

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra optiky



Bakalářská práce

**Měření účinnosti barevných filtrů pro 3D anaglyf pomocí
spektroradiometru CS-2000**

Vypracoval: Radek Cikryt

Vedoucí práce: RNDr. Vladimír Chlup

Studijní obor: Přístrojová optika

Olomouc 2013

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod odborným vedením RNDr. Vladimíra Chlupa, za použití pramenů uvedených v seznamu literatury.

V Olomouci dne

Podpis

Děkuji společnosti Pramacom-HT, spol. s r. o. za umožnění měření na spektrometru CS-2000. Dále děkuji společnosti Meopta-optika, s.r.o. za umožnění měření na spektrofotometru PerkinElmer lambda 900 a projektu IGA "Moderní optika a její aplikace" PrF_2013_019, který mi umožnil zajistit některé pomocné optické prvky a filtry.

Děkuji panu RNDr. Vladimíru Chlupovi za poskytnuté rady, dodané materiály ke tvorbě této práce a čas strávený při praktických měření u této bakalářské práce.

Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora:	Radek Cikryt
Instituce:	Univerzita Palackého v Olomouci Přírodovědecká fakulta 17. listopadu 1192/12 771 46 Olomouc
Pracoviště:	Katedra optiky
Studijní obor:	Přístrojová optika
Název práce:	Měření účinnosti barevných filtrů pro 3D anaglyf pomocí spektrometru CS-2000
Vedoucí práce:	RNDr. Vladimír Chlup
Počet stran:	64
Rok obhajoby:	2013
Klíčová slova:	Anaglyf, propustnost, filtr, barevný prostor

Tato práce si klade za cíl popsat barevné prostory, standardní CIE světelné zdroje, pojednat o typech anaglyfů, jejich využití, jak anaglyf vzniká, jeho výhody a nevýhody. V praktické části pak realizovat sérii spektrometrických měření vybraných filtrů pomocí spektrometru CS-2000, také proměřit anaglyf na kalibrovaném monitoru.

Bibliographical identification

Author's first name and surname	Radek Cikryt
School:	Univerzita Palackého v Olomouci Přírodovědecká fakulta 17. listopadu 1192/12 771 46 Olomouc
Department:	Katedra optiky
Program:	Přístrojová optika
Title of thesis:	Measuring the effectiveness of color filters for 3D anaglyph using a CS-2000 spectroradiometer
Thesis consultant:	RNDr. Vladimír Chlup
Number of pages:	64
Thesis defended in:	2013
Keywords:	Anaglyph, permeability, filter, color space

This thesis aims to describe color space, standard CIE illuminant, the issue of types anaglyphs, their use, as anaglyph created, its advantages and disadvantages. In practice, to implement spectroradiometric series of measurements of selected filters by using spectroradiometer CS-2000, also measure the anaglyph on a calibrated monitor.

Obsah

ÚVOD.....	9
1. CHARAKTER BAREV.....	10
1.1 Elektromagnetické spektrum.....	10
1.2 Newtonův barevný experiment.....	11
1.3 Spektrometrie.....	12
2. BAREVNÉ MODELY.....	13
2.1 RGB barevný model.....	13
2.2 CMYK barevný model.....	13
2.3 CIE 1931 barevný prostor (CIE 1931 XYZ).....	14
2.3.1 Trichromatické složky.....	14
2.3.2 Význam X, Y a Z.....	15
2.3.3 CIE standardní pozorovatel.....	15
2.3.4 Trichromatické členitelé $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ a $\bar{z}(\lambda)$ barevného sladění.....	16
2.3.5 CIE xy diagram chromatičnosti a CIE xyY barevný prostor.....	17
2.4 CIE 1976 L*u*v* barevný prostor.....	17
2.5 CIE L*a*b* barevný prostor.....	19
2.6 Standardní CIE světelné zdroje.....	21
3. ANAGLYF.....	23
3.1 Historie anaglyfu.....	23
3.1.1 3D kamera JVC GS-TD1.....	23
3.2 Princip anaglyfu.....	24
3.3 Typy anaglyfů.....	25
3.3.1 Prohlížení Anaglyfu.....	26
3.3.1.1 Ostré červené Anaglyf brýle.....	26
3.4 Barevnost anaglyfu.....	27
3.5 Problémy anaglyfu.....	27
3.6 Barevné kanály Anaglyfu.....	28
4. FILTRY.....	30
4.1 Absorpční filtry.....	30
4.1.1 Spektrofotometry.....	32
4.2 Skleněné filtry.....	33
4.2.1 Šedý filtr.....	34

4.3 Želatinové filtry.....	35
5. Praktické měření.....	36
5.1 Použité vybavení.....	36
5.1.1 3D kamera JVC GS-TD1.....	36
5.1.2 OSL1-EC Vysoko-intenzitní zdroj světla.....	36
5.2 Měření propustnosti filtrů.....	37
5.2.1 Měření propustnosti filtrů Anaglyf brýlí.....	38
5.2.1.1 Příprava měření.....	39
5.2.1.2 Realizace měření.....	39
5.2.1.3 AnagB1-červený.....	39
5.2.1.4 AnagB1-modrý.....	41
5.2.1.5 AnagB2-zelený.....	42
5.2.1.6 AnagB3-azurový.....	43
5.2.1.7 AnagB4-žlutý.....	44
5.2.1.8 AnagB4-modrý.....	46
5.2.2 Porovnání spektrální charakteristiky bílé zdi a CS-A5.....	47
5.2.3 Měření spektrální charakteristiky Slunce a propustnosti ND filtrů.....	49
5.2.4 Měření Anaglyfu.....	52
ZÁVĚR.....	57
Přílohy.....	58
Seznam použitých zdrojů.....	63

Úvod

Tato práce byla vytvořena s cílem zasvětit čtenáře do problematiky Anaglyfu, jeho využitím a jeho problematikou.

V první kapitole je čtenář seznámen s charakterem barvy. Z čeho se barva skládá. Dále je seznámen s relativně novým oborem spektrometrie a jeho využitím v praxi.

Druhá kapitola je zaměřena na typy barevných modelů od RGB, který je jeden z nezákladnějších modelů vůbec, jelikož se s ním člověk setkává nejčastěji (televize, mobilní telefony,...), přes barevný prostor CIE 1931, který je jedním z prvních matematicky popsaných modelů, až po CIE L*a*b*, který z modelu CIE 1931 vychází a je jedním z nejuniverzálnějších modelů. Jelikož u něj jde o absolutní vyjádření barvy nezávisle na zařízení. V neposlední řadě jsou zde popsány standardní CIE světelné zdroje (A,C,D).

Ve třetí kapitole je čtenář seznámen s Anaglyfem. Co to anaglyf je, jak vzniká, typy anaglyfů, jejich charakteristika, výhody a nevýhody anaglyfu.

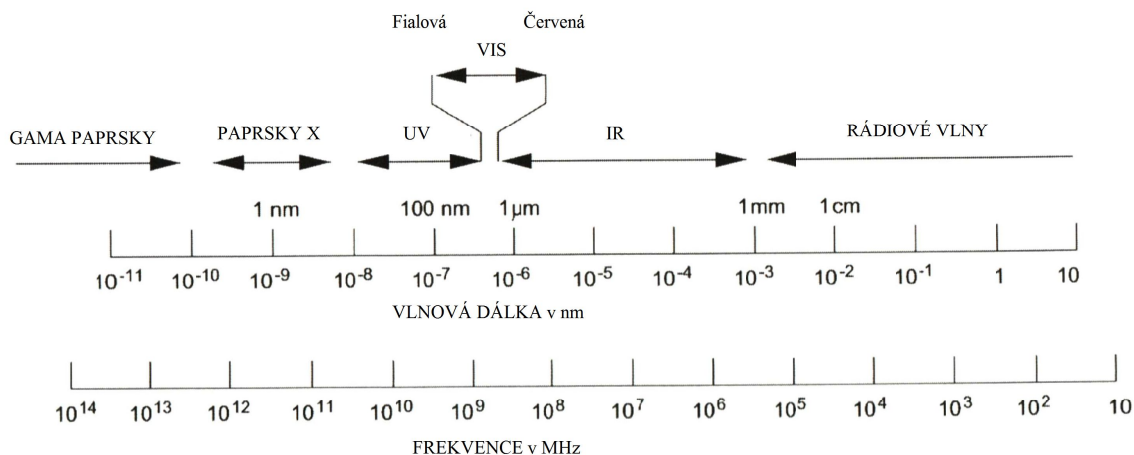
Čtvrtá kapitola se věnuje filtrům a jejich nejběžnějšímu zastoupení.

V páté kapitole je čtenář seznámen s praktickou částí této práce. Měření propustnosti anaglyf brýlí, tedy respektive jejich filtrů. Měření spektrální charakteristiky Slunce a měření anaglyfu na kalibrovaném monitoru.

1. Charakter barev

1.1 Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické vlny mají mnoho různých vlnových délek a frekvencí v rozmezí známém jako elektromagnetické spektrum, jak je znázorněno na Obr. 1.1. Světlo je úzký rozsah elektromagnetických vln, které může oko detekovat. Jednotlivé vlnové délky viditelného spektra, se vyznačují tím, že jsou vnímány jako různých barvy. Nejdelší vlnové délky vnímáme jako červené, zatímco nejkratší ty vnímáme jako fialové. Rozdělení spektra podle vlnových délek na viditelnou, ultrafialovou (UV) a infračervenou (IR) oblast je znázorněno v tabulce 1.1.



Obrázek 1.1 Elektromagnetické spektrum

Lidstvo barva zajímala po dlouhá staletí. Nicméně, největší pokrok ve studii barvy přinesl Newton, když prováděl svůj klasický experiment s hranolem.

Barevný vjem vzniká fyzickou stimulací světelných detektorů (nazývané “čípky“) na lidské sítnici. Barevné spektrum získal za použití ideálního hranolu nebo difrakční mřížky, které vytvořily zobrazení všech spektrálně čistých nebo monochromatických barev. Každé vlnové délce odpovídá jiná barva. Hodnoty vlnových délek odpovídající barvám spektra rozložené hranolem, jsou celkem nelineární. Jedná se o nelineární rozložení vlnových délek. Difrakční mřížka vytváří více lineární spektrum. Říká se, že různé spektrálně čisté barvy mají různé odstíny. Spektrálně čistá nebo monochromatická barva může být získána jen z jedné vlnové délky. Například, oranžová barva je spojená s vlnovou délkou 600,0 nm. Nicméně, stejné barvy docílíme kombinací dvou paprsků: jeden bude červený s vlnovou délkou 700,0 nm a druhý bude žlutý s vlnovou délkou 580,0 nm, a to bez oranžové složky s vlnovou délkou 600,0 nm. Na závěr, když hovoříme o spektrálně čistém světelném paprsku neznamená to, že

se skládá jen z jednoho paprsku, ale znamená to, že má stejnou barvu jako jediný paprsek odpovídající téže barvě. Při použití dvou nebo více různých paprsků za účelem získání určité barvy, nelze rozeznat pouhým okem zda-li je tato barva složena z více složek či nikoli. K tomuto účelu nám slouží spektroskop. Z tohoto důvodu můžeme říci, že oko je syntezeátor. V kontrastu, když ucho naslouchá orchestru, může jedinec identifikovat nástroje produkující zvuk. Proto říkáme, že ucho je analyzátor. Zajímavá vlastnost spektra je, že minimální vlnová délka oddělující dvě blízké barvy, které mohou být označeny jako odlišné, není stejná pro různé části spektra. Barvy vznikají v důsledku interakce světla s materiálem, například, chromatické disperze ve skle nebo ve vodě, difrakce, atd. [1]

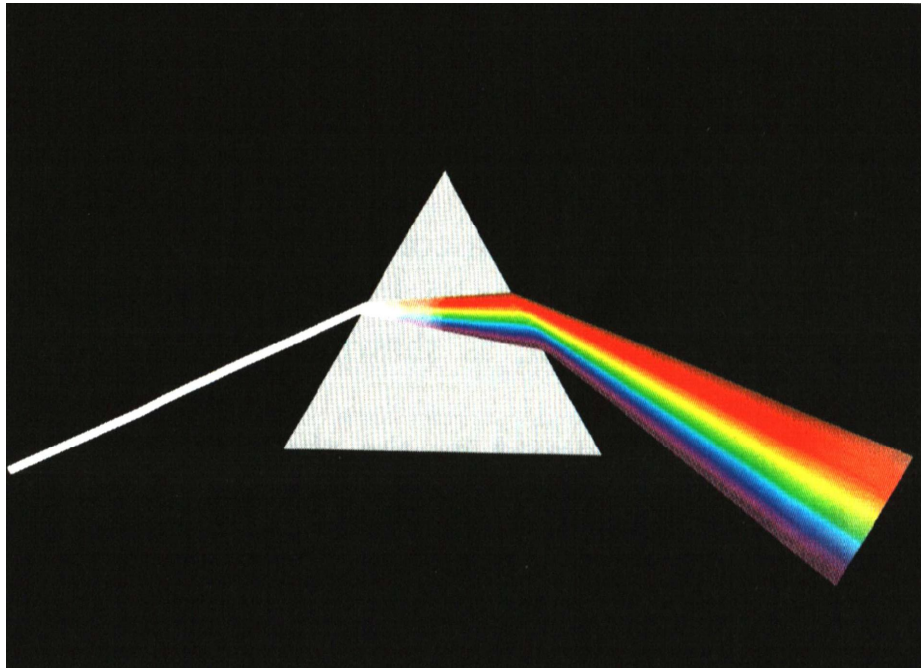
Tabulka 1.1 Ultrafialová, Viditelná a Infračervená oblast elektromagnetického spektra [1]

Oblast spektra	Rozsah vlnových délek [nm]	Podoblast
Ultrafialová	100-280	UV-C
	280-315	UV-B
	315-380	UV-A
Viditelná	380-430	Fialová
	430-500	Modrá
	500-520	Azurová
	520-565	Zelená
	565-580	Žlutá
	580-625	Oranžová
	625-740	Červená
	Infračervená	740-1400
	1400-10000	Vzdálená IR

1.2 Newtonův barevný experiment

První experiment s barvou provedl Newton pomocí hranolu v roce 1671, prokázal tak rozklad barev. Použil trojúhelníkový hranol, jak je znázorněno na Obr. 1.2, v takové pozici, aby úzký paprsek slunečního světla vstupujícího do místnosti prošel hranolem. Když byl tento paprsek zobrazen na podložku, objevilo se pásmo světla s různými barvami, který byl nazván spektrum (vidina, duch). Newton říkal, že spektrum vzniká ze sedmi barev, tj., červená, oranžová, žlutá, zelená, modrá, indigo a fialová, pravděpodobně v úzké obdobně se sedmi notami. Tento experiment okamžitě vnikl myšlenku, že bílé světlo je tvořené superpozicí

všech barev. Aby dokázal tuto myšlenku, Newton použil jiný hranol k rekombinaci všech barev ze spektra zpět do bílého světla. Newton byl velmi opatrný, než aby konstatovat, že barevné spektrum, které získal rozkladem na hranolu představovalo všechny barvy, které lze v přírodě získat. Například, nové barvy mohou být získány přidáním bílé (zředěním), čímž by měnil jejich nasycení. Nové barvy mohou být také získány zvýšením nebo snížením jejich intenzity. V případě barev, je ekvivalentní míchání s černou barvou, nebo zvýšení úrovně osvětlení. [1]



Obr. 1.2 Newtonův hranolový experiment [1]

1.3 Spektrometrie

Radiometrie je věda a technologie měření energie elektromagnetického záření. Častěji se pro zjednodušení označuje jako "měření optického záření." Vzhledem k tomu, radiometrie zahrnuje měření celkové energie záření vyzařovaného zdrojem radikalů v celém optickém spektru (1 nm až 1000 um) a spectroradiometrie se zabývá spektrálním obsahem vyzařujícího zdroje, fotometrie se týká pouze té části optického spektra, na kterou je lidské oko citlivé (380 nm až 780 nm). Přesněji řečeno, fotometrie se týká měření vyzařované energie ve "viditelném" spektru vnímaného standardním fotometrickým pozorovatelem. Standardního fotometrického pozorovatele si může představit jako "průměrného" člověka.

Ve spektrometrii se měří přístrojem, který se nazývá spektrometr. Spectroradiometry jsou přístroje určené k měření spektrální výkonové distribuce záření. Používají se běžně k

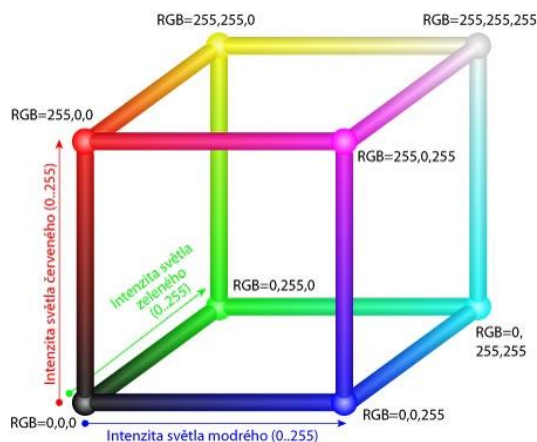
hodnocení a kategorizaci osvětlení prodávaného výrobcem, dále také oblasti ochrany životního prostředí, k měření spektra slunečního záření na zemském povrchu.

Spectroradiometry se často používají k barevné kalibraci LCD a CRT monitorů. CIE barevné hodnoty jsou měřeny a porovnávány s předem definovanými hodnotami, aby se zajistilo, že zobrazovaná barva je správná, a tak odstraňuje barevné rozdílnosti mezi více monitory. [20]

2. Barevné modely

2.1 RGB barevný model

Medium, které vyzařuje světlo, (např. televize) používá aditivní míchání barev s primárními barvami červenou, zelenou a modrou, z nichž každá stimuluje jeden ze tří barvocitlivých receptorů v oku. Kombinace těchto základních barev je pokryta velká část barevného prostoru vnímaná lidmi, a způsobuje tak velkou část lidských barevných vjemů. To je důvod, proč se vyrábějí barevné televizory nebo barevné počítačové monitory pouze kombinací červené, zelené a modré barvy. [10]

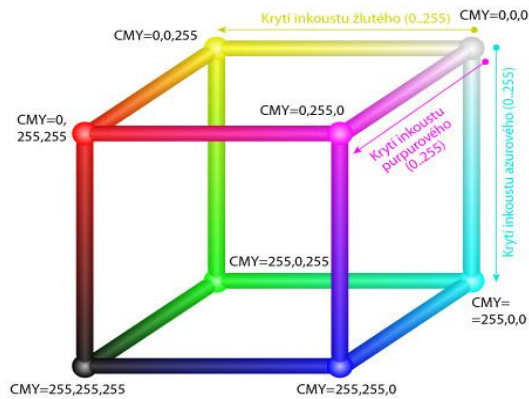


Obr. 2.1 RGB barevný model [7]

2.2 CMYK barevný model

Je možné dosáhnout široké škály barev, které člověk vnímá tím, že kombinuje azurovou, purpurovou a žlutou barvu / inkoust na bílém podkladu. Jedná se o subtraktivní primární barvy. Často je přidána černá barva ke zlepšení reprodukce některých tmavých barev. Takto je definován "CMY" nebo "CMYK" barevný prostor.

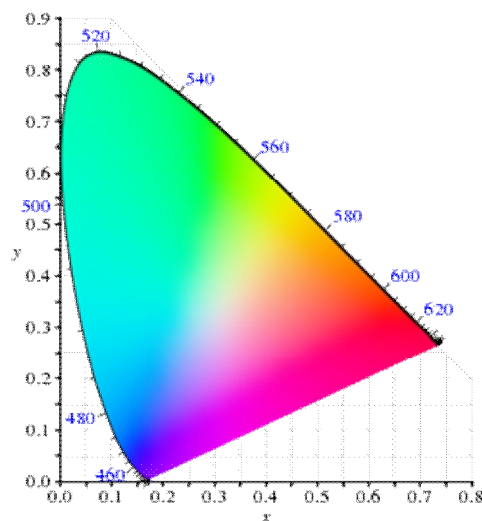
Azurový inkoust absorbuje červené světlo, ale přenáší zelené a modré. Purpurový inkoust absorbuje zelené světlo, ale přenáší červené a modré a žlutý inkoust absorbuje modré světlo, ale přenáší červené a zelené. [7]



Obr. 2.2 CMYK barevný model [7]

2.3 CIE 1931 barevný prostor (CIE 1931 XYZ)

Ve studii vnímání barev, jeden z prvních matematicky definovaných barevných prostorů je CIE 1931 XYZ barevný prostor, který vytvořila Mezinárodní komise pro osvětlení (CIE) v roce 1931, viz obr. 2.3.1.



Obr. 2.3.1 CIE 1931 barevný prostor [9]

CIE XYZ barevný prostor byl odvozen z řady experimentů provedených v období 1928-1931 William David Wright a John Gilda. Jejich experimentální výsledky byly sloučeny do specifikace CIE RGB barevného prostoru, ze kterého byl později odvozen CIE XYZ barevný prostor.

2.3.1 Trichromatické složky

Lidské oko má 3 barvocitlivé fotoreceptory (tzv. čípky) s citlivostí s vrcholy v krátkých (Short=krátký, 420 až 440 nm), středních (Middle=střední, 530 až 540 nm) a dlouhých

(Large=dlouhý, 560 -580 nm) vlnových délkách. Tyto tři druhy čípků, mohou v zásadě popsat jakýkoliv barevný vjem.

Většina vlnových délek nestimuluje jen jeden typ čípku, protože křivky citlivosti čípků se překrývají. Z tohoto vyplývá, že některé trichromatické složky nejdou fyzicky zobrazit, tím pádem vzniknou záporné hodnoty pro alespoň jednu ze tří primárních složek. Aby se předešlo těmto negativním hodnotám, musí být jedna složka, která popisuje jas, "imaginární" primární barvy. Výsledné hodnoty tří složek jsou definovány v CIE 1931 barevném prostoru, ve kterém jsou označeny jako X, Y a Z.

