

# Základy světelné techniky (5)

## Základy nauky o barvě (1. část)

prof. Ing. Jiří Habel, DrSc., Elektrotechnická fakulta ČVUT V Praze

Předmětem nauky o barvě je objektivní hodnocení barvy světla různých zdrojů i barvy pozorovaných předmětů. Jde o náročný úkol, neboť vnímání barev je složitý fyziologicko-psychický proces.

### 5.1. Vjem barvy

V nauce o barvě se barva nechápe jako směs pojidla a barviva, ale pojem barva, přesněji řečeno *vjem barvy*, označuje vlastnost zrakového počítka, která umožňuje pozorovateli zjistit rozdíl mezi dvěma ploškami zorného pole, které mají stejnou velikost, tvar i strukturu, přičemž tento rozdíl má stejnou povahu jako rozdíl, který by vznikl změnou spektrálního složení světla. Výjimkou jsou *metamerní barvy*, které i při rozdílném spektrálním složení vzbuzují stejný vjem barvy. Pojem barva tedy patří do oblasti vjemové (psychosenzorické).

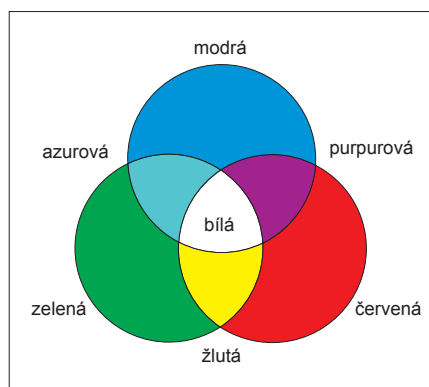
Běžně se však pojem barva přenáší i na vlastnost světla a předmětů a hovoří se o barvě světla nebo o barvě předmětů. Přesněji se však barevné vlastnosti světla označují názvem *chromatičnost* a barevné vlastnosti předmětů pojmem *kolorita*. Tyto vlastnosti lze jednoznačně vyhodnotit fyzikálně podle spektrálního složení barevného podnětu a spektrální citlivosti zraku k záření různých vlnových délek. Chromatičnost je určena spektrálním složením záření vysílaného primárním zdrojem. Kolorita je určena spektrálním složením záření zdroje osvětlujícího sledovaný předmět a spektrální odrazností či propustností materiálu předmětu. Chromatičnost a kolorita jsou proto pojmy psychofyzikální.

Monofrekvenční složky jakéhokoliv záření se ve viditelné oblasti spektra vyznačují tím, že budí zcela určitý barevný počitek; tj. záření každého kmitočtu přísluší jednoznačně určitá spektrální barva. Obráceně to však neplatí. Zrakový orgán vnímá záření aditivně a odezvy na monochromatické složky skládá na určitý zrakový vjem barvy. Nemá však schopnost složené záření analyzovat.

Kvalitativní odlišnost vjemu jednotlivých spektrálních barev se nazývá *barevný tón* a vyjadřuje se názvy fialová, modrá, zelená apod. Přibližné oblasti vlnových délek spektrálních barev jsou uvedeny v tab. 5.1. Vnímání určitého barevného tónu je u každého pozorovatele poněkud odlišné a je podmíněno jednak množstvím ener-

gie vyzařované v dané oblasti vlnových délek, jednak citlivostí oka.

Kromě *spektrálních barev*, které lze zjistit ve spektru záření slunce (běžně např. při pozorování duhy) či jiných zdrojů, existují tzv. *nespektrální barvy*. Patří k nim *purpurové barvy*. Nejsou součástí spektra ani slunečního světla, ani záření jiných zdrojů. Vyznačují se též určitým, tzv. nespektrálním barevným tónem. Purpurové barvy vznikají míšením obou krajních částí spektra viditelného záření, tj. spektrální barvy fialové a červené.



Obr. 5.1. Znárodnění principu míšení tří základních barev

Barvy se dělí na pestré a nepestré. *Pestrá barva* představuje takový vjem barvy, který má barevný tón. K pestrým barvám tedy patří čisté spektrální barvy, purpurové barvy a jejich odstíny vzniklé míšením, např. i míšením s bílou barvou.

Názvy pestrých barev (zelená, tmavozelená apod.) neoznačují fyzikální vlastnost, ale fyziologicky subjektivní vlastnost vázanou na normálního kolorimetrického pozorovatele.

