

**Implementation von HDR-Technologien in den
bestehenden Arbeitsablauf einer
Werbefilm-Postproduktion**

Bachelor-Thesis

zur Erlangung des akademischen Grades B.Sc.

Jonas Kern



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Design, Medien und Information
Department Medientechnik

Erstprüfer: Prof. Ulrich Schmidt

Zweitprüfer: Johannes Dornow

Hamburg, 8.4.2019

Inhaltsverzeichnis

Abstract	4
Abkürzungsverzeichnis	7
Vorwort	8
Danksagung	10
1 Einleitung	11
2 Grundlagen zur Quantisierung von Videosignalen	14
3 Forschung und Entwicklung zu Perceptual Quantization	18
3.1 Quantisierung in Abhängigkeit zur menschlichen Kontrastsensitivität	18
3.2 Quantisierungsstufen im realen Produktionsumfeld	21
3.3 Erhalt kreativer Intention mit PQ	24
3.4 Unterschiede in PQ-HDR-Formaten	25
3.4.1 Statische und dynamische Metadaten	26
3.4.2 Lizenzmodelle	27
4 Forschung und Entwicklung zu Hybrid Log Gamma	29
4.1 Abwärtskompatibilität der Quantisierungskennlinie	29
4.2 Quantisierungseffizienz und Dynamikumfang	31
4.3 Systemgamma	32
4.4 Belichtung	33
5 Marktrelevanz	34
5.1 Technische Voraussetzungen	34
5.2 Adoption auf Verbraucherseite	34
5.3 Videospiele als Inkubator	35
5.4 Entwicklung der Distributionswege	36
6 HDR im professionellen Produktionsumfeld	38
6.1 Kameras	38
6.2 Codecs	39
6.3 Schnittstellen	40

Inhaltsverzeichnis

6.4	Referenzmonitore	40
7	Farbmanagement mit dem Academy Color Encoding System	43
7.1	Postproduktion in ACES	44
7.2	Monitoring von Material im ACES2065-Farbraum	45
7.3	Mastering für SDR und HDR	45
8	Signalverteilung für HDR-Signale	47
9	Displaykonfiguration und Kalibrierung	50
9.1	Strategien zur farbrichtigen Kalibrierung	50
9.2	Verwendetes Material	51
9.3	Probe Matching	51
9.4	Messergebnisse	52
9.4.1	Displayhelligkeit	52
9.4.2	EOTF-Tracking	53
9.4.3	Farbraum	53
9.4.4	Farbwiedergabe	55
9.4.5	RGBW-Subpixel	56
9.4.6	Automatic Brightness Limiting	56
9.5	Schlussfolgerungen	58
10	HDR-Workflow in der Praxis	59
10.1	Testmaterial	59
10.2	SDR-Master	60
10.3	HDR-Master	60
10.4	Auswertung	61
11	Diskussion	63
11.1	Bewertung der HDR-Technologien	63
11.2	Ausblick	64
12	Fazit	65
	Abbildungsverzeichnis	66
	Tabellenverzeichnis	67
	Literaturverzeichnis	68

Abstract

Motivation

The spread of HDR-Video is increasing rapidly. With the support for different High Dynamic Range (HDR) technologies on 4K Blu-Ray Disc, streaming services, broadcast TV and in cinemas worldwide the availability of HDR content for consumers is growing daily. HDR compatibility is becoming the norm on media consumption devices. This development indicates that HDR could become a mandatory technical requirement for future productions just like HD resolution is today.

Scope

This thesis deals with the challenges a post production facility faces with the creation of HDR content. Which parts of the workflow and the signal chain need to be altered in order to support the different formats of HDR video? How can HDR as a creative tool be explored without investing into an emerging technology which is not required by clients today?

The goal of this research paper is the design of a HDR mastering environment which enables the creation of deliverables based on Hybrid Log Gamma and Perceptual Quantization. The design will be restricted by technical environment at a given post production facility.

Findings

To comply with the current standards of HDR video production it is in most cases sufficient to replace just the reference video monitor with a HDR compatible device. All other devices such as cameras, lenses, workstation computer systems and signal converters are usually already HDR compatible, can be updated via software or are not affected by a change to HDR.

In cases where professional HDR reference monitors are unobtainable or present too much of a financial commitment to a still developing technology, consumer grade OLED-TVs can be used to derive a HDR deliverable from a Master which has been created for Standard Dynamic Range (SDR).

Zusammenfassung

Motivation

Die Verbreitung von HDR-Video nimmt rasant zu. Seit der Einführung verschiedener HDR-Technologien auf 4K Blu-Ray Disc, bei Streaming-Anbietern, Fernsehanstalten und in Kinos weltweit, steigt die Verfügbarkeit von HDR-Inhalten für Konsumenten täglich. HDR-Kompatibilität wird zur Norm für Mediengeräte. Diese Entwicklung legt nahe, dass HDR zu einer technischen Grundvoraussetzung für zukünftige Produktionen werden könnte, ganz so wie heute HD-Auflösung.

Umfang

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den Herausforderungen in der Postproduktion bei der Kreation von HDR-Inhalten. Welche Teile des Arbeitsablaufs und der Signalkette müssen angepasst werden, um die verschiedenen Formate von HDR-Video zu unterstützen? Wie kann HDR als kreatives Werkzeug erforscht werden, ohne in eine aufkommende Technologie zu investieren, die vom Kunden noch nicht gefordert wird?

Ziel dieser Forschung ist die Entwicklung einer HDR-Mastering-Umgebung, die die Entwicklung von Projektleistungen auf Basis von Hybrid Log Gamma und Perceptual Quantization ermöglicht. Das Design dieser Umgebung wird durch die technische Einrichtung eines gegebenen Postproduktions-Studios eingeschränkt.

Ergebnisse

Um die aktuellen Standards im Bereich HDR-Videoproduktion zu erfüllen, ist es in den meisten Fällen ausreichend nur den Referenzmonitor durch ein HDR-fähiges Gerät zu ersetzen. Andere Geräte, wie Kameras, Objektive, Computersysteme und Signalkonverter, sind in der Regel bereits kompatibel zu HDR-Signalen, können per Software aufgerüstet werden oder sind nicht von einer Umstellung zu HDR betroffen.

In Fällen, in denen HDR-Referenzmonitore nicht verfügbar sind oder eine zu große finanzielle Bindung an eine sich noch wandelnde Technologie bedeuten, können Consumer-OLED-Displays verwendet werden, um aus einem für Standard Dynamic Range (SDR) gefertigten Master eine HDR-Sendekopie zu erzeugen.

Abkürzungsverzeichnis

ABL	Automatic Brightness Limiting
ACES	Academy Color Encoding System
AMPAS	Academy of Motion Picture Arts and Sciences
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
ASBL	Automatic Static Brightness Limiting
BBC	British Broadcasting Corporation
BDA	Blu-ray Disc Association
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CRT	Cathode Ray Tube
DECE	Digital Entertainment Content Ecosystem
EBU	European Broadcast Union
EETF	Electrical-Electrical Transfer Function
EOTF	Electro-Optical Transfer Function
EXR	Extended Dynamic Range
HD	High Definition
HDR	High Dynamic Range
HFR	High Frame Rate
HLG	Hybrid Log Gamma
IDT	Input Device Transform
ITU	International Telecommunication Union
LCD	Liquid Crystal Display

LCML	Light Modulating Cell Layer
LED	Light Emitting Diode
LPCM	Linear Pulse Code Modulation
LUT	Lookup-Tabelle
MaxCLL	Maximum Content Light Level
MaxFALL	Maximum Frame Average Light Level
NHK	Nippon Hoso Kyokai, Japanische Rundfunkgesellschaft
ODT	Output Device Transform
OETF	Opto-Electronic Transfer Function
OLED	Organic Light Emitting Diode
OOTF	Opto-Optical Transfer Function
PQ	Perceptual Quantization
SDR	Standard Dynamic Range
SMPTE	Society of Motion Picture and Television Engineers
UHD	Ultra High Definition
VFX	Visual Effects

Vorwort

Die Film- und Fernsehindustrie ist bekannt für ihre Marketingbegriffe, die den Konsumenten von technischen Neuerungen als Kaufargument überzeugen soll. Kinos bieten gegen Aufpreis Säle mit verbesserter Tonqualität, hochauflösender Projektion oder auch einfach ergonomisch geformter Sitze. Fernsehhersteller werben mit tiefem Schwarz, satteren Farben und feineren Details.

Um sich von der Konkurrenz abzuheben, werden Wörter geschaffen, die nicht selten kaum noch errahnen lassen, welche Technologie sich hinter ihnen verbirgt. Beliebt sind dabei Wortbausteine wie High, Super, Nano, Dynamic, Advanced oder schlicht Ultra.

Solche Marketingphrasen sind kein Phänomen des Internetzeitalters. Ein berühmtes historisches Beispiel stellt Cinemascope dar. Mit der schnell voranschreitenden Verbreitung von Fernsehgeräten im Amerika der 50er Jahre, brauchte Twentieth Century Fox ein neues Argument, um die Kunden zu Kinobesuchen zu bewegen. Um ein Kinobild visuell von einem Fernsehbild zu differenzieren, wurde das Bildseitenverhältnis um das Doppelte verbreitert. Ein solches Breitbild ließ sich nur auf einer Kinoleinwand erleben und tatsächlich stiegen somit die Besucherzahlen wieder an.

Das technische Verfahren hinter Cinemascope war denkbar einfach und auch keine Neuentwicklung. Der Anamorphskop, eine Zerrlinse, die das aufgenommene und auch das projizierte Bild auf einer Achse staucht bzw. streckt, ist eine Erfindung der 20er Jahre. Dass diese Technik der Bildqualität unzutraglich war, spielte aus wirtschaftlicher Sicht keine Rolle. Die Leute gingen wieder ins Kino (Hart 1996).

Bis heute gilt Cinemascope als Inbegriff des Kinolooks. Die optischen Unzulänglichkeiten wie chromatische Aberrationen, geometrische Verzerrungen, Randunschärfe, Vignettierung, verringerter Kontrast und die berühmten Blendenflecke gelten als besondere Charakteristik, die sich Objektivhersteller gut bezahlen lassen, ein gelungener Coup der Twentieth Century Fox.

Das Recyceln und Umverpacken alter Technologien ist auch heute das Mittel der Wahl, um den Konsumenten zu überzeugen. Als Samsung den Trend zu OLED-Displays nicht mitging, wurde die nächste Generation weitgehend herkömmlicher LCD-TVs des koreanischen Tech-Giganten Quantum Dot LED kurz QLED (deutsch: Quantenpunkt-Leuchtdiode) genannt und als eine Art Weiterentwicklung von OLED verkauft. Die Ähnlichkeit der Abkürzungen dürfte durchaus gewollt sein.

Natürlich ist nicht jede Marketing-Kampagne der AV-Branche von Erfolg gekrönt. Manche Technologien werden trotz aller Bemühungen nicht vom Kunden angenommen. Als Paradebeispiel sei hier nur kurz 3D genannt.

Ist also HDR nur ein weiterer Hype? Mit High und Dynamic gehören immerhin zwei der drei Begriffe zu den bereits beschriebenen Wortbausteinen für Technologie-

marketing. Anders betrachtet stehen hinter HDR immerhin mehrere Technologien, die um die Vorreiterschaft bei der Definition des nächsten Sendestandards für digitale Videosignale kämpfen. Der Formatkrieg ist schon voll im Gang und vergleichbar mit VHS gegen Betamax und Blu-Ray gegen HDDVD.

Mit Perceptual Quantization (PQ) und Hybrid Log Gamma (HLG) sind zwei HDR-Technologien entstanden, die nicht nur ein realitätsnäheres Bild liefern können, sie lösen auch bestehende Probleme mit herkömmlicher Gamma-Quantisierung. Sie bringen jedoch neue, ganz eigene Hürden mit sich, die es zu überwinden gilt.

Danksagung

Zuerst gebührt mein Dank Herrn Prof. Ulrich Schmidt, der mich während meiner Zeit im Praktikum und der ihm folgenden Schreibphase betreut hat und die Themenfindung zu einem so produktiven und unkomplizierten Prozess gemacht hat.

Ich möchte mich bei meinen Kollegen und Kolleginnen der Firma The Marmalade bedanken, die mich mit Sachverstand, wertvollen Anregungen und nicht zuletzt modernem Equipment unterstützt haben. Johannes Dornow danke ich für die besondere Chance bei The Marmalade erste Berufserfahrungen machen zu dürfen und gleichzeitig die Themen dieser Arbeit zu erforschen.

Für die tatkräftige Unterstützung bei der Kalibrierung und Evaluation von HDR-Displays danke ich Matthias Wilkens.

Allen Beteiligten der Produktion des Robe-Events im Produktionslabor der HAW Hamburg danke ich für das mit technischer Perfektion aufgenommene Testmaterial.

Meinen Eltern danke ich für die stetige Unterstützung während meines Studiums der Medientechnik.

1 Einleitung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den Technologien und Standards hinter HDR-Video und ihrer Implementierung in den Arbeitsablauf einer Videoproduktion. Besonders beleuchtet werden das von Dolby Laboratories entwickelte Verfahren der perzeptiven Quantisierung (PQ) sowie Hybrid Log Gamma (HLG) von der British Broadcasting Corporation (BBC) und Nippon Hoso Kyokai, Japanische Rundfunkgesellschaft (NHK). Dabei werden die Technologien hinsichtlich ihres Anwendungsbereichs miteinander verglichen und auf ihre Relevanz am Markt im Allgemeinen und im Speziellen für das Produktionsumfeld im Bereich Werbefilm der The Marmalade Holding GmbH überprüft. Beide Technologien sollen vorerst testweise in eine bereits bestehende Infrastruktur integriert und in der Praxis erprobt werden.

Untersucht werden die technischen und kreativen Herausforderungen in den verschiedenen Phasen einer HDR-Produktion. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist die Empfehlung einer modifizierten Produktionsumgebung zur Kreation von HDR-Inhalten sowie die Identifikation weiterhin bestehender Probleme, Herausforderungen und Chancen zur Weiterentwicklung.

Der theoretische Teil beschäftigt sich mit den Grundlagen der konkurrierenden Technologien zur Aufnahme, Speicherung, Übertragung und Wiedergabe von HDR-Videomaterial. Es werden Ziel, Methodik und Endergebnis der Entwicklung von PQ und HLG betrachtet. Die aus diesen Entwicklungen entstandenen Standards der International Telecommunication Union (ITU) werden vorgestellt und als Basis für die spätere praktische Anwendung definiert.

Da für die Distribution von HDR-Inhalten nicht nur die Kompatibilität des Produktionsumfelds zu den aktuellen technischen Standards von Nöten ist, sondern auch die teilweise herstellereigene Auslegung der Spezifikationen eine Rolle spielt, werden die verschiedenen Implementationen von PQ und HLG betrachtet. Ersteres wird vorrangig durch Dolby Vision, HDR10 und HDR10+ vertreten. HLG hingegen wird zwar nicht unter verschiedenen Markennamen vertrieben, unterscheidet sich jedoch teilweise in der Umsetzung des Standards.

Zur Zeit genießt HDR noch keinen besonders hohen Verbreitungsgrad. In den meisten Fällen wird auf absehbare Zeit der Standard Dynamic Range (SDR)-Master einer Produktion also der wichtigere sein. Inwiefern Abwärtskompatibilität durch bestehende Standards gegeben ist und an welchen Stellen diese manuell hergestellt werden muss, soll untersucht werden.

Mit HDR kommt in der Regel nicht nur ein erweiterter Dynamikumfang, sondern auch ein größerer Farbraum. Inwieweit dieser Auswirkung auf die Produktion und das Endprodukt haben kann, soll analysiert werden, um Problemen bei der praktischen

1 Einleitung

Umsetzung vorbeugen zu können.

HDR stellt hohe Anforderungen an das Farbmanagement der Produktionskette. Nicht jedes Aufnahme- und Wiedergabemedium interpretiert Farben und Kontraste auf gleiche Weise. Oftmals muss Material aus verschiedenen Quellen wie Computernimation und -grafik, unterschiedlichen Kameras oder dem Archiv zusammengeführt werden. Das Endergebnis muss auf ebenso unterschiedlichen Endgeräten präsentiert werden. Dabei müssen Fassungen nicht nur für variierende Auflösungen und Bildraten, sondern auch für verschiedene Farbräume und eben für SDR- und HDR-fähige Geräte erstellt werden. Ebenfalls müssen Erzeugnisse so archiviert werden, dass sie auch in Zukunft in derzeit noch gar nicht bekannte Endformate gewandelt werden können. Alle diese Vorgänge dürfen die kreative Intention des Gestalters nicht verfälschen.

Zu diesem Zweck wurde das Academy Color Encoding System (ACES) von der Academy of Motion Picture Arts and Sciences (AMPAS) entwickelt. Im theoretischen Teil dieser Arbeit soll hierzu ein technischer Überblick gegeben werden, mit dem eine Einschätzung zur Implementierung von ACES in einen HDR-Arbeitsablauf möglich sein soll.

Keine Standardisierung kann alle Unwägbarkeiten aus dem Weg räumen. Im Falle von HDR wird diese Tatsache besonders deutlich. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Arbeit gibt es keine kommerziell erhältliche Displaytechnologie und keine Kamera, die den vollen Tonwertumfang der aktuellen HDR-Standards abbilden könnte. Was passiert also mit nicht darstellbaren Signalanteilen? Selbst ein HDR-Referenzmonitor reicht nicht an die Grenzen der Standardisierung heran. Es muss also eine graduelle Interpretation des Signals sowohl in Farbe als auch in Helligkeit vorgenommen werden.

Weitere potentielle Probleme, wie z. B. die Betrachtung von HDR-Material in Abhängigkeit des Umgebungslichts und die Verwendung des erweiterten Helligkeitsbereichs, sollen identifiziert und analysiert werden, um im praktischen Teil auf sie Bezug nehmen zu können.

Der praktische Teil dieser Arbeit befasst sich mit der Modifikation der technischen Arbeitsschritte bei The Marmalade, um Endprodukte in PQ- oder HLG-Formaten anbieten zu können. Dabei müssen alle Phasen der Produktion vom Dreh über die Postproduktion bis hin zur Distribution betrachtet werden.

Anhand der im theoretischen Teil gewonnenen Erkenntnisse wird zunächst festgelegt, auf welche Endformate der Workflow zugeschnitten sein muss, um den Anforderungen zukünftiger Werbeproduktionen gerecht zu werden. Dabei gilt es, vorhandene Ressourcen möglichst effektiv zu nutzen und nur dort bestehende Arbeitsschritte zu modifizieren, wo sich auch ein tatsächlicher Mehrwert erzielen lässt.

Auch werden in diesem Teil die Grenzen des Erreichbaren deutlich, denn begrenzte Ressourcen schränken natürlich das Endergebnis ein. Die größte Hürde stellen hier die vorhandenen Displays dar. Zwar muss nicht in jeder Phase der Produktion das Bild auf einem HDR-Display betrachtet werden können, bei allen farbkritischen Prozessen und bei Kundenpräsentationen sollte dies jedoch möglich sein. Hierfür sollen

1 Einleitung

Consumer-OLED-TVs zum Einsatz kommen, welche bereits seit mehreren Jahren als Client-Monitore verwendet werden. Inwiefern sich solche Displays als Ersatz für bisher nicht vor Ort vorhandene HDR-Referenzmonitore eignen, muss messtechnisch ermittelt werden.

Für einen vollständigen HDR-Workflow müssen die verschiedenen Werkzeuge der Postproduktion das Material auf gleiche Weise interpretieren können. The Marmalade nutzt verschiedene Software für 3D-Modellierung, Compositing, Schnitt und Color-grading. Ob das bereits genannte ACES hier Abhilfe schaffen kann, wird in der Praxis erprobt.

Das Ziel des praktischen Teils besteht darin, die gesamte geschaffene Produktionsumgebung in einem Test zu erproben und das Endprodukt in einem Vergleich von SDR- und HDR-Master zu evaluieren. Ziel ist hierbei auf der einen Seite die möglichst genaue Orientierung an geltenden Standards und andererseits ein Ergebnis, welches sowohl in SDR als auch in HDR der kreativen Intention entspricht, ohne dabei die visuellen Vorzüge von HDR zu vernachlässigen.

Die genannten Anforderungen definieren den Erfolg des Projekts und bieten Anhaltspunkte für eine abschließende Bilanz. Sie soll erläutern, ob die Integration von HDR in den Produktionsablauf von The Marmalade erfolgreich war und welche Schritte gegebenenfalls noch nötig sind, um HDR als Endformat anbieten zu können.

Zudem soll diskutiert werden, inwiefern mangelnde Standardisierung oder die technische Umsetzung geltender Vorgaben die Produktion und den Konsum von HDR-Inhalten beeinflussen. Hierbei werden die im Verlauf dieser Arbeit aufgetretenen Probleme zusammengetragen und auf ihre Ursachen zurückgeführt.

2 Grundlagen zur Quantisierung von Videosignalen

Die einfachste Form den Pegel eines Signals zu interpretieren, besteht in einer linearen Zuordnung. Eine Verdoppelung, Verdreifachung, Vervierfachung usw. des Eingangssignals entspricht einer Verdoppelung, Verdreifachung, Vervierfachung des Ausgangssignals.

$$f(x) = ax \quad \text{mit } a: \text{ linearer Verstärkungsfaktor}$$

Es ist hierbei nicht von Bedeutung, ob analog oder digital übertragen wird. Solange eine elektrische Spannung oder ein digital interpretierter Wert dem Ausgang des Systems linear zugeordnet wird, ist die Übertragungsfunktion und damit die Kennlinie des Systems linear.

Bei der Entwicklung der Digitaltechnik galt es, die bisher verwendeten analogen Signale zu quantisieren und somit diskreten Werten zuzuordnen. In der Audiotechnik wurde der elektrische Pegel zwischen 0V und der Bezugsgröße von $0,775V_{\text{eff}}$ (0dBu) mit in der Regel 16Bit Auflösung quantisiert und per Puls-Code-Modulation zeitdiskret übertragen. (Görne 2014: 157 ff.) Am Namen dieses Verfahrens – Linear Pulse Code Modulation (LPCM) – lässt sich eine wichtige Eigenschaft ableiten: Linearität.

Beim visuellen Medium des bewegten Bildes beschreibt der elektrische Signalpegel die Helligkeit und später beim Komponentensignal auch die Farbe eines Bildpunktes. Die mathematische Beschreibung dieses Vorgangs wird in optisch-elektrischer Richtung Opto-Electronic Transfer Function (OETF) genannt. Die umgekehrte, elektrisch-optische Wandlung, wird mit der Electro-Optical Transfer Function (EOTF) beschrieben. Die Wandlung des Lichts der Szene zum Licht eines Wiedergabegeräts wird mit der Opto-Optical Transfer Function (OOTF) erfasst (Rep. ITU-R BT.2390-4 2018: 6 f.). Die elektronische Signalverarbeitung hingegen geschieht mit der Electrical-Electrical Transfer Function (EETF) (Rep. ITU-R BT.2390-4 2018: 19).

Zu Beginn der elektronischen Bewegtbildübertragung standen auf Seite der Aufnahme Kameras mit Bildaufnahmeröhren und auf Betrachtungsseite Kathodenstrahlröhrenbildschirme, englisch: Cathode Ray Tube (CRT). Diese Bildschirme wandelten die elektrische Spannung des Eingangssignals zeilenweise und seriell zur Helligkeit eines Bildpunktes auf der Mattscheibe. Die Wandlung von Spannung zu Helligkeit erfolgte systembedingt jedoch nicht linear. Dieser Umstand wurde aber nicht auf Seite des Monitors korrigiert, sondern durch eine Vorentzerrung des Signals auf Aufnahmeseite. Durch diese Vorentzerrung konnte gewährleistet werden, dass die Gesamtheit des

2 Grundlagen zur Quantisierung von Videosignalen

Systems wieder linear arbeitete (Schmidt 2013: 463). Helligkeit wird zu elektrischer Spannung gewandelt und lediglich linear gedämpft bzw. verstärkt wieder zu Helligkeit am Monitor zurückgewandelt.

