

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE  
FAKULTA MATEMATIKY FYZIKY A INFORMATIKY  
Katedra aplikovanej informatiky



# VNÍMANIE A POMENOVÁVANIE FARIEB A FAREBNÝCH KATEGÓRIÍ

(bakalárska práca)

*Kristína Rebrová*

Študijný odbor: Aplikovaná informatika 9.2.9  
Školiteľ: **RNDr. Martin Takáč**  
BRATISLAVA 2007

## **PREHLÁSENIE**

Čestne prehlasujem, že som túto prácu vytvorila samostatne, vedená radami a usmernením môjho školiteľa, čerpajúc z uvedenej literatúry a zdrojov dostupných na internete.

V Bratislave, dňa 14.6. 2007

.....  
Kristína Rebrová

## **POĎAKOVANIE**

Chcela by som sa v prvom rade poďakovať môjmu školiteľovi RNDr. Martinovi Takáčovi, za cennú inšpiráciu, jeho pomoc a ochotu pri tvorbe tejto práce. Tiež chcem vysloviť vďaku mojim rodičom, ktorí ma trpezlivo podporovali počas celého štúdia.

## ABSTRAKT

Bakalárska práca na tému „vnímanie a pomenovávanie farieb a farebných kategórií“ zachytáva úvod do vnímania a charakterizovania farieb. Popisuje, ako vnímame farby našou percepčnou sústavou, klasifikujeme ich a zobrazujeme do farebných priestorov. Tiež načrtá bežne používané farebné modely a priestory a matematický základ prevodov medzi nimi. V neposlednom rade opisuje pojem farebnej kategórie a zbežne uvádza čitateľa do výskumu vzniku a používania farebných kategórii vo svete ale aj v umelej inteligencii.

Praktická časť práce obsahuje jednoduchý pomocný program spadajúci pod rozsiahlejší projekt zameraný na vznik a osvojovanie si kategórií. V širšom kontexte je táto bakalárska práca úvodnou štúdiou pre nasledujúcu rozsiahlejšiu (diplomovú) prácu.

Bachelor work on theme “perception and naming of color and color categories” captures an introduction to color perception and characterization. It describes how we see colors thru our perception system, classify them and project them to color spaces. It also portrays commonly used color models and spaces, and mathematical bases of conversions between them. Last but not least it explains the notion of color category in world and also in artificial intelligence.

Practical part of this work consists of simple facilitating program for larger project set on the emergence and adaptation of categories. In wider context is this bachelor work introducing paper to next broader (higher graduation) work.

# OBSAH

<b>PREHLÁSENIE .....</b>	<b>2</b>
<b>POĎAKOVANIE.....</b>	<b>3</b>
<b>ABSTRAKT.....</b>	<b>4</b>
<b>OBSAH .....</b>	<b>5</b>
<b>ZOZNAM OBRÁZKOV A PRÍLOH .....</b>	<b>6</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>7</b>
<b>1 FARBA.....</b>	<b>8</b>
1.1 VIDITELNÉ SPEKTRUM.....	9
1.2 VNÍMANIE FARIEB.....	10
1.3 KLASIFIKÁCIA FARIEB .....	12
1.4 TEÓRIE VNÍMANIA FARIEB .....	13
1.5 ROZLIŠOVANIE FARIEB .....	14
1.6 PORUCHY VNÍMANIA FARIEB .....	17
1.7 FAREBNÝ PRIESTOR.....	18
1.8 MIEŠANIE FARIEB.....	19
1.9 FAREBNÝ KRUH .....	22
<b>2 FAREBNÉ MODELY A PRIESTORY .....</b>	<b>23</b>
2.1 RGB MODEL .....	23
2.2 CMYK MODEL .....	24
2.3 HSV A HSL MODELY .....	24
2.4 TROJZLOŽKOVÝ FAREBNÝ PRIESTOR .....	26
2.5 CIE 1931 XYZ .....	27
2.6 CIE 1976 L*A*B*.....	31
2.7 MUNSellov FAREBNÝ SYSTÉM .....	34
2.8 RGB KONVERZIE FAREBNÝCH MODELOV .....	36
2.8.1 CMY a CMYK .....	36
2.8.2 HSV a HSL.....	37
2.8.3 CIE XYZ a CIE L*a*b*.....	39
<b>3 FAREBNÉ KATEGÓRIE .....</b>	<b>40</b>
3.1 ZÁKLADY KATEGORIZÁCIE .....	40
3.2 KATEGORIZÁCIA FARIEB .....	41
3.3 WORLD COLOR SURVEY .....	43
<b>4 PRAKTICKÁ ČASŤ .....</b>	<b>45</b>
<b>5 ZÁVER.....</b>	<b>46</b>
<b>6 ZOZNAM POUŽÍTYCH ZDROJOV .....</b>	<b>47</b>

## **Zoznam obrázkov a príloh**

Obrázok 1. Farby viditeľného spektra .....	9
Obrázok 2. Náčrt receptorového a nervového vnemu farby .....	11
Obrázok 3. Ilustrácia vplyvu pozadia na vnem farby .....	15
Obrázok 4. Ilustrácia vplyvu pozadia na kontrast vnímanej farby .....	15
Obrázok 5. Ilustrácia aditívneho miešania farieb .....	19
Obrázok 6. Ilustračný obrázok subtraktívneho miešania farieb .....	20
Obrázok 7. Rozdiel v gamute farebných systémov RGB a CMY .....	21
Obrázok 8. Schéma farebného kruhu .....	22
Obrázok 9. Umelecký, subtraktívny a aditívny farebný kruh .....	22
Obrázok 10. Porovnanie HSV a HSL modelu .....	25
Obrázok 11. Color matching funkcie pre CIE RGB a CIE XYZ .....	28
Obrázok 12. Citlivosť ľudskej farebnej percepcie, štandard CIE .....	28
Obrázok 13. Chromatický diagram CIEXYZ .....	30
Obrázok 14. Približná vizualizácia MacAdamových elíps na CIEXYZ .....	32
Obrázok 15. Zobrazenie CIELAB osí a celej gule .....	33
Obrázok 16. Zobrazenie CIELAB priestoru pri troch hodnotách jasu .....	33
Obrázok 17. Prehľad základných Munsellových odtieňov vo farebnom kruhu .....	34
Obrázok 18. Vizualizácia fungovania Munsellovho farebného systému .....	35
Obrázok 19. WCS testovacia paleta .....	44

Príloha č.1: CD s programom

# ÚVOD

Vnímanie, pomenovávanie farieb a ich kategorizácia je dôležitým fenoménom ľudskej vizuálnej percepcie. Pri tejto problematike sa nám intuitívne načrtá spojitosť s kognitívnou vedou, ktorá sa s aplikovanou informatikou prelína v obore umelej inteligencie. Ak sa uberieme týmto smerom, na vnímanie a rozlišovanie farieb možno nazerať ako na vynikajúcu tému pre simuláciu a výskum vzniku, reprezentácie a osvojovania si kategórií.

Pojem farebnej kategórie možno zjednodušene pripodobniť k základnej farbe alebo základnému farebnému pomenovaniu. Ako budeme popisovať aj v tejto práci, vnímanie farieb a vytváranie farebných kategórií je kultúrne špecifický fenomén. Skúmaniu pomenovania farieb sa venovalo niekoľko rozsiahlych lingvistických štúdií, z ktorých pravdepodobne najväčšia bola Svetová farebná štúdia – „World color survey“ pod záštitou Národnej vedeckej nadácie (National Science Foundation) a ďalších inštitúcií: University of California at Berkeley, the Summer Institute of Linguistics (SIL, International), the International Computer Science Institute (ICSI) a iných. Dáta z tohto výskumu a štúdie jemu predchádzajúcej (obe popísané v kapitole 3), budú spracúvané v rámci praktickej časti tejto bakalárskej práce. Tá slúži ako pomocný program pre väčší projekt zaoberajúci sa učením sa kategórií, konkrétne pre jeho podčasť, tvoriacu učenie rozlišovania farieb, resp. farebných kategórií (viac informácií v kapitole 4).

Bakalárska práca „vnímanie a pomenovávanie farieb a farebných kategórií“ tvorí niečo ako prípravnú pôdu pre nadväzujúcu magisterskú diplomovú prácu s rovnakou témou a s väčším dôrazom na výskum spracúvaných dát a učenia sa farebných kategórií. Táto práca poskytuje čitateľovi základný informačný prehľad o farbe, jej vnímaní a reprezentácií, ako aj o pojme farebnej kategórie a informácie o štúdií WCS, slúžiacej ako zdroj dát. Bakalárska práca má slúžiť ako úvod do problematiky farieb a farebných kategórií a priblíženie sa k ďalšiemu výskumu.

# 1 FARBA

Táto kapitola predstavuje všeobecný informačný pohľad na perceptuálne vnímanie a rozlišovanie farieb, ich zobrazovanie a reprezentáciu. Často budeme používať farebné termíny a pomenovania špecifické najmä pre západnú civilizáciu, proti ktorým by sme mohli, aj na základe tejto práce, namietat'. Vnímanie a pomenovávanie farieb je totiž kultúrne špecifické, ako ukazujú aj výsledky svetovej farebnej štúdie (WCS, popísané v kapitole 4). Terminológia tejto kapitoly je teda tiež kultúrne špecifická, blízka čitateľovi, umožňujúca lepšie vystihnúť fenoménu farieb ako takého. Obsah kapitoly sa opiera o materiál [1] až [15].

Otázka definovania farby ako takej je v mnohých ohľadoch diskutabilná. Farbu môžeme jednoducho definovať ako vlastnosť alebo vedľajší produkt svetla – elektromagnetického žiarenia s vlnovou dĺžkou od 380nm do 740nm, ktoré sa dostáva do ľudskej alebo inej percepčnej sústavy. Z tohto môžeme odvodiť pojem pre farbu objektu a definovať ju na základe vlnovej dĺžky svetla, ktoré tento objekt odráža a ktoré pohlcuje. Všeobecne známy fakt je, že materiál, o ktorom hovoríme, že je svetlý, odráža viac svetla ako tmavý materiál. Takto popisujeme farbu na základe jej vzniku, vnemu a fyzikálneho pôvodu. No farba je tiež akoby vlastnosťou ľudskeho mozgu alebo mysle. Farbu totiž môžeme vidieť aj v našich snoch či predstavách bez použitia percepčného systému. Preto väčšinou definujeme farbu nepriamo ako psychologický vnem s tromi komponentmi – odtieňom, jasom a saturáciou. Pričom odtieň sa vzťahuje na kvalitu tohto vnemu, teda určitú farebnú hodnotu, ktorú vyjadrujeme rôznym spôsobom popísaným ďalej. Jas alebo svetlosť sú dva pojmy, vystihujúce to, aké množstvo svetla zjavne vychádza z objektu, na ktorom farbu pozorujeme. Jas charakterizuje vlastnosť farby ako takej, a svetlosť zas vlastnosť povrchu objektu, na ktorom farbu pozorujeme. Saturácia, chroma alebo farebnosť sú tri pomenovania pre čistotu, teda sýtosť farby vzhľadom na množstvo šedi. Čím je saturácia vyššia, tým je farba sýtejšia.



## 1.1 Viditeľné spektrum

Viditeľné alebo optické spektrum je rozsah elektromagnetického žiarenia, ktoré je pozorovateľné ľudským okom. Žiarenie v tomto rozsahu jednoducho voláme svetlo.

Bežným omylom je predstava, že vlnová dĺžka pôsobiaceho svetla priamo určuje, akej farby budú predmety, ktoré toto svetlo osvetľuje. Je tomu tak väčšinou len v prípade takzvanej voľnej farby, kedy uvažujeme kvázi absolútnu hodnotu svetla resp. farby bez porovnania s okolím. No v princípe náš percepčný systém nevie vnímať absolútne vlnové dĺžky alebo jas, iba ich porovnávať vzhľadom na rôzne časti scény.

Približný vzťah medzi vlnovými dĺžkami a farebnými odtieňmi je asi takýto:



**Obrázok 1. Farby viditeľného spektra**

Obrázok znázorňuje farby viditeľného svetla s legendou – našimi pomenovaniami pre základné farby spektra aj s rozsahom vlnovej dĺžky svetla ich produkujúceho. Tento obrázok je modifikáciou pôvodného zdroja z [7].

## 1.2 Vnímanie farieb

Ľudský vizuálny percepčný systém funguje na princípe absorpcie svetla špeciálnymi receptormi, bunkami citlivými na svetlo. Fotoreceptory spracúvajú jednotlivé dávky svetelnej energie, čiže fotóny dopadajúce na sietnicu. Rozlišujeme dva druhy fotoreceptorov – čapíky a tyčinky, pomenované podľa ich charakteristického tvaru. Za vnímanie farieb zodpovedajú čapíky, ktoré sú citlivejšie, ale aj náročnejšie na svetlo.

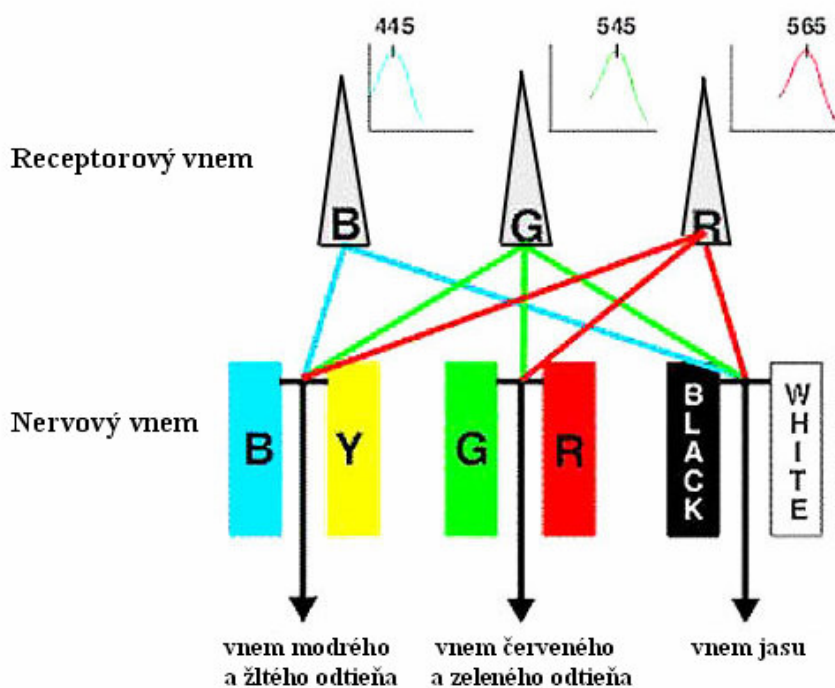
Na rozdiel od iných cicavcov vníma človek farby tromi druhmi čapíkov. Tie možno rozlíšiť podľa vlnovej dĺžky svetla, na ktoré reagujú. Delíme ich na červené, zelené a modré, alebo L, M a S-čapíky. Červené alebo L-čapíky (long-wavelength sensitive cones) vnímajú svetlo nízkych frekvencií, zelené (M) stredných a modré (S) vysokých frekvencií. Všetky majú rôzne, no prelínajúce sa citlivosti. Vrchol citlivosti červených čapíkov je približne je 565nm, pri zelených je to 545nm a pri modrých 440nm (po skorigovaní so stratou, ku ktorej dôjde pred dosiahnutím sietnice). Dôležitým faktom je, že čapík akéhokoľvek druhu môže určiť intenzitu a vlnovú dĺžku svetla k nemu prichádzajúceho len v porovnaní s jedným alebo viacerými inými typmi čapíkov.

