

# Měření barevnosti

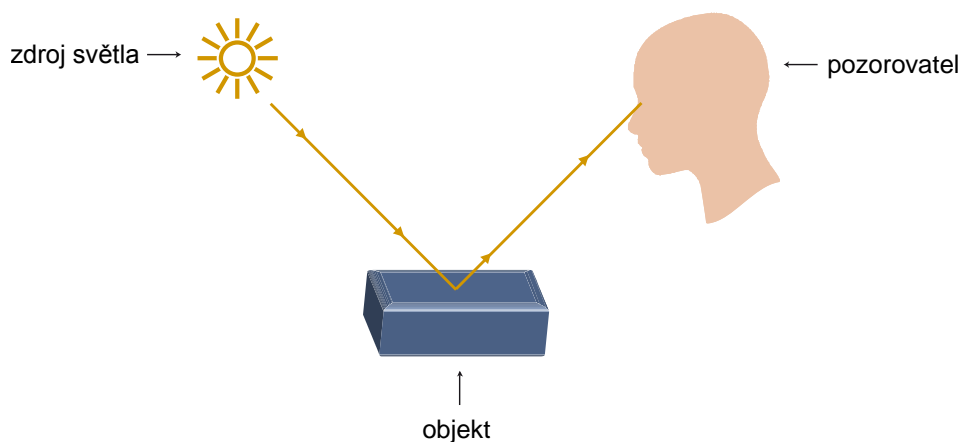
studijní materiál

Ing. Ondřej Panák, [ondrej.panak@upce.cz](mailto:ondrej.panak@upce.cz)

Katedra polygrafie a fotofyziky, Fakulta chemicko-technologická, Univerzita Pardubice

## Úvod

Abychom mohli či už subjektivně nebo objektivně vyhodnocovat barevnost objektů, je za potřeby k tomu definovat tři elementy, a to je zdroj světla, pozorovaný objekt a pozorovatel (viz Obr. 1). Každý světelný zdroj vyzařuje ve viditelné oblasti na každé vlnové délce v různé intenzitě, a tedy světlo různých zdrojů má jinou barevnost. Toto světlo dopadá na objekty, a v závislosti na vlastnostech materiálu se v něm různě toto světlo pohlcuje, respektive odráží. Světlo odražené od objektu následně dopadá na fotoreceptory lidského oka. V závislosti na spektrálním složení záření dopadajícího na tyto fotoreceptory je pak signál po excitaci fotoreceptorů dále zpracován v dalších buňkách sítnice. Lidský mozek po vyhodnocení signálu interpretuje vjem barvy.



**Obr. 1:** Tři elementy barevného vidění

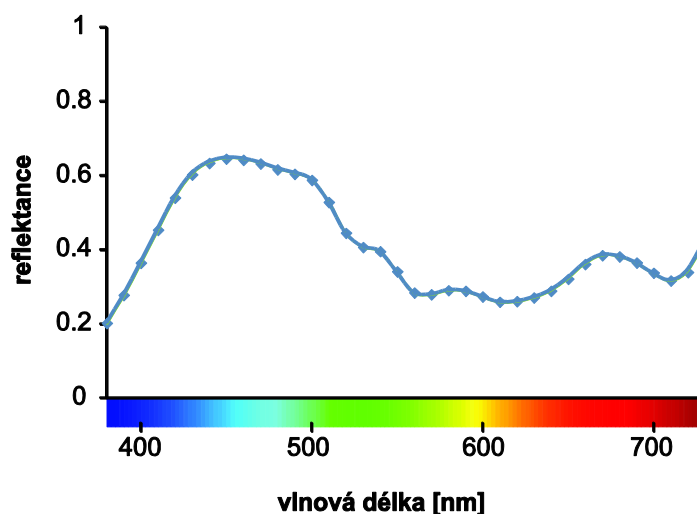
K objektivnímu popisu barev využíváme kolorimetrii. Kolorimetrie se snaží barvu popsat pomocí jistých spojitých funkcí/parametrů, které pak můžeme vzájemně porovnávat. K tomu, abychom mohli barvy objektivně vyhodnocovat, potřebujeme objekt, zdroj světla i pozorovatele definovat.

