

**BACHELORARBEIT**

# **Analyse und Bewertung des IC<sub>T</sub>C<sub>P</sub> Videopegelraums für HDR und WCG Videoanwendungen**

---

vorgelegt am 07. August 2024  
Moritz Sebastian Walliser

Erstprüfer: Prof. Dr. Marco Grimm  
Zweitprüfer: Matthias Wilkens

---

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE  
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**

Department Medientechnik  
Finkenau 35  
22081 Hamburg

## Zusammenfassung

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, die Vorteile von  $IC_{7C_P}$  bei der Verarbeitung von HDR und WCG Inhalten zu erarbeiten und anhand eines Testbilds zu visualisieren. Dafür wurden mehrere vergleichende Studien zusammengetragen und ein Pythonskript zur Analyse des Videopegelraums und zur Erstellung des Testbilds konzipiert. Die theoretischen Vorteile konnten in der Analyse bestätigt werden und mit dem Testbild visualisiert werden. Die Arbeit zeigt, dass  $IC_{7C_P}$  gegenüber etablierten Videopegel- und Farbräumen bessere Ergebnisse liefert und dementsprechend als neuer Standard für HDR und WCG Inhalte in Betracht gezogen werden sollte.

## Abstract

The aim of this bachelor thesis is to elaborate on the benefits of using  $IC_{7C_P}$  when processing HDR and WCG content and to visualize these advantages using a test image. For this purpose, several comparative studies were compiled, and a Python script was designed to analyze the color representation and create the test image. The theoretical benefits were confirmed in the analysis and visualized with the test image. The thesis demonstrates that  $IC_{7C_P}$  delivers better results compared to established color representations and color spaces and should therefore be considered as a new standard for HDR and WCG content.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen zu Komponentensignalen</b>	<b>2</b>
2.1 Entwicklung von Komponentensignalen . . . . .	2
2.2 $Y_C B_C R_C$ . . . . .	4
<b>3 Grundlagen Farbe</b>	<b>6</b>
3.1 Begriffsklärung . . . . .	6
3.2 Farbräume . . . . .	7
3.2.1 CIE XYZ . . . . .	8
3.2.2 LMS . . . . .	9
3.2.3 IPT . . . . .	10
3.2.4 Rec.709 . . . . .	11
3.2.5 Rec.2020 . . . . .	12
<b>4 Grundlagen WCG und HDR</b>	<b>13</b>
4.1 Perceptual Quantizer . . . . .	13
<b>5 Forschung und Entwicklung von <math>IC_T C_P</math></b>	<b>15</b>
5.1 Technische definitionem $IC_T C_P$ . . . . .	15
5.2 Designkriterien von $IC_T C_P$ . . . . .	16
5.3 Implementierung . . . . .	18
<b>6 Vergleich zwischen <math>IC_T C_P</math> und <math>Y' C' B' C' R'</math></b>	<b>19</b>
6.1 Konstante Leuchtdichte . . . . .	19
6.2 Farbtonlinearität . . . . .	21
6.3 Gleichmäßigkeit der JNDs . . . . .	22
6.4 Effizienz der Basisbandquantisierung . . . . .	24
6.5 Bewertung . . . . .	25

<b>7</b>	<b>Erstellung der Testgrafiken</b>	<b>26</b>
7.1	Verwendete Software . . . . .	26
7.1.1	Colour-Science . . . . .	26
7.1.2	Pygfx . . . . .	27
7.1.3	NumPy . . . . .	27
7.1.4	Matplotlib . . . . .	27
7.1.5	IDE und Python . . . . .	28
7.2	Code . . . . .	28
7.2.1	Erstellung von Datensätzen . . . . .	28
7.2.2	Farbraum Konversionen . . . . .	29
7.2.3	Hilfsfunktionen . . . . .	30
7.2.4	Auswertung und Visualisierung . . . . .	31
7.3	Test-Skript . . . . .	33
7.4	Jupyter Notebook . . . . .	40
<b>8</b>	<b>Diskussion</b>	<b>41</b>
8.1	Bewertung von $IC_T C_P$ . . . . .	41
8.2	Ausblick . . . . .	42
<b>9</b>	<b>Fazit</b>	<b>43</b>
	<b>Literatur</b>	<b>44</b>

# Abbildungsverzeichnis

3.1	Spektrale Empfindlichkeit . . . . .	9
7.1	Raster für Y Vergleich . . . . .	29
7.2	CL_check Ablauf . . . . .	32
7.3	NCL-Testfeld . . . . .	34
7.4	Sichtbare Farbdifferenzen bei 10 Bit . . . . .	35
7.5	In YCbCr entsättigte Farbverläufe . . . . .	36
7.6	Alternatives JND Cross Pattern . . . . .	37
7.7	Erstelltes Testbild . . . . .	38
7.8	Clipping Artefakte nach Subsampling . . . . .	39
7.9	Farbvolumen nach Unterabtastung . . . . .	40

# 1 Einleitung

Die sich stetig weiterentwickelnde Landschaft der audiovisuellen Medien strebt stets nach besseren, realitätsnäheren Erfahrungen für Zuschauende. Dabei führen diese Bemühungen immer wieder zu technologischen Neuerungen, die im Fall von Videoanwendungen bessere Bildqualität in Form von räumlicher und zeitlicher Auflösung, erweiterter Farbwiedergabe und höheren Dynamikumfangen versprechen. Der Etablierung dieser neuen Standards steht dabei ständig die Kompatibilität zu bestehenden Systemen und bereits verwendeten Standards im Weg. Durch die Einführung des höheren Dynamikumfangs (HDR) und des erweiterten Farbraums (WCG) konnte die wahrgenommene Qualität vergleichsweise mehr gesteigert werden als durch den Sprung von HD auf UHD (vgl. Hinde et al., 2022, S. 13). Die Neuerung führt jedoch zum vermehrten Auftreten von störenden Artefakten bei der Verwendung des bereits weit verbreiteten NCL  $Y'C'_B C'_R$  Videopegelraums. Daher wurde in der ITU Empfehlung BT.2100 neben den beiden HDR Kurven PQ und HLG auch ein neuer Videopegelraum mit dem Namen  $IC_T C_P$  eingeführt. Der von Dolby Laboratories entworfene Videopegelraum verspricht eine konstantere Leuchtdichte, verbesserte Farbtonlinearität, gleichmäßigere Farbverteilung und eine erhöhte Quantisierungseffizienz gegenüber bestehenden Standards.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, welche Vorteile  $IC_T C_P$  gegenüber NCL  $Y'C'_B C'_R$  bei der Verarbeitung von HDR WCG Videomaterial bietet und wie diese anschaulich visualisiert werden können. Dazu werden im ersten Teil der Arbeit sowohl Grundlagen zu Komponentensignalen als auch verschiedenen Farbräumen zusammengetragen, um im zweiten Teil die Entwicklung und technische Implementierung von  $IC_T C_P$  zu erklären und den Videopegelraum mit NCL  $Y'C'_B C'_R$  anhand bestehender Studien zu vergleichen. Im dritten Teil werden eine Reihe an Funktionen in Python konzipiert, um die Vorteile des neuen Videopegelraums zu verifizieren und mit den gesammelten Daten ein Testbild zu entwerfen, welches die Vorteile von  $IC_T C_P$  gegenüber NCL  $Y'C'_B C'_R$  darstellen kann. Zusätzlich werden die Funktionen verwendet, um die Unterschiede der beiden Videopegelräume schrittweise anschaulich in einem Jupiter Notebook zu erklären. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst, um zu bewerten, inwieweit  $IC_T C_P$  Vorteile gegenüber NCL  $Y'C'_B C'_R$  bietet und ob diese mit dem Testbild dargestellt werden können.

# 2 Grundlagen zu Komponentensignalen

Komponentensignale sind Videosignale, in denen die Farbinformationen (Farbdifferenzsignale) von der Helligkeitsinformation (Luma-Signal) durch Differenzbildung getrennt enthalten sind. Diese Form des Videosignals ist sowohl mit Farb- als auch Schwarz-Weiß-Fernsehern (S/W) kompatibel und lässt sich durch Bandbreitenreduktion/Unterabtastung der Farbdifferenzsignale um bis zu 50% reduzieren, ohne dass ein visueller Qualitätsverlust entsteht (vgl. Schmidt, 2021, S. 38). Komponentensignale sind die häufigste Form von Videosignalen und werden in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt, auch bei  $IC_7C_P$  handelt es sich um ein Komponentensignal.

## 2.1 Entwicklung von Komponentensignalen

Die Entwicklung der Komponentensignale geht zurück auf die Problematiken der Abwärtskompatibilität vom analogen Farbfernsehen zum S/W-Fernsehen. Beim Filmen eines farbigen Videos wird ein Bild per Farbfilterung auf dem Sensor oder den Sensoren in drei spektrale Anteile aufgeteilt und zu elektrischen Signalen gewandelt. Das daraus entstehende RGB-Signal benötigt im einfachsten Fall die dreifache Bandbreite eines S/W-Signals und ist nicht kompatibel mit S/W-Fernsehgeräten. Im folgenden Abschnitt werden die  $\gamma$ -vorentzerrten analogen Signale der Einfachheit halber in ihrer umgangsblichen Schreibweise verwendet ( $P_R$  anstelle von  $E_{PR}$ ).

Damit eine für das Farbfernsehen produzierte Übertragung auch auf einem S/W-Fernseher wiedergegeben werden kann, muss das elektronische Gamma-vorentzerrte RGB-Signal in ein abwärtskompatibles Komponentensignal gewandelt werden. Zunächst muss aus den Rot-, Grün- und Blau-Signalen ein Luma-Signal (Y-Signal) berechnet werden. Hierzu werden die Werte aus dem RGB-Modell mithilfe einer Normalized Primary Matrix (NPM) in das CIE-XYZ-Farbmodell übersetzt, wobei der Y-Wert für das Y-Signal verwendet wird (vgl. Schmidt, 2021, S. 94).

Mit dem Luma-Signal lassen sich die beiden Farbdifferenzsignale aus den Rot- und Blau-Signalen berechnen. Eine technisch korrekt eingestellte Farbkamera gibt bei einer neutralen

Fläche, wie zum Beispiel einer Graukarte, alle drei Signale mit derselben Intensität aus. Das Y-Signal ist die Summe einer prozentualen Multiplikation der RGB-Signale mit Faktoren, die zusammen 100% ergeben. Daher gilt  $R=G=B=Y$  für alle unbunten Bilder (vgl. Schmidt, 2021, S. 95). Die Signale werden durch die Differenz von Y zu R und Y zu B gebildet, daher auch der Name: Farbdifferenzsignale.

Die Wahl der Farbkanäle für die Farbdifferenzsignale basiert auf dem relativen spektralen Hellempfindlichkeitsgrad  $V(\lambda)$ , welcher beim ans Tageslicht adaptierten menschlichen Auge um 550nm (Grün) die höchste Empfindlichkeit aufweist (vgl. Schmidt, 2021, S. 20). Das Grün-Signal macht somit den prozentual größten Teil des Y-Signals aus, weshalb bei einer Differenzbildung von G-Y geringere Pegel entstehen würden als bei (R-Y) und (B-Y). Das aus dem Luma-Signal und den Farbdifferenzsignalen zusammengesetzte Signal wird Komponentensignal genannt. Dieselbe Operation, die verwendet wird, um aus den RGB-Signalen das Komponentensignal zu erhalten, kann invers angewandt werden, um das Komponentensignal wieder in RGB zu wandeln, damit es auf einem Farbdisplay wiedergegeben werden kann.

Durch die Differenzbildung kann es bei den Farbdifferenzsignalen (R-Y) und (B-Y) zu Spannungswerten jenseits der  $0,7 V_{SS}$  kommen, daher müssen sie für die Bildung eines einheitlichen Komponentensignals pegelreduziert werden (vgl. Schmidt, 2021, S. 95). Im analogen Komponentensignal (CAV) werden die pegelreduzierten Farbdifferenzsignale  $P_R$  für das (R-Y) Signal und  $P_B$  für das (B-Y) Signal genannt, im digitalen Komponentensignal entsprechend  $C_R$  und  $C_B$ .

Die Formeln der unterschiedlichen Auflösungen unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen Skalierung der Farbwerte und den verschiedenen Farbräumen (vgl. Schmidt, 2021, S. 96). Es gilt:

$$\begin{aligned}
 \text{SD:} \quad & Y = 0,299 R + 0,587 G + 0,114 B & P_B = 0,564 (B - Y) & P_R = 0,713 (R - Y) \\
 \text{HD:} \quad & Y = 0,2126 R + 0,7152 G + 0,0722 B & P_B = 0,5389 (B - Y) & P_R = 0,6350 (R - Y) \\
 \text{UHD:} \quad & Y = 0,2627 R + 0,6780 G + 0,0593 B & P_B = 0,5315 (B - Y) & P_R = 0,6782 (R - Y)
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Neben der Abwärtskompatibilität zu S/W-Displays durch das Luma-Signal ermöglicht die Verwendung des Komponentensignals die Bandbreitenreduktion der Farbdifferenzsignale. Da das menschliche Auge eine geringere Ortsauflösung im Farbbereich als im S/W-Bereich aufweist, können die Farbdifferenzsignale auf bis zu ein Viertel ihrer Bandbreite begrenzt werden, ohne dass dabei ein visueller Qualitätsverlust sichtbar wird (vgl. Schmidt, 2021, S. 38). Bei Verwendung des SD CAV werden die Farbdifferenzsignale von 5 MHz auf 1,3 MHz für Konsumenten und 2,5 MHz für Produktionen reduziert (vgl. Schmidt, 2021, S. 98).

Das entspricht den im digitalen gängigen Bezeichnungen 4:2:2 bzw. 4:2:0 der Farbunterabtastung. Beim 4:2:2-Verfahren wird die Horizontalauflösung der Farbdifferenzsignale gegenüber

dem Luma-Signal halbiert, somit werden nur noch zwei Drittel der originalen Datenrate benötigt. Beim 4:2:0-Verfahren wird sowohl die Horizontalauflösung als auch die Vertikalauflösung der Farbdifferenzsignale halbiert, somit wird nur noch die Hälfte der originalen Datenrate benötigt. Zusätzlich bietet die 4:1:1-Variante eine Alternative zu 4:2:0, bei der die Horizontalauflösung der Farbdifferenzsignale nur ein Viertel der des Luma Signals beträgt, somit also dieselbe Datenrate wie bei 4:2:0 erreicht wird. Die vertikale Farbauflösung bleibt hierbei unangetastet (vgl. Schmidt, 2021, S. 151).

## 2.2 $YC_B C_R$

Aufgrund der bereits erwähnten unterschiedlichen Skalierung der SD-, HD- und UHD-Signale sind in den von der ITU definierten Videostandards ITU-R BT.601/709/2020 jeweils eigene Formeln für das digitale Komponentensignal ( $YC_B C_R$ ) gegeben. Die Koeffizienten, mit denen das Luma-Signal sowie die Farbdifferenzsignale gebildet werden, stimmen mit ihren analogen Gegenstücken überein.

Ein Ziel der ITU-Empfehlung BT.601 (Rec.601) war die Etablierung einer erweiterbaren Standard-Familie zur digitalen Videocodierung. Dabei sollte die Codierung auf einem Komponentensignal, bestehend aus einem Luma- und zwei Farbdifferenzsignalen, basieren (vgl. ITU, 2011b, S. 1-2).  $YC_B C_R$  für SD wird beispielhaft in zwei Versionen und mit zwei Farbrasterabastungsvarianten gebildet.

Aus den  $\gamma$ -vorentzerrten analogen RGB-Signalen wird mit der in Abschnitt 2.1 gegebenen Formel 2.1 für SD ein normalisiertes Komponentensignal gebildet (vgl. ITU, 2011b, S. 2-3). Im zweiten Schritt werden die einzelnen Komponenten gleichmäßig quantisiert, dabei sind mit 8-Bit und 10-Bit zwei Bittiefen vorgesehen. Bei der Quantisierung mit 8-Bit sind jeweils das erste und letzte Level für die synchronisations-Signale (SAV und EAV) reserviert. Für das Luma-Signal werden 220 Level verwendet, die beiden Farbdifferenzsignale verwenden jeweils 225 Level. Da der Schwarzwert auf Level 16 festgelegt ist, bleibt für das Luma-Signal ein Footroom von 15 Levels und ein Headroom von 19 Levels, bei den Farbdifferenzsignalen ist der Headroom 5 Levels geringer. Aufgrund der Normalisierung der Farbdifferenzsignale um  $0 V_{SS}$  und den damit entstehenden negativen Spannungen wird der Nullpunkt bei der Quantisierung auf Level 128 gesetzt (vgl. ITU, 2011b, S. 3-4). Die entsprechenden Formeln lauten:

$$\begin{aligned}
 Y &= \text{int} \left[ (219E'_Y + 16) * 2^{n-8} \right] \\
 C_B &= \text{int} \left[ (224E'_{C_B} + 128) * 2^{n-8} \right] \\
 C_R &= \text{int} \left[ (224E'_{C_R} + 128) * 2^{n-8} \right]
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Wobei  $n$  für die Bit-Tiefe der Quantisierung steht. Alternativ lässt sich  $Y_C B_C R_C$  auch aus einem quantisierten  $\gamma$ -vorentzerrten RGB-Signal bilden.

Auch die 4:2:2 Farbrunterabtastung lässt sich entweder durch digitale Filterung und Unterabtastung realisieren oder durch eine analoge Filterung vor der Quantisierung, wobei die Ergebnisse dieser beiden Varianten leicht voneinander abweichen können. Rec.601 sieht nur die 4:2:2 Unterabtastung und ein volles 4:4:4 Signal für  $Y_C B_C R_C$  vor (vgl. ITU, 2011b, S. 5-6), Unterabtastungen wie 4:2:0 und 4:1:1 werden offiziell erst in späteren Empfehlungen eingeführt.

