

Problematika barevných prostorů v kinematografii

Adam Faltus

Bakalářská práce
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta multimediálních komunikací

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta multimediálních komunikací
Ateliér Audiovize

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Adam Faltus
Osobní číslo: K19113
Studijní program: B8209 Teorie a praxe audiovizuální tvorby
Studijní obor: Audiovizuální tvorba – Kamera
Forma studia: Prezenční
Téma práce: 1. Teoretická část: Problematika barevných prostorů v kinematografii
2. Praktická část: Kamera u audiovizuálního díla v minimální délce 12 minut, nebo Kamera u souboru audiovizuálních děl, nebo Dokumentární série fotografií.
viz Zásady pro vypracování

Zásady pro vypracování

1. Teoretická část:

Rozsah práce: minimálně 15 normostran textu bez započítání obsahu, rejstříku a obrazových příloh.

Formální podoba: Jednotná formální úprava teoretické části práce, její uložení a zpřístupnění se řídí aktuální verzí příslušné směrnice rektora. Student odevzdává 1 ks fyzické (tištěné) práce v pevné vazbě. Tištěná verze práce obsahuje originální „Zadání DP/BP“ včetně příslušných podpisů a studentem podepsané Prohlášení o původnosti práce. Práce v elektronické podobě obsahuje nascanované „Zadání DP/BP“ se všemi formálními náležitostmi a také nepodepsané Prohlášení studenta o původnosti práce. Plný text elektronické verze ve formátu PDF/A a případné přílohy (zkomprimované do jednoho zip souboru) student odevzdá nahráním do IS/STAG a do příslušné složky na NAS-AAV (viz níže).

Pokyny k vypracování: prostudujte a analyzujte dostupné materiály z profesního hlediska a formulujte závěry a získané vědomosti do podoby akademického/odborného textu.

2. Praktická část:

1) Kamera u audiovizuálního díla v minimální délce 12 minut, ve výstupní kvalitě uvedené ve Výrobní knize AAV.

2) Kamera u souboru audiovizuálních děl oficiálně schváleného před odevzdáním Výrobní komisí ateliéru Audiovizuální tvorba, ve výstupní kvalitě uvedené ve Výrobní knize AAV.

3) Dokumentární série fotografií, správně adjustovaných, v rozměru 30x45cm na šířku, která zachycuje zajímavý moment v životě člověka. Důležitá je složka obsahová i výrazová. Barevnost či nebarevnost fotografií je podmíněna sdělením. Varianta musí být schválena před odevzdáním Výrobní komisí ateliéru Audiovizuální tvorba.

Další požadované materiály praktické části:

a) Upoutávka, teaser či trailer na předložené audiovizuální dílo (var. 1 a 2).

b) Písemná explikace z pohledu dané specializace. Minimální rozsah 2 normostrany (var. 1, 2, 3).

c) Anotace (var. 1, 2, 3).

d) Technický scénář (var. 1).

e) Štábová listina (var. 1, 2).

V případě, že je dílo autorským počinem nebo není součástí praktické části SZS studenta Produkce, je nutné dodržet doložení požadovaných materiálu a-h dle zadání specializace Produkce. Tato data odevzdává za projekt vždy jeden člověk. Nezbytná je konzultace s vedením AAV.

Všechny odevzdávané materiály musí splňovat vnitřní technické normy dle Výrobní knihy AAV pro odevzdávání prací a musí být řádně popsány (jméno, název, logo fakulty, formát, rozlišení). Součástí závěrečné práce je vytištěný a podepsaný formulář „Údaje o bakalářské práci studenta“.

Uložení na NAS:

Ve složce na NAS-AAV, označené „Bakalářská / Magisterská práce“ uložte:

1. Teoretickou práci ve formátu PDF/A a případné přílohy (zkomprimované do jednoho zip souboru) dle specifikací výše.

2. Vytvořte podsložku Praktická práce, která bude obsahovat materiály částí a- h. Řádně nazvaný film/absolventské dílo odevzdávejte ve formátech splňujících vnitřní technické normy AAV pro odevzdávání prací.

3. Vytvořte podsložku s názvem Katalog, která bude obsahovat „Podklady pro katalog FMK UTB ve Zlíně“: 10 kusů obrazové dokumentace praktické části závěrečné práce pro využití v publikacích FMK. Formát pro bitmapové podklady: JPEG, barevný prostor RGB, rozlišení 300 dpi, 250 mm delší strana. Formáty pro vektory: AI, EPS, PDF. Loga a texty v křivkách. V samostatném textovém souboru uveďte jméno a příjmení, login do portálu UTB, obor (ateliér), typ práce, přesný název práce v češtině i v angličtině, rok obhajoby, osobní e-mail, osobní web, telefon. Přiložte svou osobní fotografii v tiskovém rozlišení.

1. Teoretická část:

2. Praktická část:

Kamera u audiovizuálního díla v minimální délce 12 minut, ve výstupní kvalitě uvedené ve Výrobní knize AAV

Rozsah bakalářské práce: **viz Zásady pro vypracování**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

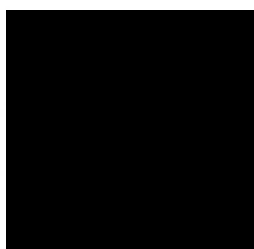
BROWN, Blain. Motion picture and video lighting. 2nd ed., New ed. Boston: El-sevier/Focal Press, c2008. ISBN 0240807634.
TOOMS, Michael. Colour Reproduction in Electronic Imaging Systems: Photography, Television, Cinematography. Wiley; 2016. ISBN 9781119021766.
VERDULT, Vincent. Optimal Audio and Video Reproduction at Home: Improving the Listening and Viewing Experience. Taylor & Francis; 2019. ISBN 9780429813184.
American Cinematographer: the International Journal of Motion Picture Photography and Production Techniques. Los Angeles: American Society of Cinematographers, [1920]-^^^^. ISSN 0002-7928.

Vedoucí teoretické části: **Mgr. art. Július Liebenberger, ArtD.**
Ateliér Audiovize

Vedoucí praktické části: **Mgr. art. Július Liebenberger, ArtD.**
Ateliér Audiovize

Datum zadání bakalářské práce: **1. prosince 2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **19. května 2023**



Mgr. Josef Kocourek, Ph.D.
děkan



MgA. Irena Kocí, Ph.D.
vedoucí ateliéru

Ve Zlíně dne 1. prosince 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ / DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- bakalářská/diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou/diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou/diplomovou práci - nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské/diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské/diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské/diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že:

- jsem na bakalářské/diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Bakalářská práce pojednává o nejčastěji využívaných barevných prostorech v kinematografii a jejich využití na fyzických zobrazovacích zařízeních i promítací zařízeních v kinech. Zaměřuje se na charakteristiku a vlastnosti současných i dříve používaných barevných prostorů, vymezuje rozdíly mezi nimi a zachycuje jejich referenční pozorovací podmínky. Práce vychází z technologicko-odborné literatury a samotné praxe, kdy tato problematika je její důležitou součástí.

Klíčová slova: barevný prostor, kinematografie, barva, RGB, BT.601, BT.709, BT.2020, BT.2100, DCI-P3, ACES

ABSTRACT

The bachelor's thesis focuses on the most frequently used color spaces in cinematography and their usage on physical display devices and screening devices at cinema. It analyses characteristics and properties of current and previously used color spaces, defines the differences between them and describes their reference viewing specifications. This thesis is based on specialised technological literature and practice itself, where this issue is an important aspect.

Keywords: color space, cinematography, color, RGB, BT.601, BT.709, BT.2020, BT.2100, DCI-P3, ACES

Zde je místo pro případné poděkování, popř. motto, úryvky knih atp.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
1 BARVA	12
1.1 CHARAKTERISTIKA BARVY.....	12
1.2 CHROMATICKÝ DIAGRAM CIE 1931 [X, Y].....	13
1.2.1 Bílý bod D ₆₅	15
2 BAREVNÉ MODELY	17
2.1 RGB.....	17
2.2 CMYK.....	18
2.3 YUV	18
2.4 CIELAB	19
2.5 HSV.....	19
2.6 HSL	20
3 HISTORIE BAREV V KINEMATOGRFII	21
3.1 ČERNOBÍLÝ FILM.....	21
3.2 BAREVNÝ FILMOVÝ MATERIÁL.....	22
3.3 PRVNÍ ČERNOBÍLÉ TELEVIZNÍ VYSÍLÁNÍ	24
3.4 PROBLEMATIKA BAREVNÉHO TELEVIZNÍHO VYSÍLÁNÍ.....	24
3.5 DIGITALIZACE	26
4 TECHNOLOGICKÉ ASPEKTY BAREVNÝCH PROSTORŮ V KINEMATOGRFII	28
4.1 BAREVNÁ HLOUBKA.....	28
4.1.1 Nejpoužívanější bitové hloubky u videosignálu	29
4.1.2 Chybné artefakty při tonalitě.....	30
4.2 TRANSFORMAČNÍ FUNKCE.....	31
4.3 LUMA A CHROMA	34
4.3.1 Luma	34
4.3.2 Chroma.....	34
4.3.3 Typy přenosu videosignálu	35
4.3.4 Podvzorkování barevného modelu na příkladu $Y'CbCr$	36
5 BAREVNÉ PROSTORY V KINEMATOGRFII	38
5.1 BT.601.....	40
5.2 BT.709.....	41
5.2.1 Referenční pozorovací podmínky barevného prostoru BT.709	42
5.3 BT.2020.....	43
5.3.1 Referenční pozorovací podmínky barevného prostoru BT.2020	44

5.4	BT.2100.....	45
5.4.1	HLG.....	45
5.4.2	HDR10	46
5.4.3	Dolby Vision	46
5.4.4	Referenční pozorovací podmínky barevného prostoru BT.2100	47
5.5	DCI-P3	47
5.5.1	Referenční pozorovací podmínky barevného prostoru DCI-P3	49
5.6	ACES AP0.....	49
5.6.1	Referenční pozorovací podmínky barevného prostoru ACES AP0	51
6	PŘENOSOVÁ ROZHRANÍ.....	52
6.1	KOMPOZITNÍ VIDEO	52
6.2	KOMPONENTNÍ VIDEO	52
6.3	SDI	52
6.4	HDMI	55
	ZÁVĚR	56
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	58
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	62
	SEZNAM OBRÁZKŮ	64
	SEZNAM TABULEK.....	65

ÚVOD

Tématem této bakalářské práce je problematika barevných prostorů užívaných v kinematografii a v nejrůznějších digitálních odvětvích. Od roku 2019 studuji bakalářský obor Audiovizuální tvorba se specializací na kameru. K volbě tématu této práce mě vedla nejen osobní zkušenost spojená se studiem daného oboru, ale i samotná praxe, během které se s problematikou barevných prostorů opakovaně setkávám. Považuji za nezbytné znát podrobně tuto danou problematiku potřebnou pro výkon profese hlavního kameramana, koloristy či případně i vizuálního specialisty, aby divákovi byla dodána požadovaná reprodukce barev kamerou snímané scény na zobrazovacím zařízení.

V úvodních dvou kapitolách práce budu charakterizovat pojem barva a podstatu jejího míchání. Dále objasním, jakým způsobem se lidské vnímání barev transformuje do číselných hodnot, které se využívají v digitální podobě a popisují, jak nám mají být tyto barvy prezentovány. Tyto číselné hodnoty barev fungují na principu jejich vyobrazení v digramu, jehož prostřednictvím určíme rozsah barevných prostorů vůči schopnosti lidského oka vnímat barvy.

Další kapitola bude věnována historii barvy v kinematografii. Budu popisovat vznik samotného černobílého filmu až po film barevný a jeho složení na filmovém pásu, které vychází z podstaty mísení barev. Dále se zaměřím na historii televizního černobílého i barevného vysílání. Následně budu pokračovat až k digitální podobě barev, se kterou se v dnešní době setkáváme v kinech či televizích.

V následující kapitole se zaměřím na postup zaznamenávání obrazu kamerou, kdy převádíme analog (to, co vidíme) do jeho barevné digitální podoby. Způsoby transformace tohoto digitálního obrazu jsou základními aspekty, které určují jeho kvalitu a akceptovatelnou hranici pro přijetí barev a tonálního vnímání scény divákem. Procesy potřebné ke správnému fungování barev v barevném prostoru, jako je kvantizace, transformační funkce či barevná komprese, budu v této kapitole podrobně charakterizovat.

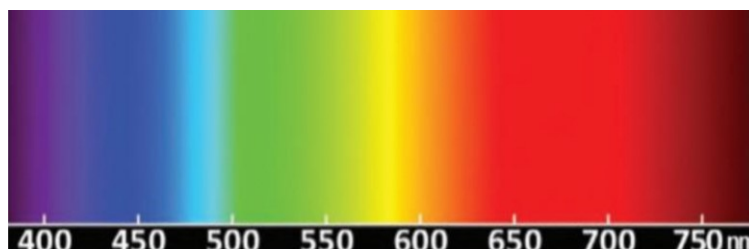
Hlavnímu tématu této práce bude věnována předposlední kapitola, kdy vymezím nejčastěji využívané barevné prostory v kinematografii. U každého z těchto prostorů uvedu nejen jeho charakteristiku, ale i referenční pozorovací podmínky pro jeho dokonalou prezentaci na zobrazovacím zařízení. Zaměřím se na zobrazení a popis současných i dříve používaných barevných prostorů ve srovnání s lidským vnímáním barev. Tímto vymezím rozdíly mezi jednotlivými barevnými prostory. V závěrečné kapitole představím potřebná

přenosová rozhraní a jejich specifika pro zobrazení těchto barevných prostorů na zobrazovacím zařízení.

1 BARVA

Pro pochopení rozdílů mezi velikostmi, výhodami či zobrazením kterýchkoliv barevných prostorů je nutné nejprve porozumět pojmu barva a přepisu lidského vjemu vnímání barvy do číselných hodnot. Vše, co zdravé lidské oko vidí, má svou barvu. Je to výsledný efekt světla ve viditelné oblasti spektra vlnových délek.¹

V sítnici zdravého lidského oka se vyskytuje okolo šesti miliónů buněk barevných fotoreceptorů, které se nazývají čípky. Ty jsou citlivé na dopadající světelné záření od 380 nm do 750 nm a vlivem očního pigmentu jodopsin je barva jejich výsledkem vnímání. Toto vnímání je trichromatické – zahrnuje tři barvy, na které čípky reagují. Jedná se o barvu červenou, zelenou a modrou.²



Obrázek 1 Viditelné spektrum v nanometrech³

1.1 Charakteristika barvy

Směsice dvou odlišných barev vede k vnímání jiné třetí barvy, jejich mix vede k široké škále barev. Tyto tři barvy jsou označovány jako barvy primární. Jejich určení závisí na typu jejich míchání aditivním nebo subtraktivním způsobem.⁴

Podstatnějším z těchto dvou principů je aditivní způsob míchání barev. Paprsky viditelného spektra sčítají vlnovou délku po vlnové délce a jejich intenzita určuje, jaká barva je vnímána. Stoupající intenzita světla vede k vnímání bílé, snižující intenzita zase k černé. U subtraktivního míchání dochází k absorbování světla, tedy odečítání barev a získání tak černé. Primárními barvami aditivního způsobu jsou červená, zelená a modrá, u subtraktivního míchání jsou primárními barvami azurová, purpurová a žlutá.⁵

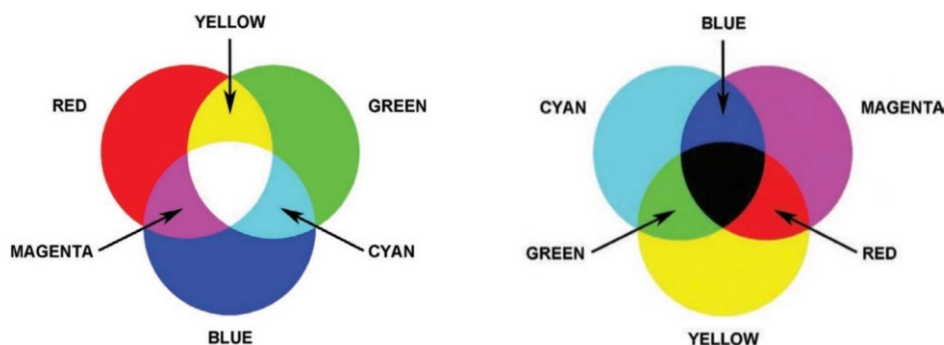
¹ ITTEN, Johannes. *Umění barvy*. Praha: NAMU, 2021, s. 14. ISBN 978-80-7331-546-7.

² POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 266. ISBN 978-0-12-391926-7.

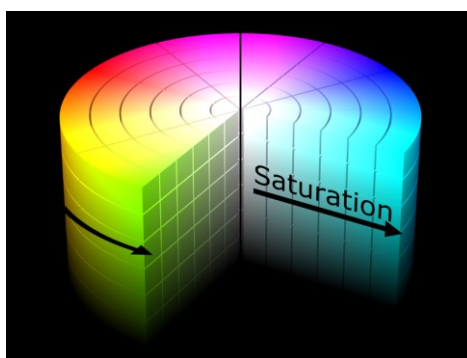
³ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. [obrázek] 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 44. ISBN 978-1138603868.

⁴ TOOMS, Michael S. *Colour Reproduction in Electronic Imaging Systems: Photography, Television, Cinematography*. Chichester: Wiley, 2016, s. 283. ISBN 978-1-119-02176-6.

⁵ Tamtéž, s. 19-30.