## Objekt

Začneme tedy nejdříve s tím, jak definovat objekt. Bílé světlo je složeno ze světél s vlnovými délkami od přibližně 380 do 750 nm. Světlo ze světelného zdroje dopadá na objekt. V objektu se nějaké složky pohltí (tím pádem se méně odráží), a jiné složky se zase nepohltí (odráží se více). My chceme zjistit, jak intenzivně na které vlnové délce  $\lambda$  objekt odráží. Dopadající světlo charakterizujeme intenzitou světla na každé vlnové délce  $I_0(\lambda)$ . Tedy například  $I_0(450)$  je intenzita dopadajícího světla pro vlnovou délku 450 nm. Světlo odražené od objektu pak bude mít intenzitu  $I(\lambda)$ . Když dáme do poměru intenzitu světla odraženého od objektu k intenzitě světla dopadajícího na objekt, dostaneme parametr reflektance  $R(\lambda)$ :

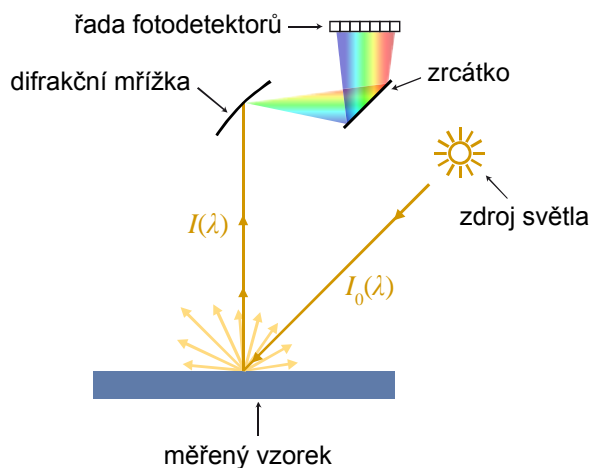
$$R(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (1)$$

Reflektance nám tedy vyjadřuje, jak moc objekt světlo o dané vlnové délce odráží. Když tento parametr zjistíme pro všechny vlnové délky v intervalu přibližně 380–750 nm, tak tím získáme reflexní spektrum charakterizující objekt, jak je znázorněno v Obr. 2.



