VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

KALIBRACE DIGITÁLNÍHO FOTOAPARÁTU PRO ÚČELY MĚŘENÍ JASU

CALIBRATION OF DIGITAL CAMERA TO LUMINANCE MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE MARTIN VOLEK

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. PETR BAXANT, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2012

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Martin Volek
Ročník: 3

ID: 119671
Akademický rok: 2011/12

NÁZEV TÉMATU:

Kalibrace digitálního fotoaparátu pro účely měření jasu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Principy měření jasu
2. Vlastnosti digitálního fotoaparátu jako měřiče jasu
3. Příprava pracoviště pro kalibraci
4. Měření série kalibračních dat
5. Vyhodnocení kalibračních dat, vytvoření aproximačních kalibračních funkcí

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 25.5.2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.
Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Ústav elektroenergetiky

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

VOLEK, M. *Kalibrace digitálního fotoaparátu pro účely měření jasu* . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 55 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D..

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

……

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

Kalibrace digitálního fotoaparátu pro účely měření jasu

Martin Volek

vedoucí: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2012

Brno

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Electrical Power Engineering

Bachelor's Thesis

Calibration of Digital Camera to Luminance Measurement

by

Martin Volek

Supervisor: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

Brno University of Technology, 2012

Brno

ABSTRAKT

Práce se zabývá kalibrací digitálního fotoaparátu pro účely měření jasu. Cílem práce je vytvoření aproximačních kalibračních funkcí pro výpočet jasu. V první části práce je uveden rozbor základních světelně-technických parametrů, principu měření jasu a vlastností digitálních fotoaparátů pro tyto účely. Důležitým tématem je přizpůsobení digitálního fotoaparátu jako měřiče jasu. Dále je zde popsána příprava pracoviště pro kalibraci, zejména potřebné přístroje. V poslední části jsou uvedeny nalezené kalibrační funkce pro vybrané světelné zdroje a jejich vzájemné porovnání.

KLÍČOVÁ SLOVA: měření jasu; teplota chromatičnosti; halogenová žárovka; kompaktní zářivka, LED dioda; digitální fotoaparát; expoziční čas; expoziční hodnota

ABSTRACT

The thesis deals with the calibration of a digital camera for a purpose of luminance measurement. The aim is to create calibration approximation functions allowing the calculation of luminance. The first part analyses the basic light-technical parameters, as well as the principle of luminance measurement and the features of digital cameras for this purpose. An important issue, introduced in the present thesis, is to adapt a digital camera as a luminance meter. Furthermore, there is a description of the preparation of a site for the calibration, including necessary devices. The last part is dedicated to define the acquired calibration functions for the respective light sources and their mutual comparison.

KEY WORDS: luminance measurement; color temperature; halogen lamp; compact fluorescent lamp; light-emitting diode; digital camera; shutter speed; exposure value

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ 10
SEZNAM ROVNIC 12
SEZNAM TABULEK 14
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK 15
1 ÚVOD 17
2 ZÁKLADNÍ SVĚTELNĚ-TECHNICKÉ VELIČINY A PARAMETRY 18
2.1 ZÁŘIVÝ TOK 18
2.2 SVĚTELNÝ TOK 18
2.3 MĚRNÝ VÝKON 19
2.4 SVĚTELNÉ MNOŽSTVÍ 19
2.5 PROSTOROVÝ ÚHEL 19
2.6 SVÍTIVOST 20
2.7 INTENZITA OSVĚTLENÍ 20
2.8 JAS 21
2.9 TEPLOTA CHROMATIČNOSTI 21
2.10 INDEX PODÁNÍ BAREV 21
3 PRINCIP MĚŘENÍ JASU 22
4 VLASTNOSTI DIGITÁLNÍHO FOTOAPARÁTU JAKO MĚŘIČE JASU 24
4.1 DIGITÁLNÍ FOTOAPARÁT A JEHO PRINCIP 24
4.2 DŮLEŽITÉ PARAMETRY DIGITÁLNÍHO FOTOAPARÁTU 25
4.3 FOTOAPARÁT JAKO MĚŘIČ JASU 26
5 PŘÍPRAVA PRACOVIŠTĚ PRO KALIBRACI 27
5.1 SVĚTELNÉ ZDROJE 27
5.2 KULOVÝ INTEGRÁTOR 29
5.3 DIGITÁLNÍ FOTOAPARÁT CANON 450D EOS 29
5.4 SPECTRORADIOMETER CS-1000 29
5.5 ZDROJ KEITHLEY 2602A 29
6 MĚŘENÍ SÉRIE KALIBRAČNÍCH DAT 30
6.1 ROZMÍSTĚNÍ A ZAPOJENÍ MĚŘÍCÍCH PŘÍSTROJŮ A POMŮCEK 30
6.2 POSTUP MĚŘENÍ 30
6.3 ZMĚŘENÁ DATA 31
7 VYHODNOCENÍ KALIBRAČNÍCH DAT A VYTVOŘENÍ KALIBRAČNÍCH FUNKCÍ 33
7.1 KALIBRAČNÍ FUNKCE HALOGENOVÉ ŽÁROVKY 33
7.2 KALIBRAČNÍ FUNKCE KOMPAKTNÍ ZÁŘIVKY 37
7.3 KALIBRAČNÍ FUNKCE WARM WHITE LED 41

7.4 KALIBRAČNÍ FUNKCE COOL WHITE LED 45
7.5 VÝSLEDNÉ KALIBRAČNÍ FUNKCE PRO VÝPOČET JASU 49
7.6 POROVNÁNÍ KALIBRAČNÍCH FUNKCÍ 50
8 ZÁVĚR 52
8.1 ZÁVĚRY PRÁCE A JEJÍ PŘÍNOS 52
8.2 VÝZNAM A VYUŽITÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ 53
8.3 NÁVRH DALŠÍHO POSTUPU 53
POUŽITÁ LITERATURA 54

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3-1: Princip jasoměru [3] 22

Obr. 3-2: Schématický náčrt konstrukčního uspořádání jasoměru umožňujícího pozorovat okolí plošky, jejíž jas se měří [3] 23

Obr. 4-1Řez digitálním fotoaparátem [5] 24

Obr. 5-1 Spektrum měřené halogenové žárovky 27

Obr. 5-2 Spektrum měřené kompaktní zářivky 28

Obr. 5-3 Spektrum měřené Warm White LED 28

Obr. 5-4 Spektrum měřené Cool White LED 28

Obr. 6-1 Rozmístění a zapojení měřících přístrojů a pomůcek 30

Obr. 7-1 Závislost Average G2 na L_V (HŽ) 33

Obr. 7-2 Závislost Average G2 na L_{normG2} (HŽ) 34

Obr. 7-3 Závislost Average G1 na L_{normG2} (HŽ) 34

Obr. 7-4 Závislost Average R na L_{normG2} (HŽ) 35

Obr. 7-5 Závislost Average B na L_{normG2} (HŽ) 35

Obr. 7-6 Závislost L_{SENS} na K_1 (HŽ) 36

Obr. 7-7 Závislost Average G1 na L_V (KZ) 37

Obr. 7-8 Závislost Average G1 na L_{normG1} (KZ) 38

Obr. 7-9 Závislost Average G2 na L_{normG1} (KZ) 38

Obr. 7-10 Závislost Average R na L_{normG1} (KZ) 39

Obr. 7-11 Závislost Average B na L_{normG1} (KZ) 39

Obr. 7-12 Závislost L_{SENS} na K_1 (KZ) 40

Obr. 7-13 Závislost Average G1 na L_V (WWL) 41

Obr. 7-14 Závislost Average G1 na L_{normG1} (WWL) 42

Obr. 7-15 Závislost Average G2 na L_{normG1} (WWL) 42

Obr. 7-16 Závislost Average R na L_{normG1} (WWL) 43

Obr. 7-17 Závislost Average B na L_{normG1} (WWL) 43

Obr. 7-18 Závislost L_{SENS} na K_1 (WWL) 44

Obr. 7-19 Závislost Average G1 na L_V (CWL) 45

Obr. 7-20 Závislost Average G1 na L_{normG1} (CWL) 46

Obr. 7-21 Závislost Average G2 na L_{normG1} (CWL) 46

Obr. 7-22 Závislost Average R na L_{normG1} (CWL) 47

Obr. 7-23 Závislost Average B na L_{normG1} (CWL) 47

Obr. 7-24 Závislost L_{SENS} na K_1 (CWL) *48*

SEZNAM ROVNIC

Rov. 7-1 Výpočet L_{normG2} (HŽ) 34
Rov. 7-2 Výpočet koeficientu K_1 (HŽ) 36
Rov. 7-3 Výpočet L_{SENS} (HŽ) 36
Rov. 7-4 Výpočet koeficientu K_2 (HŽ) 36
Rov. 7-5 Výpočet výsledného jasu L_{VYP} (HŽ) 36
Rov. 7-6 Výpočet absolutní chyby (HŽ) 36
Rov. 7-7 Výpočet relativní chyby (HŽ) 37
Rov. 7-8 Výpočet L_{normG1} (KZ) 38
Rov. 7-9 Výpočet koeficientu K_1 (KZ) 40
Rov. 7-10 Výpočet L_{SENS} (KZ) 40
Rov. 7-11 Výpočet koeficientu K_2 (KZ) 40
Rov. 7-12 Výpočet výsledného jasu L_{VYP} (KZ) 40
Rov. 7-13 Výpočet absolutní chyby (KZ) 40
Rov. 7-14 Výpočet relativní chyby (KZ) 41
Rov. 7-15 Výpočet L_{normG1} (WWL) 41
Rov. 7-16 Výpočet koeficientu K_1 (WWL) 44
Rov. 7-17 Výpočet L_{SENS} (WWL) 44
Rov. 7-18 Výpočet koeficientu K_2 (WWL) 44
Rov. 7-19 Výpočet výsledného jasu L_{VYP} (WWL) 44
Rov. 7-20 Výpočet absolutní chyby (WWL) 44
Rov. 7-21 Výpočet relativní chyby (WWL) 45
Rov. 7-22 Výpočet L_{normG1} (CWL) 45
Rov. 7-23 Výpočet koeficientu K_1 (CWL) 48
Rov. 7-24 Výpočet L_{SENS} (CWL) 48
Rov. 7-25 Výpočet koeficientu K_2 (CWL) 48
Rov. 7-26 Výpočet výsledného jasu L_{VYP} (CWL) 48
Rov. 7-27 Výpočet absolutní chyby (CWL) 48
Rov. 7-28 Výpočet relativní chyby (CWL) 49
Rov. 7-29 Obecná rovnice pro výpočet koeficientu K_1 (HŽ) 49
Rov. 7-30 Obecná rovnice pro výpočet koeficientu K_2 (HŽ) 49
Rov. 7-31 Obecná rovnice pro výpočet výsledného jasu L_{VYP} (HŽ) 49
Rov. 7-32 Obecná rovnice pro výpočet koeficientu K_1 (KZ) 49

Rov. 7-33 Obecná rovnice pro výpočet koeficientu K_2 (KZ) *49*
Rov. 7-34 Obecná rovnice pro výpočet výsledného jasu L_{VYP} (KZ) *49*
Rov. 7-35 Obecná rovnice pro výpočet koeficientu K_1 (WWL) *49*
Rov. 7-36 Obecná rovnice pro výpočet koeficientu K_2 (WWL) *49*
Rov. 7-37 Obecná rovnice pro výpočet výsledného jasu L_{VYP} (WWL) *50*
Rov. 7-38 Obecná rovnice pro výpočet koeficientu K_1 (CWL) *50*
Rov. 7-39 Obecná rovnice pro výpočet koeficientu K_2 (CWL) *50*
Rov. 7-40 Obecná rovnice pro výpočet výsledného jasu L_{VYP} (CWL) *50*
Rov. 7-41 Výpočet koeficientu K_1 (KZpHŽ) *50*
Rov. 7-42 Výpočet koeficientu K_2 (KZpHŽ) *50*
Rov. 7-43 Výpočet výsledného jasu L_{VYP} (KZpHŽ) *51*
Rov. 7-44 Výpočet absolutní chyby (KZpHŽ) *51*
Rov. 7-45 Výpočet relativní chyby (KZpHŽ) *51*
Rov. 7-46 Výpočet koeficientu K_1 (CWLpWWL) *51*
Rov. 7-47 Výpočet koeficientu K_2 (CWLpWWL) *51*
Rov. 7-48 Výpočet výsledného jasu L_{VYP} (CWLpWWL) *51*
Rov. 7-49 Výpočet absolutní chyby (CWLpWWL) *51*
Rov. 7-50 Výpočet relativní chyby (CWLpWWL) *51*

SEZNAM TABULEK

Tab. 6-1 Změřená data halogenové žárovky *31*
Tab. 6-2 Změřená data zářivky *32*
Tab. 6-3 Změřená data Warm White LED *32*
Tab. 6-4 Změřená data Cool White LED *32*
Tab. 7-1 Kalibrace na halogenovou žárovku *33*
Tab. 7-2 Poměr R, G1, G2, B (HŽ) *35*
Tab. 7-3 Kalibrace na kompaktní zářivku *37*
Tab. 7-4 Poměr R, G1, G2, B (KZ) *39*
Tab. 7-5 Kalibrace na Warm White LED *41*
Tab. 7-6 Poměr R, G1, G2, B (WWL) *43*
Tab. 7-7 Kalibrace na Cool White LED *45*
Tab. 7-8 Poměr R, G1, G2, B (CWL) *47*

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Vysvětlivka	Jednotka
A	plocha	m^2
A_S	plocha kolmá k ose	m^2
Average B	průměrná modrá	
Average G	průměrná zelená	
Average R	průměrná červená	
B	modrá	
D	průměr vstupní čočky	m
E_V	intenzita osvětlení	lx
E_N	normálová osvětlenost	lx
EV	expoziční hodnota	
F	clonové číslo	
f	ohnisková vzdálenost	m
G	zelená	
I_V	svítivost	cd
K_1	pomocný výpočtový koeficient	
K_2	pomocný výpočtový koeficient	
K_m	maximální spektrální světelná účinnost	$lm.W^{-1}$
$K(\lambda)$	spektrální světelná účinnost	$lm.W^{-1}$
L_{norm}	pomocná výpočtová hodnota	
L_{SENS}	pomocná výpočtová hodnota	
L_V	jas	$cd.m^{-2}$
L_{VYP}	vypočítaný jas	$cd.m^{-2}$
l	vzdálenost	m
P	příkon	W
Q_V	světelné množství	lm.s
R_a	index podání barev	
R	zelená	
r	poloměr	m
S	expoziční čas	s
T_C	teplota chromatičnosti	K
t	čas	s

Značka	Vysvětlivka	Jednotka
x_1	pomocný výpočtový koeficient	
x_2	pomocný výpočtový koeficient	
Δ_L	absolutní chyba výpočtu jasu	$cd.m^{-2}$
δ_L	relativní chyba výpočtu jasu	
Θ	úhel dopadu paprsku do objektivu	°
λ	vlnová délka	m
π	konstanta 3,1415…	
Φ_e	zářivý tok	W
Φ_V	světelný tok	lm
η_V	měrný výkon	$lm.W^{-1}$
Ω	prostorový úhel	sr
CCD	součástka s vázaným nábojem	
CMOS	snímač řízený elektrickým polem	
CWL	Cool White LED	
CWLpWWL	Cool White LED pomocí kalibrační funkce Warm White LED	
HŽ	halogenová žárovka	
KZ	kompaktní zářivka	
KZpHŽ	kompaktní zářivka pomocí kalibrační funkce halogenové žárovky	
LED	dioda emitující světlo	
WWL	Warm White LED	

1 ÚVOD

V dnešní moderní době je na trhu plno různých speciálních měřících přístrojů pro měření jasu. Tyto speciální měřící přístroje jsou velice složité, přesné, ale i velice drahé. Hodně menších firem, vyrábějící například světelné zdroje, si tyto speciální přístroje nemůže dovolit. Proto vznikla myšlenka použít přístroj, který už velká část populace vlastní, není tak drahý a zaručuje dostatečnou přesnost. Řeč je o digitálním fotoaparátu.

Tato práce se tedy zabývá kalibrací digitálního fotoaparátu pro účely měření jasu. Cílem práce je vytvoření aproximačních kalibračních funkcí pro výpočet jasu. V první části jsou teoreticky rozebrány potřebné veličiny pro měření jasu, dále je uveden princip měření jasu. V další části je rozebráno přizpůsobení digitálního fotoaparátu pro účely měření jasu a důležité parametry digitálních fotoaparátů pro řešení tohoto problému. V poslední části je provedena samotná kalibrace pro čtyři světelné zdroje. Z naměřených dat jsou vyhodnoceny aproximační funkce a porovnáním těchto kalibračních funkcí je zjištěna případná širší využitelnost.

2 ZÁKLADNÍ SVĚTELNĚ-TECHNICKÉ VELIČINY A PARAMETRY

V této kapitole jsou popsány základní světelně-technické veličiny a parametry, které jsou důležité k porozumění a řešení této problematiky.

2.1 Zářivý tok

Zářivý tok Φ_e světelného zdroje je množství zářivé energie přenesené tokem fotonů za jednotku času.

