



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
katedra elektroenergetiky**

**SPEKTRÁLNÍ PROSTOROVÉ CHARAKTERISTIKY
MODERNÍCH LED SVÍTIDEL**

**SPECTRAL DISTRIBUTION CHARACTERISTICS
OF MODERN LIGHT SOURCES**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Tomáš Kodytek

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektroenergetika

Vedoucí práce: Ing. Marek Bálský, Ph.D.

Praha (2019)

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kodytek** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **420106**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Spektrální prostorové charakteristiky moderních LED svítidel

Název diplomové práce anglicky:

Spectral distribution characteristics of moder light sources

Pokyny pro vypracování:

1. Teorie prostupu světla světelných zdrojů LED světelně činnými materiály.
2. Měření spektrálních prostorových charakteristik moderních LED svítidel.
3. Vyhodnocení vlivu prostupu světla materiálem na spektrální prostorové charakteristiky moderních LED svítidel..

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČSN EN 13032: Světlo a osvětlení – Měření a způsob uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel.
- [2] Publikace CIE 130-1998: Practical Methods for the Measurement of Reflectance and Transmittance.
- [3] HABEL, Jirí, et al. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013. 438 s. ISBN 978 80 86534 21 3.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Marek Bálský, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **12.02.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **20.09.2020**

Ing. Marek Bálský, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 24. 5. 2019

Jméno, příjmení

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Marku Bálskému, Phd. za metodické vedení práce a za cenné odborné rady a připomínky.

Dále bych rád poděkoval společnosti Signify Commercial Czech Republic za zapůjčení svítidla, na kterém byla prováděna měření.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá problematikou spektrálních prostorových charakteristik LED svítidel. Práce shrnuje teoretické poznatky o LED světelných zdrojích, světelně činných částech svítidel a šíření světla v optických materiálech. V práci je pak dále vysvětleno, jak může při interakci světla se světelně činnými částmi svítidla dojít ke změně spektrálního složení světla v závislosti na směru vyzařování světla do prostoru. U vzorků LED svítidel jsou naměřeny spektrální prostorové charakteristiky. Pozorované změny jsou podrobně popsány a je zhodnocen jejich význam pro praktické aplikace.

Abstract

This diploma thesis deals with the issue of spectral distribution characteristics of LED light sources and luminaires. It summarizes the theory of LED light sources, light-active parts of luminaires and the propagation of light through optic materials. It is then explained how the interaction of light with the light-active parts of luminaire can change the spectral distribution depending on the direction of the emitted light. Spectral distribution characteristics are measured on a couple of samples. The observed spectral changes are described in detail and possible implications are evaluated.

Klíčová slova

LED, LED světelné zdroje, LED svítidla, osvětlení, spektrální prostorová charakteristika, teplota chromatičnosti, spektrum světla, světelně činné části svítidel, kolorimetrie, spektrometrie

Key words

LED, LED light sources, LED luminaires, illumination, lighting, spectral distribution characteristic, colour temperature, light spectrum, light-active parts of luminaires, colorimetry, spectrometry

OBSAH

Zadání	iii
Prohlášení	v
Poděkování.....	vi
Anotace	vii
OBSAH	viii
1. ÚVOD	1
2. SVĚTELNĚ TECHNICKÉ VELIČINY	2
2.1. Světelný tok.....	2
2.2. Svítivost a čáry svítivosti	2
2.3. Osvětlenost	4
2.4. Barva světla	4
2.4.1. Barva a spektrum	4
2.4.2. Trichromatické soustavy	5
2.4.3. Diagram chromatičnosti	6
2.4.4. Teplota chromatičnosti	7
2.4.5. Index podání barev	9
3. TYPY SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	10
3.1. Konvenční technologie	10
3.1.1. Teplotní světelné zdroje	10
3.1.2. Výbojové světelné zdroje	10
3.2. LED světelné zdroje	11
3.2.1. Princip funkce LED diody	11
3.2.2. Bílá LED dioda	11
3.2.3. Vlastnosti a výhody LED diod	13
4. SVĚTELNĚ ČINNÉ ČÁSTI SVÍTIDEL	14
4.1. Veličiny charakterizující světelně technické vlastnosti materiálů	14
4.2. Jevy na rozhraní optických materiálů	15
4.2.1. Odraz a rozptyl.....	15
4.2.2. Lom a disperze	15
4.3. Světelně činné části svítidel	17
4.3.1. Reflektory	17
4.3.2. Difuzory	18
4.3.3. Čočky a refraktory	19
5. MĚŘENÍ SPEKTRÁLNÍCH PROSTOROVÝCH CHARAKTERISTIK.....	20
5.1. Měřicí přístroje	20
5.1.1. Fotometrická lavice	20
5.1.2. Goniofotometr	20
5.1.3. Spektrometr	21
5.2. Hypotézy	22

5.3.	Spektrální prostorové charakteristiky	24
5.4.	Měřená LED svítidla	24
5.5.	Postup měření spektrálních prostorových charakteristik	25
5.5.1.	Měřicí přístroj a postup měření	25
5.5.2.	Přepočet na poměrné hodnoty a přesnost měření	27
5.6.	Výsledky měření spektrálních prostorových charakteristik	28
5.6.1.	Spektrální prostorová charakteristika svítidla P725.....	28
5.6.2.	Spektrální prostorová charakteristika svítidla RC464B	30
5.6.3.	Porovnání spektrálních charakteristik svítidla RC464B při různě nastavené CCT	32
6.	MĚŘENÍ TEPLoty CHROMATIČNOSTI	34
6.1.	Výpočet náhradní teploty chromatičnosti.....	34
6.2.	Metody a postup měření teploty chromatičnosti	34
6.3.	Výsledky měření teploty chromatičnosti	36
7.	DŮSLEDKY PROSTOROVĚ PROMĚNNÉHO SPEKTRA A CCT LED SVÍTIDEL.....	39
8.	ZÁVĚR	41
Příloha 1	– Technické parametry spektrometru Mavospec Base	42
Příloha 2	– Naměřené hodnoty	43
	Seznam použitých zdrojů	51
	Seznam obrázků	54
	Seznam grafů.....	54
	Seznam tabulek	54

1. ÚVOD

Světelné diody LED jsou komerčně vyráběny již od 60. let 20. století. Červené, oranžové a žluté diody našly ihned své uplatnění v signalizační a spínací technice a to především díky svým malým rozměrům, vysoké účinnosti a spolehlivosti. Použití LED světelných zdrojů v osvětlování bylo ale umožněno až vynálezem modré diody japonským vědcem Shuji Nakamurou v roce 1991, která je nezbytná pro smíchání bílé barvy [22].

V následujících letech došlo k dalšímu zdokonalování bílých LED. Díky neustávajícímu vývoji v této oblasti časem klesly jejich výrobní náklady natolik, že LED zdroje se postupně stávají dominantním světelným zdrojem na trhu a jsou označovány jako „světelné zdroje budoucnosti“ [22].

Až na výjimky v určitých specifických aplikacích dnes LED technologie tvoří většinu portfolia a tržeb výrobců osvětlení. Společnost Signify (dříve Philips Lighting) například do prosince 2017 prodala za svoji historii globálně již celkem 1 mld. LED zdrojů a svítidel a má za cíl tyto prodeje zdvojnásobit do roku 2020 [23]. Podíl LED světelných zdrojů a svítidel společnosti činil 65 % v roce 2017 a 71 % v roce 2018 [30].

Nová technologie s sebou ale přináší nové technické problémy a výzvy, kterým je potřeba se dále věnovat. Jedním ze specifik LED technologie oproti technologiím konvenčním je jiné konstrukční řešení a s tím spojené odlišné šíření světla ve svítidlu.

Tato práce pak má za cíl zanalyzovat, zda a jak konstrukce LED svítidel ovlivňuje prostorové rozložení spektra vyzařovaného světla. Kromě teoretického rozboru je úkolem ověřit teoretické hypotézy změřením spektrálních prostorových charakteristik LED svítidel a zhodnotit naměřená data.

2. SVĚTELNĚ TECHNICKÉ VELIČINY

Radiometrické (energetické) veličiny posuzují vlastnosti záření v celém rozsahu vlnových délek. Citlivost lidského oka je nicméně omezená pouze do úzkého rozmezí vlnových délek záření. Citlivost oka je navíc i v této viditelné části spektra proměnná. Proto se v osvětlování využívá veličin fotometrických, které tuto citlivost lidského oka zohledňují [13].

2.1. Světelný tok

Světelný tok Φ [lm] je světelně technická veličina, která odpovídá zářivému toku Φ_e (výkonu přenášenému zářením) a vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit zrakový vjem.

Světelný tok monochromatického záření s vlnovou délkou λ se spočítá dle následujícího vztahu:

$$\Phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) \quad (2.1)$$

kde $K(\lambda)$ je světelná účinnost monochromatického záření a K_m je maximum této veličiny, empiricky stanovené pro normálního fotometrického pozorovatele při fotopickém (denním) vidění a pro záření základní vlnové délky $\lambda_m = 555,155$ nm.

$$K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \quad (2.2)$$

Veličina $V(\lambda)$ je poměrná světelná účinnost monochromatického záření a je definována jako:

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} \quad (2.3)$$

Světelný tok záření složeného z více monochromatických složek se pak určí integrací:

$$\Phi = K_m \int_0^\infty \left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_\lambda V(\lambda) d\lambda \quad (2.4)$$

kde $\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} = \Phi_{e\lambda}$ je spektrální hustota zářivého toku [14].

2.2. Svítivost a čáry svítivosti

Svítivost I_v [cd] je definována jako prostorová hustota světelného toku $d\Phi$ vyzařovaného do prostorového úhlu $d\Omega$ v daném směru (pod úhlem γ):

$$I_{\gamma} = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (2.5)$$

Svítivost je definována pouze pro bodový zdroj světla, tj. pro zdroj, jehož rozměry jsou vzhledem k jeho vzdálenosti od kontrolního bodu zanedbatelné [12].

Prostorový úhel Ω [sr] je určen velikostí plochy, kterou obecná kuželová plocha vytkne na povrchu jednotkové koule se středem ve vrcholu dané kuželové plochy.

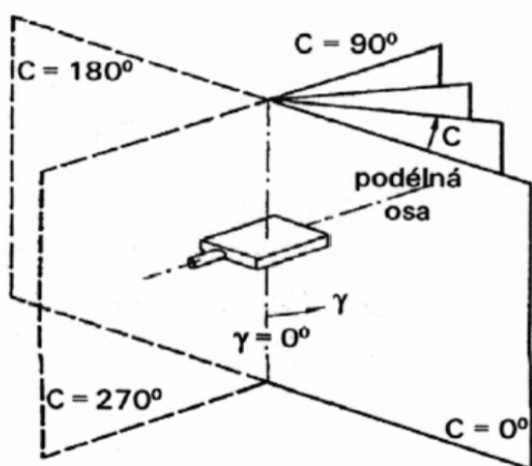
Je-li plocha dA ve vzdálenosti l pozorována pod úhlem β , pak prostorový úhel, pod nímž tuto plochu pozorujeme, můžeme určit ze vztahu:

$$d\Omega = \frac{dA \cdot \cos \beta}{l^2} \quad (2.6)$$

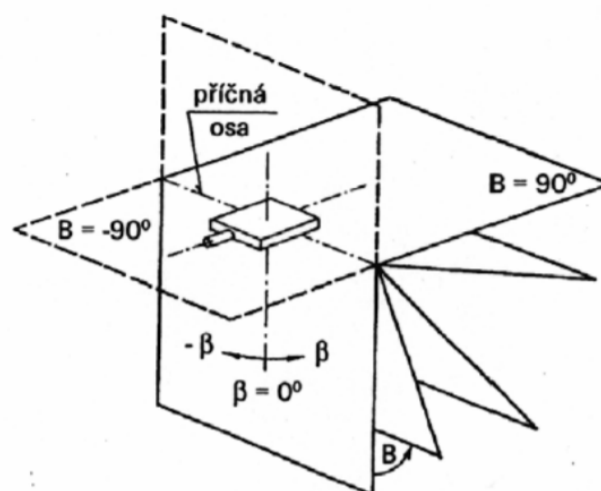
Naměříme-li hodnoty svítivosti zdroje ve všech směrech v prostoru, lze tyto hodnoty vynést do prostoru jako polohové vektory. Tyto vektory mají počátek v měřeném bodovém zdroji světla a velikost vektoru v určitém směru je dána velikostí svítivosti zdroje v daném směru. Koncové body všech těchto vektorů tvoří tzv. fotometrickou plochu svítivosti.

V praxi většinou není třeba znát hodnoty svítivosti v celé fotometrické ploše, můžeme se tedy omezit pouze na určité fotometrické roviny, které vzniknou jako řezy fotometrickou plochou tak, že řez prochází světleným zdrojem či svítidlem a jeho optickou osou (hlavní směr vyzařování).

Nejčastěji používanými rovinami jsou soustavy rovin C- γ (Obr. 1) a B- β (Obr. 2) doporučené Mezinárodní komisí pro osvětlování CIE a normou ČSN EN 13032 [13] [6].



Obr. 1 - Soustava fotometrických rovin C- γ [15]



Obr. 2 - Soustava fotometrických rovin B- β [15]

V rovinách řezů tak vzniknou tzv. čáry svítivosti (též křivky svítivosti či prostorové charakteristiky), které se dají snadno zobrazit jako graf v polárních souřadnicích. Jedná se o jeden

ze základních parametrů, který je uváděn výrobcem v katalogových listech zdroje či svítidla. Aby bylo možné mezi sebou porovnávat výrobky s různými světelnými toky, hodnoty svítivosti se pro účely grafického znázornění zpravidla přepočítávají na světelný tok 1000 lm [13]. Svítivost umožňuje u zdrojů světla sledovat prostorové rozložení vyzařovaného světelného toku.

Aby bylo možné mezi sebou porovnávat světelné zdroje o různém výkonu, jsou hodnoty svítivosti v prostorových charakteristikách zpravidla přepočítány na hodnotu světelného toku zdroje 1000 lm. Skutečné hodnoty svítivosti je pak třeba dopočítat pomocí skutečného světelného toku zdroje [14].

2.3. Osvětlenost

Osvětlenost neboli intenzita osvětlení je definována jako plošná hustota dopadajícího světelného toku, tedy jako podíl dopadajícího toku $d\Phi_d$ a osvětlené plochy dA :

$$E = \frac{d\Phi_d}{dA} \quad (2.7)$$

Při osvětlení plochy dA pod úhlem β bodovým zdrojem Z , který je umístěn ve vzdálenosti l a v daném směru vyzařuje se svítivostí I_γ , lze osvětlenost této plochy odvodit z rovnic (2.5), (2.6) a (2.7) jako:

$$E = \frac{I_\gamma \cdot \cos \beta}{l^2} = E_n \cdot \cos \beta \quad (2.8)$$

Normálovou osvětleností E_n se rozumí osvětlenost ve směru normály k osvětlené ploše, tedy pod úhlem $\beta = 0^\circ$ [14].

2.4. Barva světla

2.4.1. Barva a spektrum

Vnímání barvy je komplexní fyziologicko-psychický proces, který je silně závislý na daném pozorovateli. Barevný vjem konkrétního pozorovatele tedy nelze přesně určit. Z fyzikálního pohledu lze jednoznačně nicméně stanovit koloritu, tedy barvu předmětů, a chromatičnost, tedy barvu světla zdroje. Tyto veličiny jsou určeny pouze spektrálním složením světla.

Chromatičnost je dána poměrnou spektrální hustotou vyzařovaného světelného toku $\varphi_{e\lambda}$:

$$\varphi_{e\lambda}(\lambda) = \frac{\Phi_{e\lambda}}{\Phi_{e\lambda \max}} = \frac{\left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda}\right)_\lambda}{\left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda}\right)_{\max}} \quad (2.9)$$

Kolorita je pak dána poměrnou spektrální hustotou světla odraženého od materiálu $\varphi_{e\lambda\rho}$ či propuštěného materiálem $\varphi_{e\lambda\tau}$:

$$\varphi_{e\lambda\rho}(\lambda) = \varphi_{e\lambda}(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \quad (2.10)$$

$$\varphi_{e\lambda\tau}(\lambda) = \varphi_{e\lambda}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \quad (2.11)$$

kde $\rho(\lambda)$ je spektrální činitel odrazu a $\tau(\lambda)$ je spektrální činitel prostupu materiálu (více v kapitole 4.1) [12].

Každé vlnové délce světla lze přiřadit konkrétní spektrální barvu (červená, oranžová, žlutá, zelená, atd.). Pokud světlo není monochromatické a obsahuje tedy více než jednu vlnovou délku, obsažené vlnové délky se v oku člověka aditivně skládají a vyvolávají opět určitý barevný vjem. Barvy, které nejsou obsaženy v přirozeném spektru Slunce (v duze), označujeme jako nespektrální (např. purpurová barva složená z červené a fialové, tedy spektrálních barev z opačného konce viditelného spektra).

Pestré barvy jsou barvy spektrální a purpurové a barvy, které vznikly jejich vzájemným mícháním či smícháním s barvou bílou. Nepestré barvy nemají barevný tón. Jedná se o barvu bílou, černou a šedivou a jejich odstíny. Bílá barva vzniká buď smícháním spektrální barvy s ostatními barvami spektra či smícháním dvou vzájemně doplňkových (komplementárních) barev [13].

Závislost (poměrné) spektrální hustoty intenzity vyzařování na vlnové délce se nazývá spektrální charakteristika. Spektrální charakteristika je jednou ze základních charakteristik světelných zdrojů a svítidel. V grafické podobě přehledně zobrazuje emisní spektrum zdrojů a svítidel. Tvar spektrální charakteristiky se mění podle typu světelného zdroje (viz kap. 0).

2.4.2. Trichromatické soustavy

Pro popis barvy jsou vytvořené tzv. trichromatické soustavy, které fungují na principu aditivního míchání barev. Abychom mohli namíchat všechny možné barvy, potřebujeme k tomu alespoň 3 vhodně zvolené (lineárně nezávislé) základní barvy. Každé jednotlivé barvě pak jednoznačně odpovídají konkrétní intenzity těchto základních barev, jejichž smíšením daná barva vzniká.

Každá trichromatická soustava má tedy definované 3 monochromatické základní barvy, jejichž intenzity představují souřadnice v dané trichromatické soustavě. Každé konkrétní barvě pak jednoznačně přísluší určité trichromatické složky, resp. trichromatické souřadnice.

Základní barva má přesně definované poměrné spektrum, které je určeno pomocí tzv. trichromatického koeficientu, značeného např. $\bar{x}(\lambda)$ pro složku X v soustavě XYZ (dle standardu CIE 1931 [3] [8]). Trichromatická složka X daného světelného záření pak lze vypočítat jako:

$$X = \int_0^{\infty} \varphi_{e\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (2.12)$$

Trichromatická souřadnice x se pak vypočítá jako podíl dané složky X a součtu všech složek $X+Y+Z$:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (2.13)$$

Analogicky lze vypočítat zbylé složky a souřadnice Y a Z , nebo jiné složky a souřadnice v jiných trichromatických soustavách.

Existuje několik trichromatických soustav definovaných mezinárodními normami CIE, které se v praxi používají, např. XYZ (standard CIE 1931), CIELUV (nebo také $L^*u^*v^*$; dle standardu CIE 1964), CIELAB (nebo také Lab či $L^*a^*b^*$; dle standardu CIE 1976) apod. [3] [8]. Každá z těchto soustav má své výhody i nevýhody a jejich použití závisí od účelu použití. Lze je také vzájemně přepočítávat [8] [13].

2.4.3. Diagram chromatičnosti

Vynesením všech možných barev vzniklých aditivním mícháním v dané trichromatické soustavě na osy dle daných souřadnic, tzv. trojúhelník barev (diagram chromatičnosti).

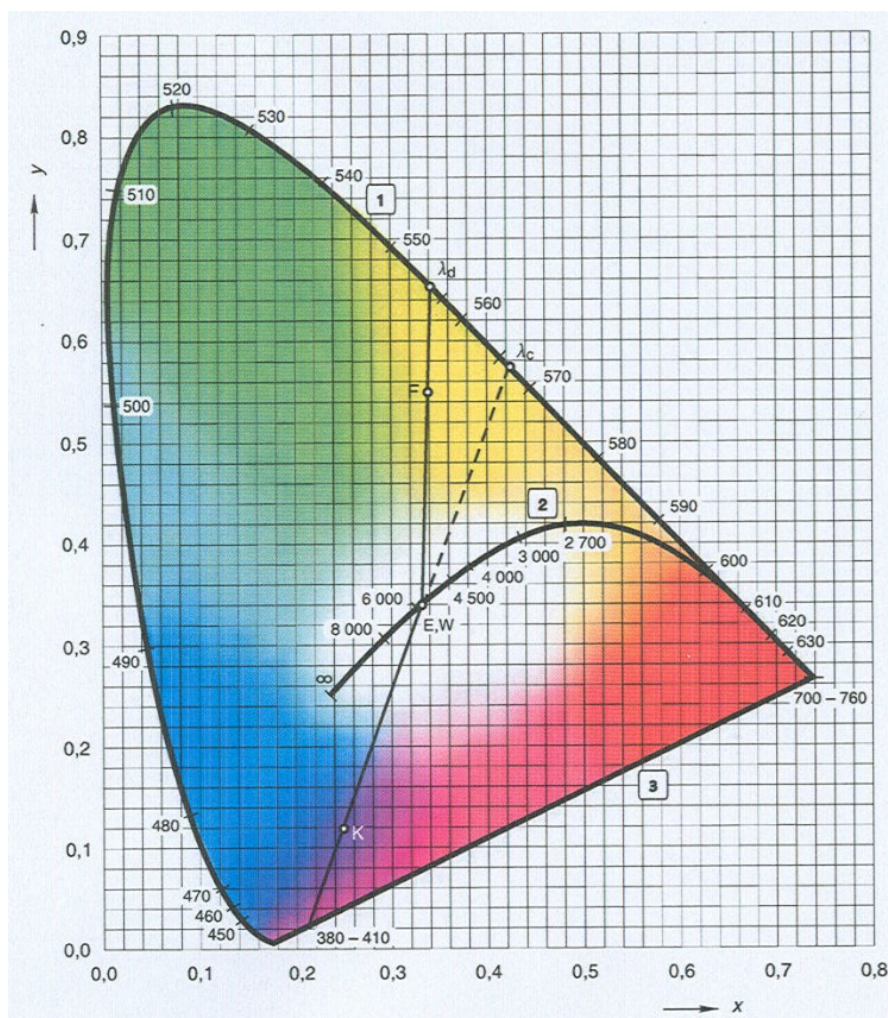
Vzhledem k tomu, že tento diagram vzniká vynesením hodnot ve třech rozměrech (osách), je tento diagram trojrozměrný. Zároveň jde ale o plochu, která je pouze zakřivena a umístěna v prostoru. Pro přehlednost lze tedy tento diagram promítnout do dvojrozměrného prostoru (v případě soustavy XYZ například do roviny xy). Promítnutím je ovšem zkrácen tvar a vzdálenosti mezi jednotlivými body diagramu.

Plocha diagramu je ze tří stran ohraničena křivkou spektrálních monochromatických barev (křivka 1 na Obr. 3), každému bodu na této čáře tedy přísluší jediná vlnová délka, které mohou být na této křivce vyneseny.

Diagram je uzavřen spojením koncových bodů křivky spektrálních barev tzv. přímkou purpurů (křivka 3 na Obr. 3), které nejsou monochromatické, ale vznikají smícháním fialové a červené barvy z okrajů světelného spektra (smícháním vlnových délek 380 nm a 780 nm v různých poměrech). Všechny ostatní body na diagramu vznikají namícháním různých barev v různých poměrech.