Obrázek 2 Rozdíl mezi aditivním (vlevo) a subtraktivním (vpravo) mícháním barev⁶
 Barvy mají tři hlavní vlastnosti: odstín, sytost a světlost. Odstín značí barvu, která je viditelná, ať už se jedná o červenou, zelenou, modrou nebo jejich vzájemné kombinace. Množství a barevnost konkrétní barvy označuje sytost. Tyto dva aspekty jsou závislé na barevné chromatičnosti – kvalitě barvy, nezávisle na jas. Světlost barvy je ovšem závislá na hodnotě jas, a to jak moc světlá nebo tmavá tato barva dokáže být.⁷



Obrázek 3 Charakteristika barev: odstín, sytost a světlost⁸

1.2 Chromatický diagram CIE 1931 [x, y]

V roce 1931 přichází mezinárodní komise Commission Internationale de L'Éclairage (dále jen CIE), zabývající se kolorimetrií, světlem a barvou, s určením definice Standardní kolorimetrický pozorovatel. Tato definice představuje průměrné lidské chromatické vnímání. Křivky Standardního kolorimetrického pozorovatele se nazývají Color matching funkce $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ a $\bar{z}(\lambda)$ (dále jen CMFs).⁹ Matematickým výsledkem CMFs křivek je zápis

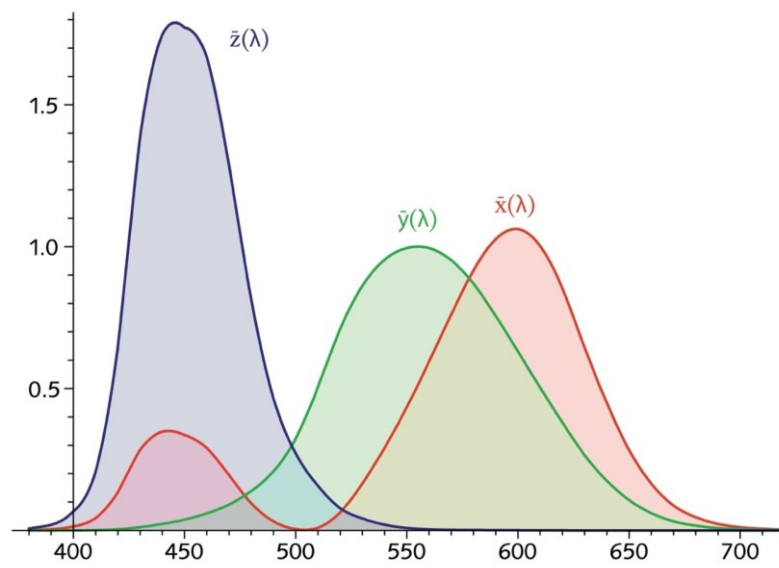
⁶ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. [obrázek] 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 46. ISBN 978-1138603868.

⁷ TOOMS, Michael S. *Colour Reproduction in Electronic Imaging Systems: Photography, Television, Cinematography*. Chichester: Wiley, 2016, s. 3–5. ISBN 978-1-119-02176-6.

⁸ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. [obrázek] 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 45. ISBN 978-1138603868.

⁹ POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 270–272. ISBN 978-0-12-391926-7.

barvy viditelného spektra založený na třech hodnotách primárních barev, který je nazýván XYZ tristimulus. Tyto hodnoty XYZ odpovídají viditelnému spektru zdravého lidského oka. Nyní se tak jedná konečně o barvy v matematických hodnotách.¹⁰



Obrázek 4 Křivky Color matching funkce $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ a $\bar{z}(\lambda)$ ¹¹

Pro reprezentaci lidského vnímání barev přichází CIE v roce 1931 se svým chromatickým diagramem. Na výpočet čisté barvy XYZ tristimulu v tomto diagramu, kdy každá barva v nanometrech má své vlastní x , y a z číslo, postačí pouze dvě chromatické hodnoty x a y . Tímto jsou tedy osy x a y v diagramu znázorněny stejně číselně, jako jsou jejich vlastní chromatická čísla nutná pro výpočet XYZ tristimulu. Vzhledem k tomu, že barevná chromatičnost není závislá na jas, světelnost se tak v diagramu nezapočítává. Černá se zde tedy chromaticky nemůže zobrazit, pomocí aditivního míchání se získá pouze bílá.¹²

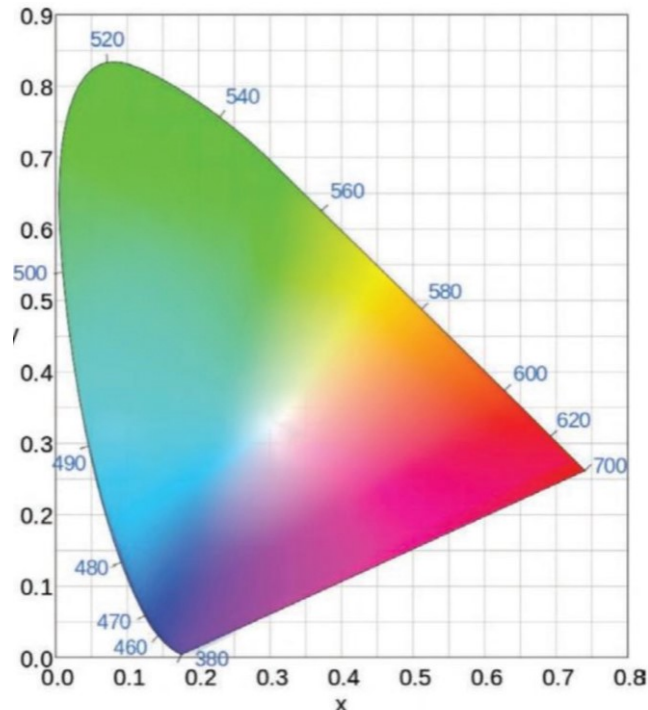
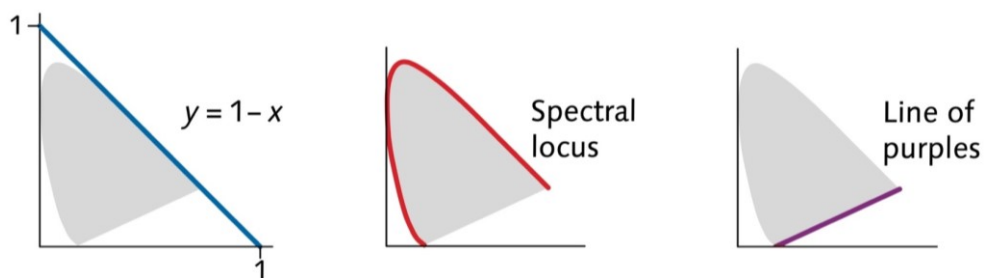
Tento diagram získává tvar obráceného písmene U (tvar podkovy) prostřednictvím spektrálního lokusu (Spectral Locus) značící viditelnou vlnovou délku spektra od 400 nm do 700 nm v x a y souřadnicích, kdy linie z bodu x a y matematicky vychází $y = 1 - x$. Po propojení obou konců "podkovy" přímkou vzniká linie fialové, též pojmenovaná jako purpurová hranice (line of purples). Ta je pouze dojem oné získané barvy – smícháním krátkých a dlouhých vlnových délek jejich koncových bodů na hodnotách 380 nm a 750 nm (krajní extrémní spektrální modrá a červená).¹³

¹⁰ POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 272–273. ISBN 978-0-12-391926-7.

¹¹ Tamtéž, s. 271.

¹² Tamtéž, s. 272–273.

¹³ Tamtéž, s. 272–275.

Obrázek 5 Chromatický diagram CIE 1931 $[x, y]$ ¹⁴Obrázek 6 Funkce diagramu CIE 1931¹⁵

Je třeba zdůraznit, že barevný Chromatický diagram CIE 1931 $[x, y]$ či jiné zobrazení viditelného spektra je v závislosti na pozorovacích podmínkách, zobrazovacím zařízení, výtisku či prostředí zcela irelevantní. Zobrazení barvy je závislé na šířce barevného prostoru daného média, na kterém toto zobrazení sledujeme. V dnešní době není žádná šířka barevného prostoru na takové úrovni, aby zobrazovala veškeré barvy ve viditelném spektru.

1.2.1 Bílý bod D₆₅

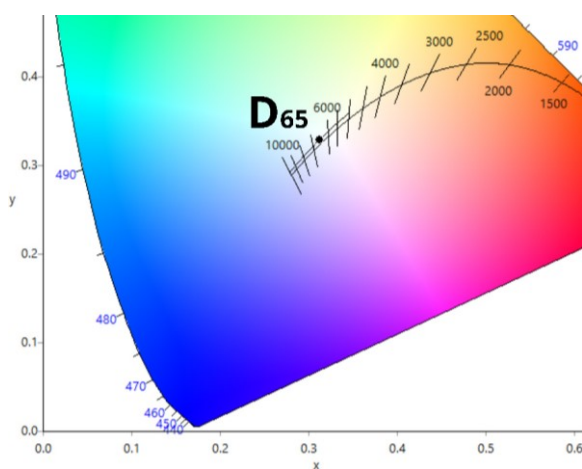
V rámci Chromatického diagramu CIE 1931 neexistuje definice bílé. Aditivním mícháním barev je bílý bod definován shodnými hodnotami XYZ tristimulu stejného příměsu

¹⁴ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. [obrázek] 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 45. ISBN 978-1138603868.

¹⁵ POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces* [obrázek] 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 275. ISBN 978-0-12-391926-7.

primárních barev vlnové délky: červené, zelené a modré.¹⁶ Další způsob určení bílého bodu je pomocí barevné teploty (též teplota chromatičnosti), která odpovídá teplotě předmětu, jenž vyzařuje teplo. Je značena v kelvinech (K). S přibývajícím teplotou se bod posunuje z červené na modrou stranu chromatického diagramu. Barevná teplota se v diagramu označuje tedy přesně naopak, než je užívána v terminologii umění.¹⁷

Referenční bílý bod, s x a y souřadnicemi $[1/3, 1/3]$ v diagramu, je nazýván D_{65} . Jeho přesná teplota je 6504 K, což odpovídá hodnotě kelvinů denního světla. V některých mimoevropských státech (např. Čína, Mexiko) jsou obyvatelé zvyklí na modřejší bílou o hodnotě spíše 9300 K. V těchto regionech je tak bílý bod označován jako D_{93} .¹⁸



Obrázek 7 Bílý bod D_{65} a barevná teplota v Chromatickém diagramu CIE 1931¹⁹

Adaptace lidského oka je tak dokonalá, že se v závislosti na pozorující podmínky a prostředí mění jeho vnímání bílé. Vždy se adaptuje bez ohledu na to, zda se nachází v prostředí s osvětlením 3200 K nebo 5600 K.²⁰ Pro dokonalé pozorovací podmínky na referenčních zobrazovacích zařízeních je tedy nutné jejich podsvícení o stejné hodnotě kelvinů, jakou má jejich bílý bod.²¹

¹⁶ POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 277 - 278. ISBN 978-0-12-391926-7.

¹⁷ VERDULT, Vincent. *Optimal Audio and Video Reproduction at Home: Improving the Listening and Viewing Experience*. 2. vyd. New York: Routledge, 2019, s. 47. ISBN 9781138335387.

¹⁸ POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 278 - 279. ISBN 978-0-12-391926-7.

¹⁹ What is D65 and what is it used for? [obrázek] In: *Waveform Lighting* [online]. 20. 1. 2018 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.waveformlighting.com/color-matching/what-is-d65-and-what-is-it-used-for>

²⁰ POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 280. ISBN 978-0-12-391926-7.

²¹ *Recommendation ITU-R BT.2100-2: Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme exchange* [online]. Ženeva: ITU, 2018 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2100-2-201807-I!!PDF-E.pdf

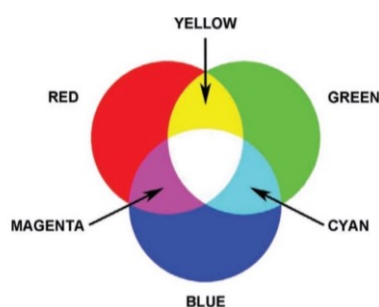
2 BAREVNÉ MODELY

CIE určilo číselné hodnoty XYZ každé barvy, které pomáhají správnému kódování v rámci barevného obrazu. Barevné modely matematicky popisují, jak mají být barvy prezentovány. Rozsah barev v daném modelu se nazývá barevný prostor, označovaný též jako barevný gamut. V každém barevném prostoru jsou komponenty jeho modelu přesně definovány, což umožňuje pozorovateli rozeznat, jak jednotlivé barvy vypadají. Některé barevné modely jsou vymezeny dvourozměrně (využívají pouze odstín a sytost) a některé zase trojrozměrně (odstín, sytost a světlost).

2.1 RGB

Dvourozměrný RGB model je specifický funkcí aditivního míchání primárních barev (barva červená, zelená a modrá). Jejich vzájemným sečtením tak vzniká bílý bod. Nejčastěji se využívá v rámci digitálních médií – video, fotografie, grafika atd. Název RGB modelu se odvozuje z počátečních písmen anglického termínu primárních barev. Černá má v tomto modelu hodnotu RGB 0, 0, 0 a bílá má hodnotu RGB 1, 1, 1.²²

Způsobem míšení barev vznikají barevné prostory, které se vytvářejí z dané sady primárních barev RGB. Jejich rozsah se uvádí v Chromatickém diagramu CIE 1931 v hodnotách x a y , a zobrazuje tak maximální saturaci daných barevných prostorů. Každý barevný prostor má tvar trojúhelníku, jehož tři vrcholy jsou tvořeny maximálními hodnotami jeho primárních barev. Během transformace spektra vlnové délky může dojít k překročení viditelných barev chromatického diagramu, které pak nelze správně přenést na zobrazovací zařízení. Tyto překročené signály se poté ukazují jako přesaturované.²³



Obrázek 8 Barevný model RGB²⁴

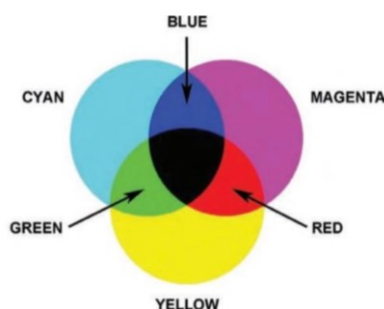
²² POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 12. ISBN 978-0-12-391926-7.

²³ Tamtéž, s. 290.

²⁴ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. [obrázek] 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 46. ISBN 978-1138603868.

2.2 CMYK

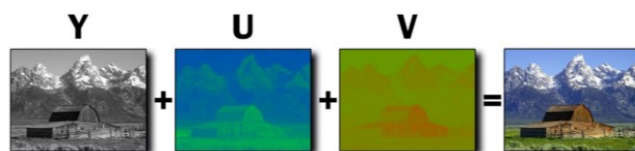
Subtraktivní míchání barev tohoto modelu je určené pouze pro tisk. Jedná se také o dvourozměrný barevný model, který však vychází z podstaty mísení spektrálních vlastností primárních barev. Dochází tak k jejich odčítání a tím vytváření černé, tedy přesný opak RGB modelu. Tím se i určuje barevnost tří základních barev, které jsou komplementární protiklady RGB modelu (barva azurová, purpurová, žlutá a černá). Jejich akronym CMYK, tak vychází z anglického názvu těchto barev.²⁵



Obrázek 9 Barevný model CMYK²⁶

2.3 YUV

Barevný model používaný pouze v kompozitním analogovém televizním vysílání. Jedná se o rozdělení světelné a barevné složky signálu pro jednodušší šíření v menším přenosovém pásmu. Jasová složka Y (luma) je doplněna o další dvě barevné (chroma) složky U a V. Složka U zastává barevný rozdíl modré a lumy, složka V odpovídá barevnému rozdílu červené a lumy.²⁷ Americkým ekvivalentem pro tento barevný model je YIQ, kdy souřadnice barevné složky I a Q jsou na CIE digramu pouze pootočené o 33°, jinak zastávají stejnou funkci.



Obrázek 10 Barevný model YUV²⁸

²⁵ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 17. ISBN 978-1138603868.

²⁶ Tamtéž, s. 49.

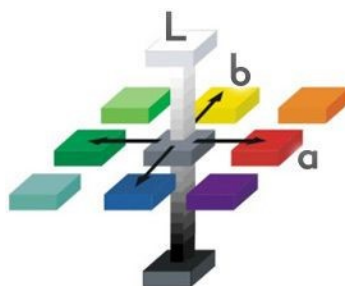
²⁷ POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 567 - 571. ISBN 978-0-12-391926-7.

²⁸ What are RGB and YUV color spaces?. [obrázek] In: *DEXON Systems* [online]. 5. 4. 2022 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://dexonsystems.com/blog/rgb-yuv-color-spaces>

2.4 CIELAB

CIE vytvořilo také svůj vlastní třídímenzionální barevný model, který je na bázi lidského zraku. Není závislý na zobrazovacím zařízení, proto nemůže být volně a jednoduše dostupný jako model RGB. V jeho akronymu písmeno L značí světlost barvy (lightness), písmeno A značí pozici barvy mezi červenou a zelenou, pozici mezi žlutou a modrou značí písmeno B.²⁹

Pro tvorbu videosignálu a jeho přehrávání v reálném čase je RGB model jednodušší na dekódování, proto se CIELAB méně používá.³⁰ Na jeho dokonalé vyobrazení barev, které je takřka totožné s vnímáním barev lidským okem, jsou postaveny různé vzorníky: PANTONE, RAL i 18 % středně šedá, která se využívá na měření expozice.



Obrázek 11 Barevný model CIELAB³¹

2.5 HSV

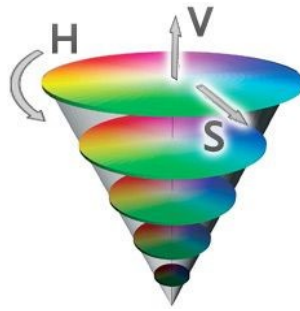
Jedná se také o trojdimenzionální barevný model, kdy jeho parametry vytváří odstín (H), sytost (S) a jas (V). Pro vyobrazení modelu se využívá jehlan, jehož středová osa směřuje od bílé dolů k černé. Jeho úhel od osy znázorňuje odstín, sytost znázorňuje vzdálenost od osy jehlanu. Nevýhodou tohoto modelu je neplynulý přechod z bílé do černé.³²

²⁹ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 77. ISBN 978-1138603868.

³⁰ POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 284. ISBN 978-0-12-391926-7.

