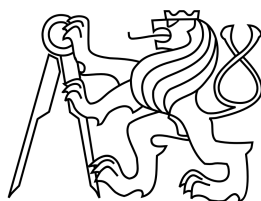


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA MĚŘENÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vývoj a analýza fotometrických parametrů RGB
LED stěny

Autor: Bc. Martin Jarolímek

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

Praha, 2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student:	Bc. Martin Jarolímek
Studijní program:	Inteligentní budovy
Název tématu česky:	Vývoj a analýza fotometrických parametrů RGB LED stěny
Název tématu anglicky:	Development and Photometric Analysis of RGB LED Wall

Pokyny pro vypracování:

Vyberte vhodné světelné zdroje (LED čipy), navrhnete způsob jejich řízení a zkonstruuje model RGB LED stěny jako 2D matici samostatně adresovatelných světelných bodů zakrytých vyměnitelným difuzorem s možností volby různých vzdáleností difuzoru od LED čipů. Jako difuzor použijte průsvitné desky z několika zvolených materiálů, které jsou vhodné pro konstrukci LED stěny. Pro různé vzdálenosti difuzorů od LED čipů proveďte analýzu jasů, rovnoměrnosti jasů, chromatičnosti a subjektivního vnímání LED stěny a zvolte nejvhodnější umístění a materiál difuzoru pro dosažení optimálních fotometrických parametrů LED stěny.

Seznam odborné literatury:

- [1] ČSN EN 13032: Světlo a osvětlení - Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel, 2012.
- [2] ČSN EN ISO 11664 (011720): Kolorimetrie, 2011.
- [3] HABEL, Jiří, et al.: Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013. 624 s., ISBN 978-80-86534-21-3.

Vedoucí diplomové práce:	Ing. Marek Bálský, Ph.D. (K 13115)
Datum zadání diplomové práce:	9. února 2017
Platnost zadání do ¹ :	30. září 2018



Prof. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 9. 2. 2017

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Název práce: Vývoj a analýza fotometrických parametrů RGB LED stěny

Autor: Bc. Martin Jarolímek

Katedra (ústav): Katedra měření

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

Abstrakt Diplomová práce se zabývá vývojem RGB LED stěny s difuzorem a analýzou fotometrických parametrů takové LED stěny. Součástí vývoje LED stěny je výběr vhodných světelných zdrojů a mechanická konstrukce. Analýza fotometrických parametrů je realizována sérií měření pro jednotlivé uvažované difuzory. Je provedeno měření činitele prostupu světla a měření teploty chromatičnosti. Dvěma různými fotoaparáty jsou pořízeny jasové mapy, které jsou podrobeny jasové analýze. V rámci ní stanovena rovnoměrnost jasů a získaná data jsou zpracována statisticky. Závěrem je provedena analýza subjektivního vnímání LED stěny s difuzorem. Pomocí provedených analýz je vybrán vhodný materiál difuzoru a jeho umístění.

Klíčová slova: LED stěna, RGB LED, difuzor, jasová mapa, Raspberry Pi

Title: Development and Photometric Analysis of RGB LED Wall

Author: Bc. Martin Jarolímek

Department: Department of Measurement

Supervisor: Ing. Marek Bálský, Ph.D.

Abstract The diploma thesis deals with development of RGB LED wall with diffuser and analysis of photometric parameters of such LED wall. Part of the LED wall design is the selection of suitable light sources and mechanical structure. The analysis of photometric parameters is realized by a series of measurements for the individual diffusers considered. Measurement of light transmittance and color temperature measurement are performed. Luminance maps are captured by two different cameras, which are subject to luminance analysis. Within this, uniformity of luminance is determined and the data obtained is statistically processed. Finally, an analysis of the subjective perception of the LED wall with diffuser is performed. The appropriate diffuser material and its location are selected using the analyzes performed.

Keywords: LED wall, LED RGB, diffuser, luminance map, Raspberry Pi

Prohlášení autora práce

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vykonal 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 autora práce

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Markovi Bálskému, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích diplomové práce. Dále děkuji své rodině, přátelům a Aničce za neutuchající podporu a pevné nervy.

1	Úvod	1
2	Teoretické předpoklady pro měření parametrů LED stěny	3
2.1	Definice pojmů	3
2.1.1	Viditelné světlo	3
2.1.2	Jas	4
2.2	Světelně-technické vlastnosti materiálů	5
2.2.1	Odraz světla od materiálů	7
2.2.2	Prostup světla materiálem	8
2.3	Barevné modely a barevné prostory	9
2.3.1	Barevný prostor XYZ	9
2.3.2	Barevné prostory RGB	10
2.3.3	Barevný prostor CMYK	10
2.3.4	Barevný prostor YUV	11
2.4	Převody barevných prostorů	12
2.5	Spektrum a spektrální citlivost lidského oka	12
2.6	Přístroje použité pro analýzu parametrů	14
2.6.1	Spektrometr	14
2.6.2	Jasoměr	15
2.6.3	Fotoaparát Finepix	17
2.6.4	Fotoaparát Raspberry Pi	17

2.7	Generování jasových map fotoaparátem Raspberry Pi	18
2.7.1	Formát Y'UV420p	18
2.7.2	Postup a výpočty	19
3	RGB LED stěna	23
3.1	Co je RGB LED stěna	23
3.2	Porovnání a výběr vhodných světelných zdrojů	24
3.2.1	LED pásky	25
3.2.2	LED moduly	28
3.3	Konstrukce testovacího vzorku LED stěny	31
3.4	Testované difuzory	34
3.4.1	Corian	34
3.4.2	Plexisklo	34
3.4.3	Sklo s fólií	34
3.4.4	Sklo s mezifólií	35
4	Měření světelně-technických parametrů	37
4.1	Měření činitele prostupu světla	38
4.2	Měření teploty chromatičnosti a spektra záření	39
4.3	Jasové mapy	43
4.3.1	Jasové mapy pořízené fotoaparátem Finepix	44
4.3.2	Jasové mapy pořízené fotoaparátem Raspberry Pi	47
4.4	Jasová analýza	50
4.4.1	Měření rovnoměrnosti jasů	50
4.4.2	Histogramy difuzorů	52
4.5	Subjektivní analýza	54
4.6	Vyhodnocení výsledků měření	58
5	Závěr	61
	Literatura	63
A	Příloha - Jasové mapy pořízené fotoaparátem Finepix	i
B	Příloha - Jasové mapy pořízené fotoaparátem Raspberry Pi	xi
C	Příloha - Obrázky	xxi

KAPITOLA 1

Úvod

Cílem diplomové práce je vyvinout světelnou stěnu s RGB LED čipy. Světelnou stěnou je míněna interiérová vestavná instalace sloužící k různým reprezentativním a prezentačním účelům, která je vhodně zakomponována do interiéru budovy. Podsvícení budou zajišťovat RGB LED čipy, protože se jedná o malé bodové světelné zdroje. Vývoj RGB LED stěny bude probíhat v několika fázích.

Nejprve bude třeba vybrat vhodné světelné zdroje, tedy RGB LED čipy. Poté bude nutné vymyslet konstrukci celé RGB LED stěny. Dále bude sestaven testovací vzorek stěny s vyměnitelnými difuzory, jejichž parametry budou měřeny a analyzovány.

Důležitou součástí světelné stěny je difuzor, který má dvě funkce. Jednak zakrývá světelné zdroje a vytváří pohledový povrch stěny, zároveň rozptyluje procházející světlo. Musí mít optimální difuzní vlastnosti. Existuje několik různých materiálů, které lze pro difuzor použít. Volba správného difuzoru má zcela zásadní vliv na výsledný efekt světelné stěny, proto je jeho výběru věnována tak velká pozornost. Cílem měření světelně-technických parametrů je výběr nejvhodnějšího difuzoru.

Práce je rozčleněna do tří částí. V první budou uvedeny teoretické předpoklady, definice používaných jednotek, popis používaných barevných prostorů a převod mezi nimi. Budou vysvětleny principy použitých přístrojů a vlastnosti materiálů. V druhé části bude popsána světelná RGB LED stěna, její konstrukce a porovnání

použitelných světelných zdrojů. Bude popsán vzorek světelné stěny a jednotlivé testované difuzory. V třetí části budou popsána provedená měření a analýzy, měření činitele prostupu světla, měření rovnoměrnosti jasů a měření chromatičnosti a spektra. Nedílnou součástí analýz je subjektivní posouzení estetického vjemu. V rámci jasové analýzy budou pořízeny jasové mapy dvěma fotoaparáty se snímači CCD a CMOS. Na základě provedených měření bude vybrán nejvhodnější materiál a umístění difuzoru.

Teoretické předpoklady pro měření parametrů LED stěny

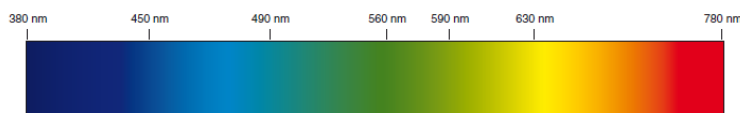
V této kapitole se budu věnovat obecným principům využitým v diplomové práci. Nejprve popíšu několik barevných prostorů, se kterými budu pracovat, a převody barevných prostorů mezi sebou. Poté popíšu použité přístroje, spektrometr, jasoměr a dva fotoaparáty, kterými budu pořizovat jasové mapy – Finepix a Raspberry Pi. Dále se zmíním o světelně-technických vlastnostech materiálů, se kterými budu pracovat.

2.1 Definice pojmů

2.1.1 Viditelné světlo

Viditelné záření je elektromagnetické záření v určité části elektromagnetického spektra, které vyvolává zrakový vjem. Světlo je viditelné záření, které je zpracováno okem pozorovatele podle jeho spektrální citlivosti. Za viditelné světlo je považováno záření v rozsahu vlnových délek 380 nm – 780 nm [1]. Záření na kratších vlnových délkách je ultrafialové, na delších vlnových délkách infračervené. Podstatnou vlastností světla je jeho barva. Pokud je světelné záření tvořené úzkým rozsahem vlnových délek, je takové záření vnímáno jako barevné a barvu určuje dominující vlnová délka. Složení viditelného záření je zobrazeno na obrázku 2.1.

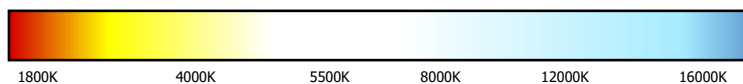
Pokud jsou naopak ve světelném záření zastoupeny všechny vlnové délky při-



Obrázek 2.1: Barvy jednotlivých vlnových délek spektra ve viditelné oblasti záření; převzato z [4]

blíže rovnoměrně, je takové světlo vnímáno jako bílé. I pro bílé světlo jsou definovány odstíny – tato vlastnost světla se označuje jako chromatičnost.

