



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky**

Analýza jasů světelné scény s využitím digitálního fotoaparátu

Luminance analysis with digital camera

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

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

Václav Andrýsek

Praha 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Andrýsek** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **474369**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza jasu světelné scény s využitím digitálního fotoaparátu

Název bakalářské práce anglicky:

Luminance analysis with digital camera

Pokyny pro vypracování:

- 1) Teorie měření jasu světelné scény
- 2) Měření jasu vybraných světelných scén jasoměrem a digitálním fotoaparátem
- 3) Analýza nejistot a výsledků měření jasu scén jasoměrem a digitálním fotoaparátem

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČSN EN ISO 11664 Kolorimetrie
- [2] ČSN EN 13032 Světlo a osvětlení - Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel
- [3] HABEL, Jíří, et al. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013. 438 s. ISBN 978 80 86534 21 3.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **09.01.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné 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

.....

Podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Markovi Bálskému, Ph.D. za veškerou ochotu během studia, za poskytnuté konzultace, za pomoc s praktickým měřením a cenné rady, které mi pomohly vypracovat tuto práci.

Abstrakt

Tato práce se zabývá analýzou měření určité skupiny jasů černobílých a barevných odstínů a tvorbou softwaru, který aplikuje výsledky této analýzy a zobrazí uživateli naměřené hodnoty jasů. Výsledek práce je nejistota měření jasoměrem a digitálním fotoaparátem a skutečnost, že měření jasů digitálním fotoaparátem je zatíženo systematickými chybami, které je potřeba korigovat.

Klíčová slova

jas, měření jasů, jasoměr, digitální fotoaparát, Lab, RGB, CMYK, HSB, HDR Luminance Analyzer, nejistota měření, Wolfram Mathematica, software

Abstract

The aim of this thesis is to analyse measurements in certain group of coloured and black and white shades and to create a software. This software uses the results of the analysis and displays the measured luminance to the user. The result of this thesis is the uncertainty of measurement with a luminance meter and a digital camera and the fact that the measurement of luminance with digital camera contains systematic errors which need to be corrected.

Klíčová slova

luminance, luminance measurement, luminance meter, digital camera, Lab, RGB, CMYK, HSB, HDR Luminance Analyzer, uncertainty of measurement, Wolfram Mathematica, software

Obsah

| | |
|---|----|
| Úvod | 13 |
| 1 Teorie měření jasu světelné scény | 15 |
| 1.1 Definice jasu svazku světelných paprsků | 15 |
| 1.2 Princip měření jasu..... | 16 |
| 1.3 Měření jasu | 17 |
| 1.3.1 Měření jasu jasoměrem | 17 |
| 1.3.2 Měření jasu digitálním fotoaparátem | 18 |
| 1.4 Parametry fotoaparátu | 19 |
| 1.5 Barevné systémy | 19 |
| 1.5.1 Barevný systém Lab..... | 19 |
| 1.5.2 Barevný systém RGB | 20 |
| 1.5.3 Barevný systém CMYK..... | 21 |
| 1.5.4 Barevný systém HSB..... | 21 |
| 1.6 Převodní charakteristiky mezi barevným systémem Lab a jasem L | 22 |
| 1.7 Zpracovávání digitální fotografie | 23 |
| 1.7.1 programem HDR Luminance Analyzer | 23 |
| 1.7.2 programem Wolfram Mathematica | 25 |
| 1.8 Nejistota měření | 25 |
| 1.8.1 Chyby měření a nejistota měření | 25 |
| 1.8.2 Standardní nejistota měření | 25 |
| 1.8.3 Dílčí nejistoty typu B pro měření světelných veličin | 26 |
| 1.8.4 Požadavky na nejistoty měření jasoměrů | 27 |
| 2 Měření jasu vybraných světelných scén jasoměrem a digitálním fotoaparátem | 28 |
| 2.1 Měření 15 vzorků | 28 |
| 2.1.1 Jasoměrem | 29 |
| 2.1.2 Digitálním fotoaparátem..... | 30 |
| 2.2 Měření 36 vzorků | 31 |
| 2.2.1 Jasoměrem | 31 |
| 2.2.2 Digitálním fotoaparátem..... | 32 |
| 2.3 Měření světelné scény | 33 |
| 2.3.1 Jasoměrem | 33 |
| 2.3.2 Digitálním fotoaparátem..... | 34 |
| 3 Analýza nejistot a výsledků měření jasu scén jasoměrem a digitálním fotoaparátem..... | 35 |
| 3.1 Obecné poznatky z kapitoly 2 | 35 |
| 3.1.1 Černobílé odstíny | 35 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1.2 | Barevné odstíny..... | 35 |
| 3.1.3 | Odchytky a korekční funkce..... | 36 |
| 3.2 | Vyhodnocení a analýza výsledků z kapitoly 2.1 | 36 |
| 3.3 | Vyhodnocení a analýza výsledků z kapitoly 2.2 | 37 |
| 3.4 | Vyhodnocení a analýza výsledků z kapitoly 2.3 | 40 |
| 3.5 | Softwarová realizace měření jasů digitálním fotoaparátem..... | 41 |
| 3.6 | Výpočet nejistot měření jasoměrem..... | 45 |
| 3.7 | Výpočet nejistot měření digitálním fotoaparátem | 45 |
| | Závěr..... | 48 |
| | Seznam použité literatury | 49 |
| | Příloha – barevná škála 36 barevných vzorků..... | 51 |

Úvod

Tato práce se zabývá měřením fyzikální veličiny jasu pomocí digitálního fotoaparátu. Pokud fotoaparát umožňuje vyfotit stejnou světelnou scénu několika fotografiemi s různými dobami expozic, vzniká tak množina hodnot, ze kterých lze pomocí různých úvah vybírat vhodné hodnoty, které se považují za výsledné naměřené. V diplomové práci [1] je popsán způsob měření jasu založený na výběru hodnoty měřeného jasu, která má hodnotu L_{Lab} z barevného systému Lab nejbližší 50 %.

Přestože jasoměr je oproti digitálnímu fotoaparátu bezkonkurenčně přesnější, na rozdíl od digitálního fotoaparátu má řadu nevýhod. Jednou z nich je zdlouhavé měření s nutností ručně směřovat zorné pole jasoměru na jednu konkrétní měřenou plošku. Další nevýhodou je nemožnost stanovit jas v několika velmi malých bodech vedle sebe, protože pro uživatele jasoměru je problematické tyto malé body zaměřit a správně odhadnout pomocí zorného pole jasoměru jejich polohu. Fotoaparát umožňuje v krátkém okamžiku pořídit fotografii například o 16 000 000 pixelech, která nese informaci o 16 000 000 hodnot jasu.

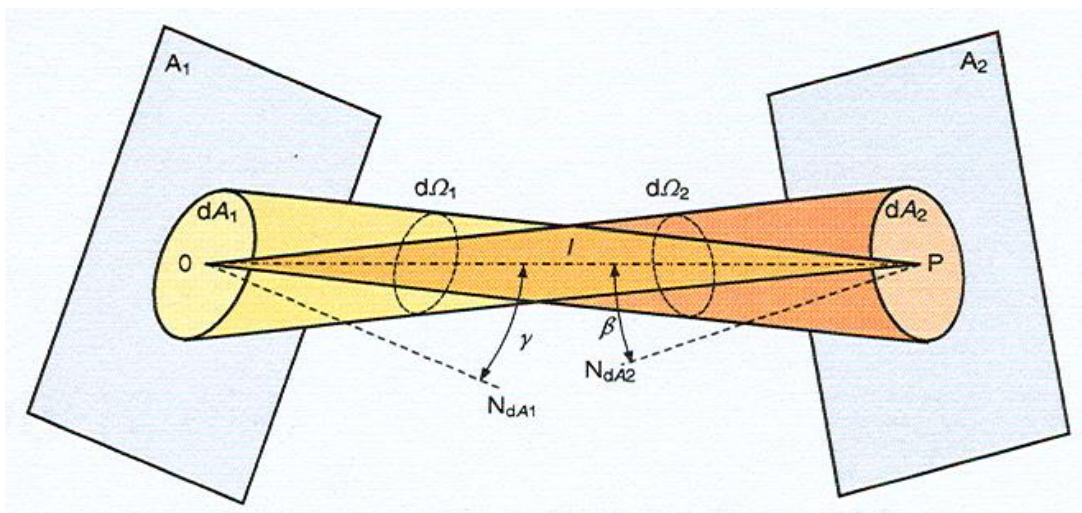
Mezi největší nevýhodu měření jasu světelné scény digitálním fotoaparátem patří nepředvídatelnosti způsobené samotným fotoaparátem, o nichž má informace pouze výrobce fotoaparátu a nikde je nezveřejňuje. Jasoměr je kalibrován na fotometrické veličiny, které jsou založené na vnímání lidským okem. Není vyloučeno, že naměřené hodnoty jasu digitálním fotoaparátem mohou být znehodnoceny vlnovými délkami, které lidské oko nevidí, nebo je fotoaparát citlivější na některou oblast viditelných vlnových délek.

Nutnost softwaru, který usnadňuje převod hodnot z množiny pixelů ve fotografii na hodnoty jasů, je důvodem k tomu, aby měření jasu digitálním fotoaparátem nebylo zdlouhavější než měření jasu jasoměrem. V případě, že by samotné měření digitálním fotoaparátem bylo zdlouhavější, pořád by mělo výhodu v tom, že by nainstalování digitálního fotoaparátu a stisknutí několika spouští (a následné pořízení série fotografií v přibližně stejném okamžiku) bylo mnohonásobně časově kratší než měření mnoha bodů jasoměrem. To by mělo výhodu v tom, když by bylo potřeba analyzovat jas v prostorách, kde člověk potřebuje strávit minimum času, například v infekčních prostorách v nemocnici [1].

1 Teorie měření jasu světelné scény

1.1 Definice jasu svazku světelných paprsků

Jas svazku světelných paprsků obecně a jas svazku světelných paprsků pro sbíhající se a rozbíhající se paprsky je definován pomocí obr. č. 1:



Obr. č. 1: definice jasu svazku světelných paprsků sbíhajících se a rozbíhajících se [2]

A_1 a A_2 jsou stínítka, dA_1 a dA_2 jsou otvory ve stínítkách. Světelné paprsky jsou přenášeny uvažovaným svazkem světelných paprsků v ose OP ve směru od bodu O do bodu P , vymezené příslušným elementem prostorového úhlu $d\Omega_1$ nebo $d\Omega_2$. Element normálové plošky dA_{n1} se uvažuje v bodě, ze kterého vychází prostorový úhel $d\Omega_2$ (v bodě dA_1), zatímco element normálové plošky dA_{n2} se uvažuje v bodě, ze kterého vychází prostorový úhel $d\Omega_1$ (v bodě dA_2).

Jas svazku světelných paprsků přenášovaných ve směru osy OP je roven součinu prostorové a plošné hustoty světelného toku ϕ v uvažovaném bodě na stínítku (v bodu O nebo bodu P).

$$L_{OP} = \frac{d^2\phi}{d\Omega \cdot dA_n} \quad (cd \cdot m^{-2}; lm, sr, m^2) \quad (1.1)$$

Definice platí za předpokladu zanedbatelných rozměrů otvorů na stínítku dA_1 a dA_2 vzhledem ke vzdálenosti l , která spojuje body O a P . dA_n je element normálové plošky vzhledem k ose OP v příslušném uvažovaném bodě O nebo P a $d\Omega$ je element prostorového úhlu svazku světelných paprsků vzhledem ke stejnému uvažovanému bodu.

Jas svazku světelných paprsků sbíhajících se v bodě je definován pomocí vzorce (1.2). Pokud by se stejný světelný tok soustředil do plošky dA_2 , která je vůči ose OP natočena o nenulový úhel β v intervalu $(0^\circ; 90^\circ)$, jas by se oproti případu $\beta = 0^\circ$ zvýšil. Intuitivní význam členu $\cos(\beta)$ ve jmenovateli je soustředění stejného světelného toku do menší plošky dA_{n2} , která se oproti plošce dA_2 liší o vynásobení členem $\cos(\beta)$. Zmenšená ploška má za následek větší plošnou hustotu světelného toku vzhledem k normálové rovině a tím i zvětšení jasu. Toto platí za předpokladu, že se světelný tok pro úhel 0° a jiný úhel v intervalu $(0^\circ; 90^\circ)$ nezměnil.

$$L_{OP} = \frac{d^2\phi}{d\Omega_1 \cdot dA_{n2}} = \frac{d^2\phi}{d\Omega_1 \cdot dA_2 \cdot \cos(\beta)} \quad (cd \cdot m^{-2}; lm, sr, m^2; lm, sr, m^2, -) \quad (1.2)$$

$$dA_{n2} = dA_2 \cdot \cos(\beta) \quad (m^2; m^2, -) \quad (1.3)$$

Jas svazku světelných paprsků rozbíhajících se z bodu je definován pomocí vzorce (1.4). Pokud by stejný světelný tok vycházel z plošky dA_1 , která je vůči ose OP natočena o nenulový úhel γ v intervalu $(0^\circ; 90^\circ)$, ve směru osy OP, jas by se oproti případu $\gamma = 0^\circ$ zvýšil. Intuitivní význam členu $\cos(\gamma)$ ve jmenovateli je obdobný jako pro jas sbíhajících se paprsků, tedy pro stejný světelný tok ve směru osy OP má zmenšení plošky dA_1 za následek zvětšení plošné hustoty světelného toku vzhledem k normálové rovině a tím i zvětšení jasu.

$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_2 \cdot dA_{n1}} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_2 \cdot dA_1 \cdot \cos(\gamma)} \quad (cd \cdot m^{-2}; lm, sr, m^2; lm, sr, m^2, -) \quad (1.4)$$

$$dA_{n1} = dA_1 \cdot \cos(\gamma) \quad (m^2; m^2, -) \quad (1.5)$$

Jednotka jasu je odvozena z rovnice (1.4), ve které se použije definice svítivosti (1.7), která značí svítivost bodového zdroje z bodu O.

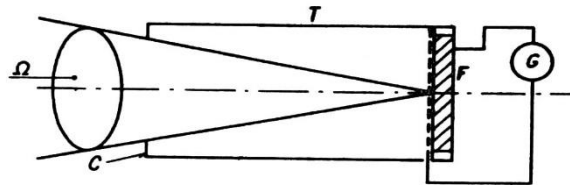
$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_2 \cdot dA_{n1}} = \frac{dI_\gamma}{dA_{n1}} \quad (cd \cdot m^{-2}; lm, sr, m^2; cd, m^2) \quad (1.6)$$

$$I_\gamma = \frac{d\Phi}{d\Omega_2} \quad (cd; lm, sr) \quad (1.7)$$

Podílem jednotky svítivosti a jednotky plochy je odvozena jednotka jasu $cd \cdot m^{-2}$ [2].

1.2 Princip měření jasu

Zařízení, kterým se měří jas, se nazývá jasoměr. Princip měření jasu lze popsat na nejjednodušším modelu objektivního jasoměru na obr. č. 2.



Obr. č. 2: nejjednodušší model objektivního jasoměru [3]

Rovnice, která popisuje princip měření jasu pomocí objektivního jasoměru (1.8), je odvozena z (1.2):

$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_1 \cdot dA_{n2}} = \frac{dE_{n2}}{d\Omega_1} \quad (cd \cdot m^{-2}; lm, sr, m^2; lx, sr) \quad (1.8)$$

$$E_{n2} = \frac{d\Phi}{dA_{n2}} \quad (lx; lm, m^2) \quad (1.9)$$

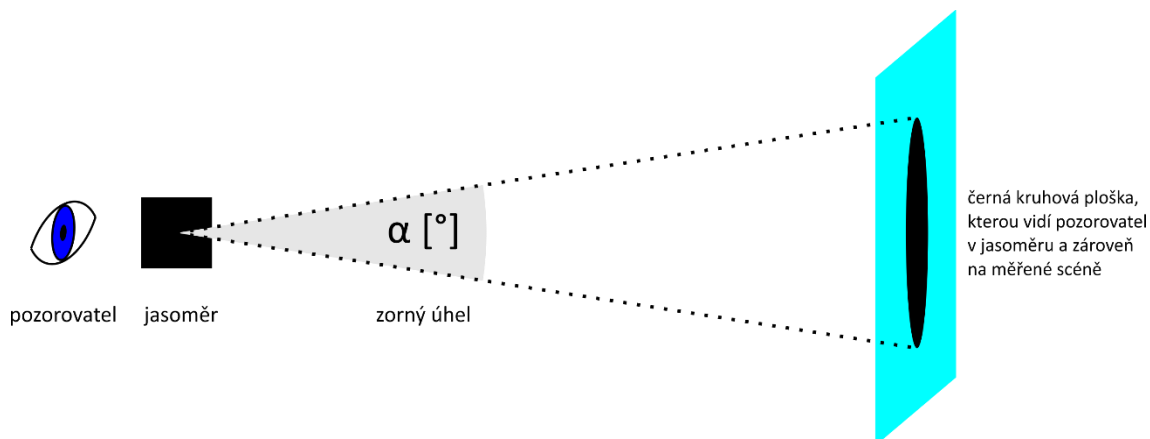
Místo elementů dE_{n2} a $d\Omega_1$ jsou uvažovány veličiny E_n a Ω , které nejsou infinitezimálně malé. Vztah (1.8) přechází do tvaru:

$$L = \frac{E_n}{\Omega} \quad (cd \cdot m^{-2}; lx, sr) \quad (1.10)$$

Černý tubus T a kruhová clona C vymezují prostorový úhel Ω . F je fotonka, která měří normálovou osvětlenost. G je galvanometr [2], zařízení pro měření malých stejnosměrných proudů [4], z jehož údaje se přepočtem zjistí naměřená hodnota normálové osvětlenosti na fotonce F. Protože se měří pouze jeden údaj na galvanometru, který je úměrný osvětlenosti na fotonce, je změřený jas roven průměrnému jasů ve vymezeném prostorovém úhlu.

