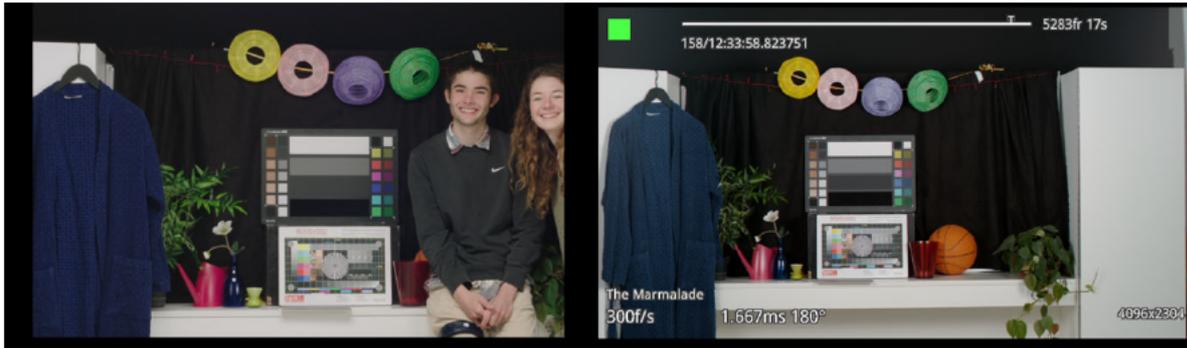


Abbildung 42: Links: Referenz ARRI, Rechts: Phantom ohne Farbmatrix

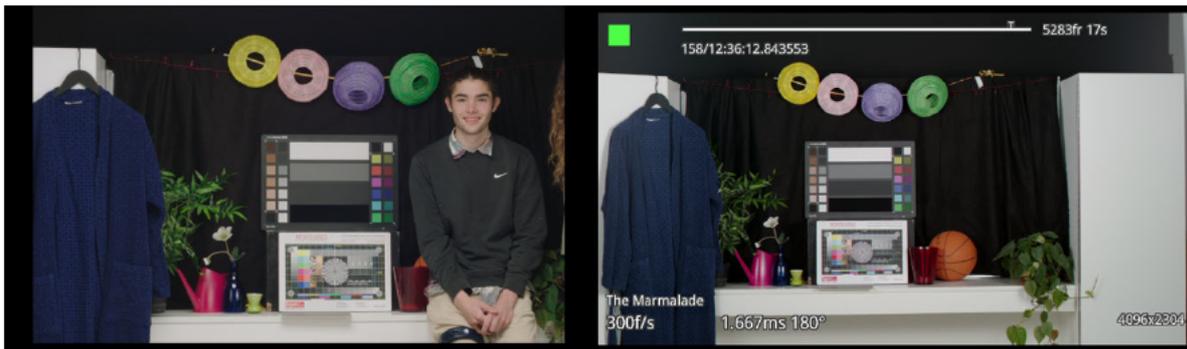


Abbildung 43: Links: Referenz ARRI, Rechts: Phantom mit Farbmatrix M1

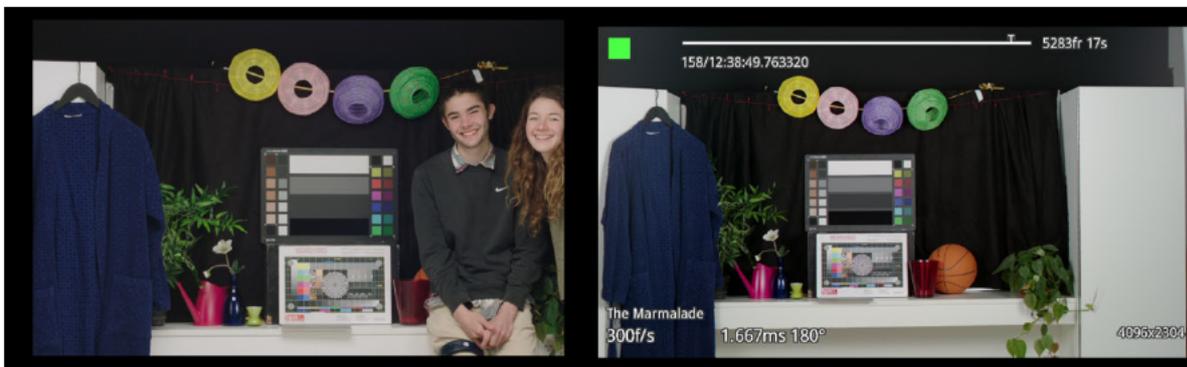


Abbildung 44: Links: Referenz ARRI, Rechts: Phantom mit Farbmatrix M2

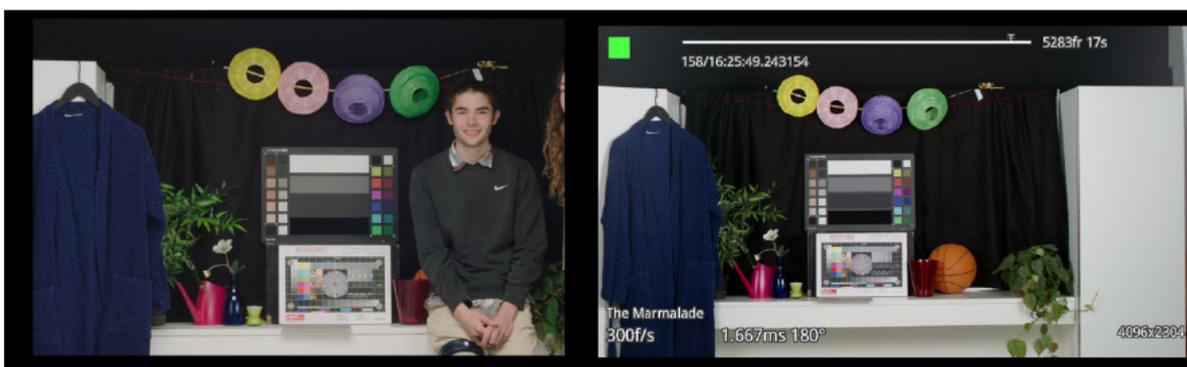


Abbildung 45: Links: Referenz ARRI, Rechts: Phantom mit Farbmatrix M3

5.3.5 Resümee

Ab einem gewissen Punkt erwies sich dieses Verfahren nicht mehr als zielführend, da die Verbesserung eines Farbkanals eine Verschlechterung der anderen Primärfarben bewirkte. Aus den RGB-Wertepaaren wurde mit Hilfe eines Online-Delta-E-Rechners¹¹⁵ der optische Farbabstand berechnet. Der Vorgang beinhaltete das Ablesen der RGB-Werte aus DaVinci Resolve, die Eintragung in Excel und die Eintragung in den Rechner. Schon das Ablesen der Zahlenwerte unmittelbar benachbarter Pixel einer Farbe, brachte große Schwankungen mit sich. Diese Messungenauigkeiten in DaVinci Resolve sind dem Rauschen des Sensors geschuldet. Bei einer videobasierten Messung ist es unmöglich eine homogene Fläche abzubilden. Da alle Sensoren Rauschen erzeugen, rauscht jeder Sensel unterschiedlich stark. Um dies zu vermeiden, müsste eine Mittelwertmessung veranlasst werden, was den Rahmen dieser Arbeit überschreitet. Eine visuelle Begutachtung der Aufnahmen ließ Zweifel an der Aussagekraft der Delta-RGB-Werte über die wirklichen optischen Differenzen aufkommen. Da die Berechnung des Delta E-Wertes jedoch zu viel Zeit in Anspruch nimmt, war eine Optimierung des Verfahrens nötig. Außerdem muss die Grundlage des Versuches durch die richtige und frühzeitige Konzeption der Belichtungskurve in der PCC verbessert werden. Als positiver Effekt ergab sich, dass die Abweichungen innerhalb des 35 mm und des 50 mm Zeiss-Objektives so geringfügig waren, dass sie auf Messungenauigkeiten zurückzuführen sind. Durch diese Erkenntnis wurde für die folgenden Aufnahmen von beiden Kameras nur noch das 50 mm Objektiv verwendet.

5.4 Optimierter Workflow des Angleichungsvorgangs

Nach einem Expertengespräch mit Matthias Wilkens (Lehrbeauftragter Videotechnik HAW und Bildingenieur beim NDR) wurde ein optimierter Workflow entwickelt, der das Hauptaugenmerk auf das korrekte Einbeziehen der verschiedenen Dynamikbereiche legt. In diesem Zuge wurde zu Beginn der Weißpunkt in Bezug auf die Helligkeit angepasst, bevor eine Weißpunktanpassung im Sinne der Farbtemperatur (Weißabgleich) vorgenommen wurde. Im dritten Schritt wurden mit Hilfe der Farbmatrix die Farbhelligkeiten und Farbtöne angeglichen. Abschließend kam es zu einer Begutachtung der Natürlichkeit der Hauttöne und des Gesamteindrucks des Bildes.

¹¹⁵ (Delta-E Calculator, kein Datum)

5.4.1 Grautreppe

Der erste Schritt des Angleichens besteht in der Anpassung der Helligkeiten bzw. der verschiedenen Graustufen. Die Voraussetzung für richtige Farbhelligkeiten ist eine korrekte Grundhelligkeit. Die Parameter Helligkeit und Sättigung stehen in einem Abhängigkeitsverhältnis zueinander. Die maximale Sättigung erreichen die verschiedenen Farbtöne nur bei einem bestimmten, ungefähr mittleren Helligkeitswert. Hellere und dunklere Schattierungen eines Farbtones sind nur durch eine Entsättigung zu erreichen, wodurch das Repertoire an Sättigungswerten eingeschränkt wird.