Die ITU-Empfehlung BT.709 (Rec.709) spezifiziert  $Y' C' B' C' R'$  konzeptionell so wie Rec.601, wobei die Formeln sich, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, mit dem leicht erweiterten Farb- raum und dem anders skalierten RGB-Signal entsprechend der Formel 2.1 ändern (ITU, 2015a, vgl.). In der ITU-Empfehlung BT.2020 (Rec.2020) werden zwei Versionen des digitalen Komponentensignals eingeführt: NCL  $Y' C' B' C' R'$  und CL  $Y' C' B' C' R'$ . NCL steht für non-constant luminance und ist aufgebaut wie die Komponentensignale aus Rec.601 und Rec.709. Angepasst an den neuen Farbraum und die andere Skalierung des Videosignals lautet die Formel entsprechend wie in 2.1. CL steht für constant luminance und wurde entworfen, um den konstanten-Leuchtdichten Fehler zu minimieren (vgl. ITU, 2015b, S. 4). Anstelle des  $\gamma$ -vorentzerrten RGB-Signals wird für die Berechnung von  $Y_C$  ein lineares RGB-Signal verwendet, das Gamma wird erst anschließend angewendet. Durch diese Operationsreihenfolge bleibt das Luma-Signal originalgetreuer erhalten, die Verbesserung ist besonders in stark gesättigten und hochfrequenten Bildinhalten zu sehen (vgl. ITU, 2023, S. 55).

$$\begin{aligned}
 Y'_C &= (0,2627 * R + 0,6780 * G + 0,0593 * B)' \\
 C'_{BC} &= \begin{cases} \frac{B' - Y'_C}{-2N_B}, & N_B \leq B' - Y'_C \leq 0 \\ \frac{B' - Y'_C}{2 * P_B}, & 0 < B' - Y'_C \leq P_B \end{cases} & C'_{RC} &= \begin{cases} \frac{R' - Y'_C}{-2N_R}, & N_R \leq R' - Y'_C \leq 0 \\ \frac{R' - Y'_C}{2 * P_R}, & 0 < R' - Y'_C \leq P_R \end{cases} \quad (2.3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_B &\approx 0,7910, N_B \approx -0,9702 \\
 P_R &\approx 0,4969, N_R \approx -0,8591
 \end{aligned}$$

## 3 Grundlagen Farbe

Das Konzept Farbe ist ein komplexes Phänomen der visuellen Wahrnehmung, welches sprachlich häufig zu Missverständnissen führt. Die Klassifizierung einer Farbe ist für den wissenschaftlichen Diskurs unerlässlich, da derselbe Farbreiz von unterschiedlichen Personen als Pink oder Magenta betitelt wird. Die Definition des Wortes Farbe selbst ist eine komplexe Aufgabe, daher liefert die CIE gleich zwei verschiedene Definitionen, basierend auf der Wahrnehmung und auf dem psychophysischen Reiz. Sprachlich wird meist die erste Definition verwendet, in der Farbe als visuelle Eigenschaft betitelt wird, die sich mit den Attributen Farbton, Helligkeit und Sättigung beschreiben lässt (vgl. CIE, 2020a). Für die wissenschaftliche Klassifizierung ist die psychophysische Definition, die Farben als messbare und definierte Stimuli beschreibt, entscheidend. Sie erlaubt eine präzise Einordnung einer Farbe in ein mathematisches System, wie zum Beispiel ein Tristimulus-Farbraum (vgl. CIE, 2020b). In diesem Kapitel werden verschiedene Farbräume, welche für die Definition und Verwendung von  $IC_T C_P$  entscheidend sind, vorgestellt. Zusätzlich werden Begrifflichkeiten rund um das Thema Farben im Zuge dieser Arbeit geklärt, um sprachliche Unklarheiten zu beseitigen.

### 3.1 Begriffsklärung

Da es häufig zu Verwechslungen zwischen den verschiedenen Begriffen der Farbmeterik kommt, werden hier entscheidende Begrifflichkeiten für diese Arbeit geklärt und voneinander abgegrenzt. Dabei ist zu beachten, dass die nachfolgenden Begriffe in verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten unterschiedlich definiert werden und somit die folgenden Definitionen nicht als absolut gewertet werden können, sondern nur zur Verständigung innerhalb dieser Arbeit zu verstehen sind. Der erste Begriff in der Definitionshierarchie ist das Farbmodell. Ein Farbmodell ist eine mathematische Darstellung von Farben als numerisches Tupel, ohne dass sie dabei an spezifische, reale Werte geknüpft sind (vgl. Ganesan et al., 2010, S. 2). Beispiele für Farbmodelle sind das RGB-Modell, bei dem die Primärfarben Rot, Grün und Blau verwendet werden, das CMYK-Modell, welches im Printbereich mit Cyan, Magenta, Gelb und Schwarz verwendet wird, und das HSL-Modell, bei dem anstelle von Farben der Buntton, die Buntheit und die Helligkeit einer Farbe verwendet werden. Farbmodelle werden häufig mit Farbräumen synonym verwendet oder verwechselt, der Unterschied liegt in der bereits

erwähnten Festlegung, wie die Werte zu interpretieren sind. Sobald die Werte, unter anderem die Primärvalenzen Rot, Grün und Blau, eine feste Definition haben, wie zum Beispiel einen Bezug zu einer bestimmten Wellenlänge, kann aus ihnen ein Farbraum gebildet werden. Klar definierte Farbräume ermöglichen den Austausch und die korrekte Wiedergabe von Bildinhalten über eine Vielzahl an unterschiedlichen Anwendungen und Geräten, ohne sie würden die Daten nur relativ interpretierbar sein und somit auf unterschiedlichen Geräten zu anderen Farben führen. Beispiele für Farbräume sind CIE 1931 XYZ, sRGB und der in Rec.2020 definierte Farbraum. Die in einem Farbraum darstellbaren Farbtöne und Buntheiten lassen sich über ein Dreieck zwischen den Primärvalenzen bilden. Dieses Dreieck ist der Gamut eines Farbraums. Für einen Vergleich verschiedener Farbräume mit realen Primärvalenzen werden die Gamuts in einem Farbraum mit imaginären Primärvalenzen, der den gesamten Spektralfarbenzug abdeckt, aufgestellt. Häufig sind Geräte wie Drucker, Bildschirme und Projektoren nicht ohne weiteres in der Lage, standardisierte Farbräume in ihrer Gänze abzudecken, da die verbauten Elemente nicht genau die Primärvalenzen eines gegebenen Farbraums erzeugen. Der Gamut eines Geräts ist somit der komplette Farbton- und Buntheitsumfang, welcher mit den verwendeten Elementen wiedergegeben oder eingefangen werden kann. Damit ein Gerät die vom Farbraum vorgesehenen Farben akkurat wiedergeben kann, müssen sie per Gamut-Mapping an den Gamut des Geräts angepasst werden. Es ist möglich, dass der Geräte-Gamut kleiner als der darzustellende Farbraum ist und daher die Farben, welche außerhalb des Gamuts liegen, entweder geklammert werden und damit Farbdetails verloren gehen oder das mithilfe einer Funktion alle Farben verhältnismäßig angepasst werden und dementsprechend Farbton, Farbkontraste oder Helligkeitskontraste leiden (vgl. Setchell, 2012, S. 238-239). Sofern der Geräte-Gamut den vorgesehenen Farbraum zu 100% abdeckt, können die Bildinhalte ohne Veränderung wiedergegeben werden. Das Farbvolumen eines Farbraums ist der Farbraum selbst, da hier zusätzlich zu den im Gamut enthaltenen Farbtönen und Buntheiten die Helligkeit verwendet wird, um eine Farbe in einem dreidimensionalen Raum zu definieren. Das Farbvolumen eines Geräts gibt neben den Farbtönen und Buntheiten auch den Dynamikumfang an, also die minimale und maximale Helligkeit, die vom Gerät wiedergegeben oder aufgenommen werden kann. Videopegelräume wie  $Y'C'_B C'_R$  und  $IC_T C_P$  sind das elektrische Äquivalent zu Farbräumen. Die Farbinformation liegt hier in einem elektrischen Pegel oder in quantisierten Codewerten vor.

## 3.2 Farbräume

Im folgenden Abschnitt werden eine Reihe verschiedener Farbräume vorgestellt und mathematisch definiert. Die vorgestellten Farbräume sind die Basis der Berechnung und Forschung von  $IC_T C_P$  und den im Praxisteil durchgeführten Operationen.

### 3.2.1 CIE XYZ

Der CIE 1931 XYZ Farbraum (CIE XYZ) ist der zentrale Farbraum für viele Farbraumtransformationen, da er mit seinen imaginären Primärvalenzen  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  das gesamte sichtbare elektromagnetische Spektrum einer normalsichtigen Person umfasst. CIE XYZ basiert auf dem 2° CIE-Normalbeobachter, wobei auch eine Version, die auf dem 10° CIE-Normalbeobachter basiert, namens CIE 1964  $X_{10}Y_{10}Z_{10}$  existiert. Dieser wird jedoch in der Praxis relativ selten verwendet, da er trotz seiner verbesserten Präzision eine weitere Variable in Form der beteiligten Stäbchen mit sich bringt (vgl. Schanda, 2007, S. 37). Die Entwicklung des 2° CIE-Normalbeobachters basiert auf zwei Experimenten, deren Grundlage das erste Graßmannsche Gesetz war, welches besagt, dass jeder Farbeindruck mit drei unabhängigen Variablen beschrieben werden kann.

$$[C] \equiv R[R] + G[G] + B[B] \quad (3.1)$$

Bei den Experimenten mussten Proband\*innen drei monochromatische Strahler so einstellen, dass sie denselben Farbeindruck wie eine Testfarbe erzeugen. Das Testfeld wurde dazu in zwei Hälften geteilt, eine Seite wurde nur von der Testfarbe angestrahlt, die andere nur von den einstellbaren Strahlern. Die Größe und der Abstand des Testfelds wurden so gewählt, dass es nur in den Bereich der Fovea centralis fällt und somit eine konstante Dichte an Zapfen reizt. Die Umgebung des Testfelds wurde abgedunkelt, damit keine anderen Zonen im Auge gereizt werden (vgl. Schanda, 2007, S. 27-29). Das Experiment wurde von zwei unabhängigen Wissenschaftlern mit jeweils unterschiedlichen Primärvalenzen durchgeführt und führte zu übereinstimmenden Ergebnissen. Für die Definition des Normalbetrachters wurden die drei Primärvalenzen auf 700 nm für Rot, 561 nm für Grün und 436 nm für Blau festgelegt. Dieses RGB-Tupel definiert zusätzlich den CIE RGB Farbraum. Zusammen mit den Ergebnissen der Experimente und der relativen Leuchtdichte der Primärvalenzen, die mit der Formel 3.2 definiert wurde, bilden sie den 2° CIE-Normalbeobachter.

$$L = 1,0000 R + 4,5907 G + 0,0601 B \quad (3.2)$$

Da ein Farbgleich teilweise nicht mit den drei Strahlern auf der Abgleichseite möglich war, musste zusätzlich ein Strahler auf der Testseite beigemischt werden, dies entspricht einer Subtraktion der Farbe auf der Abgleichseite. Die Farbgleichfunktionen (CMF) haben folglich unerwünschte negative Anteile. CIE XYZ wurde so definiert, dass die CMFs der neuen Normvalenzen keine negativen Anteile haben, dass einer der Normvalenzen die Leuchtdichte  $L$  beschreibt und dass der Farbraum so klein wie möglich ist. Die daraus entstehenden imaginären Primärvalenzen  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  bilden als Normvalenzen den additiven Tristimulus-Farbraum CIE 1931 XYZ (vgl. Schanda, 2007, S. 29-30).

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,768\,892 & 1,751\,748 & 1,130\,160 \\ 1,000\,000 & 4,590\,700 & 0,060\,100 \\ 0 & 0,056\,508 & 5,594\,292 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Für eine vereinfachte Darstellung in einem 2-dimensionalen Diagramm werden aus den Normvalenzen die Chromatizitätskoordinaten  $x$ ,  $y$  und  $z$  gebildet.

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (3.4)$$

Die Chromatizitätskoordinaten sind nichtlinear unabhängig voneinander, daher reicht die Angabe von  $x$  und  $y$ , um eine Koordinate zu beschreiben (vgl. Malacara, 2002, S. 58-59).

$$x + y + z = 1 \quad (3.5)$$

Durch das Plotten der  $x$  und  $y$  Chromatizitätskoordinaten in einem 2-dimensionalen Koordinatensystem entsteht das CIE-Chromatizitätsdiagramm (Normfarbtafel) (auch hier gibt es äquivalent zum Normalbeobachter zwei Versionen, die Unterschiede sind jedoch relativ gering). Die Normfarbtafel modelliert mit dem Spektralfarbenzug alle für normalsichtige Menschen sichtbaren Farben. Die monochromatischen Farben liegen dabei auf der Spektralfarblinie, alle Mischfarben befinden sich innerhalb dieser Linie und auf der Purpurlinie, mit der die beiden Enden der Spektralfarblinie verbunden sind. Zusammen mit der Normvalenz  $Y$  bilden die Chromatizitätskoordinaten  $x$  und  $y$  einen Luma-Chroma-Farbraum namens CIE  $xyY$  (vgl. Malacara, 2002, S. 61).

### 3.2.2 LMS

Der LMS-Farbraum basiert auf den spektralen Empfindlichkeiten der menschlichen Zapfen. Die Buchstaben  $L$ ,  $M$  und  $S$  stehen jeweils für eine Sorte Zapfen. Die  $L$ -Zapfen sind empfindlich für lange Wellenlängen (rotes Licht), die  $M$ -Zapfen für mittellange Wellen (grünes Licht) und die  $S$ -Zapfen für kurze Wellen (blaues Licht) (vgl. Malacara, 2002, S. 136).

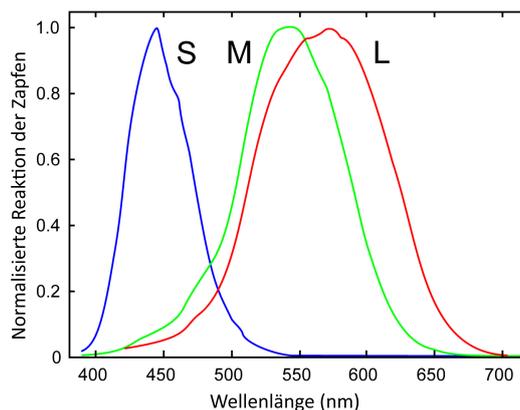


Abbildung 3.1: Spektrale Empfindlichkeit der Zapfen (Quelle: Vanessaezekowitz, 2007)

Da aufgrund der in Abbildung 3.1 zu sehenden Überlappung der spektralen Empfindlichkeiten der Zapfen eine Reizung eines einzelnen Zapfens nicht möglich ist, sind die  $L$ ,  $M$  und  $S$  Primärvalenzen imaginär, sie liegen außerhalb des Spektralfarbenzugs. Auch wenn sich die LMS-Zapfenanregungen nicht linear in XYZ-Tristimuluswerte umrechnen lassen, ist eine Annäherung durch eine lineare Matrix ( $\mathbf{M}$ ) ausreichend, um zwischen den Farbräumen zu konvertieren (vgl. Fairchild, 2005, S. 163). Eine Übersetzung von einem auf CIE XYZ basierenden Tristimulus-Farbraum ist erforderlich, wenn die chromatische Adaption mitmodelliert werden soll, wie zum Beispiel in einem Color Appearance Model (CAM). Das menschliche Auge passt sich nicht nur an Helligkeiten an, sondern auch an unterschiedliche Farbsituationen, somit erscheinen Objekte auch unter verschiedenen Lichtquellen farblich gleich. Diese Adaption wird durch die von Kries Transformationsmatrix vereinfacht modelliert, um einen Farbraum auf ein bestimmtes Normlicht zu normalisieren.

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \mathbf{M}^{-1} * \begin{pmatrix} L_{max2} & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & M_{max2} & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & S_{max2} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1/L_{max1} & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 1/M_{max1} & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 1/S_{max1} \end{pmatrix} * \mathbf{M} * \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Wobei das  $\mathbf{M}$  für eine beliebige lineare CIE XYZ zu LMS Matrix steht (vgl. Fairchild, 2005, S. 168-169).

### 3.2.3 IPT

Der IPT-Farbraum wurde von Ebner und Fairchild mit dem Ziel entwickelt, einen Farbraum zu schaffen, in dem Farbtöne wahrnehmungsgetreu modelliert werden können. IPT steht sowohl für Image Processing Transform als auch für Intensität (I) der Helligkeit und Protan (P) und Tritan (T) für die Rot-Grün- und Blau-Gelb-Dimension entsprechend der Rot- und Blau-Zapfen im menschlichen Auge. Im IPT-Farbraum wird die Adaption des menschlichen Auges konzeptionell von der wahrgenommenen Farbe getrennt, dadurch wird er zu einem betrachtungsbedingungsunabhängigen Farbraum. Die chromatische-adaptions-Transformation wird zum Beispiel mit einem CAM vorgenommen, anschließend wird IPT verwendet, um die Farberscheinung zu beschreiben. Das Ziel des IPT-Farbraums, Farbtöne möglichst einheitlich zu modellieren, ohne dabei andere Farberscheinungsmerkmale gegenüber bestehenden Modellen zu verschlechtern, äußert sich in den lineareren Konstanten-Farbton-Linien (vgl. Ebner & Fairchild, 1998, S. 1). Zur Bildung der IPT-Werte werden zunächst CIE XYZ-Werte, die auf D65 Normlicht angepasst sind, mit einer Transformation ähnlich der Hunt-Pointer-Estevéz (HPE) Matrix, normalisiert auf D65, zu LMS gewandelt. Die LMS-Werte werden durch eine Potenzfunktion komprimiert und anschließend mit einer weiteren Matrixtransformation in IPT-Werten umgewandelt.

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,4002 & 0,7075 & -0,0807 \\ -0,2280 & 1,1500 & 0,0612 \\ 0,0 & 0,06 & 0,9184 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X_{D65} \\ Y_{D65} \\ Z_{D65} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} L' &= L^{0,43}; & L \geq 0 & \quad L' = -|L|^{0,43}; & L < 0 \\ M' &= M^{0,43}; & M \geq 0 & \quad M' = -|M|^{0,43}; & M < 0 \\ S' &= S^{0,43}; & S \geq 0 & \quad S' = -|S|^{0,43}; & S < 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{pmatrix} I \\ P \\ T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,4000 & 0,4000 & 0,2000 \\ 4,4550 & -4,8510 & 0,3960 \\ 0,8056 & 0,3572 & -1,1628 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} L' \\ M' \\ S' \end{pmatrix}$$

### 3.2.4 Rec.709

Der Farbraum für digitale HD-Signale, spezifiziert in ITU-R BT.709, ist ein Standard-Video-Farbraum, dessen Primärvalenzen alle innerhalb des Spektralfarbenzugs liegen und somit zu 100% von physischen Displays wiedergegeben werden können. Der Rec.709 Farbraum wird im CIE 1931 xy Diagramm durch die Chromatizitätskoordinaten  $R$ ,  $G$ ,  $B$  und dem Referenzweiß  $W$ , welcher dieselben Chromatizitätskoordinaten wie das D65 Normlicht hat, definiert.

$$\begin{aligned} R &= (0,640|0,330) \\ G &= (0,300|0,600) \\ B &= (0,150|0,060) \\ W &= (0,3127|0,3290) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Neben den Primärvalenzen wird in Rec.709 auch die opto-electronic transfer function (OETF) definiert, welche zusammen mit der in ITU-R BT.1886 definierten electro-optical transfer function (EOTF) die opto-optical transfer function (OOTF) bildet. Die OETF ist die bereits in 2.2 erwähnte  $\gamma$ -Vorentzerrung, die über den Großteil der Leuchtdichte mit  $\gamma = 0,45$  definiert ist, für besonders kleine Leuchtdichten wurde ein linearer Übergang gewählt, um Details in den dunklen Bildinhalten zu wahren.

$$\begin{aligned} V &= \alpha * L^{0,45} - (\alpha - 1); & 1 \geq L \geq \beta; & \quad \alpha = 1,099 \\ V &= 4,500 * L; & \beta > L \geq 0; & \quad \beta = 0,018 \end{aligned} \quad (3.9)$$

$L$  ist die aufgenommene Leuchtdichte linear auf  $0 \leq L \leq 1$  aufgeteilt und  $V$  ist das entsprechende elektrische Signal (vgl. ITU, 2015a, S. 3). Da die ursprünglichen Referenzmonitore für HDTV CRT-Displays verwendeten und diese aufgrund ihrer natürlichen Beschaffenheit alle

sehr ähnliche EOTFs aufwiesen, wurde die EOTF für andere Displaytechnologien erst in der ITU-Empfehlung BT.1886 definiert (vgl. ITU, 2011a, S. 4).

$$L = a(\max[(V + b), 0])^\gamma; \quad a = (L_W^{1/\gamma} - L_B^{1/\gamma})^\gamma; \quad b = \frac{L_B^{1/\gamma}}{L_W^{1/\gamma} - L_B^{1/\gamma}} \quad (3.10)$$

Wobei  $a$  und  $b$  die Variablen für Gain und Black-Level-Lift sind, die so eingestellt werden, dass bei vollem Videopegel  $V = 1$   $L = L_W$  und bei  $V = 0$   $L = L_B$  gilt. Das Gamma ist mit  $\gamma = 2,4$  gegeben,  $L_W$  ist die Leuchtdichte für Weiß und  $L_B$  für Schwarz (vgl. ITU, 2011a, S. 2). Zusammen mit dem approximierten Gamma der OETF von 0,5, bildet das Gamma der EOTF ein System-Gamma der OETF von  $\gamma = 1,2$ , welches für die in der ITU-R BT.2035 empfohlene Betrachtungsumgebung ausgelegt ist (vgl. Schmidt, 2021, S. 160). Der ‚Schwesterfarbraum‘ sRGB, welcher hauptsächlich für Webanwendungen und PCs verwendet wird, hat dieselben Primärvalenzen wie der Rec.709 Farbraum, weist jedoch in seiner EOTF ein Gamma von  $\gamma = 2,2$  anstelle der 2,4 auf. sRGB ist häufig der Standard-Farbraum im Fall einer nicht richtig getagten Datei.