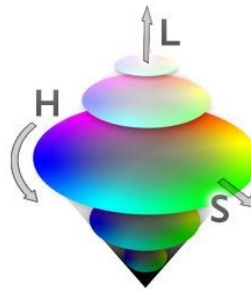
³¹ Color Theory. [obrázek] In: *Colorotate* [online]. 28. 6. 2013 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <http://learn.colorotate.org/color-models/>

³² Color Theory. *Colorotate* [online]. ©2023 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <http://learn.colorotate.org/color-models>

Obrázek 12 Barevný model HSV³³

2.6 HSL

Obdobný trojrozměrný model jako HSB. Tento model má však jednu výhodu, celý rozsah hodnot zde pokrývá světlost (L), ne jas. Jeho tvar diamantu odpovídá skutečnosti, tedy tomu, jak lidské oko vnímá barevné tóny se ztmavováním nebo zesvětlováním. Osa diamantu jde též od světlé po tmavou. Uprostřed, v nejširším úhlu, jsou barvy nejvíce satureované. Model HSL je totožný jako vnímání barev lidským okem.³⁴

Obrázek 13 Barevný model HSL³⁵

³³ Color Theory. [obrázek] In: *ColorRotate* [online]. 28. 6. 2013 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <http://learn.colorotate.org/color-models>

³⁴ Color Theory. *ColorRotate* [online]. ©2023 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <http://learn.colorotate.org/color-models>

³⁵ Color Theory. [obrázek] In: *ColorRotate* [online]. 28. 6. 2013 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <http://learn.colorotate.org/color-models>

3 HISTORIE BAREV V KINEMATOGRAFII

Před digitální formou kinematografie v podobě, v jaké je známa v současné době, byl k natáčení i promítání používán filmový pás. Na konci 19. století začalo docházet k rozvoji v oblasti zábavního průmyslu, kdy pracující dělnická třída chtěla vidět kromě cirkusů, divadel nebo pouťových atrakcí nové věci.³⁶

Než byl vytvořen první pohyblivý snímek, musela být v této oblasti učiněna řada nových vědeckých i technologických postupů. Nejblíže k pohyblivému snímku měly optické hračky zootrop. Pohledem přes jejich statickou štěrbinu bylo vidět otáčející sérii rozfázovaných kreseb, které tak vytvářely optickou iluzi pohybu. Dalším z potřebných technologických postupů bylo v roce 1826 vytvoření první fotografie na skleněné desce (francouzský vynálezce Claude Niépce).³⁷

3.1 Černobílý film

Od porozumění vnímání pohybu lidským okem, přes schopnost promítání snímků za sebou, až po studii sekvenčního snímání koňského dostihu Eadwardem Muybridgem, byla vytvořena v roce 1891 motorem poháněná kamera kinetograf od Thomase Edisona a jeho asistenta Williama K. L. Dicksona. Kinetograf zaznamenával obraz na fotografické celuloidové světlocitlivé svitky od firmy Eastman Kodak (materiál vynalezen v roce 1888), které Dickson upravil do velikosti šířky jednoho palce (cca velikost klasického 35mm filmu). Takto upravené svitky slepil a vyrazil na každou stranu čtyři perforace. Tímto určil standard, který je dodnes používán u jednoho okénka filmu během posunu filmového pásu. Tyto fotografické filmové svitky byly světlocitlivé, zaznamenávaly obraz tonalitou světla, výsledný film byl tedy pouze černobílý.³⁸

Kinetografem se inspirovali i francouzští bratři Louis a Auguste Lumièrové se svou malou kamerou kinematograf a vlastním promítacím zařízením. Lumièrové na rozdíl od Edisona natáčeli 16 okének za vteřinu, kdy Edison jich využíval 46. Docházelo tak k úspoře materiálu a jeho skladování, zlevnila se jeho výroba, a tímto byl zaveden standard na dalších 20 let.

³⁶ THOMPSON, Kristin a David BORDWELL. *Dějiny filmu: přehled světové kinematografie*. Praha: AMU, 2007, s. 21. ISBN 978-80-7106-898-3.

³⁷ Tamtéž, s. 22.

³⁸ Tamtéž, s. 22–25.

Jak Lumièrové tak i Edison byli po své prezentaci krátkých černobílých filmů veřejností uznáváni. Nový velký průmysl byl vytvořen.³⁹

3.1.1 Zvuk ve filmu

Film byl zpočátku brán jen a pouze jako součást zábavního průmysl. Poptávka od diváků po kvalitách filmu však začala být větší a náročnější. Postupně tak docházelo ke vzniku velkých filmových studií.⁴⁰ Začal být také používán zvuk, který ovšem zabíral místo na filmovém pásu, obraz se proto zmenšil na poměr stran 1,33:1. Academy of Motion Picture Arts and Sciences standardizovalo znovuvytvoření obdélníkového tvaru políčka filmu o velikosti 22 x 16 mm záznamové plochy na 35mm filmu. Pro dokonalou synchronizaci zvuku a obrazu byla určena standardní snímková frekvence 24 snímků za sekundu (frames per second, dále jen fps).⁴¹

3.2 Barevný filmový materiál

Již na úplném konci 19. století se začaly čím dál více objevovat ručně kolorované či monochromatické černobílé snímky. Ve fotografii byla barva již dávno objevena aditivním tříbarevným (barva červená, modrá a zelená) filmem.⁴² Filmoví diváci tak museli čekat až do začátku 30. let 20. století, kdy firma Technicolor uvedla první filmové třívrstvé barevné negativy.⁴³

Každá ze tří černobílých vrstev tohoto filmu byla ošetřena spektrálním senzibilizátorem pro danou primární barvu (barva červená, modrá a zelená) viditelného spektra světelného záření. Prostřednictvím polopropustného hranolu dopadalo světlo na tři negativní černobílé filmové materiály opatřené senzibilátorem. Díky purpurovému (červená a modrá barva) a zelenému (zelená barva) filtru se zachytávala potřebná primární barva světelného záření na daný filmový negativ. Tyto tři filmové pásy byly poté kopírovány na jejich černobílé pozitivy a byla na ně nanášena jejich komplementární subtraktivní barva azurová, purpurová

³⁹ THOMPSON, Kristin a David BORDWELL. *Dějiny filmu: přehled světové kinematografie*. Praha: AMU, 2007, s. 26 - 27. ISBN 978-80-7106-898-3.

⁴⁰ Tamtéž, s. 76.

⁴¹ Tamtéž, s. 204–205.

⁴² STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 70. ISBN 978-1138603868.

⁴³ Tamtéž, s. 229.

a žlutá. Pomocí subtraktivního způsobu míchání těchto konečných barev vzniká jejich převodem barviva znovu negativ.⁴⁴

Prvním barevným filmem se stává Disneyho animované Probuzení jara (Flowers and Trees, 1932). Více se tento barevný materiál proslavil v roce 1939 filmem Čaroděj ze země Oz (The Wizard of Oz, 1939).⁴⁵ Ve stejném roce se představil třívrstvý 16mm film Kodachrome od firmy Eastman Kodak, určený pro amatéry a na domácí natáčení. Zanedlouho se uzavřelo partnerství mezi firmami Eastman Kodak a Technicolor za účelem využití tohoto filmu Kodachrome na 35mm filmový pás.⁴⁶

3.2.1 Nové způsoby natáčení

Další výrazné změny ve filmovém průmyslu přišly až v 50. letech 20. století. Velikost používaného filmu vzrostla na 65mm a 70mm. Začalo se také využívat anamorfických předsádek u objektivů, kdy diváci začali dostávat větší a širokoúhlejší záběry o poměrech stran 2,35:1 až 2,55:1 (razantní změna z dříve používaných 1,37:1).⁴⁷ Revolucí barevného filmu byl v těchto letech vícevrstvý negativní film Eastmancolor, který se začal používat jako standard ve filmovém průmyslu. Výhodou bylo využití pouze jedné role filmu, která je založena na třech vrstvách pro červené, zelené a modré světlo vlnové délky. Obsahuje také žlutý (modrá barva) a zelený (červená a zelená barva) filtr pro lepší oddělení vlnových délek a podkladový materiál, který tyto vrstvy a filtry podpírá. Po vyvolání negativu mají barvy vlnové délky také své komplementární subtraktivní barvy.⁴⁸

Od té doby bylo vyrobeno přes 100 různých typů barevných filmů i od jiných firem. Nadále však firmy Kodak a Technicolor zůstaly lídry v tomto oboru až do dnešní doby. Při natáčení, vyvolání nebo kopírování filmu byl používán jednotný způsob ve všech filmových laboratořích. Předávání či převádění materiálu bylo naprosto shodné v rámci státu

⁴⁴ GOLDMAN, Michael. Technicolor celebrates centennial. *American Cinematographer: International Journal of Motion Picture Photography and Production Techniques*, roč. 96 (2015), č. 9, s. 87-88. ISSN 0002-7928.

⁴⁵ THOMPSON, Kristin a David BORDWELL. *Dějiny filmu: přehled světové kinematografie*. Praha: AMU, 2007, s. 229. ISBN 978-80-7106-898-3.

⁴⁶ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 73. ISBN 978-1138603868.

⁴⁷ THOMPSON, Kristin a David BORDWELL. *Dějiny filmu: přehled světové kinematografie*. Praha: AMU, 2007, s. 338 - 340. ISBN 978-80-7106-898-3.

⁴⁸ Eastman Color. *Timeline of Historical Film Colors* [online]. ©2023 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://filmcolors.org/timeline-entry/1310/>

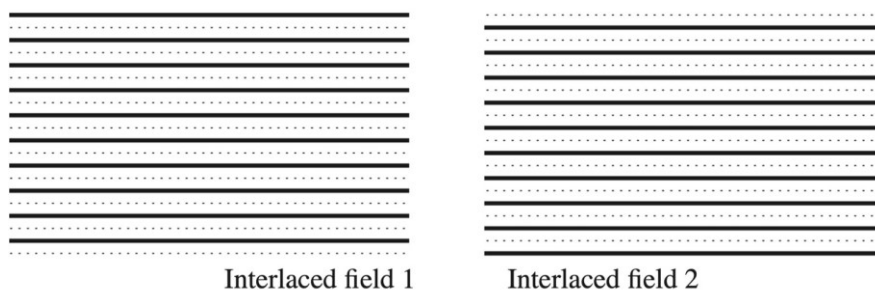
či regionu, neprobíhaly tedy žádné transformace barevných prostorů, jaké známe dnes. Tehdejší produkce filmů tak byla o něco jednodušší.⁴⁹

3.3 První černobílé televizní vysílání

Již na začátku 30. let 20. století se objevila první černobílá televize. Došlo tak k prvním zkouškám vysílání od British Broadcasting Company (dále jen BBC) v 48 fps. Kvůli malé šířce vysílacího pásma a tehdejším nedostačujícím technologiím nebylo možné vysílat takové množství obrazu pro mnoho televizních kanálů. Diváci tak byli zpočátku omezeni sledovat pouze tři televizní kanály.⁵⁰

3.3.1 Prokládané skenování obrazu

Pro využití většího množství vysílaného signálu se muselo předejít jeho snížení a redukci. Pro lepší synchronizaci s tehdejším 60 Hz zdrojem vzniká prokládané skenování obrazu (Interlaced Scan – značení i) s 30 snímky/60 polosnímky za vteřinu. Jeden tento snímek se skládá ze dvou samostatných polí. První pole obsahuje pouze liché řádky, zatímco druhé pole obsahuje pouze sudé řádky. Tato pole jsou zachycována a zobrazována postupně v čase, nastává tedy mezi nimi mírná prodleva.⁵¹



Obrázek 14 Způsob prokládání videa⁵²

3.4 Problematika barevného televizního vysílání

Standard prokládaného kompozitního videa National Television System Committee (dále jen NTSC), který je tvořen 525 prokládanými řádky obrazu, byl určen pro americký

⁴⁹ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 73. ISBN 978-1138603868.

⁵⁰ Tamtéž, s. 74.

⁵¹ VERDULT, Vincent. *Optimal Audio and Video Reproduction at Home: Improving the Listening and Viewing Experience*. 2. vyd. New York: Routledge, 2019, s. 208 - 209. ISBN 9781138335387.

⁵² VERDULT, Vincent. *Optimal Audio and Video Reproduction at Home: Improving the Listening and Viewing Experience*. [obrázek] 2. vyd. New York: Routledge, 2019, s. 124. ISBN 9781138335387.

trh přenosu analogového televizního signálu. Vše potřebné pro přenos obrazu je tak kódované do jednoho kanálu.⁵³

Přechod k barevnému vysílání v televizi byl nevyhnutelný. I přes tak malou šířku vysílacího pásma se k tehdejšímu černobílému standardu ještě zvládly reálně vejít další dvě pásma. Problematické bylo to, že barevná složka by měla obsahovat tři barevná pásma, každé pro červenou, modrou a zelenou barvu. Bylo tedy nutné dojít k redukci těchto tří barevných složek na pouhé dvě. Jasovou (černobílá) složku a dvě další barevné složky tak bylo nakonec možné přenášet v požadovaném jednom kanálu.⁵⁴

Americký 60 Hz kompozitní standard NTSC využíval barevného modelu YIQ, mimoamerické prokládané standardy Phase Alternating Line (dále jen PAL) a Séquentiel couleur à mémoire (dále jen SECAM) fungovaly na barevném modelu YUV. Tento barevný model, který je tvořen 625 prokládanými řádky obrazu, je prokládán 50 polosnímky z důvodu používání 50 Hz zdrojů.⁵⁵

3.4.1 CRT displeje

Televizním barevným standardem v zobrazovacím zařízení se v 50. letech 20. stolní staly CRT (cathode ray tube – katodová trubice) displeje, které obsahovaly červené, modré a zelené elektronové paprsky. Výsadní postavení si tato zařízení udržela i po nástupu digitalizace. Společně s xenonovými projektory tvořily nejlepší referenční obraz, díky svým konzistentním barvám a tonalitě, a to i po letech používání.⁵⁶

3.4.2 Progresivní skenování obrazu

Společně s CRT přichází také progresivní skenování obrazu (Progressive scan – značení p), které na rozdíl od prokládání zobrazuje každý snímek za snímkem, řádek po řádku, a neprokládá je. Tento typ se rozšiřuje až do dnešní digitalizace, je naprosto běžný a nejvyužívanější, funguje při jakékoli snímkovací frekvenci.⁵⁷

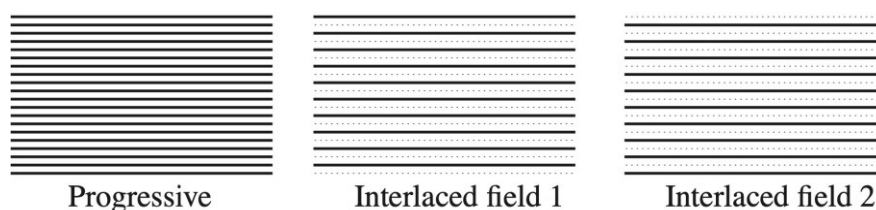
⁵³ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 74. ISBN 978-1138603868.

⁵⁴ Tamtéž, s. 74–75.

⁵⁵ Tamtéž, s. 75.

⁵⁶ Tamtéž, s. 517.

⁵⁷ VERDULT, Vincent. *Optimal Audio and Video Reproduction at Home: Improving the Listening and Viewing Experience*. 2. vyd. New York: Routledge, 2019, s. 124. ISBN 9781138335387.



Obrázek 15 Rozdíl mezi progresivním a prokládaným skenování obrazu⁵⁸

3.4.3 Komponentní video

Dalším milníkem bylo na začátku 80. let 20. století uvedení komponentního analogového signálu videa. Oproti kompozitnímu videu přenášelo separátně jak jasovou složku signálu, tak i obě barevné složky. Na rozdíl od kompozitního videa, kde signály vede pouze jeden kabel, je u komponentního videa veden pro každý signál vlastní kabel.⁵⁹

3.5 Digitalizace

Kladem komponentního systému je jeho schopnost efektivnějšího zmenšení videesignálu v šířce pásma. Začala tak vznikat první analogová vysílání ve vysokém rozlišení HDTV (High-Definition television), dříve nazývané jako High-Vision. Za jejich vznikem stálo představení nového vysílacího zařízení a analogové videokamery Sony HDVS od stejnojmenné firmy v roce 1981. Dále dva roky poté představení první HDTV od japonské firmy NHK s novým standardem poměru stran 16:9. V druhé půlce 80. let 20. století rovněž v Evropě vzniká vlastní analogový standard HDTV s označením HD-MAC.⁶⁰

Systém HDTV firmy NHK byl v 90. letech 20. století přijat Společností filmových a televizních techniků (Society of Motion Picture and Television Engineers, dále jen SMPTE). Standardizací prvků tohoto formátu se rovněž do dnešního dne zabývá rádio-komunikační sekce Mezinárodní telekomunikační unie (International Telecommunication Union Radiocommunication Sector, dále jen ITU-R). Během této doby se postupně rozmáhá zaznamenávání obrazu digitální formou pixelů, začínají se vyvíjet i první digitální systémy značky Sony či JVC. Pro digitální HDTV vznikají nové

⁵⁸ VERDULT, Vincent. *Optimal Audio and Video Reproduction at Home: Improving the Listening and Viewing Experience*. [obrázek] 2. vyd. New York: Routledge, 2019, s. 124. ISBN 9781138335387.

⁵⁹ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 77. ISBN 978-1138603868.

⁶⁰ Tamtéž, 2021, s. 77.

komprimovací algoritmy za účelem získání početnějších možností televizních kanálů této kvality HDTV v šířce vysílacího pásma. V USA se tak již v roce 1998 začíná poprvé vysílat v digitálním HDTV formátu.⁶¹

Digitalizace přinesla do filmového i televizního průmyslu spoustu výhod, zejména zjednodušení archivace včetně ukládání dat a celkové snížení nákladů. Filmové pásy natočených snímků se také začaly postupem času skenovat a uchovávat v jejich digitální podobě. Od 90. let 20. století se postupně začíná celá filmová produkce přesouvat do digitální sféry, jak ji známe dnes.

3.5.1 Nové zobrazovací technologie

Příchod analogového HDTV znamenal přínos nové škály technologií, zobrazovacích zařízení i rychlejšího začátku digitální sféry. Všechna tato nová zobrazovací zařízení včetně jejich barev a tonality, jsou závislá na zobrazení podporující barevné prostory a správné převody videosignálů.