Moderní jasoměry umožňují v objektivu zobrazit pro pozorovatele černou kruhovou plošku, na základě které pozorovatel pozná, v které části plochy, která se nachází před jasoměrem, se měří střední hodnota jasu.

Zorný úhel α objektivu jasoměru je úhel udávaný ve stupních, který je vymezen tubusem stejným směrem jako úhel Ω (Ω je vymezen ve steradiánech) [2].



Obr. č. 3: zorný úhel objektivu jasoměru

1.3 Měření jasu

1.3.1 Měření jasu jasoměrem

Během měření jasoměrem je nutné brát v úvahu, kterou plochu chce osoba provádějící měření posoudit z hlediska jejího jasu. Jasoměr dává informaci o tom, jaký je průměrný jas v měřené plošce. Pro porovnání naměřených hodnot jasu jasoměrem s hodnotami naměřenými digitálním fotoaparátem je potřeba zvolit zorný úhel jasoměru tak, aby měřená plocha podávala informaci o hodnotách jasu, které se přibližně nacházejí na světelné scéně, kterou změnil digitální fotoaparát. Z toho důvodu se pro měření jeví vhodnější jasoměry bodové (se zorným úhlem do 1 °) oproti jasům integračním, protože výstupem digitálního fotoaparátu jsou hodnoty jasu přiřazené pro každý pixel fotografie.

Menší rozlišení jasoměru, ale ne příliš malé, zaujme plošku větší, než je velikost plošky, která odpovídá po přepočtu velikosti jednomu pixelu na digitální fotografii. V případě, že by se informace o hodnotě jasu promítala i do okolních pixelů vůči měřenému pixelu na digitální fotografii, jeví se vhodnější použít rozlišení jasoměru větší než rozlišení, které by přesně zaujímalo plochu na měřené scéně odpovídající ploše jednoho pixelu na fotografii. Dalším důvodem nenastavování rozlišení jasoměru zaujímající plochu jednoho pixelu je skoro nemožnost se přesně trefit jasoměrem do tohoto měřeného bodu [2].

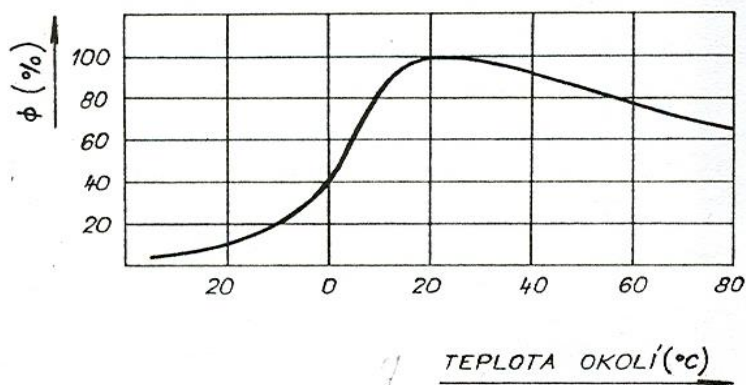
Jasoměr je nutné pro přesná a provozní měření upevnit na stojan. Dále by jasoměr neměl být pokryt prachem nebo jakkoliv znečištěn [5]. Kdyby jasoměr nebyl upevněn na stojanu a byl by držen v rukách, byla by v případě nestabilního zaměření měřené plošky při měření jasu na jasově nerovnoměrných plochách velmi výrazně ovlivněna naměřená hodnota.

Fotočlánek uvnitř tubusu jasoměru, jenž měří osvětlenost přepočítávanou na jas, je potřeba vystavit přibližně stejným světelným podmínkám před zahájením měření po dobu 5 až 15 minut [2], například pokud byl předtím umístěn v krabici. Účelem adaptování měřidla na přibližně měřené hodnoty je zvýšení přesnosti pozdějších naměřených hodnot, které budou ustálené [5].

Denní světlo je proměnlivé, proto je nutné se tomuto světlu vyvarovat po dobu měření v prostorech s umělým osvětlením. Během měření při umělém osvětlení je potřeba světelné zdroje nechat ustábit (až 20 min), jinak by mohl světelný tok vycházející z umělých zdrojů světla kolísat. To by znehodnotilo hodnoty, u kterých trvá delší dobu jejich naměření. Například 40 různých hodnot měřených na jedné světelné scéně jasoměrem by byly nesprávně naměřené vzhledem tomu, že se každý bod měří jasoměrem samostatně a zaměření konkrétního bodu určitou dobu trvá [2].

Pokud se člověk nachází v okolí světelné scény, může ovlivnit množství dopadajících paprsků na světelnou scénu a tím ovlivnit výsledky měření [5]. Je potřeba brát ohled na to, že jakýkoliv stín, který není na první pohled vidět, může znehodnotit měření, a to se může projevit při porovnávání hodnot jasu měřených objektivním jasoměrem s hodnotami jasu měřenými digitálním fotoaparátem kvůli různému umístění osoby v prostoru, která se nachází v okolí měřidla.

Světelný tok svítidel může ovlivňovat teplota, proto je nutné zajistit konstantní teplotu v okolí svítidel. Proto nelze například v zimním období jenom tak otevřít okno měřicí laboratoře. Například u zářivky se může stát, že světelný tok výrazně poklesne při poklesu teploty [2].



Obr. č. 4: závislost poměrného světelného toku zářivky na teplotě okolí [6]

V případě, že by se měření mělo považovat za přesné, měření se opakuje, aby bylo možné statisticky vyhodnotit různé odchylky a střední hodnotu [5].

1.3.2 Měření jasu digitálním fotoaparátem

Mezi bezkonkurenční výhodu měření jasu digitálním fotoaparátem patří zachycení světelné scény do velkého množství pixelů pouhým vyfocením fotografie. Jasoměrem je obtížné se přesně zaměřit do měřeného bodu a zároveň je zdouhavé znovu nastavovat jasoměr na jiný měřený bod. Jedno měření jasoměrem znamená jednu měřenou hodnotu, zatímco jedno měření digitálním fotoaparátem v případě fotografie s rozlišením 4000 x 4000 pixelů znamená 16 000 000 změřených hodnot jasů [1].

Digitální fotoaparát použitý k měření jasu v této práci *Fujifilm FinePix S2 Pro* s objektivem *Nikon AF Nikkor 28-105mm f/3,5-4,5D* na základě měření neprojevuje sklony k vinětování, což je ztráta energie světelných paprsků, které neprocházejí středem objektivu, ale procházejí okrajem objektivu. Tento jev je způsoben větší uraženou vzdáleností těchto paprsků procházejících mimo střed objektivu. Vinětování by ovlivňovalo hodnoty na okraji fotografie tím, že by jejich hodnota jasu byla nižší [7].

Digitální fotoaparát není nutné adaptovat na hodnoty, které se budou přibližně měřit, protože jeho snímač je vystaven světlu pouze určitou dobu během pořizování fotografie [1].

1.4 Parametry fotoaparátu

Fotoaparát může umožňovat změnu průměru objektivu pomocí clony, což má za následek změnu množství světla, které projde objektivem do fotoaparátu. Clonové číslo F (1.11) je poměr mezi ohniskovou vzdáleností f a průměrem otvoru clony d fotoaparátu.

$$F = \frac{f}{d} \quad (1.11)$$

Doba expozice je časový úsek, kterému je vystaven snímač ve fotoaparátu světlu z okolí, než dojde k zaznamenání fotografie. Doba expozice se značí t .

Expozice (1.12) je definována jako logaritmus o základu 2 z podílu druhé mocniny clonového čísla a doby expozice. Zkratka EV znamená „exposure value“.

$$EV = \log_2 \frac{F^2}{t} = \log_2 \frac{f^2}{d^2 \cdot t} \quad (1.12)$$

Průměr otvoru clony fotoaparátu a doba expozice jsou ve jmenovateli, proto s rostoucím průměrem otvoru clony fotoaparátu a rostoucí dobou expozice klesá expozice. Čím déle je vystaven snímač fotoaparátu okolí a čím je větší průměr objektivu fotoaparátu, tím více dopadne světla na snímač fotoaparátu a podle definice expozice klesá hodnota EV .

Dopadne-li na snímač fotoaparátu nedostatek světla, světlá místa budou osvětlena nedostatečně, fotografie bude celkově tmavší a bude ubývat rozdílů mezi tmavými a středně tmavými místy. Dopadne-li na snímač fotoaparátu příliš mnoho světla, tmavá místa budou příliš osvětlena, fotografie bude celkově světlejší a bude ubývat rozdílů mezi světlými a středně světlými místy. Pro měření jasu digitálním fotoaparátem se hledá optimální doba expozice tak, aby bylo možné s co největší přesností určit měřený jas [1].

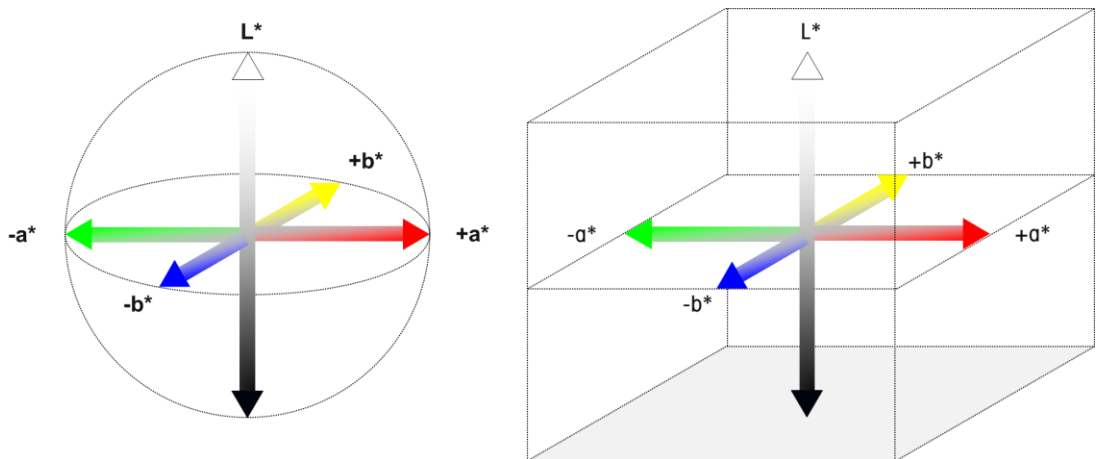
1.5 Barevné systémy

1.5.1 Barevný systém Lab

Barevný systém Lab je charakterizován třemi barevnými souřadnicemi: souřadnice a , která v kladných hodnotách dosahuje červené barvy a v záporných hodnotách zelené barvy, souřadnice b , která v kladných hodnotách nabývá žluté barvy a v záporných hodnotách modré barvy a souřadnice L_{Lab} , která pro nulovou hodnotu nabývá černé barvy a pro hodnotu $L_{Lab} = 100\%$ nabývá bílé barvy za předpokladu $a = 0$ a $b = 0$ [1]. Souřadnice a a b mohou teoreticky nabývat hodnot libovolných reálných čísel, ale mohou být omezeny velikostí celočíselné proměnné, ve které jsou uloženy [8].

Místo správného označení hodnoty L v barevném systému Lab se použije označení L_{Lab} , aby bylo možné rozlišit jas změřený jasoměrem od jasu v barevném systému Lab.

Každý pixel na digitální fotografii obsahuje po převodu do barevného systému Lab informaci o hodnotě L_{Lab} . Hodnota L_{Lab} by neměla být závislá na barevných odstínech, ale není vyloučeno, že během pořizování fotografie se mohou informace o barvách jakkoliv zkreslovat, protože výrobce zpravidla informace o získávání dat z měřicího čipu fotoaparátu nezveřejňuje [7].



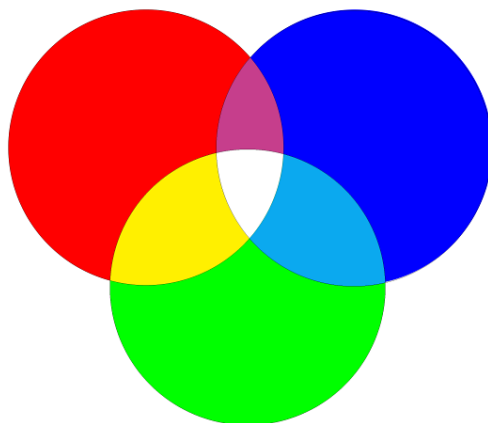
Obr. č. 5: Barevný systém Lab [9]

1.5.2 Barevný systém RGB

Barevný systém RGB je určen třemi barevnými souřadnicemi - červenou (RED), zelenou (GREEN) a modrou (BLUE). Jednou z možností vyjádření intervalu, kterého mohou nabývat souřadnice těchto tří barev, je pomocí celočíselných hodnot od 0 do 255. Interval celočíselných hodnot od 0 do 255 je dán možností zápisu této celočíselné hodnoty do osmibitové proměnné ($2^8 = 256$ kombinací). Jednotlivé kombinace barev jsou založeny na aditivě, to znamená slučování barev. Například svítíme-li na bílou plochu ve tmě červenou svítilnou a zelenou svítilnou, v průniku těchto dvou barev bude barva žlutá [10].

V případě nejrozšířenějšího systému sRGB (standardizovaný RGB systém společností Microsoft a Hewlett-Packard) nabývají barevné souřadnice hodnot od 0 do 1 v uzavřeném intervalu.

Převodem mezi barevným systémem sRGB a Lab se zabývá diplomová práce [1], kde jsou popsány vzorce zajišťující tento převod. Vzorce jsou navíc zabudované do programu, jehož tvorbou se [1] zabývá, tak, aby uživatel nemusel přepočty provádět ručně [1].

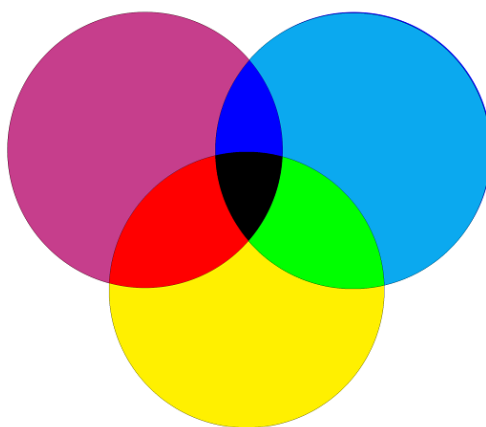


Obr. č. 6: Barevný systém RGB [11]

1.5.3 Barevný systém CMYK

Barevný systém CMYK má 4 souřadnice: azurovou (Cyan), purpurovou (Magenta), žlutou (Yellow) a černou (Black). Purpurová barva v systému CMYK odpovídá purpurové barvě, která v systému RGB vznikne aditivitou červené a modré, obdobně azurová vznikne aditivitou zelené a modré a žlutá vznikne aditivitou červené a zelené. Bílá barva vznikne aditivitou červené, zelené a modré v systému RGB.

Míchání barev v systému CMYK je založeno na substraktivitě, to znamená odečítání barev. Při smíchání purpurové a žluté ve vhodném poměru v systému CMYK vznikne červená, protože purpurová a žlutá mají společnou pouze červenou barvu v modelu RGB (zbývající nespolečné barvy modrá a zelená se odečtou). Při smíchání červené a azurové v režimu CMYK ve vhodném poměru vznikne černá, protože azurová je v systému RGB reprezentována zelenou a modrou a červená červenou. Průnik azurové a červené v systému CMYK není, což se považuje za černou barvu [10].

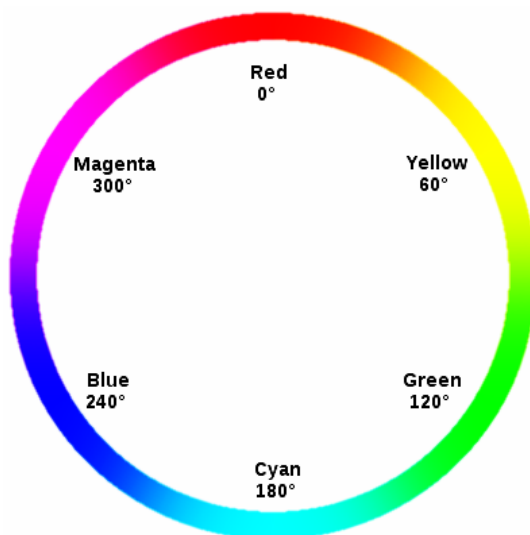


Obr. č. 7: Barevný systém CMYK [12]

1.5.4 Barevný systém HSB

Tento systém se oproti předchozím zmíněným barevným systémům liší v tom, že pouze jedna souřadnice podává informaci o barevných tónech. Zbylé dvě souřadnice charakterizují množství bílých odstínů a informaci o odstínu směrem k černé barvě. Souřadnice *H* (Hue) značí sytou barvu v intervalu od 0 ° do 360 °. Souřadnice *S* (Saturation) znamená množství barevného tónu oproti bílé barvě a nabývá hodnot v intervalu <0; 1>. Souřadnice *B* (Brightness) udává informaci o jasnosti a taktéž nabývá hodnot v intervalu <0; 1>.