Červené a zelené čapíky zabezpečujú vnímanie spektra s väčšími vlnovými dĺžkami a vo všeobecnosti zodpovedajú za rozlišovanie svetlého a tmavého. Krátkovlnné, teda modré čapíky sa zase používajú na vnímanie farebného kontrastu, preto ich je asi desaťkrát menej než dlhovlnných. V princípe sú si dva druhy dlhovlnných čapíkov veľmi podobné a majú spoločný farebný základ - žltú farbu. Teda červené čapíky sú vlastne červeno-žlté a zelené zeleno-žlté. Tento princíp súhlasí s oboma základnými farebnými teóriami (Trichromatická teória a Teória opozičných procesov, viď. kapitola 1.4). Korešponduje aj s rozdelením najsvetlejšej časti farebného spektra, žltej farby, na dve časti – zelenkastú a červenkastú (viď. obrázok farebného spektra vyššie, kapitola 1.1). Trivariancia umožňuje miešaním paralelného zeleno-červeného a modro-žltého systému vnímanie viacerých farieb, ako napríklad magenta (svetlá fialová) alebo cyan (zeleno-modrá, svetlá tyrkysová), ktoré nie sú súčasťou farebného spektra.

Svetelný stimul sa v spracovaní čapíkmi prejavuje tromi odlišnými nervovými stimulmi putujúcimi do vizuálnej kôry. Tie sú generované pre jednu základnú farbu a zároveň inhibujú vnemy jej opačnej farby v súhlase s teóriou opozičných procesov. Napríklad, červená farba

stimuluje čapíky citlivé na červenú, aby do mozgu vydávali príslušné impulzy, ale súčasne tiež znižovali citlivosť na zelenú (brzdili „zelené impulzy“). Signály modrej farby zas inhibujú impulzy pre červenú a zelenú, pretože dovedna dávajú jej protipól – žltú.

Poslednou časťou spracovania farebného vnemu je vnútorný mechanizmus premietajúci prichádzajúci farebný signál na farebný priestor, v rámci ktorého pozorovateľ mapuje svoje farebné vnemy.



**Obrázok 2. Náčrt receptorového a nervového vnemu farby**

Diagram na obrázku znázorňuje dve štádia procesu vnímania farby – receptorový a nervový vnem s dôrazom na zobrazenie transformácie farieb vnímaných farebnými receptormi na nervové impulzy putujúce do mozgu a rozdiel v týchto farbách. Obrázok vznikol úpravou pôvodného obrázku z [3].

### 1.3 Klasifikácia farieb

Farby možno rozčleniť alebo charakterizovať pomocou niekoľkých druhov a kategórií.

V prvom rade ich delíme na *chromatické* a *achromatické*. Achromatické sú neutrálne farby – čierna, biela a odtiene šedej a chromatické sú všetky ostatné.

*Spektrálne* farby – červená, modrá, zelená, oranžová, atď.<sup>1</sup> existujú vo viditeľnom spektre (viď. kapitola 1.1). Takzvané *mimospektrálne* farby sú tie, čo vzniknú ich kombináciou, napríklad magenta – nie je spektrálna farba, ale možno ju vytvoriť zmiešaním spektrálnej modrej a červenej.

Väčšina pozorovateľného svetla sa javí ako kombinácia farieb, čo znamená, že aj na prvý pohľad jasne rozlíšiteľnej farbe možno nájsť stopy iných farieb. *Unikátna* farba je potom taká, v ktorej nemožno nájsť žiadne stopy inej farby.

*Doplnkové* farby sú také, ktoré po zmiešaní vyprodukujú neutrálnu farbu. V zobrazení tohto farebného priestoru (napr. na farebný kruh, viď. kapitola 1.9) ležia rovno oproti sebe. *Nedoplnkové* sú všetky ostatné.

Z hľadiska svetla vytvárajúceho farby tiež rozlišujeme dve kategórie. *Monochromatické* svetlo pozostáva z jedinej vlnovej dĺžky, takže vytvára odtieň jednej základnej farby. Naopak *polychromatické* svetlo pozostáva z viacerých vlnových dĺžok, a teda môže produkovať aj mimospektrálnu farbu. Menší pokles saturácie možno dosiahnuť miešaním podobných farieb (napríklad červenej a žltej, modrá a žltá zase spôsobia veľkú desaturáciu). Vlnové dĺžky, z ktorých sa svetlo skladá, tvoria jeho *spektrálnu dekompozíciu*.

Dve svetlá s rôznou spektrálnou kompozíciou no s rovnakým zjavom sa nazývajú *metametrické*. K tomuto javu dochádza preto, že aj dve fyzikálne odlišné svetlá môžu v našich farebných receptoroch vyvolať rovnaký stupeň aktivity. Napríklad pri spojení červená + zelená sa náš perцепčný systém nevie rozhodnúť, či vníma monochromatickú žltú (cca 580nm) alebo kombináciu zeleného a červeného svetla (530nm a 630nm). K tomuto javu dochádza na základe „princípu univariancie“ [2], ktorý spočíva v tom, že akonáhle čapík

---

<sup>1</sup> Na tomto mieste treba zdôrazniť kultúrnu špecifickosť farebných pomenovaní a farieb samotných, pretože svetlo rôznych vlnových dĺžok pôsobiacie na našu perцепčnú sústavu ako farba, možno pomenovať farebným termínom alebo zaradiť do akejkoľvek farebnej skupiny (kategórie opísanej v kapitole 3) najrôznejšími spôsobmi. Pre lepšiu zrozumiteľnosť uvádzame príklad farieb z našej triedy farebných kategórií.

príjme svetlo, nevie aká bola jeho vlnová dĺžka. Takto môžu niektoré navzájom rozoznateľné svetlá pôsobiť na farbosllepých ľuďí. (Poruchy vnímania farieb vid' kapitola 1.6)

## **1.4 Teórie vnímania farieb**

Poznáme dva základné teórie vnímania farieb: Trichromatickú a Teóriu opozičných procesov.

Trichromatická teória vnímania farieb je založená na pokusoch s miešaním farieb a hovorí, že kombinácia troch farebných kanálov: červenej, modrej a zelenej postačuje na vytvorenie akejkoľvek farby. Napriek tomu, že sa opiera o výsledky mnohých experimentov, táto teória nevie vysvetliť existenciu štyroch unikátnych farieb: červenej, zelenej, modrej a žltej, a efekt afterimage-u<sup>2</sup>. Tiež nevie vysvetliť, že ľudia s poruchou vnímania jednej farby, teda dichromati (vid'. kapitola 1.6) môžu vidieť bielu a žltú farbu, aj keď ich bez tretieho kanálu nemožno namiešať.

Teória opozičných procesov sa zakladá na princípe dvojíc tzv. opačných farieb, teda takých, ktoré nemožno skombinovať tak, aby sa prelínali. Tieto sú zelená – červená, modrá – žltá a čierna – biela. Teda neexistuje červenkastá zelená alebo žltkastá modrá. Zmiešaním týchto dvoch opačných farieb dostaneme farbu neutrálnu, teda pri akomkoľvek miešaní neutralizuje jedna z páru opačných farieb druhú. Tento princíp korešponduje aj s ľudským vnímaním. Reakcie na opačné páry farieb sa pri spracúvaní fotoreceptormi navzájom inhibujú (vid'. kapitola 1.2). Na rozdiel od prvej teórie sa tu uvádza žltá ako základná farba, avšak aj ako neutrálna farba, čo pôsobí nejednoznačne.

Pri konfrontácií týchto dvoch teórií zistíme, že sa obe zakladajú na správnych postrehoch, no ani jedna nevystihuje skutočnosť presne. Žltá farba je totiž prítomná alebo vnímateľná zelenými aj červenými čapíkmi. Jasná zelená a jasná červená potom ohraničujú žltú farbu a jasnú žltú zachytávajú receptory oboch typov. Ale vieme tiež, že žltá farba podnecuje v neuroreceptoroch inhibíciu vnímania modrej farby.

---

<sup>2</sup> Termín afterimage sa používa na pomenovanie kvázi negatívu – obrazu, ktorý nie je našimi neuroreceptormi vnímaný skrz vizuálny vnem (môžeme pri tom aj zavrieť oči) ale naopak, po skončení veľmi silného vizuálneho vnemu. Tento efekt sa používa napríklad pri optických ilúziách. Pri vnímaní farieb spôsobuje silný vnem jednej z opozičných unikátnych farieb – zelenej, červenej, modrej, žltej, čiernej a bielej afterimage opačnej farby. Tento jav je bližšie popísaný v nasledujúcej kapitole 1.5.

## **1.5 Rozlišovanie farieb**

Pri najlepších optických podmienkach existuje okolo milióna rozlíšiteľných farieb – kombinácií rôznych odtieňov, saturácie a jasú [1]. Ľudské oko je schopné rozlíšiť okolo 150 spektrálnych odtieňov. Tento počet môžeme ešte obohatiť o mimospektrálne farby, ktoré vznikajú miešaním spektrálnych farieb, zmenou kontrastu, atď. Podľa niekoľkých štúdií vie človek rozlíšiť okolo 450 odtieňov šedej [1].

Rozlišovanie farieb je ovplyvnené priestorovou separáciou porovnávaných objektov, počtom dimenzií, v ktorých sa farby líšia, polohou farby vo farebnom spektre, veľkosťou pozorovaného objektu, saturáciou a jasom. Tiež záleží na časovom posune od vzhladnutia farby. Najlepšie si zapamätáme farby, ktoré sú dobrými reprezentantmi, na ich rozpoznanie nám stačí kratší čas. Lepšie rozlišujeme farby v prípade, že máme medzi daným objektom a jeho farbou vžitú asociáciu, napríklad červené jablko, zelená tráva, a podobne. Pri rozpoznaní farby objektu je dôležitá aj jeho poloha vzhľadom na sietnicu. Periférnym videním rozoznávame všetko slabšie, nielen farby.

Množstvo rozlíšiteľných stupňov saturácie sa s každou farbou mení. Špeciálnym prípadom je žltá farba, ktorá má v porovnaní s ostatnými základnými opačnými dopĺňajúcimi sa farbami – červenou, modrou a zelenou, niekoľko násobne menšie množstvo týchto úrovní. Najviac rozpoznateľných stupňov saturácie sa ukazuje pri farbách s nižšou vlnovou dĺžkou - odtieňoch modrej a fialovej.

Dôležitým faktorom pri vnímaní farieb je, že vizuálny perцепčný systém človeka rozlišuje farby nie základe absolútnych vlnových dĺžok, ale porovnávaním vlnových dĺžok a jasú prichádzajúceho z rôznych častí scény. Pri určovaní farby objektu hrá markantnú rolu pozadie, na ktorom sa nachádza. Okrem pozadia ovplyvňuje farebný vnem aj chromatická adaptácia, trvácnosť farby, jas (Bezold-Brückov efekt, popísaný pri konci tejto kapitoly), veľkosť objektu a saturácia (Abneyho efekt, popísaný pri konci tejto kapitoly).

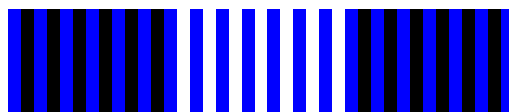
Pozadie objektu ovplyvňuje jeho farebný vnem niekoľkými spôsobmi. Jedným z týchto efektov je princíp simultánneho farebného kontrastu, teda vyvolanie dojmu, že objekt má farebný nádych doplnkovej farby k farbe pozadia. Napríklad na jasne červenom pozadí sa môže objekt javiť zelenší a na modrom zase žltší. Tento princíp najlepšie funguje vtedy, keď majú objekt a jeho pozadie navzájom opačné farby (napríklad zelená a červená), čo sú farby,

ktoré zmiešaním dávajú neutrálnu farbu (viď. teória opozičných procesov, kapitola 1.4). Pozadie môže na druhej strane pri podobných odtieňoch znižovať vnímanú saturáciu farby objektu. Všeobecne platí, že pozadie s veľkou saturáciou desaturuje objekt rovnakej farby, resp. odtieňa a zvyšuje saturáciu objektov doplnkových (opačných) farieb. Ďalším, veľmi názorným príkladom vplyvu pozadia na objekt je jeho zosvetlenie alebo stmavenie. Tmavé pozadie vo všeobecnosti objekt zosvetlí, naopak svetlé stmaví.



**Obrázok 3. Ilustrácia vplyvu pozadia na vnem farby**  
Obrázok vznikol úpravou pôvodnej ilustrácie z [2].

Opakom simultánneho kontrastu je vznik asimilačného alebo rozprestierajúceho efektu. Dochádza k tomu vtedy, keď pozadie miesto toho, aby pôsobilo na objekt kontrastne, s ním splyva. Ukážka nižšie poukazuje na to, ako môže farba objektu pozadie zvýrazniť (pri bielych čiarach) alebo stmaviť (pri čiernych čiarach).



**Obrázok 4. Ilustrácia vplyvu pozadia na kontrast vnímanej farby**  
Ilustračný obrázok prevzatý z [2].

Chromatická adaptácia alebo stálosť farby je vlastnosť našej percepcie, vychádzajúca z predošlého určenia farby objektu. Na základe tejto vlastnosti si za akýchkoľvek svetelných podmienok adaptujeme náš percepčný systém tak, že rozoznávame farbu daného objektu stále rovnako. Princíp tohto javu sa zakladá na fakte, že percepcia farby objektu nezávisí len od vlnovej dĺžky svetla, ktoré naň dopadá, ale hlavne od vlnovej dĺžky žiarenia odrážaného povrchom objektu putujúceho do oka pozorovateľa. Rôzne zdroje svetla produkujú žiarenie s rôznou spektrálnou kompozíciou. Správne proporcie všetkých vlnových dĺžok má len slnečné žiarenie. Klasické žiarovky s volfrámovým vláknom vytvárajú skôr žiarenie dlhovlnné, ladené do červena, naopak žiarivky produkujú skôr krátkovlnné, modré svetlo. Rôzne spektrálne kompozície konkrétnych zdrojov svetla potom spôsobujú, že materiál odráža svetlo inak a teda logicky má inú farbu. Naš percepčný systém sa svojím spôsobom

takýmto zmenám prispôsobuje. Adaptácia na svetlo spôsobuje, že pri prevažne dlhovlnnom osvetlení strácame citlivosť na dlhovlnné svetlo, no nie na krátkovlnné, pretože modré čapíky žiarenie s väčšou vlnovou dĺžkou nevnímajú. Toto prispôsobovanie nie je neobmedzené. Pri bežných podmienkach má slnečné žiarenie na obed charakter krátkovlnného žltého svetla a večer dlhovlnného červeného. V tomto osvetlení bude červené jablko stále červené, pretože jeho pigment odráža červené svetlo. No keď ho osvetlíme modrým svetlom, bude sa javiť tmavošedé alebo čierne, pretože na jeho povrch nebude dopadať žiadne červené žiarenie.

Chromatické adaptácia môže podobne ako simultánny farebný kontrast spôsobiť indukovanie doplnkovej farby. Napríklad adaptácia zraku pohľadom na červený štvorec môže spôsobiť, že následne pozorované objekty žltej alebo bielej farby budú vyzerat' zelenkasto. Tento jav môže tiež znížiť zdanlivú saturáciu alebo posilniť, či znížiť jasnosť. Keď sa napríklad zrak adaptuje na jasnú scénu, následne vzhliadnutá tmavšia scéna bude vyzerat' ešte tmavšie.