LCD (Liquid Crystal Displays) displeje na bázi RGB pixelů trpí velice neuspokojivou reprodukcí barev a tonality. Jsou tak velice nekonzistentní mezi různými výrobci a vyznačují se špatnou kalibrací už z výroby, která se nedá ani poté vylepšit.⁶²

Plazmové displeje obsahují v malých buňkách ionizovaný plyn. Díky elektrickému proudu je toto plynové palivo přeměněno na tříbarevné pixely, a uživatel je poté schopen vidět barevný obraz.⁶³

Seskupení malých svítících RGB pixelů a jejich generování mícháním různých barev na zobrazovacím zařízení se nazývá LED (Light Emitting Diode) displej. V dnešní době je tento typ zobrazovací technologie nejčastější a také finančně nejodstupnější.⁶⁴

OLED (Organic Light Emitting Diode) displeje také vyzařují světlo diodami, ale na rozdíl od LED jsou bez podsvícení, černá je tedy černou daného displeje. Je pro ně typické zachování dokonalé reprodukce barev i při vysokém úhlu zobrazení.⁶⁵

⁶¹ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 77-78. ISBN 978-1138603868.

⁶² Tamtéž, s. 517–518.

⁶³ Tamtéž, s. 518.

⁶⁴ Tamtéž, s. 518.

⁶⁵ Tamtéž, s. 518.

4 TECHNOLOGICKÉ ASPEKTY BAREVNÝCH PROSTORŮ V KINEMATOGRAFII

Videosignál, který sledujeme v digitální podobě na jakémkoliv zobrazovacím zařízení, pořízený záznamovým zařízením, se skládá z barevných obrazových bodů (pixelů). Ať už se jedná o kamerové nebo telefonní zařízení, každé z nich přenáší to, co zaznamenává (analog) do binární soustavy, kde jsou zaznamenané barvy pomocí kódování přesně definovány. Záznam bývá často softwarově barevně převáděn do potřebných barevných požadavků zobrazovacích zařízení za účelem správného rozeznání daných barev. Záznamové i zobrazovací zařízení fungují na principu RGB barevného modelu. Aby byl barevný videosignál kvalitně zobrazen, je třeba několika technologických aspektů, které musí určité barevné prostory naplňovat.

V každém digitálním záznamovém zařízení se nachází A/D převodník, prostřednictvím kterého převádíme analogové obrazové signály na jejich digitální podobu. Přes snímací optiku dopadá analogový signál (snímaná scéna) na snímač záznamového zařízení. Převodník odebírá analogový datový tok z obrazového snímače kamery a zaznamenává na něm náboj nebo počet elektronů. Čím je vyšší hodnota zaznamenaného výsledného pixelu obrazu, tím je jeho původní signál světlejší. Tomuto pixelu udává převodník také jasně daný barevný odstín a sytost, a to na základě informací původního analogového originálu. Z tohoto procesu získáváme lineární *RGB* videosignál, vzhledem k rovnoměrnému (lineárnímu) nárůstu informací na snímači. Omezení světelných hodnot pixelů je způsobeno dynamickým rozsahem (hodnota od stínů po jasy) záznamového zařízení.⁶⁶

4.1 Barevná hloubka

Tonalita digitálního videosignálu obrazu závisí na počtu různých úrovní, které mohou červené, zelené a modré složky pixelu získat. Směs těchto tří primárních barev udává barvu a jas každého daného pixelu. Šedá barva se získává, když se intenzita těchto tří složek rovná, změnou intenzity se dosahuje různých odstínů této neutrální barvy. Rozdílné barvy se získávají aditivním smícháním odlišného množství lineárních *R*, *G* a *B* signálů.⁶⁷

⁶⁶ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 26–27. ISBN 978-1138603868.

⁶⁷ VERDULT, Vincent. *Optimal Audio and Video Reproduction at Home: Improving the Listening and Viewing Experience*. 2. vyd. New York: Routledge, 2019, s. 40. ISBN 9781138335387.

Počet různých úrovní v červené, zelené a modré složce digitálního videa je výsledkem procesu zvaného kvantizace. Světlo, které dopadlo na digitální snímač, se v něm mění na voltáž o rozsahu 0 - 1 hodnot a kvantizace tento rozsah konvertuje na konečný počet pevných úrovní. V digitálním videu jsou různé kvantizační úrovně kódovány pomocí bitů. Počet bitů se nazývá bitová hloubka.⁶⁸

4.1.1 Nejpoužívanější bitové hloubky u videesignálu

Často se může stát, že původní videesignál ze záznamového zařízení bude mít vyšší bitovou hloubku než výsledný obsah po jeho zpracování. Tento způsob se může aplikovat kvůli nárokům výsledného zobrazovacího zařízení či požadavkům výsledného obsahu.

4.1.1.1 8-bit

Minimální akceptovatelnou bitovou hloubkou pro vnímání kvalitního digitálního obrazu v kinematografii je 8-bit. Kvantizační úroveň pro každý RGB kanál je 256 úrovní dané barvy s celkovým hromadným počtem přes 16 miliónů barev.⁶⁹ HD a DVD nebo i Blu-ray formáty využívají tuto bitovou hloubku nejčastěji. V případě této bitové hloubky se jedná o standardní dynamický rozsah (dále jen SDR) videesignálu, a to z hlediska jeho barevné limitace.

4.1.1.2 10-bit

Využití 10-bit barevné hloubky je výhodné pro Ultra HD a novější formáty digitálního obrazu s vyšším dynamickým rozsahem barev (dále jen HDR) a vyšší kompresí formátu. Je možné využít více jak 1,07 miliardy barev s 1024 úrovněmi pro každý ze tří barevných kanálů. Lze tak získat 64krát větší barevný rozsah než u 8-bit varianty.⁷⁰

4.1.1.3 12-bit

V dnešní době je 12-bit barevná hloubka sice již zavedeným, ale méně používaným systémem o 4096 barevných úrovních na kanál. Používá se na stejné formáty jako 10-bit hloubka. S jeho celkovým počtem barev, které přesahují 64 miliard, jsou jeho možnosti daleko větší a barevná gradace dokonalejší.⁷¹

⁶⁸ VERDULT, Vincent. *Optimal Audio and Video Reproduction at Home: Improving the Listening and Viewing Experience*. 2. vyd. New York: Routledge, 2019, s. 41. ISBN 9781138335387.

⁶⁹ Tamtéž, s. 42.

⁷⁰ Tamtéž, s. 42.

⁷¹ Tamtéž, s. 42.

4.1.1.4 16-bit

S takto velkou bitovou hloubkou se lze setkat zřídka. V ojedinělých případech se s ní setkáváme při práci s kamerou, kdy je do této vysoké kvantizace zaznamenáván obraz o neskutečných 65 536 úrovních na jeden barevný kanál. Nejčastěji je používána ve formátu RAW, kdy je čip profesionální kamery plně využíván bez jakékoliv barevné či datové komprese. Soubory jsou o velkém datovém kvantu, proto během postprodukce je možné plně využít množství barevné svobody.

Tabulka 1 Porovnání bitových hloubek

Počet bitové hloubky	Počet kvantizačních úrovní pro jeden barevný kanál	Celkový přesný počet barev
8	256	16 777 216
10	1 024	1 073 741 824
12	4 096	68 719 476 736
16	65 536	281 474 976 710 656



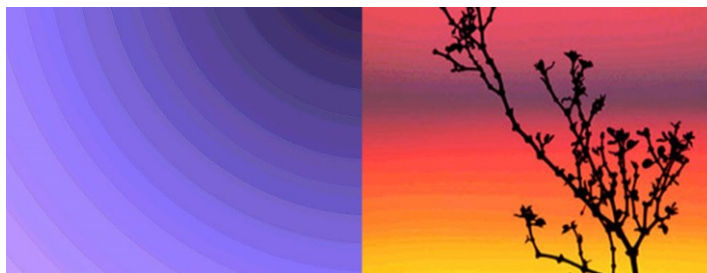
Obrázek 16 Porovnání 8-bit a 10-bit barevné hloubky⁷²

4.1.2 Chybné artefakty při tonalitě

Čím vyšší je bitová hloubka digitálního videa, tím lze očekávat lepší tonalitu obrazu. Při použití nižšího počtu bitů může často docházet k rozpadání obrazu. Jaká je však ideální potřeba bitové hloubky pro dané barevné prostory, to v současné době ještě není vědecky prokázáno.

⁷² Best Monitor for Graphic Design, Video Editing & 3D Animation. [obrázek] In: *CG Director* [online]. 12. 8. 2022 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.cgdirector.com/best-monitor-graphic-design-video-editing-3d/>

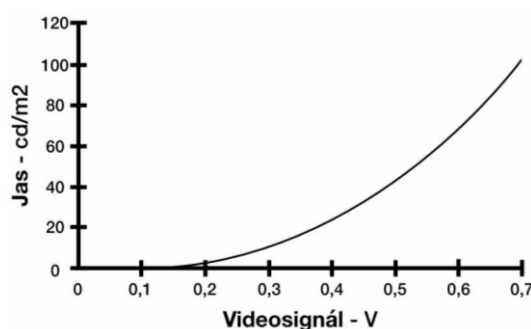
Pokud odstíny ploch nejsou hladké, ale obsahují pruhy a pásy s různými stupni jasu, nastává banding. Během posterizace dochází k podobnému efektu, tentokrát však v oblastech postupných barevných změn, např. gradace modré oblohy.⁷³



Obrázek 17 Ukázka bandingu (vlevo) posterizace (vpravo)⁷⁴

4.2 Transformační funkce

Hlavním úkolem transformační funkce u lineárního *RGB* videosignálu je zobrazení správných tonálních přechodů obrazu (jasové signály od černé po bílou) a také jeho barevná reprodukce. Tato funkce je způsob, jakým se *R*, *G* a *B* složky signálu zobrazují v digitálním obrazu. Při špatném převedení transformační funkce může dojít ke ztrátě dat, a to ve stínech nebo v nejsvětlejších částech videosignálu. Transformační funkce vychází z dob CRT monitorů, které měly výstupy s lineární odezvou zvýšeného napětí (voltáž), kdy jas se při stoupání napětí měnil nelineárně z černé na bílou v tmavé oblasti pomaleji. Dnešní monitory tuto vlastnost nemají, proto musí svou lineární odezvu před zobrazením softwarově upravovat.⁷⁵



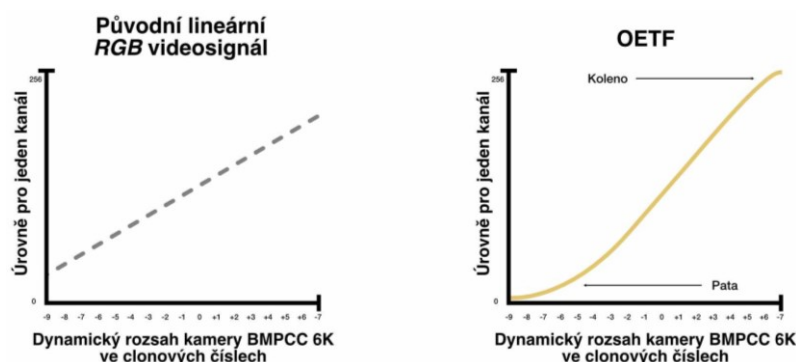
Obrázek 18 Nelineární vztah videosignálu a světelnosti u CRT displeje v grafu

⁷³ VERDULT, Vincent. *Optimal Audio and Video Reproduction at Home: Improving the Listening and Viewing Experience*. 2. vyd. New York: Routledge, 2019, s. 40. ISBN 9781138335387.

⁷⁴ Can You See the Difference Between 10-Bit and 8-Bit Images and Video Footage? [obrázek] In: *Fstoppers* [online]. 24. 2. 2017 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://fstoppers.com/education/can-you-see-difference-between-10-bit-and-8-bit-images-and-video-footage-166977>

⁷⁵ VERDULT, Vincent. *Optimal Audio and Video Reproduction at Home: Improving the Listening and Viewing Experience*. 2. vyd. New York: Routledge, 2019, s. 42 - 43. ISBN 9781138335387.

Stejně tak, jako lidské oko rozlišuje logaritmicky různé úrovně jasu, jsou ještě před kvantizací lineární *RGB* složky transformovány nelineární funkcí pro dosažení požadovaného logaritmického výsledku.⁷⁶ Tato opto-elektrická transformační funkce (dále jen OETF) křivkou se nejčastěji provádí v kameře, která snímá danou scénu lineárně. Prostřednictvím OETF křivky je tato lineární scéna převedena do lidského logaritmického vidění v jasech a stínech.⁷⁷ V případě překročení jasových a tmavých míst lineárního videosignálu dochází k jejich zlomu. OETF křivka v těchto problémových místech také dodává signálu jeho rovnoměrným nárůstem zaoblení, které odpovídá logaritmickému vnímání jasů lidským okem. U jasů signálu je toto zaoblení nazýváno koleno, u stínů pata.



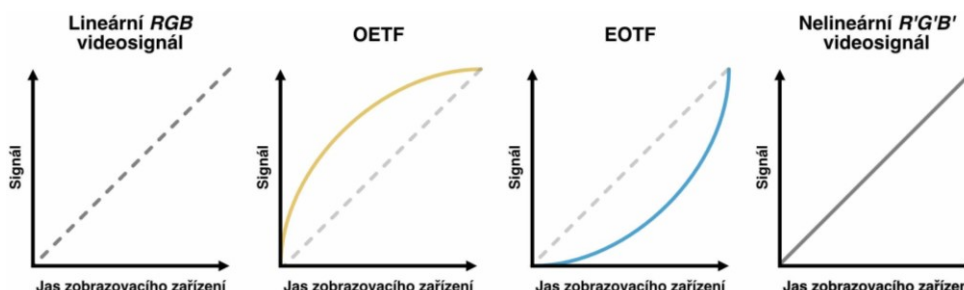
Obrázek 19 Ukázka reálné transformace OETF u kamery Blackmagic Pocket Cinema Camera 6K v 8-bit barevné hloubce videa

Vzhledem k vlastnostem lineárního záznamu snímače záznamového zařízení se rozdíl mezi vstupními hodnotami lineárního signálu a jeho kvantizovanou hodnotou nachází po celé tonální škále rovnoměrně. OETF křivka má sice pozitivní vliv na vnímání tohoto rovnoměrného lineárního rozdílu, avšak zkresluje rozložení odstínů po celé škále. Obrácením této OETF křivky získáme do lineárního zobrazovacího zařízení přesnou reprodukci jasů od černé po bílou. Toto obrácení (konverze) nazýváme elektro-optická transformační funkce (dále EOTF, známe také jako EOCF), je též označovaná jako gamma korekce (též gamma křivka). Dochází k ní pouze v zobrazovacím zařízení, a jejím prostřednictvím dostáváme nelineární hodnoty pixelů $R'G'B'$. Je důležité zmínit, že EOTF křivka není přesně invertovaná, ale přizpůsobuje se danému okolnímu osvětlení, ve kterém se zobrazovací zařízení nachází. Čím je prostředí temnější, tím je nastavení

⁷⁶ VERDULT, Vincent. *Optimal Audio and Video Reproduction at Home: Improving the Listening and Viewing Experience*. 2. vyd. New York: Routledge, 2019, s. 43. ISBN 9781138335387.

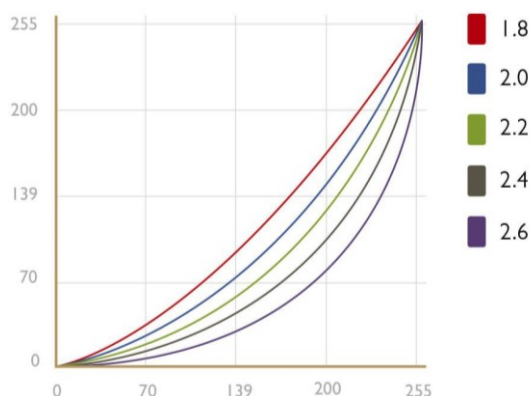
⁷⁷ Recommendation ITU-R BT.2100-2: *Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme exchange* [online]. Ženeva: ITU, 2018 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2100-2-201807-1!!PDF-E.pdf

gamma korekce vyšší.⁷⁸ Souhrnně lze vyjádřit, že lineární primární *RGB* videosignál je transformační funkcí OETF a jeho následnou kvantizací, po které dochází ke gamma korekci (EOTF), konvertován na nelineární *R'G'B'*.⁷⁹



Obrázek 20 Postup aplikování transformační funkce

Označení EOTF gamma křivky lze matematicky vyjádřit pomocí $S=V^{\text{gamma}}$, kdy *S* značí lineární signál nebo tristimulus a *V* značí dříve používanou nelineární stoupající voltáž CRT monitoru.⁸⁰ Zobrazení videosignálu na CRT monitoru by tedy končilo pouze OETF křivkou, a to vzhledem k jeho využívané voltáži.



Obrázek 21 Porovnání strmosti EOTF gamma křivek v 8-bit barevné hloubce videa⁸¹

Vzhledem k dobré adaptaci lidského oka na prostředí se odlišuje nastavení hodnot gamma křivky na daném zobrazovacím zařízení. Tyto hodnoty závisí na prostředí, kde výsledný obraz sledujeme. Gamma křivka při projekci v kině (tmavé prostředí) by měla mít hodnotu 2.6. Při temnějším osvětlení (např. studio či obývací pokoj) je doporučeno u videosignálu

⁷⁸ VERDULT, Vincent. *Optimal Audio and Video Reproduction at Home: Improving the Listening and Viewing Experience*. 2. vyd. New York: Routledge, 2019, s. 43 - 44. ISBN 9781138335387.

⁷⁹ POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 318 - 320. ISBN 978-0-12-391926-7.

⁸⁰ POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 326 - 327. ISBN 978-0-12-391926-7.

⁸¹ What is Gamma?. [obrázek] In: *BenQ* [online]. 6. 9. 2019 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.benq.com/en-my/knowledge-center/knowledge/gamma-monitor.html>

používat hodnotu 2.4 gamma křivky. Pro grafiku, fotografii a světlejší místnosti se zase využívá hodnota gamma křivky 2.2.⁸²



Obrázek 22 Porovnání využití EOTF gamma křivek na obsahu⁸³

4.3 Luma a chroma

Pro přenos barevných nelineárních hodnot pixelů $R'G'B'$ videosignálu jsou nezbytné tři obrazové složky, které se přenáší odděleně. Jedna z těchto složek představuje světlost (luma), další dvě složky (chroma) reprezentují barvu bez ohledu na světlost.⁸⁴ Po transformaci barevných zdrojů $R'G'B'$ na lumu a chromu lze podvzorkovat a snížit data obrazového signálu. Podvzorkování je založeno na principu fungování televizního analogového barevného modelu YUV.