2.3.2 Význam X, Y a Z

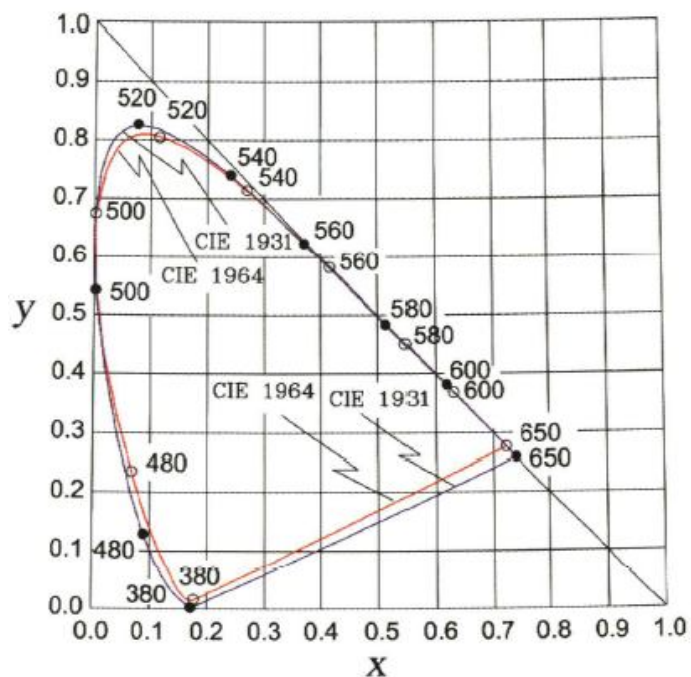
Při posuzování relativní svítivosti (jasu) v různých barvách, při dobrých světelných podmínkách, mají lidé tendenci vnímat světlo v zelené části spektra jasněji než červené nebo modré světlo, i když svítí stejnou intenzitou. Funkce svítivosti, která popisuje vnímání jasu různých vlnových délek, je tak hrubě analogická s frekvenční odezvou čípků M.

Tento model CIE těží z této skutečnosti tím, že definuje Y jako složku jasu. Z je definována jako modrá stimulace, nebo odezva na čípku S, a složka X je lineární kombinace křivek vybraných z kladné části odezvy čípku. Trichromatické hodnoty XYZ jsou tedy podobné, jako reakce lidského oka na čípcích LMS. Definování Y jako složku jasu má užitečný význam a to, že pro danou hodnotu Y, bude rovina XZ obsahovat všechny možné chromatičnosti na jasu.

2.3.3 CIE standardní pozorovatel

Vzhledem k rozložení čípků v oku, barevný vjem závisí na pozorovatelově zorném poli. K odstranění této proměnné CIE definovala funkci barevného mapování nazývaného standardní (kolorimetrický) pozorovatel, který bude zastoupen "průměrným" člověkem a který má chromatickou odpověď ve 2 ° oblouku fovey centralis. Tento úhel byl zvolen vzhledem k přesvědčení, že barvocitlivé čípky leží ve 2 ° oblouku fovey centralis. Tak CIE 1931 zavedla funkci standardního pozorovatele, která je také známá jako CIE 1931 2° standardní pozorovatel. Novější, ale méně využívanou alternativou je CIE 1964 10 ° standardní pozorovatel, který je odvozen z práce Stilese, Burche a Speranskaya, viz obr. 2.3.3.1.

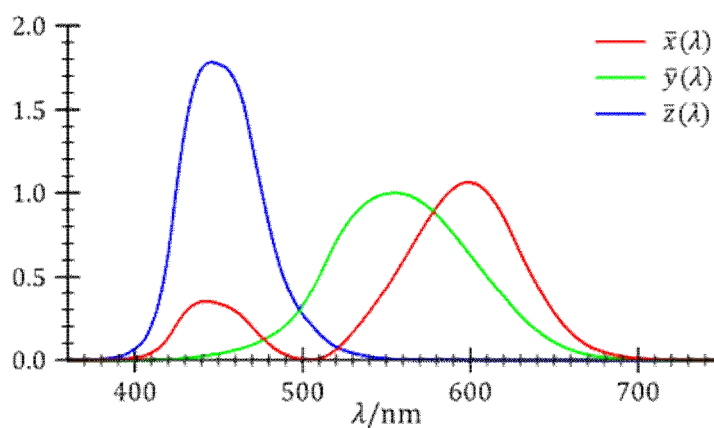
Při práci s větším zorným polem než jsou 4°, se doporučuje používat CIE 1964 pro 10°. Hodnoty obou standardních pozorovatelů jak pro 2°, tak i pro 10° jsou diskretizovány v intervalech 5 nm od 380 nm do 780 nm λ . Standardní pozorovatel je charakterizován třemi funkcemi sladění barev.



Obr. 2.3.3.1 Dva CIE chromatické diagramy, pro 2° a pro 10° a jejich srovnání [1]

2.3.4 Trichromatičtí členitelé $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ a $\bar{z}(\lambda)$ barevného sladění

CIE v barvě odpovídající funkci $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ a $\bar{z}(\lambda)$ (obr. 2.3.2), je to numerický popis barevného vjemu pozorovatele (viz výše). Mohou být považovány za křivky spektrálních citlivostí tří lineárních světelných detektorů jejichž výsledkem jsou trichromatické hodnoty CIE X, Y a Z. Taktéž, tyto tři funkce známe jako standardního pozorovatele CIE.



Obr. 2.3.2 Trichromatičtí členitelé [9]

Trichromatické hodnoty pro barvu se spektrální intenzitou vyzářování $I(\lambda)$, jsou uvedeny v podmínkách standardního pozorovatele podle:

$$X = \int_{380}^{780} I(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int_{380}^{780} I(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int_{380}^{780} I(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

kde λ je vlnová délka odpovídající monochromatickému světlu. Hodnoty X, Y a Z jsou omezeny, pokud je omezena intenzita spektra $I(\lambda)$.

2.3.5 CIE xy diagram chromatičnosti a CIE xyY barevný prostor

CIE XYZ barevný prostor byl záměrně navržen tak, aby parametr Y byl měřítkem jasů nebo světlosti barvy. Chromatičnost barvy byla tehdy určena dvěma odvozenými parametry x a y, dva ze tří normalizovaných hodnot, které jsou funkcí všech tří trichromatických hodnot X, Y a Z:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} = 1 - x - y$$

Odvozený barevný prostor určený x, y, a Y je známý jako barevný prostor CIE xyY a je široce používán k určení barvy v praxi.

Trichromatické hodnoty X a Z lze vypočítat zpětně z barevné hodnoty x, y a trichromatické složky: $X = \frac{Y}{y} x$, $Z = \frac{Y}{y} (1 - x - y)$

Matematicky, x a y jsou projektivní polohy a barvy diagramu chromatičnosti zabírající oblast skutečné projektivní roviny. [9]

2.4 CIE 1976 L*u*v* barevný prostor

V kolorimetrii, CIE 1976 (L * u * v *) barevný prostor, obvykle známý pod zkratkou CIE Luv, je barevný prostor, který přijala Mezinárodní komise pro osvětlení (CIE) v roce 1976, jako zjednodušení k výpočtu transformace CIE 1931 XYZ barevného prostoru, který se pokusil o vjemovou jednotnost, viz obr. 2.3.3. Nyní se používá v aplikacích, jako je počítačová grafika, která se zabývá barevnými světly. I když aditivní kombinace různých barevných světél klesnou na čáru k CIE Luv rovnoměrnému diagramu chromatičnosti,

nebudou tyto aditivní kombinace, spadat podél čáry barevného prostoru CIE Luv, pokud tyto kombinace mají konstantní světelnost.

Konverze z XYZ na CIE Luv a CIE Luv na XYZ

Transformace z XYZ na CIE L*u*v*:

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}$$

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16$$

$$u^* = 13 \cdot (u' - u'_n)$$

$$v^* = 13 \cdot (v' - v'_n)$$

Transformace z CIE Luv na XYZ:

$$u' = \frac{u^*}{13L^*} + u'_n$$

$$v' = \frac{v^*}{13L^*} + v'_n$$

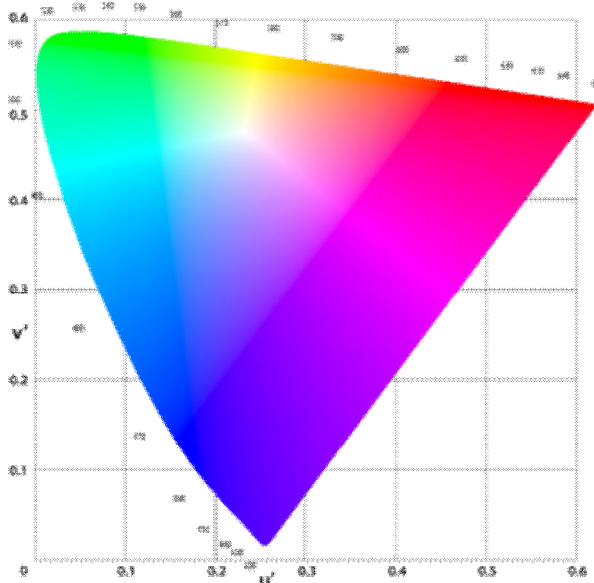
$$Y = \begin{cases} Y_n \cdot L^* \cdot \left(\frac{3}{29} \right)^3, & L^* \leq 8 \\ Y_n \cdot \left(\frac{L^* + 16}{116} \right)^3, & L^* > 8 \end{cases}$$

Kde X_n , Y_n a Z_n jsou CIE XYZ trichromatické hodnoty referenčního bílého bodu a hodnoty u'_n a v'_n jsou barevné souřadnice referenčního bílého bodu. [7]

Transformace z barevných souřadnic u' , v' na x , y :

$$x = \frac{9u'}{6u' - 16v' + 12}$$

$$y = \frac{4u'}{6u' - 16v' + 12}$$



Obr. 2.3.3 (u' , v') CIE $L^*u^*v^*$ barevný prostor [7]

2.5 CIE $L^*a^*b^*$ barevný prostor

$L^*a^*b^*$ barevný prostor je barevný prostor s rozměrem L^* (světlost), a^* a b^* pro barevné rozměry na základě nelineárně komprimovaných souřadnicích CIE XYZ barevného prostoru.

Rozměry Hunter 1948 L , a , b barevného prostoru jsou L , a , a b . Nicméně, Lab je nyní často používán jako zkratka pro neformální označení CIE 1976 (L^* , a^* b^*) barevný prostor (nebo CIE LAB). Rozdíl mezi Hunter a CIE barevnými souřadnicemi jsou, že souřadnice CIE jsou založeny na transformaci třetí odmocniny z barevných dat, zatímco Hunter souřadnice jsou založeny na transformaci druhé odmocniny.

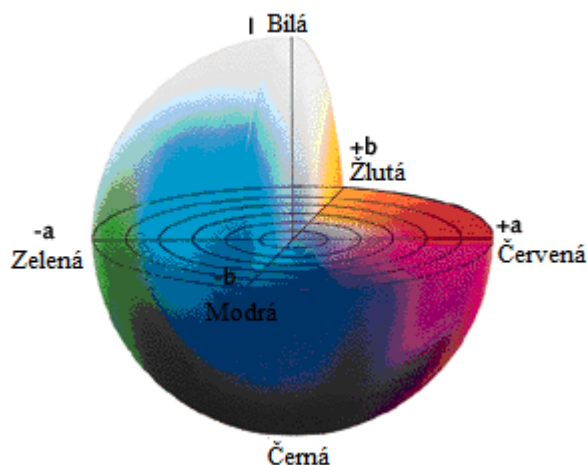
Oba prostory jsou odvozeny z "master" prostoru CIE 1931 XYZ, který může předpovídat, jaké spektrální rozdělení bude vnímáno jako stejná barva, ale není zvlášť vjemově jednotný. Byl silně ovlivněn Munsellovým barevným systémem, záměr obou "Lab" barevných prostorů je vytvořit prostor, v němž může být vypočítán prostor pomocí jednoduchých vzorců z prostoru XYZ, ale zároveň by byl více vjemově jednotný. Vjemově jednotný znamená, že změna v barevné hodnotě, by měla způsobit změnu přibližně stejnou vizuálnímu významu. Při ukládání barev v omezeně přesných hodnotách, můžeme zlepšit reprodukci tónů. Oba Lab prostory jsou vztaženy k bílému bodu z dat XYZ, které byly převedeny z hodnot Lab nedefinující absolutní barvy. V praxi se často předpokládá, že bílý bod je standardní a není výslovně určen.

Světlost se koreluje v CIELAB, vypočítáním třetí odmocniny z relativního jasů.

$L^* a^* b^*$ barevný prostor obsahuje všechny barvy, což znamená, že jeho gamut převyšuje RGB a CMYK barevné modely. Jedním z nejvýznamnějších atributů $L^* a^* b^*$ modelu je nezávislost na zařízení. To znamená, že barvy jsou definovány nezávisle na povaze vytvořeného zařízení, které se zobrazují v $L^* a^* b^*$ barevném prostoru a používají se např. v Adobe Photoshopu, kdy grafika pro tisk musí být převedena z RGB do CMYK. $L^* a^* b^*$ gamut zahrnuje jak RGB, tak i CMYK gamut. Také se používá jako výměnný formát mezi různými zařízeními, jako nezávislé zařízení.

CIE $L^* a^* b^*$

CIE $L^* a^* b^*$ (CIELAB) je nejkompaktnější barevný prostor určený Mezinárodní komisí pro osvětlení, viz obr. 2.4. Jsou zde popsány všechny barvy viditelné pro lidské oko a byl vytvořen, aby sloužil jako nezávislý zdroj na zařízení, které se používá jako referenční.



Obr. 2.4 CIE $L^* a^* b^*$ barevný prostor [7]

Tři souřadnice barevného prostoru CIELAB představují světlost barvy ($L^* = 0$ příspěvek černé a $L^* = 100$ udává matnou bílou, lesklá bílá může mít vyšší hodnotu), pozici mezi červenou / purpurovou a zelenou (a^* záporné hodnoty označují zelenou, zato kladné hodnoty purpurovou) a pozici mezi žlutou a modrou (b^* záporné hodnoty označují modrou a kladné hodnoty žlutou). Hvězdička (*) po L, a a b je součástí celého jména, protože představuje L^* , $a^* b^*$ barevný prostor a také aby se odlišil od Hunter L, a, b.

Vzhledem k tomu, že model $L^* a^* b^*$ je trojrozměrný model, může být řádně zastoupen pouze v trojrozměrném prostoru. Dvourozměrný diagram chromatičnosti vyobrazuje zahrnutý. Sekci barevného solenoidu s pevnou světlostí. Je důležité si uvědomit, že vizuální

reprezentace celé škály barev, v tomto modelu není nikdy přesná, je tam jen proto, aby vám pomohla v porozumění konceptu.

Převod mezi CIE L*a*b* a CIE XYZ

$$\begin{aligned}L^* &= 116f(Y/Y_n) - 16 \\a^* &= 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \\b^* &= 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)]\end{aligned}$$

Kde X_n , Y_n a Z_n jsou CIE XYZ trichromatické hodnoty referenčního bílého bodu. [7]

2.6 Standardní CIE světelné zdroje

Standardní světelný zdroj je teoretický zdroj viditelného světla s profilem, který je blíže specifikován. Standardní světelné zdroje se používají jako základ pro porovnávání snímků nebo barev zaznamenaných za použití jiného světelného zdroje.

Mezinárodní komise pro osvětlení (CIE) je orgán odpovědný za vydávání všech známých standardních světelných zdrojů. Každý z nich je označen písmenem nebo kombinací čísel. Světelné zdroje A, B a C byly zavedeny v roce 1931, představují žárovkové světlo, přímé sluneční záření a průměrné denní světlo. Světelný zdroj D, představuje fáze denního světla.

A) [Světelný zdroj A](#)

Světelný zdroj A má představovat typickou domácí žárovku s wolframovým vláknem. Jeho relativní spektrální vyzařování je vztaženo na Planckovo těleso při teplotě přibližně 2856 K. Světelný zdroj A by měl být používán ve všech kolorimetrických aplikacích zahrnujících používání žárovkového zdroje, pokud neexistují zvláštní důvody pro použití jiného světelného zdroje.

B) Světelný zdroj B a C

Světelné zdroje B a C mají za úkol simulovat denní světlo. Jsou odvozeny od světelného zdroje A pomocí liquid filtru. Světelný zdroj B byl navrhnout jako zástupce poledního Slunce, s teplotou chromatičnosti 4874 K, zatímco světelný zdroj C představuje průměrné denní světlo s teplotou chromatičnosti 6774 K.

C) Světelný zdroj D

Série D světelných zdrojů jsou konstruovány tak, aby představovaly přirozené denní světlo.

Nejznámější ze série D světelných zdrojů je světelný zdroj [D₆₅](#).

D₆₅ zhruba odpovídá polednímu slunci v západní / severní Evropě, a proto se také nazývá světelný zdroj denního světla. Jako každý standardní světelný zdroj je reprezentován jako tabulka průměrných spektrofotometrických dat. Každý zdroj světla, který má stejné spektrální vyzařování, lze považovat za zdroj světla D₆₅.

Definice

Chromatické souřadnice v CIE 1931 barevném prostoru pro světelný zdroj D₆₅ jsou $x = 0,31271$, $y = 0,32902$ pomocí standardního pozorovatele a $x = 0,31382$, $y = 0,33100$ pomocí náhradního pozorovatele. Normalizace pro relativní svítivost, trichromatické hodnoty XYZ jsou $X = 95,047$, $Y = 100,00$, $Z = 108,883$. Vzhledem k tomu, že D₆₅ představuje bílé světlo, jeho souřadnice jsou také bílé místo, odpovídající teplotě chromatičnosti 6504 K. Název D₆₅ naznačuje, že teplota chromatičnosti by měla být 6500 K, zatímco ve skutečnosti je blíže 6504 K. Tento rozpor vznikl tím, že Planckova konstanta $h = 6,62606896 \cdot 10^{-34}$ J.s v průběhu let zaznamenala upřesňování, především v důsledku vývoje vědy a zkvalitňováním měřicích zařízení. Těmito změnami a pevným definováním světelného zdroje D₆₅ v [tabulce CIE relativní spektrální disturbance](#), došlo k posunutí teploty chromatičnosti z hodnoty 6500 K na hodnotu 6504 K. Tento posun Planckova těžiště, postihuje všechny teploty chromatičnosti. Stejný rozpor se vztahuje na všechny standardní světelné zdroje v D-sérii D50, D55, D65,...

Tabulka 2.5 Bílé body standardních světelných zdrojů jak pro zorný úhel 2°, tak i 10° [15]

Název	CIE 1931 2°		CIE 1964 10°		Teplota chromatičnosti [K]	Poznámka
	x_2	y_2	x_{10}	y_{10}		
A	0.44757	0.40745	0.45117	0.40594	2856	Žárovka
B	0.34842	0.35161	0.34980	0.35270	4874	Polední Slunce
C	0.31006	0.31616	0.31039	0.31905	6774	Průměrné denní světlo
D ₆₅	0.31271	0.32902	0.31382	0.33100	6504	Polední denní světlo

Bohužel jsem nedisponoval žádným standardním CIE světelným zdrojem (A,B,C,D,...). Proto jsem jako referenční zdroj světla využil OSL1-EC vysoko-intenzitní zdroj světla o teplotě chromatičnosti 3200K, který je popsán níže. [16]

3. Anaglyf

Anaglyf je pojmenování stereoskopického 3D efektu, jak dosáhnout kódovaného obrázku pro každé oko pomocí filtrů různých barev, typicky červené a azurové. Obrázky 3D Anaglyfu obsahují dva různé barevně filtrované snímky, jeden pro každé oko. Při pohledu přes "anaglyf brýle", každý ze dvou obrazů padne do jednoho oka, tak aby se vytvořil ucelený stereoskopický obraz. Část mozku pro vizuální detekci spojí tento obraz do trojrozměrné scény nebo kompozice.

Anaglyf snímky nedávno zaznamenaly velký bům, díky prezentaci obrázků a videa na Internetu, Blu-ray discích, CD, a dokonce i v tisku. V současné době jsou nejvíce používané anaglyf brýle s červeným a azurovým filtrem. Červená se používá pro levý kanál. Levnější filtrační materiál použitý v monochromatické minulosti byl červený a modrý pro větší pohodlí a nižší náklady. Avšak s azurovým filtrem dosáhneme lepších výsledků, hlavně co se týče barevné škály. [19]

3.1 Historie anaglyfu

Anaglyf vynalezl roku 1853 Němec Wilhelm Rollmann v Lipsku. Nejstarší anaglyfy byly vytvořeny soutiskem ze dvou štoků červené a zelené barvy přes sebe nebo promítány projektořem se dvěma objektivy přes barevné filtry. Vhodnější azurová barva se začala používat až později. Lze se setkat i s narýsovanými obrázky, zejména v deskriptivní geometrii. Často se jedná o phantogramy, tedy obrazce nakreslené na papíře, které se pozorují položené na vodorovné ploše pod úhlem 45°. Zobrazené předměty z papíru vystupují a "stojí" na něm.

V současnosti se k tvorbě anaglyfů využívají 3D kamery a výpočetní technika. K dispozici je mnoho specializovaných programů. Jedním z nich je program [ExifTool](#) nebo [ImageMagick](#), které pracují v operačním systému Linux. [19]

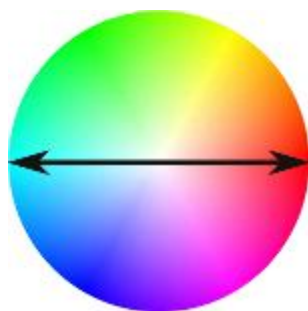
3.1.1 3D kamera JVC GS-TD1

Jednou z nejzajímavější, a také uživatelsky nejlépe dostupnou alternativou k vytvoření 3D obrazu je 3D kamera JVC GS-TD1. Tato kamera je opatřena dvěma objektivy. Každý objektiv zaznamenává obraz pro jedno oko. Levý objektiv pro levé oko a pravý objektiv pro pravé oko. Také je zde použita dvojice záznamových čipů, díky kterým se razantně zvýší světelnost kamery. JVC kamera je osazena dvojicí GT objektivů, jejichž světelnost má být ve 3D v rozmezí F1.2 až f2.28, zatímco ve 2D v rozmezí F1.2 až F2.8. Lepší světelnost ve 3D je zajištěna objektivovými dvojčaty umožňující synchronizovaný zoom, který je pětinasobný,

zatímco ve 2D desetinásobný. Při větším zvětšení pak objektivy pochopitelně ztrácí světelnost. [17]

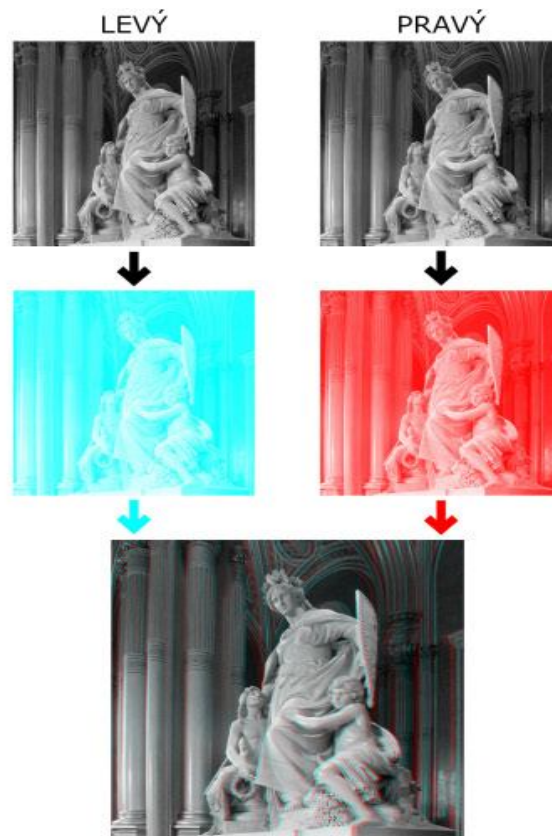
3.2 Princip anaglyfu

Prohlížení anaglyfu přes vhodně zvolené brýle nebo plastové filtry umožňuje každému oku vidět nezávisle levý a pravý obraz v rámci jednoho Anaglyf obrazu. Levý a pravý obraz je v anaglyfu oddělen barevně. Anaglyf je tvořen barvami, které jsou vzájemně doplňkové (jejich substraktivním smícháním vznikne černá, aditivním bílá), viz obr. 3.1. Takových kombinací barev existuje mnoho, ale ne všechny jsou vhodné. Dnes se nejčastěji používá kombinace červená - azurová (red - cyan), přičemž červený filtr bývá na levém oku a azurový na pravém. V minulosti se používaly také kombinace červená - zelená a červená - modrá, které ale nejsou přesně doplňkové.