V diagramu se také často vyznačuje tzv. čára teplotních zářičů (křivka 2 na Obr. 3). Jedná se o čáru vzniklou spojením bodů, které odpovídají chromatičnosti záření vyzařovaného absolutně

černým tělesem. Pro tyto body přesně platí Wienův posunovací zákon (viz 2.4.4), podle (2.14) jim lze tedy přímo přiřadit teplotu chromatičnosti. Tyto teploty v K bývají na čáře teplotních zářičů vyneseny [13] [25].



Obr. 3 - Diagram chromatičnosti soustavy XYZ (CIE 1931) v pravúhlých souřadnicích x, y [25]

2.4.4. Teplota chromatičnosti

Teplota chromatičnosti T_c [K] je fyzikální veličina odvozená z Wienova posunovacího zákona pro záření absolutně černého tělesa, který říká, že vlnová délka λ_{max} , na které je vyzařována maximální energie, je nepřímo úměrná termodynamické teplotě zářiče T .

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}, \quad (2.14)$$

kde b je Wienova konstanta.

Podle tohoto vztahu tak můžeme podle vyzařovaného spektra určit teplotu světelných teplotních zdrojů (3.1.1).

Teplota chromatičnosti záření je pak definována jako teplota takového absolutně černého tělesa, jehož záření má stejnou chromatičnost, jako záření uvažované.

Teplota chromatičnosti se používá jako jeden z charakteristických údajů pro charakterizaci zdrojů bílého světla. Podle teploty chromatičnosti pak bílé záření dělíme na:

- a) teplé (WW, z angl. *warm white*) – nízká teplota chromatičnosti (méně než cca 3500 K)
- b) neutrální (NW, z angl. *neutral white*) – střední teplota chromatičnosti
- c) studené (CW, z angl. *cool white*) – vysoká teplota chromatičnosti (více než 5000 K)

[13]

Teplota chromatičnosti dle výše uvedené definice má fyzikální smysl pouze u tepelných zářičů, tedy u světelných zdrojů s tvarem spektra odpovídajícím absolutně černému tělesu. Pro ostatní zdroje, pak můžeme definovat ekvivalentní teplotu chromatičnosti T_e , resp. náhradní teplotu chromatičnosti T_n (nebo také CCT; z angl. *Correlated Colour Temperature*).¹

Ekvivalentní a náhradní teplota chromatičnosti je definována jako teplota chromatičnosti takového bodu na křivce teplotních zářičů v diagramu chromatičnosti (viz kap. 2.4.3), který je nejbližší bodu odpovídajícímu chromatičnosti daného spektra. Vizuální vjem chromatičnosti daného spektra je tedy nejbližší vjemu při pozorování spektra absolutně černého tělesa s danou teplotou chromatičnosti.

Ekvivalentní teplota chromatičnosti je definováno pro spektra blízka spektru absolutně černého tělesa, tedy spektra spojitá a bez velkých změn, tvarově velmi podobná absolutně černému tělesu. Náhradní teplota chromatičnosti je pak definována pro světelné zdroje se spojitým spektrem jiného tvaru, nebo spektrem nespojitým či s prudkými změnami [12].

Z diagramu chromatičnosti (Obr. 3, kap. 2.4.3) lze také vysledovat problém nejjednoznačnosti náhradní teploty chromatičnosti. Vzhledem k definici výše lze k různým bodům na diagramu přiřadit stejnou náhradní teplotu chromatičnosti, ačkoliv mají tyto body odlišná spektra. Může se tedy stát, že dva světelné zdroje budou mít stejnou teplotu chromatičnosti, ale jeden bude svítit nazelenale (bod v diagramu chromatičnosti nad čarou tepelných zářičů) a druhý bude narůžovělý (pod čarou tepelných zářičů) [18].

Minimální rozdíl rozeznatelný lidským zrakem mezi dvěma různými teplotami chromatičnosti není konstantní pro všechny hodnoty teplot chromatičnosti. Stejná absolutní změna teploty chromatičnosti je lépe rozeznatelná při nižších hodnotách teploty chromatičnosti (u teplého bílého světla) než při hodnotách vyšších (u studeného světla). Například zvýšení teploty chromatičnosti o 100 K u zdroje s teplotou chromatičnosti 3300 K (wolframová žárovka) bude výrazná a zřetelná

¹ Pro přehlednost bude ve zbytku této práce často používáno toto označení „náhradní“, resp. „ekvivalentní“ pouze v případě, bude-li potřeba tyto pojmy odlišit od teploty chromatičnosti. V opačném případě bude termín „teplota chromatičnosti“ používán jako zástupný pro všechny typy teploty chromatičnosti.

viditelná změna, zatímco stejné zvýšení teploty chromatičnosti o 100 K u denního světla o teplotě 5600 K není téměř rozeznatelné.

Pro popis rozdílů teplot chromatičnosti se proto s výhodou používá převrácené hodnoty teploty chromatičnosti M udávané v jednotkách mired [μrd], která je definována jako:

$$M = \frac{1\,000\,000}{T_c} \quad (2.15)$$

Tyto převrácené hodnoty lze na rozdíl od normálních hodnot teplot chromatičnosti sčítat a odčítat. Vjem barevného rozdílu mezi dvěma teplotami chromatičnosti je přibližně přímo úměrný rozdílu $\Delta M = M_1 - M_2$. V předchozím příkladu změny teploty chromatičnosti o 100 K při 3300 K a 5600 K lze pomocí rovnice (2.15) vyjádřit jako změnu o přibližně 8,9 μrd při teplotě 3300 K a jenom 3,1 μrd při teplotě 5600 K [19].

2.4.5. Index podání barev

Jak je uvedeno ve vztazích (2.10) a (2.11), vjem barvy předmětu je závislý na spektrálním složení světla dopadajícího na předmět. Tento vliv označujeme jako podání barev.

Index podání barev (color rendering index CRI) světelného zdroje pak kvantifikuje kvalitu podání barvy v porovnání s určitým referenčním smluvním zdrojem světla. Nabývá hodnot od 0 do 100, vyšší hodnota znamená lepší podání barev. Referenční zdroj pro hodnocení indexu podání barev by měl mít vždy stejnou (náhradní) teplotu chromatičnosti, jako hodnocený zdroj světla.

Pokud není uvedeno jinak, indexem podání barev se myslí tzv. všeobecný index podání barev R_a . Pro zdroje s $T_n < 5000$ K se jako referenční zdroj uvažuje absolutně černé těleso. Pro zdroje s vyšší teplotou chromatičnosti se jako reference uvažuje tzv. normalizované světlo D, tedy průměrné denní světlo. Index R_a tak pro denní světlo nabývá hodnoty 100, pro monochromatické záření naopak 0.

Pro určité aplikace se stanovují i tzv. speciální indexy podání barev R_1, R_2 , atd., které jsou vztaženy k jiným referencím [13].

3. TYPY SVĚTELNÝCH ZDROJŮ

Světelné zdroje dělíme na přírodní (slunce, blesk,...) a umělé (zdroje vyrobené člověkem [13]). Tato kapitola se zabývá pouze hlavními umělými zdroji, které se v praxi používají nejčastěji.

3.1. Konvenční technologie

„Konvenční zdroje“ je v praxi často používaný souhrnný termín pro všechny zdroje, které nevyužívají LED technologie. Tyto zdroje jsou sice stále hojně používány a vyráběny, nicméně již stojí na okraji technického vývoje, který se dnes převážně soustředí na technologii LED.

3.1.1. Teplotní světelné zdroje

Zdrojem záření u teplotních světelných zdrojů je rozžhavená látka. Patří mezi ně všechny zdroje využívající plamen ohně (svíčka, petrolejka,...) a žárovky (obyčejné a halogenové). Žárovky vyzařují světlo na principu elektroinkadescence z kovového (wolframového) vlákna odporově ohřátého na velmi vysokou teplotu.

Všechny teplotní zdroje mají hladké spojité spektrum tvarem blízké spektru absolutně černého tělesa s nízkou teplotou chromatičnosti (např. 2700-2900 K pro obyčejné žárovky, 1900 K pro svíčku, apod.). Z toho vyplývá, že mají vysoký index podání barev $R_a = 100$.

Dále se vyznačují malým měrným výkonem. Účinnost přeměny energie v obyčejné žárovce dosahuje pouze asi 7-10% a uvažujeme-li i citlivost lidského oka, pak se světelná účinnost pohybuje v řádu pouze jednotek procent [13]. Velká část energie se totiž vyzáří v podobě tepelného záření s vlnovými délkami mimo viditelné spektrum.

3.1.2. Výbojové světelné zdroje

Ve výbojových světelných zdrojích dochází k zapálení elektrického výboje v plynném prostředí. Světlo je pak generováno přímo v samotném výboji nebo je zářením výboje vybuzeo v luminoforu. Mezi hlavní zástupce této skupiny zdrojů patří především zářivky, výbojky nízkotlaké sodíkové, vysokotlaké rtuťové, halogenidové, indukční a vysokotlaké sodíkové, atd.

Výbojové zdroje dosahují vyšších účinností a měrných výkonů než zdroje teplotní. Oproti zdrojům teplotním také pro svůj provoz výbojové zdroje potřebují speciální předřadník, který zajišťuje zapálení a udržení výboje.

Další nevýhodou je jejich nespojitě čárové spektrum. Ve výboji dochází k excitaci jednotlivých atomů plynu a při následném přechodu excitovaného atomu zpět na nižší energetickou hladinu je vyzářen foton s vlnovou délkou λ odpovídající rozdílu daných energetických hladin ΔE dle vztahu $\Delta E = hc/\lambda$. Jelikož každý chemický prvek má jiné uspořádání

elektronového obalu, jsou tyto rozdíly energetických hladin charakteristické pro každý prvek. Zároveň výboj nemůže vyzařovat v celém spektru, ale pouze na těchto diskretních vlnových délkách, jejichž poloha tedy závisí na chemickém složení plynů a par, v kterých výboj hoří.

Z tohoto důvodu tak některé výbojky mohou generovat téměř monochromatické světlo. Typickým příkladem jsou nízkotlaké sodíkové výbojky, které vyzařují pouze v rozsahu vlnových délek 589,0–589,6 nm.

U silně nespojitého spektra nemůžeme docílit vysokých hodnot indexu podání barev. Aby bylo docíleno lepšího podání barev, volí se při výrobě zdroje takové materiály (luminofor a obsažené plyny a příměsi), aby došlo k pokrytí širší části spektra [13].

3.2. LED světelné zdroje

Do této skupiny spadají světelné zdroje využívající světelné (elektroluminiscenční) diody (LED, z angl. *light-emitting diode*).

3.2.1. Princip funkce LED diody

LED diody jsou polovodičové součástky sestávající z přechodu PN, který při průchodu proudem emituje nekoherentní světelné záření. Světelné záření vzniká při zářivé rekombinaci elektronů a děr v oblasti přechodu PN po přiložení napětí správné polarizace.

Při rekombinaci přechází elektron z vodivostní vrstvy elektronového obalu do valenční vrstvy. Podobně jako u výbojových zdrojů je u LED zdrojů vyzařována energie odpovídající rozdílu energií diskretních energetických hladin v elektronovém obalu. Vyzařované světlo je tedy omezeno na velmi úzký rozsah vlnových délek (maximálně desítky nm) a není z principu možné vyzářit samotnou diodou bílé světlo. Konkrétní vlnová délka vyzařovaného světla pak závisí na materiálu diody [10].

3.2.2. Bílá LED dioda

Pro vytvoření vjemu bílého světla potřebujeme k téměř monochromatické barvě světelné diody doplnit i ostatní vlnové délky tak, aby jejich smíšením vznikla barva bílá. Pro vytvoření bílého světla pomocí LED diod se dnes v praxi používá dvou následujících metod, které obě využívají modré diody.

První způsob spočívá v kombinaci tří vhodně zvolených barev², jejichž vzájemným smícháním ve vhodných poměrech vznikne barva bílá, tedy zpravidla kombinací barvy červené, zelené a modré (RGB).

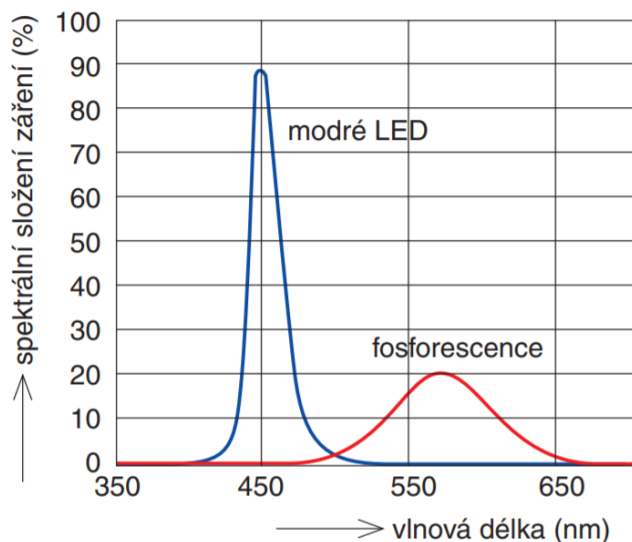
Tento způsob je citlivý na správné vyvážení intenzit jednotlivých složek a při nerovnoměrném stárnutí jednotlivých diod a následném poklesu intenzit může docházet ke změně výsledné barvy. Výsledné spektrum takto vytvořeného bílého světla vzniká součtem spekter jednotlivých diod, vyznačuje se tedy třemi špičkami v místech vlnových délek jednotlivých barev. RGB bílé diody mají nižší světelnou účinnost a jsou složitější a dražší na výrobu, což je důvod jejich nízkého využití v osvětlování [10] [18].

Druhý způsob využívá k vytvoření bílého světla modrou LED diodu s luminoforem (PC LED dioda, z angl. *phosphor-converted*). Luminofor excitovaný modrou diodou vyzařuje fosforescenci záření v širokém pásmu vlnových délek s maximem v oblasti žluté barvy. Modrá barva vyzářená diodou částečně prochází luminoforem a skládá se se spektrem vyzářeným luminoforem tak, že jejich kombinací vzniká bílé světlo (Obr. 4).

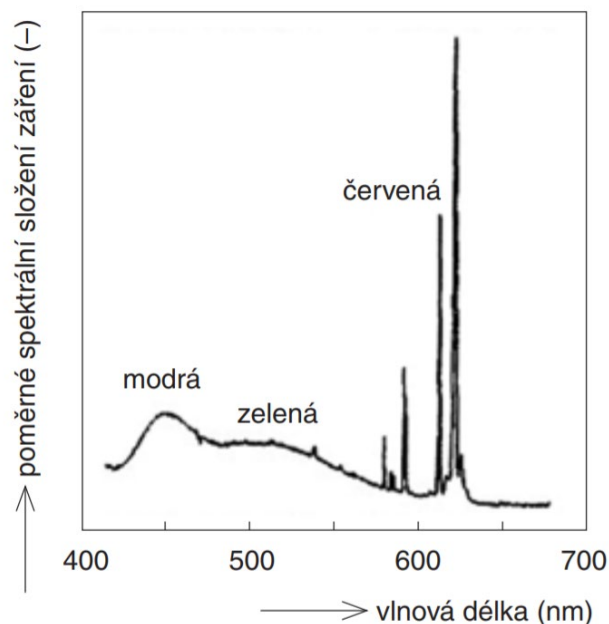
Tento způsob má vyšší světelnou účinnost než RGB model, ale výsledné spektrum má většinou nízký index podání barev kvůli dominantní modré složce, která vytváří výraznou úzkou špičku v porovnání s částí spektra vytvořené luminiscencí, a kvůli potlačené zelené a červené barvě.

Tento problém lze (alespoň částečně) odstranit použitím luminoforu s širším pásmem vyzařování, což sice vede k vyššímu CRI, ale zato klesá účinnost. Například tzv. trojpásmový luminofor buzený ultrafialovou diodou (princip podobný zářivce) sice není tak energeticky výhodný, ale ultrafialová složka se zde neuplatňuje, výsledné spektrum (Obr. 5) proto dosahuje vyšších hodnot R_a [10] [18].

² V principu je možné pro vytvoření bílého barevného vjemu využít pouze dvě komplementární barvy (viz kap. 2.4), ale podání barev výsledného spektra je nevyhovující pro běžné účely v osvětlení [15].



Obr. 4 - Spektrum bílé LED diody využívající fosforescenci luminoforu [10]



Obr. 5 - Spektrum bílé LED s třípásmovým luminoforem excitovaným UV diodou [10]

Lze i kombinovat oba výše zmíněné přístupy. Účelem takové hybridní metody je zlepšit podání barev či účinnost diody, většinou ale na úkor jiné kvalitativní vlastnosti. Zpravidla se jedná o kombinaci bílé PC diody a červené diody [18].

3.2.3. Vlastnosti a výhody LED diod

Bílé LED diody mají široký rozsah náhradní teploty chromatičnosti od 2500 K (zřídka i méně) do 8000 K. Mezi další jejich výhody patří malé rozměry, vysoká účinnost a měrný výkon a dlouhá doba života a spolehlivost, mohou svítit v libovolné poloze a jsou plně stmívatelné a dynamicky říditelné. Mezi nevýhody patří vyšší pořizovací cena, výrazná teplotní závislost světelně technických vlastností (nároky na chlazení) [10] [13].

Od ostatních světelných zdrojů se LED liší směrem vyzařování. U teplotních i výbojových zdrojů je místo vzniku záření (elektrický výboj, rozžhavené vlákno,...) umístěno v prostoru tak, že vznikající světelné záření se může šířit do všech směrů. Až následně je světlo různými světelně činnými částmi (viz 4.3) usměrněno do požadovaného směru.

U LED zdrojů vzniká záření v polovodičovém přechodu, který je vytvořen tak, že vznikající světlo je vyzařováno pouze na jednu stranu od roviny přechodu, tedy pouze do jednoho poloprostoru. Tato vlastnost i bodový charakter diody kladou specifické nároky na světelně činné části LED svítidel a zdrojů.

Spektrum obou typů bílých LED diod (PC i RGB) obsahuje výrazně vyšší podíl modré složky obzvláště v porovnání s teplotními zdroji.

4. SVĚTELNĚ ČINNÉ ČÁSTI SVÍTIDEL

4.1. Veličiny charakterizující světelně technické vlastnosti materiálů

Při dopadu světla na materiál může být část světla pohlcena materiálem, část odražena a část světla může materiálem projít. Dopadající světelný tok Φ je tedy rozdělen na 3 složky: část odraženou Φ_ρ , absorbovanou Φ_α a část Φ_τ , která projde materiálem:

$$\Phi = \Phi_\rho + \Phi_\tau + \Phi_\alpha \quad (4.1)$$

Poměry jednotlivých složek vůči dopadajícímu toku definujeme jako integrální činitel odrazu ρ , integrální činitel prostupu τ a integrální činitel pohlcení α :

$$\rho = \frac{\Phi_\rho}{\Phi}, \quad \tau = \frac{\Phi_\tau}{\Phi}, \quad \alpha = \frac{\Phi_\alpha}{\Phi} \quad (4.2)$$

Tyto činitele (indexy) patří mezi základní světelně technické parametry materiálů. Jejich vztah vychází z rovnice (4.1):

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \quad (4.3)$$

Poměry jednotlivých složek záření se mohou lišit pro různé vlnové délky. Proto se kromě výše definovaných integrálních činitelů analogicky definují i spektrální indexy $\rho(\lambda)$, $\tau(\lambda)$ a $\alpha(\lambda)$. Jak lze odvodit z rovnic (2.4) a (4.2), z těchto spektrálních indexů pak můžeme odpovídající integrální indexy spočítat integrací podle vztahu:

$$\rho = \frac{\int_0^\infty \left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda}\right)_\lambda V(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda}\right)_\lambda V(\lambda) d\lambda}, \quad (4.4)$$

resp. podle analogických vztahů pro činitele τ a α . [12]

Absorpce světla je způsobena srážkou fotonů s atomy látky, kdy dojde k předání energie fotonu valenčnímu elektronu, který díky této energii excituje na jinou energetickou hladinu. Pravděpodobnost srážky fotonu s atomem je tím větší, čím více atomů je v látce. Dle Lambert-Beerova zákona míra absorpce lineárně roste s tloušťkou materiálu [17].

4.2. Jevy na rozhraní optických materiálů

4.2.1. Odraz a rozptyl

Rozlišujeme dva typy odrazů světelného paprsku od materiálu – zrcadlový a rozptylný (difuzní).

Při zrcadlovém odrazu se světelný paprsek odráží od materiálu pod stejným úhlem, pod kterým dopadl. Jedná se o ideální případ, kterého v praxi nelze zcela dosáhnout. Téměř ideálního zrcadlového odrazu lze docílit na kovových plochách, které jsou důkladně a přesně vyleštěny. Jakékoliv nerovnosti povrchu mohou změnit úhel odrazu. Zrcadlového odrazu se využívá u zrcadel a reflektorů.

Při difuzním odrazu je světelný paprsek z místa dopadu vyzařován rovnoměrně do všech směrů. Ozářený bod rozptyluje světlo do okolí s rozložením svítivosti dle vztahu:

$$I_{\gamma} = I_0 \cdot \cos \gamma \quad , \quad (4.5)$$

kde I_0 je svítivost ve směru kolmém od ozářené plochy a γ je úhel mezi odraženým paprskem v daném směru a normálou k ozářené ploše. Tento způsob odrazu je také idealizovaný. Za ideálně difuzní povrchy jsou například považovány stěny místností a další plochy v interiéru při světelně technických výpočtech (z důvodu zjednodušení výpočtu), apod.

U reálných povrchů dochází vždy ke smíšenému odrazu, tedy ke kombinaci obou typů odrazů. Část světla je odražena zrcadlově a část je rozptýlena.

Úhel odrazu nezávisí na vlnové délce dopadajícího světla [13].

K těmto jevům dochází i po prostupu světla materiálem při výstupu z materiálu. U přímého prostupu světla vystupuje světelný paprsek z materiálu ve stejném směru, v jakém do něj vstupoval. Při dokonalém rovnoměrně rozptylném prostupu je na výstupu světlo rozptýleno do všech směrů se stejným kulovým rozložením svítivosti, jako je uvedeno u difuzního odrazu výše. Stejně jako u odrazu jsou oba typy prostupu ideální a v praxi nerealizovatelné. U skutečných materiálů dochází ke kombinaci obou typů prostupů světla [11] [13].

4.2.2. Lom a disperze

Rychlost světla je závislá na prostředí, ve kterém se světlo šíří. Každý materiál je charakterizován bezrozměrnou veličinou (absolutní) index lomu n , který je definovaný jako podíl

rychlosti šíření světla v daném materiálu v a rychlosti světla ve vakuu c . Relativní index lomu n_{12} pak definujeme jako podíl rychlostí šíření světla v_1 a v_2 ve dvou optických prostředích.

$$n = \frac{c}{v}, \quad n_{12} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (4.6)$$

Při přechodu světla mezi prostředími s různými indexy lomu dojde k lomu světla a změně směru jeho šíření. Prochází-li světelný paprsek z prostředí s indexem lomu n_1 do prostředí s indexem lomu n_2 a dopadá-li světlo pod úhlem α (úhel mezi dopadajícím paprskem a kolmicí dopadu) na rozhraní mezi prostředími, zalomí se pod úhlem β (mezi paprskem a kolmicí) podle Snellova zákona:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \quad (4.7)$$

Při přechodu z opticky hustšího prostředí (s větším indexem lomu n_1) do prostředí opticky řidšího (s menším indexem lomu n_2) se láme světlo od kolmice (při opačném směru šíření ke kolmici), úhel lomu β je tedy větší než úhel dopadu α . Zvyšujeme-li totiž úhel α , úhel β se stále zvyšuje, až při určitém mezním úhlu α_m dosáhneme situace, kdy je úhel lomu maximální, tedy $\beta = 90^\circ$.

Zanedbáme-li absorpci, tak na každém optickém rozhraní se část světla odráží a část láme (jak bylo uvedeno v kapitole 4.1). Při vyšších úhlech dopadu než je mezní ($\alpha > \alpha_m$) již však k lomu nedochází a světlo je celé odraženo. Této situaci říkáme úplný (totální) odraz světla.