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \text{ (W; Ws, s)} \tag{2.1}$$

Jednotkou zářivého toku je watt (W), neboť jde o veličinu energetickou. Je-li zářivý tok hodnocen okem, potom zavádíme místo výkonu přenášeného záření (ve wattech) fotometrickou veličinu světelný tok v lumenech (lm). [1]

2.2 Světelný tok

Světelný tok Φ_v vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit zrakový vjem. Známe-li zářivý tok monochromatického záření $\Phi_{e(\lambda)}$ určíme světelný tok ze vztahu:

$$\Phi_{V(\lambda)} = K(\lambda).\Phi_{e(\lambda)} = K_m V(\lambda).\Phi_{e(\lambda)} \text{ (lm; lm.W}^{-1}\text{, W)} \tag{2.2}$$

a světelný tok složeného záření:

$$\Phi_v = K_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda).\Phi_{e(\lambda)}.d\lambda \text{ (lm; lm.W}^{-1}\text{,W)} \tag{2.3}$$

kde λ_1 je 380 nm

λ_2 780 nm

$K(\lambda)$ spektrální světelná účinnost monochromatického záření, která je rovna podílu světelného toku a jemu odpovídajícího zářivého toku.

$$K(\lambda) = \frac{\Phi_{V(\lambda)}}{\Phi_{e(\lambda)}} \text{ (lm.W}^{-1}\text{; lm, W)} \tag{2.4}$$

Největší $K(\lambda)$ se označuje K_m a je rovna 683 lm.W^{-1} pro monochromatické záření o kmitočtu 5,4.10^{14} Hz (555nm). [1]

2.3 Měrný výkon

Světelná účinnost záření $K(\lambda)$ nedává dostatečný obraz o účinnosti světelného zdroje. Pro posouzení přeměny elektrické energie ve světlo se používá měrný výkon η_v vyjadřující podíl vyzařovaného světelného toku Φ_v k příkonu zdroje P.

$$\eta_v = \frac{\Phi_v}{P} = \frac{K_m \int_{\lambda 1}^{\lambda 2} V(\lambda).\Phi_{e(\lambda)}.dt}{P} \text{ (lm.W}^{-1}\text{; lm, W)} \tag{2.5}$$

kde λ_1 je 380 nm

λ_2 780 nm

Jednotkou měrného výkonu je lumen na watt (lm.W^{-1}). [1]

2.4 Světelné množství

Světelné množství Q_v je součin světelného toku a doby, po kterou světelný zdroj svítí.

$$Q_v = \int_{t_1}^{t_2} \Phi_V.dt \text{ (lm.s; lm, s)} \tag{2.6}$$

Jednotkou světelného množství je lumensekunda (lm.s). Další používaná jednotka je lumenhodina (lm.h). [1]

2.5 Prostorový úhel

Pro stanovení dalších definic je zapotřebí vysvětlit úlohu prostorového úhlu Ω ve světelné technice. Osvětlenou plochu vidíme, protože do našeho oka vstupuje svazek paprsků. Podobný svazek paprsků vystupuje z bodového zdroje světla. Tyto svazky paprsků vidíme pod určitým prostorovým úhlem, jehož velikost závisí na pozorované ploše a její vzdálenosti od oka nebo bodového zdroje světla. Prostorový úhel je veličina, která vyjadřuje prostorovou rozbíhavost kužele. Určuje se poměrem plochy kulového vrchlíku A vymezeného na kouli opsané z vrcholu úhlu ke dvojmoci poloměru r.

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \text{ (sr; m}^2\text{, m)} \tag{2.7}$$

Jednotkou prostorového úhlu je steradián (sr). [1]

2.6 Svítivost

Svítivost I_V je základní fyzikální veličinou měrové soustavy SI. Světelný tok vysílaný do prostoru bodovým zdrojem světla není rovnoměrně rozdělen do všech směrů, je proto zapotřebí vedle hodnoty světelného toku znát jeho prostorovou hustotu v různých směrech, tj. svítivost v daném směru do nekonečně malého prostorového úhlu a velikosti tohoto úhlu.

$$I_V = \frac{d\Phi_V}{4\pi} \text{ (cd; lm, sr)} \tag{2.8}$$

Hlavní jednotkou svítivosti je kandela (cd). Je to svítivost $\frac{1}{60}.10^{-4}\,\mathrm{m}^2$ povrchu absolutně černého tělesa ve směru kolmém k tomuto povrchu při teplotě tuhnutí platiny (1769 °C) a při tlaku 1,013 25.10^5 Pa, který odpovídá tlaku 760 torr (1 torr = 1,333 22.10^5 Pa). [1]

2.7 Intenzita osvětlení

Intenzita osvětlení E_V je veličina, která vyjadřuje jak je uvažovaný předmět nebo plocha osvětlena dopadajícím světelným tokem. Závisí na velikosti toku a osvětlené ploše. Intenzita osvětlení v daném bodu plochy A je tedy podíl světelného toku, který dopadá na element této plochy obsahující daný bod a velikosti tohoto plošného elementu.

$$E_V = \frac{d\Phi_V}{dA} \text{ (lx; lm, m}^2\text{)} \tag{2.9}$$

Závislost osvětlení na svítivosti zdroje a na vzdálenosti osvětlované plochy vyjadřuje zákon, který praví, že osvětlení od bodového zdroje je nepřímo úměrné druhé mocnině vzdálenosti osvětlované plochy od zdroje.

$$E_V = \frac{I_V}{l^2} \text{ (lx; cd, m)} \tag{2.10}$$

Vztah (2.10) platí v případě, že osvětlená rovina je kolmá k paprsku.

Jednotkou intenzity osvětlení je lux (lx). [1]

2.8 Jas

Jas L_V svítícího povrchu světelného zdroje v některém směru je podíl svítivosti v tomto směru a velikosti svítící plochy promítnuté do roviny, která je kolmá k ose pozorování.

$$L_V = \frac{dI_V}{dA.\cos\Theta} = \frac{dI_V}{dA_S} \text{ (cd.m}^{-2}\text{; cd, m}^{-2}\text{)} \tag{2.11}$$

Kde Θ je úhel, který svírá směr, ve kterém jas zjišťujeme s kolmicí k pozorované ploše. Jednotkou jasu je kandela na metr čtvereční (cd.m^{-2}). [1]

2.9 Teplota chromatičnosti

Teplota chromatičnosti T_C také teplota barvy nebo barevný dojem. Charakterizuje spektrum bílého světla. Světlo určité teploty chromatičnosti má barvu tepelného záření vydávaného černým tělesem zahřátým na tuto teplotu. Teplota chromatičnosti se měří v kelvinech (K). [2]

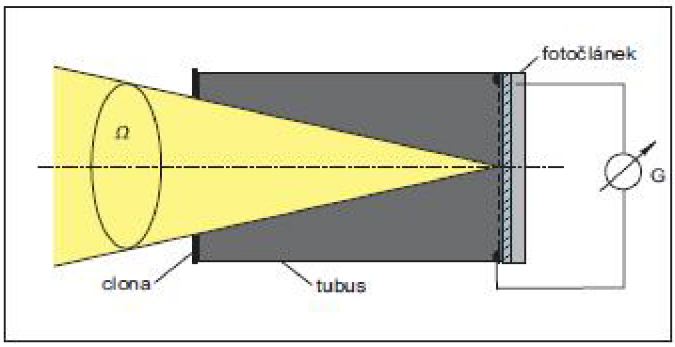
2.10 Index podání barev

Index podání barev R_a je hodnocení věrnosti barevného vjemu, který vznikne osvětlením z určitého zdroje, v porovnání s tím, jaký barevný vjem by vznikl ve světle referenčního ideálního zdroje. Hodnota R_a může být od 0 do 100. Hodnota R_a = 0 znamená, že při tomto osvětlení není možné rozeznat barvy. Hodnota R_a = 100 znamená, že je to světelný zdroj, který umožňuje přirozené podání barev. [2]

3 PRINCIP MĚŘENÍ JASU

Nejjednodušší princip řešení objektivního jasoměru je na *Obr. 3-1*. Na přijímač je nasazen tubus, uvnitř černý vpředu opatřený clonkou s kruhovým otvorem. Takto je vymezen prostorový úhel Ω, v němž dopadají paprsky z měřené plochy na přijímač (fotočlánek). V popsaném uspořádání se fotočlánkem změří normálová osvětlenost E_N přijímací plochy čidla. Střední jas L_V plochy vymezené prostorovým úhlem Ω na sledovaném povrchu se určí ze vztahu:

$$L_V = \frac{E_N}{\Omega} \text{ (cd.m}^{-2}\text{; lx, sr)} \tag{3.1}$$



Obr. 3-1: Princip jasoměru [3]

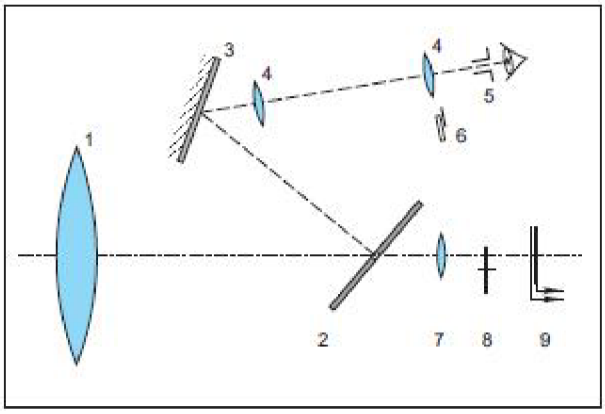
Při měření jasu je třeba mít vždy na zřeteli, že se jasoměrem zjišťuje střední hodnota jasu měřené plochy, kterou vymezuje optika přístroje v závislosti na vzdálenosti jasoměru od měřeného povrchu. Proto je nutné dbát na to, aby měřená plocha zahrnovala pouze povrch, jehož jas se hodnotí. U běžných objektivních jasoměrů toto není problém. Neboť se okolí měřené plochy pozoruje v okuláru a měřená oblast je v zorném poli vyznačena např. tmavým kroužkem.

Podle velikosti plochy, jejíž jas se vyhodnocuje, resp. podle velikosti clon určujících zorný úhel přístroje, se rozlišují jasoměry bodové, kterými lze měřit jas velmi malých plošek a integrační, jimiž se zjišťuje jas mnohem větších ploch.

Jasy ploch důležitých pro vidění se měří bodovými jasoměry v kontrolních bodech umístěných tak, aby bylo možné posoudit rozložení jasu v zorném poli uživatelů prostoru při běžném směru jejich pohledu a obvyklé výšce očí pozorovatele (nejčastěji se uvažuje u stojící osoby 150 cm, u sedící osoby 120 cm).

Zejména se měří jas pozorovaného předmětu (detailu), jas ploch předmět bezprostředně obklopujících, jas vzdálených ploch (např. stěn, podlahy, stropu atd.) a rovněž jasy svazků paprsků odrážejících se od velmi jasných částí povrchů, které mohou nepříznivě ovlivnit zrakovou pohodu uživatelů interiéru.

Většina fyzikálních jasoměrů je založena na tom, že měří světelný tok procházející clonou určitého tvaru a velikosti. V rovině této clony se zobrazuje ploška vymezená zorným polem, jejíž jas se určuje. Zásadní konstrukční schéma takového přístroje je na *Obr. 3-2*.



Obr. 3-2: Schématický náčrt konstrukčního uspořádání jasoměru umožňujícího pozorovat okolí plošky, jejíž jas se měří [3]

Objektiv 1 přístroje zobrazuje měřený záběr na plošku 2, na které je možné pozorovat obraz přes zrcátko 3 a optiku 4 okulárem 5. Do jeho zorného pole se zobrazuje i údaj stupnice měřícího přístroje 6. Ve stínítku 2 je otvor, kterým projde světlo z měřené plošky pomocnou optikou 7 a filtry 8 (barevné i šedé pro změnu rozsahu) na fotočlánek 9, jehož proud se po zesílení přivede do měřícího přístroje. Velikosti otvorů v zrcadlech se obvykle volí tak, aby odpovídaly zorným polím o úhlech 6´, 15´, 30´, 1°, 2°.

Požadavky na jasoměry jsou shrnuty v normě. Celková přípustná chyba jasoměrů pro přesná měření je ±7,5% a jasoměrů pro provozní měření ±10%. Maximální doba platnosti kalibrace jasoměrů pro přesná měření je dva roky a pro provozní tři roky. Jasoměry pro přesná a provozní měření mají být přizpůsobeny pro upevnění na stativ, umožňující měřit jas v různých směrech prostoru.

Kvalitní objektivní jasoměry produkují známí výrobci fotometrických přístrojů, mezi nimi např. americká firma Spektra Pritchard, firma Minolta aj. patří k nim také německá firma Lichtmess-technik Berlin. [4]

4 VLASTNOSTI DIGITÁLNÍHO FOTOAPARÁTU JAKO MĚŘIČE JASU

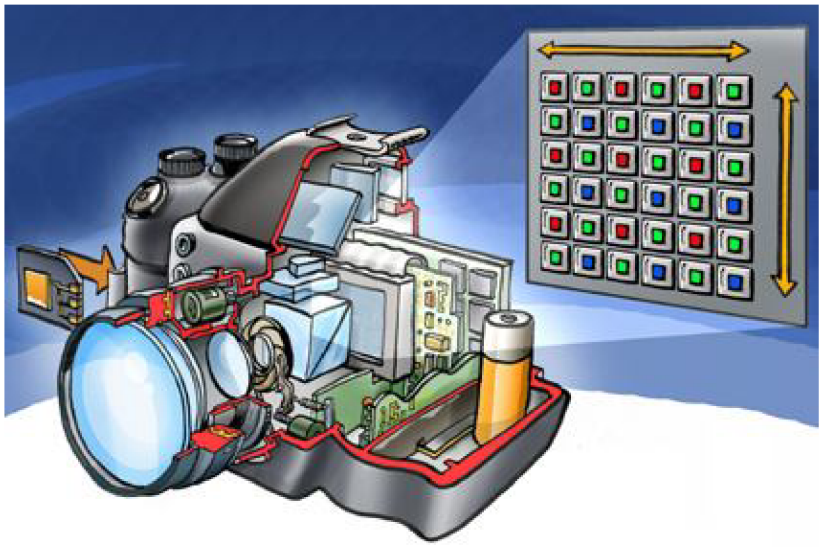
V této části je uveden základní princip digitálních fotoaparátů a důležité parametry pro účely měření jasu.

4.1 Digitální fotoaparát a jeho princip

Digitální fotoaparát je zařízení, zaznamenávající obraz v digitální formě, které může být okamžitě zobrazeno na displeji nebo v počítači. Základní funkcí digitálního fotoaparátu je snímání statických obrazů do podoby tzv. digitální fotografie a umožnit tak jejich další zpracování.

Princip digitálního fotoaparátu vychází z konstrukce klasického fotoaparátu. Jádrem přístroje je světlocitlivá plocha snímače na bázi technologie CCD nebo CMOS. Na plochu senzoru je promítán obraz přes systém optických čoček v objektivu. Světelná energie, která přichází ze snímaného prostoru (scény), je v jednotlivých pixelech (obrázkových bodech) převáděna na elektrický signál a uložena v podobě vázaného náboje (u technologie CCD). Náboj vzniká postupně během expozice čipu, kdy je otevřena uzávěrka fotoaparátu a světlo může dopadat na čip. Princip vzniku elektrického náboje je založen na fotoelektrickém jevu s tím rozdílem, že náboje neodtékají okamžitě do vnějšího obvodu, ale jsou izolovány v nábojových zásobnících v elektricky izolované struktuře čipu.

Po uzavření uzávěrky jsou vygenerované náboje z čipu postupně odváděny a měřeny speciálním zesilovačem pro každý jednotlivý pixel. Takto získaný signál je dále převeden A/D převodníkem na signál v binárním kódu. Vzniklý datový proud je pak pomocí mikroprocesoru různě upravován a převeden do některého grafického formátu používaného pro záznam obrazových dat, např. RAW, JPEG. Výsledný datový soubor je uložen zpravidla na paměťové médium v podobě paměťové karty nebo vestavěné paměti typu Flash-EEPROM (tj. elektricky mazatelná paměť s trvalým záznamem, který je uchováván i bez přívodu elektrického napětí).



Obr. 4-1Řez digitálním fotoaparátem [5]

Dnes se výhradně používají digitální fotoaparáty se snímači umožňující pořizovat barevné fotografie. To ve většině případů zajišťuje tzv. Bayerova maska. V níž jsou z každých čtyř buněk snímače dva překryty zeleným filtrem, jeden červeným a jeden modrým. Toto uspořádání je dáno návazností na spektrální citlivost lidského zraku. Například čtyř megapixelový snímač obsahuje dva miliony bodů citlivých na zelenou a po milionu bodů citlivých na červenou a modrou. Zbývající barevná informace se ve výsledném snímku dopočítává.

Výjimkou jsou senzory Foveon, které jsou založeny na principu pronikání světla o různých vlnových délkách do různé hloubky. Každý pixel tedy má zaznamenány informace o všech třech barvách a interpolace tedy není potřeba. Dalším typem senzorů je Super CCD, které mají čtvercovou síť otočenou o 45°. Posledním typem je Super CCD EXR. [6]

4.2 Důležité parametry digitálního fotoaparátu

Citlivost

Citlivost snímače vychází z jednotek ASA. Čím vyšší je jeho citlivost, tím kratší čas je potřeba k expozici. Citlivost se udává v jednotkách ISO. Každé zdvojnásobení hodnoty ISO znamená poloviční množství světla potřebné k expozici. Základní citlivost bývá 100 ISO. U digitálních zrcadlovek je možno nastavit ISO až např. 1600. Při tomto nastavení se, ale již na snímku výrazně projeví vysoká hladina elektronického šumu, která snímek znehodnocuje. [7]

Clonové číslo

Další parametr je clonové číslo F [-]. Je poměr ohniskové vzdálenosti f optické soustavy a průměru D vstupní čočky. Filmové či fotografické objektivy umožňují měnit clonové číslo objektivu prostřednictvím clony, která zmenšuje efektivní průměr vstupní čočky. Při dané ohniskové vzdálenosti, nízké clonové číslo znamená větší světelný tok vnikající do objektivu, což umožňuje velmi krátký expoziční čas na úkor nízké hloubce ostrosti. Naopak, vyšší clonové číslo znamená menší světelný tok, což si vyžaduje vyšší citlivost čipu nebo expoziční čas, zvyšuje se však hloubka ostrosti. [8]

Expoziční čas

Expoziční čas S [s] (doba expozice, rychlost závěrky). Je to doba po kterou je závěrka fotoaparátu otevřena a umožňuje tak světlu dopadat na obrázkový senzor ve fotoaparátu. Expoziční čas je jedním ze tří základních parametrů expozice fotografie. Správná expozice záleží na přizpůsobení těchto tří parametrů světelným podmínkám předmětu snímku. [9]

Expoziční hodnota

Expoziční hodnota EV, označuje proces vystavení světla dopadajícího na senzor, tak i jeho celkové množství. Správná expozice je určena citlivostí senzoru měřenou na stupnici ISO, nastavením clony a rychlostí závěrky fotoaparátu. [10]

4.3 Fotoaparát jako měřič jasu

Aby mohl být fotoaparát kalibrován a použit jako měřič jasu, je potřeba fotoaparátu, který umožňuje ukládat fotografie ve formátu RAW. Jsou to jen minimálně zpracovaná data ze senzoru. Název byl vytvořen z anglického slova raw, znamenající surový, neupravený, hrubý. RAW je často nazýván digitálním negativem, i když s negativním typem obrazu nemá nic společného. RAW formát není bohužel nijak standardizovaný a výrobci si každý podle svých potřeb, preferencí a použité technologie (senzoru) definovali vlastní RAW formát. Obsah RAW souboru primárně obsahuje skutečně zcela hrubá digitální data toho, co uviděl senzor a současně data sdělující okolnosti pořízení snímku (metadata). Data nejsou ukotvena k žádnému standardnímu barevnému prostoru, v datech není vyvážená bílá atd. [11]

Pro úspěšnou kalibraci fotoaparátu je tedy potřeba znát hodnoty R, G, B a data uvádějící okolnosti pořízení snímku: citlivost, clonové číslo, expoziční čas a expoziční hodnotu.

