

**Poděkování:**

Rád bych poděkoval doc. Ing. Michalovi Vikovi, Ph.D. za odborné vedení, za rady a za pomoc při zpracování bakalářské práce. Děkuji také MUDr. Tomáši Vidovi za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích.

## **Anotace v českém jazyce**

**Jméno a příjmení autora:** Martin Farkaš

**Instituce:** Technická univerzita v Liberci, Ústav zdravotnických studií

**Název práce:** Vliv spektrálního složení LED osvětlení na barevný vzhled výrobku.

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Michal Vik, Ph.D.

**Konzultant:** MUDr. Tomáš Vido

**Počet stran:** 70

**Rok obhajoby:** 2017

### **Anotace:**

Tato bakalářská práce má za úkol zmapování vlivů nových světelných zdrojů na barevný vzhled výrobku. Porovnání několika měřících metod používaných a doporučených v rámci technických výborů CIE. Dále se práce věnuje problematice nasvícení různých předmětů pod různými světelnými zdroji. V neposlední řadě budou popsány anatomické struktury lidského oka a jeho fyziologické děje.

**Klíčová slova:** světelné zdroje  
vzhled výrobku  
kolorimetrie  
lidský zrak  
barevné vidění

## **Anotace v anglickém jazyce**

**Name and surname:** Martin Farkaš

**Institution:** Technical university of Liberec, Institute of Health Studies

**Title:** Spectral composition of LED lighting on the color appearance of the product

**Supervisor:** doc. Ing. Michal Vik, Ph.D.

**Consultant:** MUDr. Tomas Vido

**Pages:** 70

**Year:** 2016

### **Annotatiton:**

This thesis has the task of mapping of the effects of new light sources on the color appearance of the product. Comparison of several measuring methods used and recommended within the technical committees CIE. Furthermore, the work deals with issues of lighting different subjects under different light sources. Finally, they will describe the anatomical structure of the human eye and its physiological processes.

**Key words:** light source  
product appearance  
colorimetry  
human eyesight  
color vision

## Obsah

Úvod .....	14
<b>Teoretická medicínská část .....</b>	<b>15</b>
<b>1 Oční koule.....</b>	<b>15</b>
1.1 Vnější vrstva ( <i>tunica fibrosa</i> ).....	15
1.2 Střední vrstva ( <i>tunica vasculosa</i> ) .....	16
1.3 Vnitřní vrstva ( <i>tunica intima</i> ).....	16
1.4 Sklivec ( <i>corpus vitreum</i> ) .....	17
<b>2 Přídavné orgány oka .....</b>	<b>17</b>
2.1 Okohybné svaly ( <i>musculi bulbi</i> ) .....	17
2.2 Spojivka ( <i>tunica conjunctiva</i> ) .....	17
2.3 Oční víčka ( <i>palpebrae</i> ) .....	18
2.4 Slzný aparát ( <i>apparatus lacrimalis</i> ) .....	18
<b>3 Fotoreceptory .....</b>	<b>19</b>
3.1 Anatomie čípků a tyčinek.....	20
3.2 Barevné vidění .....	22
3.3 Psychofyzika barevného vidění.....	23
<b>Teoretická technická část.....</b>	<b>24</b>
<b>4 Rozdělení světelných zdrojů .....</b>	<b>24</b>
4.1 Umělé světelné zdroje .....	25
4.1.1 Teplota chromatičnosti .....	25
4.1.2 Index barevného podání.....	27
4.2 Standardní zdroje osvětlování .....	28
4.3 LED světelné zdroje .....	28
4.3.1 Studená bílá LED .....	30
4.3.2 Teplá bílá LED.....	30
4.3.3 Neutrálně bílá LED.....	30

4.4	Výhody a nevýhody LED.....	30
4.5	Obecné využití LED zdrojů .....	31
4.6	Optické metody měření světelně-technických veličin .....	33
4.7	Princip fotometrie.....	34
4.8	Princip kolorimetrie .....	35
4.9	Princip spektrometrie .....	35
4.10	Diagram chromatičnosti .....	36
4.10.1	Barevný prostor X Y Z .....	37
4.10.2	Barevný trojúhelník XYZ .....	38
<b>5</b>	<b>Indexy barevného podání.....</b>	<b>38</b>
5.1	Index barevného podání $R_a$ (CRI) .....	38
5.2	Color Quality Scale (CQS).....	38
5.3	CRI CAM02UCS index podání barev.....	39
5.4	Rank order Color Rendering Index (RCRI) .....	40
5.5	Memory Color Quality metric (MCRI) $S_a$ .....	40
5.6	Felling of Contrast color rendering Index (FCI) .....	41
5.7	Color Harmony Rendering Index.....	41
5.8	Categorical Color Rendering Index (CCRI) .....	41
5.9	Gamut Area Index (GAI) .....	42
5.10	Flattery Index (FI) .....	42
5.11	Color Preference Index (CPI).....	42
5.12	Color Discrimination Index (CDI) .....	43
5.13	Cone Surface Area (CSA) .....	43
5.14	Full Spectrum Index (FSI) .....	43
	<b>Praktická část .....</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>Použité přístroje.....</b>	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>Použité standardy .....</b>	<b>51</b>

<b>8</b>	<b>Jednoduchá spektroskopie.....</b>	<b>53</b>
8.1	Popis metody.....	53
8.2	Popis měření.....	53
8.3	Postup měření.....	53
8.4	Použitá technologie .....	55
8.5	Vyhodnocení měření .....	55
8.6	Vyhodnocení výsledků.....	59
<b>9</b>	<b>Nekontaktní kolorimetrie .....</b>	<b>60</b>
9.1	Popis metody.....	60
9.2	Popis měření.....	60
9.3	Postup měření.....	60
9.4	Použitá technika .....	60
9.5	Vyhodnocení měření .....	62
<b>10</b>	<b>Vizuální pokus .....</b>	<b>62</b>
10.1	Popis metody.....	62
10.2	Popis měření.....	63
10.3	Postup měření.....	64
10.4	Použitá technika .....	64
10.5	Vyhodnocení výsledků.....	64
	<b>Závěr .....</b>	<b>67</b>
	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>69</b>

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$T_c$	Teplota chromatičnosti
$u', v'$	Chromaticity coordinates of CIE 1976 chromaticity diagram
$S_a$	Memory color rendering index
$S_i$	Region of four reference color sample under reference source
$Q_a$	General color quality scale
XYZ	Tristimulus values of CIE XYZ trichromatic systém
$w'$	Perpendicular height of the cone

CIECAM02	CIE Color Appearance Model 2002
CAT02	Chromatic Adaptation Transform 2002
CCT	Correlated Color Temperature
CDI	Color Discrimination Index
CIE CRI	CIE Color Rendering Index
CIECAM97s	CIE Color Appearance Model 1997 (simplified version)
CIELAB	CIE 1976 ( $L^*a^*b^*$ ) color space
CIEUVW	CIE 1964 ( $U^*V^*W^*$ ) color space
CMCCAT2000	Color Management Committee Chromatic Adaption Transform
CPI	Color Preference Index
CQS	Color Quality Scale
CRI	Color Rendering Index
CSA	Cone Surface Area
FCI	Feeling of Contrast Index

FSI	Full Spectrum Index
GA	Gamut Area
GAI	Gamut Area index
IPT	Image Processing Transform
SPD	Spectral Power Distribution
LCD	Liquid Crystal Display
TFT	Thin Film Transistor



## Úvod

Bakalářská práce se zabývá problematikou vlivu spektrálního složení nových LED osvětlení na barevný vzhled materiálů a výrobků. Umělé osvětlení je každodenní součástí našich životů a tak dochází k neustálému ovlivňování našeho pozorovacího úsudku.

Zrak je jedním z nejdůležitějších smyslových orgánů, díky kterému získáváme většinu okolních informací. Měli bychom proto porozumět jeho vnitřním strukturám, které nám zprostředkovávají barevné vidění. Anatomická struktura a fyziologické procesy ve zrakovém orgánu jsou velmi složité systémy. Pro pochopení jejich funkcí je důležité si uvědomit, že v nich dochází k propojení dvou vědních oborů, a to medicíny a fyziky. Této problematice se věnuje první teoretická část bakalářské práce. Druhá teoretická část je věnována světelným zdrojům, výhodám a nevýhodám jejich konstrukce a použití. Dále jsou zde popsány teoretické principy jednotlivých výzkumných metod, které jsou použity v praktické části. Posledním větším blokem teoretické části je pak popis indexů barevného podání.

Praktická část mé bakalářské práce se zabývá zodpovězením výzkumných otázek, a to do jaké míry ovlivňují nové LED světelné zdroje vzhled výrobku a jakým způsobem se liší jejich spektrální složení. Obě tyto otázky spolu úzce souvisejí, jelikož spektrální složení světelného zdroje je jedním z mnoha důležitých faktorů, které hrají velkou roli v tom, jak předměty pod ním vypadají. Jak již bylo zmíněno, barevné vnímání je otázkou mnoha aspektů určitých vědních oborů a tak je tomu i při provádění jednotlivých pokusů. Zajímavé tedy bude sledovat, jak si povede lidský zrak ve srovnání s moderními přístroji a zda propojení obou těchto způsobů bude ve výsledku stačit k zodpovězení výzkumných otázek.

## **Teoretická medicínská část**

Zrak je jedním z nejdůležitějších lidských smyslů, který nám napomáhá utvářet ucelené informace například o prostoru a předmětech. Svou anatomickou a fyziologickou strukturou je u zdravého jedince schopen detailně popisovat tvar, velikost, stavbu a barvu daného objektu. Lidské oko je velmi složitý orgán a pro jeho zkoumání je zapotřebí pochopit jeho strukturu a děje v něm probíhající.

### **1 Oční koule**

Oko (bulbus oculi) je smyslovým orgánem, který slouží k vnímání elektromagnetického světelného záření v rozsahu vlnových délek od 400-790 nm. Má přibližný tvar koule s vyklenutými místy v předním směru - přední a zadní pól (polus anterior et posterior). Jeho průměr je zhruba 25 mm.

Oko je uloženo v kostěné schránce (očnici) v tukovém vazivu. Zepředu je chráněno a zvlhčováno slzným aparátem a víčky. Spojení mezi bulbem a víčky zprostředkovává spojivka. Pohyby oka pak zajišťují okoohybné svaly.[1]

#### **1.1 Vnější vrstva (*tunica fibrosa*)**

Povrch oční koule je tvořen vazivovou vrstvou, která se dále dělí na přední a zadní segment. Přední segment tvoří rohovka (cornea), která je průhledná a dochází v ní k lámání světelných paprsků. Je zasazena do bělimy jako hodinové sklíčko a odpovídá asi  $\frac{1}{5}$  plochy povrchu oční koule. Její mírně eliptický tvar s poloměrem zakřivení 6,8 – 8,5 mm způsobuje fyziologický astigmatismus, který následně korigují mozková centra. Povrch rohovky tvoří rohovkový epitel, který dobře regeneruje při poškození. Zadní segment je tvořen bělimou (sclera). Tvoří zhruba  $\frac{4}{5}$  povrchu oční koule. Její mléčná fibriozní vrstva je neprůhledná a pevná. Na zevním povrchu bělimy je řídké vazivo s velkým množstvím štěrbin vyplněných tkáňovou tekutinou, která se nazývá episkléra, jimiž se bělima spojuje se spojivkou a umožňuje tak značnou pohyblivost oka. [1]

## 1.2 Střední vrstva (tunica vasculosa)

Střední vrstva slouží v první řadě k výživě oka. Její součástí je živnatka (uvea), jež je protkána hustou cévní sítí, a dále se živnatka rozděluje na tři další samostatné tkáně.

První z nich je cévnatka (choroidea). Jejím úkolem je zejména vyživovat vrstvu tyčinek a čípků, které od sebe také navzájem izoluje, udržovat stálé napětí čočky a regulovat množství dopadajícího světla na sítnici. Cévní kličky prostoupené vazivem, jsou v cévnatce v různém uspořádání v několika vrstvách. Součástí cévnatky jsou pak více specializované části jako řasné těleso (corpus ciliare) a duhovka (iris). Řasnaté tělísko je pomocí své svaloviny schopno měnit zakřivení čočky a zajišťuje akomodaci oka. Součástí jsou ciliární výběžky, které dokáží složitým procesem produkovat komorovou vodu z cévní pleteně. Duhovka má v centrální oblasti otvor nazývaný zornice (pupilla), který dělí prostor oka na přední a zadní komoru oční. Přední část duhovky tvoří vazivové trámce. Duhovková barva je ovlivněna prosvítáním cév a pigmentem zadní plochy. Zadní část duhovky je tvořena epitelem. Duhovka funguje na principu clony fotoaparátu, to znamená, že reguluje na množství světla a velikost otvoru, kterým mohou procházet paprsky k sítnici v centrální části. Střední vrstvu dále tvoří čočka (lens). Ta je uložena za zornicí v přední části komory oční (v capsula lentis), což je průhledné nebuněčné pouzdro. Čočka je zavěšena na vláčenkách, které vystupují z řasnatého tělíska. Změnou napětí těchto vláken se čočka buď oplošťuje, nebo naopak při minimálním tahu vyklenuje. Svým tvarem opravdu připomíná tvar bikonvexní čočky o průměru 10 mm. Při adaptaci na vzdálenost je její tloušťka přibližně 3,8 mm a při adaptaci na blízko až 4,4 mm. Optická mohutnost čočky je zhruba + 17 D. [1]

## 1.3 Vnitřní vrstva (tunica intima)

Vnitřní vrstva oční koule je tvořena sítnicí (retina), kde dochází k převodu fotochemického procesu na bioelektrický signál nervových buněk a k jeho dalšímu zpracování. Lidský zrak má schopnost barevného, černobílého i prostorového vidění. Celková dioptrická mohutnost oka je přibližně +60 dioptrií. Dle přítomnosti světločivných elementů ji lze rozdělit na dvě části. První část pokrývající oční kouli se nazývá optická (pars optica) a obsahuje světločivé elementy a neurony. Druhou částí sítnice je část řasnatého tělesa a duhovky (pars ciliaris et iridica retinae), jež nemá percepční schopnost, neboli část slepou (pars caeca). Mezi oběma oblastmi sítnice je linie nazývaná pilovitý okraj (ora serrata), která leží při zadním okraji řasnatého tělesa

(corpus ciliare). Optická část sítnice (pars optica retinae) je tvořena nervovou tkání s bohatým výskytem světločivných buněk a je rozdělena do jednotlivých vrstev, které těsně naléhají na cévnatku s pigmentovým epitelem, který obsahuje četné melanosomy a transportuje kyslík pro tyčinky a čípky, čímž umožňuje fotochemické děje a regeneraci.

Sítnice má zaživa oranžovo-růžovou barvu, což je způsobeno prosvítáním kapilár cévnatky. V místech, kde se axony sbíhají do optického nervu, se nachází slepá skvrna (discus nervi optici) s prohloubeným středem, která neobsahuje světločivné elementy. [1]

#### **1.4 Sklivec (corpus vitreum)**

Je rosolovitá, polotekutá, dokonale průhledná hmota, která vyplňuje prostor mezi sítnicí a zadní plochou čočky. Sklivec je tvořen z 99% vodou a 1% bílkovinou. [1]

## **2 Přídavné orgány oka**

Mezi přídavné orgány oka patří okohybné svaly, spojivka, oční víčka, slzný aparát. Jsou to orgány, které se podílejí na správné funkci oka. [1]

### **2.1 Okohybné svaly (musculi bulbi)**

O správné prostorové vidění se stará 6 okohybných svalů, z nichž jsou 4 přímé a 2 šikmé. Svaly jsou uloženy v očnici, jsou přirostlé k očnici a rozpínají se mezi kostěnou částí a bulbem. V případě poruchy souhry okohybných svalů dochází k šilhání (strabismus). [1]

### **2.2 Spojivka (tunica conjunctiva)**

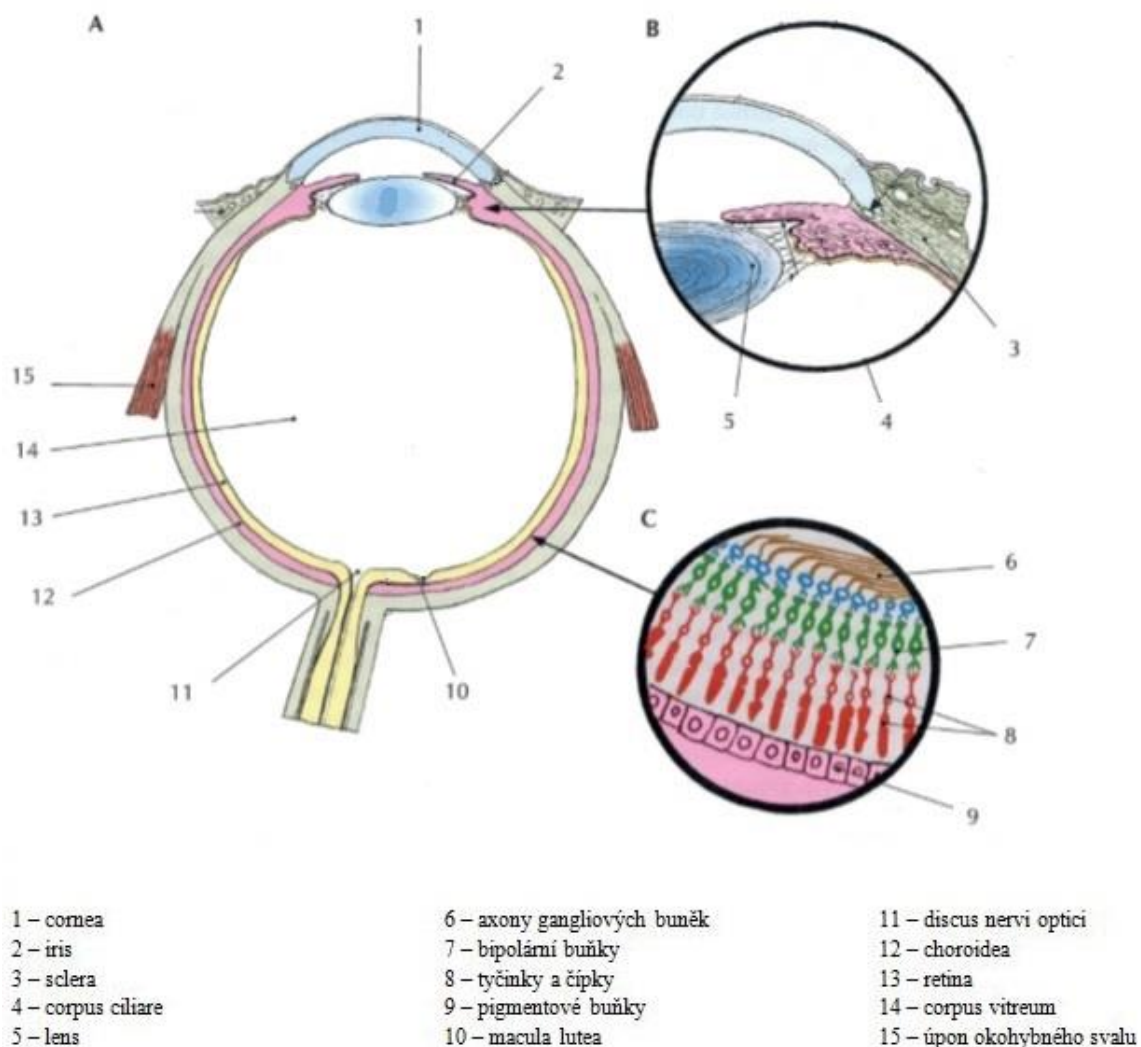
Spojivka je jemná slizniční vrstva, která pokrývá zadní plochu víček a kryje přední část oční koule. V místech, kde přechází bulbární spojivka na víčka, vytváří spojivka ohyb. Dochází tak ke vzniku spojivkového vaku. Spojivka uzavírá přístup k bulbu a je přirostlá k limbu rohovky. Do horního vaku spojivky ústí vývody slzné žlázy, která zprostředkovává vlhčení očního povrchu. [1]