4.3.1 Luma

Jedná se o obrazovou složku, která je tvořena ve stupních šedi. Na lineární R , G a B hodnoty tristimulů je aplikována nelineární transformační funkce OETF a EOTF, dochází tak k vytvoření nelineárních $R'G'B'$ složek, jejichž tonalitou vzniká vnímatelný rozsah videosignálu od bílé po černou – luma. Luma (nelineární) je označována symbolem Y' (nekonstantní jas) nebo Y'_c (konstantní jas). Neurčuje relativní jas, světelnost ani svítivost zobrazovacího zařízení.⁸⁵ Není ani úměrná intenzitě světla.⁸⁶

4.3.2 Chroma

Tato složka je využívána ke snížení obrazových dat, a to prostřednictvím redukce ostrosti barev. První signál Y' (luma) zůstává v jeho plné kvalitě, kvalita druhého a třetího signálu barevných rozdílů $B'-Y'$ (rozdíl mezi nelineární modrou a nelineární lumou, též označováno

⁸² POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 119. ISBN 978-0-12-391926-7.

⁸³ Gamma, what is "higher" and what is "lower"?. [obrázek] In: *AVS Forum* [online]. 30. 1. 2017 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.avsforum.com/threads/gamma-what-is-higher-and-what-is-lower.2732553/>

⁸⁴ POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 122 – 123. ISBN 978-0-12-391926-7.

⁸⁵ Tamtéž, s. 121–122.

⁸⁶ Tamtéž, s. 265.

jako B' minus luma,) a $R'-Y'$ (rozdíl mezi nelineární červenou a nelineární lumou, též označováno jako R' minus luma) je po gamma korekci snižována. Nelineární zelená G' se přímo nepřenáší, ale pouze se dopočítává z jasové složky Y' . Úbytkem signálu (podvzorkováním) tak můžeme redukovat details barevných rozdílů. Pro lidské oko je vhodnější ponechat tonalitu na úkor barev.⁸⁷

4.3.3 Typy přenosu videosignálu

Přenos kompozitního analogového videosignálu zavedl standard pro rozdělení jasové a barevné složky do jednoho kanálu prostřednictvím barevného modelu YUV nebo YQI. Přenos analogového komponentního videosignálu byl založen na rozdělení jasové a barevné složky do tří samostatných kanálů. Digitální složky videosignálu jsou opět přenášeny společně v jednom kanálu, a to shodně jako kdysi u kompozitního videa. U analogového a digitálního videosignálu se rozlišuje několik typů jeho přenosu, kdy každý typ využívá tři složek videosignálu (luma a chroma).

4.3.3.1 $Y'P_B P_R$

Tento analogový komponentní videosignál je rozdělený na tři signály. Zelený nebo bílý kabel Y' nese lumu, modrý P_B nese barevný rozdíl mezi modrou a lumou, červený P_R nese barevný rozdíl mezi červenou a lumou. Barevné rozdíly jsou analogově filtrovány na polovinu šířky jasového pásma. Tento systém využívá pouze analogová technika.⁸⁸

4.3.3.2 $Y'C_B C_R$

Jedná se o nejrozšířenější typ barevného $R'G'B'$ digitálního videosignálu v současnosti. Není rozdělen analogově na tři signály, je sloučený stejně jako kompozitní digitální videosignál. Luma nese označení Y' , barevný rozdíl modré označujeme C_B a C_R zase barevný rozdíl červené. Využívá se u všech digitálních SDR videozařizováních. U tohoto typu můžeme provádět podvzorkování za účelem snížení potřebných obrazových dat.⁸⁹

4.3.3.3 $Y'_c C_{BC} C_{RC}$

Typ $Y'_c C_{BC} C_{RC}$ se používá pro nejpřesnější uchování informací o jasu videosignálu, a dále tam, kde se očekává zlepšená efektivita kódování pro doručení videosignálu

⁸⁷ POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 123. ISBN 978-0-12-391926-7.

⁸⁸ Tamtéž.

⁸⁹ Tamtéž.

na zobrazovací zařízení. Luma se vypočítává z lineárních RGB složek, poté je transformována gamma korekcí na nelineární $R'G'B'$ videosignál, tímto procesem se tak získává více světelných informací, které jsou konstantní. Tento typ je založen na stejném principu jako $Y'CB'CR$ a jeho podvzorkování je taktéž umožněno.⁹⁰

4.3.3.4 $ICTCP$

Videosignál tohoto typu je založený na lidském vizuálním systému. Izoluje jasovou intenzitu od barevných rozdílových kanálů, a může být vynikajícím prostředkem pro provádění mapování objemu barev.⁹¹ $ICTCP$ funguje také na stejném principu jako $Y'CB'CR$, a vytváří tak jeho přímého nástupce v oblasti HDR videosignálu.⁹²

4.3.4 Podvzorkování barevného modelu na příkladu $Y'CB'CR$

Podvzorkování videosignálu uvádí poměr luma ku ztrátě barevných rozdílů, kdy jeho účelem je snížení datového objemu obrazu. Vzorkovací zápis se označuje třemi nebo čtyřmi číslicemi, stejně jako jsou jeho poměry. První číslice značí horizontální i vertikální Y' lumu (jasovou složku). Další dvě čísla C_B a C_R (signály barevného rozdílu) jsou v horizontálním i vertikálním směru podvzorkovány stejnou rychlostí jako Y' . Pokud se zde zobrazí čtvrtá číslice, značí Alfa kanál, který slouží pro klíčování barev, a má stejnou hodnotu jako jasová složka Y' .⁹³ Všechny typy přenosu videosignálu se vzorkují i podvzorkují naprosto stejným způsobem.

4.3.4.1 Vzorkování 4:4:4

Vzorkování je označeno $R'G'B'$ 4:4:4. Každý jeden nelineární pixel $R'G'B'$ tak může být bezztrátově transformován do $Y'CB'CR$. Luma Y' je plně zachována, není patrná žádná degradace ani u barevného rozdílu C_B nebo C_R . Využíváním plného vzorkování tak dochází k dokonalé reprodukci barev.⁹⁴ Během natáčení se toto vzorkování využívá hlavně na VFX záběry, kdy je potřeba získat co nejvíce barevných dat pro postprodukcí. Toto vzorkování

⁹⁰ Recommendation ITU-R BT.2020-2: Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange [online]. Ženeva: ITU, 2015 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2020-2-201510-1!!PDF-E.pdf

⁹¹ Ultra HD Forum Guidelines [online]. Fremont: Ultra HD Forum, 2022, s. 119 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://ultrahdforum.org/wp-content/uploads/UHD-Guidelines-V2.6a-NAB2022-c.pdf>

⁹² Tamtéž, s. 41.

⁹³ POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 124. ISBN 978-0-12-391926-7.

⁹⁴ POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 124. ISBN 978-0-12-391926-7.

se nachází nejčastěji u natočeného materiálu, kdy valná většina profesionálních kamer (ARRI, RED, Panavision, Blackmagic Design...) zaznamenává videosignál do kódovacího bezztrátového formátu ProRes nebo DNxHD. S tímto vzorkováním se lze setkat především v profesionální oblasti.

4.3.4.2 Podvzorkování 4:2:2

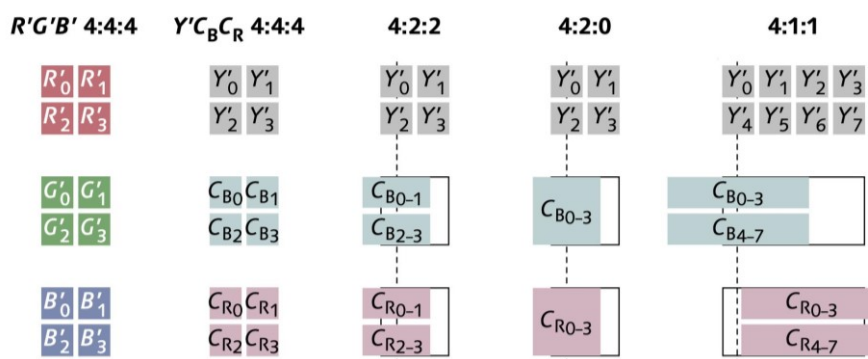
Signály rozdílu barev C_B a C_R jsou společně podvzorkovány poloviční rychlostí pouze v horizontálním směru. Luma Y' zůstává opět nedotčená. Oproti vzorkování 4:4:4 se zde provádí snížení obrazových dat v poměru 1,5:1.⁹⁵ V současné době se plně využívá v kódovacích formátech H.265 (HEVC) nebo v postprodukci ProRes (HQ nebo LT).

4.3.4.3 Podvzorkování 4:2:0

Jedná se o nejrozšířenější snížení obrazových dat používané v H.264 formátu, na Blu-ray discích, JPEG nebo PAL i NTSC. Hodnota luma Y' stále zůstává stejná, signály barevného rozdílu jsou efektivně rozděleny na polovinu v horizontálním i vertikálním směru. Podvzorkováním zde získáváme 2:1 ztrátu barev.⁹⁶

4.3.4.4 Podvzorkování 4:1:1

Nastává zde stejná efektivní ztráta obrazových dat jako u podvzorkování 4:2:0. Dochází ke čtvrtinovému podvzorkování C_B a C_R , a to pouze v horizontálním směru. Využívá se minimálně, protože vnímaný obraz je na hranici značného ovlivnění své kvality.⁹⁷ Dříve se využívalo při NSTC nebo PAL modelech na VHS videokazetách.



Obrázek 23 Vzorkování a podvzorkování modelu $Y'CbCr$ ⁹⁸

⁹⁵ TOOMS, Michael S. *Colour Reproduction in Electronic Imaging Systems: Photography, Television, Cinematography*. Chichester: Wiley, 2016, s. 283. ISBN 978-1-119-02176-6.

⁹⁶ Tamtéž.

⁹⁷ Tamtéž.

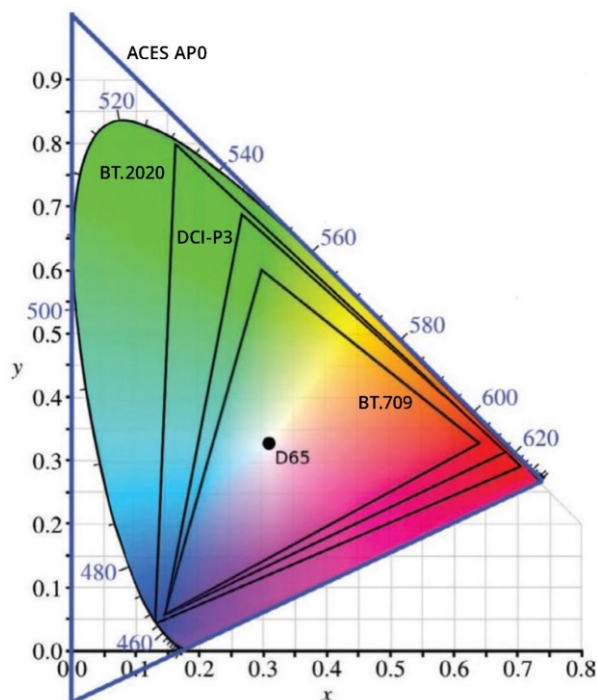
⁹⁸ POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces* [obrázek] 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 124. ISBN 978-0-12-391926-7.

5 BAREVNÉ PROSTORY V KINEMATOGRAFII

V RGB barevném modelu vznikají barevné prostory míšením viditelných vlnových délek na sebe. Každý z barevných prostorů má uvnitř sebe barevný rozsah (gamut), který je tvořen primárními barvami lineárních R , G a B . Svým rozložením tak vytváří trojúhelník v Chromatickém diagramu CIE 1931, kdy každá z těchto barev je uvedena v hodnotách x a y . Barevných prostorů i gamutů může být nespočet. Jejich využití je možné v jakémkoliv odvětví, kde se pracuje s digitální verzí barev. Tyto prostory mají jak své vlastní názvy, tak i matematická označení. Například ve fotografii se nejčastěji využívají barevné prostory označené sRGB, AdobeRGB nebo ProPhoto RGB. Zato v kinematografii jsou to BT.709 nebo BT.2020 a další níže popsane.

U barevného prostoru jde o správnou reprodukci barev vhodným barevným profilováním na fyzickém zobrazovacím zařízení tak, jak je lidské oko schopné vnímat barvy. Při nedodržení náležitě transformace barevného prostoru a jeho rozsahu barev dochází k barevné i tonální degradaci daného digitálního média. Tyto příčiny degradace se mohou lišit od média k médiu. Může se jednat o odlišnou saturaci či desaturaci, jiné barevné odstíny, snížení kontrastu nebo zesvětlení či ztmavení signálu. Jejich variant tak může být mnoho.

V kinematografii má každé fyzické zobrazovací zařízení také svůj vlastní barevný prostor i gamut. Nejčastěji používanými barevnými prostory pro kinematografii jsou BT.601, BT.709, BT.2020, BT.2100, určené hlavně pro digitální obraz, a dále DCI-P3 s ACES AP0, primárně určené pro promítání v kinech. Volba vhodného zařízení pro pozorování je tak velice důležitá, stejně jako jeho nastavení. V případě zobrazování digitálního videosignálu na fyzickém zobrazovacím zařízení platí, že čím je větší barevný prostor a gamut na tomto zařízení, tím je na něm také bez problému možné zobrazit barevné prostory o menších velikostech.



Obrázek 24 Porovnání barevných prostorů BT.709, BT.2020, DCI-P3 a ACES AP0 v Chromatickém diagramu CIE 1931 $[x, y]$ ⁹⁹

Každý výrobce záznamového zařízení využívá na svém zařízení nejčastěji i svůj vlastní barevný prostor. U profesionálních videokamer se používá záznam daleko většího barevného rozsahu prostoru než v případě níže zmiňovaných kinematografických prostorů. Prostřednictvím tohoto záznamu většího barevného rozsahu je tak možné provádět více možností úpravy videosignálu v barevné postprodukci. Takto natočený záznam z kamery je již přímo logaritmický nelineární $R'G'B'$ videosignál, který je třeba, a to z důvodu správné barevné korekce, převést do požadovaného výstupního barevného prostoru.

V dnešní době je možné, i přes níže uváděné doporučující zásady ITU-R, vytvořit videosignál v jiném než uváděném barevném prostoru i za využití rozdílného rozlišení pixelů. Mnohdy není tento videosignál omezen televizním vysíláním či přehrávačem, pro které jsou tyto standardy ITU-R určeny. Lze tak například využít potenciál barevného prostoru BT.709 i při rozlišení 3840 x 2160 pixelů a vyšší fps. Takto upravený videosignál je tak nejčastěji použitelný na webová rozhraní (YouTube, Vimeo), sociální sítě a jiná digitální média.¹⁰⁰

⁹⁹ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. [obrázek] 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 137. ISBN 978-1138603868.

¹⁰⁰ *DaVinci Resolve 18.1: Reference Manual* [online]. Blackmagic Design, 2022, s. 3899–3903 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://documents.blackmagicdesign.com/UserManuals/DaVinci_Resolve_18_Reference_Manual.pdf?_v=1668153611000

5.1 BT.601

Tento barevný prostor SDTV byl poprvé představen organizací ITU-R v roce 1982, dnes má již 7. revizi (BT.601-7) vydanou v roce 2011. Je znám dále pod názvy ITU-R.601 nebo také Rec.601. Byl primárně využíván na kódování analogového komponentního televizního videosignálu o poměru stran 4:3 na digitální $Y'CB'CR$ 4:2:2, též je využíván u DVD přehrávačů. Komponentní analogový prokládaný signál má dva standardy, a to NTSC (systém 525 řádků s rozlišením až 720×480 pixelů¹⁰¹) a PAL nebo SECAM (systém 625 řádků s rozlišením maximálně 720×576 pixelů¹⁰²). Každý tento standard má odlišné primární barevné hodnoty x a y v Chromatickém diagramu CIE 1931. Od roku 1995 začal být také využíván dnešní televizní standard poměru stran 16:9. Kvantizace tohoto barevného prostoru podporovala nejen 8-bit, ale také již i 10-bit barevnou hloubku, která nebyla v té době tolik využívána.¹⁰³

Tabulka 2 Charakteristika barevného gamutu standardů NSTC a PAL nebo SECAM¹⁰⁴

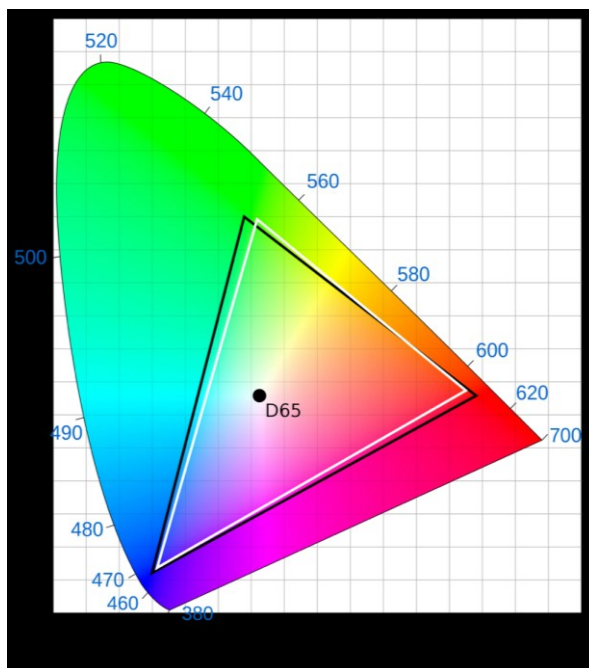
Parametr	Systém 525 řádků – NSTC		Systém 625 řádků – PAL nebo SECAM	
	Hodnota x	Hodnota y	Hodnota x	Hodnota y
Souřadnice chromatičnosti (CIE 1931)				
R (primární červená)	0.630	0.340	0.640	0.330
G (primární zelená)	0.310	0.595	0.290	0.600
B (primární modrá)	0.155	0.070	0.150	0.060
D_{65} (bílý bod)	0.3127	0.3290	0.3127	0.3290

¹⁰¹ VERDULT, Vincent. *Optimal Audio and Video Reproduction at Home: Improving the Listening and Viewing Experience*. 2. vyd. New York: Routledge, 2019, s. 123. ISBN 9781138335387.