### 3.2.5 Rec.2020

Der Farbraum für UHD-TV, welcher in der ITU Empfehlung BT.2020 definiert ist, wird häufig als Wide Color Gamut (WCG) bezeichnet, da er größer als der Rec.709 Farbraum ist und 99% der Körperfarben abbilden kann (vgl. Schmidt, 2021, S. 170). Das Referenzweiß  $W$  bleibt im Vergleich mit Rec.709 unverändert das D65 Normlicht. Die Primärvalenzen  $R$ ,  $G$  und  $B$  liegen im Rec.2020 Farbraum jedoch auf dem Spektralfarbenzug und haben dementsprechend neben ihren Chromatizitätskoordinaten assoziierte Wellenlängen, die ihr monochromatisches Licht beschreiben.

$$\begin{aligned} R &= (0,708|0,292) && = 630nm \\ G &= (0,170|0,797) && = 532nm \\ B &= (0,131|0,046) && = 467nm \\ W &= (0,3127|0,3290) \end{aligned} \quad (3.11)$$

Auch die OETF und die EOTF sind weitestgehend mit denen des Rec.709 Farbraums identisch, wobei die Koeffizienten der OETF in einem 12 Bit System mit einer Nachkommastelle mehr angegeben werden:  $\alpha = 1,0993$  und  $\beta = 0,0181$ . Die Koeffizienten sind gerundete Werte, die in der Praxis ausreichend sind, um den linearen Teil der OETF mit dem Gamma-Teil zu verbinden (vgl. ITU, 2015b, S. 3-4).

## 4 Grundlagen WCG und HDR

In Abschnitt 2.2 wurde bereits die Quantisierung von Gamma-vorentzerrten Signalen behandelt, die für die Verzerrung verwendeten OETFs und EOTFs aus den Abschnitten 3.2.4 und 3.2.5 geben dabei an, wie die verschiedenen Helligkeitsabstände auf die begrenzten Codewörter aufgeteilt werden. Im SDR-Bereich liegen die meisten Kontrastschrittweite bei einer Quantisierung mit zehn Bit unterhalb der Schreibergrenze und somit treten Quantisierungsartefakte in einem tolerierbaren Rahmen auf (vgl. Schmidt, 2021, S. 186).

Mit der Entwicklung von helleren Displays und dem Streben nach einer besseren Bildqualität wurde die Erweiterung des Dynamikumfangs in Form von HDR eingeführt. In diesen neuen Grenzen mit Leuchtdichten von bis zu  $10\,000\text{ cd/m}^2$  liegen die Kontrastschrittweite bei Verwendung der alten OETFs und EOTFs zu größeren Teilen über der Schreibergrenze (vgl. Schmidt, 2021, S. 186). Um Quantisierungsartefakte zu vermeiden und die Helligkeitsstufen für menschliche Betrachter sinnvoll auf die begrenzten Codewörter aufzuteilen, wurden in der ITU-Empfehlung BT.2100 zwei neue Verfahren für HDR-TV vorgestellt: Perceptual Quantizer (PQ) und Hybrid Log Gamma (HLG). Im Zuge dieser Arbeit liegt das Hauptaugenmerk auf PQ, da  $IC_{7C_P}$  anhand dieser Kurve entwickelt und getestet wurde.

### 4.1 Perceptual Quantizer

PQ ist ein von Dolby Laboratories entwickeltes Verfahren zur wahrnehmungsbasierten Quantisierung von HDR-Videosignalen. Die von Barten definierte Sichtbarkeitsgrenze dient als Vorlage für die PQ-Kurve und modelliert eine effiziente Verteilung der Quantisierungsstufen auf die darzustellenden Helligkeitswerte, sodass bei einer Unterschreitung der Kurve keine Quantisierungsartefakte sichtbar sind. Bartens Modell berücksichtigt neben der Leuchtdichte mehrere Faktoren, welche die Kontrast-Empfindlichkeits-Kurve (CSF) des HVS beeinflussen, wie zum Beispiel das Sichtfeld oder die Ortsfrequenzen der Bildinhalte (vgl. ITU, 2023, S. 41-42). Daher gilt es im Gegensatz zu der nicht so strengen Schreibergrenze auch unter nicht optimalen Betrachtungsbedingungen als anerkannt (vgl. Schmidt, 2021, S. 181). Mit diesem Ansatz lassen sich die erweiterten Helligkeitsstufen auf möglichst wenige Quantisierungsstufen aufteilen, ohne störende Artefakte zu produzieren.

Das PQ-Verfahren ist über seine EOTF definiert, das Signal enthält die Leuchtdichte der Komponenten als absolute Werte und ist dementsprechend displaybezogen. Da die Helligkeitswerte absolut sind, muss das PQ-HDR-Signal Metadaten über das Masteringdisplay enthalten, um eine der artistischen Intention entsprechende korrekte Wiedergabe zu ermöglichen. Bei PQ wird die OOTF in der Produktion oder direkt in der Kamera auf das Signal angewandt, anschließend wird die inverse EOTF verwendet um eine entsprechende OETF zu erhalten, die wie bereits beschrieben auf der Displayseite mit der EOTF in die absoluten Helligkeitswerte übersetzt wird (vgl. ITU, 2018, S. 12-13). Die inverse EOTF wird auch in der Transformation von linearem Rec.2020 RGB zu  $IC_{TC_P}$  verwendet, um die Signalwerte wahrnehmungsentsprechend auf die zur Verfügung stehenden Bits aufzuteilen, daher wird die Formel in 5.2 gegeben.

$$F_D = EOTF[E'] = 10000 * Y$$

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

$F_D$  Display Leuchtdichte in  $cd/m^2$  (4.1)

$E'$  Nicht-linearer Farbwert zwischen [0:1]

$Y$  linearer Farbwert normalisiert auf [0:1]

$$c_1 = 3424/4096$$

$$c_2 = 2413/4096 * 32$$

$$c_3 = 2392/4096 * 32$$

$$m_1 = 2610/4096 * 0,25$$

$$m_2 = 2523/4096 * 128$$

PQ wurde für eine Maximalhelligkeit von 10 000  $cd/m^2$  im nativen Weißpunkt (zum Beispiel D65) entworfen, wobei aufgrund von Display-Limitierungen häufig auf Maximalwerte von 1 000 oder 4 000  $cd/m^2$  gemastert wird. Die Wahl des Maximalhelligkeitswerts begründet sich auf einer Dolby-Studie, die besagt, dass 90% der Testpersonen einen Kontrastumfang von  $1:10^7$  befriedigend fanden (vgl. Schmidt, 2021, S. 191). Bei Verwendung des vollen Kontrastumfangs liegt die PQ-Kurve nur bei einer Quantisierung mit 12 Bit unterhalb der Bartensgrenze, mit einer 10 Bit Quantisierung liegt sie immer noch unterhalb der Schreibergrenze (vgl. Schmidt, 2021, S. 193).

Die PQ-Kurve wird in verschiedenen HDR-Standards zur Codierung der Helligkeitswerte verwendet, Dolby selbst bietet das proprietäre Format Dolby Vision an, welches sowohl statische als auch dynamische Metadaten im Dual Layer-Verfahren verwendet. HDR10 bietet als offener Standard eine simplere Alternative mit ausschließlich statischen Metadaten, wobei es mit HDR10+ auch eine Version mit dynamischen Metadaten gibt. Die verschiedenen Standards sind im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter von Bedeutung, entscheidend ist die ihnen zugrunde liegende PQ-Kurve und die entsprechenden EOTF beziehungsweise die inverse EOTF.

# 5 Forschung und Entwicklung von $IC_T C_P$

Mit der Entwicklung neuer Displaytechnologien und der Einführung von HDR und WCG wird die Landschaft der Displayindustrie immer vielfältiger, es treten jedoch auch vermehrt Probleme mit der korrekten Wiedergabe des Videomaterials auf. Displays mit unterschiedlichen Leuchtdichten und Abdeckungen des Rec.2020 Farbraums erfordern ein schnelles und effizientes display-spezifisches Gamut-Mapping, um ein eingehendes Signal zu verarbeiten und fehlerfrei wiederzugeben. Ein Videopegelraum, der sich über den gesamten WCG so gleichmäßig wie möglich verhält und in dem das Luma-Signal möglichst unabhängig von den Chroma-Signalen ist, wird benötigt, damit das Gamut-Mapping ohne zusätzliche Farbraumtransformationen effizient und korrekt durchgeführt werden kann. Basierend auf diesen Kriterien entwickelte Dolby Laboratories den Videopegelraum  $IC_T C_P$ , um einen Ersatz für NCL  $Y' C'_B C'_R$  bei HDR- und WCG-Inhalten zu bieten.  $IC_T C_P$  ist ein Komponentensignal, basierend auf dem in 3.2.3 vorgestellten IPT-Farbraum, welches in der ITU Empfehlung BT.2100 als Signalformat für HDR standardisiert wurde. Unabhängigkeit zwischen dem Luma-Signal und den Chroma-Signalen sowie gleichmäßige MacAdam-Ellipsen und konstante Farbton-Linien waren die zentralen Punkte der Entwicklung.

## 5.1 Technische definitionem $IC_T C_P$

Die Nomenklatur von  $IC_T C_P$  ist analog zum IPT-Farbraum, das Luma-Signal ist als I (für Intensity) und die Chroma-Signale als  $C_T$  und  $C_P$  (für Tritanopie und Protanopie) codiert.  $IC_T C_P$  orientiert sich konzeptuell an der visuellen Wahrnehmung des Menschen (HVS): Lineares Licht wird über die drei Zapfen-Typen entsprechend ihrer Empfindlichkeiten aufgenommen (vgl. Fairchild, 2005, S. 8), angepasste an eine Sensitivität nicht-linear angepasst (vgl. Fairchild, 2005, S. 19-24) und entsprechend der Gegenfarbentheorie in die drei Bestandteile Hell-Dunkel, Gelb-Blau und Grün-Rot aufgeteilt (vgl. Fairchild, 2005, S. 18-19). Zur Bildung von  $IC_T C_P$  aus linearem RGB im Rec.2020 Farbraum wird im ersten Schritt eine Transformation in LMS mit einer auf Normlicht D65 normalisierten HPE-Matrix durchgeführt. Um gleichmäßigere MacAdam-Ellipsen und geradere konstante Farbton-Linien zu erhalten, wird

zusätzlich ein Crosstalk von 4% zwischen den RGB-Signalen eingeführt (vgl. Dolby, 2016, S. 3).

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1688 & 2146 & 262 \\ 683 & 2951 & 462 \\ 99 & 309 & 3688 \end{pmatrix} \div 4096 * \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Im zweiten Schritt werden die LMS-Werte durch die in SMPTE ST 2084 definierte inverse PQ-Funktion wahrnehmungsentsprechend nicht-linear verteilt (vgl. Dolby, 2016, S. 5).

$$EOTF^{-1}[F_D] = \left( \frac{C_1 + C_2 * Y^{m_1}}{1 + C_3 * Y^{m_1}} \right)^{m_2}; \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} Y &= F_D/10000 & c_1 &= 3424/4096 \\ m_1 &= 2610/4096 * 0,25 & c_2 &= 2413/4096 * 32 \\ m_2 &= 2523/4096 * 128 & c_3 &= 2392/4096 * 32 \end{aligned}$$

Wobei  $F_D$  die Leuchtdichte der Komponente in  $\text{cd/m}^2$  und  $Y$  der auf  $[0:1]$  normalisierte Farbwert ist.

Im letzten Schritt wird das L'M'S'-Signal mit einer auf der LMS zu ITP basierenden Matrix zu  $IC_T C_P$  transformiert. Die Koeffizienten für das I-Signal wurden verändert, um eine konstantere Leuchtdichte zu erhalten. Um eine bessere Abwärtskompatibilität zu bestehenden Werkzeugen, wie zum Beispiel Vektorskopen, zu gewährleisten, werden die Hauttöne an den SDR  $Y' C_B C_R$  Rec.709 Hauttönen ausgerichtet. Die Koeffizienten der Chroma-Signale werden so skaliert, dass sie in den Wertebereich von  $[-0,5;0,5]$  fallen (vgl. Dolby, 2016, S. 5-6).

$$\begin{pmatrix} I \\ C_T \\ C_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2048 & 2048 & 0 \\ 6610 & -13613 & 7003 \\ 17933 & -17390 & -543 \end{pmatrix} \div 4096 * \begin{pmatrix} L' \\ M' \\ S' \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

## 5.2 Designkriterien von $IC_T C_P$

Nach der technischen Definition von  $IC_T C_P$  werden im folgenden Abschnitt die verschiedenen Problematiken der korrekten Bildwiedergabe von HDR WCG Inhalten aufgelistet, welche als Designkriterien für die Entwicklung von  $IC_T C_P$  verwendet wurden. Der Fokus liegt hierbei auf den teilweise bereits erwähnten Problemen der konstanten Leuchtdichte, der Farbtonlinearität, der Gleichmäßigkeit der gerade noch wahrnehmbaren Unterschiede und der Basisbandquantisierungsleistung. Diese Parameter können als Indikator verwendet werden, um die Eignung des  $IC_T C_P$  Videopegelraums als Ersatz für NCL  $Y' C_B C_R$  für den Einsatz in HDR und WCG Videos zu überprüfen.

Das Problem der nicht konstanten Leuchtdichte bei NCL  $Y'C'_BC'_R$  entsteht aus der Gamma-Vorentzerrung des RGB-Signals. Das aus den  $R'G'B'$ -Signalen berechnete  $Y$ -Signal unterscheidet sich von einem  $Y$ -Signal, welches wie in CL  $Y'_C'BC'_R$  aus einem linearen RGB-Signal berechnet wird und erst anschließend Gamma-angepasst wird. Bei einer unbeeinflussten 4:4:4 Übertragung des NCL  $Y'C'_BC'_R$  Signals tritt der Fehler nicht auf, da die Matrixtransformation invers wieder zum originalen Signal führt. Erst bei einer Farbunterabtastung oder anderweitigen Veränderung der Chroma-Signale treten Leuchtdichtenfehler auf. Durch die Gamma-Vorentzerrung des RGB-Signals wird ein Teil der Helligkeitsinformation in den Chroma-Signalen  $C'_B$  und  $C'_R$  transcodiert, es entsteht ein sogenannter Crosstalk zwischen dem Luma- und den Chroma-Signalen. Bei einer Farbunterabtastung wird somit nicht nur die Farbinformation in ihrer Bandbreite begrenzt, sondern auch ein Anteil der Helligkeitsinformation. Bei der Rücktransformation in ein RGB-Signal entstehen durch die veränderte Helligkeitsinformation vom Original abweichende Leuchtdichten. Ein Verlust an Helligkeitsdetails und geringere Leuchtdichten sind mögliche Resultate, diese Fehler sind vor allem in stark gesättigten und hochfrequenten Bildinhalten sichtbar (vgl. ITU, 2023, S.55).

Die Farbtonlinearität eines Farbraums oder Videopegelraums beschreibt, wie sich der Farbton einer Farbe bei Veränderung der Sättigung verhält. Je linearer sie ist, desto näher liegt der entsättigte beziehungsweise gesättigte Farbton am originalen Farbton. In einem Videopegelraum mit einer schlechten Farbtonlinearität führt der Crosstalk zwischen dem Farbton und der Sättigung bei einem Gamut-Mapping zu einer wahrnehmbaren Farbtonveränderung, diese kann nur durch komplexe Mapping-Operationen ausgeglichen werden. Eine hohe Farbtonlinearität bietet den Vorteil, dass Gamut-Mapping in dem Videopegelraum mit einfachen Operationen durchgeführt werden kann und somit sowohl Rechenleistung als auch Zeit gespart wird.

Die Gleichmäßigkeit der gerade noch wahrnehmbaren Unterschiede (JND) entscheidet darüber, wie groß eine Signalwertänderung durchschnittlich sein muss, um eine neue Wahrnehmung hervorzurufen. Je gleichmäßiger die JNDs eines Farbraums oder Videopegelraums sind, desto effizienter lässt sich ein Signal in diesem quantisieren. Vereinfacht könnte ein idealer gleichmäßiger Farbraum linear quantisiert werden, sodass jedes Codewort genau eine Wahrnehmung repräsentiert. Da sich das HVS jedoch nicht bei jedem Menschen gleich verhält, ist ein solcher Farbraum nicht umsetzbar. Dennoch bieten die JNDs aus verschiedenen Experimenten und Datensätzen wie der bereits in 4.1 erwähnten Bartensgrenze Aufschluss über eine sinnvolle wahrnehmungsentsprechende Verteilung der Informationen auf begrenzte Codewörter. Die Helligkeitsinformation wird im Fall von HDR mit der PQ- oder HLG-Kurve bereits sinnvoll aufgeteilt, die Farbinformationen sind jedoch im  $Y'C'_BC'_R$  Videopegelraum nicht sehr gleichmäßig verteilt. Bei begrenzter Bandbreite kann dies zu Farbfehlern in bestimmten Farbtönen führen, da für diese weniger Codewörter zur Verfügung stehen und damit schneller Wahrnehmungssprünge in Form von Farb-Banding auftreten. Ein Farbraum oder Videopegelraum mit gleichmäßigeren JNDs kann mit geringeren Bits Quantisiert werden, bevor ein solcher Fehler auftritt, da bei einer linearen Quantisierung die verschiedenen

Farbwahrnehmungsschritte ähnlich viele Codewörter zugewiesen bekommen.