Um den Videopegel der Phantom an den der Alexa Mini anzugleichen, wird das Referenzbild der Alexa Mini unter gleicher Beleuchtungssituation benötigt. Das vorliegende Referenzbild und das Live-Bild werden in vMix mittels eines virtuellen Inputs als zwei Layer übereinandergelegt. vMix bietet die Möglichkeit Bilder horizontal und vertikal zuzuschneiden, zu verschieben oder die Größe des Bildausschnittes zu ändern.

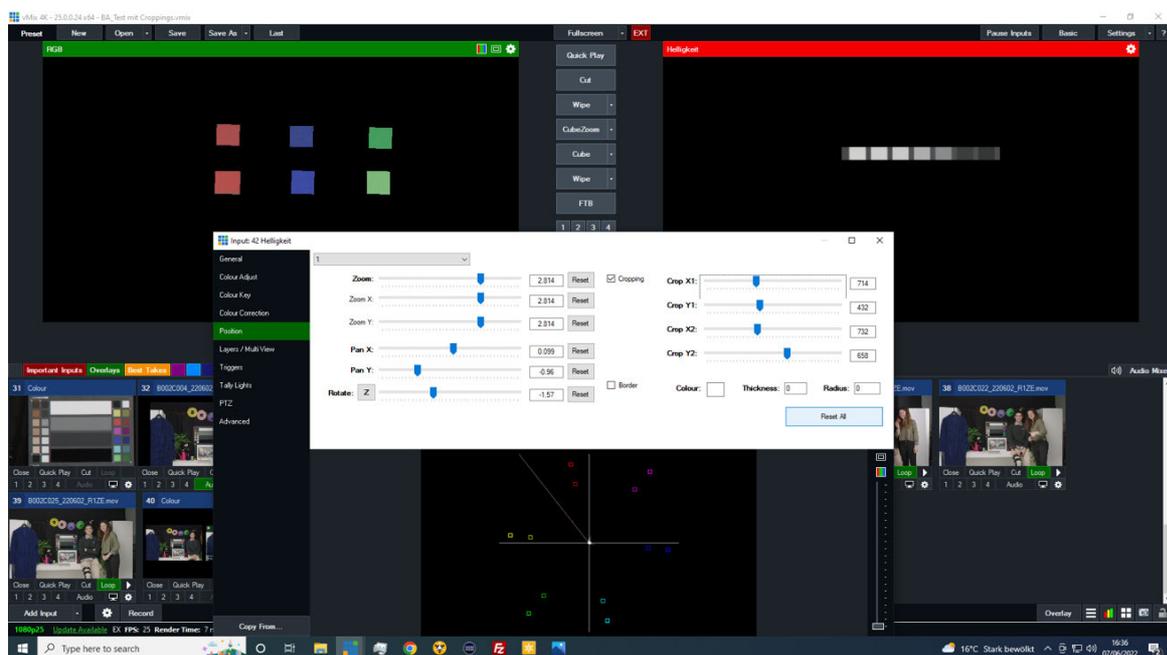


Abbildung 46: Menü für die Positionsänderung der Grautreppe

Nach einer Rechtsdrehung um etwa 90° beider Bilder konnte der Grauverlauf von Weiß bis Schwarz abgebildet werden. Es wurden beide ausgeschnittenen Grautreppe horizontal an der etwa gleichen Position platziert, um das Betrachten der Waveform zu erleichtern.

Der generierte Input wurde in Resolve Live ausgegeben, um die Scopes betrachten zu können und in erster Linie die Grauverläufe gemeinsam im Waveformmonitor zu begutachten. Auf den ersten Blick fiel auf, dass die ARRI Alexa Mini besonders in den Highlights höhere Videopegel besitzt (siehe Abbildung 48). Um die Helligkeit der Phantom insgesamt etwas anzuheben, wurde die Blende geöffnet. Das Hauptaugenmerk der Anpassung lag in der Optimierung der mittleren Grautöne (bei 50 % und 62,5 % Videopegel), da diese vorrangig zur Gestaltung des dynamischen Teils des Bildes beitragen. Das Angleichen der Highlights wurde zweitrangig betrachtet, da derart helle Töne üblicherweise nur geringfügig im Bild auftreten. Die ARRI Alexa Mini verfügt über einen Roll-Off in den Highlights und versetzt dem Log Gamma besonders bei höheren Empfindlichkeiten eine Art „Super Knee“, um den Dynamikbereich nochmals zu erweitern. Bei Pegeln über 62,5 % setzt dieser Roll-Off bereits ein, wodurch das Angleichen der hellen Grautöne nur bis zu dem physikalischen Limit der Phantom VEO4K-PL möglich ist. Die Phantom wird aufgrund des geringeren Dynamikumfangs eher übersteuern (clippen). Für präzisere Anpassungen wurde die Belichtungskurve in der Phantom Camera Control Application mit einbezogen. Durch das Setzen von Punkten konnten die verschiedenen Videopegel beeinflusst werden.