### **2.3 Oční víčka (palpebrae)**

Rozeznáváme dolní a horní víčko a jejich hlavní úlohou je ochrana přední části oka. Při jejich sevření se mezi nimi vytváří štěrbina. Víčka jsou navzájem spojena v očních koutcích, kde jsou fixována ke kostře lebky. Vlastní zakřivení, je tvořeno vazivovými destičkami (víčkovými tarzy) uvnitř mazové žlázy. Vnitřní povrch víček je krytý spojivkou, zevní plocha pak jemnou kůží. Na volných okrajích víček se nacházejí 3 – 4 řady řas (ciliae).[1]

### **2.4 Slzný aparát (apparatus lacrimalis)**

Slzná žláza (glandula lacrimalis) leží při horním okraji očnice. Vývody slzné žlázy jsou vyústěny do zevní strany horního spojivkového vaku. Při pohybu víček jsou pak slzy roztírány po povrchu oka směrem k vnitřnímu očnímu koutku. Uvnitř víčka vzniká dolní i horní kanálek ležící v slzném kanálku, odkud ústí do slzného vaku. Slzný vak poté vyústí do dutiny nosní, do dolního průchodu nosního. Odtud mohou slzy dále stékat přes nosohltan až ke kořenu jazyka, kde můžeme zaznamenat jejich slanou chuť. Slzy mají pro oko mnoho významů. Zásobovat rohovku kyslíkem a živinami, distribuovat ochranné látky, udržovat povrch hladký a kluzký, dále pak zajistit jejich zvlhčení a desinfekci. [1]



Obr. 1 Schéma pravého oka. Celkové schéma (A), detail iridokorneálního úhlu (B), detail sítnice (C).[1]

### 3 Fotoreceptory

Místem výskytu fotoreceptorů je sítnice. Obsahuje asi 6-7 milionů čípků a asi 120 milionů tyčinek. Vrstva čípků je zhruba 20 krát menší a zprostředkovává vnímání barvy, přičemž se předpokládá, že každý druh čípku vnímá pouze jednu barvu. Největší koncentrace čípků se nachází ve foveole uprostřed žluté skvrny (macula lutea), kde zcela chybí tyčinky a jedná se tak o místo nejostřejšího vidění, barvu má sytě oranžovo-žlutou. Vrstva tyčinek i čípků naléhá k pigmentovému epitelu a podílí se především na vnímání intenzity světla. Díky přítomnosti speciálních pigmentů rhodopsinu v tyčinkách

a jodopsinu v čípcích dokáže lidský zrak přes první neuron zrakové dráhy přenášet světelné podněty a měnit je na elektrický potenciál.

Procesem stárnutí zůstává počet čípků neměnný, avšak hustota tyčinek se snižuje zhruba o třetinu. Směrem k periferi od očního centra fovey dochází k postupnému ubývání jednotlivých receptorů, a to nejprve pro zelenou, červenou a nakonec i modrou barvu. Vyskytují se v poměru 1:16:32. Nejvíce je takzvaných L-čípků, které mají maximální citlivost pro oblast červené barvy. Následují M-čípky s citlivostí v oblasti zelené barvy a nejméně je S-čípků s maximem v modré barvě.

Fotoreceptory jsou odlišné podle různých speciálních segmentů, umístění jádra a tvaru synaptického zakončení. Všechny receptory mají zevní segment, v němž probíhají metabolické procesy.

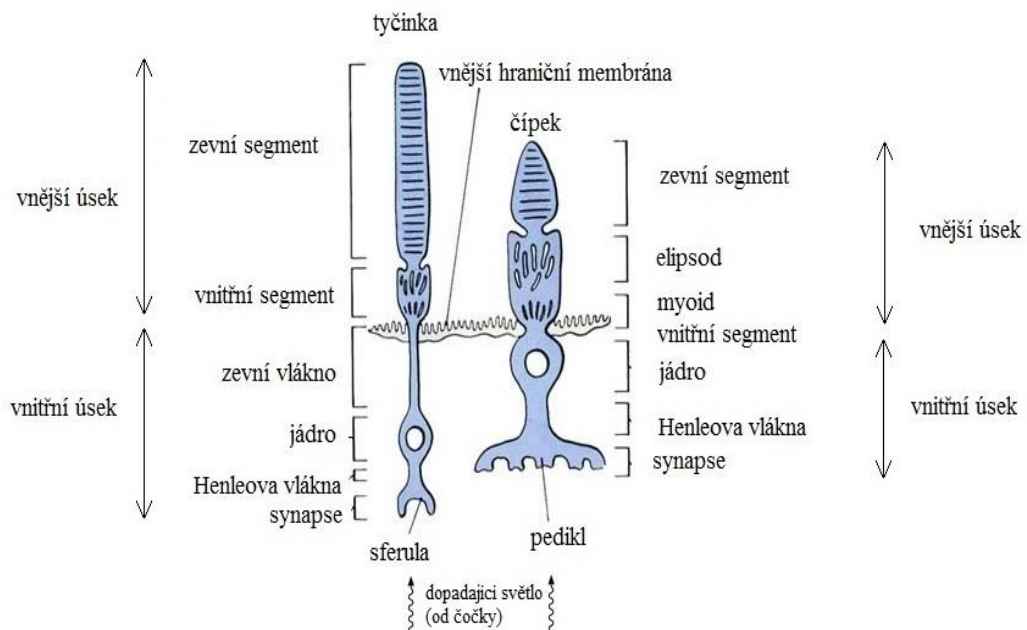
Prvotní klasifikace fotoreceptorových buněk byla založena na mikroskopickém tvaru distálních konců buněk. Čípky se od vnitřního segmentu směrem k zevnímu zužují. U tyčinek je zevní segment tvaru vypouklého válce. K synapsi čípků s jinými buňkami dochází prostřednictvím takzvaného receptorového terminálu, který se nazývá pedicel. U tyčinek je zakončení menší a nazýváme ho spherule. U člověka jsou čípky mohutnější než tyčinky. Z důvodu těžkého rozlišení tyčinek a čípků nemůže být jejich klasifikace založená pouze na samotné morfologii. Jako příklad lze uvést foveální čípky, které se nezužují, jsou spíše vypouklé a tvarem téměř identické jako tyčinky.[2]

### **3.1 Anatomie čípků a tyčinek**

Čípky jsou svou základní stavbou podobné tyčinkám. Skládají se z vnějšího a vnitřního úseku. Stejně jako u tyčinek představuje vnější úsek vlastní čípek, jenž je obdobou dendritů u nervových buněk. Vnější úsek je složen ze tří částí. První částí je zevní segment, místo, ve kterém dochází k přeměně světelné energie na elektrický signál. Zevní segment obsahuje membranózní disky, které jsou složené z lipoproteinových membrán. Tato část stále dorůstá a je pak pohlcována buňkami retinálního pigmentového epitelu. Rozklad a fagocytóza při procesu vidění zevních segmentů má denní rytmus. K fagocytóze čípků dochází při vidění v noci, tyčinek pak přes den. Jedná se o celkovou obměnu v řádech stovek kusů za cyklus. Disky jsou tenčí než u tyčinek, naopak jsou na sebe více nahromaděny. Disky čípků obsahují jodopsin, disky tyčinek pak rodopsin. Při dopadu světelných paprsků zde dochází k přestavbě na molekulární úrovni a světelné impulsy se mění na nervové elektrické vzruchy.

Druhou částí je přechodová zóna, která má mezi zevním a vnitřním segmentem hustou vláknitou strukturu.

Třetí částí je vnitřní segment. Tento segment fotoreceptorů obsahuje množství mitochondrií v takzvaném elipsoidu, který leží přímo pod zevním segmentem. Nakupení mitochondrií v čípcích je větší než u tyčinek, celkový počet je 15 krát vyšší, protože v těchto místech probíhají oxidačně-redukční velmi náročné energetické pochody. Další část vnitřního segmentu je myoid. Myoid se nazývá proto, že u nižších obratlovců je schopen kontraktilní změny a podle osvětlení mění celou délku receptoru. Vnější úsek je u čípků silnější a svým tvarem připomíná spíše kužel. V centrální krajině sítnice dochází ke změně tohoto tvaru na užší, spíše podobný tyčinkám, což je způsobeno jejich zvětšeným množstvím v této oblasti. Vnitřní úsek pak sestává z buněčného jádra, které je umístěno přímo pod vnitřním výběžkem vnějšího úseku. Buněčné jádro je větší než u tyčinky a čípkové nervové vlákno je na konci více rozšířeno a je objemnější. Vytváří tak synapse s bipolárními buňkami. Jádra obou receptorů se nacházejí pod vnitřním segmentem v rozšířené části buňky a vytvářejí takzvanou zevní jádrovou vrstvu. Vnitřní vlákna čípků se rozbíhají radiálně na všechny strany od fovey a dochází tak k vytvoření Henleových vláken. Čípky jsou v opozici k pigmentovému epitelu sítnice a zabořují se do něj. Inverzní charakter sítnice pak svou funkcí nutí veškeré světelné podněty projít celou svou strukturou, než se dostane ke světločivným výběžkům čípků.[2]

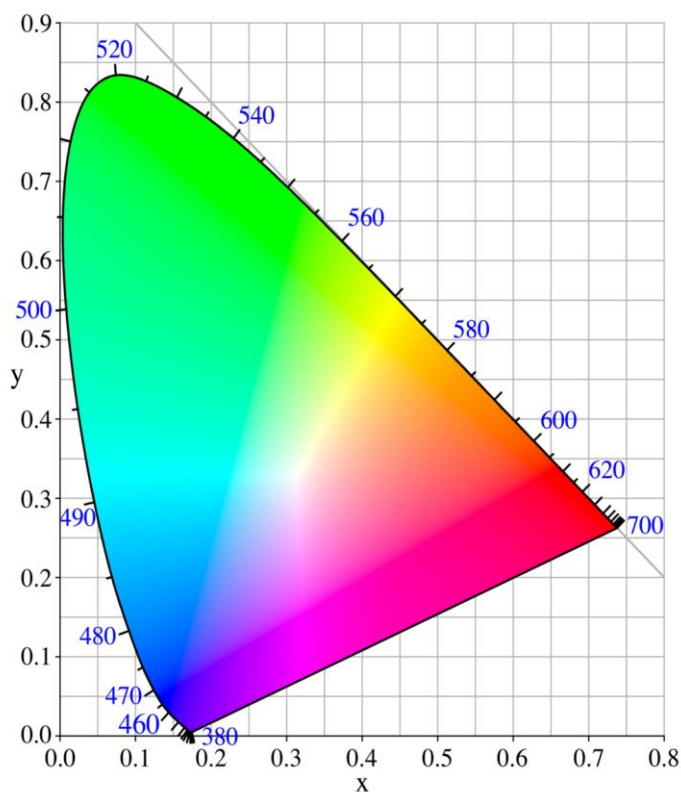


Obr. 2 Popis buněčné anatomické struktury tyčinek a čípků.[2]



### 3.2 Barevné vidění

Náš zrak je schopen rozlišovat nejen tvary, pohyby, vzdálenost, popřípadě rozložení předmětů v prostoru, ale také jejich barvu. Tím je myšleno, že lidské oko je schopno rozlišit vlnovou délku té části spektra, která předmětem prochází nebo se od předmětu odráží. Tuto schopnost v očním aparátu při určité hladině osvětlení zprostředkovávají čípky sítnice. Pokud je hladina osvětlení příliš nízká, přejímají funkci receptorů tyčinky, kdy lidské oko již nevnímá barvy a je v takzvaném skotopickém (černobílém) pásmu. Pásmo, ve kterém převládají jako receptory čípky, nazýváme fotopické (barevné). V případě, že jsou zapojeny oba druhy receptorů, jedná se o velmi úzké mezopické pásmo. Lidské oko vnímá barvy v přibližném rozsahu od 400 nm až 790 nm, podrobným vyšetřením celého viditelného spektra najdeme vlnovou délku, pro kterou je oko ve fotopickém pásmu nejcitlivější. Jedná se o žlutozelenou barvu o vlnové délce okolo 555 nm. Naopak maximální citlivost má lidský aparát ve skotopickém pásmu při vlnové délce okolo 500 nm, jedná se o modrozelenou barvu. Smícháním tří primárních spektrálních barev (červené, zelené a modré) můžeme na spektrálním aparátu dostat jakýkoliv odstín spektra pouhou změnou poměru barev ve směsi, mluvíme o takzvaném trichromatickém vidění. [3]



Obr. 3 CIE kolorimetrický trojúhelník x,y,z.[3]

### 3.3 Psychofyzika barevného vidění

V rozmezí vlnových délek viditelného světla 380 nm – 780 nm se nachází množství monochromatických barev. Lidský zrak je schopen v oblasti vlnových délek od 490 nm do 590 nm rozlišit již rozdíl vlnové délky pouhého jednoho nanometru. V praxi se však barvy jako monochromatické vyskytují jen velmi zřídka. Mnohem častěji se jedná o část barevného spektra nebo o světelnou směs různých vlnových délek. V takovém případě se hovoří o nečisté barvě, neboli odstínu (*hue*). Pokud je směs znečištěna příměsí bílého světla, jde o odstín nenasycený, v případě základních barev, červené, zelené či modré se jedná o barvy nasycené. Barevný odstín lze změnit i zvyšováním intenzity světla. Pokud je zvýšení intenzity světla maximální, vznikne bez rozdílu pro všechny vlnové délky vjem barvy žlutobílé.

Při míšení dvou barev dochází ke vzniku dalšího odstínu, který je závislý na vzdálenosti spekter a na intenzitě původních barev. Můžeme tak říct, že lze dosáhnout jakéhokoliv barevného odstínu pomocí tří základních barev, pokud zvolíme vhodné intenzity. Toto tvrzení vyjádřil, roku 1853 německý matematik a fyzik Hermann Grassman, pomocí vzorce:  $B = \check{C} * \alpha + Z * \beta + M * \gamma$ , kde B je výsledná barva, Č, Z, M charakterizují počáteční písmena primárních barev, tedy červenou, zelenou a modrou a koeficienty  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  vyjadřují intenzitu základních barev. Pro příklad lze použít míšení bílého světla, kde se míchají tři základní barvy ve stejném poměru tedy  $B$  (bílá) =  $0,33\check{C} + 0,33Z + 0,33M$ . Diagram spektrálních oblastí pro jednotlivé barvy ukazuje, kde velikost koeficientu pro červenou, zelenou a modrou barvu leží. Červenou barvu bychom našli na vodorovné ose s hodnotou vlnové délky 650 nm, zelenou na svislé ose s hodnotou 530 nm. Barva modrá se získá ze vztahu  $\gamma = \alpha + \beta - 1$ . Její vlnová délka pak je 460 nm. Z uvedených rovnic a diagramu lze tedy odvodit princip barevného vidění. Předpokládáme-li, že barvu lze složit ze tří základních (primárních) barev, pak bude lidský zrak disponovat nejjednodušším mechanismem pro skládání kódu určité barvy. Toto se dá pokládat za podstatu teorie barevného vidění. Tato teorie byla navržena a dále propracována řadou vědců například Youngem, Lomonosovem a Helmholtzem. Jejich teorie předpokládá existenci tří typů receptorů v oku s tím, že každý z receptorů je určen pro vnímání jedné základní barvy. Oko však není schopno rozlišit, zda jde o barvu složenou pouze z barvy jedné vlnové délky nebo o směs jednotlivých vlnových délek vhodného smíšení. [3]

## **Teoretická technická část**

Tato část bakalářské práce má za úkol přiblížit a vysvětlit problematiku osvětlování. Je zde rozebráno jednotlivé třídění světelných zdrojů, které jsou použity v praktické části a detailněji popsány jejich principy. Dále jsou zde zmíněny základy metod, které jsou využity při zjišťování a zpracování výsledků, doprovázeny zavedením základních pojmů a veličin pro pochopení technické části práce. Samotný text je doplněn řadou obrázků a tabulek, které napomáhají k celkovému pochopení technické části.