¹⁰² Tamtéž

¹⁰³ *Recommendation ITU-R BT.601-7: Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide screen 16:9 aspect ratios* [online]. Ženeva: ITU, 2011 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.601-7-201103-I!!PDF-E.pdf

¹⁰⁴ Tamtéž



Obrázek 25 Barevný prostor BT.601 a jeho standardy NSTC (bílý) a PAL nebo SECAM (černý) v Chromatickém diagramu CIE 1931 $[x, y]$ ¹⁰⁵

5.2 BT.709

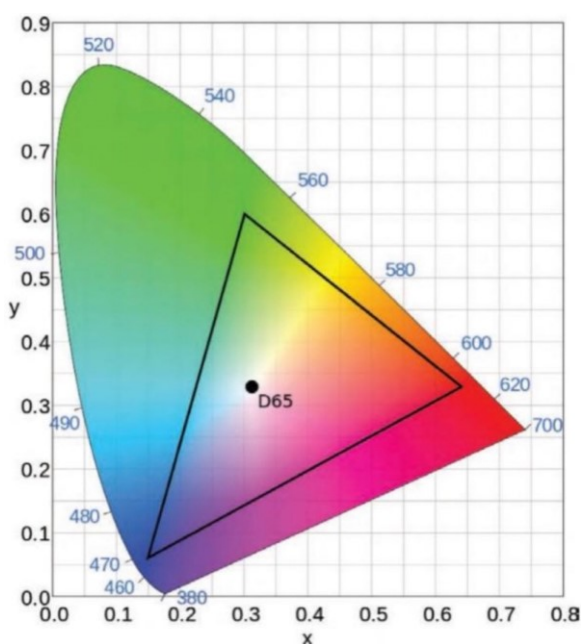
Jedná se o barevný prostor, který je též nazýván jako Rec.709 nebo ITU-R.709. Byl vytvořen pro parametry televizního vysílání HDTV (High Definition Television) a Blu-ray o maximálním rozlišení 1920 x 1080 pixelů, tj. poměr stran 16:9. Tyto parametry zůstávají nezávislé vůči měnící se rychlosti obrazu o hodnotách 60 Hz, 50 Hz, 30 Hz, 25 Hz a 24 Hz (shodné s fps). Vzhledem k této vlastnosti tak může být videosignál přehráván v jakémkoli regionu na světě, na rozdíl od NTSC a PAL, které jsou závislé na odlišné frekvenci (Hz) zdroje. Obraz tak může být progresivní nebo prokládaný. V roce 2015 byla vydána BT.709-6, která je již šestou revizí tohoto SDR prostoru pocházejícího z roku 1993. Stejně jako jeho předchůdce BT.601 i tento barevný prostor podporuje kvantizaci 8-bit a 10-bit barevné hloubky. Barevná hloubka 10-bit je v současné době často používána, a kódování tak využívá $Y'CbCr$ 4:4:4 (kromě Blu-ray, který je limitován na 4:2:0).¹⁰⁶

¹⁰⁵ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. [obrázek] 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 49. ISBN 978-1138603868.

¹⁰⁶ *Recommendation ITU-R BT.709-6: Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange* [online]. Ženeva: ITU, 2015 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.709-6-201506-I!!PDF-E.pdf

Tabulka 3 Charakteristika barevného gamutu prostoru BT.709¹⁰⁷

Souřadnice chromatičnosti (CIE 1931)	Hodnota x	Hodnota y
R (primární červená)	0.640	0.330
G (primární zelená)	0.300	0.600
B (primární modrá)	0.150	0.060
D_{65} (bílý bod)	0.3127	0.3290

Obrázek 26 Barevný prostor BT.709 v Chromatickém diagramu CIE 1931 $[x, y]$ ¹⁰⁸

5.2.1 Referenční pozorovací podmínky barevného prostoru BT.709

Dokonalého referenčního obrazu na zobrazovacím zařízení, které má barevný prostor BT.709, dosáhneme pozorovací vzdáleností, která je 3,2násobkem výšky tohoto zařízení při horizontálním pozorovacím úhlu 31° . Bílý bod D_{65} (v některých regionech D_{93}) by měl dosahovat jasové úrovně $100 \text{ nitů} = 100 \text{ cd/m}^2$. Poměr jasu na pozadí za zobrazovacím zařízením by měl dosahovat 10% hodnoty bílého bodu, tj. 10 nitů.¹⁰⁹ Transformační funkce zobrazovacího zařízení by měla být EOTF gamma křivka dle normy ITU-R BT.1886,

¹⁰⁷ Recommendation ITU-R BT.709-6: Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange [online]. Ženeva: ITU, 2015 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.709-6-201506-I!!PDF-E.pdf

¹⁰⁸ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. [obrázek] 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 49. ISBN 978-1138603868.

¹⁰⁹ Recommendation ITU-R BT.2035: A reference viewing environment for evaluation of HDTV program material or completed programmes [online]. Ženeva: ITU, 2013 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2035-0-201307-I!!PDF-E.pdf

kteřá se rovná 2.4 gamma křivce a také stejnému zobrazení, jaké by bylo možné na CRT displejích.¹¹⁰ Tyto displeje byly mnoho let používány jako referenční, a to pro jejich konzistentní zobrazování i po letech užívání. S příchodem nových zobrazovacích technologií se stávaly CRT displeje nedostupnými, byly tak nahrazovány novějšími technologiemi (LCD, OLED...).

5.3 BT.2020

V roce 2012 vychází nová SDR norma televizního vysílání, barevný prostor BT.2020, známý také jako Rec.2020 nebo ITU-R.2020. V současné době má druhou revizi BT.2020-2, která byla vydána roku 2015. S rozlišením 3840×2160 pixelů a 7680×4320 pixelů jsou tyto Ultra-High Definition Television (dále jen UHD TV) parametry určeny nejen pro digitální televizní vysílání a veřejné sledování publikem, ale i pro nevysílací odvětví (počítačovou grafiku, tiskoviny nebo lékařské aplikace). UHD TV podporuje také rozlišení HDTV. Pro svou schopnost vysokého rozlišení poskytuje divákovi vylepšený vizuální zážitek, neboť tak pokrývá větší části zorného pole lidského oka. Širší barevný gamut tohoto barevného prostoru se přibližuje spektru, které je viditelné lidským zrakem. U tohoto barevného prostoru již není podporován prokládaný obraz, pracuje se tak pouze s progresivním skenem obrazu ve frekvencích 120 Hz, 100 Hz, 60 Hz, 50 Hz, 30 Hz, 25 Hz a 24 Hz. U UHD TV, stejně jako HDTV, zůstal poměr stran 16:9. Bitová hloubka videosignálu se zde posunuje na 10-bit a rozšiřuje až na 12-bit. Vzorkování $Y'CB'CR$ 4:4:4 (primárně většina SDTV a HDTV prostředí, Ultra HD Blu-ray stále pouze 4:2:0) nebo $Y'CBCRC$ 4:4:4 je maximální kódování videosignálu v tomto barevném prostoru.¹¹¹

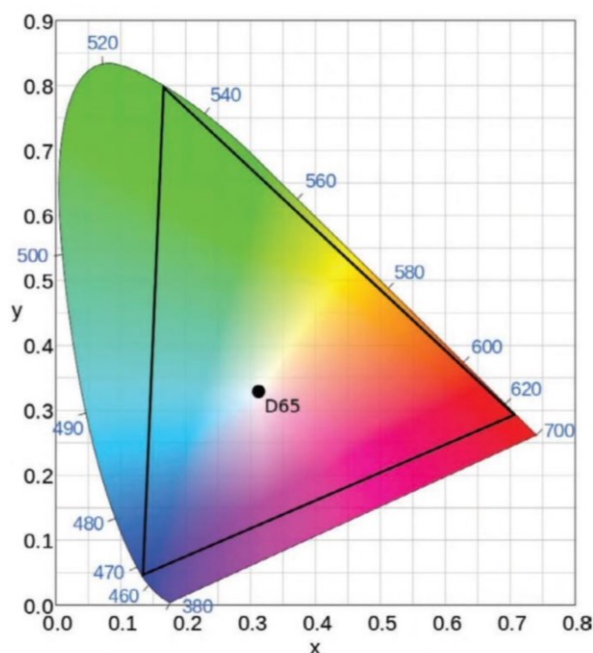
Tabulka 4 Charakteristika barevného gamutu prostoru BT.2020¹¹²

Souřadnice chromatičnosti (CIE 1931)	Hodnota x	Hodnota y
R (primární červená)	0.708	0.292
G (primární zelená)	0.170	0.797
B (primární modrá)	0.131	0.046
D_{65} (bílý bod)	0.3127	0.3290

¹¹⁰ Recommendation ITU-R BT.1886: Reference electro-optical transfer function for flat panel displays used in HDTV studio production [online]. Ženeva: ITU, 2011 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.1886-0-201103-I!!PDF-E.pdf

¹¹¹ Recommendation ITU-R BT.2020-2: Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange [online]. Ženeva: ITU, 2015 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2020-2-201510-I!!PDF-E.pdf

¹¹² Tamtéž



Obrázek 27 Barevný prostor BT.2020
v Chromatickém diagramu CIE 1931 $[x, y]$ ¹¹³

5.3.1 Referenční pozorovací podmínky barevného prostoru BT.2020

Referenční pozorovací podmínky v tomto barevném prostoru jsou shodné s těmi, které jsou u prostoru BT.709, jen s rozdílem navýšení počtu pixelů. Při rozlišení 3840×2160 pixelů se udávaná doporučená pozorovací vzdálenost zkracuje na 1,6 až 3,2násobek výšky zobrazovacího zařízení.¹¹⁴ U rozlišení 7680×4320 pixelů se pozorovací vzdálenost redukuje na 0,8 až 3,2násobek výšky. EOTF referenční gamma křivka zůstává stejná jako u HDTV, tj. BT.1886.¹¹⁵ Nutné dodat, že v době realizace této bakalářské práce dosud neexistuje žádné zobrazovací zařízení, jehož displej by byl schopný zobrazit plně barevný gamut BT.2020. Dosavadní zařízení tak využívají svého potenciálu, aby pouze mapovali gamut k jeho potřebným charakteristikám, přesto jsou ale považována za zobrazovací zařízení s barevným prostorem BT.2020.¹¹⁶

¹¹³ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. [obrázek] 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 50. ISBN 978-1138603868.

¹¹⁴ *Recommendation ITU-R BT.2100-2: Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme exchange* [online]. Ženeva: ITU, 2018 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2100-2-201807-I!!PDF-E.pdf

¹¹⁵ *Recommendation ITU-R BT.2035: A reference viewing environment for evaluation of HDTV program material or completed programmes* [online]. Ženeva: ITU, 2013 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2035-0-201307-I!!PDF-E.pdf

¹¹⁶ *Ultra HD Forum Guidelines* [online]. Fremont: Ultra HD Forum, 2022, s. 30 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://ultrahdforum.org/wp-content/uploads/UHD-Guidelines-V2.6a-NAB2022-c.pdf>

5.4 BT.2100

Tento barevný prostor, o úplně stejných vlastnostech jako BT.2020, přináší parametry High Dynamic Range TV (dále jen HDRTV) pro využití jasnějších zobrazovacích zařízení se světlejší bílou v obrazu a vylepšenými detaily v tmavých oblastech. Tyto parametry počítají s širším barevným gamutem (Wide Color Gamut, dále jen WCG), schopností vyššího kontrastu, kdy výsledkem je reálnější pocit z obrazu. ITU-R upřesňuje, že je tento barevný prostor postavený na principu nelineární transformační funkce HLG nebo percepční kvantizace (Perceptual Quantization, dále jen PQ¹¹⁷), která nahrazuje klasickou gamma křivku v zobrazeném HDR. HLG je na rozdíl od PQ zpětně kompatibilní s gamma křivkou BT.1886. Tento barevný prostor pochází z roku 2016, bývá označován také jako Rec.2100 nebo ITU-R.2100 a jeho teprve druhá revize BT.2100-2 přišla v roce 2018. Pro standard HDRTV je nutné, aby bylo zobrazovací zařízení schopno zobrazit minimálně 90% barev z barevného prostoru DCI-P3,¹¹⁸ proto většina filmů na UltraHD Blu-ray discích je prezentována v tomto masterovacím formátu pro kina.¹¹⁹

5.4.1 HLG

Tato HDR transformační funkce přenosu, celým názvem Hybrid Log-Gamma, byla vytvořena firmami BBC a HNK. Je také označena jako OETF křivka a navržena tak, aby poskytovala HDR při zachování určitého stupně zpětné kompatibility se zobrazovacími zařízeními BT.2020 v SDR. HLG funguje na principu kvantizace 10-bit barevné hloubky. Prostřednictvím hodnot jasu, které jsou zaznamenány v pixelech, by mělo docházet k identické reprezentaci dané snímané scény na jakémkoliv zobrazovacím zařízení, a současně tak kompenzovat zobrazovací schopnosti (rozdílná špičková svítivost jasu) daného zařízení.¹²⁰

¹¹⁷ *Ultra HD Forum Guidelines* [online]. Fremont: Ultra HD Forum, 2022, s. 30 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://ultrahdforum.org/wp-content/uploads/UHD-Guidelines-V2.6a-NAB2022-c.pdf>

¹¹⁸ *Recommendation ITU-R BT.2100-2: Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme exchange* [online]. Ženeva: ITU, 2018 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2100-2-201807-I!!PDF-E.pdf

¹¹⁹ VERDULT, Vincent. *Optimal Audio and Video Reproduction at Home: Improving the Listening and Viewing Experience*. 2. vyd. New York: Routledge, 2019, s. 170. ISBN 9781138335387.

¹²⁰ *Ultra HD Forum Guidelines* [online]. Fremont: Ultra HD Forum, 2022, s. 31-32 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://ultrahdforum.org/wp-content/uploads/UHD-Guidelines-V2.6a-NAB2022-c.pdf>

5.4.2 HDR10

Jedná se o další HDR formát barevného prostoru BT.2100. Stejně jako HLG je i tento založen na stejné kolorimetrii prostoru BT.2020. Tento WCG používá transformační funkci PQ a jeho bitová barevná hloubka je 10-bit. Na rozdíl od HLG není zpětně kompatibilní s barevným prostorem BT.2020 ani s referenční gamma křivkou BT.1886, či žádnou další gamma křivkou. V dnešní době se jedná o nejrozšířenější a nejvíce používaný HDR formát videosignálu.¹²¹

5.4.2.1 HDR10+

V srpnu roku 2017 vzniklé partnerství americké filmové produkční společnosti 20th Century Fox a dvou technologických gigantů, Samsung a Panasonic, přináší vylepšenou funkci HDR10 nazývanou HDR10+. Kromě stejných specifikací poskytuje navíc dynamická metadata, které dopodrobna popisují každou zobrazovanou scénu, a zlepšují tak její tonální i barevné podání s uchováním uměleckého záměru. Výhodou tohoto WCG je bezplatný formát, takže užívání je dostupné pro kohokoliv.¹²²

5.4.3 Dolby Vision

Firma Dolby přichází se svým řešením WCG v podobě Dolby Vision. Díky dynamickým metadatům je tento HDR formát schopen zachovat umělecký záměr napříč širokou škálou distribučních systémů i spotřebitelských zobrazovacích zařízení. Odpovědí na Dolby Vision je volně dostupný HDR10+, který však v pár ohledech zaostává. Dolby Vision je také postaven na transformaci PQ, která díky své optimalizaci EOTF křivky využívá 10-bit i 12-bit barevnou hloubku. Kromě dynamických metadat, které jsou ukládány do každého snímku, využívá také technologie mapování barev, která podporuje zobrazení libovolné škály barev v rámci barevného profilu BT.2100. Následně je Dolby Vision analyzován a upraven na odpovídající barvy zobrazovacího zařízení. Tento HDR formát podporuje jak signál $Y'CB_C R$, tak i vylepšený IC_TCP , který využívá při vyšších špičkových svítivostech jasů.¹²³

¹²¹ *Ultra HD Forum Guidelines* [online]. Fremont: Ultra HD Forum, 2022, s. 34 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://ultrahdforum.org/wp-content/uploads/UHD-Guidelines-V2.6a-NAB2022-c.pdf>

¹²² *20th Century Fox, Panasonic and Samsung Forge New Partnership to Deliver Best Possible Viewing Experience with HDR10+ Technology* [online]. Berlín, 2017 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://news.panasonic.com/global/press/data/2017/08/en170828-6/en170828-6-1.pdf>

¹²³ *Ultra HD Forum Guidelines* [online]. Fremont: Ultra HD Forum, 2022, s. 117-119 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://ultrahdforum.org/wp-content/uploads/UHD-Guidelines-V2.6a-NAB2022-c.pdf>

5.4.4 Referenční pozorovací podmínky barevného prostoru BT.2100

Ideální pozorovací vzdáleností pro tento barevný prostor je stejná maximální vzdálenost od zobrazovacího zařízení jako u BT.2020. Zobrazovací zařízení však musí být obklopeno neutrálně šedou barvou při jasu podsvícení 5 cd/m^2 , v teplotě 6500 K. Špička jasu zobrazovacího zařízení by se měla rovnat $1000 \text{ cd/m}^2 = 1000 \text{ nitů}$.¹²⁴

5.5 DCI-P3

V roce 2000 definovalo společenství pro standardizaci systému digitálních kin Digital Cinema Initiative (dále jen DCI) barevný prostor DCI-P3 jako standard SMPTE s označením ST 428-1¹²⁵, jehož poslední revize byla v roce 2019. Využívá se primárně v digitálním kině pro promítání z projektorů a svými specifikacemi se má přibližovat stejným parametrům jako promítání 35mm kinofilmu. Rozdílem oproti BT.709 nebo BT.2020 není jen jeho využívání nebo širší barevný gamut, ale také posunutí jeho bílého referenčního bodu na 6100 K, aby se co nejvíce přiblížil 35mm filmu.¹²⁶ S dnešními rozšiřujícími se zobrazovacími schopnostmi se i tak DCI-P3 dostává mimo plátno na zobrazovací zařízení. V roce 2010 je vydán standard ST 432-1, který určuje referenční bod na displejích jako D_{61} .¹²⁷ Při standardizaci tohoto prostoru bylo zamýšleno využít barevný prostor, jehož užití bude možné i v horizontu nadcházejících let. Z tohoto důvodu jsou všechna barevná data pro jejich dokonalé zobrazení kódována do XYZ hodnot tristimulů. Všechny digitální mastery (finální podoby) filmů pro kina jsou tvořeny v tomto barevném prostoru, takže nedochází k převodům, které by vedly k barevným rozdílům.¹²⁸ Využití těchto masterů připadá i na jejich prezentaci na UHD Blu-ray, kdy BT.2100 má podmínku zobrazování 90% barev tohoto barevného prostoru.