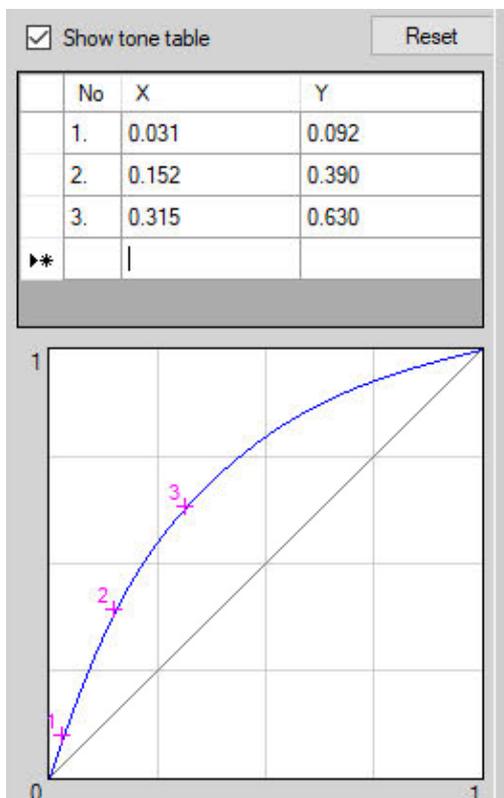


Abbildung 47: Belichtungskurve in der Phantom VEO4K-PL

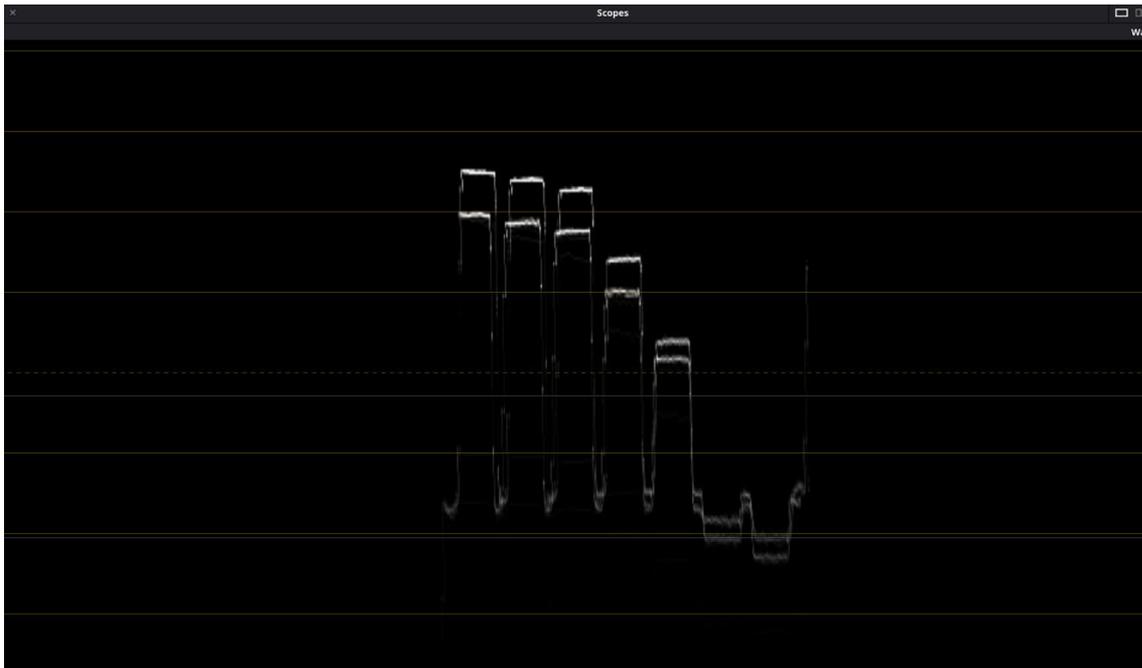


Abbildung 48: Waveform der Grautreppe beider Kameras vor der Anpassung

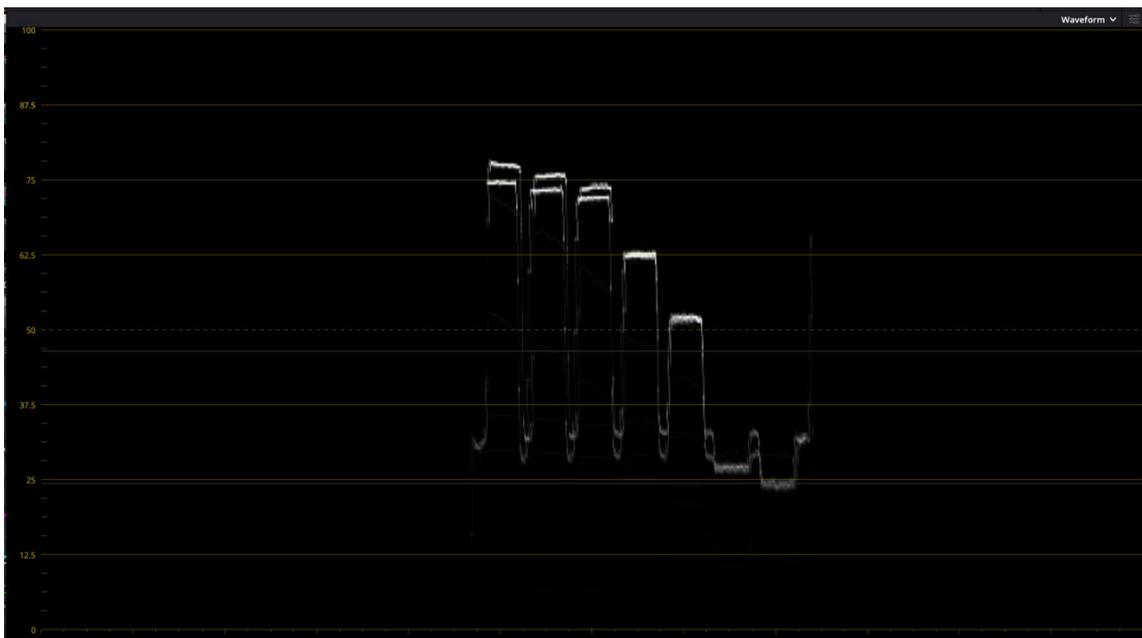


Abbildung 49: Waveform der Grautreppe beider Kameras nach der Anpassung

Die vorgenommene Anpassung des Weißpunktes im Sinne von Helligkeit und Kennlinie bietet die erforderliche Grundlage für weiteren Anpassungsschritte.

5.4.2 Weißabgleich

Nach der Helligkeitsangleichung wird als Nächstes der Weißabgleich vorgenommen, um die Farbanpassung aller Grautöne zu gewährleisten und den Weißpunkt im Sinne der Farbtemperatur festzulegen. Für den Erhalt korrekter Messwerte sind die Änderungen der Belichtungskurve oder der Blendenöffnung ab diesem Zeitpunkt nicht mehr zulässig. Der Weißabgleich des Referenzbildes dient als Orientierung für die Einstellungen der Farbtemperatur in der Phantom, sodass auch hier eine Farbtemperatur von 6500 K gewählt wurde. Bei der Betrachtung der Waveform der Farbtafel wird darauf geachtet, dass alle Farbpegel übereinander liegen. Damit eine Übereinstimmung vorlag, musste der Tint für diese Lichtsituation um T23.82 in Richtung Magenta verschoben werden.

Äquivalent wurde diese Form der Anpassung für die drei anderen Lichtsituationen durchgeführt. In der nachfolgenden Abbildung 50 werden anhand der Screenshots der Waveform-Monitore deutlich, wie ein falscher Weißabgleich das Konstrukt beeinflusst.

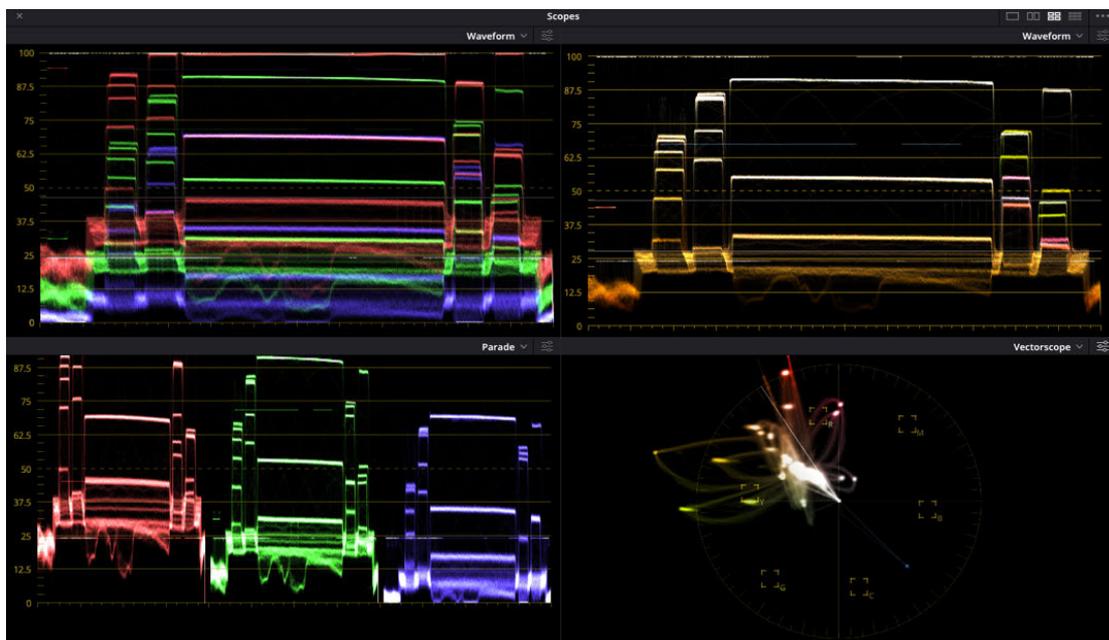


Abbildung 50: Phantom unter LED 3200 K - vor Weißabgleich

In diesem Fall passt die Einstellung der Kamera nicht mit der Farbtemperatur von 3200 K der LED ARRI Skypanel überein. Im Zuge der Anpassungen des Kelvin- und des Tint-Wertes in der Phantom VEO4K-PL ergibt sich ein passender Weißabgleich. Zur Kontrolle dienen die additiv gemischten Videopegel der Grauwerte, die eine möglichst exakt weiße Linie ergeben sollen.

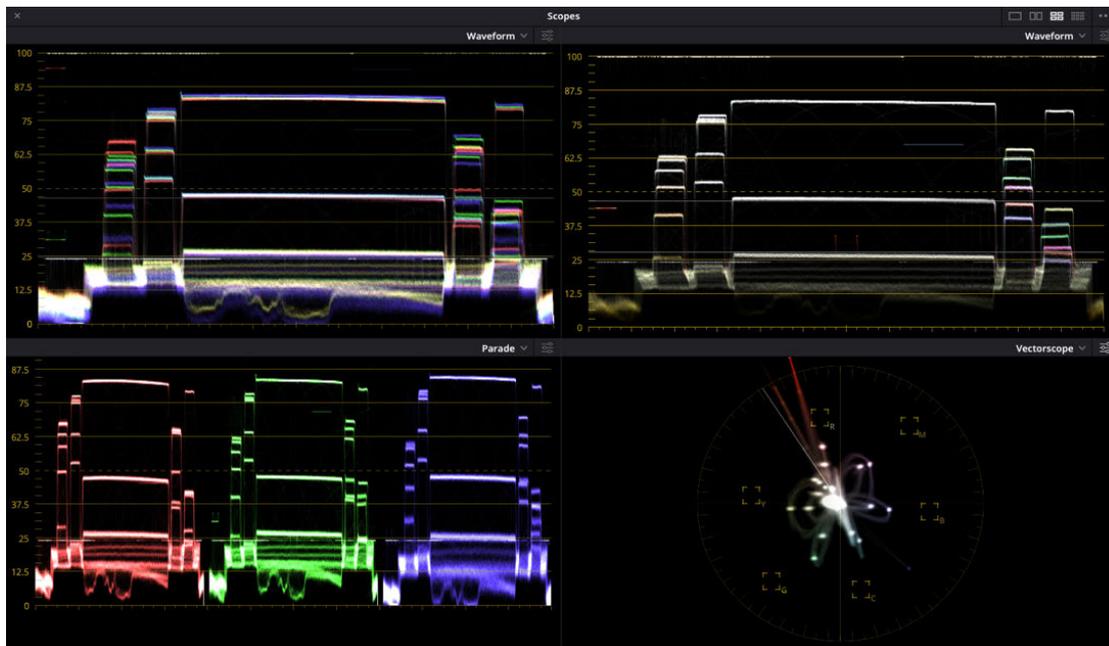


Abbildung 51: Phantom unter LED 3200 K - nach Weißabgleich

5.4.3 Farbmatrix

Bis zu diesem Zeitpunkt gab das Vektorskop keine Aufschlüsse, da nur Helligkeitswerte bzw. Pegel betrachtet wurden. Im nächsten Schritt wurden die Farbtöne und Farbsättigungen der Phantom VEO4K-PL angeglichen.

Da es sich als schwierig herausstellte, aus dem Gesamtbild Rückschlüsse aus dem Vektorskop zu ziehen, wurden die Primärfarben des ColorCheckers des Referenzbildes und des Live-Bildes ausgeschnitten und in vMix untereinander dargestellt. Die obere Reihe repräsentiert die mit der ARRI Alexa Mini aufgenommenen Primärfarben. Das Abbilden der Sekundärfarben hätte zu diesem Zeitpunkt keinen Mehrwert, da sie durch das Verschieben der Primärfarben bedingt sind.