### **4 Rozdělení světelných zdrojů**

Světelnými zdroji nazýváme tělesa, která vyzařují optické, zpravidla viditelné záření. Dělí se na přírodní (slunce, měsíc a blesk) a na umělé (louč, plynová lampa, výbojka, světelná dioda a další). Přírodní těleso, ve kterém dochází k přímému vyzáření světla, jež vzniklo v něm samém přeměnou energie, se nazývá primární. Umělý světelný zdroj je zdrojem optického záření a pro tento účel byl také vyroben. Dochází v něm k přeměně některých druhů energie na energii elektromagnetického záření, které se nachází v optickém intervalu spektra. Jedná se především o elektrickou, chemickou a biologickou energii. Dle principu vzniku světla se elektrické světelné zdroje dají dělit na zdroje teplotní (obyčejné a halogenové žárovky), výbojové (zářivky, vysokotlaké a halogenidové výbojky, sodíkové výbojky obou typů) a dále na elektroluminiscenční (světelné diody LED). Nejvíce využívané jsou v dnešní době elektrické světelné zdroje, které přeměňují již zmíněnou elektrickou energii na světelnou a jsou základním prvkem každé osvětlovací soustavy. Díky vývoji v technice a bouřlivému rozvoji se dnes objevují nové světelné zdroje využívající dříve neznámé principy generování světla. Jedná se například o indukční nízkotlaké i vysokotlaké výbojky. Zdroje již dlouho využívané dnes díky novým technologiím dosahují daleko lepších parametrů než před lety, a tak jim po právu patří místo mezi nejrozšířenějšími světelnými zdroji. Jako příklad lze uvést halogenidové výbojky s keramickým hořákem, bezelektrodové indukční výbojky a světelné diody LED. Na druhou stranu je možné ještě stále přijít do styku se zdroji, které své fyzikální možnosti vyčerpaly, a tak jsou spíše na ústupu. Jedná se především o teplotní zdroje typu obyčejné a částečně i halogenové žárovky a dále

pak o malou část výbojkových zdrojů, především vysokotlakých rtuťových a směsových výbojek.[4]

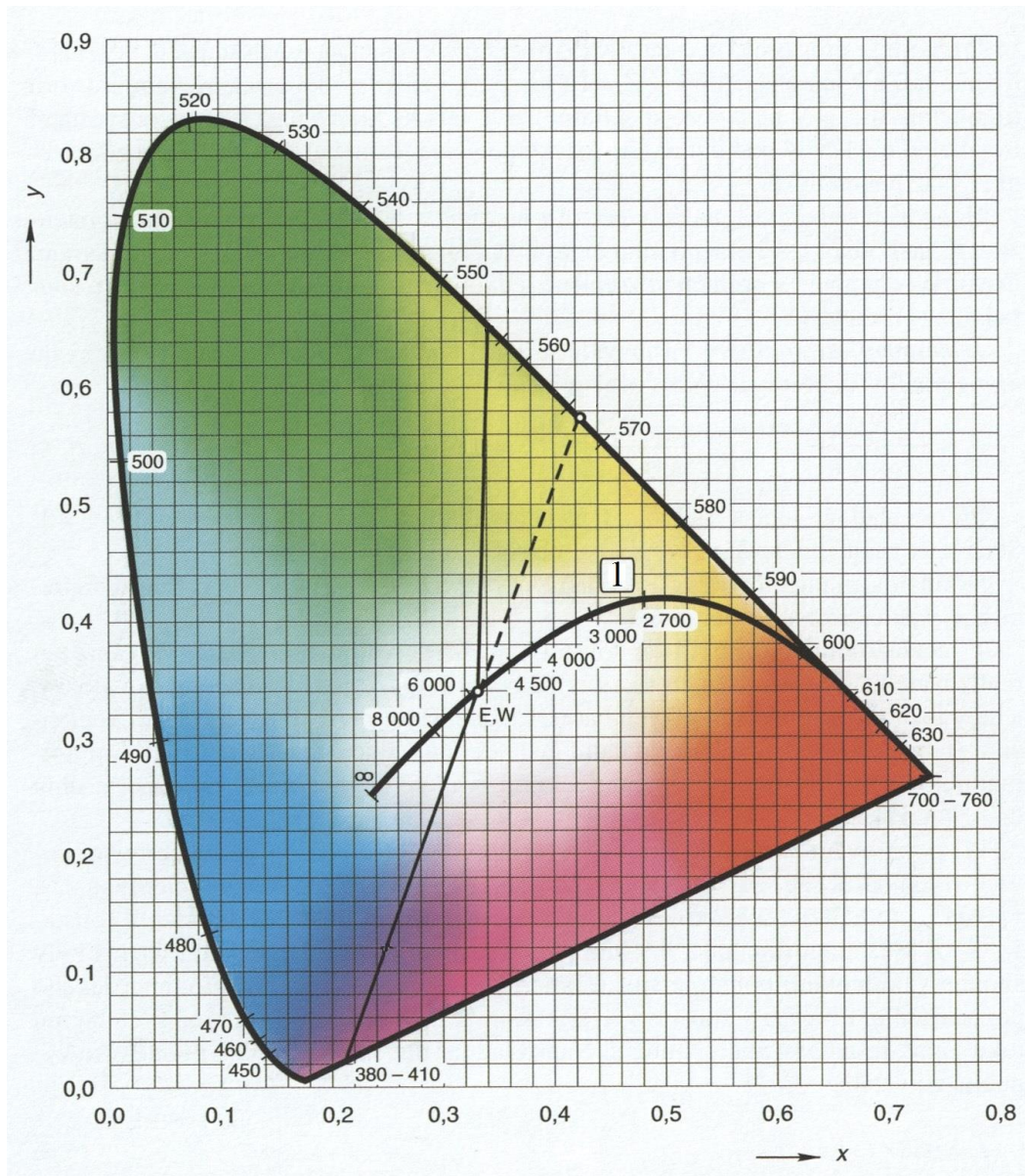
## **4.1 Umělé světelné zdroje**

Světelný zdroj je elektromagnetické záření, které se nachází v rozsahu vlnových 400 nm-790 nm. Jsou tedy snadno pozorovatelné lidským okem a spadají do viditelného spektra. Umělé světelné zdroje se dají rozdělit podle jednotlivých vlastností do různých skupin. Jednou z možností jak dělit světelné zdroje je z hlediska podstaty vzniku světla. Tímto dělením dostáváme několik skupin světelných zdrojů: žárovky, tedy zdroje světla, které fungují na principu teplotního záření, dále zářivky, u kterých světlo vzniká při průchodu elektrického výboje plynem a světelné diody, které fungují na principu průchodu elektrické energie propustným směrem polovodičové součástky s určitým chemickým složením.

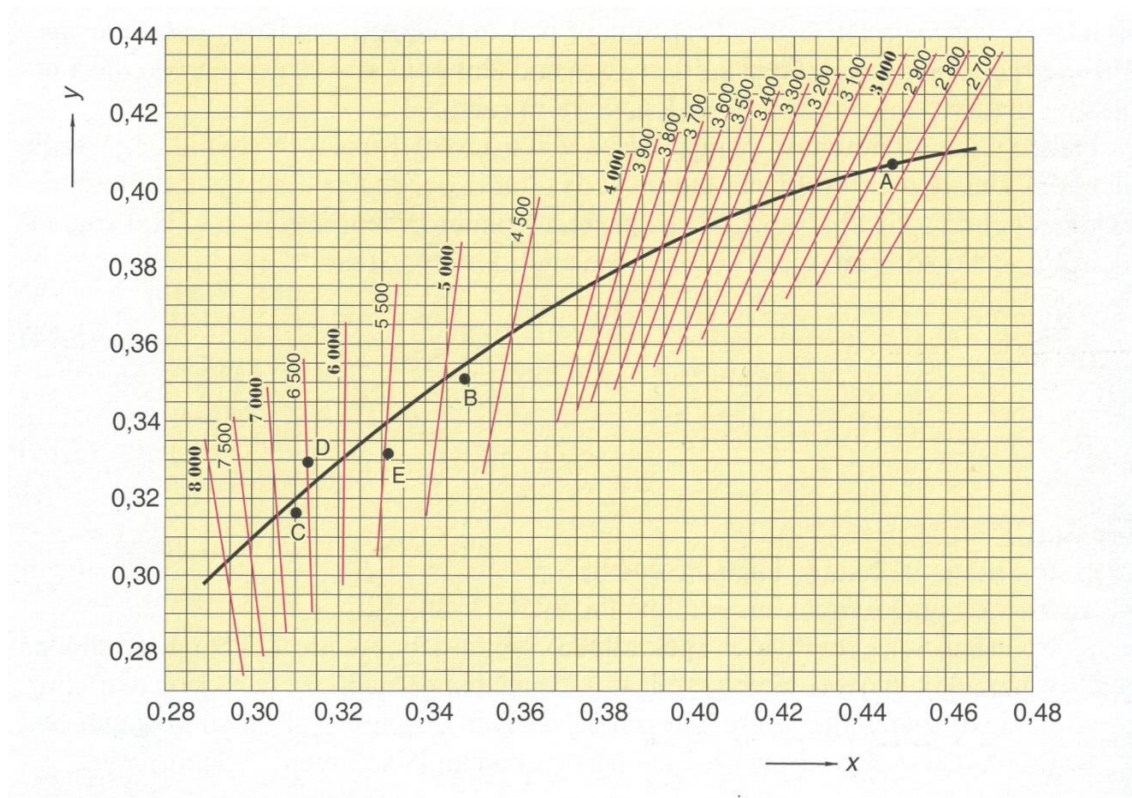
Jednotlivé světelné zdroje pak specifikují jejich vlastnosti. Mezi hlavní parametry umělých světelných zdrojů patří: teplota chromatičnosti, index podání barev, jas a svítivost. Dále také parametry spojené s elektrickou energií jako například proud, příkon a měrný výkon. Tyto parametry jsou důležité zejména při vyhodnocování přeměny elektrické energie na světelnou. [4]

### **4.1.1 Teplota chromatičnosti**

K vystižení barvy či barevných odstínů lze využít jas zdroje, kromě toho lze využít i trichromatické souřadnice též teplotu chromatičnosti. Teplota chromatičnosti se rovná teplotě černého tělesa, jehož záření má shodnou chromatičnost jako uvažované záření. Udává se v kelvinech (K). Čáru teplotních zářičů s vyznačenými hodnotami teploty vidíme znázorněnou na obr. 4. Barvu světelných zdrojů, jejichž křivka spektrálního složení je plynulá, bez větších změn, lze popisovat ekvivalentní teplotou chromatičnosti. Zdroje, u kterých křivka vykazuje prudké změny, lze přibližně popisovat takzvanou náhradní teplotou chromatičnosti. Ke stanovení ekvivalentní a náhradní teploty chromatičnosti lze využít diagram na obr. 5, ve kterém jsou zakresleny čáry konstantních teplot chromatičnosti. Ekvivalentní teplota chromatičnosti je používána v případě, že spektrální průběh zdroje je plynulý a příliš se neodchyluje od Planckovského zářiče. Náhradní teplota chromatičnosti se využívá v případě, že spektrální průběh zdroje vykazuje náhlé změny hodnot.[4]



Obr. 4 Diagram chromatičnosti mezinárodní kolorimetrické soustavy XYZ v pravoúhlých souřadnicích  $x,y$ . 1 – čára teplotních zářičů se stupnicí v kelvinech. [4]



Obr. 5 Čára teplotních zářičů v souřadnicích x, y s vyznačenými čarami konstantních teplot chromatičnosti v kelvinech. [4]

#### 4.1.2 Index barevného podání

Vliv spektrálního složení světelných zdrojů, které vytvářejí barevný vjem při osvětlení předmětů, popisuje podání barev. Barevný vjem osvětlených předmětů se poté srovnává s vjemem vznikajícím při osvětlení smluvními zdroji. K číselnému vyjádření jakosti barevného vjemu se využívá index podání barev, který vyjadřuje stupeň shodnosti vjemu barvy předmětů, které jsou osvětleny nekonvenčními zdroji světla a stejných předmětů osvětlených smluvními zdroji při přesně stanovených podmínkách pozorování. Tato metoda se zakládá na číselném vyjádření rozdílu vjemu barvy pro stanovené vzorky, které se osvětlují jak konvenčním, tak nekonvenčním zdrojem světla. Výpočtem se stanoví všeobecný index podání barev s označením  $R_a$ , ve světě znám jako CRI (Color Rendering Index). Hodnota indexu podání barev  $R_a$  se stanovuje v rozmezí od 0 do 100. Nejvěrněji vnímané jsou barevné předměty osvětlené denním světlem a světlem z teplotních zdrojů, jejich hodnota indexu podání se blíží k číslu 100. Podle ČSN EN 12464 se v současnosti požaduje osvětlení pro většinu interiérů s minimální hodnotou  $R_a > 80$ . [4]

## 4.2 Standardní zdroje osvětlování

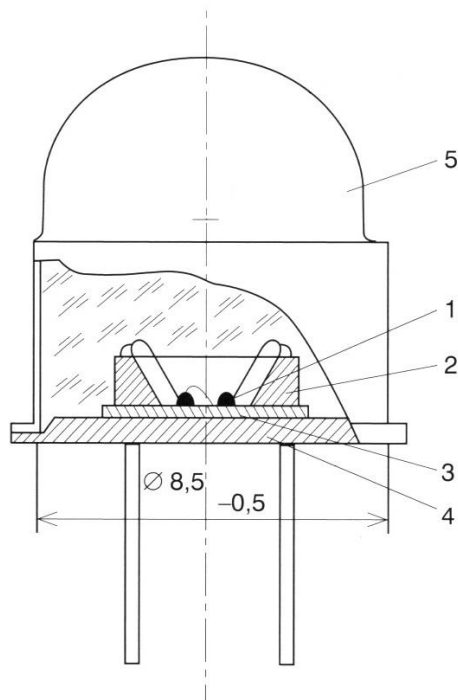
Z důvodu velkého množství světelných zdrojů se společnost CIE rozhodla stanovit základní zdroje světla A, B, C, D, F. U zdrojů je hlavním parametrem jejich spektrální složení.

Normalizovaný zdroj světla typu A odpovídá umělému žárovkovému osvětlení s teplotou chromatičnosti  $T_c = 2856$  K. Zdroj světla typu B by neměl být používán vůbec. Odpovídá střednímu dennímu světlu a jeho hlavní složkou je přímý sluneční svit. Ekvivalentní teplota chromatičnosti  $T_{ce} = 4874$  K. Dalším zdrojem světla je typ C, který taktéž odpovídá dennímu světlu avšak bez přímého slunečního světla. Stejně jako typ B se dnes už nepoužívá. Ekvivalentní teplota chromatičnosti  $T_{ce} = 6774$  K. Jedním z hojně využívaných je typ D. Svým spektrálním složením odpovídá průměrnému dennímu světlu. Spektrální složení je popsáno matematickým vztahem a tak je možno jej definovat pro jakoukoliv ekvivalentní teplotu chromatičnosti v rozsahu 4000K až 25000K. Přednostně je využíván zdroj světla s ekvivalentní teplotou  $T_{ce} = 6504$  K, s označením D65. Dále je možné se v praxi setkat s typy D50, popřípadě D55 a D75. [19]

## 4.3 LED světelné zdroje

Led světelné zdroje patří do skupiny takzvaných elektroluminiscenčních světelných zdrojů. Světelné diody jsou polovodičové součástky, jež obsahují přechod PN, který pokud je buzen průchodem elektrického proudu, dochází k emitování optického záření. Nejvýznamnější pro všeobecné nebo speciální druhy osvětlení jsou především LED (Light Emitted Diode) diody. K vytvoření polovodičových přechodů typu PN se využívají zejména polovodiče typu  $A^{III} B^V$ , které mají vysokou čistotu a jsou legované malým množstvím vhodných příměsí. Tyto příměsi pak způsobují přebytek elektronů z materiálu typu N anebo jejich nedostatek, a tedy přebytek děr u materiálu typu P. V místě, kde dochází ke styku polovodičů, vzniká takzvaný přechod PN. Po přiložení stejnosměrného napětí se správnou polaritou na tento přechod dochází ke vzájemnému přibližování elektronů a děr k místu kontaktu a k jejich rekombinaci. Při rekombinaci všech párů elektron – díra se uvolňuje určité množství energie, která může být vyzářena mimo krystal. Dochází tak k přímé přeměně elektrické energie na světlo určité barvy. Vlastní polovodičový čip má velmi malé rozměry. Dnes se plocha čipu pohybuje

v řádech jednotek milimetrů čtverečných. Konstrukce světelné diody je ukázána na obr. 6.



Obr. 6 Základní konstrukční uspořádání světelné diody se dvěma krystaly.

- 1- Polovodič s přechodem PN, 2- reflektor, 3- keramická destička odvádějící teplo,
- 4- podložka, 5- polokulová čočka[4]

Technika od vytvoření prvních diod, které vyzařovaly červenou barvu, pokročila a díky rozmanitosti sortimentu lze dnes pomocí diody modré barvy sestavit diodu vyzařující bílou barvu. Dioda září v celé viditelné oblasti spektra a díky tomu se významně rozšířila oblast jejich použití, a to především ke všeobecnému osvětlení. Bílé světlo lze dnes získávat dvěma způsoby. První způsob zahrnuje klasický způsob přímého míšení světla pomocí červené, zelené a modré LED, kde je však zapotřebí využití kvalitního hardwaru a softwaru. Výsledný jas je nižší a v důsledku nerovnoměrného opotřebení jednotlivých druhů čipu může docházet v průběhu života k nežádoucím posunům barvy vyzařovaného světla. Druhý způsob využívá princip fosforescence luminoforů. Vhodným druhem luminoforu je ytrito-hlinitý granát, který se aktivuje cerem ( $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ ) a který je buzen světlem modré diody, anebo třípásmový luminofor buzený zářením ultrafialové diody. Bílé LED se dnes vyrábějí ve velmi širokém rozsahu náhradní teploty chromatičnosti. Od 2500 do 4000 K u teplých



odstínů a 5000 až 10 000 K u chladnějších odstínů. Dále do této skupiny patří laserové diody nebo elektroluminiscenční panely.[4]

#### **4.3.1 Studená bílá LED**

Světelný zdroj má teplotu chromatičnosti  $>5300$  K. Vyzářené světlo má namodralou, téměř až nafialovělou barvu, která působí velmi chladným dojmem a využívá se především k osvětlení velkých prostorů. [4]

#### **4.3.2 Teplá bílá LED**

Světelný zdroj s tímto označením má teplotu chromatičnosti  $<3300$  K a nejblíže se podobá žárovce. Světlo je mírně nažloutlé, a tak vyvolává příjemný pocit v místnosti. [4]

#### **4.3.3 Neutrálně bílá LED**

Světelný zdroj s ostrým světlem s teplotou chromatičnosti 3300-5300 K. Střední cesta mezi světelnými zdroji. Světlo je mírně namodralé. Je vhodné pro čtení.[4]

### **4.4 Výhody a nevýhody LED**

Výhody a nevýhody elektroluminiscenčních zdrojů se dají rozdělit do více podskupin. Jedná se například o elektrické a světelné parametry, kolorimetrické parametry, dále pak provozní, geometrické a vlastnosti z hlediska vlivu na životní prostředí. Je nutné si uvědomit, že LED světelné zdroje jsou fenoménem poslední doby a díky rozvoji nových technologií převládají názory spíše kladného rázu. K negativním vlastnostem lze snad říci pouze to, že tyto světelné zdroje jsou poměrně drahé a jejich hlavní parametry ovlivňují teplotu okolí. [4]

#### **a) Elektrické a světelné parametry**

- malé napájecí napětí nevyžaduje ochranu před nebezpečí dotykem. Nicméně zdroje, sestavené z jednotlivých diod se zabudovaným měničem a možností připojení přímo do sítě 230 V, musí vyhovět bezpečnostním požadavkům jako běžné elektrické spotřebiče,
- lze zapojit do série a dosáhnout vyšších hodnot světelného toku,
- energeticky úsporné osvětlení, napájení solárními články,
- plná stmívatelnost bez změny barvy,

- možnost dalšího zvyšování měrného výkonu až k hodnotám 160 – 200 lm/W, dnes běžně 50-70 lm/W.
- b) Kolorimetrické parametry
- lze vyrobit LED zářící v infračervené a ultrafialové oblasti,
  - výroba bílých LED s velmi dobrou účinností, s vysokým podáním barev a velká stupnice teplot chromatičnosti,
  - velký počet barev, většina se vyznačuje vysokou čistotou, jsou téměř monochromatické, což má velké využití zejména v signálních zařízeních. Lze získat teoreticky nekonečně velký počet barevných odstínů.
- c) Provozní parametry
- vysoká spolehlivost, extrémně dlouhá životnost. Jednotlivý výrobci uvádějí hodnoty mezi 60 až 100 tisíci hodin, při poklesu světelného toku o 30 až 40 %,
    - teplota okolního prostředí mezi -30 a + 60 °C,
    - možnost využití plastu k výrobě základních druhů díky nízkým povrchovým teplotám,
    - náklady spojené s údržbou a výměnou vadných zdrojů jsou nižší v porovnání s klasickými zdroji,
    - mechanicky odolná konstrukce, bez větších problémů snášejí otřesy a vibrace.
- d) Ostatní parametry
- nemají negativní vliv na životní prostředí, většina použitého materiálu je recyklovatelná,
  - zdroje neobsahují rtuť,
  - umožňují vytvářet velké množství kombinací nejrůznějších tvarů výkonů a rozměrů,
  - malé rozměry dovolují navrhovat zdroje s vysoce koncentrovaným svazkem světelné energie. [4]

#### **4.5 Obecné využití LED zdrojů**

Přestože princip světelných diod byl objeven již ve 20. letech minulého století a první použitelné diody se v praxi objevují od roku 1962, jejich největší rozvoj probíhá až poslední desetiletí. Společnosti, které se zabývají problematikou osvětlování, mají velká oddělení, která se každým dnem snaží posunout technické parametry LED osvětlení k novým rozměrům. Díky novým materiálům a zdokonalování technických postupů dochází k rozšíření sortimentu o další barvy vyzařovaného světla, ke zvýšení

účinnosti zdrojů a prodloužení životnosti a stability jejich světelných parametrů. Vzhledem k úplně odlišnému generování světla a zcela odlišné technologii se, na rozdíl od ostatních světelných zdrojů, vyrábějí ve firmách, které se zabývají výrobou polovodičových čipů. Hlavním faktorem, jenž provází výrobu diod, je cena základního krystalu polovodiče. Chemické složení krystalu má zásadní vliv na barvu světla. Teoretické možnosti zvýšení účinnosti přeměny elektrické energie na světelnou předurčují diody k obsazení všech významných míst v rámci světelných zdrojů.