Die Effizienz der Basisbandquantisierung eines Videopegelraums gibt Aufschluss darüber, wie viele Bits zur Quantisierung eines Signals verwendet werden können, bevor sichtbare Quantisierungsartefakte auftreten. Neben ungewollten Konturen, verlorenen Details und erhöhtem Bildrauschen kann es durch die Quantisierung auch zu Farbverzerrungen kommen. Diese lassen sich über eine Farbdifferenz  $\Delta E$  bestimmen und mit verschiedenen Güteklassen vergleichen, um vorherzusagen, ob die Quantisierung im Basisband zu visuellen Artefakten führen kann.

## 5.3 Implementierung

Durch seine Inklusion in mehreren modernen Codecs, darunter AV1 und H.265 kann ein mit  $IC_T C_P$  codiertes Signal von jedem H.265-fähigen Gerät interpretiert werden. Der Aufbau des Videopegelraums wurde so gewählt, dass der Wandel zu Display-RGB dieselben Schritte wie  $NCL Y' C'_B C'_R$  durchläuft. Das Signal wird als erstes mit einer Matrix aus dem Videopegelraum in einen Farbraum transformiert,  $IC_T C_P$  zu  $L' M' S'$  und  $NCL Y' C'_B C'_R$  zu  $R' G' B'$ . Anschließend wird im Fall von PQ die EOTF verwendet, um die Signale zu linearisieren, damit sie mit einer zweiten Matrix abschließend über den CIE XYZ Farbraum in den entsprechenden Display-Farbraum transformiert werden können (vgl. Dolby, 2016, S. 13). Beim Codieren in einen HEVC-Bitstream muss der Video Usability Information (VUI) Parameter `MatrixCoefficients` auf 14 gesetzt werden, damit beim Decodieren die Matrizen für  $IC_T C_P$  verwendet werden.

## 6 Vergleich zwischen $IC_T C_P$ und $Y' C'_B C'_R$

Der von Dolby Laboratories vorgeschlagene Videopegelraum  $IC_T C_P$  sollte gegenüber bereits etablierten Standards wie NCL  $Y' C'_B C'_R$  signifikante Vorteile bei der Verarbeitung und Wiedergabe von HDR und WCG Inhalten aufweisen, um einen Wechsel zwischen den Videopegelräumen zu rechtfertigen. Es existieren bereits Studien, die sich mit den Vorteilen von  $IC_T C_P$  auseinandersetzen, jedoch wurden einige davon von Dolby Laboratories durchgeführt und müssen gegebenenfalls kritischer bewertet werden. Im folgenden Kapitel werden einige relevante Studien zu den Tests und Ergebnissen des  $IC_T C_P$  Whitepapers hinzugezogen, um die Vorteile und Qualität dieses neuen Standards zu verifizieren.

### 6.1 Konstante Leuchtdichte

Ein zentrales Problem des etablierten Videopegelraums NCL  $Y' C'_B C'_R$  ist die im Namen enthaltene nicht konstante Leuchtdichte, die bei einer Farbunterabtastung zu störenden NCL-Artefakten führen kann. Da in NCL  $Y' C'_B C'_R$  das Luma-Signal  $Y'$  nicht vollständig von den Chroma-Signalen  $C'_B$  und  $C'_R$  dekorreliert ist, wird bei einer Verarbeitung der Chroma-Signale ein Teil der Helligkeitsinformation verändert. Dementsprechend führen Operationen wie die Farbunterabtastung zu veränderten Leuchtdichten, obwohl nur die Farbinformation, jedoch nicht die Helligkeitsinformation verändert werden soll. NCL-Fehler fallen eher selten störend in natürlichen SDR-Videos auf. Wenn das Material den Farbraum und den erhöhten Dynamikumfang eines HDR-Signals ausfüllt, können sie bei einer 4:2:0 Farbunterabtastung jedoch auch in einem unkomprimierten natürlichen Video auftreten (vgl. Lu et al., 2017, S. 14). Es gibt verschiedene Ansätze, um NCL-Fehler zu minimieren, wie die Verwendung von Luma-Anpassung oder CL  $Y' C'_B C'_R$  jedoch bringen diese eine erhöhte Komplexität mit sich.  $IC_T C_P$  hat mit dem I-Signal ein Helligkeitssignal mit einer annähernd konstanten Leuchtdichte und minimiert somit die NCL-Fehler aufgrund der nahezu komplett dekorrelierten Helligkeits- und Farbinformationen auf ein vernachlässigbares Level.

Um die beiden Videopegelräume  $IC_T C_P$  und NCL  $Y' C'_B C'_R$  auf ihre konstante Leuchtdichte zu überprüfen, verwendet Dolby einen Vergleich der Helligkeitssignale mit der tatsächli-

chen Leuchtdichte des Signals Y. Je mehr die Helligkeitssignale I und Y' mit Y korrelieren, desto genauer ist die enthaltene Helligkeit und desto weniger Crosstalk herrscht zwischen dem Helligkeits- und den Chroma-Signalen eines jeweiligen Videopegelraums. Y wird für die Vergleichbarkeit ebenfalls mit der inversen PQ EOTF codiert. Für die Analyse wurde ein Rec.2020 RGB Farbwürfel mit Leuchtdichten von 0,005 cd/m<sup>2</sup> bis 10 000 cd/m<sup>2</sup> in die jeweiligen Helligkeitssignale I und Y' transformiert und mit der Leuchtdichte Y verglichen. IC<sub>T</sub>C<sub>P</sub> hat mit dem Pearson-Korrelationskoeffizient r=0,998 eine eindeutig bessere Trennung zwischen dem Helligkeitssignal I und den Chroma-Signalen C<sub>T</sub> und C<sub>P</sub> als NCL Y'C'<sub>B</sub>C'<sub>R</sub> mit einem r von 0,819. Der stärkste Crosstalk ist bei NCL Y'C'<sub>B</sub>C'<sub>R</sub> in den gesättigten Blau- und Rottönen zu sehen. IC<sub>T</sub>C<sub>P</sub> hat aufgrund seiner hohen Korrelation von I zu Y keine besonders starke Ausprägung in bestimmten Farbtönen und kann als Videopegelraum mit konstanter Leuchtdichte bezeichnet werden (vgl. Dolby, 2016, S. 8).

Um die Vorteile der konstanten Leuchtdichte von IC<sub>T</sub>C<sub>P</sub> gegenüber NCL Y'C'<sub>B</sub>C'<sub>R</sub> mit natürlichem Material zu verifizieren, haben Forschende von Dolby Laboratories den "HdM-HDR-2014" Datensatz der Hochschule der Medien in Stuttgart in beide Videopegelräume analysiert. Der Datensatz beinhaltet HDR WCG Videos, die als Rec.2020 mit einer Leuchtdichte von 0,005-4000 cd/m<sup>2</sup> graded wurden. Eine Farbvolumen-Analyse der Forschenden zeigt, dass die Videos des Datensatzes den Rec.2020 Gamut beinahe ausfüllen und sich breit über das Farbvolumen aufteilen (vgl. Lu et al., 2017, S. 16). Für den ersten Test wurden die verschiedenen Testvideos sowohl nach IC<sub>T</sub>C<sub>P</sub> als auch NCL Y'C'<sub>B</sub>C'<sub>R</sub> transformiert, zusätzlich wurde die originale Leuchtdichte mit PQ codiert, um die Korrelation der Helligkeitssignale der beiden Videopegelräume zu überprüfen. Dieser erste Test ist das Äquivalent zu dem bereits beschriebenen Test und liefert ähnliche Ergebnisse. Das I-Signal korreliert mit dem Y-Signal und produziert eine saubere Diagonale. Das Y'-Signal korreliert nicht so stark mit dem Y-Signal, daher verschieben sich die Werte von der idealen Diagonalen. Für den zweiten Test wurde eine Farbunterabtastung im 4:2:0 Muster durchgeführt, die Chroma-Signale C<sub>T</sub>C<sub>P</sub> und C'<sub>B</sub>C'<sub>R</sub> wurden anschließend wieder mit den Helligkeitssignalen I und Y' zu R'G'B'-Signalen zusammengesetzt. Um den Crosstalk zwischen den Helligkeitssignalen und den Chroma-Signalen zu bestätigen, wurden die Leuchtdichten der in den Videopegelräumen farbunterabgetasteten Signale mit der originalen Leuchtdichte verglichen. IC<sub>T</sub>C<sub>P</sub> produziert auch in diesem Test eine ordentliche Diagonale, dementsprechend treten keine sichtbaren NCL-Fehler in den verarbeiteten Videos auf. NCL Y'C'<sub>B</sub>C'<sub>R</sub> produziert wie zu erwarten eine unsaubere Diagonale mit sichtbarer Streuung der Leuchtdichten, diese spiegeln sich auch in den sichtbaren NCL-Fehlern wieder, die in den verarbeiteten Videos in stark gesättigten Bereichen auffallen (vgl. Lu et al., 2017, S. 16-17).

Beide Tests bestätigen die konstante Leuchtdichte von IC<sub>T</sub>C<sub>P</sub>, somit eignet sich der neue Videopegelraum zur Farbunterabtastung von HDR und WCG Material. Trotz seiner Vorteile gegenüber NCL Y'C'<sub>B</sub>C'<sub>R</sub> benötigt er dieselben Operationen und ist dementsprechend nicht langsamer oder hardwareintensiver. Für Videoinhalte, die in einem Rec.2020 Container

übertragen werden, jedoch nur Farben innerhalb des Rec.709 Gamuts beinhalten, sind die NCL-Fehler häufig gering genug, dass sie nicht auffallen oder tolerierbar sind, daher lohnt sich die Verwendung von  $IC_{7C_P}$  im Bezug auf NCL-Artefakte nur bei farbvolumenfüllenden Bildinhalten.

## 6.2 Farbtonlinearität

Mit dem erweiterten Rec.2020 Gamut und einer Vielzahl an verschiedenen Wiedergabegeräten, die unterschiedliche Farbvolumen darstellen können, ist Gamut-Mapping ein entscheidender Verarbeitungsschritt auf der Wiedergabeseite, damit die Farbinformation so originalgetreu wie möglich wiedergegeben werden kann. In der ITU-Empfehlung BT.2407 werden zwei Ansätze zum Gamut-Mapping von Rec.2020 zu Rec.709 Farben gegeben. Der einfachste und hardware-kostensparende Ansatz ist eine simple Matrixtransformation der linearen Rec.2020 RGB-Werte, die innerhalb des Rec.709 Gamuts liegen und ein hartes Clipping der Farben, die sich außerhalb des Rec.709 Gamuts befinden. Diese Form des Gamut-Mappings erhält alle Farben des Rec.2020 RGB-Signals, die innerhalb des Rec.709 Gamuts liegen originalgetreu und ist für diese auch reversibel. Der Nachteil ist jedoch, dass Farbinformationen außerhalb des Rec.709 Gamuts unwiderruflich verloren gehen und an ihrer Stelle Farbtonverschiebungen und Verlust von Bilddetails auftreten (vgl. ITU, 2017, S. 2). Der zweite Ansatz ist die Transformation der Rec.2020 RGB-Farben in einen anderen Farbraum, in dem sie per Mapping-Algorithmus in Rec709 Farben gewandelt werden. Je nach gewähltem Farbraum sind die Mapping-Algorithmen komplexer und die Ergebnisse präziser. Zusätzlich ist die Wahl des Algorithmus ausschlaggebend darüber, wie stark die Farben innerhalb des Rec.709 Gamuts verändert werden und ob die Konversion mehrmals stattfinden kann, ohne die Farbinformationen immer weiter zu degradieren (vgl. ITU, 2017, S. 4). In einem Farbraum mit optimaler Farbtonlinearität kann der Mapping-Algorithmus die Rec.2020 Farben auf Geraden von der Originalfarbe zum Weißpunkt verteilen, ohne Farbtonveränderungen hervorzurufen. Diese Form des Mappings ist die simpelste und schnellste Variante, daher ist die Farbtonlinearität ein entscheidender Faktor bei der Wahl des Mapping-Farbraums.

Die Transformation in einen Mapping-Farbraum und wieder zurück ist hinfällig, wenn der Farbraum oder Videopegelraum, der zur Übertragung genutzt wird, bereits genügend Farbtonlinearität aufweist. Daher wurde bei der Entwicklung von  $IC_{7C_P}$  darauf Wert gelegt. Um die Farbtonlinearität der beiden Videopegelräume miteinander zu vergleichen, benutzt Dolby den Hung und Berns Datensatz, welcher auf einem Farbton-Matching-Experiment mit 12 Referenzfarben an einem CRT-Display und mit Farben innerhalb des Rec.709 Gamuts basiert (vgl. Wang et al., 2022, S. 44897). Dabei zeigt sich das NCL  $Y'C'_B'C'_R$  mit ca. 23° eine höhere maximale Abweichung der Farbtonwinkel als  $IC_{7C_P}$  mit nur ca. 8° aufweist. Beide Maxima sind im Blau-Magenta-Bereich, wobei NCL  $Y'C'_B'C'_R$  auch in der Region der Hauttöne

eine größere Abweichung produziert (vgl. Dolby, 2016, S. 8). Daraus lässt sich schließen, dass  $IC_{TC_P}$  gegebenenfalls als Mapping-Farbraum verwendet werden kann und sich auf jeden Fall besser für eine simple lineare Transformation der Rec.2020 Farben in den Rec.709 Gamut eignet als  $NCL Y'C'_B C'_R$ . Durch ein Gamut-Mapping im  $IC_{TC_P}$  Videopegelraum können auf der Wiedergabeseite zwei Farbraumtransformationen eingespart und ein gegebenenfalls komplexer Mapping-Algorithmus vereinfacht werden.

Forschende der Polytechnic University in Hongkong haben im Zuge der Entwicklung von HDR und WCG einen neuen Datensatz in einem WCG und unter HDR-Bedingungen erstellt. Der neue Datensatz umfasst 21 Referenzfarbtöne, die gleichmäßig zwischen den drei Primärvalenzen des Test-Displays aufgeteilt wurden. Die Farben wurden auf eine Leuchtdichte von  $3400 \text{ cd/m}^2$  kalibriert und liegen nahe der Rec.2020 Gamutgrenze. Zusätzlich wurde ein vierter Warmweißkanal verwendet, um dem Beobachter-Metamerismus mit einer breiteren SPD entgegenzuwirken. Mit diesem Datensatz wurden neun verschiedene Farb- und Videopegelräume, darunter  $IC_{TC_P}$  und  $NCL Y'C'_B C'_R$ , auf ihre Farbtonlinearität überprüft. Für den Vergleich wurden vier verschiedene Metriken verwendet: Die durchschnittliche Abweichung der Test-Farbtonwinkel vom Referenzwinkel ( $|\overline{\Delta h}|$ ), die Standardabweichung der Farbtonwinkel ( $SD(h)$ ), der RMSE der Farbtonwinkel Differenzen ( $RMSE(|\overline{\Delta h}|)$ ) und die wahrgenommene Farbtendifferenz ( $|\overline{\Delta H}|$ ), bei der mithilfe der Chroma-Level die Sättigungsunterschiede wahrnehmungsgetreuer modelliert werden. Von den neun getesteten Farb- und Videopegelräumen erzielte  $IC_{TC_P}$  in drei von vier Tests die besten Ergebnisse, wobei der neue Videopegelraum bei dem  $|\overline{\Delta h}|$  Test knapp hinter CAM02-UCS und IPT lag (vgl. Wang et al., 2022, S. 44906).

Sowohl die von Dolby durchgeführte Analyse als auch der unabhängige Test mit einem für HDR und WCG entwickelten Datensatz belegen, dass  $IC_{TC_P}$  eine gute Farbtonlinearität aufweist und sich dementsprechend als Mapping-Raum eignen würde. Für einen optimalen Erhalt der Farbtöne wird jedoch trotzdem ein komplexer Mapping-Algorithmus nötig sein, da sich auch  $IC_{TC_P}$  vor allem in den Blau- und Magentatönen nicht komplett linear verhält.

### 6.3 Gleichmäßigkeit der JNDs

Damit Farbinformationen so effizient wie möglich in einem Farbraum oder Videopegelraum verarbeitet werden können, müssen die JNDs gleichmäßig über den gesamten Farbraum verteilt sein. JNDs sind die kleinsten vom HVS wahrnehmbaren Veränderungen. In einem optimalen Farbraum führt eine Wertveränderung immer zu einer gleichen äquivalenten Wahrnehmungsänderung. Der  $IC_{TC_P}$  Videopegelraum basiert auf dem in 3.2.3 erwähnten IPT-Farbraum, welcher mit dem Ziel entwickelt wurde, Farbtöne nach dem HVS zu modellieren. Daher sind die JNDs gleichmäßiger verteilt als im  $NCL Y'C'_B C'_R$  Videopegelraum.

Um die Videopegelräume auf ihre Gleichmäßigkeit zu überprüfen, verwendet Dolby die 1942 entworfenen MacAdam-Ellipsen. MacAdams Experiment war eines der ersten, dass die JNDs verschiedener Farbtöne anhand eines menschlichen Betrachters ermittelte. Insgesamt wurden 25 verschiedene Referenzfarben in einem color matching Experiment bei einer Leuchtdichte von ca. 48 cd/m<sup>2</sup> auf ihre JNDs untersucht (vgl. Costa et al., 2020, S. 161). Ein Farbraum wird in Bezug auf die Farbtonverteilung als ideal gleichmäßig angesehen, wenn die MacAdam-Ellipsen gleich groß und kreisförmig sind, die Ellipsen beinhalten dabei alle Farbwerte, die als eine (Referenz-)Farbe wahrgenommen werden. Für den Vergleich zwischen IC<sub>T</sub>C<sub>P</sub> und NCL Y'C'<sub>B</sub>C'<sub>R</sub> werden MacAdam-Ellipsen im jeweiligen Videopegelraum aufgestellt und auf ihre durchschnittliche und maximale Abweichung vom Rest der Ellipsen analysiert. Die eindeutigsten Verbesserungen IC<sub>T</sub>C<sub>P</sub>s gegenüber Y'C'<sub>B</sub>C'<sub>R</sub> liegen im Cyan und Magenta-Bereich, wobei alle MacAdam-Ellipsen im neuen Videopegelraum sichtbar einheitlicher sind. Die Standardabweichung von 0,39 der Ellipsen in IC<sub>T</sub>C<sub>P</sub> ist eine klare Verbesserung gegenüber den 1,74 in NCL Y'C'<sub>B</sub>C'<sub>R</sub> (vgl. Dolby, 2016, S. 10).