Obr. 3.1 Barvy, které jsou na kruhu přesně naproti sobě jsou doplňkové. Šipkou je vyznačena červená a azurová. Další kombinace doplňkových barev jsou například modrá - žlutá a fialová - zelená. [19]

Anaglyf vznikne tak, že se obrázek pro levé oko (červený filtr) převede do azurovobílé škály a obrázek pro pravé oko (azurový filtr) do červenobílé škály. Tyto dva obrázky se pak zobrazí přes sebe. V místech, kde se červená a azurová barva setká, vznikne černá barva, nebo odpovídající odstín šedé. Pozorovatel pak vidí každým okem černobílý obraz tvořený doplňkovou barvou k filtru brýlí a ze dvou dílčích obrazů si v mozku vytvoří prostorový vjem, viz obr. 3.2. [19]



Obr. 3.2 Historický postup tisku anaglyfu. Dvěma štočky se přes sebe vytisknou dílčí obrazy azurovou a červenou barvou. [19]

3.3 Typy anaglyfů

A) Doplnkové barvy

Anaglyf používá pouze jeden z páru filtrů opatřený doplňkovou barvou pro každé oko.

Doplňkové barvy používané v anaglyfu jsou červená, zelená, modrá a azurová.

Nejpoužívanější jsou však červená a azurová. Zapojení trichromatické teorie, oko je citlivé na tři základní barvy, červenou, zelenou a modrou barvu. Červený filtr propouští pouze červenou, zatímco azurový filtr červenou nepropouští, ale modrou a zelenou ano (kombinace modré a zelené je vnímána jako azurová). Nedávno byly představené nové barvy filtrů a to žlutá s modrou. (Žlutá barva propouští přes filtr obě barvy, jak červenou tak zelenou.)

B) [\(ACB\) 3D](#)

(ACB) "Anaglyphic Contrast Balance" je patentovaná Anaglyf výrobní metoda Studia 555.

Retinal Rivalry ji řešil u barevných kontrastů v barevných kanálech anaglyf obrazů.

Kontrasty a detaily ze stereo páru jsou zachovány a předělány pro pozorování v anaglyf obrazu.(ACB) způsob vyvážení barevného kontrastu ve stereo páru umožňuje stabilní

zobrazení kontrastních detailů. Tento proces je vhodný pro červený - azurový kanál, ale může být použita i jiná kombinace doplňkových barev. Stejně jako u všech stereoskopických systémů, zobrazených na monitoru nebo vytištěných na papíře, musí být barva displeje nastavená přesně v RGB a brýle k pozorování, musí být opatřeny filtry se správnými barevnými kanály, aby se zabránilo dvojímu zobrazování (tzv. duchů).

(ACB) Postup také umožňuje černobílý (monochromatický) anaglyf.

C) [ColorCode 3D](#)

ColorCode 3D byl vyvinut kolem roku 2000 a používá žluté a modré filtry. Je určen k vnímání téměř plně barevného zobrazení (zejména v rámci RG barevného prostoru) se stávajícími televizemi a dalšími médii. Jedno oko (vlevo používá žlutý filtr) obdrží barevnou informaci napříč spektrem a druhé oko (vpravo používá modrý filtr) vidí monochromatický obraz, mají za cíl docílit hloubkového efektu. Mozek pak spojuje oba obrazy dohromady.

Obrázky zobrazené bez filtrů budou mít tendenci vykazovat světle modré a žluté lemování. Zpětný 2D zážitek pro diváka, který nenosí tyto brýle by měl být obecně lepší, než u předchozího zobrazování anaglyfu červeno-zelenou

D) [Inficolor 3D](#)

Vyvinutý TriOvizem, Inficolor 3D je patentovaný stereoskopický systém, nejprve demonstrován na IBC (International Broadcasting Convention) v roce 2007 a nasazen v roce 2010. Pracuje s tradičními 2D plochými panely, HDTV soubory a používá drahé brýle s komplexními barevnými filtry (purpurová a zelená) a specializované zpracování obrazu, které umožňuje přirozené vnímání barev s 3D zážitkem. Když pozorujete obraz bez brýlí, mohou být některé akce v pozadí mírně zdvojené, i tak umožňuje sledování filmu nebo videoher ve 2D bez brýlí.

3.3.1 Prohlížení Anaglyfu

Pro prohlížení anaglyfu je třeba použít speciální brýle s barevnými průzory - modrozeleným a červeným. Výhodou anaglyfu je jeho velké rozšíření. Pokud vytvoříte 3D obrazy v anaglyfu, může je pozorovat velké množství lidí po celém světě, kteří vlastní příslušné brýle.

3.3.1.1 Ostré červené Anaglyf brýle

S jednoduchými anaglyf brýlemi, je červeně filtrovaný obraz méně jasný, při pohledu zblízka na obrazovku počítače nebo vytištěný obrazec. Pozorování přes červený filtr má za následek využití jinak citlivých čípků na sítnici, než při pozorování obrazu přes azurový filtr, který je

dominantní u zaostřování očí. Lepší kvalitu dosáhneme pomocí tvarovaných akrylátových brýlí, často používající dioptrickou změnu na filtru k narušení rovnováhy mezi červeným filtrem, sloužícímu k jemnější kontuře obrazu a azurovým filtrem, který naopak snižuje měkkost obrazu a zvyšuje ostrost. Pro zvýšení ostrosti obrazu se dá také použít kombinace brýlí na čtení s papírovými brýlemi pro anaglyf.

Korekce jen asi o +1/2 dioptrie na červené čočce, může vést u některých lidí s dioptrickými brýlemi k rozdílu obrazu a to tak, že budou jeden obraz vnímat o něco větší než ostatní. Ačkoli byla podpořena mnoha 3D webovými stránkami je dioptrie "fix" efekt stále poněkud kontroverzní. Zejména pro některé krátkozraké lidi je to nepříjemné. I když je zde asi 400% zlepšení v ostrosti s tvarovanými dioptrickými filtry a výrazné zlepšení kontrastu a tmy. Americká nadace pro tupozrakost používá tuto funkci ve svých plastových brýlích pro školní screening dětského zraku.

3.4 Barevnost anaglyfu

Původně byly anaglyfy pouze černobílé. Pokusy s barevnými fotografickými procesy sice probíhaly již od druhé poloviny 19. století, ale rozumných výsledků bylo dosaženo až ve 20. století. Masové rozšíření přišlo až ve druhé polovině 20. století a to už byl anaglyf překonán polarizovanou projekcí.

V současné době je možné díky výpočetní technice tvořit barevné anaglyfy. Z principu ale nelze zobrazit všechny barvy. Problémy jsou zejména s červenou barvou, která se na levém obrázku zobrazuje jako červená a na pravém jako černá. Stejný problém, ale na opačeném oku, dělá azurová barva, kterou v běžném životě tolik nepotkáváme. Částečným řešením je polobarevný anaglyf (half color), který problémové barvy nahrazuje odstínem šedé. Jinou možností je Dubois anaglyf (vynalezl Eric Dubois), který problémové barvy nahrazuje jinými barvami. Výsledné anaglyfy mají ve všech případech nereálné barvy. Pokud jsou na obrázku velké a výrazné plochy problémových barev, je často vhodnější udělat anaglyf černobílý.

3.5 Problémy anaglyfu

Základní problém anaglyfu je na začátku zmiňovaná nevhodnost pro některé diváky. Další nevýhodou je již také zmíněná nemožnost zobrazení reálných barev. Posledním významným problémem anaglyfu jsou duchové. Vznikají zejména na kontrastních hranách, kde se střídají tmavé a světlé plochy. Mohou vznikat ze dvou důvodů. Prvním a nejčastějším důvodem je běžně používaný grafický formát JPEG, který i při malé kompresi ukládá obrazové informace






po čtvercích. V jinak dobrém anaglyfu tím mohou vzniknout neodstranitelné duchové. Proto je vhodné pro anaglyfy používat nekomprimované formáty, jako PNG nebo TIFF.

Druhým důvodem vzniku duchů mohou být nepřesné barvy vytvořeného anaglyfu. To může záviset na kvalitě i kalibraci monitoru a tiskárny. Lze se setkat i s brýlemi s nepřesnými barvami filtrů. Částečným řešením pro odstranění duchů je tzv. plovoucí okno (floating window). Princip spočívá v tom, že se anaglyf sesadí tak, aby se hlavní motiv, nebo nejproblémovější část obrazu přesně překrývaly. Tím nevzniknou hrany, kde by se mohly duchové objevit. Většinou tím dojde k porušení stereoskopického okna. To pak lze napravit rámečkem plovoucím v prostoru před zobrazovací plochou.

3.6 Barevné kanály Anaglyfu

Anaglyf obrázky mohou použít libovolnou kombinaci barevných kanálů, viz Tab. 3.6.1. Nicméně, pokud chceme stereoskopický obraz sledovat je potřeba mít co nejvíce diametrálně odlišné barvy (nejlépe doplňkové). Nedokonalosti v barevném kanálu, nebo ve filtrech, by mohly způsobit, že některé části obrázku, určené pro jiný kanál, by nebyly vidět. To má za následek stereoskopické dvojité zobrazení, tzv. duchy. Barevné kanály mohou být různě nakombinované. Červená / Azurová je nejčastější. Purpurová / Zelená a Modrá / Žlutá jsou také populární. Červená / Zelená a Červená / Modrá umožňují vytváření monochromatických snímků, zejména červená / zelená. Mnoho vývojářů anaglyfu záměrně integruje nedokonalosti do barevných kanálů a filtrů, které pak umožňují lepší vnímání barev. Jas barevného kanálu pro bílou v %: Červená-30/Azurová-70, Purpurová-41/Zelená-59 nebo zvláště Modrá-11/Žlutá-89. Světlejší zobrazení kanálu se ztmaví nebo světlejší zobrazení filtrem se může ztmavit, aby obě oči získávaly vyvážený obraz. Volba ideálního zobrazení pomocí filtrů je dána tím, jaký barevný kanál anaglyfu bude pozorován. [6]

Tab. 3.6.1 Stručný přehled Anaglyfů [6]

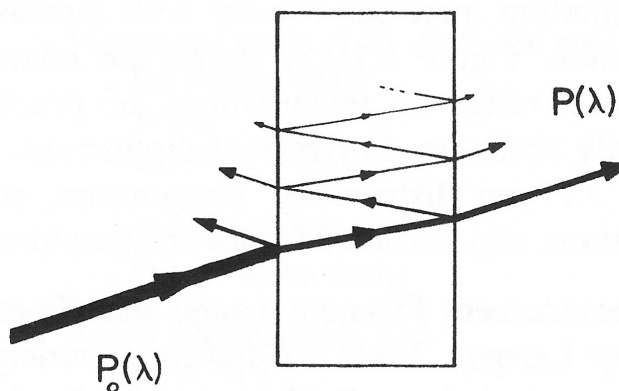
Kombinace	Levé oko	L R	Pravé oko	Podání barev	Popis
červená-zelená	červená		zelená	Monochromatické	Předchůdce červené-azurové, používá se v knihách a časopisech
červená-modrá	červená		modrá	monochromatické	Použití v tištěných dokumentech
červená-azurová	červená		Azurová (zelená+modrá)	Barva (slabší červená, dobrá zelená)	Dobré vnímání barev zelené a modré, bez červené. V současné době je nejběžněji používaná.
Infricolor	Komplexní purpurová		Komplexní zelená	Barva (téměř plně a příjemné přírodní barvy s vynikajícím vnímáním tónů pleti)	Vyvinutý společností TriOviz, Pracuje s tradičními 2D obrazovkami a televizory (LCD, plazma) a používá nový komplex barevných filtrů a speciální zpracování obrazu, která umožňuje přirozené vnímání barev s příjemným 3D zážitkem.
ColorCode 3D	Žlutá (červená + zelená + neutrální šedá)		Tmavě modrá	Barva (téměř plně vnímání barev)	lepší podání barev, ale tmavší obraz, vyžaduje tmavé místnosti nebo velmi jasný obraz. Starší lidé mohou mít problémy při vnímání modré. Funguje nejlépe v prostoru RG.

4. Filtry

V nejširším významu je optický filtr nástroj nebo materiál, který mění selektivně nebo neselektivně spektrální rozdělení dopadajícího světla. Typickými příklady jsou barevné a interferenční filtry. Hranolové a mřížkové monochromátory, reflexní materiály jako jsou zrcadla a nátěry mohou být klasifikovány také jako optické filtry, ale mnohem lépe se s nimi zachází jednotlivě. Můžeme zde popsat velké množství filtrů, ale jen málo z nich má přímý podíl na kolorimetrii.

4.1 Absorpční filtry

Nejběžnější typy absorpčních filtrů jsou ty, které jsou vyrobeny ze skla, plastu nebo kapaliny. Barviva se v nich rozpouští nebo suspendují. Zářivý tok $P_0(\lambda)$ dopadající na první plochu filtru se šíří skrze střed filtru a vychází z druhé plochy jako zářivý tok $P(\lambda)$, viz obr. 4.1.1. Část zářivého toku, která dopadá na první a druhou plochu je ztracena v důsledku odrazu od plochy a zbývající část zářivého toku je přenesena, avšak snížena v důsledku docházející absorpce uvnitř filtru.



Obr. 4.1.1 Absorpční filtr [2]

Přesná matematická formulace propustnosti absorpčního filtru je poměrně složitá a závisí na řadě parametrů, včetně optických konstant média, které jsou dány indexem lomu, tloušťkou média, úhlem dopadu, polarizací, vlnovou délkou a časovou a prostorovou koherencí vyzařované energie. Všechny tyto parametry hrají svou roli při měření spektrální propustnosti, kdy je cílem měření nejvyšší přesnost a správnost. Nicméně, ve většině praktických situacích se většina parametrů podílí na přesném vymezení propustnosti a jejich měření nemá žádný nebo jen velmi malý význam a díky tomu se rovnice vztahující

k propustnosti filtrů poměrně zjednoduší. Zde je několik vzorců, platných pro všeobecné použití. Pro homogenní izotropní absorpční filtry, platí Bouguerův zákon: $v(\lambda) = 10^{-dn(\lambda)}$, kde d je délka dráhy svazku světla ve filtračním médiu a m je spektrální absorpce v prostředí. Při kolmém dopadu je d rovno tloušťce filtru, $v(\lambda)$ se nazývá vnitřní spektrální propustnost filtru a je definována jako poměr zářivého toku dopadajícího na zadní plochu filtru ku toku, který vstupuje do filtru na jeho přední ploše.

Změny v koncentraci vodního roztoku mají stejný účinek jako změny v optické délce. Tedy s použitím $m(\lambda) = c\varepsilon(\lambda)$ dostaneme vzorec $v(\lambda) = 10^{-dce(\lambda)}$, který označujeme jako Beerův zákon, kde c se nazývá koncentrace absorbující rozpuštěné látky, která měří převážně v gramech na litr, $\varepsilon(\lambda)$ je koeficient extinkce rozpuštěné látky materiálu na vlnové délce λ . Bylo zjištěno, že Beerův zákon obecně platí pro nízké a střední koncentrace.

Pokud d_0 a d je původní a nová tloušťka příslušného absorpčního filtru dodržující Bouguerův nebo Beerův zákon a pokud $v_0(\lambda)$ a $v(\lambda)$ odpovídají vnitřní spektrální propustnosti, pak $v(\lambda) = [v_0(\lambda)]^{d/d_0}$, je vztah často označován jako Lambertův zákon. Pro praktickou manipulaci s $v(\lambda)$ je vhodné využít vnitřní optické hustoty $\delta(\lambda)$. Při určování propustnosti z velmi přesně přiřazených planparalelních prvků (filtry, kostky, atd.) pro paralelní paprsek v monochromatickém světle (např. spektrální čáry), je nutno mít na paměti možnost interferenčních jevů. Obvykle se poznají podle světlých a tmavých proužků. V mnoha případech interference přispěje jen velmi málo k propustnosti filtrem. Absorpční filtry mohou být kombinovány do série s cílem získat lepší charakteristiku spektrální propustnosti. U spektrální propustnosti $\tau(\lambda)$ při kombinaci filtrů je obtížné předvídat, zda je potřeba brát v úvahu interferenci mezi povrchy. Vzorce stávají složité a numerické predikce neproveditelné. V důsledku toho se dává přednost přímému měření na spektrofotometru.

A) Kombinace filtrů spojených optickým tmelem

Spektrální propustnost kombinací k filtrů, které jsou navíc spojené je dána podle: $\tau_c(\lambda) = [1 - \rho_0(\lambda)] v_1(\lambda)[1 - \rho_1(\lambda)] v_2(\lambda) \times [1 - \rho_2(\lambda)] \dots [1 - \rho_{j-1}(\lambda)] \times v_i(\lambda)[1 - \rho_j(\lambda)]$, kde $\rho_j(\lambda)$ je odrazivost vyskytující se na j -tých plochách ($j = 0, 1, 2, 3, \dots, k$) oddělující dvě sousední plochy a $v_i(\lambda)$ ($i = 1-k$) je vnitřní spektrální propustnost i -té části filtru.

To bývá často předpokladem, že indexy lomu jednotlivých filtrů jsou stejné. Předpokládá se, že tloušťka a absorpce tmelu je zanedbatelná.

B) Kombinace filtrů oddělených vzduchovou mezerou

Spektrální propustnost kombinací k filtrů oddělených vzduchovou mezerou je dána podle: :
 $\tau_c(\lambda)=[1-\rho_1(\lambda)]^2 v_1(\lambda)[1-\rho_2(\lambda)]^2 \times v_2(\lambda)\dots[1-\rho_j(\lambda)]^2 v_i(\lambda)$ nebo $\tau_c(\lambda) = \tau_1(\lambda) \tau_2(\lambda) \dots \tau_k(\lambda)$. To znamená, že spektrální propustnost kombinací filtrů, z nichž jsou všechny odděleny vzduchovou mezerou, je dána součinem spektrálních propustností jednotlivých součástí filtru. Z této rovnice je snadno vidět, že ztráta odrazem v kombinaci multifiltrů může být značná, pokud jsou filtry odděleny vzduchem. [2]

4.1.1 Spektrofotometry

K měření absorpčních filtrů se používají přístroje známé jako spektrofotometry, které se k tomuto úkonu hodí nejlépe, ale můžeme využít i spektroradiometr. Spektrofotometr je na měření filtrů nejlepší proto, že používá komparační (porovnávací) měření. To znamená, že používá dvě větve k měření. Jednou větví vede referenční světlo, které beze změny dopadne na detektor a u druhé větve vkládáme paprsku do cesty předměty u nichž chceme vědět jejich spektrální charakteristiku. Propustnost tedy známe v “reálném“ čase. Zatímco u spektroradiometru musíme nejprve změřit referenční světlo, následně filtr a nakonec je mezi sebou podělit, aby nám vyšla požadovaná propustnost. Spektrofotometr je vědecký přístroj, který nám pomáhá zjistit chemické složení pevné nebo kapalné látky. Princip měření pomocí spektrofotometru je v měření spektrálních vlastností měřených kusů v závislosti na vlnové délce dopadajícího světla. Zde si popíšeme jen dva , PerkinElmer λ 900 (viz obr. 4.1.1.1) a PerkinElmer/Hitachi 300 (viz obr. 4.1.1.2), na kterých byly měřeny filtry anaglyf brýlí.

A) PerkinElmer λ 900

Skládá se ze dvou zdrojů světla, jednoho pro UV od 175 nm po 379 nm a druhého pro VIS od 380 nm a NIR (near infrared = blízká infračervená oblast) po 3300 nm, dále obsahuje dva monochromátory, jeden pro UV a VIS s 1440 čar/mm a druhý pro NIR s 360 čar/mm. Rozsah ve kterém může pracovat je od 175 nm UV oblasti po 3300 nm NIR oblasti. Měření lze provádět pomocí stolního nebo přenosného počítače. Citlivost ve VIS a UV oblasti je $< 0,05$ nm a v NIR oblasti je $< 0,2$ nm. Jako detektory jsou zde použity, fotonásobič R6872 pro vysoké energie v celé oblasti UV / VIS vlnových délek. Peltier chlazený PBS detektor pro NIR.



Obr. 4.1.1.1 PerkinElmer λ 900

B) PerkinElmer/Hitachi 330

Tento Perkin-Elmer/Hitachi 330 UV-VIS-NIR patří mezi starší modely, na kterém se ještě zapisovalo na papír, obsahuje dva zdroje záření v rozmezí 185 nm – 2600 nm vlnových délek. Perkin Elmer Model 330 je použitelný pro měření propustnosti a absorpce, pevných, kapalných a plynných látek ve viditelné, ultrafialové a blízké infračervené oblasti. Jeho citlivost je 0,07 nm.