Tab. 5.1. Vlnové délky spektrálních barev

Rozmezí vlnových délek (nm)	Barevný tón spektrální barvy
380 až 430	fialová
430 až 465	modrofialová
465 až 490	modrá
490 až 500	modrozelená
500 až 560	zelená
560 až 575	zelenožlutá
575 až 585	žlutá
585 až 620	oranžová
620 až 770	červená

Spektrální barvy jsou syté (čisté). *Sytost barvy* udává podíl čisté spektrální či purpurové barvy v dané barvě na celkovém barevném počítku. Sytost se zmenší, smísí-li se spektrální barva např. s bílou barvou. Spektrální barvy mají sytost rovnou jedničce. Bílá, šedá a černá barva mají sytost nulovou. *Nepestré barvy* jsou vjemy barev, které nemají barevný tón a tvoří spojitou řadu od bílé, přes šedou až po černou. Rozdíl mezi nepestrými barvami je jen v jejich intenzitě, tj. v hodnotě světelného toku nebo jasů.

Vyloučí-li se ze spektra slunečního záření, tedy z bílého světla, oblast odpovídající modrému barevnému tónu, zbývající záření vzbudí vjem barvy, jejíž barevný tón je žlutý. Podobně, odfiltruje-li se zelená oblast spektra z bílého světla, je barevný tón zbývajícího záření purpurový. A smíšením spektrálních světél, v nichž chybí červená oblast spektra, se získá světlo modrozeleného (azurového) barevného tónu. Spektrum viditelného záření lze tedy rozdělit na tři části, představující v zásadě tři základní barvy: modrou, zelenou a červenou.

Popsané skutečnosti znázorňuje obr. 5.1.

Smísí-li se základní barva se světlem ze zbývajících částí spektra, získá se bílé světlo. Dvojice barev, které smíseny ve vhodném poměru dávají bílé (nepestře) světlo různé intenzity, se nazývají *doplňkové* (komplementární) *barvy*. Příklady doplňkových barevných tónů k některým barvám jsou sestaveny na obr. 5.2. Bílé světlo tedy lze vytvořit nejen jako směs všech spektrálních světél, ale i míšením pouze dvou vhodně zvolených světél. Nicméně vjem bílé barvy je stejný bez ohledu na to, jak byla barva vytvořena.

Podle psychologického působení se barvy dělí na teplé (např. červená, oran-

žová, žlutá) a studené (např. modrá, zelená, fialová, modrozelená). Stručný přehled o fyzickém, optickém a psychologickém vlivu představitelů obou skupin, oranžové a modrozelené barvy při hladinách osvětlenosti do asi 2 000 lx poskytuje tab. 5.2.

### 5.2. Barevný podnět

Záření charakterizované určitým spektrálním složením a světelným tokem či jasmem, který vniká do oka pozorovatele a budí barevný počitek, se označuje názvem *barevný podnět*. Spektrální složení barevného podnětu se popisuje křivkou poměrného spektrálního složení barevného podnětu, tj. průběhem závislosti poměrné spektrální hustoty zářivého toku  $\varphi_{e\lambda}$  na vlnové délce  $\lambda$ . Hodnoty funkce  $\varphi_{e\lambda}(\lambda)$  jsou vztaženy např. k maximální hodnotě

$$\varphi_{e\lambda \max} = \left( \frac{d\varphi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_{\max} \quad (W \cdot m^{-1}; W, m) \quad (5.1)$$

závislosti spektrální hustoty zářivého toku na vlnové délce, tj. pro vlnovou délku  $\lambda$  bude

$$\varphi_{e\lambda}(\lambda) = \frac{\varphi_{e\lambda}}{\varphi_{e\lambda \max}} = \frac{\left( \frac{d\varphi_{e\lambda}(\lambda)}{d\lambda} \right)_{\lambda}}{\left( \frac{d\varphi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_{\max}} \quad (5.2)$$

Při hodnocení barevných vlastností předmětů se pracuje s poměrným spektrálním složením