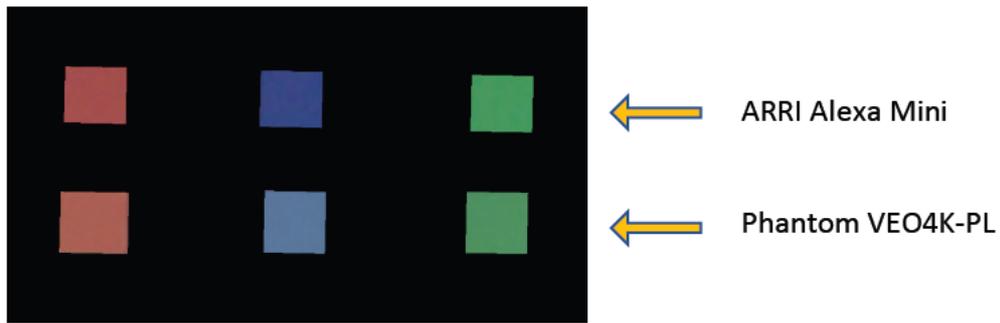


Abbildung 52: Primärfarben-Phantom ohne Matrix unten

Der optische Eindruck über die verschobenen Farbwinkel von Rot und Blau wurde durch das Vektorskop bestätigt. Die gelben Pfeile in Abbildung 53 repräsentieren die Winkel der Phantom-Primärfarben bei zweifacher Vergrößerung. Der Rotton der Phantom enthält mehr Grünanteile, wird somit Richtung Gelb verschoben und erzeugt einen orangen Eindruck. Ebenso zeigt das Blau einen Farbwinkel-Verschub, der durch erhöhte Grünanteile hervorgerufen wird. Das Blau bewegt sich in Richtung Cyan.

Durch die Mischung mit Grün wird das Rot und das Blau der Phantom heller wahrgenommen, als das Rot und Blau der ARRI Alexa Mini. Dies lässt sich durch das stärkere Helligkeitsempfinden grüner Farbtöne begründen.

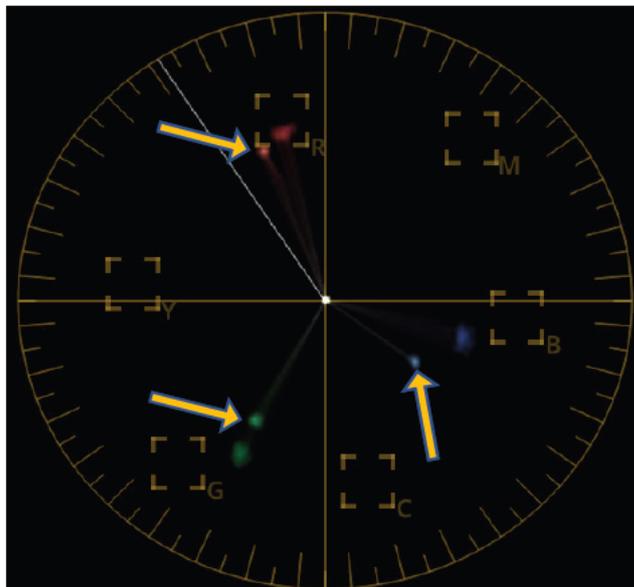


Abbildung 53: Primärfarben beider Kameras im Vektorskop (2x Zoom)

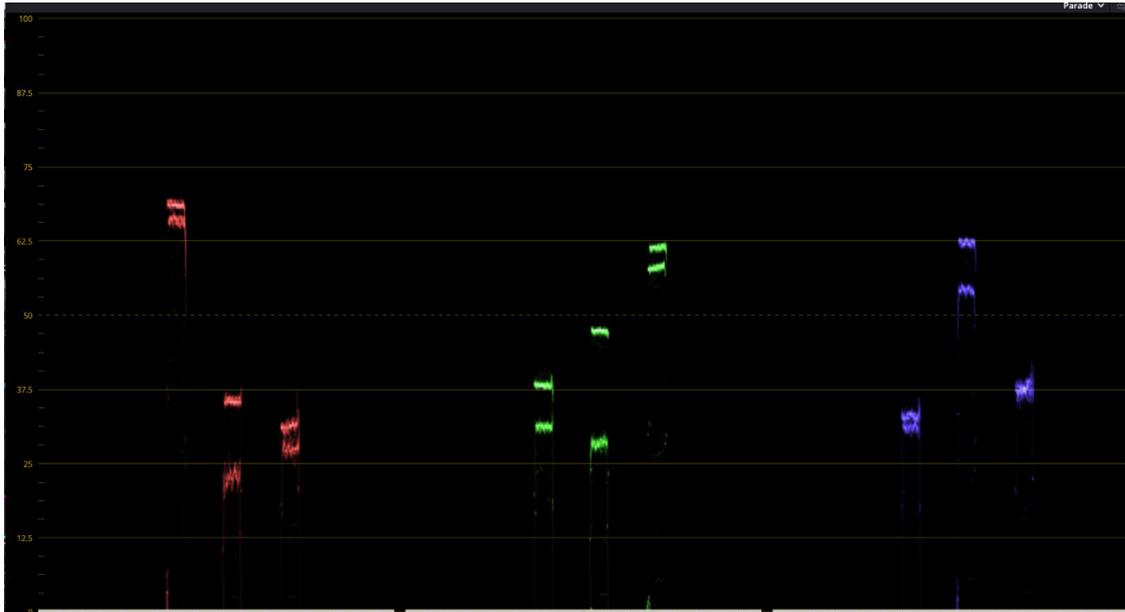


Abbildung 54: RGB Parade beider Kameras ohne Farbmatrix

Die RGB Parade spiegelt ebenfalls den optischen Eindruck wider. In dieser Darstellung fällt auf, dass die einzelnen „Striche“ unterschiedliche Größen aufweisen. Dieses Phänomen lässt sich durch Helligkeitsabweichungen innerhalb einer Farbe (der Farbtafel) erklären, die wiederum auf das Sensorrauschen und geringe Schattenbildung zurückzuführen sind.

Um Verbesserungen in der Matrix zu erkennen, empfiehlt es sich das Vektorskop und die RGB-Parade zeitgleich zu betrachten. Das Vektorskop eignet sich anschaulich als richtungsweisend, spart die Dimension der Helligkeit jedoch aus. In der Parade können die Auswirkungen der Farbmatrix-Änderungen differenzierter betrachtet werden. Im Zuge der Anpassung ergab sich Farbmatrix „M4“:

	R	G	B
R	1.25	-0.05	-0.2
G	-0.15	1.85	-0.7
B	-0.03	-0.07	1.1

Tabelle 7: Farbmatrix „M4“

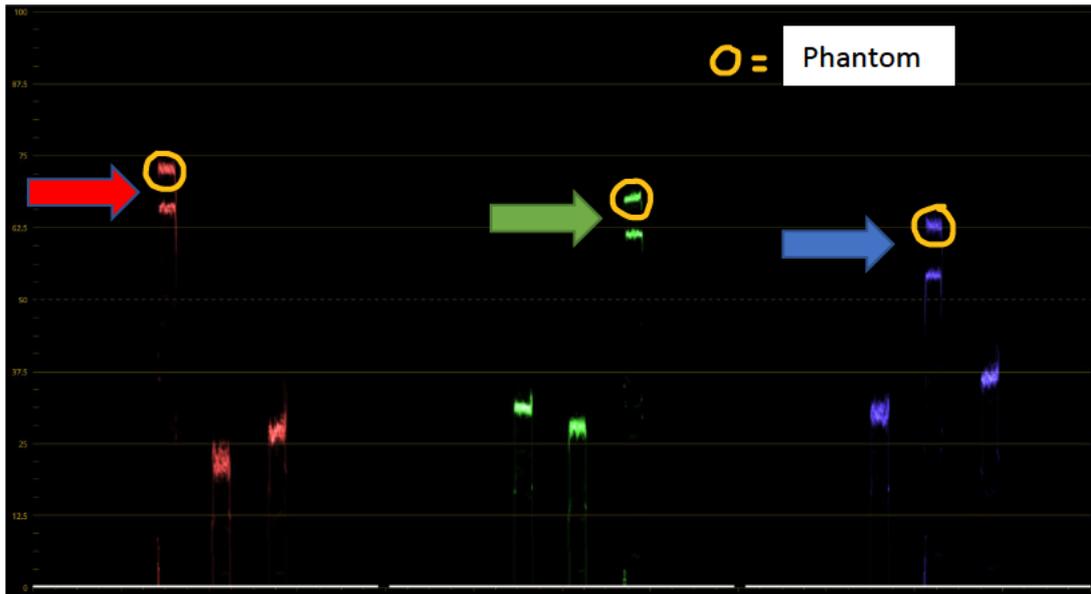


Abbildung 55: RGB Parade beider Kameras mit Farbmatrix M4

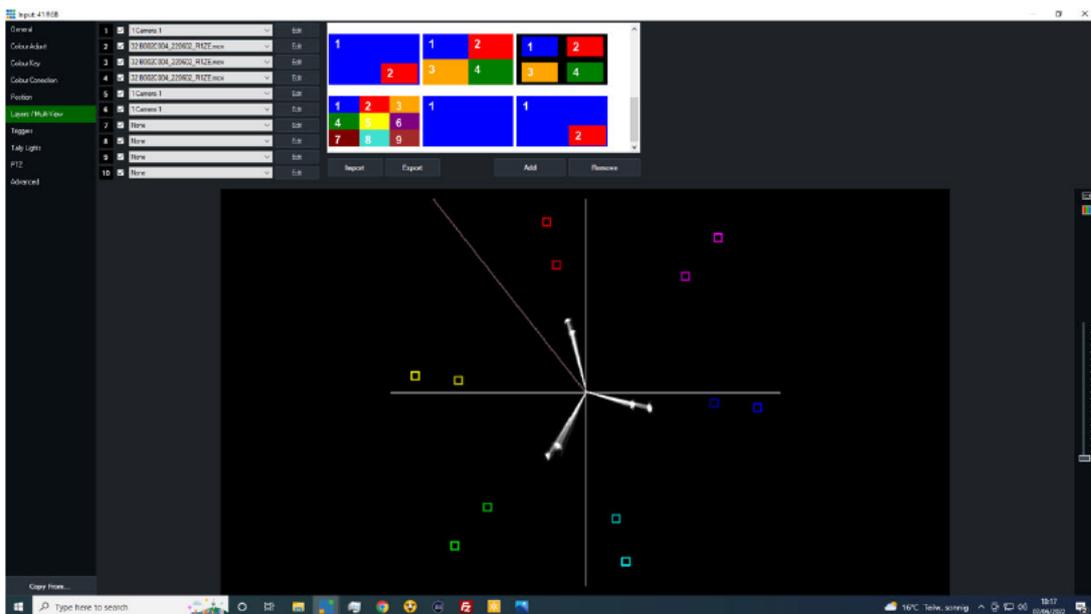


Abbildung 56: Vektorskop der RGB-Werte beider Kameras (Phantom mit Matrix M4) in vMix

Das Vektorskop und die RGB-Parade zeigen, dass die Farbwinkel (und dementsprechend die Farbtöne) und auch der Großteil der Farbhelligkeiten mit den Werten der ARRI Alexa Mini übereinstimmen. Die Farbhelligkeiten für Rot in Rot (roter Pfeil in Abbildung 55), Grün in Grün (grüner Pfeil) und Blau in Blau (blauer Pfeil) weisen bei der Phantom höhere Werte auf als bei der ARRI (Begründung siehe Auswertung). Bei der Betrachtung der ausgeschnittenen Primärfarben spiegeln sich diese durch einen helleren Farbeindruck der unteren Primärfarben in Abbildung 57 wider.