Die Nichtlinearität der Komponenten lässt sich vereinfacht (näherungsweise und ohne Berücksichtigung der Schwarzwertkontrolle) mathematisch beschreiben:

$$\begin{aligned} \text{OETF: } V(L) &= a_1 L^{\frac{1}{\gamma}} \\ \text{EOTF: } L(V) &= a_2 V^\gamma \end{aligned} \quad (2.1)$$

V	Signal
L	Luminanz
$a_{1,2}$	Verstärkung/Dämpfung
γ	Grad der Verzerrung

Bis auf die Dämpfung bzw. Verstärkung ist also die eine Funktion die Umkehrung der jeweils anderen. Die Helligkeit des Monitors entspricht zwar nicht mehr der Helligkeit des aufgenommenen Objekts, sie ist jedoch linear abhängig und bildet somit die Szene akkurat ab. Bildtechnisch gesprochen bleibt der Kontrast von Szene zu Abbildung konstant. Die Stärke der Verzerrung wird durch die Variable γ (Gamma) angegeben.

In der Videotechnik unterscheidet sich das Gamma eines Monitors oder Projektors je nach verwendetem Standard. Ein Gamma von 2,2 wird heute für Computermonitore mit sRGB-Farbraum verwendet (Anderson, Chandrasekar, Motta & Stokes 1996). 2,4 ist der Wert für HDTV-Monitore (Rec. ITU-R BT.1886 2011: 2). Projektoren im Kino verwenden hingegen ein Gamma von 2,6 (Kennel 2013).

Da mit Beginn der elektronischen Videoübertragung zunächst ausschließlich Röhrenmonitore zum Einsatz kamen, definierte sich die Gamma-Kurve durch die Eigenheiten eben dieser Displaytechnologie. Neuartige Displays auf LCD-, Plasma- oder OLED-Basis mussten das Verhalten eines CRT-Monitors also simulieren. Erst 2011 wurde mit der BT.1886 der ITU die EOTF üblicher Referenzmonitore messtechnisch erfasst und mathematisch beschrieben. Empfohlen wird ein Gamma von 2,4 am Monitor, obwohl die Kameras üblicherweise mit Gamma 2,2 ($1/2,2 \approx 0,45$) vorentzerren und für für dunkle Bereiche sogar eine lineare Kennlinie (Gleichung 2.2) zur Rauschunterdrückung aufweisen (Rec. ITU-R BT.709-6 2015: 3).

$$V = \begin{cases} 1,099L^{0,45} - 0,099 & 1 \geq L \geq 0,018 \\ 4,5L & 0,018 > L \geq 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

L	Luminanz des Bildes $0 \leq L \leq 1$
V	abhängiges elektrisches Signal

Das unterschiedliche Gamma an Kamera und Monitor wird zur Neutralisierung des wahrnehmungspsychologischen Effekts des Simultankontrastes verwendet. Dieses



Abbildung 2.1: Simultankontrast, eigene Visualisierung

Phänomen beschreibt die unterschiedliche Kontrastwahrnehmung in Abhängigkeit der Luminanz umliegender Objekte.

Die zwei inneren Quadrate haben den exakt gleichen Luminanzwert. Dennoch wirkt das rechte dunkler als das Linke. Um den gleichen wahrgenommenen Kontrast eines Bildes auf einem Bildschirm oder einer Leinwand in dunkler Umgebung zu erzeugen wie in der Realität, wird das Gamma des Bildes bewusst verzerrt (Borer & Cotton 2015: 4).

Die Kombination von Gamma 2,2 in der Kamera und Gamma 2,4 am Monitor sorgt für ein sogenanntes Systemgamma von 1,2. Dieser Wert wird für professionelle Monitore in dunkler Umgebung als Referenz betrachtet. Manche moderne Displays bieten neben der klassischen Gamma-Funktion zusätzlich eine EOTF, die sich an der alternativen Kennlinie der BT.1886 orientiert und somit noch näher an die Charakteristik von Cathode Ray Tube (CRT)s herankommt (Rec. ITU-R BT.1886 2011: 3 f.).

Bei der Definition des digitalen Videosignals wurde die Gamma-Vorentzerrung beibehalten. Auf den ersten Blick scheint dies keinen Nutzen zu bieten, schließlich muss das digitale Signal am Display ohnehin zu elektrischer Spannung gewandelt werden, um die Helligkeit eines Bildpunktes steuern zu können. An dieser Stelle könnte auch die Nichtlinearität des Displays kompensiert und das Systemgamma angewendet werden.

Es stellt sich jedoch heraus, dass die nichtlineare Quantisierung von Helligkeitsinformationen einen Vorteil bei der Codierungseffizienz bietet. Das menschliche Auge differenziert Helligkeiten in dunklen Bereichen deutlich feiner als in hellen (genauere Betrachtung in Kapitel 3). Bei Verwendung der üblichen Gamma-Vorentzerrung, werden 50% des Signalpegels verwendet, um die Helligkeitswerte zwischen 0% und 26% der Maximalaussteuerung zu beschreiben (Abbildung 2.2).

Bei Systemen mit begrenzter Bandbreite ist dies von Vorteil, da im Vergleich zu linearer Quantisierung weniger Quantisierungsstufen verwendet werden können.

2 Grundlagen zur Quantisierung von Videosignalen

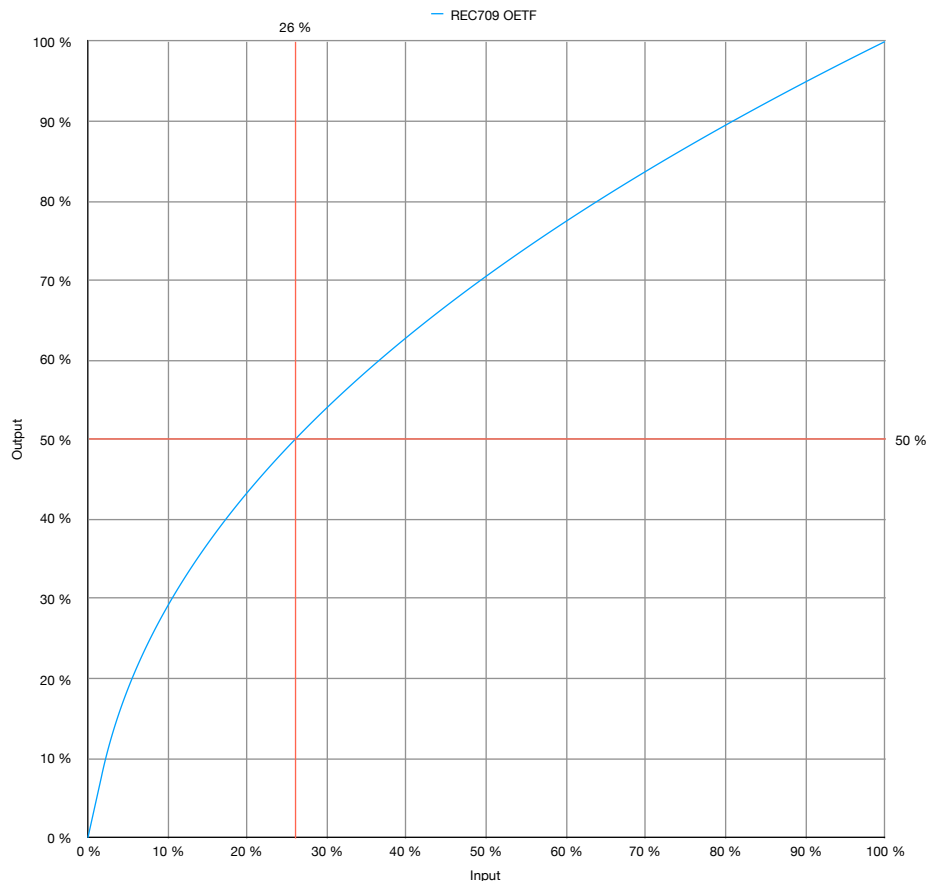


Abbildung 2.2: OETF nach REC. ITU-R BT.709

So führt die Darstellung eines mit 10Bit quantisierten Bildes auf einem Klasse-1-Referenzmonitor mit einem Helligkeitsbereich von $0,001\text{cd}/\text{m}^2$ bis $100\text{cd}/\text{m}^2$ zu fast keinen wahrnehmbaren Sprüngen zwischen benachbarten Helligkeitswerten. Bei linearer Quantisierung hingegen treten sichtbare Artefakte in dunklen Bereichen auf (siehe Kapitel 3).

Selbst im Consumer-Segment, wo bis heute meistens mit 8-Bit-Quantisierung gearbeitet wird, sind bei den meisten Bildinhalten keine Artefakte zu erkennen. Bei weichen Verläufen macht sich die grobe Quantisierung jedoch bemerkbar.

Die Forschung zu HDR-Video entwickelt den Ansatz Helligkeitsinformationen in Abhängigkeit der menschlichen Kontrastsensitivität zu quantisieren weiter. Moderne Displaytechnologien bieten immer höhere Kontraste, die mangelnde Quantisierungspräzision offenlegen.

Das Ziel bei der Entwicklung der beiden hier betrachteten Technologien zu HDR-Video – PQ und HLG – ist es, einen großen Dynamikumfang mit der kleinstmöglichen Anzahl Quantisierungsstufen frei von Artefakten wiederzugeben.

3 Forschung und Entwicklung zu Perceptual Quantization

Das von Dolby Laboratories entwickelte Verfahren zur Quantisierung von Videosignalen mit erweitertem Dynamikumfang basiert auf den Erkenntnissen zur menschlichen Kontrastwahrnehmung von Peter G. J. Barten. Die Orientierung an der Wahrnehmung (Perzeption) spiegelt sich auch im Namen der Technologie wieder.

3.1 Quantisierung in Abhängigkeit zur menschlichen Kontrastsensitivität

Die sogenannte Barten-Ramp definiert den Schwellwert der wahrnehmbaren Helligkeitsänderung in Abhängigkeit zur betrachteten Helligkeit.

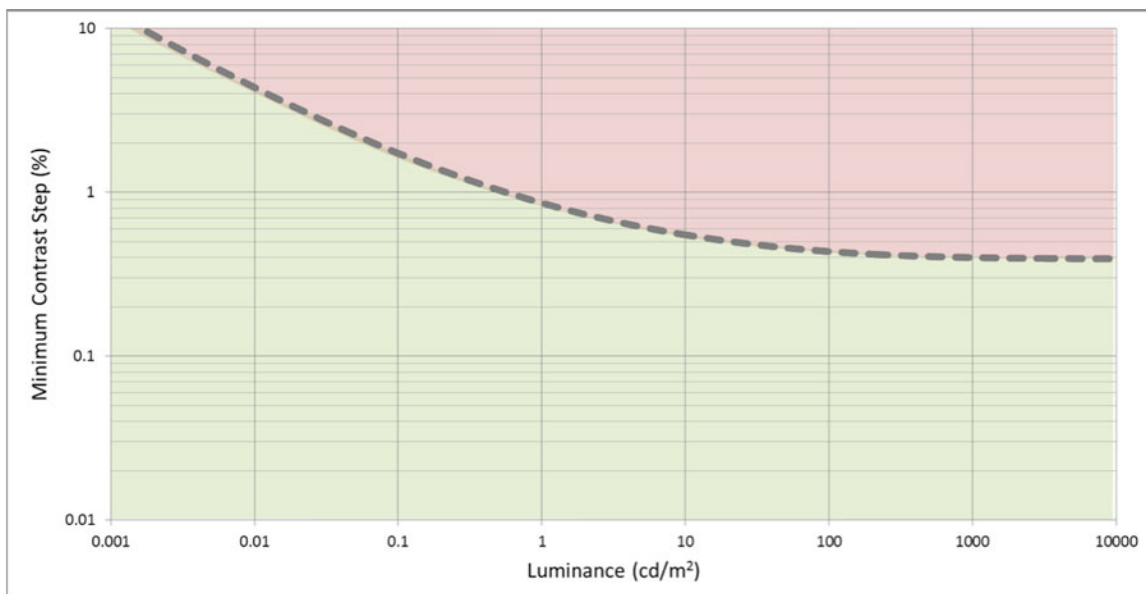


Abbildung 3.1: Schwellwert der wahrnehmbaren Helligkeitsänderung nach Barten (Miller 2014: 8)

Beispiel: Bei einer Helligkeit von $0,01\text{cd/m}^2$ liegt der Schwellwert bei ca. 4%. Demnach wäre der nächste differenzierbare Helligkeitswert nach unten $0,0096\text{cd/m}^2$

und nach oben $0,0104\text{cd/m}^2$. Die minimal wahrnehmbare Differenz beträgt hier also $0,0004\text{cd/m}^2$.

Bei 1000cd/m^2 erhalten wir einen Schwellwert von ca. 0,4%. Die minimal wahrnehmbare Differenz liegt hier bei 4cd/m^2 und ist somit zehntausend mal größer als bei $0,01\text{cd/m}^2$.

Diesen Sachverhalt kann man sich bei der Quantisierung zu Nutze machen. Zunächst muss jedoch festgelegt werden, welcher Helligkeitsbereich überhaupt von der Quantisierung abgedeckt werden soll.

Bei der Entwicklung des Perceptual Quantizers entschied man sich bei Dolby Laboratories für einen Schwarzpunkt von 0cd/m^2 und ein Helligkeitsmaximum von 10.000cd/m^2 . Dieser Helligkeitsbereich ist das Ergebnis von Tests an Probanden, die Schwarz- und Weißpunkt eines experimentellen Displays mit $0,004\text{cd/m}^2$ bis 20.000cd/m^2 Leuchtdichte selbst bestimmen konnten. Die gewählte maximale Leuchtdichte von 10.000cd/m^2 befriedigte 90% der Teilnehmer. Diese Helligkeit ist kurz vor der Blendung und vergleichbar mit dem Blick in eine Leuchtstoffröhre. Fast alle Probanden regelten den Schwarzwert auf das erreichbare Minimum (Brooks 2014: 3).

Abseits der Präferenzen der Versuchsteilnehmer wurden bei der Definition des Helligkeitsumfangs auch andere Aspekte der visuellen menschlichen Wahrnehmung berücksichtigt. Der im Standard definierte absolute Nullpunkt für Schwarz ergibt sich aus der Tatsache, dass das menschliche Auge mit genug Adaptionzeit in der Lage ist, auch noch in extrem dunklen Lichtverhältnissen ($0.00001 - 0.000001\text{cd/m}^2$) Objekte wahrzunehmen (Miller 2014: 7). Bei Quantisierung mit 12Bit liegt der erste Wert über dem Nullpunkt bei $0,000004\text{cd/m}^2$ (Gleichung 3.1) und somit knapp über der Wahrnehmungsschwelle bei vollständiger Adaption und gutem Sehvermögen. Gleichung 3.1 wurde der BT.2100 der ITU entnommen.

$$F_D = \text{EOTF}[E'] = 10000Y$$

$$Y = \left(\frac{\max[(E'^{1/m_2} - c_1), 0]}{c_2 - c_3 E'^{1/m_2}} \right)^{1/m_1} \quad (3.1)$$

E'	Nicht-linearer normierter Farbwert [0,1]
F_D	Leuchtdichte am Display
Y	Normalisierte Helligkeit am Display [0,1]
m_1	$2610/16384 = 0,1593017578125$
m_2	$2523/4096 \cdot 128 = 78,84375$
c_1	$3424/4096 = 0,8359375 = c_3 - c_2 + 1$
c_2	$2413/4096 \cdot 32 = 18,8515625$
c_3	$2392/4096 \cdot 32 = 18,6875$

Um die Werte im gewählten Helligkeitsbereich unterhalb der Kontrastsensitivitätsgrenze quantisieren zu können, wurde von Dolby eine Übertragungsfunktion (Gleichung 3.1, Abbildung 3.2) entwickelt, die sich an der Barten-Ramp orientiert. Bei

3 Forschung und Entwicklung zu Perceptual Quantization

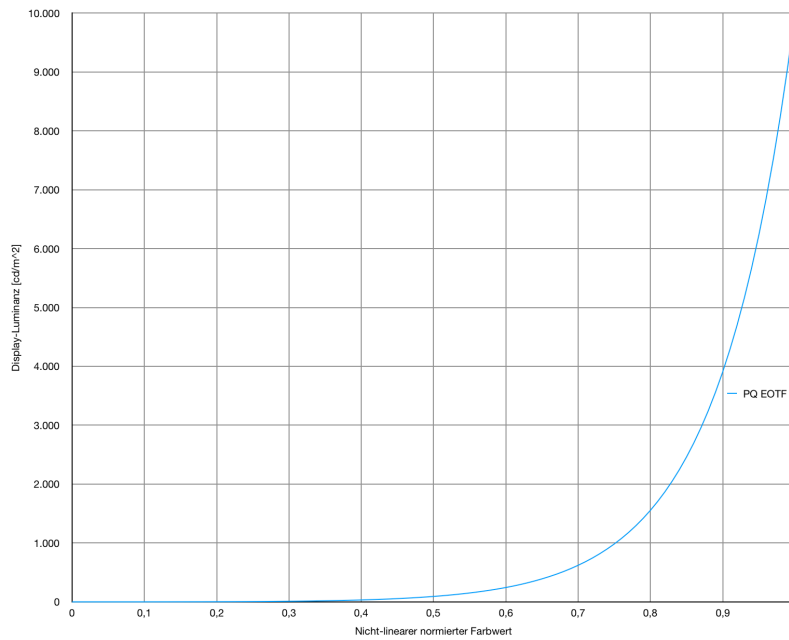


Abbildung 3.2: PQ-EOTF

einer Quantisierung mit 12Bit überschreitet sie an keinem Punkt die Schwelle (siehe Abbildung 3.3).

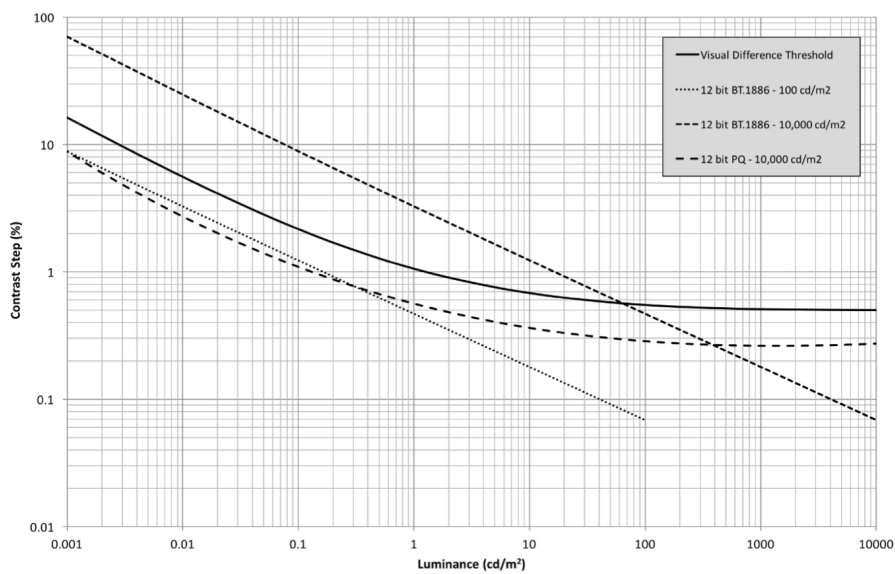


Abbildung 3.3: Vergleich zur Quantisierungseffizienz BT.1886 und PQ bei 12Bit (Rep. ITU-R BT.2390-4 2018: 15)

Im gezeigten Graphen 3.3 ist ebenfalls eine Gamma-Funktion nach BT.1886 zu

sehen, wie sie von einem Display mit einer maximalen Leuchtdichte von 100cd/m^2 interpretiert werden würde. Diese Gamma-Funktion überschreitet ebenfalls nicht die Wahrnehmungsschwelle. Warum sich jedoch diese Art der Quantisierung bei 12Bit-Präzision nicht für eine maximale Helligkeit von 10.000cd/m^2 verwenden lässt, zeigt die dritte Funktion. Sie liegt weit über der Barten-Schwelle.

Tatsächlich wäre laut Dolby eine Gamma-Quantisierung mit 15Bit erforderlich, um Artefakte wie Banding zu verhindern. Bei logarithmischer Quantisierung, welche schon seit langem aufgrund ihrer hohen Effizienz in Kameras Verwendung findet, wären es 13Bit.

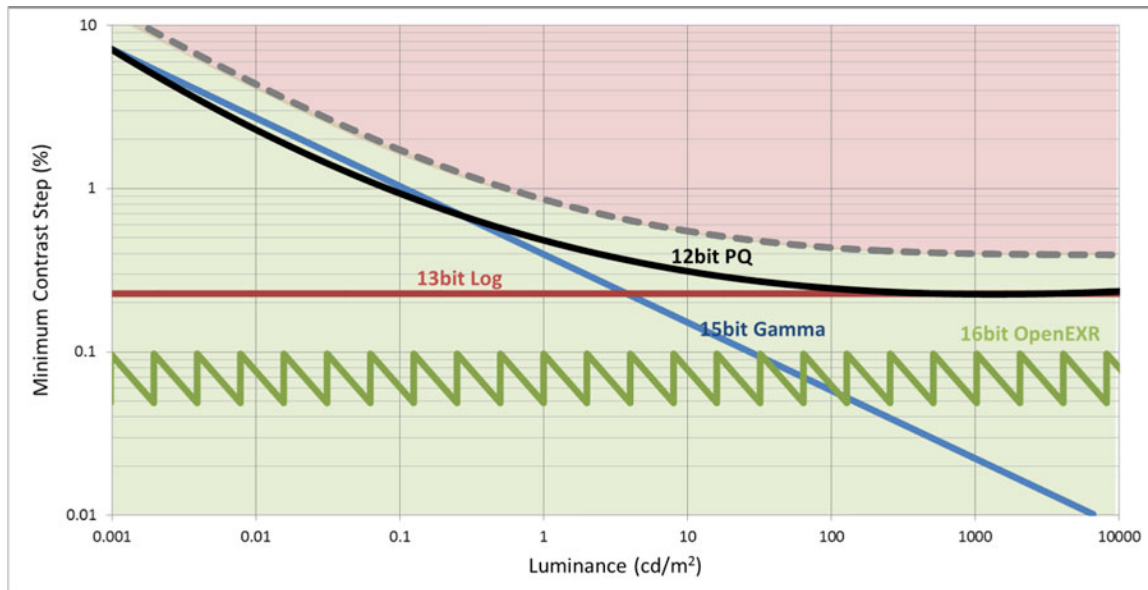


Abbildung 3.4: Vergleich zur Quantisierungseffizienz von Gamma, Log, PQ und Linear mit Fließkomma (OpenEXR) (Miller 2014: 10)

Auf Fließkommazahlen (16Bit oder mehr) basierende Technologien wie OpenEXR (Extended Dynamic Range) können mit HDR-Material weiterhin verwendet werden, da auch sie die nötige Quantisierungspräzision aufweisen. Dies ist besonders wichtig für Anwendungen im Visual Effects (VFX)-Bereich, da hier 16Bit-Fließkomma-Quantisierung weit verbreitet ist und HDR somit keine große technische Umstellung bedeutet.