Veľkosť objektu tiež ovplyvňuje jeho farebný zjav. Menšie objekty sú ťažšie rozoznateľné, tmavé farby (napr. modrá) konvergujú k čiernej a svetlé (napr. žltá) zas k bielej.

Jasnosť farby závisí na mnohých faktoroch. Ovplyvňuje ju svietivosť materiálu, pozadie, vlastnosti osvetlenia a prispôsobivosť pozorovateľa naň, dĺžka trvania pohľadu na daný objekt a jeho veľkosť. Bezold-Brückov efekt alebo posun je zmena vnímania farebného odtieňa spôsobená zmenou intenzity osvetlenia. So stúpajúcim jasom sa spektrálne farby posúvajú viac k modrej (pod 500nm) alebo k žltej (nad 500nm). Naopak pri nižších frekvenciách svetla vyniká červená a zelená.

Pri zvyšovaní saturácie, teda pridaní bieleho svetla do osvetlenia objektu dochádza k takzvanému Abneyho efektu – posunu farebného odtieňa. Napríklad pridaním bieleho svetla do modrého bude toto svetlo pôsobiť červensšie.



## **1.6 Poruchy vnímania farieb**

Existuje sedem typov porúch vnímania farieb, spôsobených abnormalitami farebných čapíkov. Vrodenou poruchou vnímania farieb trpí na svete približne 8% mužov a približne 0.5% žien. Prvým a najbežnejším typom týchto porúch je anomálna trichromacia, teda vnímanie všetkých troch farieb s určitými odchýlkami.

Človek trpiaci touto poruchou má jeden z troch typov čapíkov v menšom počte, s menším množstvom pigmentu, alebo má čapíky tohto typu nastavené na neobvyklú vlnovú dĺžku. Preto potom dochádza k určitému posunu farebného vnemu najmä pri jasnejších alebo viac saturovaných odtieňoch základných farieb, najčastejšie červenej a zelenej. Ak je porucha protanomalická, dochádza k posunu červenej k zelenej. Pri najbežnejšej, deuteranomalickej poruche je oslabená zelená farba. Tritanomália, porucha modrých čapíkov, sa vyskytuje len zriedka.

Ďalším typom poruchy vnímania farieb je dichromacia, ktorá sa vyznačuje úplnou absenciou jedného z troch typov čapíkov. O ľuďoch trpiacich touto poruchou možno povedať, že sú skutočne farboslepí, pretože nemôžu za žiadnych okolností vnímať určité farebné odtiene. Niektorí dichromati používajú na rozoznávanie zelenej a červenej farby slabšie receptory – tyčinky, ktoré zdravý človek používa len na rozlíšenie tmavého a svetlého. Pri tejto poruche existujú opäť tri typy protanopia, deuteranopia a tritanopia, teda absencia červených (protanopia), zelených (deuteranopia) alebo modrých (tritanopia) čapíkov. Ľudia trpiaci prvými dvomi typmi tohto ochorenia vidia len v odtieňoch modrej a žltej. Tretí typ – tritanopia, je opäť zriedkavejšia a ľudia ňou trpiaci vidia naopak len v odtieňoch červenej a zelenej.

Posledným typom je monochromacia, veľmi zriedkavá porucha, indikujúca absenciu dvoch druhov farebných čapíkov. Monochromat – človek trpiaci touto poruchou vidí vlastne čiernobielo s určitým farebným posunom podľa toho, ktorý farbený čapík mu ostal. Podobná, tiež málo sa vyskytujúca je achromacia – úplná absencia farebných čapíkov. Človek touto poruchou postihnutý vníma len tyčinkami, je ochudobnený nielen o vnem farby, ale aj o ostrosť a jas videnia.

## **1.7 Farebný priestor**

Z približnej definície farby uvedenej začiatkom predošlej kapitoly vieme, že farbu väčšinou definujeme nepriamo ako psychologický vnem s tromi komponentmi. Či už sú tieto charakteristické údaje o farbe v zložení: odtieň, jas a saturácia, alebo iné číselné alebo inak exaktne vyjadriteľné parametre, vytvárame z nich štruktúry a tak popisujeme rôzne farebné priestory. Farebný priestor si môžeme pripodobniť štandardnému vektorovému priestoru, ktorého osi sú vlastnosti alebo komponenty farby.

Pojem farebného priestoru sa často stotožňuje s farebným modelom, čo je abstraktný matematický model reprezentujúci farby ako štruktúry s tromi niekedy štyrmi číselnými parametrami vystihujúcimi komponenty farby. V skutočnosti ale pojem farebného priestoru zahŕňa nielen štruktúru, ale aj mapovaciu funkciu do absolútneho farebného priestoru. Napríklad existuje niekoľko farebných priestorov definovaných na báze RGB modelu.

*Absolútny farebný priestor* je taký priestor, v ktorom je perceptuálny rozdiel medzi farbami vyjadrený vzdialenosťou medzi konkrétnymi bodmi reprezentujúcimi dané v tomto farebnom priestore. V takomto farebnom priestore je každá farba jednoznačná, teda jasne definovaná bez odvolávania sa na externé faktory.

Farebný priestor charakterizuje jeho gamut, čo je množina všetkých jeho farieb.

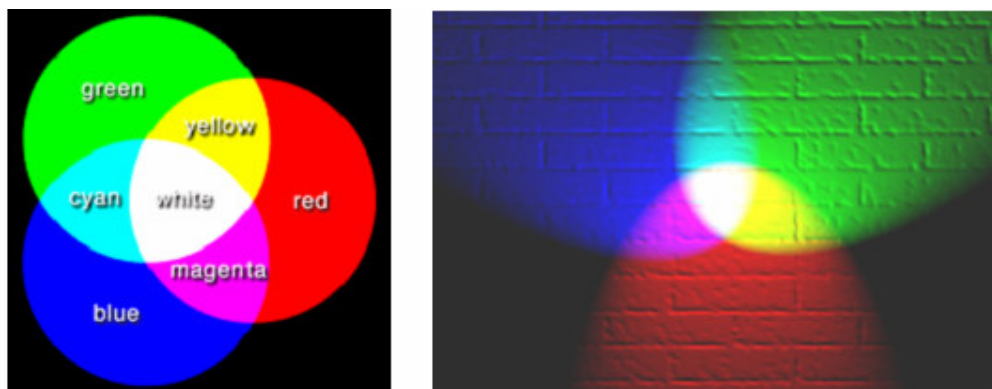
Farebné priestory môžeme v princípe definovať aj bez použitia farebného modelu. Takéto priestory si môžeme predstaviť ako množiny mien a čísel, definovaných na základe existencie korešpondujúcej množiny existujúcich farebných vzoriek.

Farby pozorovateľné voľným okom najlepšie definujú najobširnejšie farebné priestory CIELAB a CIEXYZ (kapitola 2.5, 2.6), ktoré sú ale príliš komplexné na bežné používanie. S počítačmi, resp. informačnými technológiami sa najčastejšie spája farebný model RGB interpretovaný rôznymi spôsobmi. Pri papierovej tlači sa zas využíva CMYK (viď kapitola 1.8 a 2.2)

## 1.8 Miešanie farieb

Vo všeobecnosti rozlišujeme z hľadiska miešania farieb dva princípy. Je to aditívny a subtraktívny systém. Oba tieto farebné princípy popisujú miešanie farieb a v prvom rade prístup k množine základných farieb – červenej, zelenej, žltej, modrej, bielej, čiernej a mimospektrálnej fialovej (magenta) a tyrkysovej (cyan).

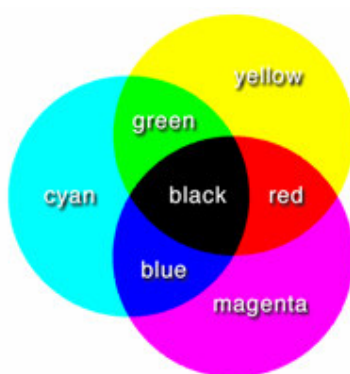
**Aditívny farebný model** funguje na princípe miešania troch základných farieb spektra – červenej, zelenej a modrej. Ako vieme, spojenie všetkých spektrálnych farieb dáva biele svetlo. Takto potom prienik troch základných farieb, resp farebných svetiel tejto sústavy vie vygenerovať nie len bielu farbu, ale aj zvyšné základné farby: žltú ako prienik červenej a zelenej, fialovú ako prienik červenej a modrej a tyrkysovú ako prienik modrej a zelenej. Absencia svetla v tejto farebnej sústave znázorňuje čiernu. Takéto spájanie je založené na skladaní frekvencií svetelných zdrojov, práve preto sa tento systém volá aditívny. Postupným skladaním dostaneme najsvetlejšie – biele svetlo. Tento systém síce svojím spôsobom alebo princípom korešponduje s našou percepčnou sústavou, no z fyzikálneho hľadiska bežne nefunguje. Dôležitým faktorom percepcie farby objektov sú totiž farebné vlastnosti jeho povrchu, od ktorých sa odvíja svetlo, ktoré objekt odráža zodpovedné za jeho farbu. Napriek tomu si tento model našiel široké uplatnenie pri elektronických zariadeniach ako monitory počítačov, televízne obrazovky alebo všeobecne pri osvetľovaní tmavých scén, napríklad v divadle.



Obrázok 5. Ilustrácia aditívneho miešania farieb

Ilustračný obrázok ukazuje miešanie farieb aditívnym spôsobom, obrázok na pravo zjavne úspešný pokus o takéto miešanie farieb v praxi. Obrázky prevzaté z [11], [12].

**Subtraktívny farebný model** pracuje na opačnom princípe ako aditívny. Najlepším príkladom tohto modelu sú tlačene farby, ktoré vidíme na bielom papieri. Farbu tohto modelu potom tvorí žiarenie tých frekvencií, ktoré nie sú povrchom absorbované. Ak teda nakreslíme nejaký farebný útvar na biely papier, bude tá časť papiera odrážať svetlo farby, ktorou sme objekt nakreslili. Čím viac farieb spojíme, tým tmavšia farba vznikne, pretože sa pridá ďalšia frekvencia do spektrálnej kompozície odrážaného svetla. Napriek tomu, že dochádza k „pridávaniu frekvencií“, vlnová dĺžka odrazeného svetla sa miešaním farieb zväčšuje. Tomuto modelu hovoríme subtraktívny preto, lebo každá farba odráža jej príznačné svetlo a absorbuje žiarenie iných frekvencií. Subtraktívny farebný model funguje s opačnými, svetlejšími základnými farbami, a to so žltou, tyrkysovou a svetlou fialovou (magenta). Ich zmiešaním po pároch vzniká červená, zelená a modrá. Kompletným zmiešaním týchto základných farieb žiaľ nemôžeme dostať čiernu, len niečo, čo sa na ňu podobá. Preto sa pri tlačením nepoužíva systém CMY ale CMYK, kde sa pridáva samostatná čierna farba.

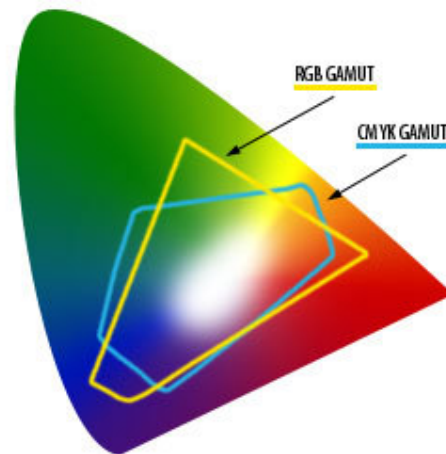


**Obrázok 6. Ilustračný obrázok subtraktívneho miešania farieb**

Ilustračný obrázok prevzatý z [12].

Aditívny model miešania farieb sa úzko viaže s RGB farebným modelom, subtraktívny zase s modelom CMY alebo CMYK. Tieto dva modely sú najjednoduchšie a najbežnejšie používané farebné modely. Napriek tomu zachytávajú relatívne ochudobnelú časť viditeľných farieb, napríklad v porovnaní s CIELAB. Približné zobrazenie gamutov RGB a CMY kódovania na farebný diagram 1931 CIE, reprezentujúci celý gamut ľudskej percepcie ukazuje, ako oba modely zaostávajú v zobrazovaní pozorovateľných farieb a ako sa ich rozsahy líšia.

Presné rozsahy týchto kódovaní tiež závisia na zariadení (monitor, scanner, farebná tlačiareň), ktoré môže mať vlastný farebný gamut. Podobne vidno rozdiely aj pri papierových médiach aj napriek tomu, že tlačiarenský priemysel má svoje štandardy. Pre rozdiely v gamutoch týchto dvoch farebných systémov vzniká mnoho problémov pri konfrontácii počítačovej grafiky a jej tlačeného výstupu.

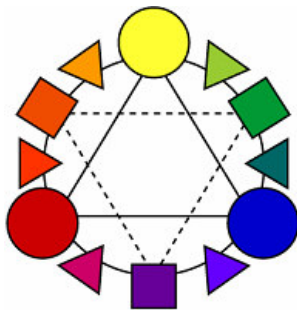


**Obrázok 7. Rozdiel v gamute farebných systémov RGB a CMY**

Obrázok ilustruje približné zobrazenie gamutov RGB a CMY kódovania na farebný diagram 1931 CIE. Obrázok bol prevzatý z [13].

## 1.9 Farebný kruh

Efektívna metóda zobrazovania základných farieb daného priestoru je pomocou farebného kruhu. Táto metóda zobrazuje farby v kruhu rozdelenom na príslušný počet častí s primárnymi farbami uprostred. Štandardný farebný kruh obsahuje 12 rozdielnych odtieňov bez vizuálnej informácie o saturácii alebo jase (teda čo najšýtejšie farby). Tieto základné odtiene môžeme rozdeliť do troch kategórií, na primárne, sekundárne a terciárne. Na základe primárnych farieb môžeme definovať celý farebný kruh, rozmiestnené rovnomerne po jeho obvode. Sekundárne sú rovnako vzdialené od primárnych a vznikajú ich zmiešaním vzhľadom na farebný priestor, ktorý tento kruh opisuje. Terciárne sú medzi primárnymi a sekundárnymi, vznikajú kombináciou primárnych so sekundárnymi. Oproti sebe sa nachádzajú farby, ktoré sú vzhľadom na danú schému doplnkové (teda opačné) a vedľa seba zas analogické.



Obrázok 8. Schéma farebného kruhu

Obrázok ukazuje rozloženie primárnych, sekundárnych a terciárnych farieb v umeleckom farebnom kruhu. Krúžok označuje primárnu, štvorec sekundárnu a trojuholník terciárnu farbu. Zdroj [16].

Poznáme tri bežné farebné kruhy a to umelecký, subtraktívny a aditívny. Umelecký používa ako základ červenú, modrú a žltú a používa sa na miešanie farieb na maľovanie. Subtraktívny farebný kruh má ako základné farby samozrejme tyrkysovú, žltú a magentu a používa sa pri tlači. Aditívny kruh má základnú červenú, zelenú a modrú a využíva sa najmä pri elektronike. Farby, ktoré táto sústava produkuje, nemôžu byť použité pri tlači, pretože sú príliš jasné. Farebné kruhy sa využívajú najmä v dizajne a pri výbere správneho farebného modelu.



Obrázok 9. Umelecký, subtraktívny a aditívny farebný kruh.

Obrázky prevzaté z [5].