Vztah pro mezní úhel můžeme odvodit z (4.7):

$$\sin \alpha_m = \frac{n_2}{n_1} \quad (4.8)$$

kde zřejmě $n_2 < n_1$.

Na rozdíl od odrazu je lom světla závislý na vlnové délce (resp. frekvenci) světla. To vychází z toho, že rychlost šíření světla v optickém prostředí závisí na frekvenci. S rostoucí frekvencí se zvyšuje index lomu a snižuje se úhel lomu světla. Z viditelného spektra se tedy nejvíce láme světlo fialové a nejméně světlo červené.

Důsledkem této frekvenční závislosti je disperze světla, což je jev, při kterém je bílé světlo rozloženo na jednotlivé monochromatické složky. K rozkladu dochází při lomu světla, kdy se každá vlnová délka zalomuje pod jiným úhlem. Disperzí vzniká například duha při rozkladu slunečního spektra při průchodu světla kapičkami vody [28].

4.3. Světelně činné části svítidel

Světelně činné části svítidel jsou ty části svítidla, které ovlivňují směr šíření světla ze světelného zdroje nebo jeho charakter. Upravují rozložení světelného toku svítidla a zásadně ovlivňují jeho fotometrické vlastnosti.

Mezi základní části patří reflektory, difuzory, čočky a refraktory, které budou popsány dále. Také mezi ně můžeme zařadit filtry, stínidla a kryty, světlovody a holografické prvky, nicméně tyto části se u LED svítidel určených k osvětlování až na výjimky nepoužívají.

Tyto části nemusí být vždy součástí svítidla, ale mohou být již součástí samotného zdroje světla.

4.3.1. Reflektory

Reflektory využívají ke změně směru světelných paprsků odrazu. Podle podílu zrcadlově a difuzně odraženého světelného toku reflektory dělíme na zrcadlové, matované a difuzní.

Činitel odrazu materiálu může být spektrálně závislý, chromatičnost odraženého světla tedy může být odlišná od světla dopadajícího.

Zrcadlové reflektory, které využívají hlavně zrcadlového odrazu světla, jsou nejvyužívanějším typem, jelikož zrcadlový odraz dovoluje přesné směřování odražených paprsků. Různým tvarem reflektoru lze docílit rozmanitého rozložení svítivosti.

Mezi symetrické reflektory, které vytvářejí symetrické rozložení svítivosti ve všech fotometrických rovinách, patří především reflektory paraboloidní, kulové a elipsoidní, případně kombinace těchto typů, u kterých lze jednoduše geometricky spočítat směr odražených paprsků a tedy i určit výsledné rozložení odraženého světelného toku. Tvar může být rotačně souměrný (pro bodové světelné zdroje) nebo korýtkový (pro lineární zdroje).

Asymetrické reflektory vytvářejí nesymetrické rozložení svítivosti alespoň v jedné fotometrické ploše. Toho se využívá především tam, kde svítidlo nemůže být umístěno uprostřed osvětlovaného prostoru, ale potřebujeme mít rovnoměrné osvětlení. Typickým příkladem jsou svítidla určená pro uliční osvětlení, kdy je svítidlo umístěno na okraji osvětlované vozovky.

Směr odrazu paprsků je také závislý na poloze zdroje vůči reflektoru, resp. jeho středu či ohnisku. Pro další tvarování výsledné křivky svítivosti se základní hladký tvar reflektoru může rozčlenit na rovinné či jinak tvarované (prostorové) malé plošky, tzv. fazety.

Matované reflektory využívají smíšeného odrazu světla. Jejich výhodou je, že nevzniká zrcadlový odraz světelného zdroje, což může omezit oslnění a zrovnoměnit rozložení světelného toku (křivka svítivosti je hladší). Přesto je u těchto reflektorů dominantní část světelného toku odražena v požadovaném směru.

Difuzní reflektory využívají především difuzního odrazu. Tyto reflektory tedy ze své podstaty nemohou být využity k přesnému nasměrování světelného svazku do určitého směru. Používají se především k omezení světelného toku na určitou část prostoru a k rovnoměrnému rozptýlení světla. Tvar reflektoru má na rozložení svítivosti minimální vliv, výsledná křivka svítivosti má přibližně kosinusový průběh dle (4.5) [13].



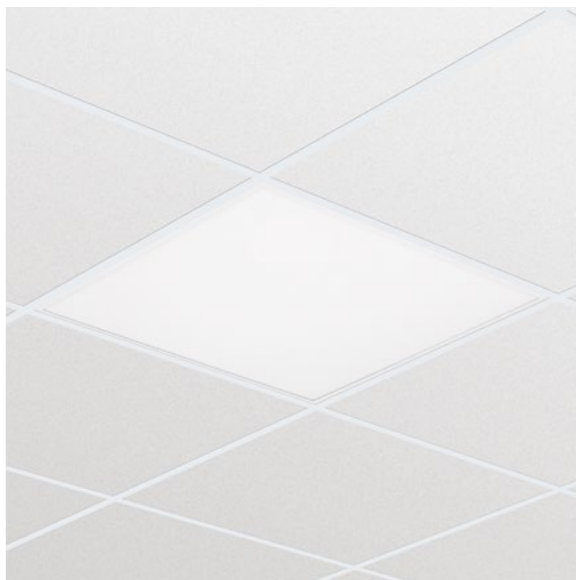
Obr. 6 - LED svítidlo s rotačně symetrickým zrcadlovým reflektorem s fazetami - Philips Ecostyle ST440T [16]



Obr. 7 - LED svítidlo s difuzním reflektorem - Philips Ledinaire Mini BVP105 [16]

4.3.2. Difuzory

Difuzory jsou průsvitné materiály rozptylující světlo, které jimi prochází. Rozptylem světla je docílena změna tvaru čar svítivosti svítidla podle rovnice (4.5) (viz 4.2.1) a snížení jasu (omezení oslnění od velmi jasných bodových zdrojů) [13].



Obr. 8 - Svítidlo s difuzorem - Philips Ledinaire RC065B [16]

4.3.3. Čočky a refraktory

Čočky a refraktory využívají ke změně směru šíření světla lomu.

Optické čočky se používají především u LED zdrojů a svítidel. Svítivost samostatné diody je totiž blízká kosinusovému (difuznímu) záření dle vztahu (4.5), což pro velkou část aplikací není vyhovující a je potřeba toto rozložení svítivosti upravovat. Vzhledem k malým rozměrům diod je jednoduché vybavit každou diodu vlastní čočkou, čímž se docílí potřebného tvaru fotometrické roviny. Čočky LED diod mohou být různých tvarů a typů - od rotačně symetrických, které pouze zužují světelný svazek, po složité tvary, které přesně modelují tvar čar svítivosti (používáno například pro LED uliční osvětlení).

Refraktory využívají kromě lomu světla i úplný odraz od vnitřního rozhraní. Paprsky, které na rozhraní dopadají pod úhlem větším než mezním, jsou odraženy zpět do materiálu. To eliminuje vyzařování jinak difuzního světla diody do směrů, které jsou příliš odkloněny od požadovaného směru, čímž je omezeno oslnění při bočním pohledu do svítidla. Typickým příkladem jsou prizmatické kryty zářivek [13].

5. MĚŘENÍ SPEKTRÁLNÍCH PROSTOROVÝCH CHARAKTERISTIK

5.1. Měřicí přístroje

5.1.1. Fotometrická lavice

Fotometrická lavice je přístroj sloužící k měření svítivosti. Přístroj sestává z kolejnic s pojezdnými vozíky, na něž se umísťuje měřený světelný zdroj a samotný měřicí přístroj. Na kolejnicích je měřítko, podle něhož se dá přesně nastavit vzdálenosti zdroje od měřicího přístroje.

Pro měření je také potřeba zajistit, aby středy zdroje a měřicího přístroje byly ve stejné výšce, a aby tedy vzdálenost na kolejnici odpovídala kolmé vzdálenosti mezi zdrojem a měřicím přístrojem. Na vozíky lze připevňovat množství nástavců, kterými lze zajistit správnou výšku připevněného předmětu nebo natočení o přesně stanovený úhel.

Na lavici lze také umístit řadu clon za účelem eliminování světla rozptýleného a odraženého od okolních předmětů, aby bylo možné měřit pouze světlo vycházející přímo z měřeného zdroje [14].

Samotné změření svítivosti zajišťuje fotometr. Hlavní funkční částí fotometru je fotočlánek, součástka schopná detekovat dopadající světelné záření, která může pracovat na různých fyzikálních principech. Používanými principy jsou fotoemise (využíváno ve fotonkách a fotonásobičích), fotovodivost (ve fotorezistorech) a nejčastěji fotoelektrický jev (ve fotodiodách) [5].

5.1.2. Goniofotometr

Prostorové charakteristiky (čáry svítivosti) svítidel a světelných zdrojů se měří pomocí goniofotometru.

Goniofotometr se skládá z dlouhého ramene o pevně stanovené délce, na jehož jednom konci je umístěn měřený zdroj či svítidlo a na druhém konci fotometr. Přístroj zajišťuje vzájemný pohyb a natočení světelného zdroje či svítidla a fotometru tak, aby bylo možné naměřit intenzitu osvětlení ve všech úhlech pro jednotlivé fotometrické roviny, přičemž zachovává vzdálenost mezi zdrojem záření a fotometrem. Podle konstrukčního uspořádání se goniofotometry mohou lišit tím, který z prvků (zdroj nebo fotometr) se otáčí a který je pevně uchycen, popřípadě jsou pevně uchyceny oba a kolem zdroje se otáčí soustava zrcadel. Naměřená data jsou většinou průběžně zpracovávána počítačem [6] [13].

5.1.3. Spektrometr

Spektrometr je přístroj pro měření spektrálních charakteristik (viz 2.4.1).

Abychom mohli změřit intenzitu záření (spektrální hustotu vyzařování) na jednotlivých vlnových délkách, je potřeba jednotlivé vlnové délky od sebe oddělit.

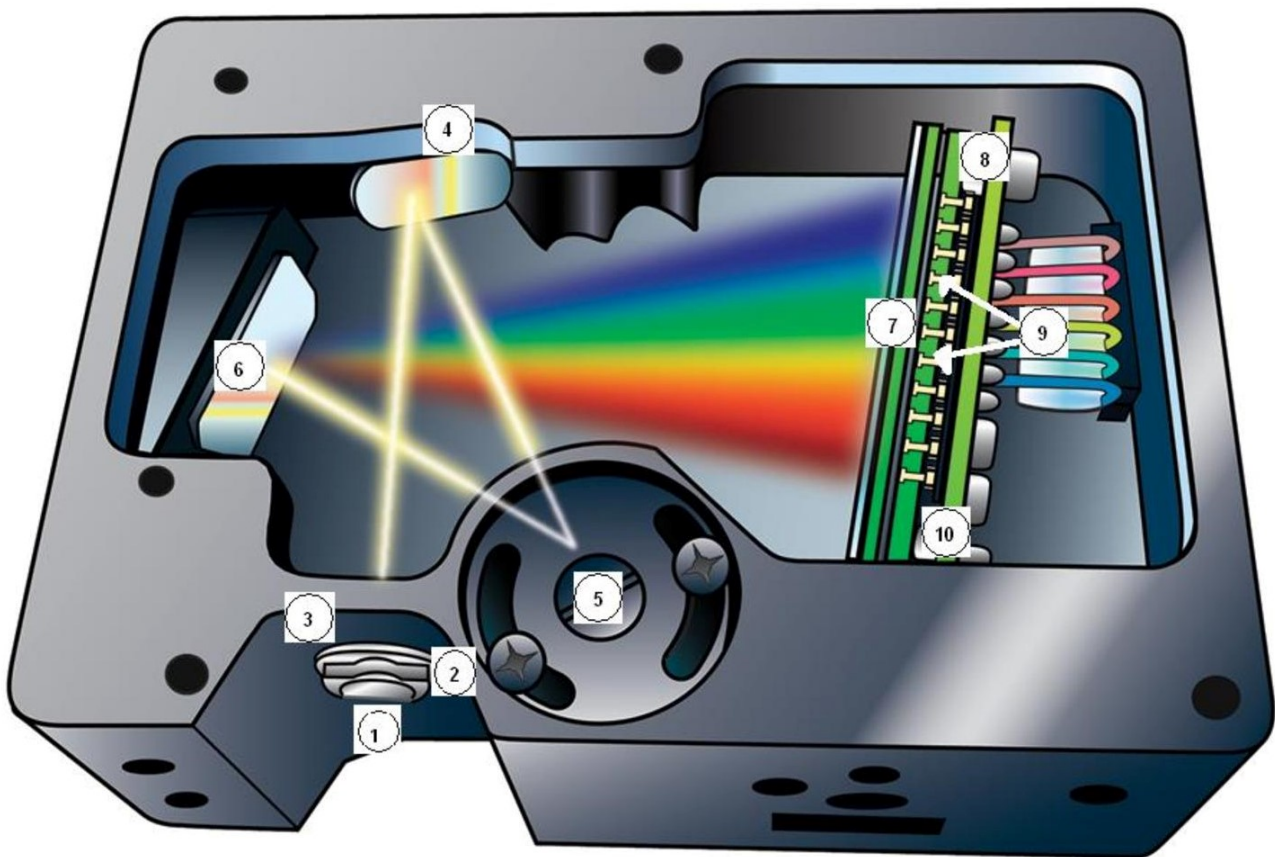
K rozdělení bílého světla na barevné složky dochází při disperzi světla (viz 4.2.2). Nevýhodou disperze světla je ale nutnost průchodu materiálem optického hranolu, během něhož může dojít k absorpci některých částí záření (konkrétní absorbované vlnové délky závisí na materiálu, např. sklo má velmi nízkou transmisivitu v oblasti UV záření, apod.), což by výrazně ovlivnilo měřené spektrum. Z tohoto důvodu, se pro účely spektroskopie používá difrakce záření na difrakční mřížce, u níž světlo žádným materiálem neprostopuje.

Difrakční mřížka je tvořena velkým počtem malých děr, které jsou od sebe ve vzdálenosti b (mřížková konstanta). Jednotlivé otvory v mřížce se dle Huygensova principu chovají jako bodové zdroje koherentního světla. Vzdálenost bodu na stínítku, kam světlo dopadá, je od každého otvoru jiná. Záření dopadající na stínítko z různých otvorů mřížky je tedy fázově posunuto o dráhový rozdíl Δl a dochází k jeho k interferenci (skládání). Jelikož dráhový rozdíl se liší pro jednotlivé body na stínítku, někde dojde k interferenci konstruktivní (sečtou se maxima ve fázi) a někde k interferenci destruktivní (sečte se maximum s minimem). Na stínítku tak vznikají tzv. interferenční maxima a minima. Pro maximum řádu $k \in \mathbb{N}_0$ (pořadí maxima od středu), které vzniklo pod úhlem α od mřížky lze odvodit vztah:

$$\Delta l = k\lambda = b \sin \alpha \quad (5.1)$$

Z tohoto vztahu je zřejmé, že poloha maxima (úhel α) je závislá na vlnové délce záření. Průchodem bílého světla difrakční mřížkou lze tedy světlo rozdělit na jednotlivé vlnové délky a jednotlivé barevné složky dále měřit jako u disperze na optickém hranolu [28].

Na Obr. 9 je naznačen princip funkce běžného spektrometru. Měřený paprsek vstupující do spektrometru je nejprve zaostřen zrcadly a štěrbinami (na Obr. 9 čísla 1–4) na difrakční mřížku (č. 5). Při průchodu světla mřížkou dojde k disperzi na jednotlivé barevné složky. Takto prostorově oddělené složky jsou pak dále opticky zaostřeny (č. 6) na fotočlánky (č. 8; většinou CCD), které změří jejich intenzitu a převedou na signál, který může být dále zpracován počítačem [27].



Obr. 9 - Princip funkce spektrometru [27]

5.2. Hypotézy

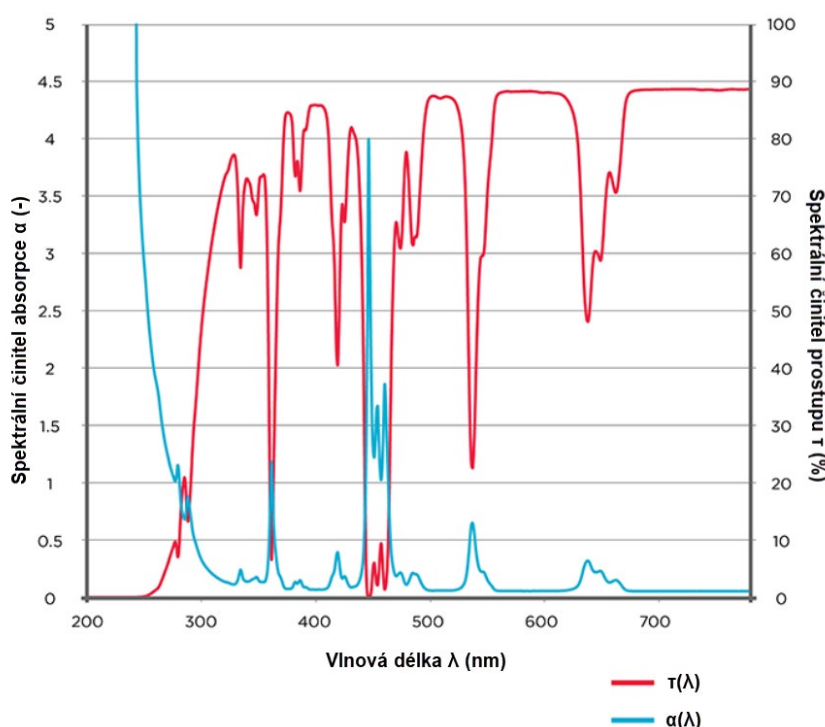
Spektrální prostorové charakteristiky jsou kombinací standardních (integrálních) prostorových charakteristik a charakteristik spektrálních. Zobrazují závislosti emisního spektra na úhlu vyzařování světelného zdroje či svítidla.

Jak bylo ukázáno v přechozích kapitolách, směr paprsků vyzařovaných svítidlem je ovlivňován řadou světelně činných součástí. Některé z jevů, ke kterým dochází při prostupu světla optickými materiály, jsou závislé na frekvenci. Dá se tedy předpokládat, že světlo různých vlnových délek bude vyzařováno pod různými úhly s jinými intenzitami a emisní spektrum svítidla se tedy bude lišit v závislosti na pozorovacím úhlu.

Uvažujme situaci, kdy světlo vyzářené LED diodou prochází nějakým optickým materiálem (luminoforem, čočkou, difuzorem,...). Při průchodu světla přes rozhraní mezi vzduchem a optickým materiálem dochází k disperzi světla (viz 4.2.2). Světelný paprsek s kratší vlnovou délkou (např. modré barvy) se zalomí více, než paprsek delší vlnové délky (např. červené barvy). V krajních úhlech vyzařování svítidla bychom tedy mohli očekávat větší podíl kratších vlnových délek (modré barvy).

Tento jev se ale především uplatňuje tehdy, když vstupní a výstupní strana materiálu svírají nenulový tzv. lámavý úhel (nejsou rovnoběžné, tedy např. u čoček). U rovnoběžných materiálových rozhraní sice dojde k rozdělení paprsku na barevné složky, ale výstupní směr vyzařování těchto složek zůstane nezměněn. Pokud je svítidlo navíc opatřeno difuzorem, difúze může tento jev zcela eliminovat, jelikož výstupní záření je kosinusově rozptýleno dle rovnice (4.5) nezávisle na vlnové délce.

Dalším jevem závislým na vlnové délce je prostup, resp. absorpce (viz 4.1). Absorpční index běžně používaných optických materiálů (sklo, PMMA, apod.) sice dosahuje velmi vysokých hodnot v oblasti UV záření, ale v rozpětí viditelných vlnových délek je velmi malý, popř. s úzkými absorpčními spektrálními čarami (viz Obr. 10). Tento jev sám o sobě ale nevysvětluje prostorové změny spektra vyzařování.



Obr. 10 - Absorpční spektrum filtru Kopp Glass' 3131 [11]

Druhá hypotéza je postavena na interakci záření a luminoforu. Většina LED diod používaných v osvětlování je typu PC, dioda je tedy opatřena luminoforem, který absorbuje část záření modré diody. Jak bylo zmíněno v kap. 4.1, míra absorpce je lineárně závislá na vzdálenosti, kterou musí světlo v materiálu urazit. Světlo vyzářené kolmo z diody prochází nejkratší cestou skrz luminofor, je tedy nejméně absorbováno. Naproti tomu při zvyšujícím se úhlu vyzařování světla z diody vůči kolmému směru se vzdálenost prostupu luminoforem zvyšuje a tedy roste i míra absorpce. V krajních úhlech vyzařování lze tedy očekávat menší podíl modré části vyzářeného světelného spektra.

Zmíněné hypotézy předvídají odlišné výsledky. První očekává větší podíl krátkých vlnových délek (modré složky světla) při velkých úhlech vyzařování, zatímco druhá efekt opačný. Nicméně dle obou hypotéz se spektrum vyzařování LED svítidel mění v závislosti na úhlu vyzařování.

Úkolem následujícího měření je ověřit, zda je spektrum vyzařování LED svítidel opravdu úhlově proměnné, a v případě potvrzení tohoto předpokladu ukázat, zda v krajních vyzařovacích úhlech dojde k omezení modré složky záření, či naopak.

5.3. Spektrální prostorové charakteristiky

Spektrální prostorovou charakteristiku si lze představit jako kombinaci spektrální charakteristiky (viz 2.4.1) a charakteristiky prostorové (viz kap. 2.2, kde místo svítivosti uvažujeme spektrální hustotu intenzity vyzařování).

Lze ji chápat dvěma způsoby:

- a) jako změnu spektra v závislosti na poloze v prostoru vůči svítidlu (resp. na úhlu vyzařování)
- b) jako změnu prostorové charakteristiky v závislosti na vlnové délce.

Z toho vyplývá i možnost, jak lze tuto charakteristika graficky zobrazit. Dle a) lze pro různé úhly vyzařování sestavit poměrné spektrální charakteristiky a následně je vynést do společného grafu. Tento způsob je nejnázornější a lze pomocí něho zobrazit i malé změny spektra.

Další způsoby zobrazení spektrálních prostorových charakteristik již nejsou tak názorné ani praktické, nicméně v principu jsou stále použitelné. Dle přístupu b) lze do jednoho grafu vynést prostorové charakteristiky sestavené pro různé vlnové délky. Jelikož se jedná o závislost 3 veličin (poměrná spektrální hustota intenzity vyzařování, úhel vyzařování a vlnová délka), lze také charakteristiku vynést v 3D grafu.

5.4. Měření LED svítidla

Měřenými vzorky byla LED svítidla Philips RC464B PowerBalance Tunable White (Obr. 11) [24] a iGiuzzini P725 (Obr. 12) [21].

Svítidlo Philips RC464B PowerBalance je čtvercové podhledové svítidlo. Skládá se z pole 4×4 menších čtvercových sektorů a v každém sektoru je skupina 3×3 menších PC LED diod. Svítidlo je typu Tunable White, což je označení pro svítidla s proměnnou teplotou chromatičnosti. Část diod svítí s teplotou chromatičnosti 6300 K a část s teplotou 2700 K. Jednotlivé teploty chromatičnosti jsou samostatně ovládané, mohou tedy svítit v různých poměrech intenzit. Tím lze docílit plynulé regulace teploty chromatičnosti v rozmezí 2700–6300 K. Nad diodami je v každém sektoru PMMA difuzor a difuzní (matný bílý) PMMA reflektor ve tvaru čtyřbokého komolého jehlanu se zaoblenými hranami, které zajišťují rovnoměrné rozptýlení světla tak, aby došlo k důkladnému

smíchání světél obou teplot chromatičnosti a svítidlo tak ze spodního pohledu nevypadalo dvoubarevné. Další technické parametry svítidla jsou k dispozici přes odkaz [24].