Aufgrund der bereits erwähnten mangelnden Leuchtdichte und der begrenzten Anzahl an Testfarben sind die MacAdam-Ellipsen nicht optimal, um die JNDs in einem HDR und WCG fähigen System zu modellieren. Zur Verifikation der Gleichmäßigkeit der JNDs in IC<sub>T</sub>C<sub>P</sub> kann ein weiterer moderner Datensatz hinzugezogen werden. Forschende an der University of Waterloo entwickelten ein innovatives und effizienteres Testverfahren, um einen neuen JND-Datensatz für HDR und WCG zu erstellen. Dieser umfasst 245 einzigartige Referenzfarben, aufgeteilt auf sieben Leuchtdichten von 0,01 bis 500 cd/m<sup>2</sup>, somit eignet er sich besser für die Analyse der wahrgenommenen Gleichmäßigkeit der Farben in einem HDR und WCG System (vgl. Costa et al., 2020, S. 161). Für den Vergleich zwischen IC<sub>T</sub>C<sub>P</sub>, NCL Y'C'<sub>B</sub>C'<sub>R</sub> und 5 weiteren Farbräumen wurde ein Variationskoeffizient (CV) aus der Standardabweichung und dem Durchschnitt der JNDs für jede der sieben Leuchtdichten gebildet. Von allen getesteten Farb- und Videopegelräumen weist IC<sub>T</sub>C<sub>P</sub>, gemessen an den CVs, die gleichmäßigsten JNDs auf. Trotz des guten Ergebnisses im Verhältnis zu NCL Y'C'<sub>B</sub>C'<sub>R</sub> bedeuten die Testergebnisse nicht, dass Farben in IC<sub>T</sub>C<sub>P</sub> wahrnehmungsgetreu optimal gleichmäßig verteilt sind (vgl. Costa et al., 2020, S. 164). Die Abweichung der einzelnen JND-Ellipsen vom Durchschnitt der restlichen Ellipsen ist nach wie vor ausbaufähig. Zusätzlich werden auch mit diesem Datensatz nur Ellipsen auf unterschiedlichen Leuchtdichten-Ebenen auf ihre Einheitlichkeit untersucht, die möglichen 1500 Testfarben, die mit einer Referenzfarbe verglichen werden, haben alle dieselbe Leuchtdichte. Daher produziert der Datensatz keine Ellipsoide in einem Farbvolumen, sondern nur Ellipsen auf den jeweiligen Helligkeitsstufen. Ein optimaler Farbraum mit einem optimalen JND-Datensatz würde gleichmäßige Kugeln im gesamten Farbvolumen erzeugen, erst dann wäre die Verteilung der Farben im Farbraum tatsächlich gleichmäßig.

Sowohl das von Dolby durchgeführte Experiment als auch die unabhängige Studie belegen, dass IC<sub>T</sub>C<sub>P</sub> im Gegensatz zu NCL Y'C'<sub>B</sub>C'<sub>R</sub> eine höhere Gleichmäßigkeit der JNDs der Farben aufweist. Damit kann der neue Videopegelraum als effizienter angesehen werden, da er mit

weniger Bits oder einfacheren Operationen quantisiert werden kann, ohne dass ungewollte Wahrnehmungssprünge in bestimmten Farbbereichen auftreten.

## 6.4 Effizienz der Basisbandquantisierung

Ein Videopegelraum sollte eine effiziente Basisbandquantisierung besitzen, damit bei Quantisierungen mit geringeren Bit-Tiefen keine störenden Artefakte auftreten. Das Signal sollte mit so wenig Quantisierungsstufen wie möglich ein visuell verlustfreies Ergebnis erzielen, damit der Videopegelraum auch bei einer bandbreitenbegrenzten Übertragung ein möglichst originalgetreues Bild produzieren kann. Die Effizienz der Basisbandquantisierung eines jeweiligen Videopegelraums ist direkt an die JNDs der Helligkeits- und Farbunterschiede gebunden, gleichmäßigere JNDs führen zu einer besseren Effizienz.

Eine mögliche Metrik, um die Basisbandquantisierungseffizienz eines Videopegelraums zu messen, ist eine Farbdifferenzmetrik  $\Delta E$ . Dolby Laboratories verwendet die  $\Delta E_{2000}$  Farbdifferenz für den Test zwischen  $IC_T C_P$  und  $NCL Y' C'_B C'_R$ , wobei diese nicht für HDR und WCG Inhalte konzipiert wurde und daher nicht als einzige Verifikation für die Effizienz der Videopegelräume verwendet werden sollte. Die Verwendung von  $\Delta E_{2000}$  ist trotzdem sinnvoll, da sich die Metrik für Bereiche von  $1 \text{ cd/m}^2$  bis  $100 \text{ cd/m}^2$  eignet, um ein Signal auf Quantisierungsfehler in Form von Farbdifferenzen zu überprüfen und die durchschnittliche Leuchtdichte eines HDR-Signals nicht viel höher als die eines SDR-Signals sein sollte (vgl. ITU, 2021, S. 3-4). Alle Farbdifferenzen  $\Delta E_{2000}$ , die kleiner als eins sind, können visuell nicht wahrgenommen werden, daher sollte diese Grenze als Ziel der Basisbandquantisierungseffizienz gesehen werden. Ein weiterer von Dolby verwendeter Grenzwert ist die maximal zulässige Toleranz des Weißpunkts für Kinosäle der DCI, welche bei einem  $\Delta E_{2000}$  von drei liegt. Alle Farbdifferenzen zwischen diesen beiden Grenzwerten sind zwar sichtbar, sollten jedoch nicht als sehr störend auffallen (vgl. Dolby, 2016, S. 11-12). Zur Analyse der Videopegelräume wurde wieder ein Rec.2020 Farbwürfel über verschiedene Leuchtdichten verwendet, welcher in die jeweiligen Räume transformiert und auf 10 und 12 Bit quantisiert wurde. In  $IC_T C_P$  liegt jede Leuchtdichte mit einer Quantisierung von 10 Bit unter der Qualitätsgrenze der DCI und mit 12 Bit unter der visuellen Grenze.  $NCL Y' C'_B C'_R$  hingegen liegt bei einer Quantisierung von 10 Bit mit jeder Leuchtdichte über der Qualitätsgrenze der DCI, erst eine Quantisierung mit 12 Bit verschiebt sie teilweise unter die visuelle Grenze. Somit kann ein mit 10 Bit quantisiertes und in  $IC_T C_P$  codiertes Videosignal ausreichende Qualität für die meisten Anwendungen aufweisen, eine Codierung mit  $NCL Y' C'_B C'_R$  führt auf diesem Quantisierungslevel hingegen zu sichtbaren und störenden Quantisierungsfehlern.

Eine weitere Möglichkeit, die Effizienz der Basisbandquantisierung eines Videopegelraums zu überprüfen, ist die Analyse der JND-Ellipsoide. Werden für die Quantisierung kleinere

Schritte als die Hälfte der kleinsten Achse innerhalb des kleinsten JND-Ellipsoiden verwendet, können keine visuellen Quantisierungsfehler auftreten, da keine JND mit einem Quantisierungsschritt übergangen werden kann (vgl. Fröhlich, 2017, S. 105-106). Ein Videopegelraum mit gleichmäßigeren JNDs benötigt demnach weniger Codeworte, um den gesamten Raum zu quantisieren, ohne dass es zu sichtbaren Quantisierungsfehlern kommt. Da  $IC_{TC_P}$  wie bereits in 6.3 erwähnt gleichmäßigere JNDs als  $NCL Y'C'_B C'_R$  aufweist, kann davon ausgegangen werden, dass auch eine Analyse der JND-Ellipsoide die verbesserte Effizienz des neuen Videopegelraums belegt. In einer Analyse mehrerer HDR Videopegelräume, in der  $NCL Y'C'_B C'_R$  nicht enthalten war, schnitt  $IC_{TC_P}$  am besten ab, da es insgesamt mit den wenigsten Codewörtern codiert werden könnte, ohne visuelle Fehler zu produzieren (vgl. Fröhlich, 2017, S. 107).

Die überlegene Effizienz der Basisbandquantisierung in  $IC_{TC_P}$  lässt sich mit beiden Tests verifizieren, dabei ist sie das logische Ergebnis der gleichmäßigeren JNDs des neuen Videopegelraums gegenüber  $NCL Y'C'_B C'_R$ . Dementsprechend lässt sich durch die Verwendung von  $IC_{TC_P}$  auch mit weniger Quantisierungsstufen ein visuell besseres Bild übertragen und somit Bandbreite einsparen, ohne auf Qualität zu verzichten.

## 6.5 Bewertung

Die untersuchten Studien belegen die Vorteile des neuen Videopegelraums für Anwendungen mit HDR und WCG Inhalten. Durch die dekorrelierten Helligkeits- und Farbinformationen werden erfolgreich NCL-Fehler verhindert, welche bei Farbunterabtastung des Komponentensignals zu störenden Artefakten und dementsprechend zu einer geringeren wahrgenommenen Bildqualität führen. Aufgrund der gleichmäßigeren Verteilung der JNDs im Gamut von  $IC_{TC_P}$  lässt sich das Signal bei gleicher wahrgenommener Qualität mit weniger Quantisierungsstufen übertragen. Zusätzlich ermöglicht die erhöhte Farbtonlinearität Ansätze für Gamut-Mapping-Operationen, ohne dass das Signal hierzu in einen anderen Farbraum transformiert werden muss. Somit lässt sich Zeit/Rechenleistung bei der Verarbeitung des Signals einsparen. Trotz der Vorteile wird ein Wechsel zu  $IC_{TC_P}$  nicht in jeder Situation oder für jeden Inhalt eine Steigerung der Qualität mit sich bringen. Je nach Bildinhalt und den zur Verfügung stehenden Ressourcen kann  $NCL Y'C'_B C'_R$  die gleichen Ergebnisse in wahrgenommener Qualität liefern. Eine Studie, die sich primär mit dem adaptiven Reshaper beschäftigt hat, fand keine klare Präferenz der Zuschauenden für einen der beiden Videopegelräume, demnach wird  $IC_{TC_P}$  für geringere Bitraten und  $NCL Y'C'_B C'_R$  für höhere Bitraten bevorzugt (vgl. Perrin et al., 2018, S. 45). Die Verwendung des neuen Videopegelraums  $IC_{TC_P}$  über dem bereits etablierten  $NCL Y'C'_B C'_R$  lohnt sich nur, wenn HDR und WCG Inhalte mit anspruchsvollen Bildinhalten mit möglichst geringen Rechenkosten versendet und verarbeitet werden sollen.

# 7 Erstellung der Testgrafiken

Die Visualisierung der in Kapitel 6 erarbeiteten theoretischen Vorteile von  $IC_{7C_P}$  gegenüber  $NCL Y'C'_B C'_R$  bei der Verarbeitung von HDR und WCG Videomaterial dient dazu, die Ergebnisse verständlich und anschaulich zu präsentieren. Im folgenden Kapitel werden zu diesem Zweck konzipierte Funktionen aus dem Skript *BA\_MWalliser\_ICtCp\_Functions* erläutert und in einem Skript verwendet, um Daten für die Erstellung eines Testbilds zu erhalten. Das Testbild soll die Unterschiede der beiden Videopegelräume praktisch darstellen und zur visuellen Verifizierung der Vorzüge von  $IC_{7C_P}$  genutzt werden können. Zusätzlich werden die Funktionen in einem Jupyter Notebook verwendet, um schrittweise die verschiedenen Transformationen und Verarbeitungsschritte zu erklären und mit zusätzlichen Funktionen zu visualisieren. Das Notebook soll verwendet werden, um die Funktionen des Skripts schnell und anschaulich zu erklären, sodass Nutzer\*innen das Skript verwenden können, um ihre eigenen Analysen und Visualisierungen zu entwerfen.

## 7.1 Verwendete Software

Im Folgenden werden die verwendete Software und Softwarebibliotheken genannt und oberflächlich beschrieben, die im Rahmen der Arbeit verwendet wurden. Die Auswahl der verwendeten Bibliotheken basiert auf ihrer Relevanz, Verbreitung und Akzeptanz in der wissenschaftlichen Gemeinde.

### 7.1.1 Colour-Science

Das Colour-Science Projekt beinhaltet mit dem Colour Modul eine der umfassendsten Python-Bibliotheken zur Analyse und Verarbeitung von Farben (vgl. Mansencal, 2023). Colour-Science ist ein Open-Source-Projekt, das von einer Vielzahl an Unternehmen wie Google, Netflix, Epic Games und Forschenden verwendet wird, um im Feld der Farbwissenschaft Nachforschungen anzustellen und Bildverarbeitungspipelines zu entwerfen. Die Bibliothek unterstützt eine Vielzahl an Farbräumen und Konvertierungsmöglichkeiten sowie verschiedene Farbdifferenzmetriken, die in dieser Arbeit verwendet werden, um die beiden Videopegelräume  $NCL Y'C'_B C'_R$  und  $IC_{7C_P}$  zu analysieren. Mit dem Colour-Visuals Modul bietet Colour-Science

zusätzliche Visualisierungsmöglichkeiten, um Ergebnisse anschaulich darzustellen. Colour wurde in der Version 0.4.4 und Colour-Visuals in der Version 0.1.0 verwendet. Das Projekt steht unter der 3-Klausel-BSD-Lizenz zur Verfügung.

### 7.1.2 Pygfx

Pygfx ist eine auf WebGPU basierende Rendering-Engine, die von Colour-Visuals für 3D-Visualisierungen verwendet wird (vgl. Klein & van Golen, 2024). Pygfx ermöglicht die Erstellung von interaktiven 3D-Szenen mit einer intuitiven Kamerasteuerung, die in dieser Arbeit zur Betrachtung von Farbvolumen und großen Datenmengen in Form von Farben verwendet wird. Die zugrunde liegende GPU-API `wgpu-py` ist eine Abwandlung der WebGPU-API für Python. Die GPU-API ermöglicht hardwarebeschleunigte komplexe Rendering-Aufgaben mit einer GPU und spart somit Rechenleistung der CPU ein. WebGPU ist die Weiterentwicklung der häufig verwendeten WebGL-API, die für hardwarebeschleunigte 3D-Renderings in Webbrowsern verwendet wird. Die Pygfx Bibliothek wurde in der Version 0.2.0 verwendet, die dazugehörige `wgpu-py` API wurde in der Version 0.15.3 verwendet. Das Projekt steht unter der 2-Klausel-BSD-Lizenz zur Verfügung.

### 7.1.3 NumPy

NumPy ist der wissenschaftliche Standard zur Verarbeitung von N-dimensionalen Arrays in Python (vgl. Harris et al., 2020). Die NumPy Bibliothek verfügt über umfangreiche Funktionen zur Array-Manipulation von mehrdimensionalen Arrays sowie eingebaute mathematische Funktionen zur Datenverarbeitung und Analyse. NumPy ist ein Open-Source-Projekt, das von einer großen Community betreut, gewartet und verbessert wird. Durch die zugrunde liegende optimierte Programmierung in C und C++ verfügen NumPy-Arrays über eine höhere Leistung als Python's native Listen und ermöglichen effizientere numerische Berechnungen von großen Datenmengen. NumPy wird vom Colour-Science Projekt verwendet. Im Zuge dieser Arbeit sind leistungsoptimierte Matrixtransformationen von 3D-Arrays entscheidend, um große Bild-Arrays zwischen verschiedenen Farbräumen zu transformieren und auf verschiedene Kriterien zu analysieren. Durch die Implementierung von NumPy erhält Python eine ähnliche Funktionalität wie die häufig verwendete Matlab Software. NumPy wurde in der Version 1.26.4 verwendet und steht unter der 3-Klausel-BSD-Lizenz zur Verfügung.

### 7.1.4 Matplotlib

Matplotlib ist die Standardbibliothek für verschiedenste Visualisierungen von Daten und zur Erstellung von wissenschaftlichen Grafiken in Python (vgl. Hunter, 2007). Matplotlib

ermöglicht die Erstellung einer Vielzahl verschiedener Diagrammtypen, die sich individuell anpassen und beschriften lassen. Mit der Open-Source-Bibliothek erhält Python viele Funktionen der Matlab Software und bietet somit im Zusammenspiel mit NumPy eine kostenfreie Alternative, die sich leicht in Matlab-Code übersetzen lässt. Matplotlib wird im Colour Modul verwendet, um verschiedene Farbinformationen, Datensätze und Diagramme anschaulich zu visualisieren. Matplotlib wurde in der Version 3.8.3 verwendet und steht unter der PSF-Lizenz zur Verfügung.

### 7.1.5 IDE und Python

Für die Entwicklung wurde die Programmiersprache Python in der Version 3.9.5 verwendet. Als Entwicklungsumgebung wurde die PyCharm IDE in der Version 2023.3.3 mit einer professionellen Studentenlizenz verwendet. Auf dem Entwicklungsrechner läuft Windows 10 Home in der Version 22H2.

## 7.2 Code

Im folgenden Abschnitt wird der geschriebene Code anhand seiner Funktionen schematisch erklärt. Dabei werden einzelne entscheidende Funktionen vertieft und andere Hilfsfunktionen nur namentlich erwähnt. Die meisten Funktionen zur Bildverarbeitung erwarten ein dreidimensionales NumPy-Array der Form  $(y, x, 3)$  befüllt mit dem Datentyp float. Dabei bestimmen  $x$  und  $y$  die Anzahl der Zeilen und Spalten des Bildes, die  $3$  steht für jeweils einen Kanal eines RGB, NCL  $Y'C'_B C'_R$  oder  $IC_T C_P$  Signals. Die RGB-Werte sowie die  $Y'$ - und  $I$ -Komponente sollten innerhalb eines Wertebereichs von  $[0, 1]$  liegen, die Farbkanäle  $C'_B C'_R$  und  $C_T C_P$  in dem Bereich  $[-0,5, 0,5]$ . Fortlaufend wird, falls nicht explizit etwas anderes erwähnt wird, auf diese Form der Arrays mit RGB-Array, NCL  $Y'C'_B C'_R$ -Array und  $IC_T C_P$ -Array hingewiesen. Der gesamte Code ist auf Rec.20220 Farben und Full Range Computer Data ausgelegt, dementsprechend liegen die Pegelstufen bei 10-Bit zwischen 0 und 1023. Der Code wurde auf Englisch geschrieben und kommentiert.

### 7.2.1 Erstellung von Datensätzen

Für eine ausführliche Analyse der Videopegelräume wurde ein Datensatz mit allen möglichen RGB-Farben einer gegebenen Farbtiefe mit der *create\_every\_color* Funktion erstellt und als Array abgespeichert. Um Speicherplatz zu schonen, wird das Array nicht im Typ float, sondern als Typ uint8 für Farbtiefen von 8-Bit oder niedriger und als uint16 für Farbtiefen von über 8-Bit abgespeichert. Dementsprechend muss das Array nach dem Laden mit einem Koeffizienten

$(2^{bit} - 1)$  dividiert werden, um es in ein kompatibles RGB-Array zu wandeln. Die Funktion wurde verwendet, um ein Array in der Farbtiefe 8-Bit (4096, 4096, 3) und eine Liste von 16 (8192, 8192, 3) Arrays in einer Farbtiefe von 10-Bit zu erstellen. Um die Wechselwirkung der Helligkeitskanäle  $Y'$  und  $I$  auf die Farbkanäle  $C'_B C'_R$  und  $C_T C_P$  zu untersuchen, wird die *create\_Y\_dif\_from\_every\_color* Funktion verwendet, die jede mögliche Farbe bei gegebener Farbtiefe wie in Abbildung 7.1 platziert, sodass bei einer 4:2:0 Farbrunterabtastung jede Farbe von jeder Farbe unterabgetastet wird. Aufgrund der extremen Datenmengen sollte diese Funktion nicht mit Farbtiefen über 4-Bit ausgeführt werden (8-Bit führt zu ca.  $1,8 * 10^{14}$  Daten-Triplen).