Fotoaparát je provozován s vypnutým automatický ostřením a vypnutým optickým stabilizátorem, aby neovlivňovali měření a výpočet kalibrace.

Jelikož kalibrace je prováděna pomocí referenčního (přesného) přístroje, který měří jas na předem ohraničené (definované) ploše, bude potřeba mít i data z fotoaparátu ze stejně definované plochy jako u měření referenčním přístrojem. K tomu bude potřeba softwarové podpory. V této práci byl použit program LumiDISP. Je to software vyvíjený na Ústavu elektroenergetiky, sloužící např. k jasové analýze pomocí digitálních fotoaparátů. Použitím tohoto programu jsou spočítány průměrné hodnoty R, G, B z definované plochy. [12]

5 PŘÍPRAVA PRACOVIŠTĚ PRO KALIBRACI

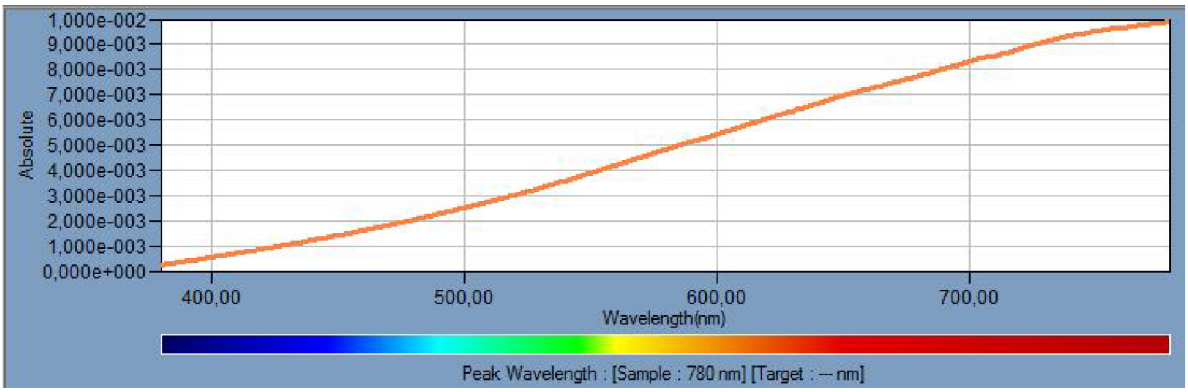
V této papilote jsou rozebrány všechny potřebné měřící přístroje pro kalibraci. Při měření byly všechny přístroje a pomůcky pevně ukotveny na pracovním stole. Měření bylo prováděno v temné laboratoři, bez přístupu rušivého světla (např. denní světlo, pracovní osvětlení atd.).

5.1 Světelné zdroje

Zde jsou uvedeny světelné zdroje pro, které byla kalibrace provedena. Pro účely měření jasu digitálním fotoaparátem výsledek nejvíce závisí na vyzařovaném spektru světelného zdroje. Proto jsou zde uvedeny spektra měřených světelných zdrojů, ale i stručná charakteristika těchto zdrojů.

Halogenová žárovka

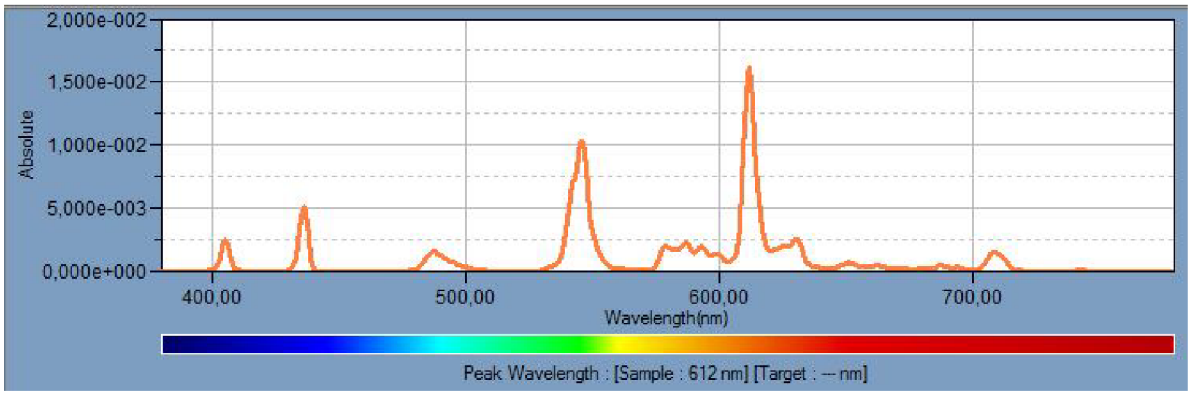
Je speciální druh žárovky, u které se dosahuje vyšší teploty vlákna (a tedy vyšší světelné účinnosti a bělejšího světla) a delší životnosti tím, že se do atmosféry uvnitř baňky přidá sloučenina halového prvku (halogenu, např. bromu nebo jodu). Oproti běžným žárovkám nemá na jejich životnost vliv ani časté vypínání a zapínání. V žárovce probíhá tzv. halogenový cyklus, kde se při vysoké teplotě vypařující wolfram slučuje a rozpadá např. s bromem. Díky tenzi wolframových par v blízkosti vlákna se omezuje jeho vypařování. Výsledkem je delší životnost a zvýšení světelného toku. [13]



Obr. 5-1 Spektrum měřené halogenové žárovky

Kompaktní zářivka

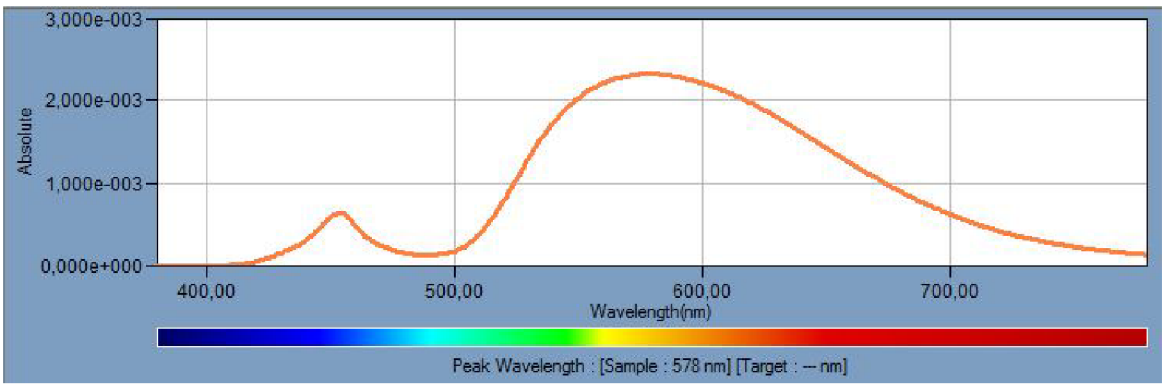
Je nízkotlaká výbojka, kterou tvoří skleněná trubice se žhavícími elektrodami, naplněná rtuťovými parami a argonem. V nich nastává doutnavý výboj, který ale září převážně v neviditelné ultrafialové oblasti. Toto záření dopadá na stěny trubice které jsou pokryty luminoforem. Tato látka absorbuje ultrafialové záření a sama září ve viditelné oblasti. Mívají delší životnost. Výrobci uvádějí, že kompaktní zářivky mají přibližně o 80% menší spotřebu energie oproti klasické žárovce při stejném světelném toku. [14], [15]



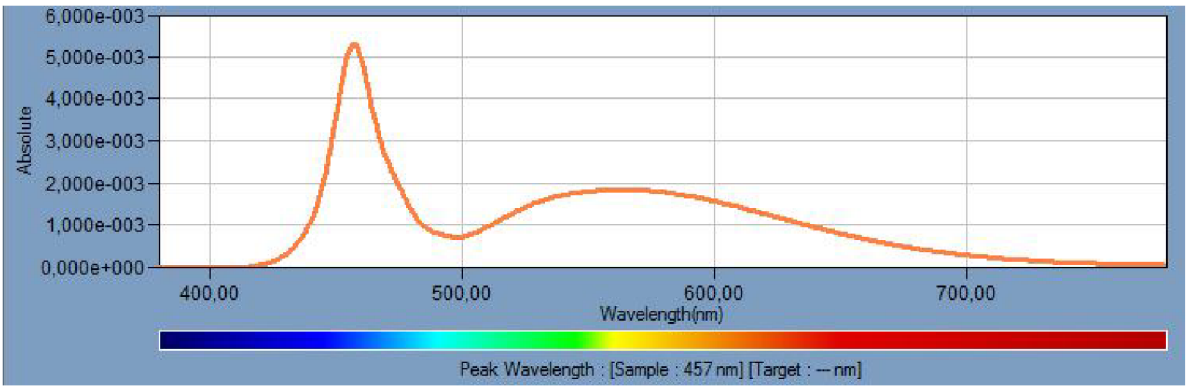
Obr. 5-2 Spektrum měřené kompaktní zářivky

LED dioda

Je elektronická polovodičová součástka obsahující přechod P-N. Na rozdíl od klasických diod, LED vyzařuje viditelné světlo. Pásmo spektra záření diody je závislé na chemickém složení použitého polovodiče. LED jsou vyráběny v pásmu vyzařování od ultrafialových, přes různé barvy viditelného spektra, až po infračervené pásmo. Oproti jiným elektrickým zdrojům světla mají tu výhodu, že pracují s poměrně malými hodnotami proudu a napětí. [16]



Obr. 5-3 Spektrum měřené Warm White LED



Obr. 5-4 Spektrum měřené Cool White LED

5.2 Kulový integrátor

Kulový integrátor či fotometrický integrátor, také integrační koule, je fotometrický laboratorní měřící přístroj, který slouží k měření světelného toku světelných zdrojů a svítidel. Díky tomu se také používá k určení účinnosti svítidel a kalibraci etanolů světelných toků. Má tvar koule, ta je dutá a její vnitřní nátěr je bílý s velkou odrazností. Princip měření spočívá v mnohonásobných odrazech, ke kterým dochází uvnitř koule. Pak je možné říct, že intenzita světelného toku v celé měřící ploše je stejná. [17]

5.3 Digitální fotoaparát Canon 450D EOS

Pro kalibraci byl použit fotoaparát Canon 450D EOS. Fotoaparát je vybaven CMOS snímačem s rozměry 22,2 x 14,8 mm s efektivním rozlišením 12,2 MPix, antistatickým povrchem, filtrem s možností sklepání prachu (při zapnutí přístroje, tuto funkci lze deaktivovat) a softwarovou detekcí prachu v obraze, resp. jeho softwarovým odstraňováním. Snímky lze ukládat v rozlišení 4272 x 2848, 3088 x 2056 a 2256 x 1504 bodů ve formátech JPEG i RAW a citlivost lze při fotografování nastavit od ISO 100 do 1600. [18]

5.4 Spectroradiometer CS-1000

Spectroradiometer od firmy Konica Minolta je vysokorychlostní a velmi přesné zařízení pro měření spektrální distribuce elektrické energie, jasu, barvy a teploty chromatičnosti světelných zdrojů. Používaný pro absolutní měření TFT monitorů, LCD monitorů, zářivek, LED diod atd. Ve viditelné části spektra od 380 nm do 780 nm zachycuje vlnové délky v intervalech 0,9 nm. Pro komunikaci s PC je vybaven sériovým portem RS-232C. [19]

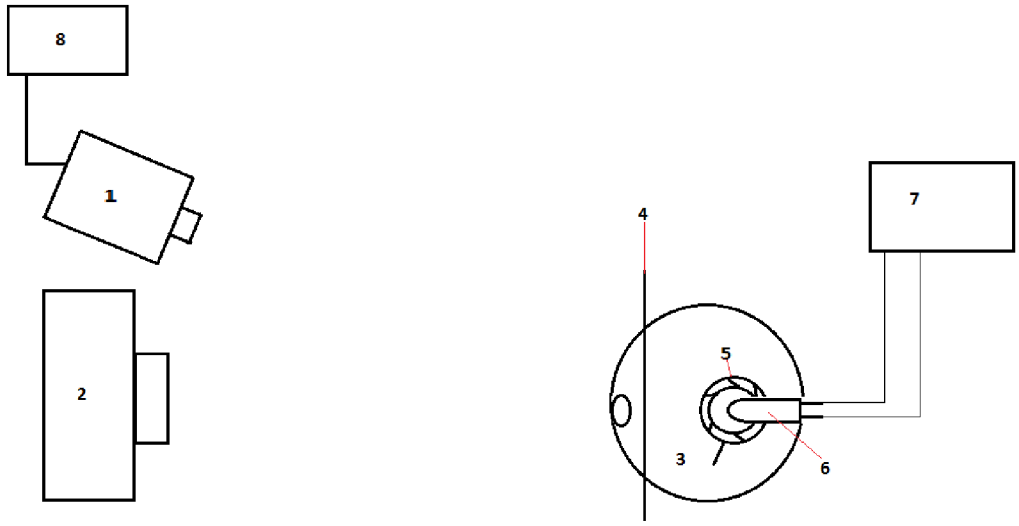
Díky jeho vysoké přesnosti byl při kalibraci použit jako referenční měřič jasu. To znamená, že fotoaparát byl kalibrován na jasy udávány spectroradiometrem.

5.5 Zdroj Keithley 2602A

Je dvoukanálový systémový přesný měřící zdroj. Výstupní výkon je 40,4 W na kanál, proudový výkon min. ± 1 pA a max. ± 3 A (10 A puls). Napěťový výkon je min ± 1 μV a max. ± 40 V. Vhodný pro I-U funkční testy a charakteristiky, testování optických zařízení jako jsou LED, displeje. [20]

6 MĚŘENÍ SÉRIE KALIBRAČNÍCH DAT

6.1 Rozmístění a zapojení měřících přístrojů a pomůcek



Obr. 6-1 Rozmístění a zapojení měřících přístrojů a pomůcek

1 – spectroradiometer, 2 – digitální fotoaparát, 3 – kulový integrátor, 4 clonící stěna, 5 – clona, 6 – světelný zdroj, 7 – zdroj el. energie, 8 – počítač.

Clonící stěna 5 byla v úloze použita, aby naměřená data fotoaparátem a spectroradiometrem nebyla ovlivněna přímým svitem světelného zdroje. Nastavováním clony 6 bylo ovlivňováno množství světla procházejícího do kulového integrátoru. Tento způsob měření byl použit proto, aby nebyly měněny parametry a vlastnosti (zejména teplota chromatičnosti) světelného zdroje v průběhu měření (např. změnou napájecího napětí).

6.2 Postup měření

Ještě před samotným měřením byly stanoveny expoziční časy fotoaparátu ve kterých se každý měřící bod prováděl. Expoziční časy: 1/1000s, 1/500s, 1/250s, 1/125s, 1/60s, 1/30s, 1/15s, 1/8s, 1/4s, 1/2s, 1s. Měření pro 11 expozičních časů bylo provedeno, aby nedocházelo k tzv. přepálení čipu. Tzn. při dlouhých expozičních časech se čip přeexponuje a výsledný obraz na fotografii je už zkreslený. Poté pro samotný výpočet byly data vybrány pro jeden expoziční čas, kde čip nebyl přeexponovaný.

Další důležitým předpokladem pro větší přesnost měření bylo vytvoření více měřících bodů. To bylo zajištěno clonou 5 , která byla v průběhu měření postupně zavírána a tím se zmenšoval světelný tok vstupující do kulového integrátoru.

Postup měření byl následující:

1) Světelný zdroj byl uveden do činnosti na své nominální hodnoty (kromě halogenové žárovky (viz. níže)).
2) Clona byla plně otevřená.
3) Spectroradiometrem byl změřen referenční jas L_V.
4) Fotoaparátem byly pořízeny fotografie pro 11 expozičních časů se záznamem na paměťovou kartu.
5) Clonou bylo zmenšeno procházející světlo do kulového integrátoru.
6) Celé měření bylo opakováno od bodu 3) do bodu 5), tak aby bylo přibližně 7 až 10 měřících bodů.

U měření halogenové žárovky byla požadována konstantní teplota chromatičnosti T_C = 2856 K. Jelikož v laboratoři byla jen halogenová žárovka s nominální teplotou chromatičnosti T_C = 2800 K, bylo nutné tuto žárovku vybudit lehce nad její nominální hodnoty. Pro kontrolu správnosti nastavené teploty chromatičnosti byl použit spectroradiometer. Žárovka byla vybuzena, poté byla změřena a dále následovala korekce až do požadované hodnoty T_C = 2856 K.

U měření kompaktní zářivky, nebyl použit zdroj elektrické energie Keithley 2602A, ale zářivka byla připojena přímo na síť 230V.

6.3 Změřená data

Zde jsou uvedeny už pouze vybrané hodnoty (z metadat) *Average R*, *Average G1*, Average *G2*, *Average B*, *EVEX* a *SENS* pro jeden expoziční čas. Tyto data byly vybrány tak, aby hodnoty *R*, *G1*, *G2*, *B* nebyly přepálené, tzn. menší něž je maximální hodnota vybuzení čipu. Citlivost pro všechna měření byla ISO 100 a clonové číslo 3,5.