Svítidlo iGuzzini P725 je reflektorové svítidlo určené k instalaci do podhledu. Sestává se z jednoho velkého PC LED čipu a rotačně symetrického zrcadlového reflektoru s fazetami. Tuto část lze natáčet až do úhlu cca 30° od vertikálního směru, což ale pro toto měření nebylo využito. Na zrcadlový reflektor navazuje lesklý černý čtvercový reflektor, který již ale nijak neovlivňuje další šíření světla. Svítidlo nemá žádný difuzor. Další technické parametry svítidla jsou k dispozici přes odkaz [21].



Obr. 11 - Svítidlo Philips RC464B PowerBalance Tunable White [20]



Obr. 12 - Svítidlo iGuzzini P725 [21]

5.5. Postup měření spektrálních prostorových charakteristik

5.5.1. Měřicí přístroj a postup měření

Abychom mohli sestavit spektrální prostorovou charakteristiku svítidla, je potřeba změřit spektrum svítidla v různých úhlech vyzařování.

Pro měření těchto charakteristik slouží goniospektrofotometr, kombinující principy goniofotometru (viz 5.1.2) a spektrometru (5.1.3). Tento přístroj ale bohužel není součástí vybavení školní laboratoře fotometrie katedry elektroenergetiky na FEL ČVUT, kde bylo měření prováděno. [26] V praxi používané goniospektrofotometry se navíc využívají především k měření barvy předmětů, jejichž barva se mění podle úhlu pohledu, často v přenosném provedení (jako např. přístroj MA68II firmy BAS Rudice spol. s r. o. [32]), což je pro účely tohoto měření nevhodné.

U měření spektrálních prostorových charakteristik by totiž mělo být zajištěno (podobně jako u měření čar svítivosti), že svítidlo bude splňovat parametry bodového zdroje.³ Měřicí přístroj tedy musí být umístěn dostatečně daleko od svítidla, vzhledem k rozměrům měřených svítidel (60x60 cm u svítidla PowerBalance [24]) ve vzdálenosti alespoň několik metrů.

Goniospektrofotometr je ale v podstatě pouze goniofotometr se spektrometrem místo fotometru. Je tedy možné ho sestavit z přístrojů, které jsou v laboratoři fotometrie k dispozici. Při měření je pouze potřeba zajistit měření spektra z různých úhlů a v konstantní vzdálenost měřicího čidla od svítidla.

Pro účely měření spektra byl použit spektrometr Gossen Mavospec Base (technické parametry jsou uvedeny v Příloze 0) [20]. V laboratoři je dále mimo jiné k dispozici goniofotometr a fotometrická lavice [26], nabízejí se tedy dvě možnosti, jak měření provádět:

- a) Spektrometr umístit na rameno goniofotometru – rameno zajistí konstantní vzdálenost od svítidla a otáčením ramene lze nastavit různé úhly vůči nehybnému svítidlu.
- b) Spektrometr umístit na fotometrickou lavici – spektrometr je nehybný a v konstantní vzdálenosti od svítidla (resp. posunem spektrometru po lavici lze nastavovat různá vzdálenost) a nastavení úhlu lze zajistit rotací svítidla kolem své osy.

Z důvodu omezených možností připevnění svítidla a spektrometru na goniofotometr byl pro toto měření zvolen postup b). Nevýhodou tohoto způsobu je, že svítidlo nesvítí ve standardním vertikálním směru, ale je natočeno do směru horizontálního. Pro účely našeho měření to nepředstavuje žádný problém, pouze až při dlouhodobějším provozu by toto mohlo mít vliv na spolehlivost (chlazení, apod.).

Měřené svítidlo bylo připevněno na fotometrickou lavici do vzdálenosti 3 m od spektrometru. Svítidlo bylo umístěno na otočný čep s měřítkem úhlu otočení. Výška umístění svítidla a spektrometru byla nastavena tak, aby čidlo spektrometru leželo v optické ose svítidla a směřovalo přímo ke svítidlu. Této poloze odpovídá úhel natočení svítidla 0°.

Pro měření prostorových charakteristik by se mělo měřit v různých fotometrických rovinách C- γ (viz 2.2) [6]. Obě měřená svítidla jsou ale středově symetrické, pro potřeby tohoto měření bylo měření provedeno pouze v jedné z rovin (C = 0°), jelikož výsledky měření v ostatních rovinách by byly stejné (dle technických údajů svítidel [24] [21] čáry svítivosti pro jednotlivé roviny splývají).

³ Vzhledem k tomu, že metodika měření spektrálních prostorových charakteristik není součástí žádné aktuální technické normy, tento i další požadavky na měření byly přeneseny ze stávajících požadavků na měření prostorových charakteristik a charakteristik spektrálních dle platných norem (viz [4]).

Fotometrická lavice je umístěna přímo u stěny měřicí místnosti. Aby bylo eliminováno ovlivnění měření jinými než měřenými zdroji světla, je navíc kolem lavice natažen neprůsvitný závěs, který zamezí přístupu světla z okolí k experimentu. Během měření se svítidla musí natáčet do stran. Jelikož zeď, závěs i samotná fotometrická lavice jsou velmi blízko ke svítidlu, tak ačkoliv jsou všechna tato okolní tělesa černá a matná, tak se od nich odráží a rozptyluje značná část světelného toku (činitel jasu těchto povrchů dosahuje i více jak 4 % [6]). To pak může výrazně ovlivnit měření (odražené spektrum se liší od spektra vyzářeného).

Pro omezení tohoto vlivu byly mezi spektrometr a měřené svítidlo umístěny clony (černé desky s kruhovým otvorem). Tyto clony byly umístěny tak, aby spojnice čidla spektrometru a optického středu svítidla procházela středem otvoru v cloně. Vzdálenost od spektrometru a svítidla byla volena tak, aby ze spektrometru bylo viditelné pouze samotné svítidlo skrze otvor v desce a zbytek zorného pohledu čidla byl touto clonou zakrytý. Případné rozptýlené světlo od okolí je tak zachyceno clonami a neprojde na čidlo spektrometru, čímž zajistíme, že spektrometr měří pouze přímé světlo vyzářené svítidlem.

Měření spektra probíhalo s krokem vlnové délky 5 nm. Krok úhlu byl zvolen 5° pro svítidlo Philips PowerBalance RC464B a 2,5° pro svítidlo iGiuzzini P725. Rozdílný krok úhlu byl zvolen proto, že svítidlo iGiuzzini P725 má výrazně užší prostorovou charakteristiku a při kroku 5° bychom měli příliš málo naměřených hodnot.

Provozní podmínky během měření (teplota, napájecí napětí, proudění vzduchu apod.) byly jmenovité a stálé. Měření bylo provedeno v souladu s normou ČSN EN 13032 [6].

5.5.2. Přepočítání na poměrné hodnoty a přesnost měření

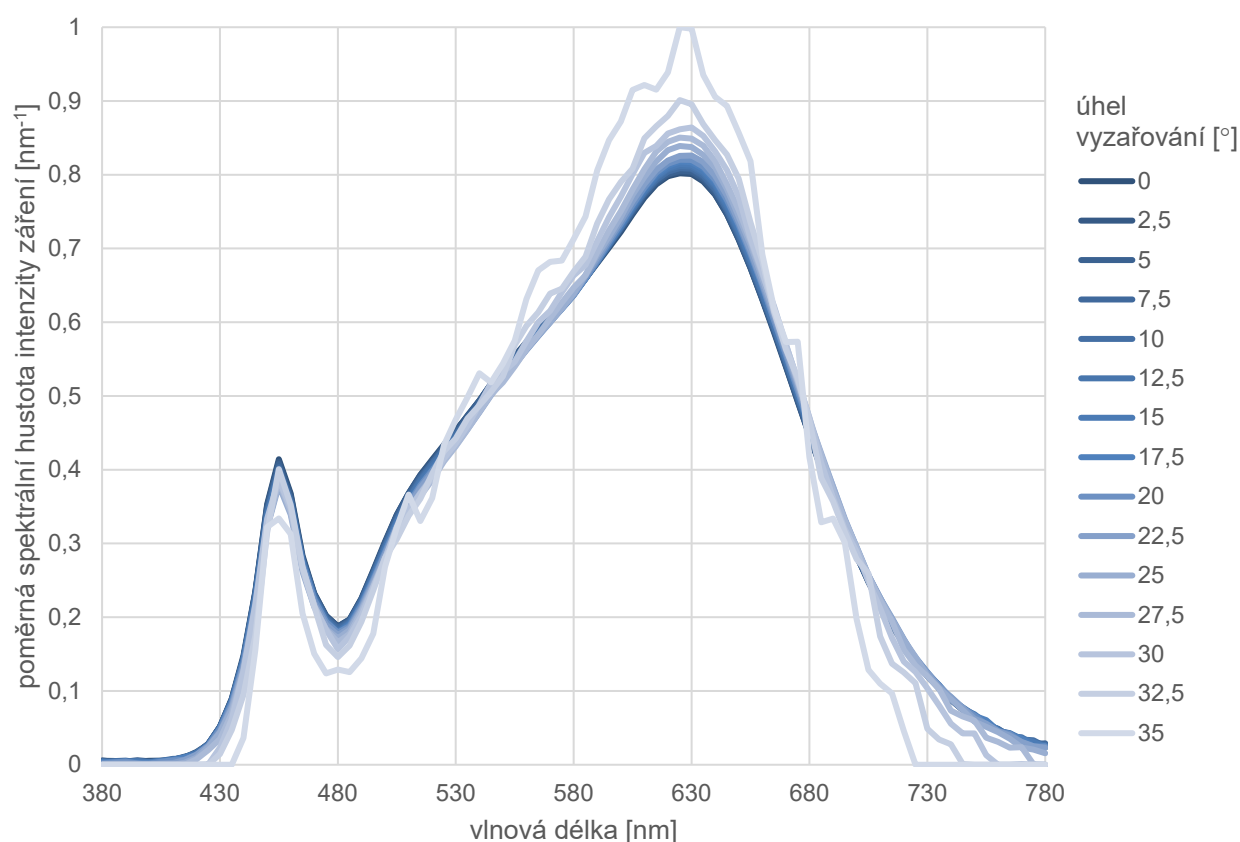
Spektroskop měří hodnoty spektrální hustoty intenzity vyzářování v jednotkách $\frac{\text{mW}}{\text{m}^2 \cdot \text{nm}}$. Zároveň měří hodnotu intenzity osvětlení v luxech a hodnotu intenzity ozáření v jednotkách $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Při odklánění svítidla od přímého směru klesá intenzita osvětlení (resp. ozáření) podle prostorové charakteristiky. Abychom mohli mezi sebou porovnávat spektra s různými intenzitami ozáření, jsou všechny naměřené hodnoty spektrální hustoty intenzity vyzářování podělené intenzitou ozáření pro daný úhel měření. Hodnoty spektrální hustoty intenzity vyzářování jsou tedy přepočítané na společnou úroveň intenzity ozáření 1 W/m². Takto vypočítaná relativní spektrální hustota intenzity ozáření by v tomto případě měla jednotku $\frac{\text{mW}}{\text{m}^2 \cdot \text{nm}} / \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = \frac{10^{-3}}{\text{nm}}$. Abychom získali poměrné hodnoty v intervalu hodnot (0 ; 1), jsou tyto přepočtené hodnoty dále poděleny maximem ze všech těchto přepočtených hodnot. Výsledné hodnoty vynášené do grafů jsou tedy v poměrných jednotkách nm⁻¹.

Měření je provedeno jako měření provozní, používané pro porovnávání a ověřování technických údajů a vlastností svítidel. Odhad rozšířené nejistoty měření je tedy 8–14 % [13].

Hodnoty jsou naměřeny s určitou absolutní chybou. Relativní chyba roste s klesající osvětleností a pod určitou intenzitou osvětlení již spektrometr není schopen naměřit žádné hodnoty (chyba by byla příliš vysoká). Přepočtem naměřených hodnot na stejnou úroveň intenzity osvětlení (resp. ozáření) zvyšujeme tuto absolutní chybu u hodnot naměřených při velmi malých osvětlenostech. Průběhy hodnot v těchto okrajových případech jsou tedy velmi nepravidelné. V prvním grafu jsou tyto hodnoty pro úplnost zobrazeny, ale v ostatních případech jsou již kvůli vysoké nejistotě těchto hodnot z grafického zobrazení vyčleněny.

5.6. Výsledky měření spektrálních prostorových charakteristik

5.6.1. Spektrální prostorová charakteristika svítidla P725



Graf 1 - Spektrální prostorová charakteristika svítidla P725

V grafu 1 jsou vyneseny hodnoty naměřené a přepočtené dle postupu uvedeného v 5.5. Pro úplnost graf zahrnuje i krajní úhly až do 35°, ačkoliv samotná dioda je přímo viditelná pouze do cca 30°. V krajních úhlech je tedy naměřeno již jen světlo rozptýlené od reflektoru svítidla a od okolí. Intenzita osvětlení pro tyto úhly je navíc již velmi nízká a průběh je tedy zatížen velkou nejistotou (jak bylo zmíněno v kap. 5.5). Pro další úvahy tedy budeme uvažovat pouze úhly do 30°.

Z grafu je zřejmé, že spektrum tohoto LED svítidla se opravdu mění v závislosti na úhlu vyzařování.

Ve spektru lze zřetelně pozorovat úzkou špičku kolem vlnové délky cca 460 nm, která přísluší modré LED diodě, díky luminoforu (viz 3.2.2) ale svítidlo dominantně vyzařuje v oblasti žluté, oranžové a červené barvy s maximem kolem 630 nm.

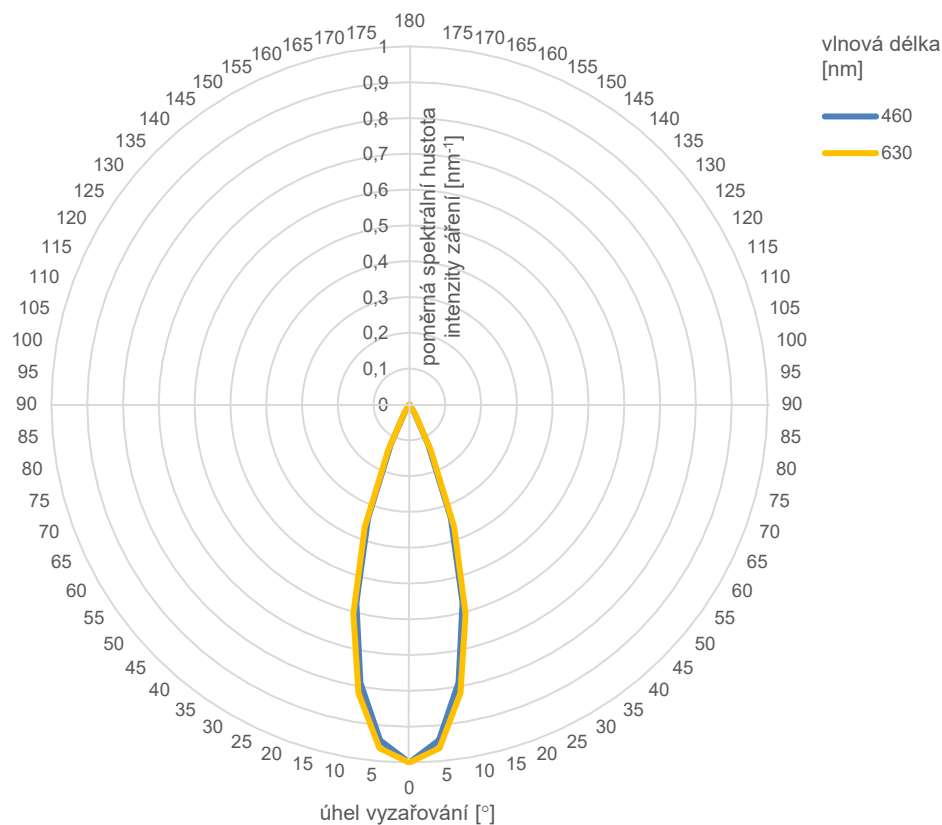
Dle grafu bychom mohli říct, že s rostoucím úhlem intenzita modré složky klesá, zatímco intenzita oranžové složky se zvyšuje. To je ale ovlivněno zvoleným přepočtem naměřených hodnot na stejnou intenzitu ozáření. Při volbě jiného přepočtu by toto nemusela být pravda. Například při pouhém přepočtu k maximální hodnotě (podělení naměřených hodnot spektrální hustoty intenzity záření hodnotou maxima při daném úhlu) by maximum spektra zůstalo s rostoucím úhlem konstantní a všechny ostatní naměřené hodnoty by klesaly.

Lepší je tedy porovnávat poměry různých částí spektra. Svítidlo vyzařuje s určitým poměrem intenzity oranžové složky (630 nm) a intenzity modré složky (460 nm). Tento poměr se dle naměřených dat zvyšuje. V krajních úhlech vyzařování je tedy podíl modré složky světla menší než v přímém (hlavním) směru vyzařování svítidla.

Porovnáme-li tvar jednotlivých naměřených spekter, můžeme vidět, že obě dvě špičky v grafu se s rostoucím úhlem zužují, resp. velikost směřnice bočních stran těchto špiček se zvyšuje.

V grafu lze ale také sledovat pokles intenzit v okrajových částech spektra, což je ale nejspíš ovlivněno nižší přesností měřicího přístroje při velmi nízkých spektrálních hustotách intenzity záření pro dané vlnové délky. V momentě kdy absolutní hodnota spektrální hustoty intenzity záření klesne pod určitou úroveň, spektrometr není schopen tuto hodnotu naměřit, proto v oblasti nejdelších vlnových délek padají hodnoty při vyšších úhlech předčasně k nule.

Dle bodu b) v kap. 5.3 lze spektrální prostorovou charakteristiku chápat i jako prostorovou charakteristiku měnící se v závislosti na vlnové délce. Graf 2 zobrazuje takto vytvořenou spektrální prostorovou charakteristiku v polárním grafu. Tento typ grafického zobrazení ale není příliš vhodný, jednotlivé křivky v grafu totiž téměř splývají a rozdíly mezi nimi jsou těžko viditelné. V grafu jsou proto kvůli přehlednosti vyneseny jen dvě zvolené vlnové délky, odpovídající lokálním maximům spektra (modré a oranžové barvě). Aby byly křivky vzájemně porovnatelné, jsou hodnoty přepočítané na společnou hodnotu spektrální hustoty intenzity záření. Změny spektra popsané u grafu 1 jsou i zde patrné, nicméně graf 1 je zobrazuje podstatně lépe.



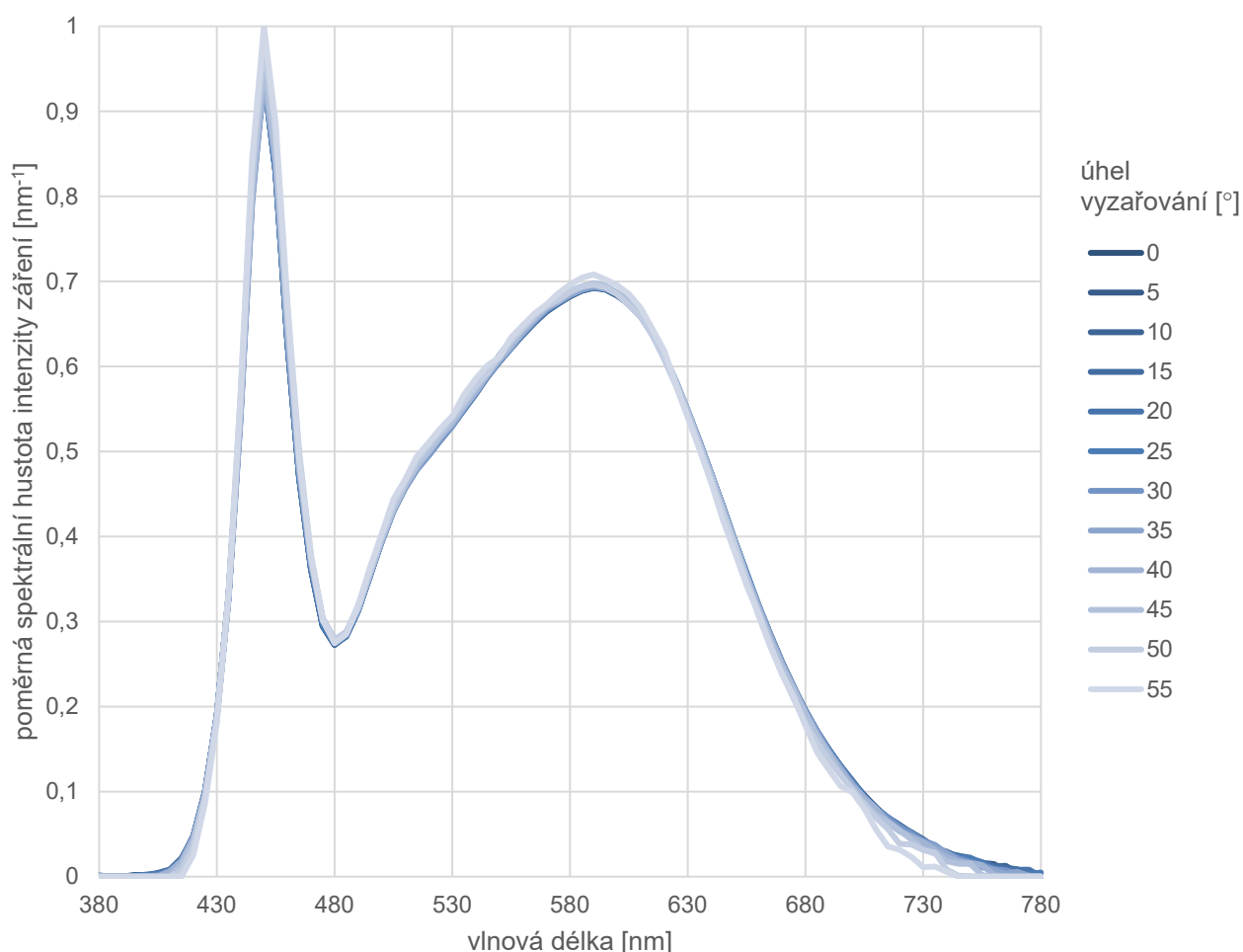
Graf 2 - Spektrální prostorová charakteristika svítidla P725 (polární graf)

5.6.2. Spektrální prostorová charakteristika svítidla RC464B

Jelikož svítidlo RC464B má nastavitelnou teplotu chromatičnosti (viz 5.4), je nutné specifikovat, jaké byly nastaveny intenzity studené (6300 K) a teplé (2700 K) barvy. Graf 3 byl získán z hodnot naměřených při nastavené neutrální bílé barvě světla (NW, viz 2.4.4), resp. při nastavené plné intenzitě obou barevných složek (intenzity všech diod byly nastaveny na 100 %). Vzhledem k tomu, že toto svítidlo také využívá PC diody, výsledkem je spektrum s průběhem podobným tomu z grafu 2. V tomto spektru je ale větší podíl modré složky.

Do grafu byly vyneseny pouze spektrální charakteristiky při úhlech do 55°, jelikož hodnoty naměřené při příliš malé ozáření byly z dalšího zpracování kvůli pochybné přesnosti vyloučeny.

I u tohoto svítidla lze pozorovat, že tvar spektra nezůstává se změnou úhlu zcela konstantní. Změny spektra jsou ale oproti grafu 2 výrazně menší. Největší změny jsou viditelné v lokálních maximech spektra a dále v oblastech vlnových délek na okrajích spektra (to již bylo vysvětleno v 5.6.1). Zbylé rozdíly jsou natolik malé, že je v rámci nejistoty měření můžeme považovat za zanedbatelné.



Graf 3 - Spektrální prostorová charakteristika svítidla RC464B – NW

Rozdíly spektra u svítidla RC464B tedy nejsou zdaleka tak veliké, jako u svítidla P725. To může být způsobeno řadou faktorů, ale především tím, že se liší konstrukce těchto dvou svítidel. Ve svítidle RC464B je zcela jiný typ, počet a uspořádání diod a nad diodami je umístěn difuzor (viz 5.4), což vše ovlivňuje tvar spektrální prostorové charakteristiky.