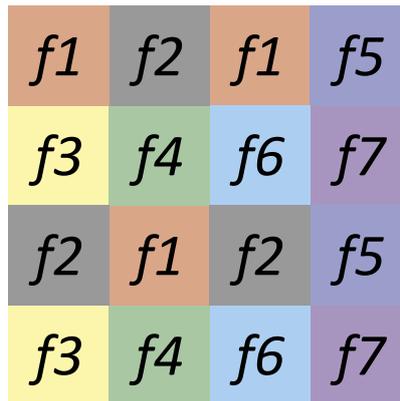


Abbildung 7.1: Schematisches Raster der *create\_Y\_dif\_from\_every\_color* Funktion

## 7.2.2 Farbraum Konversionen

Zur Konversion zwischen den verschiedenen Farbräumen werden eine Reihe an Funktionen verwendet, die alle demselben Schema folgen. Damit ein sinnvoller Vergleich zwischen NCL  $Y' C'_B C'_R$  und  $IC_T C_P$  gezogen werden kann, muss das RGB-Signal mit der inversen PQ EOTF codiert werden. Die inverse PQ EOTF ist eine absolute Transferfunktion für den Wertebereich  $[0, 10\ 000]$ , daher müssen die RGB-Arrays mit einem Faktor  $l_p$  multipliziert werden, der den Wertebereich von  $[0, 1]$  auf eine gewünschte Maximalhelligkeit im Bereich  $[0, l_p]$  überträgt und somit linearem Rec.2020 Display RGB entspricht (vgl. ITU, 2018, S. 5). Auch  $IC_T C_P$  verwendet lineares Display RGB als Input, da, wie in 5.1 beschrieben, die inverse PQ EOTF verwendet wird, um die Helligkeitsstufen wahrnehmungsentsprechend zu verteilen. Falls nicht explizit eine höhere oder niedrigere Maximalhelligkeit erwähnt wird, ist für die Tests von  $100\text{ cd/m}^2$  auszugehen. Zur Transformation werden die Funktionen des Colour Moduls verwendet, welche die in den Kapiteln 2, 3 und 5 enthaltenen Transformationsmatrizen und Verarbeitungsschritte beinhalten. Nach der Wandelung werden die Werte der Arrays mit einer gewählten Bit-Präzision quantisiert, die entsprechenden Funktionen werden später

erläutert. Die fünf Funktionen sind nach dem Schema *EingangsFormat\_to\_Ausgangsformat* benannt. Zusätzlich werden mit den *RGB\_via\_Format* Transformationen von RGB-Array zu RGB-Array über einen entsprechenden Videopegel- oder Farbraum durchgeführt, ohne das Signal zwischen den Transformationen zu quantisieren.

### 7.2.3 Hilfsfunktionen

Die *subsampling* Funktion kann ein NCL  $Y'C'_R$  oder ein  $IC_{TC_P}$ -Array nach den Schemata 4:2:2 oder 4:2:0 Farbrunterabtasten. Der Referenzpixel bei 4:2:0 ist dabei der obere linke Pixel eines zwei mal zwei großen Pixelblocks. Die Unterabtastung wird mit NumPys Arrayindexing-Funktionen realisiert.

Zur Quantisierung der verschiedenen Arrays auf eine gewählte Bit-Präzision werden zwei Funktionen verwendet. Die *quantization* Funktion quantisiert ein RGB-Array mit einer gegebenen Bit-Tiefe. Die drei Kanäle werden mit einem der Bit-Präzision entsprechenden Koeffizienten ( $2^{bit} - 1$ ) multipliziert, auf ganze Zahlen gerundet und anschließend mit demselben Koeffizienten dividiert. Damit keine Werte außerhalb der vorgesehenen Wertebereiche zurückgegeben werden, wird das Signal auf  $[0, 1]$  geklammert. Die Funktionen *dif\_quantization* führen dieselben Schritte für die beiden Helligkeitssignale durch. Die Farbsignale  $C'_B C'_R$  und  $C_{TC_P}$  werden ihrem verschobenen Wertebereich entsprechend mit einem anderen Koeffizienten ( $2^{bit}/2$ ) multipliziert und nach dem runden dividiert. Aufgrund ihrer Effizienz wurde für die Rundung die `numpy.round()` Funktion verwendet, welche nicht kaufmännisch, sondern symmetrisch rundet und bei zu großen floats leichte Rundungsfehler produzieren kann (vgl. „`numpy.round`“, 2024).

Mit der *deltaE* Funktion lässt sich ein zweidimensionales Array erstellen, welches die Farbunterschiede zwischen zwei RGB-Arrays beinhaltet. Die RGB-Arrays werden hierzu über den XYZ-Farbraum in den Lab-Farbraum transformiert, um das  $\Delta E_{2000}$  zwischen ihnen zu berechnen. Die *dif\_image* Funktion erstellt ein RGB-Array, welches alle Farben beinhaltet, die über einem gewählten Farbdifferenzwert liegen. Mit einem Farb- oder Helligkeitsdifferenz-Array mit derselben Anzahl an Einträgen wie Triplen im gegebenen RGB-Array werden alle RGB-Triple extrahiert, die den gewählten Schwellwert überschreiten. Anschließend wird ein der Anzahl entsprechendes quadratisches RGB-Array mit den RGB-Werten befüllt und übergeben.

Die *sat\_lum\_adjustment* Funktion wird verwendet, um die Helligkeitskanäle I und  $Y'$  sowie die Farbkanäle  $C'_B C'_R$  und  $C_{TC_P}$  anzupassen, um die Sättigung und Helligkeit eines in  $IC_{TC_P}$  oder  $Y'C'_B C'_R$  codierten RGB-Bildes zu verändern. Hierzu werden die Helligkeitskanäle I und  $Y'$  mit einem Luma-Koeffizienten multipliziert und auf ihren nativen Wertebereich  $[0, 1]$  geklammert, die Farbkanäle werden mit einem separaten Chroma-Koeffizienten multipliziert und entsprechend auf den Wertebereich  $[-0,5, 0,5]$  geklammert. Mit der *sat\_lum\_min\_max*

Funktion können die Helligkeit und Sättigung auf ihre Extrema gesetzt werden. Liegt der Luma-Koeffizient über 1, werden die Helligkeitskanäle I und Y' auf 1 gesetzt. Liegt er unter 1, werden sie auf 0 gesetzt. Dasselbe gilt für den Chroma-Koeffizienten und die Farbkanäle, wobei diese entsprechend auf 0 oder auf 0,5 beziehungsweise -0,5 gesetzt werden.

## 7.2.4 Auswertung und Visualisierung

Die *color\_diff* Funktion vergleicht drei RGB-Arrays auf ihre Farbunterschiede und schreibt die Ergebnisse in die Konsole. Zusätzlich können die Farben der Extrema als Farbfelder geplottet werden. Das erste Array sollte das originale RGB-Array sein und wird als Referenz verwendet. Das zweite sollte ein RGB-Array sein, das eine  $IC_T C_P$  Pipeline durchlaufen hat, und das dritte ein RGB-Array, das eine  $Y'C'_B C'_R$  Pipeline durchlaufen hat. Zwischen jedem der drei RGB-Arrays wird  $\Delta E_{2000}$  gebildet. Die Summe der Farbdifferenzen, die über den Schwellwerten aus 6.4 liegen, sowie die Extrema mit ihren Koordinaten in dem Referenz-RGB-Array werden in der Konsole ausgegeben. Optional können die Farbfelder mit den Farben der Extrema zwischen der Referenz und dem RGB aus  $IC_T C_P$  sowie der Referenz und dem RGB aus  $Y'C'_B C'_R$  geplottet werden.

Mit der *crostalk\_img* Funktion können eine Reihe von Differenzbildern und 3D-Plots generiert werden. Der Funktion wird ein RGB-Array und zwei  $\Delta E_{2000}$  Arrays übergeben, die Differenzen sollten zwischen dem RGB-Array und jeweils einem aus  $IC_T C_P$  und  $Y'C'_B C'_R$  transcodierten RGB-Array gebildet worden sein. Mit der *dif\_image* Funktion werden dem Schwellwert für sichtbare Farbunterschiede und der DCI-Weißpunktteranz aus 6.4 entsprechend vier RGB-Arrays gebildet. Jedes Array ungleich null wird anschließend als normales Bild und als dreidimensionale Punktwolke geplottet, wobei nur ein 3D-Plot gleichzeitig aktiv sein kann. Daher wartet das Programm, bis der aktuelle Plot geschlossen wurde. Die Punktwolke wird im CIE xyY-Farbraum auf der CIE-Normfarbtafel dargestellt. Zusätzlich wird der Rec.2020-Farbraum in Farbe und der Rec.709-Farbraum in Grau als Gamut auf der Tafel und als Volumen in Form eines Gitters eingezeichnet, um die Verteilung der Farben klarer zu gestalten.

Die *extrema\_colorswatch* Funktion übernimmt die Aufgabe der *color\_diff* Funktion für Helligkeitsdifferenzen. Dabei kann entweder die Differenz zwischen dem Helligkeitskanal I beziehungsweise Y' und der mit PQ EOTF<sup>-1</sup> codierten Leuchtdichte Y des ursprünglichen RGB-Arrays übergeben werden, oder die Differenz zwischen den Leuchtdichten Y der mit  $IC_T C_P$  und  $Y'C'_B C'_R$  verarbeiteten RGB-Arrays und der Leuchtdichte Y des ursprünglichen RGB-Arrays, wobei auch diese Leuchtdichten mit der inversen PQ EOTF codiert wurden. Die Berechnung der verschiedenen Differenz-Arrays ist in den Vergleichen in Abbildung 7.2 zu sehen. Zusätzlich wird das ursprüngliche RGB-Array für die optionale Erstellung von Farbfeldern übergeben.

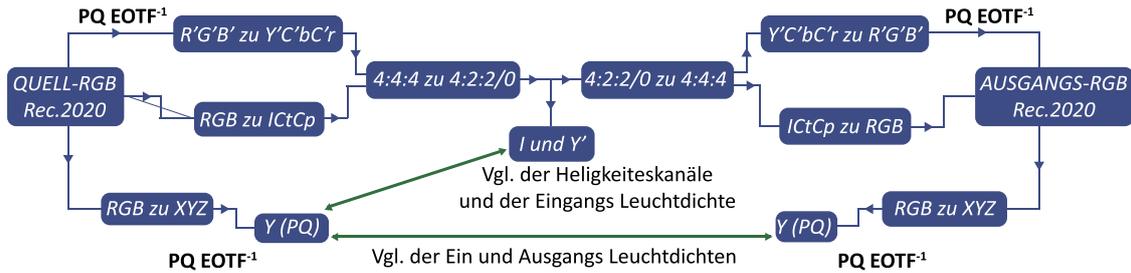


Abbildung 7.2: Schematischer Ablauf des Constant Luminance checks

Die *plot\_scatter\_lum* Funktion verwendet die in Abbildung 7.2 genannten Differenzen, um zwei Streudiagramme zu erstellen. Die x-Achsen zeigen dabei entweder die Werte I und Y' oder die Leuchtdichten Y codiert mit  $PQ\ EOTF^{-1}$  des Ausgangs-RGB-Arrays an. Die y-Achse zeigt immer die Quelleleuchtdichte codiert mit  $PQ\ EOTF^{-1}$  an. Mit dem Argument *steps=n* wird die Anzahl der geplotteten Punkte beschränkt, indem nur jeder nte Punkt dargestellt wird, dadurch lässt sich die Rechenzeit für größere Arrays verringern.

Mit der *volume\_separator* Funktion können alle Farben innerhalb des Rec.709 Farbraums aus einem RGB-Array gefiltert werden. Ein Rec.2020 RGB-Array wird hierfür in den XYZ-Farbraum transformiert und als Rec.709 wieder zurück in ein RGB-Array transformiert, alle Farben, die außerhalb des Rec.709 Farbraums liegen, überschreiten in dieser Form den [0, 1] Wertebereich. Die Farben innerhalb des Wertebereichs werden in ein Rec.2020 RGB-Array übertragen, alle Farben außerhalb werden in ein separates Rec.2020 RGB-Array übertragen. Dementsprechend gibt die Funktion für ein gegebenes RGB-Array zwei neue RGB-Arrays zurück. Dabei enthält das erste nur die Farben außerhalb des Rec.709 Farbraums und das zweite nur die Farben innerhalb des Rec.709 Farbraums.

Die *constant\_luminance\_check* Funktion ist eine multifunktionale Analysefunktion, die sich aus mehreren bereits beschriebenen Funktionen zusammensetzt. Sie dient dazu, die Konstanz der Leuchtdichten der Videopegelräume zu überprüfen, indem wie in Abbildung 7.2 beschrieben Differenzen gebildet werden. Die übergebenen Parameter entscheiden darüber, ob bei der Verarbeitung die Helligkeit und/oder Sättigung angepasst werden soll, welche Form der Farbunterabtastung durchgeführt wird, ob die Vergleiche zwischen I/Y' und Y oder zwischen Y/Y' und Y durchgeführt werden sollen sowie über die grafische Ausgabe eines Streudiagramms, Farbfeldern und den transcodierten RGB-Bildern. Standardmäßig wird das RGB-Array nur hin und zurück transformiert, wobei die Differenzen der Leuchtdichten verglichen werden, ohne dass eine Farbunterabtastung/Anpassung der Sättigung und Helligkeit durchgeführt wird. Es erfolgt keine grafische Ausgabe.

Mit der *hue\_linearity\_demo* Funktion lässt sich ähnlich wie mit der *constant\_luminance\_check* Funktion ein RGB-Array auf Farbunterschiede überprüfen. Die Videopegel-Arrays können

zusätzlich mit der *sat\_lum\_min\_max* Funktion auf ihre Extrema gesetzt werden. Anstelle eines Streudiagramms werden mit den Farbdifferenzen optional mehrere RGB-Bilder und die dazugehörigen dreidimensionalen Punktwolken mit der *crosstalk\_img* Funktion ausgegeben. Dabei kann die Farbdifferenz auch zu Schwarz gebildet werden, um bei minimaler Helligkeit der Signale I und Y' Farbfehler durch Crosstalk zu beobachten.

Die *wrong\_tag* Funktion simuliert, was bei einer Missinterpretation eines in  $IC_{TC_P}$  oder NCL  $Y'C'_B C'_R$  codierten Signals mit den Bildinhalten passiert. Das Signal wird dazu mit den Schritten des anderen Videopelraums in ein RGB-Array gewandelt und als Bild ausgegeben. Die *quick\_trafo* Funktion kann verwendet werden, um ein RGB-Array mit beiden Videopelräumen zu transcodieren und optional als 16 Bit RGB-Bild abzuspeichern. Dabei kann standardmäßig die Quantisierungstiefe, Maximalhelligkeit und Farbunterabtastung gewählt werden sowie eine Anpassung der Helligkeits- und Farbinformationen vorgenommen werden.

## 7.3 Test-Skript

Das Python-Skript *TestImage* beinhaltet eine Reihe an Tests, die verwendet werden, um die bereits theoretisch erarbeiteten Vorteile des Videopelraums zu verifizieren und mit konkreten Werten zu belegen. Die gesammelten Daten werden für die Erstellung eines Testbilds verwendet, welches die Unterschiede zwischen NCL  $Y'C'_B C'_R$  und  $IC_{TC_P}$  anschaulich demonstrieren soll.

Um die RGB-Werte zu finden, die durchschnittlich den größten NCL-Fehler bei einer Farbunterabtastung produzieren, wurde mit der *create\_Y\_dif\_from\_sub\_every\_color* Funktion für jede mit 4Bit mögliche Farbe eine Farbunterabtastung in  $IC_{TC_P}$  und NCL  $Y'C'_B C'_R$  mit jeder möglichen 4 Bit Farbe durchgeführt. Die resultierenden RGB-Arrays wurden auf ihre Leuchtdichtendifferenz zum originalen RGB-Array analysiert. Die Farbe, welche die größte Leuchtdichtendifferenz nach der Farbunterabtastung produziert, wurde zusammen mit der Referenzfarbe, welche zur Unterabtastung verwendet wurde, in ein neues RGB-Array geschrieben. Eine Häufigkeitsanalyse der Arrays zeigt das die Farben, die am häufigsten die größten Leuchtdichtendifferenzen zum Original RGB-Arrays aufweisen, voll gesättigte helle Primärfarben sind. Für NCL  $Y'C'_B C'_R$  ist für über 75% der möglichen 4 Bit Farben ein stark gesättigtes, helles Rot (in 8 Bit [255, 0, 0]) die Farbe, die am häufigsten den größten Leuchtdichtenfehler bei einer Farbunterabtastung verursacht. Circa 17% der NCL-Fehler werden von zwei voll gesättigten hellen Blautönen verursacht, wobei 6% von Schwarz hervorgerufen werden. Bei  $IC_{TC_P}$  sind mit 71% zwei helle, stark gesättigte Blautöne (in 8 Bit [0, 0, 238/255]) für die häufigsten und größten NCL-Fehler verantwortlich. Rottöne führen im neuen Videopelraum nicht zu vermehrten NCL-Fehlern, stattdessen ist mit 18% ein

warmes Weiß (in 8 Bit [255, 255, 238]) für mehr Fehler verantwortlich. Schwarz führt auch in  $IC_T C_P$  zu circa 6% der NCL-Fehlern.

Die Ergebnisse decken sich mit denen des Whitepapers, voll gesättigte (pure) helle Farben produzieren die größten NCL-Fehler bei einer Farbunterabtastung (vgl. Dolby, 2016, S. 8). Für die Erstellung des Testbilds können diese RGB-Werte verwendet werden, um zwei NCL-Testfelder zu gestalten. Wobei Schwarz als Grundfarbe verwendet wird, damit der Helligkeitseindruck nicht durch Farbwahrnehmung verändert wird. Jeweils zwei der Blautöne und der Rotton werden als Referenzpixel für eine 4:2:0 Farbunterabtastung in dem in Abbildung 7.3 zu sehenen Raster platziert. Das Testfeld sollte nach einer Farbunterabtastung in einem Farbraum oder Videopegelraum mit konstanter Leuchtdichte denselben Helligkeitseindruck hervorrufen. Als Referenz wird ein zweites Testfeld platziert, bei dem die Farben leicht entsättigt im selben Raster liegen. Durch die Entsättigung wird der Crosstalk zwischen der Helligkeitsinformation und den Farbinformationen minimiert. Je mehr Helligkeitsinformationen in den Chromakanälen enthalten sind, desto heller erscheint das Testpatch im Vergleich zu dem Referenztestpatch.