Jedním z důležitých parametrů bílého světla je teplota chromatičnosti, její jednotkou je kelvin $[K]$. Teplota chromatičnosti je taková barva, kterou by vydávalo absolutně černé těleso zahřáté na příslušnou teplotu. Nízké teploty chromatičnosti jsou označovány jako „teplé“ odstíny, vysoké teploty chromatičnosti jsou označovány jako „studené“ odstíny. Přehled teplot chromatičnosti je pro názornost na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Přehled teplot chromatičnosti a jejich odstínů; převzato z [8]

2.1.2 Jas

Jas je fotometrická veličina definovaná jako měrná jednotka svítivosti. Označuje se L a je udávána v $\frac{cd}{m^2}$. Svítivost je základní jednotka SI a vyjadřuje prostorovou hustotu světelného toku bodového zdroje. Jas je veličina, která vyjadřuje prostorovou hustotu světelného toku dopadající na plochu (nebo z plochy vystupující). Při posuzování jasu záleží na poloze pozorovatele a směru pohledu, tedy průmětu svítící plochy do roviny, jejíž normála je směr pohledu pozorovatele. Jas může být dvojího druhu. Buď se jedná o jas plochy, ze které vychází svazek paprsků, nebo o jas plochy, od které se svazek paprsků odráží. Lidské oko přímo reaguje na jas, resp. kontrast jasů [5].

Rovnoměrnost jasů se počítá pro určitou síť kontrolních bodů. Určuje se jako podíl minimálního a průměrného jasu, tedy podle vzorce:

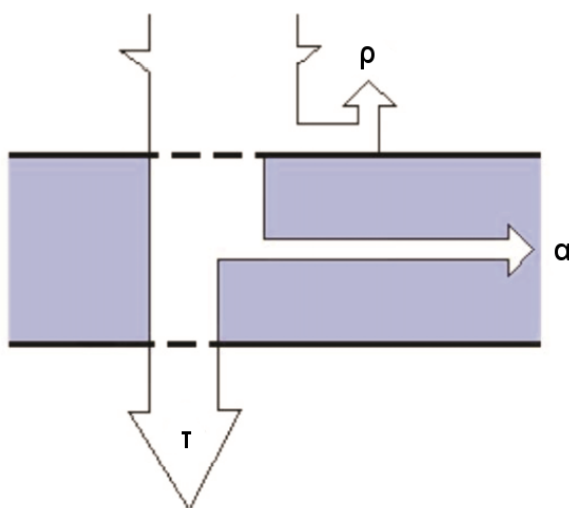
$$U = \frac{L_{min}}{L_p} \quad [-] \quad (2.1)$$

2.2 Světelně-technické vlastnosti materiálů

Znalost světelně-technických parametrů materiálů je při práci s nimi nutností. Světelně-technické vlastnosti látek charakterizují tři základní činitele: činitel odraznosti (ρ), pohltivosti (α) a prostupu (τ). Při dopadu záření na materiál udávají tyto tři činitele, jak velká část záření je odražena, pohlcena a prostoupena. Podle těchto parametrů je veškeré dopadlé záření na materiál odraženo, pohlceno a prostoupeno. Obecně se jedná se o spektrální činitele, jsou tedy závislé na vlnové délce záření. Pro zjednodušení lze uvažovat i činitele integrální, které nejsou závislé na vlnové délce a jsou konstantami. Pro činitele platí následující rovnice [5]:

$$1 = \rho + \alpha + \tau \quad [-]$$

Na obrázku 2.3 je schématicky naznačené rozdělení záření na velikosti jednotlivých činitelů. Pomocí těchto činitelů lze popsat chování různých skupin materiálů.



Obrázek 2.3: Schématické znázornění rozdělení záření na odražené, pohlcené a propuštěné (šířka šipky udává velikost příslušného činitele); převzato z [2]

U neprůsvitných materiálů nedochází k prostupu, tedy platí:

$$\rho + \alpha = 1 \quad \tau = 0 \quad [-]$$

Vzduch je materiál, kterým se šíří světlo, a je považován za dokonale propustný, tedy platí:

$$\tau = 1 \quad \rho = 0 \quad \alpha = 0 \quad [-]$$

Absolutně černé těleso pohlcuje veškeré dopadající záření, tedy platí:

$$\alpha = 1 \quad \rho = 0 \quad \tau = 0 \quad [-]$$

Žádný materiál nemůže mít činitel prostupu roven 1. U materiálů, které slouží k rozptylu, jsou všechny činitele nenulové. V tabulce 2.1 jsou uvedeny hodnoty činitelů pro vybrané průsvitné materiály. Je patrné, že hodnoty činitelů se pro podobné materiály mohou velmi lišit. V tabulce 2.2 jsou uvedeny hodnoty činitele odraznosti pro vybrané neprůsvitné materiály.

Materiál (tl. 2 – 4 mm)	Činitel [%]		
	odraznosti ρ	pohltivosti α	prostupnosti τ
Čiré sklo	6 – 8	2 – 4	90 – 92
Sklo matové leptané	6 – 11	3 – 19	75 – 91
Sklo opálové bílé	29 – 52	3 – 10	36 – 66
Sklo opalizované	13 – 28	3 – 13	59 – 84

Tabulka 2.1: Hodnoty činitelů odraznosti, prostupnosti a pohltivosti vybraných průsvitných materiálů; převzato z [3]

Materiál, povrch	Činitel odraznosti ρ [%]
Hliník matný	55 – 60
Cihly červené	cca 25
Sádra	cca 80
Omítka jemná	cca 40
Papír bílý	cca 80
Dřevo surové	30 – 50
Malba bílá	76 – 88
Malba černá	2 – 4

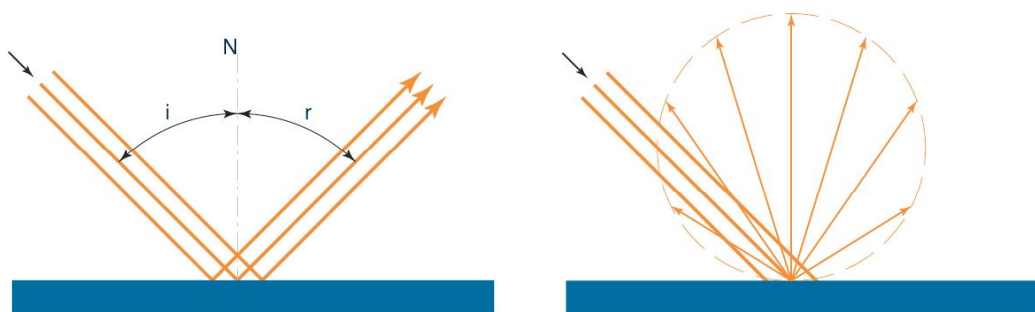
Tabulka 2.2: Hodnoty činitelů odraznosti vybraných neprůsvitných materiálů; převzato z [3]

Uvedené činitele odraznosti, pohltivosti a prostupu jsou kvantitativními parametry. Vlastnosti materiálů lze ale popsat i kvalitativně podle toho, jak materiál dopadající záření odráží a propouští.

2.2.1 Odraz světla od materiálů

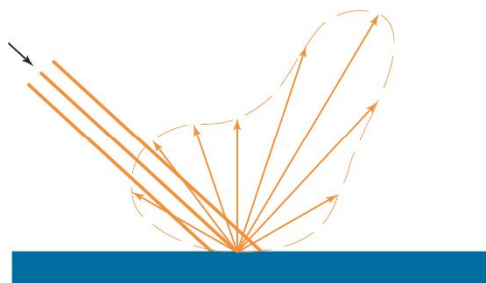
Dopadající záření se dle povrchových vlastností materiálu od neprůsvitných materiálů odráží dvojím způsobem. Dochází buď k zrcadlovému odrazu, kdy se záření odráží pod stejným úhlem, pod kterým dopadlo. Tento odraz se nazývá zrcadlový, viz obrázek 2.4. Opačnou možností je, že dochází k takovému odrazu, kdy se záření rovnoměrně rozptýlí do celého prostoru. Tento odraz se nazývá difuzní, viz obrázek 2.4. U difuzního odrazu dochází k rovnoměrnému rozptylu s maximem svítivosti v normále roviny dopadu. Svítivost v jiných úhlech se určí podle kosinového zákona [1]:

$$I_{\gamma} = I_0 \cdot \cos \gamma \quad [cd] \quad (2.2)$$



Obrázek 2.4: Zrcadlový odraz (vlevo) a difuzní odraz (vpravo); převzato z [1]

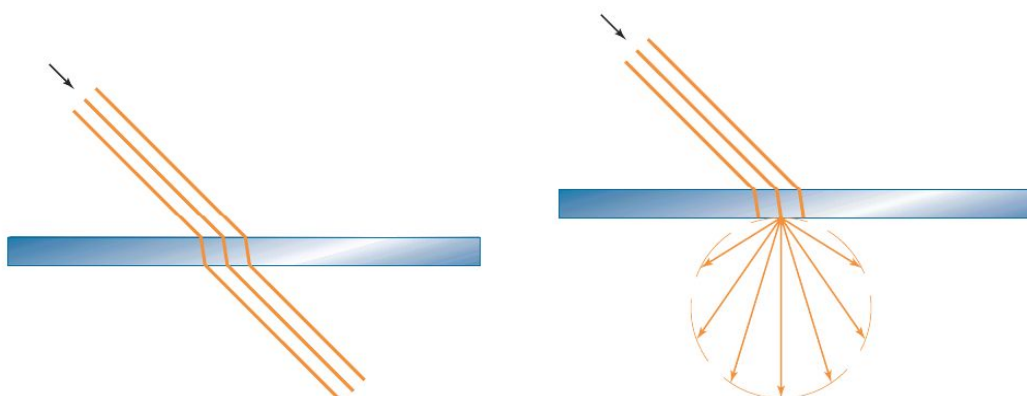
Povrchy, které dokonale difuzně rozptylují záření, tedy splňují kosinový zákon, se nazývají Lambertovy zářiče [5]. Důležitou vlastností difuzního povrchu je, že jeho jas je konstantní ve všech směrech. U většiny materiálů však běžně dochází ke smíšenému odrazu, který je tvořen kombinací zrcadlového a difuzního odrazu, viz obrázek 2.5. Zrcadlové povrchy malou část záření odráží difuzně a matné difuzní povrchy vykazují jistý zrcadlový odraz.



Obrázek 2.5: Smíšený odraz; převzato z [1]

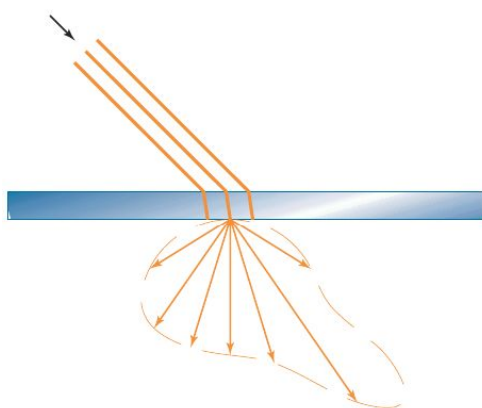
2.2.2 Prostup světla materiálem

Prostupnost lze popsat podobně jako odraznost, záleží na struktuře materiálu. Dopadající záření prostupuje podle vnitřních vlastností materiálu průsvitným materiálem dvojím způsobem. U čirých materiálů dochází k přímému prostupu, kdy úhel, pod kterým záření vystupuje, je stejný jako úhel, pod kterým záření dopadá. Kvůli rozdílným indexům lomu dochází pouze k lineárnímu posunu, nikoliv však ke změně úhlu. U difuzních materiálů dochází k difuznímu prostupu, kdy je vystupující záření rovnoměrně rozptýleno. [5] Opět dochází k rovnoměrnému rozptylu s maximem svítivosti v normále roviny vystupujícího záření. Svítivost v jiných úhlech se určí podle stejného kosinového zákona, viz 2.2.