3.2 Quantisierungsstufen im realen Produktionsumfeld

Für die Signalübertragung stellt eine Quantisierung mit 12Bit eine erhebliche Herausforderung dar. Im professionellen Umfeld unterstützt die bestehende Infrastruktur nur in den seltensten Fällen mehr als 10Bit pro Kanal bei der Übertragung. Daher stellt sich die Frage, ob unter Aufgabe von 2Bit Präzision ein deutlicher Qualitätsverlust zu erwarten ist.

3 Forschung und Entwicklung zu Perceptual Quantization

Bei der Entwicklung des Perceptual Quantizers wurden abseits der theoretischen Betrachtung des Schwellwerts auch praxisnahe Tests durchgeführt. Bei einem dieser Tests kam das Verfahren der Nearest Neighbour Analyses zum Einsatz. Auf einer neutral gefärbten Fläche (6500K) wurden Quadrate mit den nächstgelegenen Farbwerten gezeigt, plus/minus eine Quantisierungsstufe für jeden Farbkanal und alle daraus entstehenden möglichen Kombinationen.

Das entstehende Testbild nennt sich JND-Cross-Pattern (Just Noticeable Difference) und wurde auf einem Dolby PRM-4200 HDR-Referenz-Display einer Sichtprüfung unterzogen. Dabei wurde das Testbild mit unterschiedlichen Helligkeiten gezeigt, um die Leistung verschiedener Quantisierungskennlinie vergleichen zu können.

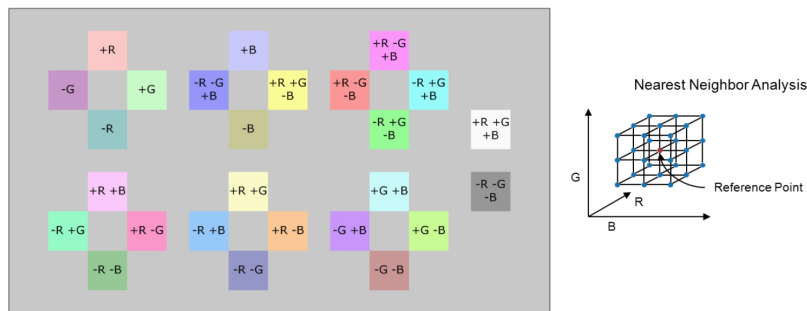


Abbildung 3.5: JND Cross Test Pattern (Miller, Nezamabadi & Daly 2012: 7)

Zu Illustrationszwecken sind die hier gezeigten Testfelder durch Sättigung und Kontrast hervorgehoben. Das eigentliche Testbild sieht für das menschliche Auge bei perfekter Quantisierung aus wie eine ebene graue Fläche.

Das JND Cross Test Pattern ist das herausforderndste Testbild zur Messung von Quantisierungseffizienz. Eine Quantisierungskennlinie, die bei diesem Test keine sichtbaren Artefakte erzeugt, wird auch jedes andere Bild artefaktfrei wiedergeben können. Hierfür waren nie mehr als 11Bit bei PQ (Tabelle 3.1) notwendig (Miller, Nezamabadi & Daly 2012: 8). Dies deckt sich mit der theoretischen Betrachtung nach Barten.

Gray Field Luminance: (cd/m ²)	0.001	0.005	0.01	0.03	0.05	0.1	1	5	10	50	100	250	500
PQ 1K	11	11	10	11	10	10	10	10	10	10	10	10	9
PQ 10K	11	11	11	10	11	11	11	11	10	11	10	10	10
Rec1886 1K	>12	>12	>12	>12	>12	12	12	12	12	10	10	10	9
Rec1886 2K	>12	>12	>12	>12	>12	>12	>12	12	12	11	11	10	9

Tabelle 3.1: JND Cross Testergebnisse, benötigte Quantisierungspräzision (Miller, Nezamabadi & Daly 2012)

Verglichen wurden die klassische Gamma-Quantisierung und die perzeptive Quantisierung jeweils bei unterschiedlichen Spitzenhelligkeiten. Auffällig ist hierbei die mangelnde Präzision der Gamma-Funktion bei niedriger Helligkeit. Hier wären theoretisch über 12Bit pro Kanal nötig, was im Test aufgrund technischer Limitierungen nicht erreichbar war. Ebenfalls bemerkenswert ist der geringe Unterschied zwischen einer perzeptiven Quantisierung mit 1000cd/m^2 Spitzenhelligkeit und der Verzehnfachung auf 10.000cd/m^2 . Dies lässt sich mit der deutlichen Abnahme der absoluten Kontrastsensitivität bei größeren Helligkeiten erklären, die bereits anhand des Barten-Modells (Abschnitt 3.1) erläutert wurde.

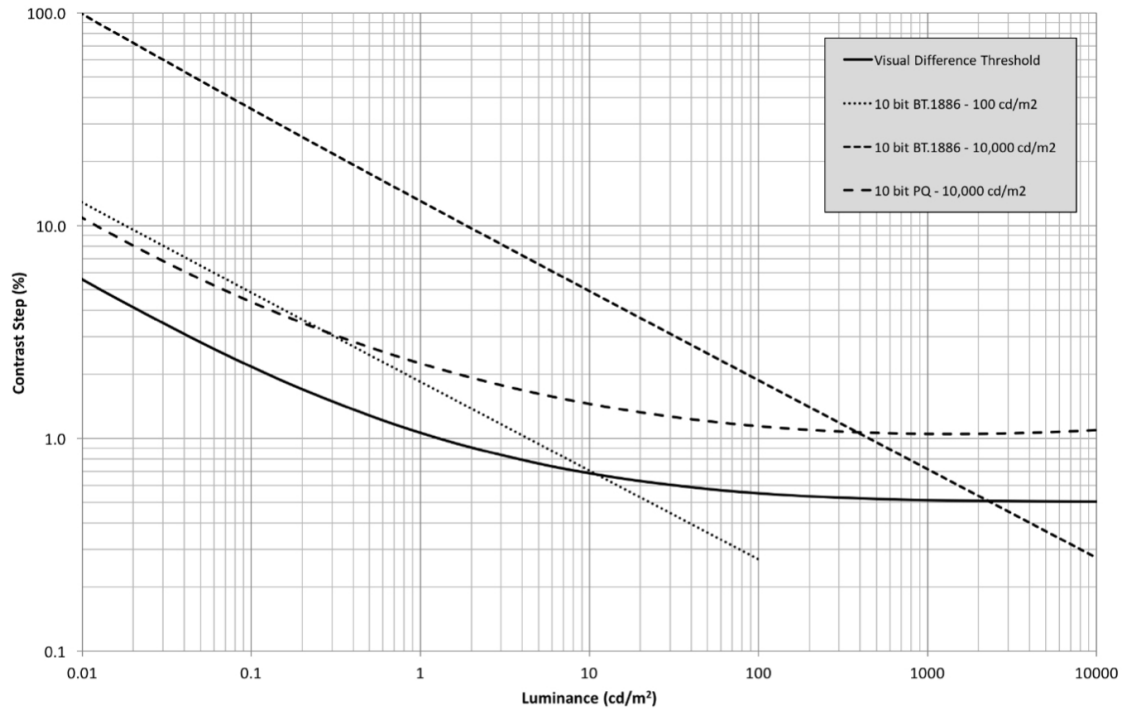


Abbildung 3.6: Vergleich zur Quantisierungseffizienz BT.1886 und PQ bei 10Bit (Rep. ITU-R BT.2390-4 2018: 16)

Bei 10Bit-Quantisierung wird die Barten-Schwelle deutlich überschritten (Abbildung 3.6). Dies relativiert sich jedoch durch den Fakt, dass dies auch bei der bisherigen Gamma-Quantisierung der Fall war – zumindest in dunklen Bildbereichen. In der Praxis maskieren die Rauschanteile in Kamerasignalen die Quantisierungsartefakte, sodass eine Quantisierung mit 10Bit keinen wahrnehmbaren Qualitätsverlust erzeugt. Bei computergenerierten Inhalten, insbesondere bei Verläufen, kann es jedoch zu sichtbaren Artefakten kommen. Digital hinzugefügtes Rauschen könnte hier Abhilfe schaffen. Diese Thematik ist jedoch keine Eigenheit von HDR, sondern bestand schon bei SDR-Inhalten.

Zur Evaluation praxisnaher Bildinhalte bei Verwendung von PQ wurden bei gleichem Aufbau des bereits beschriebenen JND Cross Tests ein Grauverlauf und eine

Auswahl verschiedener aufgezeichneter Szenen anstatt des Testbilds gezeigt (Abbildung 3.7).



Abbildung 3.7: Testbilder zur Evaluation praxisnaher Bildinhalte (Miller, Nezamabadi & Daly 2012)

Die Testergebnisse bestätigen auch hier die Theorie, dass reale Bildinhalte aufgrund von Rauschen Quantisierungsartefakte maskieren. Nur der Grauverlauf reizte den Coderaum von 10Bit Quantisierung tatsächlich aus. Zu beachten ist auch, dass die Gamma-Quantisierung nicht bei einer Spitzenhelligkeit von 10.000cd/m^2 , sondern bei 2000cd/m^2 getestet wurde. Das Ergebnis wäre bei 10.000cd/m^2 noch eindeutiger.

Image Name:	Dark Ramp	Black Controllers	Black Feathers	Charcoal	Glacier	White Feathers	White Paper	Plane Hangar
PQ 1K	10	9	8	8	7	7	8	9
PQ 10K	10	9	9	8	8	8	9	9
Rec1886 1K	>12	11	10	10	7	7	8	9
Rec1886 2K	>12	11	11	10	7	7	9	9

Abbildung 3.8: Testergebnisse mit Bildmaterial, benötigte Quantisierungspräzision (Miller, Nezamabadi & Daly 2012)

Es kann also abschließend argumentiert werden, dass 10Bit-Quantisierung bei PQ für gewissermaßen jeden realen Bildinhalt ausreicht. Dabei entsteht im Vergleich zu SDR-Inhalten kein Qualitätsverlust, obwohl sich der mögliche Kontrast vervielfacht. Diese Erkenntnis ist wichtig, da somit erwiesen ist, dass PQ-HDR keine zusätzliche Datenrate im Vergleich zu bisherigen professionellen Videosignalen benötigt.

3.3 Erhalt kreativer Intention mit PQ

Da mit PQ absolute Helligkeit und kein gewöhnlicher relativer Helligkeitspegel definiert wird, müssen vom Display nicht darstellbare Signalanteile über ein sogenanntes

Luminance Mapping transformiert werden. Zu helle bzw. zu dunkle Werte werden über eine Shoulder/Knee-Funktion in den darstellbaren Bereich gebracht.

Zunächst scheint dies den visuellen Charakter des Bildes stark zu verfälschen, da Teile eines Bildes nicht mehr im ursprünglich definierten Kontrast zueinander stehen können.

Die Argumentation hinter dieser Signalinterpretation besteht jedoch darin, dass der mittlere Luminanzbereich durch das Luminance Mapping nicht beeinflusst wird, da dieser Bereich von jeder aktuell verfügbaren Displaytechnologie dargestellt werden kann. In diesem Bereich finden sich bei korrekter Belichtung die wichtigsten Bildinformationen. Nur tiefste Schatten sowie Glanzlichter, Lichtquellen und Bildbereiche, die deutlich heller beleuchtet sind als das Hauptmotiv, liegen außerhalb. Damit dies sichergestellt werden kann, veröffentlicht Dolby Referenzwerte zur optimalen Belichtung von HDR-Material mit PQ.

Dolby selbst schränkt ein, dass diese Werte nur als Anhaltspunkte zu sehen sind und finale Referenzangaben erst nach mehr Erfahrung in der Praxis mit HDR-Inhalten festgeschrieben werden können (Dolby Laboratories 2016).

	INDOOR		OUTDOOR	
	cd/m ²	%PQ	cd/m ²	%PQ
18% Grey Card	17	34	57	45
Caucasian	26	38	85	49
Diffuse White	140	54	425	66

Tabelle 3.2: Referenzpegel für PQ (Dolby Laboratories 2016)

An den vorgeschlagenen Werten lässt sich jedoch schon erkennen, dass bis auf diffus reflektierendes Weiß bei Außenaufnahmen alle Helligkeitswerte im für aktuelle Displaytechnologien erreichbaren Bereich liegen. Selbst die für beschriebenes Weiß empfohlenen 425cd/m² sind für viele Displays bereits heute erreichbar. Mit diesen Einschränkungen fallen bei korrekter Belichtung also nur die Extremwerte in Helligkeitsbereiche, die vom Tone Mapping betroffen sind.

Der Report BT.2390-2 der ITU schlägt eine Reihe an möglichen Funktionen zum Tone Mapping vor. Auffällig ist hierbei, dass der Luminanzbereich zwischen 1cd/m² und 100cd/m² nur bei Displays mit sehr geringem Kontrast angepasst wird. Die in der Bildgestaltung gewünschten Kontraste bleiben in diesem Bereich also weitgehend vorhanden.

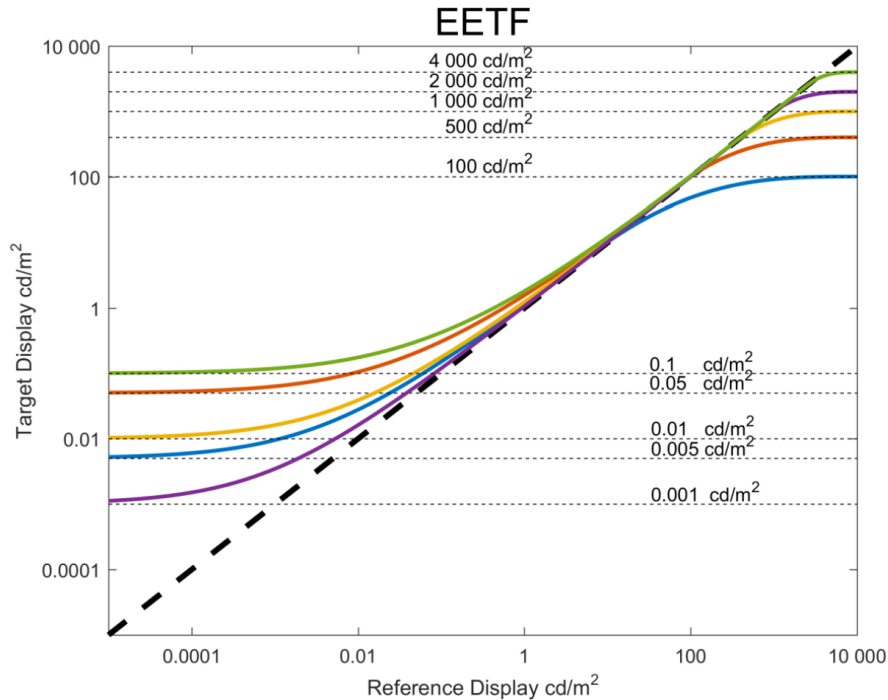


Abbildung 3.9: Tone Mapping bei PQ (Rep. ITU-R BT.2390-4 2018)

3.4 Unterschiede in PQ-HDR-Formaten

Anders als HLG wird PQ nicht unter dem Namen der zugrunde liegenden Technologie vertrieben, sondern mittels verschiedener Markennamen und mit variierender Implementation der benötigten Metadaten. Als Entwicklungslabor hinter PQ vertriebt Dolby die Technologie unter dem Namen Dolby Vision und unterstützt eine Vielzahl dynamischer Metadaten. Die einfachste Variante von PQ stellt HDR10 dar, das nur mit statischen Metadaten arbeitet.

3.4.1 Statische und dynamische Metadaten

Als statische Metadaten werden alle Metadaten bezeichnet, die für die gesamte Dauer eines visuellen Erzeugnisses gelten. Dynamische Metadaten können hingegen über die Dauer des Programms verändert werden. Dies kann pro Szene oder auch für einzelne Standbilder erfolgen. Im Fall von PQ-HDR werden neben den üblichen Informationen zu Bittiefe, Farbraum und Auflösung etc. spezifische Werte übertragen, die am Display für ein möglichst überzeugendes Tone Mapping genutzt werden können. Diese zusätzlichen Metadaten enthalten nach Society of Motion Picture and Television Engineers (SMPTE) ST 2086 Informationen zu dem Display, auf dem der Inhalt gemastert wurde. Hierzu gehören Weißpunkt und Primärvalenzen als x,y-Koordinaten und Schwarz- und Weißwert in cd/m^2 .

Zusätzlich zu diesen Metadaten definiert die Blu-ray Disc Association (BDA) zusammen mit dem Digital Entertainment Content Ecosystem (DECE) zwei weitere Parameter als Teil der statischen HDR-Metadaten. Anders als die Metadaten der SMPTE beziehen sie sich auf den Inhalt und nicht das Mastering Display. Der Parameter Maximum Frame Average Light Level (MaxFALL) beschreibt hierbei die über die Bildfläche gemittelte Helligkeit des hellsten Bildes. Der zweite Parameter Maximum Content Light Level Maximum Content Light Level (MaxCLL) entspricht dem höchsten Luminanzwert, den ein einzelner Pixel erreicht. Da für diese Daten der gesamte Bildinhalt der Produktion bekannt sein muss, eignen sie sich nur für aufgezeichnete Programme. Live-Produktionen müssen mit den zuerst genannten Metadaten der SMPTE auskommen. HDR10 enthält alle genannten statischen Metadaten (Ultra HD Forum 2016: 22 f.).

Das am weitesten verbreitete PQ-HDR-Format mit dynamischen Metadaten ist Dolby Vision. Die Metadaten dieses Formats gehen weit über die statischen Metadaten von HDR10 hinaus und ermöglichen Anpassungen im Tone Mapping für verschiedenste Displays. Mit Dolby Vision lassen sich die gesamten Anpassungen aller Trim Passes von beispielsweise 4000cd/m^2 bis runter zu den 108cd/m^2 eines HDR-Kinoprojektors als reine Metadaten speichern und für jede Szene oder gar einzelne Bilder verändern. In der Praxis werden dynamische HDR-Metadaten zunächst durch eine softwareseitige automatisierte Bildanalyse generiert und danach händisch angepasst, um den gewünschten visuellen Eindruck auf verschiedenen Displays zu erzielen. Auch für verschiedene Farbräume können Metadaten erfasst werden. In Abbildung 3.10 werden die Anpassungen für ein SDR-Display gezeigt, welches mit Dolby Vision ein HDR-Signal über Tone Mapping darstellt.



Abbildung 3.10: Dolby Vision Palette in DaVinci Resolve (Carman 2014)

In Konkurrenz zu Dolby Vision steht HDR10+, das unter anderem von 20th Century Fox, Panasonic, Samsung und Amazon vermarktet wird (HDR10+ Technologies, LLC. 2018). Die Verwendung dynamischer Metadaten bei HDR10+ ist vergleichbar mit Dolby Vision. Der größte Unterschied zwischen den beiden Formaten besteht in

ihrer Lizenzierung.

3.4.2 Lizenzmodelle

Dolby Vision ist ein proprietäres Format, das Dolby selbst an seine Lizenznehmer vertreibt. Hersteller von AV-Geräten und Software können für ihre Produkte Lizenzen erwerben und somit die nötige Softwarebibliothek von Dolby Vision verwenden. Postproduktionshäuser können sich ebenfalls lizenzieren lassen und erhalten nach einer Überprüfung des technischen Aufbaus der Grading Suite einen Lizenzschlüssel, um Dolby Vision in der verwendeten Software freizuschalten (Dolby 2018). Ohne einen HDR-Referenzmonitor und entsprechender Einrichtung der Suite, vergibt Dolby jedoch keine Lizenzen, wodurch erhebliche Investitionen nötig sind, um Dolby Vision anbieten zu können.

Das strenge Lizenzmodell sowohl für Konsumentengeräte als auch auf Produktionsseite hat Vor- und Nachteile. Auf der einen Seite ist die Implementierung von Dolby Vision herstellerübergreifend reguliert, wodurch die Signalverarbeitung weniger Varianz aufweist als bei frei verfügbaren HDR-Formaten. Auf der anderen Seite steht das Lizenzmodell Distributionswegen abseits von Blu-Ray, Kino und großen Streaming-Anbietern im Wege.

HDR10+ bietet ein Modell, das nur die Hersteller von AV-Geräten und Zulieferer mit Lizenzkosten belastet. Die Kreationseite muss keine Lizenz erwerben, um Inhalte in HDR10+ herstellen zu können (HDR10+ Technologies, LLC. 2018). Theoretisch sollte die Verbreitung von HDR10+ somit schneller vonstatten gehen. Zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung fällt auf HDR10+ jedoch ein wesentlich geringerer Marktanteil als auf Dolby Vision. Ein Grund hierfür dürfte die spätere Marktreife von HDR10+ sein, wodurch nur wenige Inhalte in dem Format verfügbar sind und die Unterstützung auf Herstellerseite abseits von Samsung und Panasonic nur sporadisch vorhanden ist. Im März 2019 stehen weltweit nur vier Titel bei Streaming-Anbietern oder auf Blu-Ray-Disc in HDR10+ im Programm. Bei Dolby Vision sind es über 300 (Medienagentur Nico Jurran & Friends 2019).

4 Forschung und Entwicklung zu Hybrid Log Gamma

Wie auch bei PQ stand die Quantisierungseffizienz bei der gemeinsamen Entwicklung der BBC und NHK von HLG im Focus. Anders als PQ soll HLG jedoch einen Grad an Abwärtskompatibilität zu gamma-encodierten Signalen bieten, ohne aufwändige Wandlung.

4.1 Abwärtskompatibilität der Quantisierungskennlinie

Während bei PQ die gesamte Quantisierungskennlinie im Hinblick auf erhöhte Codierungseffizienz modifiziert wurde, wird bei HLG für dunkle Bildbereiche die bekannte Gamma-Quantisierung beibehalten. Die Signalanteile mit hoher Luminanz werden hingegen logarithmisch quantisiert. Diese Hybridlösung gibt Hybrid Log Gamma seinen Namen. Der Übergang zwischen den beiden OETFs liegt bei 50% des maximalen Signalpegels.