Hodnota jasu L_V byla změřena spectroradiometrem a hodnoty *Average R*, *Average G1*, Average *G2*, *Average B*, *EVEX* a *SENS* byly změřeny fotoaparátem s expozičním časem 1/15s.

Tab. 6-1 Změřená data halogenové žárovky

L_V [cd.m^{-2}]	*Average R*	*Average G1*	*Average G2*	*Average B*	*EVEX*	*SENS*
309,44	0,58787578	0,80344522	0,80379963	0,40272319	183,75	0,005442
305,21	0,5804686	0,79384732	0,79417181	0,39813361	183,75	0,005442
301,04	0,57357061	0,78410339	0,78473002	0,3934027	183,75	0,005442
277,29	0,53365391	0,72807723	0,72827828	0,36707333	183,75	0,005442
184,92	0,37726265	0,50746256	0,50732809	0,26448578	183,75	0,005442
136,71	0,29484901	0,39137891	0,39080393	0,21153648	183,75	0,005442
109,67	0,24906492	0,32652014	0,32603979	0,18117407	183,75	0,005442
60,48	0,16530208	0,20836686	0,20800982	0,12791003	183,75	0,005442
27,97	0,11008318	0,12930819	0,12927929	0,09256753	183,75	0,005442
4,14	0,06970242	0,07231636	0,07249777	0,06694569	183,75	0,005442

Hodnota jasu L_V byla změřena spectroradiometrem vždy na začátku a poté na konci měření, protože zářivka byla napájena přímo ze sítě a díky kolísání napětí v síti docházelo i ke změnám změřeného referenčního jasu. Uvedená hodnota jasu v tabulce je průměrná hodnota změřená na začátku a konci měření. Hodnoty *Average R*, *Average G1*, Average *G2*, *Average B*, *EVEX* a *SENS* byly změřeny fotoaparátem s expozičním časem 1/8s.

Tab. 6-2 Změřená data zářivky

L_V [cd.m^{-2}]	*Average R*	*Average G1*	*Average G2*	*Average B*	*EVEX*	*SENS*
129,15	0,45636517	0,60110408	0,60020685	0,24733867	98	0,010204
113,8	0,40973493	0,53817272	0,53751737	0,22559628	98	0,010204
95,17	0,35460103	0,46241790	0,46160221	0,19928631	98	0,010204
71,44	0,28096819	0,36213383	0,36142057	0,16420436	98	0,010204
57,55	0,23863554	0,30360717	0,30297419	0,14448038	98	0,010204
45,81	0,20175858	0,25331119	0,25285590	0,12729751	98	0,010204
34,9	0,16918677	0,20956282	0,20901072	0,11230391	98	0,010204
25,58	0,14047264	0,16942106	0,16907704	0,09886704	98	0,010204
16,91	0,11372305	0,13242546	0,13233039	0,08621958	98	0,010204
10,06	0,09317049	0,10437529	0,10422733	0,07668712	98	0,010204

Hodnota jasu L_V byla změřena spectroradiometrem a hodnoty *Average R*, *Average G1*, Average *G2*, *Average B*, *EVEX* a *SENS* byly změřeny fotoaparátem s expozičním časem 1/8s.

Tab. 6-3 Změřená data Warm White LED

L_V [cd.m^{-2}]	*Average R*	*Average G1*	*Average G2*	*Average B*	*EVEX*	*SENS*
123,8	0,43186423	0,59951627	0,59917748	0,20674877	98	0,010204
111,89	0,39678922	0,54766834	0,54743463	0,1937295	98	0,010204
81,83	0,30687985	0,41784811	0,41731986	0,15844853	98	0,010204
50,64	0,21435793	0,28263164	0,28226820	0,12182481	98	0,010204
38,17	0,17621687	0,22834639	0,22793691	0,10690477	98	0,010204
10,3	0,09329128	0,10698587	0,10701561	0,0740775	98	0,010204
3,99	0,07448699	0,07972573	0,07978932	0,06689492	98	0,010204

Hodnota jasu L_V byla změřena spectroradiometrem a hodnoty *Average R*, *Average G1*, Average *G2*, *Average B*, *EVEX* a *SENS* byly změřeny fotoaparátem s expozičním časem 1/8s.

Tab. 6-4 Změřená data Cool White LED

L_V [cd.m^{-2}]	*Average R*	*Average G1*	*Average G2*	*Average B*	*EVEX*	*SENS*
113,76	0,33871147	0,71348810	0,71282065	0,7137261	98	0,010204
107,36	0,32303944	0,67656970	0,67589152	0,67374176	98	0,010204
86,33	0,27185482	0,55642700	0,55567646	0,55294532	98	0,010204
67,09	0,22549833	0,44599801	0,44536224	0,44046244	98	0,010204
27,63	0,12898286	0,21873994	0,21821806	0,20931828	98	0,010204
15,13	0,09895235	0,14724328	0,14703876	0,14024895	98	0,010204
11,78	0,09086329	0,12835275	0,12831336	0,12263501	98	0,010204

7 VYHODNOCENÍ KALIBRAČNÍCH DAT A VYTVOŘENÍ KALIBRAČNÍCH FUNKCÍ

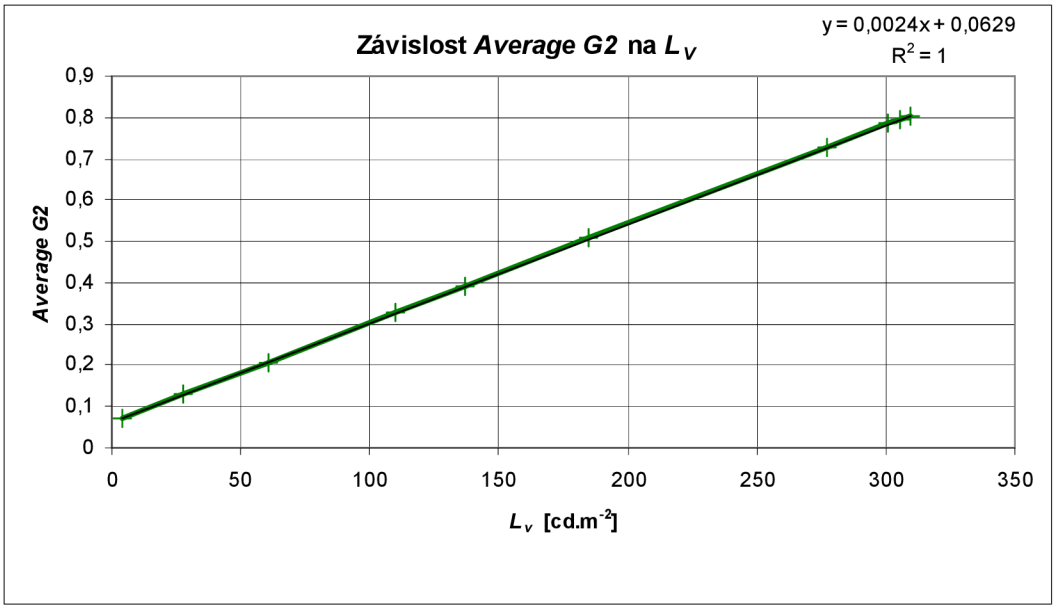
Pro všechny výpočty byl použit vždy první řádek všech tabulek.

7.1 Kalibrační funkce halogenové žárovky

Tab. 7-1 Kalibrace na halogenovou žárovku

δ_L [%]	Δ_L [cd.m^{-2}]	L_{VYP} [cd.m^{-2}]	K_2	L_{sens}	K_1	L_V [cd.m^{-2}]	L_{normG2}
0,10	0,30	309,14	1,68240023	1,68397248	0,69361743	309,44	0,805556
0,05	0,16	305,05	1,66014265	1,66095282	0,68527063	305,21	0,795404
0,01	0,03	301,01	1,63816706	1,63825968	0,67702957	301,04	0,785396
-0,08	-0,21	277,50	1,51022128	1,50901218	0,62904871	277,29	0,728396
-0,21	-0,38	185,30	1,00843808	1,00633464	0,4408753	184,92	0,506708
-0,07	-0,10	136,81	0,74453576	0,74397582	0,34190946	136,71	0,391004
-0,06	-0,07	109,74	0,59720994	0,59682414	0,2866609	109,67	0,326108
-0,08	-0,05	60,53	0,32940524	0,32913216	0,18623162	60,48	0,208052
0,78	0,22	27,75	0,15103531	0,15221274	0,11934122	27,97	0,130028
2,24	0,09	4,05	0,02202568	0,02252988	0,0709614	4,14	0,072836

Nejprve byla vynesena závislost nejsilnější ze složek *R, G1, G2, B* na změřeném jasu L_V. U halogenové žárovky byla nejsilnější složka *Average G2*.



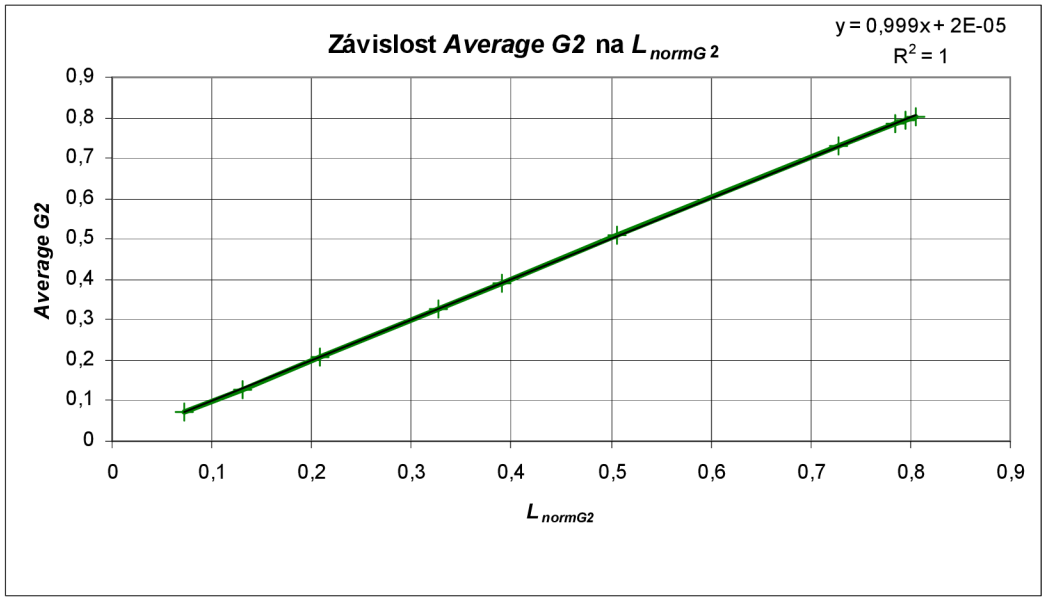
Obr. 7-1 Závislost Average G2 na L_V (HŽ)

Vynesením závislosti *Average G2* na L_V a přidáním do grafu lineární regrese, byl získán koeficient x_1 = (0,0024x + 0,0629), podle kterého byl znormován změřený jas L_V. Tím byla vytvořena hodnota L_{normG2}.

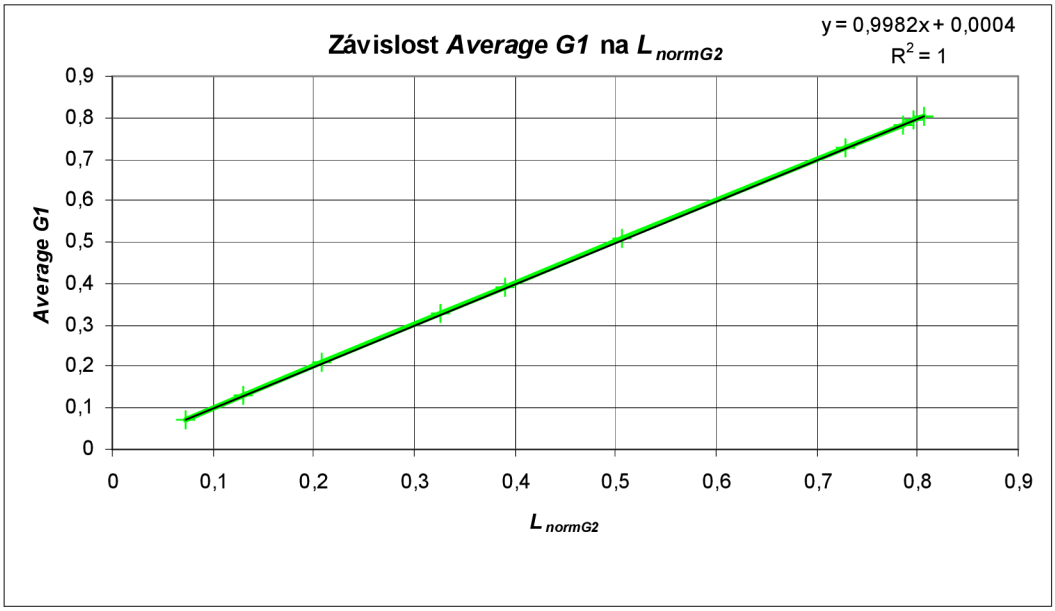
Rov. 7-1 Výpočet L_{normG2} (HŽ)

$$L_{normG2} = x_1 \cdot L_V = (0{,}0024.309{,}44) + 0{,}0629 = 0{,}805556$$

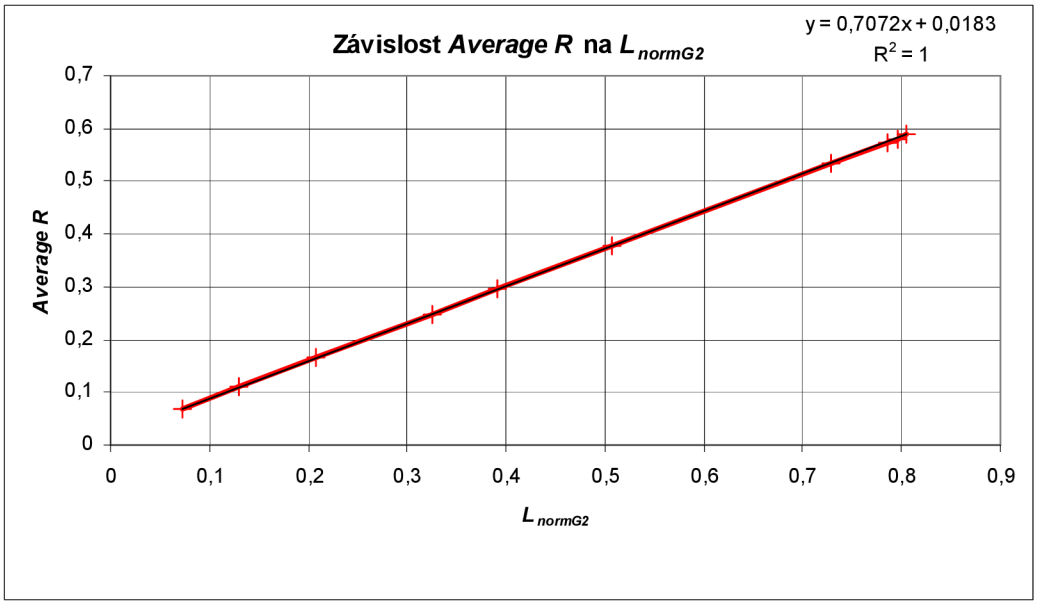
Po vypočtení L_{normG2} byly vyneseny závislosti *R, G1, G2, B* na L_{normG2}, aby byl zjištěn celkový poměr *R, G1, G2, B* v každém měřeném bodu (neboli celkové zastoupení jednotlivých barevných složek).



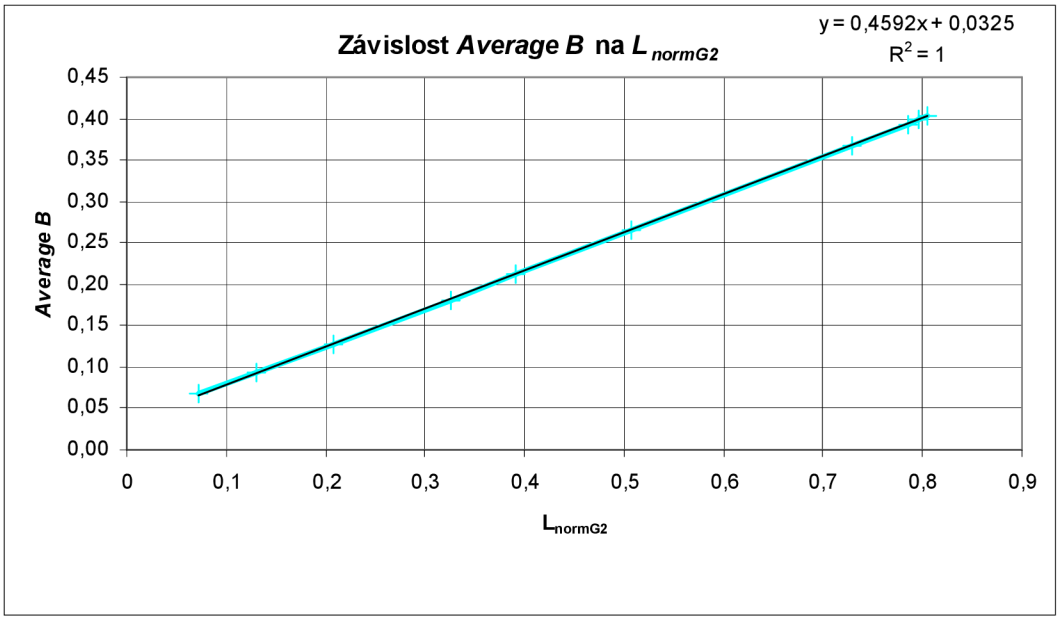
Obr. 7-2 Závislost Average G2 na L_{normG2} (HŽ)



Obr. 7-3 Závislost Average G1 na L_{normG2} (HŽ)



Obr. 7-4 Závislost Average R na L_{normG2} (HŽ)



Obr. 7-5 Závislost Average B na L_{normG2} (HŽ)

Z jednotlivých rovnicí regresí bylo vypočítáno zastoupení každé složky a dále byly tyto složky sečteny a nanormované na jedničku. Tím byl získán poměr *R, G1, G2, B*.