## 2 FAREBNÉ MODELY A PRIESTORY

V nasledujúcej sekcii budeme popisovať vybrané známe farebné modely a z nich vytvorené farebné priestory, na báze definície farebného priestoru z kapitoly 1.7. Začneme všeobecnými farebnými modelmi a skončíme pri najzložitejších farebných priestoroch, vytvorených Medzinárodnou komisiou pre ilumináciu (International Commission on Illumination – CIE). Faktografia tejto sekcie sa opiera o zdroj [17] – [32]

### 2.1 RGB model

Jeden z najčastejšie používaných modelov je farebný model alebo štandard RGB. Je to aditívny model, ktorého celý gamut je vyprodukovaný rôznymi kombináciami červenej, zelenej a modrej. (Princíp fungovania aditívneho miešania farieb je popísaný vyššie.) Vznik tohto modelu sa spája so vznikom a vývinom CRT (cathode ray tubes) obrazovky, ktorá funguje na princípe aditívneho vytvárania obrazu v RGB sústave.

Parametre – červená, zelená a modrá, nie sú v modeli určené presne, spektroskopicky, preto nie sú farby definované presne ale relatívne. Keď dôjde k stanovaniu presných hodnôt pre tri primárne farebné zložky, stáva sa model absolútnym farebným priestorom. Pri RGB modeli sú jeho najznámejšími adaptáciami sRGB a AdobeRGB, pričom AdobeRGB má zreteľne väčší gamut.

Hustota farebného priestoru opísaného RGB modelom, respektíve jeho gamutu závisí od implementácie modelu. Najbežnejšia je 24-bitová implementácia, pri ktorej na každú farebnú zložku pripadá 8 bitov, teda 256 rôznych úrovní, hodnôt danej zložky. Každý farebný priestor založený na 24-bitovom RGB modeli má potom presne stanovený gamut -  $256 \times 256 \times 256 \approx 16.7$  miliónov farieb. Niektoré implementácie používajú na vyjadrenie jednej zložky 16 bitov, z čoho vyplýva zväčšenie hustoty diskretných farieb, no nie rozsahu daného priestoru. Využíva sa to pri práci alebo porovnávaní s „hustejšími“, zložitejšími farebnými systémami. Podobne to platí aj pre iné farebné systémy stvorené na základe RGB modelu s rôznou bitovou hĺbkou (bit depth). Napríklad 16-bitový Highcolor systém s piatimi bitmi na jednu farbu alebo najbežnejšie používaný 32-bitový systém. Tento na rozdiel od predošlého pracuje takmer rovnako ako 24-bitový s tým, že zvyšných 8 bitov sa používa kvôli lepšej

kompatibilita s hardwarom. Najkvalitnejší je 48-bitový systém, niekedy nazývaný aj 16-bitový, pretože kóduje každú jednu zložku 16-bitmi. Používa v profesionálnych programoch (napríklad v Adobe Photoshop) používajúcich na úpravu obrazu viacero zložitých filtrovacích algoritmov.

## **2.2 CMYK model**

CMYK – cyan, magenta, yellow, and key (Black) – sú komponenty tohto farebného modelu. Je to subtraktívny farebný model, najviac využívaný pri tlači. Ako sme už spomenuli vyššie, subtraktívny princíp miešania farieb pracuje na základnom fakte, že svetlo odrážané nafarbeným povrchom nesie jeho farbu preto, že nafarbený materiál (pri tlači väčšinou papier) pohlcuje tú časť farebného spektra dopadajúceho svetla, ktorá nevystihuje nanosenú farbu. (Viac v kapitole o subtraktívnom miešaní farieb, vyššie.)

Podobne ako z RGB aj z tohto modelu existuje mnoho odvodených farebných priestorov pre rôzne sady atramentov a charakteristík tlače.

## **2.3 HSV a HSL modely**

HSV/HSB, hue (odtieň), saturation (saturácia), value/brightness (jas) alebo lightness/luminance (svetlosť) pri HSL modeli, sú tri parametre vystihujúce farbu tak, ako si ju prirodzene predstavujeme, teda na základe odtieňa, saturácie a jasu alebo svetlosti. Základný rozdiel medzi týmito dvoma modelmi je v poslednom parametri, ktorý sa môže na prvý pohľad javiť rovnaký. V skutočnosti pojem jasu poukazuje na jasnosť farby a svetlosť zas hovorí o vlastnosti materiálu.

Oba tieto farebné systémy sú odvodené od RGB modelu a teda sú podmienené farebným priestorom vytvoreným z RGB modelu, z ktorého sú vytvorené. Tiež ich môžeme popísať ako nelineárne deformácie farebnej RGB kocky, pričom HSV možno graficky znázorniť ako farebný kužeľ a HSL ako dvojité kužeľ, dvojité hexagonálny kužeľ alebo guľu.

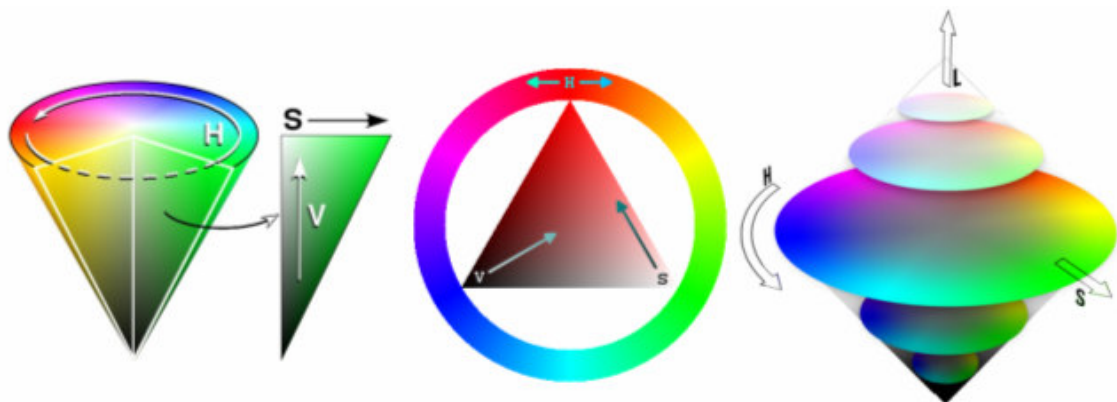
Oba modely obvykle používajú rovnaký rozsah farebných odtieňov udávaných v stupňoch, čo už možno intuitívne vystupuje z kruhového alebo kruhovitého tvaru ich zobrazení. Bežne používaná stupnica nápadne pripomína farebné spektrum, no obsahuje aj najdôležitejšie mimospektrálne farby – cyan (zelenomodrá) a magenta (svetlá fialová).



Saturácia, alebo intenzita farby sa meria v percentách, pričom 0 znamená absenciu farby a 100% zas farbu s maximálnou intenzitou. Aj pri tomto komponente sa prejavuje rozdiel medzi HSL a HSV. Pri HSL modeli prechádza saturácia vždy od úplne saturovanej farby k ekvivalentnej šedej. Naopak pri HSV, pri maximálnej hodnote parametra jas (value), prechádza saturácia od plne intenzívnej farby ku bielej, čo nepôsobí príliš intuitívne. Ekvivalentný odtieň šedi teda musíme modelovať nielen pomocou saturácie ale aj pomocou jas (value) farby.

Posledný komponent, či už je to jas (brightness/value) alebo svetlosť (lightness), sa tiež meria v percentách, pričom nula vždy značí čiernu. Praktický rozdiel medzi dvoma podobnými kódovaniami sa objavuje aj pri tejto zložke. V HSL totiž svetlosť pokrýva celý rozsah od čiernej až po bielu (100%) s možnosťou dosiahnuť plnú intenzitu farby v strede. Pri HSV modeli možno komponent jas pri maximálnej saturácii nastaviť len na polovičnú úroveň – od čiernej po maximálne saturovanú farbu. Bielu farbu v tomto modeli môžeme potom nájsť len na jednom mieste, pri maximálnom jase a minimálnej saturácii.

Oba farebné systémy HSV aj HSL sa bežne používajú v počítačových grafických aplikáciách, práve pre ich názornosť a jednoduchosť. Dôležitým faktom ostáva, že tieto modely sú len transformáciou RGB modelu a teda majú v prevedení na farebný priestor rovnaký gamut ako priestor odvodený od RGB modelu.



**Obrázok 10. Porovnanie HSV a HSL modelu**

Vizualizácia HSV modelu vpravo v porovnaní s HSL modelom vľavo. Útvar vpravo znázorňuje výber farby v HSL systéme, kde sa po kružnici vyberá farba, smerom do stredu klesá saturácia a od hora dole klesá svetlosť. V strede je najčastejšie zobrazenie HSV modelu v praxi, kde si možno vybrať požadovaný odtieň na kruhovej palete a doladiť ho pomocou trojuholníka znázorňujúceho pomery medzi všetkými troma komponentmi. Zaujímavé je, že aj z tohto príkladu je jasné, že bielu farbu možno dosiahnuť len na základe kombinácie dvoch komponentov. Pri takomto kruhovo - trojuholníkovom zobrazení, najčastejšie prezentovanom užívateľovi, v konečnom dôsledku na výbere z týchto dvoch reprezentácií nezáleží. Obrázky zo zdrojov [19], [21].

## 2.4 Trojzložkový farebný priestor

Ľudský percepčný systém používa trojzložkový farebný priestor, ktorý si môžeme predstaviť ako trojrozmerný euklidovský priestor. V ňom sú osi  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , priradené trom druhom farebných receptorov, dlhovlnným ( $L$ ), stredno-vlnným ( $M$ ) a krátkovlnným ( $S$ ) čapíkom. Počiatočný bod  $(S, M, L) = (0, 0, 0)$  prislúcha čiernej farbe. Biela nie je v rámci tohto priestoru jasne definovaná, pretože sa skôr vzťahuje na požiadavku vyváženosti bielej (white balance) alebo na stav osvetlenia v priestore. Ľudský trojzložkový farebný priestor má tvar pokriveného kužeľa siahajúceho kvázi do nekonečna. V skutočnosti možno extrémnymi svetelnými intenzitami náš percepčný systém presaturovať ale aj poškodiť. K styku s takýmto extrémnym osvetlením pri bežných podmienkach vôbec nedochádza.

Najsýtejšie, resp. najviac saturované farby sa v tomto priestore nachádzajú na vonkajšom okraji. Zaujímavý je fakt, že v skutočnosti neexistuje hnedé alebo šedé svetlo, len oranžové a žlté svetlo s intenzitou nižšou ako v okolitých častiach fyzického priestoru, v ktorom sa pozorovateľ nachádza. Ľudský trojzložkový farebný priestor má charakter aditívneho miešania farieb. Pri miešaní farieb v tomto priestore sa skladajú vektory.

Miešanie farieb v ľudskom percepčnom systéme funguje na základe Grassmanovho zákona [22]. Ten hovorí, že ak je daná farba kombináciou dvoch monochromatických farieb (s jednou vlnovou dĺžkou), potom jej vnímaná hodnota, prevedená do farebného priestoru, je sumou hodnôt dvoch farieb, z ktorých vznikla.

Podľa Grassmanovho zákona možno postaviť všeobecný vzorec v rámci sústavy RGB:

$$\begin{aligned} R &= R_1 + R_2 \\ G &= G_1 + G_2 \\ B &= B_1 + B_2 \end{aligned} \quad , \text{ kde } (R_1, G_1, B_1) \text{ je vektor hodnôt prvej farby a } (R_2, G_2, B_2) \text{ vektor} \\ &\quad \text{koordinát farby druhej.}$$

Podľa tohto zákona vo všeobecnej podobe možno vyjadriť  $R$ ,  $G$ ,  $B$  koordináty danej farby pre konkrétnu spektrálnu hustotu energie (spectral power distribution)  $I(\lambda)$ , teda pri osvetlení s vlnovou dĺžkou  $\lambda$  a distribúciou energie  $I$ .

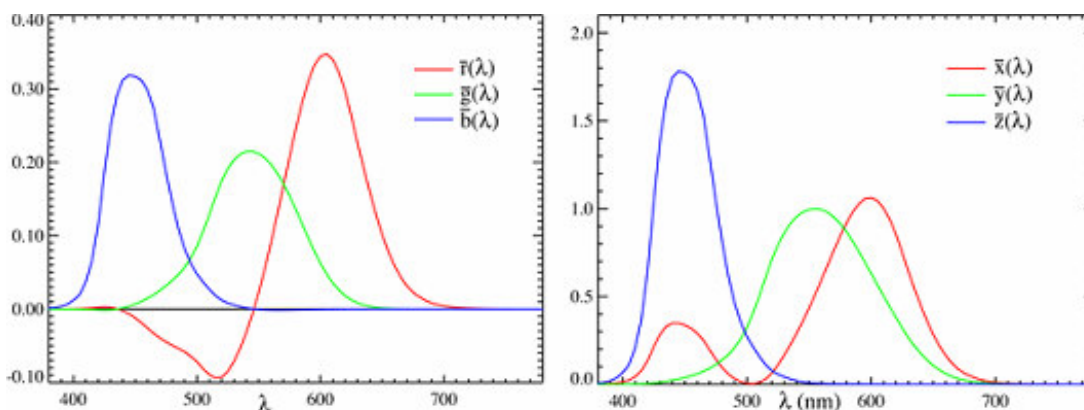
$$\begin{aligned} R &= \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda \\ G &= \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda \\ B &= \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad , \text{ kde } \bar{r}, \bar{g}, \bar{b} \text{ sú color matching functions (vid'. kapitola 2.5)}$$

## **2.5 CIE 1931 XYZ**

Jedným z prvých skutočných, matematicky definovaných farebných priestorov bol CIE XYZ, nazývaný aj CIE 1931, vytvorený Medzinárodnou komisiou pre ilumináciu (Commission Internationale de l'Eclairage) v roku 1931. Charakteristické pre tento farebný priestor je, že definuje svetelné žiarenie presne tak, ako sa nám javí v bežnom živote. Je váhovaný podľa schopnosti rozlišovania farieb bežného ľudského zraku a obmedzený spektrom žiarenia pozorovateľného ľudským okom. Tento systém, jeho zobrazenie a princíp stále slúži ako základ pre mnohé ďalšie farebné priestory.

Jeho predchodcom bol priestor CIE RGB založený na sadách experimentov D. Wrighta a J. Guilda z konca dvadsiatych rokov nášho storočia. Pomocou testov ľudského perцепčného systému na normálne vidiacich adeptoch boli trom parametrom (R,G,B), korešpondujúcim s našimi tromi druhmi farebných receptorov, priradené číselné hodnoty. Tieto testy spočívali v nastavovaní pomerov, resp. množstva farebného žiarenia pri aditívnom miešaní troch základných odtieňov – červenej, modrej a zelenej s nastaviteľnou úrovňou jasnosti, teda vlnovou dĺžkou ambientného svetla. Subjekt testu dostal vždy najprv farebnú vzorku – ukážku, ktorú potom použitím mechanického zariadenia namiešaval – „matchoval“ z farebných primitív (základných farieb).