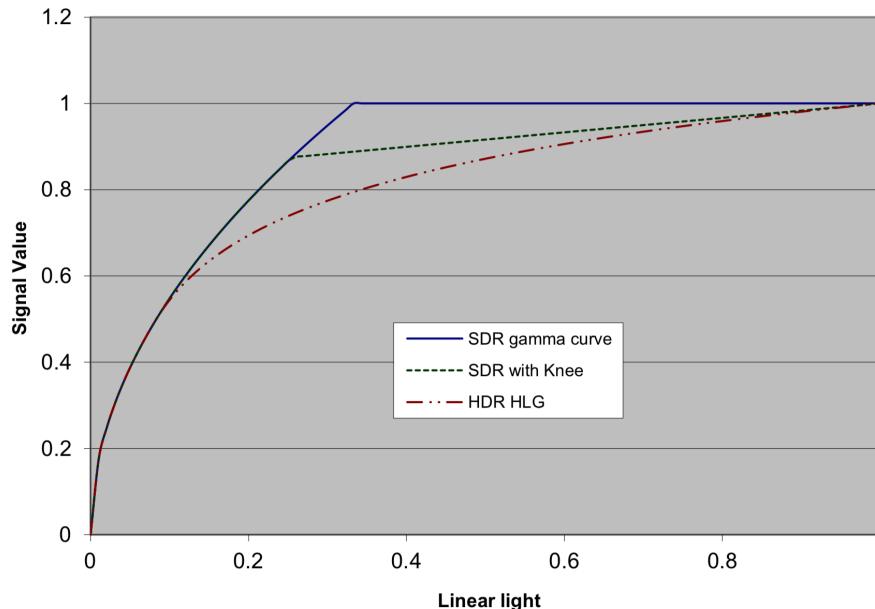


Abbildung 4.1: Vergleich der SDR und HLG-HDR-OETFs (Rep. ITU-R BT.2390-4 2018)

In der mathematischen Beschreibung der EOTF ist die Zusammensetzung aus zwei Übertragungsfunktionen anhand der Fallunterscheidung für oberhalb und unterhalb der Hälfte des normierten Signals ebenfalls gut zu erkennen:

$$\text{EOTF}[x] = \text{OETF}^{-1}[x] = \begin{cases} \frac{x^2}{3} & 0 \leq x \leq \frac{1}{2} \\ \frac{e^{\frac{x-c}{a}} + b}{12} & \frac{1}{2} < x \leq 1 \end{cases} \quad (4.1)$$

Ohne Systemgamma (siehe Abschnitt 4.3) und Schwarzwertkontrolle sind die normierte EOTF und OETF von HLG invers zueinander (Rec. ITU-R BT.2100-2 2018: 5 f.).

$$\text{OETF}[E] = \begin{cases} \sqrt{3E} & 0 \leq E \leq \frac{1}{12} \\ a \cdot \ln(12E - b) + c & \frac{1}{12} < E \leq 1 \end{cases} \quad (4.2)$$

Auf einem SDR-Monitor ist der optische Eindruck eines HLG-codierten Signals vergleichbar mit einem Kamerabild, bei dem die Lichter mittels der sogenannten Knee-Funktion stark komprimiert wurden, um nicht auszubrennen. Bei manchen Bildinhalten kann dies an das Verhalten chemischen Films erinnern.

Zur einfachen Evaluation von Bildinhalten, die keiner kritischen Analyse unterliegen, reicht für HLG also ein SDR-Monitor. Hierin stellt sich der Unterschied zu PQ dar: Wird ein PQ-Signal mit einer Gamma-EOTF interpretiert, erscheint das Bild vollkommen kontrastarm und eignet sich in keinem Fall zur Bildbeurteilung (siehe Abbildung 4.2).



Abbildung 4.2: HDR-Signal interpretiert als SDR, eigene Visualisierung

Wird nun ein HLG-Signal auf einem HDR-Display dargestellt, so linearisiert dieses den logarithmischen Teil der OETF, um die tatsächlichen Luminanzen wiederzugeben. Der gamma-quantisierte Teil der Übertragungsfunktion wird, wie auch bei SDR üblich, über die Umkehrfunktion entzerrt. Wie auch SDR sieht HLG ein Systemgamma vor, welches sich in Abhängigkeit von Display und Umgebungslicht verändert (siehe Abschnitt 4.3).

In gewisser Weise stellt HLG also einen Kompromiss dar. Anstatt absolute Luminanzwerte zu definieren, wird weiterhin ein einfaches relatives Maß übertragen. Die bereits seit Jahrzehnten genutzte Knee-Funktion wird in logarithmischer Form zu einem standardisierten Teil der OETF und lässt sich somit je nach den technischen Möglichkeiten des Displays interpretieren. Für SDR-Displays, die keine EOTF zur

Interpretation von HDR-Signalen bieten, ist bei HLG kein Tone-Mapping nötig. Bei PQ hingegen führt kein Weg an Tone-Mapping vorbei.

4.2 Quantisierungseffizienz und Dynamikumfang

Die Abwärtskompatibilität ohne Tone-Mapping von HLG hat jedoch auch Nachteile. Da die untere Hälfte des Signalpegels nahezu identisch zum BT.709-Gamma ist, ist die Quantisierungseffizienz ein wenig geringer als bei PQ, wodurch der theoretische Dynamikumfang verringert wird. Die BBC spricht von ca. 16 Blenden bei einem 10Bit Signal. PQ hingegen bietet ungefähr 28 Blenden Dynamikumfang. (BBC R&D 2016: 13.)

Dieses Defizit muss jedoch im Kontext zur menschlichen Wahrnehmung gesehen werden. Das Auge hat einen Sensitivitätsumfang von über 1.000.000.000:1. Dies würde ca. 30 Blenden entsprechen. Bei der Betrachtung eines Videobildes ist jedoch der Simultankontrast entscheidend. Anders als beim Sensitivitätsumfang wird hierbei der Adaptionzustand fixiert und somit der wahrnehmbare Kontrast innerhalb einer Szene beschrieben. Als Richtwert werden hier weniger als 14 Blenden genannt. (BBC R&D 2016: 5.)

Bei der Entwicklung kam nicht das Modell zur Kontrastsensitivität nach Barten zum Einsatz. Stattdessen wurde für Helligkeiten oberhalb von 1cd/m^2 das Gesetz von Weber und Fechner verwendet. Danach kann das menschliche Auge einen relativen Helligkeitsunterschied ab 2% Differenz (Weber Fraction) erkennen. Unterhalb von 1cd/m^2 wurde das De Vries-Rose-Gesetz angenommen, das eine mit sinkender Helligkeit reduzierte Kontrastwahrnehmung für dunkle Szenen beschreibt. Das Schreiber-Limit (Abbildung 4.3) nach W. F. Schreiber beschreibt die Kombination dieser beiden Gesetze (Borer & Cotton 2015: 3 ff.).

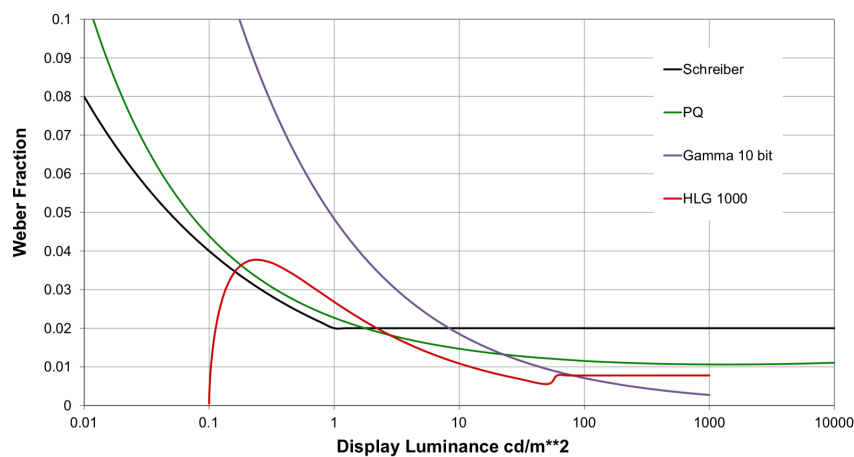


Abbildung 4.3: Quantisierung von HLG, PQ und Videogamma im Vergleich zur Schwelle nach Schreiber (Borer & Cotton 2015: 7)

Der Knick in der HLG-Kennlinie erklärt sich hierbei durch den Übergang von Gamma-Encodierung zu logarithmischer Encodierung. Das rasche Absinken unterhalb von $1\text{cd}/\text{m}^2$ deutet auf ein Display mit einem Schwarzwert von $0,1\text{cd}/\text{m}^2$ hin.

Im Modell nach Barten ist HLG vergleichbar mit der Leistung von 10Bit-PQ. Nur in dunklen Bereichen könnten mehr Banding-Artefakte auftreten. In Abbildung 4.4 weist das Display jedoch auch einen etwas geringeren Schwarzwert von ca. $0,05\text{cd}/\text{m}^2$ auf.

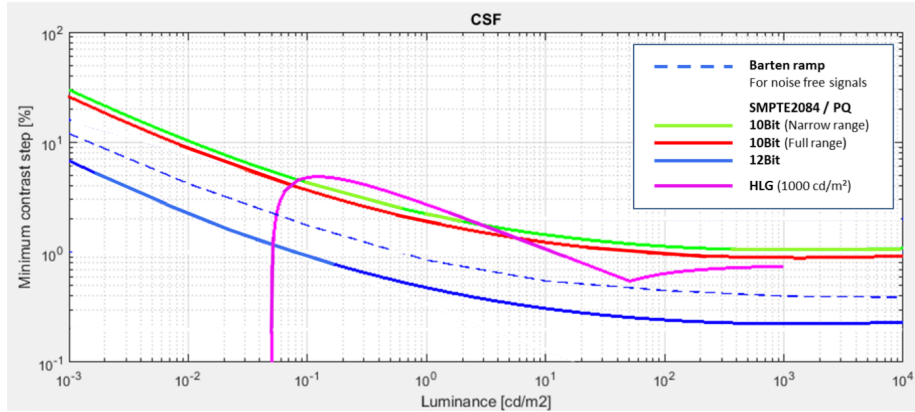


Abbildung 4.4: Quantisierung von HLG und PQ im Vergleich zur Kontrastsensitivitätsfunktion nach Barten (Weber 2018: 20)

4.3 Systemgamma

Ein großer Unterschied zwischen PQ und HLG besteht in der Signalinterpretation bei unterschiedlichen Displayhelligkeiten. Während bei PQ mit steigender maximaler Leuchtdichte nur die Helligkeit der Spitzlichter zunimmt, steigt bei HLG die Helligkeit des gesamten Bildes.

Um den visuellen Eindruck unterschiedlich heller Displays zu kompensieren wurde für HLG ein dynamisches Gamma in Abhängigkeit der Leuchtdichte des jeweiligen Displays eingeführt. Die nominale maximale Leuchtdichte eines HLG-Displays definiert die ITU-R BT.2100 mit $1000\text{cd}/\text{m}^2$ und empfiehlt hierfür in Referenzumgebung das von SDR bekannte Gamma von 1,2 (siehe Kapitel 2). Für Displays im für HLG normalen Helligkeitsbereich von $400\text{cd}/\text{m}^2$ bis $2000\text{cd}/\text{m}^2$ lässt sich das Gamma mit folgender Formel (Rec. ITU-R BT.2100-2 2018) bestimmen:

$$\gamma = 1,2 + 0,42 \log_{10}\left(\frac{L_w}{1000}\right) \quad (4.3)$$

Außerhalb dieses Bereichs gilt:

$$\gamma = 1,2\kappa \log_2\left(\frac{L_w}{1000}\right) \quad \text{mit } \kappa = 1,111 \quad (4.4)$$

Diese Spezifikation ergibt sich aus einer Reihe an Versuchen der BBC und NHK, bei denen Probanden den Helligkeitseindruck unterschiedlicher Displays mit Hilfe der Gamma-Regelung angleichen sollten (Borer & Cotton 2015: 4 f.).

4.4 Belichtung

Der durch HDR ermöglichte Dynamikumfang oberhalb des diffusen Weißpunkts steht in Abhängigkeit zur Belichtung der aufgenommenen Szene. Durch bewusste Unterbelichtung ließ sich auch schon bei SDR zusätzlicher Spielraum für Lichter erreichen. Insbesondere bei szenischen Produktionen wird daher eine Belichtung unterhalb des Referenzwerts gewählt.

In den Anfängen von HLG gab es zwei Vorschläge zur Wahl des diffusen Weißpunkts. Der Standard der japanischen Association of Radio Industries and Businesses (ARIB) sah einen Referenzpegel von 50% für diffuses Weiß vor (ARIB STD-B67 2015). Die BBC hingegen schlug einen Weißpegel von 73% bzw. 75% für Grafik-Weiß vor.

Die beiden Ansätze haben ihre Vor- und Nachteile. Die hellere Belichtung nach Vorschlag der BBC sorgt für eine bessere Abwärtskompatibilität, falls das HLG-Signal direkt als SDR interpretiert wird. Die dunklere Belichtung hingegen bietet mehr Spielraum oberhalb des Referenzweiß und sorgt somit für eine deutlichere Abgrenzung zu SDR. Die Abwärtskompatibilität ist jedoch nur rudimentär gegeben. Das resultierende Bild sollte nicht ohne Bearbeitung SDR-Empfangsgeräte erreichen.

Im ITU-Standard BT.2100 wird die hellere Belichtung empfohlen, wodurch auch die Softwarehersteller diese Lösung für ihr Farbmanagement wählen. Gegen diesen Ansatz spricht jedoch die Tatsache, dass die BBC damit versucht ein Problem zu lösen, das nur für die wenigsten Zuschauer existiert. Nur wenige Empfangsgeräte können Ultra High Definition (UHD)-Signale nach BT.2020 decodieren und gleichzeitig aber kein HLG interpretieren. Für alle anderen Empfänger muss ohnehin ein High Definition (HD)-Signal nach BT.709 bereitgestellt werden. Bei der dafür notwendigen Wandlung des Farbraums könnte auch gleichzeitig die dunklere Belichtung von HLG kompensiert werden.

Es ist zu erwarten, dass – wie schon bei SDR – szenische Produktionen auch in HLG bewusst Unterbelichtung nutzen werden, um mehr Spielraum für Lichter zu erhalten.

Ob sich mit der aktuellen ITU-Standardisierung noch ein deutlicher Mehrwert mit HLG gegenüber SDR erzeugen lässt, soll in Kapitel 10 überprüft werden.

5 Marktrelevanz

5.1 Technische Voraussetzungen

Es sind, anders als bei anderen Technologien zur Qualitätssteigerung visueller Medien, keine großen hardwareseitigen Sprünge nötig, um in HDR zu produzieren. Hierin liegt wahrscheinlich das größte Argument für den Erfolg von HDR am Markt.

Zum Vergleich: Die Steigerung der Auflösung von HD auf UHD vervierfacht die benötigte Datenrate. High Frame Rate (HFR), die Übertragung von mehr Bewegungsphasen durch eine höhere Bildrate, verdoppelt bzw. vervierfacht die Datenrate bei einer Steigerung von 25 auf 50 oder gar 100 Vollbilder. Bei 3D sieht es nicht anders aus. Da jeweils eigene Bilder für das linke und das rechte Auge übertragen werden müssen, steigt die benötigte Datenrate. Hinzu kommt die Investition in spezielle Displays, die den Effekt in der Regel nur durch eine Shutter- oder Polarisationsbrille zeigen können.

HDR hingegen lässt sich an den meisten Stellen der Signalkette tatsächlich softwareseitig lösen. Dies geht soweit, dass sowohl professionelle Anwender als auch Konsumenten mittels Firmware-/Softwareupdates ihre Geräte zur Kompatibilität mit HDR nachrüsten können. Ein Gerät, welches in der Lage ist, ein digitales Videosignal mit 10Bit Farbtiefe pro Kanal zu verarbeiten, ist prinzipiell HDR-fähig. Nur wenn das Signal in Relation zum beschriebenen Licht einer Szene interpretiert werden muss, ist die tatsächliche Implementierung einer HDR-Technologie erforderlich.

5.2 Adoption auf Verbraucherseite

Aus rein technischer Perspektive bestehen also keine großen Hürden zur Adoption von HDR. Die viel wichtigere Frage dürfte jedoch die nach dem Vorteil für den Endverbraucher sein, denn letzten Endes entscheidet dieser über die Nachfrage nach HDR-Inhalten. Dabei ist die Nachfrage nur teilweise abhängig von der Verfügbarkeit der Technologie. Denn obwohl ein Großteil der neuverkauften TV-Systeme zur Zeit des letzten 3D-Booms die allseits angepriesene Technologie unterstützten, entschieden sich die Konsumenten in vielen Fällen gegen den Genuss von 3D-Inhalten. Daraus ließe sich schließen, dass nur weil die meisten aktuell angebotenen Fernseher HDR-fähig sind, dies nicht bedeutet, dass auch eine tatsächliche Nachfrage nach entsprechenden Inhalten vorliegt.

Zwischen 3D und HDR besteht jedoch ein entscheidender Unterschied: Die Möglichkeit der graduellen Markteinführung. Ein Display kann 3D-Inhalte darstellen oder

es kann dies nicht. Bei HDR sieht das anders aus. Wie bereits erwähnt, ist HDR-Kompatibilität in erster Linie Softwaresache. Auch wenn also ein Display Jahrzehnte alte LC-Technologie verwendet, kann es mit entsprechender Software sowohl PQ als auch HLG-Signale darstellen. Die Darstellung wird wohl kaum visuell ansprechender sein als gewöhnliches SDR, man könnte hier eher von HDR-Emulation sprechen. Hierin liegt die große Chance und gleichzeitig die Gefahr von HDR. Es werden kaum Kunden von der neuen Technologie ausgeschlossen, da sie sich kostengünstig implementieren oder gar nachrüsten lässt. Das sorgt für eine schnelle Verbreitung. Gleichzeitig kann aber auch quasi jedes Display dem Verbraucher als HDR-fähig verkauft werden, obwohl es kein verbessertes Seherlebnis bietet.

Die Kunden einer Filmproduktionsfirma stehen selbst auf Verbraucherseite des Mediums Bewegtbild. Wenn sich durch Verwendung einer neuen Technologie kein besseres Endergebnis erzielen lässt, sollte sie aus wirtschaftlicher Sicht auch nicht eingefordert werden. Ein Kunde, der HDR nur aus Perspektive des Verbrauchers sieht, könnte also durchaus zu dem Schluss kommen, dass es sich nur um einen schwammig definierten (bereits im Vorwort erwähnten) Marketingbegriff handelt. Bis also dem Verbraucher durch moderne Displaytechnologien die Vorzüge von HDR kommuniziert werden können, wird HDR als Distributionsformat nur in seltenen Fällen gefordert werden.

5.3 Videospiele als Inkubator

Für die Entwicklung und Verbreitung neuer Displaytechnologien und Standards ist neben Film und Fernsehen die stetig wachsende Branche rund um Videospiele als einflussreicher Markt nicht mehr wegzudenken. So lag der Umsatz der Videospielebranche in Deutschland 2015 mit 2,81 Milliarden Euro deutlich über dem des Kinofilms mit 1,17 Milliarden Euro (Castendyk & Müller-Lietzkow 2017: 90). Umso wichtiger ist die Marktdurchdringung von HDR in der Spielebranche. Und tatsächlich ist die Entwicklung hier rasant. Mit Microsofts Xbox One S und Sonys Playstation 4 Serie sind die zwei größten Konsolenplattformen mit HDR-Unterstützung ausgestattet. Windows 10, als das Betriebssystem mit der weltweit größten Verbreitung, bietet ebenfalls HDR für auf ihm installierte Software an. Neun der zehn meistverkauften Videospiele in den USA im Ranking der National Purchase Diary Group 2018 enthalten HDR-Unterstützung (Webb 2019). Und sowohl viele weitere Spiele als auch die Konsolen selbst erhielten per Patch bzw. Firmwareupdate Aktualisierungen zur Ausgabe von HDR-Signalen. Nur Nintendo – in der Tabelle 5.1 durch Super Smash Bros. Ultimate vertreten – bietet auf seiner Konsole Switch noch keine HDR-Unterstützung.

Die Spieleindustrie setzt auf PQ mit statischen Metadaten unter dem Label HDR10. Dynamische Metadaten mittels Dolby Vision oder HDR10+ finden ebenso wie HLG zur Zeit keine Verwendung.

Die Statistik lässt die Interpretation zu, dass die Gamesbranche sich in weiten Teilen für HDR entschieden hat. Dies dürfte die Anzahl HDR-fähiger Endgeräte weiter

Verkaufsrank	Titel	HDR-Unterstützung
1	Red Dead Redemption II	Ja
2	Call of Duty: Black Ops	Ja
3	NBA2K19	Ja
4	Madden NFL 19	Ja
5	Super Smash Bros. Ultimate	Nein
6	Marvel's Spider-Man	Ja
7	Far Cry 5	Ja
8	God of War	Ja
9	Monster Hunter: World	Ja
10	Assassin's Creed: Odyssey	Ja

Tabelle 5.1: HDR-Unterstützung laut Herstellerangaben bei den meistverkauften Videospielen 2018

in die Höhe treiben, sodass auch mehr potentielle Kunden HDR-Videos empfangen könnten.

5.4 Entwicklung der Distributionswege

Selbst wenn ein HDR-Master ausgeliefert wird, wird er wahrscheinlich nur eine geringe Anzahl Endverbraucher erreichen. Dies liegt weniger an den Endgeräten, sondern oftmals an den Distributionskanälen, bei denen HDR bisher eine Ausnahme darstellt. Im linearen Fernsehprogramm finden sich bisher kaum Sendeanstalten, die Programme in HLG oder PQ ausstrahlen. Im Bezug auf die hier fokussierte Werbefilmbranche bedeutet dies, dass es noch dauern wird, bis Werbespots in HDR-Formaten übertragen werden. Auf dem Kinomarkt sieht es ähnlich aus: Noch wurde in Deutschland kein einziger Kinosaal mit HDR-Projektionstechnik eröffnet. Die schnellsten Fortschritte verzeichnet der Video-On-Demand (VoD)-Markt. Netflix und Amazon Video, die zwei größten Streaming-Anbieter auf dem deutschen Markt, bieten bereits zahlreiche Titel in PQ-HDR an. Netflix setzt dabei auf DolbyVision, Amazon hingegen auf das freie HDR10 und zukünftig HDR10+ (siehe Unterabschnitt 3.4.2). Als weltweit größte freie Streaming-Plattform unterstützt YouTube Uploads sowohl in PQ mit statischen Metadaten als auch HLG. Vimeo bietet die beiden Formate ebenfalls an. Je nach Endgerät stellt die Plattform einen HDR- oder einen aus diesem erzeugten SDR-Stream bereit.

An dieser Stelle lässt sich die Konsequenz ziehen, dass SDR weiterhin als das wichtigere Distributionsformat betrachtet werden sollte, weil es das Format darstellt, wel-

ches in den meisten Fällen konsumiert wird. Da also ein Werbespot den Endverbraucher nur in Ausnahmefällen in einem HDR-Format erreicht, stellt eine Investition in professionelle HDR-Technologie – insbesondere Videomonitor – zur Zeit kaum einen nachweisbaren Mehrwert dar. Um sich dennoch für die Zukunft auf das Format vorbereiten zu können, wird im Kapitel 9 überprüft, inwieweit sich eine Postproduktion in HDR ohne professionelle Referenzmonitore realisieren lässt.

6 HDR im professionellen Produktionsumfeld

Nicht jeder Teil der Produktion ist von einer Umstellung zu HLG oder PQ gleichermaßen betroffen. Von der Kamera bis zur Ausspielung sollen hier die wichtigsten Neuerungen beleuchtet werden.

6.1 Kameras

Die im Tagesgeschäft verwendeten professionellen Kameras sind bereits seit längerer Zeit in der Lage einen größeren Dynamikumfang zu erfassen. Dies gilt sowohl für den Broadcast- und ENG-Bereich, als auch für digitale Kinokameras. Da sich diese Arbeit insbesondere mit der Werbefilmbranche beschäftigt, sollen hier nur letztere näher betrachtet werden.

Der Dynamikumfang eines CMOS-Kamerasensors entspricht dem Verhältnis zwischen der ausgegebenen Spannung eines Sensels bei vollständiger Sättigung (full well) und der Spannung des Grundrauschens (dark noise). Bei vollständiger Sättigung könnte mehr einfallendes Licht keinen höheren Wert mehr erzeugen, während sich bei minimaler Belichtung niedrigere Werte nicht mehr vom Rauschen differenzieren lassen.

Da nach dem Sensel das Signal zunächst verstärkt und danach quantisiert wird, spielen die hierfür nötigen elektronischen Komponenten ebenfalls eine Rolle für den Dynamikumfang, den ein Kamerasystem letztendlich erfassen kann. Während dieser Wert im Broadcast- und ENG-Bereich üblicherweise in Dezibel angegeben wird, spricht man beim Dynamikumfang für kinematische Kameras in der Regel von Blendenstufen. Der aktuelle Branchenstandard bei digitalen Kinokameras liegt aufwärts von 14 Blendenstufen. Dies entspricht einem Kontrastverhältnis von ca. 1:16.000.