Tab. 7-2 Poměr R, G1, G2, B (HŽ)

	poměr *R, G1, G2, B*	
R	0,7255	0,2257
G1	0,9986	0,3106
G2	0,99902	0,3108
B	0,4917	0,1529
suma	3,2148	1,0000

Se známým poměrem *R, G1, G2, B* byl poté vypočten koeficient K_1 a L_{SENS}.

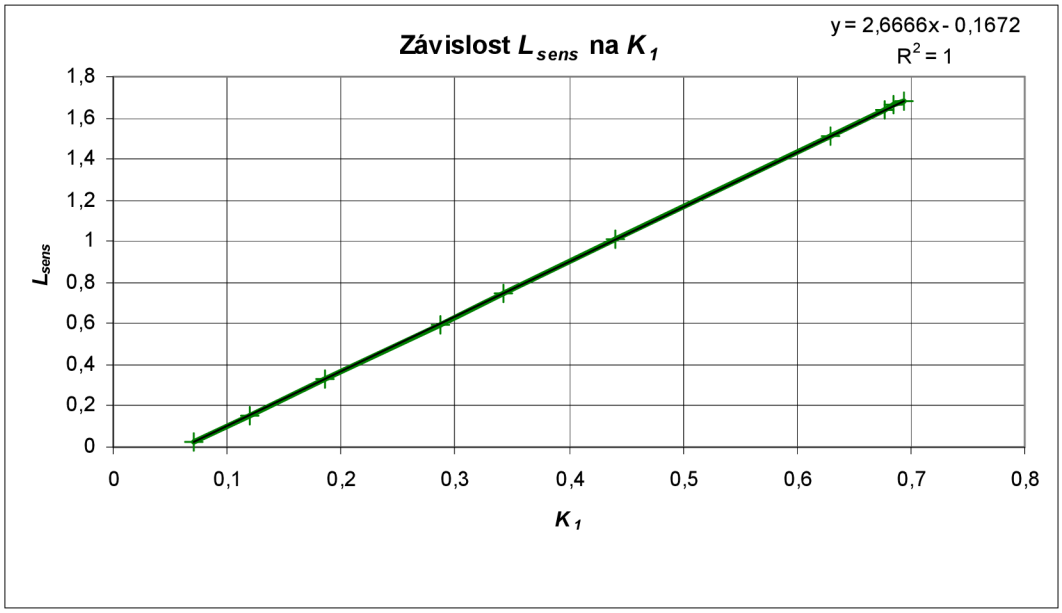
Rov. 7-2 Výpočet koeficientu K_1 (HŽ)

$$K_1 = (pomerR.AverageR) + (pomerG1.AverageG1) + (pomerG2.AverageG2) + (pomerB.AverageB) =$$
$$(0{,}2257.0{,}587876) + (0{,}3106.0{,}80344522) + (0{,}3108.0{,}80379963) + (0{,}1529.0{,}402723) = 0{,}69361743$$

Rov. 7-3 Výpočet L_{SENS} (HŽ)

$$L_{SENS} = SENS \cdot L_V = 0{,}005442.309{,}44 = 1{,}68397248$$

Aby byl výsledný jas co nejpřesnější byla potřeba ještě koeficient K_1 zkorigovat na koeficient K_2. K_2 byl vypočítán pomocí koeficientu x_2. x_2 byl získán vynesením závislosti L_{SENS} na K_1 a přidáním lineární regrese. $x_2 = (2{,}6666x - 0{,}1672)$.



Obr. 7-6 Závislost L_{SENS} na K_1 (HŽ)

Rov. 7-4 Výpočet koeficientu K_2 (HŽ)

$$K_2 = x_2.K_1 = (2{,}6666.0{,}69361743) - 0{,}1672 = 1{,}68240023$$

Rov. 7-5 Výpočet výsledného jasu L_{VYP} (HŽ)

$$L_{VYP} = EVEX.K_2 = 183{,}75.1{,}68240023 \doteq 309{,}14 \text{ cd.m}^{-2}$$

Rov. 7-6 Výpočet absolutní chyby (HŽ)

$$\Delta_L = L_V - L_{VYP} = 309{,}44 - 309{,}14 = 0{,}30 \text{ cd.m}^{-2}$$

Rov. 7-7 Výpočet relativní chyby (HŽ)

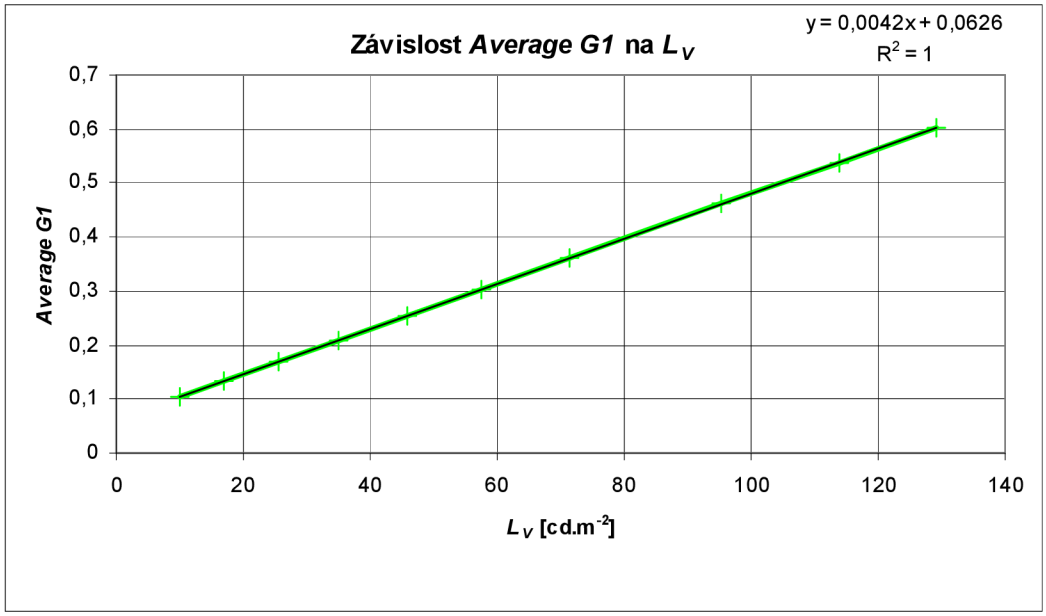
$$\delta_L = \left(\frac{\Delta_L}{L_V}\right).100 = \left(\frac{0{,}30}{309{,}44}\right)\cdot 100 = 0{,}10\ \%$$

7.2 Kalibrační funkce kompaktní zářivky

Tab. 7-3 Kalibrace na kompaktní zářivku

δ_L [%]	Δ_L [cd.m^{-2}]	L_{VYP} [cd.m^{-2}]	K_2	L_{sens}	K_1	L_{normG1}	L_V [cd.m^{-2}]
0,25	0,33	128,82	1,3145406	1,3178466	0,52283304	0,60503	129,15
0,05	0,06	113,74	1,1606337	1,1612152	0,46892708	0,54056	113,8
-0,46	-0,44	95,61	0,97558659	0,97111468	0,40411425	0,462314	95,17
-0,19	-0,14	71,58	0,73037869	0,72897376	0,31823008	0,362648	71,44
-0,13	-0,07	57,62	0,5879912	0,5872402	0,2683588	0,30431	57,55
0,46	0,21	45,60	0,46530603	0,46744524	0,22538826	0,255002	45,81
-0,53	-0,18	35,08	0,35800873	0,3561196	0,18780734	0,20918	34,9
0,11	0,03	25,55	0,26073916	0,26101832	0,15373863	0,170036	25,58
0,98	0,17	16,74	0,17085792	0,17254964	0,12225768	0,133622	16,91
0,32	0,03	10,03	0,10232481	0,10265224	0,09825394	0,104852	10,06

Nejprve byla vynesena závislost nejsilnější ze složek *R, G1, G2, B* na změřeném jasu L_V. U kompaktní zářivky byla nejsilnější složka *Average G1*.



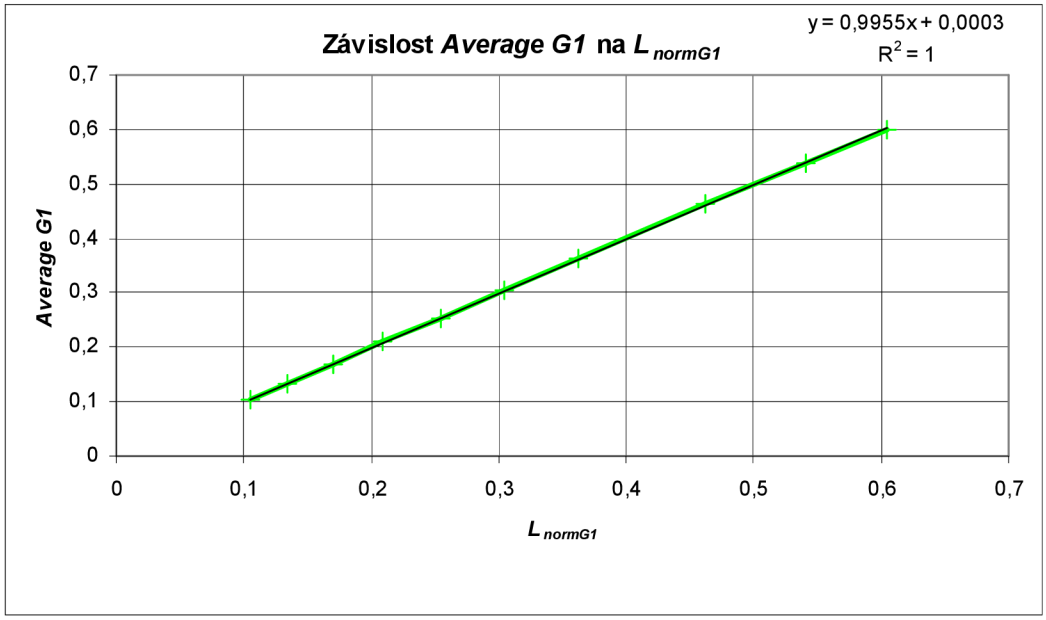
Obr. 7-7 Závislost Average G1 na L_V (KZ)

Vynesením závislosti *Average G1* na L_V a přidáním do grafu lineární regrese, byl získán koeficient x_1 = (0,0042x + 0,0626), podle kterého byl znormován změřený jas L_V. Tím byla vytvořena hodnota L_{normG1}.

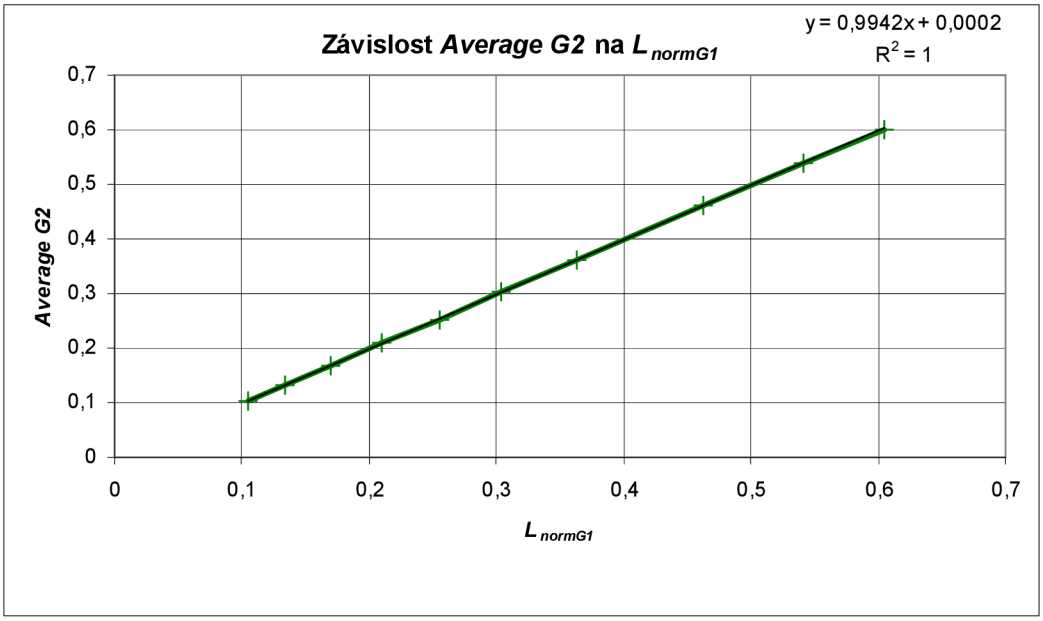
Rov. 7-8 Výpočet L_{normG1} (KZ)

$$L_{normG1} = x_1 \cdot L_V = (0{,}0042.129{,}15) + 0{,}0626 = 0{,}60503$$

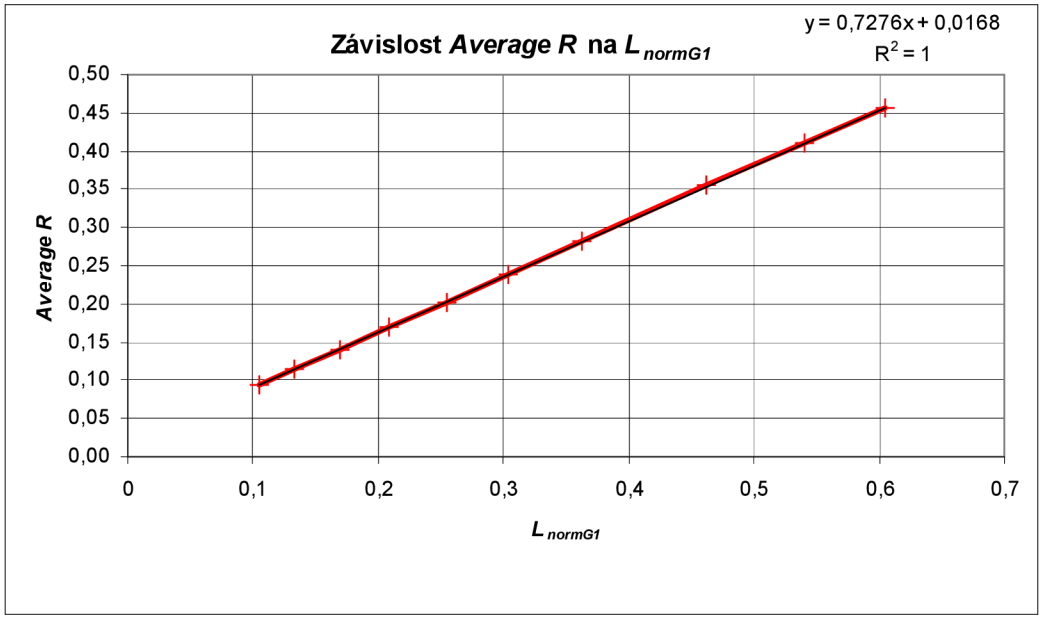
Po vypočtení L_{normG1} byly vyneseny závislosti *R, G1, G2, B* na L_{normG1}, aby byl zjištěn celkový poměr *R, G1, G2, B* v každém měřeném bodu (neboli celkové zastoupení jednotlivých barevných složek).



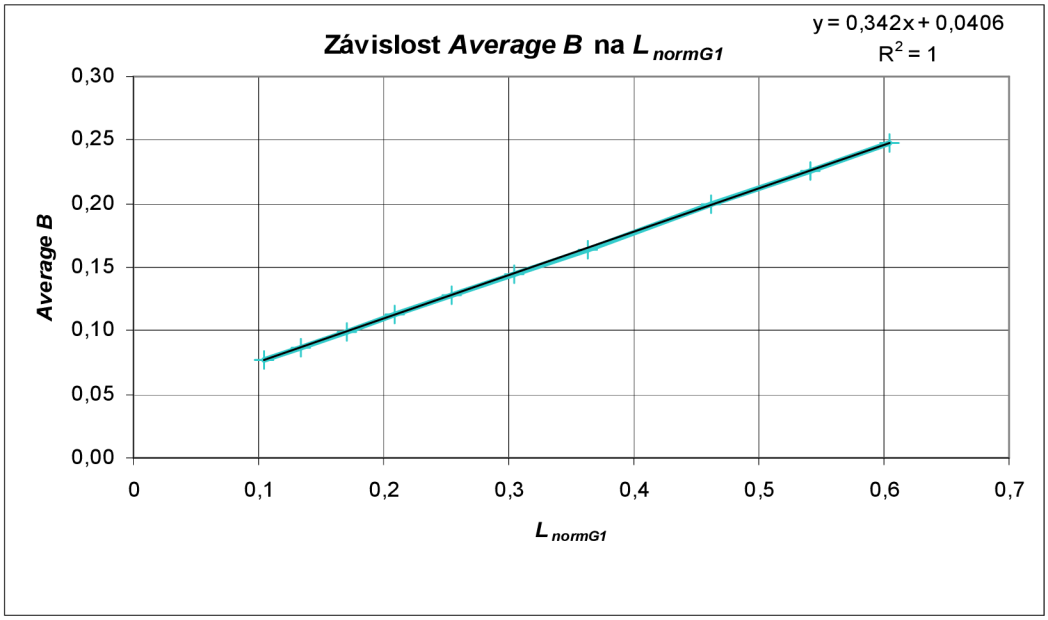
Obr. 7-8 Závislost Average G1 na L_{normG1} (KZ)



Obr. 7-9 Závislost Average G2 na L_{normG1} (KZ)



Obr. 7-10 Závislost Average R na L_{normG1} (KZ)



Obr. 7-11 Závislost Average B na L_{normG1} (KZ)

Z jednotlivých rovnicí regresí bylo vypočítáno zastoupení každé složky a dále byly tyto složky sečteny a nanormované na jedničku. Tím byl získán poměr *R, G1, G2, B*.

Tab. 7-4 Poměr R, G1, G2, B (KZ)

	poměr *R, G1, G2, B*	
R	0,7444	0,2388
G1	0,9958	0,3195
G2	0,9944	0,3190
B	0,3826	0,1227
suma	3,1172	1,0000

Se známým poměrem *R, G1, G2, B* byl poté vypočten koeficient K_1 a L_{SENS}.