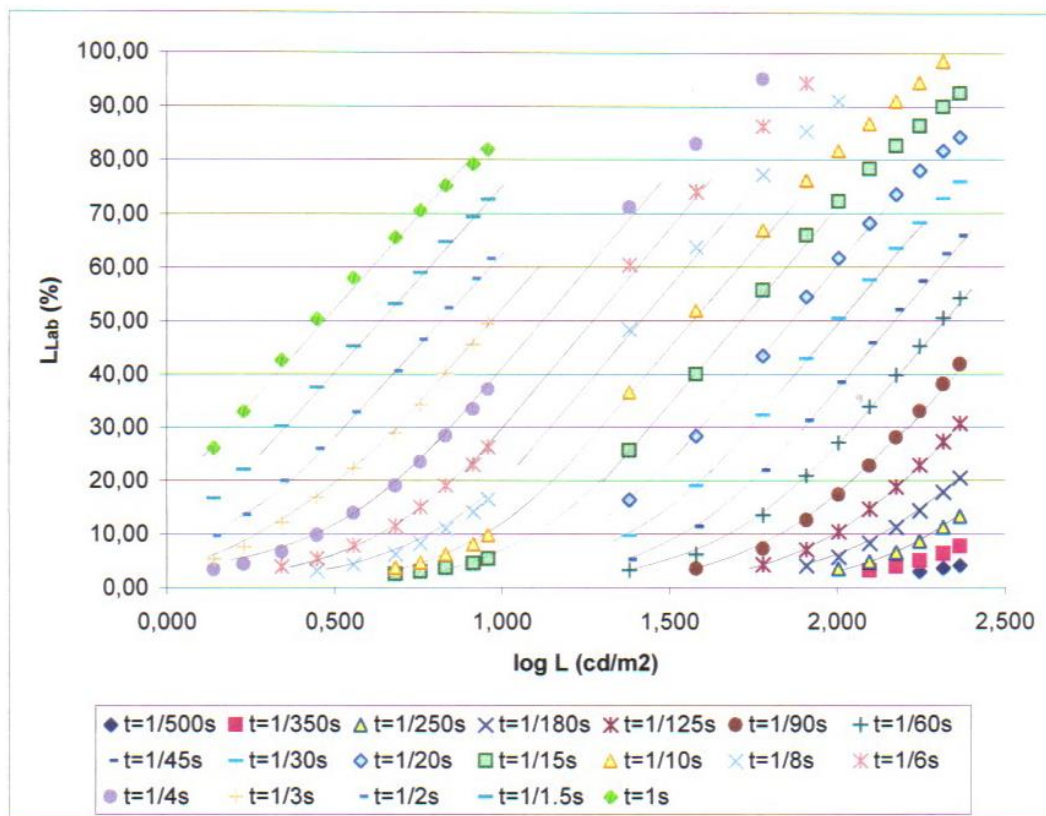
V této práci je použita pro *S* a *B* jednotka procento a v případě *S* = 0 % je podíl barevných tónů nulový a souřadnice *S* udává bílý tón a v případě *S* = 100 % je podíl barevných tónů maximální a souřadnice *S* určuje nulové zastoupení bílé barvy. Souřadnice *B* znamená pro *B* = 0 % nulový jas (černá barva) a pro *B* = 100 % maximální jas (odstín mezi sytou barvou a bílou barvou) [10].



Obr. č. 8: Souřadnice H v barevném systému HSB [13]

1.6 Převodní charakteristiky mezi barevným systémem Lab a jasem L

Za účelem nalezení funkce, která na základě zadání parametru clonového čísla F , doby expozice t a hodnoty L_{Lab} vypočítá hodnotu jasu L , byly experimentálně proměřeny převodní charakteristiky. Na osu x se v logaritmickém měřítku vynesl jas L , na osu y se vynesla procentuální hodnota hodnoty L_{Lab} .



Obr. č. 9: Převodní charakteristiky mezi hodnotou jasu L_{Lab} v barevném systému Lab a hodnotou jasu L [7]

Charakteristiky zobrazené na obr. č. 9 byly změřeny pro clonové číslo $F = 4$ [1]. Existují i naměřené převodní charakteristiky pro clonové číslo $F = 22$ [7]. Měření převodních charakteristik bylo předmětem diplomové práce [7].

Pro hodnoty L_{Lab} větší než 20 % a menší než 80 % lze považovat závislost mezi L_{Lab} a $\log L$ za lineární a vzorec (1.13) přibližně přiřazuje hodnotu jasů L pro lineárně proložené oblasti. Ve vzorci (1.13) jsou koeficienty A a B , kde $A = 0,0373 \text{ s} \cdot \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ a $B = 0,0307 \text{ \%}^{-1}$, určeny experimentálně.

$$L = \frac{F^2}{t} \cdot A \cdot e^{B \cdot L_{Lab}} (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; -, \text{s} \cdot \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}, \text{\%}^{-1}, \text{\%}, \text{s}) \quad (1.13)$$

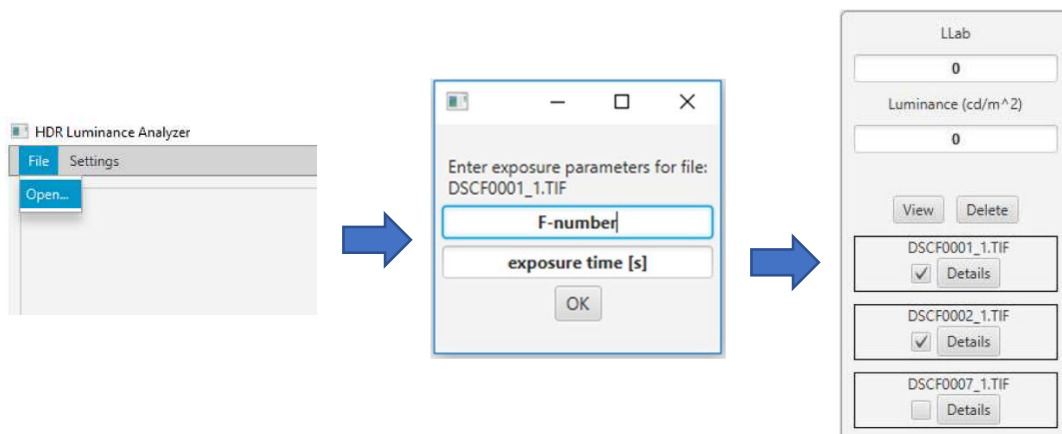
Pro výpočet jasů L lze použít pouze hodnoty v lineární oblasti. Nejpřesnější by měly být hodnoty v okolí $L_{Lab} = 50 \text{ \%}$. Řešením k zaznamenání co největší množiny hodnot s různými hodnotami L_{Lab} je vhodně zvolený interval různých (například klesajících) dob expozic, ze kterého je možné vhodně vybrat naměřenou hodnotu [1].

1.7 Zpracovávání digitální fotografie

1.7.1 programem HDR Luminance Analyzer

Nejprve je potřeba použít software od výrobce fotoaparátu k převedení fotografií z formátu RAF do formátu TIF, aby se fotografie převedla do systému sRGB a nedošlo ke ztrátě jakékoliv informace o barvě, protože pouze software výrobce fotoaparátu obsahuje databázi o skutečných vyfoceních hodnotách barev a správně fotografii převede.

Do programu HDR Luminance Analyzer lze nahrát jednu nebo více fotografií. Postup nahrávání fotografií zobrazuje obr. č. 10.



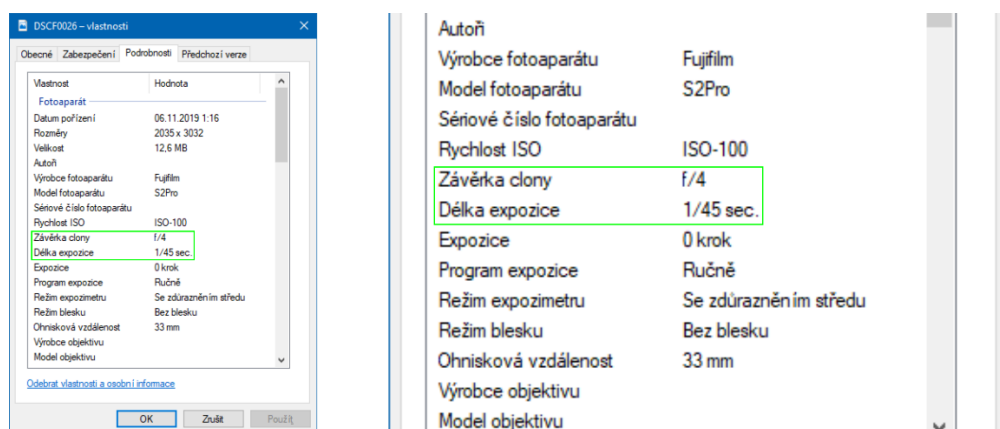
Obr. č. 10: vlevo volba fotografie k nahrávání, uprostřed zadávání parametrů F a t , vpravo menu na pravé straně [1]

Při nahrávání fotografie je nutné ve vyskakovacím okně uprostřed obr. č. 10 do programu zadat údaj clonového čísla a doby expozice. První možnost, jak zjistit hodnoty F a t , je umístit kurzor myši na soubor s fotografií ve formátu RAF a chvíli počkat.



Obr. č. 11: Získání F a t z informací o souboru pomocí kurzoru

Například z tohoto zobrazení lze vyčíst $F = 4$ (bezrozměrné číslo) a $t = 1/45 \text{ s} \approx 0.02222 \text{ s}$ (zaokrouheno na 5 desetinných míst, protože tolik desetinných míst pojme program HDR Luminance Analyzer a toto racionální číslo je do programu v tomto tvaru zadáno co nejpřesněji). Druhá možnost je zjistit parametry ve vlastnostech souboru.



Obr. č. 12: Získání F a t ve vlastnostech souboru

Obě čísla F a t je nutné zadávat s desetinou tečkou, ne s desetinou čárkou, pokud je potřeba zadávat desetinná čísla. Počet desetinných míst nerozhoduje o tom, jestli program zobrazí uživateli chybu způsobenou zadáním neplatného čísla. Pokud se do programu zadá hodnota F nebo t na větší počet desetinných míst, než je 5, program příslušné číslo zaokrouhlí na 5 desetinných míst. Zadá-li uživatel neplatné číslo, program zobrazí chybu, která ho o zadání neplatného čísla informuje.

Pro vygenerování jasové mapy je potřeba zvolit fotografie podle obr. č. 10 vpravo, ze kterých se vytvoří jasová mapa. Volba fotografií se provede označením čtverečku nalevo od tlačítka „Details“, které je zobrazené vedle každé úspěšně nahrané fotografie. Tlačítkem „View“ se vygeneruje jasová mapa a umístění kurzoru myši na jasovou mapu bude znamenat zobrazení hodnot „LLab“ a „Luminance“ na obr. č. 10.

V případě jedné zvolené nahrané fotografie program zobrazí výsledné měřené hodnoty odpovídající zvolené fotografii. V případě více zvolených fotografií program vybere z množiny snímků pro každý pixel hodnotu jasu, která je charakterizována hodnotou L_{Lab} co nejbližší $L_{\text{Lab}} = 50 \%$. Pokud nebude nalezena hodnota jasu z lineární části převodních charakteristik (obr. č. 9), bude v daném bodě uložena hodnota 0% v případě $L_{\text{Lab}} < 20 \%$ nebo 9999% v případě $L_{\text{Lab}} > 80 \%$.

Při větším počtu zvolených fotografií nebo při opakovaném generování jasové mapy z většího počtu fotografií se může stát, že jasová mapa vygenerována nebude a program nebude po zvolení jiného počtu fotografií a stisknutí tlačítka „View“ měnit vizuální vzhled jasové mapy. V tomto případě program může přiřazovat správné hodnoty „LLab“ a „Luminance“ nebo vykazovat paralyzování zobrazování hodnot „LLab“ a „Luminance“.

Během odečítání naměřených hodnot kurzorem se pod hodnotou „Luminance“ zobrazují souřadnice, které mají počátek vlevo nahoře. Souřadnice „X“ se zvětšuje směrem doprava a souřadnice „Y“ se zvětšuje směrem dolů. Počátek vlevo nahoře má souřadnice $[0; 0]$ [1].

1.7.2 programem Wolfram Mathematica

Skript programu Wolfram Mathematica Měření_HSB.nb zajišťuje převod zvoleného pixelu v souřadnicích programu HDR Luminance Analyzer do barevného systému HSB. Souřadnice, které se používají ve Wolframu Mathematice jsou odlišné oproti souřadnicím, které používá program HDR Luminance Analyzer. Ve Wolframu je souřadnice prvního pixelu vlevo dole [1; 1] zatímco v programu HDR Luminance Analyzer je souřadnice prvního pixelu vlevo nahoře [0; 0] [1]. Z toho plyne, že pokud jsou známy souřadnice v programu HDR Luminance Analyzer (X, Y), tak souřadnice x bude ve Wolframu Mathematice o jednu jednotku větší a souřadnice y se ve Wolframu získá tak, že se od výšky fotografie odečte hodnota Y z programu HDR Luminance Analyzer.

Když bude výška fotografie 2848 pixelů, tak hodnota Y vlevo dole bude 2847, protože vlevo nahoře je Y rovno 0. K získání souřadnice y ve Wolframu stačí v tomto případě od 2848 odečíst 2847 a to splňuje předpoklad toho, že ve Wolframu je vlevo dole hodnota y rovna jedné [14].

Funkce PixelValue zjistí 3 hodnoty, které obsahuje měřený pixel v barevném systému sRGB [15]. Funkce ColorConvert převede zvolené hodnoty jednoho pixelu do zvoleného barevného systému [16].

Skript programu Wolfram Mathematica Měření_HSB_v_kruhu.nb ve zvoleném kruhu na fotografii vypočítá aritmetický průměr hodnot H, S a B . Algoritmus pro výpočet průměrné hodnoty úhlu (1.14) je převzatý z [17], který je použit pro výpočet průměrné hodnoty H .

$$\bar{\alpha} = \arg \left(\sum_{j=1}^n e^{i\alpha_j} \right) \quad (1.14)$$

Skript programu Wolfram Mathematica Měření_Lab_L_v_kruhu.nb ve zvoleném kruhu na fotografii vypočítá aritmetický průměr hodnot L_{Lab} a L . Hodnota L extrahovaná z jednoho pixelu na fotografii je vypočítaná podle vzorce (1.13).

1.8 Nejistota měření

1.8.1 Chyby měření a nejistota měření

Existují dva druhy chyb měření. Prvním druhem je chyba náhodná, která je nepředvídatelná a lze pozorovat například její statistické chování při dostatečně velkém množství naměřených dat jedné stejné měřené hodnoty. Náhodnou chybu nelze systematicky korigovat. Druhým druhem je chyba systematická, kterou lze korigovat. Ke korekci systematické chyby mohou sloužit různé rovnice, které vzniknou kalibrací měřicího přístroje.

Nejistota měření podává informace o intervalu okolo naměřené hodnoty, ve kterém se s určitou pravděpodobností vyskytuje skutečná hodnota. Zavedení nejistoty měření je důvodem k tomu, že náhodnou chybu nelze systematicky korigovat [2].

1.8.2 Standardní nejistota měření

Standardní nejistota měření je směrodatná odchylka, která se udává buď absolutně vůči měřené veličině nebo jako relativní poměr směrodatné odchylky k hodnotě, která je považována za referenční. Existují dva typy standardní nejistoty měření.

Prvním typem je standardní nejistota typu A (značí se u_A), která je založena na dostatečném počtu naměřených hodnot ($n > 20$) jedné stejné měřené hodnoty a její příčiny nelze určit. Standardní nejistotu typu A z počtu n hodnot v relativním tvaru lze vypočítat podle vzorce (1.15) a příslušný aritmetický průměr lze vypočítat podle vzorce (1.16).

$$u_A(\%) = \frac{100}{\bar{X}} \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.15)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.16)$$

Druhým typem je standardní nejistota typu B (značí se u_B), jejíž příčiny na rozdíl od standardní nejistoty typu A lze předpovědět. Do standardní nejistoty typu B patří například nejistota způsobená odečítáním údaje ze stupnice měřicího přístroje [2]. Standardní nejistota typu B se vypočítá podle vzorce (1.17) [18].

$$u_B(\%) = \frac{Z_{\chi_{\max}}}{\chi \cdot X_{vzt}} \cdot 100 \quad (1.17)$$

Koeficient χ souvisí s pravděpodobnostním rozdělením týkajícím se chyby měření. Činitel χ může být v případě normálního rozdělení $\chi = 2$, pokud je pravděpodobnost překročení chyby $Z_{\chi_{\max}}$ nízká nebo $\chi = 3$, pakliže se pravděpodobnost překročení chyby $Z_{\chi_{\max}}$ nepředpokládá. V případě rovnoměrného rozdělení platí $\chi = \sqrt{3}$ [2]. $Z_{\chi_{\max}}$ je maximální odhadnutá odchylka. X_{vzt} je měřená hodnota, ke které se hodnota $Z_{\chi_{\max}}$ vztahuje [18].