¹²⁴ Recommendation ITU-R BT.2100-2: Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme exchange [online]. Ženeva: ITU, 2018 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2100-2-201807-I!!PDF-E.pdf

¹²⁵ POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 295. ISBN 978-0-12-391926-7.

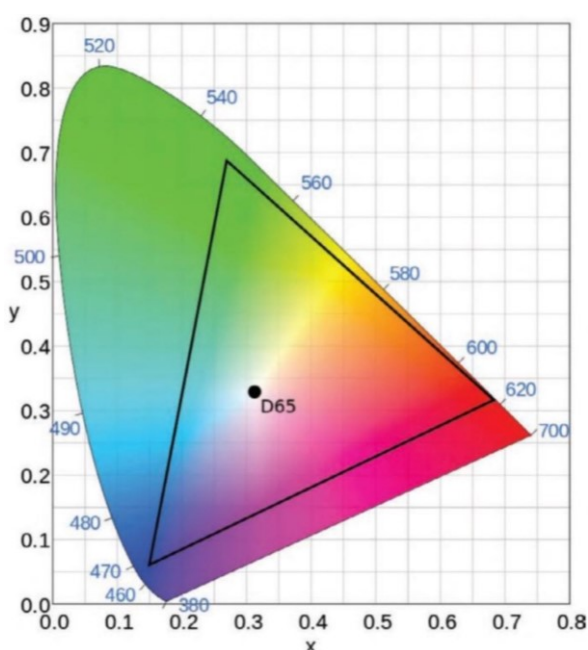
¹²⁶ POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 295. ISBN 978-0-12-391926-7.

¹²⁷ ST 428-1:2019 - SMPTE Standard: D-Cinema Distribution Master — Image Characteristics [online]. SMPTE, 2019 [cit. 2023-01-25]. ISBN 978-1-68303-171-0. Ke stažení dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8709077>

¹²⁸ POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 295 - 296. ISBN 978-0-12-391926-7.

Tabulka 5 Charakteristika barevného gamutu prostoru DCI-P3¹²⁹

Souřadnice chromatičnosti (CIE 1931)	Hodnota x	Hodnota y
R (primární červená)	0.680	0.320
G (primární zelená)	0.265	0.690
B (primární modrá)	0.150	0.060
D_{65} (bílý bod)	0.314	0.351
D_{65} (bílý bod)	0.3127	0.3290



Obrázek 28 Barevný prostor DCI-P3
v Chromatickém diagramu CIE 1931 $[x, y]$ ¹³⁰

DCI také určila přesné parametry pro dodávání digitálních masterů filmů (Digital Cinema Delivery Master, dále jen DCDM) do digitálních kin, kdy není možné volit jiné formáty jako v případě BT.709 a ostatních prostorů. Tento DCDM zahrnuje obraz, zvuk i titulky. Do kin je pak distribuován jako balík Digital Cinema Package (dále jen DCP) obsahující tyto tři složky zašifrovaného do souboru MXF. Každý obrazový snímek je tak komprimovaný do formátu JPEG 2000 s maximálním rozlišením pro 2K Master 2024 x 1080 pixelů nebo 4K Master 4096 x 2160 pixelů. Mastery s rozlišením 2K mohou

¹²⁹ POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 295. ISBN 978-0-12-391926-7.

¹³⁰ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. [obrázek] 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 51. ISBN 978-1138603868.

mít 24, 25, 30, 48, 50 nebo 60 fps, s rozlišením 4K pouze jenom 24, 25 nebo 30 fps.¹³¹ Transformační funkce je v tomto případě rozdílná. Primární lineární *RGB* hodnoty transformuje OETF 2.6 gamma křivka na nelineární hodnoty *R'G'B'* pixelů, které se poté převedou na *X'Y'Z'* hodnoty (také nelineární), a jsou zároveň kvantizovány na 12-bit barevnou hloubku. Tyto hodnoty se pomocí inverzní EOTF 2.6 gamma křivky v projektoru převedou na lineární *XYZ* hodnoty.¹³²

5.5.1 Referenční pozorovací podmínky barevného prostoru DCI-P3

Pro dokonalé pozorovací podmínky při promítání DCI-P3 je nutné být v temné místnosti, ve které by měla být maximální okolní světelná úroveň 0,01 nit. Referenční xenonový projektor o svítivosti 48 nitů by měl promítat na promítací plátno o poměru stran 1,85:1 nebo 2,39:1 s černým maskováním, které je závislé na poměru stran promítaného materiálu. Ideální pozorovací vzdálenost při konstantní výšce plátna a variabilitě poměru stran prezentovaného obsahu je dána 1,5 až 3,5násobkem této výšky plátna. V případě konstantní šířky promítacího plátna a variabilitě poměru stran promítaného obsahu je ideální pozorovací vzdálenost rovná celkové výšce promítacího plátna. Referenční projektor tak DCP promítá s EOTF 2.6 gamma křivkou.¹³³

5.6 ACES AP0

S cílem dosáhnout nového barevného standardu a jeho dlouhodobého využití byl v roce 2012 vytvořen pod dohledem profesionálů z praxe a samotnou Akademií filmového umění a věd nejnovější a nejšířší barevný profil systému Academy Color Encoding System (dále jen ACES). Šířka gamutu tohoto prostoru jde přes celý spektrální lokus Chromatického diagramu CIE 1931 a přesahuje tak viditelné spektrum lidského oka. Kvantizací dosahuje až na 16-bit barevnou hloubku, pomocí které je schopný zachytit až 30 clon dynamického rozsahu. ACES AP0 má určený referenční bílý bod D₆₀ na 6000 K.¹³⁴

¹³¹ *Digital Cinema System Specification 1.4.2* [online]. Digital Cinema Initiatives, LLC, 2022, s. 21 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://dcss.dcinemovies.com/0c0cff34d231b516cb89ae3fad352d5cf37a9515/dcss.pdf>

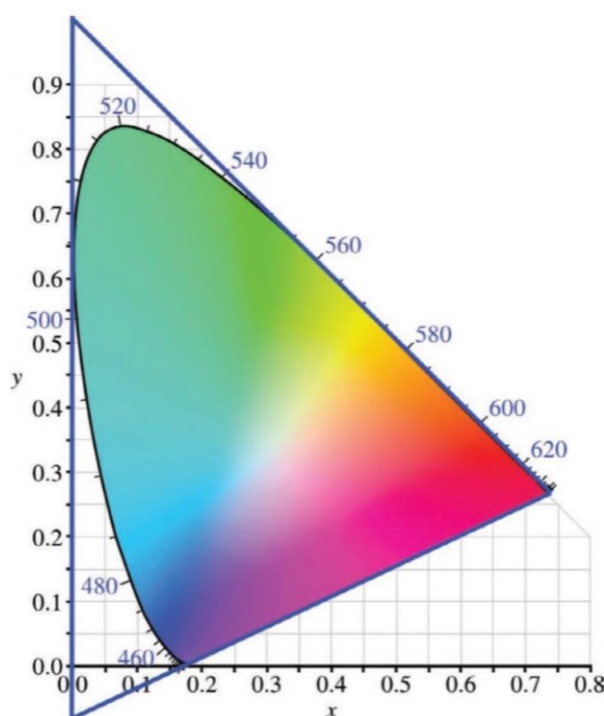
¹³² *RP 431-2:2011 - SMPTE Recommended Practice: D-Cinema Quality — Reference Projector and Environment* [online]. SMPTE, 2011 [cit. 2023-01-25]. ISBN 978-1-61482-243-1. Ke stažení dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7290729>

¹³³ Tamtéž.

¹³⁴ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 50–51. ISBN 978-1138603868.

Tabulka 6 Charakteristika barevného gamutu prostoru ACES AP0¹³⁵

Souřadnice chromatičnosti (CIE 1931)	Hodnota x	Hodnota y
R (primární červená)	0.734	0.265
G (primární zelená)	0.000	1.000
B (primární modrá)	0.001	-0.077
D ₆₀ (bílý bod)	0.3216	0.33767

Obrázek 29 Barevný prostor ACES AP0
v Chromatickém diagramu CIE 1931 $[x, y]$ ¹³⁶

Standardizovaný SMPTE systém ACES, využívající tento barevný prostor, se používá na správu barev digitálního obrazu od produkce až po mastering či případnou archivaci daného filmu. Využívá se také k usnadnění předávání obrazových dat mezi postprodukčními odděleními. Dodržením jednoho základního barevného prostoru už během produkce, nedochází k nesrovnalostem při barevných převezech nebo vizuálních efektech. Souborový formát se využívá EXR. Pro co nejvyšší barevný rozsah udávaný kamerou a možnost reálného využití tohoto barevného prostoru jako referenční podobu videosignálu na place

¹³⁵ POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 295. ISBN 978-0-12-391926-7.

¹³⁶ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. [obrázek] 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 56–57. ISBN 978-1138603868.

během produkce, je doporučeno zaznamenávat do RAW formátu kamerového interního záznamu. Počítá se také se zpětnou kompatibilitou barevných prostorů BT.709 a DCI-P3, kdy za pomoci inverzní EOTF Referenční vykreslovací transformace (Reference Rendering Transform, dále jen RRT) můžeme z těchto prostorů snadno získat ACES soubor EXR pro případné archivační účely.¹³⁷ Zpracování filmů v systému ACES v dnešní době čítá více jak 600 velkých filmových titulů, například celá knihovna filmů produkční společnosti Disney je od doby jeho vydání vytvářena právě v tomto barevném prostoru.¹³⁸

5.6.1 Referenční pozorovací podmínky barevného prostoru ACES AP0

Ideální pozorovací podmínky při promítání jsou pro tento prostor naprosto stejné jako u DCI-P3. V rámci reference na fyzickém zobrazovacím zařízení by mělo být využito barevného prostoru BT.709 a jeho referenčních podmínek. Avšak u barevného prostoru ACES AP0 se nevyskytuje transformační křivka EOTF, je tak nutné dopředu vytvořit potřebnou RRT pro výstupní zobrazovacího zařízení a jeho barevný prostor.¹³⁹ Zobrazení tohoto reálného širokého barevného gamutu by bylo možné za využití laserové projekce, kdy za pomoci monochromatickosti těchto laserů dosahují primární barvy větší saturevanosti, než která je u projekčního xenonového systému.¹⁴⁰

¹³⁷ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 56–57. ISBN 978-1138603868.

¹³⁸ *Color: ACES* [online]. IMDb.com, © 1990 - 2023 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.imdb.com/search/title/?colors=aces>

¹³⁹ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 58–59. ISBN 978-1138603868.

¹⁴⁰ Tamtéž., s. 61.

6 PŘENOSOVÁ ROZHRAŇÍ

Pro přenos videosignálu v rámci zobrazovacích zařízení se používají různé normy, kdy některé z nich jsou více standardizované než jiné. Ovšem s vyvíjejícími se technologiemi a rostoucím přijímacím videosignálem vzrůstají i nároky pro jeho příjem. V některých případech existují i bezdrátové přenosy obrazu na GHz frekvencích, i do nich však musíme signál posílat prostřednictvím těchto již zavedených přenosových rozhraní.

6.1 Kompozitní video

Jde o analogový videosignál NTSC nebo PAL či SECAM přenášený pouze jedním kanálem. Dosahuje pouze rozlišení prokládaného obrazu při 480i (NTSC) nebo 570i (PAL nebo SECAM) ve snímkovací frekvenci 60fps nebo 50fps (dle regionu). Podporuje tedy pouze barevný prostor YUV nebo YIQ. Konektorem pro připojení tohoto rozhraní je žlutý 3,5mm standard cinch.

6.2 Komponentní video

Dalším z přenosových rozhraní je rozdělený videosignál $Y'P_B P_R$ na tři komponenty, a to jasovou složku (bílý nebo zelený kabel) a dvě chromatické složky (modrý a červený kabel). Slouží pro přenos analogového videosignálu transformací na digitální videosignál do barevného prostoru BT.601, který dosahuje rozlišení až maximálně prokládaného 1080i a progresivního 720p, v obou případech schopných 60fps. S nástupem nových digitálních technologií se tak toto rozhraní pomalu přestalo používat.¹⁴¹

6.3 SDI

Toto přenosové rozhraní Serial digital interface (dále jen SDI) standardizovalo STMPE v roce 1989 jako elektronický audio a video přenos přes koaxiální a optické vlákno s konektorem BNC.¹⁴² Poslední a současně nejvyšší verze této normy vyšla v roce 2020. SDI je obousměrné. Rozdělujeme ho dle názvů jeho přenosové rychlosti signálu Gbit/s. Signál lze zvýšit jeho sčítáním dvojitým (Dual-Link) nebo i čtyřnásobným (Quad-Link)

¹⁴¹ *High Definition Analog Component Measurement* [online]. Tektronix, 2003 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: https://download.tek.com/document/25W_16653_0.pdf

¹⁴² POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012, s. 432. ISBN 978-0-12-391926-7.

spojením ze dvou či čtyř BNC konektorů. SDI se primárně používá v profesionální technice a prostředí.¹⁴³

Tabulka 7 Porovnání Single-link SDI normy

Parametr	Efektivita signálu formátu	Bitová hloubka	Barevný prostor	Maximální rozlišení a fps
Single-link HD-SDI¹⁴⁴	$Y'CBC_R$ 4:2:2	10-bit	BT.709	1920 × 1080 30p 1280 × 720 60p
Single-link 3G¹⁴⁵	$Y'CBC_R$ 4:2:2	12-bit	BT.2100	2048 × 1080 60p 1280 × 720 60p
Single-link 6G¹⁴⁶	$Y'CBC_R$ 4:2:0	12-bit	BT.2100	3840 × 2160 30p 2048 × 1080 60p
Single-link 12G¹⁴⁷	$Y'CBC_R$ 4:2:0	12-bit	BT.2100	4096 × 2160 60p 3840 × 2160 60p
Single-link 24G¹⁴⁸	$Y'CBC_R$ 4:2:0	12-bit	BT.2100	7680 × 4320 30p 4096 × 2160 120p

¹⁴³ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 422–423. ISBN 978-1138603868.

¹⁴⁴ *UHD-SDI Standards Roadmap* [online]. SMPTE, 2017 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: https://f.hubspotusercontent00.net/hubfs/5253154/SMPTE%20wallchart%232.6_20_17-JULY%202017.pdf

¹⁴⁵ Tamtéž.

¹⁴⁶ *OV 2081-0:2018 - SMPTE Overview Document – 6G-SDI Bit-Serial Interfaces: Roadmap for the SMPTE ST 2081 Document Suite* [online]. SMPTE, 2018 [cit. 2023-01-28]. ISBN 978-1-68303-142-0. Ke stažení dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8356219>

¹⁴⁷ *OV 2082-0:2016 - SMPTE Overview Document - 12G-SDI Bit-Serial Interfaces: Overview for the SMPTE ST 2082 Document Suite* [online]. SMPTE, 2016 [cit. 2023-01-28]. ISBN 978-1-68303-045-4. Ke stažení dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7565450>

¹⁴⁸ *UHD-SDI Standards Roadmap* [online]. SMPTE, 2017 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: https://f.hubspotusercontent00.net/hubfs/5253154/SMPTE%20wallchart%232.6_20_17-JULY%202017.pdf

Tabulka 8 Porovnání Dual-link SDI normy

Parametr	Efektivita signálu formátu	Bitová hloubka	Barevný prostor	Maximální rozlišení a fps
Dual-link HD-SDI¹⁴⁹	$Y'CBCR$ 4:2:2	12-bit	BT.709	2048 × 1080 60p 1280 × 720 60p
Dual-link 3G¹⁵⁰	$Y'CBCR$ 4:2:2	12-bit	BT.2100	3840 × 2160 30p 2048 × 1080 60p
Dual-link 6G¹⁵¹	$Y'CBCR$ 4:2:0	12-bit	BT.2100	4096 × 2160 60p 3840 × 2160 60p
Dual-link 12G¹⁵²	$Y'CBCR$ 4:2:0	12-bit	BT.2100	7680 × 4320 30p 4096 × 2160 60p
Dual-link 24G¹⁵³	$Y'CBCR$ 4:2:0	12-bit	BT.2100	7680 × 4320 60p

Tabulka 9 Porovnání Quad-link SDI normy

Parametr	Efektivita signálu formátu	Bitová hloubka	Barevný prostor	Maximální rozlišení a fps
Quad-link 3G¹⁵⁴	$Y'CBCR$ 4:2:2	12-bit	BT.2100	4096 × 2160 60p 3840 × 2160 60p
Quad-link 6G¹⁵⁵	$Y'CBCR$ 4:2:0	12-bit	BT.2100	7680 × 4320 30p 4096 × 2160 60p
Quad-link 12G¹⁵⁶	$Y'CBCR$ 4:2:0	12-bit	BT.2100	7680 × 4320 30p 4096 × 2160 120p
Quad-link 24G¹⁵⁷	$Y'CBCR$ 4:2:0	12-bit	BT.2100	7680 × 4320 120p

¹⁴⁹ *UHD-SDI Standards Roadmap* [online]. SMPTE, 2017 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: https://f.hubspotusercontent00.net/hubfs/5253154/SMPTE%20wallchart%232.6_20_17-JULY%202017.pdf

¹⁵⁰ Tamtéž.