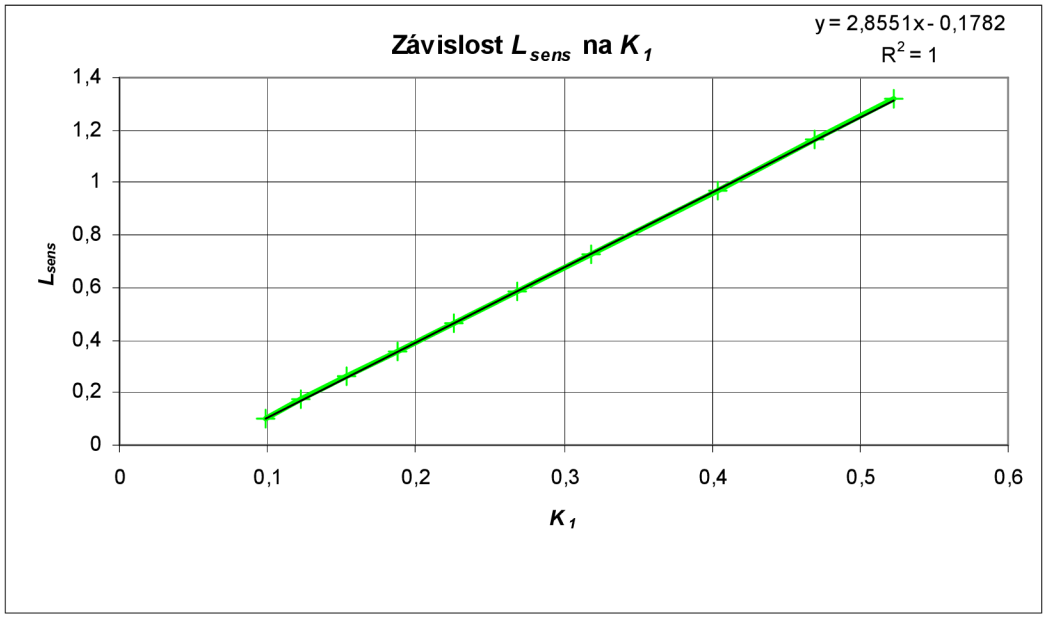
Rov. 7-9 Výpočet koeficientu K_1 (KZ)

$$K_1 = (pomerR.AverageR) + (pomerG1.AverageG1) + (pomerG2.AverageG2) + (pomerB.AverageB) =$$
$$(0{,}2388.0{,}456365) + (0{,}3195.0{,}60110408) + (0{,}3190.0{,}60020685) + (0{,}1227.0{,}247339) = 0{,}52283304$$

Rov. 7-10 Výpočet L_{SENS} (KZ)

$$L_{SENS} = SENS \cdot L_V = 0{,}010204.129{,}15 = 1{,}3178466$$

Aby byl výsledný jas co nejpřesnější byla potřeba ještě koeficient K_1 zkorigovat na koeficient K_2. K_2 byl vypočítán pomocí koeficientu x_2. x_2 byl získán vynesením závislosti L_{SENS} na K_1 a přidáním lineární regrese. $x_2 = (2{,}8551x - 0{,}1782)$.



Obr. 7-12 Závislost L_{SENS} na K_1 (KZ)

Rov. 7-11 Výpočet koeficientu K_2 (KZ)

$$K_2 = x_2.K_1 = (2{,}8551.0{,}52283304) - 0{,}1782 = 1{,}3145406$$

Rov. 7-12 Výpočet výsledného jasu L_{VYP} (KZ)

$$L_{VYP} = EVEX.K_2 = 98.1{,}3145406 \doteq 128{,}82 \text{ cd.m}^{-2}$$

Rov. 7-13 Výpočet absolutní chyby (KZ)

$$\Delta_L = L_V - L_{VYP} = 129{,}15 - 128{,}82 = 0{,}33 \text{ cd.m}^{-2}$$

Rov. 7-14 Výpočet relativní chyby (KZ)

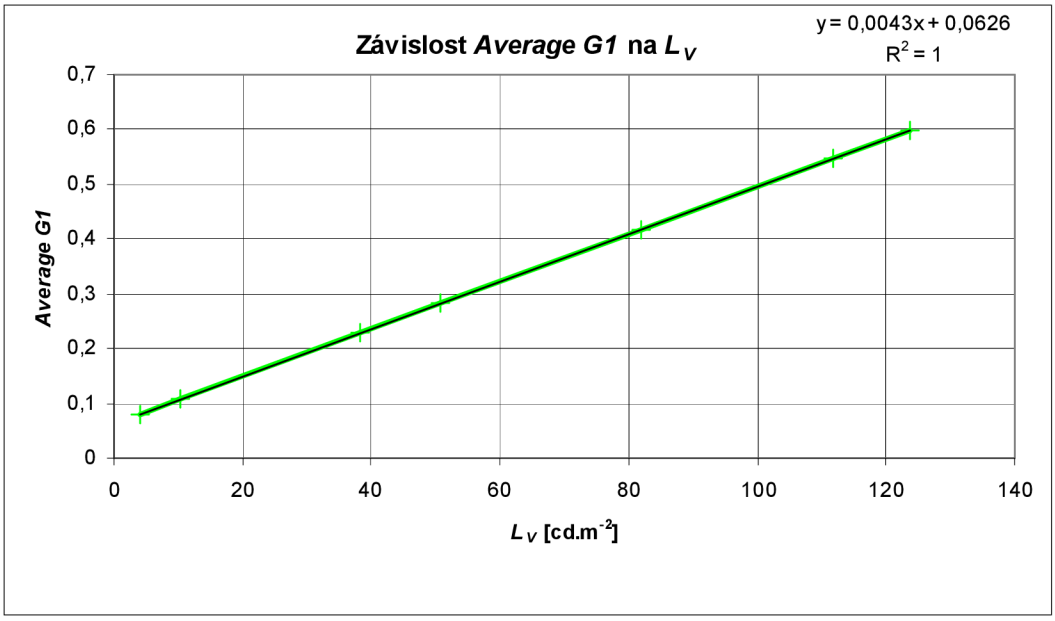
$$\delta_L = \left(\frac{\Delta_L}{L_V}\right).100 = \left(\frac{0{,}33}{129{,}15}\right)\cdot 100 = 0{,}25\ \%$$

7.3 Kalibrační funkce Warm White LED

Tab. 7-5 Kalibrace na Warm White LED

δ_L [%]	Δ_L [cd.m^{-2}]	L_{VYP} [cd.m^{-2}]	K_2	L_{sens}	K_1	L_{normG1}	Lv [cd.m^{-2}]
0,04	0,05	123,75	1,26275216	1,2632552	0,51875146	0,59494	123,8
0,02	0,02	111,87	1,14153766	1,14172556	0,47495851	0,543727	111,89
-0,05	-0,04	81,87	0,83538178	0,83499332	0,36434907	0,414469	81,83
-0,19	-0,09	50,73	0,51770263	0,51673056	0,24957644	0,280352	50,64
0,04	0,01	38,16	0,38934889	0,38948668	0,2032042	0,226731	38,17
0,50	0,05	10,25	0,10457897	0,1051012	0,10032117	0,10689	10,3
0,54	0,02	3,97	0,04049383	0,04071396	0,07716819	0,079757	3,99

Nejprve byla vynesena závislost nejsilnější ze složek *R, G1, G2, B* na změřeném jasu L_V. U Warm White LED diody byla nejsilnější složka *Average G1*.



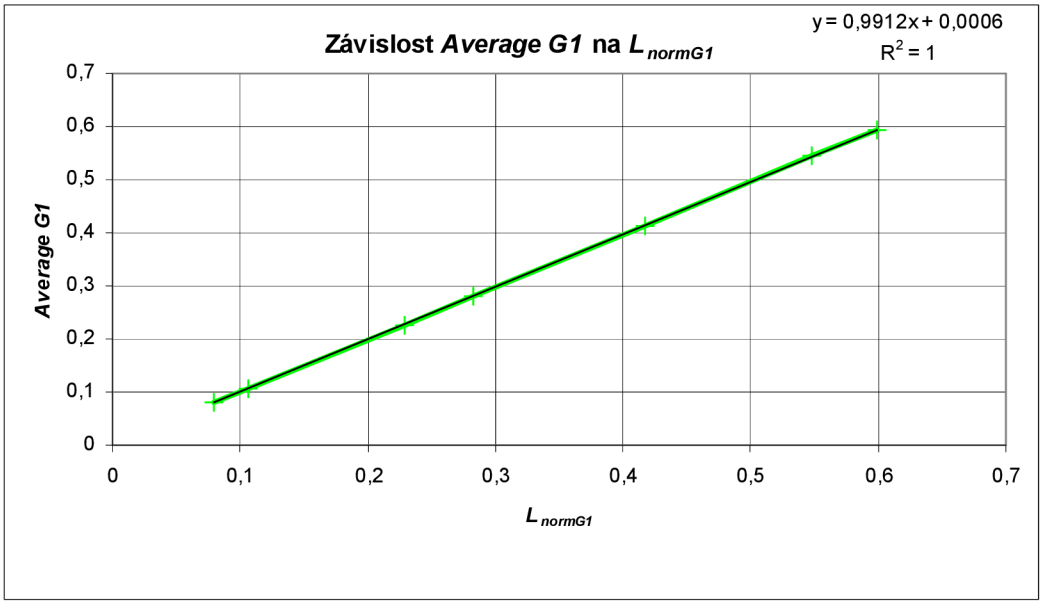
Obr. 7-13 Závislost Average G1 na L_V (WWL)

Vynesením závislosti *Average G1* na L_V a přidáním do grafu lineární regrese, byl získán koeficient x_1 = (0,0043x + 0,0626), podle kterého byl znormován změřený jas L_V. Tím byla vytvořena hodnota L_{normG1}.

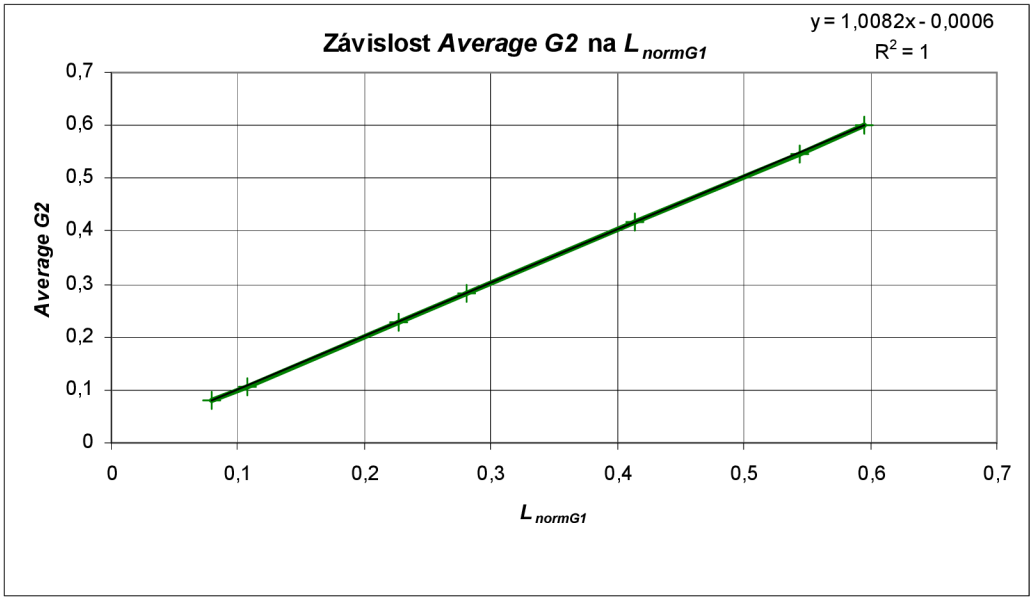
Rov. 7-15 Výpočet L_{normG1} (WWL)

$$L_{normG1} = x_1 \cdot L_V = (0{,}0043.123{,}8) + 0{,}0626 = 0{,}59494$$

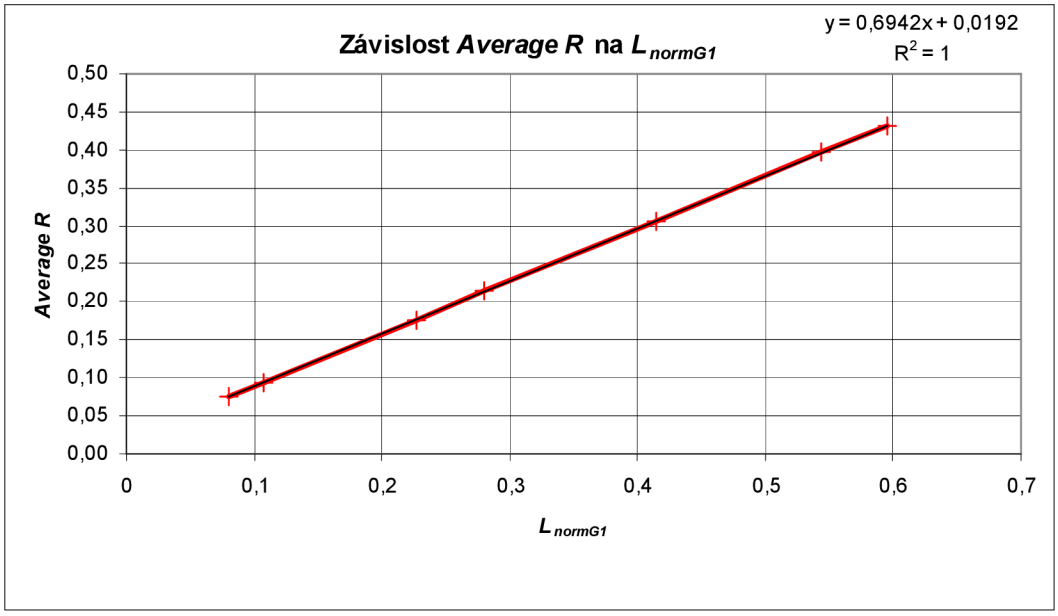
Po vypočtení L_{normG1} byly vyneseny závislosti *R, G1, G2, B* na L_{normG1}, aby byl zjištěn celkový poměr *R, G1, G2, B* v každém měřeném bodu (neboli celkové zastoupení jednotlivých barevných složek).



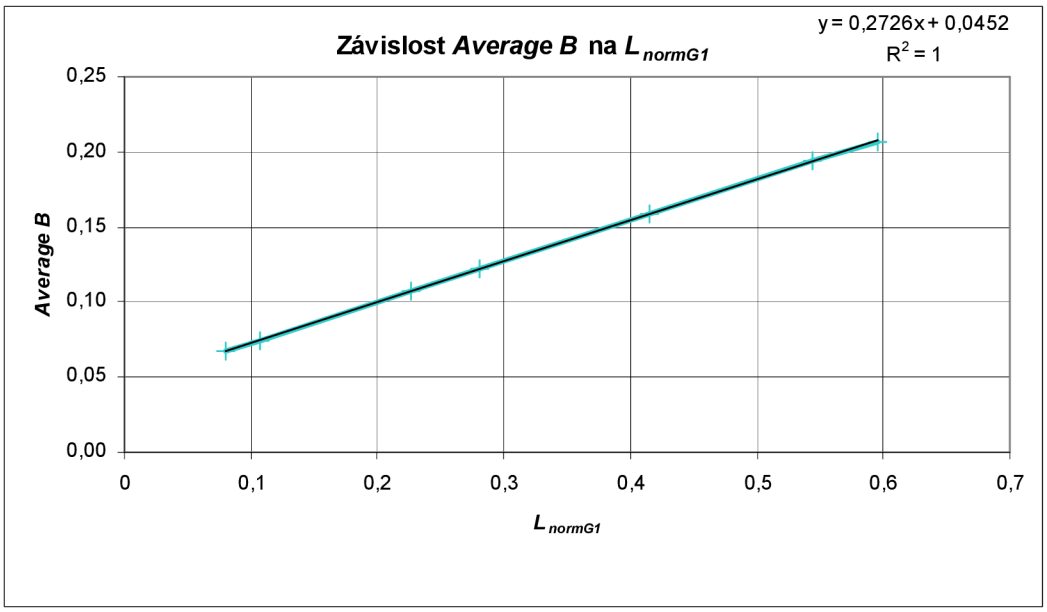
Obr. 7-14 Závislost Average G1 na L_{normG1} (WWL)



Obr. 7-15 Závislost Average G2 na L_{normG1} (WWL)



Obr. 7-16 Závislost Average R na L_{normG1} (WWL)



Obr. 7-17 Závislost Average B na L_{normG1} (WWL)

Z jednotlivých rovnicí regresí bylo vypočítáno zastoupení každé složky a dále byly tyto složky sečteny a nanormované na jedničku. Tím byl získán poměr *R, G1, G2, B*.

Tab. 7-6 Poměr R, G1, G2, B (WWL)

	poměr *R, G1, G2, B*	
R	0,7134	0,2354
G1	0,9918	0,3273
G2	1,0076	0,3325
B	0,3178	0,1049
suma	3,0306	1,0000

Se známým poměrem *R, G1, G2, B* byl poté vypočten koeficient K_1 a L_{SENS}.