Obrázek 2.6: Přímý prostup (vlevo) a difuzní prostup (vpravo); převzato z [1]

U většiny materiálů dochází ke smíšenému prostupu, který je tvořen kombinací přímého a difuzního prostupu, viz obrázek 2.5.



Obrázek 2.7: Smíšený prostup; převzato z [1]

Část dopadajícího záření je v běžných podmínkách vždy odražena a část pohlcena, výše uvedené obrázky pouze ilustrují ideální situace. Difuzního prostupu se využívá při konstrukci svítidel pro materiály, které mají za cíl zakrývat světelné zdroje a rozptylovat světelné záření. Takovým materiálům se obecně říká difuzor.

2.3 Barevné modely a barevné prostory

Barevný model definuje způsob práce se základními barvami, jejich mísení do výsledné barvy. Barva světla je určena vlnovou délkou záření, záleží ale také na šířce spektra záření. Kromě samotné barvy je důležitá i intenzita záření, resp. jas. Barevný model většinou definuje několik složek, ze kterých se skládají výsledné barvy, nejedná se ale o přesnou kolorimetrickou definici, takže je míchání složek relativní záležitostí. Barevný model je definován podle způsobu jeho využití a podle možností aplikace, která ho využívá. Existuje několik základních barevných modelů – např. RGB, CMYK a YUV.

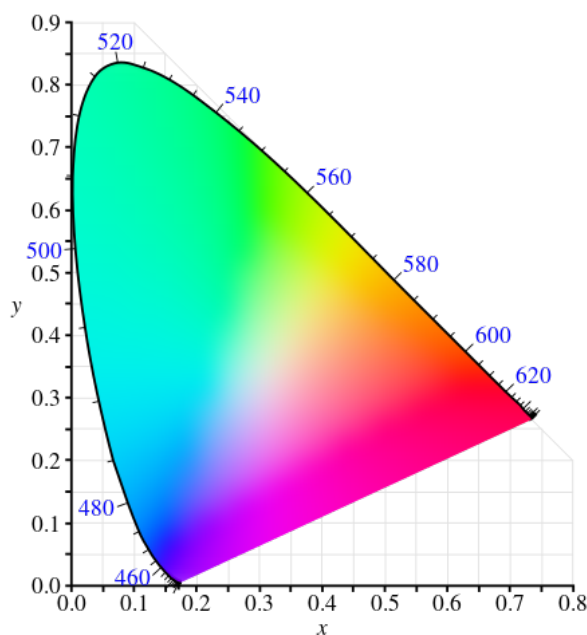
Barevný prostor vychází z barevného modelu, kdy jsou jednotlivé složky přesně popsány a kvantifikovány. Barevný prostor je tedy matematická definice sady barev. Barevné prostory je možné mezi sebou vzájemně převádět. Zobrazitelná oblast barev, kterou je možné v daném barevném prostoru zobrazit, se nazývá barevný gamut. Barvy mimo tento gamut není možné v daném barevném prostoru zobrazit.

2.3.1 Barevný prostor XYZ

Jedná se o jeden z prvních barevných prostorů, které definovala Mezinárodní komise pro osvětlování CIE v roce 1931. Vychází z vnímání barev a vytvořen byl experimentálně. X, Y a Z jsou trichromatické složky, kdy Y vyjadřuje přímo jasovou složku a barvu definují odvozené parametry x a y . Ty lze vypočítat z trichromatických složek. Z odvozených parametrů x , y a jasové složky Y vychází chromatický diagram CIE 1931, viz obrázek 2.8. Chromatický diagram je velmi široce využíván pro zobrazování barevného gamutu. Parametry x a y lze z trichromatických složek jednoduše vypočítat podle vzorců [7]:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (2.3)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (2.4)$$



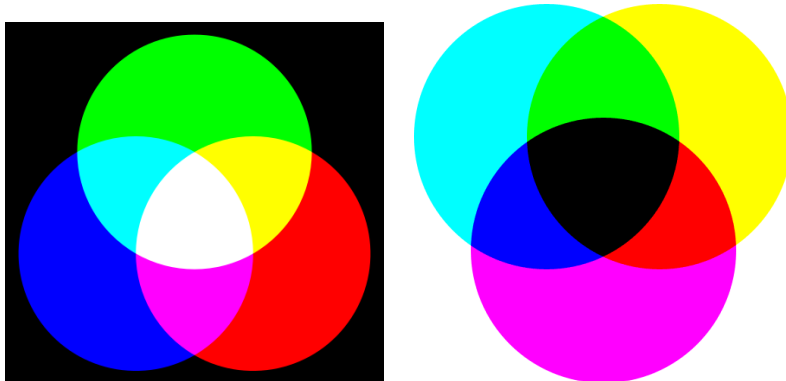
Obrázek 2.8: Chromatický diagram CIE 1931; převzato z [9]

2.3.2 Barevné prostory RGB

Existuje velké množství barevných prostorů založených na modelu RGB. Barevné prostory RGB využívají aditivního míchání tří složek barev – červené (R), zelené (G) a modré (B), viz obrázek 2.9. Mícháním různých poměrů červené, zelené a modré barvy je možné dosáhnout všech barev. Dále je pro barevné prostory RGB definována hodnota gamma a bílý bod, tedy barva s RGB hodnotami (255, 255, 255). Jedná se např. o iluminant D65, který má teplotu chromatičnosti 6504 K [7]. Využívá se pro displeje, monitory, televize, projektory, fotoaparáty a další zobrazovací zařízení.

2.3.3 Barevný prostor CMYK

Barevný prostor CMYK využívá subtraktivní míchání barev, kdy se barevné složky vzájemně odčítají, viz obrázek 2.9. Čtyři základní barvy modelu jsou: azurová (C), purpurová (M), žlutá (Y) a černá (K). Odčítáním barev dochází k omezení barevného spektra, které se od povrchu odráží. Teoreticky by postačovaly pro poskládání všech barev tři barevné složky (bez černé), ale ta je přidána kvůli tomu, že samotná černá barva je oproti skládání mnohem ekonomičtější. Využívá se pro tisková zařízení. Barevný gamut je oproti barevným prostorům menší.

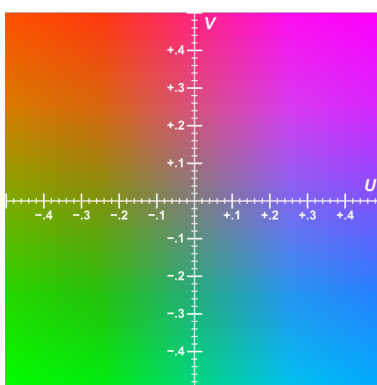


Obrázek 2.9: Aditivní míchání barev (vlevo), subtraktivní míchání barev (vpravo); převzato z [10][11]

2.3.4 Barevný prostor YUV

Barevný prostor YUV není založen na míchání barev. Byl vyvinut a používán pro televizní vysílání. Jedná se o barevný prostor, který k popisu obrazového bodu využívá tři složky – Y, U a V. Složka Y je přímo jasová složka a složky U a V jsou barevné. Oddělení jasové a barevných složek je použito ze dvou důvodů. Hlavní důvod spočívá v tom, že lidské oko je nejvíce citlivé na jas, méně už na barvy. Barevné složky pak mohou mít výrazně nižší rozlišení. Navíc je takový prostor přímo kompatibilní s černobílým obrazem.

Dále je možné se setkat s barevným prostorem Y'UV, který se od prostoru YUV liší v definici jasové složky. Zatímco Y reprezentuje přímo jas jako fotometrickou veličinu vnímanou lidským okem, Y' reprezentuje jasovou složku po gamma korekci (zakódování). Jasová složka Y' není přímo vypočítaná z jasů, je získána váženým součtem gamma korekcí barevných složek [12].



Obrázek 2.10: U-V barevná plocha barevného modelu Y'UV pro hodnotu $Y' = 0,5$; převzato z [13]

2.4 Převody barevných prostorů

Barevné prostory lze mezi sebou libovolně převádět. Při převodu z barevného prostoru RGB do XYZ je nejprve třeba hodnoty normalizovat, aby byly v rozsahu $[0, 1]$. Poté je třeba provést nelineární transformaci, která kompenzuje nelineární charakteristiku intenzity. Této konverzní funkci se říká gamma korekce. Nakonec stačí provést lineární transformaci souřadnic základních barev podle známé transformační matice [14]:

$$\begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} R \\ G \\ B \end{vmatrix} \quad (2.5)$$

Pro opačný převod lze použít inverzní postup. Transformační matice je pro barevný prostor definována, nebo je možné ji odvodit změřením (a vypočítáním) trichromatických složek X, Y a Z.

Převod barevných prostorů Y'UV a RGB je naopak velice jednoduchý, protože zde odpadá potřeba gamma korekce, což je nelineární operace. Pro převod RGB do Y'UV podle NTSC standardu lze použít následující transformační matici (pro jiné standardy bude odlišná) [14]:

$$\begin{vmatrix} Y' \\ U \\ V \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ -0,147 & -0,289 & 0,436 \\ 0,615 & -0,515 & -0,100 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} R \\ G \\ B \end{vmatrix} \quad (2.6)$$

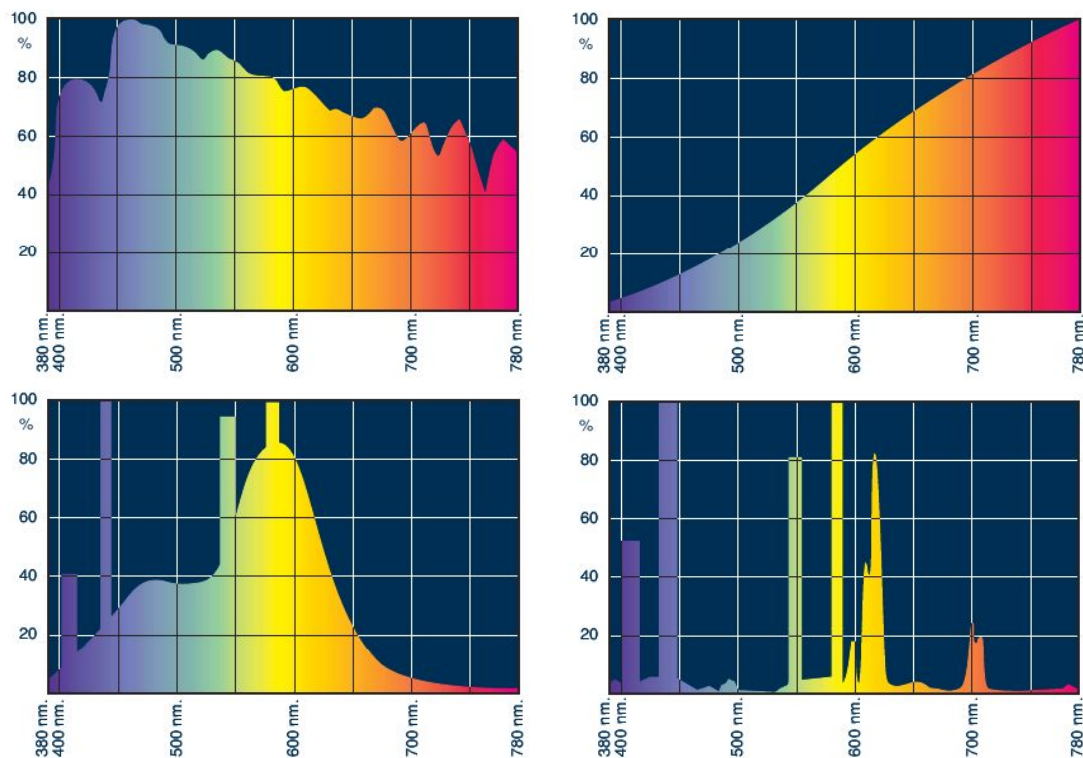
Pro inverzní převod lze použít následující inverzní transformační matici:

$$\begin{vmatrix} R \\ G \\ B \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1,137 \\ 1 & -0,397 & -0,580 \\ 1 & 2,034 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} Y' \\ U \\ V \end{vmatrix} \quad (2.7)$$

2.5 Spektrum a spektrální citlivost lidského oka

Spektrum vyjadřuje rozložení intenzit záření v různých vlnových délkách. Spektrum se ve většině případů uvádí v relativních hodnotách, vztažených k maximální hodnotě naměřeného záření. Na obrázku 2.11 je příklad spekter různých světelných zdrojů.