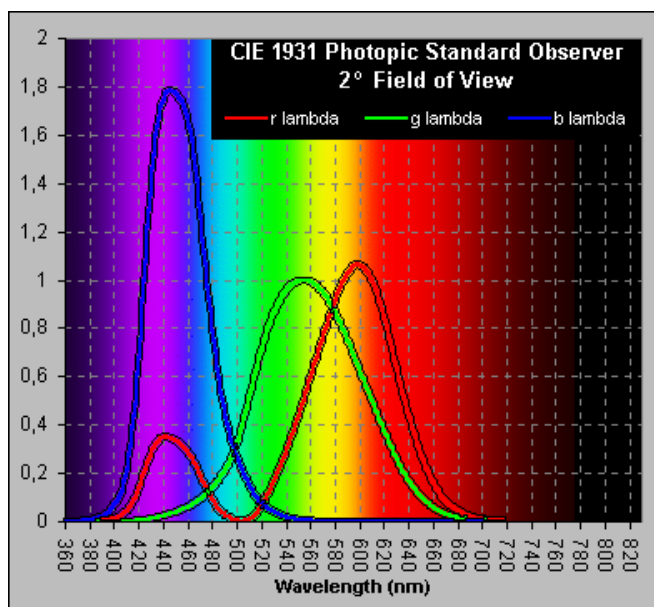
Takto namerané trojzložkové hodnoty s komponentmi označenými R,G,B pre množstvo zelenej, červenej a modrej farby, pri svetle určitej vlnovej dĺžky zabezpečili objektívne meranie a vyjadrenie farieb vnímateľných naším perцепčným systémom. Z priemerných hodnôt nameraných údajov boli vytvorené takzvané color matching functions. Tieto funkcie opisujú množstvá základných zložiek potrebných pre namiešanie monochromatickej primárnej testovacej farby pri osvetlení danej vlnovej dĺžky (horizontálna os v grafe na obrázku nižšie).



**Obrázok 11. Color matching funkcie pre CIE RGB a CIE XYZ**

Obrázok vľavo ilustruje rozloženie vlnových dĺžok vzhľadom na color matching funkcie CIE RGB systému. Všimnite si záporné hodnoty pre červenú farbu, ktoré znamenajú, že sa pridávala do pôvodnej testovacej vzorky vtedy, keď bolo počas pozorovania zjavné, že adept nedokáže namiešať požadovanú testovaciu vzorku a teda bolo treba naopak prispôsobiť vzorku podľa nameranej – testovacím subjektom namiešanej farby. Pre porovnanie, obrázok vpravo ukazuje štandardizované výsledky farebných testov - color matching funkcie takzvaného „CIE1931 štandardného pozorovateľa pri dennom svetle“, v rozsahu 380 nm a 780 nm s 5nm širokým intervalom. Obrázky prevzaté z [23]

CIE založilo nový farebný priestor na tomto systéme s rozdielom alebo určitým posunom. Rada sa totiž rozhodla, že matchovacie funkcie nemôžu nadobúdať záporné hodnoty, preto došlo k úpravám. Parametre tohto systému dostali označenie X,Y,Z. Farebný priestor CIE XYZ je lineárnou transformáciou CIE RGB priestoru.



**Obrázok 12. Citlivosť ľudskej farebnej percepcie, štandard CIE**

Graf na obrázku ilustruje spektrálnu citlivosť ľudskej farebnej percepcie vzhľadom na štandardného pozorovateľa pri dennom svetle pri CIE 1931 modeli, pre farebné diely o šírke 2 stupňov vizuálneho poľa. Ilustračný obrázok prevzatý z [24].

Zámerom CIE bolo prezentovať trojrozmerné vyjadrené farby pomocou dvojrozmernej farebnej mapy, podobne ako sa to už od pradávna robí v geografii. Z troch nameraných hodnôt – X,Y,Z boli odvodené tri ďalšie parametre x,y,z ako podiel príslušnej hodnoty a všetkých ostatných hodnôt, napríklad  $x = \frac{X}{X+Y+Z}$ . Prenosom trojice skutočných hodnôt na parametre x,y,z, ktoré po sčítaní dávajú 1, docielili autori to, že tento systém stačí definovať len pomocou dvoch parametrov. Dôležité je tiež, že pomocou týchto súradníc možno lokalizovať takzvaný biely bod (bielu farbu) ako úplný stred, teda  $x = y = z = 1/3$ . Diagram farebného priestoru CIEXYZ obsahuje len koordináty x,y ako vertikálnu a horizontálnu os a neobsahuje z, ktoré si vždy možno dopočítať ako  $z = 1 - x - y$ .

Color matching functions pre tento priestor sú odvodené podľa všeobecného Grassmanovho zákona:

$$X = \int_0^{\infty} I(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda$$

$$Y = \int_0^{\infty} I(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda, \text{ kde } \bar{x}, \bar{y}, \bar{z} \text{ sú color matching functions.}$$

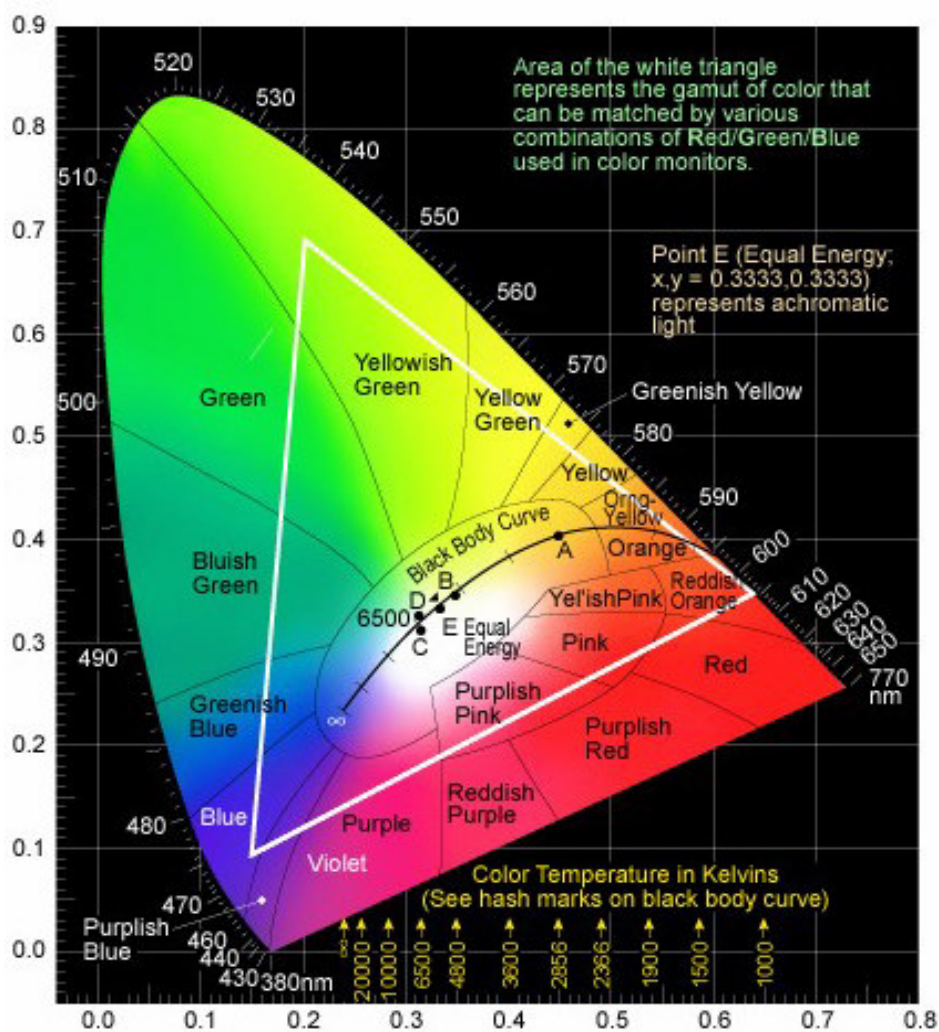
$$Z = \int_0^{\infty} I(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda$$

Matching funkcia pre  $\bar{y}(\lambda)$  je rovná funkcii dennej svetelnej účinnosti  $V(\lambda)$  pre štandardného pozorovateľa pri dennom svetle, definovaného medzinárodnou komisiou. Táto funkcia opisuje zmeny vnímaného jasú vzhľadom na vlnovú dĺžku.

Zmes dvoch farieb vyjadrujeme na CIE 1931 diagrame pomocou rovnej čiary, spojnice vlnových dĺžok vystihujúcich dané dve farby. Keďže sa rozsah vlnových dĺžok medzi 770nm a 450nm považuje za viditeľné spektrum, voláme tieto pozície na grafe spectrum loci (spektrálne polohy). Celú túto spojnicu môžeme považovať za ohraničenie zmesi daných dvoch farieb v rôznych pomeroch, pričom každý jeden bod tejto spojnice určuje konkrétnu farbu.

Rozsah číselných hodnôt parametrov X, Y, Z priestoru CIE 1931 je pre každú koordinátu iný. Parameter X sa pohybuje v rozmedzí od 0 do 95.047, Y od 0 do 100.000 a Z od 0 do 108.883.

Najväčším problémom farebného systému CIE 1931 je, že neposkytuje priamy spôsob na vyjadrenie perceptuálnych rozdielov medzi farbami. Vzdialenosť v tomto diagrame by totiž za optimálnych podmienok mala vyjadrovať stupeň odlišnosti daných dvoch farieb. K takémuto presnejšiemu vyjadreniu farebného priestoru sa CIE priblížila vo svojom ďalšom farebnom priestore CIE L\*u\*v\*, nahradenom novším CIE L\*a\*b\*.



**Obrázok 13. Chromatický diagram CIEXYZ**

Obrázok ilustruje farebný chromatický diagram CIEXYZ, vystihnutý len približne, pretože gamut monitora, na ktorom toto zobrazenie sledujeme, je obmedzený. Všimnite si, že zobrazenie CIE priestoru má tvar podkovy alebo jazyka, rovnaký tvar dáva aj viditeľné spektrum, ak je zobrazené v xy grafe. Ilustračný obrázok bol prevzatý z [24].

## 2.6 CIE 1976 $L^*a^*b^*$

Farebný priestor CIELAB je ideálny prostriedok na vyjadrenie farebného modelu najbližšieho k ľudskej percepcii, nezávislého na zariadení, na účel referenčného použitia. Jeho gamut (mohutnosť množiny farieb) je väčší ako gamut počítačových monitorov, tlačiarňí, dokonca aj ľudskej vizuálnej percepcie, preto ho žiaľ nemožno ani správne zobrazit'. Tento model sa svojej popularite teší už dlhú dobu a stále sa často využíva.

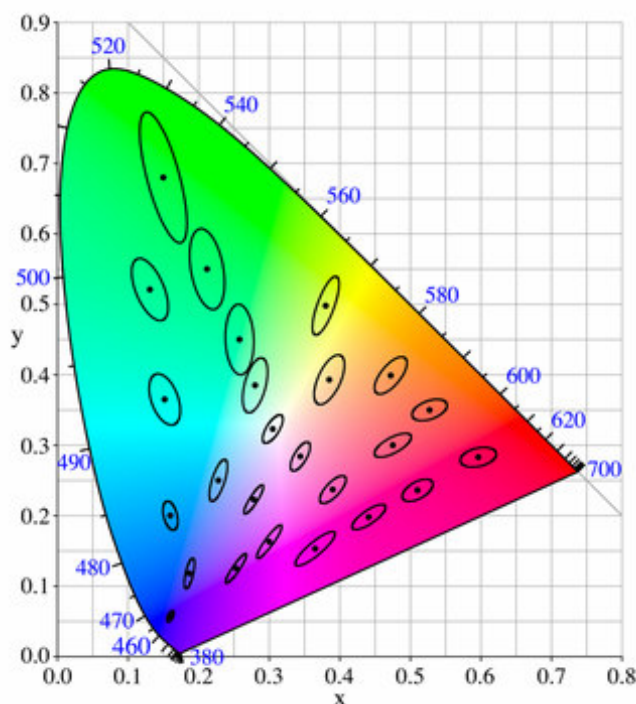
Vo všeobecnosti je farebný priestor Lab založený na Opponent Process teórii vnímania farieb (teda potvrdzuje existenciu základných doplnkových farieb, ktoré miešaním dávajú neutrálne). Ďalšou jeho charakteristikou je, že miesto XYZ farebných súradníc používa podobne ako farebné systémy HSL a HSV prirodzenejší spôsob vyjadrovania farieb a to pomocou farebných odtieňov a svetlosti. Prvý komponent  $L$  zastupuje jas farby (luminance), komponenty  $a$  a  $b$  vyjadrujú patričný odtieň dvojrozmerným spôsobom na základe dimenzií opačných farieb a sú odvodené z nelineárne komprimovaných súradníc priestoru CIEXYZ. Tento farebný priestor možno vyjadriť jednoduchými vzorcami XYZ priestoru, no súčasne je viac perceptuálne lineárny, takže sú na ňom adekvátne zobrazené akékoľvek zmeny vo farebných hodnotách.

Rozsah komponentu  $L$ , resp  $L^*$ <sup>3</sup> jasnosti farby, začína pri nule, čo symbolizuje čiernu a končí podobne ako v Munsellovom systéme (viď kapitola 2.7) hornou hranicou a to pri hodnote 100, ktorá indikuje bielu farbu. Parameter  $a^*$  hovorí o pozícii farby medzi dvoma takmer opačnými farbami – zelenou a magentou (bledou fialovou), pričom negatívne hodnoty tohto parametra indikujú zelenú a pozitívne zase magentu. Podobne parameter  $b^*$  tvorí rozhranie medzi modrou –v negatívnych hodnotách a žltou – v pozitívnych. Hodnota parametrov  $a^*$  a  $b^*$  sa pohybuje (bežne) v rozmedzí -128 až +128. Všimnite si, že systém navrhnutý takýmto spôsobom, skutočne korešponduje s teóriou opozičných procesov, pretože takto nemožno nikdy namiešať zelenkastú červenú alebo žlto-modrú farbu. V bode, v ktorom sú koordináty  $a^*$  a  $b^*$  na nule, sa nachádza takzvaný šedý bod, neutrálny bod zastupujúci odtiene šedej.

---

<sup>3</sup> Označenie CIEL\*a\*b\* s hviezdikami sa používa špeciálne pre tento farebný priestor pre odlíšenie tohto systému a jeho parametrov od veľmi podobného farebného priestoru „Hunter 1948 L, a, b“, o ktorom táto práca ale vôbec nepovedáva.

Farebný priestor CIELAB je založený priamo na CIE 1931 XYZ, aj keď to možno a prvý pohľad nie je zrejmé. Farebné hodnoty CIELAB priestoru sú z jeho predchodcu odvodené na základe princípu MacAdamových elíps. MacAdamova elipsa [26] je oblasť farebného diagramu obsahujúca všetky farby, ktoré sú bežným okom navzájom nerozlíšiteľné. Takéto elipsy potom definujú koncept vzdialenosti vo farebnom priestore, ktorý je dôležitý pre CIELAB model.