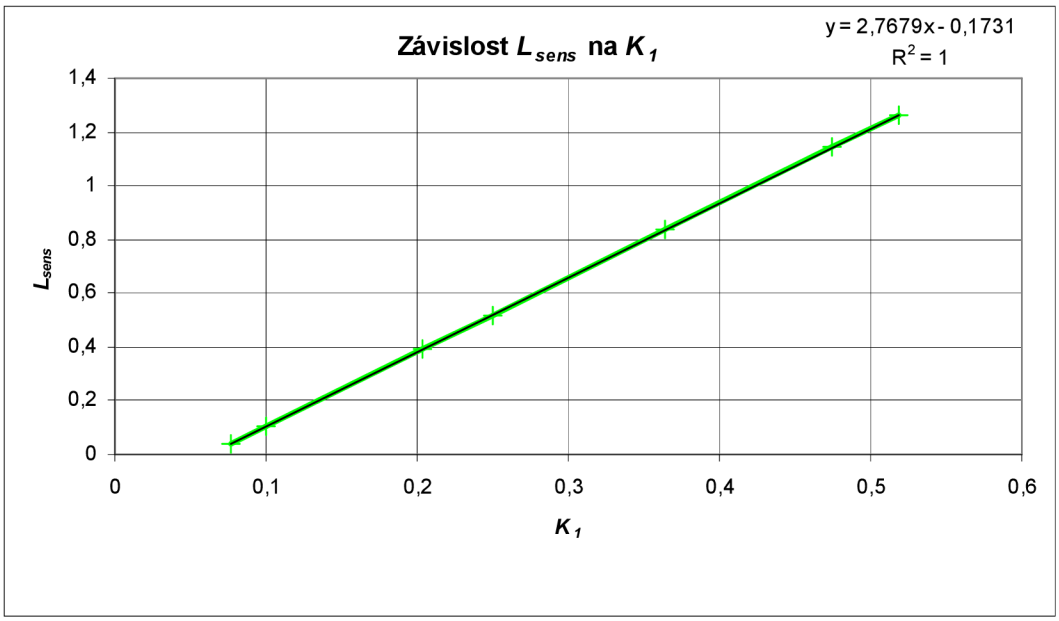
Rov. 7-16 Výpočet koeficientu K_1 (WWL)

$$K_1 = (pomerR.AverageR) + (pomerG1.AverageG1) + (pomerG2.AverageG2) + (pomerB.AverageB) =$$
$$(0{,}2354.0{,}43186423) + (0{,}3273.0{,}59951627) + (0{,}3325.0{,}59917748) + (0{,}1049.0{,}20674877) = 0{,}51875146$$

Rov. 7-17 Výpočet L_{SENS} (WWL)

$$L_{SENS} = SENS \cdot L_V = 0{,}010204.123{,}8 = 1{,}2632552$$

Aby byl výsledný jas co nejpřesnější byla potřeba ještě koeficient K_1 zkorigovat na koeficient K_2. K_2 byl vypočítán pomocí koeficientu x_2. x_2 byl získán vynesením závislosti L_{SENS} na K_1 a přidáním lineární regrese. $x_2 = (2{,}7679x - 0{,}1731)$.



Obr. 7-18 Závislost L_{SENS} na K_1 (WWL)

Rov. 7-18 Výpočet koeficientu K_2 (WWL)

$$K_2 = x_2.K_1 = (2{,}7679.0{,}51875146) - 0{,}1731 = 1{,}26275216$$

Rov. 7-19 Výpočet výsledného jasu L_{VYP} (WWL)

$$L_{VYP} = EVEX.K_2 = 98.1{,}26275216 \doteq 123{,}75 \text{ cd.m}^{-2}$$

Rov. 7-20 Výpočet absolutní chyby (WWL)

$$\Delta_L = L_V - L_{VYP} = 123{,}80 - 123{,}75 = 0{,}05 \text{ cd.m}^{-2}$$

Rov. 7-21 Výpočet relativní chyby (WWL)

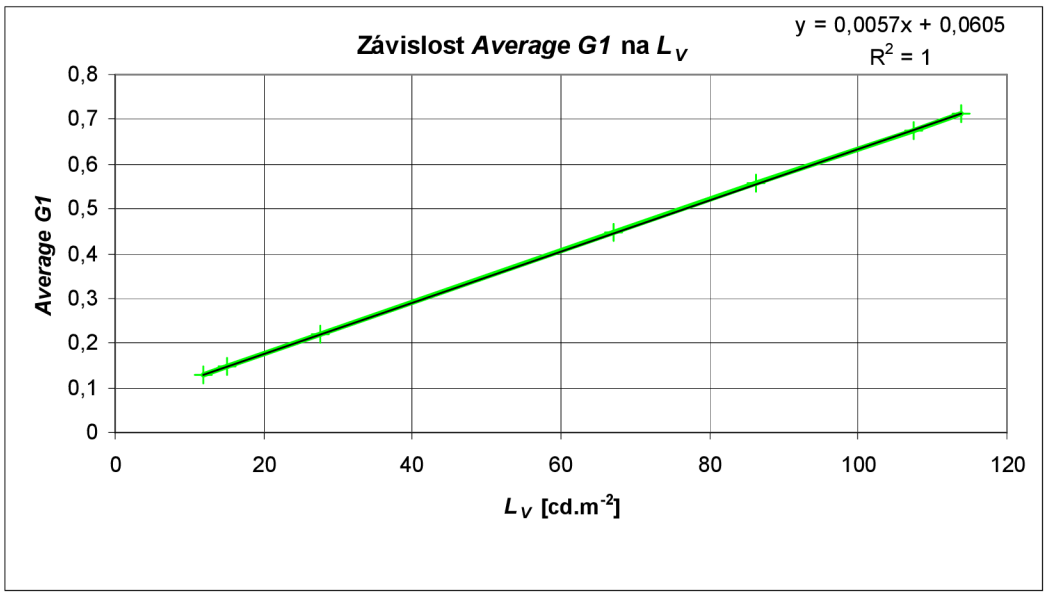
$$\delta_L = \left(\frac{\Delta_L}{L_V}\right).100 = \left(\frac{0{,}05}{123{,}80}\right)\cdot 100 = 0{,}04\ \%$$

7.4 Kalibrační funkce Cool White LED

Tab. 7-7 Kalibrace na Cool White LED

δ_L [%]	Δ_L [cd.m^{-2}]	L_{VYP} [cd.m^{-2}]	K_2	L_{sens}	K_1	L_{normG1}	Lv [cd.m^{-2}]
-0,08	-0,09	113,85	1,16170008	1,16080704	0,66357482	0,708932	113,76
0,09	0,09	107,27	1,09456136	1,09550144	0,62858851	0,672452	107,36
-0,03	-0,03	86,36	0,88118457	0,88091132	0,51739686	0,552581	86,33
0,01	0,01	67,08	0,68452884	0,68458636	0,41491862	0,442913	67,09
0,81	0,22	27,41	0,27965688	0,28193652	0,20393793	0,217991	27,63
-0,11	-0,02	15,15	0,15455027	0,15438652	0,13874428	0,146741	15,13
-1,37	-0,16	11,94	0,12185364	0,12020312	0,12170591	0,127646	11,78

Nejprve byla vynesena závislost nejsilnější ze složek *R, G1, G2, B* na změřeném jasu L_V. U Cool White LED diody byla nejsilnější složka *Average G1*.



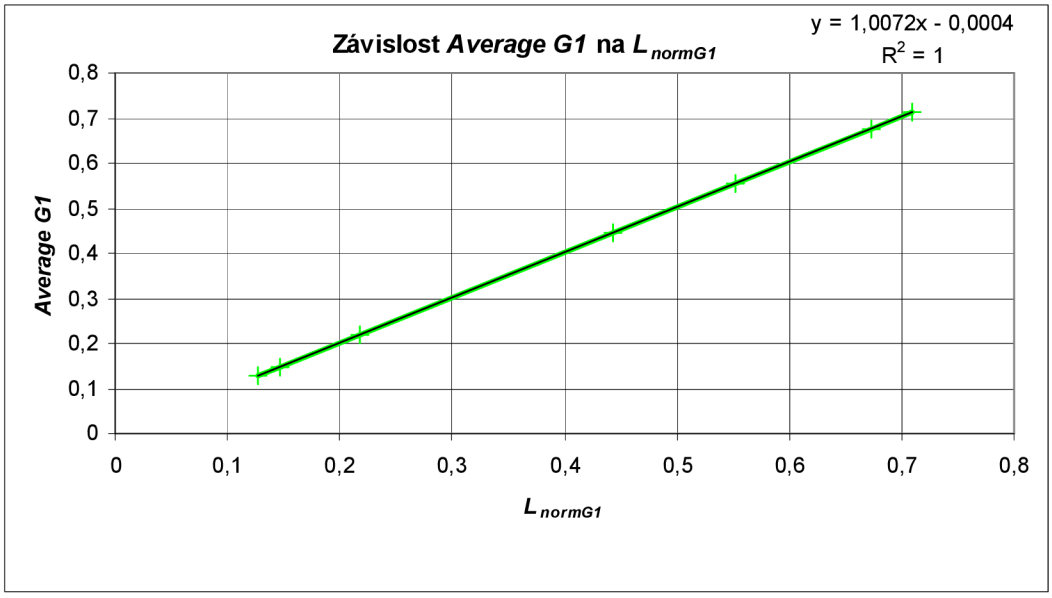
Obr. 7-19 Závislost Average G1 na L_V (CWL)

Vynesením závislosti *Average G1* na L_V a přidáním do grafu lineární regrese, byl získán koeficient x_1 = (0,0057x + 0,0605), podle kterého byl znormován změřený jas L_V. Tím byla vytvořena hodnota L_{normG1}.

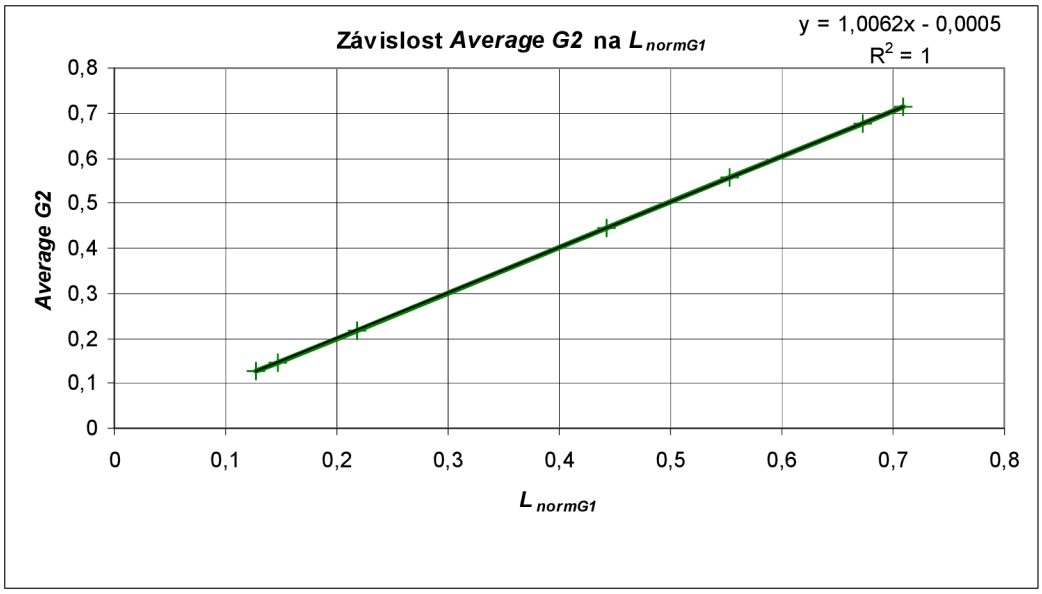
Rov. 7-22 Výpočet L_{normG1} (CWL)

$$L_{normG1} = x_1 \cdot L_V = (0{,}0057.113{,}76) + 0{,}0605 = 0{,}708932$$

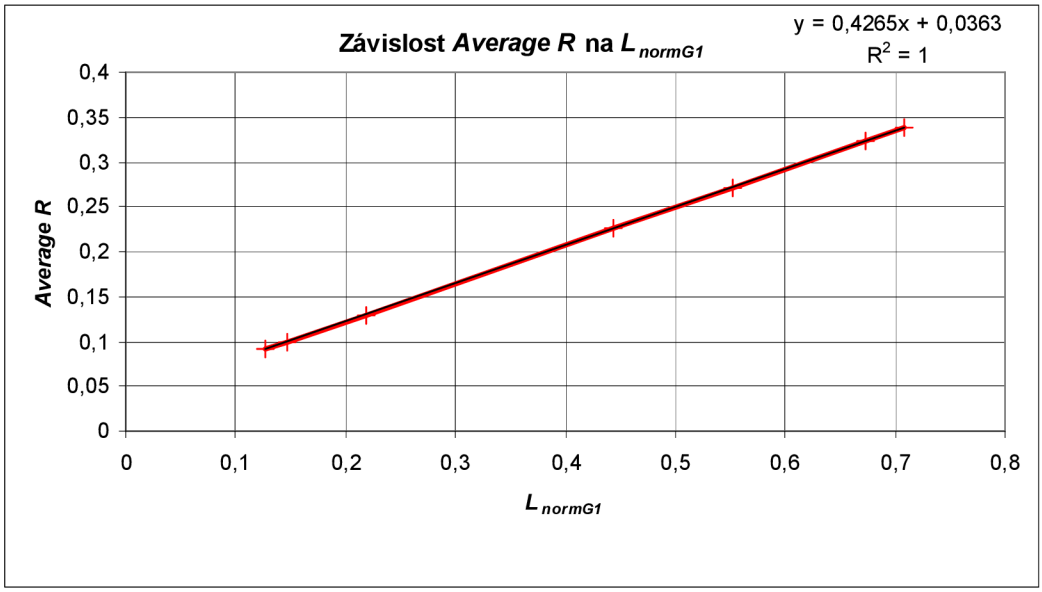
Po vypočtení L_{normG1} byly vyneseny závislosti *R, G1, G2, B* na L_{normG1}, aby byl zjištěn celkový poměr *R, G1, G2, B* v každém měřeném bodu (neboli celkové zastoupení jednotlivých barevných složek).



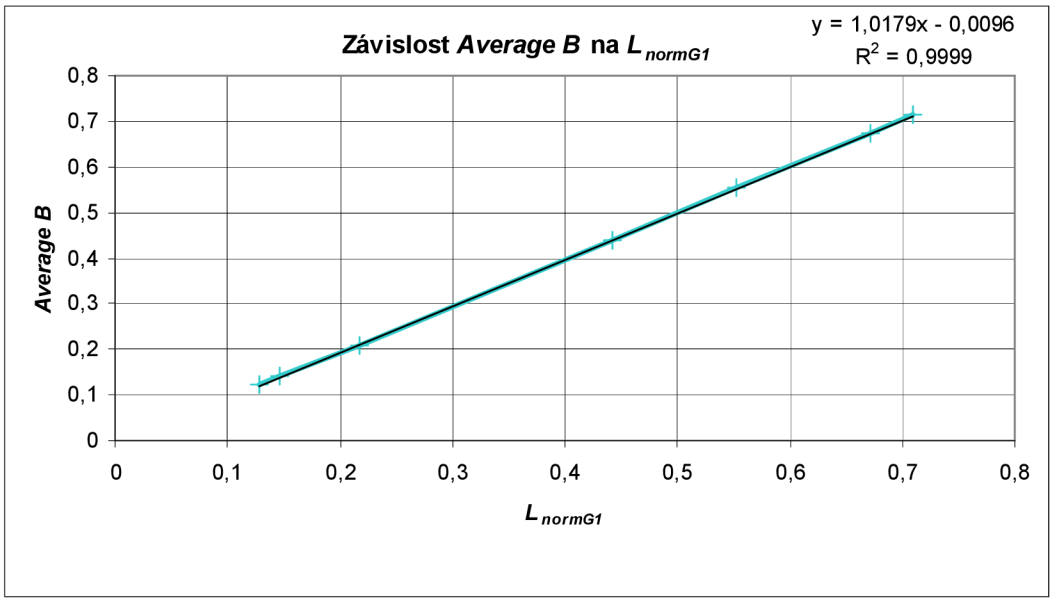
Obr. 7-20 Závislost Average G1 na L_{normG1} (CWL)



Obr. 7-21 Závislost Average G2 na L_{normG1} (CWL)



Obr. 7-22 Závislost Average R na L_{normG1} (CWL)



Obr. 7-23 Závislost Average B na L_{normG1} (CWL)

Z jednotlivých rovnicí regresí bylo vypočítáno zastoupení každé složky a dále byly tyto složky sečteny a nanormované na jedničku. Tím byl získán poměr *R, G1, G2, B*.

Tab. 7-8 Poměr R, G1, G2, B (CWL)

	poměr *R, G1, G2, B*	
R	0,4628	0,1329
G1	1,0068	0,2890
G2	1,0057	0,2887
B	1,0083	0,2894
suma	3,4836	1,0000

Se známým poměrem *R, G1, G2, B* byl poté vypočten koeficient K_1 a L_{SENS}.

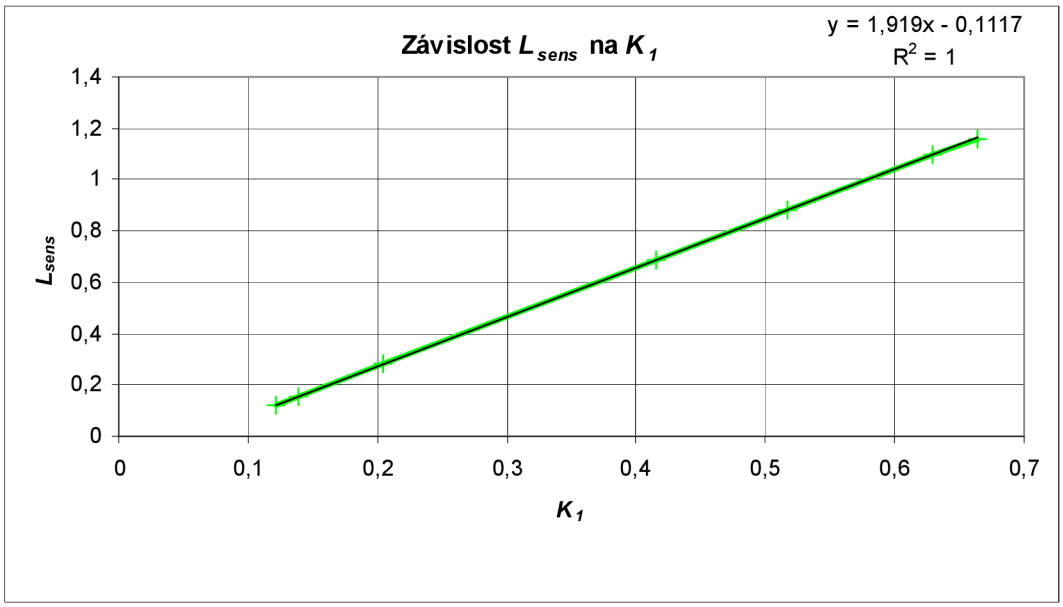
Rov. 7-23 Výpočet koeficientu K_1 (CWL)

$$K_1 = (pomerR.AverageR) + (pomerG1.AverageG1) + (pomerG2.AverageG2) + (pomerB.AverageB) =$$
$$(0{,}1329.0{,}33871147) + (0{,}2890.0{,}71348810) + (0{,}2887.0{,}71282064) + (0{,}2894.0{,}71372610) = 0{,}66357482$$

Rov. 7-24 Výpočet L_{SENS} (CWL)

$$L_{SENS} = SENS \cdot L_V = 0{,}010204.113{,}85 = 1{,}16080704$$

Aby byl výsledný jas co nejpřesnější byla potřeba ještě koeficient K_1 zkorigovat na koeficient K_2. K_2 byl vypočítán pomocí koeficientu x_2. x_2 byl získán vynesením závislosti L_{SENS} na K_1 a přidáním lineární regrese. $x_2 = (1{,}919x - 0{,}1117)$.