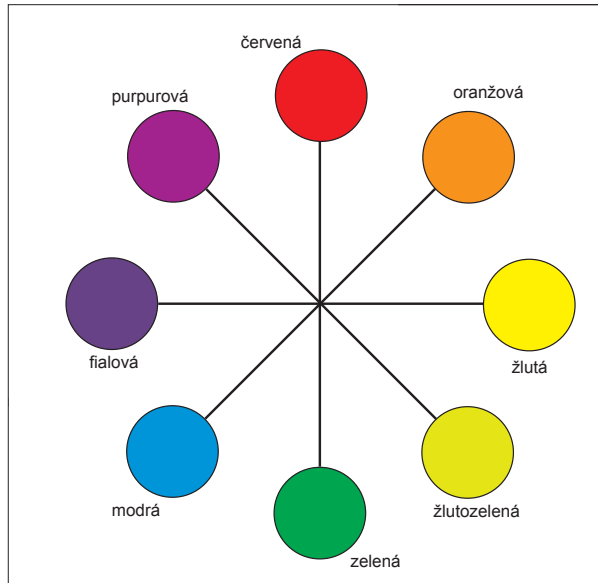
- odraženého záření, tj. s veličinou  $\varphi_{e\lambda\rho}(\lambda) = \varphi_{e\lambda}(\lambda) \rho(\lambda)$ , nebo
- propuštěného záření, tj. s veličinou  $\varphi_{e\lambda\tau}(\lambda) = \varphi_{e\lambda}(\lambda) \tau(\lambda)$ .

Z uvedeného vyplývá, že počitek barvy je fyzikálně určen spektrálním složením barevného podnětu, což je objektivně měřitelná fyzikální realita nezávislá na zrakovém orgánu.

### 5.3. Trichromatické soustavy

K popisu barev se používají kolorimetrické soustavy. Pro přesné charakterizování barev jsou zapotřebí tři údaje, např. čísel. Proto bývají kolorimetrické soustavy také nazývány trichromatické soustavy a jsou založeny na tom, že libovolný barevný podnět lze nahradit adiční směsí tří vhodně zvolených měrných barevných podnětů (světél). Obecně jsou měrné barevné podněty tři lineárně nezávislé, ale jinak libovolně zvolené barevné podněty. Označují se např. Č<sup>o</sup>, Z<sup>o</sup>, M<sup>o</sup>; X<sup>o</sup>, Y<sup>o</sup>, Z<sup>o</sup>; R<sup>o</sup>, G<sup>o</sup>, B<sup>o</sup> apod.

Kolorimetrická množství tří měrných barevných podnětů, jejichž adiční směsí je možné vzbudit stejný barevný vjem jako uvažovaným barevným podnětem,



Obr. 5.2. Příklady dvojic doplňkových barev Č - Z (červená - zelená), P - ZZ (purpurová - žlutozelená), F - Ž (fialová - žlutá), M - O (modrá - oranžová)

se nazývají **trichromatické složky** a značí se velkými písmeny Č, Z, M; X, Y, Z; R, G, B apod. K výpočtu trichromatických složek se využívají *kolorimetrické koeficienty*, označované

$$\bar{c}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{m}(\lambda), \bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$$

apod. Jsou to poměrná kolorimetrická množství měrných barevných podnětů (světél) dané soustavy, jimiž se popisuje

monochromatická složka izoenergetického spektra, tedy spektra charakterizovaného konstantní hodnotou zářivého toku v oblasti sledovaných vlnových délek, tj.  $\varphi_e(\lambda) = konst.$  Souhrn kolorimetrických koeficientů pro všechny vlnové délky vytváří křivky trichromatických koeficientů [5.1], např. viz obr. 5.3, kde

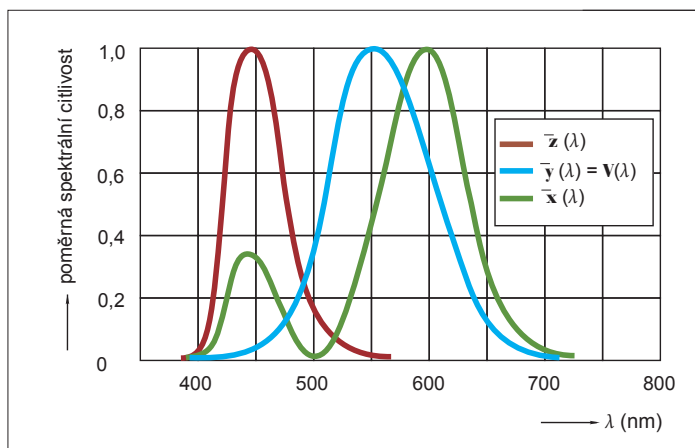
jsou nakresleny křivky kolorimetrických koeficientů pro soustavu X, Y, Z. V podstatě se tedy uvažuje existence tří přijímačů záření s poměrnými spektrálními citlivostmi rovnými odpovídajícím kolorimetrickým koeficientům.