Na základě Gaussova principu šíření nejistot (1.18) lze z jednotlivých dílčích nejistot typu A a typu B vypočítat výslednou kombinovanou nejistotu měření.

$$u_C(\%) = \sqrt{(u_{A1})^2 + (u_{A2})^2 + (u_{A3})^2 + \dots + (u_{B1})^2 + (u_{B2})^2 + (u_{B3})^2 + \dots} \quad (1.18)$$

Důvodem zavedení rozšířené standardní nejistoty měření je zvýšit interval, ve kterém se může nacházet naměřená hodnota a tímto zvýšit pravděpodobnost, že se naměřená hodnota bude v tomto nově zvoleném intervalu nacházet. Rozšířenou standardní nejistotu lze vypočítat podle (1.19) pro zvolený koeficient rozšíření k_U .

$$U(\%) = k_U \cdot u_C \quad (1.19)$$

V případě volby $k_U = 2$ se zvýší pravděpodobnost, že se naměřená hodnota nachází v rozšířeném intervalu, pro normálního rozdělení na 95,5 %. Pro rovnoměrné rozdělení se v tomto případě hodnota pravděpodobnosti blíží 100 % [2].

1.8.3 Dílčí nejistoty typu B pro měření světelných veličin

Dílčí nejistota typu B digitálního přístroje se určí v případě použití digitálního přístroje, u kterého se udává počet platných číslic, ve kterých se může vyskytovat chyba, podle vzorce (1.20).

$$u_{BE}(\%) = \frac{\delta_1 + \frac{N \cdot R}{X}}{\sqrt{3}} \cdot 100 \quad (1.20)$$

R je hodnota, která má rozměr měřené veličiny a udává hodnotu jedné nejmenší platné číslice. N udává počet těchto platných číslic, ve kterých se může vyskytovat chyba. δ_1 značí chybu přístroje z odečtené hodnoty. X je naměřená hodnota, kterou ukazuje přístroj.

Dílčí nejistota typu B vlivem konečných rozměrů měřeného svítidla je dána vztahem (1.21).

$$u_{Bk}(\%) = \frac{\left| 1 - \left(\frac{r_0}{\sqrt{r_0^2 + (a+b)^2}} \right)^3 \right|}{\sqrt{3}} \cdot 100 \quad (1.21)$$

r_0 je osová vzdálenost mezi středem přijímací plochy fotočlánku a středem svítidla. a je polovina charakteristického rozměru svítidla, který vidí pozorovatel ze středu fotočlánku směrem do středu svítidla. b je poloměr světlocitlivého povrchu fotočlánku [18].

1.8.4 Požadavky na nejistoty měření jasoměrů

Měření se klasifikuje z hlediska přesnosti do tří skupin: přesná, provozní a orientační. Každá z těchto tří skupin je charakterizována intervalem odhadu rozšířené nejistoty měření a maximální přípustnou celkovou chybou. Požadavky na přípustnou chybu a přípustnou rozšířenou nejistotu měření pomocí jasoměru zobrazuje tab. č. 1 [2].

| Přesnost měření | Přípustná celková chyba jasoměru (%) | Odhad rozšířené nejistoty výsledků měření (%) |
|-----------------|--------------------------------------|---|
| přesná | $\pm 7,5$ | $U \leq 8$ |
| provozní | ± 10 | $8 \% < U \leq 14 \%$ |
| orientační | ± 15 | $14 \% < U \leq 20 \%$ |

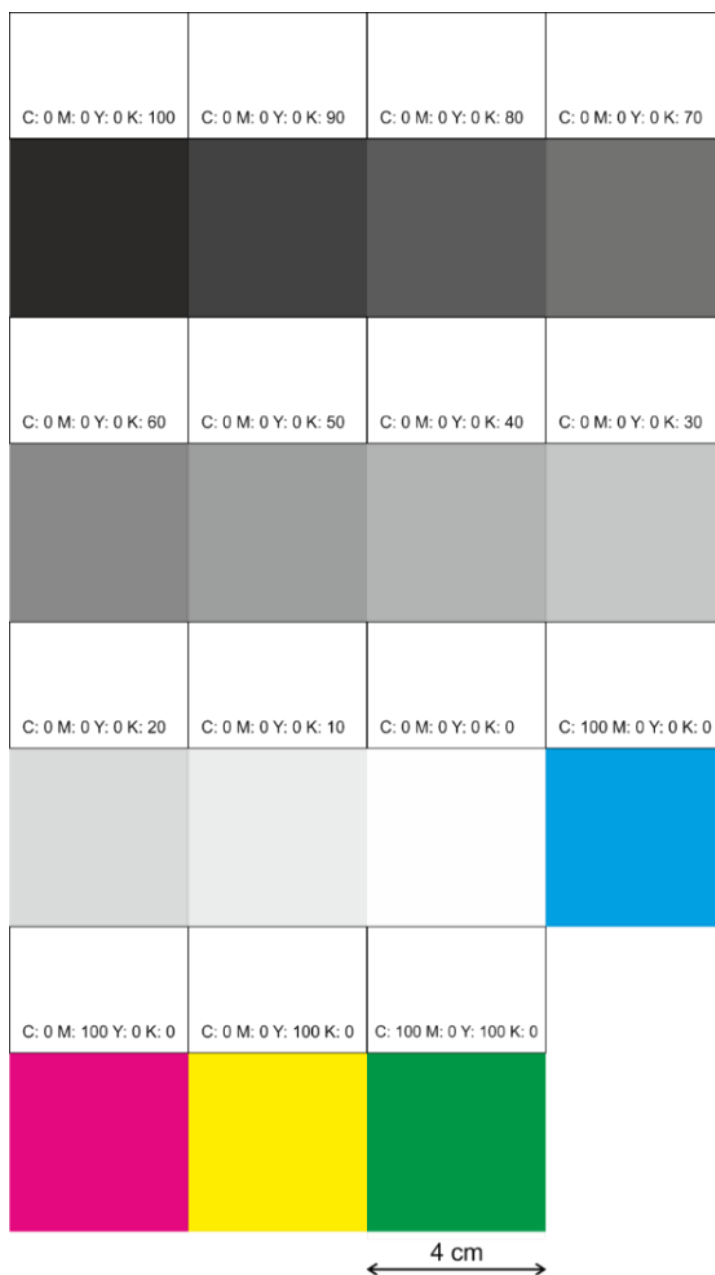
Tab. č. 1: Klasifikace nejistot měření a přípustných chyb jasoměrů [2]

2 Měření jasu vybraných světelných scén jasoměrem a digitálním fotoaparátem

2.1 Měření 15 vzorků

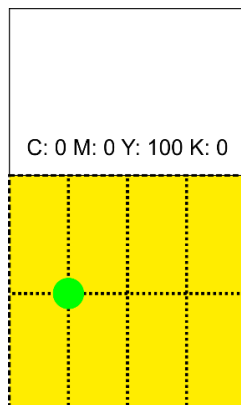
Na hlavní rozvaděč byl v laboratoři světelné techniky magnetkami připevněn výtisk, který obsahoval 11 různých odstínů šedi a čtyři barevné odstíny vytištěných ve čtvercích.

Jednotlivé odstíny byly definovány na základě barevného modelu CMYK a černobílá paleta byla pomocí množství černé barvy *K* nastavena tak, aby se množství černé barvy rovnoměrně rozložilo do černobílé škály. Každý černobílý i barevný odstín je ve tvaru čtverce o hraně 4 cm.



Obr. č. 13: Škála 15 barevných odstínů, ve skutečnosti zvětšená a vytištěná na střed celého papíru A4

Souřadnice měřených bodů jasoměrem i digitálním fotoaparátem jsou uvažovány pro každý z těchto 15 barevných vzorků stejným způsobem, jak je naznačeno v obr. č. 14, kde střed terče jasoměru je zobrazen zeleným kruhem.



Obr. č. 14: souřadnice středu terče jasoměru na měřeném vzorku (ukázáno na žluté barvě)

2.1.1 Jasoměrem

Jasoměr byl umístěn ve vzdálenosti $l = 2,3$ m daleko od středu výtisku. Zorný úhel, kterým byla jasoměrem pozorována měřená ploška, byl $\alpha = 0^\circ 20'$. Zornému úhlu $\alpha = 0^\circ 20'$ odpovídá podle [19] korekční koeficient $k = 1,015$ (-). Za výslednou hodnotu měřenou jasoměrem (referenční jas vzhledem k jasům měřeným digitálním fotoaparátem) se považuje hodnota L_{ref} ($cd \cdot m^{-2}$), která se vypočítá vynásobením hodnoty jasu $L_{jasoměru}$ ($cd \cdot m^{-2}$), kterou ukazuje stupnice jasoměru, korekčním činitelem k (-). Naměřené hodnoty jasů jsou zpracovány v tab. č. 2.

| vzorek | $L_{jasoměru}$ ($cd \cdot m^{-2}$) | L_{ref} ($cd \cdot m^{-2}$) |
|--------------------------------|---|------------------------------------|
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 100 | 12,53 | 12,72 |
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 90 | 13,52 | 13,72 |
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 80 | 16,33 | 16,57 |
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 70 | 21,7 | 22,03 |
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 60 | 23,3 | 23,65 |
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 50 | 29,5 | 29,94 |
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 40 | 38,3 | 38,87 |
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 30 | 47,5 | 48,21 |
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 20 | 64,4 | 65,37 |
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 10 | 84,1 | 85,36 |
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 0 | 89,9 | 91,25 |
| C: 100 M: 0 Y: 0 K: 0 | 21,4 | 21,72 |
| C: 0 M: 100 Y: 0 K: 0 | 25,9 | 26,29 |
| C: 0 M: 0 Y: 100 K: 0 | 80,0 | 81,20 |
| C: 100 M: 0 Y: 100 K: 0 | 21,6 | 21,92 |

Tab. č. 2: Hodnoty jasů 15 vzorků naměřené jasoměrem

2.1.2 Digitálním fotoaparátem

Digitální fotoaparát byl umístěn ve vzdálenosti $l = 2,3$ m daleko od středu výtisku ve stejném bodě v místnosti, ve kterém byl umístěn jasoměr. K měření hodnot jasů byl použit program HDR Luminance Analyzer.

Souřadnice X a Y jsou hodnoty, které se zobrazují v programu HDR Luminance Analyzer pro příslušný bod, na kterém je v jasové mapě umístěn kurzor myši. V tab. č. 3 jsou pro každý měřený vzorek zaznamenány souřadnice X a Y příslušného středu terče jasoměru na měřeném vzorku a těmto souřadnicím odpovídá v tab. č. 3 naměřená hodnota jasů L_{50} ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) pomocí programu HDR Luminance Analyzer.

Procentuální odchylka hodnoty jasů měřené digitálním fotoaparátem L_{50} od hodnoty jasů měřené jasoměrem L_{ref} je definována podle vzorce (2.1) jako δ_{50} .

$$\delta_{50} (\%) = 100 \cdot \frac{L_{50} - L_{ref}}{L_{ref}} \quad (2.1)$$

| vzorek | X (px) | Y (px) | L_{50} ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) | δ_{50} (%) |
|--------------------------------|----------|----------|---|-------------------|
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 100 | 2066 | 1135 | 11,78 | -7,39 |
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 90 | 2172 | 1135 | 12,99 | -5,35 |
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 80 | 2277 | 1135 | 14,38 | -13,27 |
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 70 | 2383 | 1135 | 17,74 | -19,46 |
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 60 | 2069 | 1314 | 19,43 | -17,84 |
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 50 | 2176 | 1314 | 24,57 | -17,94 |
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 40 | 2283 | 1314 | 31,23 | -19,66 |
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 30 | 2390 | 1314 | 42,81 | -11,20 |
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 20 | 2075 | 1494 | 53,85 | -17,62 |
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 10 | 2181 | 1494 | 75,29 | -11,80 |
| C: 0 M: 0 Y: 0 K: 0 | 2287 | 1494 | 80,69 | -11,58 |
| C: 100 M: 0 Y: 0 K: 0 | 2393 | 1494 | 23,11 | 6,39 |
| C: 0 M: 100 Y: 0 K: 0 | 2077 | 1677 | 22,27 | -15,30 |
| C: 0 M: 0 Y: 100 K: 0 | 2184 | 1677 | 58,66 | -27,75 |
| C: 100 M: 0 Y: 100 K: 0 | 2291 | 1677 | 18,65 | -14,94 |

Tab. č. 3: Hodnoty jasů 15 vzorků naměřené digitálním fotoaparátem

V souboru 15_vzorků.xls jsou uloženy tabulky naměřených hodnot jasů pro každou fotografii, která byla vstupem do programu HDR Luminance Analyzer. Hodnota $\delta_{\text{jasoměru}}$ znamená v tabulkách procentuální odchylku měřené hodnoty jasů L od hodnoty $L_{\text{jasoměru}}$ a δ znamená procentuální odchylku měřené hodnoty jasů L od hodnoty L_{ref} .

K měření hodnot H , S a B byl použit skript Měření_HSB.nb.

| C: 0 M: 0 Y: 0 | K: | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
|----------------|----|-----|----|-----|----|-----|-----|
| H (°) | | 330 | 0 | 349 | 5 | 352 | 348 |
| S (%) | | 2 | 4 | 9 | 9 | 6 | 4 |
| B (%) | | 46 | 45 | 49 | 51 | 53 | 44 |

Tab. č. 4: hodnoty H , S a B pro některé černobílé odstíny

2.2 Měření 36 vzorků

Byla sestavena barevná škála o 36 barevných odstínech tak, aby 12 sytých barev bylo co nejvíce rovnoměrně rozloženo podle modelu RGB a ke každé z těchto 12 barev byl vytvořen jeden světlejší odstín a jeden tmavší odstín. Dva papíry formátu A4, na kterých byla vytištěna barevná škála v příloze této práce, byly vedle sebe připevněny na hlavní rozvaděč v laboratoři světelné techniky.

Na rozdíl od měření 15 vzorků byly určeny souřadnice středů čtverečků na barevné škále místo bodů, které se nacházely směrem nalevo od středů barevných čtverečků.

2.2.1 Jasoměrem

Jasoměr byl umístěn ve vzdálenosti $l = 1$ m daleko od středu výtisku. Zorný úhel, kterým byla jasoměrem pozorována měřená ploška, byl $\alpha = 0^\circ 20'$.

| vzorek | $L_{\text{jasoměru}}$ ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) | L_{ref} ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) |
|----------------------|--|---|
| R: 255 G: 0 B: 0 | 26,8 | 27,20 |
| R: 255 G: 128 B: 0 | 42,0 | 42,63 |
| R: 255 G: 255 B: 0 | 86,2 | 87,49 |
| R: 128 G: 255 B: 0 | 32,3 | 32,78 |
| R: 0 G: 255 B: 0 | 26,7 | 27,10 |
| R: 0 G: 255 B: 128 | 21,8 | 22,13 |
| R: 0 G: 255 B: 255 | 30,3 | 30,75 |
| R: 0 G: 128 B: 255 | 17,83 | 18,10 |
| R: 0 G: 0 B: 255 | 14,09 | 14,30 |
| R: 128 G: 0 B: 255 | 9,76 | 9,91 |
| R: 255 G: 0 B: 255 | 26,7 | 27,10 |
| R: 255 G: 0 B: 128 | 23,7 | 24,06 |
| R: 255 G: 128 B: 128 | 48,6 | 49,33 |
| R: 255 G: 192 B: 128 | 61,0 | 61,92 |
| R: 255 G: 255 B: 128 | 81,8 | 83,03 |
| R: 192 G: 255 B: 128 | 54,0 | 54,81 |
| R: 128 G: 255 B: 128 | 33,0 | 33,50 |
| R: 128 G: 255 B: 192 | 31,8 | 32,28 |
| R: 128 G: 255 B: 255 | 41,0 | 41,62 |
| R: 128 G: 192 B: 255 | 35,1 | 35,63 |
| R: 128 G: 128 B: 255 | 37,2 | 37,76 |
| R: 192 G: 128 B: 255 | 32,2 | 32,68 |
| R: 255 G: 128 B: 255 | 45,0 | 45,68 |
| R: 255 G: 128 B: 192 | 45,7 | 46,39 |
| R: 128 G: 0 B: 0 | 14,35 | 14,57 |
| R: 128 G: 64 B: 0 | 14,32 | 14,53 |
| R: 128 G: 128 B: 0 | 32,4 | 32,89 |
| R: 64 G: 128 B: 0 | 15,82 | 16,06 |
| R: 0 G: 128 B: 0 | 12,36 | 12,55 |
| R: 0 G: 128 B: 64 | 10,8 | 10,96 |
| R: 0 G: 128 B: 128 | 18,42 | 18,70 |
| R: 0 G: 64 B: 128 | 10,62 | 10,78 |
| R: 0 G: 0 B: 128 | 8,46 | 8,59 |
| R: 64 G: 0 B: 128 | 6,5 | 6,60 |
| R: 128 G: 0 B: 128 | 12,45 | 12,64 |
| R: 128 G: 0 B: 64 | 10,17 | 10,32 |

Tab. č. 5: Hodnoty jasů 36 vzorků naměřené jasoměrem

2.2.2 Digitálním fotoaparátem

Digitální fotoaparát byl umístěn ve vzdálenosti $l = 1$ m daleko od středu výtisku ve stejném bodě v místnosti, ve kterém byl umístěn jasoměr. K měření byl použit program HDR Luminance Analyzer.