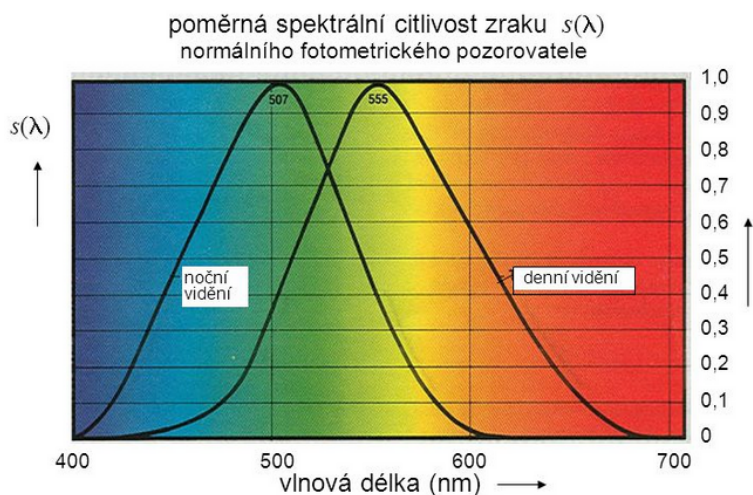
Spektrální citlivost vyjadřuje, jak oko reaguje na záření o různých vlnových dél-



Obrázek 2.11: Příklady spekter různých světelných zdrojů – spektrum denního světla (vlevo nahoře), spektrum žárovky (vpravo nahoře), spektrum zářivky (vlevo dole) a spektrum výbojky (vpravo dole); převzato z [1]

kách. Oko je citlivé na viditelné záření o vlnových délkách 380 nm – 780 nm, na každou vlnovou délku však jinak. To vyjadřuje graf spektrální citlivosti lidského oka na obrázku 2.12. Z grafu je patrné, že oko je nejvíce citlivé na zelenou barvu o vlnové délce 555 nm. Pro vyvolání stejně intenzivního vjemu jako zelené světlo, musí mít červené (nebo modré) světlo téměř dvojnásobnou intenzitu. Při nízkých intenzitách jasů je citlivost posunuta do kratších vlnových délek (skotopické vidění).

Poměrná spektrální citlivost lidského oka také vyjadřuje rozdíl mezi radiometrickými a fotometrickými veličinami. Radiometrie se zabývá elektromagnetickým zářením a používá k tomu absolutní veličiny jako zářivý tok $[W]$ a intenzita záření $[W \cdot m^{-2}]$. Fotometrie zkoumá obdobné veličiny, ale z hlediska jejich působení na lidské oko. Fotometrické veličiny jsou např. světelný tok $[lm]$, svítivost $[cd]$, jas $[cd \cdot m^{-2}]$ a osvětlení $[lx]$.



Obrázek 2.12: Poměrná spektrální citlivost lidského oka při denním (fotopickém) vidění a nočním (skotopickém) vidění; převzato z [2]

2.6 Přístroje použité pro analýzu parametrů

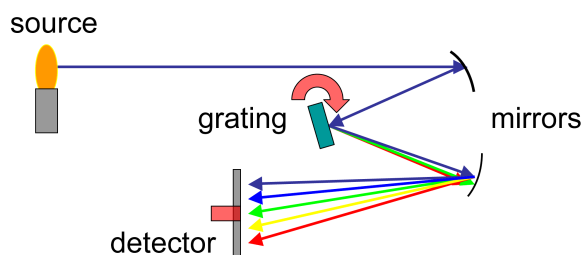
Všechna měření i metody měření jsou závislé na přístrojích, které byly k dispozici. Níže jsou uvedeny všechny přístroje, které byly pro analýzu použity. U každého přístroje je popsán základní princip funkce a jsou uvedeny nejdůležitější parametry.

2.6.1 Spektrometr

Spektrometr je radiometrický přístroj měřící spektrum, tedy rozložení intenzit záření v jednotlivých vlnových délkách.

Spektrometr využívá principu rozkladu světla na hranolu nebo na mřížce. Skládá se z kolimátoru, který upravuje vstupní paprsky na rovnoběžné. Ty dopadají na disperzní prvek (reflexní mřížka nebo hranol), který paprsky rozloží na barevné spektrum. Rozložené barevné spektrum dopadá na fotocitlivý prvek, který kvantifikuje intenzitu jednotlivých vlnových délek. Fotocitlivým prvkem může být lineární CCD nebo CMOS čip. Z těchto dat je následně zobrazeno spektrum. Schématické znázornění principu spektrometru je na obrázku 2.13.

Použitý přístroj je spektrometr MK350S firmy UPRtek. Zobrazuje spektrum v relativních hodnotách, z uložených dat je však možné reprodukovat absolutní hodnoty intenzit. Kromě barevného spektra dokáže přístroj měřit ještě teplotu chromatičnosti a barevné parametry x a y v barevném prostoru XYZ (CIE 1931).



Obrázek 2.13: Schématické znázornění principu spektrometru; převzato z [15]

V tabulce 2.3 jsou uvedeny důležité parametry spektrometru, všechny jsou uvedeny v [16].

Parametr	Hodnota
Senzor	CMOS Linear Image
Spektrální šířka pásma	cca 12 nm (poloviční šířka pásma)
Rozsah vlnových délek	380 ~ 780 nm
Integrační časový rozsah	6 ~ 5000 ms
Digitální rozlišení	16 bitů
Min. krok vlnové délky	1 nm
Chyba měření osvětlenost	$\pm 5 \%$
Chyba měření barevných složek	$\pm 0,0025$ (pro x, y CIE1931)
Chyba měření CCT	$\pm 2 \%$
Chyba měření CRI	$\pm 1,5 \%$

Tabulka 2.3: Vybrané parametry spektrometru MK350S; převzato z [16]

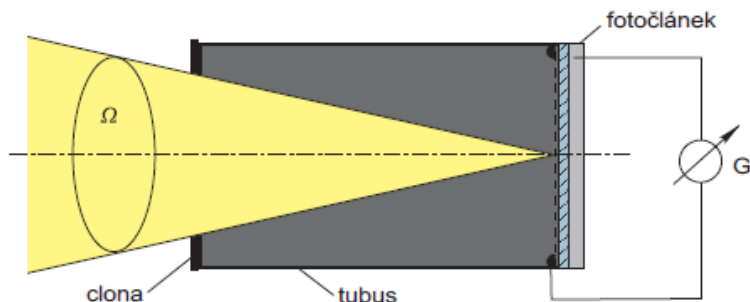
2.6.2 Jasoměr

Jasoměr, přístroj měřící jas, pracuje na stejném principu jako luxmetr. Jasoměr je vybaven optikou (tubusem), která vymezuje prostorový úhel Ω , v němž dopadá světlo na fotočlánek. Fotočlánek pak měří normálovou osvětlenost E_N . Jas plochy vymezené prostorovým úhlem Ω se určí podle vzorce:

$$L = \frac{E_N}{\Omega} \quad \left[\frac{cd}{m^2}; lx, sr \right] \quad (2.8)$$

Jasoměr měří střední hodnotu jasu měřené plochy, která je vymezena optikou. Optika proto většinou umožňuje volbu několika prostorových úhlů podle potřeb měření. Podle zvolené optiky (velikost clony) se rozlišují dva druhy jasoměrů. Bodový měří pod malým úhlem (např. $6'$), měří tudíž malé plošky. Integrační měří

pod velkým úhlem (např. 2°), a měří tedy jas velké plochy. Jasoměry mohou měřit povrchy vyzařující i odražející světlo. Bývají vybaveny optickým systémem s okulem, který umožňuje obsluhu přesné zaměřování měřeného bodu nebo plochy [6]. Princip jasoměru je popsán na obrázku 2.14.



Obrázek 2.14: Princip objektivního jasoměru; převzato z [6]

Použitý přístroj je jasoměr LMT L1009. V tabulce 2.4 jsou uvedeny dostupné důležité parametry jasoměru, všechny jsou uvedeny v [17].

Parametr	Hodnota
Senzor	Si fotočlánek
Prostorový úhel	$3^\circ, 1^\circ, 20', 6'$ (volitelně)
Měřicí rozsah	$0,0001 \sim 19\,990\,000 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$
Měřicí vzdálenost	$0,5 \text{ m} \sim \text{nekonečno}$
Celková chyba	$7,5 \%$ (pro 3° a 1°)

Tabulka 2.4: Dostupné důležité parametry jasoměru LMT L1009; převzato z [17]

Pro získávání informací o rozložení jasů je vhodné použít jasový analyzátor. To je ve své podstatě digitální fotoaparát, který má upravenou citlivost podle spektrální citlivosti lidského oka. Tato úprava citlivosti je většinou realizována softwarově. Jasový analyzátor má tedy rozlišovací schopnost danou prostorovým úhlem snímaným jedním pixelem. Ten lze vypočítat z rozlišení snímače a jeho zorným úhlem.

Jasový analyzátor pracuje jako fotoaparát – scéna je vyfotografována, a tím dojde k zaznamenání hodnot jasů. Každý pixel tak zaznamená hodnotu jasů určité malé plošky. Snímky se obvykle ukládají do formátu surových dat RAW. Zaznamenané hodnoty jsou spolu s parametry snímání (hodnota expozice, clonové číslo, citlivost ISO, expoziční čas) vstupními daty pro výpočet výsledného jasů. Výpočet

je prováděn pomocí převodní funkce, která je pro každý snímač odlišná. Výstupem jasového analyzátoru jsou jasové mapy.

Jasové mapy jsou snímky rozložení jasů, velké matice hodnot. Samotné jasy jsou vyjádřené pomocí pseudobarev, kdy každé barvě odpovídá určitá hodnota jasu podle stupnice.

Analýzu jasů lze provést jednoduše pomocí jasového analyzátoru, jedná se však o velmi drahý přístroj, kterým laboratoř světelné techniky ČVUT nedisponuje.¹ Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto použít pro jasovou analýzu dva fotoaparáty, které dokáží získat jasové mapy. Cílem není vytvoření jasového analyzátoru z fotoaparátu, ale pouze využití snímků a naznačení dalšího vývoje. Největší překážkou je odvození převodní funkce a kalibrace, získané absolutní hodnoty intenzit bodů jsou tedy bezpředmětné.