Využití zdrojů lze opět rozdělit do malých podkapitol:

a) Venkovní osvětlení

- umístění osvětlovacích soustav blíže k vozovce, přináší významnou energetickou úsporu a omezení rušivého světla,
- ke zvýšení bezpečnosti silničního provozu, vyznačení okrajů vozovky, barevné označení jízdnic pruhů a pro dynamické řízení a operativní změny jízdnic pruhů s využitím svítidel zapuštěných do vozovky, lze je využít k instalaci na stožáry, jejichž výška a rozteč je obdobná se stávajícími konvenčními soustavami pouličního osvětlení,
- jsou součástí soustav v tunelech.

b) Signalizace

- vhodné použití pro dopravní značky v silniční a železniční dopravě, semaforey,
- využití pro palubní desky automobilů a dalších komponentů osvětlení automobilů, včetně vnějšího osvětlení,
- označení únikových cest v budovách,
- nahrazují žárovky s barevnými baňkami nebo barevnými filtry a dosahují až patnáctkrát větší účinnost.

c) Zdravotnictví

- dezinfekce pomocí UV záření,
- k vytvrzování hmot v zubařské technice,
- terapie vnitřních a kožních nemocí.

d) Osvětlování vnitřních prostor

- osvětlení exponátů v muzeích, zboží v obchodních centrech,
- osvětlení pracovní plochy,
- osvětlení budov, restaurací, nákupních center.

e) Zobrazovací technika a reklamní osvětlení

- velkoplošné obrazovky se speciálním uspořádáním základních barev s kvalitním, vysoce kontrastním a ostrým obrazem, s pozorovací vzdáleností od 7 metrů až do několika set metrů,
  - soustavy dynamického řízení počítačem s velkou možností změny barev a jasu, plnohodnotná náhrada svítících trubic.
- f) Ostatní využití
- kontrola bankovek UV zářením,
  - čtení čárových kódů,
  - optické myši u počítačů,
  - světelné zdroje ve vláknové optice,
  - prosvětlování displejů a klávesnic u mobilních telefonů,
  - dálkové ovládání průmyslového a bytového zařízení. [4]

#### **4.6 Optické metody měření světelně-technických veličin**

Za účelem zjišťování a ověřování parametrů světelně-technických přístrojů a zařízení, se využívají různé metody a měření. Využívají se především v oblasti světelných zdrojů, svítidel a osvětlovacích soustav. Jejich využití je velmi rozmanité a dá se rozdělit na metody, kdy se měří vybrané parametry a porovnávají se s hodnotami předpokládanými v uvedených doporučeních a normách či na metody, kdy jsou změny některých světelně-technických veličin sledovány v průběhu provozu jednotlivých zařízení, popřípadě se při fotometrických měřeních srovnávají parametry různých typů a konstrukčních řešení.

Podle účelu měření a požadavků na přesnost lze rozlišit měření na přesná, používána při tvorbě etalonů, provozní, která se využívají při běžném ověřování a porovnávání parametrů světelných zdrojů, a orientační, která slouží ke kontrole vybraných základních funkcí zařízení.

Metody měření veličin se dělí na vizuální a fyzikální. Vizuálními metodami lze dosáhnout poměrně velké přesnosti měření, ale měřicí přístroje, jako fotometr, jsou ve většině případů velice robustní a měření jsou časově náročná. Důležitým faktorem je zkušenost a praxe pozorovatele, výsledky ovlivňuje například kvalita zraku pozorovatele. Vizuální měření se tedy využívají pouze v laboratorních podmínkách. Nicméně i v těchto případech se dnes využívají fyzikální fotometry, pro přesný a objektivní výsledek. Pro ověřování parametrů světelně-technických výrobků se klade důraz především na rychlost a jednoduchost měření. Jejich přesnost může být menší než

u precizních laboratorních měření. Těmto požadavkům opět vyhovují pouze přenosné fyzikální fotometry. [4]

#### 4.7 Princip fotometrie

Fotometrie je součástí optiky, která se zabývá světlem a jeho účinky na lidský zrak. Pro vyjádření kvantity tohoto působení se používají fotometrické veličiny. Tyto veličiny jsou psychofyziologickou obdobou příslušných veličin, které jsou používány ve fyzice. Pro porozumění je tedy nutné zavést veličiny fotometrické **viz Tab. 1**. Důležitost těchto veličin je především v tom, že lidský zrak nehodnotí velikost určitého světelného vjemu úměrně s výkonem nebo energií, jimž byl vjem vyvolán. Jedná se o důsledek jednak různé citlivost buněk, které se nacházejí v sítnici k zařazení různých vlnových délek, a dále pak složitého psychofyziologického děje, jimž se světelný podnět mění v oku, optických nervových drahách a mozkové kůře v komplex nervových podráždění, jejichž výsledným subjektivním korelátem je zrakový vjem. Kvalitativní stránkou světelných vjemů, jež spojujeme s barvami, se věnuje kolorimetrie. [5]

Tab. 1 Přehled fotometrických veličin [4]

Světelný tok $\Phi$
Jednotka : Lumen. [lm]
Definice: Světelný tok vyjadřuje schopnost daného zářivého výkonu vyvolat u normálního fotometrického pozorovatele světelný vjem.
Svítivost I
Jednotka : Kandela. [cd]
Definice: Udává prostorovou hustotu světelného toku zdroje v různých směrech.
Osvětlení E
Jednotka : Lux. [lx]
Definice: Osvětlenost je měrná veličina světelného toku na osvětlované ploše, je určena diferenciálním podílem světelného toku a obsahu plochy, na niž tento tok dopadá.
Jas L
Jednotka : [cd · m <sup>-2</sup> ]
Definice: Je měrná veličina svítivosti plošného zdroje. Z hlediska lidského vidění je jas nejvýznamnější veličinou.
Světlení H

Jednotka : [ $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
Definice: Je ekvivalent osvětlení s tím rozdílem, že definuje světelný tok z plochy odražený.

#### 4.8 Princip kolorimetrie

Kolorimetrie se zabývá objektivním popisem fyzikálních korelátů při vnímání barev. Jedná se o optickou metodu, při které se porovnávají vzorky s předepsanými standardy. Světlo vnikající do lidského oka a vzbuzující barevný vjem se nazývá barevný podnět. Jeho barevná jakost tzv. chromatičnost, je určena spektrálním složením, to znamená podněty stejného spektrálního složení. Tomuto jevu se říká metametrie, podněty které jsou odlišného spektrálního složení, avšak působí tentýž barevný vjem, označujeme jako metamerní. Bezprostřední chromatičnost proto nevystihuje spektrální složení podnětu, protože nepřihlíží k metametrii. Proto je potřeba zavést zvláštní kolorimetrické soustavy, které nám umožní popsat barevnou jakost podnětu s ohledem na metametrii, to znamená, že stejným barevným vjemům náleží stejné hodnoty kolorimetrických veličin dané soustavy nezávisle na spektrálním složení podnětů. Problematikou barevného vidění se vědci zabývají již dlouho. Až na začátku 20. století přišli s metodou, při které jsou schopni přímého porovnání barevných světél s referenčním světlem. V roce 1931 mezinárodní komise pro osvětlení standardizovala kolorimetrickou soustavu CIE. Je založena na faktu, že libovolný barevný podnět lze sestavit metamerním podnětem, který se skládá ze směsi, která působí na totéž místo sítnice současně, tří vhodně zvolených, takzvaných měrných světél X, Y, Z. Určité množství těchto světél pak jednoznačně popisují chromatičnost podnětu a nazýváme je trichromatické složky. Tyto složky lze určit jednak měřením, dále pak výpočtem ze známého spektrálního složení podnětu. [5]

#### 4.9 Princip spektrometrie

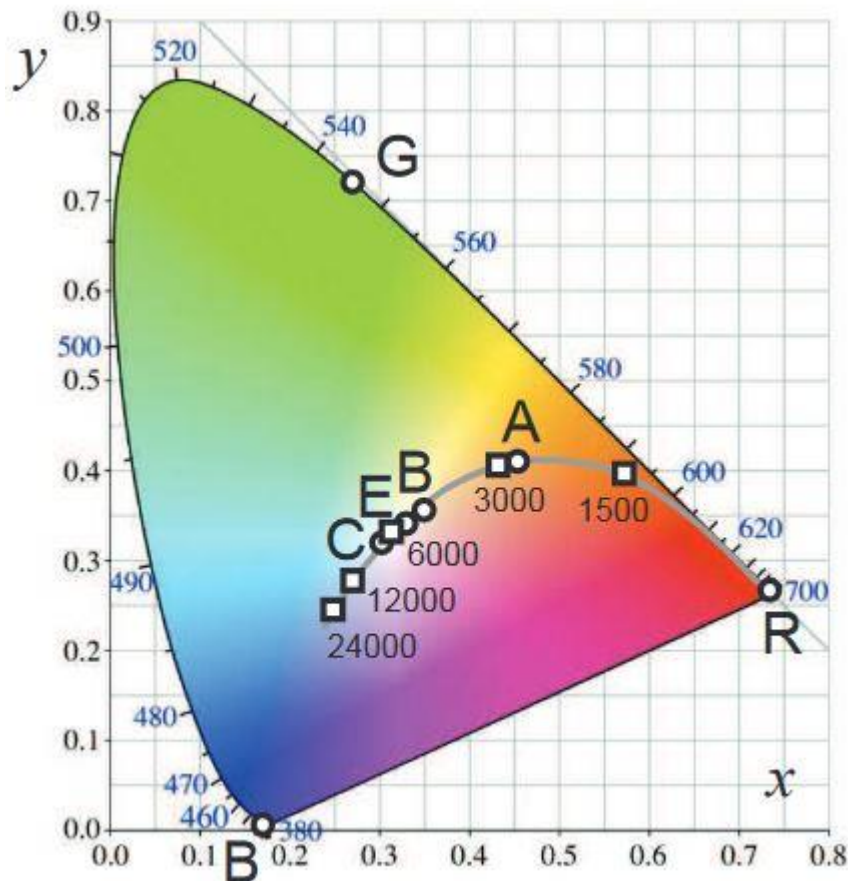
Využívá se při měření spektrálních vlastností materiálů. Ke zjištění těchto vlastností se typicky používají spektrofotometry. Součástí konstrukce spektrofotometru je monochromátor, který rozděluje bílé polychromatické světlo na pásy vlnových délek. Šířku pásu lze měnit pomocí štěrbin a rozlišením senzoru. Nejpoužívanější jsou lineární senzory, které obsahují minimálně 16, častěji však 32 nebo více fotodiód. Současné lineární senzory jsou založeny na CCD, CMOS snímačích, kde počet jednotlivých fotoelementů, neboli pixelů, jde až do několika tisíc. Reálné rozlišení je

však ovlivňováno počtem pixelů senzoru a šířkou šterbiny, ale také účinností monochromátoru. Nejčastěji se jako monochromátory používají ploché či konkávní difrakční mřížky. Možné je také použití sady interferenčních filtrů nebo optických hranolů. S tím úzce souvisí otázka ohledně rozsahu vizuálního spektra. CIE kolorimetrie uvažuje standardní rozmezí viditelné části elektromagnetického záření v rozsahu od 380 nm do 780 nm. Řada měření vizuálních odezev však začíná na 390 nm a končí na 830 nm. Charakteristickým příkladem může být tzv. fundamentální charakteristika CIE pozorovatele. Typicky se však můžeme setkat s užším rozsahem například 400 nm až 700 nm. Tento rozsah je používán z mnoha důvodů, jako jsou poměrné spektrální účinnosti receptoru, monochromátoru, použitého řešení optické soustavy. V takových případech je zapotřebí použít upravené tabulky poměrných spektrálních složení použitých světel a CIE standardních pozorovatelů. Ve většině případů je však spektrální rozsah 400 nm až 700 nm naprosto dostačující. V případě pochybností lze provést kontrolní měření na referenčním spektrofotometru s plným rozsahem. Z důvodu napodobení CIE osvětlení D65 dnešní spektrofotometry využívají světelné zdroje založené na zábleskových xenonových výbojkách. Výbojky se používají z důvodu dosažení vysokého indexu barevného podání. Vhodnou kombinací filtrů lze dosáhnout dobrého přiblížení poměrného spektrálního složení emitovaného světla rovněž v oblasti UV spektra. Dříve používané halogenové žárovky s konverzními filtry rovněž vykazují vysoký index barevného podání, avšak z důvodu nízkého podílu UV záření ve spektru, nejsou vhodné pro měření bělosti materiálů s obsahem zjasňujících prostředků. Z důvodu nízkého vybuzení je naměřená bělost také nízká. Využití LED je v současné době omezeno z důvodu spektrálního rozsahu. Aby byl dodržen požadovaný rozsah, je zapotřebí využít dvou a více světelných diod. [19]

#### **4.10 Diagram chromatičnosti**

S využitím trichromatických souřadnic lze výslednou chromatičnost vyjádřit bodem v rovinné soustavě souřadnic  $0\ xy$ . Množina všech těchto bodů se nazývá diagram chromatičnosti obr. 7. V diagramu lze vidět především křivku spektrálních světel, tím je myšlena množina chromatičnosti monochromatických světel, k jednotlivým bodům této křivky náleží příslušné vlnové délky. Body na okraji křivky jsou propojeny úsečkou čistých purpur, na níž leží chromatičnost světel, jež vznikají adičním míšením krajního fialového a krajního červeného světla s různými poměry. Uvnitř jsou takto ohraničené plochy chromatičnosti všech reálných podnětů. Šedivou křivkou je označená oblast

světla, jež může být považována za bílá světla. Čím více se bod vyjadřující chromatičnost určitého podnětu blíží této oblasti, to znamená, čím více je vzdálen od křivky spektrálních světel a úsečky čistých purpurů, tím se zmenšuje sytost a dochází k blednutí barvy. Největší možnou sytost mají tedy čisté purpury a světla spektrální. Vně od ohraničených ploch se nacházejí chromatičnosti myšlených světel, které nelze realizovat. [5]



Obr. 7 Barevný trojúhelník XYZ [5]

#### 4.10.1 Barevný prostor X Y Z

RGB barevný prostor, který byl předchůdcem prostoru XYZ, se skládá ze základních tří barev, červené, zelené a modré. Mezinárodní komise bere za primárně čisté barvy trojici, která má přesné vlnové délky 700 nm, 546,1 nm a 435,8 nm. Tento prostor byl odvozen z velké řady experimentů a dnes je znám jako CIE RGB. Systém však obsahoval řadu nového. Především obsahoval záporné hodnoty odvozených funkcí a bílá barva ležela příliš blízko okraji barevného pole, proto komise navrhla vhodnější systém CIE XYZ s trichromatickými členiteli spektrálních barev.[6]



#### **4.10.2 Barevný trojúhelník XYZ**

Barvy se v technických oborech znázorňují pomocí barevného trojúhelníku XYZ. Každé barvě pak náleží jeden bod se souřadnicemi (x,y) v tomto barevném trojúhelníku. Na podkovovitém okraji barevného trojúhelníku se nachází všechny spektrální barvy, uvnitř trojúhelníku se nachází barvy složené a také bílá E. Bílá barva musí mít stejné barevné souřadnice  $x = y = z = 1/3$ . [6]

### **5 Indexy barevného podání**

Tato kapitola se zabývá různými alternativními měřítky podání barev, pro posouzení různých světelných zdrojů. Mnohé z uvedených metod využívají algoritmu pro výpočet  $R_a$  a dochází v nich k obměně jednotlivých funkčních částí, jako jsou například přijatelnější barevné prostory, různé sady barevných vzorků nebo odlišný způsob výpočtu průměrování. Jiné metody algoritmus pouze doplňují za účelem jeho vylepšení. V dnešní době lze využít celou řadu různých metod. V následujících kapitolách jsou vybrány metody spojené s vyhodnocením praktické části práce.

#### **5.1 Index barevného podání $R_a$ (CRI)**

Tato metoda se zakládá na číselném vyjádření rozdílu vjemu barvy pro stanovené vzorky, které se osvětlují jak konvenčním tak nekonvenčním zdrojem světla. Výpočtem se stanoví všeobecný index podání barev s označením  $R_a$ , ve světě znám jako CRI (Color Rendering Index). Hodnota indexu podání barev  $R_a$  se stanovuje v rozmezí od 0 do 100. Nejvěrněji vnímané jsou barevné předměty osvětlené denním světlem a světlem z teplotních zdrojů jejich hodnota indexu podání se blíží k číslu 100. Metoda postupuje následně. 1) Výpočet zkušebního zdroje CCT. 2) Volba srovnávacího zdroje osvětlení. 3) Výpočet hodnot XYZ. 4) Přeměna souřadnic XYZ na barevné souřadnice u, v. 5) Přepočítání souřadnic u, v pod světlem zkušebním na souřadnice pod světlem referenčním. 6) Výpočet výsledného posunu barev. 7) Výpočet indexu podání barev CIE. [4]

#### **5.2 Color Quality Scale (CQS)**

Metoda je vyvíjena v národním normalizačním institutu standardů a technologie v USA. S hlavním zaměřením na vylepšení nedostatků CIE pro barevné podání. Na rozdíl

od CIE CRI, který využívá pouze podání nebo věrnost podání barev, CQS zaznamenává několik různých rozsahů kvality barvy a to včetně barevného podání, chromatické adaptace a volby pozorovatele. CQS metoda pracuje se zkušebním vzorkem stejným jako u CIE CRI. Barevné rozdíly jsou vypočítány na předem stanovené řadě reflexních vzorků při osvětlení testovaným zdrojem světla a zdrojem referenčním. Referenční světlo se vybírá stejně jako u CIE CRI. Žádný z osmi vybraných vzorků použitých při výpočtu CIE CRI není vysoce nasycený. Zatímco patnáct Munsellových vzorků, použitých při metodě CQS, má vysokou sytost odstínu. Metoda pro svůj popis také vyměnila zastaralý barevný prostor CIEUVW z roku 1964 za modernější barevný prostor CIELAB, který je v dnešní době doporučován úřady CIE. Chromatická adaptace využívaná při metodě CIE CRI se v dnešní době považuje za zastaralou a neaktualizovanou verzi, proto se u metody CQS využívá jiná s označením CMCCAT2000, tato chromatická transformace je více aktuální a přesnější. Ukázalo se, že dokáže poskytnout výsledky daleko srovnatelnější v souladu s lidským zrakem. Dalším z důležitých vlivů při výpočtu v CQS je faktor nasycení. CIE CRI je ryze věrná metrickému postihu. Všechny posuny u vnímaného objektu v závislosti na barevném odstínu a sytosti jsou čistě metricky znevýhodněny. Nicméně zvýšení sytosti po tak dlouhou dobu dokud není nadměrné, napomáhá ke zlepšení vizuální jasnosti a ke zlepšení vnímání jasu, což lze obecně považovat za výhodu. V CQS zvyšování sytosti není závadou, ale nenapomáhá ke zlepšení vnímání jasu. Celkový postup lze popsat následujícími kroky. 1) Výpočet barevného rozdílu a rozdílu chromatičnosti. 2) Aplikování saturačního faktoru. 3) Výpočet rozptylu rozdílu barev. 4) Změna měřítka. 5) Změna na stupnici 0-100. 6) Aplikování CCT faktoru. 7) Výpočet obecné barevné stupnice kvality (Qa). [11]

### **5.3 CRI CAM02UCS index podání barev**

C. Li a M. R. Luo jsou tvůrci tohoto indexu barevného podání. Zmíněná metrická metoda je založena na předpokladu kolísání barevného vzhledu zkušebních vzorků při osvětlení zkušebním a referenčním zdrojem světla. Základní výpočty jsou stejné jako u CIE CRI, ale jsou založeny na jiném barevném prostoru a to CAM02-UCS, který obsahuje spolehlivé chromatické přizpůsobení. Referenční osvětlení je stejné jako u metody CIE CRI.