¹⁵¹ *OV 2081-0:2018 - SMPTE Overview Document – 6G-SDI Bit-Serial Interfaces: Roadmap for the SMPTE ST 2081 Document Suite* [online]. SMPTE, 2018 [cit. 2023-01-28]. ISBN 978-1-68303-142-0. Ke stažení dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8356219>

¹⁵² *OV 2082-0:2016 - SMPTE Overview Document – 12G-SDI Bit-Serial Interfaces: Overview for the SMPTE ST 2082 Document Suite* [online]. SMPTE, 2016 [cit. 2023-01-28]. ISBN 978-1-68303-045-4. Ke stažení dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7565450>

¹⁵³ *UHD-SDI Standards Roadmap* [online]. SMPTE, 2017 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: https://f.hubspotusercontent00.net/hubfs/5253154/SMPTE%20wallchart%232.6_20_17-JULY%202017.pdf

¹⁵⁴ Tamtéž

¹⁵⁵ *OV 2081-0:2018 - SMPTE Overview Document – 6G-SDI Bit-Serial Interfaces: Roadmap for the SMPTE ST 2081 Document Suite* [online]. SMPTE, 2018 [cit. 2023-01-28]. ISBN 978-1-68303-142-0. Ke stažení dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8356219>

¹⁵⁶ *OV 2082-0:2016 - SMPTE Overview Document – 12G-SDI Bit-Serial Interfaces: Overview for the SMPTE ST 2082 Document Suite* [online]. SMPTE, 2016 [cit. 2023-01-28]. ISBN 978-1-68303-045-4. Ke stažení dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7565450>

¹⁵⁷ *UHD-SDI Standards Roadmap* [online]. SMPTE, 2017 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: https://f.hubspotusercontent00.net/hubfs/5253154/SMPTE%20wallchart%232.6_20_17-JULY%202017.pdf

6.4 HDMI

Jedná se spíše o spotřebitelské přenosové rozhraní, které najdeme v dnešní době u televizorů, monitorů, počítačů i audio přístrojů. High-Definition Multimedia Interface (dále jen HDMI) může, jak přijímat, tak i odesílat dané signály. Výhodou tohoto rozhraní je přenos nekomprimovaných obrazových i audio signálů. Jedná se o moderní náhradu analogového VGA standardu. Stejně jako jakákoliv nová technologie i toto rozhraní dostává nové verze, které se mezi sebou tak odlišují svými specifikacemi.¹⁵⁸

Tabulka 10 Porovnání verzí HDMI normy¹⁵⁹

Parametr	1.0–1.2a	1.3–1.3a	1.4–1.4b	2.0–2.0b	2.1–2.1a
Efektivita signálu formátu	$Y'CbCr$ 4:2:2	$Y'CbCr$ 4:2:2	$Y'CbCr$ 4:2:2	$Y'CbCr$ 4:2:0	$Y'CbCr$ 4:2:0
Bitová hloubka	12-bit	16-bit	16-bit	16-bit	16-bit
Barevný prostor	BT.709	BT.709	BT.2020	BT.2100	BT.2100
Maximální rozlišení a fps	1920 × 1080 60 fps	2560 × 1440 30 fps	3840 × 2160 60 fps	7680 × 4320 30 fps	7680 × 4320 120 fps

¹⁵⁸ STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. 2. vyd. New York: Routledge, 2021, s. 535. ISBN 978-1138603868.

¹⁵⁹ *HDMI* [online]. HDMI Licensing Administrator, ©2023 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://hdmi.org>

ZÁVĚR

Tématem této bakalářské práce bylo objasnit fungování a problémy, které nastávají během zobrazování barevných prostorů v kinematografii. Funkční barevné prostory nejsou jednoduchým technologickým řemeslem, i přesto je filmová postprodukční oddělení, jako vizuální efekty či barevné korekce filmu, neustále využívají.

V úvodu práce jsem popsal a vysvětlil pojem barva. Procházel jsem různé varianty barevného míchání až po přepsání vnímání barev lidským okem do matematické soustavy. Matematická soustava je následně použita pro převedení barev do jejich digitální podoby na zobrazovacím zařízení, kdy každé toto zařízení má svůj daný barevný rozsah pro reprodukci.

Historii barev v kinematografii jsem se věnoval v následující kapitole. Zaměřil jsem se na úplné začátky zaznamenávání pohybu a první černobílé za sebou jdoucí fotografie, které vytváří pohyb. Dále jsem zachytil, že se zdokonalením technologií přichází nové možnosti od černobílého filmového pásu po barevný materiál. Vše se změnilo s příchodem digitálu, kdy se barvy musí reprodukovat na zobrazovacích zařízeních, a jejich binární soustava tak musí být jasně daná pro každou z barev. Uvedl jsem zde i nejnovější technologie na poli zobrazovacích zařízeních.

Další kapitolu jsem věnoval vzniku obrazu v kameře, který se přenáší do zobrazovacího zařízení. Při tomto převodu analogu do digitálu dochází k mnoha technologickým aspektům, které jsou důležité pro správné zobrazení obrazu a jeho barev v barevném prostoru. V rámci této kapitoly jsem jednotlivé technologické aspekty barevných prostorů charakterizoval.

Nejrozsáhlejší kapitolu této práce jsem zaměřil na její hlavní téma, které pojednává o nejvyužívanějších barevných prostorech v kinematografii. U každého z prostorů jsem vymezil jeho dané vlastnosti. Také jsem se zabýval zobrazovacími referenčními podmínkami každého tohoto prostoru zvlášť. Tyto podmínky jsou závislé na kalibrovaných zobrazovacích zařízeních. Pomocí těchto podmínek je také možné docílit dokonalého barevného a tonálního obrazu i na méně kvalitních zobrazovacích zařízeních. Zaměřil jsem se i na přenosová rozhraní, která se používají pro přenos videosignálu do zobrazovacího zařízení. Jejich vlastnosti a podrobnosti jsem popsal v závěrečné kapitole práce.

Barevné prostory nejsou pouze technickým odvětvím, jak si mnoho lidí myslí, jedná se také i o fyzikální a matematickou záležitost. Při tvorbě této bakalářské práce

jsem vycházel z fyzikálně technologických publikací, kdy normy pro standardy a rozhraní jsou dostupné pouze jako publikace technologických institucí zabývajících se jejich rozvojem. Bylo pro mě důležité pochopit, jak jsou při tvorbě signálu barevného prostoru technologické postupy za sebou koncipované. Náročné bylo zvolit, v jakém pořadí je vhodné jednotlivé postupy popsat a náležitě seřadit, a to z důvodu jejich pochopení a porozumění čtenářem, neboť se postupy často prolínají. Realizace této bakalářské práce pro mě byla velkým přínosem. Získal jsem tak souhrnný přehled a poznatky tykající se i jiných oblastí než pouze kinematografie. Problematika barevných prostorů je často opomíjeným tématem, její význam pro tvorbu a vznik filmového díla je však nepostradatelný.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ITTEN, Johannes. *Umění barvy*. Praha: NAMU, 2021. ISBN 978-80-7331-546-7.
2. POYNTON, Charles. *Digital Video and HD: Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. 2. vyd. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 2012. ISBN 978-0-12-391926-7.
3. STUMP, David. *Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows*. 2. vyd. New York: Routledge, 2021. ISBN 978-1138603868.
4. TOOMS, Michael S. *Colour Reproduction in Electronic Imaging Systems: Photography, Television, Cinematography*. Chichester: Wiley, 2016. ISBN 978-1-119-02176-6.
5. VERDULT, Vincent. *Optimal Audio and Video Reproduction at Home: Improving the Listening and Viewing Experience*. 2. vyd. New York: Routledge, 2019. ISBN 9781138335387.
6. What is D65 and what is it used for? *Waveform Lighting* [online]. 20. 1. 2018 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.waveformlighting.com/color-matching/what-is-d65-and-what-is-it-used-for>
7. *Recommendation ITU-R BT.2100-2: Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme exchange* [online]. Ženeva: ITU, 2018 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2100-2-201807-I!!PDF-E.pdf
8. What are RGB and YUV color spaces? *DEXON Systems* [online]. 5. 4. 2022 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://dexonsystems.com/blog/rgb-yuv-color-spaces>
9. Color Theory. *Colorotate* [online]. ©2023 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <http://learn.colorotate.org/color-models>
10. THOMPSON, Kristin a David BORDWELL. *Dějiny filmu: přehled světové kinematografie*. Praha: AMU, 2007. ISBN 978-80-7106-898-3.
11. GOLDMAN, Michael. Technicolor celebrates centennial. *American Cinematographer: International Journal of Motion Picture Photography and Production Techniques*, roč. 96 (2015), č. 9. ISSN 0002-7928.
12. Eastman Color. *Timeline of Historical Film Colors* [online]. ©2023 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://filmcolors.org/timeline-entry/1310/>

13. Best Monitor for Graphic Design, Video Editing & 3D Animation. *CG Director* [online]. 12. 8. 2022 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.cgdirector.com/best-monitor-graphic-design-video-editing-3d/>
14. Can You See the Difference Between 10-Bit and 8-Bit Images and Video Footage? *Fstoppers* [online]. 24. 2. 2017 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://fstoppers.com/education/can-you-see-difference-between-10-bit-and-8-bit-images-and-video-footage-166977>
15. What is Gamma? *BenQ* [online]. 6. 9. 2019 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.benq.com/en-my/knowledge-center/knowledge/gamma-monitor.html>
16. Gamma, what is "higher" and what is "lower"? *AVS Forum* [online]. 30. 1. 2017 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.avsforum.com/threads/gamma-what-is-higher-and-what-is-lower.2732553/>
17. *Recommendation ITU-R BT.2020-2: Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange* [online]. Ženeva: ITU, 2015 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2020-2-201510-I!!PDF-E.pdf
18. *Ultra HD Forum Guidelines* [online]. Fremont: Ultra HD Forum, 2022. [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://ultrahdforum.org/wp-content/uploads/UHD-Guidelines-V2.6a-NAB2022-c.pdf>
19. *DaVinci Resolve 18.1: Reference Manual* [online]. Blackmagic Design, 2022, [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://documents.blackmagicdesign.com/UserManuals/DaVinci_Resolve_18_Reference_Manual.pdf?v=1668153611000
20. *Recommendation ITU-R BT.601-7: Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide screen 16:9 aspect ratios* [online]. Ženeva: ITU, 2011 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.601-7-201103-I!!PDF-E.pdf
21. *Recommendation ITU-R BT.709-6: Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange* [online]. Ženeva: ITU, 2015 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.709-6-201506-I!!PDF-E.pdf

22. *Recommendation ITU-R BT.2035: A reference viewing environment for evaluation of HDTV program material or completed programmes* [online]. Ženeva: ITU, 2013 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2035-0-201307-I!!PDF-E.pdf
23. *Recommendation ITU-R BT.1886: Reference electro-optical transfer function for flat panel displays used in HDTV studio production* [online]. Ženeva: ITU, 2011 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.1886-0-201103-I!!PDF-E.pdf
24. *20th Century Fox, Panasonic and Samsung Forge New Partnership to Deliver Best Possible Viewing Experience with HDR10+ Technology* [online]. Berlín, 2017 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://news.panasonic.com/global/press/data/2017/08/en170828-6/en170828-6-1.pdf>
25. *ST 428-1:2019 - SMPTE Standard: D-Cinema Distribution Master — Image Characteristics* [online]. SMPTE, 2019 [cit. 2023-01-25]. ISBN 978-1-68303-171-0. Ke stažení dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8709077>
26. *Digital Cinema System Specification 1.4.2* [online]. Digital Cinema Initiatives, LLC, 2022, s. 21 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://dcss.dcmovies.com/0c0cff34d231b516cb89ae3fad352d5cf37a9515/dcss.pdf>
27. *RP 431-2:2011 - SMPTE Recommended Practice: D-Cinema Quality — Reference Projector and Environment* [online]. SMPTE, 2011 [cit. 2023-01-25]. ISBN 978-1-61482-243-1. Ke stažení dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7290729>
28. *High Definition Analog Component Measurement* [online]. Tektronix, 2003 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: https://download.tek.com/document/25W_16653_0.pdf
29. *RP 431-2:2011 - SMPTE Recommended Practice: D-Cinema Quality — Reference Projector and Environment* [online]. SMPTE, 2011 [cit. 2023-01-25]. ISBN 978-1-61482-243-1. Ke stažení dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7290729>
30. *UHD-SDI Standards Roadmap* [online]. SMPTE, 2017 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: https://f.hubspotusercontent00.net/hubfs/5253154/SMPTE%20wallchart%232.6_20_17-JULY%202017.pdf

31. *OV 2081-0:2018 - SMPTE Overview Document – 6G-SDI Bit-Serial Interfaces: Roadmap for the SMPTE ST 2081 Document Suite* [online]. SMPTE, 2018 [cit. 2023-01-28]. ISBN 978-1-68303-142-0. Ke stažení dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8356219>
32. *OV 2082-0:2016 - SMPTE Overview Document – 12G-SDI Bit-Serial Interfaces: Overview for the SMPTE ST 2082 Document Suite* [online]. SMPTE, 2016 [cit. 2023-01-28]. ISBN 978-1-68303-045-4. Ke stažení dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7565450>
33. *HDMI* [online]. HDMI Licensing Administrator, ©2023 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://hdmi.org>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ACES	Academy Color Encoding System
BBC	British Broadcasting Company
CIE	Commission Internationale de L'Éclairage
CMFS	Color matching funkce $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ a $\bar{z}(\lambda)$
CRT	Cathode ray tube
DCDM	Digital Cinema Delivery Master
DCI	Digital Cinema Initiative
DCP	Digital Cinema Package
DVD	Digital Video Disc
EOTF	elektro-optická transformační funkce
fps	frames per second
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
HDR	High Dynamic Range
HDRTV	High Dynamic Range television
HDTV	High-Definition Television
HLG	Hybrid Log-Gamma
i	Interlaced Scan
ITU-R	International Telecommunication Union Radiocommunication
LCD	Liquid Crystal Displays
LED	Light Emitting Diode
NTSC	National Television System Committee
OETF	opto-elektrická transformační funkce
OLED	Organic Light Emitting Diode
p	progresivní skenování videa
PAL	Phase Alternating Line

PQ	Perceptual Quantization
<i>RGB</i>	Lineární RGB videosignál před transformační funkcí
<i>R'G'B'</i>	Nelineární RGB videosignál po transformační funkci
RRT	Reference Rendering Transform
SDI	Serial digital interface
SDR	Standard Dynamic Range
SDTV	Standard-Definition Television
SECAM	Séquentiel couleur à mémoire
SMPTE	Society of Motion Picture and Television Engineers
UHDTV	Ultra-High Definition Television
VHS	Video Home System
WCG	Wide Color Gamut

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Viditelné spektrum v nanometrech	12
Obrázek 2 Rozdíl mezi aditivním (vlevo) a subtraktivním (vpravo) mícháním barev	13
Obrázek 3 Charakteristika barev: odstín, sytost a světlost	13
Obrázek 4 Křivky Color matching funkce $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ a $\bar{z}(\lambda)$	14
Obrázek 5 Chromatický diagram CIE 1931 $[x, y]$	15
Obrázek 6 Funkce diagramu CIE 1931	15
Obrázek 7 Bílý bod D65 a barevná teplota v Chromatickém diagramu CIE 1931	16
Obrázek 8 Barevný model RGB	17
Obrázek 9 Barevný model CMYK	18
Obrázek 10 Barevný model YUV	18
Obrázek 11 Barevný model CIELAB	19
Obrázek 12 Barevný model HSV	20
Obrázek 13 Barevný model HSL	20
Obrázek 14 Způsob prokládání videa	24
Obrázek 15 Rozdíl mezi progresivním a prokládaném skenování obrazu	26
Obrázek 16 Porovnání 8-bit a 10-bit barevné hloubky	30
Obrázek 17 Ukázka bandingu (vlevo) posterizace (vpravo)	31
Obrázek 18 Nelineární vztah videesignálu a světelnosti u CRT displeje v grafu	31
Obrázek 19 Ukázka reálné transformace OETF u kamery Blackmagic Pocket Cinema Camera 6K v 8-bit barevné hloubce videa	32
Obrázek 20 Postup aplikování transformační funkce	33
Obrázek 21 Porovnání strmosti EOTF gamma křivek v 8-bit barevné hloubce videa	33
Obrázek 22 Porovnání využití EOTF gamma křivek na obsahu	34
Obrázek 23 Vzorkování a podvzorkování modelu $Y'CBC_R$	37
Obrázek 24 Porovnání barevných prostorů BT.709, BT.2020, DCI-P3 a ACES AP0 v Chromatickém diagramu CIE 1931 $[x, y]$	39
Obrázek 25 Barevný prostor BT.601 a jeho standardy NSTC (bílý) a PAL (černý) nebo SECAM v Chromatickém diagramu CIE 1931 $[x, y]$	41
Obrázek 26 Barevný prostor BT.709 v Chromatickém diagramu CIE 1931 $[x, y]$	42
Obrázek 27 Barevný prostor BT.2020 v Chromatickém diagramu CIE 1931 $[x, y]$	44
Obrázek 28 Barevný prostor DCI-P3 v Chromatickém diagramu CIE 1931 $[x, y]$	48
Obrázek 29 Barevný prostor ACES AP0 v Chromatickém diagramu CIE 1931 $[x, y]$	50

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Porovnání bitových hloubek	30
Tabulka 2 Charakteristika barevného gamutu standardů NSTC a PAL nebo SECAM.....	40
Tabulka 3 Charakteristika barevného gamutu prostoru BT.709	42
Tabulka 4 Charakteristika barevného gamutu prostoru BT.2020	43
Tabulka 5 Charakteristika barevného gamutu prostoru DCI-P3	48
Tabulka 6 Charakteristika barevného gamutu prostoru ACES AP0.....	50
Tabulka 7 Porovnání Single-link SDI normy	53
Tabulka 8 Porovnání Dual-link SDI normy.....	54
Tabulka 9 Porovnání Quad-link SDI normy	54
Tabulka 10 Porovnání verzí HDMI normy.....	55