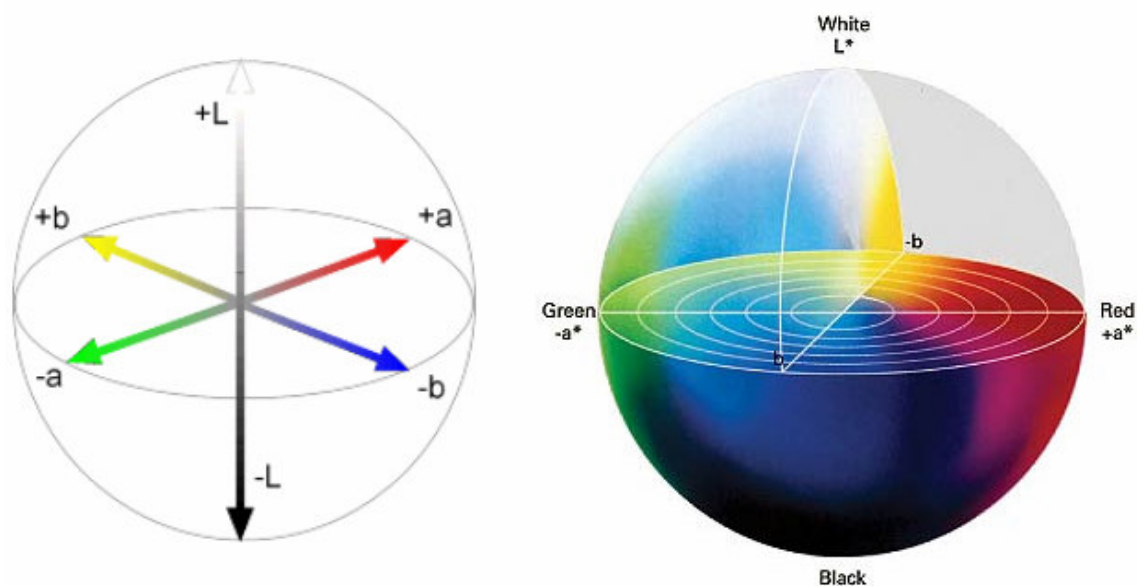
**Obrázok 14. Približná vizualizácia MacAdamových elíps na CIEXYZ**

Vizualizácia MacAdamových elíps na CIE 1931 XYZ farebnom xy-diagrame. Elipsy sú zobrazené 10-krát väčšie ako v skutočnosti. Zdroj obrázku [26].

Nelineárne vzťahy medzi troma komponentmi tohto farebného systému sú vytvorené tak, aby napodobňovali logaritmické reakcie ľudského oka. Narozdiel od CIE XYZ je tento systém závislý od stanovenia bieleho bodu (white point). Kým nie je tento údaj stanovený, nemôže tento priestor definovať absolútne farby. Bežne sa však biely bod určuje podľa štandardu vzhľadom na systém, resp. aplikáciu, ktorá tento farebný priestor používa. Napríklad pri bežnom grafickom software (napr. Adobe Photoshop) sa najviac používa norma CIE standard illuminant D50. Vyjadrenie perceptuálnej vzdialenosti dvoch farieb, pre tento model tak dôležité, možno vypočítať ako Euklidovskú vzdialenosť medzi dvoma trojicami  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  súradníc, reprezentujúcich 2 farby v tomto priestore. Tejto vzdialenosti sa v rámci CIELAB priestoru hovorí  $\Delta E$  (alebo presnejšie  $\Delta E^*_{ab}$ ).

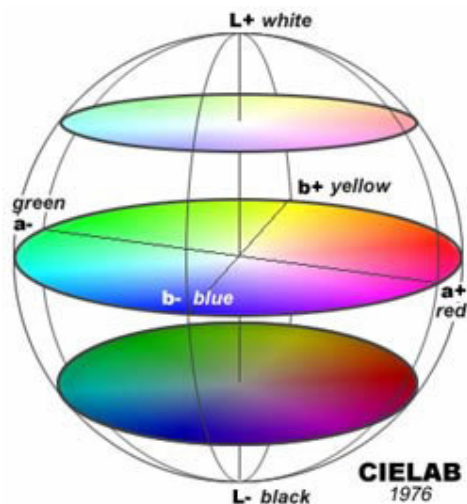


Farebný priestor CIELAB možno znázorniť viacerými spôsobmi, obvykle však dominuje kruhový tvar možných farebných odtieňov. Zobrazuje sa ako guľa s tromi na seba kolmými osami reprezentujúcimi jeho koordináty. Tiež sa zvykne zobrazovať čiastočne, pre jednu alebo viac hodnôt parametra jasu  $L^*$  ako kruh, niekoľko kruhov na osi  $L^*$ , výsek z gule a podobne.



Obrázok 15. Zobrazenie CIELAB osí a celej gule

Ilustračné obrázky boli prevzaté z [27], [28].



Obrázok 16. Zobrazenie CIELAB priestoru pri troch hodnotách jasu.

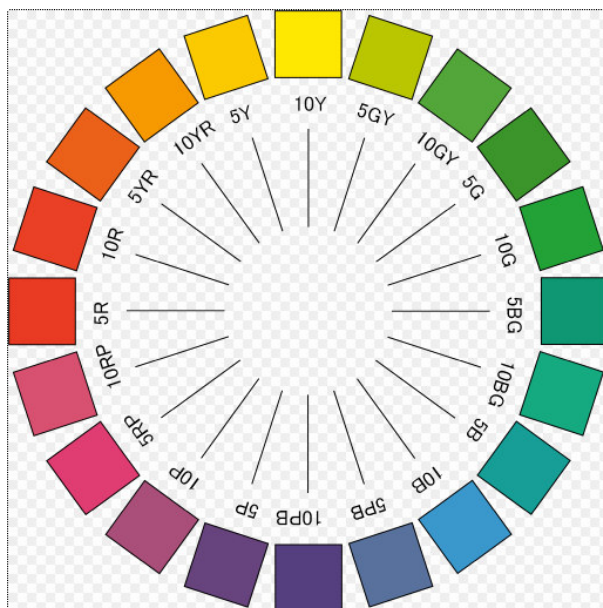
Obrázok prevzatý z [29].

## 2.7 Munsellov farebný systém

Tento farebný priestor budeme spomínať ako jediný príklad komerčného farebného priestoru, pretože sa využíva v ďalšej časti tejto práce a to v testoch WCS popísaných v práci ďalej. Autorom tohto modelu z prvej polovice 20. storočia je Albert H. Munsell.

Základnými zložkami tohto modelu sú podobne ako pri HSL a HSV modeloch tri zložky prirodzene popisujúce farbu a to: odtieň, hodnota (svetlosť) a chroma, čo je parameter zhruba korešpondujúci so saturáciou. Podobne ako farebné priestory CIE, je aj tento založený na experimentoch s ľudskou vizuálnou percepciou. Farba v tomto priestore je jednoznačne popísaná tromi číslami – hodnotami troch parametrov.

Munsellov systém definuje päť základných farebných odtieňov – červenú, žltú, zelenú, modrú a fialovú. V druhom stupni definuje ďalších päť odtieňov, teda 10 základných odtieňov, z ktorých je každý ešte rozdelený na 10 podúrovní, čo dovedna dáva 100 číselných hodnôt pre rôzne farebné odtiene. Tieto odtiene sa najčastejšie zobrazujú na farebnom kruhu a platia pre ne rovnaké pravidlá ako pre štandardný farebný kruh (viď. kapitola 1.9). Doplnkové farby teda ležia na kruhu oproti sebe a aditívnym zmiešaním produkujú neutrálnu šedú rovnakej hodnoty, teda jas.

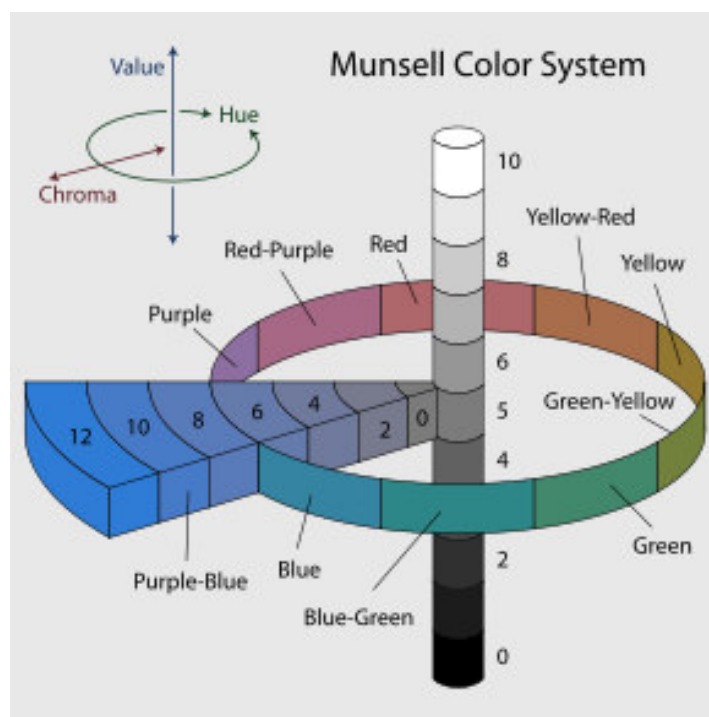


Obrázok 17. Prehľad základných Munsellových odtieňov vo farebnom kruhu

Obrázok prevzatý z [30].

Hodnota, alebo jas sa v zobrazení Munsellovho farebného priestoru mení vertikálne zdola nahor. Zaujímavé je, že má veľmi málo hodnôt, od nuly reprezentujúcej čiernu až po desiatku reprezentujúcu bielu.

Chroma, zobrazovaná po kružnici s hodnotami meniacimi sa smerom od stredu reprezentuje čistotu farby. Podobne ako pri saturácii, nízka hodnota parametra chroma znamená šedšiu a vysoká zas jasnejšiu farbu. Tento parameter nemá žiadne horné obmedzenie, maximálne dosahuje okolo 30 úrovní. Rôzne časti farebného priestoru majú rôzne maximálne hodnoty tohto parametra. Napríklad žlté farby majú viac rôznych hodnôt ako svetlá fialová, čo je podmienené povahou oka a fyzikálnymi vlastnosťami farebného stimulu.



**Obrázok 18. Vizualizácia fungovania Munsellovho farebného systému**

Munsellov farebný systém znázorňujúci kruh farebných odtieňov pri parametri value/hodnota rovnou 5, parametri chroma = 6, neutrálne hodnoty od 0 do 10 a rôzne hodnoty chromy fialovo-modrej farby s hodnotou 5. Ilustračný obrázok bol prevzatý z [30].

## 2.8 RGB konverzie farebných modelov

Nasledujúca kapitola sa bude zaoberať matematickými prevodmi súradníc vybraných farebných priestorov, konkrétne CMY/CMYK, HSL, HSV, CIEXYZ a CIEL\*a\*b\* na farebný model RGB. Táto časť úzko súvisí s programátorskou časťou bakalárskej práce, preto odporúčame čitateľovi bez záujmu o matematické pozadie, nech podľa vlastného uváženia prejde na ďalšiu kapitolu. Táto sekcia čerpá zo zdrojov [30] a [31] ako aj z materiálov uvedených v úvode do celej druhej kapitoly.

Dôležitým faktom pri týchto prevodoch je, že takmer každý farebný model prevedením do systému RGB stráca časť svojho gamutu a súčasne nemusí pokryť celý RGB priestor. Ako sme naznačili už v predošlých kapitolách o jednotlivých farebných modeloch, gamuty niektorých farebných modelov, napríklad CMY sa nezhodujú s gamutom RGB modelu alebo ho vysoko prevyšujú (v prípade farebných priestorov CIE). Naopak niektoré farebné modely, napríklad HSL alebo HSV, ktoré sú odvodené z RGB modelu musia mať zákonite aj rovnaký gamut. Všimnite si tiež, že momentálne demonštrujeme prevody farebných systémov v rozmedzí absolútnych farebných modelov, nie konkrétnych farebných priestorov.

### 2.8.1 CMY a CMYK

Pre konverziu CMYK na RGB a naopak, použijeme prostrednú hodnotu v rámci priestoru CMY. Farebné hodnoty budeme reprezentovať pomocou vektorov komponentov s hodnotami od 0.0 pre žiadnu a 1.0 pre plne saturovanú farbu. Potom

vektor  $t_{CMYK} = \{C, M, Y, K\}$  vystihuje hodnotu v CMYK,

vektor  $t_{CMY} = \{C', M', Y'\}$  vystihuje hodnotu v CMY

a vektor  $t_{RGB} = \{R, G, B\}$  vystihuje hodnotu v RGB.

Pri konverzii z CMYK na RGB najprv premeníme CMYK na CMY a ten potom na RGB. Princíp pri tejto konverzii je jednoduchý, tam kde sa v CMYK pridáva čierna farba, musia mať parametre C,M,Y maximálnu hodnotu. Potom pre komponenty CMY modelu platí

$$t_{CMY} = \{C', M', Y'\} = \{C(1 - K) + K, M(1 - K) + K, Y(1 - K) + K\}$$

a tiež platí  $t_{RGB} = \{R, G, B\} = \{1 - C', 1 - M', 1 - Y'\}$ ,

potom  $t_{RGB} = \{1 - (C(1 - K) + K), 1 - (M(1 - K) + K), 1 - (Y(1 - K) + K)\} = \{(1 - C)(1 - K), (1 - M)(1 - K), (1 - Y)(1 - K)\}$ .

Pri opačnej konverzií sa postupuje rovnako, teda  $RGB \rightarrow CMY \rightarrow CMYK$ , pričom sa opierame o základ, že  $t_{CMY} = \{C', M', Y'\} = \{1 - R, 1 - G, 1 - B\}$  a stanovíme hodnotu K ako minimum z hodnôt C', M' a Y'. Potom odčítame od všetkých ostatných komponentov hodnotu K a dostaneme výsledné hodnoty C, M a Y.

$$t_{CMYK} \{C, M, Y, K\} = \{C' - K, M' - K, Y' - K, K\}$$

## 2.8.2 HSV a HSL

Konverziu HSL na RGB možno rozčleniť na dva prípady podľa hodnoty parametra S. Pokiaľ je saturácia nulová, jedná sa o odtieň šedi a teda sú všetky RGB parametre rovnaké a rovné parametru L. V opačnom prípade postupujeme takto: majme farbu  $f = \{H, S, L\}$

Majme parameter  $Q = \begin{cases} L \cdot (1.0 + S), & \text{ak } L < 0.5 \\ L + S - (L \cdot S), & \text{ak } L \geq 0.5 \end{cases}$  a z neho parameter  $P = 2L - Q$ ,

Prevedieme parameter H na rozsah  $[0,1]$  –  $H_k = \frac{H}{360}$ . Pre konverziu odtieňa farby na RGB

použijeme ďalšie pomocné premenné:  $T_R = H_k + \frac{1}{3}$ ,  $T_G = H_k$ ,  $T_B = H_k - \frac{1}{3}$

A pre každé C = R,G,B upravíme hodnotu  $T_C = \begin{cases} T_C + 1.0 & \text{ak } T_C < 0 \\ T_C - 1.0 & \text{ak } T_C > 0 \end{cases}$

A pre každý komponent vektora farby  $f' = \{R, G, B\}$  platí:

$$C = \begin{cases} P + ((Q - P) \cdot 6.0 \cdot T_C), & \text{ak } T_C < \frac{1}{6} \\ Q, & \text{ak } \frac{1}{6} \leq T_C < \frac{1}{2} \\ P + \left( (Q - P) \cdot \left( \frac{2}{3} - T_C \right) \cdot 6.0 \right), & \text{ak } \frac{1}{2} \leq T_C < \frac{2}{3} \\ P, & \text{pre všetky ostatné prípady} \end{cases}$$

kde za C postupne dosádzame R, G, B a za  $T_C$  zas  $T_R$ ,  $T_G$ ,  $T_B$  a takto postupne získavame zložky farebného vektora.