CAM02-UCS je výkonný nástroj pro přesnou předpověď údajů o barevném vzhledu a barevném rozdílu. Z pokusu se zjistilo, že výpočet barevného rozdílu v barevném

prostoru CAM02-UCS má za příčinu lepší korelaci vizuálních výsledků než u předchozích prostorů. Barevný rozdíl u rovnice CRI CAM02-UCS je rovnocenný pro posuny v osvětlení, barevnosti a odstínu zkušebních vzorků mezi testovaným a referenčním zdrojem světla. Výzkum se provádí s větším počtem testovaných vzorků. Metoda se skládá z následujících kroků. 1) Výpočet barevných souřadnic ze SPD zkušebního zdroje a získání CCT zkušebního zdroje z kolorimetrických souřadnic. 2) Výběr referenčního osvětlování podle daných omezení. 3) Výpočet hodnot XYZ pro každý zkoušený vzorek v rámci testování referenčním a zkušebním zdrojem. 4) Výpočet CIE-CAM02 barevného vzhledu vzorku za dodržení daných atributů. 5) Výpočet rozdílu barev pro každý testovaný vzorek s použitím CAM02-UCS daný barevným rozdílem vzorků. 6) Stanovení CRI-CAM02-UCS index podání barev. [8]

#### **5.4 Rank order Color Rendering Index (RCRI)**

Jedná se o experimentální měřítko, které předpovídá vzhled barevného pořadí stanovené podle světelných zdrojů. Známy je také jako index podání barev na bázi pořadové stupnice. Na základě řady psychofyzických experimentů předpovídá vizuální hodnocení vnímaných barevných rozdílů mezi sadou 17 barevných vzorků, osvětlených světlem referenčním a světlem testovaným. Vyhodnocení pak probíhá na pětistupňové stupnici R od 1 do 5, kde 1 je známka nejlepší a 5 nejhorší. Referenční svítidla jsou stanovena stejnou metodou jako u metriky vykreslování barev CIE. Rozdíly barev se počítají stejně jako u CAM02UCS barevného rozdílu. [9]

#### **5.5 Memory Color Quality metric (MCRI) $S_a$**

Kvalita barev je hodnocena jako obecný stupeň podobnosti u sady deseti známých objektů pod testovacím světelným zdrojem. Podobnost každého objektu v rámci zkušebního zdroje s jeho barevnou pamětí se vypočítá pomocí rozdělení podobností získaných z řady psychofyzických experimentů. Za prvé, pro tři hodnoty stimulů všech objektů pod zdrojem světla. Počítají se pomocí spektrální odrazivosti objektů a standardního pozorovatele CIE 10°. Za druhé, jsou hodnoty vypočteny podle D65, pro bílý bod IPT s transformací chromatické adaptace CAT02. Za třetí, jsou odpovídající hodnoty transformovány na IPT kolorimetrické souřadnice  $X = (P_i, T_i)$ . Za čtvrté, jsou hodnoty vypočítané s odpovídající distribucí z analogového objektu  $X_i$ , což v sadě  $S_i$  deseti hodnot popisují stupně podobnosti u každého objektu s barevnou pamětí. [10]

## **5.6 Felling of Contrast color rendering Index (FCI)**

FCI je index podání barev, který pracuje s pocitem světelného kontrastu. Myšlenkou je, že světelný zdroj, který zvyšuje pocit zabarvení objektů, rovněž zvyšuje sytost barevných objektů. Nasycení nebo vylepšení sytosti je obecně považováno za pozitivní rys v mnoha aplikacích osvětlení. Metrika FCI odhaduje pocit kontrastu v závislosti na oblasti gamut CIELAB odpovídajících barev čtyř speciálně vybraných vysoce chromatických vzorků (červená: 5R4/12; žlutá: 5Y8.2/10; zelená: 5.5G5/8 a modrá: 4.5PB3.2/6) pod testovaným zdrojem světla (GA testsource) a CIELAB gamut prostoru pod srovnávacím světlem D65, (GA D65). [11]

## **5.7 Color Harmony Rendering Index**

Barevná harmonie je jedním z důležitých aspektů barevného vzhledu. Jedná se o pozorovatelnou vlastnost, kterou je třeba posuzovat při určování kvality barevného světelného zdroje. Index podání barev harmonie popisuje, jak silný zdroj světla narušuje harmonii barev v prostředí. Problematika barevné harmonie nevykresluje jednotlivé barevné rozdíly, ale vykresluje celkový vzhled všech barev v zorném poli v rámci testovaného a referenčního světelného zdroje. Někteří vědci definují barevnou harmonii jako příjemný pocit, který propojuje soulad s emocemi, jenž vytváří barvy v sousedních oblastech. Vědci vytvořili kvantitativní model pro dvoubarevné kombinace založené na chromatičnosti, světlosti a efektu odstínu, který aditivně vytváří dvoubarevný harmonický model. [12]

## **5.8 Categorical Color Rendering Index (CCRI)**

CCRI je založena na kategorickém názvu barvy a používá barevný vzhled modelu CIECAM97. Dává přednost právě barevné kategorizaci před hodnocením barevných rozdílů světelných zdrojů. CCRI měří, zda pozorovaná barva pod testovaným zdrojem spadá do stejné kategorie, jako při osvětlení zdrojem referenčním. Pro výpočet kategorického indexu podání barev byl prováděn experiment se čtyřmi předměty, 292 Munsellovými vzorky a čtrnácti světelnými zdroji. Mezi čtrnácti testovanými světelnými zdroji bylo využito osm zářivek, pět vysoce intenzivních výbojek a žárovka. Pokus spočíval v třídění barevných vzorků do jedenácti základních, barevných kategorií pod každým světlem. Tyto barevné kategorie jsou červená, zelená, žlutá, modrá,

oranžová, růžová, fialová, hnědá, bílá, šedá a černá. Třídění vzorků se pro každý subjekt pod každým zdrojem třikrát opakuje.[22]

### **5.9 Gamut Area Index (GAI)**

GAI je založen na práci zabývající se sytostí a diskriminací barevného odstínu. Myšlenka je v podstatě totožná jako u FCI metriky. Zvýšení sytosti barevných objektů nebo zvýšení barevné diskriminace má obecně pozitivní vliv na kvalitu vnímaných barev. Namísto čtyř vysoce chromatických vzorků používá GAI osm Munsellových vzorků použitých při výpočtu CIE  $R_a$  hodnot. Výpočty jsou prováděny v CIE 1976  $u', v'$  barevném prostoru se stejnou energetickou stimulací, jenž je vybrána stejně jako u referenčního osvětlení.[17]

### **5.10 Flattery Index (FI)**

FI index byl navržen v roce 1967 k doplnění CIE CRI kvůli obavám, že zdroje světla v CIE CRI nedostatečně korelují s veřejným výběrem pro všeobecné osvětlování. Flattery Index je založen na subjektivním pocitu a barevné paměti. Lidé si spíše pamatují barvu známých předmětů, které jsou svěží a nasycené. Na základě této barevné paměti pak lidé upřednostňují jednotlivé barvy. Jako příklad lze uvést zelené listy nebo trávu, u kterých preferujeme zelenou barvu bez zabarvení i když tomu tak ve skutečnosti není. Flattery Index vyhodnocuje, do jaké míry světelné zdroje zobrazují objekty více příjemně či nikoliv. Základ indexu je podobný jako u CIE CRI kromě toho, že cílové barvy nebyly pravé, barevné vzorky, ale místo toho byly preferované barevné vzorky zobrazené pod standardním referenčním zdrojem. Využívá 10 ze 14 Munsellových vzorků. FI nemá zacházet se všemi posuny všech barevných vzorků stejně. Místo toho má na základě psychologických studií zacházet s jednotlivými posuny odděleně. Celkový objem všech barevných vzorků je rozdělen na třetiny. Jedna třetina je věnována lidské pokožce, další třetina celkového objemu je barva potravin a zbývající část je rozdělena rovným dílem mezi šest textových vzorků.[13, 18]

### **5.11 Color Preference Index (CPI)**

CPI je velmi podobný FI pouze s několika rozdíly. Za prvé, je použito pouze prvních 8 Munsellových vzorků. Za druhé, je zachována původní velikost barevného posunu. Za

třetí, všechny vzorky mají stejnou váhu. Za čtvrté, maximální skóre světelného zdroje je 156 a osvětlení D65 má hodnotu 100. [14]

### **5.12 Color Discrimination Index (CDI)**

Barevná rozlišnost osvětlovacích prostředků je míra v rozsahu, v němž osvětlení umožňuje pozorovateli rozlišovat mezi velkým množstvím barevných objektů při současném prohlížení. Jsou známy určité vizuální úkoly, u kterých je vyžadováno snadné rozlišení mezi barvami. Odlišit červené auto na parkovišti, které je osvětlené rtuťovou výbojkou a kouli na kulečnickovém stole, která je osvětlena zdrojem složeným z jedné čisté barvy může být velmi obtížné, proto je žádoucí pro tyto a podobné úkoly poskytnout pozorovateli světelný zdroj s maximální schopností barevného rozlišení. Vnímání barevného rozdílu je zásadní při barevném rozlišování. CDI má nastavenou hodnotu referenčního zdroje CIE C na hodnotu 100, je však možné nastavit hodnotu vyšší. CDI je úměrný gamutu oblasti ohraničeným osmi zkušebními vzorky použitých při výpočtu CIE CRI z roku 1960 CIE UCS diagramu. Světelné zdroje s malou plochou gamutu mají špatnou schopnost rozlišování barev, zatímco světelné zdroje, které mají větší rozsah barevné plochy, mají tuto schopnost lepší. Barevné rozlišení osvětlovacích prostředků závisí na průměrném kontrastu barev mezi sousedními objekty v zorném poli a barevném vnímání. [15]

### **5.13 Cone Surface Area (CSA)**

Tato metrika kombinuje měřítka gamutu oblasti prvních osmi testovaných vzorků CIE CRI se zdrojem chromatičnosti v diagramu chromatičnosti CIE 1976  $u' v'$ . Plocha povrchu barevného kužele se základní plochou o stejné velikosti jako osmiboký gamut oblasti prvních osmi testovaných vzorků CIE CRI vykreslených v diagramu CIE 1976  $u' v'$  a výškou rovnou  $w'$  stejného barevného prostoru. [16]

### **5.14 Full Spectrum Index (FSI)**

FSI je matematická konstrukce toho, jak moc se spektrum světelného zdroje odchyluje od stejného energetického spektra. Jedná se o imaginární spektrum, které poskytuje stejný zářivý výkon při všech vlnových délkách, což představuje plné spektrum. Pokud chce člověk vnímat barevnost objektů, zdroj světla musí generovat více než jednu oblast viditelného spektra. Jemné rozdíly ve vnímání barevných objektů

vznikají z malých rozdílů ve spektrální odrazivosti těchto objektů. V případě, že světelný zdroj neposkytuje energii na těchto vlnových délkách, spektrální odrazivosti těchto objektů se mírně liší. Objekty pak působí dojemem, že mají stejnou barvu. Proto se předpokládá, že by zdroj, který vyzařuje zářivý výkon všech viditelných vlnových délek, měl mít dobré vykreslování barevných vlastností. Světelné zdroje s nedostatky v některých částech spektra budou mít horší hodnoty FSI a budou méně účinné při vykreslení jemných rozdílů u barevných objektů.[23]

## **Praktická část**

Tato část bakalářské práce navazuje na poznatky z teoretické části. Pokusy provedené v rámci práce jsou uspořádány do jednotlivých podkapitol. Technika použitá při provádění pokusů je popsána samostatně a dále už je pouze odkazováno na jednotlivé přístroje. Při provádění měření byla využita řada standardizovaných vzorků, které tvoří samostatnou podkapitolu. Zde je kladen důraz především na grafické znázornění. Podkapitoly jsou doplněny specifikačními tabulkami a fotografiemi přístrojů.

## **6 Použité přístroje**

### **Koloristické skříně**

Jsou jedním z nejpoužívanějších přístrojů v oboru kolorimetrie, především pak u vizuálního hodnocení barevných předloh a barevných rozdílů. Slouží k dodržení standardních podmínek osvětlování a pozorování. V praxi se lze setkat s dvojím provedením, a to se soustavou svítidel pevně montovaných k samotné skříně, případně pak se svítidly volně zavěšenými bez okolních stěn. Stejně jako jiné měřicí přístroje musí splňovat řadu podmínek. Nejzákladnější podmínkou je barevná neutrálnost vnitřní plochy pro hodnocení. Na tuto podmínku je potřebné dohlédnout především při použití závěsného systému svítidel. Současní výrobci obvykle používají světle šedé pozadí označené N7, podle Munsellova atlasu barev. Lze se ovšem setkat i se skříněmi dřívější výroby, ve kterých bylo použito pozadí blízké neutrální šedé. V koloristických skříních jsou využity světelné zdroje, které mají zajistit simulaci osvětlení podle CIE. Tyto světelné zdroje musí taktéž splňovat několik podmínek. Jednou z nich je dodržení osvětlenosti. Pro většinu odstínů je doporučeno rozmezí mezi 900-1700 lx. Z důvodů dodržování předepsaných norem jako například ASTM D1729, lze v určitých případech upravit hodnotu osvětlení. V případě hodnocení světlých až bílých odstínů lze použít osvětlenost 540 lx. Naopak při hodnocení tmavých odstínů lze použít až 2150 lx. Další důležitou podmínkou je umístění skříně do prostorů s možností regulace okolního světla. Nejideálnější je umístění do tmavé místnosti, případně pak okolo skříně umístit



zástěny tak, aby byl vliv okolního osvětlování eliminován. V následujících pokusech byly využity skříně Spectralight III, AT color, ICS – Texicon s úpravou pro použití LED světelných zdrojů.[19]



Obr. 8 Koloristické skříně, 1 - AT color, 2 - ICS – Texicon upravená pro použití s LED světelnými zdroji.



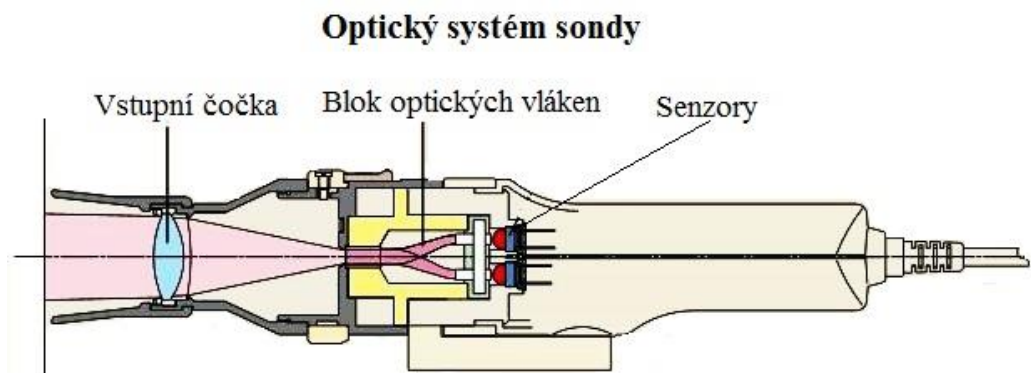
Obr. 9 Koloristická skříň, Spectralight III.

### **Analyzátor barev Konica-Minolta CA-210 s měřicí sondou CA-PU12**

Display color analyzer CA-210 je referenční nástroj pro měření barevných vlastností zobrazovacích zařízení. Nástroj je vybaven LCD & TFT displeji. Skládá se ze základního přístroje a připojené externí sondy CA-PU12/15, která je připojená optickým kabelem. Optický systém sondy se skládá ze vstupní čočky, bloku optických vláken a senzoru. Světlo vchází do optického systému objektivem a dále pak pokračuje k bloku optických vláken. Vlákná rozdělí světelný signál na 3 části, které jsou pak vedeny k přijímací oblasti snímačů x, y, z. Zde je světlo dále zaměřeno pomocí čočky umístěné na čipu a rozvedeno do samotných senzorů. Rychlost měření až 20krát/s umožňuje vyšší produktivitu s možností měřit současně až 5 bodů najednou. Nový model umožňuje měření jasu až do řádu  $0,1 \text{ cd.m}^{-2}$ . [20]



Obr. 10 Sonda CA-PU12 s doplněným popisem. 1 - polohovací kroužek, 2 - zarážka, 3 - otvor pro uchycení šroubu ke stativu, 4 - standardní clona proti vstupu světla, 5 - propojovací konektor



Obr. 11 Schéma optické sondy CA-PU12 s doplněným popisem.[20]



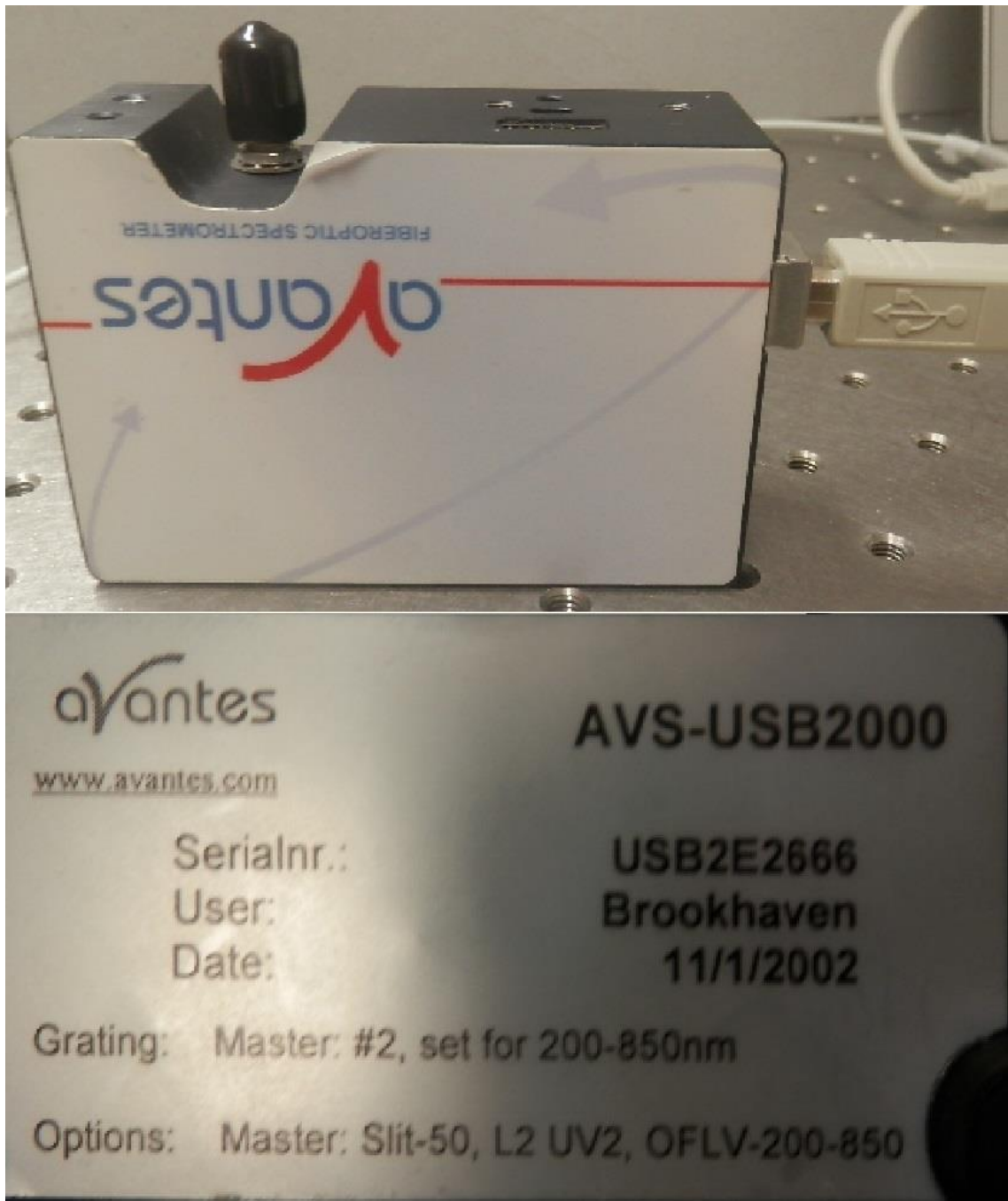
Obr. 12 Fotografie Analyzátoru Konica-Minolta CA-210 s popisem. 1 – přepínač pro vypnutí/zapnutí 2 – digitální displej 3 – LCD displej 4 – tlačítko pro počáteční kalibraci 5 – tlačítka pro změnu funkcí analyzátoru 6 – tlačítkový panel.