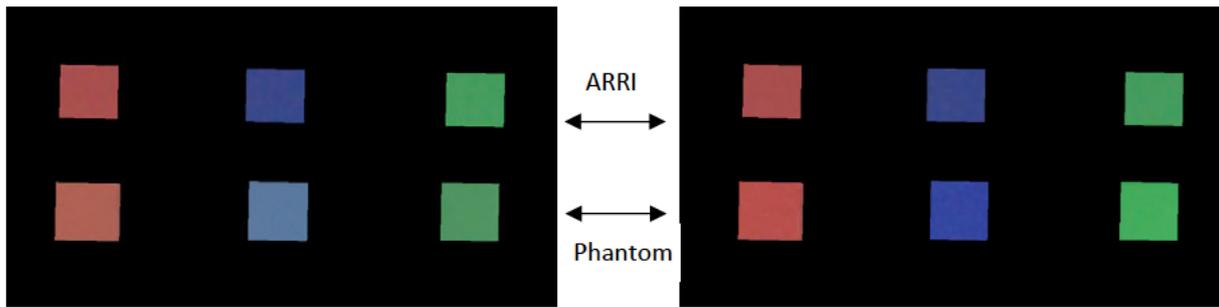


Abbildung 57: Primärfarben ARRI vs. Phantom (rechts mit Matrix M4)

Im letzten Schritt wurde das Gesamtbild und die Darstellung der Hauttöne betrachtet. Die ARRI Alexa Mini ist bekannt für ihre präzise und gesunde Darstellung der Hauttöne. Um diese Eigenschaften auch auf die Darstellung der Hauttöne mit der Phantom VEO4K-PL zu übertragen, empfiehlt es sich die Hauttonlinie im Vektorskop einzublenden (Siehe Linie in Abbildung 56).

5.5 Auswertung

Die zuvor präsentierten Abbildungen geben Auskunft über die Farbhelligkeiten, Farbsättigungen und Farbtöne der Phantom VEO4K-PL vor und nach der Anpassung. Bei der vergleichenden Betrachtung der Vektorskope in Abbildung 53 und Abbildung 56 fällt die Verbesserung der Farbwinkel durch die Überlagerung der Achsen ins Auge.

Abbildung 55 zeigt, dass die Phantom einige erhöhte Helligkeitswerte aufweist, die durch einen Fehler in der Referenz zu begründen sind. In Abbildung 42 bis 45 sind Personen am Rand zu erkennen, die zu einer leichten Schattenbildung auf der Farbtafel führten. Aus diesem Grund wurden die Referenzwerte minimal verfälscht.

	R	G	B
R	1	0	0
G	0	1	0
B	0	0	1

	R	G	B
R	1.25	-0.05	-0.2
G	-0.15	1.85	-0.7
B	-0.03	-0.07	1.1

Tabelle 8: Farbmatrizen im Vergleich

Bei der Wertebetrachtung der blauen Zeile fällt auf, dass „Blau in Blau“ sich nur geringfügig geändert hat. Trotz des im Vektorskop sichtbaren falschen Farbwinkels führt schon ein minimaler Versatz zu sichtbaren farblichen Änderungen. Das Auge reagiert empfindlicher auf Änderungen im blauen Bereich, wodurch der wahrgenommene Farbabstand im Vergleich zu grünen Farbtönen deutlich höher ist. Die Erkenntnis, dass die Abstände im CIE xy-Diagramm nicht den wahrgenommenen Farbabständen entsprechen, lieferte MacAdam und veranschaulicht dies durch die MacAdam-Ellipsen in Abbildung 58.¹¹⁶ Der Ursprung der erhöhten Empfindlichkeit hat evolutionäre Gründe. Gemäß DIN99 wird die Gelb-Blau-Achse mit dem Faktor 0,7 gestaucht, damit sie eher dem Sehen entspricht.¹¹⁷

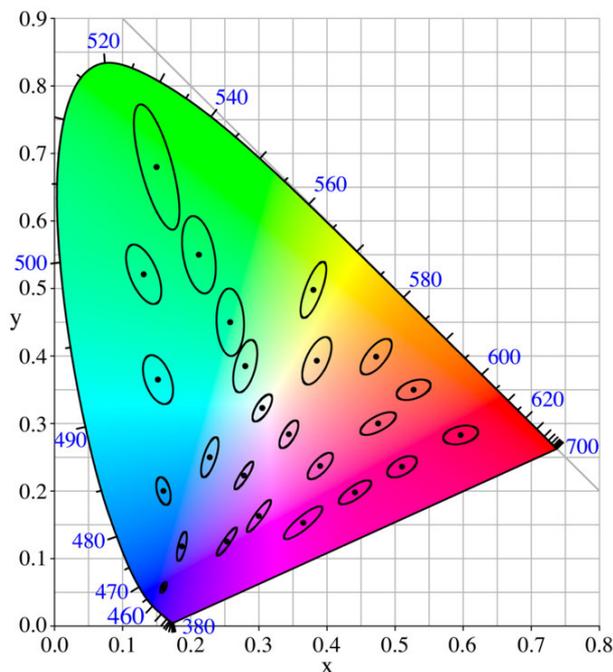


Abbildung 58: MacAdam-Ellipsen, zur Verdeutlichung 10-fach vergrößert

¹¹⁶ Vgl. (Fröhlich, 2017)

¹¹⁷ Vgl. (Greule, Farbsysteme, 2013)

5.6 Fehlerquellen und Optimierungsmöglichkeiten

Der Versuch wurde in einem Studio der Werbevideoproduktionsfirma „The Marmalade“ durchgeführt. Der Arbeitsbereich wurde durch dunkle, nicht reflektierende Stellwände abgegrenzt. Trotz dieser gestaltete es sich unmöglich den Lichteinfall durch sekundäre Quellen auszuschließen. Streulichter entstanden durch die sich ständig öffnenden Türen und die nicht vollkommen blickdichten Gardinen. Aufgrund der Größe des Studios konnte dieses nicht ausschließlich für den Versuch genutzt und vom Tageslichteinfall abgeschattet werden. Bei einer wiederholten Versuchsreihe würde es sich empfehlen ein kleineres, ungestörtes Studio einzurichten.

Durch das frühzeitige oder phasenweise Entwenden einiger Scheinwerfer, Stative und Optiken, war es beim Wiederaufbau unmöglich die exakt gleiche Position zu finden.

Auch der zeitliche Faktor führte zu Abweichungen in den Messreihen. Außerdem verändert der Kamerasensor seine Temperatur im laufenden Betrieb unter Einstrahlung, wodurch ebenfalls Messungenauigkeiten entstehen können.

Mit steigender Laufzeit verändert sich auch die Farbtemperatur der Scheinwerfer. Viele Faktoren führen dazu, dass nicht jede Messung gleichlang dauert. Angefangen mit dem Einstellen des Weißabgleiches wird auch für das Aufnehmen der Referenzen eine unterschiedliche Zeitspanne benötigt. Die exakt gleichen Bedingungen herzustellen, gestaltet sich demzufolge als sehr schwierig.

Für die Referenzen wurden Aufnahmen mit drei unterschiedlichen Hauttönen erstellt. Um eine größere Vielfalt abzudecken, hätten deutlich mehr Hauttöne aufgenommen werden können.

6 Fazit

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden die ARRI Alexa Mini und die Phantom VEO4K-PL in Bezug auf technische Grundlagen gegenübergestellt. Die Betrachtung der physikalischen Grenzen besitzt große Relevanz für den Testaufbau und den Angleichungsvorgang der Phantom an die ARRI Alexa Mini. Die Hauptunterschiede liegen in der Größe des Dynamikbereiches, der Art der Farbverarbeitung, der Speicherung und der zur Verfügung stehenden Frame-Rate.

Anhand der richtigen Vorarbeit konnte das Ziel, mit Hilfe einer Farbmatrix die Farbanpassung der Hochgeschwindigkeitskamera bereits in Echtzeit zu realisieren, erfüllt werden. Für diesen speziellen Fall, unter Anbetracht der Gegebenheiten (wie Objektiv- und Scheinwerferwahl), funktioniert die Lösung einwandfrei und liefert zufriedenstellende Ergebnisse.