Dargestellt auf einem SDR-Display ließen sich hiermit Luminanzen zwischen ca. $0,00625\text{cd/m}^2$ und 100cd/m^2 wiedergeben. Es entsteht nun jedoch folgende Problematik:

Bei einer üblichen Belichtung von Hauttönen mit beispielsweise 56% Signalpegel bei einem Gamma von 2,4 liegt die Luminanz schon bei 25cd/m^2 . Bis zur Referenzluminanz von SDR sind es ab hier jedoch nur noch 2 Blendenstufen, nämlich 50cd/m^2 und 100cd/m^2 . Bei einer Kamera mit 14 Blendenstufen Dynamikumfang lägen also 12 davon unterhalb üblich belichteter Hauttöne. Da in der realen Welt jedoch viele

Bildinhalte der gleichen Einstellung deutlich oberhalb der Hauttöne liegen, kommt die Knee-Funktion zum Einsatz.

Im genannten Beispiel würde die Kamera ihren Dynamikumfang auf einen anderen Luminanzbereich verteilen, beispielsweise zwischen einem noch immer tiefen Schwarz von $0,05\text{cd/m}^2$ und einer theoretischen Spitzenleuchtdichte von 800cd/m^2 , die 14 Blenden bleiben ja bestehen.

Oberhalb der bei 25cd/m^2 liegenden Hauttöne finden sich nun 5 anstatt 2 Blendenstufen, nämlich 50cd/m^2 , 100cd/m^2 , 200cd/m^2 , 400cd/m^2 und 800cd/m^2 . Somit ist sichergestellt, dass nur extrem helle Bildanteile „ausbrennen“ können.

Die 800cd/m^2 liegen jedoch weit außerhalb der 100cd/m^2 Spitzenhelligkeit, weswegen sie mit der Knee-Funktion in den Bereich des Videopegels transformiert werden müssen. Hiermit kann zwar Clipping verhindert werden, der tatsächliche Kontrast der Szene geht jedoch verloren.

Moderne Kameras können also längst HDR-Inhalte liefern. Mit der klassischen Videosignalverarbeitung lassen sie sich jedoch nicht übertragen.

Würde das Bild im beschriebenen Beispiel mit einer HDR-OETF aufgenommen werden, so ließe sich der Kontrast erhalten. Bei PQ könnte die Spitzenleuchtdichte von 800cd/m^2 auch als solche aufgezeichnet werden. Im Fall von HLG würden diese hohen Luminanzwerte in den logarithmischen Teil der OETF fallen.

6.2 Codecs

Prinzipiell ist der Videocodec von der verwendeten OETF unabhängig. Die Struktur des reinen Videosignals verändert sich aus technischer Perspektive nicht durch HDR. Die Interpretation des Signals zu einem Bild auf einem Monitor stellt den einzigen Unterschied dar. Für HDR-Videos können also alle bisher genutzten Videocodecs verwendet werden. Die richtige Interpretation der Daten ist dann jedoch nicht mehr sichergestellt und muss somit händisch in der verwendeten Software eingestellt werden.

Um eine korrekte Interpretation auf Empfangsseite sicherzustellen, müssen entsprechende Metadaten enthalten sein, die vom Decoder ausgelesen werden. Da HDR-Video eine recht neue Technologie ist, unterstützen auch nur moderne Decoder die benötigten Metadaten. Zur bandbreiteneffizienten Distribution eignen sich H.264, H.265 (HEVC), VP9 und in Zukunft auch AV1. In welchem Codec letztendlich ausgeliefert wird, ist vom Distributionskanal abhängig. Für qualitativ hochwertige Sendekopien sind DNxHR HQX und ProRes 422/4444 empfehlenswert. Beide können HDR-Metadaten enthalten und eignen sich dank moderater Kompression zur weiteren Verarbeitung.

Welche Codecs in Zukunft tatsächlich von Sendeanstalten gefordert werden, ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abzusehen. Die einzigen Kriterien sind die Unterstützung von mindestens 10Bit pro Kanal und korrekter Decodierung von HDR-Metadaten. Große Umstellungen sind hier also nicht zu erwarten.

6.3 Schnittstellen

Das bisher verwendete SDI eignet sich auf Produktionsseite weiterhin zur Übertragung von HDR-Signalen. Das 10Bit-Komponentensignal ist wie in Abschnitt 3.2 erläutert ausreichend. Eine Steigerung der Qualität lässt sich wie schon bei SDR durch Übertragung in RGB und feinere Quantisierung erreichen. Da professionelle Monitore in der Regel manuell konfiguriert werden, müssen nicht zwingend HDR-Metadaten übertragen werden. Neue Standards wie SMPTE ST 2108-1 erlauben jedoch auch den Transport von HDR-Metadaten über das SDI.

Für Konsumenten ist die Umstellung größer, da zumindest für PQ Metadaten zur korrekten Bilddarstellung erforderlich sind. Nur HDMI-Interfaces ab Version 2.0a unterstützen diese. Für HLG reicht aufgrund der Abwärtskompatibilität HDMI 2.0, da hiermit im BT.2020 Farbraum übertragen werden kann. Soll HLG als HDR interpretiert werden, so ist die Version 2.0b der HDMI-Schnittstelle erforderlich (Morrison 2017).

Die für Computermonitore übliche Displayport-Schnittstelle unterstützt PQ-HDR erst ab Version 1.4, die erst 2016 veröffentlicht wurde und noch nicht sehr weit verbreitet ist (Video Electronics Standards Association 2016). HLG lässt sich nicht über Displayport übertragen.

6.4 Referenzmonitore

Der Referenzmonitor ist das einzige Gerät in der HDR-Signalkette, welches tatsächlich deutlich andere Spezifikationen aufweisen muss als bei SDR. In vielen Fällen wird es tatsächlich reichen nur den Referenzmonitor einer gegebenen Produktionsumgebung durch ein HDR-fähiges Gerät zu ersetzen, um professionelle HDR-Endformate anbieten zu können.

Anders als auf Konsumentenseite sollte der Mastering-Monitor bei PQ-HDR in der Lage sein, alle Signalanteile ohne Tone-Mapping darstellen zu können. Ein Display mit einer Spitzenhelligkeit von 1000cd/m^2 sollte also nur für das Mastering eines Films mit eben dieser maximalen Helligkeit verwendet werden. Damit soll sichergestellt werden, dass Coloristen, VFX-Artists und andere an der Postproduktion Beteiligte bei der Bildbearbeitung Kontraste erzeugen, die mit Tone-Mapping zwar visuell ansprechend wirken, jedoch auf einem Display mit höherer Leistung einen gänzlich anderen Eindruck erzeugen.

Das Prinzip, dass das Mastering-Display nur innerhalb seiner technischen Möglichkeiten verwendet werden soll, gilt auch für den Farbraum. So wird ein PQ-Signal zwar im ITU Rec. BT.2020-Farbraum ausgeliefert, in Ermangelung an Displays, die diesen tatsächlich vollständig darstellen können, wird nur ein Subraum genutzt, der die Primärvalenzen von P3 aufweist.

Anhand dieser Vorgehensweise lässt sich erkennen, dass Referenzmonitore für PQ-HDR Signale anders verarbeiten als Displays auf Konsumentenseite. Während beim

Konsumenten Tone-Mapping die Luminanz und Chrominanz des Signals in darstellbare Bereiche transformiert, ist beim Referenzmonitor ein Hard-Clipping gewollt. Im Vergleich zu SDR ist dies nichts Neues, denn auch dort soll ein Referenzmonitor das Signal in keiner Weise verfälschen. Der Unterschied besteht jedoch darin, dass Referenzmonitore für SDR das gesamte Signal darstellen können, bei HDR ist dies aufgrund technischer Limitierungen zur Zeit nicht möglich.

So definiert die European Broadcast Union (EBU) in ihrer Richtlinie für Broadcast-Monitore nur eine theoretische Klasse 1A für den Betrieb in HDR-Produktionsumgebungen, die das gesamte Signal darstellen kann. Für die reale Anwendung wurde die Klasse 1B definiert, die sich an aktuellen technischen Entwicklungen orientiert. Um den Anwender zu informieren, dass das Eingangssignal nicht vollständig von einem gegebenen Klasse 1B Monitor darzustellen ist, sollte dieser eine Warnung ausgeben, sobald Hard Clipping bei Luminanz oder Chrominanz erfolgt (European Broadcast Union 2017: 22 ff.). Der Sony BVM-X300 HDR-Referenzmonitor setzt diese Vorgabe durch eine Warnleuchte am unteren Displayrand um. Außerdem sollte der Nutzer in der Lage sein, sich die problematischen Bildbereiche visuell hervorheben zu lassen, ähnlich wie eine False Color Funktion.

Als Minimalwert für die darstellbare Luminanz sieht die EBU einen Wert von 1000cd/m^2 vor.

Als Schwarzwert sieht die EBU $0,005\text{cd/m}^2$ vor, sowohl für Klasse 1A als auch 1B. Dieser Wert lässt sich nur von wenigen Displaytechnologien erreichen. Organic Light Emitting Diode (OLED) stellt natürlich eine Möglichkeit dar, aufgrund der selbstemittierenden Subpixel. Plasma-Displays weisen diese Charakteristik ebenfalls auf, können jedoch nicht die geforderten Spitzenhelligkeiten erreichen. Eine weitere Möglichkeit stellen dualmodulierte Liquid Crystal Displays (LCDs) dar. Hier wird entweder die Light Emitting Diode (LED)-Matrix der Hintergrundbeleuchtung lokal gedimmt oder zwei LC-Schichten übereinander verwendet, um tieferes Schwarz zu erzeugen. Bei lokalem Dimmen können jedoch Säume an hohen Kontrastkanten auftreten, falls die Auflösung der LED-Matrix die Auflösung des Displays deutlich unterschreitet. Diese Artefakte werden auch als Blooming bezeichnet. Displays, die diese Artefakte aufweisen, lassen sich nicht zur kritischen Bildbeurteilung verwenden, da die Luminanz einzelner Pixel nicht akkurat wiedergegeben werden kann.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Veröffentlichung sind nur wenige HDR-Referenzdisplays am Markt verfügbar. Diese professionellen Monitore weisen Spezifikationen auf, die nicht im Konsumentenbereich verfügbar sind. Die OLED-Modelle der BVM-X300-Serie von Sony sind die einzigen Displays mit selbstemittierenden Subpixeln, die die geforderte Spitzenleuchtdichte von 1000cd/m^2 erreichen.

TVLogic verwendet in seinem LUM-310R eine extrem dicht angeordnete LED-Matrix zur Hintergrundbeleuchtung einer Flüssigkristallschicht. Die über 2000 einzeln steuerbaren LEDs sollen aufgrund ihrer dichten Anordnung Blooming-Artefakte minimieren (TVLogic 2019).

Eizo, Sony und Flanders Scientific bieten Geräte mit einem zweischichtigen LC-Panel an, welches tiefes Schwarz trotz der 1000cd/m^2 Maximalhelligkeit ermöglicht.

Flanders Scientific bezeichnet diese Technologie als Light Modulating Cell Layer (LCML). Der Vorteil dieser dualmodulierten LCDs besteht darin, dass anders als bei OLED-Displays hohe Leuchtdichten über eine größere Bildfläche erreicht werden können, ohne das Panel zu beschädigen.

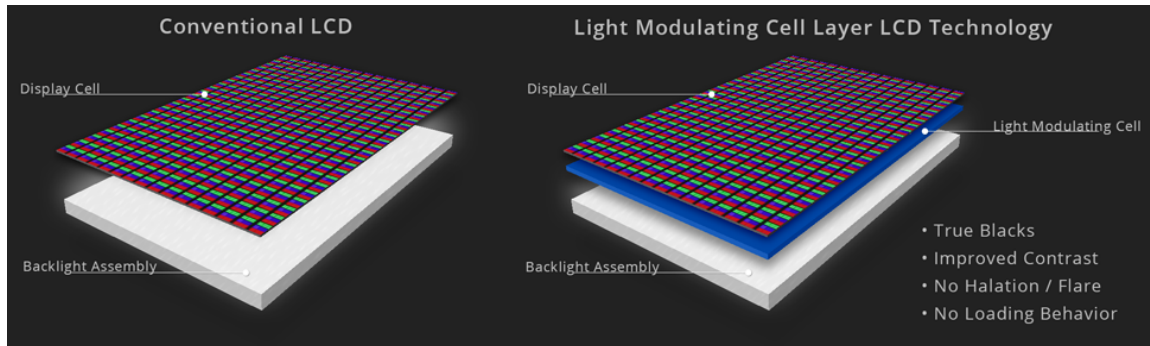


Abbildung 6.1: Schaubild zur LMCL-Technologie (Flanders Scientific Inc. 2019)

Alle professionellen HDR-Referenzdisplays werden derzeit zu einem Verkaufspreis von über 30.000 Euro gehandelt. Wie bereits in Kapitel 5 erläutert, ist HDR in den verschiedenen Distributionswegen noch nicht soweit verbreitet. Daher lohnt sich eine Investition dieser Preisklasse nur für die wenigsten Produktionsfirmen. Um bereits vor der Entwicklung einer erhöhten Nachfrage HDR in der Postproduktion erproben und anbieten zu können, sollen im praktischen Teil dieser Arbeit HDR-Displays aus dem Konsumenten-Segment hinsichtlich ihrer Eignung zur Bildbeurteilung geprüft werden.

Da im konkreten Fall der Werbebranche HDR als sekundäres Distributionsformat betrachtet werden kann, bietet es sich an, den Master in SDR zu fertigen, da dieser auf vorhandenen SDR-Referenzmonitoren exakt nach Standard beurteilt werden kann und dem Format entspricht, das von dem Großteil der Zuschauer betrachtet werden wird. HDR wäre in diesem Fall lediglich ein Abformat des fertigen SDR-Masters und würde mittels eines Trim Passes entstehen, bei dem der größere Dynamikumfang und Farbraum genutzt wird.

Die HDR-Sendekopie entsteht also aus einer abgeschlossenen Timeline mit allen bereits ausgeführten primären und sekundären Farbkorrekturen. Durch diesen Arbeitsablauf wird für die kommerziell wichtigere Sendekopie nicht auf die technische Prüfung an einem Referenzmonitor verzichtet und dennoch kostengünstig ein HDR-Abformat angeboten.

Um die zusätzlichen Bildinformationen während dieses Prozesses zu erhalten, soll im folgenden Kapitel ein Farbmanagement-System betrachtet werden, das trotz des eingeschränkten BT.709-Monitorformats den erweiterten Dynamikumfang von HDR während des gesamten Bearbeitungsprozesses erhält und eine konsistente Wiedergabe in verschiedener Software ermöglicht.

7 Farbmanagement mit dem Academy Color Encoding System

Für den hier vorgeschlagenen Workflow zur Arbeit mit HDR-Video soll das Academy Color Encoding System (ACES) als Austausch-, Master- und Archivformat zum Einsatz kommen. Der entscheidende Vorteil von ACES besteht in der Größe des Farbvolumens. Der Farbraum ACES2065 enthält alle Farben und Helligkeiten, die das menschliche Auge bei vollständiger Adaption wahrnehmen kann. Die in Abschnitt 4.2 bereits erwähnten 30 Blenden Sensitivitätsumfang werden hier tatsächlich erreicht. Bei Repräsentation durch 16Bit-Fließkommawerte ist die ideale Darstellung frei von digitalen Artefakten.

In ACES lassen sich somit alle Kamerasignale oder auch computergeneriertes Material ohne Tone-Mapping speichern. Des Weiteren gibt es keinen SDR oder HDR-Sendestandard, der die Grenzen des Farbvolumens von ACES überschreitet. Aller Wahrscheinlichkeit nach wird es einen solchen Standard auch nie geben, da alle Farben und Helligkeiten außerhalb von ACES auch außerhalb des sichtbaren Lichts liegen und somit höchstens für Forschungszwecke relevant sind, nicht jedoch für die Unterhaltungselektronik. (Piccin & Weynand 2018: 13 f.)

ACES bietet sich somit auch als Archivformat an, da es das Maximum an visuellen Informationen abbilden kann, die ein Bild je enthalten könnte. In dieser Hinsicht lässt sich der Vergleich zu chemischem Film ziehen. Da er lange Zeit das Rohmaterial für Filmproduktionen darstellte und somit alle aufgezeichneten Bildinformationen enthält, wird er für viele Remaster in höheren Auflösungen oder auch in HDR erneut mit heutiger Technik gescannt, um die maximale Bildqualität zu extrahieren. Ein ACES-Master ließe sich in vergleichbarer Weise in Zukunft in einen bisher nicht vorhandenen Sendestandard wandeln, um die Vorzüge futuristischer Displaytechnologien ausschöpfen zu können. (Piccin & Weynand 2018: 16 f.)

ACES wird von der Academy of Motion Picture Arts and Sciences (AMPAS) entwickelt und steht frei und quelloffen zur Verfügung. Dieser Umstand dürfte auch zur weiten Verbreitung beitragen, die einen Großteil der professionellen Softwarepakete für die Postproduktion umfasst. Tabelle 7.1 listet die verwendete Software bei The Marmalade, die besonders vom einheitlichen Farbmanagement profitieren könnte. Es lässt sich erkennen, dass ACES oftmals bereits integriert ist oder über das ebenfalls freie und quelloffene Plugin OpenColorIO verwendet werden kann.

Software	Hersteller	ACES-Farbmanagement
After Effects	Adobe	OpenColorIO-Plugin
Cinema4D	Maxxon	Nein
DaVinci Resolve	Blackmagic Design	Integriert
Flame	Autodesk	Integriert
Houdini	SideFX	OpenColorIO-Plugin
Maya	Autodesk	Integriert
Nuke	The Foundry	Integriert
Photoshop	Adobe	Integriert

Tabelle 7.1: ACES: Unterstützte Software, Ausschnitt

7.1 Postproduktion in ACES

Um aufgezeichnetes Material aus der Kamera in den ACES2065-Farbraum zu transformieren, kommen sogenannte Input Device Transforms (IDT) zum Einsatz. Diese werden von den Herstellern professioneller Kamerasysteme bereitgestellt und erhalten die gewünschte Farb- und Kontrastwiedergabe des jeweiligen Systems (Piccin & Weynand 2018: 27 f.). Ebenfalls gibt es allgemein gültige IDTs, die sich an verschiedenen Distributionsstandards wie BT.709 oder DCI-P3 orientieren und die exakte Inverse der zugehörigen Output Device Transform (ODT) bilden, um Archivmaterial oder Daten aus anderen Quellen verwenden zu können. Der gesamte Offline-Schnitt kann natürlich wie gewohnt mit Proxies in REC709 durchgeführt werden und ist vom Farbmanagement nicht weiter betroffen. Im Conforming werden die geschnittenen Schüsse den zu 16Bit-OpenEXR-Sequenzen umgewandelten Rohdaten im ACES2065-Farbraum zugeordnet. Um Platz im Archiv zu sparen reicht es, nur die benötigten Schüsse umzuwandeln und alle nicht geschnittenen Daten im kamara-sepezifischen Rohformat zu archivieren.

Liegt nun die gesamte Timeline im ACES-Farbraum vor, können VFX-Plates mit Framehandles für das Compositing ausgegeben werden. Jeglicher Austausch von Videodaten zwischen den Departments geschieht ab diesem Zeitpunkt in 16Bit-OpenEXR-ACES-Sequenzen. Der Arbeitsfarbraum in der jeweiligen Software für Grading oder VFX muss dabei nicht ACES2065 sein. Der große lineare Farbraum von ACES ist bei der Bilddatenverarbeitung oftmals ein Hindernis, da die Werkzeuge und Effekte der Softwarepakete nicht auf diese Art Bilddaten ausgelegt sind. Zu diesem Zweck wurden ACEScc und ACEScct entwickelt, die dank logarithmischer Encodierung besser zu den Werkzeugen im Color Grading passen. ACEScc und ACEScct unterscheiden sich durch ihr Verhalten in dunklen Bildbereichen und lassen sich je nach Präferenz des Coloristen verwenden. Beide umfassen einen etwas kleineren Farbraum als ACES2065,

um Farbanpassungen zu vereinfachen (Piccin & Weynand 2018: 40). Für die Arbeit im Bereich computer-generated Imagery (CGI) wurde ebenfalls ein kleinerer Farbraum ACEScg entwickelt, um die Berechnung von Licht und Farbe in virtuellen Welten zu vereinfachen (Piccin & Weynand 2018: 34 f.). Wichtig ist bei diesen Arbeitsfarbräumen jedoch, dass sie in keinem Fall zur Speicherung von Material verwendet werden, sondern nur zur internen Farbverarbeitung innerhalb einer Software. Es macht also keinen Unterschied für die Ausgabe von bearbeitetem Material, ob in ACEScc, ACEScct oder ACEScg gearbeitet wurde. Es wird stets eine Bildsequenz in ACES2065 exportiert.

7.2 Monitoring von Material im ACES2065-Farbraum

Das Monitoring von ACES-Material funktioniert mittels der Output Device Transforms (ODT). Diese transformieren die ACES-Daten nach verschiedenen Sendestandards zur Betrachtung und Distribution. Diese Transformationen enthalten das nötige Tone-Mapping, um Signalanteile außerhalb der jeweiligen Spezifikation zu erhalten. Eine weitere Möglichkeit Material in ACES zu betrachten stellt ACESProxy dar. Ein ACESProxy-Signal lässt sich dank effizienterer logarithmischer Encodierung über SDI übertragen und auf kompatiblen Monitoren betrachten (Piccin & Weynand 2018: 29). Da jedoch nur wenige Monitore am Markt dieses Format interpretieren können, soll sich hier auf eine Darstellung über ODTs beschränkt werden.

Für SDR gibt es eine entsprechende ODT, die das große Farbvolumen von ACES2065 in den vergleichsweise kleinen Subraum von BT.709 transformiert. Für HLG-HDR gibt es ebenfalls eine solche ODT, die jedoch den größeren Farbraum von BT.2020 nutzt und mehr Informationen in den Lichtern erhalten kann, aufgrund der in Kapitel 4 besprochenen Charakteristik der HLG-EOTF.

Im Fall von PQ-HDR stehen mehrere ODTs zur Verfügung, die je nach verwendetem Mastering-Display zum Einsatz kommen. Bei einem Sony BVM-X300 transformiert die ODT hin zu einer Leuchtdichte von maximal 1000cd/m^2 . Bei einem Dolby-Pulsar wäre es die ODT für 4000cd/m^2 .

7.3 Mastering für SDR und HDR

Der hier beschriebene Workflow sieht ein Mastering in SDR vor, aus dem die erste Sendekopie entsteht. Danach wird aus der gleichen Timeline mit allen bereits durchgeführten Bearbeitungsschritten mittels einer ODT für HDR-Monitore die HDR-Sendekopie erzeugt. Hier soll sich jedoch nicht nur auf das in ACES definierte Tone-Mapping beschränkt werden. Vielmehr ist es mit diesem Verfahren möglich, einzelne Schüsse für die Ausgabe in HDR anzupassen, um das erweiterte Farbvolumen nutzen zu können, ohne ein vollständiges zweites Color-Grading durchzuführen. Dieses Verfahren wird auch Trim Pass genannt. Oft wird damit die Transformation von HDR zu

SDR bezeichnet und nicht umgekehrt. Passender wäre somit der Begriff Enhancement Pass. Er findet in der Praxis jedoch bislang kaum Verwendung.