### Spektrometr USB 2000+

Miniaturní spektrometr Fiber optic USB 2000+ od firmy Ocean Optic je díky kombinaci technologií jedním z nejmodernějších přenosných spektrometrů na trhu. Obsahuje 2 MHz analogově digitální převodník (A/D), programovatelnou elektroniku, detektor Sony s 2048 prvky CCD a vysokorychlostní port USB 2.0. Díky této kombinaci lze zachytit a uložit do paměti 1000 měřených spekter za sekundu. Spektrometr je také využitelný při jiných aplikacích, například v chemii nebo biochemii, ve které je zapotřebí monitorovat rychlé reakce v krátkém čase. Při připojení spektrometru k počítači lze provádět samostatné napájení přes rozhraní USB 2.0., což eliminuje potřebu externího napájení. Spektrometr je kompatibilní se softwarem Ocean View, který funguje na všech operačních systémech.[21]

Tab. 2 Technická dokumentace

<b>Spektrometr AVANTES AVS-USB2000</b>	
Rozměry	89.1mm x 63.3mm x 34.4mm
Hmotnost	190 g
<b>DETEKTOR</b>	
Detektor	Sony ILX511B 2048 CCD
Rozsah detektoru	200-1100 nm
Pixely	2048 pixelů
Integrační čas	1ms – 65 s



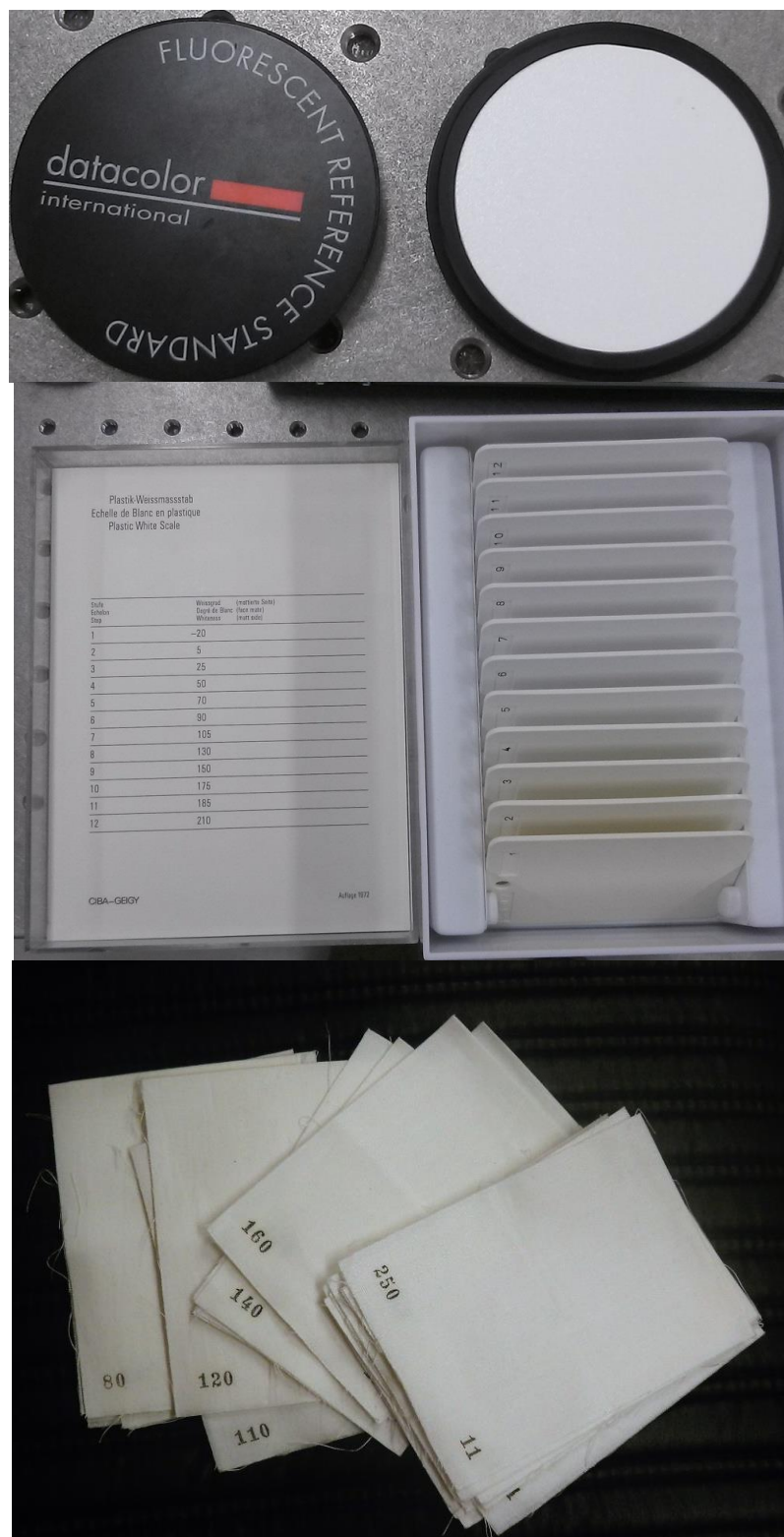
Obr. 13 Spektrometr AVANTES AVS-USB2000

## 7 Použité standardy

Barevné standardy jsou nedílnou součástí všech výzkumných laboratoří. Využívají se například ke kalibraci přístrojů nebo pro vyhodnocení jiných měření. Nejedná se o velké předměty, a tak jsou dobře skladné a přenosné. Pro jejich používání platí několik pravidel. Nejdůležitějším z nich je jejich stav. Pokud je některý ze vzorků poškozen prasknutím, poškrábáním nebo zlomením, není možné jej dále používat. Proto s nimi musíme manipulovat nanejvýš opatrně. V dnešní době je barevných standardů nepřeberné množství. Jako příklady lze uvést keramické kachle, opálové sklo, plastové terčíky nebo látkové čtverce. Standardy použité v této bakalářské práci lze vidět na následujících obrázcích.



Obr. 14 Ukázka kalibračního standardu, Datacolor SN 355.



Obr. 15 Ukázka kalibračních standardů. 1 - Datacolor fluorescent reference standard 2 - plastická stupnice bělosti CIBA 3 - hadrová stupnice bělosti.

## 8 Jednoduchá spektroskopie

### 8.1 Popis metody

Principem spektroskopie je charakterizování světelného zdroje pomocí spekter. Seřazením vlnových délek určitého zdroje a zjištěním intenzity záření na jednotlivých vlnových délkách dostaneme elektromagnetické spektrum příslušného zdroje.

### 8.2 Popis měření

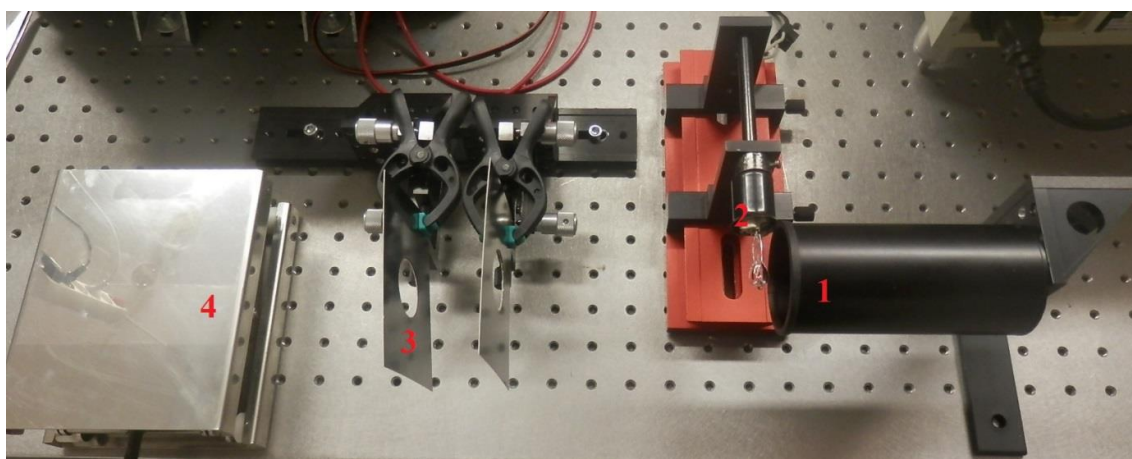
V rámci příprav tohoto měření musela být nejdříve sestavena měřící soustava. Sestávala ze stojanu s referenční halogenovou žárovkou, dvou černých, papírových stínících štítků s vyřezaným otvorem o průměru 30 mm připevněných v řadě za sebou. Stínítka zde byla z důvodu zamezení rozptylu světla před kosinovým konektorem snímače. Poslední částí sestavy byl stojan pro snímač. Důraz byl kladen na dodržení stejných výšek všech částí sestavy z důvodu čistého průchodu světelného signálu. Po provedení prvních měření dále došlo k celkovému odstínění prostoru kolem sestavy z důvodu odstranění světelného šumu odraženého od okolí. Provedení zastínění je viditelné na obrázku 15. Dalším krokem bylo propojení senzoru s počítačem, kde byl použit program od firmy Ocean Optic s názvem Ocean View. Po kalibraci s pomocí halogenové žárovky se senzor postupně přesunul do koloristických skříní, kde bylo provedeno měření jednotlivých světelných zdrojů.

### 8.3 Postup měření

- 1) Sestavení měřící soustavy podle výše zmíněného návodu.
- 2) Pomocí programu Ocean View došlo k propojení senzoru a počítače. Po spuštění programu se vybere požadovaná aplikace spektroskopie, v mém případě jednoduchá spektroskopie.
- 3) Dále se zvolí program měření relativního ozáření (relative irradiance) a nastaví se integrační čas.
- 4) Následuje kalibrace senzoru pomocí referenční halogenové žárovky na světlo a tmu. Jakmile je zdroj připraven, stiskem tlačítka dojde k uložení referenčního spektra pro dané podmínky.
- 5) V dalším kroku zvolíme teplotu referenčního zdroje, v mém případě 2800 K.



- 6) Na obrazovce se zobrazí výsledný signál, u kterého je nutné specifikovat prvky ukládání signálu.
- 7) Nastaví se místo uložení, doba mezi jednotlivými skeny, pojmenuje se měřený vzorek a určí se maximální počet skenů.
- 8) Nastavení se potvrdí a spustí se ukládání skenů.
- 9) Uložené skeny jsou pak ve formě textového souboru, se kterým se dále pracuje.
- 10) Celý proces se poté opakoval pro jiné světelné zdroje a senzory, které jsou zmíněny v seznamu použité techniky.



Obr. 16 Měřicí soustava před odstíněním. 1 - stínění proti úniku světla do prostoru 2 - stojan s halogenovou žárovkou 3 - stínící štítky s otvory 4 - stojan na senzor.



Obr. 17 Sestava po odstínění.

## **8.4 Použitá technologie**

### **1) Použité přístroje**

Spektrometr USB 2000+

### **2) Koloristické skříně**

Spectralight III

AT color

ICS – Texicon s úpravou pro použití LED světelných zdrojů

### **3) Software**

OceanView.Ink

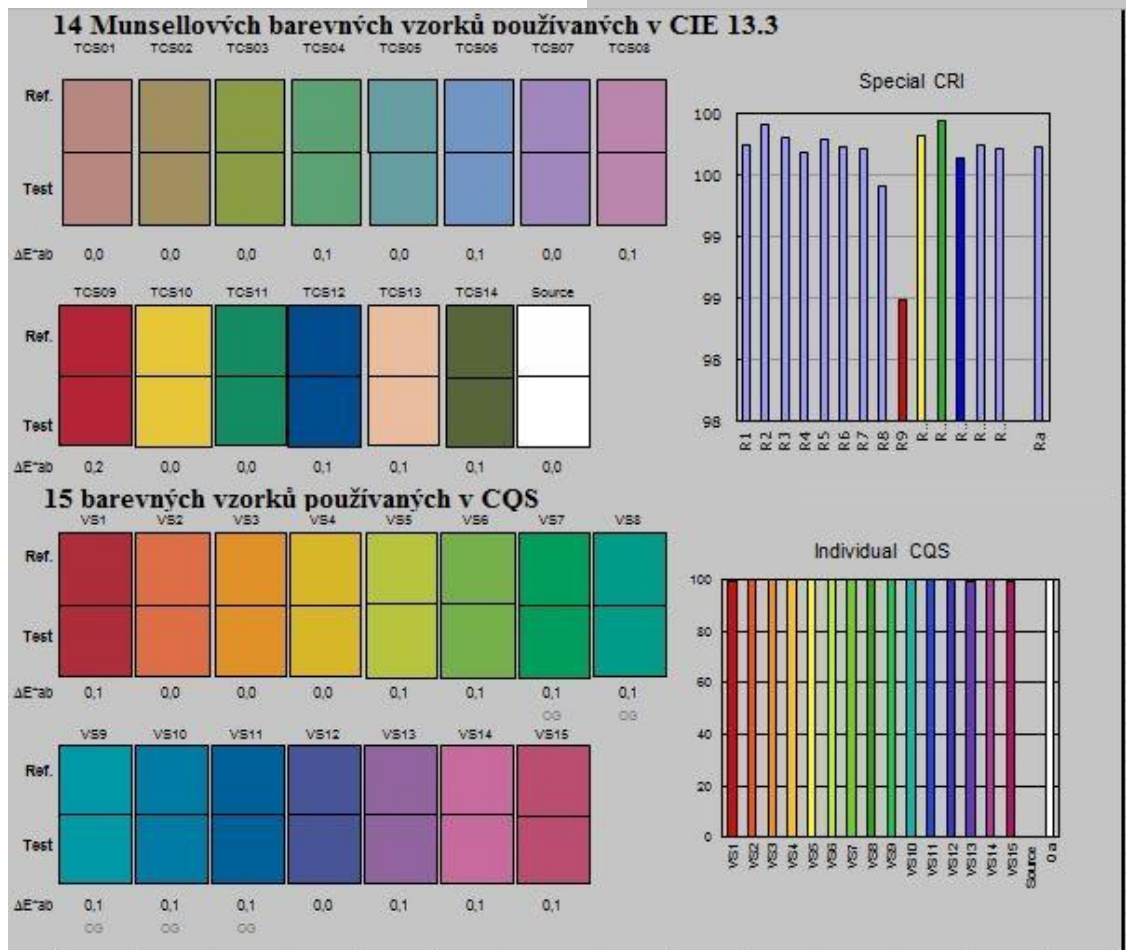
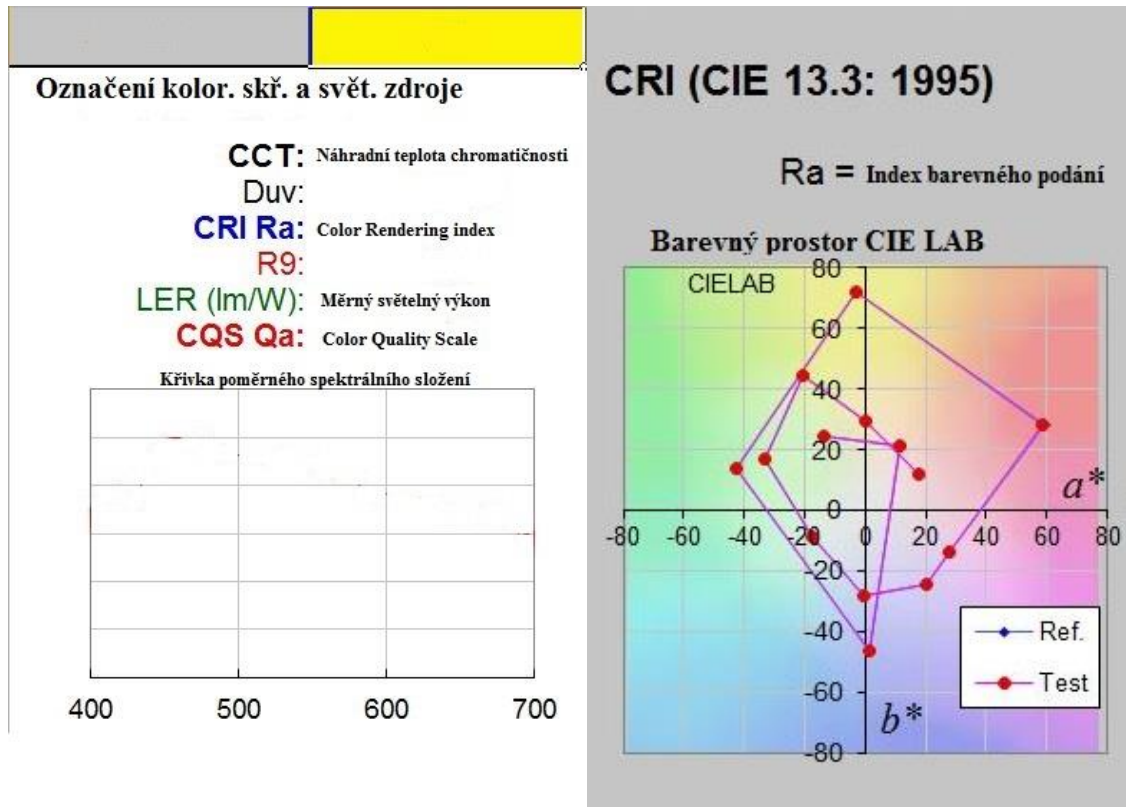
### **4) Další přístroje**