Trichromatické složky lze vypočítat násobením z rovnice (5.2) určené poměrné spektrální hustoty zářivého toku  $\varphi_{e\lambda}(\lambda)$  barevného podnětu kolorimetrickými koeficienty a integrací těchto součinů v celé

Tab. 5.2. Vlivy teplé a studené barvy na člověka

Vliv na	Účinek barvy	
	oranžové	modrozelené
fyzickou aktivitu	tlumící (pasivní)	povzbuzující (aktivní)
jasově-optický dojem	světlý	temný
	vystupující	odstupující
citový (psychologický) dojem	teplý	studený
	suchý	vlažný
	zdůrazňující	uklidňující
	aktivní (povzbuzující)	pasivní (tlumící)
	dráždivý	uklidňující

Poznámka: Při hladinách osvětlenosti nad 2 000 lx začínají teplé barvy psychologicky působit nepřírozně, zatímco studené barvy příjemně.

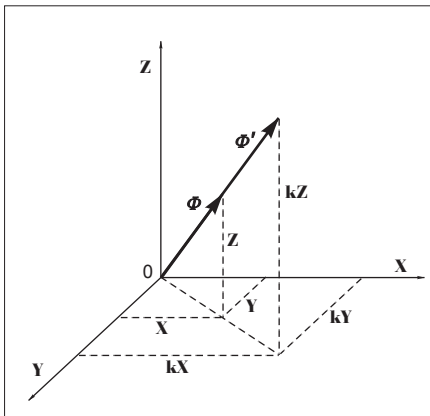


Obr. 5.3. Spektrální průběhy kolorimetrických koeficientů trichromatické soustavy XYZ

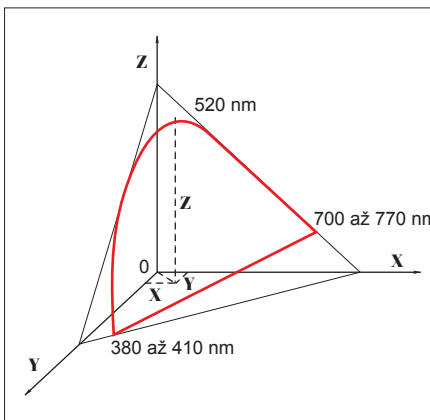
oblasti spektra, tj. např. v soustavě XYZ se složky stanoví z výrazů

$$\begin{aligned} X &= \int_0^\infty \varphi_{e\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= \int_0^\infty \varphi_{e\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= \int_0^\infty \varphi_{e\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (5.3)$$

Tři údaje charakterizující barevný podnět – barevný tón, sytost barvy a intenzita (světelný tok nebo jas) barvy – jsou tedy jednoznačně určeny třemi nezávislými složkami trichromatické soustavy, např. X, Y, Z, které je možné znázornit v trojrozměrné soustavě souřadnic (obr. 5.4).