Obr. 7-24 Závislost L_{SENS} na K_1 (CWL)

Rov. 7-25 Výpočet koeficientu K_2 (CWL)

$$K_2 = x_2.K_1 = (1{,}919.0{,}66357482) - 0{,}1117 = 1{,}16170008$$

Rov. 7-26 Výpočet výsledného jasu L_{VYP} (CWL)

$$L_{VYP} = EVEX.K_2 = 98.1{,}16170008 \doteq 113{,}85 \text{ cd.m}^{-2}$$

Rov. 7-27 Výpočet absolutní chyby (CWL)

$$\Delta_L = L_V - L_{VYP} = 113{,}76 - 123{,}85 = -0{,}09 \text{ cd.m}^{-2}$$

Rov. 7-28 Výpočet relativní chyby (CWL)

$$\delta_L = \left(\frac{\Delta_L}{L_V}\right).100 = \left(\frac{-0{,}09}{113{,}76}\right)\cdot 100 = -0{,}08\ \%$$

7.5 Výsledné kalibrační funkce pro výpočet jasu

Pro halogenovou žárovku

Rov. 7-29 Obecná rovnice pro výpočet koeficientu K_1 (HŽ)

$$K_1 = (0{,}2257.AverageR) + (0{,}3106.AverageG1) + (0{,}3108.AverageG2) + (0{,}1529.AverageB)$$

Rov. 7-30 Obecná rovnice pro výpočet koeficientu K_2 (HŽ)

$$K_2 = (2{,}6666.K_1) - 0{,}1672$$

Rov. 7-31 Obecná rovnice pro výpočet výsledného jasu L_{VYP} (HŽ)

$$L_{VYP} = EVEX.K_2\ (\mathrm{cd.m^{-2}})$$

Pro kompaktní zářivku

Rov. 7-32 Obecná rovnice pro výpočet koeficientu K_1 (KZ)

$$K_1 = (0{,}2388.AverageR) + (0{,}3195.AverageG1) + (0{,}3190.AverageG2) + (0{,}1227.AverageB)$$

Rov. 7-33 Obecná rovnice pro výpočet koeficientu K_2 (KZ)

$$K_2 = (2{,}8551.K_1) - 0{,}1782$$

Rov. 7-34 Obecná rovnice pro výpočet výsledného jasu L_{VYP} (KZ)

$$L_{VYP} = EVEX.K_2\ (\mathrm{cd.m^{-2}})$$

Pro Warm White LED

Rov. 7-35 Obecná rovnice pro výpočet koeficientu K_1 (WWL)

$$K_1 = (0{,}2354.AverageR) + (0{,}3273.AverageG1) + (0{,}3325.AverageG2) + (0{,}1049.AverageB)$$

Rov. 7-36 Obecná rovnice pro výpočet koeficientu K_2 (WWL)

$$K_2 = (2{,}7679.K_1) - 0{,}1731$$

Rov. 7-37 Obecná rovnice pro výpočet výsledného jasu L_{VYP} (WWL)

$$L_{VYP} = EVEX.K_2 \text{ (cd.m}^{-2}\text{)}$$

Pro Cool White LED

Rov. 7-38 Obecná rovnice pro výpočet koeficientu K_1 (CWL)

$$K_1 = (0{,}1329.AverageR) + (0{,}2890.AverageG1) + (0{,}2887.AverageG2) + (0{,}2894.AverageB)$$

Rov. 7-39 Obecná rovnice pro výpočet koeficientu K_2 (CWL)

$$K_2 = (1{,}919.K_1) - 0{,}1117$$

Rov. 7-40 Obecná rovnice pro výpočet výsledného jasu L_{VYP} (CWL)

$$L_{VYP} = EVEX.K_2 \text{ (cd.m}^{-2}\text{)}$$

7.6 Porovnání kalibračních funkcí

Po výpočtu kalibračních funkcí pro každý ze světelných zdrojů, byla dále vyzkoušena širší využitelnost jednotlivých kalibrací:

1) Výpočet jasu kompaktní zářivky pomocí kalibrační funkce na výpočet jasu halogenové žárovky a výpočet odchylky od referenční hodnoty.
2) Výpočet jasu Cool White LED pomocí kalibrační funkce na výpočet jasu Warm White LED a výpočet odchylky od referenční hodnoty.

Výpočet jasu kompaktní zářivky pomocí kalibrační funkce na výpočet jasu halogenové žárovky a výpočet odchylky od referenční hodnoty

Hodnoty *R, G1, G2, B a EVEX* byly vzaty z dat pro kompaktní zářivku (*Tab. 6-2*) a funkce na výpočet jasu byla vzata pro halogenovou žárovku (*Rov. 7-29*, *Rov. 7-30* a *Rov. 7-31*).

Rov. 7-41 Výpočet koeficientu K_1 (KZpHŽ)

$$K_1 = (0{,}2257.AverageR) + (0{,}3106.AverageG1) + (0{,}3108.AverageG2) + (0{,}1529.AverageB) =$$
$$(0{,}2257.0{,}45636517) + (0{,}3106.0{,}60110408) + (0{,}3108.0{,}60020685) + (0{,}1529.0{,}24733867) =$$
$$0{,}51406692$$

Rov. 7-42 Výpočet koeficientu K_2 (KZpHŽ)

$$K_2 = (2{,}6666.K_1) - 0{,}1672 = (2{,}6666.0{,}51406692) - 0{,}1672 = 1{,}20361085$$

Rov. 7-43 Výpočet výsledného jasu L_{VYP} (KZpHŽ)

$$L_{VYP} = EVEX.K_2 = 98.1{,}20361085 \doteq 117{,}95 \text{ cd.m}^{-2}$$

Rov. 7-44 Výpočet absolutní chyby (KZpHŽ)

$$\Delta_L = L_V - L_{VYP} = 129{,}15 - 117{,}95 = 11{,}20 \text{ cd.m}^{-2}$$

Rov. 7-45 Výpočet relativní chyby (KZpHŽ)

$$\delta_L = \left(\frac{\Delta_L}{L_V}\right).100 = \left(\frac{11{,}20}{129{,}15}\right)\cdot 100 = 8{,}67 \ \%$$

Výpočet jasu Cool White LED pomocí výsledné funkce na výpočet jasu Warm White LED a výpočet odchylky od referenční hodnoty

Hodnoty *R, G1, G2, B a EVEX* byly vzaty z dat pro Cool White LED (*Tab. 6-4*) a funkce na výpočet jasu byla vzata pro Warm White LED (*Rov. 7-35*, *Rov. 7-36* a *Rov. 7-37*).

Rov. 7-46 Výpočet koeficientu K_1 (CWLpWWL)

$$K_1 = (0{,}2354.AverageR) + (0{,}3273.AverageG1) + (0{,}3325.AverageG2) + (0{,}1049.AverageB) =$$
$$(0{,}2354.0{,}33871147) + (0{,}3273.0{,}71348810) + (0{,}3325.0{,}71282065) + (0{,}1049.0{,}7137261) =$$
$$0{,}62514007$$

Rov. 7-47 Výpočet koeficientu K_2 (CWLpWWL)

$$K_2 = (2{,}7679.K_1) - 0{,}1731 = (2{,}7679.0{,}62514007) - 0{,}1731 = 1{,}5572252$$

Rov. 7-48 Výpočet výsledného jasu L_{VYP} (CWLpWWL)

$$L_{VYP} = EVEX.K_2 = 98.1{,}5572252 \doteq 152{,}61 \text{ cd.m}^{-2}$$

Rov. 7-49 Výpočet absolutní chyby (CWLpWWL)

$$\Delta_L = L_V - L_{VYP} = 113{,}76 - 152{,}61 = -38{,}85 \text{ cd.m}^{-2}$$

Rov. 7-50 Výpočet relativní chyby (CWLpWWL)

$$\delta_L = \left(\frac{\Delta_L}{L_V}\right).100 = \left(\frac{-38{,}85}{113{,}76}\right)\cdot 100 = -34{,}15 \ \%$$

8 ZÁVĚR

8.1 Závěry práce a její přínos

Když na začátku práce byl stanoven jako hlavní cíl práce nalezení funkcí pro výpočet jasu pomocí digitálního fotoaparátu, tak je nutno říct, že úkol byl splněn. Byly nalezeny funkce (*kap 7.5*) pro výpočet jasu všech čtyř světelných zdrojů. Všechny grafické závislosti, které byly spojeny s digitálním fotoaparátem měly lineární charakter, což tento problém patřičně zjednodušuje.

U kalibrace na halogenovou žárovku se vyskytla maximální absolutní chyba výpočtu (odchylka od referenční hodnoty) Δ_L = 0,30 cd.m^{-2} a maximální relativní chyba δ_L = 2,24 %. U kalibrace na kompaktní zářivku se vyskytla maximální absolutní chyba výpočtu Δ_L = -0,44 cd.m^{-2} a maximální relativní chyba δ_L = 0,98 %. U kalibrace na Warm White LED se vyskytla maximální absolutní chyba výpočtu Δ_L = -0,09 cd.m^{-2} a maximální relativní chyba δ_L = 0,54 %. U kalibrace na Cool White LED se vyskytla maximální absolutní chyba výpočtu Δ_L = -0,16 cd.m^{-2} a maximální relativní chyba δ_L = -1,37 %. Tyto chyby lze považovat za velice malé a tedy celou kalibraci za dostatečně přesnou a použitelnou.

Při výpočtu jasu např. kompaktní zářivky pomocí kalibrační funkce na halogenovou zářivku byla vypočtena absolutní chyba výpočtu Δ_L = 11,20 cd.m^{-2}, což odpovídá relativní chybě δ_L = 8,67 %. Při výpočtu jasu např. Cool White LED pomocí kalibrační funkce na Warm White LED byla vypočtena absolutní chyba výpočtu Δ_L = -38,85 cd.m^{-2}, což odpovídá relativní chybě δ_L = -34,15 %. Z těchto chyb vyplývá, že pro každý světelný zdroj je potřeba udělat vlastní kalibraci, aby byla zaručena dostatečná přesnost. Při provedené kalibraci pro každý světelný zdroj, by v budoucnu stačilo vzít odpovídající kalibraci pro vybraný světelný zdroj, vyfotit tento zdroj a poté výsledný jas vypočítat.

Všechny nalezené kalibrační funkce nevychází z počáteční nulové hodnoty. To znamená, že použitý fotoaparát Canon 450D EOS i při absolutní tmě udává malé hodnoty *R*, *G*, *B* (tzv. offset).

Vytvořené kalibrační funkce jsou použitelné výhradně pro přímo měřené světelné zdroje, jelikož byly na tyto zdroje kalibrované. Například, při výpočtu jasu stěny (v budově) osvětlené halogenovou žárovkou s použitím kalibrační funkce přímo na halogenovou žárovku, dojde ve výpočtu k relativně velké chybě. Tato chyba vznikne, protože spektrum halogenové žárovky odrážející se od stěny není stejné, jako spektrum přímo vyzařované z halogenové žárovky. To, že tyto dvě spektra nejsou stejné způsobuje odrazivost daného povrchu.

Ukázalo se, aby byl výpočet jasu pomocí digitálního fotoaparátu možný, jednodušší a přesnější, je potřeba použít fotoaparát, který ukládá fotografie ve formátu RAW. Malou nevýhodou je skutečnost, že podporu toho formátu mají přístroje vyšší kategorie i cenové třídy. Levné kompaktní fotoaparáty na tento výpočet tedy použít nelze. Nicméně lepší digitální fotoaparát je pořád levnější záležitostí, něž přesný speciální přístroj určený k měření jasu.

Jedním z poznatků byla skutečnost, že sériově vyráběné halogenové žárovky snesou bez problému vyšší teplotu chromatičnosti (resp. vyšší napájecí napětí a proud) o 56 K. Další poznatek byl fakt, že při napájení kompaktní zářivky přímo z elektrické sítě, docházelo k jasovým poklesům a to až o 0,44 cd.m^{-2}. Tyto poklesy byly způsobeny kolísáním napětí v síti, proto ve výpočtech kalibrační funkce kompaktní zářivky byl použit aritmetický průměr změřeného

referenčního jasu na začátku a konci měření, což mělo za následek částečnou eliminaci chyby měření.

Dalším přínosem této práce bylo pochopení funkce a principu digitálního fotoaparátu. Hlavně znalost jeho základních parametrů (citlivost, clonové číslo, expoziční čas a expoziční hodnota). Už jen základní znalost těchto parametrů, může člověku pomoci s lepším nastavováním fotoaparátu, potažmo jeho lepším fotografickým umem.

8.2 Význam a využití dosažených výsledků

Hlavní využitelnost těchto kalibračních funkcí je ve výpočtu jasů světelných zdrojů bez nutnosti použít speciálního a drahého měřícího přístroje. Stačí vlastnit zásobu kalibrační funkcí pro různé světelné zdroje. Měřený světelný zdroj vyfotografovat, z metadat zjistit potřebné hodnoty jako jsou R, G, B a $EVEX$. Z těchto hodnot vypočíst potřebné koeficienty K_1, K_2 a dále už vypočíst hledaný jas světelného zdroje L_{VYP}.

8.3 Návrh dalšího postupu

Výpočtem jasu kompaktní zářivky pomocí kalibrační funkce na halogenovou zářivku a výpočtem jasu Cool White LED pomocí kalibrační funkce na Warm White LED byly stanoveny poměrně velké relativní chyby výpočtu (δ_L = 8,67 %; δ_L = -34,15 %). Z čehož lze usoudit, že fotoaparát nevnímá světlo stejně jako člověk (podle spektrální citlivosti lidského oka), ale jinak. Z tohoto důvodu vznikají tyto velké chyby ve výpočtu. Kdyby byly měřeny dva různé světelné zdroje a poté by byl jejich jas vypočten pomocí jedné kalibrační funkce, byla by relativní chyba výpočtu tím menší, čím více by se spektra těchto dvou světelných zdrojů podobala. Proto by dalším návrhem postupu mělo být přizpůsobení spektrální citlivosti digitálního fotoaparátu, na spektrální citlivost lidského oka.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] MIŠKAŘÍK, Stanislav. *Moderní zdroje světla*. 1. vydání. Praha: Státní nakladatelství státní literatury, 1979. ISBN 04-509-79.

[2] Světelné zdroje: Světelné zdroje pro interiéry aneb jak nahradit klasickou žárovku. MELČ, Antonín. *Světlo*: *Časopis pro světelnou a osvětlovací techniku* [online]. 1. číslo. 2009 [cit. 2012-05-1]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=38557

[3] Základy světelné techniky (4): Základy fotometrie (1. část). HABEL, Jiří. *Světlo*: *Časopis pro světelnou a osvětlovací techniku* [online]. 3. číslo. 2009 [cit. 2012-05-1]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39195.pdf

[4] Základy světelné techniky (4): Základy fotometrie (1. část). HABEL, Jiří. *Světlo*: *Časopis pro světelnou a osvětlovací techniku* [online]. 3. číslo. 2009 [cit. 2012-05-1]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=39195

[5] Chipincamera.jpg. In: *Wikipedia*: *the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 18.1.2008 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Chipincamera.jpg

[6] Digitální fotoaparát. In: *Wikipedia*: *the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 11.4.2012 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Digitální_fotoaparát

[7] Popis základních parametrů: Základní parametry. *Fotoaparáty-foťáky* [online]. [cit. 2012-05-1]. Dostupné z: http://www.fotoaparaty-fotaky.cz/zakladni-parametry/

[8] Clonové číslo. In: *Wikipedia*: *the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 20.1.2011 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Clonové_číslo

[9] Expoziční čas. In: *Wikipedia*: *the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 8.5.2012 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Expoziční_čas

[10] Expozice (fotografie). In: *Wikipedia*: *the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 8.5.2012 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Expozice_(fotografie)

[11] PIHAN, Roman. Tipy a triky: Vše o formátu RAW – 1.díl. *Fotoaparáty-foťáky* [online]. 2008, 19.3.2008 [cit. 2012-05-1]. Dostupné z: http://www.digimanie.cz/art_doc-87481D92051B776BC1257410006AAA3F.html

[12] O LumiDISPu. BAXANT, Petr. *LumiDISP* [online]. 2011, 27.3.2011 [cit. 2012-05-1]. Dostupné z: http://www.lumidisp.eu/?section=about

[13] Halogenová žárovka. In: *Wikipedia*: *the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 27.2.2012 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Halogenová_žárovka

[14] Kompaktní zářivka. In: *Wikipedia*: *the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 10.12.2011 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Kompaktní_zářivka

[15] Zářivka. In: *Wikipedia*: *the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 18.1.2012 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Zářivka

[16] LED. In: *Wikipedia*: *the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 4.3.2012 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/LED

[17] Kulový integrátor. In: *Wikipedia*: *the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 16.3.2012 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Kulový_integrátor

[18] Canon EOS 450D. PHOTOEXTRACT.COM. *Photoextract* [online]. 2004 [cit. 2012-05-1]. Dostupné z: http://www.photoextract.com/f/canon-eos-digital-rebel-xsi

[19] CS-1000A/S/T. *Konica Minolta* [online]. 2008 [cit. 2012-05-1]. Dostupné z: http://www.konicaminolta.com/instruments/products/display/spectroradiometer/cs1000ast/index.html

[20] Model 2601A/2602A Systémový přesný měřicí zdroj. *Teste*: *Testovací Technika s.r.o.* [online]. 2009 [cit. 2012-05-1]. Dostupné z: http://www.teste.cz/?produkt=28