2.6.3 Fotoaparát Finepix

Fotoaparát Finepix S2 Pro je digitální zrcadlovka, v současné době již notně zastaralá. Tento fotoaparát je k dispozici v laboratoři světelné techniky ČVUT pro snímání rozložení jasů. Umožňuje pořizování snímků ve formátu surových dat RAW. Zaznamenané hodnoty jsou následně převedeny do barevného prostoru Lab. V tomto barevném prostoru reprezentuje souřadnice L jasovou složku, která je úměrná jasu každého pixelu. Hodnoty jasů jsou vypočítány ze souřadnic L podle odvozené převodní funkce, viz [19]. Výsledně jsou vygenerovány jasové mapy.

V tabulce 2.5 jsou uvedeny nejdůležitější vybrané parametry fotoaparátu.

Parametr	Hodnota
Senzor	Fujifilm SuperCCD III
Rozlišení senzoru	4256 × 2848 pixelů
Technologie snímáče	Super CCD

Tabulka 2.5: Nejdůležitější vybrané parametry Fotoaparátu Finepix S2 Pro (většina parametrů je dána použitým objektivem); převzato z [18]

2.6.4 Fotoaparát Raspberry Pi

Fotoaparát Raspberry Pi slouží pro pořízení jasových map. Získávání jasových map tímto fotoaparátem se nevěnuje žádná dostupná literatura. Popíšu zde tedy

¹Ani zapůjčení není vzhledem k osobním vztahům s disponenty možné.

postup sběru dat a generaci snímků.

Raspberry Pi je mikropočítač vyvinutý pro experimentální účely. Využívá linuxový operační systém (Raspbian) a obsahuje velké množství periférií včetně fotoaparátu. Pro účely pořizování jasových map slouží originální kamera. Pro tato měření byla použita nejnovější verze Raspberry Pi v3 a Camera v2. V tabulce 2.6 jsou uvedeny vybrané důležité parametry fotoaparátu.

Parametr	Hodnota
Senzor	Sony IMX219
Rozlišení senzoru	3280 × 2464 pixelů
Technologie snímače	BSI CMOS
Horizontální zorný úhel	62,2°
Vertikální zorný úhel	48,8°
Světelnost snímače	f/2.0

Tabulka 2.6: Vybrané důležité parametry fotoaparátu Raspberry Pi; převzato z [20]

2.7 Generování jasových map fotoaparátem Raspberry Pi

Pro vygenerování jasových map je nejprve třeba vytvořit snímek ve vhodném formátu dat, nejlépe číselných. Poté se data zpracují a následně se vygeneruje jasová mapa. Zpracování dat bude probíhat ve výpočetním prostředí MATLAB.

Pro snímání je k dispozici program `raspistill`, který umožňuje nastavit velké množství parametrů. Pro účely jasových map disponuje Raspberry Pi ještě jedním méně obvyklým programem `raspivyuv`². Jedná se o program, který dokáže zaznamenávat data ve formátu Y'UV420p [21].

2.7.1 Formát Y'UV420p

Použitý formát Y'UV420p (planární) je implementací barevného prostoru Y'UV. Hodnoty jednotlivých složek jsou ukládány za sebou v řadě bez adresace a bez oddělovačů. Zároveň formát Y'UV420p definuje způsob komprese dat. To znamená, že hodnoty Y' (jasová složka) se ukládají nejdříve a mají plné rozlišení (1 bajt

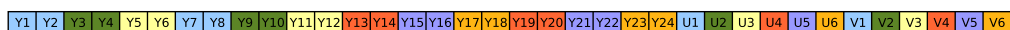
²Program lze najít i pod starším názvem `raspistillyuv`.

= 8 bitů pro každý obrazový bod). Hodnoty Y' jsou následovány hodnotami U a nakonec hodnotami V . Hodnoty U i V mají čtvrtinové rozlišení oproti prvkům Y' (1 bajt U a 1 bajt V odpovídají vždy čtveřici obrazových bodů). Taková komprese barevných složek je použita proto, že lidské oko je citlivější na jas než na barevné složky. Rozsah hodnot složky Y' je [16, 235], rozsah hodnot složek U a V je [16, 240]. Tyto rozsahy jsou dány definicí formátu kvůli odlišení od šumu (SNR – odstup signálu k šumu) [12]. Uspořádání dat v souboru je schématicky znázorněno na obrázku 2.15.

Single Frame YUV420:



Position in byte stream:



Obrázek 2.15: Schématické uspořádání dat v souboru formátu Y'UV420p; převzato z [22]

2.7.2 Postup a výpočty

Kamera musí být správně zapojena a v nastavení konfigurace počítačových periférií musí být povolena. Pro záznam snímku ve formátu Y'UV420p stačí v příkazové řádce spustit následující program s parametry:

```
raspiyuv -ISO 50 -cfx 128:128 -o cam.yuv -w 3200 -h 2400
```

-ISO 50 : nastaví hodnotu citlivosti ISO na 50

-cfx 128:128 : úprava barevných složek U:V (128:128 má za následek černobílý obrázek)³

-o cam.yuv : uložení snímku do souboru cam.yuv

³Stejného efektu by bylo dosaženo nastavením minimální saturace (-sa -100).

-w 3200 : nastaví šířku snímku na 3200 pixelů

-h 2400 : nastaví výšku snímku na 2400 pixelů

Snímky jsou pořizovány s nejnižší možnou hodnotou citlivosti ISO pro minimalizaci šumu, který by měl negativní efekt na výslednou jasovou mapu. Zároveň je snímán statický obraz, takže může být prodloužen expoziční čas. Pro jasové mapy jsou důležité pouze hodnoty jasové složky Y. Barevné složky U a V jsou bezpředmětné, proto jsou při snímání nahrazeny nulovou hodnotou – snímek je tedy černobílý. Rozlišení snímku je zvoleno 3200×2400 pixelů, protože formát Y'UV420p vyžaduje horizontální rozlišení dělitelné 32 a vertikální rozlišení dělitelné 16.⁴

Kamera Raspberry Pi má pevnou clonu a hodnota ISO je pevně nastavena, takže hodnota expozice je určována výhradně expozičním časem. U každého snímku je expoziční čas jiný, automaticky volený. Následkem toho nejsou jednotlivé číselné hodnoty jasových map mezi sebou vzájemně porovnatelné. Nastavením stejného expozičního času pro všechny snímky by docházelo u některých k přesycení a u některých k podsycení, protože hodnoty jasů se liší až desetinásobně.

Výstupní soubor programu má příponu .yuv a jedná se o řadu čísel, která není nijak kódována ani komprimována. Soubor neobsahuje žádné informace o adresaci bodů, ani oddělovače konců řádků a dokonce ani informaci o formátu souboru. Je tedy nezbytné pamatovat si rozlišení, se kterým byly snímky pořizovány, a formát, ve kterém je snímek uložen.

Poté následuje zpracování ve výpočetním programu. Soubor s daty je načten jako jednorozměrná matice. Protože jsou pro jasové mapy potřeba pouze jasové složky, jsou nejprve odstraněny hodnoty barevných složek U a V. Zůstanou pouze hodnoty na pozicích od 1 do $w \times h$, které obsahují hodnoty jasové složky Y. Dále je nutné jednorozměrnou matici transformovat na matici o rozměrech $w \times h$. Je vybrána oblast samotného difuzoru jako podmatice celého snímku, protože je snímán celý model včetně okraje. Z této oblasti je následně počítána rovnoměrnost, směrodatná odchylka a další potřebné parametry. Nakonec je vygenerována samotná jasová mapa jako obrázek v pseudobarvách.

Zde je zkrácený výpis zdrojového kódu pro dekodování dat a generaci jasové mapy. Jedná se o zkrácený výpis těch nejdůležitějších funkcí, neobsahuje např. formátování.

⁴V opačném případě by příslušný počet bodů by doplněn nulovými hodnotami a vznikly by problémy při dekodování.


```

w = 3200; %definice šířky snímku
h = 2400; %definice výšky snímku
fileID = fopen('cam.yuv'); %otevření souboru
A = fread(fileID); %načtení dat do matice
fclose(fileID); %zavření souboru
A = A(1:w*h); %ořez matice na délku 1-w*h
A = reshape(A,w,h); %transformace na rozměr w*h
B = A(333:2893,353:2036); %výběr podmatice - oblast
    %samotného difuzoru
Lm = mean(B(:)); %výpočet průměrné hodnoty
Lmin = min(B(:)); %výpočet minimální hodnoty
Lmax = max(B(:)); %výpočet maximální hodnoty
U = Lmin/Lm; %výpočet rovnoměrnosti
SD = std(B(:)); %výpočet směrodatné odchylky
contourf(B,'LineColor','none'); %vygenerování jasové mapy
colormap(jet); %aplikace palety pseudobarev
colorbar; %zobrazení bargrafu

```

Fotoaparát Raspberry Pi by bylo možné měřit i absolutní hodnoty jasů a fotoaparát by mohl sloužit jako jasová kamera. K tomu by bylo nutné nalézt funkční závislost mezi zaznamenanými relativními hodnotami a absolutními hodnotami jasů (tzv. regresní převodní funkce). Při hledání regresní funkce bude hrát důležitou roli hodnota expozice EV. Díky variabilní expozici je možné výrazně rozšířit rozsah hodnot, kdy se vytvoří v jeden okamžik několik snímků s rozdílnými expozicemi, z podexponovaného se vyberou světlá místa a z přeexponovaného se vyberou tmavá místa. Jedná se ve své podstatě o režim HDR.

Hledání regresní funkce a kalibrace hodnot je určitě směr dalšího výzkumu. Tomuto tématu se věnuje dostupná literatura [23][24].

V této kapitole se budu věnovat samotnému vývoji RGB LED stěny. Nejprve popíšu její využití s referenčními příklady použití a pak se budu věnovat jejím jednotlivým součástem. Popíšu výběr světelných zdrojů, způsob napájení a konstrukci celé světelné stěny. Dále popíšu testovaný vzorek a nakonec představím jednotlivé testované difuzory.

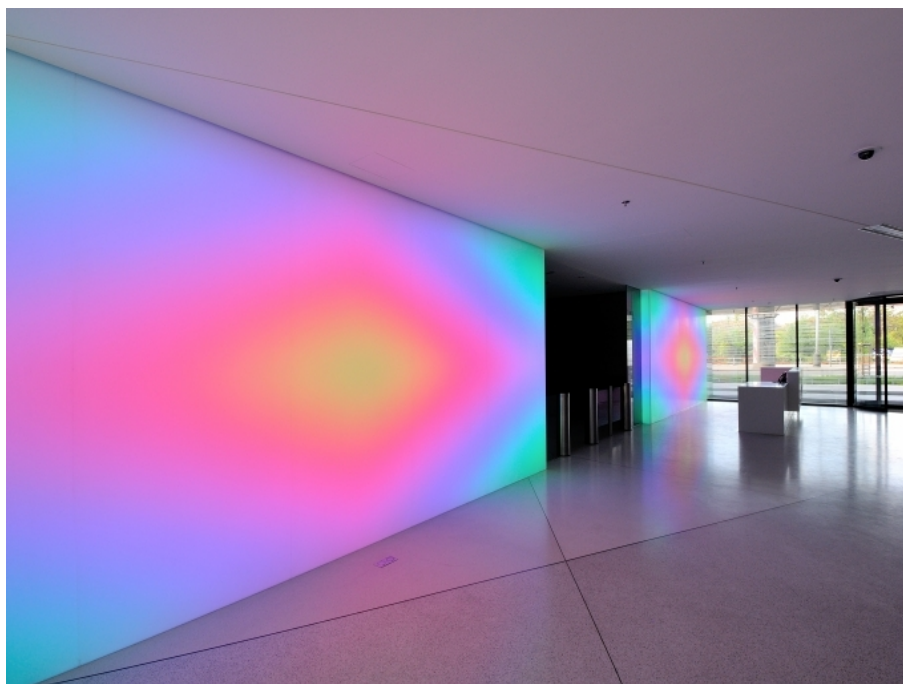
3.1 Co je RGB LED stěna

Světelná stěna je velká interiérová instalace, která je zhotovována na míru pro konkrétní místo. Výška stěny je zpravidla přes celou výšku místnosti, např. 3 metry. Délka stěny je zpravidla také přes celou šířku místnosti, např. 5 metrů. Pro světelnou stěnu se používají různé světelné zdroje, dříve se nejčastěji jednalo o lineární zářivky. Jejich nevýhodou je, že světelná stěna se skládá z pruhů a není možné na ní zobrazit bod. Proto se nyní světelné stěny realizují ze světelných diod LED, které dokáží zobrazit více barev z jednoho čipu. Nejběžnější jsou třibarevné LED čipy RGB, které v jednom čipu obsahují tři barevné složky – tedy svítí červeně (Red), zeleně (Green) a modře (Blue). Z těchto složek lze namíchat libovolnou barvu. RGB LED stěna je tedy podsvětlená stěna, která má RGB LED čipy jako světelné zdroje.