**Obr. 2:** Reflexní spektrum modrého vzorku

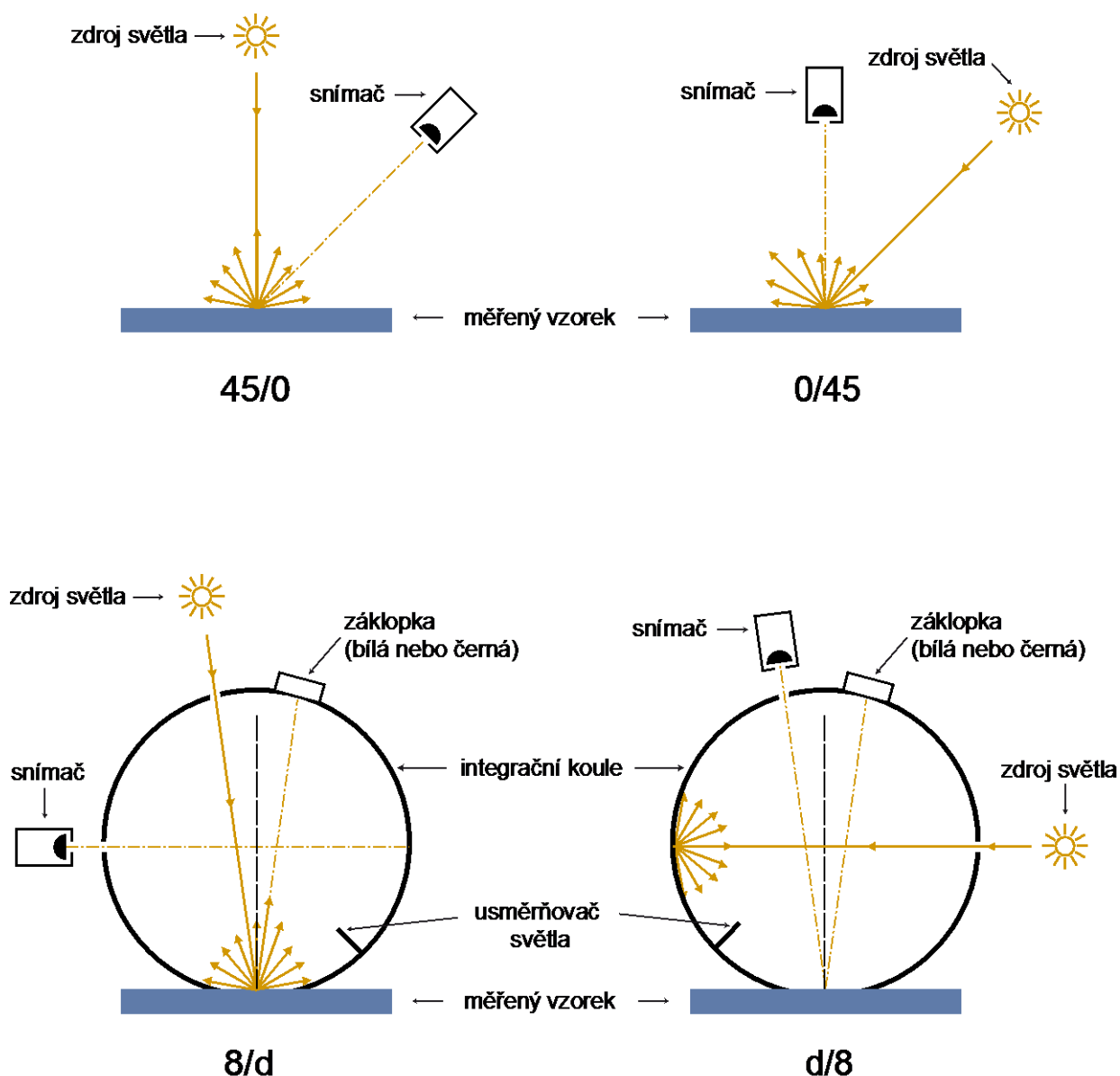
K naměření reflexního spektra se využívá reflexní spektrofotometr, jehož obecné schéma je uvedeno v Obr. 3. Abychom zjistili jaké je intenzita odraženého světla pro  $I(\lambda)$  pro jednotlivé vlnové délky, musíme světlo rozložit pomocí difrakční mřížky. Posléze pak takto rozložené světlo dopadá na řadu fotodetektorů, které promění světlo na elektrický signál. Intenzitu dopadajícího světla  $I_0(\lambda)$  získáme tak, že nejdříve se změří dokonale bílá plocha, která žádné světlo nepohlcuje. Proto před započítím měření je nutné přístroj kalibrovat na absolutní bílou. Přístroj pak dá do poměru intenzitu odraženého světla od měřeného objektu s intenzitou dopadajícího světla, udělá tak pro všechny vlnové délky a získá tak reflexní spektrum.



**Obr. 3:** Obecné schéma spektrofotometru

U ručních spektrofotometrů je difrakční mřížka fixní, a je v něm řada fotodetektorů, kde jeden fotodetektor odpovídá pro jeden interval vlnových délek, co je povětšinou u těchto přístrojů 10 nm. Kvalitnější stolní laboratorní spektrofotometry mají jeden fotodetektor a difrakční mřížka je otočná. S tímto uspořádáním je možné nastavit citlivost intervalu na jednotky nanometrů. Pro kolorimetrické vyhodnocení je dostačující interval 10 nm. Zdrojem světla bývá u ručních spektrometrů halogenová výbojka nebo LED světelné zdroje. U stolních se často využívá i xenonových výbojek.