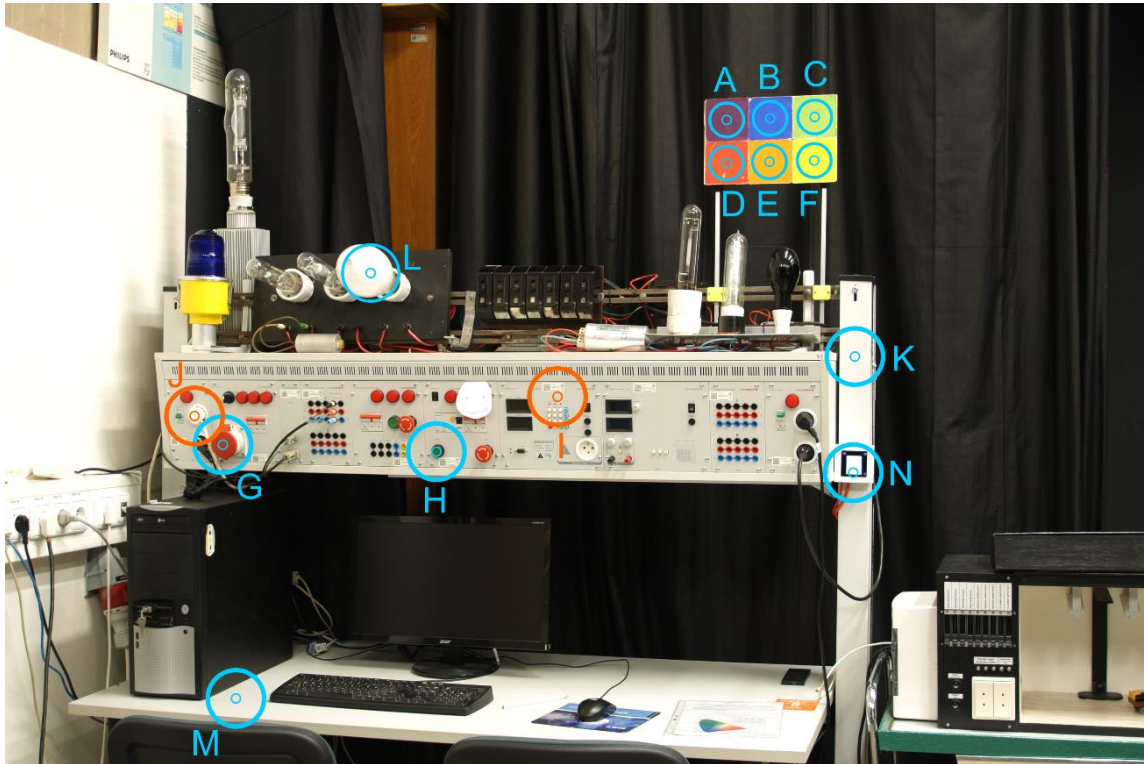
| vzorek | X (px) | Y (px) | L_{50} ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) | δ_{50} (%) |
|----------------------|--------|--------|---|-------------------|
| R: 255 G: 0 B: 0 | 1250 | 963 | 25,04 | -7,97 |
| R: 255 G: 128 B: 0 | 1473 | 963 | 37,60 | -11,81 |
| R: 255 G: 255 B: 0 | 1696 | 963 | 73,61 | -15,87 |
| R: 128 G: 255 B: 0 | 1919 | 963 | 28,24 | -13,86 |
| R: 0 G: 255 B: 0 | 1245 | 1252 | 26,04 | -3,91 |
| R: 0 G: 255 B: 128 | 1469 | 1252 | 22,10 | -0,11 |
| R: 0 G: 255 B: 255 | 1692 | 1252 | 29,14 | -5,26 |
| R: 0 G: 128 B: 255 | 1916 | 1252 | 22,61 | 24,92 |
| R: 0 G: 0 B: 255 | 1242 | 1541 | 17,17 | 20,08 |
| R: 128 G: 0 B: 255 | 1466 | 1541 | 10,16 | 2,59 |
| R: 255 G: 0 B: 255 | 1691 | 1541 | 25,81 | -4,76 |
| R: 255 G: 0 B: 128 | 1915 | 1541 | 25,13 | 4,46 |
| R: 255 G: 128 B: 128 | 1240 | 1829 | 42,58 | -13,69 |
| R: 255 G: 192 B: 128 | 1464 | 1829 | 48,41 | -21,81 |
| R: 255 G: 255 B: 128 | 1689 | 1829 | 71,30 | -14,12 |
| R: 192 G: 255 B: 128 | 1913 | 1829 | 46,716 | -14,77 |
| R: 128 G: 255 B: 128 | 1237 | 2118 | 28,125 | -16,03 |
| R: 128 G: 255 B: 192 | 1462 | 2118 | 28,239 | -12,51 |
| R: 128 G: 255 B: 255 | 1687 | 2118 | 39,197 | -5,81 |
| R: 128 G: 192 B: 255 | 1912 | 2118 | 35,27 | -1,00 |
| R: 128 G: 128 B: 255 | 2429 | 1113 | 36,572 | -3,14 |
| R: 192 G: 128 B: 255 | 2651 | 1113 | 28,618 | -12,44 |
| R: 255 G: 128 B: 255 | 2874 | 1113 | 42,69 | -6,54 |
| R: 255 G: 128 B: 192 | 3096 | 1113 | 41,568 | -10,39 |
| R: 128 G: 0 B: 0 | 2427 | 1400 | 15,09 | 3,60 |
| R: 128 G: 64 B: 0 | 2649 | 1400 | 15,113 | 3,98 |
| R: 128 G: 128 B: 0 | 2871 | 1400 | 26,946 | -18,06 |
| R: 64 G: 128 B: 0 | 3093 | 1400 | 15,736 | -2,00 |
| R: 0 G: 128 B: 0 | 2425 | 1687 | 11,785 | -6,06 |
| R: 0 G: 128 B: 64 | 2647 | 1687 | 10,338 | -5,69 |
| R: 0 G: 128 B: 128 | 2870 | 1687 | 20,826 | 11,39 |
| R: 0 G: 64 B: 128 | 3092 | 1687 | 11,015 | 2,19 |
| R: 0 G: 0 B: 128 | 2424 | 1976 | 9,057 | 5,47 |
| R: 64 G: 0 B: 128 | 2646 | 1976 | 5,764 | -12,63 |
| R: 128 G: 0 B: 128 | 2868 | 1976 | 11,69 | -7,49 |
| R: 128 G: 0 B: 64 | 3090 | 1976 | 10,074 | -2,41 |

Tab. č. 6: Hodnoty jasů 36 vzorků naměřené digitálním fotoaparátem

V souboru 36_vzorků.xls jsou uloženy naměřené hodnoty pro každou fotografii, která byla vstupem do programu HDR Luminance Analyzer včetně naměřených hodnot H , S a B , které byly měřeny v bodě na fotografii, ze které program HDR Luminance Analyzer vybírá výslednou měřenou hodnotu jasu.

2.3 Měření světelné scény

Měření světelné scény bylo provedeno v laboratoři světelné techniky. Na světelné scéně bylo zvoleno 14 měřených bodů označených písmeny A až N, jejichž umístění na světelné scéně je zobrazeno na obr. č. 15.



Obr. č. 15: fotografie světelné scény s vyznačenými měřenými body

2.3.1 Jasoměrem

Jasoměr byl umístěn ve vzdálenosti $l = 3,5$ m daleko od středu světelné scény. Zorný úhel, kterým byla jasoměrem pozorována měřená ploška, byl $\alpha = 0^\circ 6'$. Naměřené hodnoty jasů jsou zpracovány v tab. č. 7. Pro zorný úhel $\alpha = 0^\circ 6'$ není v [19] uveden korekční koeficient. Nejnižší rozlišení jasoměru, pro které je v [19] uveden korekční koeficient, je $\alpha = 0^\circ 20'$. Jako korekční koeficient je použit $k = 1,015$ (-) odpovídající rozlišení jasoměru $\alpha = 0^\circ 20'$.

| měřený bod | $L_{\text{jasoměru}}$ ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) | L_{ref} ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) |
|------------|--|---|
| A | 5,6 | 5,68 |
| B | 7,1 | 7,21 |
| C | 36,8 | 37,35 |
| D | 13,7 | 13,91 |
| E | 35,3 | 35,83 |
| F | 66,4 | 67,40 |
| G | 6,2 | 6,29 |
| H | 6,6 | 6,70 |
| I | 27,4 | 27,81 |
| J | 47,3 | 48,01 |
| K | 45,5 | 46,18 |
| L | 59,1 | 59,99 |
| M | 40,6 | 41,21 |
| N | 97,5 | 98,96 |

Tab. č. 7: Hodnoty jasů světelné scény naměřené jasoměrem

2.3.2 Digitálním fotoaparátem

Digitální fotoaparát byl umístěn ve vzdálenosti $l = 3,5$ m daleko od středu světelné scény ve stejném bodě v místnosti, ve kterém byl umístěn jasoměr. K měření byl použit program HDR Luminance Analyzer. Naměřené hodnoty jasů jsou zpracované v tab. č. 8.

| měřený bod | X (px) | Y (px) | L_{50} ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) | δ_{50} (%) |
|------------|--------|--------|---|-------------------|
| A | 2697 | 441 | 5,16 | -9,24 |
| B | 2861 | 430 | 8,75 | 21,35 |
| C | 3022 | 422 | 27,06 | -27,54 |
| D | 2695 | 591 | 12,33 | -11,32 |
| E | 2858 | 589 | 26,91 | -24,90 |
| F | 3027 | 582 | 47,58 | -29,41 |
| G | 811 | 1643 | 5,57 | -11,43 |
| H | 1608 | 1678 | 5,77 | -13,91 |
| I | 2062 | 1472 | 24,78 | -10,91 |
| J | 709 | 1542 | 38,96 | -18,85 |
| K | 3178 | 1320 | 37,76 | -18,24 |
| L | 1364 | 997 | 50,80 | -15,32 |
| M | 862 | 2598 | 27,32 | -33,71 |
| N | 3174 | 1747 | 157,31 | 58,96 |

Tab. č. 8: Hodnoty jasů světelné scény naměřené digitálním fotoaparátem

V souboru Světelná_scéna.xls jsou uloženy naměřené hodnoty pro každou fotografii, která byla vstupem do programu HDR Luminance Analyzer včetně naměřených hodnot H , S a B , které byly měřeny v bodě na fotografii, ze které program HDR Luminance Analyzer vybírá výslednou měřenou hodnotu jasů.

3 Analýza nejistot a výsledků měření jasu scén jasoměrem a digitálním fotoaparátem

3.1 Obecné poznatky z kapitoly 2

3.1.1 Černobílé odstíny

Nejtmavší černobílé odstíny byly fotoaparátem ze všech měřených černobílých odstínů změřeny nejpřesněji, ale rozsah dob expozic použitých fotografií byl omezen tak, že program HDR Luminance Analyzer měl pro výběr výsledné naměřené hodnoty jasu dvou nejtmavších černobílých odstínů z množiny hodnot jasů pouze jednu hodnotu s hodnotou L_{Lab} blízkou $L_{\text{Lab}} = 25 \%$.

U světlých černobílých odstínů bylo dostatek fotografií pro HDR analýzu k tomu, aby měřená hodnota L_{50} byla jednoznačně určena ve všech případech, když by došlo k rozšíření počtu fotografií s různým rozsahem dob expozic pro HDR analýzu. Obecně vycházejí černobílé odstíny nižší, než je hodnota referenční.

V tabulkách naměřených v souboru 15_vzorků.xls lze pozorovat, že výběrem hodnoty měřeného jasu, která má hodnotu L_{Lab} vyšší než 25 % a zároveň je hodnota L_{Lab} nejnižší možná, se snížila chyba měření v případě těchto měřených černobílých odstínů.

3.1.2 Barevné odstíny

Barevné odstíny jsou nepravidelné v porovnání s černobílými odstíny v tom, že některé barevné odstíny vykazují měřenou hodnotu jasu pomocí programu HDR Luminance Analyzer vyšší, než je referenční hodnota jasu, zatímco měřené černobílé odstíny ukázaly, že hodnoty jasu měřené programem HDR Luminance Analyzer jsou nižší než jejich referenční hodnoty jasu měřené jasoměrem.

Pro barevné odstíny byl použit dostatečný rozsah fotografií pro HDR analýzu pomocí programu HDR Luminance Analyzer. Syté a tmavé odstíny modré vykazují vyšší naměřenou hodnotu jasu, než je referenční hodnota. Někdy vychází vyšší naměřená hodnota jasu u červených odstínů oproti referenční hodnotě. Příčinou může být citlivost fotoaparátu na vlnové délky, které lidské oko nevidí (červené vlnové délky jsou blízké IR záření a modré vlnové délky jsou blízké UV záření).

Světlé barevné odstíny (jejich hodnoty R, G, B jsou všechny nenulové) vycházejí všechny nižší, než je jejich referenční hodnota jasu. To může být způsobeno tím, že je u nich více rovnoměrné zastoupení všech vlnových délek podobně jako u černobílých odstínů, u kterých taky vycházejí hodnoty nižší, než je jejich referenční hodnota jasu.

Program HDR Luminance Analyzer je vhodný s dostatečně velkým rozsahem fotografií pro měření červených, zelených a fialových barev v případě sytých odstínů, pro měření modrých a azurových barev v případě světlých odstínů a pro měření červených, zelených a modrých odstínů v případě tmavých barev. K rozhodnutí, o který měřený barevný odstín jde, je potřeba počítačový program. Nelze jednoznačně říct, že jedna určitá skupina barev bez uvažování světlosti nebo tmavosti je pokaždé vhodná pro měření pomocí programu HDR Luminance Analyzer.

Ke strojovému rozlišení, o jaký měřený odstín jde, navrhuji použít barevný systém HSB. Naměřené barevné odstíny jsou závislé na syté barvě, která je dána souřadnicí H , a rozsahu dob expozic fotografií, které se nacházejí v lineárních částech převodních charakteristik podle obr. č. 9 (ukázáno v kapitole 3.3). Neuvažuji závislost na souřadnici B , protože HDR fotografie výrazně mění hodnoty B na fotografiích s různými dobami expozic, a navíc v intervalu lineární části převodních charakteristik podle obr. č. 9 se interval hodnot B vzhledem ke skutečnému množství jasů na světelné scéně nemění.

3.1.3 Odchytky a korekční funkce

Procentuální odchylka je definována podle vzorce (3.1), kdy hodnota L_m ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) reprezentuje hodnotu jasů různým způsobem měřenou digitálním fotoaparátem a hodnota L_{ref} je referenční hodnota jasů měřená jasoměrem.

$$\delta (\%) = 100 \cdot \frac{L_m - L_{ref}}{L_{ref}} \quad (3.1)$$

Chyba měření je definována podle vzorce (3.2).

$$\varepsilon (\%) = 100 \cdot \frac{|L_m - L_{ref}|}{L_{ref}} \quad (3.2)$$

Korekční funkce δ_k reprezentuje odhadnutou procentuální odchylku. Měřená hodnota jasů různým způsobem digitálním fotoaparátem L_m se koriguje na základě odpovídající procentuální odchylky δ_k . Korigovaný měřený jas digitálním fotoaparátem L_{korig} ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) vzhledem k hodnotě jasů L_m je definován podle vzorce (3.3).

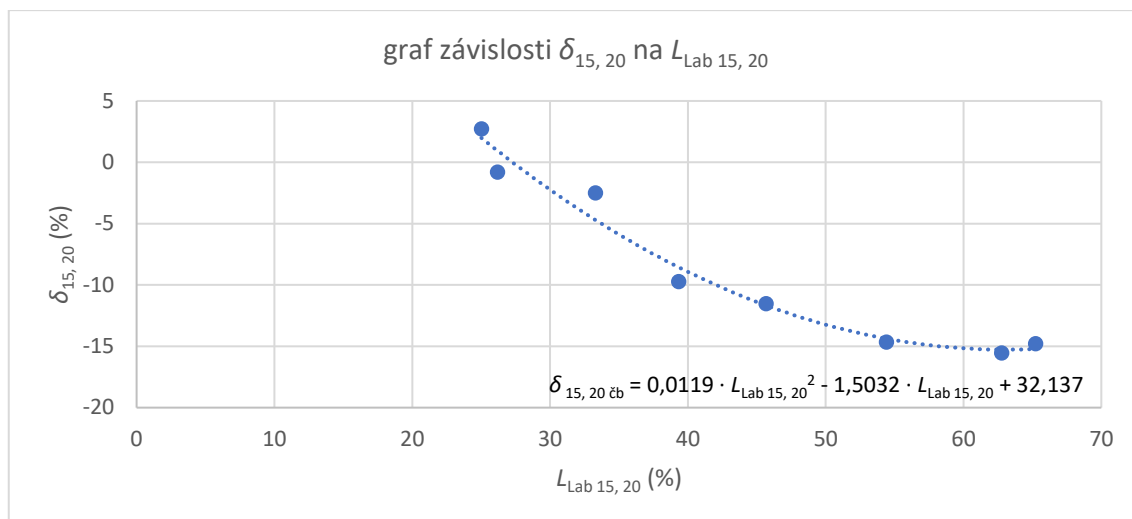
$$L_{korig} (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}) = \frac{L_m}{1 + \frac{\delta_k}{100}} \quad (3.3)$$

Pokud je procentuální odchylka stanovena vzhledem k aritmetickému průměru hodnot L zvolených určitým způsobem, koriguje se měřený jas vzhledem k aritmetickému průměru hodnot L zvolených stejným způsobem.