Obzvláště přítomnost difuzoru má nejspíš rozhodující vliv. Z principu funkce difuzoru je světlo procházející difuzorem rovnoměrně rozptýleno do prostoru (viz 4.3.2, resp. 4.2.1), což vyrovnává veškeré spektrální rozdíly mezi jednotlivými směry.

Uvažujme světlo vstupující do ideálního difuzoru dvěma různými směry, přičemž z těchto dvou směrů dopadají na difuzor záření různé barvy (tedy s odlišným spektrálním složením). Po průchodu záření difuzorem dojde k rovnoměrnému rozptýlení světla. Jelikož tento jev není závislý na vlnové délce ani na směru dopadajícího světla, obě barvy jsou rozptýleny do všech směrů stejně. Výsledné vyzářené spektrum tedy bude součtem obou vstupních spekter a ve všech směrech bychom tedy měli pozorovat stejné spektrální složení.

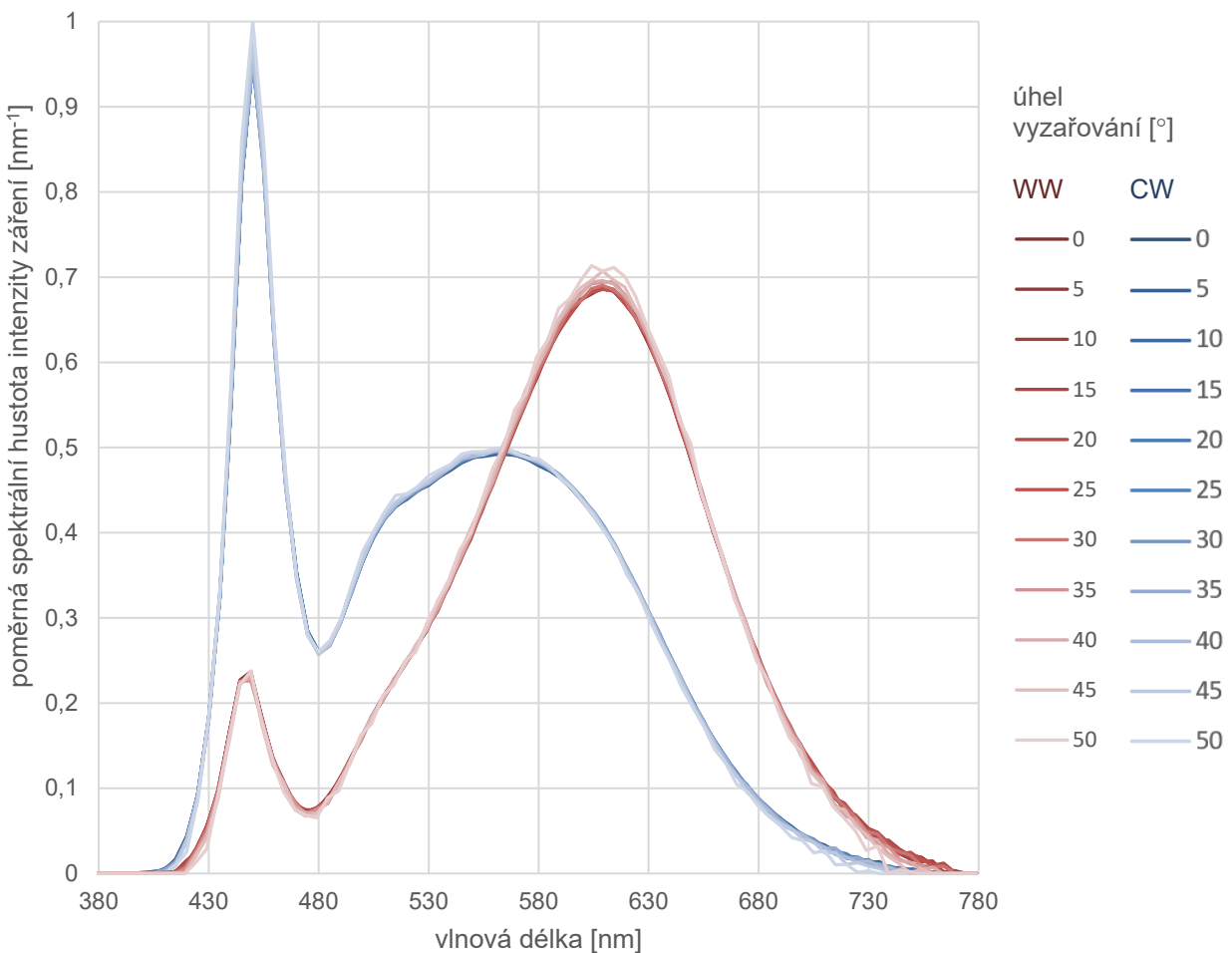
Toto platí samozřejmě jen u ideálního difuzoru, kde je veškeré světlo dokonale rozptýleno. U reálného difuzoru část světelného toku ale rozptýlena není a světlo si částečně zachová svůj směr (v tomto směru bude světlo rozptýleno s největší intenzitou). Spektrum se tedy v různých

úhlech může stále trochu lišit. Jak ale ukazuje naše měření, difuzor použitý ve svítidlu RC464B rozptyluje dostatečně velkou část světelného toku, proto změny spektra nejsou dobře pozorovatelné.

5.6.3. Porovnání spektrálních charakteristik svítidla RC464B při různě nastavené CCT

Svítidlo RC464B je typu tunable white, lze u tedy měnit jeho teplotu chromatičnosti, resp. spektrální složení světla (viz 5.4). Pro toto svítidlo lze tedy sestavit více spektrálních prostorových charakteristik (např. při sepnutí pouze teplých bílých diod obdržíme jinou charakteristiku, než při sepnutí pouze studených diod). Při nastavení jiné teploty chromatičnosti svítidla měníme pouze spektrum, ale světelně činné části svítidel zůstávají stejné. Máme tak příležitost pozorovat, jaký vliv má na spektrální prostorovou charakteristiku samotné spektrální složení vyzařovaného světla.

Bohužel následující hodnoty byly naměřeny bez použití clon, data jsou teda zatížena větší chybou než v předchozích případech v kap. 5.6.1 a 5.6.2 díky rozptylu světla od okolních předmětů. Na druhou stranu celkový vyzařovaná světelný tok byl zde výrazně menší (svítidla pouze část diod), takže i intenzita rozptýleného světla je menší.



Graf 4 - Spektrální prostorové charakteristiky svítidla RC464B – WW a CW

V grafu 4 jsou vyneseny spektrální prostorové charakteristiky dvou různých teplot chromatičnosti svítidla RC464B. V jednom případě byla intenzita teplých LED nastavena na 100 % a studené LED byly vypnuty. Výsledkem je teplé bílé (WW) světlo s nízkou jmenovitou teplotou chromatičnosti 2700 K. V druhém případě byly se maximální intenzitou sepnuty pouze studené diody a teplé diody byly vypnuty. To odpovídá studené bílé (CW) barvě světla se jmenovitou teplotou chromatičnosti 6300 K. Složením těchto dvou charakteristik lze sestavit charakteristiku zobrazenou v grafu 3.

Z uvedených spektrálních charakteristik je patrné, že bílé LED se liší použitým luminoforem. Luminofor teplé bílé diody totiž vyzařuje s maximem na vlnové délce cca 610 nm, tedy v oblasti vyšších vlnových délek než luminofor studené bílé diody, který vyzařuje s maximem na vlnové délce cca 560 nm. Jelikož se jedná o rozdílné materiály, může být různý i spektrální index absorpce. Jelikož interakce modrého světla s luminoforem je jedna z pravděpodobných příčin prostorových změn spektra, mohou se tedy lišit i spektrální prostorové charakteristiky těchto PC diod.

V obou případech jsou na charakteristikách pozorovatelné malé změny v závislosti na úhlu vyzařování. V případě WW diod je s rostoucím úhlem zřetelný nárůst oranžové části spektra (vyzařované luminoforem) vůči kratším vlnovým délkám, což by odpovídalo klesající teplotě chromatičnosti vyzařovaného světla. U studené bílé diody je tento jev také pozorovatelný (i když v menší míře), zároveň však dochází i k nárůstu modré spektrální špičky.

Studená a teplá bílá PC dioda se tedy mírně odlišují svými spektrálními prostorovými charakteristikami (se změnou úhlu dochází k odlišným změnám spektra). Z toho je zřejmé, že spektrální prostorové charakteristiky jsou ovlivněny nejen světelně činnými částmi svítidla, ale i vlastnostmi a materiály samotné diody a luminoforu, jelikož v obou případech bylo použito stejné svítidlo, takže interakce světla s dalšími světelně činnými částmi svítidla tedy tyto rozdíly nemůže způsobovat.

Mimo materiálových vlastností mohou být pozorované rozdíly v charakteristikách způsobeny také odlišnou pozicí LED diod, jelikož dvě různé diody (teplá a studená) přirozeně nemůžou být v jednom místě. Studené a teplé diody tedy na difuzor a následný reflektor svítí z jiných směrů, což může charakteristiku ovlivnit.

6. MĚŘENÍ TEPLoty CHROMATIČNOSTI

6.1. Výpočet náhradní teploty chromatičnosti

Výpočet náhradní teploty chromatičnosti dle Mezinárodní komise pro osvětlování CIE [1] [3] vychází z definice zmíněné v 2.4.4. Výpočet se provádí v diagramu chromatičnosti se souřadnicemi u' a $2/3v'$ (dle soustavy CIELUV 1976 [3] [8]).

Pro daný bod reprezentující měřený světelný zdroj je třeba nalézt takový bod $[u'_p, \frac{2}{3}v'_p]$ na čáře teplotních zdrojů, který je měřenému bodu $[u'_t, \frac{2}{3}v'_t]$ nejbližší. K tomu lze použít libovolného algoritmu, který hledá minimum vzdálenosti (resp. minimální rozdíl v chromatičnosti) mezi měřeným bodem a body na čáře teplotních zářičů.

Tato metoda lze použít pouze tehdy, pokud je rozdíl chromatičnosti $\Delta C < 5 \cdot 10^{-2}$, kde:

$$\Delta C = \sqrt{(u'_t - u'_p)^2 + \frac{4}{9}(v'_t - v'_p)^2}, \quad (6.1)$$

Pro ostatní body není tento výpočet přesně stanoven [1] [3].

Úhlová rovnoměrnost barvy je definována jako maximální odchylka chromatičnosti $\Delta_{u',v'}$ mezi chromatičnostmi se souřadnicemi $[u', v']$ v jednotlivých směrech a prostorově průměrnou hodnotou chromatičnosti $[u'_a, v'_a]$.

Odchylka $\Delta_{u',v'}$ se vypočítá podle vztahu [2] [6]:

$$\Delta_{u',v'} = \sqrt{(u' - u'_a)^2 + (v' - v'_a)^2}, \quad (6.2)$$

6.2. Metody a postup měření teploty chromatičnosti

Dosud uvedené spektrální prostorové charakteristiky přesně zobrazují všechny rozdíly ve spektrálním složení. Ne vždy je ale zcela jasné, jak se jednotlivé změny spektra projeví v barevném (vizuálním) vjemu pozorovatele. To lze značně zjednodušit využitím teploty chromatičnosti. Teplota chromatičnosti je definována na základě spektra (2.4.4) a úzce s ním souvisí. Sledování změn teploty chromatičnosti je tedy způsob, jak zjednodušeně určit změny spektra.

Cílem této části měření je tedy sledovat změny teploty chromatičnosti v závislosti na úhlu vyzařování svítidla.

Nejpřesnější metodou pro měření teploty chromatičnosti je metoda spektrofotometrická (*Spectrophotometric Colorimetry*). Z kapitoly 6.1 vyplývá, že určení náhradní teploty chromatičnosti světelných zdrojů vychází ze znalosti vyzařovaného spektra. Tato metoda předpokládá změření celého viditelného spektra od 380 nm do 780 nm s krokem alespoň 5 nm pomocí spektrometru. Z naměřeného spektra lze pomocí rovnic (2.12) a (2.13) přesně spočítat polohu v diagramu chromatičnosti a následně je třeba dopočítat teplotu chromatičnosti z diagramu chromatičnosti porovnáním s čarou teplotních zářičů [1].

Měření celého spektra a následné zpracování naměřených dat může být ale někdy výpočetně náročné či náročné na potřebné měřicí vybavení (spektrofotometr).

Metoda trichromatická (*Photoelectric Tristimulus Colorimetry*) nepotřebuje pro výpočet znát celé spektrum, ale vystačí si pouze s jeho částí přímým změřením trichromatických složek. Přesnost této metody silně závisí na přesnosti nastavení spektrální citlivosti senzorů pro měření jednotlivých složek. Aby metoda dosahovala přesnosti jako u metody spektrofotometrické (ideální případ), musela by spektrální citlivost senzorů (kolorimetru [6]) přesně odpovídat definovaným spektrálním průběhům trichromatických koeficientů (viz 2.4.2) [1].

Dle [31] lze například využít jednoduchý RGB senzor, který měří pouze RGB barevné složky. Takto naměřené souřadnice v RGB kolorimetrické soustavě je pak třeba převést do jiných standardizovaných soustav, z nichž lze teplota chromatičnosti dopočítat. Ačkoliv není změřeno celé spektrum světelného zdroje, dokáže tato metoda určit teplotu chromatičnosti s chybou do 6 %.

V tomto měření byla využita spektrofotometrická metoda, jelikož spektrometr Mavospec Base dokáže teplotu chromatičnosti z naměřeného spektra přímo spočítat [20]. Měření teploty chromatičnosti tedy probíhalo ve stejném uspořádání, stejným přístrojem a ve stejné době jako měření spektrálních prostorových charakteristik. Teplota chromatičnosti je počítána spektrometrem přímo z dat naměřených v kap. 5.6.

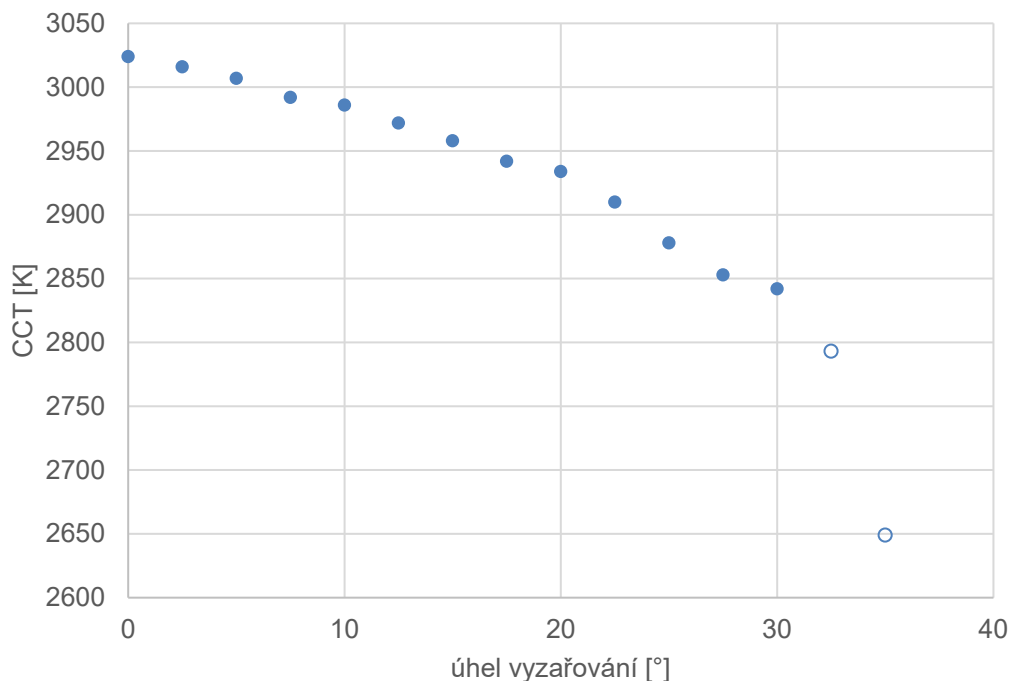
Podobně jako prostorové charakteristiky (viz 2.2, resp. 5.5.1) by i hodnoty trichromatických souřadnic pro výpočty z kap. 6.1 měly být dle normy ČSN EN 13032-4 [6] měřeny v několika fotometrických rovinách C- γ , kde roviny (úhly) C se volí s krokem nanejvýš 90° (doporučeno 22,5°) a úhel γ s krokem nanejvýš 10° (doporučeno 2,5°). U reflektorových zdrojů by měl pak být krok úhlu γ volen tak, aby mezi úhly s maximální a poloviční svítivostí bylo alespoň 10 kroků. Hodnoty naměřené při svítivosti menší než 10 % by neměly být do výpočtu zahrnuty [6].

Jak již ale bylo zmíněno v kap. 5.5.1, vzhledem k symetričnosti svítidel bylo měření provedeno pouze v jedné fotometrické rovině (C = 0°). U svítidla RC464B normě vyhovuje i zvolený krok úhlu γ 5°. U svítidla P725 byl zvolen jemnější krok 2,5°, ale i tak je krok příliš velký vzhledem k výše uvedené podmínce (mezi maximem a polovinou svítivosti naměřeno pouze 7 hodnot).

6.3. Výsledky měření teploty chromatičnosti

V kap. 5.6 bylo ukázáno, že vyzařované spektrum svítidla se mění v závislosti na úhlu vyzařování. Jelikož náhradní teplota chromatičnosti (CCT) světla úzce souvisí s jeho spektrálním složením, lze předpokládat, že ani teplota chromatičnosti nebude konstantní.

Všechny naměřené hodnoty jsou k dispozici v Příloze 2.



Graf 5 - Závislost CCT na úhlu vyzařování svítidla P725

Graf 5 zobrazuje závislost náhradní teploty chromatičnosti na úhlu vyzařování svítidla P725. Teplota chromatičnosti postupně s rostoucím úhlem klesá. Rozdíl mezi teplotou chromatičnosti světla vyzářeného přímo pod úhlem 0° a pod hraničním úhlem 30° činí přibližně 150 K.

Pro úhly větší než 30° je pokles náhle výrazně prudší. Jak už ale bylo zmíněno v kap. 5.6.1, pro tyto velké úhly je naměřené spektrum již silně pokrivené a nepřesné. Z těchto dat vypočítaná teplota chromatičnosti je proto také nepřesná. Tyto hodnoty jsou v grafu pro úplnost ponechány (ale barevně odlišeny), ale nemají pro nás žádnou vypovídající hodnotu.

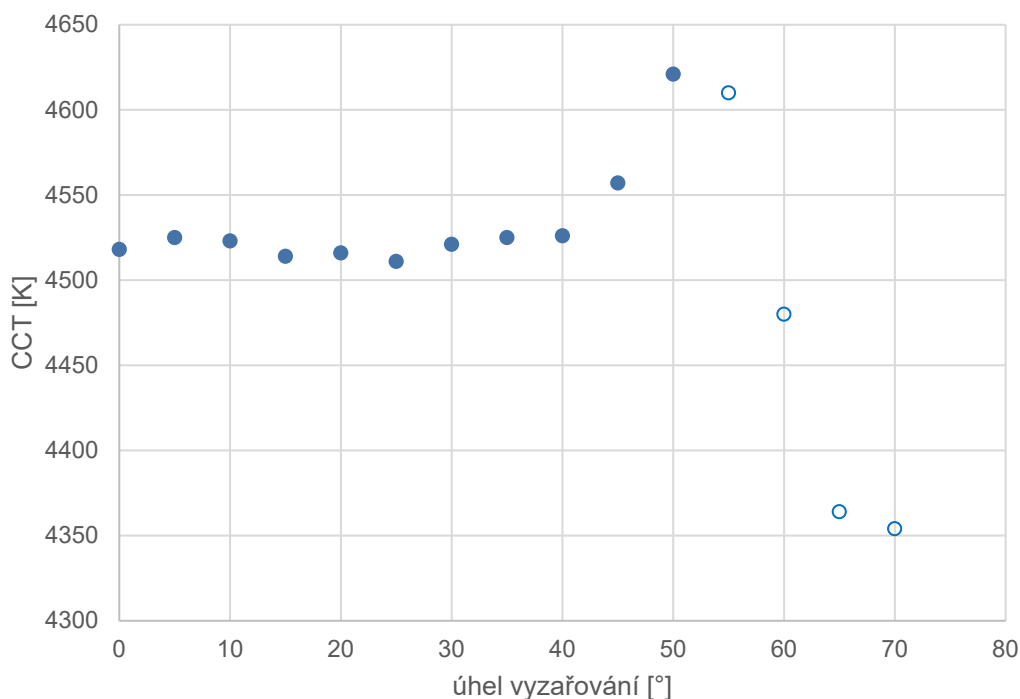
Pokles teploty chromatičnosti přesně odpovídá naměřené spektrální prostorové charakteristice (Graf 1), v níž s rostoucím úhlem dochází k poklesu intenzity modré složky světla vůči intenzitě oranžové barvy. Při větších úhlech je více dominantní oranžová část spektra, což odpovídá teplejšímu zdroji světla s nižší teplotou chromatičnosti.

Graf 6 zobrazuje prostorové změny teploty chromatičnosti pro svítidlo RC464B (při nastavené chromatičnosti NW). Zobrazená závislost částečně potvrzuje poznatky získané z pozorování spektra v kap. 5.6.2, tedy že rozptyl světla difuzorem zajišťuje prostorově neměnné spektrální

složení vyzařovaného světla. Až do úhlu 40° je teplota chromatičnosti vyzařovaného světla opravdu přibližně konstantní.

Při úhlu nad 40° ale teplota chromatičnosti náhle narůstá (přibližně o 100 K). Pokud se pozorně podíváme na spektrální prostorovou charakteristiku tohoto svítidla (graf 3), můžeme si všimnout, že u části spektra vyzářené luminoforem opravdu dochází při vyšších úhlech k posunu „doleva“, tedy ke kratším vlnovým délkám, což by odpovídalo pozorovanému nárůstu teploty chromatičnosti.

Tento nárůst teploty chromatičnosti by možná mohl být způsoben odrazem světla od difuzního reflektoru svítidla. Při zvětšování úhlu natočení svítidla se zároveň mění úhel natočení roviny reflektoru vůči spektrometru a s tímto úhlem se může měnit podíl odražené složky světla. Přestože je reflektor svítidla RC464B matný a bílý, nejedná se o reflektor ideální. Reflektor tedy nemůže odrážet veškeré dopadající světlo, ale určitá (velmi malá) část dopadajícího světelného toku je absorbována. Protože činitel absorpce $\alpha(\lambda)$ je závislý na vlnové délce (viz 4.1), může tato interakce světla s reflektorem ovlivnit vyzařované spektrum.



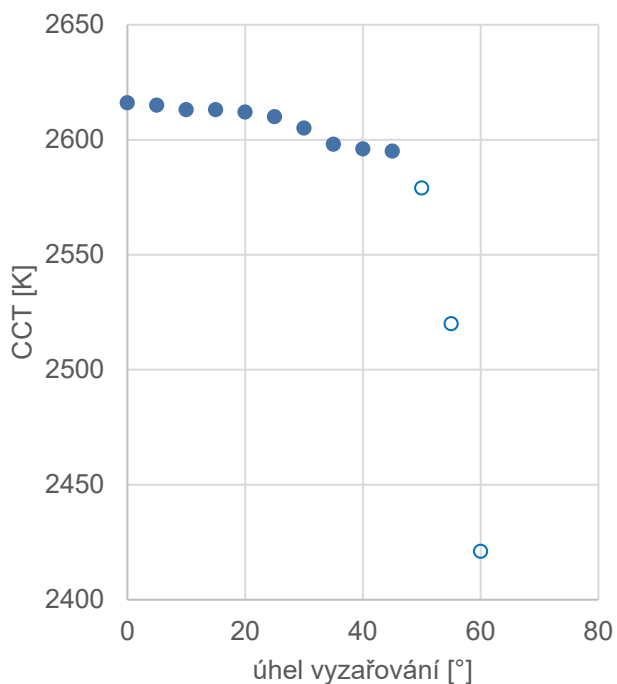
Graf 6 - Závislost CCT na úhlu vyzařování svítidla RC464B - NW

Při úhlech vyšších než 50° pak začínají být naměřené hodnoty silně ovlivněny nízkou přesností měření spektra při malé osvětlenosti (méně než 10 % maximální hodnoty). Tyto hodnoty byly barevně odlišeny, ale v grafu pro úplnost ponechány.