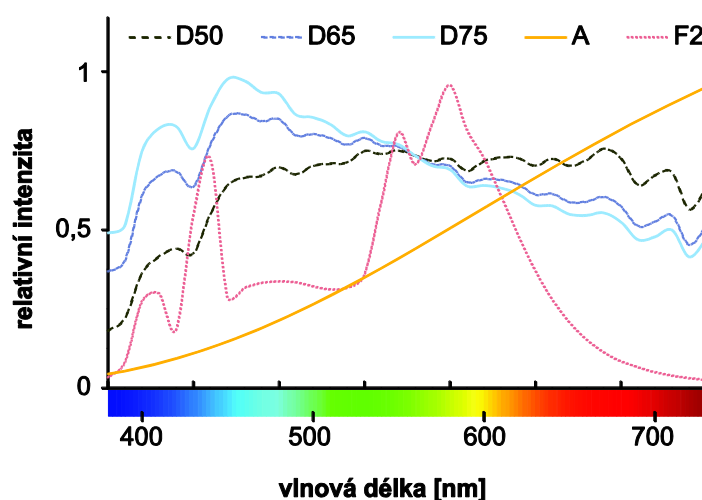
Pro měření odrazových předloh jsou konstruovány v principu 4 druhy geometrií (viz Obr. 4). Geometrie měření vyjadřuje uspořádání měřicí soustavy, tedy pod jakým úhlem dopadá světlo a pod jakým úhlem toto světlo snímáme. Kromě absorpčních vlastností daného objektu záleží i na struktuře povrchu objektu. Povrch ovlivňuje měření barevnosti a pro matný, lesklý nebo jinak texturovaný objekt můžeme získat rozdílné hodnoty, protože různý povrch může odrážet dopadající záření do různých směrů. Geometrie měření rozdělujeme na: 45/0, 0/45, 8/d a d/8. První číslo určuje, pod jakým úhlem světlo dopadá, druhé číslo, pod jakým se odráží. Označení „d“ znamená difuzní osvětlení. U prvních dvou metod se vždy snímá paprsek, který je mimo přímý odraz. U geometrií s integrační koulí je objekt osvětlen buď ze všech stran, nebo je ze všech stran odrazu přiveden signál do detektoru. Tím je měření do jisté míry nezávislé na struktuře povrchu. Tyto dvě metody umožňují zahrnout složku z přímého odrazu (specular included), nebo nezahrnout složku z přímého odrazu (specular excluded). V spektrofotometru se to děje tak, že do prostoru s přímým odrazem se vloží bílá (included) nebo černá (excluded) záklopka. Nezahrnout přímý odraz do vyhodnocování barevnosti se doporučuje o vysoce lesklých objektech, kde je přímý doraz největší.



Obr. 4: Geometrie měření

## Zdroj světla

Pro kolorimetrické vyhodnocování se používají tabelované hodnoty standardizovaných zdrojů. Mezinárodní komise pro osvětlení CIE (Commission internationale de l'éclairage) definovala několik standardizovaných zdrojů. Každý ze světelných zdrojů je charakterizován parametrem spektrální intenzita vyzařování  $M_e(\lambda)$ . Ta nám v podstatě říká, jak který zdroj vyzařuje na které vlnové délce. Pro denní osvětlení jsou to zdroje D50, D65, a D75. Číslo určuje takzvanou teplotu chromatičnosti. Parametr vyjadřuje teplotu absolutně černého tělesa, kterého spektrální intenzita vyzařování poskytne stejnou barevnost, jako spektrální intenzita vyzařování zdroje daného záření. Znamená to, že zdroj D50 má takovou barevnost, jako absolutně černé těleso zahřáté na 5000 Kelvinů. Zdroj záření D65 se nám bude zdát více bílý než zdroj záření D50, a je to kvůli tomu, že vyzařuje více v modré oblasti viditelného záření. Standardizované jsou také i jiné zdroje, například žárovka (A), nebo zářivky (F). Příklady spektrálních intenzit vyzařování jsou uvedeny v Obr. 5.



Obr. 5: Spektrální intenzita vyzařování různých světelných zdrojů

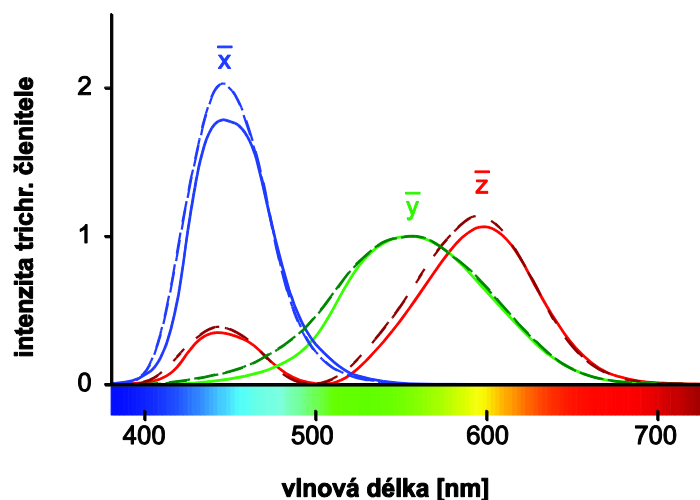
Když si na spektrofotometru nastavíte, že chcete měřit se zdrojem světla D50, znamená to, že do výpočtů kolorimetrických parametrů se dosadí tabelované hodnoty standardizovaného zdroje. Neznamená to, že v přístroji skutečně svítíte zdrojem D50. V ručním přístroji máte pořád jako zdroj halogenovou žárovku nebo LED diody. Teoreticky by naměřený parametr  $R(\lambda)$  neměl záviset na duhu skutečného zdroje, protože poměr odraženého světla k dopadajícímu je konstantní. Jestli při dané vlnové délce dopadá méně světla, tak se i proporčně méně odráží.