Unüblich ist es jedoch nicht, zunächst den SDR-Master zu erzeugen und davon die Ausgabe in HDR zu entwickeln. Im Vergleich zum von Dolby empfohlenen Workflow für Dolby Vision, bei dem pro Trim Pass das Farbvolumen reduziert wird, räumt dieses Verfahren SDR einen höheren Stellenwert ein. Somit ist garantiert, dass das Endformat keine Kompromisse aufgrund der HDR-SDR-Wandlung aufweist. Amazons Serie The Grand Tour wurde auf diese Weise gemastert im Hinblick auf eine Kundschaft, die hauptsächlich Inhalte auf SDR-Geräten konsumiert.

Inwieweit sich Consumer-OLED-TVs anstatt professioneller HDR-Monitore für den genannten Trim bzw. Enhancement Pass eignen, wird in Kapitel 9 überprüft.

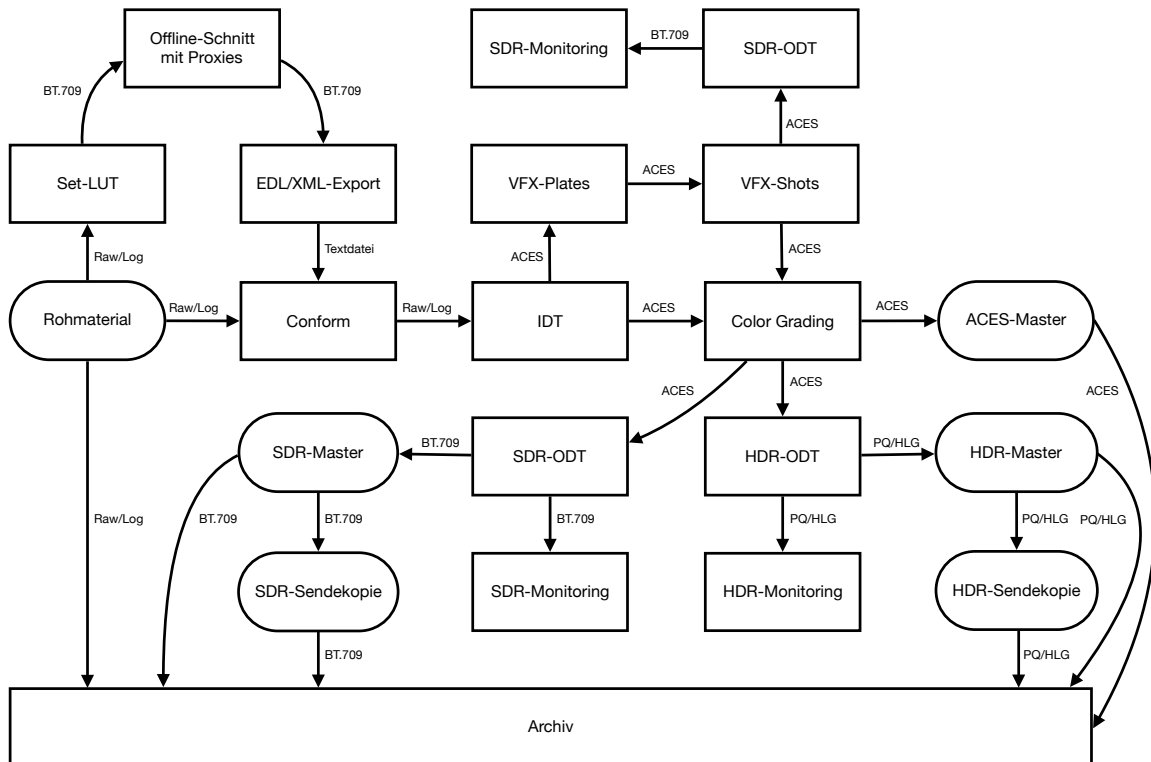


Abbildung 7.1: Postproduktion mit ACES und HDR

8 Signalverteilung für HDR-Signale

Die Computersysteme für Grading- und VFX-Suiten bei The Marmalade sind abgesetzt und zentral im Serverraum installiert. Somit müssen die Signale für Monitore und Eingabegeräte über die Hausleitungen verteilt werden. Für das Videomonitoring geschieht dies über Koaxialkabel. Für den bisherigen Workflow stellte dies eine optimale Lösung dar, da per SDI das Videosignal direkt von den Video-I/O-Karten zu den Referenzmonitoren übertragen werden konnte. Das Monitoring von HDR-Inhalten soll nun jedoch auf Consumer-OLED-TVs erfolgen, die kein SDI bieten.

Eine rein auf HDMI basierende Signalverteilung stellt jedoch keine Lösung dar. Erstens ist für HDMI keine Infrastruktur im Haus verbaut und zweitens sind bei höheren Auflösungen und Bildraten die nötigen Kabellängen nur schwer zu erreichen. Die Übertragung per SDI mit Wandlung zu HDMI direkt am Display scheint also naheliegend. Die nötige Infrastruktur ist bereits vorhanden und lässt sich leicht für höhere Datenraten per Dual- bzw. Quadlink erweitern.

Durch die Wandlung von SDI zu HDMI offenbart sich jedoch eine Limitierung bei der Verwendung von Consumer-Equipment. Für die korrekte Darstellung von HDR-Inhalten auf Fernsehern und anderen Endgeräten wie Laptops und Smartphones sind Metadaten erforderlich, die parallel zum Bildinhalt übertragen werden müssen. Je nach verwendetem HDR-Standard enthalten diese Daten Informationen zu Farbraum, maximaler Leuchtdichte, durchschnittlicher Leuchtdichte, verwendetem Referenzmonitor und Informationen zur HDR-SDR-Kreuzkonvertierung (siehe Unterabschnitt 3.4.1). Anders als bei professionellen Monitoren lassen sich diese Parameter nicht vollständig am Display konfigurieren, was die Übertragung von Metadaten zwingend erforderlich macht.

Auch den Softwareherstellern ist dieses Problem bekannt. So bietet Blackmagic in DaVinci Resolve die Möglichkeit Metadaten über ihre HDMI-I/O-Karten zu übertragen. Eine Lösung solche Daten über SDI auszugeben, die auch bei der Wandlung zu HDMI erhalten bleiben, ist zur Zeit jedoch nicht in Sicht.

Zur SDI-HDMI-Signalwandlung kommt bei The Marmalade der Mini-Converter Hi5-4K-Plus von AJA Video Systems zum Einsatz. Dieses Gerät wandelt nicht nur das Videosignal zum gewünschten HDMI-Standard, es ermöglicht auch die sogenannte Metadata-Injection. Dabei werden dem Ausgangssignal Metadaten hinzugefügt, die im Eingangssignal nicht vorhanden sind. Die Konfiguration hierfür erfolgt über eine USB-Schnittstelle und eine Computersoftware mit graphischer Oberfläche. Somit lässt sich schnell die Konfiguration von SDR auf HDR ändern.

Mit der Konfigurationssoftware können Metadaten für HLG oder PQ dem Signal hinzugefügt werden. Unabhängig davon lässt sich der Farbraum definieren. HLG be-

8 Signalverteilung für HDR-Signale

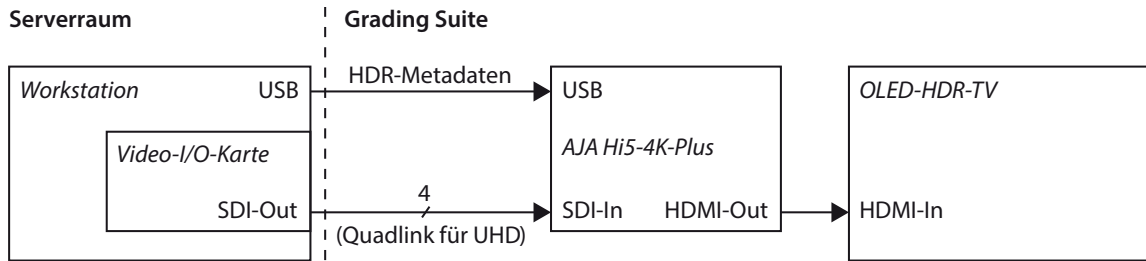


Abbildung 8.1: Metadata-Injection für abgesetzte Systeme

nötigt abseits von EOTF und Farbraum keine weiteren Metadaten. Für PQ hingegen lassen sich die minimale und maximale Helligkeit des Displays übertragen sowie die absolut maximale und die maximale pro Bild gemittelte Helligkeit des Inhalts (MaxCLL, MaxFALL). Die genannten Parameter werden in Unterabschnitt 3.4.1 näher erläutert.

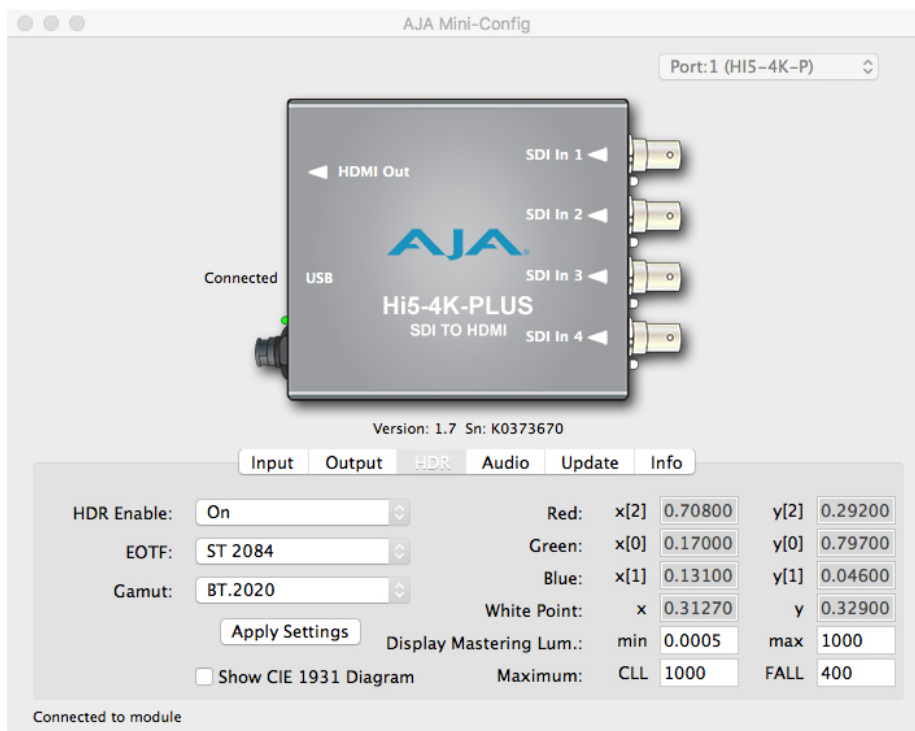


Abbildung 8.2: AJA Mini-Config, graphische Oberfläche

Durch die hinzugefügten Metadaten aktiviert der verwendete HDR-TV den entsprechenden Bildmodus für HLG oder HDR10 und interpretiert das Signal mit der korrekten EOTF im passenden Farbraum. Bei PQ werden die zusätzlichen Metadaten zu Primärvalenzen und Displayhelligkeit genutzt, um entsprechendes Tone-Mapping zu betreiben. Wie genau diese Daten interpretiert werden, ist jedoch vom Hersteller

des Geräts abhängig und unterliegt keiner einheitlichen Standardisierung. Da bei der Bildbearbeitung kein Tone-Mapping am Monitor stattfinden sollte, scheint es sinnvoll die Metadaten dem verwendeten OLED-TV anzupassen. Ob sich damit Tone-Mapping vollständig abstellen lässt, ist schwer zu beurteilen, da dies dem Nutzer nicht kommuniziert wird (siehe Kapitel 9).

Beim Testaufbau mit verschiedenen HDR-OLED-TVs wurde festgestellt, dass Geräte des Herstellers Panasonic eine manuelle Konfiguration von Farbraum und EOTF bieten, die die im Signal enthaltenen Metadaten überschreibt. Dies würde das manuelle Hinzufügen dieser Daten am Konverter überflüssig machen. Für reine HLG-Workflows, die keine weiteren Metadaten benötigen, scheint dies eine valide Lösung zu sein. Zur Kontrolle über Tone-Mapping bei PQ wird jedoch weiterhin Metadata-Injection notwendig sein.

9 Displaykonfiguration und Kalibrierung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Evaluation aktueller Consumer-OLED-TVs zur Verwendung als HDR-Monitor in professionellen Produktionsumgebungen. Betrachtet wird hierfür die Möglichkeit diese Geräte standardgemäß zu kalibrieren, um den Anforderungen für Produktionsmonitore gerecht zu werden. Grundlage dieser Bewertung ist der Standard Tech 3320 der EBU. Hierin werden für HDR drei Geräteklassen 1a, 1b und 2 definiert. Dabei ist Klasse 1a die theoretische Referenzklasse, die mit aktuellen Technologien nicht zu erreichen ist. Klasse 1b definiert die Referenz für aktuell verfügbare Monitore, die zur technischen Evaluation des Bildes verwendet werden. Klasse 2 Monitore hingegen unterliegen weniger strengen Toleranzen und eignen sich daher für alle Schritte der Produktion, die gestalterischen Charakters sind und keine technische Perfektion erfordern. In der Praxis kommen Referenzmonitore oftmals nur in der Bildtechnik und im Color-Grading zum Einsatz.

Für diese Arbeit soll überprüft werden, ob bei einer Produktion, deren primäres Endformat in SDR ausgegeben wird, ein HDR-OLED-TV ausreicht, um einen Trim Pass auszuführen, bei dem ein sekundäres HDR-Medium entsteht. Motivation und Begründung dieses Vorgehens wird in Abschnitt 6.4 erläutert.

9.1 Strategien zur farbrichtigen Kalibrierung

Für die Kalibrierung von Fernsehern stehen mehrere Werkzeuge zur Verfügung. Mit Hilfe des im Display integrierten Color Management System (CMS) lassen sich verschiedene Parameter zur Bilddarstellung modifizieren. Im High-End-Segment sind die vorhandenen Einstellmöglichkeiten hier sehr weitreichend. Ebenfalls kann eine 3D-Lookup-Table (LUT) zur Korrektur des Monitors verwendet werden. Einige Hersteller bieten dies direkt im Gerät an. Ist dies nicht möglich, kann das Signal bereits vor dem Monitor per Software oder mittels eines zwischengeschalteten Geräts – einer sogenannten LUT-Box – vorverarbeitet werden. Eine Kombination aus integriertem CMS und 3D-LUT ist möglich.

Fernseher bieten anders als professionelle Monitore eine Reihe an Bildverarbeitungsschritten, die dem Verbraucher zwar ein optimiertes Seherlebnis bieten sollen, jedoch eine nüchterne Bildbeurteilung unmöglich machen. Dazu zählen Vorgänge wie Rauschminderung, Nachschärfung, Kantenanhebung, Skalierung und generell jede Form der Bildverarbeitung, die in Abhängigkeit des Eingangssignals dessen Inter-

pretation verändert. Wenn möglich sollten solche Funktionen vor dem Profilieren abgeschaltet werden.

Ebenfalls stehen eine Vielzahl an Bildprofilen zur Verfügung, die sich in den meisten Fällen weniger an geltenden Standards orientieren als an eindrucksvollem Kontrast und Sättigung. Hier gilt es messtechnisch das neutralste Profil zu ermitteln.

9.2 Verwendetes Material

Der hier verwendete Monitor ist ein Fernseher vom Typ C8 in der 65-Zoll-Ausführung der Marke LG Electronics. Für die Messungen kam das Kolorimeter SpectraCal C6 HDR2000 zum Einsatz, welches mittels eines JETI specbos 1201 für die Messung an Panels der 8er Serie von LG Displays kalibriert wurde. Weitere Informationen hierzu finden sich im Abschnitt 9.3 Probe Matching.

Als Signalgenerator kam ein VideoForge Pro zum Einsatz. Die Software Calman Studio des Herstellers SpectraCal wurde im Autocal-Modus betrieben, hierbei werden Signalgenerator und Messgerät automatisch angesteuert und erfassen ohne Zutun des Nutzers Messdaten zu Grauverlauf und Sättigungsverlauf im gewünschten Videostandard. Aus den Messwerten wird eine eindimensionale Lookup-Tabelle (LUT) zur Korrektur des Grauverlaufs errechnet sowie eine 3D-LUT zur Korrektur von Farborten und Sättigung. Die LUTs werden per Netzwerk auf den Fernseher übertragen.

Zur Überprüfung der Kalibrierung und zum Erfassen weiterer Messdaten, die für die Kalibrierung nicht nötig sind, wie z. B. Daten zur Helligkeitslimitierung und Uniformität, wurde ein X-Rite i1 Pro Spektrometer zusammen mit der Software LightSpace CMS verwendet.

9.3 Probe Matching

In der Praxis haben sich einfache Kolorimeter aufgrund ihrer höheren Empfindlichkeit und Geschwindigkeit zur regelmäßigen Kalibrierung professioneller Displays bewährt. Sie bieten präzisere Messungen bei dunklen Lichtquellen als Spektralphotometer und lassen sich insbesondere bei wenig Licht deutlich schneller auslesen.

Ein Kolorimeter misst nur die Korrelation des einfallenden Lichts zur spektralen Gewichtung seiner Filter. Im einfachen Fall des Tristimulus-Kolorimeters sind drei solcher Filter verbaut. Je mehr Anteile des einfallenden Lichts hinter dem Filter auf die Photodiode treffen, desto ähnlicher ist das Spektrum des einfallenden Lichts dem des jeweiligen Filters. Aus mindestens drei Filtern lässt sich somit eine Farbe in Farbort, Sättigung und Luminanz bestimmen. Da die verwendeten Filter jedoch nicht dem Reaktionsverhalten der Zapfen im menschlichen Auge entsprechen, können bei verschiedenen Lichtquellen starke Differenzen zwischen Messwert und tatsächlich wahrnehmbarer Farbe entstehen.

Spektrometer weisen diese Problematik nicht auf, da sie das tatsächliche Spektrum

der betrachteten Lichtquelle erfassen. Somit lassen sich mit ihnen trotz unterschiedlicher Spektren verschiedener Displaytechnologien präzise Farbwerte erfassen.

Um nun die Vorteile beider Technologien zu kombinieren, wird die Differenz des gemessenen Weißpunkts am Display zwischen Kolorimeter und Spektrometer als Korrekturwert auf alle weiteren Messungen des Kolorimeters angewandt. Die Verschiebung des Weißpunkts auf den Achsen Blau-Orange und Grün-Magenta enthält dabei die Information darüber, wie die Messwerte des Kolorimeters zu gewichten sind, um der tatsächlichen Farbe zu entsprechen. Dabei ist es nicht notwendig, von jedem Panel, das kalibriert werden soll, diese Korrekturwerte zu erfassen. Innerhalb einer Fertigungsserie ist die Streuung der Spektralwerte so gering, dass viele Softwarehersteller von Kalibrierungslösungen Datenbanken zur Verfügung stellen, die die entsprechenden Korrekturwerte für verschiedene Kolorimeter enthalten. Für die hier vorliegenden Versuche wurden jedoch eigene Korrekturdaten an einem Display gleichen Typs erfasst und zur Kalibrierung angewendet.

9.4 Messergebnisse

9.4.1 Displayhelligkeit

Das grundlegende Problem der verwendeten OLED-TVs liegt in der maximal erreichbaren Helligkeit des Panels. Nach EBU-Richtlinie werden 1000cd/m^2 benötigt. Das hier verwendete Display erreicht maximal 770cd/m^2 .

Für PQ-HDR lassen sich hier drei Lösungsansätze entwickeln:

1. Der Inhalt wird für 1000cd/m^2 gemastert. Am Display werden mittels Tone-Mapping hohe Luminanzen in den darstellbaren Bereich transformiert. Color-Grading ist ohne die tatsächlichen Kontraste zu sehen jedoch risikobehaftet. Diese Lösung ist zu bevorzugen, falls der OLED-TV nur als Klientenmonitor verwendet werden soll und die eigentliche Bildbeurteilung auf einem HDR-Referenzmonitor stattfindet.
2. Man verzichtet auf das Mastering mit 1000cd/m^2 und nutzt nur den tatsächlich darstellbaren Luminanzbereich des Displays ohne Tone-Mapping. Hierbei gibt man jedoch den großen Spielraum für Spitzlichter von PQ ein Stück weit auf.
3. Wie oft bei HDR-Projektoren im Konsumentensegment verwendet man einen Multiplikator, der das Verhältnis von im Signal beschriebener Helligkeit zur Helligkeit des Displays steuert. Bei einem Multiplikator von 2 würde das Display also den eigentlich nicht darstellbaren Wert von 1000cd/m^2 als 500cd/m^2 interpretieren. Hier bliebe der Kontrast erhalten, allerdings erzeugt ein um die Hälfte dunkleres Bild auch eine andere Bildwirkung.

Aufgrund der Einschränkungen des hier betrachteten Systems zur Kalibrierung des LG C8, soll der erste Lösungsansatz verfolgt werden.

HLG ist weniger komplex in der Handhabung, da außerhalb der Referenzumgebung lediglich das Systemgamma ein wenig angepasst werden muss (siehe Abschnitt 4.3), um die veränderte Bildwirkung eines dunkleren Monitors zu kompensieren. Inwiefern diese Vorgabe seitens LG beim C8 umgesetzt wurde, soll messtechnisch erfasst werden.

9.4.2 EOTF-Tracking

Die Display sollte in seiner Wiedergabe unterschiedlicher Helligkeiten möglichst nah an der jeweiligen EOTF des verwendeten Standards arbeiten. Die EBU Tech 3320 definiert hierfür eine Toleranz von $\pm 0,025\%$ des Referenzwerts im Bereich zwischen 5% und 80% des maximalen Pegels. Der LG C8 überschreitet diese Toleranz im HLG-Modus nur geringfügig. Für PQ wurde noch kein Toleranzbereich seitens der EBU definiert. In Abbildung 9.1 ist gut zu erkennen, dass das Display dem Verlauf der PQ-EOTF folgt, bis es seine maximale Helligkeit erreicht hat.

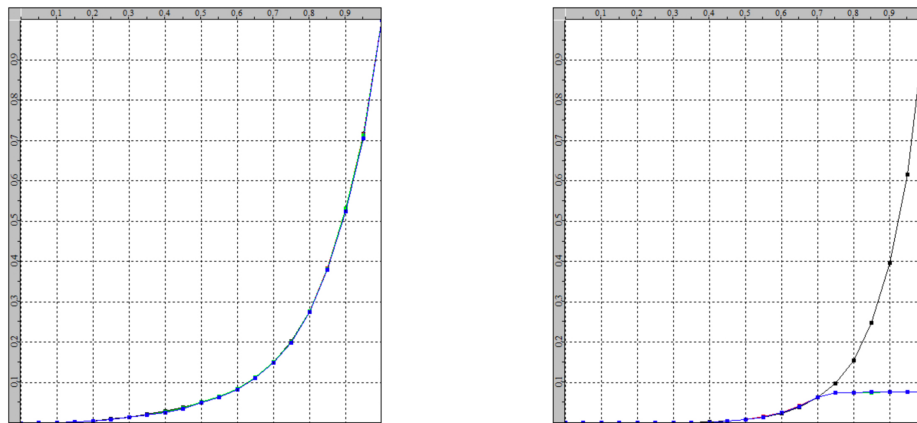


Abbildung 9.1: LG C8 EOTF-Tracking, LightSpace-Bericht

Die Farbabweichung bei unterschiedlichen Helligkeiten ist erwartungsgemäß gering, da hierfür eine eigene 1D-LUT anhand von 20 Messpunkten in Calman generiert wird. Die maximale Abweichung liegt bei $0,91\Delta E_{ITP}$ und damit unterhalb der Wahrnehmungsgrenze. Im Mittel liegt die Abweichung bei $0,36\Delta E_{ITP}$. ΔE_{ITP} ist so skaliert, dass nur Farben mit einem Abstand größer 1 sich im adaptierten Zustand des Auges unterscheiden lassen (Rec. ITU-R BT.2124-0 2019).