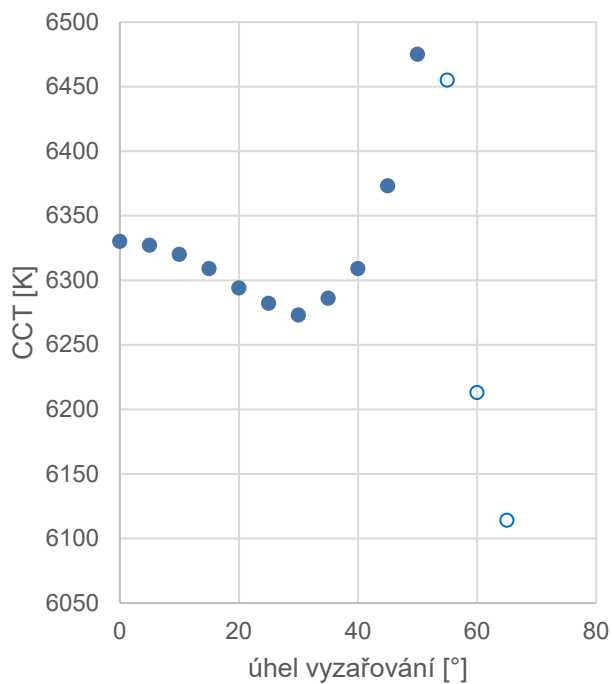
V závislostech pro teplé a studené světlo (WW a CW) u svítidla RC464B (graf 7 a 8) lze pozorovat již zmíněné rozdíly v jejich spektrálních prostorových charakteristikách (kap. 5.6.3). Zde jsou ovšem tyto rozdíly mnohem výraznější.

Zatímco teplota chromatičnosti teplého světla se drží téměř konstantní, pouze s mírným poklesem (jen asi 25 K), teplota chromatičnosti studeného světla se chová zcela odlišně. Mezi 0° a 30° teplota chromatičnosti klesá asi o 50 K a následně prudce narůstá až o 200 K.

Spektrum neutrální bílé (NW) je kombinací spekter WW a CW. Lze tedy očekávat, že výše uvedená závislost pro neutrální bílou (graf 6) je jakýmsi „průměrem“ závislostí z grafu 7 a 8, což přibližně odpovídá naměřeným hodnotám.



Graf 7 - Závislost CCT na úhlu vyzařování svítidla RC464B - WW



Graf 8 - Závislost CCT na úhlu vyzařování svítidla RC464B - CW

7. DŮSLEDKY PROSTOROVĚ PROMĚNNÉHO SPEKTRA A CCT LED SVÍTIDEL

Teplota chromatičnosti a spektrální složení světla jsou základními parametry každého svítidla. Tyto hodnoty jsou deklarovány výrobcem a uváděny v katalogích. Jako každý jiný parametr výrobku i tyto vlastnosti je ale nutné umět přesně změřit, aby bylo možné tyto parametry ověřit. Ověřování těchto parametrů je nutné obzvláště pro speciální aplikace, kde je nutné dodržet přesné spektrální složení světla, resp. teplota chromatičnosti či index podání barev, které přímo závisí na spektru.

Mezi takové aplikace patří případy, ve kterých jsou kladeny různé požadavky na konkrétní hodnoty těchto parametrů na základě legislativy či smluvního vztahu.

Dokument [9] vydaný Úřadem pro publikace Evropské unie například shrnuje aktuální stav požadavků kladených na uliční osvětlení a navrhuje nová opatření a ustanovení pro následující období. Dle tohoto dokumentu se některé kladené požadavky na osvětlení liší podle teploty chromatičnosti svítidel.

Například v kap. 6.1.3. tohoto dokumentu jsou navrhovány požadavky na minimální hodnoty světelné účinnosti svítidel. Tyto požadavky se ale nevztahují na svítidla s náhradní teplotou chromatičnosti $CCT \leq 2700$ K.

Dalším příkladem je v dokumentu zmiňovaný standard LIL (Low Impact Lighting), který stanovuje limity za účelem omezení světelného smogu a omezení modré barvy ve spektru uličního osvětlení (kvůli vlivu na cirkadiánní rytmus člověka). Jsou zde stanoveny následující požadavky:

- $CCT < 2200$ K a zároveň v oblasti vlnových délek kratších než 500 nm musí být vyzářeno méně než 6 % celkového světelného toku (s výjimkou osvětleností do 5 lx, při nichž je povolena CCT až 2700 K a 10 % vyzářeného toku v části spektra do 500 nm)
- světelná účinnost svítidel musí být větší než 50 lm/W pro $CCT < 1900$ K, 95 lm/W pro CCT v rozmezí 1900–2200 K a 100 lm/W pro CCT v rozmezí 1900–2200 K.

Zmíněné dokumenty a další normy (ČSN, EN, CIE,...) nejsou závazné (pokud tak není stanoveno v zákoně), nicméně slouží jako doporučení pro stanovení požadavků pro veřejné zakázky, apod. a ve většině případů se dodržují. Uvedené příklady ilustrují, že umět správně určit teplotu chromatičnosti svítidla je velmi důležité, protože na základě tohoto parametru jsou často kladeny další požadavky.

S určením náhradní teploty chromatičnosti to ale v praxi není tak jednoduché. Normy pouze udávají definici CCT a jak lze vypočítat (viz 6.1). Již ale nespecifikují, jak přesně lze CCT změřit a za jakých podmínek má být měření prováděno. Nikde není třeba stanoveno, z jaké vzdálenosti a z jakého úhlu má být teplota chromatičnosti (resp. spektrum) měřena, v jaké poloze má být svítidlo umístěno, apod.

Jak bylo ale ukázáno v kap. 5.6 a 6.3, při měření spektra a teploty chromatičnosti LED svítidla z různých směrů můžeme dojít k odlišným výsledkům. Při našem měření se ukázalo, že teplota

chromatičnosti měřeného svítidla se lišila až o cca 200 K (viz graf 8) pro různé úhly vyzařování. To je podstatný rozdíl, který by neměl být zanedbán.

Protože není aktuálně k dispozici standardizovaný způsob měření těchto spektrálních vlastností svítidel a není tedy možné měřením přesně a spolehlivě ověřit hodnoty zmíněných spektrálních parametrů, je možné využít alternativních způsobů, jak docílit splnění stanovených požadavků v osvětlení:

- Parametry deklarované výrobcem se určí jako správné a neměnné a pro danou aplikaci se zvolí svítidla podle těchto parametrů. Je to nejjednodušší způsob, nicméně většinou zákazník nemá informace o tom, jak byly tyto parametry stanoveny a zda byly ověřeny.
- Pokud je nutné potřebné podmínky splnit za všech okolností, lze také „předimenzovat“ návrh osvětlení, např. v případě, že je nutné mít osvětlení s *CCT* menší než stanovený limit, je možné použít svítidlo s výrazně menší *CCT*, abychom měli jistotu, že podmínka bude při jakýchkoliv provozních podmínkách splněna.
- Podobně, jako jsme to provedli v našem měření, můžeme měření provést na základě podobných platných norem, nebo sestavit vlastní postup měření. Naměřené hodnoty jsou ale špatně porovnatelné s jinými hodnotami, jelikož se mohou lišit způsobem a přesností měření (vhodné pro orientační a provozní měření, ale nikoliv pro měření přesná [13]).

Prostorová závislost spektrálního složení vyzařovaného světla se u konvenčních zdrojů vzhledem k jiné konstrukci a principu funkce neprojevovala, proto tato problematika nikdy nebyla řešena zahrnutím do technických norem. LED zdroje jsou stále novou technologií, která je pořád dále vyvíjena. Až s velkým rozmachem LED zdrojů a svítidel na trhu v posledních letech se tato problematika ukazuje jako důležitý a dosud opomíjený problém.

V současné době je v České republice ve stadiu přípravy nová Metodika měření teploty chromatičnosti. Na přípravě této nové metodiky se podílí i katedra elektroenergetiky FEL ČVUT v Praze. Obsahem připravovaného dokumentu by mimo jiné měla být analýza stávajících používaných metodik v zahraničí a návrh samotné metodiky, která by následně mohla být přenesena do platné normy.

8. ZÁVĚR

Úvodní část této práce předkládá ucelený přehled teoretických znalostí o problematice. Jsou zde vysvětleny základní technické a fyzikální pojmy týkající se osvětlování a LED technologie. Spolu s popisem základních typů světelných zdrojů je popsáno, v čem se LED technologie liší od technologií konvenčních.

LED svítidla se skládají z několika světelně činných částí, které ovlivňují směr šíření světla. V práci je pak dále vysvětleno, jak může při interakci světla se světelně činnými materiály dojít ke změně spektrálního složení vyzařovaného světla do prostoru. To pak může vést k tomu, že spektrum světla se u LED svítidel bude lišit pro různé směry vyzařování. Podle představené teoretické hypotézy by měl být tento jev způsoben především interakcí modrého světla světelné diody s luminoforem, který je důležitou součástí bílé diody. Vzniklá úhlová nerovnoměrnost je pak dále ovlivněna dalšími světelně činnými částmi svítidla.

Pro přehledné zobrazení změn spektra v závislosti na úhlu vyzařování lze použít spektrální prostorové charakteristiky. Tyto charakteristiky byly naměřeny u LED svítidel iGiuzzini P725 a Philips PowerBalance RC464B. Vzhledem k tomu, že svítidlo RC464B je typu „tunable white“ s proměnnou teplotou chromatičnosti, tak u tohoto svítidla bylo změřeno více charakteristik pro různě nastavené teploty chromatičnosti.

Naměřené spektrální charakteristiky potvrzují, že u LED svítidel opravdu dochází ke prostorové změně spektrálního složení vyzařovaného.

Tato změna je ale komplexní jev a tvar spektrální prostorové charakteristiky svítidla závisí na velkém počtu faktorů. U jednotlivých charakteristik docházelo k různým změnám způsobeným specifickou konstrukcí svítidel či spektrálním složením světla. Jednotlivé pozorované změny byly podrobně popsány a byly navrženy možné mechanismy, jak může k těmto jednotlivým změnám docházet.

Tato práce by měla sloužit k tomu, aby upozornila na tento jev a ukázala, k jak velkým změnám ve spektru svítidel může docházet.

Tato problematika v současné době není zahrnuta do českých technických norem a chybí standardizovaná metodika, jak tyto parametry svítidel měřit. Jak ale ukazují naměřené charakteristiky, změny spektra LED svítidel nemusí být zanedbatelné a ve specifických případech by mohly být významné. Proto je důležité, aby se s tímto jevem při výrobě či používání LED svítidel počítalo a aby byl dále zkoumán.

Příloha 1 – Technické parametry spektrometru Mavospec Base

Tabulka 1 - Technické parametry spektrometru Mavospec Base (výňatek z katalogu) [20]

PHOTOMETRY	
Applications	Daylight, LEDs, halogen and more
Illuminance Evis	10 lx ... 100,000 lx
Irradiance Ee	•
Luminous Efficacy Ratio LER	•
Color temperature CCT	1,600 K ... 50,000 K (Duv ≥ - 0.1)
Color temperature difference relative to the Planckian locus Duv	(1,600 K ≤ CCT ≤ 50,000 K)
Color Rendering IES TM-30-15	Rf, Rg
Color rendering index CRI per CIE 13.3	Ra, Re, R1 ... R15
Gamut Area Index GAI	•
Peak wavelength	•
Dominant wavelength per CIE 15	•
Color purity per CIE 15	•
Chromaticity coordinates [x',y'] per CIE 1931	•
Chromaticity coordinates [u',v'] per CIE 1976	•
Chromaticity coordinates [u,v] per CIE 1960	•
Flicker – Index	0.00 ... 1.00 (f ≤ 400 Hz and Flicker % ≥ 2.5 %)
Flicker – %	2.5 % ... 100 % (f ≤ 400 Hz)
Flicker – frequency	2 Hz ... 6,000 Hz (Flicker % ≥ 2.5 %)
Configurable measured value display	•
Selectable Units Of Measure	lx / °C – fc / °F

SENSOR TECHNOLOGY / MEASUREMENT TOLERANCES	
Sensor	CMOS image sensor, 256 pixels
Diffusor light-entry surface	Φ 7 mm
Distance diffuser to surface to be measured	25 mm
Error limit - cosine rating (f2')	≤ 3.00 %
Spectral range	380 - 780 nm (VIS)
Full width at half maximum (FWHM)	≤ 15 nm (typically 12 nm)
Physical resolution	~ 1.72 nm
A/D converter	16 bit
Wavelength reproducibility	± 0.5 nm
Integration time	automatic, manually 10 ms – 3,000 ms
Signal-to-noise ratio	1,000:1
Spurious light	-25 dB
Dark current compensation	automatic via temperature sensor
Measurement uncertainty illuminance*	± 3 %
Reproducibility chromaticity*	± 0.0005
Measurement uncertainty CCT*	± 2 %
Measurement uncertainty TM30*	± 1.5 %
Measurement uncertainty CRI*	± 1.5 %
Measurement uncertainty Flicker*	± 1.5 %

*Standard light type A, 2,856 K @ 1,000 lx

MISCELLANEOUS	
Mains power pack	100 - 240V (50/60Hz) 0.15A 5V, 1A (DC) USB port
Power supply via USB port	•
Rechargeable battery	Li-Ion 3.7V - 890 mAh
Automatic shutdown	Programmable for display + device
Rechargeable battery life	≥ 8 hours continuous operation
Charging time with power pack	1.5h
Operating temperature	5 - 40 °C
Dimensions [H x W x D]	139 mm x 60 mm x 30 mm
Weight	150 g
Scope of delivery	Meter, sensor cover cap, V070A rechargeable battery, power pack, USB interface cable, aluminum case, neoprene sheath, carrying strap, calibration protocol, operating instructions in German and English, 4 GB micro SDHC memory card including EXCEL file with several protocol templates and operating instructions in German, English, French, Italian, Spanish as PDF, SD adapter

OPERATION, INTERFACES, MEMORY	
Display	2.1" color TFT 320 x 240
Controls	3 keys, ring controller
Interface	USB 2.0
Interface protocol	open
Data storage	4 GB micro SD / 500,000 measurements
Memory mode	Manual, auto
Data format	CSV

OPTIONAL ACCESSORIES	
Replacement battery	Li-Ion 3.7V - 890mAh Article number V070A

Příloha 2 – Naměřené hodnoty

Tabulka 2 - Naměřené hodnoty při měření svítidla RC464B - NW

úhel [°]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
E vis [lx]	443,55	443,09	442,02	437,17	428,71	409,7	373,88	334,85	295,73	230,69	152,52	87,52	47,32	23,75
Ee [W/m ²]	1,422	1,421	1,418	1,404	1,374	1,313	1,199	1,072	0,945	0,735	0,485	0,276	0,146	0,072
LER [lm/W]	312	311,8	311,7	311,3	311,9	311,9	311,9	312,3	313	313,7	314,7	317,3	323,3	329,9
CCT [K]	4518	4525	4523	4514	4516	4511	4521	4525	4526	4557	4621	4610	4480	4364
Ra	86,45	86,48	86,47	86,55	86,43	86,49	86,48	86,55	86,47	86,34	86,32	86,07	85,29	84,58
x	0,359	0,358	0,358	0,359	0,359	0,359	0,358	0,358	0,358	0,357	0,355	0,356	0,360	0,364
y	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,353	0,352	0,352	0,356	0,360
u'	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,219	0,218	0,219	0,220	0,221
v'	0,488	0,488	0,488	0,488	0,488	0,488	0,488	0,488	0,488	0,487	0,486	0,486	0,489	0,492
u	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,219	0,218	0,219	0,220	0,221
v	0,325	0,325	0,325	0,325	0,325	0,325	0,325	0,325	0,325	0,325	0,324	0,324	0,326	0,328
λ [nm]	Spektrální hustota intenzity vyzařování [mW/m ² / nm]													
380	0,000	0,000	0,009	0,012	0,000	0,000	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
385	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
390	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
395	0,013	0,020	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
400	0,004	0,018	0,012	0,018	0,024	0,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
405	0,023	0,020	0,028	0,045	0,025	0,034	0,016	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
410	0,064	0,057	0,080	0,086	0,058	0,045	0,059	0,051	0,036	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
415	0,198	0,207	0,213	0,224	0,190	0,170	0,167	0,150	0,116	0,075	0,025	0,000	0,000	0,000
420	0,497	0,495	0,479	0,480	0,456	0,431	0,411	0,359	0,307	0,223	0,125	0,052	0,000	0,000
425	1,018	1,047	1,026	1,018	0,991	0,945	0,878	0,759	0,665	0,513	0,332	0,174	0,059	0,007
430	1,963	1,959	1,958	1,947	1,895	1,816	1,668	1,467	1,305	0,999	0,665	0,365	0,165	0,056
435	3,424	3,423	3,417	3,385	3,305	3,154	2,881	2,549	2,262	1,780	1,176	0,669	0,322	0,141
440	5,665	5,653	5,651	5,584	5,452	5,202	4,707	4,197	3,721	2,944	1,985	1,135	0,572	0,282
445	8,378	8,364	8,340	8,246	8,054	7,695	6,946	6,216	5,513	4,355	2,931	1,700	0,882	0,434
450	9,790	9,788	9,761	9,640	9,436	9,017	8,206	7,388	6,516	5,152	3,478	2,017	1,065	0,530
455	8,615	8,631	8,586	8,499	8,313	7,954	7,325	6,579	5,810	4,585	3,101	1,786	0,955	0,465
460	6,533	6,531	6,511	6,456	6,314	6,034	5,591	5,031	4,419	3,510	2,363	1,361	0,718	0,354
465	4,877	4,886	4,869	4,827	4,724	4,505	4,209	3,771	3,303	2,621	1,770	0,991	0,538	0,263
470	3,758	3,758	3,745	3,725	3,636	3,479	3,236	2,906	2,544	2,010	1,334	0,762	0,397	0,197
475	3,069	3,057	3,054	3,033	2,967	2,842	2,642	2,357	2,083	1,632	1,076	0,609	0,319	0,142
480	2,838	2,833	2,823	2,806	2,749	2,626	2,423	2,181	1,913	1,496	0,989	0,554	0,297	0,125
485	2,948	2,944	2,941	2,897	2,856	2,722	2,505	2,246	1,979	1,546	1,016	0,575	0,287	0,130
490	3,254	3,256	3,248	3,206	3,152	3,006	2,767	2,473	2,181	1,688	1,130	0,642	0,336	0,160
495	3,666	3,678	3,677	3,621	3,550	3,398	3,103	2,778	2,454	1,909	1,273	0,732	0,372	0,185
500	4,100	4,102	4,091	4,037	3,960	3,786	3,454	3,088	2,734	2,131	1,421	0,812	0,420	0,209
505	4,471	4,489	4,469	4,407	4,329	4,128	3,764	3,371	2,986	2,319	1,549	0,895	0,467	0,226
510	4,768	4,769	4,749	4,694	4,601	4,400	4,002	3,586	3,176	2,471	1,649	0,942	0,499	0,248
515	4,997	4,998	4,984	4,928	4,827	4,608	4,191	3,762	3,325	2,599	1,734	0,997	0,531	0,259
520	5,162	5,168	5,159	5,087	4,997	4,782	4,338	3,896	3,463	2,685	1,798	1,030	0,549	0,282
525	5,346	5,357	5,336	5,268	5,175	4,949	4,494	4,044	3,573	2,786	1,857	1,063	0,575	0,294
530	5,526	5,519	5,507	5,443	5,340	5,103	4,641	4,169	3,680	2,877	1,917	1,093	0,597	0,292
535	5,714	5,714	5,708	5,629	5,525	5,281	4,814	4,322	3,815	2,982	1,980	1,143	0,605	0,302

540	5,919	5,915	5,904	5,824	5,711	5,453	4,989	4,465	3,937	3,086	2,047	1,181	0,632	0,309
545	6,124	6,125	6,101	6,028	5,924	5,654	5,160	4,618	4,079	3,187	2,098	1,213	0,646	0,322
550	6,312	6,289	6,282	6,210	6,098	5,817	5,309	4,755	4,199	3,281	2,176	1,232	0,662	0,328
555	6,478	6,470	6,458	6,377	6,255	5,961	5,457	4,886	4,300	3,371	2,237	1,279	0,686	0,350
560	6,641	6,640	6,615	6,533	6,414	6,127	5,599	5,005	4,431	3,458	2,288	1,308	0,712	0,362
565	6,788	6,786	6,759	6,683	6,563	6,255	5,728	5,125	4,527	3,534	2,341	1,336	0,731	0,363
570	6,922	6,908	6,894	6,816	6,692	6,397	5,841	5,230	4,623	3,599	2,379	1,357	0,739	0,375
575	7,019	7,004	6,987	6,912	6,787	6,492	5,918	5,298	4,667	3,649	2,404	1,383	0,753	0,385
580	7,091	7,088	7,075	7,003	6,863	6,565	5,988	5,358	4,738	3,701	2,438	1,404	0,770	0,394
585	7,169	7,156	7,140	7,072	6,930	6,633	6,045	5,410	4,784	3,729	2,459	1,421	0,781	0,402
590	7,210	7,191	7,177	7,111	6,967	6,659	6,084	5,433	4,813	3,749	2,467	1,428	0,784	0,395
595	7,182	7,172	7,159	7,088	6,950	6,644	6,070	5,417	4,795	3,734	2,456	1,417	0,778	0,378
600	7,113	7,096	7,091	7,022	6,876	6,586	6,002	5,373	4,737	3,689	2,427	1,403	0,769	0,384
605	7,009	6,993	6,977	6,914	6,770	6,475	5,910	5,298	4,671	3,646	2,382	1,382	0,760	0,384
610	6,860	6,844	6,828	6,765	6,619	6,337	5,790	5,184	4,577	3,559	2,333	1,349	0,730	0,374
615	6,640	6,624	6,608	6,553	6,421	6,137	5,608	5,014	4,428	3,437	2,258	1,299	0,704	0,358
620	6,361	6,351	6,327	6,294	6,139	5,874	5,359	4,806	4,236	3,294	2,157	1,248	0,673	0,339
625	6,040	6,027	6,011	5,967	5,827	5,590	5,083	4,557	4,018	3,127	2,047	1,166	0,631	0,326
630	5,687	5,682	5,664	5,614	5,488	5,262	4,783	4,292	3,786	2,939	1,921	1,090	0,597	0,312
635	5,320	5,302	5,291	5,243	5,131	4,909	4,463	4,008	3,526	2,732	1,788	1,013	0,559	0,296
640	4,923	4,903	4,903	4,858	4,760	4,546	4,134	3,711	3,277	2,519	1,655	0,934	0,517	0,259
645	4,498	4,496	4,502	4,458	4,361	4,177	3,812	3,397	2,988	2,313	1,515	0,845	0,470	0,237
650	4,089	4,083	4,082	4,052	3,958	3,795	3,444	3,093	2,720	2,092	1,380	0,769	0,426	0,214
655	3,690	3,683	3,669	3,663	3,582	3,422	3,094	2,772	2,446	1,878	1,235	0,691	0,379	0,172
660	3,306	3,313	3,298	3,267	3,213	3,066	2,782	2,506	2,180	1,689	1,091	0,624	0,331	0,158
665	2,961	2,961	2,935	2,913	2,861	2,729	2,499	2,228	1,939	1,498	0,963	0,548	0,287	0,125
670	2,614	2,625	2,605	2,575	2,538	2,414	2,209	1,970	1,724	1,325	0,848	0,481	0,238	0,111
675	2,318	2,316	2,308	2,281	2,227	2,130	1,935	1,740	1,533	1,174	0,742	0,426	0,205	0,101
680	2,010	2,021	2,026	1,995	1,939	1,875	1,690	1,520	1,333	1,024	0,638	0,358	0,181	0,095
685	1,758	1,765	1,766	1,753	1,696	1,640	1,487	1,333	1,140	0,887	0,559	0,294	0,154	0,070
690	1,548	1,541	1,538	1,534	1,485	1,432	1,289	1,150	1,002	0,771	0,485	0,253	0,123	0,060
695	1,338	1,346	1,325	1,330	1,303	1,243	1,124	0,995	0,863	0,642	0,423	0,214	0,104	0,038
700	1,133	1,160	1,146	1,155	1,129	1,056	0,965	0,832	0,739	0,554	0,360	0,200	0,105	0,029
705	0,987	0,976	0,993	0,975	0,943	0,900	0,812	0,724	0,641	0,468	0,300	0,161	0,055	0,006
710	0,847	0,836	0,839	0,832	0,803	0,757	0,703	0,603	0,552	0,388	0,245	0,112	0,042	0,002
715	0,703	0,714	0,711	0,715	0,697	0,669	0,605	0,514	0,442	0,345	0,199	0,072	0,028	0,000
720	0,589	0,603	0,605	0,626	0,582	0,559	0,516	0,428	0,368	0,292	0,137	0,064	0,010	0,000
725	0,503	0,534	0,538	0,529	0,508	0,479	0,445	0,371	0,325	0,235	0,134	0,047	0,000	0,000
730	0,433	0,418	0,456	0,444	0,427	0,394	0,372	0,320	0,278	0,171	0,111	0,023	0,000	0,000
735	0,347	0,341	0,349	0,365	0,343	0,327	0,326	0,276	0,217	0,146	0,101	0,024	0,000	0,000
740	0,271	0,304	0,290	0,287	0,266	0,266	0,238	0,221	0,158	0,098	0,030	0,012	0,000	0,000
745	0,252	0,235	0,239	0,251	0,228	0,222	0,189	0,149	0,124	0,082	0,004	0,000	0,000	0,000
750	0,189	0,179	0,208	0,228	0,205	0,209	0,152	0,114	0,110	0,081	0,002	0,000	0,000	0,000
755	0,145	0,167	0,138	0,148	0,169	0,160	0,118	0,086	0,095	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000
760	0,112	0,155	0,125	0,125	0,113	0,079	0,079	0,061	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
765	0,096	0,075	0,132	0,106	0,068	0,066	0,067	0,026	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
770	0,050	0,057	0,047	0,089	0,082	0,035	0,029	0,044	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
775	0,025	0,032	0,035	0,021	0,081	0,032	0,011	0,007	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
780	0,019	0,001	0,030	0,015	0,000	0,046	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabulka 3 - Naměřené hodnoty při měření svítidla RC464B - CW