Obr. 4.1.1.2 PerkinElmer/Hitachi 330

4.2 Skleněné filtry

Komerčně dostupné je velké množství skleněných filtrů. Zde bude zmíněno jen malé množství. U některých skel, zejména u těch, která obsahují jako barvivo oxid seleničitý i malá změna teploty v místnosti výrazně ovlivňuje spektrální propustnost. U ostatních skel, může být účinek malý a měřitelný jen přes větší rozsah teplot. Některá obecná pravidla, viz. obr. 4.2, jsou popsána zde: spektrální propustnost se zvyšuje se zvyšující se vlnovou délkou a zpravidla klesá s rostoucí teplotou. Čím vyšší je strmost křivky spektrální propustnosti, tím větší je zpravidla vliv teploty. Spektrální propustnost, která klesá s rostoucí vlnovou délkou je obecně málo ovlivnitelná, pokud ale není často ovlivněna zvyšující se teplotou. Křivky spektrálních propustností různých vlnových délek jsou málo ovlivnitelné změnou teploty. Změny

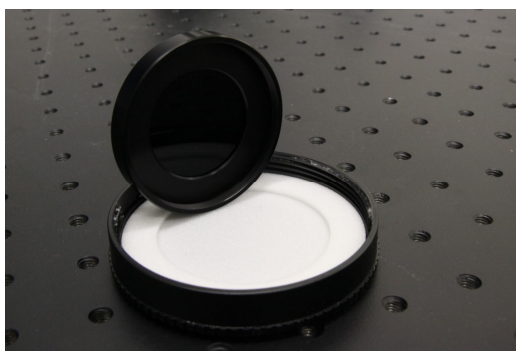
propustnosti způsobené teplotou jsou vratné, to znamená, že se filtr může vždy vrátit do původní propustnosti pro udanou teplotu. Mnoho skleněných filtrů fluoreskuje a to zejména při ozáření ultrafialovým světlem. Fluorescence může být někdy problematická a to především tehdy, když filtr absorbuje excitující energii nebo fluoreskuje sám. Povrchy některých filtrů se zamží při styku se vzdušnou vlhkostí, vysokou vlhkostí nebo vysokou teplotou. Citlivá skla mohou být někdy chráněna vtmelením mezi dvě méně náchylná skla. Také je možné tato skla ochránit tenkými vrstvami. [2]

4.2.1 Šedý filtr

Ve fotografii a optice se šedý filtr (neutrální filtr, anglicky neutral density, ND) používá k redukování světla všech vlnových délek nebo barev. Důvod používání šedých filtrů ve fotografii je možnost fotografa měnit expoziční čas a clonu v mnohem větším rozmezí a mít tak kontrolu nad délkou expozice i za extrémních okolností, dalším důvodem použití šedých filtrů je snížení intenzity všech vlnových délek, aby nedošlo ke zkreslení obrazu.

Ve skutečnosti nejsou šedé filtry (viz obr. 4.2.1.1) dokonalé a neredukují intenzitu všech vlnových délek stejnoměrně. To může způsobit barevné vady na záznamu, zejména u levných filtrů. Většina šedých filtrů je určena pouze pro viditelnou oblast spektra a neodstraňuje rovnoměrně všechno záření v ultrafialové a infračervené oblasti. To může být nebezpečné při sledování zářících zdrojů (jako Slunce nebo žhavého kovu či skla) jež emitují intenzivní záření i mimo viditelnou oblast a mohou způsobit poškození zraku, dokonce i když se zdají být ne příliš jasnými při pozorování přes filtr.

Šedé filtry se též používají pro kalibraci spektrofotometrů měřením kolmé spektrální propustnosti zkušebních filtrů. [21]



Obr. 4.2.1.1 ND filtr

4.3 Želatinové filtry

Želatinové filtry jsou vyrobeny vmícháním organického barviva do želatiny a nanесeny jako povlak na skleněnou desku. Poté co je povlak suchý, se želatinový film odstraní z desky.

Želatinové filmy jsou k dispozici buď jako lakované nebo stmelенé mezi skleněné desky.

Jejich spektrální charakteristika je velice podobná skleněným filtrům. Želatinové filtry jsou obecně levnější než skleněné a mohou být snadno přizpůsobeny na požadovanou velikost a tvar. Nicméně, většina želatinových filtrů není tak stabilní jako skleněné filtry, hlavně co se týče dlouhodobého vystavení světlu, vysokým teplotám a vlhkosti. V kolorimetrii se využívají jen zřídka. [2]

5. Praktické měření

5.1 Použité vybavení

V průběhu celého praktického měření jsem kromě používání spektroradiometru CS-2000, který je popsán v příloze B a k němu dodaného softwaru CS-S10w, který popsán v příloze C, používal i další vybavení pro tvorbu a zpracování Anaglyfu.

5.1.1 3D kamera JVC GS-TD1

Tuto kameru od japonské firmy JVC jsem používal k záznamu 3D obrazu pro polarizované brýle a následně převáděl do Anaglyfu.



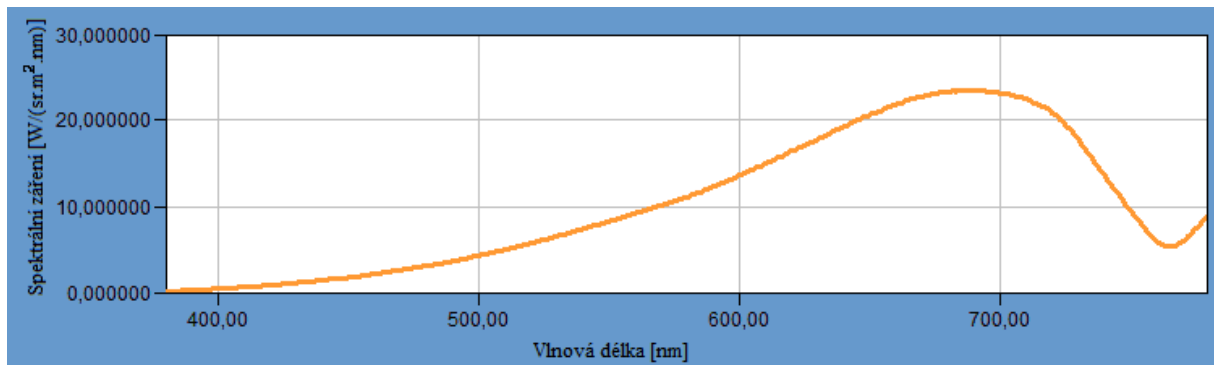
Obr. 5.1.1.1 3D kamera JVC GS-TD1 [17]

5.1.2 OSL1-EC Vysoko-intenzitní zdroj světla

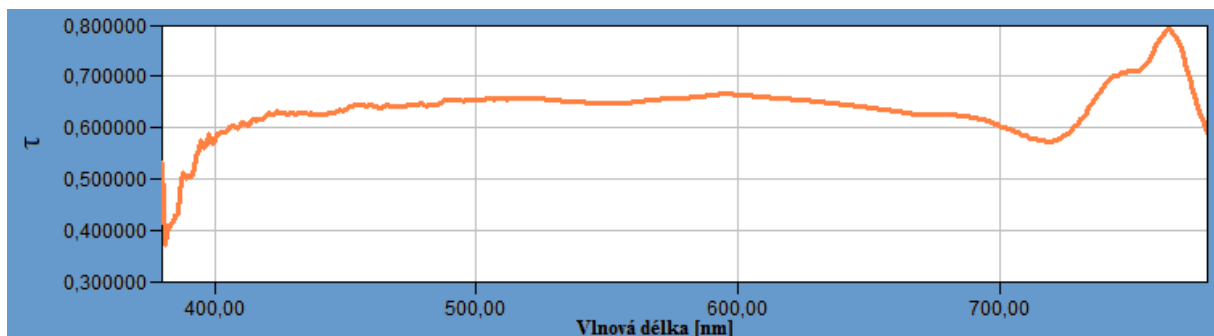
Tento vysoko-intenzitní zdroj světla od firmy THORLABS (viz obr. 5.1.2.1), jsem používal jako referenční zdroj k měření propustnosti filtrů pomocí odrazu od referenční “bílé“ plochy (viz obr. 5.1.2.2). Jeho teplota chromatičnosti je 3200K. Jako zdroj světla využívá halogenovou žárovku. Má možnost regulace její intenzity. Doplněk, který umožňuje lepší manipulaci se vzniklým světlem je světlovod o délce 2m (viz obr. 5.1.2.3), který uvnitř obsahuje kapalinu pro lepší vedení světla.



Obr. 5.1.2.1 OSL1-EC [12]



Obr. 5.1.2.2 Spektrální charakteristika OSLI-EC



Obr. 5.1.2.3 Spektrální propustnost světlovodu o délce 2m

5.2 Měření propustnosti filtrů

Abychom porozuměli této problematice co nejlépe, budeme si muset ještě definovat některé proměnné, jako je například absorpce, propustnost úhel měření.

Absorpce světla (záření) je v širším smyslu pohlcení a zeslabení záření při jeho šíření určitým prostředím vyvolané například rozptylem záření. Odborněji je to fyzikální proces, při kterém je energie fotonu pohlcena látkou, například atomem, jehož valenční elektrony přecházejí mezi dvěma úrovněmi energie.

Pohlcená energie může být opět vyzářena, nebo může být přeměněna na tepelnou energii a po zachycení uvolněného elektronu jiným atomem se energie přemění na záření, obvykle jiné vlnové délky (tzv. emise záření). Míru absorpce vyjadřuje absorpční koeficient.

Lambertův zákon: při pohlcení světelné energie může dojít k její přeměně na teplo. Pohlcená energie se však může přeměnit zpět ve světelnou energii, což se označuje jako luminiscence.

Experimentálně bylo zjištěno, že při průchodu světla o intenzitě I vrstvou látky o tloušťce $d\delta$ dojde k zeslabení této intenzity o hodnotu dI , která je úměrná původní intenzitě světla a síle vrstvy, tzn. $dI = -\beta I d\delta$

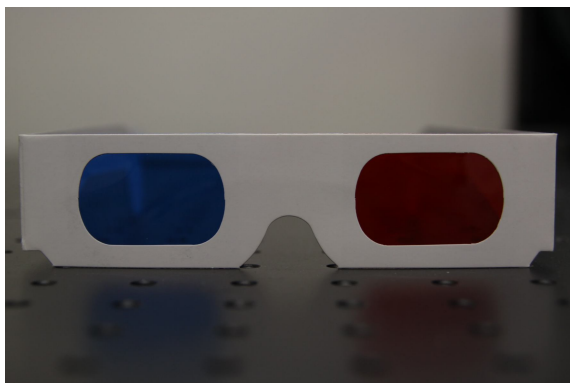
Integrací tohoto vztahu dostaneme tzv. Lambertův zákon (Lambertův-Beerův zákon)

$I = I_0 e^{-\beta \delta}$, kde I je intenzita světla po průchodu prostředím o tloušťce δ , přičemž I_0 představuje intenzitu prošlého světla pro $\delta = 0$, tj. při nulové tloušťce vrstvy. Konstanta β je absorpční koeficient. Konstanta $\tau = e^{-\beta}$ bývá označována jako propustnost.

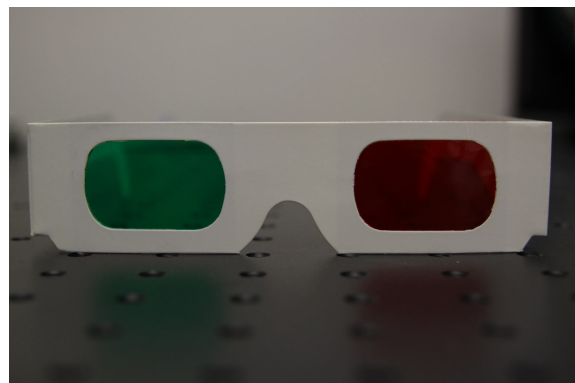
Úhel měření je vlastně velikost svazku dopadajícího na detektor omezená clonou. V našem případě clonou velikosti 1° , $0,2^\circ$ a $0,1^\circ$ k velikosti zorného pole objektivu. Velikost clony měníme v závislosti na velikosti měřeného předmětu a požadované citlivosti.

5.2.1 Měření propustnosti filtrů Anaglyf brýlí

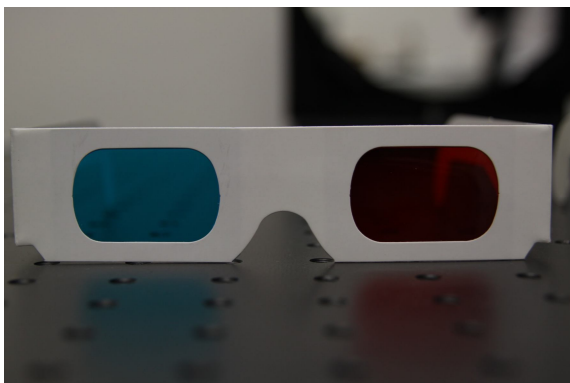
K měření propustnosti anaglyf brýlí jsem měl k dispozici 4 druhy brýlí. Od každého druhu další 3-4 kusy. Nakonec jsem si vybral jen jeden kus od jednoho druhu. Jelikož jsem měl na výběr takovéto množství brýlí, vybral jsem vždy ty nejméně poškrábané a co nejlépe poohýbané. Tyto deformace by měly zbytečný vliv na kvalitu výsledku. Pro lepší orientaci budou dále nazývány AnagB1 pro červený a modrý filtr, viz. obr. 5.2.1.1, AnagB2 pro červený a zelený filtr, viz. obr. 5.2.1.2, AnagB3 pro červený a azurový filtr, viz. obr. 5.2.1.3 a AnagB4 pro jantarový a modrý filtr, viz. obr. 5.2.1.4.



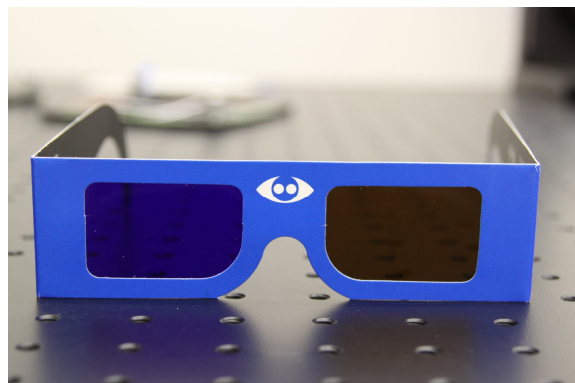
Obr. 5.2.1.1 AnagB1



Obr. 5.2.1.2 AnagB2



Obr. 5.2.1.3 AnagB3



Obr. 5.2.1.4 AnagB4

Před samotným měřením, je zapotřebí připravit místnost a vybavení do požadovaného stavu

5.2.1.1 Příprava měření

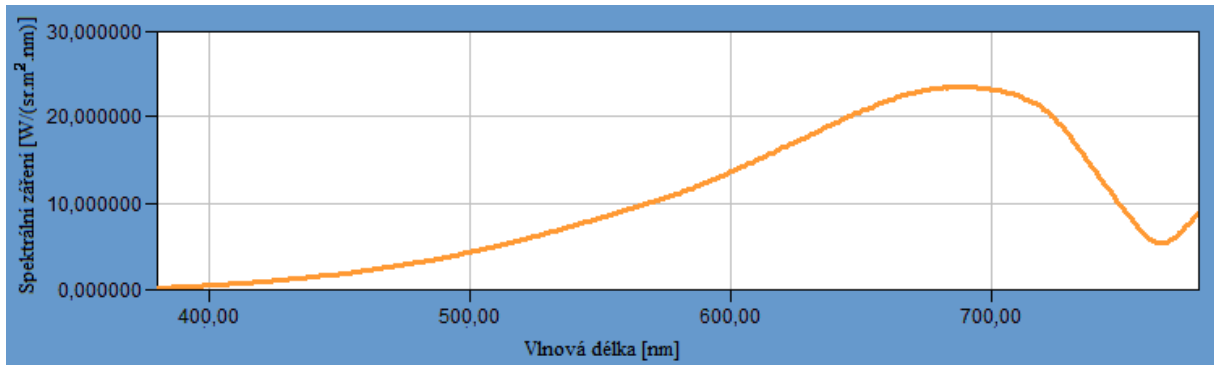
- Zabezpečit laboratoř proti vniknutí rušivého záření, taktéž eliminovat rušivé záření uvnitř laboratoře (diody u počítačů, obrazovky monitorů, ...)
- Uvést zdroj záření do pracovního režimu (nechat nažhavit zdroj záření alespoň 10 minut)
- Ukolmení světlovodu na “absolutně“ bílé pozadí
- Měřicí zařízení připojit do sítě el. napětí, propojit s vyhodnocovací jednotkou (PC), umístění do vhodné vzdálenosti od měřeného objektu (30-40 cm), očištění objektu a objektivu, nastavení optické osy kolmo k měřenému objektu, zapnutí měřicího zařízení (CS-2000) a ponechání 20-ti minut než bude přístroj připraven k měření, spárovat s přiloženým softwarem (CS-S10w), zaostření na měřený objekt

5.2.1.2 Realizace měření

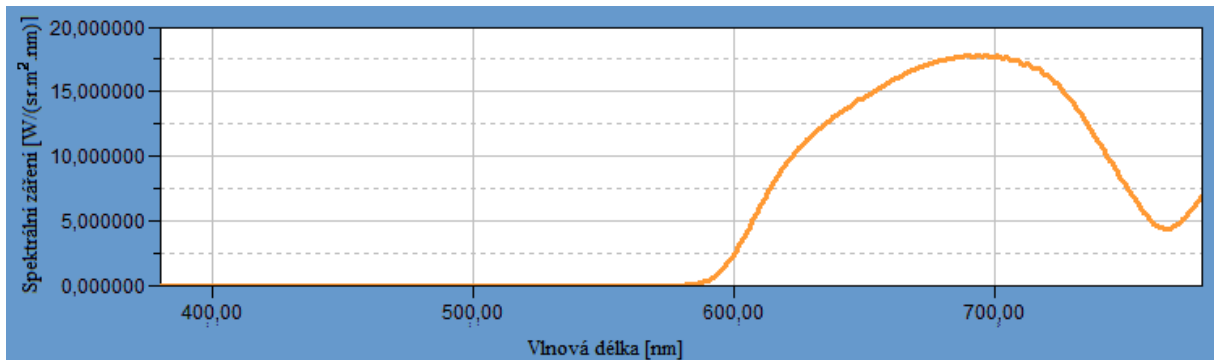
- Nejprve si změříme referenční bílé spojité světlo, které se nám odráží od bílého pozadí
- Začneme vkládat do cesty svazku filtry
- Přiložený software nastavíme do normal modu L_v, x, y
- Ke zvýšení přesnosti výsledku nastavíme v softwaru 10 měření po 10 opakováních s výsledným zprůměrnováním
- Naměřené hodnoty filtrů podělíme hodnotami, které jsme naměřili u bílého spojitého světla a tak získáme propustnosti filtrů $\tau(\lambda) = E_c(\lambda) / E(\lambda)$, kde $E_c(\lambda)$ jsou naměřené hodnoty jednotlivých filtrů a $E(\lambda)$ jsou pak hodnoty bílého spojitého záření.

5.2.1.3 AnagB1-červený

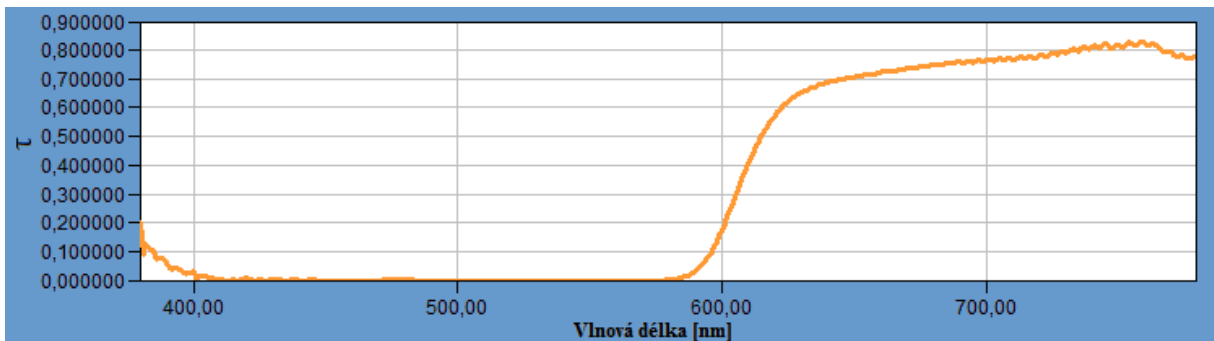
Cílem tohoto, v pořadí prvního, měření bylo zjistit spektrální propustnost červeného filtru, používaného v anaglyf brýlích, k vytvoření 3D obrazu. Při tomto měření jsem se seznamoval s obsluhou měřicího přístroje CS-2000 a s přiloženým softwarem CS-S10w. Nejprve jsem si nachystal zdroj záření. Po správném ukolmení světlovodu a nastavení měřicího přístroje tak, aby do objektivu vnikalo co možná největší množství světla, jsem nastavil úhel měření na $0,1^\circ$. Tento úhel jsem si vybral z důvodu největšího rozsahu citlivosti, to je od 0,3 do $500,000\text{cd/m}^2$. Po ustálení všech proměnných, jsem nejprve změřil spektrální charakteristiku referenčního světla (viz obr. 5.2.1.3.1) a poté jsem vložil do cesty svazku červený filtr, tak aby vyplňoval veškerý prostor před objektivem a změřil jeho spektrální charakteristiku (viz obr. 5.2.1.3.2). Neměřené hodnoty jsem mezi sebou podělil a získal tak propustnost červeného filtru (viz obr. 5.2.1.3.3).