9.4.3 Farbraum

Die EBU-Norm definiert für Monitore der Klasse 1a und 1b bzw. 2 unterschiedliche Bereiche, in denen die Primärvalenzen des Displays liegen sollten. Für grün und blau werden dabei dreieckige Flächen definiert (siehe Tabelle 9.1 G_1 bis G_3 und B_1 bis B_3), für rot ist es ein viereckiger Bereich (R_1 bis R_4). Dargestellt sind hier die Bereiche

für die Klassen 1b und 2. Die Bereiche für Klasse 1a sind deutlich kleiner und liegen näher um die Primärvalenzen des BT.2020-Farbraums (R_0 , G_0 , B_0).

Farbe	u'	v'
R_{C8}	0,4855	0,5255
R_0	0,5566	0,5165
R_1	0,4875	0,5268
R_2	0,6234	0,5065
R_3	0,6202	0,5022
R_4	0,4790	0,5195
G_{C8}	0,0998	0,5737
G_0	0,0556	0,5868
G_1	0,0177	0,5863
G_2	0,0696	0,5165
G_3	0,0742	0,5713
B_{C8}	0,1744	0,1413
B_0	0,1593	0,1258
B_1	0,1836	0,0921
B_2	0,1558	0,1318
B_3	0,1754	0,1579

Tabelle 9.1: Primärvalenzen LG C8 vgl. Standard BT.2020 und Toleranzbereiche EBU Tech 3320

Wie in Abbildung 9.2 zu erkennen ist, erfüllt der LG C8 in Sachen Farbraum nicht die Anforderungen an HDR-Produktionsmonitore nach EBU Tech 3320. Während Rot noch knapp innerhalb des Toleranzbereichs liegt, sind Grün und Blau deutlich außerhalb der definierten Bereiche.

In der Praxis hat dieser Mangel jedoch nur geringe Auswirkungen. Da kein Display den gesamten BT.2020-Farbraum eines HDR-Signals abdecken kann, wird in der Regel nur ein Ausschnitt des Farbraums verwendet. Dieser entspricht den Primärfarben von DCI-P3. Die maximale Sättigung des Displays wird dabei für Grün und Rot erreicht, nicht jedoch für Blau. Wie der Abbildung 9.2 zu entnehmen ist, wird der P3-Subraum somit fast vollständig abgedeckt. Mit den korrekten Metadaten im Signal, ließe sich somit der gesamte DCI-P3-Subraum bei der Arbeit mit PQ-HDR ausnutzen, ohne die Probleme von Saturation-Mapping zu erfahren. Da HLG keine Metadaten für eigene Primärvalenzen innerhalb von BT.2020 unterstützt, muss

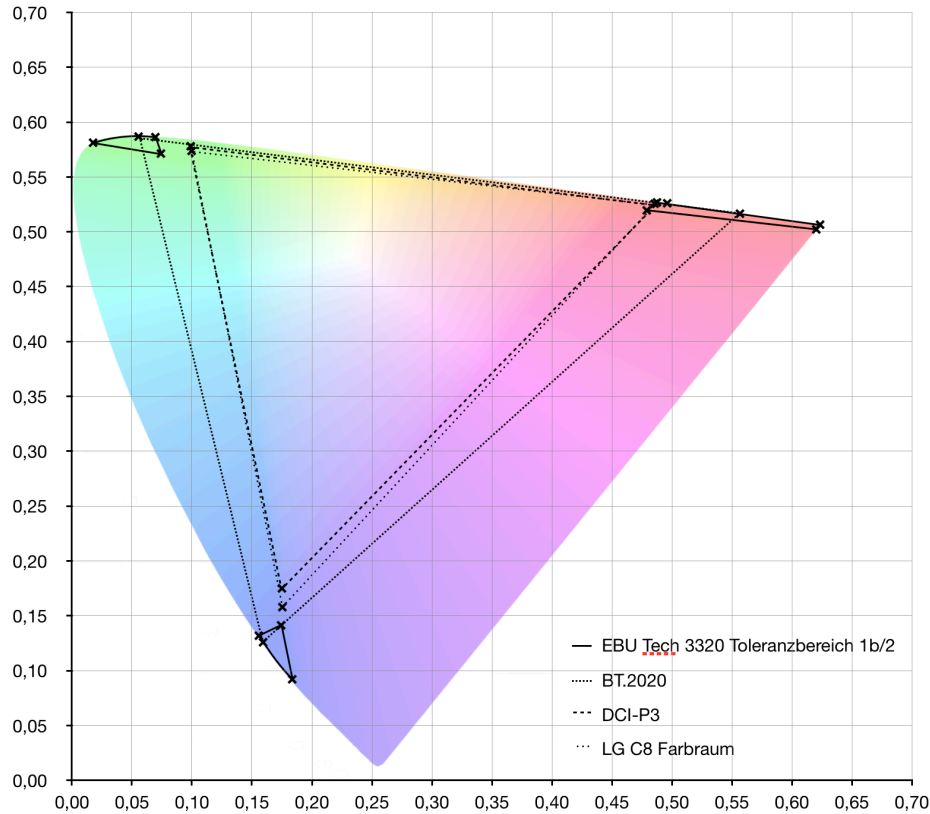


Abbildung 9.2: Farbraum LG C8 nach Kalibrierung mit PQ BT.2020, selbsterstellte Grafik

Saturation-Mapping in Kauf genommen werden.

9.4.4 Farbwiedergabe

Zur Kalibrierung der Farbwiedergabe wurde lediglich eine Matrixkorrektur verwendet, bei der die 3D-LUT nur über Verzerrung der Primärfarben erstellt wird. Dieses Verfahren ist das mit Abstand zeiteffizienteste, jedoch weniger präzise im Vergleich zur Messung und Korrektur anhand von hunderten oder gar mehreren tausend Punkten.

Zur Überprüfung der Kalibrierung wurden die Farbfelder des bekannten X-Rite ColorCheckers herangezogen. Diese Sammlung an Farben soll bekannte natürliche Farben wie Himmelblau, Blattgrün oder Hauttöne repräsentieren, die aufgrund ihres häufigen Auftretens besonders akkurat wiedergegeben werden sollten. Um die reine Farbwiedergabe beurteilen zu können, wurden Abweichungen in Luminanz nicht berücksichtigt. Nur wenige Messwerte überschreiten bei diesem Test geringfügig die Grenze des Farbabstands ΔE_{ITP} von 1.

Die EBU-Norm bestimmt die maximale Farbabweichung nicht über das noch recht neue ΔE_{ITP} , sondern verwendet ΔE_{uv}^* auf Basis des CIE-LUV-Farbmodells. Als

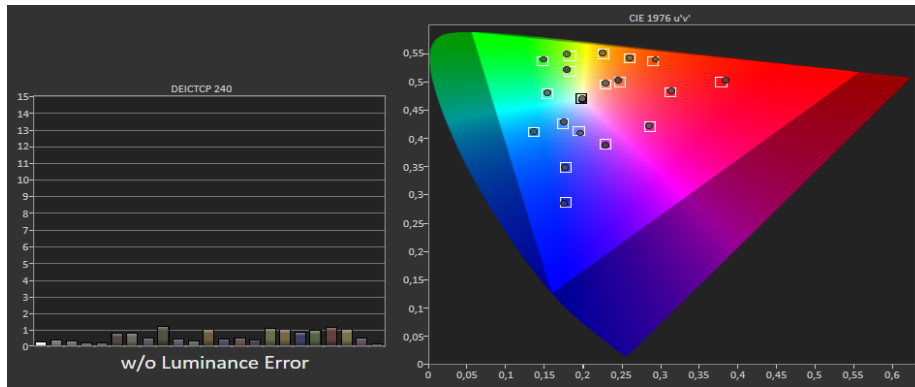


Abbildung 9.3: LG C8 Farbwiedergabe der ColorChecker-Farbtabelle nach Kalibrierung für BT.2020, Bildschirmfoto aus Calman Studio

Grenze gelten hier $4\Delta E_{uv}^*$ für Farben im Allgemeinen und $2,6\Delta E_{uv}^*$ für Hauttöne. ΔE_{ITP} und ΔE_{uv}^* sind nicht direkt miteinander vergleichbar. Allgemein lässt sich jedoch argumentieren, dass eine Farbdarstellung mit maximaler Abweichung unterhalb der Wahrnehmungsgrenze unabhängig vom verwendeten Messverfahren der farbkritischen Bildbeurteilung genügt.

Trotz dieser guten Messwerte muss jedoch eine Einschränkung für die farbkritische Verwendung von OLED-TVs getroffen werden. Im Folgenden soll näher darauf eingegangen werden.

9.4.5 RGBW-Subpixel

Professionelle HDR-Monitore verwenden drei Subpixel in den Farben Rot, Grün und Blau für jeden Bildpunkt. Die drei Subpixel erzeugen bei ausreichendem Betrachtungsabstand eine Mischfarbe. Bei HDR-OLED-TVs kommt jedoch ein vierter weißer Subpixel dazu, um die großen Helligkeiten von HDR erreichen zu können. Dies führt dazu, dass helle Bildbereiche eine geringere maximale Sättigung erhalten, da die Zugabe von Weiß nicht nur die Luminanz erhöht, sondern auch die Chrominanz reduziert.

9.4.6 Automatic Brightness Limiting

Nicht nur die maximale Helligkeit des Displays in einem Punkt stellt ein Problem dar. Die über die gesamte Bildfläche gemittelte Maximalhelligkeit ist ebenfalls eine Hürde. Damit das Panel keinen Schaden nimmt, kommt in OLED-Displays ein sogenanntes Automatic Brightness Limiting (ABL) zum Einsatz. Ist der durchschnittliche Signalpegel eines Bildes zu hoch, regelt das Display die Helligkeit des Panels herab. Steht ein Bild zu lange, ohne dass sich der Inhalt verändert, wird die Helligkeit ebenfalls reduziert. Dieses Verhalten ist keine Eigenheit von Konsumentendisplay, auch

professionelle OLED-Displays nutzen ABL. Es soll messtechnisch erfasst werden, ob ABL die Arbeit mit den OLED-TVs beeinträchtigt.

Zunächst wurde die maximale Helligkeit auf voller Fläche erfasst. Zu diesem Zweck wurde ein bildfüllendes Grau in seiner Helligkeit gesteigert, bis trotz höherem Signalpegel keine Steigerung der Luminanz am Display gemessen werden konnte. Bei $137,5\text{cd/m}^2$ war diese Grenze erreicht. Der Referenzwert für PQ kann demnach nicht erreicht werden, er liegt mit $199,2\text{cd/m}^2$ deutlich höher. Die geforderten 203cd/m^2 für HLG-Signale liegen zwar auch außerhalb der Kapazität des Displays, da bei HLG jedoch die Helligkeit des Bildes mit der maximalen Helligkeit des Displays skaliert, gilt dieser absolute Wert auch nur für Displays mit 1000cd/m^2 Spitzenleuchtdichte. Die Definition für die minimale vollflächige Helligkeit ist bei HLG daher über den relativen Signalpegel zu treffen. Hier werden von der EBU Tech 3320 75% gefordert. Für das hier gemessene Display mit 770cd/m^2 maximaler Leuchtdichte ergibt sich ein Wert von 149cd/m^2 bei 75% HLG. Um professionelles Arbeiten mit dem LG C8 in HLG zu ermöglichen scheint es sinnvoll, die maximale Leuchtkraft des Panels etwas zu reduzieren, um tatsächlich ein Weiß auf voller Fläche ohne ABL anzeigen zu können. Dies ließe sich mit dem Parameter OLED-Light am Display steuern.

Besonders beim Color Grading wird die Problematik hinter ABL deutlich. Riegelt das Display die Helligkeit automatisch ab, kann dies dazu führen, dass Manipulationen am Bild nicht wie erwartet umgesetzt werden. Wird mittels Gamma-Regler die Helligkeit des Bildes soweit erhöht, dass ABL im Display eingreift, fühlt es sich für den Coloristen so an, als wäre eine noch stärkere Manipulation nötig, um den gewünschten Bildeindruck zu erzielen, tatsächlich gibt das Display jedoch das Eingangssignal nicht mehr korrekt wieder. Professionelle HDR-Displays machen durch Kontrollleuchten und False-Color-Assistenten auf diesen Umstand aufmerksam, bei Consumer-Displays gibt es jedoch keinerlei Warnhinweise.

Eine weitere Form von ABL, die den Bildeindruck verfälschen kann, ist Automatic Static Brightness Limiting (ASBL). Hierbei registriert das Display, dass sich das Eingangssignal über einen längeren Zeitraum nicht oder nur sehr wenig verändert hat und reduziert daraufhin ebenfalls seine Helligkeit, um mögliches Einbrennen zu verhindern. In der Versuchsreihe zum LG C8 zeigte sich der Effekt von ASBL zum ersten Mal bei den Messungen zur Uniformität des Panels. Bei der Einrichtung für die Verschiedenen Messpositionen wurde ein grauer Balken auf dem Display gezeigt, der über die gesamte Breite verlief und bei vertikaler Zentrierung etwa 30% der Bildfläche bedeckte. Durch Zufall war das Spektrometer im kontinuierlich lesenden Modus und zeigte nach zwei Minuten konstantem Bildinhalt einen langsam fallenden Helligkeitspegel an. Nach weiteren sechs Minuten war die gemessene Leuchtdichte von 50cd/m^2 auf 7cd/m^2 gefallen. Durch leichte Veränderung von Position oder Farbe des Balkens ließ sich wieder die gewünschte Helligkeit auf dem Display anzeigen. Das Brightness Limiting schaltete sich durch eine solche Veränderung in Bruchteilen von Sekunden ab.

Dieses Verhalten ist in ähnlicher Form auch bei professionellen OLED-Monitoren im SDR-Segment zu beobachten. So reduziert ein Sony PVM-A250 die Helligkeit des

Panels bei statischem Inhalt nach zehn Minuten. Die Differenz der beim LG C8 gemessenen zwei Minuten, zu den zehn Minuten eines Produktionsmonitors, ist in der Praxis relevant. Bei der Bildbearbeitung muss ein Standbild teilweise sehr lange betrachtet werden, ohne größere Änderungen vorzunehmen. Dabei ist z. B. das Aufhellen eines Auges oder die leichte Angleichung von Hauttönen eine so geringe Änderung, dass der Bildinhalt im Display als quasi statisch gewertet wird. Wird daraufhin die Helligkeit automatisch im Display reduziert, offenbart sich ein weiterer Unterschied zu professionellen Monitoren. Dort wird die Helligkeit schlagartig reduziert und dem Nutzer damit kommuniziert, dass nun keine akkurate Bildwiedergabe mehr gewährleistet ist. Der LG C8 reduzierte in den Versuchen jedoch seine Helligkeit so langsam, dass zunächst kaum eine Änderung mit bloßem Auge zu bemerken war. Während der Bildbearbeitung wäre dies fatal, da der Nutzer hier sogar versuchen könnte, dem veränderten Bildeindruck entgegenzuwirken.

9.5 Schlussfolgerungen

Auch wenn moderne OLED-TVs bei Farbwiedergabe und allgemeiner Bildqualität erstaunlich nah an professionelle Monitore heranreichen, bestehen klare Defizite, die sie als primäre HDR-Produktionsmonitore ungeeignet erscheinen lassen. Die reine Präzision der Bildwiedergabe ist hierbei nicht das Problem. Es ist vielmehr die Arbeitspraxis mit dem Gerät, die nicht den Anforderungen einer professionellen Produktion genügt.

Das größte Problem ist hierbei, dass statische Inhalte nicht länger als wenige Minuten mit konstanter Helligkeit angezeigt werden können (siehe Abschnitt 9.4.6). Eine ähnliche Problematik weisen Bilder auf, die aufgrund von zu hohem gemitteltem Luminanzpegel nur durch Dimmen des Panels dargestellt werden können.

Professionelle HDR-Displays müssen nach EBU Tech 3320 nicht den gesamten Farbraum von PQ oder HLG mit BT.2020-Primärfarben wiedergeben können. Doch sobald Signalanteile außerhalb der Kapazität des Displays liegen, muss der Nutzer darauf hingewiesen werden. Bei der Verwendung eines OLED-TVs erfährt der Nutzer jedoch nicht, ob Teile des Bildes gerade nur durch Luminance- oder Saturation-Mapping dargestellt werden können oder ob aus verschiedenen Gründen die Helligkeit des Panels reduziert werden musste.

Dennoch haben OLED-Fernseher einen Platz in der Videoproduktion. Als Klientenmonitore sind sie aufgrund ihrer großen Bilddiagonale perfekt geeignet. Und auch für den hier vorgeschlagenen Trim Pass bei dem ein HDR-Master aus dem fertigen für SDR bearbeitetem Material erzeugt wird, scheinen die Geräte geeignet zu sein. Der Test in der Praxis soll hier weitere Erkenntnisse liefern.

10 HDR-Workflow in der Praxis

10.1 Testmaterial

Zur Überprüfung des beschriebenen ACES-HDR-Workflows wurde in logarithmischer Codierung aufgenommenes Testmaterial verwendet. Das Material stammt von einer Kamera des Typs Sony HDC-4300 und liegt dementsprechend mit der herstellereigenen OETF S-Log3 und im Farbraum S-Gamut3.Cine vor. Die entsprechende Input Device Transform (IDT) wurde zur Transformation in den ACES2065-Farbraum verwendet. Die Testaufnahme enthält gesättigtes Effektlicht einer simulierten Bühnenshow bei der verschiedene Lampen des Herstellers Robe Lighting präsentiert wurden. Sie bietet somit starke Kontraste, die den Unterschied zwischen SDR und HDR verdeutlichen.

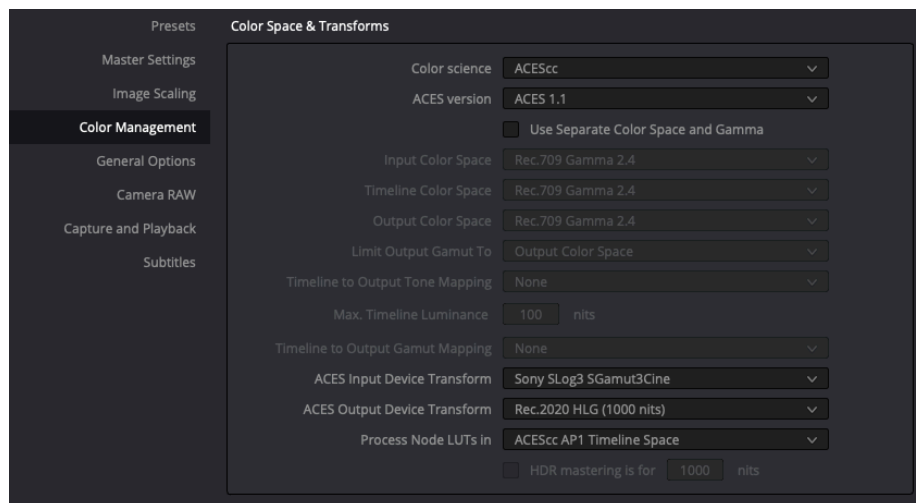


Abbildung 10.1: Farbmanagement in DaVinci Resolve mit ACES

Die hier gezeigten Bildschirmfotos zeigen die Benutzeroberfläche von Blackmagic DaVinci Resolve. Die Benutzung des Farbmanagement mit ACES erfolgt jedoch in jeder Software auf gleiche Weise und unterscheidet sich nur durch die graphische Oberfläche. Bei gleicher ACES-Version (hier 1.1) würde also z. B. Autodesk Flame die exakt gleiche Ausgabe erzeugen wie DaVinci Resolve.

10.2 SDR-Master

Die Bearbeitung erfolgte zunächst für SDR nach BT.709 mittels der entsprechenden Output Device Transform (ODT). Für dieses Testszenario wurde kein aufwändiges Color Grading vorgenommen. Die einzige Korrektur bestand in einer Absenkung der Schatten, um das Rauschen der Kamera zu unterdrücken.

Nach dem Rendern des BT.709-Masters wurde noch eine Ausgabe des Materials in UHD mit erweitertem Farbraum nach BT.2020 generiert. Zur Vergleichbarkeit liegt der BT.709-Master ebenfalls in UHD-Auflösung vor, obwohl dies nach ITU-Norm keinem Sendestandard entspricht. Ein Auflösungsunterschied zwischen den verschiedenen Endformaten würde jedoch die Bewertung verfälschen.

10.3 HDR-Master

Zum Mastering in HDR kam der in Kapitel 9 beschriebene LG C8 OLED-TV zum Einsatz. Über die entsprechenden ODTs wurde die zuvor in SDR bearbeitete Timeline als HLG bzw. PQ ausgegeben. Für PQ wurde eine maximale Leuchtdichte von 1000cd/m^2 verwendet und DCI-P3-Primärfarben innerhalb des BT.2020-Farbraums. Mit diesen Werten betreibt der LG C8 nur geringfügiges Tone-Mapping, da er fast alle Signalanteile nativ darstellen kann. Die benötigten Metadaten wurden bei der SDI-HDMI-Wandlung dem Signal hinzugefügt (siehe Kapitel 8). Zum Vergleich wurde auch eine Version ohne Beschränkung des Farbraums erstellt.

Auch in HLG wurde ebenfalls eine Version mit und eine ohne Begrenzung des Farbraums erstellt.

Die noch in SDR vorgenommene Bearbeitung wurde für den HDR-Master übernommen. Der an dieser Stelle vorgeschlagene Trim bzw. Enhancement Pass (siehe Abschnitt 7.3) wurde bewusst nicht vorgenommen, um im direkten Vergleich von SDR- und HDR-Master Probleme bei der Transformation durch ACES feststellen zu können. Im Idealfall unterscheidet sich der HDR-Master nur durch hellere Spitzlichter und weniger Saturation-Mapping aufgrund des erweiterten Farbraums.

Bei der Arbeit mit PQ und ACES im Color Grading fiel auf, dass die Werkzeuge zur Korrektur und Farbgestaltung deutlich veränderte Ergebnisse erzielten. Es lassen sich zwar immer noch die gewünschten Veränderungen am Bild erzielen, die Maßnahmen dafür unterscheiden sich jedoch von der Arbeit mit gewohntem SDR-Material. Zu erklären ist dies mit der anderen Verteilung der Codewerte auf ihre zugehörigen Farben und Helligkeiten. Die im Kapitel 7 erwähnten logarithmischen Arbeitsräume ACESc_c und ACESc_t sind hierbei enorm wichtig, da im linearen ACES2065 die Werkzeuge noch ungewohnter reagieren würden. DaVinci Resolve bietet die Möglichkeit einzelne Nodes in den HDR-Modus zu schalten, wodurch insbesondere Lift, Gamma und Gain näher zu ihrer bekannten Reaktionsweise arbeiten sollen. Bei manchen Korrekturen hat sich dies als hilfreich erwiesen.

Des Weiteren stellte sich zunächst eine gewisse Überforderung ein, da ein viel grö-

ßeres Farbvolumen zur Gestaltung verfügbar ist. Inwiefern sich HDR auf die Bildsprache auswirkt und wie die visuelle Erzählung davon profitieren kann, gilt es noch zu erforschen.