úhel [°]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
E vis [lx]	329,19	327,48	323,15	315,85	304,25	286,71	263,75	232,48	196,9	149,83	97,67	55,21	30,24	17,2
Ee [W/m ²]	1,058	1,053	1,038	1,014	0,976	0,918	0,845	0,744	0,63	0,479	0,311	0,174	0,093	0,052
LER [lm/W]	311,2	311,1	311,4	311,6	311,9	312,3	312,1	312,4	312,6	312,9	313,7	317,8	325,1	331,4
CCT [K]	6330	6327	6320	6309	6294	6282	6273	6286	6309	6373	6475	6455	6213	6114
Ra	84,11	84,12	84,07	84,06	84	83,99	83,98	83,9	83,88	83,8	83,6	83,16	82,09	80,66
x	0,316	0,316	0,316	0,316	0,316	0,317	0,317	0,316	0,316	0,315	0,313	0,313	0,318	0,319
y	0,331	0,331	0,331	0,332	0,332	0,332	0,332	0,332	0,332	0,331	0,330	0,330	0,335	0,338
u'	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,198	0,198	0,199	0,199
v'	0,470	0,470	0,470	0,470	0,470	0,471	0,471	0,471	0,470	0,470	0,469	0,469	0,472	0,474
u	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,198	0,198	0,199	0,199
v	0,313	0,313	0,313	0,313	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314	0,313	0,312	0,313	0,315	0,316
λ [nm]	Spektrální hustota intenzity vyzařování [mW/m ² / nm]													
380	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
385	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
390	0,000	0,001	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
395	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
400	0,006	0,011	0,005	0,002	0,000	0,000	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
405	0,000	0,023	0,010	0,022	0,020	0,000	0,000	0,005	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
410	0,043	0,037	0,058	0,034	0,032	0,036	0,036	0,030	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
415	0,173	0,174	0,154	0,149	0,144	0,115	0,121	0,087	0,075	0,042	0,031	0,000	0,000	0,000
420	0,447	0,439	0,404	0,398	0,388	0,349	0,325	0,293	0,231	0,185	0,077	0,034	0,000	0,000
425	0,945	0,937	0,936	0,918	0,866	0,826	0,757	0,664	0,563	0,398	0,261	0,111	0,034	0,001
430	1,873	1,866	1,843	1,791	1,710	1,621	1,492	1,295	1,095	0,847	0,554	0,279	0,142	0,068
435	3,336	3,312	3,250	3,167	3,055	2,866	2,635	2,329	1,981	1,534	0,985	0,551	0,272	0,131
440	5,588	5,570	5,471	5,352	5,162	4,833	4,440	3,948	3,372	2,582	1,716	0,980	0,497	0,275
445	8,327	8,312	8,198	8,003	7,708	7,255	6,666	5,901	5,016	3,877	2,590	1,460	0,785	0,460
450	9,778	9,731	9,599	9,371	9,007	8,486	7,793	6,875	5,856	4,518	3,008	1,722	0,924	0,518
455	8,531	8,489	8,368	8,160	7,845	7,369	6,764	5,946	5,069	3,907	2,585	1,472	0,791	0,456
460	6,389	6,328	6,258	6,089	5,826	5,496	5,040	4,444	3,773	2,899	1,902	1,070	0,569	0,337
465	4,737	4,685	4,614	4,503	4,316	4,057	3,716	3,295	2,791	2,121	1,414	0,792	0,420	0,227
470	3,608	3,589	3,518	3,440	3,305	3,098	2,839	2,486	2,110	1,617	1,043	0,580	0,306	0,165
475	2,905	2,897	2,845	2,782	2,669	2,510	2,299	2,012	1,705	1,309	0,841	0,467	0,235	0,129
480	2,667	2,644	2,618	2,541	2,436	2,292	2,111	1,862	1,585	1,189	0,784	0,428	0,234	0,115
485	2,766	2,738	2,694	2,627	2,532	2,374	2,188	1,936	1,629	1,247	0,821	0,469	0,223	0,127
490	3,018	3,012	2,966	2,895	2,796	2,632	2,415	2,138	1,795	1,374	0,898	0,494	0,265	0,152
495	3,396	3,383	3,329	3,261	3,138	2,927	2,708	2,376	2,029	1,555	1,019	0,569	0,316	0,158
500	3,745	3,734	3,690	3,604	3,456	3,253	3,006	2,645	2,250	1,706	1,138	0,641	0,327	0,178
505	4,064	4,020	3,985	3,875	3,733	3,532	3,230	2,873	2,429	1,843	1,208	0,676	0,366	0,216
510	4,276	4,243	4,183	4,082	3,935	3,706	3,402	3,007	2,546	1,954	1,278	0,722	0,401	0,208
515	4,409	4,395	4,326	4,231	4,080	3,833	3,540	3,109	2,636	2,020	1,335	0,752	0,396	0,231
520	4,500	4,492	4,417	4,338	4,143	3,912	3,609	3,184	2,698	2,064	1,340	0,772	0,407	0,238
525	4,597	4,576	4,520	4,409	4,239	4,009	3,671	3,253	2,764	2,093	1,366	0,771	0,423	0,233
530	4,689	4,641	4,595	4,485	4,319	4,076	3,739	3,296	2,792	2,136	1,405	0,795	0,429	0,240
535	4,768	4,745	4,679	4,570	4,414	4,154	3,818	3,360	2,853	2,181	1,425	0,818	0,434	0,254
540	4,844	4,839	4,766	4,654	4,489	4,223	3,896	3,431	2,907	2,207	1,444	0,806	0,461	0,255
545	4,934	4,917	4,842	4,749	4,561	4,296	3,964	3,498	2,970	2,259	1,480	0,834	0,450	0,263
550	4,991	4,975	4,900	4,797	4,605	4,357	3,994	3,523	2,982	2,288	1,489	0,843	0,459	0,265

555	5,040	4,987	4,948	4,811	4,642	4,385	4,023	3,551	2,996	2,277	1,489	0,843	0,475	0,253
560	5,049	5,008	4,955	4,836	4,680	4,389	4,051	3,563	3,030	2,299	1,499	0,848	0,462	0,280
565	5,036	5,024	4,949	4,848	4,670	4,390	4,052	3,580	3,023	2,303	1,508	0,852	0,472	0,263
570	5,021	5,002	4,925	4,830	4,654	4,378	4,016	3,555	3,005	2,279	1,484	0,846	0,470	0,268
575	4,979	4,951	4,881	4,770	4,594	4,346	3,985	3,508	2,973	2,261	1,467	0,830	0,455	0,269
580	4,922	4,876	4,829	4,702	4,548	4,288	3,944	3,468	2,952	2,242	1,464	0,831	0,458	0,268
585	4,841	4,813	4,756	4,653	4,487	4,213	3,895	3,429	2,891	2,210	1,437	0,803	0,447	0,249
590	4,745	4,739	4,657	4,567	4,398	4,144	3,819	3,361	2,840	2,152	1,392	0,791	0,439	0,267
595	4,619	4,604	4,539	4,444	4,279	4,037	3,697	3,264	2,771	2,103	1,360	0,775	0,428	0,235
600	4,470	4,446	4,401	4,297	4,134	3,914	3,586	3,165	2,679	2,025	1,313	0,744	0,420	0,238
605	4,312	4,278	4,237	4,127	3,992	3,753	3,473	3,053	2,570	1,962	1,262	0,714	0,390	0,236
610	4,127	4,098	4,045	3,962	3,822	3,599	3,323	2,908	2,464	1,865	1,205	0,687	0,388	0,208
615	3,888	3,894	3,829	3,752	3,603	3,416	3,128	2,749	2,341	1,771	1,146	0,639	0,350	0,213
620	3,659	3,640	3,598	3,512	3,386	3,185	2,937	2,586	2,175	1,649	1,056	0,606	0,335	0,183
625	3,398	3,371	3,324	3,252	3,141	2,959	2,733	2,411	2,026	1,528	0,995	0,553	0,314	0,174
630	3,120	3,115	3,060	3,004	2,889	2,734	2,510	2,198	1,874	1,416	0,903	0,508	0,277	0,160
635	2,852	2,843	2,802	2,755	2,637	2,503	2,286	2,021	1,696	1,269	0,822	0,475	0,252	0,138
640	2,590	2,566	2,540	2,475	2,404	2,247	2,079	1,823	1,532	1,166	0,746	0,400	0,227	0,121
645	2,326	2,304	2,271	2,231	2,143	2,024	1,873	1,631	1,392	1,038	0,659	0,368	0,189	0,111
650	2,047	2,064	2,024	1,964	1,904	1,801	1,641	1,449	1,214	0,917	0,588	0,328	0,190	0,090
655	1,818	1,794	1,795	1,741	1,684	1,574	1,464	1,292	1,080	0,808	0,521	0,275	0,134	0,080
660	1,585	1,587	1,549	1,533	1,461	1,385	1,256	1,106	0,947	0,703	0,438	0,238	0,131	0,050
665	1,382	1,382	1,372	1,327	1,274	1,216	1,112	0,981	0,813	0,600	0,390	0,194	0,086	0,055
670	1,197	1,195	1,181	1,145	1,125	1,021	0,965	0,823	0,697	0,533	0,316	0,170	0,079	0,021
675	1,054	1,031	1,022	1,005	0,946	0,907	0,837	0,729	0,620	0,438	0,288	0,158	0,072	0,031
680	0,864	0,882	0,870	0,840	0,825	0,780	0,721	0,633	0,511	0,386	0,237	0,109	0,034	0,020
685	0,768	0,748	0,730	0,722	0,706	0,655	0,623	0,525	0,449	0,310	0,200	0,073	0,035	0,001
690	0,662	0,657	0,643	0,612	0,589	0,568	0,517	0,452	0,356	0,274	0,168	0,063	0,018	0,002
695	0,546	0,539	0,555	0,524	0,511	0,463	0,428	0,376	0,313	0,243	0,127	0,066	0,003	0,000
700	0,473	0,468	0,450	0,442	0,408	0,402	0,368	0,321	0,281	0,187	0,116	0,030	0,006	0,000
705	0,392	0,386	0,394	0,395	0,364	0,344	0,326	0,265	0,221	0,172	0,073	0,017	0,000	0,000
710	0,323	0,339	0,303	0,296	0,284	0,276	0,251	0,216	0,188	0,112	0,079	0,005	0,001	0,000
715	0,294	0,259	0,280	0,272	0,247	0,235	0,233	0,215	0,135	0,116	0,031	0,000	0,000	0,000
720	0,203	0,222	0,185	0,194	0,217	0,170	0,166	0,126	0,116	0,049	0,032	0,000	0,000	0,000
725	0,197	0,154	0,173	0,175	0,142	0,144	0,136	0,137	0,083	0,059	0,004	0,000	0,000	0,000
730	0,130	0,148	0,143	0,128	0,152	0,104	0,105	0,083	0,091	0,041	0,009	0,000	0,000	0,000
735	0,142	0,128	0,104	0,097	0,078	0,081	0,091	0,083	0,053	0,026	0,000	0,000	0,000	0,000
740	0,055	0,070	0,083	0,072	0,078	0,045	0,058	0,021	0,041	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000
745	0,055	0,069	0,040	0,029	0,017	0,025	0,032	0,043	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
750	0,035	0,040	0,045	0,055	0,033	0,029	0,000	0,000	0,004	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000
755	0,011	0,037	0,000	0,002	0,038	0,000	0,027	0,020	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
760	0,003	0,005	0,019	0,014	0,000	0,002	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
765	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
770	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
775	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
780	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabulka 4 - Naměřené hodnoty při měření svítidla RC464B - WW

úhel [°]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
E vis [lx]	169,32	167,94	165,62	163,41	155,87	148,24	136,81	119,49	100,54	76,05	50,43	27,3	15,76
Ee [W/m²]	0,53	0,525	0,519	0,511	0,489	0,465	0,428	0,371	0,312	0,234	0,154	0,082	0,046
LER [lm/W]	319,5	319,8	319,4	319,9	318,9	318,9	319,7	321,8	322,6	324,7	327	333,8	342,6
CCT [K]	2616	2615	2613	2613	2612	2610	2605	2598	2596	2595	2579	2520	2421
Ra	80,47	80,44	80,49	80,38	80,49	80,43	80,35	80,22	80,01	79,74	79,59	78,16	76,31
x	0,468	0,468	0,468	0,468	0,468	0,468	0,469	0,470	0,470	0,471	0,473	0,480	0,493
y	0,413	0,414	0,414	0,414	0,414	0,414	0,414	0,415	0,415	0,416	0,417	0,421	0,428
u'	0,266	0,266	0,266	0,266	0,267	0,267	0,267	0,267	0,267	0,267	0,268	0,271	0,276
v'	0,530	0,530	0,530	0,530	0,530	0,530	0,530	0,531	0,531	0,531	0,532	0,534	0,539
u	0,266	0,266	0,266	0,266	0,267	0,267	0,267	0,267	0,267	0,267	0,268	0,271	0,276
v	0,353	0,353	0,353	0,353	0,353	0,353	0,353	0,354	0,354	0,354	0,354	0,356	0,359
λ [nm]	Spektrální hustota intenzity vyzařování [mW/m ² / nm]												
380	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
385	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
390	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
395	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
400	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
405	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
410	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
415	0,010	0,006	0,007	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000
420	0,043	0,041	0,040	0,069	0,046	0,041	0,028	0,015	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
425	0,151	0,130	0,143	0,126	0,133	0,130	0,109	0,092	0,067	0,048	0,020	0,000	0,000
430	0,288	0,292	0,285	0,284	0,269	0,250	0,224	0,178	0,140	0,098	0,045	0,010	0,002
435	0,515	0,485	0,485	0,474	0,458	0,452	0,414	0,342	0,279	0,203	0,139	0,044	0,015
440	0,852	0,849	0,842	0,824	0,791	0,737	0,673	0,577	0,493	0,372	0,234	0,115	0,052
445	1,197	1,171	1,160	1,144	1,084	1,043	0,958	0,833	0,690	0,516	0,339	0,174	0,089
450	1,249	1,231	1,203	1,186	1,131	1,072	0,984	0,835	0,717	0,553	0,363	0,194	0,088
455	0,957	0,945	0,944	0,932	0,886	0,830	0,771	0,665	0,557	0,406	0,273	0,135	0,066
460	0,714	0,705	0,690	0,680	0,654	0,632	0,573	0,489	0,414	0,295	0,202	0,100	0,043
465	0,550	0,562	0,553	0,533	0,516	0,478	0,450	0,377	0,311	0,248	0,146	0,057	0,021
470	0,433	0,422	0,416	0,417	0,394	0,391	0,354	0,308	0,244	0,174	0,115	0,059	0,024
475	0,382	0,390	0,380	0,373	0,348	0,329	0,299	0,249	0,222	0,157	0,105	0,042	0,002
480	0,407	0,388	0,385	0,385	0,373	0,358	0,323	0,277	0,220	0,164	0,100	0,045	0,021
485	0,466	0,473	0,451	0,442	0,424	0,396	0,363	0,304	0,267	0,196	0,137	0,054	0,018
490	0,576	0,564	0,549	0,559	0,531	0,503	0,455	0,392	0,323	0,250	0,149	0,078	0,043
495	0,704	0,693	0,692	0,665	0,641	0,614	0,568	0,485	0,408	0,299	0,199	0,106	0,046
500	0,838	0,824	0,812	0,816	0,775	0,732	0,660	0,578	0,492	0,370	0,249	0,119	0,058
505	0,964	0,963	0,951	0,923	0,883	0,846	0,781	0,684	0,564	0,427	0,270	0,148	0,082
510	1,091	1,083	1,056	1,051	1,000	0,945	0,869	0,748	0,642	0,481	0,320	0,155	0,082
515	1,189	1,179	1,169	1,143	1,094	1,038	0,955	0,842	0,696	0,523	0,338	0,181	0,103
520	1,307	1,289	1,270	1,244	1,188	1,134	1,048	0,905	0,767	0,569	0,382	0,190	0,096
525	1,392	1,385	1,371	1,355	1,296	1,217	1,122	0,977	0,819	0,626	0,399	0,216	0,122
530	1,522	1,510	1,486	1,453	1,385	1,332	1,228	1,071	0,895	0,666	0,450	0,234	0,121
535	1,636	1,621	1,602	1,593	1,529	1,424	1,313	1,151	0,967	0,745	0,489	0,251	0,144
540	1,785	1,778	1,756	1,715	1,633	1,566	1,444	1,262	1,054	0,789	0,528	0,295	0,169
545	1,942	1,913	1,884	1,874	1,786	1,694	1,566	1,363	1,142	0,874	0,581	0,301	0,170
550	2,082	2,075	2,049	2,012	1,907	1,823	1,684	1,468	1,233	0,943	0,613	0,337	0,194

555	2,255	2,240	2,192	2,174	2,073	1,978	1,817	1,591	1,344	1,007	0,669	0,355	0,198
560	2,413	2,400	2,369	2,341	2,232	2,108	1,945	1,702	1,427	1,089	0,728	0,398	0,236
565	2,591	2,574	2,527	2,493	2,381	2,268	2,089	1,826	1,545	1,175	0,768	0,419	0,237
570	2,757	2,729	2,693	2,671	2,537	2,415	2,234	1,950	1,646	1,242	0,834	0,443	0,268
575	2,916	2,889	2,867	2,812	2,683	2,555	2,354	2,056	1,738	1,323	0,863	0,483	0,273
580	3,088	3,055	3,000	2,976	2,833	2,703	2,498	2,185	1,841	1,384	0,929	0,502	0,293
585	3,225	3,201	3,165	3,114	2,980	2,823	2,610	2,277	1,919	1,459	0,959	0,538	0,315
590	3,371	3,343	3,284	3,250	3,098	2,958	2,721	2,389	2,014	1,515	1,016	0,549	0,328
595	3,467	3,438	3,388	3,357	3,187	3,033	2,823	2,451	2,072	1,564	1,033	0,583	0,333
600	3,552	3,518	3,478	3,418	3,276	3,110	2,864	2,515	2,109	1,600	1,066	0,581	0,354
605	3,587	3,572	3,523	3,482	3,317	3,161	2,924	2,555	2,156	1,621	1,093	0,605	0,345
610	3,628	3,597	3,558	3,499	3,336	3,174	2,940	2,561	2,160	1,646	1,083	0,595	0,361
615	3,606	3,582	3,529	3,475	3,328	3,164	2,917	2,564	2,148	1,622	1,090	0,601	0,350
620	3,536	3,506	3,463	3,424	3,256	3,095	2,873	2,509	2,105	1,603	1,074	0,573	0,352
625	3,437	3,418	3,372	3,318	3,177	3,021	2,776	2,442	2,055	1,544	1,038	0,569	0,338
630	3,306	3,273	3,240	3,207	3,057	2,910	2,691	2,360	1,970	1,495	0,985	0,547	0,326
635	3,169	3,128	3,094	3,042	2,908	2,762	2,545	2,235	1,876	1,409	0,941	0,514	0,307
640	2,979	2,955	2,911	2,881	2,756	2,623	2,416	2,117	1,784	1,338	0,895	0,494	0,295
645	2,784	2,756	2,731	2,671	2,559	2,428	2,259	1,963	1,647	1,246	0,815	0,451	0,266
650	2,567	2,554	2,510	2,486	2,377	2,267	2,080	1,814	1,537	1,149	0,773	0,410	0,230
655	2,352	2,329	2,309	2,260	2,157	2,055	1,920	1,656	1,385	1,035	0,683	0,372	0,220
660	2,127	2,112	2,084	2,061	1,980	1,881	1,721	1,509	1,267	0,943	0,624	0,332	0,194
665	1,931	1,913	1,895	1,859	1,780	1,692	1,571	1,359	1,129	0,860	0,562	0,303	0,170
670	1,729	1,705	1,674	1,674	1,599	1,516	1,389	1,219	1,019	0,749	0,495	0,252	0,153
675	1,539	1,528	1,517	1,473	1,413	1,356	1,262	1,087	0,916	0,684	0,440	0,251	0,129
680	1,359	1,337	1,337	1,304	1,273	1,199	1,091	0,950	0,793	0,587	0,382	0,194	0,105
685	1,193	1,181	1,153	1,141	1,089	1,058	0,972	0,827	0,685	0,529	0,348	0,184	0,094
690	1,049	1,024	1,023	1,013	0,977	0,924	0,844	0,729	0,615	0,446	0,291	0,148	0,068
695	0,907	0,912	0,880	0,863	0,832	0,791	0,746	0,626	0,516	0,391	0,244	0,133	0,070
700	0,774	0,772	0,783	0,769	0,733	0,694	0,633	0,557	0,466	0,323	0,219	0,098	0,036
705	0,680	0,659	0,650	0,637	0,617	0,607	0,529	0,449	0,369	0,276	0,161	0,095	0,032
710	0,562	0,578	0,567	0,543	0,530	0,514	0,472	0,406	0,340	0,242	0,157	0,055	0,021
715	0,471	0,477	0,482	0,478	0,467	0,413	0,388	0,305	0,256	0,182	0,120	0,026	0,016
720	0,417	0,406	0,388	0,381	0,356	0,382	0,334	0,249	0,221	0,175	0,099	0,034	0,000
725	0,348	0,332	0,339	0,329	0,335	0,308	0,280	0,237	0,185	0,131	0,077	0,019	0,010
730	0,273	0,264	0,278	0,280	0,269	0,237	0,210	0,179	0,130	0,105	0,041	0,012	0,000
735	0,238	0,213	0,249	0,208	0,191	0,223	0,197	0,131	0,123	0,071	0,049	0,000	0,000
740	0,182	0,166	0,186	0,166	0,190	0,160	0,133	0,115	0,072	0,046	0,000	0,000	0,000
745	0,123	0,136	0,128	0,128	0,139	0,105	0,109	0,062	0,047	0,027	0,006	0,000	0,000
750	0,089	0,111	0,111	0,084	0,101	0,115	0,091	0,041	0,041	0,000	0,003	0,001	0,000
755	0,097	0,098	0,098	0,070	0,086	0,074	0,040	0,038	0,013	0,013	0,000	0,000	0,000
760	0,048	0,055	0,046	0,075	0,045	0,049	0,031	0,000	0,023	0,000	0,000	0,000	0,000
765	0,011	0,006	0,000	0,008	0,060	0,042	0,037	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
770	0,004	0,017	0,009	0,000	0,007	0,002	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
775	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
780	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabulka 5 - Naměřené hodnoty při měření svítidla P725