## Pozorovatel

Vjem barvy vzniká až analýzou jistých podnětů v našem mozku. Těmi podněty jsou signály z fotoreceptorů, které jsou stimulovány dopadajícím světlem. V oku máme čtyři druhy fotoreceptorů. Fotoreceptory nazývané tyčinky jsou odpovědné za vnímání jasu při nízkých intenzitách osvětlení a v podstatě vidí černobíle. Dále máme v oku tři druhy čípků  $\rho$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$ ; citlivé na červenou, zelenou a modrou oblast viditelného záření. Fotoreceptory jsou na naší sítnici rozloženy tak, že největší koncentrace čípků je v centrální části sítnice nazývané fovea. Nejsou tam žádné tyčinky. Tato oblast je odpovědná za nejlepší vjem barev a detailů. Se zvětšující se vzdáleností od této centrální části prudce klesá počet čípků a postupně vzrůstá zastoupení tyčinek.

Komise CIE definovala dva standardizované pozorovatele: dvoustupňového ( $2^\circ$ ) a desetistupňového ( $10^\circ$ ), každého pomocí tří funkcí, které jsou nazývány trichromatickými členiteli  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$  (viz Obr. 6). Tyto funkce vyjadřují citlivost pozorovatele a byly získány experimentálně.

Dvoustupňový pozorovatel byl získán tak, že pozorovatelé měli pomoci tří světél (červené, zelené a modré) namíchat takou barvu, která by byla ve shodě s barvou monochromatického světla o určité vlnové délce. Experiment byl proveden tak, že obraz dopadal jen na centrální část sítnice a uplatňovaly se proto při experimentu jenom čípky. Desetistupňový pozorovatel byl obdobný experiment, ale obraz dopadal na sítnici pozorovatelů i na oblast, kde už se vyskytovaly už i tyčinky. Hodnoty těchto trichromatických členitelů jsou hodnoty tabelované a je potřebné určit, které se pro výpočet kolorimetrických parametrů využijí.



Obr. 5: Trichromatické členitelé  $2^\circ$  (plné čáry) a  $10^\circ$  (čárkovaně) pozorovatele.

### Kolorimetrické parametry

Když už máme definovaný objekt pomocí reflexního spektra  $R(\lambda)$ , spektrální intenzitu vyzařování zdroje  $M_e(\lambda)$  a definujeme pozorovatele pomocí trichromatických členitelů  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$ , tak je na řadě výpočet kolorimetrických parametrů. Nejdříve se vypočítají trichromatické hodnoty XYZ pomocí rovnic:

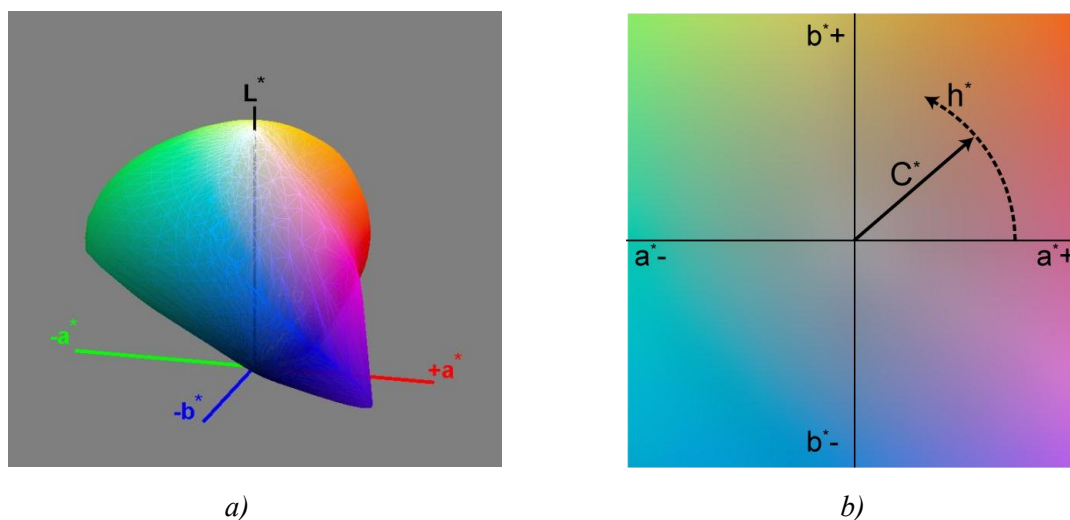
$$\begin{aligned} X &= k \sum M_e(\lambda) R(\lambda) \bar{x}(\lambda) \\ Y &= k \sum M_e(\lambda) R(\lambda) \bar{y}(\lambda) \\ Z &= k \sum M_e(\lambda) R(\lambda) \bar{z}(\lambda) \end{aligned} \quad (2)$$

$$k = \frac{100}{\sum M_e(\lambda) \bar{y}(\lambda)}$$

Tyto rovnice nám v podstatě říkají, jakou velkou odezvu v pozorovateli způsobí světlo odražené od objektu. Tyto parametry jsou pak pomocí složitějších funkcí převedeny na souřadnice barvého prostoru CIE  $L^*a^*b^*$ . Kde parametr  $L^*$  je parametr měrné světlosti (určuje, jestli se jedná o barvu světlou nebo tmavou), na ose  $a^*$  se nachází barvy od zelené po červenou a na ose  $b^*$  jsou barvy od modré po žlutou. V Obrázku 6a je prostor  $L^*a^*b^*$  znázorněn. Všem barvám, které jsme tedy schopni jako pozorovatelé vnímat, jsme schopni přiřadit konkrétní souřadnice v tomto prostoru. Jestli chceme porovnat dvě barvy, můžeme tak učinit vypočtením vzdálenosti v tomto prostoru. Tato vzdálenost se nazývá barvová odchylka  $\Delta E$  a můžeme ji vypočítat pomocí rovnice:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3)$$

Ze souřadnic  $a^*$  a  $b^*$  je možné vypočítat další atributy barev, a to chromu a odstín. Chroma  $C^*$  vyjadřuje pestrost barvy, a zvětšuje se se vzdáleností od osy  $L^*$ . Odstín  $h^*$  je určený úhlem. Na Obr. 6b jsou barvy znázorněné přerušovanou čarou barvy s konstantní chromou a měnícím se odstínem, a barvy znázorněné plnou čarou jsou barvy se stejným odstínem, ale různou chromou.



**Obr. 6:** Zobrazení barvového prostoru  $L^*a^*b^*$  z perspektivy (a) a zobrazení prostoru v průřezu (b).

Jaký standardizovaný zdroj světla využít pro výpočet kolorimetrických parametrů je stanovený většinou nějakou normou. Například pro účely měření barevnosti v polygrafii se využívá standardní zdroj světla D50 a 2° pozorovatel. Kolorimetrické parametry, které jsou vypočteny pro jeden zdroj světla a jednoho pozorovatele nemůžeme porovnávat s parametry, které byly vypočteny pro jiný zdroj světla nebo jiného pozorovatele. Můžeme porovnávat jenom kolorimetrické parametry ( $XYZ, L^*a^*b^*$ ) vypočteny pomocí téhož zdroje a zároveň téhož pozorovatele!

### Použitá literatura

GREEN, Phil, MACDONALD Lindsay. *Colour engineering: achieving device independent colour*. Rerprinted with corrections. Chichester: Wiley, 2003, ISBN 04-714-8688-4.

HUNT, R.W.G. *Measuring colour: fundamentals and applications*. 3rd ed. Kingston-upon-Thames: Fountain, 1998, ISBN 08-634-3387-1.

OHTA, Noboru a ROBERTSON, Alan. *Colorimetry: fundamentals and applications*. Chichester, West Sussex: J. Wiley, 2005, ISBN 04-700-9472-9.