Durch das Konzipieren der Farbmatrix konnte der Phantom VEO4K-PL ein Look verliehen werden, der dem der ARRI Alexa Mini erstaunlich nahekommt, obwohl die Kameras in grundlegenden technischen Aspekten voneinander abweichen. Dabei ist zu beachten, dass die vorliegende Farbmatrix auf die Anforderungen der jeweiligen Kameras und das verwendete Equipment zugeschnitten wurde. Ein Wechsel der Optik oder des Leuchtmittels würde eine Wiederholung des beschriebenen Workflows erfordern. Die Matrizen sind vom Spektrum der Scheinwerfer abhängig. Dadurch müsse die Matrix bei jeder Änderung neu auf das jeweilige Leuchtmittel angepasst werden. Die Entscheidungen darüber, welche Farbtransformationen und -räume verwendet werden sollen, basiert auf den Anforderungen und Einschränkungen eines bestimmten Projektes. Nach der Festlegung der technischen Rahmenbedingungen ist es unbedingt erforderlich die Kontinuität zu erhalten.

Der Waveform-Monitor und das Vektorskop stellen stets die Abweichungen und Verbesserungen auf technischer Seite dar. Für den optischen Eindruck halfen Berechnungen des Delta-E-Wertes, um eine Verringerung des wahrnehmbaren Farbabstandes festzustellen. Da Gemessenes sich vom Gesehenen unterscheidet, und letztendlich das visuelle Empfinden eine wichtigere Rolle in der Farbbeobachtung spielt, wurden die Testbilder kritisch betrachtet. Aufgrund der Subjektivität des Betrachtenden, wurden mehrere Seheindrücke und Meinungen diskutiert. Durch die zweigleisige Kontrolle konnte ein technisch richtiges und optisch ansprechendes Bild geschaffen werden.

Im Vergleich zu dem Phantom-Bild ohne Farbmatrix, konnte die Qualität durch die Matrix „M4“ gesteigert und der wahrnehmbare Farbabstand zu den Referenzfarben reduziert werden. Ein qualitativ hochwertiges Bild verbessert die Reputation des Unternehmens. Von daher stellt die Verwendung der Farbmatrix einen zeit- und kosteneffizienten Ansatz dar, der am Set von hoher Relevanz ist. Im Zuge der Implementierung der Ergebnisse zur Anwendung in der Postproduktion entsteht an diesem Arbeitsplatz ebenfalls ein Zeitersparnis.

Es wurde ein neuer Arbeitsablauf geschaffen, der beinhaltet mit einem Klick eine Farbmatrix in die PCC einzuladen und somit schnell auf Wechsel der Kameras, Objektive oder Beleuchtungssituation reagieren zu können. Bei der Erstellung der Farbmatrizen gibt es nicht ausschließlich eine richtige Lösung. Dieser Workflow ist ein Weg, um einen Mehrwert für die gesamte Produktion zu schaffen und nutzbare Ergebnisse zu liefern.

7 Ausblick

Im Zuge des ständigen technischen Fortschrittes wird sich das Angebot auf dem Kameramarkt weiter vervielfältigen. Der entwickelte Workflow ermöglicht es, bei richtiger Vorarbeit, die Phantom VEO4K-PL an jede beliebige Kamera anzupassen. Hierbei wird jedoch ausdrücklich nahegelegt den vorgestellten Workflow zu befolgen. Die Messkamera wird im Rahmen ihrer technischen Möglichkeiten auf neue Entwicklungen adaptierbar sein.

Bei einer Wiederholung des Versuches, würde auf die Perfektionierung der Referenzen Wert gelegt werden. Dabei sind auf die Positionen der Scheinwerfer, Gegenstände und Menschen zu achten, um Schatten auf der Farbtafel zu vermeiden.

Um schnell auf Änderungswünsche am Set vorbereitet zu sein, empfiehlt es sich diverse Matrizen für verschiedene Farbtemperaturen in jeweils mehreren Empfindlichkeiten zu generieren. Dazu bieten sich beispielweise die Farbtemperaturen 3200 K, 4000 K, 4500 K, 5000 K, 5600 K, 6000 K und 6500 K an, um Kunstlicht, Tageslicht und einige Zwischenschritte abzudecken. Die Höhe der Empfindlichkeit sollte sich am nativen ISO-Wert der Kameras orientieren und mindestens eine Stufe unter und über diesem abdecken. Bei einem nativen ISO von 800 würde die Wahl auf ISO 800, ISO 1600, ISO 400 und bestenfalls zusätzlich ISO 200 fallen.

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, mehrere Matrizen zu konzipieren, die auf die Perfektionierung bestimmter Farben ausgelegt sind. Da sich die Farben gegenseitig bedingen, kann die Verschiebung eines Farbwertes negative Auswirkungen auf eine andere Farbe haben. Liegt ein eingeschränktes Farbrepertoire vor, kann eine darauf ausgelegte Farbmatrix erstellt werden, ohne einen Kompromiss eingehen zu müssen.

Alternativ besteht die Möglichkeit der Verwendung einer „LUT-Box“. Dabei handelt es sich um eine Box, die zwei Eingänge und zwei Ausgänge besitzt und zwei verschiedene LUTs speichern kann. Die Box wird an einem Monitor angeschlossen und hat dementsprechend keine Berührungspunkte mit der Kamera. Die Verwendung dieser Option bietet sich an, wenn schnell ein bestehender, unveränderbarer Look angezeigt werden soll. Das System bietet jedoch weniger Anpassungsparameter.

Durch das pandemiebedingte Auflösen der zeit- und ortsabhängigen Arbeitsweise¹¹⁸, gewinnt die „Remote Production“ vor allem im internationalen Raum an Bedeutung. Im Zuge dessen wird auch das Live-Grading attraktiver, um möglichst schnell einen Look zu kreieren.

Die Kundennutzung des Streamings ist in Abhängigkeit des verwendeten Gerätes mit unterschiedlichen Wahrnehmungen verbunden und mit Problemen gekoppelt. Geräte- und browserabhängige Farbinterpretationen werden zu unterschiedlichen Wahrnehmungen führen.

Für tiefergehende Untersuchungen könnte ein allgemeingültiger Workflow entwickelt werden, der über die Anpassung der Phantom VEO4K-PL an beliebige Kameras hinausgeht. Es wäre sinnvoll einen Weg der Farbtransformation auszuarbeiten, bei dem nicht mit dem Phantom Live-Bild in vMix gearbeitet werden muss. Jede beliebige Kamera mit Hilfe einer Voreinstellung an eine andere Kamera anzupassen, wäre ein großer Fortschritt. Die kostengünstige Bildbearbeitungssoftware DaVinci Resolve könnte bei der Realisierung dieser Idee eine entscheidende Rolle spielen.

¹¹⁸ Durch die Zunahme der Arbeit im Home-Office

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Umrechnung DIN und ASA zu ISO	20
Tabelle 2: unveränderte Farbmatrix.....	74
Tabelle 3: Entsättigte Farbmatrix.....	75
Tabelle 4: Matrix „M1“.....	76
Tabelle 5: Matrix „M2“.....	76
Tabelle 6: Matrix „M3“.....	76
Tabelle 7: Farbmatrix „M4“.....	85
Tabelle 8: Farbmatrizen im Vergleich.....	87

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Das für den Menschen sichtbare Lichtspektrum	8
Abbildung 2: Vektorskop (rechts 2x Zoom).....	9
Abbildung 3: Farbtemperatur in Kelvin	10
Abbildung 4: Spektrum einer Halogenlampe (links)	11
Abbildung 5: Spektrum einer LED (rechts).....	11
Abbildung 6: Rolling Shutter vs. Global Shutter.....	16
Abbildung 7: Der Einfluss unterschiedlicher Sensorgrößen auf den Bildausschnitt.....	17
Abbildung 8: Bayer-Pattern Filter auf Sensor	18
Abbildung 9: Psychometrische Helligkeitsfunktion.....	22
Abbildung 10: Gamma-Systemkennlinie "über alles"	24
Abbildung 11: Logarithmische Kurve mit Helligkeitsunterschieden	27
Abbildung 12: Um X,Y und Z erweitertes RGB-Dreieck	28
Abbildung 13: Farbmischkurven zur Bestimmung der reinen Spektralfarben	29
Abbildung 14: CIE Normfarbtafel	30
Abbildung 15: Darstellung des $L^*a^*b^*$ Farbraumes.....	31
Abbildung 16: Farbwürfel.....	33
Abbildung 17: 3D-Modell der Farbräume Rec.709 und Rec.2020 (links).....	36
Abbildung 18: Rec.709 und Rec.2020 im Vergleich (rechts)	36
Abbildung 19: CIE Normfarbtafel mit den eingezeichneten Farbräumen Rec.709, DCI-P3 und Rec.2020.....	37
Abbildung 20: ACES-Farbraum im Vergleich.....	38
Abbildung 21: Kurve einer 1D-LUT mit verändertem Rot-Wert.....	40
Abbildung 22: 3D Farbwürfel mit 17 Knotenpunkten pro Achse - Screenshot aus Lattice.....	40
Abbildung 23: Filmkörnigkeit bei verschiedenen Vergrößerungen.....	42
Abbildung 24: Phantom VEO4K-PL.....	49
Abbildung 25: Auflösung und Framerate der Phantom VEO4K-PL.....	50
Abbildung 26: Sensorgrößen 35 mm vs. Phantom VEO4K.....	50
Abbildung 27: Global Shutter und Rolling Shutter im Vergleich.....	51
Abbildung 28: ARRI Alexa Mini.....	55
Abbildung 29: Dynamikumfang ARRI	57
Abbildung 30: Log C Übertragungsfunktionen für verschiedene Empfindlichkeitsstufen des Sensors	57
Abbildung 31: Digitale Referenz der Farbtafel	63
Abbildung 32: Testset.....	64
Abbildung 33: Die drei verwendeten Scheinwerfer im Testset	65
Abbildung 34: Links: ARRI M18 mit Vorschalter, Rechts: ARRI M18 in Betrieb	66
Abbildung 35: Beleuchtetes Testset mit zwei ARRI M18	67
Abbildung 36: Beleuchtetes Testset mit zwei Pollux 5 kW Scheinwerfern.....	67
Abbildung 37: 35 mm Zeiss CP.2 Super Speed	68
Abbildung 38: Vollständiger Versuchsaufbau.....	70
Abbildung 39: Simulierte Kameraeinstellungen in der Alexa Mini	71
Abbildung 40: Weißabgleich der Alexa Mini mit M18.....	72
Abbildung 41: Entsättigter Würfel, auf den die Farbmatrix in Lattice angewendet wurde.....	75
Abbildung 42: Links: Referenz ARRI, Rechts: Phantom ohne Farbmatrix	77