úhel [°]	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30	32,5	35
E vis [lx]	2340	2330	2244	2002	1892	1657	1386	1100	827,3	502,4	310,7	155,6	73,1	34,6	12,8
E _e [W/m ²]	8,164	8,129	7,833	7,001	6,622	5,807	4,866	3,87	2,909	1,767	1,091	0,544	0,251	0,117	0,041
LER [lm/W]	286,6	286,6	286,5	286	285,7	285,3	284,8	284,3	284,4	284,3	284,8	286,2	291,2	297,1	312,2
CCT [K]	3024	3016	3007	2992	2986	2972	2958	2942	2934	2910	2878	2853	2842	2793	2649
R _a	93,17	93,14	93,14	93,21	93,21	93,28	93,31	93,37	93,44	93,38	93,39	93,34	92,73	92,1	89,46
x	0,435	0,436	0,436	0,437	0,438	0,439	0,440	0,441	0,442	0,443	0,446	0,447	0,449	0,454	0,470
y	0,405	0,406	0,406	0,406	0,406	0,406	0,406	0,406	0,406	0,407	0,407	0,407	0,408	0,412	0,422
u'	0,249	0,249	0,250	0,250	0,250	0,251	0,252	0,252	0,253	0,254	0,255	0,256	0,256	0,258	0,264
v'	0,522	0,522	0,522	0,522	0,522	0,522	0,522	0,523	0,523	0,523	0,524	0,524	0,525	0,527	0,533
u	0,249	0,249	0,250	0,250	0,250	0,251	0,252	0,252	0,253	0,254	0,255	0,256	0,256	0,258	0,264
v	0,348	0,348	0,348	0,348	0,348	0,348	0,348	0,348	0,349	0,349	0,349	0,349	0,350	0,351	0,355
λ [nm]	Spektrální hustota intenzity vyzařování [mW/m ² / nm]														
380	0,308	0,329	0,240	0,181	0,201	0,191	0,102	0,088	0,037	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
385	0,301	0,233	0,216	0,243	0,158	0,110	0,116	0,109	0,065	0,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
390	0,164	0,249	0,260	0,272	0,227	0,167	0,136	0,119	0,089	0,020	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
395	0,264	0,338	0,137	0,179	0,253	0,207	0,080	0,079	0,033	0,017	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
400	0,309	0,274	0,205	0,178	0,156	0,136	0,110	0,073	0,035	0,003	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000
405	0,318	0,273	0,242	0,269	0,198	0,212	0,172	0,119	0,081	0,020	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000
410	0,322	0,384	0,372	0,395	0,320	0,242	0,244	0,166	0,121	0,030	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
415	0,567	0,627	0,551	0,400	0,471	0,410	0,337	0,266	0,137	0,079	0,021	0,000	0,000	0,000	0,000
420	0,989	0,849	0,829	0,729	0,675	0,670	0,476	0,360	0,275	0,170	0,073	0,028	0,000	0,000	0,000
425	1,584	1,611	1,543	1,407	1,272	1,108	0,899	0,702	0,533	0,314	0,184	0,076	0,001	0,000	0,000
430	2,939	2,946	2,847	2,504	2,360	2,022	1,701	1,333	0,991	0,554	0,335	0,134	0,041	0,012	0,000
435	5,143	5,088	4,786	4,230	4,085	3,547	2,934	2,311	1,695	0,990	0,581	0,265	0,109	0,039	0,000
440	8,485	8,286	7,929	7,057	6,641	5,849	4,797	3,793	2,800	1,660	0,990	0,484	0,224	0,078	0,010
445	13,453	13,297	12,795	11,301	10,636	9,260	7,693	6,000	4,471	2,664	1,625	0,807	0,383	0,144	0,045
450	20,229	20,024	19,116	16,929	15,917	13,871	11,513	9,006	6,711	4,006	2,458	1,232	0,587	0,259	0,093
455	23,720	23,436	22,422	19,835	18,686	16,260	13,517	10,615	7,933	4,742	2,901	1,465	0,681	0,329	0,096
460	21,060	20,835	19,829	17,613	16,616	14,462	12,068	9,516	7,107	4,261	2,595	1,310	0,612	0,289	0,090
465	16,238	16,007	15,351	13,613	12,904	11,241	9,377	7,402	5,538	3,311	2,003	1,011	0,470	0,220	0,059
470	13,308	13,221	12,673	11,203	10,667	9,273	7,705	6,099	4,574	2,718	1,640	0,824	0,378	0,177	0,043
475	11,577	11,513	11,024	9,806	9,131	8,044	6,637	5,256	3,959	2,357	1,412	0,700	0,322	0,133	0,036
480	10,750	10,680	10,231	9,090	8,503	7,352	6,150	4,856	3,658	2,181	1,312	0,635	0,276	0,120	0,037
485	11,287	11,224	10,757	9,567	9,019	7,844	6,523	5,153	3,834	2,299	1,398	0,677	0,306	0,133	0,036
490	12,921	12,827	12,314	10,912	10,333	8,956	7,445	5,902	4,412	2,635	1,609	0,790	0,355	0,159	0,041
495	15,105	14,961	14,317	12,725	12,015	10,418	8,681	6,848	5,117	3,076	1,871	0,921	0,424	0,194	0,051
500	17,319	17,124	16,493	14,595	13,755	11,952	9,955	7,834	5,875	3,533	2,149	1,061	0,492	0,230	0,077
505	19,410	19,321	18,541	16,406	15,437	13,462	11,224	8,828	6,618	3,984	2,423	1,206	0,567	0,251	0,093
510	21,083	20,976	20,160	17,889	16,812	14,677	12,195	9,593	7,237	4,346	2,643	1,310	0,610	0,277	0,105
515	22,508	22,390	21,466	19,124	17,968	15,699	13,036	10,279	7,729	4,659	2,825	1,390	0,648	0,296	0,095
520	23,698	23,517	22,538	20,058	18,981	16,514	13,706	10,829	8,142	4,909	2,989	1,473	0,684	0,324	0,104
525	24,850	24,657	23,701	21,012	19,886	17,335	14,405	11,376	8,562	5,149	3,161	1,570	0,731	0,349	0,125
530	25,982	25,727	24,762	21,987	20,797	18,123	15,083	11,917	8,969	5,404	3,314	1,647	0,767	0,363	0,135
535	27,085	27,013	25,939	23,046	21,711	18,928	15,795	12,507	9,391	5,652	3,483	1,734	0,809	0,385	0,143
540	28,258	28,165	27,112	24,101	22,700	19,783	16,542	13,103	9,832	5,935	3,655	1,826	0,860	0,400	0,153
545	29,585	29,455	28,333	25,201	23,720	20,742	17,304	13,717	10,270	6,231	3,833	1,916	0,911	0,415	0,149
550	30,663	30,596	29,419	26,182	24,669	21,567	18,045	14,264	10,707	6,473	3,990	1,979	0,937	0,432	0,156

555	31,770	31,558	30,383	27,103	25,569	22,335	18,680	14,811	11,095	6,729	4,146	2,061	0,962	0,467	0,165
560	32,827	32,590	31,385	28,001	26,444	23,099	19,318	15,318	11,486	6,966	4,313	2,150	1,011	0,488	0,182
565	33,821	33,633	32,371	28,812	27,320	23,875	19,975	15,834	11,869	7,204	4,460	2,225	1,056	0,504	0,193
570	34,739	34,576	33,324	29,686	28,087	24,596	20,562	16,300	12,258	7,434	4,593	2,309	1,084	0,524	0,196
575	35,599	35,472	34,188	30,494	28,820	25,247	21,137	16,774	12,620	7,672	4,733	2,391	1,128	0,530	0,197
580	36,548	36,459	35,113	31,335	29,656	25,973	21,758	17,272	13,004	7,895	4,890	2,468	1,168	0,549	0,205
585	37,746	37,597	36,236	32,401	30,655	26,859	22,488	17,889	13,461	8,214	5,082	2,533	1,193	0,565	0,214
590	38,937	38,840	37,482	33,508	31,654	27,794	23,273	18,542	13,946	8,514	5,290	2,651	1,250	0,602	0,232
595	40,157	40,097	38,700	34,604	32,723	28,738	24,094	19,206	14,462	8,830	5,481	2,765	1,307	0,629	0,244
600	41,391	41,357	39,908	35,734	33,849	29,681	24,913	19,869	14,967	9,144	5,683	2,865	1,356	0,648	0,251
605	42,745	42,667	41,193	36,914	34,967	30,698	25,789	20,547	15,485	9,469	5,915	2,976	1,410	0,663	0,263
610	44,031	43,970	42,460	38,067	36,001	31,662	26,558	21,211	15,970	9,759	6,099	3,082	1,461	0,697	0,265
615	45,064	44,953	43,440	38,924	36,847	32,414	27,227	21,720	16,379	9,999	6,260	3,173	1,477	0,710	0,263
620	45,703	45,632	44,020	39,485	37,359	32,897	27,618	22,047	16,629	10,154	6,378	3,223	1,507	0,722	0,270
625	45,927	45,825	44,249	39,714	37,588	33,073	27,804	22,203	16,740	10,232	6,421	3,245	1,517	0,740	0,288
630	45,868	45,777	44,208	39,666	37,560	33,046	27,773	22,176	16,734	10,239	6,409	3,240	1,521	0,735	0,287
635	45,291	45,202	43,675	39,162	37,121	32,669	27,455	21,940	16,546	10,131	6,328	3,204	1,501	0,713	0,269
640	44,269	44,087	42,682	38,291	36,257	31,958	26,858	21,456	16,180	9,898	6,198	3,123	1,464	0,695	0,260
645	42,753	42,546	41,157	36,943	34,936	30,794	25,920	20,731	15,627	9,567	5,972	3,003	1,420	0,679	0,257
650	40,780	40,652	39,238	35,204	33,386	29,424	24,764	19,815	14,944	9,130	5,692	2,870	1,357	0,652	0,246
655	38,569	38,419	37,093	33,275	31,542	27,825	23,434	18,753	14,140	8,639	5,395	2,712	1,257	0,603	0,235
660	36,103	36,021	34,723	31,226	29,555	26,037	21,989	17,597	13,260	8,095	5,045	2,538	1,177	0,560	0,199
665	33,563	33,572	32,359	29,055	27,547	24,225	20,495	16,372	12,299	7,544	4,686	2,372	1,087	0,504	0,178
670	30,914	30,845	29,798	26,775	25,410	22,342	18,854	15,101	11,348	6,950	4,330	2,175	1,002	0,463	0,165
675	28,256	28,061	27,239	24,446	23,181	20,415	17,246	13,781	10,365	6,360	3,955	1,985	0,917	0,430	0,165
680	25,572	25,462	24,539	22,092	21,022	18,478	15,508	12,406	9,394	5,766	3,572	1,794	0,829	0,383	0,120
685	22,953	22,969	22,154	19,877	18,837	16,601	14,019	11,214	8,486	5,192	3,231	1,602	0,721	0,319	0,095
690	20,626	20,594	19,879	17,855	16,921	14,888	12,594	10,078	7,601	4,670	2,886	1,422	0,637	0,293	0,096
695	18,402	18,272	17,723	15,968	15,118	13,231	11,223	8,989	6,768	4,118	2,554	1,264	0,563	0,259	0,087
700	16,245	16,115	15,556	13,960	13,313	11,769	9,812	7,933	5,963	3,659	2,252	1,123	0,509	0,229	0,057
705	14,179	14,270	13,651	12,229	11,607	10,293	8,616	6,908	5,214	3,186	1,961	0,976	0,438	0,213	0,037
710	12,417	12,323	12,012	10,837	10,234	8,977	7,595	6,058	4,624	2,802	1,725	0,852	0,374	0,143	0,032
715	10,872	10,721	10,397	9,387	8,955	7,832	6,624	5,345	3,994	2,465	1,508	0,742	0,303	0,113	0,028
720	9,297	9,391	9,012	8,058	7,599	6,791	5,717	4,595	3,410	2,112	1,296	0,595	0,246	0,103	0,013
725	8,052	7,979	7,760	7,026	6,562	5,879	4,893	3,903	2,969	1,784	1,120	0,513	0,222	0,091	0,000
730	6,866	6,947	6,633	5,926	5,708	4,986	4,227	3,378	2,564	1,543	0,926	0,457	0,183	0,040	0,000
735	5,941	6,008	5,670	5,130	4,946	4,316	3,694	2,916	2,183	1,315	0,795	0,393	0,142	0,028	0,000
740	5,087	5,000	5,021	4,382	4,072	3,681	3,059	2,449	1,834	1,142	0,681	0,280	0,098	0,023	0,000
745	4,257	4,243	4,103	3,711	3,614	3,141	2,595	2,070	1,568	0,960	0,568	0,250	0,075	0,001	0,000
750	3,722	3,743	3,517	3,207	3,127	2,596	2,342	1,804	1,364	0,775	0,449	0,229	0,075	0,000	0,000
755	3,143	3,065	3,205	2,742	2,523	2,335	1,925	1,643	1,115	0,691	0,393	0,140	0,023	0,000	0,000
760	2,770	2,682	2,486	2,284	2,264	1,920	1,556	1,261	0,927	0,564	0,339	0,118	0,000	0,000	0,000
765	2,234	2,238	2,271	2,081	1,782	1,574	1,466	1,098	0,855	0,490	0,270	0,089	0,000	0,000	0,000
770	1,981	1,922	1,824	1,665	1,594	1,518	1,193	0,964	0,623	0,385	0,179	0,091	0,002	0,000	0,000
775	1,513	1,688	1,619	1,383	1,544	1,131	1,055	0,679	0,499	0,311	0,158	0,002	0,000	0,000	0,000
780	1,474	1,340	1,530	1,428	1,150	1,086	0,826	0,687	0,505	0,283	0,119	0,000	0,000	0,000	0,000

Seznam použitých zdrojů

- [1] ABE, M., H. IKEDA, Y. HIGAKI a M. NAKAMICHI. *A method to estimate correlated color temperatures of illuminants using a color video camera*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement [online]. 40(1), 28-33. DOI: 10.1109/19.69944. ISSN 00189456. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/69944/>
- [2] Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). *Technical note - Chromaticity Difference Specification for Light Sources* [online], CIE TN 001:2014, c2004. Dostupné také z: http://files.cie.co.at/738_CIE_TN_001-2014.pdf
- [3] Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). *Technical report - Colorimetry*, 3. ed., CIE Publication 015:2004, 2004. ISBN 3-901-906-33-9.
- [4] Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). *Technical report - Practical methods for the measurement of reflectance and transmittance*, CIE Publication 130-1998, 1998. ISBN 978-3-900734-88-6.
- [5] ČERNÁ, Ladislava. *Fotometrie, fotometrie a spektroskopie: Měření neelektrických veličin* [online]. Praha: ČVUT v Praze. Dostupné také z: <http://pasan.feld.cvut.cz/dokumenty/fotometrie.pdf>
- [6] ČSN EN 13032. *Světlo a osvětlení - Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [7] ČSN EN 62504. *Všeobecné osvětlování - LED světelné zdroje a jejich příslušenství - Termíny a definice*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [8] ČSN EN ISO 11664. *Kolorimetrie*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [9] Donatello S., et al., *Revision of the EU Green Public Procurement Criteria for Road Lighting and traffic signals*, EUR 29631 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-79-99077-9, doi:10.2760/372897, JRC115406. Dostupné z: http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/tbr/190125_JRC115406_eugpp_road_lighting_technical_report.pdf
- [10] DVOŘÁČEK, Vladimír. *Světelné zdroje - světelné diody*. Světlo. [online]. FCC Public, 2009, 2009(5), 68-71. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39810.pdf>

- [11] GALBRAITH, Justine. *Optical Properties of Glass: How Light and Glass Interact*. Kopp Glass, Inc. [online]. August 24, 2015. Dostupné z: <http://www.koppglass.com/blog/optical-properties-of-glass-how-light-and-glass-interact/>
- [12] HABEL, Jiří, et al. *Světelná technika a osvětlování*. Praha: FCC Public, 1995. ISBN 80-901985-0-3.
- [13] HABEL, Jiří, et al. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [14] HABEL, Jiří. *Osvětlování*. Praha: České vysoké učení technické, 1995. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-01-00728-6.
- [15] *Jak projektovat veřejné osvětlení: Podklady pro školení projektantů v oblasti veřejného osvětlení v roce 2005* [online]. Společnost pro rozvoj veřejného osvětlení (SRVO), 2015. Dostupné z: <http://www.artmetal-cz.com/p%C5%99edn%C3%A1%C5%A1ky/publikace/Jak%20projektovat%20VO-2005.pdf>
- [16] *Katalog výrobků pro profesionální osvětlení* [online]. Signify Holding, c2018-2019. Dostupné z: <http://www.lighting.philips.cz/prof>
- [17] *Lambert-Beerův zákon*. WikiSkripta [online]. 2019. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Lambert-Beer%C5%AFv_z%C3%A1kon
- [18] *LED Color Characteristics* [online]. U. S. Department of Energy, 2012. Dostupné z: <https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/led-color-characteristics-factsheet.pdf>
- [19] *Lighting for video: the color temperature* [online]. Photonix Srl, 5 January 2019. Dostupné z: <https://www.photonix.net/lighting-for-video-the-color-temperature/>
- [20] *Mavospec Base* [online]. GOSSEN Foto- und Lichtmesstechnik, c2019. Dostupné z: <https://gossen-photo.de/en/mavospec-base/>
- [21] *P725* [online]. iGuzzini, c2016-2019. Dostupné z: <https://www.iguzzini.com/p725/>
- [22] PAVELKA, Tomáš, Jan ŠKODA a Petr BAXANT. *Historie světelných diod LED*. Světlo: Časopis pro světlo a osvětlování [online]. Praha: FCC Public, 21. 6. 2016, 2016(2), 26-28. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/historie-svetelnych-diod-led--1696>
- [23] Philips Lighting N.V. *Annual Report 2017* [online]. 2018. Dostupné z: <https://www.signify.com/static/2017/philips-lighting-annual-report-2017.pdf>

- [24] *PowerBalance Tunable White, recessed: RC464B LED80S/TWH PSD W60L60 VPC PIP* [online]. Signify Holding, c2019. Dostupné z: <https://www.assets.lighting.philips.com/is/content/PhilipsLighting/fp910502042503-pss-global>
- [25] *Přednášky k předmětu A5M15ES1: Základy nauky o barvě* [online]. Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/attach/A5M15ES1/A5M15ES1-04-Barva.pdf>
- [26] *Přístrojové vybavení laboratoře světelné techniky*. PowerWiki [online]. Katedra elektroenergetiky FEL ČVUT, 2011. Dostupné z: <http://www.powerwiki.cz/wiki/SvetloPristroje>
- [27] *Red Tide USB650 Fiber Optic Spectrometer: Installation and Operation Manual* [online]. Ocean Optics, 2008. Dostupné také z: <https://oceanoptics.com/wp-content/uploads/USB-650-Red-Tide-Installation-and-Operation-Instructions.pdf>
- [28] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [29] RICHTR, Zbyněk. *Potenciál úspor vyplývající z použití moderních světelných zdrojů ve vnitřních pracovních prostorech* [online]. Ostrava, 2011. Dostupné také z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/87204/RIC136_FEI_N2649_3907T001_2011.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky.
- [30] Signify N.V. *Annual Report 2018* [online]. 2019. Dostupné z: <https://www.signify.com/static/2018/signify-annual-report-2018.pdf>
- [31] VALENCIA, Juan-Sebastian Botero, Francisco-Eugenio Lopez GIRALDO a Jesus-Francisco Vargas BONILLA. Calibration method for Correlated Color Temperature (CCT) measurement using RGB color sensors. *Symposium of Signals, Images and Artificial Vision - 2013: STSIVA - 2013* [online]. IEEE, 2013, 2013, , 1-6. DOI: 10.1109/STSIVA.2013.6644921. ISBN 978-1-4799-1121-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6644921/>
- [32] *Víceúhlový spektrofotometr MA68II*. [online]. BAS Rudice spol. s r.o. Dostupné z: https://www.bas.cz/x-rite/xrite_ma68ii.php

Seznam obrázků

Obr. 1 - Soustava fotometrických rovin C- γ [15]	3
Obr. 2 - Soustava fotometrických rovin B- β [15]	3
Obr. 3 - Diagram chromatičnosti soustavy XYZ (CIE 1931) v pravúhlých souřadnicích x, y [25]	7
Obr. 4 - Spektrum bílé LED diody využívající fosforescenci luminoforu [10]	13
Obr. 5 - Spektrum bílé LED s třípásmovým luminoforem excitovaným UV diodou [10]	13
Obr. 6 - LED svítidlo s rotačně symetrickým zrcadlovým reflektorem s fazetami - Philips Ecostyle ST440T [16]	18
Obr. 7 - LED svítidlo s difuzním reflektorem - Philips Ledinaire Mini BVP105 [16]	18
Obr. 8 - Svítidlo s difuzorem - Philips Ledinaire RC065B [16]	19
Obr. 9 - Princip funkce spektrometru [27]	22
Obr. 10 - Absorpční spektrum filtru Kopp Glass' 3131 [11]	23
Obr. 11 - Svítidlo Philips RC464B PowerBalance Tunable White [20]	25
Obr. 12 - Svítidlo iGuzzini P725 [21]	25

Seznam grafů

Graf 1 - Spektrální prostorová charakteristika svítidla P725	28
Graf 2 - Spektrální prostorová charakteristika svítidla P725 (polární graf)	30
Graf 3 - Spektrální prostorová charakteristika svítidla RC464B – NW	31
Graf 4 - Spektrální prostorové charakteristiky svítidla RC464B – WW a CW	32
Graf 5 - Závislost CCT na úhlu vyzařování svítidla P725	36
Graf 6 - Závislost CCT na úhlu vyzařování svítidla RC464B - NW	37
Graf 7 - Závislost CCT na úhlu vyzařování svítidla RC464B - WW	38
Graf 8 - Závislost CCT na úhlu vyzařování svítidla RC464B - CW	38

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Technické parametry spektrometru Mavospec Base (výňatek z katalogu) [20]	42
Tabulka 2 - Naměřené hodnoty při měření svítidla RC464B - NW	43
Tabulka 3 - Naměřené hodnoty při měření svítidla RC464B - CW	45
Tabulka 4 - Naměřené hodnoty při měření svítidla RC464B - WW	47
Tabulka 5 - Naměřené hodnoty při měření svítidla P725	49