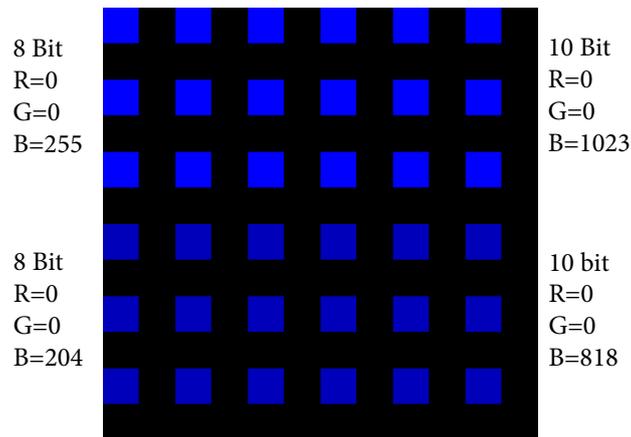


Abbildung 7.3: Schematisches Raster des NCL-Testfeld für Blautöne

Um die Ergebnisse über die gesamte PQ-Kurve zu verifizieren, wurden mit der *constant\_luminance\_check* Funktion alle in 8 Bit möglichen Farben mit Maximalhelligkeiten von 1-10 000  $cd/m^2$  in Zehnerpotenzschritten analysiert. Dabei wurden die Helligkeitskanäle I und  $Y'$  auf ihre Korrelation zur Leuchtdichte des originalen RGB-Arrays entsprechend Abbildung 7.2 überprüft. Je größer die Differenz zwischen den Helligkeitswerten der einzelnen Farben ist, desto stärker sind auftretende NCL-Fehler bei einer Farbunterabtastung oder anderweitigen Manipulation der Chroma-Kanäle. Die Analyse zeigt, dass die maximalen Differenzen wie erwartet bei  $IC_T C_P$  in voll gesättigten hellen Blautönen auftreten (in 8 Bit durchschnittlich [0, 0, 253]). Für NCL  $Y' C'_B C'_R$  gilt bis zu einer Maximalhelligkeit von 100  $cd/m^2$  dasselbe für ein voll gesättigtes helles Rot (in 8 Bit durchschnittlich [254, 0, 2]), für höhere Helligkeiten tritt

die maximale Differenz im voll gesättigten hellen Blau (in 8 Bit  $[0, 0, 255]$ ) auf. Mit zunehmender Maximalhelligkeit steigt die durchschnittliche Abweichung der Helligkeitskanäle I und Y' von der Leuchtdichte Y, wobei  $IC_{TC_P}$  mit einer durchschnittlichen Abweichung von  $3,21E+3$  deutlich unter der Durchschnittsabweichung  $14,1E+3$  von  $NCL Y'C'_B C'_R$  liegt. Diese Werte entsprechen der Erwartung, dass  $IC_{TC_P}$  eine nahezu konstante Leuchtdichte aufweist. Dementsprechend sollte das NCL-Testfeld bei einer Farbunterabtastung in  $IC_{TC_P}$  denselben Helligkeitseindruck hervorrufen wie das originale RGB-Bild.

Um Farben zu finden, die am stärksten unter einer geringeren Quantisierung im Basisband leiden, wurde ein RGB-Array mit allen in 8 Bit möglichen Farben mit 8, 10 und 12 Bit Präzision mit  $IC_{TC_P}$  und  $NCL Y'C'_B C'_R$  transcodiert. Der Farbunterschied  $\Delta E_{2000}$  zwischen den transcodierten und dem originalen RGB-Array gibt für jede Farbe an, ob durch die Quantisierung ein sichtbarer Farbunterschied entsteht, welcher sich zum Beispiel in Banding-Artefakten äußert. Die Ergebnisse für 10 Bit fallen mit einer maximalen Farbdifferenz von 1,26 für  $IC_{TC_P}$  und 2,93 für  $NCL Y'C'_B C'_R$  besser aus als erwartet. Die gegenüber dem Whitepaper verbesserte Effizienz von  $NCL Y'C'_B C'_R$  lässt sich vermutlich auf die Verwendung der inversen PQ EOTF anstelle einer normalen Gamma-Vorentzerrung zurückführen.  $IC_{TC_P}$  weist im Vergleich mit dem alten Videopegelraum dennoch für jede Bit-Tiefe erheblich geringere maximale Farbdifferenzen auf. Zusätzlich ist die Anzahl der Farben, die bei einer Quantisierung mit 10 Bit über der Sichtbarkeitsgrenze von  $\Delta E > 1$  liegt, mit 2025 deutlich geringer als die 608 692 Farben, die bei der Verwendung von  $NCL Y'C'_B C'_R$  einen sichtbaren Farbunterschied zum Original produzieren.

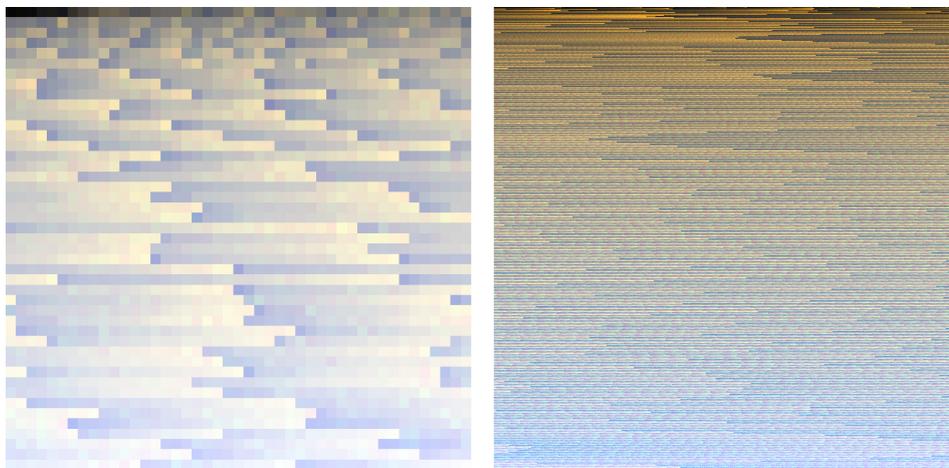


Abbildung 7.4: Sichtbare Farbdifferenzen bei einer 10 Bit Quantisierung, links  $IC_{TC_P}$ , rechts  $NCL Y'C'_B C'_R$  mit  $PQ EOTF^{-1}$

Da die Effizienz der Basisbandquantisierung direkt an die Gleichmäßigkeit der JNDs gebunden ist, sind die in Abbildung 7.4 zu sehenden, größtenteils gelblichen Töne für  $IC_{TC_P}$  und die Gelb-, Cyan- und Magenta-Töne für  $NCL Y'C'_B C'_R$  nicht überraschend. Beide Videopegelräume

weisen in diesen Farbtönen ungleichmäßige JNDs auf (vgl. Dolby, 2016, S. 10). Die Wahl des natürlichen Bildinhalts für die Erstellung des Testbilds fiel, auf ein bereits zur Verfügung stehendes Bild eines Sonnenuntergangs. Das Bild wurde an einem kalibrierten Monitor in Lightroom und Photoshop bearbeitet und im Rec.2020 Farbraum mit 16 Bit pro Kanal als PNG exportiert. Die zu sehenden Farbverläufe ausgehend von der Sonne führen bei einer Quantisierung mit 10 Bit in beiden Videopegelräumen zu Banding-Artefakten, wobei die Artefakte bei der Verwendung von  $IC_T C_P$  deutlich geringer ausfallen.

Bei einer Entsättigung der Farbkanäle  $C'_B$  und  $C'_R$  zeigt sich der NCL-Fehler in  $NCL Y'C'_B C'_R$  verstärkt in einigen der voll gesättigten Farben. Um den Zusammenhang zwischen der Farbzusammensetzung und dem NCL-Fehler sowie die Quantisierungseffizienz über die Farbtöne zu visualisieren, wurden zwei Farbgradienten dem Testbild hinzugefügt. Der untere Gradient enthält einen Farbverlauf von Schwarz über Blau, Cyan, Grün, Gelb, Rot, Magenta bis hin zu Weiß. Dabei sind alle Farben vollständig gesättigt und hell. Der zweite Farbgradient enthält von links nach rechts denselben Verlauf, jedoch nimmt von unten nach oben die Sättigung der Farben ab. Alternativ kann bei der Erstellung des Testbilds auch ein Gradient mit einem durchgehenden, entsättigten Farbverlauf gewählt werden. Bei einer Entsättigung dieser Gradienten im  $NCL Y'C'_B C'_R$  sind die Helligkeitsanteile in den einzelnen Farbanteilen Rot, Grün und Blau klar zu sehen. Wie in Abbildung 7.5 zu sehen ist, erscheinen Farben, die keinen Grünanteil haben, deutlich dunkler, wobei Mischungen aus Grün und Rot heller als Mischfarben aus Grün und Blau sind. Da die Effekte des Crosstalks zwischen der Helligkeitsinformation  $Y'$  und den Farbinformationen  $C'_B C'_R$  durch die Verwendung der inversen PQ EOTF verstärkt werden, eignet sich der  $NCL Y'C'_B C'_R$  Videopegelraum nicht für Sättigungsanpassungen und muss dementsprechend für Gamut-Mapping in einen anderen Farbraum transformiert werden. Dieselben Probleme treten in  $IC_T C_P$  nicht auf.

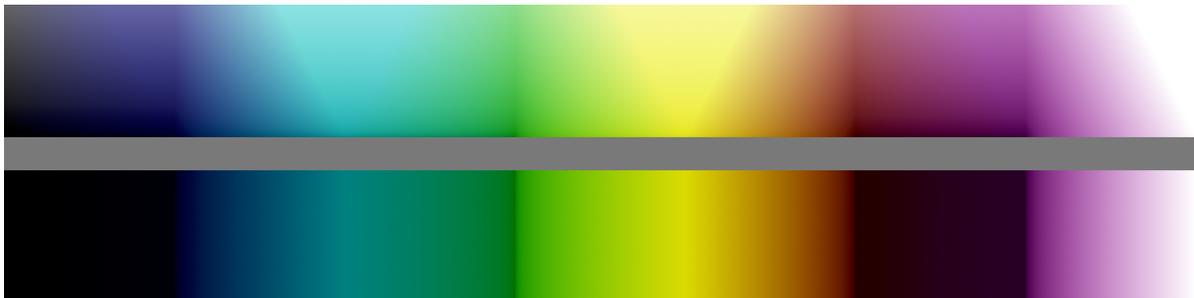


Abbildung 7.5: NCL-Fehler bei entsättigung in  $Y'C'_B C'_R$  mit  $PQ EOTF^{-1}$

Neben den Farbgradienten wurde ein Schwarz-Weiß-Gradient über alle in 10 Bit möglichen Graustufen sowie eine Grautreppe entsprechend ITU Empfehlung BT.2111 auf dem Testbild platziert (vgl. ITU, 2020, S. 9). Um die Auswirkungen der Transcodierung und Bildanpassungen mit den verschiedenen Videopegelräumen auf Hauttöne zu demonstrieren, wurde

die Monk Skin Tone Scale im Testbild verwendet (vgl. Schumann et al., 2023). Der Datensatz umfasst zehn Hauttöne, die über Kreise mit Helligkeitsvariation Kugeln der jeweiligen Hautfarbe darstellen. Dabei ist zu beachten, dass die verwendeten Bilder nur einen kleinen, zusammengefassten Teil der möglichen Hauttöne darstellen und dementsprechend nicht als repräsentativ für die breitere Bevölkerung gesehen werden dürfen. Der Datensatz ist unter der Creative Commons Lizenz 4.0 verfügbar.

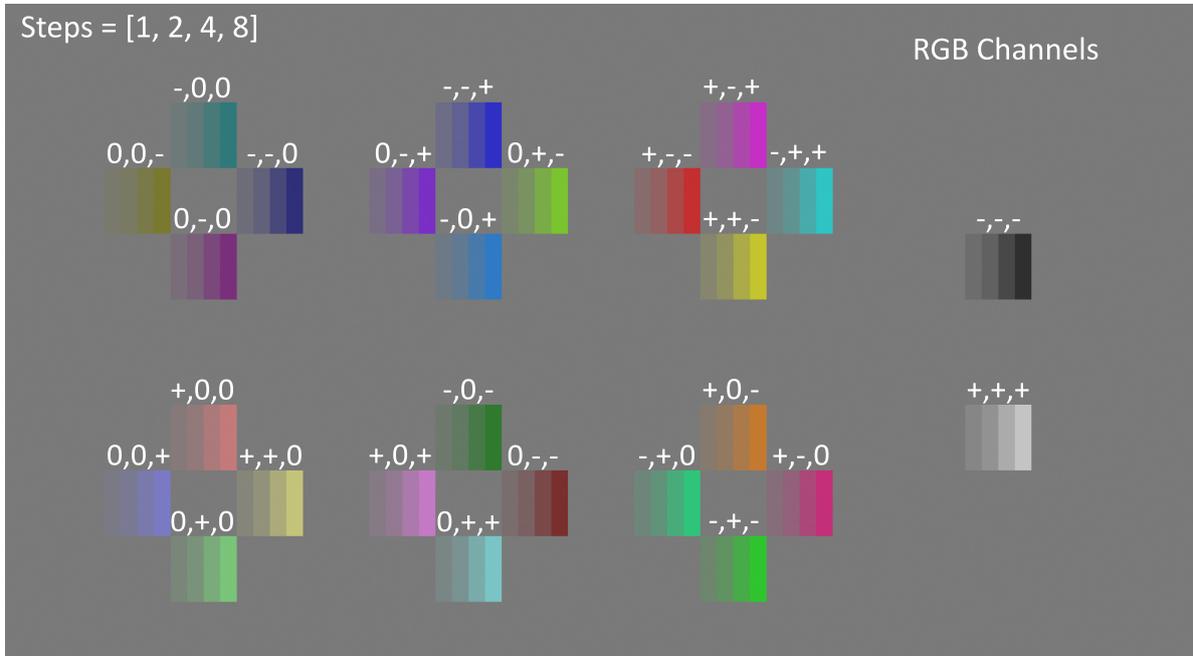


Abbildung 7.6: Schematische Darstellung des alternative JND Cross Patterns

Als letzte Ergänzung zum Testbild wurde ein abgewandeltes JND Cross Pattern erstellt (vgl. Miller et al., 2012). Das JND Cross Pattern besteht aus 26 Feldern auf einem neutralen Hintergrund, jedes Feld beinhaltet eine Farbe, die sich um plus/minus eine Quantisierungsstufe pro Farbkanal zur Grundfarbe unterscheiden. Für das Testbild wurde eine Version erstellt, bei der jedes Farbfeld in vier Abschnitte unterteilt wird. Der oberste Abschnitt bleibt bei plus/minus einer Quantisierungsstufe, für jeden weiteren Abschnitt wird die Anzahl der Quantisierungsstufen verdoppelt. In Abbildung 7.6 ist das stilisierte Testmuster zu sehen. Um die Schritte ersichtlicher zu machen, wurde die Sättigung der Felder erhöht. Ein Videopegelraum mit einer wahrnehmungsentsprechenden Verteilung der JNDs sollte bei unterschiedlichen Bit-Tiefen und Sättigungsanpassungen immer gleich hohe Blöcke produzieren. Das würde bedeuten, dass ein Quantisierungsschritt in jede Richtung einen äquivalenten Wahrnehmungsreiz erzeugen würde. Von den insgesamt 104 möglichen Abschnitten sind nach der 10 Bit Quantisierung in  $IC_{TC_P}$  56 und in  $NCL Y'C'_B C'_R$  31 übrig. Der Maximalwert der relativen Häufigkeit beträgt für  $IC_{TC_P}$  0,69, dementsprechend sind 69% der JND-Blöcke zwei Abschnitte hoch. Bei  $NCL Y'C'_B C'_R$  fällt die maximale relative Häufigkeit mit 0,42 deutlich geringer

aus, 42% der Blöcke sind nur ein Abschnitt hoch. Bei der Quantisierung mit 12 Bit steigen für beide Videopegelräume alle Werte.  $IC_{TC_P}$  kann 101 mögliche Abschnitte darstellen, wobei davon 88% der Blöcke alle vier Abschnitte aufweisen.  $NCL Y'C'_B C'_R$  hingegen kann 88 mögliche Abschnitte anzeigen, wobei nur 50% der Blöcke vier Abschnitte beinhalten.  $IC_{TC_P}$  weist für beide Bit-Tiefen eine höhere Gleichheit zwischen den einzelnen JND-Blöcken auf, was noch einmal die gleichmäßigeren JND-Ellipsen des neuen Videopegelraums bestätigt. Entsprechend eignet sich das entworfene abgewandelte JND Cross Pattern, um diesen Vorteil von  $IC_{TC_P}$  gegenüber  $NCL Y'C'_B C'_R$  zu visualisieren. Dabei ist zu erwähnen, dass für eine korrekte visuelle Beurteilung der JND-Blockgrößen eine möglichst dunkle Umgebung mit wenig Streulicht sowie ein 10 Bit fähiger, kalibrierter Monitor mit einem möglichst großen Displaygamut nahe Rec.2020 benötigt wird. Alternativ lässt sich die Gleichheit der Blöcke auch nach einer Erhöhung der Sättigung betrachten.

Das finale Testbild ist in Abbildung 7.7 zu sehen. Oben links befinden sich die NCL-Testfelder mit den beiden Blautönen, dem Rot und dem Weiß auf einem schwarzen Hintergrund. Darunter befindet sich die Monk Skin Tone Skala in 10 kreisförmigen Feldern. Im unteren Bildbereich liegen die zwei Farbverläufe sowie eine Grautreppe und ein Schwarz-Weißverlauf. Die Mitte des Testbilds wird vom natürlichen Bild eines Sonnenuntergangs mit Silhouetten im Vordergrund eingenommen. Am rechten Bildrand befindet sich das abgewandelte JND Cross Pattern.



Abbildung 7.7: Erstelltes Testbild für die Visualisierung der Vorteile von  $IC_{TC_P}$



Abbildung 7.8: Artefakte nach Farbunterabtastung und Farbvolumen-Clipping

Je nach Verarbeitung des Testbilds entstehen Artefakte, wie in Abbildung 7.8 zu sehen ist. Die stark gesättigten hellen Rot-, Magenta- und Blau-Pixel sind ein Farbunterabtastungs-Artefakt, das primär an Kanten mit hohen Helligkeitskontrasten entsteht. Die bei der Farbunterabtastung kopierte Farbinformation führt bei der Transformation von  $NCL Y' C'_{BC} R$  oder  $IC_T CP$  nach RGB zu negativen Werten, die nicht vom Display wiedergegeben werden können. Damit keine nicht darstellbaren Farben entstehen, wird das RGB-Signal mit der *quantization* Funktion auf den Wertebereich  $[0, 1]$  geklammert. Die Klammerung führt zu Artefakten, da die Farben außerhalb des Farbvolumens nicht über eine komplexere Funktion begrenzt werden, wie zum Beispiel dem "linear light processing", sondern jeder Wert außerhalb des Wertebereichs entweder auf sein Maximum oder Minimum gesetzt wird (vgl. Chan, 2008, S. 41). Bei einer Überarbeitung der Funktionen wäre eine Implementierung für den Umgang mit Farben außerhalb des Farbvolumens eine sinnvolle Ergänzung. Am Ende des *TestImage* Skripts wird die Verschiebung der RGB-Werte vor und nach der Farbunterabtastung in dreidimensionalen Punktwolken mit dem Rec.2020 Farbraum als Gitternetz dargestellt. Der auftretende Fehler ist besonders vor und nach der Verwendung der PQ EOTF, wie in Abbildung 7.9 zu sehen, sichtbar. Die nicht-linearen RGB-Farben erstrecken sich weit außerhalb des Spektralfarbenzugs, befinden sich aber größtenteils auf der richtigen Helligkeitsstufe. Erst mit der Linearisierung werden die RGB-Werte in den Rec.2020 Gamut gebracht, wobei sie außerhalb des entsprechenden Volumens liegen.