Abbildung 43: Links: Referenz ARRI, Rechts: Phantom mit Farbmatrix M1.....	77
Abbildung 44: Links: Referenz ARRI, Rechts: Phantom mit Farbmatrix M2.....	77
Abbildung 45: Links: Referenz ARRI, Rechts: Phantom mit Farbmatrix M3.....	77
Abbildung 46: Menü für die Positionsänderung der Grautreppe.....	79
Abbildung 47: Belichtungskurve in der Phantom VEO4K-PL.....	80
Abbildung 48: Waveform der Grautreppe beider Kameras vor der Anpassung.....	81
Abbildung 49: Waveform der Grautreppe beider Kameras nach der Anpassung.....	81
Abbildung 50: Phantom unter LED 3200 K - vor Weißabgleich.....	82
Abbildung 51: Phantom unter LED 3200 K - nach Weißabgleich.....	83
Abbildung 52: Primärfarben-Phantom ohne Matrix unten.....	84
Abbildung 53: Primärfarben beider Kameras im Vektorskop (2x Zoom).....	84
Abbildung 54: RGB Parade beider Kameras ohne Farbmatrix.....	85
Abbildung 55: RGB Parade beider Kameras mit Farbmatrix M4.....	86
Abbildung 56: Vektorskop der RGB-Werte beider Kameras (Phantom mit Matrix M4) in vMix.....	86
Abbildung 57: Primärfarben ARRI vs. Phantom (rechts mit Matrix M4).....	87
Abbildung 58: MacAdam-Ellipsen, zur Verdeutlichung 10-fach vergrößert.....	88

10 Abbildungsquellen

- Abbildung 1 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/62/Electromagnetic_spectrum_-_de_c.svg/2940px-Electromagnetic_spectrum_-_de_c.svg.png
- Abbildung 2 eigene Darstellung
- Abbildung 3 <https://www.ledmarkt24.de/bilder/content/led-farbttemperatur-warmweiss-neutral.jpg>
- Abbildung 4 <https://www.brillen-sehhilfen.de/optik/image/halogenlicht-spektrum.jpg>
- Abbildung 5 <https://www.brillen-sehhilfen.de/optik/led-licht.php>
- Abbildung 6 https://www.baumer.com/medias/sys_master/root/h4c/h99/8992948486174/Animation-Global-vs-Rolling-Shutter-190912-DE-FR.gif
- Abbildung 7 <https://tinofotoblog.de/wp-content/uploads/2016/05/Sensorgrößen.jpg>
- Abbildung 8 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/37/Bayer_pattern_on_sensor.svg/1200px-Bayer_pattern_on_sensor.svg.png
- Abbildung 9 vgl. Vorlesung Videotechnik - Matthias Wilkens
- Abbildung 10 eigene Darstellung
- Abbildung 11 <https://www.slashcam.de/images/texte/1482-helligkeiten-helligkeiten.jpg>
- Abbildung 12 <https://wisotop.de/xyz-zur-cie-farbtafel.php>
- Abbildung 13 <https://wisotop.de/svg/spektralfarben-rot-gruen-blau-kurven.svg>
- Abbildung 14 https://www.sensorinstruments.de/cmsimages/Farbe/Grafik_006_01.jpg
- Abbildung 15 <https://www.kennerblick.net/cie-lab-farbraum.jpg>
- Abbildung 16 eigene Darstellung
- Abbildung 17 Quelle: Roland Greule
- Abbildung 18 Quelle: Justus Mai
- Abbildung 19 [https://image.benq.com/is/image/benqco/color-gamut-8?\\$ResponsivePreset&fmt=png-alpha](https://image.benq.com/is/image/benqco/color-gamut-8?$ResponsivePreset&fmt=png-alpha)
- Abbildung 20 <https://blog.frame.io/2019/09/09/guide-to-aces/>
- Abbildung 21 eigene Darstellung
- Abbildung 22 eigene Darstellung

Abbildung 23	Siehe Professionelle Videotechnik S.310
Abbildung 24	https://www.phantomcamera.de/-/media/project/ameteksxa/visionresearch/images/product/veo/4k/veo4kpl.png?la=de-de\u0026revision=0cdebab2-2ece-4c80-a5a2-0be2a842df3e
Abbildung 25	Siehe Datenblatt Phantom VEO4K-PL
Abbildung 26	Siehe Datenblatt Phantom VEO4K-PL
Abbildung 27	Siehe Datenblatt Phantom VEO4K-PL
Abbildung 28	eigene Darstellung
Abbildung 29	https://www.arri.com/resource/blob/37754/0e11a4898135904c512866b85fa81af9/wkflw-faq-color-logcgreyscale-mapping-data.jpg
Abbildung 30	Siehe Datenblatt ALEXA Log C Curve
Abbildung 31	Quelle: Jonas Kern - The Marmalade Studios
Abbildung 32	eigene Darstellung
Abbildung 33	eigene Darstellung
Abbildung 34	https://images.prolighting.de/imagesshop/webpL/L0.37600.B.webp & eigene Darstellung
Abbildung 35	eigene Darstellung
Abbildung 36	eigene Darstellung
Abbildung 37	eigene Darstellung
Abbildung 38	eigene Darstellung
Abbildung 39	https://tools.arri.com/fileadmin/adapps/alex_a_mini_simulator/img/bg-simulator-empty.png
Abbildung 40	eigene Darstellung
Abbildung 41	eigene Darstellung
Abbildung 42	eigene Darstellung
Abbildung 43	eigene Darstellung
Abbildung 44	eigene Darstellung
Abbildung 45	eigene Darstellung

Abbildung 46	eigene Darstellung
Abbildung 47	eigene Darstellung
Abbildung 48	eigene Darstellung
Abbildung 49	eigene Darstellung
Abbildung 50	eigene Darstellung
Abbildung 51	eigene Darstellung
Abbildung 52	eigene Darstellung
Abbildung 53	eigene Darstellung
Abbildung 54	eigene Darstellung
Abbildung 55	eigene Darstellung
Abbildung 56	eigene Darstellung
Abbildung 57	eigene Darstellung
Abbildung 58	https://de.wikipedia.org/wiki/MacAdam-Ellipse#/media/Datei:CIExy1931_MacAdam.png

11 Literaturverzeichnis

- Academy Color Encoding System (ACES)*. (2012-2019). Von Cinematic Color 2: <https://nick-shaw.github.io/cinematiccolor/academy-color-encoding-system-aces.html> abgerufen am 22.05.2022
- ACES explained in a simple way*. (2022). Von Linked in : <https://www.linkedin.com/pulse/aces-explained-simple-way-iman-javaherypour> abgerufen am 24.05.2022
- Alev Sensoren*. (2022). Von ARRI: <https://www.arri.com/en/learn-help/technology/alev-sensors> abgerufen am 20.05.2022
- ARRI. (2022). *Farb-FAQ*. Von ARRI: <https://www.arri.com/en/learn-help/learn-help-camera-system/frequently-asked-questions/color-faq#accordion-44068> abgerufen am 02.06.2022
- astrophotocologne. (27. August 2017). *Wie funktioniert eine CCD bzw CMOS Kamera*. Von <https://www.youtube.com/watch?v=jVvDovskkl0> abgerufen am 20.05.2022
- Baccus, O. (7. April 2022). *Magazin, Gesundheits- und Sportnachrichten*. Von All News Press: <https://allnewspress.com/deutsch/tiktok-wirkt-auf-das-gehirn-von-kindern-wie-ein-suswarenladen-der-ihre-aufmerksamkeitsspanne-verkurzt-bericht/> abgerufen am 10.06.2022
- Bildverarbeitung* . (2022). Von ARRI: <https://www.arri.com/en/learn-help/technology/image-processing> abgerufen am 05.06.2022
- Brendel, H. (3. März 2017). *ALEXA Log C Curve*. Von ARRI. abgerufen am 06.06.2022
- Budde, M. (September 1999). *Farbmanagement mit ICC-Profilen*. Hamburg.
- Burosch, K. (2009). *Farbräume Rec.709, Rec.2020 und DCI / P3*. Von Burosch: <https://www.burosch.de/109-technik/928-farbraeume-rec709-bis-rec2020-dci-p3.html> abgerufen 14.06.2022
- Correns, D.-I. M. (24. Februar 2011). *Subpixelgenaue Kantenortsbestimmung in digitalen Mehrkanalbildern, dargestellt am Beispiel von Sensoren mit Bayer Pattern Color Filter Array*. Technischen Universität Ilmenau.
- Crop Faktor | Einfache Erklärung, Berechnung und Tabelle*. (2022). Von pixolum: <https://www.pixolum.com/blog/fotografie/crop-faktor> abgerufen am 13.06.2022
- Delta-E Calculator*. (kein Datum). Von ColorMine.org: <http://colormine.org/delta-e-calculator> abgerufen am 17.06.2022
- Eberhard Hasche, P. I. (2016). *Game of Colors: Moderne Bewegtbildproduktion*. Berlin: Springer Verlag.