Obr. 5.2.1.3.1 Spektrální charakteristika referenčního světla



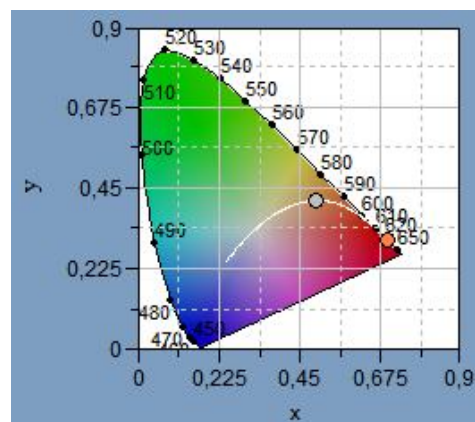
Obr. 5.2.1.3.2 Spektrální charakteristika referenčního světla + AnagBI-červený



Obr. 5.2.1.3.3 Spektrální propustnost AnagBI-červený

Tab. 5.2.1.3.1 Hodnoty x , y a L_v pro CIE 1931

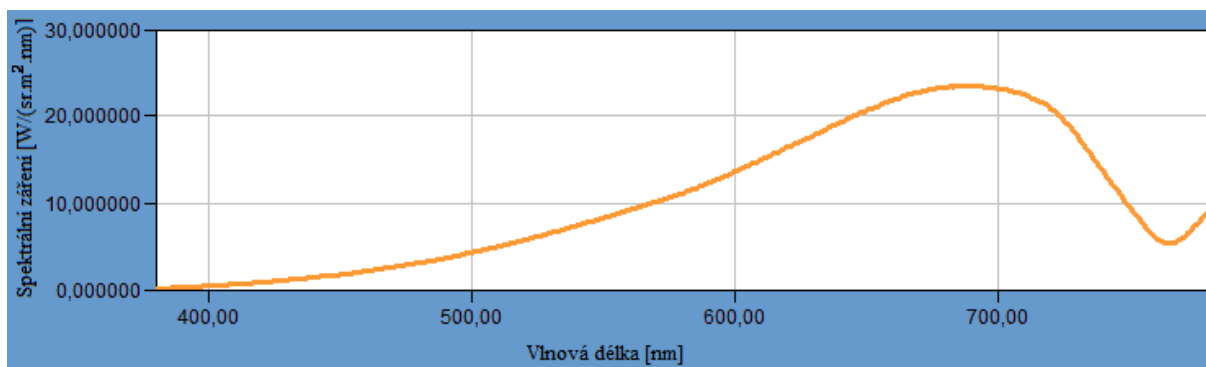
	x	y	L_v [cd/m^2]
Referenční světlo	0,4935	0,4155	711423,97
AnagBI-červený	0,696	0,303	119959,4



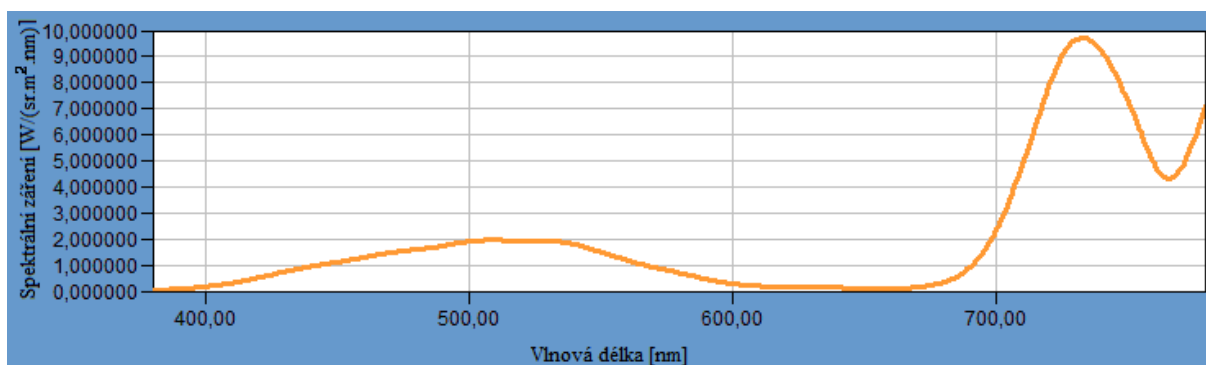
Ref. světlo a ref. světlo + AnagBI-červený
v CIE 1931

5.2.1.4 AnagB1-modrý

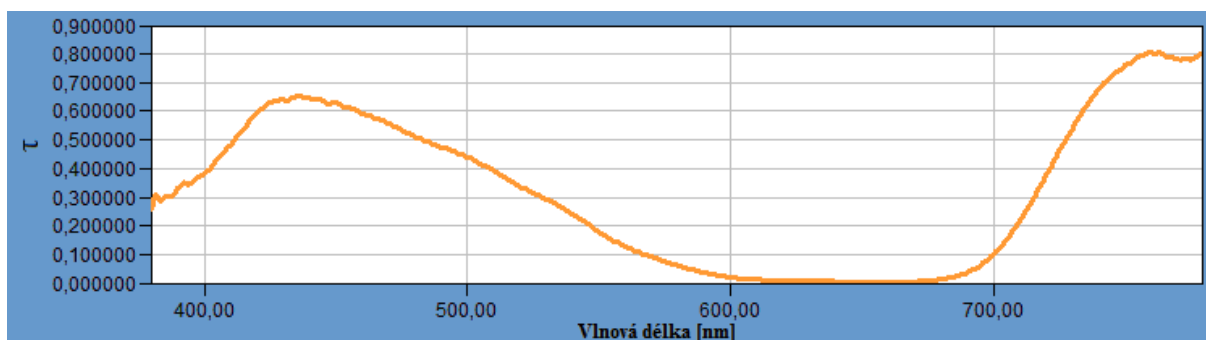
Cílem tohoto měření bylo zjistit spektrální propustnost modrého filtru, používaného v anaglyf brýlích, k vytvoření 3D obrazu. Při tomto měření jsem postupoval stejně jako v předchozím. Po ustálení všech proměnných, jsem nejprve změřil spektrální charakteristiku referenčního světla (viz obr. 5.2.1.4.1) a poté jsem vložil do cesty svazku modrý filtr, tak aby vyplňoval veškerý prostor před objektivem a změřil jeho spektrální charakteristiku (viz obr. 5.2.1.4.2). Neměřené hodnoty jsem mezi sebou podělil a získal tak propustnost modrého filtru (viz obr. 5.2.1.3.3).



Obr. 5.2.1.4.1 Spektrální charakteristika referenčního světla



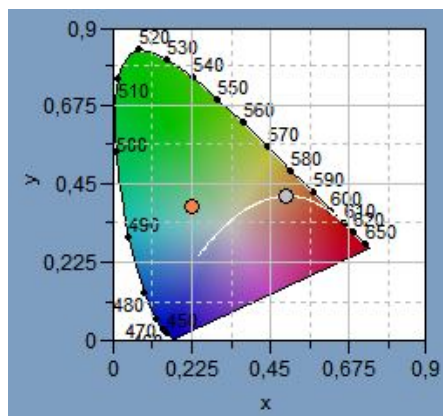
Obr. 5.2.1.4.2 Spektrální charakteristika referenčního světla + AnagB1-modrý



Obr. 5.2.1.4.3 Spektrální propustnost AnagB1-modrý

Tab. 5.2.1.4.1 Hodnoty x , y a L_v pro CIE 1931

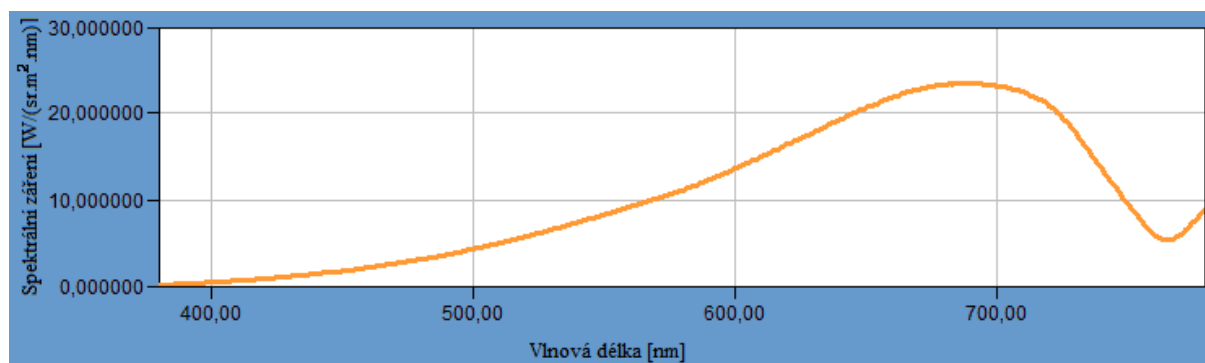
	x	y	L_v [cd/m^2]
Referenční světlo	0,4935	0,4155	711423,97
AnagB1-modrý	0,2251	0,3841	84728,61



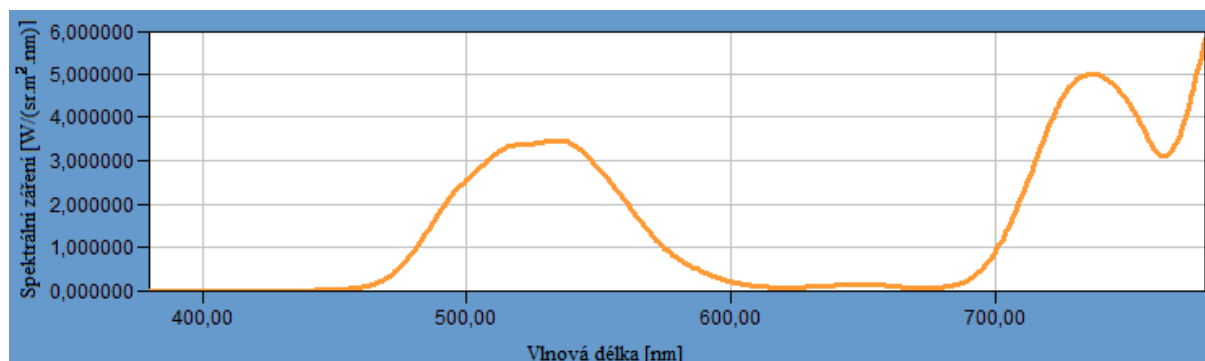
Ref. světlo a ref. světlo + AnagB1-modrý
v CIE 1931

5.2.1.5 AnagB2-zelený

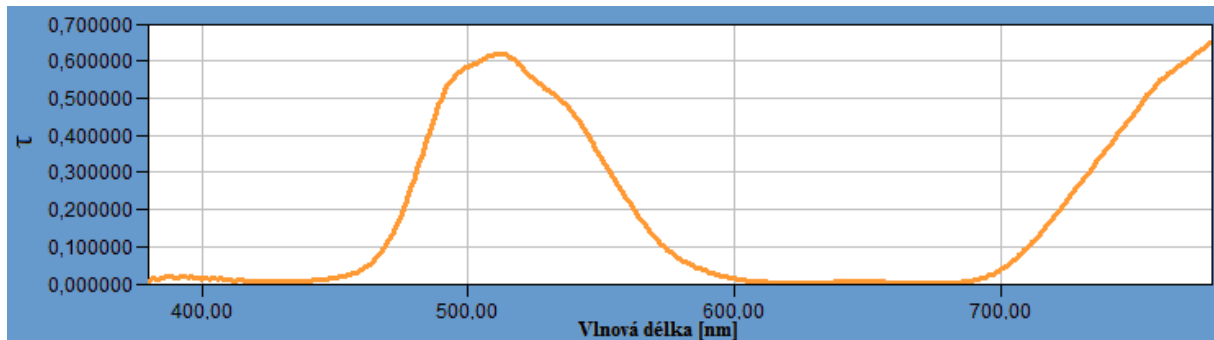
Cílem tohoto měření bylo zjistit spektrální propustnost zeleného filtru, používaného v anaglyf brýlích, k vytvoření 3D obrazu. Při tomto měření jsem postupoval stejně jako v předchozím. Po ustálení všech proměnných, jsem nejprve změřil spektrální charakteristiku referenčního světla (viz obr. 5.2.1.5.1) a poté jsem vložil do cesty svazku zelený filtr, tak aby vyplňoval veškerý prostor před objektivem a změřil jeho spektrální charakteristiku (viz obr. 5.2.1.5.2). Neměřené hodnoty jsem mezi sebou podělil a získal tak propustnost zeleného filtru (viz obr. 5.2.1.5.3).



Obr. 5.2.1.5.1 Spektrální charakteristika referenčního světla



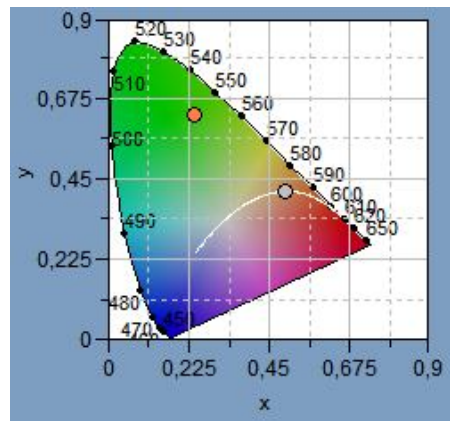
Obr. 5.2.1.5.2 Spektrální charakteristika referenčního světla + AnagB2-zelený



Obr. 5.2.1.5.3 Spektrální propustnost AnagB2-zelený

Tab. 5.2.1.5.1 Hodnoty x , y a L_v pro CIE 1931

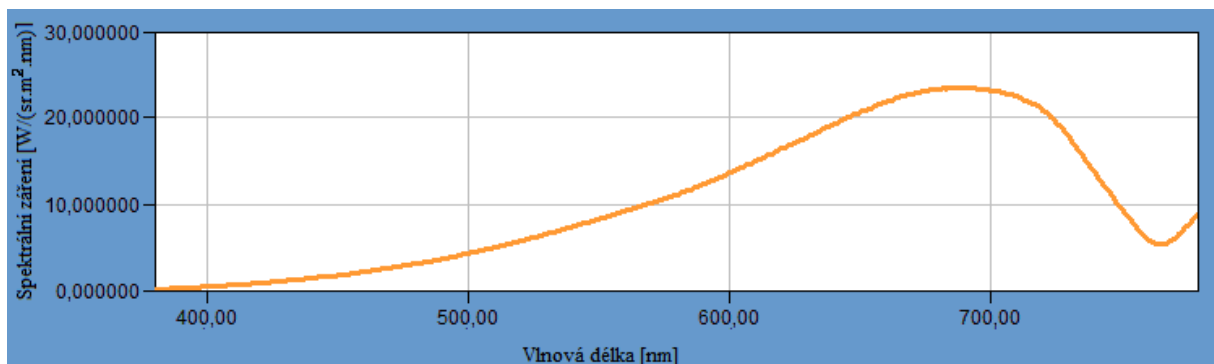
	x	y	L_v [cd/m^2]
Referenční světlo	0,4935	0,4155	711423,97
AnagB2-zelený	0,2423	0,6277	129411,37



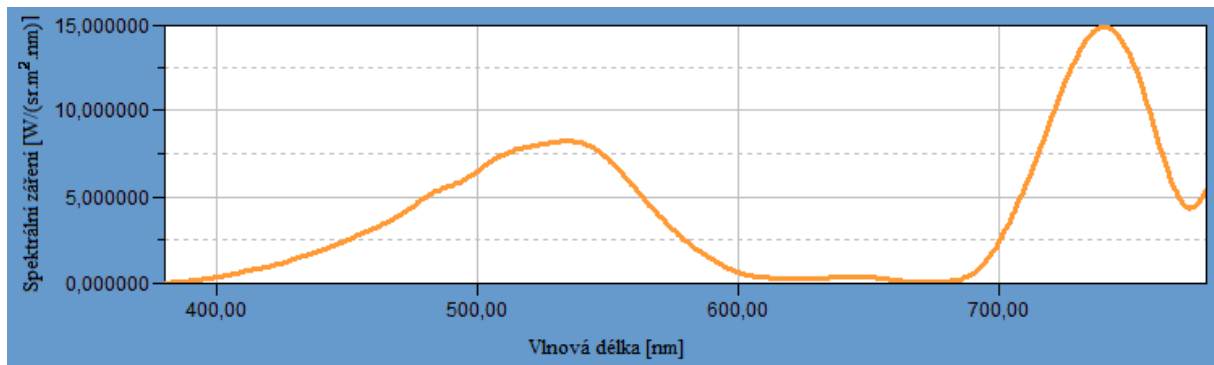
Ref. světlo a ref. světlo + AnagB1-zelený
v CIE 1931

5.2.1.6 AnagB3-azurový

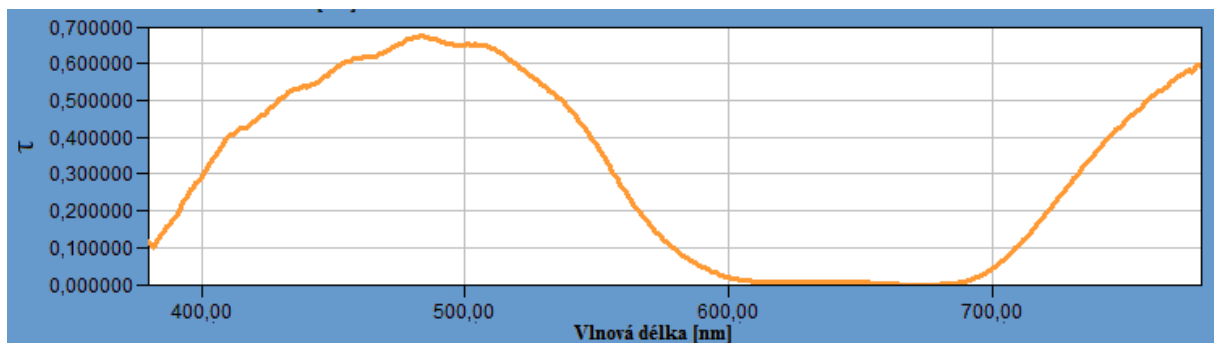
Cílem tohoto měření bylo zjistit spektrální propustnost azurového filtru, používaného v anaglyf brýlích, k vytvoření 3D obrazu. Při tomto měření jsem postupoval stejně jako v předchozím. Po ustálení všech proměnných, jsem nejprve změřil spektrální charakteristiku referenčního světla (viz obr. 5.2.1.6.1) a poté jsem vložil do cesty svazku azurový filtr, tak aby vyplňoval veškerý prostor před objektivem a změřil jeho spektrální charakteristiku (viz obr. 5.2.1.6.2). Neměřené hodnoty jsem mezi sebou podělil a získal tak propustnost azurového filtru (viz obr. 5.2.1.6.3).



Obr. 5.2.1.6.1 Spektrální charakteristika referenčního světla



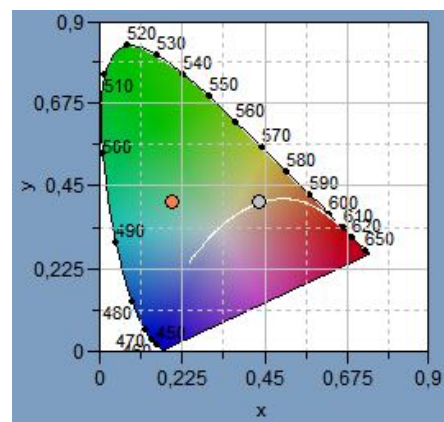
Obr. 5.2.1.6.2 Spektrální charakteristika referenčního světla + AnagB3-azurový



Obr. 5.2.1.6.3 Spektrální propustnost AnagB3-azurový

Tab. 5.2.1.6.1 Hodnoty x, y a Lv pro CIE 1931

	x	y	Lv [cd/m ²]
Referenční světlo	0,4935	0,4155	711423,97
AnagB3-azurový	0,2262	0,4709	336875,05

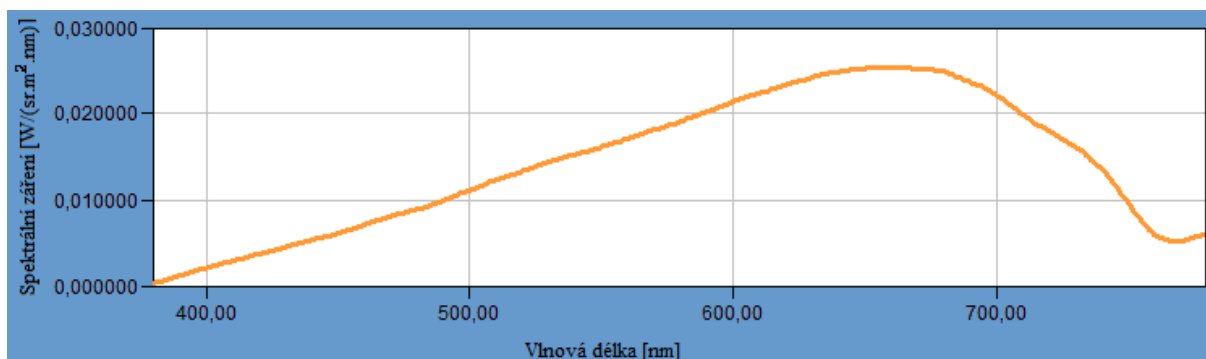


Ref. světlo a ref. světlo + AnagB1-azurový
v CIE 1931

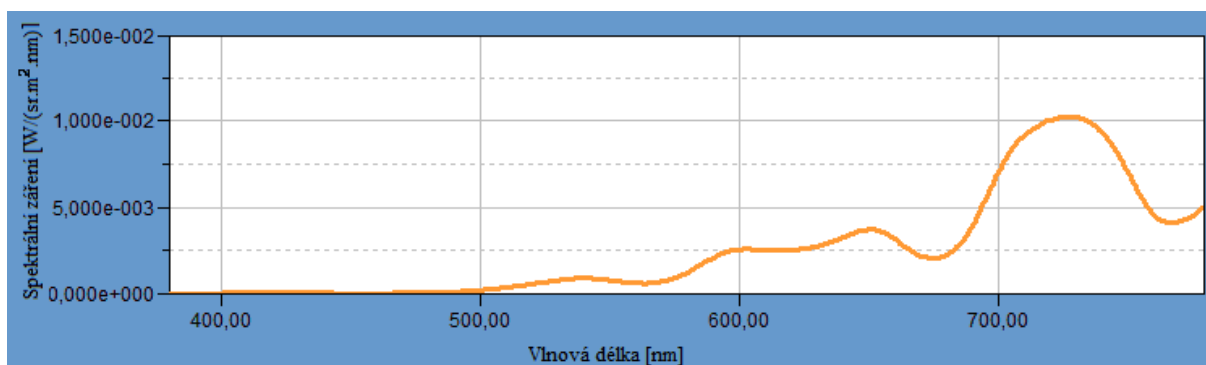
5.2.1.7 AnagB4-žlutý

Cílem tohoto měření bylo zjistit spektrální propustnost žlutého filtru, používaného v anaglyf brýlích, k vytvoření 3D obrazu. Žlutý filtr se používá současně s modrým filtrem u technologie Color-Code 3D, která byla popsána výše. Při tomto měření jsem postupoval stejně jako v předchozím. Po ustálení všech proměnných, jsem nejprve změřil spektrální charakteristiku referenčního světla (viz obr. 5.2.1.7.1) a poté jsem vložil do cesty svazku žlutý filtr, tak aby vyplňoval veškerý prostor před objektivem a změřil jeho spektrální

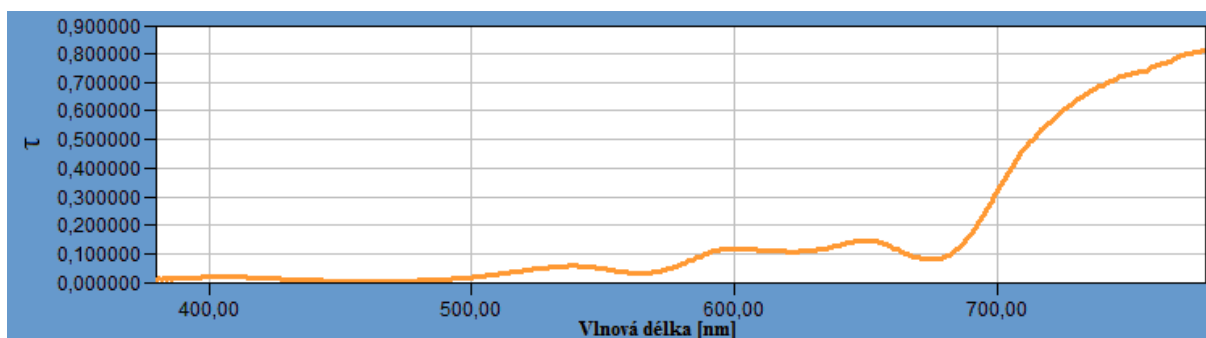
charakteristiku (viz obr. 5.2.1.7.2). Neměřené hodnoty jsem mezi sebou podělil a získal tak propustnost žlutého filtru (viz obr. 5.2.1.7.3).