10.4 Auswertung

Ziel der Entwicklung des beschriebenen Workflows zum Farbmanagement war es, ein technisch einwandfreies Ergebnis in SDR zu liefern und gleichzeitig einen Master mit den gestalterischen Vorzügen von PQ oder HLG erzeugen zu können. Ob dieses Vorhaben gelungen ist, soll in einem direkten Vergleich der verschiedenen Formate überprüft werden.

Da sowohl PQ als auch HLG einen höheren Luminanzwert für diffuses Weiß aufweisen (siehe Tabelle 3.2 und Abschnitt 4.4), wurde die Helligkeit des Monitors im SDR-Modus, an die Helligkeit der HDR-Inhalte angepasst.



Abbildung 10.2: Vergleich PQ (links) zu SDR (rechts), fotografiertes Bildschirm

Die in Abbildung 10.2 gezeigten Fotos lassen innerhalb dieses Dokuments natürlich keine Schlüsse zu. Sie repräsentieren jedoch ein recht positives Ergebnis. Ohne manuelle Anpassungen vorzunehmen ließen sich Bilder erzeugen, die in HDR und in SDR den gleichen visuellen Eindruck beim Zuschauer erzeugen. Sie unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen Farbvolumen in extrem hellen und extrem gesättigten Bereichen. In Mitteltönen lassen sie jedoch kaum differenzieren. Auch die leichte Manipulation der Schattenbereiche wirkte sich in beiden Formaten nahezu identisch aus.

Auffällig ist, dass die Transformationen in ACES ein deutlich dunkleres Bild erzeugen verglichen mit DaVinci Resolves integriertem Farbmanagementsystem. Ein möglicher Grund hierfür ist die Ausrichtung von ACES auf szenische Produktionen, die eine Belichtung unterhalb der Referenz für mehr Spielraum in den Lichtern nutzen (siehe Abschnitt 4.4).

Aufgrund des von ACES dunkel gehaltenen SDR-Bildes gleichen sich die Ausgabeformate in HLG und SDR sehr stark. In der Darstellung des Protagonisten lässt sich erkennen, dass HLG noch etwas dunkler ist. In den roten Lichtkegeln fällt die



Abbildung 10.3: Vergleich HLG (links) zu SDR (rechts) auf einem SDR-Monitor

logarithmische Codierung von HLG auf, die mehr Sättigung erhalten kann. Die Abwärtskompatibilität ist jedoch durchaus gegeben. Dieses Bild ließe sich demnach über einen einzigen Sendeweg an SDR- und HDR-Endgeräte verbreiten.

Das hier erwähnte Testmaterial findet sich auf der DVD zu dieser Arbeit. Aufgrund der begrenzten Speicherkapazität dieses Mediums wurden die Daten im H.264-10Bit-Codec komprimiert und auf HD-Auflösung skaliert. Die Metadaten für HDR sind nicht in den Dateien enthalten, da kein entsprechender Encoder zur Verfügung stand. Anhand des Dateinamens lassen sich jedoch EOTF, Farbraum und Primärvalenzen zuordnen.

11 Diskussion

11.1 Bewertung der HDR-Technologien

Nach der Arbeit mit HDR-Video wird deutlich, dass die Technologie ein wichtiger Schritt zu lebensechteren Bildern ist, die die Möglichkeiten moderner Hardware besser nutzt. Der Wandel von BT.709 zu BT.2020 enthält den Schritt zu 10Bit Farbtiefe für Distributionsformate. Diese Neuerung bringt eine große Chance mit sich. Da Empfangsgeräte ohnehin für die zusätzlichen 2Bit pro Kanal modifiziert werden müssen, sollte im gleichen Schritt versucht werden, das Beste aus den gewonnenen Quantisierungsstufen herauszuholen. 8Bit-SDR-Video ist längst an seine Grenzen gestoßen.

„Conventional 8-bit SDR TV has a displayed dynamic range of about 32:1, or 5 stops [...]. This seems low.“ (BBC R&D 2016: 3.).

Was die BBC in ihren FAQs zu HDR etwas salopp formuliert, weist auf das zentrale Problem der aktuell üblichen 8Bit-Gamma-Codierung hin: Eigentlich könnte nur ein Kontrast von 32:1 frei von Artefakten wiedergegeben werden. Und dennoch zeigen die meisten aktuellen Displays Kontraste jenseits von 1000:1. Das Ergebnis sieht der Betrachter im Fernsehen, beim Streaming und bei Videospiele. Jeder Sonnenuntergang, jeder Grauverlauf hinter dem Logo eines Filmstudios und jeder eigentlich weiche Schatten auf ebener Fläche erinnert den Betrachter an die digitale Natur der betrachteten Szene. Banding-Artefakte offenbaren die ansonsten nahezu perfekte Illusion durch den Bildschirm an einen anderen Ort zu blicken, die Täuschung, die dem Fernseher seinen Namen gab.

Die Vervierfachung der Graustufen von 8Bit zu 10Bit löst dieses Problem. Die Zuordnung dieser Stufen zu ihren Helligkeitswerten dabei nicht neu zu definieren, ließe jedoch viel ungenutztes Potential zurück. Die bisherige Beschränkung von SDR auf nur ca. 2 Blendenstufen oberhalb regulär belichteter Hauttöne (siehe Abschnitt 6.1) kann mit HDR umgangen werden. Reflexionen und Spitzlichter lassen Materialien auf dem Bildschirm plastischer wirken. In bisher kontrastarmen oder ausgebrannten Lichtern werden Details sichtbar.

Nach theoretischer Betrachtung und Anwendung in der Praxis zeigen sich jedoch auch die Probleme und Herausforderungen in der Arbeit mit HDR. Die Anforderungen an Referenzdisplays und damit ihre Preise sind so hoch, dass die Investition wirtschaftlich nur in Ausnahmefällen gerechtfertigt ist. Die hier vorgestellte Lösung mit OLED-TVs ist aufgrund zahlreicher Komplikationen im Betrieb (siehe Kapitel 9) jedoch nur als vorläufig zu betrachten.

11.2 Ausblick

Der Fortschritt von HDR wird in den kommenden Jahren maßgeblich von der Entwicklung und Verbreitung moderner Displaytechnologien beeinflusst werden. Die hier betrachteten OLED-Displays werden im professionellen Segment zunehmend von doppelschichtigen LCDs verdrängt (siehe Abschnitt 6.4) und stellen zur Zeit die wahrscheinlich sinnvollste Investition in die neue Technologie dar. In naher Zukunft könnten aber auch Micro-LED-Displays der Standard zur Bearbeitung von HDR-Inhalten werden. Sie befinden sich zur Zeit noch in der Entwicklung. Wie OLED-Displays können sie jedoch dank selbstleuchtender Subpixel perfektes Schwarz erreichen und bieten gleichzeitig Schutz gegen Einbrennen durch zu helle statische Bildinhalte, wodurch höhere Leuchtdichten erzeugt werden könnten.

Mit steigender Relevanz von HDR sollten auch technische Maßnahmen ergriffen werden, um SDR und HDR gleichzeitig während der Bearbeitung betrachten zu können. Der hier vorgestellte technische Aufbau bietet diese Möglichkeit nicht.

Die Konkurrenz zwischen den verschiedenen HDR-Formaten besteht weniger zwischen den zwei grundverschiedenen Technologien HLG und PQ als vielmehr zwischen den einzelnen Implementierungen von PQ. Nach heutigem Stand wird HLG in Live-Situationen und bei zeitkritischen Produktionen Verwendung finden, während szenische Produktionen und Videospiele vollständig auf PQ setzen. Da die ersten deutschen HDR-Fernsehsendungen in HLG gesendet werden (Jurran 2018), scheint es sinnvoll die hier betrachtete Fernsehwerbung ebenfalls in diesem Format zu produzieren. Werbung auf Streaming-Diensten oder Online-Videoplattformen ist hingegen deutlich freier in der Formatwahl, wodurch nahelegt wird, auf beide HDR-Technologien vorbereitet zu sein.

Dolby Vision und HDR10+ bedienen als auf aufwändige Postproduktion ausgerichtete Formate beide den gleichen Markt. Eine Koexistenz der beiden Formate scheint zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung kaum möglich. Das vergleichsweise einfache HDR10 wird unabhängig von Dolby Vision und HDR10+ bestehen können, da es an keine Lizenz gebunden ist und keine aufwändigen dynamischen Metadaten erfordert.

Inwiefern gänzlich neue Formate, wie z. B. Technicolor-HDR, noch Chancen auf eine Marktdurchdringung haben, ist zur Zeit noch nicht abzuschätzen.

Im Hinblick auf die Vielzahl an Möglichkeiten, wie Video mit erweitertem Dynamikumfang und Farbraum in Zukunft übertragen werden könnte, ist es von entscheidender Bedeutung in einem Format zu produzieren und zu archivieren, das die spätere Distribution in wahlweise SDR, HLG oder einer Variante von PQ unkompliziert ermöglicht. ACES (Kapitel 7) wird zu diesem Zweck empfohlen und könnte den Einstieg in die HDR-Produktion erheblich erleichtern.

12 Fazit

Das Ziel einen zeit- und kosteneffizienten Ansatz für die Postproduktion in HDR zu liefern, konnte erreicht werden. Das in dieser Arbeit beschriebene Vorgehen ermöglicht qualitativ hochwertige Endprodukte mit den behandelten Technologien HLG und PQ. Es müssen jedoch einige Einschränkungen getroffen werden:

Die in Kapitel 9 behandelten Unzulänglichkeiten der untersuchten OLED-TVs schließen ihre Verwendung als primäre HDR-Monitore aus. Für einen Enhancement-Pass über einen zuvor auf einem professionellen SDR-Monitor bearbeiteten Film reichen sie jedoch aus. Sollte bei einem Projekt HDR als primäres Endformat gefordert sein, ist auf eine vollständige Farbkorrektur an einem HDR-Referenzmonitor nicht zu verzichten.

Das Farbmanagement in ACES liefert konsistente Ergebnisse in den verschiedenen Formaten, in denen das Testmaterial ausgegeben wurde. Vor einer tatsächlichen Integration des Systems ist jedoch zu überprüfen, dass in jeder verwendeten Software identische Ergebnisse erreicht werden und auf jedem System die gleiche ACES-Version zur Verfügung steht.

Mit PQ lassen sich Bilder erzeugen, die sich visuell deutlicher von SDR-Material absetzen können. Grund hierfür ist der in Abschnitt 4.4 erläuterte Spielraum für Spitzlichter. HLG hingegen bietet aufgrund der gewollten Abwärtskompatibilität einen weniger ausgeprägten Effekt. Für Distributionskanäle, in denen PQ verfügbar ist, ist es somit HLG vorzuziehen. Der für die betrachtete Werbebranche wichtigste Distributionsweg Fernsehen, scheint jedoch in naher Zukunft auf HLG zu setzen. Beide Formate sollten daher angeboten werden.

HDR in der Postproduktion bedeutet insbesondere für Coloristen eine Umstellung (Abschnitt 10.3), da die Bilder anders auf die Werkzeuge reagieren. Außerdem muss im größeren Dynamikumfang eine Bildsprache gefunden werden, die die neuen technischen Möglichkeiten zum besseren Transport der erzählten Geschichte nutzt.

Auch wenn in dieser Arbeit PQ-HDR-Formate mit dynamischen Metadaten beschrieben wurden, lassen sich diese mit dem hier beschriebenen Workflow nicht anfertigen. Nur das auf statischen Metadaten basierende HDR10 kann ausgeliefert werden. Keiner, der für die Werbebranche relevanten Distributionskanäle, unterstützt zur Zeit HDR mit dynamischen Metadaten.

Es ist zu erwarten, dass sich HDR am Markt durchsetzt (vgl. Kapitel 5) und in Zukunft auch in der Werbebranche gefordert wird. Die Entwicklung dieser Technologie ist jedoch noch nicht vollständig abgeschlossen und sollte daher von allen Akteuren im Gebiet visueller Medien begleitet werden, um eine Standardisierung zu erreichen, von der Anwender und Konsumenten gleichermaßen profitieren.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Simultankontrast, eigene Visualisierung	16
2.2	OETF nach REC. ITU-R BT.709	17
3.1	Schwellwert der wahrnehmbaren Helligkeitsänderung nach Barten (Miller 2014: 8)	18
3.2	PQ-EOTF	20
3.3	Vergleich zur Quantisierungseffizienz BT.1886 und PQ bei 12Bit (Rep. ITU-R BT.2390-4 2018: 15)	20
3.4	Vergleich zur Quantisierungseffizienz von Gamma, Log, PQ und Linear mit Fließkomma (OpenEXR) (Miller 2014: 10)	21
3.5	JND Cross Test Pattern (Miller, Nezamabadi & Daly 2012: 7)	22
3.6	Vergleich zur Quantisierungseffizienz BT.1886 und PQ bei 10Bit (Rep. ITU-R BT.2390-4 2018: 16)	23
3.7	Testbilder zur Evaluation praxisnaher Bildinhalte (Miller, Nezamabadi & Daly 2012)	24
3.8	Testergebnisse mit Bildmaterial, benötigte Quantisierungspräzision (Miller, Nezamabadi & Daly 2012)	24
3.9	Tone Mapping bei PQ (Rep. ITU-R BT.2390-4 2018)	26
3.10	Dolby Vision Palette in DaVinci Resolve (Carman 2014)	27
4.1	Vergleich der SDR und HLG-HDR-OETFs (Rep. ITU-R BT.2390-4 2018)	29
4.2	HDR-Signal interpretiert als SDR, eigene Visualisierung	30
4.3	Quantisierung von HLG, PQ und Videogamma im Vergleich zur Schwelle nach Schreiber (Borer & Cotton 2015: 7)	31
4.4	Quantisierung von HLG und PQ im Vergleich zur Kontrastsensitivitätsfunktion nach Barten (Weber 2018: 20)	32
6.1	Schaubild zur LMCL-Technologie (Flanders Scientific Inc. 2019)	42
7.1	Postproduktion mit ACES und HDR	46
8.1	Metadata-Injection für abgesetzte Systeme	48
8.2	AJA Mini-Config, graphische Oberfläche	48
9.1	LG C8 EOTF-Tracking, LightSpace-Bericht	53

Abbildungsverzeichnis

9.2	Farbraum LG C8 nach Kalibrierung mit PQ BT.2020, selbsterstellte Grafik	55
9.3	LG C8 Farbwiedergabe der ColorChecker-Farbtafel nach Kalibrierung für BT.2020, Bildschirmfoto aus Calman Studio	56
10.1	Farbmanagement in DaVinci Resolve mit ACES	59
10.2	Vergleich PQ (links) zu SDR (rechts), fotografiertes Bildschirm	61
10.3	Vergleich HLG (links) zu SDR (rechts) auf einem SDR-Monitor	62

Tabellenverzeichnis

3.1	JND Cross Testergebnisse, benötigte Quantisierungspräzision (Miller, Nezamabadi & Daly 2012)	22
3.2	Referenzpegel für PQ (Dolby Laboratories 2016)	25
5.1	HDR-Unterstützung laut Herstellerangaben bei den meistverkauften Videospiele 2018	36
7.1	ACES: Unterstützte Software, Ausschnitt	44
9.1	Primärvalenzen LG C8 vgl. Standard BT.2020 und Toleranzbereiche EBU Tech 3320	54

Literaturverzeichnis

- Anderson, Matthew & Chandrasekar Srinivasan & Stokes, Michael & Motta, Ricardo: *A Standard Default Color Space for the Internet - sRGB*, <https://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB>, Version 1.10, 5.11.1996, letzter Zugriff: 27.3.2019
- Association of Radio Industries and Businesses: *Essential Parameter Values for the Extended Image Dynamic Range Television (EIDRTV) System for Programme Production*, https://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/2-STD-B67v1_0.pdf, Version 1.0, 3.7.2015, letzter Zugriff: 30.3.2019
- British Broadcasting Corporation Research & Development: *Frequently Asked Questions on High Dynamic Range and Hybrid Log-Gamma*, https://www.bbc.co.uk/rd/sites/50335ff370b5c262af000004/assets/586cdf8106d63ee287051b35/BBC_HDRTV_FAQ.pdf, Version von Dezember 2016, letzter Zugriff: 6.4.2019
- Borer, Tim & Cotton, Andrew: *A “Display Independent” High Dynamic Range Television System*, <https://downloads.bbc.co.uk/rd/pubs/whp/whp-pdf-files/WHP309.pdf>, September 2015, letzter Zugriff: 6.4.2019
- Borer, Tim & Cotton, Andrew: *High Dynamic Range, PQ and HLG*, https://www.smpte.org/sites/default/files/201710-18-ED-HDR-PQ_and%20HLG-Borer-Cotton-V3-Handout.pdf, 2017, letzter Zugriff: 30.3.2019
- Brooks, D. G.: *The Art of Better Pixels*, <https://www.dolby.com/us/en/technologies/dolby-vision/the-art-of-better-pixels.pdf>, 2014, letzter Zugriff: 6.4.2019
- Carman, Robbie: *Getting To Know Dolby Vision HDR*, <https://mixinglight.com/color-tutorial/getting-know-dolby-vision-hdr-part-1/>, 2014, letzter Zugriff: 24.3.2019
- Castendyk, Oliver & Müller-Lietzkow, Jörg: *Studie zur Computer- und Videospieleindustrie in Deutschland, Daten und Fakten zum deutschen Entwicklungs- und Vertriebsmarkt für digitale Spiele*, http://docs.dpaq.de/13008-abschlussbericht_games-studie_v1.0_2017-11-28.pdf, Version 1.0, 2017, letzter Zugriff 4.4.2019
- Dolby: *Getting Licensed*, <https://www.dolby.com/us/en/professional/licensing.html>, 2018, letzter Zugriff: 5.4.2019

Literaturverzeichnis

- Dolby Laboratories: *Reference Level Guidelines for PQ (BT.2100)*, <https://www.dolby.com/us/en/technologies/dolby-vision/operational-guidelines-for-pq.pdf>, 2016, letzter Zugriff: 5.4.2019
- European Broadcast Union: *TECH 3320, User Requirements for Video Monitors in Television Production*, <https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3320.pdf>, Version 4.0, 2017, letzter Zugriff: 6.4.2019
- Flanders Scientific Inc.: *XM311K 31"4K Mastering Monitor*, <http://flandersscientific.com/XM311K/>, 2019, letzter Zugriff: 4.4.2019
- Görne, Thomas: *Tontechnik*, 4. Auflage, Hanser, Carl GmbH + Co. 2014
- Hart, Martin: *Widescreen Museum - The CinemaScope Wing*, <http://www.widescreenmuseum.com/widescreen/wingcs1.htm>, 1996, letzter Zugriff: 27.3.2019
- HDR10+ TECHNOLOGIES, LLC.: *HDR10+ License Program Overview*, <https://www.hdr10plus.org/license-program/>, 2018, letzter Zugriff: 26.3.2019
- Jurran, Nico: *UHD-TV mit HDR: ProSiebenSat.1 mit weiteren Sendungen bis Jahresende*, <https://www.heise.de/newsticker/meldung/UHD-TV-mit-HDR-ProSiebenSat-1-mit-weiteren-Sendungen-bis-Jahresende-4231459.html>, 23.11.2018, letzter Zugriff: 4.4.2019
- International Telecommunication Union: *Recommendation ITU-R BT.1886, Reference electro-optical transfer function for flat panel displays used in HDTV studio production*, https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.1886-0-201103-I!!PDF-E.pdf, 2011, letzter Zugriff: 6.4.2019
- International Telecommunication Union: *Recommendation ITU-R BT.2020-2, Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange*, https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2020-2-201510-I!!PDF-E.pdf, 2015, letzter Zugriff: 6.4.2019
- International Telecommunication Union: *Recommendation ITU-R BT.2100-2, Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme exchange*, https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2100-2-201807-I!!PDF-E.pdf, 2018, letzter Zugriff: 6.4.2019
- International Telecommunication Union: *Recommendation ITU-R BT.2124-0, Objective metric for the assessment of the potential visibility of colour differences in television*, https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2124-0-201901-I!!PDF-E.pdf, 2019, letzter Zugriff: 6.4.2019

Literaturverzeichnis

- International Telecommunication Union: *Recommendation ITU-R BT.709-6, Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange*, https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.709-6-201506-I!!PDF-E.pdf, 2015, letzter Zugriff: 6.4.2019
- International Telecommunication Union: *Report ITU-R BT.2390-4, High Dynamic Range television for production and international programme exchange*, https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-BT.2390-4-2018-PDF-E.pdf, 2018, letzter Zugriff: 6.4.2019
- Kennel, Glenn: *Color and Mastering for Digital Cinema*, Auflage des Jahres 2013, Focal Press 2013
- Medienagentur Nico Jurrán & Friends: *Titelübersicht Dolby Vision*, <https://surround-sound.info/dolby-vision/titel>, 2019, letzter Zugriff: 26.3.2019
- Medienagentur Nico Jurrán & Friends: *Titelübersicht Dolby HDR10+*, <https://surround-sound.info/hdr10plus>, 2019, letzter Zugriff: 26.3.2019
- Miller, Scott: *A Perceptual EOTF for Extended Dynamic Range Imagery*, <https://www.smpte.org/sites/default/files/2014-05-06-EOTF-Miller-1-2-handout.pdf>, 2014, letzter Zugriff: 6.4.2019
- Miller, Scott & Nezamabadi, Mahdi & Daly, Scott: *Perceptual Signal Coding for More Efficient Usage of Bit Codes*, <https://www.smpte.org/sites/default/files/23-1615-TS7-2-IProc02-Miller.pdf>, 2012, letzter Zugriff: 6.4.2019
- Morrison, Geoffrey: *What is HDMI 2.0b?*, <https://www.cnet.com/how-to/what-is-hdmi-2-0b/>, 8.6.2017, letzter Zugriff: 7.4.2019
- Piccin, Vance & Weynand, Diana: *A Guide to ACES, Understanding and Integrating the Academy Color Encoding System, ACES Primer*, <https://acescentral.com/uploads/default/original/1X/a7cd69816895ac07295c3f04d332e1fe9e011e64.pdf>, Version: 070918-1, 9.7.2018
letzter Zugriff: 6.4.2019
- Schmidt, Ulrich: *Professionelle Videotechnik*, 6. Auflage, Springer 2013
- TVLogic, Product Overview: *LUM-310R : 31" 4K HDR Monitor*, http://www.tvlogic.tv/new/M_Spec.asp?sid=89, letzter Zugriff: 7.4.2019
- Ultra HD Forum: *Phase A Guidelines*, <https://www.ultrahdforum.org/wp-content/uploads/2016/04/Ultra-HD-Forum-Deployment-Guidelines-V1.1-Summer-2016.pdf>, Version: 1.1, 16.7.2016, letzter Zugriff: 26.3.2019

Literaturverzeichnis

Video Electronics Standards Association: *VESA Publishes Displayport Standard Version 1.4*, <https://www.displayport.org/pr/vesa-publishes-displayport-standard-version-1-4/>, 1.3.2016, letzter Zugriff: 7.4.2019

Webb, Kevin: *'Red Dead Redemption 2' beat out 'Call of Duty' to become 2018's best-seller — these were the 20 best-selling games of the year*, <https://www.businessinsider.de/best-selling-video-games-2018-2019-1?r=US&IR=T>, 23.01.2019, letzter Zugriff: 7.4.2019

Weber, Klaus: *HDR in der Live-Produktion, Von der Kamera bis zu einem HDR / SDR kompatiblen Workflow*, https://www.tu-ilmenau.de/fileadmin/media/mt/events/media_event/2018_Weber_Grass_Valley__HDR_in_der_Liveproduktion.pdf, letzter Zugriff: 6.4.2019

Ich versichere, die vorliegende Arbeit selbstständig 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.

Ort, Datum

Jonas Kern