3.2 Vyhodnocení a analýza výsledků z kapitoly 2.1

Naměřené černobílé odstíny splňují podmínku $S \leq 9,5$ %. Hodnota B je přibližně stejná kvůli tomu, že byla měřena uprostřed lineární části převodních charakteristik podle obr. č. 9, ve které jsou přibližně stejné hodnoty L_{Lab} . Hodnotu H nelze použít pro korekční funkce černobílých odstínů. Hodnota S je pro stanovení korekčních funkcí pro černobílé odstíny nevhodná.

Naměřené hodnoty digitálním fotoaparátem vyšly nižší, než je jejich referenční hodnota, naměřené hodnoty je nutné korigovat. Řešením sestavení korekční funkce pro tyto černobílé odstíny je na svislou osu v obr. č. 16 vynést procentuální odchylku $\delta_{15,20}$ (%), která je vypočítána z aritmetického průměru jasů $L_{jasoměru}$, které ukazují stupnice jasoměru, na dobách expozic $t = 1/15$ s a $t = 1/20$ s, a na vodorovnou osu vynést hodnotu $L_{Lab, 15,20}$ (%), která je aritmetický průměr hodnot L_{Lab} na dobách expozic $t = 1/15$ s a $t = 1/20$ s. Hodnoty, ze kterých je vypočítán aritmetický průměr, se musí nacházet v lineární části převodních charakteristik podle obr. č. 9.



Obr. č. 16: graf závislosti $\delta_{15,20}$ na $L_{\text{Lab } 15,20}$

$\delta_{15,20 \text{ čb}}$ (%) je korekční funkce pro černobílé odstíny vzhledem k aritmetickému průměru jasů L na dobách expozic $t = 1/15$ s a $t = 1/20$ s. Tato korekční funkce byla vytvořena z procentuálních odchylek aritmetického průměru jasů, které ukazuje stupnice jasoměru. Z tohoto důvodu je nutnost vynásobit korigovanou hodnotu měřeného jasů pomocí korekční funkce $\delta_{15,20 \text{ čb}}$ koeficientem $k = 1,015$ (-) a výsledná korigovaná hodnota jasů vynásobená korekčním činitelem $k = 1,015$ (-) je označena jako $L_{15,20 \text{ čb}}$.

3.3 Vyhodnocení a analýza výsledků z kapitoly 2.2

Procentuální odchylky modrých odstínů vyšly nejvyšší vzhledem k ostatním barvám v příslušné skupině sytých, tmavších nebo světlejších odstínů. Naměřené hodnoty jasů v souboru 36_vzorků.xls jsou velmi odlišné na různých dobách expozic a řešením je stanovit korekční funkce vzhledem k aritmetickému průměru hodnot L na nízkých dobách expozic vzhledem k lineární části převodních charakteristik podle obr. č. 9.

Červené odstíny a některé barvy blíží se červené ukázaly, že může nastat situace, kdy se procentuální odchylka jasů L měřeného na jedné fotografii výrazně změní pro hodnoty, jejichž hodnota L_{Lab} je vyšší než cca $L_{\text{Lab}} = 65$ %, ale tato hranice může být vyšší nebo nižší. Skoková změna této procentuální odchylky je v některých případech větší než 25 %. Proto je zvoleno pět hodnot L na nižších dobách expozic tak, aby se nestabilní hodnoty červených odstínů na vyšších dobách expozic do aritmetického průměru hodnot L označeného jako $L_{25,5}$ nezahrnuly.

Hodnota $\delta_{\text{jasoměru}}$ je procentuální odchylka hodnoty L měřené na jedné fotografii vzhledem k hodnotě jasů, kterou ukazuje stupnice jasoměru. Hodnotu měřeného jasů digitálním fotoaparátem, která vznikne aplikací naměřené korekční funkce pro barevné odstíny, je nutné vynásobit korekčním činitelem $k = 1,015$ (-) jako v případě korekční funkce $\delta_{15,20 \text{ čb}}$.

Pro určení hodnot $L_{25,5}$ (aritmetický průměr pěti jasů) a $\delta_{25,5}$ (aritmetický průměr pěti odchylek) je potřeba mít pro daný měřený bod sestavenou tabulku podobnou tab. č. 9, na níž je ukázán vzor určení hodnot $L_{25,5}$ a $\delta_{25,5}$. Hodnoty musí být v tab. č. 9 seřazeny shora od nejdelší doby expozice po nejkratší dobu expozice. Vyhledá se řádek pro co nejnižší dobu expozice takový, ve kterém je hodnota $L_{\text{Lab}} \geq 25$ % a tento řádek se označí jako dolní řádek. Potom se provede aritmetický průměr hodnoty L z dolního řádku s dalšími čtyřmi hodnotami L nad ní v případě určení hodnoty $L_{25,5}$ a provede se aritmetický průměr hodnoty $\delta_{\text{jasoměru}}$ z dolního řádku s dalšími čtyřmi hodnotami nad ní pro určení hodnoty $\delta_{25,5}$. Toto minimalizuje v tabulkách naměřených hodnot v souboru 36_vzorků.xls podíl nestabilních hodnot červených barev, které

se projevují při delších dobách expozic. V tabulce č. 9 lze pozorovat velmi vysoký rozdíl hodnoty $\delta_{\text{jasoměru}}$ na době expozice $t = 1/2$ s.

| R: 128 G: 0 B: 0 | | | |
|---|----------------------|---------------------------|--------------------------------|
| X: | 2427 | Y: | 1400 |
| l [m]: | | 1 | |
| L _{ref} [cd · m ⁻²): | | | 14,35 |
| doba expozice [s] | L _{Lab} [%] | L [cd · m ⁻²] | $\delta_{\text{jasoměru}}$ [%] |
| 1/2 | 69,962 | 10,228 | -28,7 |
| 1/3 | 65,668 | 13,446 | -6,3 |
| 1/4 | 57,871 | 14,114 | -1,6 |
| 1/6 | 48,229 | 15,745 | 9,7 |
| 1/8 | 40,266 | 16,439 | 14,6 |
| 1/10 | 31,786 | 15,838 | 10,4 |
| 1/15 | 24,081 | 18,752 | 30,7 |
| 1/20 | --- | --- | --- |
| HSB pro L _{Lab} > 50 | H [°] | S [%] | B [%] |
| | 10,609 | 75 | 76 |

Tab. č. 9: Volba hodnot L, které se průměrují pomocí aritmetického průměru

Tabulka č. 10 je vytvořena z naměřených hodnot v souboru 36_vzorků.xls. Nadpisy sloupců v tabulce č. 10 jsou ilustrovány barvami, které souvisejí s barvami, které byly na vstupu do tiskárny před měřením barevných odstínů. Hodnota t_{50} (s) je doba expozice fotografie, ze které program HDR Luminance Analyzer vybírá měřenou hodnotu jasu v případě dostatečně velkého rozsahu dob expozic fotografií.

| | barva | | | | | |
|------------------------------------|-------|-------|-----------|-------|---------|--------|
| | modrá | | purpurová | | červená | |
| světlý odstín, $\delta_{25,5}$ (%) | -0,16 | -3,41 | -5,73 | -8,12 | -12,19 | -12,17 |
| H (°) | 242 | 298 | 350 | 7 | 17 | 24 |
| sytý odstín, $\delta_{25,5}$ (%) | 13,83 | 11,22 | 5,10 | 8,58 | 0,51 | -9,53 |
| H (°) | 223 | 285 | 347 | 8 | 11 | 22 |
| tmavý odstín, $\delta_{25,5}$ (%) | 10,59 | 7,35 | 2,59 | 2,18 | 1,14 | 1,66 |
| H (°) | 330 | 355 | 14 | 17 | 10 | 18 |

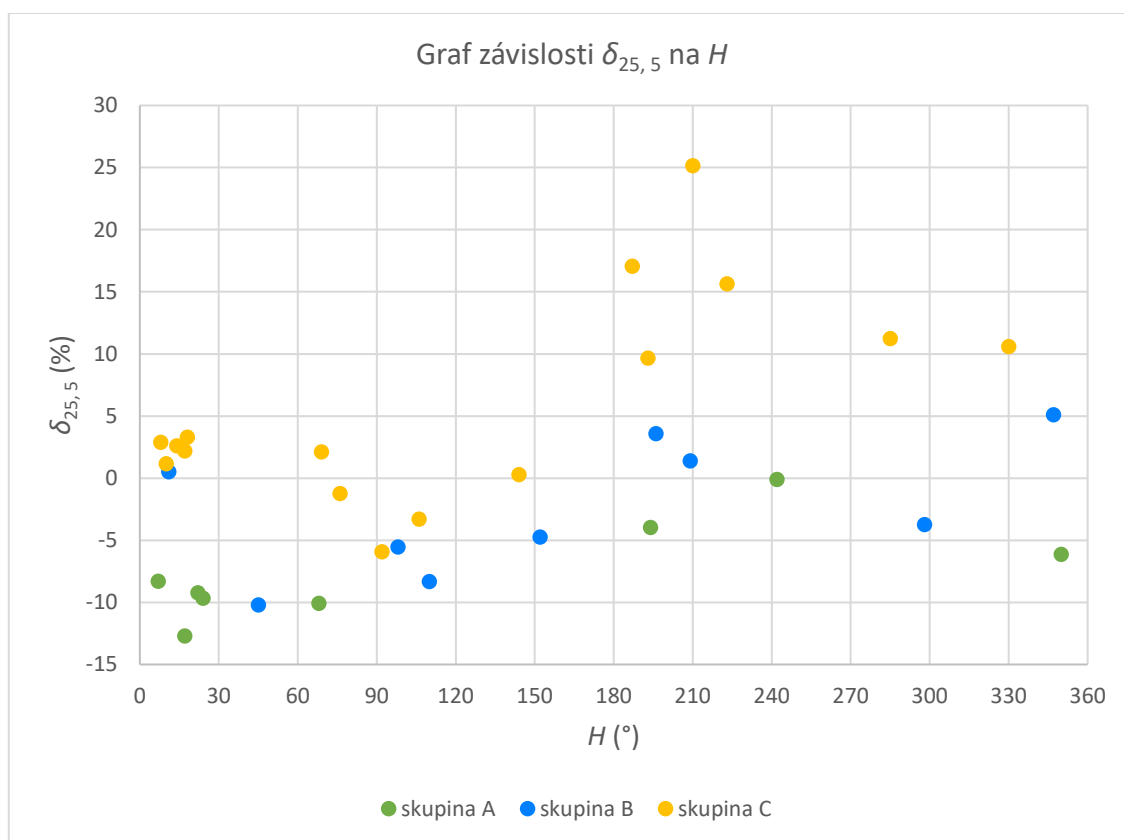
| | barva | | | | | |
|------------------------------------|--------|--------|--------|-------|---------|-------|
| | žlutá | | zelená | | azurová | |
| světlý odstín, $\delta_{25,5}$ (%) | -9,88 | -10,08 | -6,79 | -3,56 | -3,42 | 1,79 |
| H (°) | 48 | 68 | 110 | 152 | 194 | 209 |
| sytý odstín, $\delta_{25,5}$ (%) | -13,07 | -4,64 | -3,31 | -2,45 | 4,63 | 21,37 |
| H (°) | 49 | 98 | 106 | 144 | 196 | 210 |
| tmavý odstín, $\delta_{25,5}$ (%) | -9,27 | -7,41 | 2,10 | -1,26 | 9,64 | 17,05 |
| H (°) | 45 | 92 | 69 | 76 | 193 | 187 |

Tab. č. 10: Hodnoty H a $\delta_{25,5}$ pro barevné odstíny

| t_{50} (s) |
|--------------|
| 1/20 |
| 1/15 |
| 1/10 |
| 1/8 |
| 1/6 |
| 1/4 |
| 1/3 |

Legenda k tab. č. 10, ve které hodnoty ve tvaru zlomku znamenají hodnotu t_{50}

Graficky je v obr. č. 17 znázorněna závislost hodnoty $\delta_{25,5}$ na hodnotě H z tabulky č. 10.



Obr. č. 17: graf závislosti $\delta_{25,5}$ na H

Skupina A v obr. č. 17 jsou hodnoty, jejichž hodnota t_{50} je $t_{50} = 1/20$ s nebo $t_{50} = 1/15$ s. Skupina B v obr. č. 17 jsou hodnoty, jejichž hodnota t_{50} je $t_{50} = 1/10$ s. Skupina C v obr. č. 17 jsou hodnoty, jejichž hodnota t_{50} je větší nebo rovna $t_{50} = 1/8$ s a menší nebo rovna $t_{50} = 1/3$ s.

Z obr. č. 17 je zřejmé, že korekční funkce jsou v případě barevných odstínů závislé na hodnotě t_{50} . Roztříděním hodnot $\delta_{25,5}$ podle hodnoty t_{50} vznikají v případě intervalu hodnot t_{50} od 1/20 s do 1/3 s tři skupiny.

Korekční funkce $\delta_{15,20 \text{ bar}}$ vznikne spojením sousedních bodů skupiny A v obr. č. 17 přímkami. Korekční funkce $\delta_{10 \text{ bar}}$ vznikne spojením sousedních bodů skupiny B v obr. č. 17 přímkami. Korekční funkce $\delta_{3,4,6,8 \text{ bar}}$ vznikne spojením sousedních bodů skupiny C v obr. č. 17 přímkami. Program Rovnice_přímky.nb vypočítá předpis spojnice mezi dvěma body. Tyto

korekční funkce se aplikují na hodnotu $L_{25,5}$ a korigovaný jas je nutné vynásobit korekčním činitelem $k = 1,015$ (-).

Nejnižší hodnota S byla naměřena pro 36 barevných vzorků 7 %, ale druhá nejnížší hodnota S byla naměřena 21 %. Maximální hodnota S byla naměřena 84 %.

3.4 Vyhodnocení a analýza výsledků z kapitoly 2.3

Bod B a bod N, které mají společné silné ovlivnění modrými vlnovými délkami, mají kladnou procentuální odchylku, která je vysoká. Bod N je display, který září modrou barvou. Ostatní měřené body vyšly se zápornou procentuální odchylkou, což je v případě měření černobílých odstínů stejné jako v analýze v kapitole 2.1. Bod B má podobnou procentuální odchylku jako vzorek syté modré barvy. Z barevných bodů A až H včetně N na světelné scéně byly naměřeny nejlépe body G a H, které mají nejnížší hodnotu t_{50} a bod D, který je červený.

Aplikací korekčních funkcí z kapitol 2.2 a 2.3 se ověří, jestli lze předvídat odchylky měřených bodů na světelné scéně. Ověření se provede u barevných bodů, jejichž hodnoty t_{50} odpovídají hodnotám t_{50} , ze kterých jsou sestaveny korekční funkce v kapitole 2.3. V případě černobílých bodů se ověří korekční funkce popsaná v kapitole 2.2 u všech bodů.

| bod | $\delta_{15,20\text{čb}}$ (%) | $\delta_{15,20\text{bar}}$ (%) | $\delta_{10\text{bar}}$ (%) | $\delta_{3,4,6,8\text{bar}}$ (%) | $L_{15,20\text{čb}}$ ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) | $L_{15,20\text{bar}}$ ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) | $L_{10\text{bar}}$ ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) | $L_{3,4,6,8\text{bar}}$ ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) |
|-----|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|---|--|---|--|
| B | --- | --- | --- | 15,55 | --- | --- | --- | 8,16 |
| C | --- | --- | -6,21 | --- | --- | --- | 31,82 | --- |
| D | --- | --- | --- | 1,50 | --- | --- | --- | 13,73 |
| E | --- | --- | -2,94 | --- | --- | --- | 29,35 | --- |
| F | --- | -11,13 | --- | --- | --- | 58,51 | --- | --- |
| I | -2,11 | --- | --- | --- | 26,78 | --- | --- | --- |
| J | -10,33 | --- | --- | --- | 43,33 | --- | --- | --- |
| K | -9,82 | --- | --- | --- | 41,78 | --- | --- | --- |
| L | -13,99 | --- | --- | --- | 61,17 | --- | --- | --- |
| M | -5,90 | --- | --- | --- | 32,65 | --- | --- | --- |

| bod | $\epsilon_{15,20\text{čb}}$ (%) | $\epsilon_{15,20\text{bar}}$ (%) | $\epsilon_{10\text{bar}}$ (%) | $\epsilon_{3,4,6,8\text{bar}}$ (%) |
|-----|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| B | --- | --- | --- | 13,18 |
| C | --- | --- | 14,81 | --- |
| D | --- | --- | --- | 1,25 |
| E | --- | --- | 18,08 | --- |
| F | --- | 13,18 | --- | --- |
| I | 3,71 | --- | --- | --- |
| J | 9,74 | --- | --- | --- |
| K | 9,53 | --- | --- | --- |
| L | 1,98 | --- | --- | --- |
| M | 20,76 | --- | --- | --- |

Tab. č. 11: aplikace korekčních funkcí na světelné scéně

Hodnota δ s příslušným dolním indexem je v tab. č. 11 korekční funkce reprezentující očekávanou procentuální odchylku, na základě které se koriguje měřená hodnota příslušného aritmetického průměru jasů. Hodnota ε s příslušným dolním indexem je chyba měření jasu pomocí aplikace příslušné korekční funkce δ .