Obr. 5.2.1.7.1 Spektrální charakteristika referenčního světla



Obr. 5.2.1.7.2 Spektrální charakteristika referenčního světla + AnagB4-žlutý

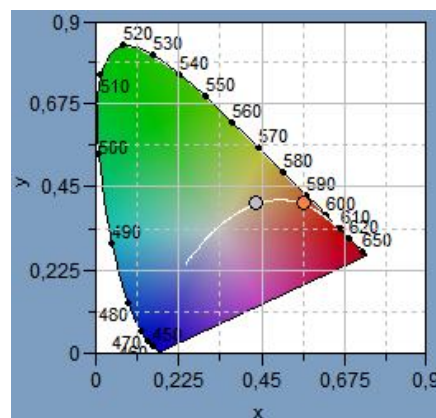


Obr. 5.2.1.7.3 Spektrální propustnost AnagB4-žlutý

Tab. 5.2.1.7.1 Hodnoty x, y a Lv pro CIE 1931

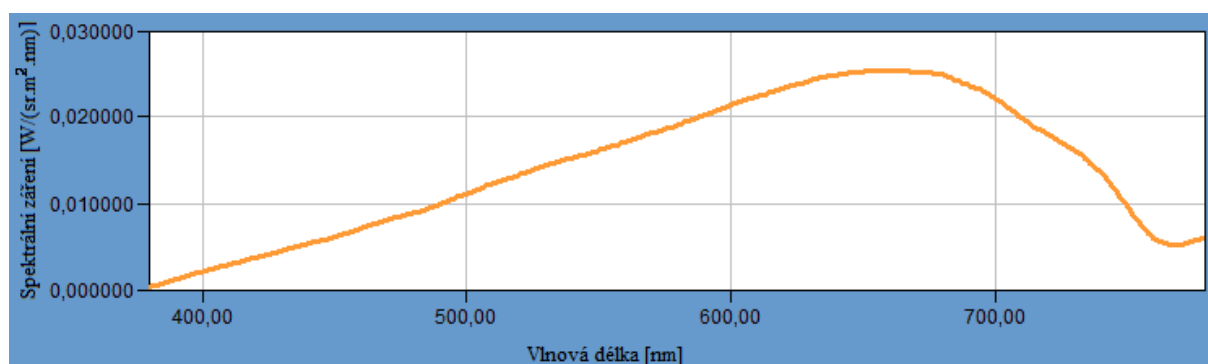
	x	y	Lv [cd/m ²]
Referenční světlo	0,4337	0,4078	1252,75
AnagB4-žlutý	0,5654	0,4095	88,53

Ref. světlo a ref. světlo + AnagB1-žlutý
v CIE 1931

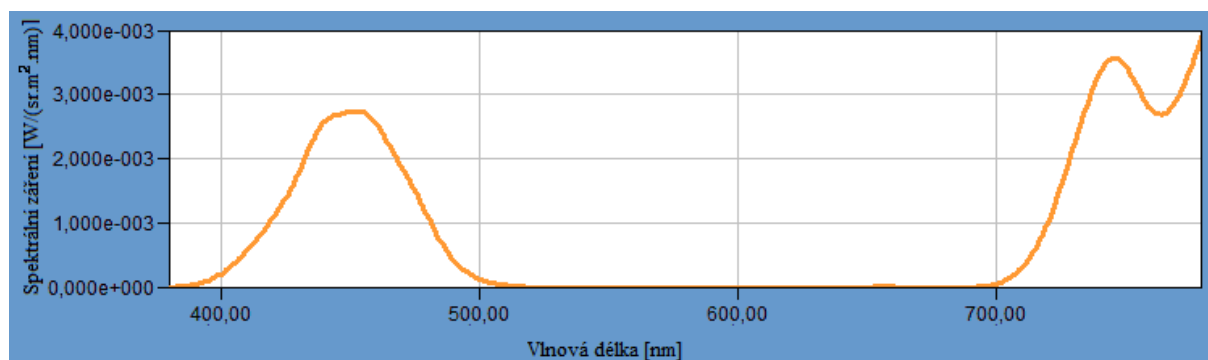


5.2.1.8 AnagB4-modrý

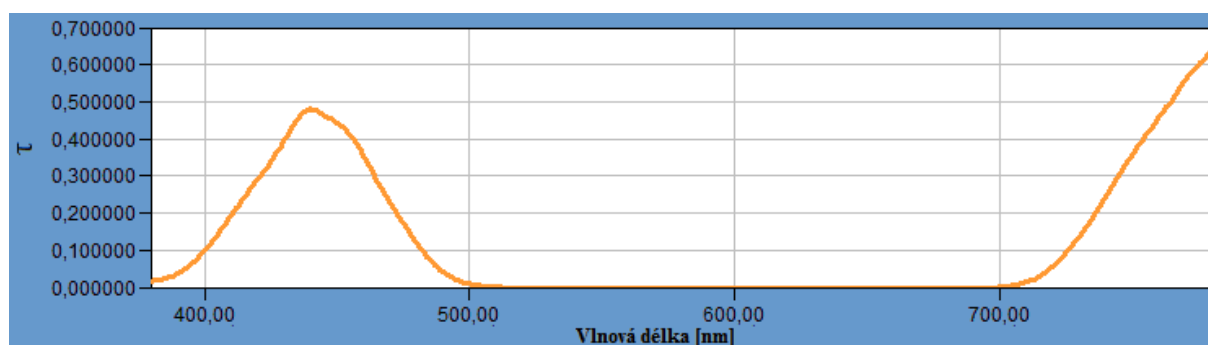
Cílem tohoto měření bylo zjistit spektrální propustnost modrého filtru, který se používá spolu s jantarovým filtrem v technologii Color-Code 3D, popsanou výše. Při tomto měření jsem postupoval stejně jako v předchozím. Po ustálení všech proměnných, jsem nejprve změřil spektrální charakteristiku referenčního světla (viz obr. 5.2.1.8.1) a poté jsem vložil do cesty svazku modrý filtr, tak aby vyplňoval veškerý prostor před objektivem a změřil jeho spektrální charakteristiku (viz obr. 5.2.1.8.2). Neměřené hodnoty jsem mezi sebou podělil a získal tak propustnost modrého filtru (viz obr. 5.2.1.8.3).



Obr. 5.2.1.8.1 Spektrální charakteristika referenčního světla



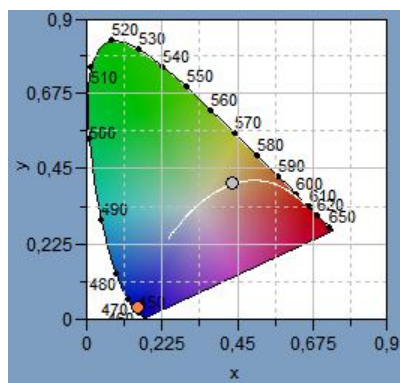
Obr. 5.2.1.8.2 Spektrální charakteristika referenčního světla + AnagB4-modrý



Obr. 5.2.1.8.3 Spektrální propustnost AnagB4-modrý

Tab. 5.2.1.8.1 Hodnoty x , y a L_v pro CIE 1931

	x	y	L_v [cd/m^2]
Referenční světlo	0,4337	0,4078	1252,75
AnagB4-modrý	0,1505	0,0341	5,83



Ref. světlo a ref. světlo + AnagB1-modrý v CIE1931

5.2.2 Porovnání spektrální charakteristiky bílé zdi a CS-A5

CS-A5 (viz obr. 5.2.2.1) je bílá kalibrovaná destička, která se prodává jako příslušenství ke spektrometru CS-2000. Používá se k zjišťování barvy objektu.



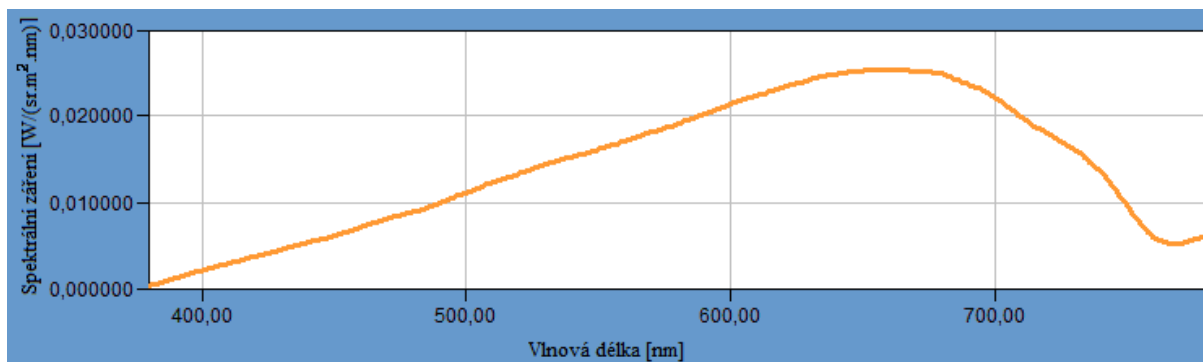
Obr. 5.2.2.1 CS-A5 [11]

Cílem tohoto měření bylo zjistit rozdíly spektrální charakteristiky mezi bílou zdí a bílou kalibrovanou destičkou CS-A5. Při tomto měření jsem postupoval stejně jako v předchozím. Po ustálení všech proměnných, jsem nejprve změřil spektrální charakteristiku odraženého paprsku od bílé zdi (viz obr. 5.2.2.2) a následně jsem změřil charakteristiku odraženého paprsku od CS-A5 (viz obr. 5.2.2.3). Tyto dvě hodnoty jsem mezi sebou podělil a zjistil, který z “odražečů“ je lepší (viz obr. 5.2.2.4)

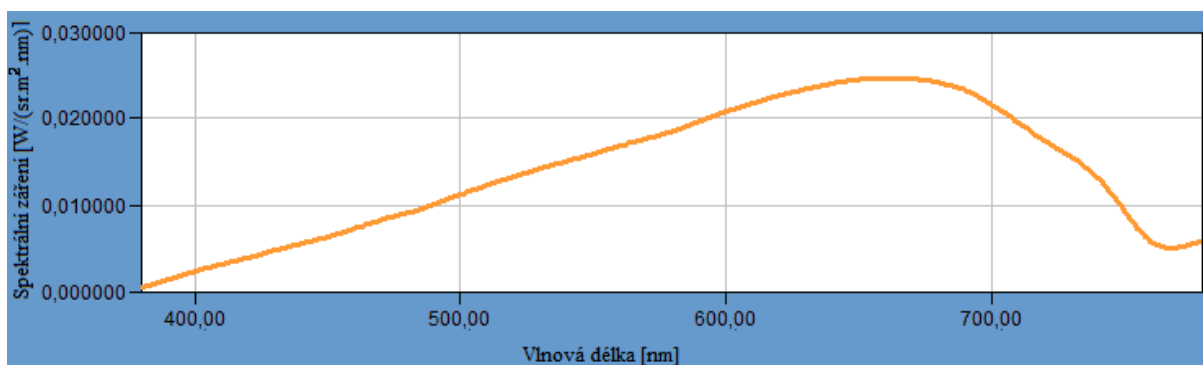
Výpočet:

$$\tau = E_{BZ}(\lambda) / E_{BD}(\lambda)$$

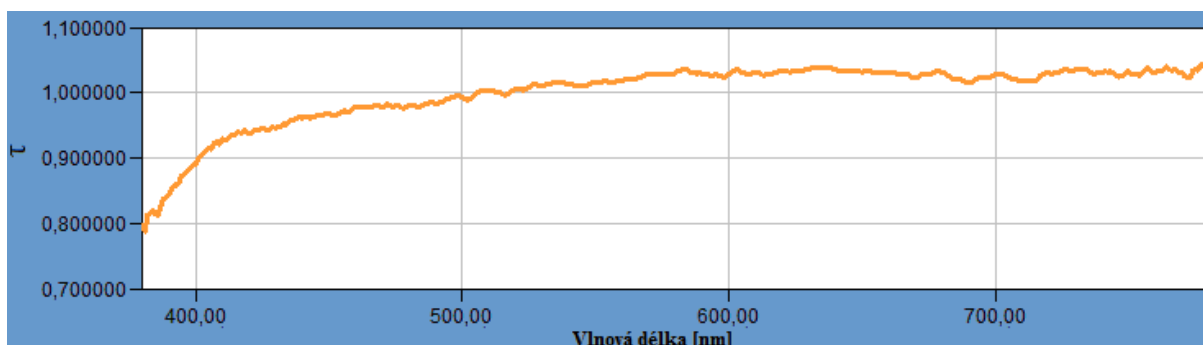
Kde $E_{BZ}(\lambda)$ jsou naměřené hodnoty bílé zdi a $E_{BD}(\lambda)$ jsou naměřené hodnoty bílé destičky CS-A5.



Obr. 5.2.2.2 Spektrální charakteristika bílého světla odraženého od bílé zdi



Obr. 5.2.2.3 Spektrální charakteristika bílého světla odraženého od CS-A5



Obr. 5.2.2.4 Podíl hodnot bílé zdi a CS-A5

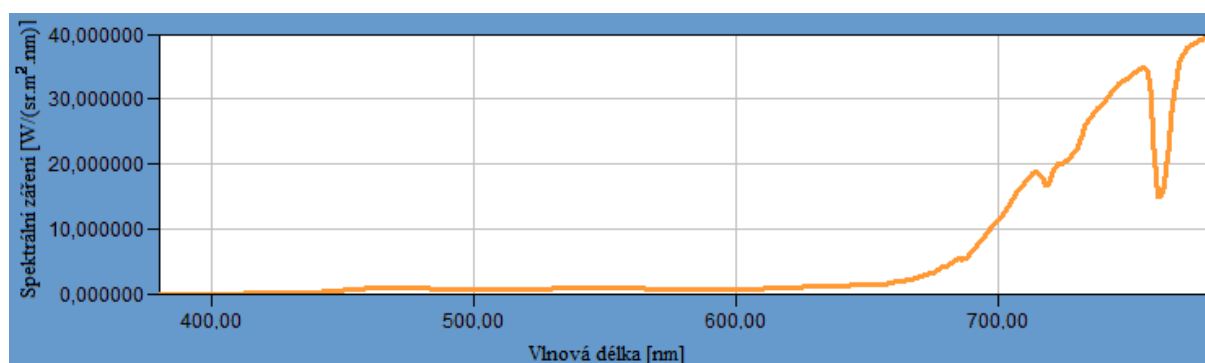
Tab. 5.2.2.1 Hodnoty x , y a L_v pro CIE 1931

	x	y	L_v [cd/m^2]
Bílá zeď	0,4337	0,4078	1252,75
CS-A5	0,4292	0,4054	1228,53

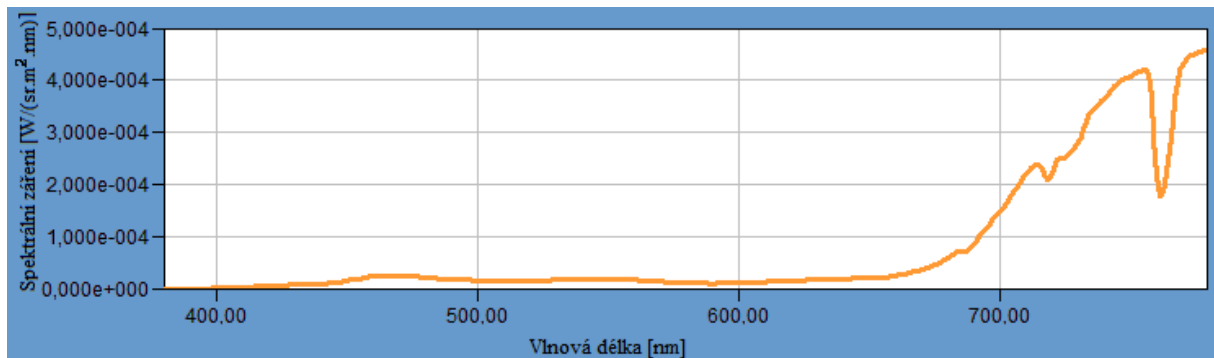
Ze získaného výsledku by bylo na první pohled zřejmé, že bílá zeď má horší vlastnosti v kratších vlnových délkách a lepší ve vlnových délkách nad 500 nm, ale nemusí tomu tak být. Jelikož jsem při svém měření nepoužíval stabilizátor napětí el. sítě, tak by se dalo uvažovat o tom, zda hodnoty, které překračují maximální 100% propustnost nejsou ovlivněny výkyvy v síti.

5.2.3 Měření spektrální charakteristiky Slunce a propustnosti ND filtrů

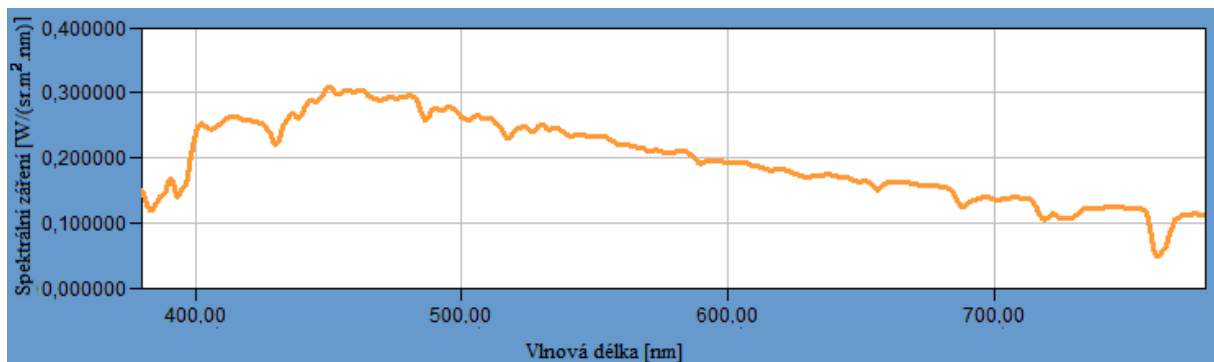
Cílem tohoto měření bylo zjistit spektrální charakteristiku Slunce za použití 2 ND filtrů, které by měly rovnoměrně snižovat intenzitu všech vlnových délek a nemělo by tak dojít ke zkreslení obrazu. ND filtry, dále jen ND1 jehož s.n. (serial numer, sériové číslo) je 7031124 a druhý dále jen ND2 jehož s.n. je 7031126, byly zakoupeny jako rozšiřující zařízení ke spektrometru CS-2000. Bez použití těchto filtrů by nebylo možné toto měření provést, jelikož tento přístroj není navržen k měření takto vysokých intenzit světla. Toto měření jsem prováděl mimo laboratoř zabezpečenou proti vnikání parazitního světla. Přístroj jsem přenesl do místnosti s otevíratelnými okny, připojil ho do sítě el. napětí a spároval s počítačem. Po nachystání všech důležitých komponent jsem na objektiv našrouboval oba ND filtry, otevřel okno, abych vyloučil odraz způsobený sklem, případně jinou deformaci výsledku a na obloze našel polohu Slunce. Po natočení objektivu správným směrem a umístění měřícího terčíku na střed Slunce jsem mohl začít měřit. Měření středu slunečního kotouče jsem provedl pro všechny úhly měření ($0,1^\circ$, $0,2^\circ$, 1°), viz obr. 5.2.3.1. Abych mohl vypočítat spektrální charakteristiku Slunce, bylo zapotřebí zbavit se vlivu ND filtrů. K tomuto účelu mi dobře posloužila obloha, kterou jsem mohl proměřit jak s našroubovanými ND filtry, tak i bez nich (viz obr. 5.2.3.2 a 5.2.3.3) a zjistit tak jejich spektrální propustnost, viz obr. 5.2.3.4. Po odečtení ND filtrů jsem zjistil spektrální vyzařování Slunce, viz obr. 5.2.3.5.



Obr. 5.2.3.1 Spektrální charakteristika Slunce se dvěma ND filtry

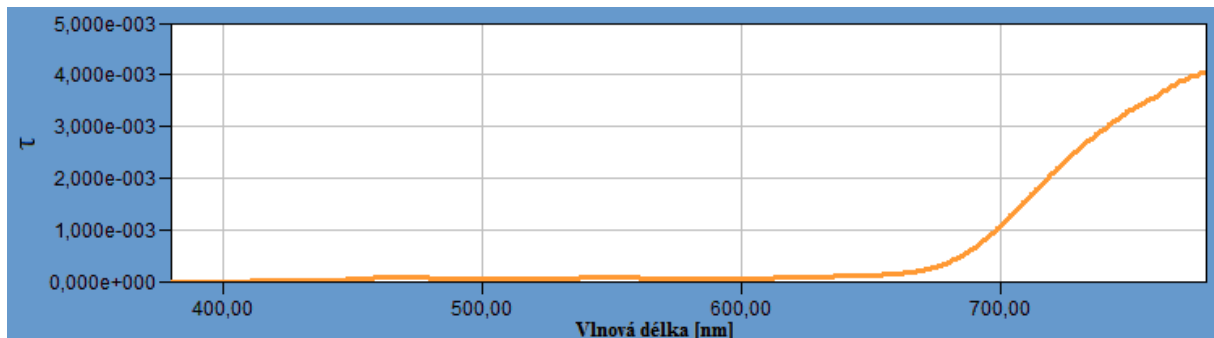


Obr. 5.2.3.1 Spektrální charakteristika oblohy se dvěma ND filtry



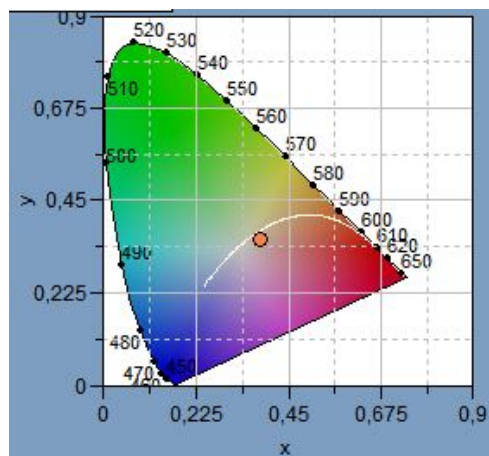
Obr. 5.2.3.1 Spektrální charakteristika oblohy bez ND filtrů

Pokles, který nastává v okolí vlnové délky 760 nm u obrázků 5.2.3.1-5.2.3.3 je způsobený absorpcí záření vodními parami.