Důležitou součástí světelné stěny je difuzor. Ten slouží jako kryt světelných

zdrojů, chrání je a zároveň rozptyluje vyzařované světlo. Difuzor může být z polo-propustného skla, opálového plexiskla nebo se může jednat o různé fólie. Protože se však jedná o interiérovou instalaci, musí difuzor splňovat ještě jeden požadavek, a to estetičnost povrchu. Jedná se o neuchopitelný požadavek, který se nedá nijak kvantifikovat, ale obecně jsou nejlépe hodnoceny opálové homogenní materiály. Naopak hůře hodnocené jsou různé fólie kvůli jejich nízké odolnosti.

Světelná stěna nachází využití především v komerční sféře jako designový prvek pro recepc, atria a haly. Instalace může být celá vestavěná do stěny, takže na první pohled není vůbec zřetelná, což je oceňováno zejména architekty. Na obrázku 3.1 je příklad možného využití – recepc kancelářského domu.



Obrázek 3.1: Recepce kancelářského domu; převzato z [25]

3.2 Porovnání a výběr vhodných světelných zdrojů

Pro realizaci RGB LED stěny je třeba nejprve vybrat vhodné světelné zdroje. Světelný zdroj musí být bodový a musí být schopen zobrazit velké množství barev. Jedná se o světelné zdroje na principu LED čipů, žádné jiné světelné zdroje nejsou schopny splnit požadavky, které jsou kladeny na RGB stěnu. Tříbarevných LED čipů ale existuje velké množství a samotné LED čipy jsou pro mé potřeby ne-

vyhovující. Musel bych se zabývat výrobou plošných spojů a řízením samotných čipů, což by bylo nad rámec diplomové práce. LED čipy je tedy nutné vybírat jako hotové celky podle formy osazení a způsobu řízení. Je třeba věnovat velkou pozornost řídicímu protokolu a celé topologii zapojení.

Důležitým požadavkem na LED čipy je adresace jednotlivých bodů. Adresace skupiny čipů není vhodná, protože by nebylo možné zobrazit jednotlivý bod. To by bylo silně limitující a nešlo by například zrealizovat zobrazení obrázku.

Po širokém průzkumu trhu s LED čipy byly vybrány dvě použitelné formy, a to LED pásky nebo LED moduly. Obě technologie bylo nutné podrobně nastudovat a vyzkoušet, aby bylo možné určit jejich limity a nedostatky.

3.2.1 LED pásky

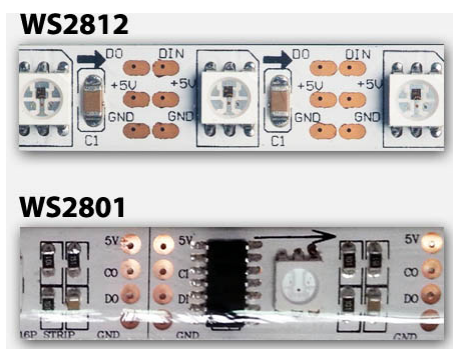
RGB LED čipy se vyrábí v pouzdrech SMD5050 a mají většinou 4 vývody – pro každý kanál jeden a jeden společný. Název je odvozen od velikosti pouzdra 5,0 × 5,0 mm. Každý takový čip v sobě obsahuje tři barevné čipy, pro každý kanál R, G, B jeden. LED čipy jsou v řadě osazené na flexibilní desce plošných spojů, odkud pochází označení LED pásek. Takovéto LED čipy není možné adresovat, proto musí být každý LED čip doplněn integrovaným obvodem, který tuto funkcionalitu přináší. Příkladem takových integrovaných obvodů je WS2801, WS2811 nebo LPD8806.

Zatím posledním vývojovým stádiem jsou RGB LED čipy v pouzdru SMD5050, které již v sobě řídicí integrovaný obvod obsahují vestavěný. Existují dva takové typy LED čipů – WS2812 a APA102. Jejich porovnání se staršími typy je na obrázku 3.2. Svým chováním se od starších typů neliší, pro oba typy je možné použít stejné řídicí signály. Jedná se o vestavění integrovaného odvodu do LED čipu.

Aplikaci je třeba provádět na nosnou desku, která funguje zároveň jako chladič. LED čipy na pásku mohou mít různou rozteč, vyrábí se 30, 32, 36, 48, 60, 72, 96 nebo 144 čipů na 1 metr pásku. Výběr hustoty čipů závisí na konkrétní instalaci, optimální počet je 72 čipů/m, při kterém je rozteč čipů přibližně stejná jako šířka LED pásku.

Princip funkce čipů WS2812 a APA102 je podobný. Liší se počtem datových vodičů, rychlostí přenosu dat a bitovou délkou rámce.

Komunikace u čipu WS2812 probíhá po jednom datovém vodiči. Taktovací frekvence je pevně stanovená na 800 kHz, přenosová rychlost je 400 kbps. Synchrono-



Obrázek 3.2: Porovnání LED čipů s vestavněným a separátním integrovaným obvodem; převzato z [26]

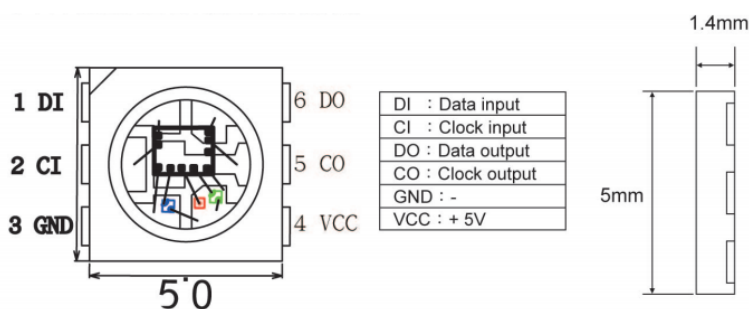
nizace probíhá vloženými rámci RES. Datagram pro jeden čip má délku 24 bitů (8 bitů pro každou barvu) [26].

Komunikace u čipu APA102 probíhá po dvou datových vodičích – DATA a CLK. CLK je hodinový signál, který zajišťuje synchronizaci a určuje přenosovou rychlost. Taktovací frekvence CLK signálu je volitelná, může být i jednotky MHz. Délka datagramu pro jeden čip je 32 bitů (8 bitů pro každou barvu + 5 bitů pro globální nastavení intenzity + 3 bity nevyužity) [27].

Jednotlivé čipy jsou propojeny sériově tak, že výstupní vývody jednoho čipu jsou vstupními vývody druhého čipu. Toto propojení musí být dodrženo i na konci každé řady. LED čipy jsou jednosměrné (naznačeno šipkou na LED pásku), je tedy nutné zapojit řídicí signál na vstupní vývody. Takto zapojené čipy fungují na principu posuvného registru, data se posílají sériově. Adresace tedy neznamená souřadnice čipu, ale jeho pořadí od začátku řady. Ze známého zapojení čipů za sebou je možné přepočítat souřadnice jednotlivého čipu, což zajišťuje řídicí jednotka.

Při rozhodování o vhodnosti různých LED pásků hraje důležitou roli přenosová rychlost, resp. taktovací frekvence. V tom spočívá velká nevýhoda LED pásku WS2812, který má fixní přenosovou rychlost. To v důsledku znamená, že s narůstajícím počtem LED čipů roste i čas potřebný k překreslení jednotlivých čipů a klesá obnovovací frekvence. U velkých instalací pak může být překreslování velmi pomalé (za 1 sekundu dojde k zobrazení přibližně 16 000 bodů), což může celou instalaci značně degradovat. Jedinou výhodou WS2812 je potřeba jediného datového vodiče [26]. LED čipy APA102 sice potřebují dva datové vodiče, výhodou naopak je volitelné časování a výrazně vyšší rychlost přenosu dat. Z tohoto důvodu jsou pro LED pásky nejlepší čipy APA102, které mají oddělený hodinový a

datový signál [27] (na obrázku 3.3).



Obrázek 3.3: LED čipy APA102 (varianta APA102C), jejich fyzické rozměry a popis vývodů; převzato z [27]

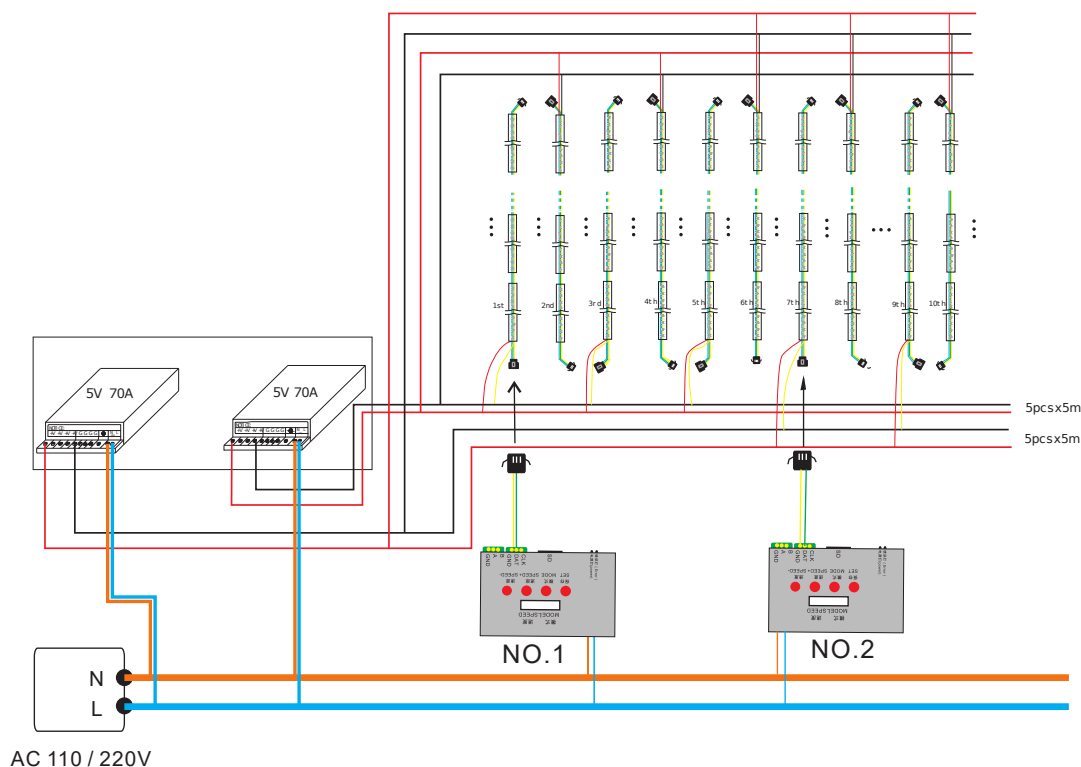
Každá barva je kódována 8 bity, je tedy možné dosáhnout 256 úrovní jasu jedné barvy. Úrovní je dosaženo pomocí PWM modulace. Mícháním je možné celkově dosáhnout 16,7 mil. barev. Svítivost jednotlivých barev není stejná, světelně-technické parametry čipu APA102 jsou uvedeny v tabulce 3.1. Podrobnější světelně-technické parametry nejsou k dispozici.