Pre opačnú konverziu: majme farbu  $f = \{R, G, B\}$  a farbu  $f' = \{H, S, L\}$  a konštanty  $MIN$  a  $MAX$  pre najväčšiu a najmenšiu z hodnôt parametrov  $R, G, B$ , potom prevod medzi ich komponentmi je nasledovný:

$$H = \begin{cases} \text{nedefinované} & \text{ak } MAX = MIN \\ 60^\circ \cdot \frac{G - B}{MAX - MIN} + 0^\circ, & \text{ak } MAX = R \wedge G \geq B \\ 60^\circ \cdot \frac{G - B}{MAX - MIN} + 360^\circ, & \text{ak } MAX = R \wedge G < B \\ 60^\circ \cdot \frac{B - R}{MAX - MIN} + 120^\circ, & \text{ak } MAX = G \\ 60^\circ \cdot \frac{R - G}{MAX - MIN} + 240^\circ, & \text{ak } MAX = B \end{cases}$$

$$S = \begin{cases} 0 & \text{ak } L = 0 \text{ alebo } MAX = MIN \\ \frac{MAX - MIN}{MAX + MIN} = \frac{MAX - MIN}{2L}, & \text{ak } 0 < L \leq \frac{1}{2} \\ \frac{MAX - MIN}{2 - (MAX + MIN)} = \frac{MAX - MIN}{2 - 2L}, & \text{ak } L > \frac{1}{2} \end{cases}$$

$$L = \frac{1}{2}(MAX + MIN)$$

Veľmi podobný mechanizmus funguje aj pri prevádzaní HSV na RGB. Majme teda rovnakú farbu  $f = \{R, G, B\}$  a farbu  $f' = \{H, S, V\}$ . Pre výpočet  $H$  (Hue – odtieň) použijeme rovnaký vzorec ako pri HSL a  $S$  a  $V$  vyjadríme takto

$$S = \frac{MAX - MIN}{MAX} = 1 - \frac{MIN}{MAX} \quad \text{a} \quad L = MAX$$

Konverzia HSV na RGB je opäť podobná ako pri HSL s tým, že najprv musíme

rozanalyzovať hue:  $H_i = \left\lceil \frac{H}{60} \right\rceil \bmod 6$ , použijeme pomocný parameter  $f = \frac{H}{60} - H_i$

a parametre  $p = V(1 - S)$ ,  $q = V(1 - fS)$  a  $t = V(1 - (1 - f)S)$ .

Podľa hodnoty  $H_i$  stanovíme hodnoty parametrov  $R, G, B$  takto:

$$\text{ak } H_i = 0 \rightarrow \{R, G, B\} = \{V, t, p\}$$

$$\text{ak } H_i = 1 \rightarrow \{R, G, B\} = \{q, V, p\}$$

$$\text{ak } H_i = 2 \rightarrow \{R, G, B\} = \{p, V, t\}$$

$$\text{ak } H_i = 3 \rightarrow \{R, G, B\} = \{p, q, V\}$$

$$\text{ak } H_i = 4 \rightarrow \{R, G, B\} = \{t, p, V\}$$

$$\text{ak } H_i = 5 \rightarrow \{R, G, B\} = \{V, p, q\}$$

### 2.8.3 CIE XYZ a CIE L\*a\*b\*

Prevod niektorej z interpretácií všeobecného RGB modelu (sRGB, Adobe RGB, atď.) na priestor XYZ a naopak závisí od určujúcich vlastností, resp. parametrov daného XYZ priestoru. Tie sú tvorené farebnými xy koordinátami pôvodného RGB (CIE RGB) systému:  $(x_r, y_r)$ ,  $(x_g, y_g)$  a  $(x_b, y_b)$  a jeho referenciou bielej  $(X_w, Y_w, Z_w)$ . Potom môžeme pre konverziu RGB do XYZ použiť maticu o veľkosti 3 x 3. Vzor pre výpočet je nasledovný:

$$[X \ Y \ Z] = [R \ G \ B] [M], \text{ pričom } [M] = \begin{bmatrix} S_r X_r & S_r Y_r & S_r Z_r \\ S_g X_g & S_g Y_g & S_g Z_g \\ S_b X_b & S_b Y_b & S_b Z_b \end{bmatrix}, \text{ kde}$$

$$\begin{array}{lll} X_r = x_r / y_r & X_g = x_g / y_g & X_b = x_b / y_b \\ Y_r = 1 & Y_g = 1 & Y_b = 1 \quad \text{a tiež platí} \\ Z_r = (1 - x_r - y_r) / y_r & Z_g = (1 - x_g - y_g) / y_g & Z_b = (1 - x_b - y_b) / y_b \end{array}$$

$$[S_r \ S_g \ S_b] = [X_w \ Y_w \ Z_w] \begin{bmatrix} X_r & Y_r & Z_r \\ X_g & Y_g & Z_g \\ X_b & Y_b & Z_b \end{bmatrix}$$

Pri takejto konverzií musí tiež platiť, že hodnoty R,G,B musia byť lineárne v nominálnom rozsahu [0,0, 1,0], takže treba väčšinou hodnoty ešte predpripraviť, napríklad vydeliť 255. Hodnoty CIE RGB parametrov a súradníc bieleho bodu sú tabuľkovo dané CIE. Pre spätnú konverziu, teda XYZ na RGB možno použiť inverznú maticu – teda počítať s inverznou [M] maticou definovanou vyššie.

Na prevedenie tohto farebného priestoru na RGB priestor a naopak je nutné použiť ako medzikrok konverziu na XYZ a až potom previesť výsledok na RGB.

Transformácia L\*a\*b\* na XYZ:

$$\begin{array}{l} L^* = 116f(Y/Y_n) - 16 \\ a^* = 500(f(X/X_n) - f(Y/Y_n)), \text{ pričom } f(t) = t^{1/3} \text{ pre } t > 0.008856 \\ b^* = 200(f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)) \quad \text{inak } f(t) = 7.787t + 16/116 \end{array}$$

Kde  $X_n, Y_n$  a  $Z_n$  je trojica hodnôt pre biely bod. Rozdelenie správania sa funkcie  $f(t)$  pre dva obory hodnôt predchádza vzniku nekonečnej slučky pri hodnote  $t = 0$ . Opačná transformácia opäť vychádza z prvej a nepovažujeme za dôležité ju uvádzať.

## 3 FAREBNÉ KATEGÓRIE

### 3.1 Základy kategorizácie

Kategorizácia je proces, v ktorom narábame s rozličnými entitami ako s ekvivalentnými, pričom ekvivalenciou môžeme myslieť spoločnú vlastnosť alebo určenie, ktorému hovoríme kategória [33]. Tento proces je jedným zo základných a všadeprítomných kognitívnych aktivít. Dôležitosť kategorizácie spočíva najmä v tom, že nám umožňuje porozumieť a rozhodovať o objektoch a udalostiach v našom svete. Napriek tomu, že je možné vytvoriť obrovské množstvo kategorizačných schém, ľudstvo bezvýhradne používa len malý zlomok z nich [33]. Dôležité je teda zamyslieť sa nad tým, prečo používame práve tie kategórie, ktoré používame a čo viac nám ponúkajú oproti iným schémam. Túto základnú otázku možno položiť všeobecne, ale aj pri konkrétnych prípadoch – napríklad pri kategorizácii farieb.

Existuje viacero teórií hovoriacich o štruktúre kategórii. Najbežnejšia je predstava, že kategórie vytvárame na základe podobnosti. Táto teória nevyhnutne stojí na stanovení pojmu podobnosti a miery, podľa ktorej možno objekty prehlásiť podobnými na základe spoločných vlastností. Kameňom úrazu môže byť zlá formulácia kľúčového prvku – spoločnej vlastnosti alebo vlastností. Chybou v tomto kroku môžeme spojiť do jednej kategórie veci od seba vzdialené v mnohých ohľadoch tak, že určíme kritérium moc široké. Opačný problém môže byť pri poradí dôležitosti rozhodujúcich vlastností a tvorbe hierarchie medzi kategóriami. Zaujímavá je tiež otázka, či podobnosť vytvára kategórie alebo kategórie spôsobujú naše vnímanie podobnosti.

Dôležitým faktorom kategorizácie je tiež fakt, že vznik kategórií sa neviaže len na jeden princíp. Potvrdzuje to napríklad existencia hierarchií medzi kategóriami alebo aj samotné osvojovanie si našej schopnosti kategorizovať. Dieťa si postupne vytvára základné kategórie na báze fyzických pozorovaní. Dospelý jedinec už vie kategorizovať rýchlejšie, obširnejšie a abstraktnejšie. V poslednej dobe je populárny výskum vzniku kategórií z hľadiska kultúrnych či etnických rozdielov, ktorými sa zaoberá aj výskum farebných kategórií popísaný nižšie.



### **3.2 Kategorizácia farieb**

Kategorizáciu farieb možno rozčleniť na lexikálnu a perceptuálnu, ktoré spolu úzko súvisia. Lexikálna farebná kategorizácia spočíva v delení farebných vnemov na triedy korešpondujúce so symbolmi farebného sveta daného jazyka [33]. Perceptuálna zase triedi farby bez ohľadu na znalosť jazyka. Kategorizácia, vnímanie a rozlišovanie farieb je úzko spojené s ich pomenúvaním. Tu sa lexikálna a percepčná časť prelína. Konzistentne s teóriou lingvistickej relativity<sup>4</sup> sa často považujú farebné kategórie – teda mená základných farieb, ktoré sa človek naučí už počas útleho detstva, za základ pre rozlišovanie farieb.

Princíp kategorizácie farieb je okrem viazanosti na jazyk založený na rozdeľovaní podľa podobnosti. Každý jazyk má svoju množinu základných farebných pomenovaní, pod ktoré spadá celý gamut ľudským okom pozorovateľných farieb. Táto množina môže, ale nemusí byť pre každý jazyk špecifická. Rozdiely a podobnosti v základných farebných kategóriách sú predmetom rôznych výskumov a teórií. Východzou bola prvá veľká jazyková štúdia venujúca sa pomenovaniu farieb a ich kategórií z roku 1969 – Berlin and Kay: „Basic Color Terms: Their Universality and Evolution“ (Základné farebné pojmy: ich všeobecnosť a vývoj). Táto práca bola postavená na praktických meraniach, pri ktorých účastníci experimentu z 20 rôznych (civilizovaných) krajín pomenúvali určité množstvo farebných políčok s tým, že ešte pred začatím experimentu vymenovali množinu základných farieb – farebných kategórií vo svojom jazyku. Testy boli neskôr doplnené o údaje zo 70 písomných zdrojov a na tomto základe bola vytvorená ich teória. (Nasledujúci text čerpá z [34], [35], [1]).

Autori vo svojom výskume dospeli k záveru, že vo všetkých jazykoch existujú pre pomenovanie farieb univerzálne pravidlá, a že systém základnej farebnej terminológie má tendenciu vyvíjať sa v čiastočne ustálenom poradí. Podľa Berlina a Kaya existuje jedenásť základných farebných kategórií v troch triedach. Prvú triedu tvoria achromatické farby (čierna, šedá, biela). Druhú základné farebné pojmy (červená, zelená, modrá, žltá) založené na teórii opozičných procesov (viď. kapitola 1.4). Poslednú skupinu tvoria takzvané sekundárne farebné pojmy a tvoria ju farby: hnedá, oranžová, fialová, ružová.

---

<sup>4</sup> Hypotéza lingvistickej relativity je založená na predstave, že jazyk, ktorým človek rozpráva, ovplyvňuje spôsob jeho myslenia. Táto teória sa opiera o rozdiely v jazykoch najmä pri interpretácií zážitkov alebo skúseností a spojitosti medzi myšlienkami a týmito reprezentáciami.

Každá farebná kategória má svojich „dobrých a zlých reprezentantov“, teda konkrétne farby – hodnoty vyjadrené v nejakom farebnom priestore, ktoré danú kategóriu vystihujú viac alebo menej. V bežnej reči môžeme napríklad pomenovať farbu ako červenšiu alebo menej červenú. Dobrí reprezentanti farieb sú odtiene, ktoré si pamätáme, ľahko rozlišujeme a určujeme podľa nich farebné kategórie iných odtieňov.

Podľa štúdie Berlina a Kaya obsahuje každý jazyk pojem pre bielu a čiernu, ak je prítomná tretia farba, je to väčšinou červená alebo jej podobná farba. „Pridávanie“ ďalšej farebnej kategórie funguje v ustálenom poradí, podľa určitej dôležitosti farieb, s dôrazom na opačné farby (podľa teórie opozičných procesov) v poradí: zelená, potom modrá a žltá, potom hnedá, potom ostatné sekundárne farby a nakoniec šedá. Podľa množstva farebných kategórií boli zavedené určité stupne vývoja jazyka, začínajúce pri dvoch farebných kategóriách (čierna – biela alebo tmavá – svetlá) a končiace posledným štádiom s viac ako šiestimi kategóriami<sup>5</sup>.

Takto Berlin a Kay stanovili presné vzory pre vytváranie farebných kategórií. Kľúčovými nedostatkami tejto štúdie bolo nedostatočné štatistické testovanie a tiež jej zameranie sa len na industrializované spoločnosti s jazykom v písomnej forme. Spracovanie nameraných dát prebehlo skôr intuitívne<sup>6</sup> a teda ťažko z tejto štúdie potvrdiť, že jej výsledky sú skutočne univerzálne a medzinárodne aplikovateľné.

---

<sup>5</sup> Pri jazykoch „najvyspelejších“ kultúr možno nájsť až jedenásť, výnimočne dvanásť základných farebných pojmov. Medzi tieto farebno-početné jazyky patrí napríklad angličtina či nemčina ale aj japončina, kórejčina, bulharčina, dokonca domorodý juhoamerický jazyk zuni. Ruština a maďarčina majú dokonca 12 základných pomenovaní.

<sup>6</sup> V tejto práci skúmali 98 jazykov, z tých len 20 podrobnejšie. Subjektmi testu boli väčšinou ľudia ovládajúci aj iný jazyk (anglicky hovoriaci) a teda ich výsledky mohli byť aj takto skreslené.

### **3.3 World Color Survey**

World Color Survey alebo Svetová farebná štúdia je rozsiahly celosvetový výskum, ktorého hlavným cieľom bolo vytvorenie materiálu pre potvrdenie, vyvrátenie alebo modifikáciu výsledkov štúdie Berlina a Kaya. Boli v nej dôslednejšie testované skupiny probantov zo 110 nepísomných jazykov z neindustrializovaných spoločností. Cieľom tohto výskumu bolo potvrdiť, či sa termíny pre základné farby v rôznych jazykoch v rámci perceptuálneho farebného priestoru združujú (viac, než sa očakáva) a tiež to, či sa tieto zhľuky aspoň približne stotožňujú so staršími dátami. Ďalším cieľom bolo zistiť, či možno skúmané systémy pomenovania farieb rozdeliť do malého množstva rozdielnych typov, tvoriacich vývojovú postupnosť (navrhovanú univerzalisticky orientovanou prácou o pomenovaní farieb, napr. Kay a Maffi, 1999).

Rovnako ako Berlin a Kay, použilo aj WCS paletu takzvaných Munsellových čipov – vzorkovník farieb so 40 rôznymi proporčne rozdelenými Munsellovými odtieňmi s rôznym jasom (od bielej po čiernu) a maximálnou saturáciou. Oproti pôvodnému experimentu pridali ešte 10 vzoriek bez odtieňa (tóny šedej). Experiment teda obsahoval 330 farebných vzoriek jednak samostatne (sklenené priesvitky) a aj ako kompletnú paletu pre vyznačovanie najlepších reprezentantov. Pri výbere účastníkov sa kládol dôraz nielen na rôznorodosť v pohlaví, ale boli uprednostnení ľudia hovoriaci len jedným jazykom. Každá skupina mala obsahovať aspoň 25 účastníkov, čo sa takmer podarilo splniť, keďže priemerný počet bol 24.