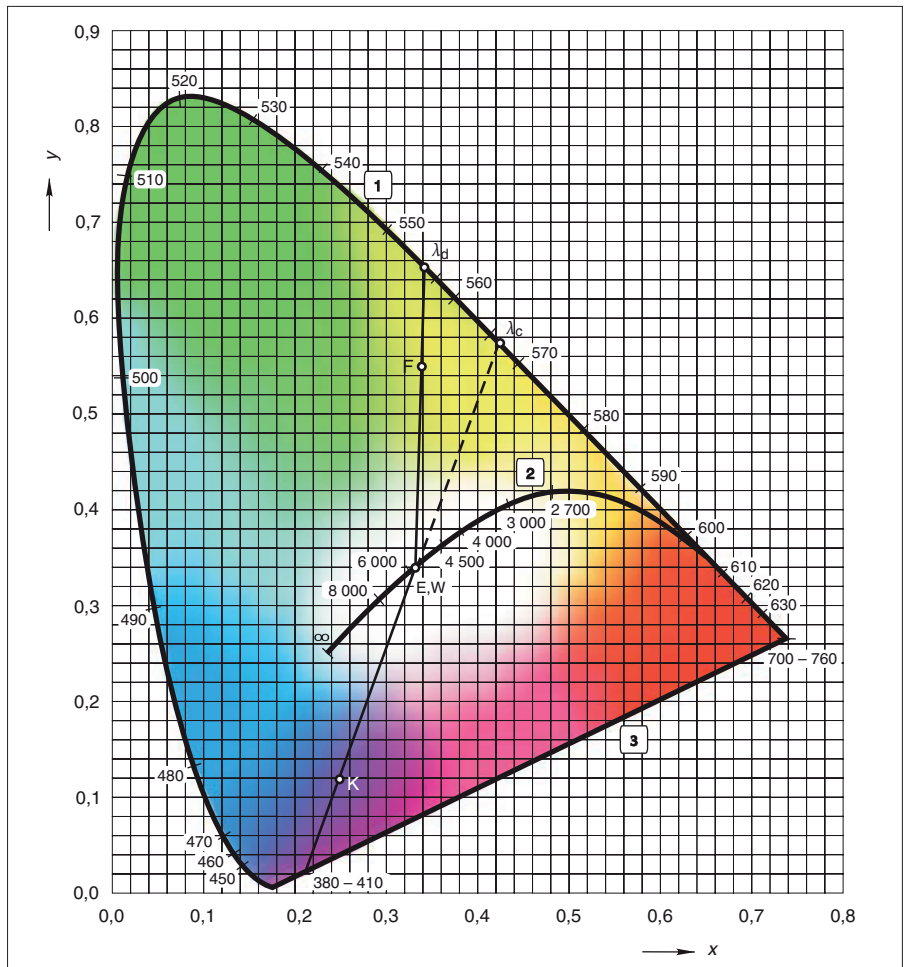


Obr. 5.4. Prostorové znázornění barevných podnětů Φ a Φ' v pravouhlé soustavě souřadnic XYZ



Obr. 5.5. Náčrt trojúhelníku barev v rovině X + Y + Z = 1 kolorimetrického prostoru XYZ

V takto vzniklém třibarevném prostoru jsou základní barvy všech intenzit znázorněny osami souřadnic např. X, Y, Z. Různé barevné tóny (všech intenzit) jsou vyjádřeny přímkami procházejícími počátkem 0. Světelný tok, resp. jas barevného podnětu je však úměrný algebraickému součtu trichromatických složek (X + Y + Z), a není tedy určen velikostí vektoru Φ. Barevné podněty Φ a Φ', které mají stejný ba-



Obr. 5.6. Diagram chromatičnosti mezinárodní kolorimetrické soustavy XYZ v pravouhlých souřadnicích x, y

1 – křivka spektrálních světél s vyznačenými vlnovými délkami v nanometrech,

2 – čára teplotních zářičů se stupnicí v kelvinech, 3 – přímka purpurů,

$\lambda_d$  – náhradní vlnová délka k záření charakterizovanému bodem F

$\lambda_c$  – doplňková vlnová délka k záření charakterizovanému bodem K v oblasti purpurů

revný tón a stejnou sytost, leží na stejné přímce procházející počátkem. Jsou-li jejich světelné toky úměrné,  $\Phi' = k \Phi$ , i pro složky platí  $X' = kX$ ,  $Y' = kY$  a  $Z' = kZ$ .

Na základě uvedeného lze barevný podnět se světelným tokem Φ v pravouhlé soustavě souřadnic, např. XYZ, popsat kolorimetrickou rovnicí ve tvaru

$$\Phi = XX^0 + YY^0 + ZZ^0 \quad (5.4)$$

kde  $X^0$ ,  $Y^0$ ,  $Z^0$  jsou jednotkové podněty orientované ve směru os ve zvolené pravouhlé soustavě souřadnic.

Protne-li se prostorová soustava XYZ rovinou vytínající na osách stejné úseky (např. rovina, pro niž též platí  $X + Y + Z = 1$ ) (obr. 5.5), vznikne v kolorimetrickém prostoru trojúhelník barev. V něm čisté spektrální barvy leží na křivce uzavřené mezi stranami trojúhelníku a každý bod uvnitř této křivky popisuje jednu barvu. Prostorové zobrazení je však nepraktické.

Hodnotí-li se barevné podněty pouze z hlediska tónu a sytosti bez ohledu na intenzitu, tj. na hodnotu světelného toku či

jasu, stačí k jejich znázornění rovinný diagram. Obvykle se pracuje s průmětem zmíněné jednotkové roviny ( $X + Y + Z = 1$ ) do souřadnicové roviny xy.

**Trichromatické souřadnice** (obvykle se značí malými písmeny, tj. např. x, y, z) jsou rovny podílu trichromatických složek a jejich součtu. Tedy např.

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X + Y + Z}; \\ y &= \frac{Y}{X + Y + Z}; \\ z &= \frac{Z}{X + Y + Z} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Přitom platí, že součet trichromatických souřadnic je roven 1, tj. např.  $x + y + z = 1$ . Stačí tedy běžně pracovat pouze se dvěma souřadnicemi (např. x, y).

Normální trojúhelník barev (diagram chromatičnosti) CIE v pravouhlých souřadnicích x, y je nakreslen na obr. 5.6.

(pokračování v příštím čísle)