Barva	Svítivost [mcd]	Vlnová délka [nm]
Červená (R)	500 – 650	620 - 630
Zelená (G)	370 – 530	515 - 530
Modrá (B)	120 – 165	465 - 475

Tabulka 3.1: Katalogové hodnoty svítivosti jednotlivých barev LED čipu APA102; převzato z [27]

LED čipy APA102 vyžadují napájení stejnosměrným napětím 5 V, každý čip má spotřebu 0,2 W. Z těchto údajů a celkového počtu LED čipů je možné relativně jednoduše nadimenzovat napájení. Navíc je nutné připočítat rezervu 20 % na ztráty vedení a aby nedocházelo k přetěžování zdroje.

Pro ovládání je zapotřebí řídicí jednotka podporující protokol SPI a řídicí signály přivedené na začátek celé řady. LED pásy budou aplikovány ve sloupcích a vzájemně sériově propojeny. Může být využito i několik řídicích jednotek, celá stěna pak bude virtuálně rozdělena na několik částí. Schématicky je celé zapojení vidět na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Schématické zapojení celé instalace s LED pásky; převzato z [28]

3.2.2 LED moduly

RGB LED čipy je možné osadit na desku plošných spojů, které jsou produkovány jako celé moduly. Používají se LED čipy v pouzdru SMD3535¹, které jsou osazeny na desce plošných spojů spolu s integrovanými obvody a konektory. LED moduly jsou pouze zobrazovací zařízení. Integrované obvody slouží pro dekódování signálu a zobrazení, neobsahují žádné obvody pro jinou práci se signálem (uložení, úprava, převzorkování, ...). LED moduly nedisponují pamětí, ani nemají identifikátory. Zároveň má každý LED modul jeden napájecí a dva datové konektory – LED moduly se navzájem propojují plochými datovými kabely [30]. Na obrázku 3.5 je vidět LED modul včetně napájecího kabelu, datového kabelu a magnetů na připevnění.

Uvažované LED moduly jsou velmi rozšířené – používají se pro LED světelné reklamy, poutače, velkoplošné obrazovky, kostky nad ledovou plochou a další. Existuje velké množství druhů LED modulů, liší se hlavně roztečí čipů (hustotou) a velikostí jasu (intenzitou). Optimální rozteč pro použití ve světelné stěně je 10 mm,

¹Existují i LED moduly osazené LED čipy v pouzdře DIP, nejsou však tolik rozšířené.



Obrázek 3.5: LED modul s příslušenstvím; nahoře magnety a napájecí kabel, dole datový plochý kabel; převzato z [29]

moduly jsou označovány P10. Velkou výhodou je, že většina výrobců vyrábí LED moduly se stejnými rozměry a rozhraními, moduly jsou tak mezi sebou kompatibilní. Všechny důležité parametry jsou přehledně uvedeny v tabulce 3.3.

Každá barva je kódována 12 bity, od každé barvy je tedy možné zobrazit 4096 odstínů [30]. Světelně-technické parametry LED čipů jsou uvedeny v tabulce 3.2.

Barva	Svítivost [mcd]	Vlnová délka [nm]
Červená (R)	800 – 1200	625 ± 5
Zelená (G)	1800 – 2300	525 ± 5
Modrá (B)	450 – 520	470 ± 5

Tabulka 3.2: Katalogové hodnoty svítivosti jednotlivých barev LED čipu v LED modulu; převzato z [31]

LED moduly mají určenou orientaci, není tedy možné je otáčet. Jednotlivé moduly se propojují datovým kabelem v řadě sériově z výstupního konektoru jednoho LED modulu na vstupní konektor druhého LED modulu. Jednotlivé řady jsou připojeny přímo do řídicí jednotky – řídicí jednotky proto obsahují více konektorů pro připojení více řad. Maximální možný počet LED modulů zapojených v řadě i ve sloupcích je určen možnostmi řídicí jednotky.

LED moduly obsahují vždy dva datové konektory – jeden vstupní (IN, J1) a jeden výstupní (OUT, J2). Konektory mohou být označeny různě. Na obrázku 3.6 je zadní strana LED modulu, kde je možné konektory názorně vidět. Dále se na zadní straně nacházejí vždy dvě šipky. Jedna šipka určuje směr šíření signálu od vstupního konektoru (IN) k výstupnímu (OUT). Druhá šipka určuje svíslou

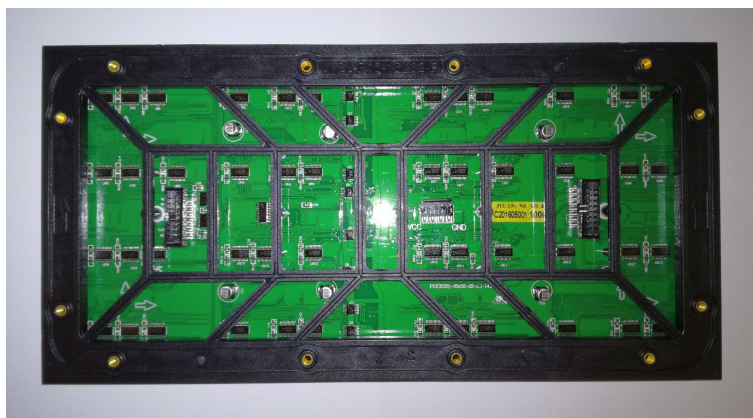
Parametr	Hodnota
Typ	P10SMD
Rozteč bodů	10 mm
Skladba barev	1R1G1B
Pouzdro čipu	SMD3535
Rozlišení modulu	32 (H) × 16 (V)
Rozměr modulu	320 × 160 mm
Konektor	HUB75
Napětí	5 V
Spotřeba (max.)	40 W
Způsob napájení	Konstantní proud
Jas	> 7500 cd/m ²
Mód řízení (scan)	1/2
Hustota bodů	10 000 pix/m ²
Pozorovací vzdálenost	7 – 100 m
Váha modulu	500 g
Pozorovací úhly	120° (H) × 120° (V)
Obnovovací frekvence	> 600 Hz
Životnost	100 000 h
Provozní teplota	-10° C +50° C
Použití	Outdoor

Tabulka 3.3: Deklarované parametry LED modulů; převzato z [31]

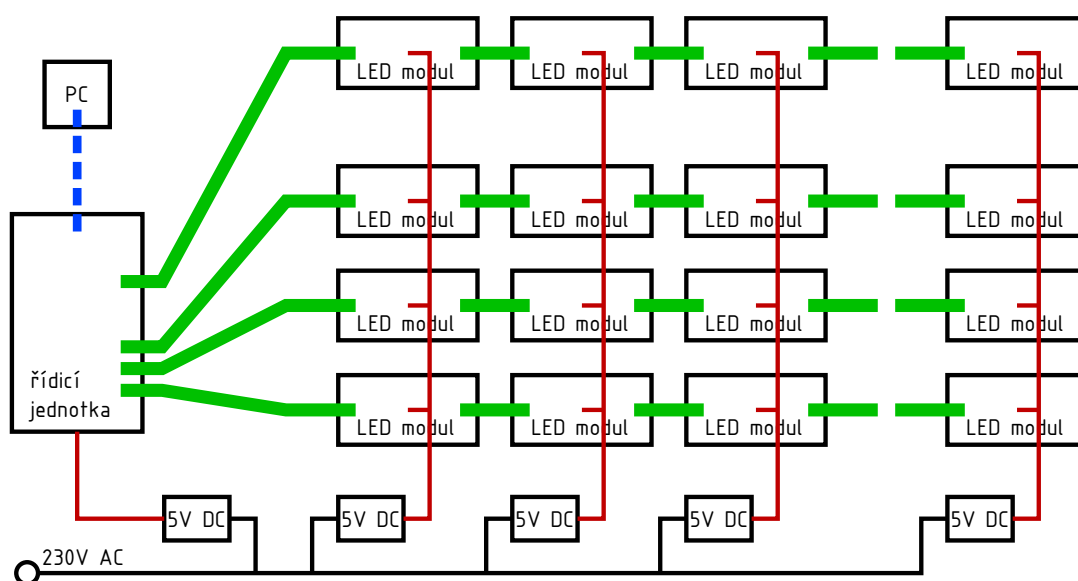
orientaci modulu (šipka ukazuje nahoru.). Přibližně uprostřed zadní strany LED modulu je konektor pro připojení napájecího kabelu. Datový konektor je univerzální IDC, který má 8 × 2 řady. Jako kabel je použit 16-ti vodičový plochý kabel AWG28 [30].

Data jsou zpracovávána sérioparalelně, taktovací frekvenci určuje řídicí jednotka. Datový kabel obsahuje 6 vodičů s informacemi o barvě, 4 vodiče slouží pro adresaci a 3 pro řízení datového toku [30]. Pro ovládání slouží řídicí jednotka, která podporuje rozhraní HUB75. Schématicky je celé zapojení vidět na obrázku 3.7.

Po zvážení všech kladů a záporů jsem se rozhodl do světelné stěny používat LED moduly, a to ze dvou hlavních důvodů. Zaprvé se jedná o modulární univerzální stavebnicové řešení, což se projeví jako výhoda při montáži celé stěny. Druhým důvodem je kvalita a výběr řídicích jednotek, které jsou pro LED pásy značně omezené na stará a těžkopádná zařízení. Naproti tomu řídicí jednotky pro LED moduly obsahují videoprocessor a přináší daleko větší uživatelský komfort.