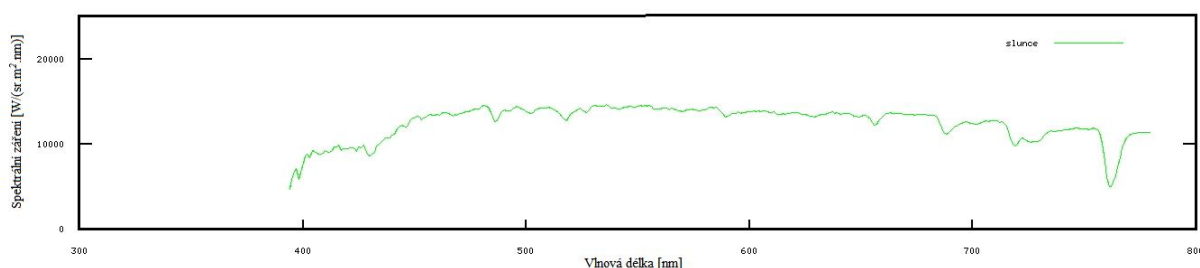


Obr. 5.2.3.4 Spektrální propustnost dvou ND filtrů

Jak je patrné u obrázku 5.2.3.4, nemají ND filtry lineární průběh. To vede k domněnce, že by měly zkreslovat obraz do červena, ale není tomu tak, jak lze vidět na obr. 5.2.3.6 v CIE barevném prostoru 1931. Je to zapříčiněno větší citlivostí lidského oka na zelenou barvu \bar{y} u trichromatického činitele při přepočtu na souřadnice x, y. Tímto je tedy vlastně jen kompenzována jeho neutrálnost.



Obr. 5.2.3.6 Souřadnice ND filtrů v CIE1931 barevném prostoru



Obr. 5.2.3.5 Spektrální charakteristika Slunce bez vlivu ND filtrů

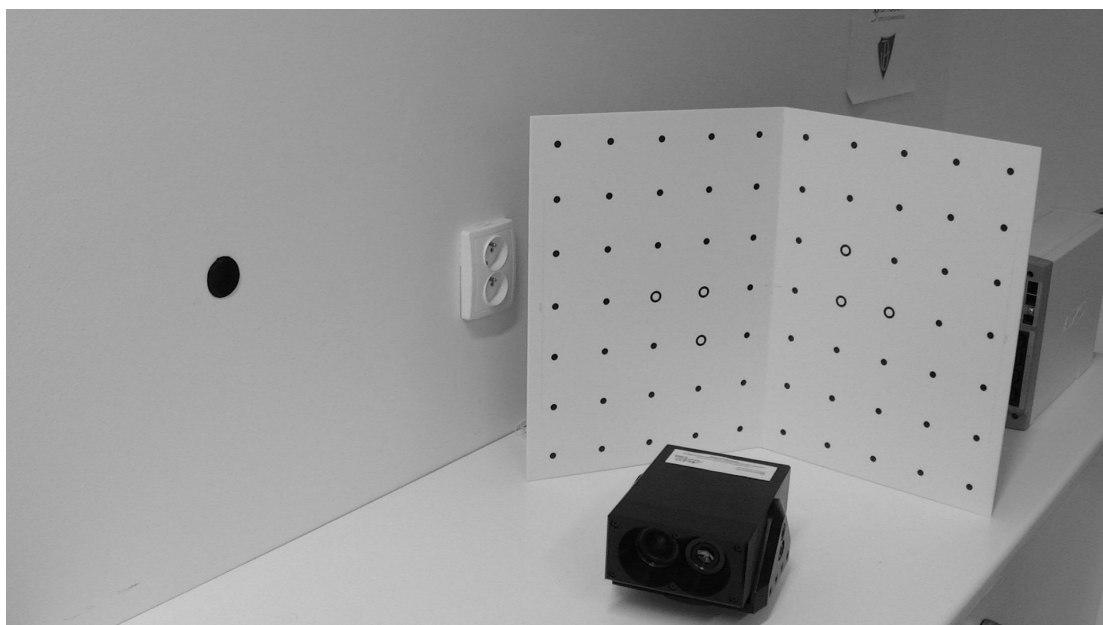
Výsledná spektrální charakteristika Slunce bez vlivu ND filtrů u obrázku 5.2.3.5., nelze brát stoprocentně. Bohužel musíme zohlednit vliv atmosféry, nepřesnosti měření a v neposlední řadě také vliv spojením dvou ND filtrů a vzniku vzduchové mezery mezi nimi, která také může ovlivnit měření. Graf byl zkonstruován pomocí programu [Octave](#), který jsem si osvojil v operačním systému Linux. Pomocí něho jsem také počítal trichromatické hodnoty X, Y, Z, barevné souřadnice x, y, z a hodnotu jasu Lv. Vypočítané hodnoty jsem poté porovnával s hodnotami naměřenými programem CS-S10w.

Tab. 5.2.3.1 Hodnoty x, y a Lv pro CIE 1931

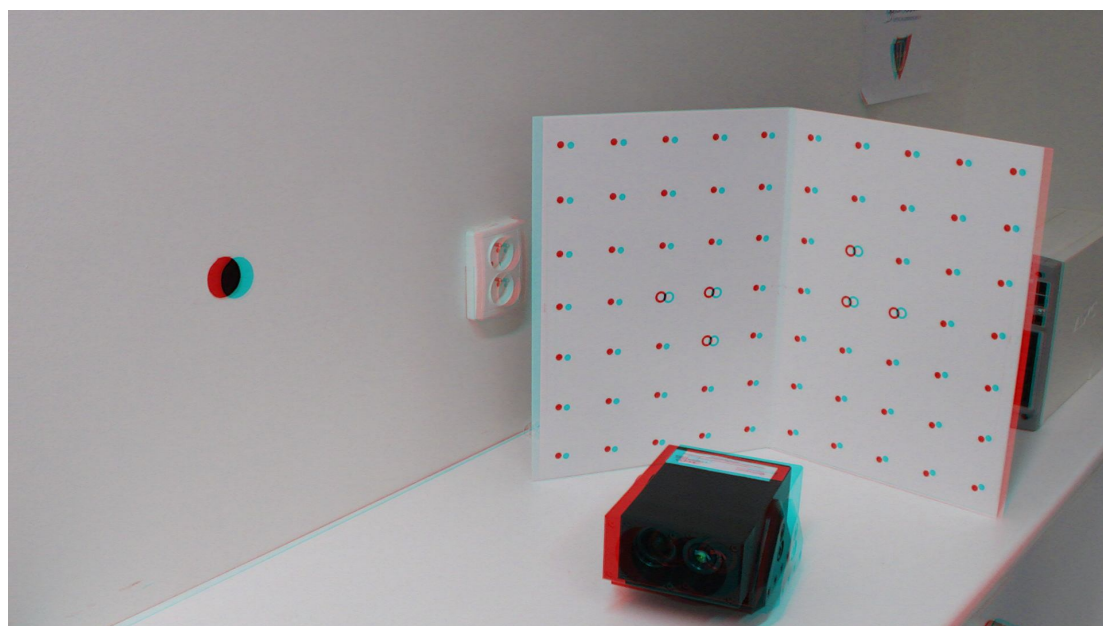
	x	y	Lv [cd/m ²]
Slunce + 2 ND filtry	0,3827	0,3665	66517,46
Obloha + 2 ND filtry	0,3093	0,3271	134,6
Obloha bez ND filtrů	0,2961	0,3125	16184,21

5.2.4 Měření Anaglyfu

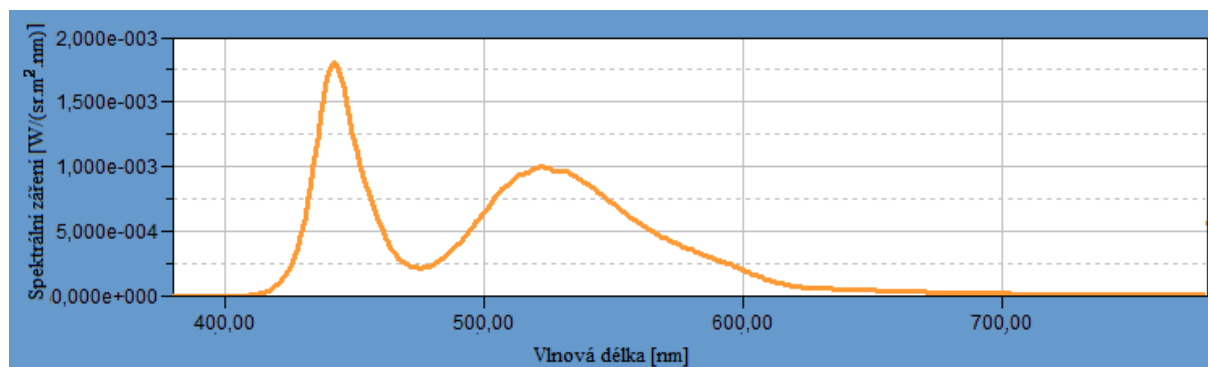
Cílem tohoto měření bylo zjistit účinnost anaglyf brýlí pro anaglyf red-cyan (červená-azurová). Jestli je černá opravdu černá nebo zda-li je v nějakém odstínu šedi. Při tomto měření jsem postupoval následovně. Nejprve bylo nutné pořídit obrázek pomocí 3D kamery, v mém případě pomocí kamery JVC GS-TD1 (viz obr. 5.2.4.1), který byl následně zpracován na anaglyf pomocí programu ExifTool v operačním systému Linux. Z obrázku pořízeného kamerou bylo nutné vytáhnout informace pro levé a pravé oko, které tento obrázek v sobě obsahoval. Po vytvoření obrázku pro levé a pravé oko, se spojením vytvořil anaglyf obrázek, který bylo možné dále proměřovat (viz obr. 5.2.4.2). Dalším krokem byla kalibrace obrazovky, kterou jsem kalibroval na světelný zdroj D65. Při promítání obrázku na kalibrované obrazovce jsem změřil červenou, azurovou složky anaglyfu (viz obr. 5.2.4.3 a 5.2.4.4), a také černou složku (viz obr. 5.2.4.5), abych ji pak mohl porovnat s naměřeným výsledkem. Zda-li se “černá“ měřená přímo z monitoru, shoduje s “černou“ naměřenou sečtením anaglyfu, proměřeného příslušnými anaglyf brýlemi AnagB3 (viz obr. 5.2.4.6 - 5.2.4.9). Po proměření přes AnagB3 a sečtením výsledků jsem docílil zisku odstínu “černé“ barvy, viz obr. 5.2.4.10.



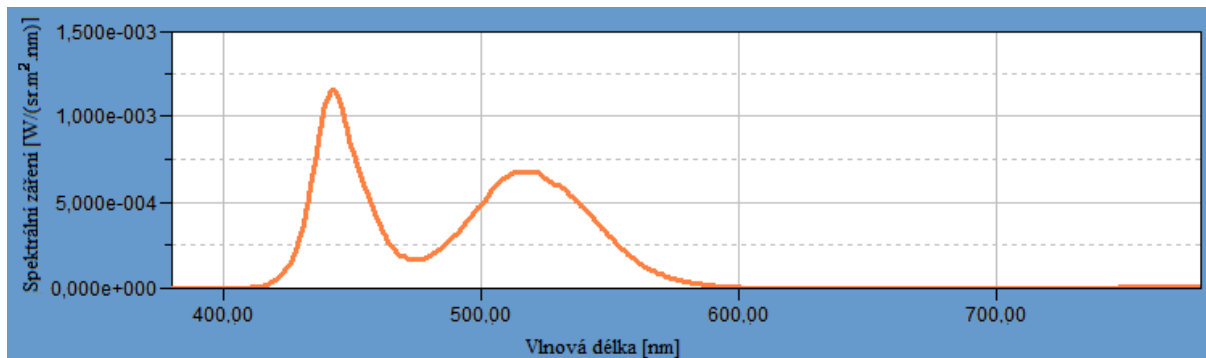
Obr. 5.2.4.1 Obrázek pořízený 3D kamerou JVC GS-TD1



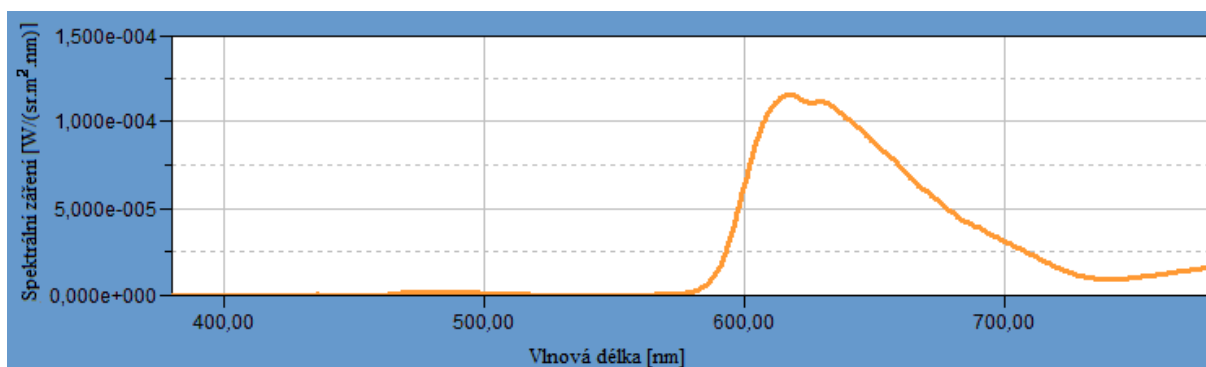
Obr. 5.2.4.2 Anaglyf obrázek vytvořený pomocí programu ExifTool



Obr. 5.2.4.3 Spektrální charakteristika azurové složky



Obr. 5.2.4.6 Spektrální charakteristika azurové složky + AnagB3-azurový

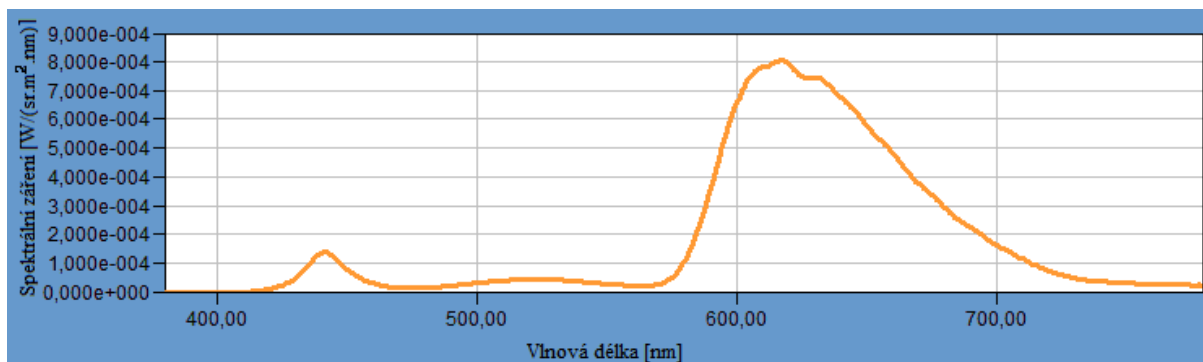


Obr. 5.2.4.7 Spektrální charakteristika azurové složky + AnagB3-červený

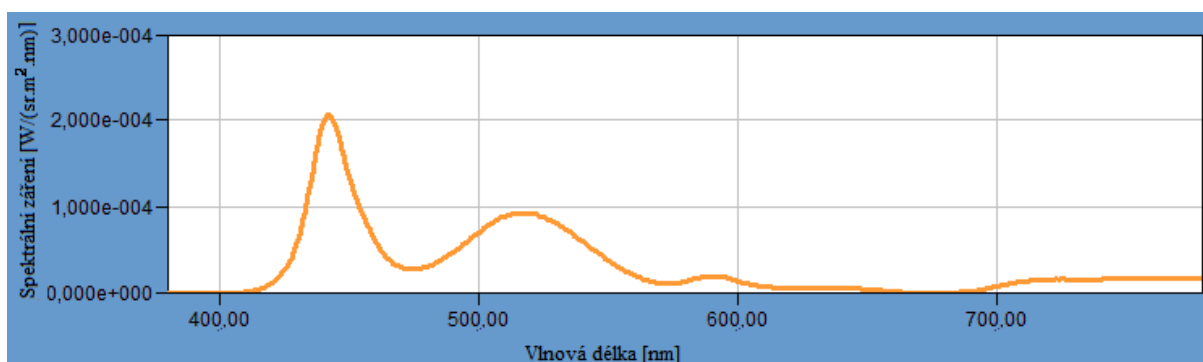
Tabulka 5.2.4.1 Porovnání jasu azurové složky anaglyfu

	Lv [cd/m ²]
Azurová složka	39,12
Azurová složka + AnagB3-azurový	18,43
Azurová složka + AnagB3-červený	1,49

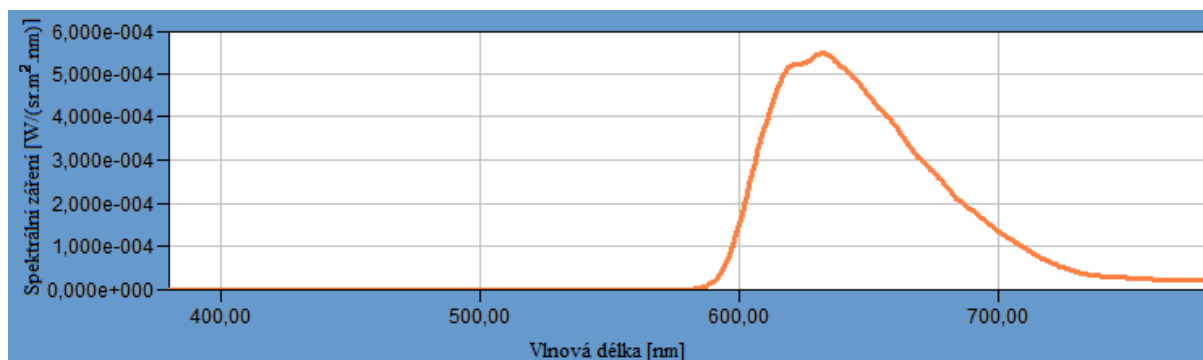
Hodnota jasu azurové složky anaglyfu, která při prvním měření byla 39,12 cd/m², při novém měření přes AnagB3-azurový filtr klesla. Tento pokles je zapříčiněn absorpcí filtru. Při dalším měření azurové složky tentokrát přes AnagB3-červený filtr jas poklesl téměř k nule. Tento pokles je zapříčiněn tím, že červený filtr odfiltruje azurovou barvu a ponechá jen červenou barvu. Jelikož azurová složka neobsahuje červenou barvu, lze azurový bod vidět přes červený filtr jen jako černý bod a tím pochopitelně naměříme velice malý jas.



Obr. 5.2.4.4 Spektrální charakteristika červené složky



Obr. 5.2.4.8 Spektrální charakteristika červené složky +AnagB1- azurový



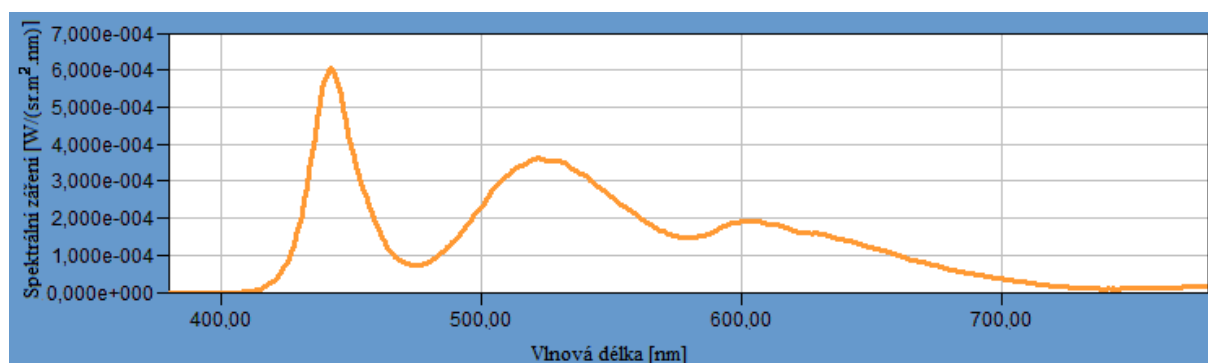
Obr. 5.2.4.9 Spektrální charakteristika červené složky +AnagB3-červený

Tabulka 5.2.4.1 Porovnání jasu červené složky anaglyfu

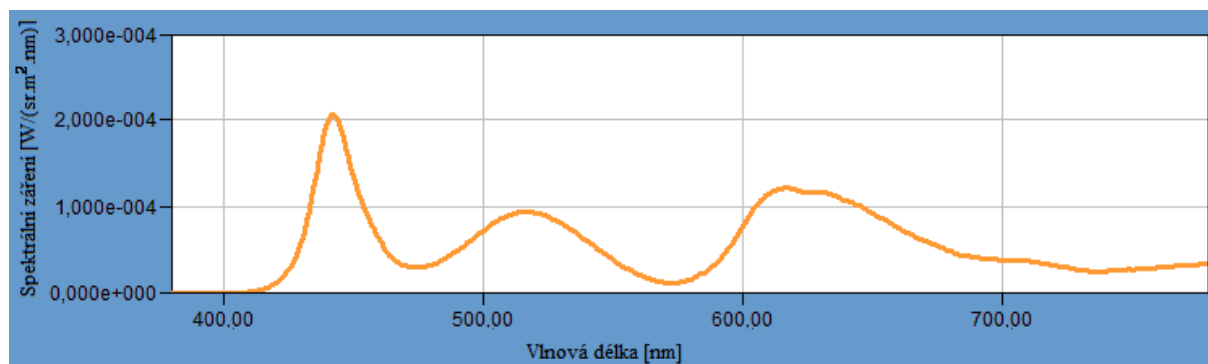
	Lv [cd/m ²]
Červená složka	14,62
Červená složka + AnagB3-azurový	1,76
červená složka + AnagB3-červený	5,60

Hodnota jasu červené složky anaglyfu, která při prvním měření byla 14,62 cd/m², při novém měření přes AnagB3-červený filtr klesla. Tento pokles je zapříčiněn absorpcí filtru. Při dalším měření červené složky tentokrát přes AnagB3-azurový filtr jas poklesl téměř k nule. Tento pokles je zapříčiněn tím, že azurový filtr odfiltruje červenou barvu a ponechá jen azurovou

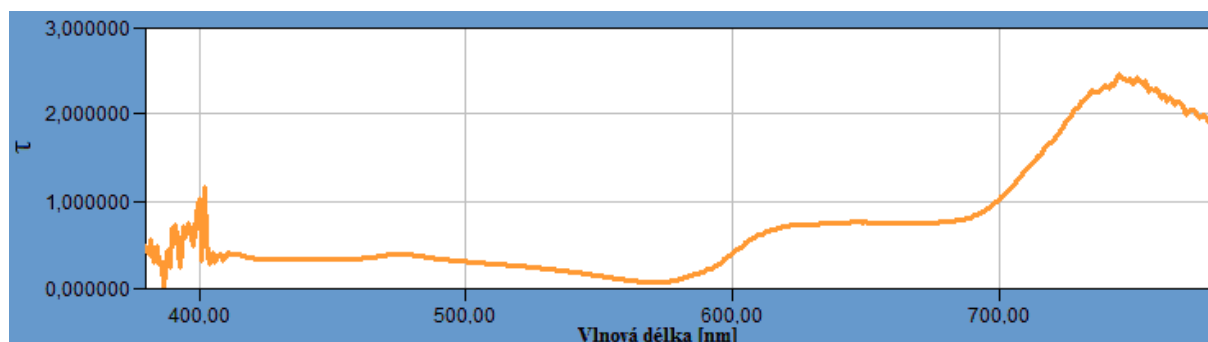
barvu. Jelikož červená složka neobsahuje azurovou barvu, lze červený bod vidět přes azurový filtr jen jako černý bod a tím pochopitelně naměříme velice malý jas.