Body I až M, které jsou lidským okem viditelné jako černobílé, nesplňují podmínku $S \leq 9,5 \%$. Korekční funkce pro černobílé odstíny $\delta_{15, 20 \text{ čb}}$ zvýšila naměřené jasy vzhledem k jasům měřených programem HDR Luminance Analyzer v případě HDR analýzy. Kromě bodu L jsou naměřené jasy $L_{15, 20 \text{ čb}}$ černobílých bodů pomocí korekční funkce $\delta_{15, 20 \text{ čb}}$ nižší, než je odpovídající referenční jas, čímž došlo ke snížení chyby měření. V případě bodu L se snížila chyba měření z 15,32 % na 1,98 %.

U bodů C až F, které lidské oko vnímá jako barevné, korekční funkce $\delta_{15, 20 \text{ bar}}$, $\delta_{10 \text{ bar}}$ a $\delta_{3, 4, 6, 8 \text{ bar}}$ zvýšily naměřené jasy vzhledem k jasům měřených programem HDR Luminance Analyzer v případě HDR analýzy. Naměřené jasy $L_{15, 20 \text{ bar}}$, $L_{10 \text{ bar}}$ a $L_{3, 4, 6, 8 \text{ bar}}$ pomocí korekčních funkcí $\delta_{15, 20 \text{ bar}}$, $\delta_{10 \text{ bar}}$ a $\delta_{3, 4, 6, 8 \text{ bar}}$ jsou nižší než odpovídající referenční jasy, čímž se snížila chyba měření. U bodu B snížila korekční funkce $\delta_{3, 4, 6, 8 \text{ bar}}$ chybu měření z 21,35 % na 13,18 %.

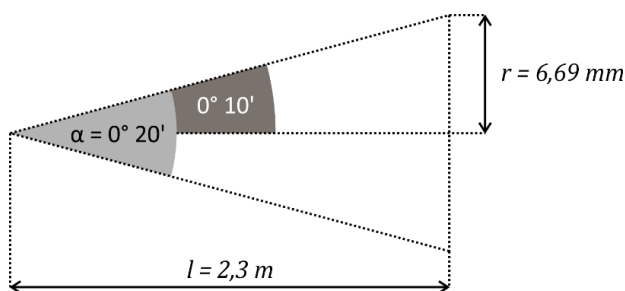
Bod M má v porovnání s body I až L výrazně jinou procentuální odchylku hodnoty L_{50} od referenční hodnoty jasu, která je velice nízká. Jeho chyba měření hodnoty $L_{15, 20 \text{ čb}}$ je v případě použití korekční funkce $\delta_{15, 20 \text{ čb}}$ taky vysoká. Příčina mohla být v tom, že se paprsky od stolu odrážely určitým směrem a jasoměr zaznamenal jas v bodě M jiný než digitální fotoaparát, jehož umístění v prostoru vzhledem ke světelné scéně mohlo být odlišné.

Na světelné scéně lze do určité míry předvídat procentuální odchylky způsobené měřením černobílým nebo barevným odstínem, z čehož plyne, že barva ovlivňuje naměřené hodnoty a jde o systematické chyby.

3.5 Softwarová realizace měření jasů digitálním fotoaparátem

Veškerá měření, ze kterých jsou vytvořeny korekční funkce, a výpočty korekčních funkcí byly provedeny znovu, aby bylo možné kalibrovat skript měření_jasu.nb v programu Wolfram Mathematica. Místo měření jednoho bodu na fotografii, ze kterého se extrahuje hodnota L_{Lab} a L pomocí programu HDR Luminance Analyzer, byly všechny hodnoty L_{Lab} , L , H , S a B , ze kterých jsou sestaveny korekční funkce, měřeny jako aritmetický průměr hodnot v oblasti na fotografii, která tvoří kruh a jejímž středem je příslušný bod pro každý měřený vzorek v kapitolách 2.2 a 2.3. Naměřené hodnoty L_{Lab} , L , H , S a B jsou zpracované v souborech 15_vzorků_wolfram.xls a 36_vzorků_wolfram.xls.

Ze vzdálenosti měřidla od středu výtisku a úhlem, pod kterým se jasoměrem pozorovala měřená ploška (zorným úhlem) 15 vzorků, lze vypočítat poloměr měřené plošky r .



Obr. č. 18: Náčrtek poloměru r plošky jasoměru pro 15 vzorků

Na základě definice goniometrické funkce tangens na pravoúhlém trojúhelníku lze vypočítat poloměr plošky r podle vzorce (3.5) odvozeného ze vzorce (3.4) [20].

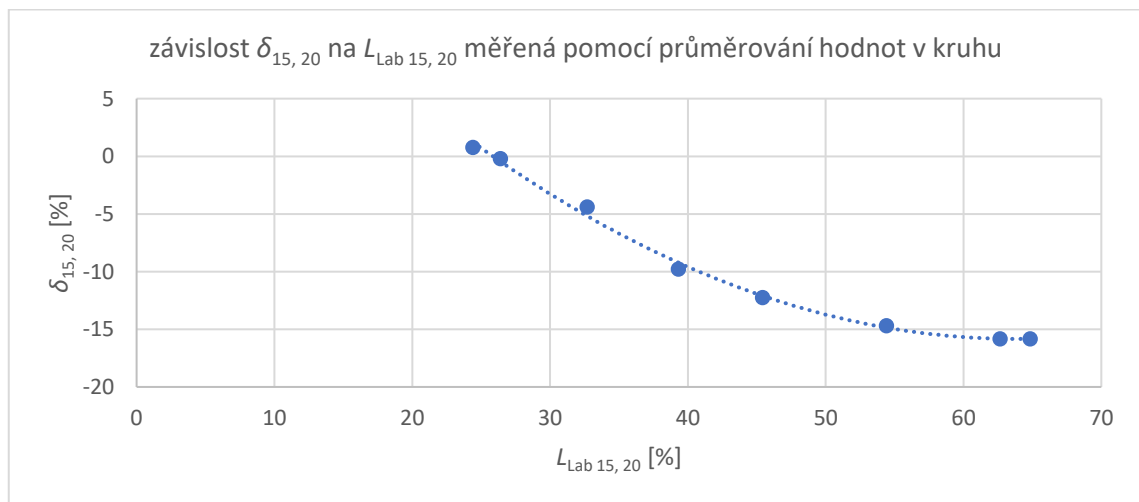
$$\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{r}{l} \quad (3.4)$$

$$r = l \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 2,3 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{0^\circ 20'}{2}\right) = 0,00669 \text{ m} = 6,69 \text{ mm} \quad (3.5)$$

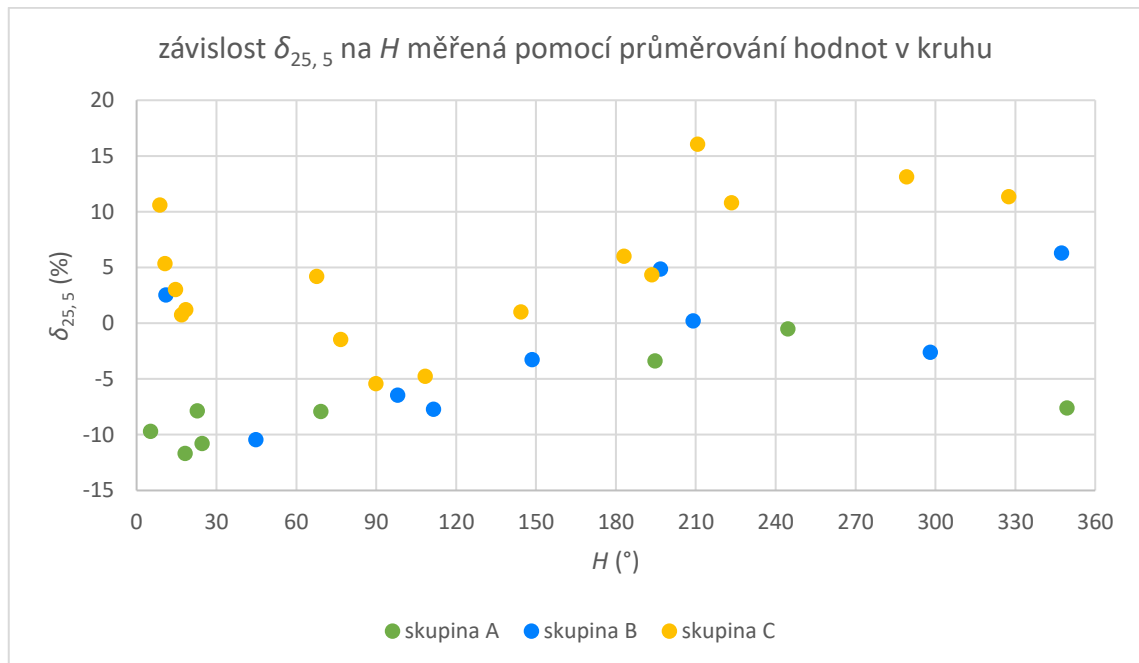
Poloměr 18 pixelů pro 15 vzorků je určen přepočtem hodnoty $r = 6,69 \text{ mm}$ do souřadnic pixelů na fotografii. 4 cm (hrana čtverce vzorku) na fotografii odpovídají rozdílu souřadnic pixelů 2283 a 2176, který je 107 pixelů.

$$r_{\text{pixel}} = \frac{107 \text{ pixelů}}{40 \text{ mm}} \cdot 6,69 \text{ mm} \approx 17,9 \text{ pixelů} \quad (3.6)$$

Stejným způsobem jako v případě určení poloměru pro 15 vzorků je určen poloměr pro 36 vzorků jako hodnota 16 pixelů.

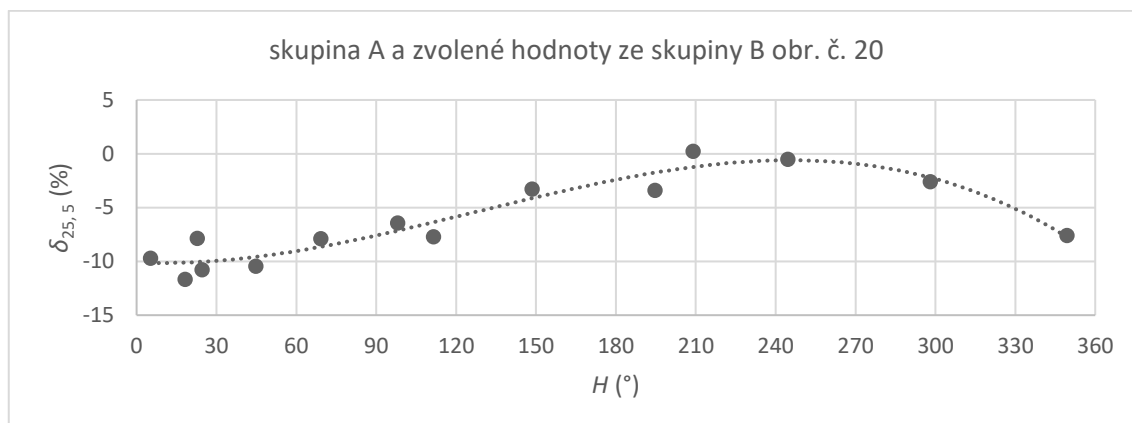


Obr. č. 19: graf závislosti $\delta_{15,20}$ na $L_{\text{Lab } 15,20}$ měřené pomocí průměrování hodnot v kruhu o poloměru 18 pixelů



Obr. č. 20: graf závislosti $\delta_{25,5}$ na H měřené pomocí průměrování hodnot v kruhu o poloměru 16 pixelů

Korekční funkce $\delta_{15, 20 \text{ bar}}$ je v případě programu Měření_jasu.nb realizována jako proložení hodnot v obr. č. 21 polynomem 3. stupně.



Obr. č. 21: skupina A a zvolené hodnoty ze skupiny B obr. č. 20 závislosti $\delta_{25,5}$ na H

Program Měření_jasu.nb funguje tak, že nejprve naměří aritmetický průměr hodnot L v kruhu na každé fotografii, naměří aritmetický průměr hodnot L_{Lab} v kruhu na každé fotografii a pro každou dobu expozice tímto vzniká jedna průměrná hodnota jako v případě využití HDR fotografie popsaném v diplomové práci [1] pro různé doby expozic fotografií. Hodnoty H , S a B se měří v kruhu na jedné fotografii, která splňuje t_{50} . V případě volby poloměru kruhu na fotografii v pixelech rovnému nule měří program pouze jeden bod na každé fotografii.

Program Měření_jasu.nb je rozšířen o způsoby měření založené na aritmetickém průměru jasů na různých dobách expozic bez použití korekčních funkcí. L_{501} je aritmetický průměr jasů L na době expozice t_{50} , na nejdelší době expozice takové, která je kratší než doba expozice t_{50} , a na nejkratší době expozice takové, která je delší než doba expozice t_{50} .

L_{502} je aritmetický průměr jasů L na době expozice t_{50} , na nejdelší době expozice označené jako t_{50a} takové, která je kratší než doba expozice t_{50} , na nejdelší době expozice takové, která je kratší než doba expozice t_{50a} , na nejkratší době expozice označené jako t_{50b} takové, která je delší než doba expozice t_{50} a na nejkratší době expozice takové, která je delší než doba expozice t_{50b} .

L_{25} je hodnota L , která má hodnotu L_{Lab} co nejnižší, ale zároveň větší nebo rovnu hodnotě $L_{\text{Lab}} = 25\%$ v množině fotografií o dostatečném rozsahu různých dob expozic.

Hodnota L_{50} je měřena v případě programu Měření_jasu.nb stejným způsobem jako způsobem popsaným v diplomové práci [1], ale vybírá se vhodná hodnota z množiny hodnot, které jsou aritmetickými průměry hodnot v kruzích na fotografiích.

Všechny hodnoty ϵ , které jsou výstupem programu Měření_jasu.nb, jsou s příslušnými indexy chyby měření v relativním tvaru hodnot jasů měřených digitálním fotoaparátem. Za účelem výpočtu chyb měření je nutné do programu zadat hodnotu L_{ref} měřenou jasoměrem.

Program Měření_jasu.nb je naprogramován tak, aby aplikoval korekční funkci pro černobílé odstíny $\delta_{15, 20 \text{ čb}}$ a hodnotu L_{25} pro $S \leq 20,5\%$ a korekční funkce pro barevné odstíny $\delta_{15, 20 \text{ bar}}$, $\delta_{10 \text{ bar}}$ a $\delta_{3, 4, 6, 8 \text{ bar}}$ pro $S \geq 9,5\%$ (hodnota S se posuzuje na fotografii s t_{50}). Korekční funkce $\delta_{3, 4, 6, 8 \text{ bar}}$ je aplikována pro rozsah hodnot t_{50} od $t_{50} = 1/2$ s do $t_{50} = 1/8$ s. Korekční funkce $\delta_{15, 20 \text{ bar}}$ a $\delta_{10 \text{ bar}}$ jsou aplikovány pro hodnoty t_{50} , ze kterých byly sestaveny.

Funkce ConstantArray generuje nulovou matici. Funkce MatrixForm umožňuje zobrazit matici v přehledném tvaru [21]. Informace o možnostech použití jednotlivých funkcí v programu Wolfram Mathematica jsou poskytnuty v nápovědě tohoto programu a tato nápověda byla ke hledání těchto informací využita.

V tab. č. 12 jsou chyby měření jednotlivých metod vypočítané programem Měření_jasu.nb v bodech na světelné scéně. Jako poloměr byla použita hodnota 6 pixelů.

| | L_{ref} (cd · m ⁻²) | $\epsilon_{15, 20 \text{ čb}}$ (%) | $\epsilon_{15, 20 \text{ bar}}$ (%) | $\epsilon_{10 \text{ bar}}$ (%) |
|-------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|------------------------------------|
| bod A | 5,68 | --- | --- | --- |
| bod B | 7,21 | --- | --- | --- |
| bod C | 37,35 | --- | --- | 13,19 |
| bod D | 13,91 | --- | --- | --- |
| bod E | 35,83 | --- | --- | 13,85 |
| bod F | 67,40 | --- | 13,59 | --- |
| bod G | 6,29 | --- | --- | --- |
| bod H | 6,70 | --- | --- | --- |
| bod I | 27,81 | 2,81 | --- | --- |
| bod J | 48,01 | --- | 10,84 | --- |
| bod K | 46,18 | 9,42 | 8,66 | --- |
| bod L | 59,99 | 2,06 | 1,26 | --- |
| bod M | 41,21 | 21,32 | --- | 18,72 |
| bod N | 98,96 | --- | --- | --- |

| | $\epsilon_{3, 4, 6, 8 \text{ bar}}$ (%) | ϵ_{25} (%) | ϵ_{501} (%) | ϵ_{502} (%) | ϵ_{50} (%) |
|-------|--|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| bod A | 14,43 | --- | 5,86 | 6,20 | 9,57 |
| bod B | 7,66 | --- | 15,07 | 17,53 | 18,55 |
| bod C | --- | --- | 22,80 | 21,08 | 27,59 |
| bod D | 6,98 | --- | 1,47 | 0,13 | 4,99 |
| bod E | --- | --- | 18,63 | 17,06 | 23,81 |
| bod F | --- | --- | 24,72 | 22,89 | 28,08 |
| bod G | 1,36 | --- | 5,23 | 6,21 | 9,30 |
| bod H | 5,81 | --- | 10,92 | 11,40 | 14,14 |
| bod I | 10,80 | 6,18 | 11,23 | 11,05 | 9,95 |
| bod J | --- | --- | 23,69 | 20,56 | 21,06 |
| bod K | --- | 9,26 | 21,79 | 18,49 | 19,06 |
| bod L | --- | 4,47 | 11,60 | 9,86 | 15,75 |
| bod M | --- | 27,40 | 29,60 | 28,03 | 33,98 |
| bod N | --- | --- | 63,86 | 64,79 | 56,26 |

Tab. č. 12: výsledky měření světelné scény pomocí programu Měření_jasu.nb

Pomocí měření programem Měření_jasu.nb se podařilo snížit chybu měření u bodů C, E, I, K a v případě bodů D, F, L, M nebyla chyba měření snížena vzhledem k chybám měření v tab. č. 11.