Fotoaparát Olympus SZ -14

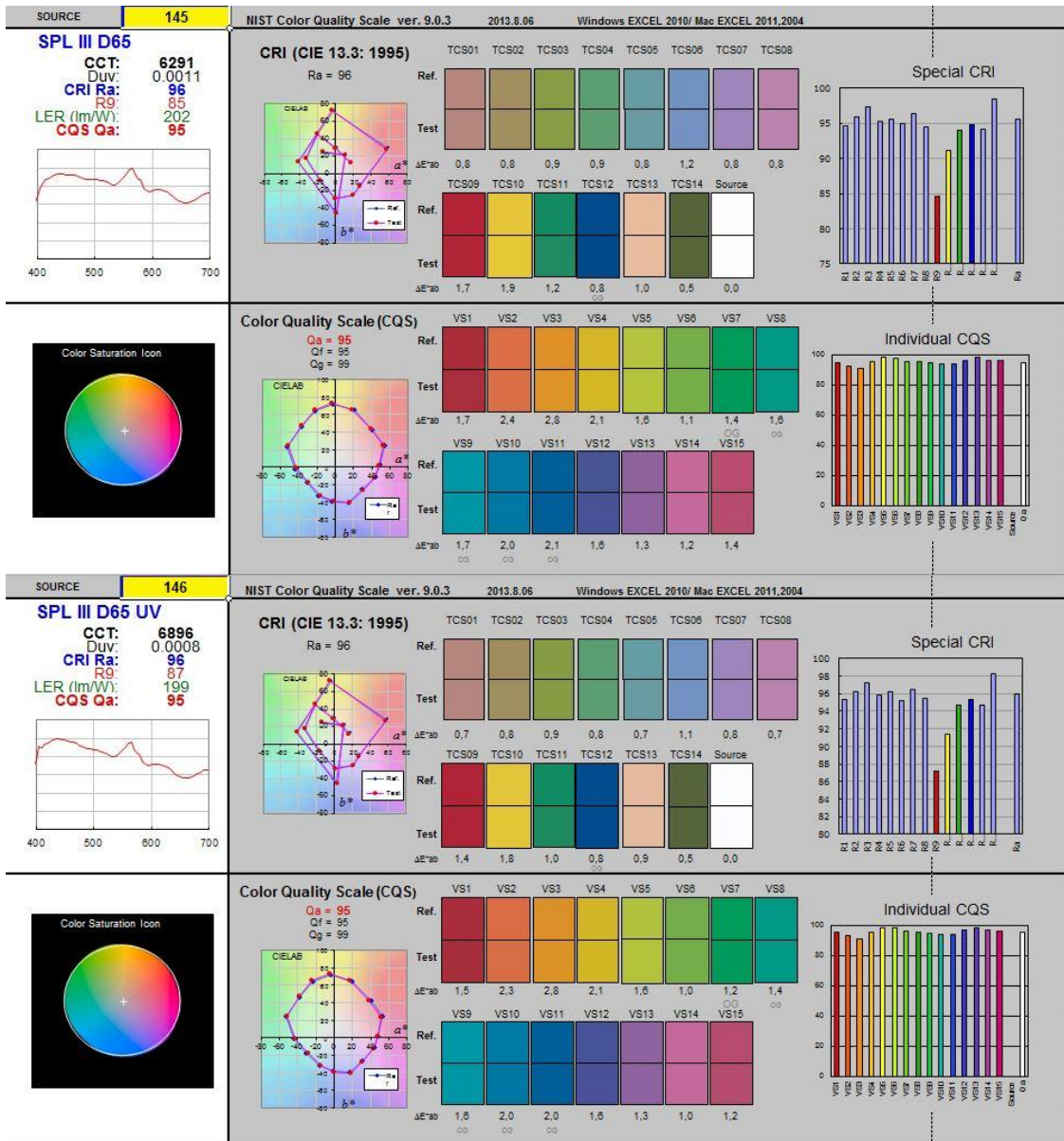
Notebook Apple MacBook Air

## **8.5 Vyhodnocení měření**

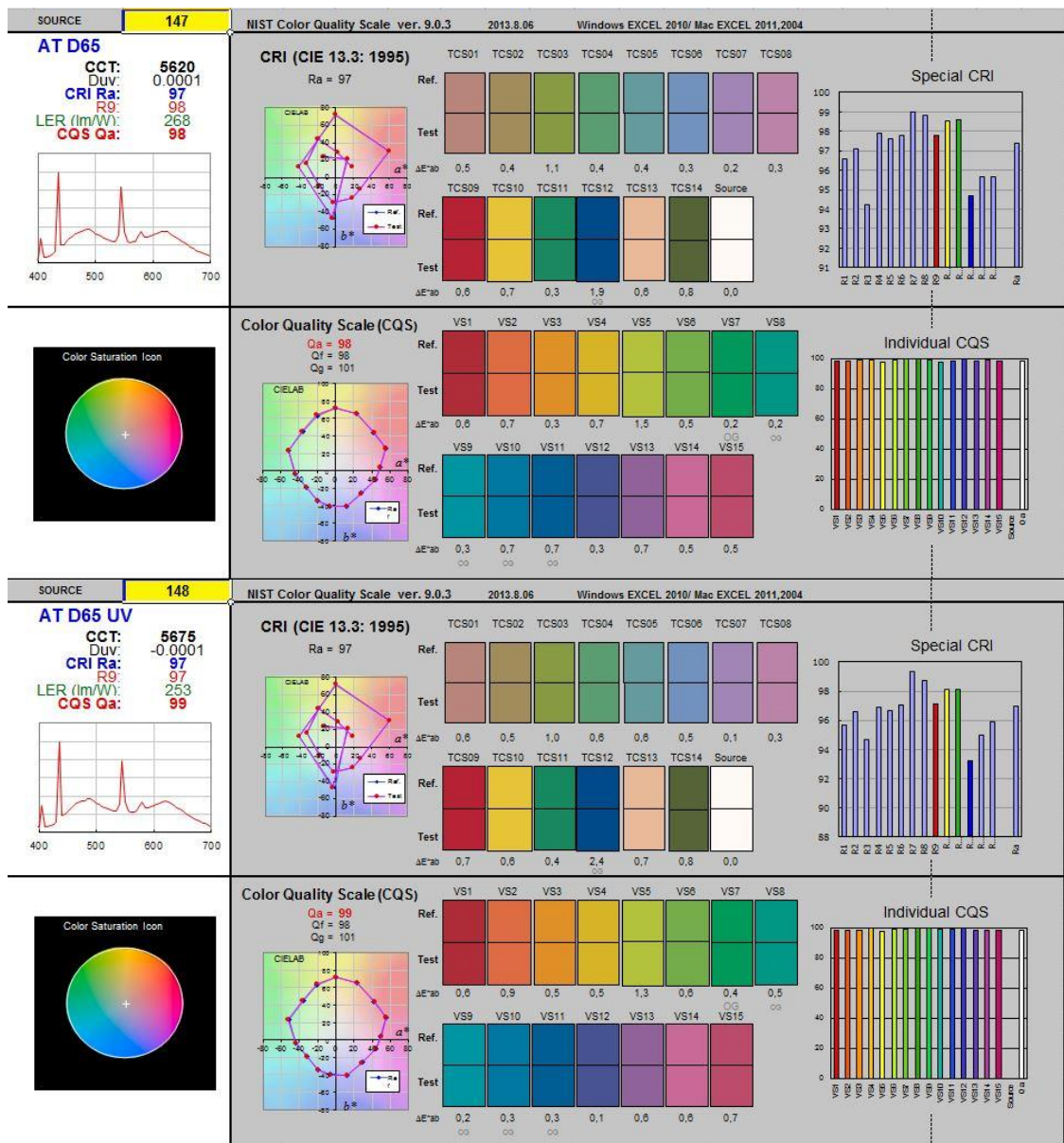
Hodnoty naměřené v programu Ocean View pro jednotlivé zdroje se uložily do textových souborů, se kterými se dále pracovalo. Nejprve se data nahrála do souboru KONVERTOR USB2000, kde došlo k jejich zprůměrování a dále k přepočtu na 1 nm hodnoty a 5 nm hodnoty. Yoshi Ohno a Wendy Davis z NIST stojí za vznikem tabulkového programu, do kterého se dále nahrála 5 nm data. Program se jmenuje CQS version 9.0.3. Výstupy pro jednotlivé světelné zdroje jsou zobrazeny na následujících obrázcích.



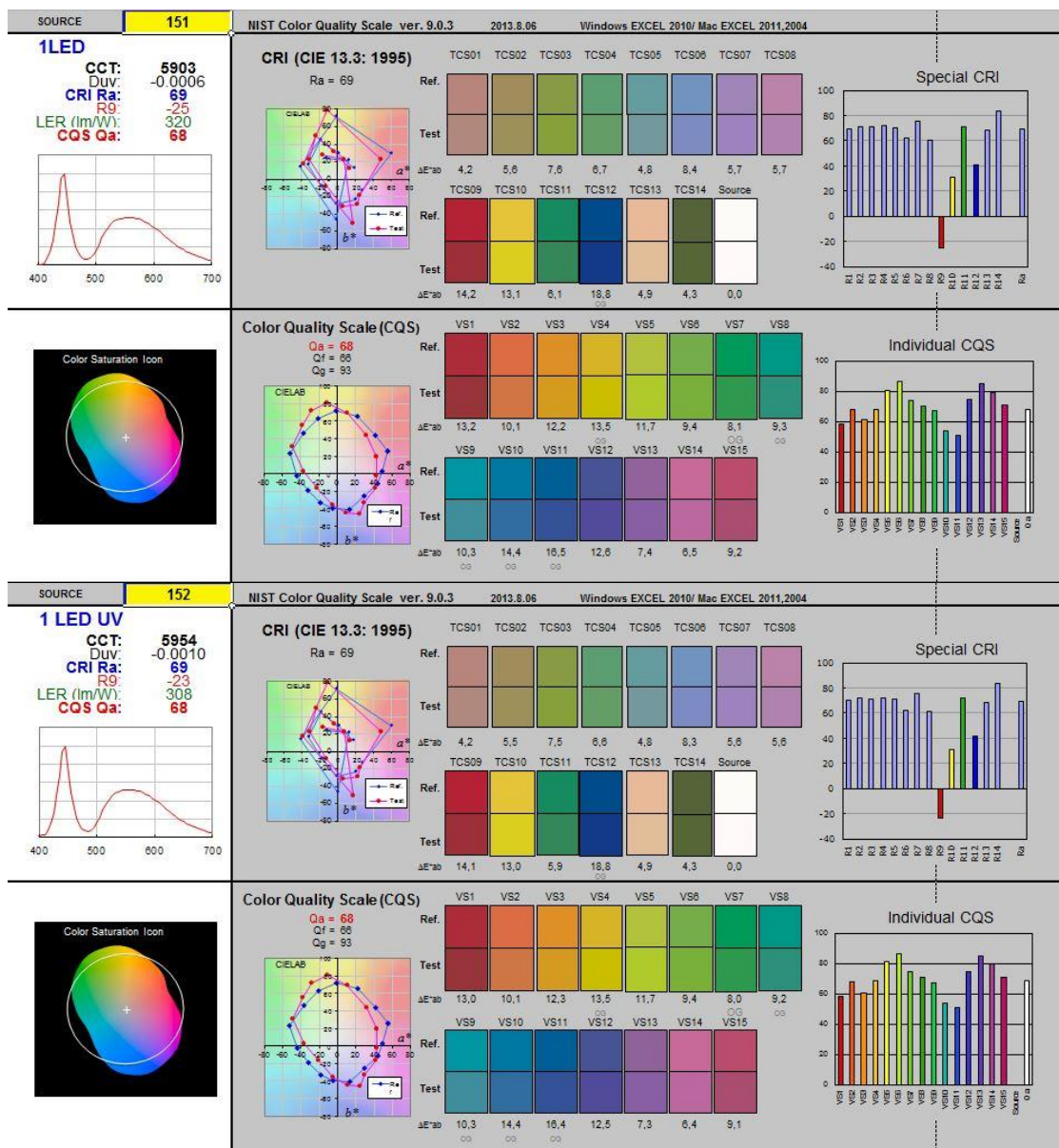
Obr. 18 Prostřední CQS 9.0.3 s popisky.



Obr. 19 Světelný zdroj D65 bez UV a s UV v koloristické skříni Spectralight III.



Obr. 20 Světelný zdroj D65 bez UV a s UV v koloristické skříně AT color.



Obr. 21 Světelný zdroj 1 LED bez UV a s UV.

## 8.6 Vyhodnocení výsledků

Jak je patrné z obrázků 19-21, přidáním UV záření dojde k navýšení hodnoty náhradní teploty chromatičnosti. CCT je však z pohledu popisu nedostatečné. Pokud se podíváme na hodnoty světla D65 ve skříní AT Color, D65 ve skříní Spectralight III a světelného zdroje s označením 1 LED. Z toho je zřejmé, že CCT zdrojů je blízké dennímu světlu D65 a je v rozmezí od 5620 do 6291. Nicméně indexy barevného podání jsou již zcela rozdílné. Zdroj s označením 1 LED dosahuje hodnot CRI 69 a CQS 68, zatímco zbylé dva zdroje mají CRI okolo 96 a CQS 95. Dále je také zřejmé, že

jednotlivé světelné zdroje mají různé spektrální složení. To je potřebné si zapamatovat, jelikož v dalším pokusu bude tato skutečnost hrát velmi významnou roli.

## **9 Nekontaktní kolorimetrie**

### **9.1 Popis metody**

Princip kolorimetrie byl popsán v teoretické části. Zde je zapotřebí pouze doplnit, že se jedná o nekontaktní kolorimetrii.

### **9.2 Popis měření**

V rámci příprav tohoto měření musela být nejdříve sestavena měřící soustava. Sestávala ze stativu, na kterém byla připevněna sonda CA-PU 12, jež byla připojena k analyzátoru barev Konica-Minolta CA 210. Analyzátor byl nejdříve zkalibrován a poté nastaven do režimu xyLV. V pokusu byly využity koloristické skříně (Spectralight III, AT color a ICS - Texicon). Ve skříně byl umístěn úhlový podstavec se sklonem 45° s označením polohy pro umístění jednotlivých vzorků. Dále pak bylo zapotřebí počítače s tabulkovým programem k zápisu naměřených hodnot. Celé měření pak probíhalo pouze při osvětlení měřeného zdroje za celkové tmy v místnosti.

### **9.3 Postup měření**

- 1) Sestavení měřící soustavy podle výše zmíněného návodu.
- 2) Zacílení sondy pomocí pointeru na střed měřeného vzorku.
- 3) Přepnutí sondy do režimu měření.
- 4) Zaznamenávání hodnot  $x$ ,  $y$  a  $L_v$  z displeje analyzátoru do tabulkového programu.
- 5) Změna měřeného vzorku a opakování bodů 2-4.
- 6) Vyhodnocení výsledků.

### **9.4 Použitá technika**

#### **1) Použité přístroje**

Analyzátor Barev Konica-Minolta CA-210 s měřicí sondou CA-PU12

#### **2) Koloristické skříně**

Spectralight III

AT color

ICS – Texicon s úpravou pro použití LED světelných zdrojů

### 3) Použité standardy

Datacolor SN 355

Datacolor fluorescent reference standard

Plastiková stupnice bílých standardů od firmy CIBA

### 4) Použité světelné zdroje

Bylo využito klasických standardních světelných zdrojů A, dále pak osvětlení TL84 a Horizon. Použité LED zdroje jsou specifikovány v následující tabulce viz tab. 3-5.

Tab. 3 Specifikace LED zdroje

<b>Výrobce Optonica LED</b>			
Katalogové číslo	TU5670-M	Příkon	9W
Závit/Patice	T8	Napájení	220V
Světelný tok	810 lm	Chromatičnost	3000K
Barva světla	Studená Bílá	Ekvivalent běžné žárovky	80W
Index podání barev	$\geq 85$ Ra	Životnost	25000hodin
Rozptyl světla	140°	IP	20
Délka	60 mm	Certifikáty	CE, RoHs

Tab. 4 Specifikace LED zdroje

<b>Výrobce Optonica LED</b>			
Katalogové číslo	TU5671-M	Příkon	9W
Závit/Patice	T8	Napájení	220V
Světelný tok	810 lm	Chromatičnost	6000K
Barva světla	Neutrální Bílá	Ekvivalent běžné žárovky	80W
Index podání barev	$\geq 85$ Ra	Životnost	25000hodin
Rozptyl světla	140°	IP	20
Délka	60 mm	Certifikáty	CE, RoHs



Tab. 5 Specifikace LED zdroje

<b>Výrobce Optonica LED</b>			
Katalogové číslo	TU5672-M	Příkon	9W
Závit/Patice	T8	Napájení	220V
Světelný tok	810 lm	Chromaticnost	4500K
Barva světla	Teplá Bílá	Ekvivalent běžné žárovky	80W
Index podání barev	>=85 Ra	Životnost	25000hodin
Rozptyl světla	140°	IP	20
Délka	60 mm	Certifikáty	CE, RoHs

## 5) Další přístroje

Fotoaparát Olympus SZ -14

Notebook Lenovo B590

## 9.5 Vyhodnocení měření

Z naměřených hodnot  $x, y, L_v$  se dále pomocí koeficientu pro dané světlo a koloristickou skřín vypočítalo  $Y$ . Pro dopočítání zbylých trichromatických souřadnic se použily následující výpočty.