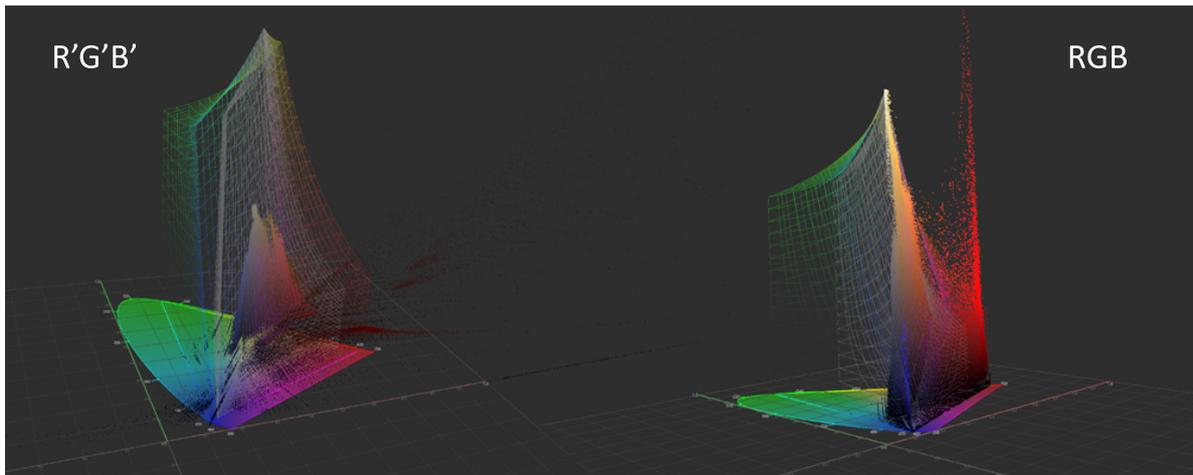


Abbildung 7.9: Farbvolumen nach Farbunterabtastung mit NCL  $Y'C'_B C'_R$ , links vor PQ EOTF, rechts linear

## 7.4 Jupyter Notebook

Um die verschiedenen Funktionen des *BA\_MWalliser\_ICtCp\_Functions* Skripts graduell zu erklären, wurde ein Jupyter Notebook erstellt. Jupyter Notebooks sind Dokumente, die sowohl Codeabschnitte als auch erläuternde Text- und Grafikabschnitte beinhalten können. Sie bieten weiterhin die Möglichkeit, Abschnitte des Codes Schritt für Schritt auszuführen, was für Nutzer\*innen den Vorteil bietet, dass Sie nicht alle Informationen in Form von Konsolenausgaben, Plots, Bildern und 3D-Modellen auf einmal präsentiert bekommen, sondern sie mit beigefügten Erklärungen schrittweise und interaktiv dargestellt bekommen. Das Notebook führt Betrachtende vom Import verschiedener Bildinhalte und Arrays über die Wandelung zwischen RGB,  $IC_T C_P$  und NCL  $Y'C'_B C'_R$  zu verschiedenen Erkenntnissen über die unterschiedlichen Auswirkungen der Verwendung beider Videopegelräume. Dabei werden schrittweise komplexere Funktionen eingeführt und Zwischenergebnisse mit verschiedenen Visualisierungsmethoden dargestellt. Mithilfe des Notebooks sollen die Unterschiede der Videopegelräume sowie die Verwendung der Funktionen einfach und anschaulich erklärt werden, sodass Nutzer\*innen in der Lage sind, anschließend eigene Bildverarbeitungs-Pipelines mit  $ICtCp$  und NCL  $Y'C'_B C'_R$  zu entwerfen und zu analysieren.

## 8 Diskussion

Der in BT.2100 eingeführte Videopegelraum  $IC_T C_P$  bietet gegenüber dem etablierten NCL  $Y'C'_B C'_R$  entschiedene Vorteile bei der Verarbeitung von HDR WCG Material diese lassen sich sowohl theoretisch belegen, als auch praktisch darstellen. Im Folgenden werden noch einmal die Ergebnisse der Analyse und Visualisierung zusammengefasst und bewertet.

### 8.1 Bewertung von $IC_T C_P$

Die zentralen Vorteile des neuen Videopegelraums sind auf die dekorrelierten Komponenten des Signals und auf die gleichmäßigere Verteilung der wahrnehmbaren Farbunterschiede zurückzuführen. Der erhöhte Dynamikumfang durch die Verwendung der PQ Kurve führt bei der Verwendung von NCL  $Y'C'_B C'_R$  zu sichtbaren NCL-Fehlern, welche sich sowohl mathematisch als auch visuell mit dem entworfenen Testbild nachweisen lassen. Die nahezu konstante Leuchtdichte von  $IC_T C_P$  verhindert NCL-Fehler, die ansonsten auftreten, sobald die Chroma-Signale angepasst werden. Sowohl bei der Farbrunterabtastung als auch bei einer Sättigungsanpassung kann es besonders in Blau- und Rottönen zu drastischen Helligkeitsunterschieden kommen, wenn ein Videopegel- oder Farbraum mit einer nicht konstanten Leuchtdichte verwendet wird. Der Effekt ist vor allem an Kanten mit starken Helligkeitskontrasten auffällig. Aufgrund der konstanten Leuchtdichte und der verbesserten Farbtonlinearität eignet sich  $IC_T C_P$  im Gegensatz zu NCL  $Y'C'_B C'_R$  für das meist notwendige Gamut-Mapping. Die einfache Entsättigung eines mit PQ codierten NCL  $Y'C'_B C'_R$  Signals führt zu starken Farbtonverschiebungen und Helligkeitsfehler in den Gamutrand nahen Farben. Auf dem Testbild können die Fehler bei einer Entsättigung in den Farbverläufen beobachtet werden, wobei der Fehler bei Erhöhung der Maximalhelligkeit entsprechend stärker auftritt. Durch ein Gamut-Mapping im Videopegelraum lassen sich somit bei der Verwendung von  $IC_T C_P$  mindestens eine Farbraumtransformation und damit Zeit/Rechenleistung einsparen. Im Vergleich mit anderen Farbräumen und CAMs die für Gamut-Mapping verwendet werden, schneidet der neue Videopegelraum im Punkt Farbtonlinearität sehr gut ab. Was nicht verwunderlich ist, da der IPT-Farbraum die besten Ergebnisse liefert (vgl. Safdar et al., 2017, S. 15147). Die verbesserte Gleichmäßigkeit der JNDs in  $IC_T C_P$  ermöglicht eine Quantisierung mit weniger Stufen als NCL  $Y'C'_B C'_R$ , ohne dass dabei sichtbare Farbfehler

auftreten. Die theoretische Abtastung mit 11,5 Bit in  $IC_{7C_P}$  verhindert sichtbare Farbfehler gänzlich, wobei die Ergebnisse für beide Videopegelräume bei einer Maximalhelligkeit von nur  $100 \text{ cd/m}^2$  besser ausfallen. Es reichen bereits 10 Bit, um beide unter den Schwellwert  $\Delta E_{2000} < 3$  zu bringen. Dabei sind die Quantisierungsfehler im Farbverlauf des Testbilds bei der Verwendung von  $IC_{7C_P}$  deutlich gleichmäßiger verteilt. Im natürlichen Bild fallen die Banding-Artefakte entsprechend deutlich geringer als bei der Verwendung von  $NCL Y' C' B' C' R$  aus. Die gleichmäßigeren JNDs der Farben in  $IC_{7C_P}$  lassen sich zusätzlich mit dem abgewandelten JND Cross Patterns auf dem Testbild in einer entsprechenden Betrachtungsumgebung visuell bestätigen.

## 8.2 Ausblick

Diese Arbeit hat sich größtenteils theoretisch und abstrakt mit den Vorteilen von  $IC_{7C_P}$  beschäftigt, daher wäre eine Implementierung in eine tatsächliche praktische Produktion mit Verwendung beider Videopegelräumen und Qualitätsbewertung durch Testpersonen interessant, um zu überprüfen ob und wenn ja, inwieweit die Vorteile tatsächlich zu einer wahrgenommene Qualitätssteigerung führen. Zusätzlich wäre eine Überprüfung der Videopegelräume mit der HLG-Kennlinie interessant, um  $IC_{7C_P}$  für Broadcast-Anwendungen zu testen. Die Vorteile sollten sich größtenteils übertragen, jedoch ist die genaue Bemessung mit spezifischen Daten entscheidend, um abzuwägen, ob und für welche Inhalte sich ein Umstieg auf den neuen Videopegelraum lohnen würde. Ein weiterer interessanter Aspekt ist der Einfluss von Metamerismus auf die visuelle Bewertung des Videopegelraums in Verwendung mit Laser-Projektoren, die den Rec.2020 Gamut füllen könnten. Da die Vorteile des Videopegelraums vor allem für Farben nahe der Gamutgrenze auffällig sind, könnten diese aufgrund von Metamerismus verringert werden. Bezüglich des geschriebenen Codes gibt es noch fehlende Funktionen wie ein realitätsnaher Umgang mit out-of-gamut Farben nach der Farbunterabtastung und eine Funktion zum taggen der generierten Bilder mit den korrekten Metadaten. Zusätzlich sollte der Code für bessere Leistung optimiert werden.

## 9 Fazit

Diese Arbeit hat sich mit der Frage beschäftigt, welche Vorteile  $IC_{7C_P}$  gegenüber NCL  $Y'C'_B C'_R$  bei der Verarbeitung von HDR WCG Videomaterial bietet und wie diese anschaulich visualisiert werden können. Dafür wurden bereits existierende Studien analysiert und in den Kontext des Whitepapers gestellt, zusätzlich wurde ein Testbild mithilfe verschiedener Funktionen in Python erstellt.

Sowohl die theoretische als auch die praktische Analyse bestätigen die Vorteile von  $IC_{7C_P}$  gegenüber NCL  $Y'C'_B C'_R$  bei der Verarbeitung von HDR und WCG Inhalten. Der neue Videopegelraum ist durch seine konstantere Leuchtdichte, verbesserte Farbtonlinearität und gleichmäßigere Verteilung der JNDs in der Lage, auch mit geringeren Quantisierungsstufen und Farbunterabtastung, Farben mit ihrer korrekten Helligkeit, Sättigung und Farbtönen wiederzugeben. Die Vorteile lassen sich mit den entworfenen Funktionen anhand des Testbilds demonstrieren und mit verschiedenen zusätzlichen Visualisierungen anschaulich darstellen. Da sich der neue Videopegelraum bereits von den meisten modernen Benutzer-Systemen verwenden lässt, bleibt abschließend festzuhalten, dass die Etablierung von  $IC_{7C_P}$  als neuer Standardvideopegelraum für HDR WCG Videoanwendungen lohnenswert wäre. Die Vorteile gegenüber dem bereits etablierten NCL  $Y'C'_B C'_R$  sind theoretisch klar belegt und lassen sich auch in der Praxis beobachten.

# Literatur

- Chan, G. (2008). Toward Better Chroma Subsampling. *SMPTE Motion Imaging Journal*, 117(4), 39–45. Verfügbar 31. Juli 2024 unter <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7269636>
- CIE. (2020a). 17-22-040: colour<perceptual>. Verfügbar 2. August 2024 unter <https://cie.co.at/eilvterm/17-22-040>
- CIE. (2020b). 17-23-001: colour<psychophysical>. Verfügbar 2. August 2024 unter <https://cie.co.at/eilvterm/17-23-001>
- Costa, T., Gaudet, V., Vrscay, E. R., & Wang, Z. (2020). Perceptual Colour Difference Uniformity in High Dynamic Range and Wide Colour Gamut. *IEEE International Conference on Image Processing*, 161–165. Verfügbar 3. August 2024 unter <https://ieeexplore.ieee.org/document/9191176>
- Dolby. (2016, April). *What is ICtCp - Introduction?* (Techn. Ber.). Dolby. [https://professional.dolby.com/siteassets/pdfs/ictcp\\_dolbywhitepaper\\_v071.pdf](https://professional.dolby.com/siteassets/pdfs/ictcp_dolbywhitepaper_v071.pdf)
- Ebner, F., & Fairchild, M. D. (1998). Development and Testing of a Color Space (IPT) with Improved Hue Uniformity. *6th IS&T/SID Color Imaging Conference 1998*, 6, 8–13. Verfügbar 3. August 2024 unter <https://library.imaging.org/cic/articles/6/1/art00003>
- Fairchild, M. D. (2005). *Color Appearance Models* (2. Aufl.). John Wiley & Sons, Ltd. Verfügbar 3. August 2024 unter <https://scis.uohyd.ac.in/~chakcs/cipclass/lecs/ColourAppearance.pdf>
- Fröhlich, J. (2017). *Encoding High Dynamic Range and Wide Color Gamut Imagery* [Diss., Universität Stuttgart]. Verfügbar 15. Juli 2024 unter [https://www.hdm-stuttgart.de/~froehlichj/diss/Jan\\_Froehlich\\_Thesis\\_2018\\_02\\_15\\_Acrobat\\_300dpi.pdf](https://www.hdm-stuttgart.de/~froehlichj/diss/Jan_Froehlich_Thesis_2018_02_15_Acrobat_300dpi.pdf)
- Ganesan, P., Rajini, V., & Immanuvel Rajkumar, R. (2010, Dezember). *Segmentation and Edge Detection of Color Images Using CIELAB Color Space and Edge Detectors* (Techn. Ber.). IEEE. Verfügbar 8. Juni 2024 unter <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5706186>
- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N. J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M. H., Brett, M., Haldane, A., del Río, J. F., Wiebe, M., Peterson, P., ... Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>

- Hinde, S. J., Noland, K. C., Thomas, G. A., Bull, D. R., & Gilchrist, I. D. (2022). On the Immersive Properties of High Dynamic Range Video. *19*(2). <https://doi.org/10.1145/3524692>
- Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, *9*(3), 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- ITU. (2011a, März). *Recommendation ITU-R BT.1886: Reference electro-optical transfer function for flat panel displays used in HDTV studio production* (Techn. Ber.). ITU. Verfügbar 20. Juni 2024 unter [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.1886-0-201103-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.1886-0-201103-I!!PDF-E.pdf)
- ITU. (2011b, März). *Recommendation ITU-R BT.601-7: Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios* (Techn. Ber.). ITU. Verfügbar 4. Juni 2024 unter [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.601-7-201103-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.601-7-201103-I!!PDF-E.pdf)
- ITU. (2015a, Juni). *Recommendation ITU-R BT.709-6: Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange* (Techn. Ber.). ITU. Verfügbar 4. Juni 2024 unter [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.709-6-201506-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.709-6-201506-I!!PDF-E.pdf)
- ITU. (2015b, Oktober). *Recommendation ITU-R BT.2020-2: Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange* (Techn. Ber.). ITU. Verfügbar 4. Juni 2024 unter [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2020-2-201510-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2020-2-201510-I!!PDF-E.pdf)
- ITU. (2017, Oktober). *Recommendation ITU-R BT.2407-0: Colour gamut conversion from Recommendation ITU-R BT.2020 to Recommendation ITU-R BT.709* (Techn. Ber.). ITU. Verfügbar 4. Juni 2024 unter [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-BT.2407-2017-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-BT.2407-2017-PDF-E.pdf)
- ITU. (2018, Juli). *Recommendation ITU-R BT.2100-2: Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme exchange* (Techn. Ber.). ITU. Verfügbar 4. Juni 2024 unter [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2100-2-201807-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2100-2-201807-I!!PDF-E.pdf)
- ITU. (2020, März). *Report ITU-R BT.2111-2: Specification of colour bar test pattern for high dynamic range television systems* (Techn. Ber.). ITU. Verfügbar 30. Juli 2024 unter [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2111-2-202012-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2111-2-202012-I!!PDF-E.pdf)
- ITU. (2021, März). *Report ITU-R BT.2446-1: Methods for conversion of high dynamic range content to standard dynamic range content and vice-versa* (Techn. Ber.). ITU. Verfügbar 15. Juli 2024 unter [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-BT.2446-1-2021-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-BT.2446-1-2021-PDF-E.pdf)
- ITU. (2023, März). *Report ITU-R BT.2246-8: The present state of ultra-high definition television* (Techn. Ber.). ITU. Verfügbar 6. Juni 2024 unter [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-BT.2246-8-2023-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-BT.2246-8-2023-PDF-E.pdf)
- Klein, A., & van Golen, K. (2024). *pygfx* (Version 0.2.0). Verfügbar 22. Juli 2024 unter <https://pygfx.com/stable/>

- Lu, T., Pu, F., Yin, P., Chen, T., & Husak, W. (2017). Conversion and Coding Practices for HDR/WCG ICTCP 4:2:0 Video. *Data Compression Conference*, 13–22. Verfügbar 11. Juli 2024 unter <https://ieeexplore.ieee.org/document/7921896>
- Malacara, D. (2002). *Color Vision and Colorimetry: Theory and applications* (2. Aufl.). SPIE-Press.
- Mansencal, T. (2023). *Colour* (Version 0.4.4). Verfügbar 22. Juli 2024 unter <https://zenodo.org/records/10396329>
- Miller, S., Nezamabadi, M., & Daly, S. (2012). Perceptual Signal Coding for More Efficient Usage of Bit Codes, 1–9. <https://doi.org/10.5594/M001446>
- numpy.round*. (2024). NumPy Developers. Verfügbar 22. Juli 2024 unter <https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.round.html>
- Perrin, A.-F., Rěřábek, M., Husak, W., & Ebrahimi, T. (2018). ICtCp Versus Y'CbCr: Evaluation of ICtCp color space and an adaptive reshaper for HDR and WCG. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 7, 38–47. Verfügbar 3. August 2024 unter <https://ieeexplore.ieee.org/document/8333011>
- Safdar, M., Cui, G., Kim, Y. J., & Luo, M. R. (2017). Perceptually uniform color space for image signals including high dynamic range and wide gamut. *Opt. Express*, 25(13), 15131–15151. <https://doi.org/10.1364/OE.25.015131>
- Schanda, J. (2007). *Colorimetry: Understanding the CIE system* (1. Aufl.). WILEY-INTERSCIENCE.
- Schmidt, U. (2021). *Professionelle Videotechnik: Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studiotchnik in SD, HD, UHD, HDR, IP* (7. Aufl.). Springer.
- Schumann, C., Olanubi, G. O., Wright, A., Monk Jr, E., Heldreth, C., & Ricco, S. (2023). Consensus and Subjectivity of Skin Tone Annotation for ML Fairness. *arXiv preprint arXiv:2305.09073*.
- Setchell, J. (2012). 8 - Colour description and communication. In J. Best (Hrsg.), *Colour Design* (S. 219–253). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857095534.2.219>
- Vanessaekowitz. (2007). Cones SMJ2 E [Added Axis labels]. Verfügbar 3. August 2024 unter [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cones\\_SMJ2\\_E.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cones_SMJ2_E.svg)
- Wang, H., Wei, M., & Qu, X. (2022). Constant Hue Loci in different color spaces for stimuli in Rec. 2020 color gamut and HDR Condition. *Optics Express*, 30, 44896–44907. Verfügbar 11. Juli 2024 unter <https://opg.optica.org/abstract/abstract.cfm?uri=oe-30-25-44896>

# Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel

## **Analyse und Bewertung des $IC_{7Cp}$ Videopegelraums für HDR und WCG Videoanwendungen**

selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hamburg, 07. August 2024