Průměrování hodnot jasů na různých dobách expozic bez použití korekčních funkcí je vhodný způsob pro měření červených a fialových odstínů v bodech A, D a G.

Aritmetický průměr hodnot $\varepsilon_{15, 20 \text{ bar}}$ společně s hodnotami $\varepsilon_{10 \text{ bar}}$ a $\varepsilon_{3, 4, 6, 8 \text{ bar}}$ vyšel v tabulce č. 12 bez uvažování bodu N jako hodnota 9,8 %. Aritmetický průměr hodnot ε_{50} v tabulce č. 12 bez uvažování bodu N jako hodnota 18,1 %. Aritmetický průměr hodnot δ_{50} v absolutních hodnotách vyšel v případě měření programem HDR Luminance Analyzer v tabulce č. 8 bez uvažování bodu N jako hodnota 18,93 %. Použití korekčních funkcí pro barevné odstíny se jeví skoro 2x přesnější než způsob měření jasu popsany v [1].

Chyba měření ε_{25} a $\varepsilon_{15, 20 \text{ čb}}$ je ve všech případech nižší než chyba měření ε_{50} .

3.6 Výpočet nejistot měření jasoměrem

K analýze nejistot způsobených jasoměrem je použit dokument od výrobce [22] a dokument o kalibraci [19]. Chyba způsobená nelinearitou stupnice jasoměru je podle [22] $0,15 \% \pm 1 \text{ digit}$, z níž se vypočítá relativní nejistota u_{BE} způsobená odečítáním ze stupnice jasoměru podle vzorce (3.7) odvozeného z (1.20). Na zbývající dílčí chyby uvedené v [22] je kromě dílčí chyby způsobené vlivem teploty aplikováno rovnoměrné rozdělení a nejistoty jsou sečteny podle Gaussova principu podle vzorce (3.8) odvozeného ze vzorce (1.18), čímž se vypočítá nejistota u_{BJ} způsobená všemi chybami uváděnými výrobcem kromě chyby způsobené nelinearitou stupnice a vlivem teploty. Chyba teploty není uvažována, protože byl dodržen teplotní rozsah stanovený výrobcem. Rozšířená nejistota typu B pro $k_U = 2$ (-) způsobená kalibrací jasoměru je podle [19] 2,1 %. Potom je standardní nejistota u_{BJk} typu B způsobená kalibrací jasoměru poloviční podle vzorce (3.9).

$$u_{BE}(\%) = \frac{\delta_1}{100 + \frac{N \cdot R}{X}} \cdot 100 = \frac{0,15 + \frac{1 \cdot R}{X}}{\sqrt{3}} \cdot 100 \quad (3.7)$$

$$u_{BJ}(\%) = \sqrt{\left(\frac{2,5}{\sqrt{3}}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{0,1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,5}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,6}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,4}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,15}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (3.8)$$

$$u_{BJk}(\%) = \frac{2,1}{2} = 1,05 \% \quad (3.9)$$

Metodickou chybu jasoměru způsobenou směrovostí, nestabilitou použitých zařízení atd. lze podle [23] uvažovat 5 %, kdy aplikací rovnoměrného rozdělení se vypočítá nejistota $u_{BmJ} = 2,89 \%$ způsobená směřováním zorného pole jasoměru do požadovaného bodu a vlivem nestability použitých zařízení [23].

Výsledná nejistota $U_{\text{jasoměru}}$ jasoměru s koeficientem rozšíření $k_U = 2$ (-) je dána kombinací dílčích nejistot u_{BE} , u_{BJ} , u_{BJk} , a u_{BmJ} Gaussovým principem podle vzorce (3.10). Hodnota jasu, která má nejvyšší poměr mezi hodnotou R a X , je tmavě zeleno azurová barva z 36 měřených vzorků, jejíž hodnota X je $10,8 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ a hodnota R je $0,1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$.

$$U_{\text{jasoměru}}(\%) = 2 \cdot \sqrt{u_{BE}^2 + u_{BJ}^2 + u_{BJk}^2 + u_{BmJ}^2} \approx 7,4 \% \quad (3.10)$$

3.7 Výpočet nejistot měření digitálním fotoaparátem

Relativní dílčí nejistota u_{Bk} typu B vlivem konečných rozměrů měřeného bodu se vypočítá podle vzorce (3.11) odvozeného ze vzorce (1.21). r_0 je rovno nejmenší vzdálenosti l snížené o absolutní odhad chyby měření hodnoty l , která reprezentuje vzdálenost měřidla od středu

světelné scény 36 vzorků na fotografii (snížením dosažené hodnoty l se zvyšuje nejistota u_{BK}). Uvažuji nepřesnost měření vzdálenosti l v případě 36 vzorků 5 cm. Potom je hodnota l rovna 0,95 m. Vzorky, které jsou nejvzdálenější od středu světelné scény, mají vzdálenost mezi digitálním fotoaparátem a měřeným bodem vyšší, než je vzdálenost l , což ovlivňuje nejistotu u_{BK} jejím snižováním.

Snímací prvek v použitém fotoaparátu Fujifilm FinePix S2 Pro má rozměry 23 x 15,5 mm. Poloměr světlocitlivého povrchu fotočlánku uvažuji polovinu úhlopříčky jednoho bodu ve tvaru čtverce na fotočlánku, který reprezentuje jeden pixel na fotografii. Použitý fotoaparát pořizuje fotografie o rozlišení 4256 x 2848 pixelů. Vydělením šířky snímacího prvku šířkou fotografie v pixelech vyjde přibližně číslo $5,41 \cdot 10^{-6}$ m ($0,023 / 4256 \approx 5,41 \cdot 10^{-6}$ m). Vydělením výšky snímacího prvku výškou fotografie v pixelech vyjde přibližně číslo $5,45 \cdot 10^{-6}$ m ($0,0155 / 2848 \approx 5,45 \cdot 10^{-6}$ m). K výpočtu úhlopříčky jednoho pixelu použiji číslo $5,45 \cdot 10^{-6}$ m, které je nepatrně vyšší než číslo vypočítané z šířky snímacího prvku, a to vynásobím $\sqrt{2}$. Potom je poloměr světlocitlivého povrchu fotočlánku $3,86 \cdot 10^{-6}$ m ($5,45 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{2} / 2 \approx 3,86 \cdot 10^{-6}$ m).

Nejmenší možné ohniskové vzdálenosti použitého fotoaparátu odpovídá podle [7] vertikální úhel $31,9^\circ$ [7]. Předpokládám, že měřené body na světelné scéně, kde každý měřený bod odpovídá jednomu pixelu na fotografii, jsou rovnoměrně rozloženy. Pro vertikální úhel $31,9^\circ$ je vzdálenost mezi středem fotografie a středem pravého nebo levého okraje strany fotografie $\text{tg}(31,9^\circ) \cdot l$. Tato vzdálenost se vydělí polovinou výšky fotografie v pixelech a vypočítá se strana čtverce reprezentujícího na světelné scéně jeden pixel. Ze strany čtverce se dopočítá polovina jeho úhlopříčky, která reprezentuje charakteristický rozměr a měřeného bodu na světelné scéně, vynásobením hodnotou $\sqrt{2} / 2$.

$$u_{BK}(\%) = \frac{\left| 1 - \left(\frac{0,95}{\sqrt{0,95^2 + \left(\frac{\text{tg}(31,9^\circ) \cdot 0,95}{\frac{2848}{2}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + 3,86 \cdot 10^{-6} \right)^2}} \right)^3 \right|}{\sqrt{3}} \cdot 100$$

$$u_{BK}(\%) \approx 1,7 \cdot 10^{-3} \% \quad (3.11)$$

Metodickou chybu digitálního fotoaparátu způsobenou nestabilitou použitých zařízení, zaokrouhlováním atd. lze podle [23] uvažovat 2,5 %, kdy aplikací rovnoměrného rozdělení se vypočítá dílčí nejistota $u_{BmDF} = 1,44\%$ způsobená nestabilitou použitých zařízení a volbou hodnot na digitální fotografii k měření jasu, která je na rozdíl od nejistoty u_{BmJ} nižší, protože extrakce hodnot z digitálního fotoaparátu je ovlivněna směrovostí méně než u jasoměru [23].

Dílčí nejistota u_{BCH} způsobená maximální chybou, která byla digitálním fotoaparátem pomocí programu HDR Luminance Analyzer naměřena, je vypočítaná podle vzorce (3.12). Maximální chyba byla dosažena v případě bodu M na světelné scéně v tab. č. 8 při měření HDR fotografie programem HDR Luminance Analyzer 33,71 %.

$$u_{BCH}(\%) = \frac{33,71}{\sqrt{3}} \approx 19,5 \% \quad (3.12)$$

Výsledná nejistota U_{DF} digitálního fotoaparátu s koeficientem rozšíření $k_U = 2$ (-) pro použití programu HDR Luminance Analyzer s využitím HDR fotografie je dána kombinací dílčích nejistot u_{Bk} , u_{BmDF} , u_{BCH} Gaussovým principem podle vzorce (3.13).

$$U_{DF} (\%) = 2 \cdot \sqrt{u_{Bk}^2 + u_{BmDF}^2 + u_{BCH}^2} \approx 39,1 \% \quad (3.13)$$

V případě, že se použije pro měření jasu světelné scény digitálním fotoaparátem program Měření_jasu.nb, který obsahuje korekční funkce, sníží se maximální chyba na 21,32 % u bodu M v případě, že uživatel bude považovat za výslednou naměřenou hodnotu jasu kteroukoliv hodnotu jasu měřenou pomocí korekčních funkcí $\delta_{15, 20 \text{ čb}}$, $\delta_{15, 20 \text{ bar}}$, $\delta_{10 \text{ bar}}$ a $\delta_{3, 4, 6, 8 \text{ bar}}$. Potom je výsledná nejistota měření digitálním fotoaparátem s koeficientem rozšíření $k_U = 2$ (-) v případě použití programu Měření_jasu.nb 24,8 %.

Závěr

Způsob výběru nejvhodnější hodnoty jasů L z množiny naměřených hodnot pomocí metodiky popsané v diplomové práci [1], není vhodné řešení pro černobílé odstíny s hodnotou S nižší než 9 %, která je měřena v bodě na fotografii, ze které je programem HDR Luminance Analyzer vybrána naměřená hodnota jasů. Řešením měření černobílých odstínů s nízkou hodnotou S je korekční funkce popsaná v obr. č. 16, která je tvořena částí paraboly.

Původní metodiku popsanou v diplomové práci [1], kdy naměřené hodnoty jasů nejsou závislé na barevných odstínech, je potřeba v případě přesnějších měření nahradit postupem, který respektuje závislost naměřených hodnot jasů na barevných odstínech.

Naměřené hodnoty jasů barevných odstínů jsou závislé na syté barvě (souřadnice H z barevného systému HSB) a na dobách expozic série fotografií, ve kterých lze uvažovat lineární části převodních charakteristik podle obr. č. 9 přejatých z diplomové práce [7]. Lze předpokládat závislost hodnot barevných odstínů na množství barvy (souřadnice S z barevného systému HSB) vzhledem k existenci barevného přechodu mezi černobílými a barevnými odstíny.

Nejistota měření jasoměrem vyšla 7,4 % s koeficientem rozšíření $k_U = 2$ (-). Nejistota měření jasů digitálním fotoaparátem v případě použití programu HDR Luminance Analyzer s využitím HDR fotografie vyšla 39,1 % s koeficientem rozšíření $k_U = 2$ (-). Nejistota měření jasů digitálním fotoaparátem v případě použití programu Měření_jasu.nb, který aplikuje naměřené korekční funkce, vyšla 24,8 %.

Mezi hlavní přínosy této práce patří poznatky získané pro měření černobílých i barevných odstínů, které pro určitou skupinu naměřených hodnot ve většině případů snižují chybu měření. Měření jasů digitálním fotoaparátem je ovlivněno systematickými chybami, které je potřeba korigovat.

Seznam použité literatury

- [1] NEPIL, Lubomír. *Vytvoření aplikace pro analýzu jasů HDR fotografií*. Praha, 2018. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky.
- [2] HABEL, Jiří, et al. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN: 978-80-86534-21-3.
- [3] BÁLSKÝ, Marek. *Fotometrie* [výukový materiál k předmětu B1B15EN3]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/A1B15EN3/EN3_2_fotometrie.ppt
- [4] *What is Galvanometer?* [online]. Circuit globe [vid. 25. 2. 2020]. Dostupné z: <https://circuitglobe.com/galvanometer.html>
- [5] ČSN 36 0011. *Měření osvětlení vnitřních prostorů*. Praha: ÚNMZ, 2005.
- [6] BÁLSKÝ, Marek. *Výbojové světelné zdroje* [výukový materiál k předmětu B1B15EN3]. Dostupné z: http://www.powerwiki.cz/attach/A1B15EN3/EN3_4_vyb_LED_svitidla.ppt
- [7] FIŠERA, Michal. *Digitální fotografie a zorné pole lidského oka*. Praha, 2005. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky.
- [8] *Introduction to Colour Models ('Spaces')* [online]. Graphic Quality Consultancy [vid. 1. 3. 2020]. Dostupné z: https://www.colourphil.co.uk/lab_lch_colour_space.shtml
- [9] CIELab. In: *ResearchGate* [online]. ResearchGate GmbH, © 2008. [vid. 14. 5. 2020]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/post/CIELab_color_scale_sphere_vs_rectangular_parallel_piped
- [10] MIKOLÁŠOVÁ, Zuzana. *Barevné systémy a jejich aplikace*. Plzeň, 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra informatiky a výpočetní techniky.
- [11] 150123rgb. In: *Digineff* [online]. Digineff, © 2020. [vid. 14. 5. 2020]. Dostupné z: <https://digineff.cz/o-barevných-modelech-rgb-a-cmyk/>
- [12] 150123cmyk. In: *Digineff* [online]. Digineff, © 2020. [vid. 14. 5. 2020]. Dostupné z: <https://digineff.cz/o-barevných-modelech-rgb-a-cmyk/>
- [13] RGB_color_circle. In: *Wikibooks* [online]. Wikibooks, 2003. [vid. 18. 3. 2020]. Dostupné z: https://en.m.wikibooks.org/wiki/File:RGB_color_circle.png
- [14] *ReplacePixelValue* [online]. Wolfram [vid. 25. 3. 2020]. Dostupné z: <https://reference.wolfram.com/language/ref/ReplacePixelValue.html>
- [15] *PixelValue* [online]. Wolfram [vid. 25. 3. 2020]. Dostupné z: <https://reference.wolfram.com/language/ref/PixelValue.html>
- [16] *ColorConvert* [online]. Wolfram [vid. 26. 3. 2020]. Dostupné z: <https://reference.wolfram.com/language/ref/ColorConvert.html>
- [17] Mean of circular quantities. In: *Wikipedie: otevřená encyklopedie* [online]. Wikimedia Foundation, 2003. Stránka naposledy edit. 3. 7. 2019 v 16:06 [vid.30. 3. 2020]. Anglická verze. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Mean_of_circular_quantities

- [18] BÁLSKÝ, Marek a Habel, Jiří. Modernizace goniofotometru. *Světlo* [online]. Roč. 2009, č. 4, s. 54-57. [vid. 20. 3. 2020]. ISSN: 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39390.pdf>
- [19] *Kalibrační list 8018-KL-R0670-19*. Český metrologický institut, 3. ledna 2020. Kalibrační list jasoměru.
- [20] HABEL, Jiří, et al. *ELEKTRICKÉ SVĚTLO 1 Řešené příklady* [učební pomůcka]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/A1B15EN3/resene_priklady.pdf
- [21] *How to | Create a Matrix* [online]. Wolfram [vid. 29. 3. 2020]. Dostupné z: <https://reference.wolfram.com/language/howto/CreateAMatrix.html>
- [22] *Luminance Meters LMT L 1000*. LMT LICHTMESSTECHNIK GMBH BERLIN, 2013. Technical Data according to DIN 5032 part 8 and CIE S023/E:2013.
- [23] SVOBODA, Miloslav. *Srovnávání konvenčních a nových metod měření a hodnocení jasů*. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky.

Příloha – barevná škála 36 barevných vzorků