Obr. 5.2.4.5 Spektrální charakteristika černé složky



*Obr. 5.2.4.10 Spektrální charakteristika černé barvy po sečtení azurové a červené složky
+ AnagB3*



Obr. 5.2.4.11 Podíl černých složek

Na závěr měření jsem “černé“ složky mezi sebou podělil (viz obr. 5.2.4.11) a získal tak nesymetrii od výchozí “černé“ barvy vytvořené na monitoru. Z výsledku vyplývá, že černá barva vzniknutá sečtením doplňkových barev není černá, ale šedá tíhnoucí k červené části spektra.

Závěr

V této bakalářské práci jsem se v první kapitole zaměřil na charakter barvy. Jak je barva tvořena a kdo byl průkopníkem tohoto oboru. Objasnil jsem pojem spektrometrie a spektrometr.

V druhé kapitole jsem popsal barevné modely. Jak který model funguje a případně i jeho využití v praxi. RGB model je jeden z nejpoužívanějších modelů, hlavně co se týče televizorů a jiných sdělovacích prostředků (počítače, telefony,...). CMYK barevný model je tvořen doplňkovými barvami. Tento model má největší uplatnění v tiskařství. Na tomto modelu fungují dnešní tiskárny. CIE barevný prostor 1931 je jeden z prvních barevných prostorů, který byl popsán matematicky a je to barevný prostor, který se nejvíce využívá při měření, i když jeho kolega CIE barevný prostor 1976 ho pomalu nahrazuje. CIE $L^*a^*b^*$ barevný prostor je jedním z nejuniverzálnějších barevných prostorů. Jde u něj o absolutní vyjádření barvy nezávisle na zařízení. Další části které se ještě věnuji v druhé kapitole jsou osvětlovací zdroje. Popsány zde jsou světelný zdroj A, B, C a D z něhož převážně osvětlovací zdroj D_{65} .

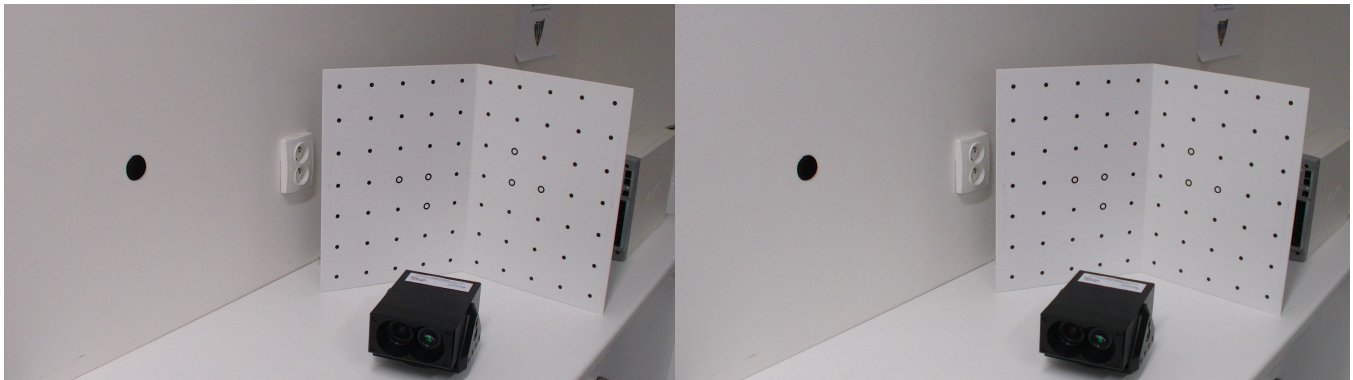
Ve třetí kapitole jsem se zabýval Anaglyfem. Je to jedna ze stereoskopických technik, která umožňuje uživateli prostorové vnímání. Vznik anaglyfu, jeho historický přehled, typy používaných anaglyfů, jeho výhody a nevýhody.

Ve čtvrté kapitole popisují typy filtrů, jejich vlastnosti a případné použití. Také v této kapitole popisují dva spektrofotometry, rozdíly mezi spektrofotometry a spektrometry.

V páté kapitole jsem popisoval praktické měření. Jak správně postupovat před měřením a v průběhu měření. Dále jsem se již věnoval problematice propustnosti anaglyf brýlí, přesněji filtrů použitých v těchto brýlích. Nejprve jsem změřil referenční světlo, poté jsem mu do cesty vložil filtr příslušných brýlí od AnagB1 po AnagB4 a nakonec podílem naměřených hodnot, jsem zjistil propustnost filtru. Dále porovnávání bílé zdi a bílé destičky CS-A5. Snažil jsem se zjistit kvalitu odrazivosti bílé zdi a CS-A5. Jednou z lukrativnějších částí této práce bylo proměření spektrální charakteristiky Slunce. Měření se neodehrávalo v zatemněné laboratoři jako zbytek měření, ale v místnosti s otevíracími okny, aby se vyloučil vliv skla na měření. Nejprve se změřila spektrální charakteristika Slunce s nasazenými ND filtry na objektivu přístroje. Jako další se změřila spektrální charakteristika oblohy s a bez ND filtrů, aby se z těchto hodnot dala vypočítat propustnost ND filtrů, která se následně odečetla od spektrální charakteristiky Slunce s ND filtry a získala se tak spektrální charakteristika Slunce bez vlivu ND filtrů a na závěr jsem provedl měření anaglyfu na kalibrované obrazovce.

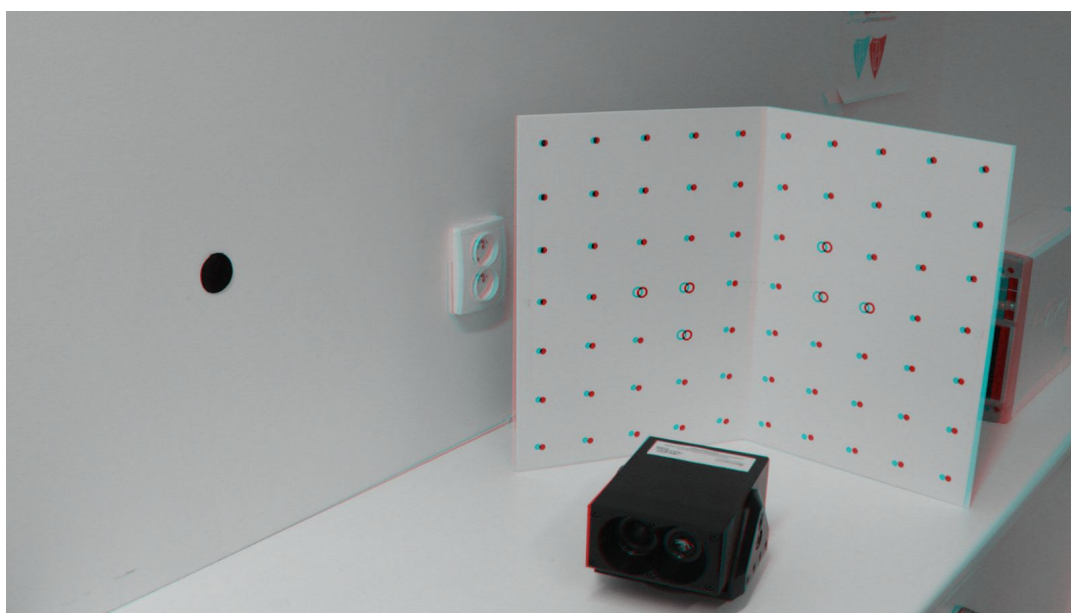
Přílohy:

A. Fotografie různých typů Anaglyfů

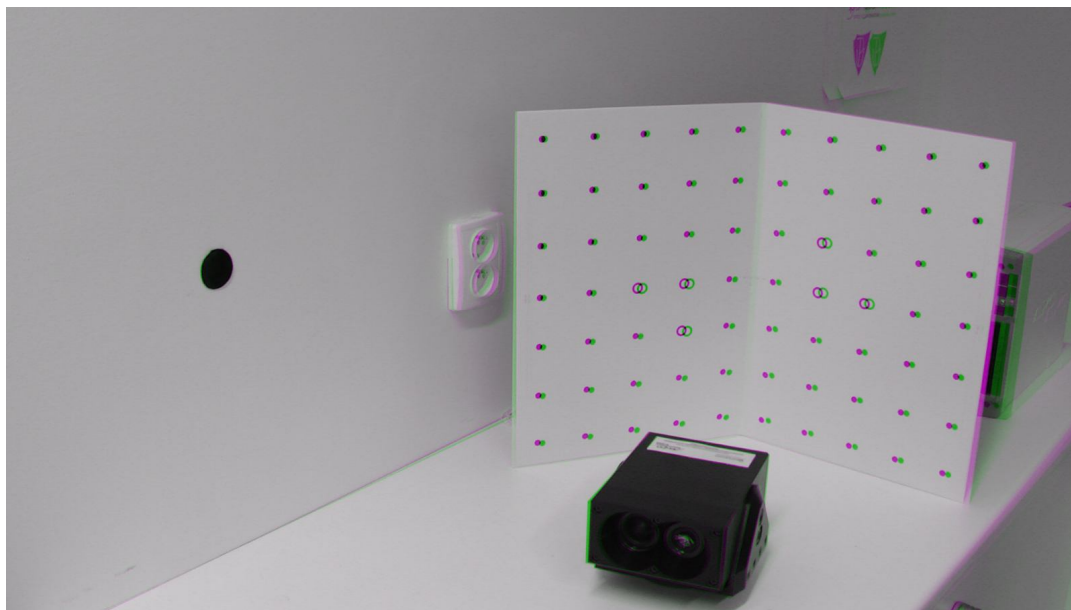


Obrázek pro levé oko

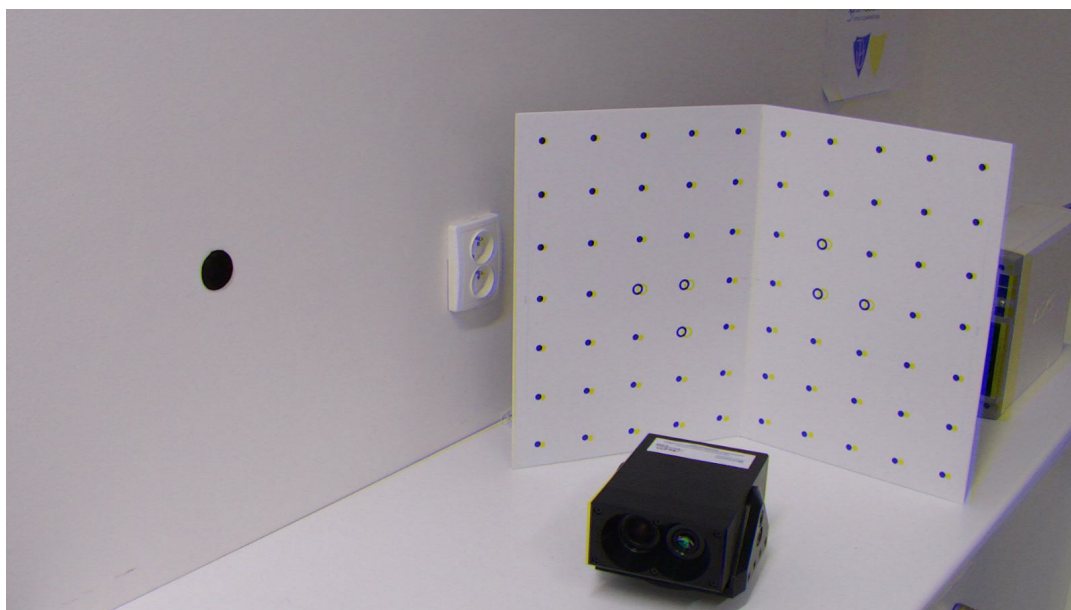
Obrázek pro pravé oko



Anaglyf červená-azurová



Anaglyf Inficolor 3D (zelená-purpurová)



Anaglyf ColorCode 3D (žlutá-modrá)

B. Stručný popis spektrometru CS-2000

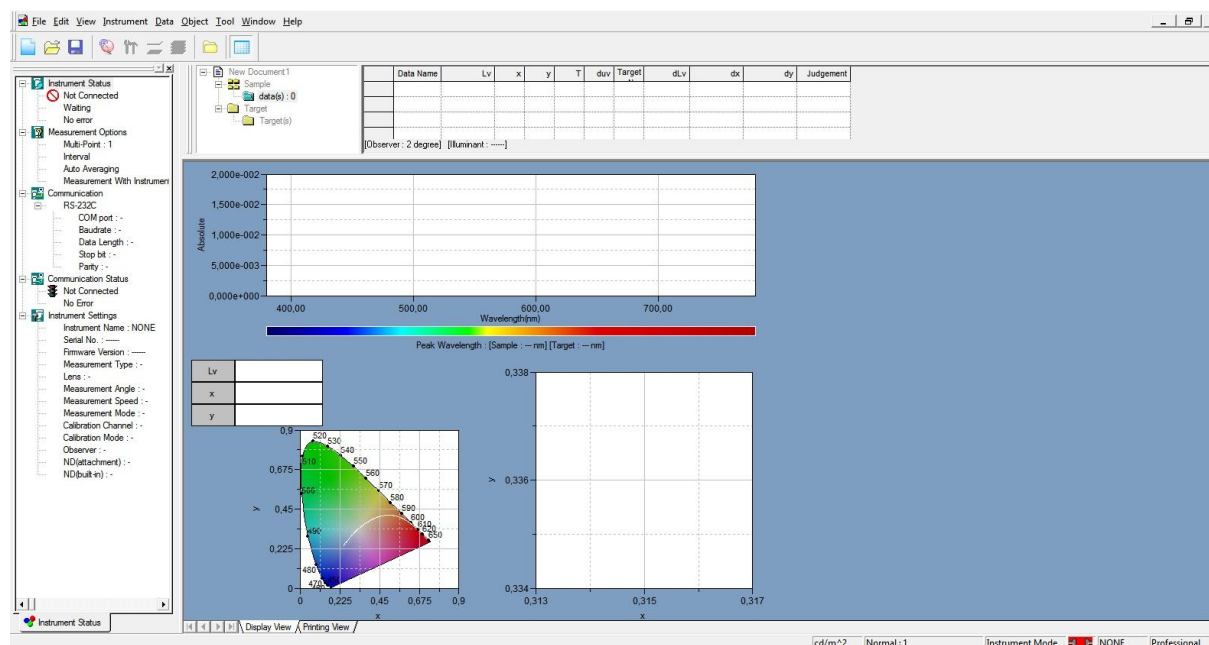


Spektrometr CS-2000 [18]

Rozsah vlnových délek	380-780 nm		
Rozlišení vlnových délek	0,9 nm/pixel		
Zobrazení šířky pásma	1 nm		
Přesnost vlnové délky	± 0,3 nm		
Spektrální šířka pásma	5 nm nebo méně		
Úhel měření (volitelný)	1°	0,2°	0,1°
Měřitelný rozsah jasu	0.003 to 5,000 cd/m ²	0.075 to 125,000 cd/m ²	0.3 to 500,000 cd/m ²
Minimální měřicí vzdálenost	350 mm		
Minimální jas displeje	0,00002 cd/m ²		
Minimální spektrální záření displeje	1,0 × 10 ⁻⁹ W/Sr.m ² .nm		
Přesnost: Záření	± 2%		
Přesnost: Barevnosti	x, y: ± 0.003 (0,003 - 0,005 cd/m ²) x, y: ± 0.002 (0,005-0,05 cd/m ²) x: ± 0,0015 (0,05 cd/m ²) y: ± 0,001	x, y: ± 0.003 (0,075-,125 cd/m ²) x, y: ± 0.002 (0,125-1,25 cd/m ²) x: ± 0,0015 (1,25 cd/m ²) y: ± 0,001	x, y: ± 0.003 (0,3 až 0,5 cd/m ²) x, y: ± 0.002 (0,5 až 5 cd/m ²) x: ± 0,0015 (5 cd/m ²) y: ± 0,001
Provozní teplota / vlhkost	5 až 35 °C / relativní vlhkost 80% nebo méně		
Rozměry přístroje	158 (Š) × 200 (H) x 300 (D) mm		
Hmotnost	6,2 Kg		

Důkladnější popis tohoto přístroje naleznete v bakalářské práci pana Jakuba Řeháka s názvem Měření spektrálních charakteristik obrazových displejů ve viditelné oblasti elektromagnetického spektra pomocí radiospektrometru CS-2000.

C. Popis softwaru CS-S10w



Obr. 1 Prostředí softwaru CS-S10w

Software CS-S10w vytvořený firmou Konika Minolta představuje velké množství funkcí. Hlavními funkcemi, které může uživatel využít jsou měření v různých typech barevných prostorů jako jsou $L^*a^*b^*$, Hunter Lab, XYZ, Yxy, $L^*u^*v^*$ a $L^*u^*v^*$ barevný prostor. Může měřit pomocí 2° nebo 10° standardního pozorovatele, jako zdroj světla si může vybrat předem nastavené hodnoty standardních CIE světelných zdrojů A, B, C, D-sérii, E a F-sérii. Pomocí softwaru můžeme měřit, kalibrovat, provádět průměrovací měření v rozsahu od 2 do 1000 měření. Interval měření si můžeme zadat v rozmezí 2 až 1000 měření po 0-12 hodinových intervalech. Nejkratší interval mezi jednotlivými měřeními je 10 sekund. Pro pohodlnější měření můžeme využít měření na dálku. Při koupi doplňkového vybavení, jako je ND filtr, bílá kalibrovaná destička CS-A5 a další, dostaneme disk s kalibračními daty, které můžeme nahrát do přístroje, a tak zlepšit měření. Při práci s přístrojem mimo dosah počítače a záznamu dat do paměti přístroje, můžeme tato data následně přehrát do softwaru a dále analyzovat. Takže může nahrávat a stahovat data z přístroje a také jej kalibrovat. Všechna pořízená data můžeme ukládat v originálním formátu s koncovkou “.ces“.

Měření pomocí softwaru CS.S10w provádíme nejprve zapnutím softwaru. Při prvním spuštění nás přivítá tabulka s nápisem vítejte v softwaru CS-S10w, vyberte zobrazení nového dokumentu. Na výběr máme hned z několika možností a to normální mód, kontrastní mód, RGB mód a RGB a kontrastní mód. Po výběru příslušného módu a potvrzení se dostaneme na

hlavní plochu, viz obr. 1. Jako další krok je zapotřebí spárovat přístroj se softwarem. Na liště menu zmáčkneme na ikonu Instrument (přístroj) a zvolíme Connect (připojit). Pokud máme přístroj propojený pomocí USB kabelu s počítačem neměl by být žádný problém přístroj připojit. Po připojení přístroje opět zmáčkneme na Instrument a tentokrát zvolíme položku Instrument Setting (nastavení přístroje). Zde nastavíme parametry měření, jako typ měření, jaký používáme objektiv (standardní nebo makro), úhel měření, rychlost měření, mód měření a kanál kalibrace. Po nastavení požadovaných parametrů, vytvoříme nový dokument. Klikneme na liště menu na File (soubor) a New (nový). Po vytvoření nového dokumentu můžeme začít měřit. Pro měření zmáčkneme na liště menu na Instrument a Measurement options (možnosti měření), kde si nastavíme počet měření a interval mezi nimi. Samostatné měření můžeme provést pomocí ikony Measurement (měření) nebo na liště menu klikneme na Instrument a Measurement. Po kliknutí na tuto ikonu se nám zobrazí tabulka, viz obr. 2, ve které v prvním řádku vyplňujeme nejčastěji datum a název toho co měříme, v druhém řádku případný komentář a stiskneme OK.

Obr. 2 tabulka měření

Proběhne měření a naměřená data se nám zobrazí jako čísla v seznamu a ilustračně jako graf, kde na ose x je vlnová délka v nm a na ose y spektrální záření ve $W/(sr.m^2.nm)$ a tečka v CIE 1931 barevném prostoru (podle zvolení) určena souřadnicemi x a y. K přidání dalších dat jako jsou vlnové délky (380-780), komentář, úhel měření atd. Klikneme na liště menu na Data a List Items (položky seznamu), kde si přidáme pomocí šipek či přetáhnutí z jednoho sloupečku do druhého požadovaná data. S naměřenými daty můžete dále pracovat a to je mezi sebou dělit, sčítat, odčítat, násobit atd. Na liště menu stiskneme Data a Edit Spectral Data (upravovat spektrální data). Uložení dat provádíme pomocí File a Save (uložit) nebo Save as (uložit jako).

Seznam použitých zdrojů:

- [1] Daniel Malacara.: Color Vision and Colorimetry: Theory and Applications second edition, SPIE, 2011
- [2] Wyszecki & Stiles.: Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae second edition, Wiley Classics Library, 2000
- [3] Jan Ponec, Milič Jiráček.: Digitální fotografie 1. vydání, Univerzita Palackého v Olomouci, 2002
- [4] Data Management Software CS-S10w Standard, Instruction manual, Konika Minolta

Internetové zdroje:

- [5] http://www.surplusserver.com/PDF/Lambda800_900_Brochure.pdf (5.5.2013)
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Anaglyph_3D (26.4.2013)
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Color_space (24.4.2013)
- [8] <http://en.wikipedia.org/wiki/Stereoscopy> (26.4.2013)
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space (25.4.2013)
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/RGB_color_space (25.4.2013)
- [11] <http://www.shopkmsa.com/index.php?p=product&id=266&parent=24> (5.5.2013)
- [12] <http://www.thorlabs.com/catalogpages/V21/1366.PDF> (5.5.2013)
- [13] http://en.wikipedia.org/wiki/Beer%E2%80%93Lambert_law (2.5.2013)
- [14] <http://www.cie.co.at/publ/abst/s005.html> (2.5.2013)

- [15] http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_illuminant (3.5.2013)
- [16] http://en.wikipedia.org/wiki/CIE_Standard_Illuminant_D65 (3.5.2013)
- [17] <http://www.pocket-lint.com/review/72413-jvc-everio-gs-td1-review> (3.5.2013)
- [18] <http://sensing.konicaminolta.asia/products/cs-2000-spectroradiometer> (10.5.2013)
- [19] <http://stereofotograf.eu/navody/anaglyf/> (20.4.2013)
- [20] <http://biology.duke.edu/johnsenlab/pdfs/tech/spectmethods.pdf> (20.4.2013)
- [21] http://en.wikipedia.org/wiki/ND_filter (22.4.2013)