- Empfindlichkeit von Kameras und Filmen: Was ist der Unterschied zwischen ISO, ASA und DIN?* (2022). Von Frag den Neudeck: <https://www.frag-den-neudeck.de/Archive/289> abgerufen am 24.06.2022
- Farbwiedergabe und der Farbwiedergabeindex.* (kein Datum). Von lampe.de: <https://www.lampe.de/magazin/farbwiedergabe/> abgerufen am 20.05.2022
- Fröhlich, J. (13. Dezember 2017). Encoding High Dynamic Range and Wide Color Gamut Imagery . Visualisierungsinstitut der Universität Stuttgart.
- Fuxjäger, A. (03. März 2021). *Einführung in die Filmfarbenanalyse.* Von <https://doi.org/10.25969/mediarep/15460> abgerufen am 02.07.2022
- Greule, R. (2013). Farbsysteme.
- Greule, R. (2021). Farbmétrische Grundlagen. In *Licht und Beleuchtung im Medienbereich* (S. 82). München: Carl Hanser.
- Greule, R. (2021). Licht und Strahlung . In *Licht und Beleuchtung im Medienbereich* (S. 3-5). München: Carl Hanser.
- Greule, R. (2021). Physikalische Größen. In *Licht und Beleuchtung im Medienbereich* (S. 7). München: Carl Hansen.
- Hamma Gamma? Was man über das Gamma wissen sollte.* (24. 10 2021). Von Farbkanal: <https://youtu.be/xVvO95HnRrk> abgerufen am 29.05.2022
- Harjes, T. (10. Februar 2021). *Die Bedeutung von Farben.* Von visionz: <https://visionz.de/wirkung-von-farben/> abgerufen am 15.06.2022
- Ingwer, P. (2016). Kameratechnik. In P. Ingwer, *Game of Colors: Moderne Bewegtbildproduktion* (S. 93-123). Berlin: Springer Verlag.
- Künne, C. (2007). Digitale Negative: Camera RAW. In *Photoshop Basiswissen*. Addison-Wesley Verlag.
- Kern, J. (8. Februar 2018). Dynamikumfang digitaler Filmkameras . Hochschule Mittweida.
- Kodak. (August 2004). KODAK VISION2 250D Color Negative Film 5205 / 7205.
- Kopatz, M. (2009). Der Filmlook – ist er noch zeitgemäß? Hochschule Mittweida - University of Applied Sciences (FH) , Hamburg.
- LED.* (22. Mai 2022). Von Conrad: <https://www.conrad.de/de/ratgeber/technik-einfach-erklart/led-leuchtdiode.html> abgerufen am 25.05.2022
- Log C.* (2022). Von ARRI: <https://www.arri.com/en/learn-help/learn-help-camera-system/camera-workflow/image-science/log-c> abgerufen am 28.05.2022

- movie college* . (2022). Von S-Log, C-Log, V-Log: <https://www.movie-college.de/filmschule/kamera/belichtung/s-log,-c-log,-v-log> abgerufen am 14.06.2022
- Norbert Welsch, C. C. (2004). *Farben: Natur, Technik, Kunst*. Spektrum Akademischer Verlag.
- Photoelektrischer Effekt*. (2022). Von Physik für Alle: https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Photoelektrischer_Effekt abgerufen am 21.05.2022
- Possel, D. H. (kein Datum). *Delta E*. Von Kenner Blick: <https://www.kennerblick.net/delta-e.html> abgerufen am 28.06.2022
- Schiele, H.-G. (2012). *Computergrafik für Ingenieure*. Springer-Verlag.
- Schmidt, E. (1956 Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1956). *Thermodynamik*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag .
- Schmidt, U. (2009). *Professionelle Videotechnik*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Schmidts, R. (23. Juni 2016). *Grundlagen: Was bedeutet Log beim Filmen?* Von slashCAM: <https://www.slashcam.de/artikel/Grundlagen/Was-bedeutet-Log-beim-Filmen-.html> abgerufen am 22.06.2022
- Shipsides, A. (27. März 2012). *Der Unterschied zwischen LUTs, Looks und Szenendateien*. Von AbelCine: <https://www.abelcine.com/articles/blog-and-knowledge/tutorials-and-guides/the-difference-between-luts-looks-and-scene-files> abgerufen am 23.06.2022
- Stevanovic, N. (25. Mai 2000). Integrierte CMOS-Bildsensorik für Hochgeschwindigkeitskinematographie. Gerhard-Mercator Universität - Duisburg.
- Tino. (2017). *Vollformat oder Crop*. Von Tinos Fotoblog: <https://tinofotoblog.de/fotografieren-lernen/vollformat-oder-crop/> abgerufen am 03.06.2022
- VEO4K-PL*. (2022). Von Phantom: <https://www.phantomcamera.de/products/cameras/4kmedia/veo4kpl> abgerufen am 23.05.2022
- Von CIE XYZ zu xyz*. (Juli 2017). Von wisotop: <https://wisotop.de/xyz-zur-cie-farbtabel.php> abgerufen am 12.06.2022
- Von RGB über XYZ zum Spektralfarbzug*. (Juli 2017). Von wisotop: <https://wisotop.de/RGB-Dreieck-CIE-Farbtabel.php> abgerufen am 07.06.2022
- Wölk, M. (kein Datum). *Zeilensprungverfahren*. Von DeWiki.de: <https://dewiki.de/Lexikon/Zeilensprungverfahren> abgerufen am 18.06.2022

Was ist der Dynamikumfang? (kein Datum). Von digitale Fotoschule:
<https://digitalefotoschule.de/6324/dynamikumfang/> abgerufen am 06.06.2022

Was ist die Farbtemperatur? (kein Datum). Von ledmarket24:
<https://www.ledmarkt24.de/Was-ist-die-Farbtemperatur> abgerufen am 22.05.2022

Was ist eine LUT und wie funktioniert sie? (2016-2022). Von VEGAS:
<https://www.vegascreativesoftware.com/de/videos-bearbeiten/was-sind-luts-wie-benutze-ich-sie-richtig/> abgerufen am 10.06.2022

Wie du ein Video im Filmlook drehst. (2022). Von filmpuls: <https://filmpuls.info/filmlook-video/> abgerufen am 01.07.2022

Wilkins, M. •-I. (2021). *Digitaler Videopegel, Gamma*. Von Videotechnik 1. abgerufen am 25.05.2022

ZEISS Kinematographie. (2022). Von ZEISS: <https://www.zeiss.de/consumer-products/cinematografie.html> abgerufen am 28.06.2022

12 Anhang

Alle im Folgenden genannten Anhänge befinden sich auf dem Datenträger.

Wissenschaftliche Arbeiten:

- Dynamikumfang digitaler Filmkameras
- Integrierte CMOS-Bildsensorik für Hochgeschwindigkeitskinematographie
- Subpixelgenaue Kantenortsbestimmung in digitalen Mehrkanalbildern, dargestellt am Beispiel von Sensoren mit Bayer Pattern Color Filter Array
- ameratechnik
- Encoding High Dynamic Range and Wide Color Gamut Imagery
- Farbmanagement mit ICC-Profilen
- Der Filmlook – ist er noch zeitgemäß?

Datenblätter:

- Pollux 5000W
- ALEXA Mini LF /ALEXA Mini /ALEXA LF / ALEXA SXT / ALEXA 65 / AMIRA – White Paper
- ALEXA Log C Curve
- ARRI Alexa Mini
- M-Series M18 mit MAX Technology
- VEO Manual
- KODAK VISION2 250D Color Negative Film 5205 / 7205

RGB-Werte in Excel:

- Ref. ARRI & Objektivgl.
- Ref. 35mm ARRI im Vgl.
- Ref. 50mm ARRI
- Versuchsreihen mit vers. Mat.
- RGB-Werte M4

Abbildungen:

- Abbildung 42
- Abbildung 43
- Abbildung 44
- Abbildung 45
- Abbildung 52
- Abbildung 57

13 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Herrn Prof. Roland Greule, der meine Bachelorarbeit betreut und begutachtet hat. Für die gute Betreuung, die hilfreichen Anregungen und die Geduld möchte ich mich herzlich bedanken.

Ein besonderer Dank gilt ebenso Dipl.-Ing. Johannes Dornow, der mir die Zusammenarbeit mit The Marmalade Studios ermöglichte und die Themenfindung erleichterte.

Ich danke Matthias Wilkens für die interessanten und konstruktiven Beiträge zu dieser Arbeit. Ebenso möchte ich mich für die Erläuterungen des Fachwissens, die Verfügbarkeit der Vorlesungsmaterialien und die Hilfsbereitschaft bedanken.

Des weiteren bedanke ich mich bei allen Kollegen und Kolleginnen der Firma The Marmalade Studios, die mir tatkräftig beim Testaufbau zur Seite standen. Insbesondere möchte ich Jonas Kern und Tim Winnicker für das Einbringen des technischen Wissens danken. Für die Möglichkeit den Testaufbau mit dem entsprechenden Equipment zu realisieren, gebührt mein Dank Christopher Klemme und dem Kameraverleih „Maddels“.

Außerdem möchte ich bei meinen Kommilitonen und Freunden für das Korrekturlesen dieser Arbeit und die hilfreichen Anmerkungen bedanken.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht hat.

14 Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere, die vorliegende Arbeit mit dem Titel „Farbanpassung einer Hochgeschwindigkeitskamera in Echtzeit“ selbständig ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt zu haben. Die aus anderen Werken wörtlich entnommenen Stellen oder dem Sinn nach entlehnten Passagen sind durch Quellenangaben eindeutig kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher und ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ort, Datum

Unterschrift