$$X = Y/y * x ; Z = Y/y * (1-x-y).$$

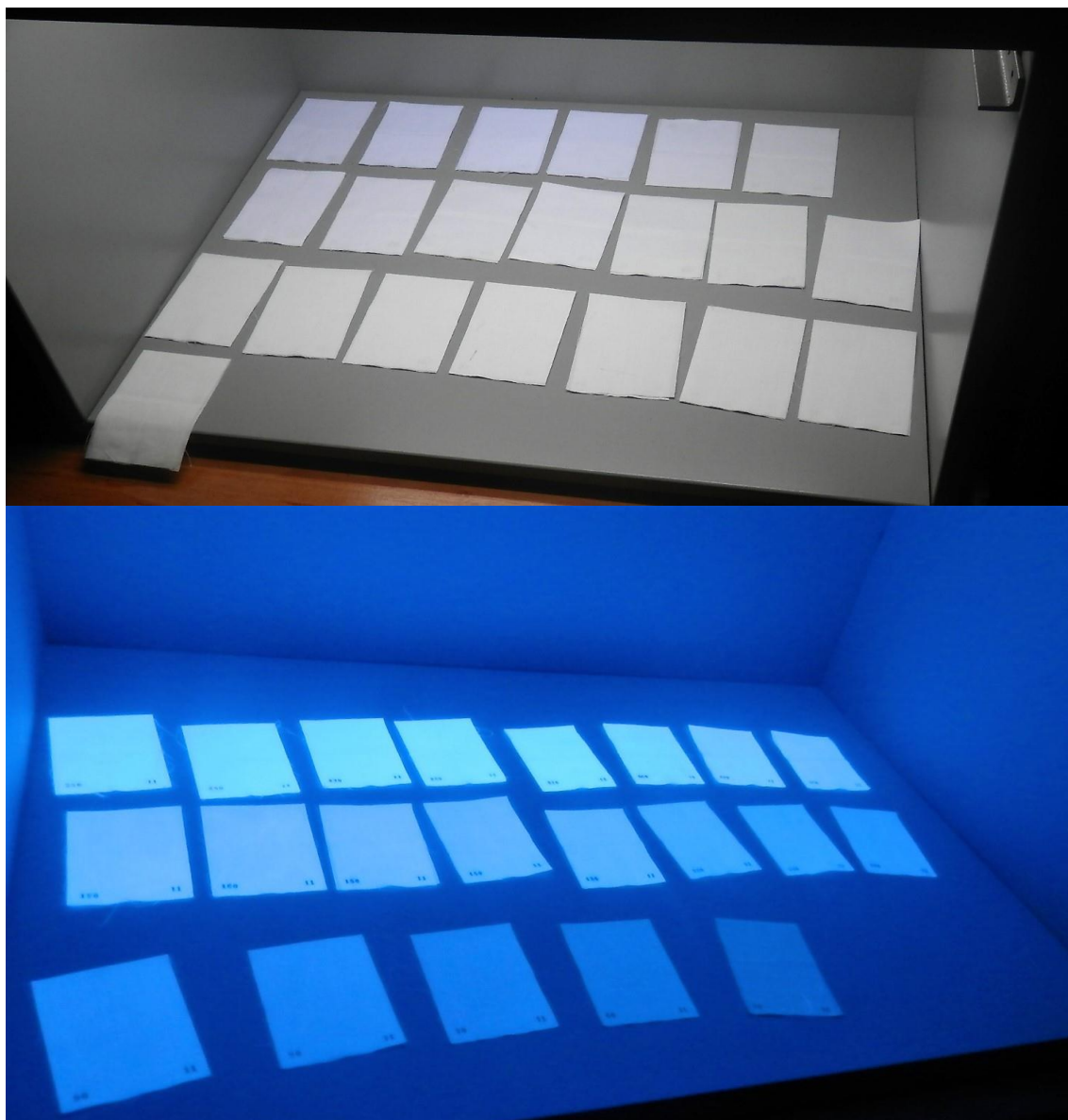
Ze všech hodnot se poté sestavila tabulka trichromatických souřadnic pro jednotlivé vzorky. Závěrem je potřebné říci, že se jednalo o kontrolní měření, které bylo prováděno za účelem ověření již známých údajů.

## 10 Vizuální pokus

### 10.1 Popis metody

Metoda funguje na principu psychofyzikálního procesu subjektivního rozhodování. Pro tento vizuální pokus byly použity bílé látkové vzorky od firmy Geigy s označením white scale. Jedná se o 21 kusů látkových čtverců, které jsou odstupňovány podle odstínů. Jednotlivé vzorky mají na zadní straně vyražené číslo udávající jejich pořadí. Vzorky byly postupně osvětlovány světlem D65 v koloristických skříních. V každém druhém měření toto světlo bylo doplněné zářivkou s UV. Světlo D65 bylo použito vzhledem k jeho spektrálnímu složení, což bylo nejvíce patrné bez přidání UV.

Použité vzorky jsou zobrazeny na obrázku 22. Pro vyhodnocení se využila statistická metoda Spearmanova koeficientu pořadové korelace.



Obr. 22 Použité látkové vzorky na první fotografii pod osvětlením D65+UV, na druhé pouze pod zdrojem UV.

## 10.2 Popis měření

V prvé řadě byl pozorovatel seznámen s celým průběhem vizuálního pokusu. Byl dotázán, zda si je vědom některé z očních vad, které by mohly ovlivnit měření. A to z důvodu případného odchýlení od průměru a k podrobení dalšímu zkoumání. Poté zaujal místo před koloristickou skříní a začal seřazovat vzorky od nejtmaššího po nejsvětější. Po kompletním seřazení bylo pořadí zaznamenáno a došlo k přepnutí zdroje

světla. Vzorky byly důkladně promíchány a poté se celý proces opakoval. Celý pokus netrval déle než 15 minut a pozorovatel nebyl vystaven žádnému zdravotnímu riziku.

### **10.3 Postup měření**

- 1) Náhodné rozestavení 21 vzorků do prostoru koloristické skříně.
- 2) Seřazení vzorků pozorovatelem od nejtmašího po nejsvětější, podle jeho uvážení.
- 3) Otočení vzorků a sepsání pořadí určené pozorovatelem.
- 4) Změna světelného zdroje.
- 5) Promíchání vzorků.
- 6) Opakování celého procesu.
- 7) Ukončení pokusu po celkovém rozřazení 126 vzorků.
- 8) Uložení naměřených hodnot do tabulkového editoru, ve kterém se poté vyhodnocovalo.

### **10.4 Použitá technika**

#### **1) Koloristické skříně**

Spectralight III

AT color

ICS – Texicon s úpravou pro použití LED světelných zdrojů

#### **2) Další přístroje**

Fotoaparát Olympus SZ -14

Notebook Lenovo B590

#### **3) Použité standardy**

Geigy white scale

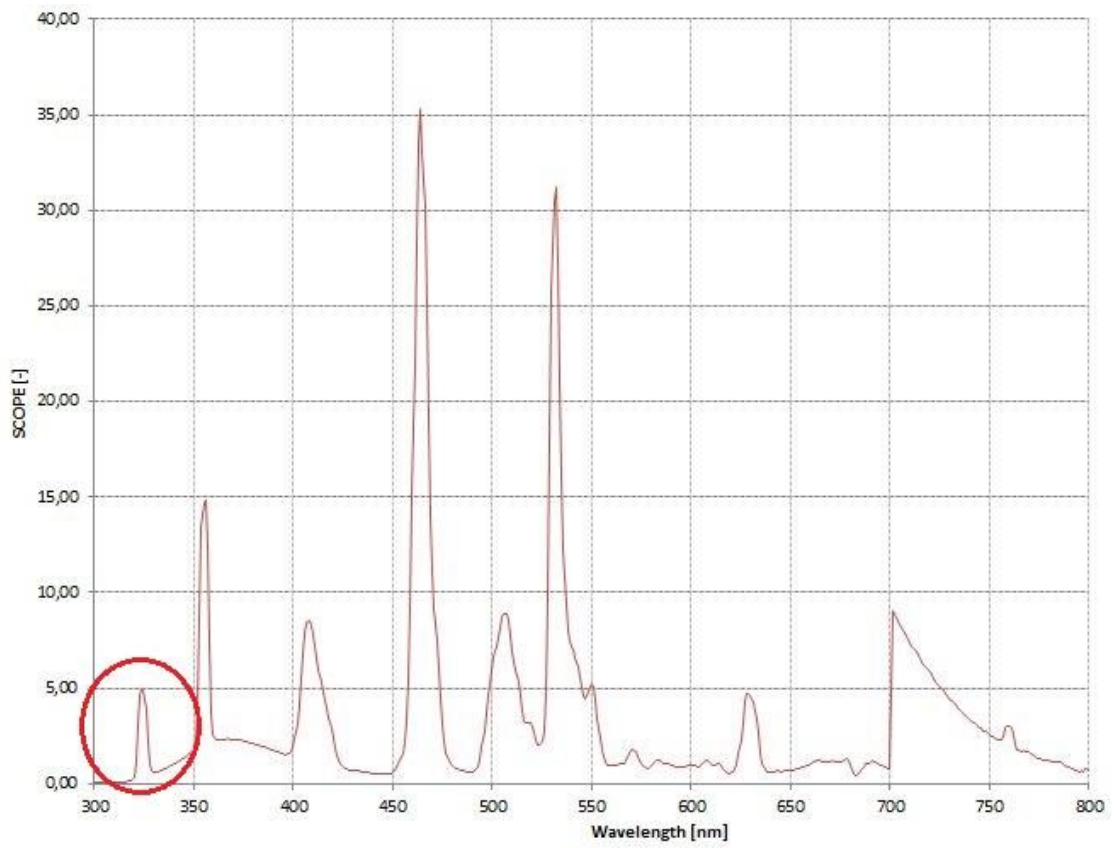
### **10.5 Vyhodnocení výsledků**

Průběh hodnocení přinesl několik zajímavých poznatků. Jedním z nich je například fakt, že přidáním UV zdroje během měření, došlo k výraznému zlepšení úsudku pozorovatele při řazení jednotlivých vzorků, což je způsobeno opticky zjasňujícími prvky, které jsou ve vzorku obsažené. Tuto skutečnost potvrzuje i výpočet Spearmanova korelačního koeficientu, který je pro jednotlivé světelné zdroje zobrazen na obr. 21. Dále je patrné, že spektrální složení světelného zdroje D65 v koloristické skříně ICS – Texicon jako jediné nevytvořilo podmínky pro správné seřazení. V případě koloristické

skříně AT color měl problémy pouze pozorovatel číslo 2. Pozorovatel však prošel Ishiharovým testem, a tak lze vyloučit, že by trpěl defektním barevným viděním. Pokud tedy porovnáme jednotlivé světelné zdroje z hlediska subjektivního řazení, je možné říci, že nejhůře se pozorovatelům dařilo pod světlem D65 ve skříní ICS – Texicon a nejlépe pak pod zdrojem D65 s přidáním UV ve skříní AT color. Příčinou nezdaru při řazení ve skříní ICS – Texicon je chybějící UV energie části spektra světelného zdroje okolo 320 nm a nízký index barevného podání. Tato skutečnost je známa z průběhu jednoduché spektrometrie. Proto byl uskutečněn doplňkový pokus, na kterém je patrné, že pod zdrojem TL84 bylo přiřazení daleko přesnější než pod zdrojem D65 ve skříní Multilight, což je doloženo obrázkem 24, na kterém je vidět spektrální složení zdroje TL84.

<b>Spearman Multilight D65</b>				
Pozorovatel 1	Pozorovatel 2	Pozorovatel 3	Pozorovatel 4	Pozorovatel 5
-0,055	-0,140	-0,142	0,226	0,260
<b>Spearman Multilight D65 + UV</b>				
Pozorovatel 1	Pozorovatel 2	Pozorovatel 3	Pozorovatel 4	Pozorovatel 5
0,987	0,965	0,997	0,997	0,981
<b>Spearman AT color D65</b>				
Pozorovatel 1	Pozorovatel 2	Pozorovatel 3	Pozorovatel 4	Pozorovatel 5
0,764	0,352	0,845	0,857	0,984
<b>Spearman AT color D65 + UV</b>				
Pozorovatel 1	Pozorovatel 2	Pozorovatel 3	Pozorovatel 4	Pozorovatel 5
0,995	0,990	0,996	0,996	0,987
<b>Spearman Spectralight III D65</b>				
Pozorovatel 1	Pozorovatel 2	Pozorovatel 3	Pozorovatel 4	Pozorovatel 5
0,982	0,914	0,990	0,964	0,986
<b>Spearman Spectralight III D65 + UV</b>				
Pozorovatel 1	Pozorovatel 2	Pozorovatel 3	Pozorovatel 4	Pozorovatel 5
0,986	0,973	0,996	0,984	0,987
<b>Spearman Multilight TL84</b>				
Pozorovatel 1	Pozorovatel 2			
0,847	0,881			
<b>Spearman AT color TL84</b>				
Pozorovatel 1	Pozorovatel 2			
0,896	0,894			
<b>Spearman Spectralight III TL84</b>				
Pozorovatel 1	Pozorovatel 2			
0,872	0,895			

Obr. 23 Výsledky Spearmanova testu.



Obr. 24 Spektrum světelného zdroje TL84 s vyznačenou UV částí.

## **Závěr**

Cílem bakalářské práce bylo zmapovat vliv nových světelných zdrojů na barevný vzhled výrobku, porovnat několik měřících metod a komplexně popsat problematiku barevného vidění.

Postupně byla popsána anatomická struktura zrakového orgánu včetně přídatných orgánů, které spolupracují na jeho správné funkci. Dále pak fyziologické procesy na čípkové a tyčinkové úrovni. Poslední podkapitola popisuje vnímání barev pomocí technických principů a vytváří tak přechod mezi medicínskou a technickou částí.

Teoretická technická část popisuje rozdělení světelných zdrojů, zejména LED světelných zdrojů. Charakterizuje jejich konstrukci a princip vzniku světla, dále pak jejich četné využití spolu s jejich výhodami a nevýhodami. Přechod mezi teorií a praxí vytváří principy metod použitých v části praktické a možnosti interpretace barevného podání.

Praktická část nás seznamuje s technikou, která byla využita při provádění měření, včetně popisu jednotlivých měření a řadou použitých standardů. V první řadě byla provedena spektroskopie, která jasným způsobem dokazuje rozlišnost spektrálního složení světelných zdrojů a naráží na problematiku nedostatečného popisu zdroje pomocí náhradní teploty chromatičnosti. Dále bylo provedeno kolorimetrické měření za účelem získání dat pro nové světelné zdroje. V neposlední řadě proběhl vizuální pokus s pozorovateli, ve kterém bylo vyhodnoceno téměř 900 vzorků.

Provedení jednotlivých pokusů přineslo zajímavé poznatky a v některých případech nás přivádí k myšlenkám na zlepšení měření a posunutí hranic přesnosti zase o něco kupředu. Například použití odstínění v sestavě při průběhu spektroskopie bylo velmi provizorní, avšak výsledky ukazují, že dostačující. Nicméně se nabízí otázka, zda sestavu nepřeprogramovat do uživatelsky přívětivější podoby a pomocí správné konstrukce nedocílit ještě kvalitnějšího odstínění. Dalším zajímavým problémem, který se při měření vyskytl, bylo využití dvou odlišných přenosných počítačů s odlišným hardwarovým vybavením a jiným operačním systémem. Obě varianty měly být pro účely záznamu dat dostačující, avšak u jedné docházelo ke špatnému přijetí signálu a tím ke zkreslování výsledků. Tento problém pak vede k myšlence, zda needukovaný uživatel tuto chybu rozpozná. Řešením by bylo provést validaci dat a dosáhnout tak

dostatečné kontroly naměřených výsledků. Z výsledků vizuálního pokusu je patrné, že některé z používaných světelných zdrojů svým spektrálním složením ovlivňují vzhled výrobku. Tato skutečnost může mít dopad na naše rozhodování a může ovlivňovat náš úsudek při jeho výběru. Nezbyvá tak, než dbát na správnost výběru světelných zdrojů pro osvětlování výrobků a zabránit tak jejich zkreslení.

## Seznam použité literatury

- [1] NAŇKA, Ondřej - ELIŠKOVÁ, Miloslava - ELIŠKA, Oldřich. *Přehled anatomie*. 2. Praha, 2009. s. 311- 318, Obr 312
- [2] KUČYHNKA, Pavel. *Oční lékařství*. Praha, 2007. s. 258, 259, Obr. 258.
- [3] SYKA, Josef a kol. *Fyziologie a patofyziologie zraku a sluchu*. Praha, 1981. s. 133, 135, 136.
- [4] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha, 2013. s. 89-90, 120, 125-126, 128-130, 135-136, 201-205, 209-210, 211-212, Obr 120, 126, 201.
- [5] MALÝ, Petr. *Optika*. Praha, 2013. s. 571-572, 587, 583-584 585-586.
- [6] BAJER, Jiří. *Optika 1*. Olomouc, 2015. s.91, 93, Obr. 93.
- [7] WENDY, Davis – OHNO, Yoshi, *Color Quality Scale*. *Optical Engineering* 49, 2010. No. 3. s. 1-3.
- [8] SANDOR, Norbert - SCHANDA, János. *Visual Colour-Rendering Experiment*. *Lighting research and Technology*, 2006. No. 3. s. 225-239.
- [9] BODROGI, Peter - BRÜCKNER, Stefan - KHAN, Tran Quoc. *Ordinal Scale based Description of Colour Rendering*. *COLOR research and application*, 2011. No. 4. s. 272-285.
- [10] SMET, Kevin – RYCKAERT, Wouter – POINTER, Michael – DECONICK, Geert – HANSELAER, Peter. *Colour Appearance Rating of Familiar Real Objects*. *COLOR research and application*, 2011. No. 3. s. 192-200.
- [11] HASHIMOTO, Kenjiro - TADASHI, Yano – SHIMIZU, Masanori – NAYATANI, Yoshinobu. *New Method for specifying Color-Rendering Properties of Light Sources Based on Feeling of Contrast*. *COLOR research and application*, 2007. No. s. 361-371.
- [12] F. SZABÓ, Ferenc – BODROGI, Peter – SCHANDA, János. *A colour harmony rendering index based on predictions of colour harmony impression*. *Lighting Research and Technology*, 2009. No. 2. s. 165-182.



- [13] BARTLESON, James. *Memory colors of familiar objects*. Journal of the optical society of america, 1960. No. 1. s. 73-77.
- [14] THORTON, A. W. *A validation of the color preference index*. Journal of Illuminating Engineering society, 1974. s. 48-52.
- [15] THORTON, A. W. *Color-Discrimination Index*. Journal of the optical society of america, 1972. s. 191-194.
- [16] X. GUO, Xin – HOUSER, Kevin. *A review of colour rendering indices and their application to commercial light sources*. lighting Research and Technology, 2004. No. 3. s. 183-189.
- [17] REA, Mark – FREYSSINIER-NOVA, Jean. *Color Rendering:A Tale of Two Metrics*. COLOR research and application, 2008. No. 3. s. 192-202.
- [18] JUDD, Dean. *A Flattery Index for Artificial Illuminants*. Illuminating Engineering, 1967. s. 593-598.
- [19] VIK, Michal. *Měření barevnosti a vzhledu v průmyslové praxi*. Liberec, 2015. s. 26- 29, 35- 36, 95- 96.
- [20] *Display color analyzer CA - 210 instruction manual* [citováno k 20.6.2016] dostupné online:([http://sensing.konicaminolta.us/products/ca-210-color-analyzer/support/\\_Discontinued\\_CA\\_210ColorAnalyzer\\_Manual.pdf](http://sensing.konicaminolta.us/products/ca-210-color-analyzer/support/_Discontinued_CA_210ColorAnalyzer_Manual.pdf))
- [21] *USB2000+Fiber Optic Spectrometer Installation and Operation Manual*, [citováno k 20.6.2016] dostupné online:(<http://oceanoptics.com/wp-content/uploads/USB2000-Operating-Instructions1.pdf>),
- [22] YAGUCHI, Hirohisa – TAKAHASHI, Yoshiro – SHIORI, Satoshi. *A Proposal of color Rendering Index based on Categorical Color Names*, in International Lighting Congress, Istanbul 2001.
- [23] *Full – Spectral index* [citováno k 20.6.2016] dostupné online: <http://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpip/lightinganswers/lightsources/whatisFullSpectrumIndex.asp>