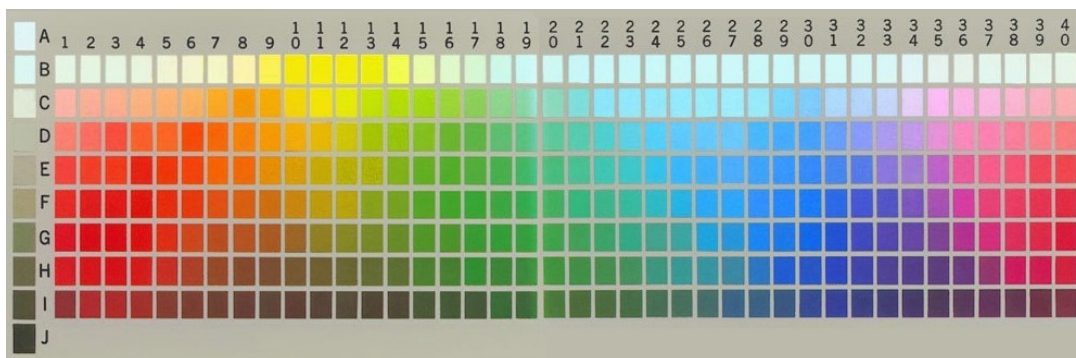
Starší experiment Berlina a Kaya spočíval v troch a experiment WCS v dvoch rôznych úlohách. Účastníci staršej štúdie boli v rámci prvej úlohy vyzvaní vymenovať bez zrakového stimulu slová, ktorými vo svojom jazyku pomenúvajú farby. Takto došlo k vytvoreniu množiny základných farebných pojmov – úzkej skupiny slov, pomocou ktorých vie subjekt pomenovať všetky ostatné farby.

V prípade WCS bolo v rámci prvej úlohy, takzvanej „naming task“, probantovi ukázaných 330 rôznych farebných čipov jeden po druhom v predpísanom náhodnom poradí – tie musel postupne pomenúvať. Účastníkom bolo zdôraznené, aby produkovali čo najjednoduchšie (najkratšie) pomenovania. Prvá úloha z BK štúdie sa teda preniesla na domáceho pracovníka, ktorý testy zabezpečoval. Ten vytvoril množinu základných farebných pojmov spracúvaním vymenovaných slov. Zaujímavé je, že pre nejasnosti v inštrukciách niektorí testovaní adepti

určili pre jedno políčko dve farebné kategórie, čo spôsobilo rozdiely vo výsledkoch. V prípade staršieho experimentu bola táto úloha v poradí druhou a spočívala obdobne v pomenovaní farieb, no na celej farebnej palete, čo mohlo na subjektu testu pôsobiť máťúco.

Oba výskumy zahŕňali rovnakú poslednú (tretiu resp. druhú) úlohu – výber takzvaných „foci“ – najlepších príkladov pre základné farebné pomenovania, ktoré adepti vyznačovali už na kompletnej palete. Takto boli stanovené farby vystihujúce konkrétnu farebnú kategóriu – najlepší reprezentanti.

Namerané dáta boli od začiatku merania v sedemdesiatych rokoch až do blízkej minulosti postupne spracúvané, opravované a digitalizované a v roku 2003 nakoniec zverejnené na internete. Databáza s výsledkami tohto výskumu sa skladá z jednoduchých textových súborov zaznamenávajúcich časti pozorovania – pomenúvajúcu úlohu, výber najlepších príkladov a osobné údaje o respondentoch. Keďže tieto súbory pracujú väčšinou s indexami a skratkami, ďalšou súčasťou musí byť súbor mapujúci skratky slov s konkrétnymi pojmami v danom jazyku a tiež súbor mapujúci index daného jazyka k jeho názvu.



**Obrázok 19. WCS testovacia paleta**

WCS mriežka s 330 farebnými políčkami, z ktorých každé reprezentuje jednu z vybraných 330 Munsellových hodnôt. Tie sú určené štyridsiatimi, svetovou organizáciou zvolenými odtieňmi (hue) s ôsmimi opäť vybranými stupňami jasnosti a maximálnou saturáciou. Dôležité je uvedomenie si rozdielu medzi kompletným Munsellovým farebným priestorom, ktorý má napriek intuitívnej predstave gamut väčší ako napríklad sRGB a touto paletou obsahujúcou len testovacie hodnoty. Tie boli zvolené ako farby (údajne) najlepšie popisujúce škálu farieb vnímateľných v reálnom svete. Na takejto mriežke uskutočňovali Berlin a Kay celý svoj experiment na rozdiel od výskumu WCS, pri ktorom bol tento „globálny pohľad“ použitý len pre určenie najlepších reprezentantov.

## 4 PRAKTICKÁ ČASŤ

Táto bakalárska práca je súčasťou väčšieho projektu zameraného na skúmanie možností reprezentácie kategórií, proces osvojovania si (konštruovania) kategórií a kategorizáciu [36]. V experimentoch sú typicky dva agenty - učiteľ a žiak. Oba agenty vnímajú scénu, ktorá sa mení v krokoch. (Scéna obsahuje učiacu vzorku, napr. rôzne objekty, tvary alebo farby). Agent učiteľ komentuje predkladané vzory, čo slúži ako vstup pre agenta žiaka. Učiteľom môže byť predprogramovaný agent alebo človek. Žiakom je agent vybavený algoritmami konštruovania a reprezentácie kategórií. Práve tieto algoritmy a ich použitie v konkrétnych úlohách sú predmetom výskumu. Neskôr, keď si žiak úspešne skonštruuje reprezentáciu kategórií, je možné učiteľa z experimentu odstrániť a pridať nového žiaka, ktorého učiteľom bude pôvodný, teraz už naučený, žiak [37].

Praktická časť bakalárskej práce je program spracúvajúci dáta zo štúdií Berlina a Kaya a WCS (získané zo zdroja [35]), generujúci učiacu vzorku základných farebných pomenovaní (kategórií) pre nadradený program širšieho výskumu popísaný vyššie. Pôvodné WCS dáta sú v tvare pseudotabuliek uložených v textových súboroch. Pre ich prepojenie a vygenerovanie testovacieho setu je nutné postupné prehľadávanie a vyberanie jednotlivých dát z rôznych častí tejto kvázi databázy, pretože rôzne údaje, či už hodnoty farebného priestoru alebo pomenovania farieb, sú uvedené vo všeobecných dátových súboroch, pričom najdôležitejší súbor obsahujúci výsledky „naming task“ úlohy (viď. kapitola 3.3) obsahuje už len indexy a skratky.

Vzorky generované programom vo forme textových súborov majú pevne stanovený vzor pre zápis základného farebného pomenovania (farebnej kategórie) a reprezentácie farebného priestoru. Tento jednoduchý software umožňuje užívateľovi zvoliť si typ výskumu – starší B&K alebo novší WCS, ďalej výber jazyka, z ktorého výsledkov sa budú generovať vzorky a nakoniec konkrétne poradové čísla účastníkov experimentov alebo ich ľubovoľný náhodný počet. Tiež je možné vybrať si farebné kódovanie, v ktorom sa budú výsledky ukladať – a to v kódovaní CIE L\*a\*b\* (obsiahnutom aj vo vstupných dátach), CIE XYZ, RGB, CMY, CMYK, HSV a HSL (viac o farebných kódovaniach, modeloch a priestoroch v kapitole 2).

Súčasťou celého programového balíčka je knižnica na počítanie prevodov medzi spomínanými farebnými priestormi, pričom konverzie sú vždy medzi vybraným kódovaním a RGB modelom, pretože ten je kľúčový pre počítačovú grafiku – vizualizáciu výsledkov, na ktorej budeme pracovať neskôr, v pokročilejšom štádiu výskumu (diplomová práca).

Implementácia programu prebehla v programovacom jazyku JAVA (Java 2 Platform, Standard Edition (J2SE) 1.4.2.) a obsahuje tri nezávislé celky (packages). Kľúčový je generátor učiacich vzoriek, ďalšou súčasťou sú triedy pre farebné prevody a triedy reprezentujúce užívateľské prostredie (GUI).

## **5 ZÁVER**

Farebné vnemy obklopujú ľudí počas celého života. Sú dôležitou súčasťou vizuálneho vnemu, teda kognitívnej vedy, ale aj estetiky, psychológie a iných odvetví. Kategorizácia farieb môže byť námetom pre výskum v informatike – v oblasti umelej inteligencie.

Ako sme uviedli už uviedli v tejto práci, vnímanie a pomenovávanie farieb a farebných kategórií je kultúrne špecifický fenomén. Práve kultúrna odlišnosť vnímania môže tvoriť zaujímavý podklad pre rôzne štúdie, či už na báze analýzy dát, ale aj ako materiál pre učenie sa a spätnú kontrolu naučených farebných kategórií programu na báze umelej inteligencie.

Táto bakalárska práca reprezentuje nielen úvod do náuky o farbách, ale aj základ výskumu vnímania a osvojovania si farebných kategórií v rámci skúmania kategorizácie ako takej.

## 6 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] Green, M.: *Basic Color & Design SBFAQ*, Part 1 – 4, <http://www.visualexpert.com/FAQ/cfaqhome.html> (2004)
- [2] Green, M.: *Basic Color & Design SBFAQ*, How are lights and colors classified?, <http://www.visualexpert.com/FAQ/Part1/cfaqPart1.html#p1.4> (2004)
- [3] Gouras, P.: *Webvision: Color Vision*, <http://webvision.med.utah.edu/Color.html> (2000)
- [4] Kalloniatis, M, Luu, Ch.: *Webvision: Color Perception*, <http://webvision.med.utah.edu/KallColor.html> (2000)
- [5] DevX.com: *What Is Color?*, <http://www.devx.com/projectcool/Article/19954> (2005)
- [6] Ľudské Telo, GEMINI, spol. s r. o., Bratislava 1991, (The Human Body, Marshall Editions Ltd., London 1989)
- [7] Wikipedia the Free Encyclopedia: *Visible Spectrum*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Visible\\_spectrum](http://en.wikipedia.org/wiki/Visible_spectrum) (jún 2007)
- [8] Wikipedia the Free Encyclopedia: *Bezold-Brücke shift*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Bezold-Br%C3%BCcke\\_shift](http://en.wikipedia.org/wiki/Bezold-Br%C3%BCcke_shift) (Február 2007)
- [9] Wikipedia the Free Encyclopedia: *Color Space*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Color\\_space](http://en.wikipedia.org/wiki/Color_space) (máj 2007)
- [10] Wikipedia the Free Encyclopedia: *Additive Color*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Additive\\_color](http://en.wikipedia.org/wiki/Additive_color) (máj 2007)
- [11] [http://en.wikipedia.org/wiki/Image:RGB\\_illumination.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/Image:RGB_illumination.jpg)
- [12] <http://hypertextbook.com/physics/waves/color/>
- [13] <http://home.sharpdots.com/resources/color.cfm?HDID=GP>
- [14] Wikipedia the Free Encyclopedia: *Subtractive Color*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Subtractive\\_color](http://en.wikipedia.org/wiki/Subtractive_color) (jún 2007)
- [15] Wikipedia the Free Encyclopedia: *Color Models*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Color\\_models](http://en.wikipedia.org/wiki/Color_models) (jún 2007)
- [16] [http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Encyc\\_colorwheel.gif](http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Encyc_colorwheel.gif)
- [17] Wikipedia the Free Encyclopedia: *RGB color model*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Rgb> (jún 2007)
- [18] Wikipedia the Free Encyclopedia: *CMYK color model*, [http://en.wikipedia.org/wiki/CMYK\\_color\\_model](http://en.wikipedia.org/wiki/CMYK_color_model) (jún 2007)

- [19] Wikipedia the Free Encyclopedia: *HSV color space*,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/HSV\\_color\\_space](http://en.wikipedia.org/wiki/HSV_color_space) (jún 2007)
- [20] Wikipedia the Free Encyclopedia: *HSL color space*,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/HSL\\_color\\_space](http://en.wikipedia.org/wiki/HSL_color_space) (máj 2007)
- [21] WinTopo Raster to Vector: *Threshold HSV/HSL*,  
<http://homepage.nflworld.com/heatons/softsoft/wintopo/help/html/threshold-hsv.htm>
- [22] Wikipedia the Free Encyclopedia: *Grassmann's law (optics)*,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Grassmann%27s\\_law\\_%28optics%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Grassmann%27s_law_%28optics%29)
- [23] Wikipedia the Free Encyclopedia: *CIE 1931 color space*,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/CIE\\_1931\\_color\\_space](http://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space) (jún 2007)
- [24] Autiokari, T.: Accurate Image Manipulation for Desktop Publishing - CIE\_XYZ AND CIE\_XYY, [http://www.aim-dtp.net/aim/technology/cie\\_xyz/cie\\_xyz.htm](http://www.aim-dtp.net/aim/technology/cie_xyz/cie_xyz.htm) (2007)
- [25] Wikipedia the Free Encyclopedia: *Lab color space*,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Lab\\_color\\_space](http://en.wikipedia.org/wiki/Lab_color_space) (jún 2007)
- [26] Wikipedia the Free Encyclopedia: *MacAdam ellipse*,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Macadam\\_Ellipse](http://en.wikipedia.org/wiki/Macadam_Ellipse) (jún 2007)
- [27] [http://www.newsandtech.com/issues/2002/02-02/ifra/02-02\\_greybalance.htm](http://www.newsandtech.com/issues/2002/02-02/ifra/02-02_greybalance.htm)
- [28] <http://www.tasi.ac.uk/advice/creating/colour.html#cm10>
- [29] [http://personales.upv.es/gbenet/teoria%20del%20color/water\\_color/color6.html#LAB1](http://personales.upv.es/gbenet/teoria%20del%20color/water_color/color6.html#LAB1)
- [30] Wikipedia the Free Encyclopedia: *Munsell Color Space*,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Munsell> (jún 2007)
- [31] Easy RGB: *Color Conversion Formulas*, <http://www.easyrgb.com/math.php> (2007)
- [32] Lindbloom, B.: *Useful Color Equations*,  
[http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn\\_RGB\\_XYZ\\_Matrix.html](http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn_RGB_XYZ_Matrix.html) (marec2007)
- [33] Wilson, R., Keil, .F.: *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*, MIT Press, Cambridge, MA, London 1999
- [34] Cook, R., Kay, P., Regier, T.: *The World Color Survey Database: History and Use*
- [35] *World Color Survey: WCS Data Archives* , <http://www.icsi.berkeley.edu/wcs/study.html>
- [36] Takáč, M.: *Kognitívna sémantika komplexných kategórií založená na rozlišovacích kritériách*. In: Kvasnička, V., Trebatický, P., Pospíchal, J., Kelemen, J. (eds.): *Myseľ, inteligencia a život*. Vydavateľstvo STU, Bratislava, 2007, pp. 339 - 355.
- [37] Takáč, M.: *Konštrukcia významov a jej dynamika v procese iterovaného učenia*. In: Kelemen, J., Kvasnička, V., Pospíchal, J. (eds.): *Kognice a umělý život VII*. Slezská univerzita, Opava, 2007, pp. 341-347.