Obrázek 3.6: Zadní strana LED modulu



Obrázek 3.7: Schématické zapojení celé instalace s LED moduly

3.3 Konstrukce testovacího vzorku LED stěny

Nosná konstrukce vzorku LED stěny je zhotovena jako dřevěný box. Vrchní část boxu lze odklopit a funguje jako víko. Víkem je zajištěn přístup k difuzorům i k elektronice a LED modulům. Z vnitřní strany boxu jsou zafrézovány drážky, do nichž se zasouvají difuzory. Drážky jsou celkem 4 a jsou v pravidelném rozestupu 5 cm. LED moduly včetně zdrojů a elektroniky nejsou připevněny přímo k boxu, ale jsou kotveny k samonosné konstrukci z ocelových profilů, která je fixována

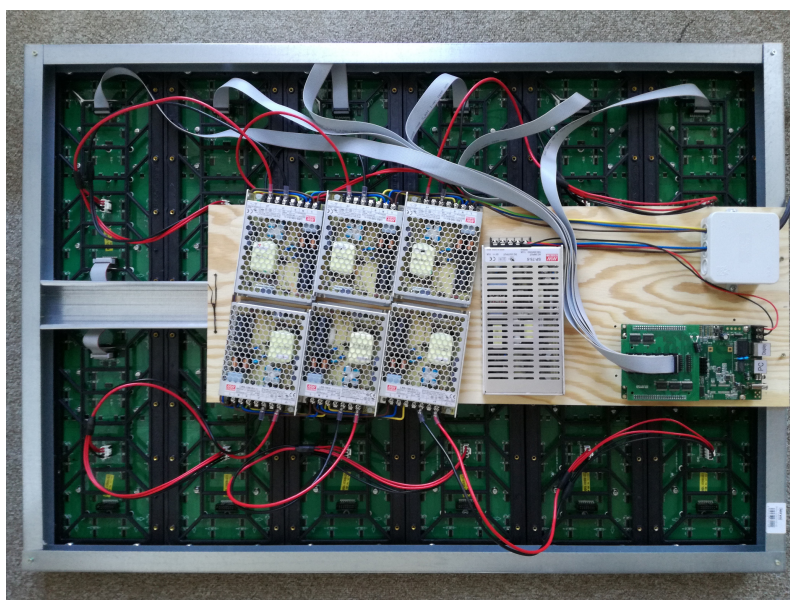
do krajní drážky. Díky tomu je box univerzální a je umožněna případná budoucí výměna LED modulů nebo napájecích zdrojů.

Konstrukce je vyrobena poměrně masivně z toho důvodu, že jsou do ní zafrézované drážky. Zároveň také proto, aby mohla horní deska sloužit jako víko. Box je kvůli své velikosti a hmotnosti opatřen kolečky, díky nimž je manipulace s ním výrazně zjednodušena. Kvůli snížení pohltivosti použitého dřeva a potlačení změny vnímané barvy odraženého světla je box z vnitřní strany natřen matnou bílou barvou. Bílá barva minimálně zkresluje barvu odraženého světla od dřevěné konstrukce.

Důležité rozměry boxu jsou popsány v tabulce 3.4. Maximální tloušťka difuzoru je 10 mm, lze však použít i tenčí. Tloušťka difuzoru 10 mm byla zvolena kvůli tomu, že při realizaci difuzoru přes celou zeď by u tenčích desek docházelo k nežádoucímu ohybu. Z tohoto důvodu budou difuzory o tloušťce 10 mm použity i pro měření.

	Šířka (mm)	Výška (mm)	Hloubka (mm)
Vnější rozměry boxu	725	1040	340
Vnitřní rozměry boxu	665	980	330
Rozměry difuzorů	685	1000	10

Tabulka 3.4: Důležité rozměry testovacího vzorku



Obrázek 3.8: Hotová rámová konstrukce s osazenými LED moduly

LED moduly mají ze zadní strany závity, které slouží k montáži. Ta se provádí pomocí magnetů, které se zašroubují do závitů. Následně se k LED modulu připojí datový a napájecí kabel a modul se magnety přichytí k ocelovému rámu.

Ve vzorku je zapojeno celkem 12 ks LED modulů v šesti řadách po dvou modulech. Šířka dvou LED modulů je $2 \times 320 \text{ mm} = 640 \text{ mm}$, výška šesti LED modulů je $6 \times 160 \text{ mm} = 960 \text{ mm}$. Celkové rozměry spojených LED modulů jsou $640 \times 960 \text{ mm}$ (šířka \times výška), vnitřní rozměry boxu jsou vyrobeny tak, aby měly LED moduly malou prostorovou rezervu. Maximální příkon LED modulu je 40 W, proto jsem použil 6 ks 90W/5V spínaných zdrojů, každý zdroj bude napájet dva LED moduly. Pro napájení řídicí jednotky jsem zvolil kvalitnější spínaný zdroj 75W/5V. Celková spotřeba vzorku LED stěny je maximálně 500 W. Tohoto příkonu je však možno dosáhnout pouze v případě, kdy budou svítit všechny barvy celé stěny naplno. Při běžném provozu bude dosahováno zhruba polovičního příkonu. Na obrázku 3.8 je hotová rámová konstrukce s připevněnými a zapojenými LED moduly.

Na obrázku 3.9 je snímek celé hotové konstrukce opatřený difuzorem z Corianu.



Obrázek 3.9: Hotová konstrukce testovacího vzorku s difuzorem z Corianu

Pro konstrukci velkoplošných LED stěn bude nutné v místě instalace postavit rámovou konstrukci z ocelových profilů s roztečí na jeden modul. K tomu se nabízí využití ocelových profilů CW a UW, které se využívají pro SDK konstrukce.

3.4 Testované difuzory

Protože dopředu nebylo známé, jak se který difuzor bude chovat, probíhal samotný výběr vhodných difuzorů odhadem po konzultaci s architekty. Hlavním kritériem, bez něhož nemohlo být o daném materiálu dále uvažováno, byla vhodnost jeho použití pro LED stěnu. Jak bylo psáno výše, LED stěny se konstruují zpravidla na výšku místnosti, což bývá kolem tří metrů. Difuzor tedy musí být samonosný na celou výšku, nesmí se ohýbat. Z tohoto důvodu jsem vybíral difuzory o tloušťce 10 mm. Důležitým kritériem pro architekty byl i samotný vzhled difuzoru, kdy byl preferován matný bílý povrch. Difuzor by měl mít vyvážené difuzní vlastnosti – tedy co nejvyšší činitel prostupu světla a zároveň musí procházející světlo dostatečně rozptylovat. Nakonec byly pro testování vybrány 4 různé difuzory.

3.4.1 Corian

Corian je umělý materiál, někdy označovaný jako umělý kámen. Jedná se o homogenní materiál, který se z třetiny skládá z akrylové pryskyřice (PMMA) a ze dvou třetin z přírodních minerálů (hlavně ATH – trihydrát hliníku). Corian má dobrou chemickou i teplotní odolnost. Použitý difuzor je z bílého Corianu, jehož činitel prostupu není znám. Corian je obchodní název firmy DuPont.

3.4.2 Plexisklo

Plexisklo je hovorový název pro polymethylmethakrylát (PMMA). Jedná se o umělý materiál vyráběný jako náhrada skla. Oproti sklu je však méně křehký a méně tuhý (ohýbá se). Je úplně bezbarvý a má stejnou prostupnost světla v celém rozsahu spektra. Je málo chemicky odolný a jeho tepelná odolnost je kolem 80° C. Použitý difuzor je bílý litý akrylát firmy Evonik Röhm GmbH. Udávaný integrální činitel prostupu světla je 42 %.

3.4.3 Sklo s fólií

Pro účely difuzoru je použito křemičité tabulové sklo. Kvůli křehkosti je použito sklo dvouvrstvé, někdy označované jako bezpečnostní (Connex). Sklo je čiré a opatřené samolepicí bílou fólií, která je na sklo nalepena z vnější strany. Činitel prostupu světla fólie není znám. Samotné sklo je teplotně, mechanicky i chemicky odolné. Jistou nevýhodou může být zelenavý nádech skla, který může způsobovat

posun spektra. Nevýhodou je malá mechanická odolnost fólie. Po nalepení fólie na sklo můžou zůstat pod fólií bubliny, což se stalo i na vzorku. Součástí analýzy bude i otázka, jak se tyto nedokonalosti projeví na jasových mapách a výsledném efektu.

3.4.4 Sklo s mezifólií

Opět je použito dvouvrstvé (bezpečnostní) křemičité tabulové sklo, fólie je však vložena mezi jednotlivé vrstvy. Jedná se o matnou PVB fólii, která je aplikována již ve výrobě. Jistou nevýhodou tohoto difuzoru je jeho povrchová úprava, kdy je povrch skleněný a lesklý, což architekti nepovažují za estetické. I přesto jsem se rozhodl takový difuzor do porovnání zařadit. Jako u skla s fólií bude i zde zajímavé sledovat, zda-li nedochází k posunu barevného spektra. U tohoto difuzoru není znám činitel prostupu světla.

Měření světelně-technických parametrů

V této kapitole se budu věnovat analýze světelně-technických parametrů RGB LED stěny, resp. jednotlivých difuzorů. V první řadě bude stanoven činitel propustnosti jednotlivých difuzorů. Dále bude provedeno měření chromatičnosti a vyzařovaného spektra. Dále se pokusím sestavit jasové mapy pomocí dvou fotoaparátů. Nakonec měření doplním o subjektivní hodnocení, kdy bude na LED stěně promítán obraz.

Samotná analýza je ze své podstaty součástí vývoje LED stěny. Z tohoto důvodu nebylo možné popsat experiment, ten následně změřit a výsledky analyzovat. Způsob měření byl průběžně doladován podle průběžných mezivýsledků. Některé zamýšlené metody se ukázaly jako neperspektivní, proto je bylo nutné změnit a provést měření jiným způsobem.

Původně byly uvažovány tři vzdálenosti difuzorů od čipů v kroku 5 cm, na což byl vzorek připraven. V průběhu měření však bylo zjištěno, že tak velké vzdálenosti jsou nepoužitelné. Proto byl změněn počet a vzdálenost difuzorů od čipů, ale s ohledem na možnosti již hotového modelu. Byly zvoleny dvě vzdálenosti, ve kterých budou prováděna veškerá měření, a to 0 cm a 3 cm. Většina měření probíhala při nastavení bílé barvy na celou světelnou stěnu.

4.1 Měření činitele prostupu světla

Měření činitele prostupu světla bylo provedeno hlavně z důvodu, že činitelé prostupu světla nebyly známy pro všechny difuzory. Tím došlo zároveň k ověření, zda použité LED moduly dosahují výrobcem deklarovaných hodnot svítivosti.

Nejprve byla změřena LED stěna bez difuzorů, tedy samotné LED čipy. Při měření jednotlivého LED čipu ukazoval jasoměr hodnoty kolem $10\,000 \frac{cd}{m^2}$, což se velmi lišilo od předpokladu. Je to dáno tím, že v RGB LED čipu je pro každou barevnou složku vlastní PN přechod a čip neobsahuje luminofor. To znamená, že jeden čip je tvořen třemi bodovými zdroji. Jasoměr zároveň není schopen zaostřit na celý čip. Měření jasů jednotlivých LED čipů je tedy nereálné. Proto byl změřen průměrný jas celé plochy o přibližně kruhovém půdorysu uprostřed LED stěny. Stejným způsobem byly změřeny i všechny difuzory a hodnoty byly zaneseny do tabulky 4.1. Rozšířená nejistota měření byla vypočítána dle [33] $U_{95\%} = 5,04\%$. Prostupnost jednotlivých difuzorů byla vypočítána podle vzorce:

$$\tau = \frac{L_{dif}}{L_0} \quad [-] \quad (4.1)$$

kde L_{dif} je průměrný jas daného difuzoru a L_0 je průměrný jas LED stěny bez difuzoru.

$$L_0 = 7560 \pm 567 \quad \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

Difuzor	$L_{dif} \frac{cd}{m^2}$	$\tau [-]$	$\tau [\%]$
Corian 0 cm	630	0,0833	8,33
Corian 3 cm	626	0,0828	8,28
Plexisklo 0 cm	3410	0,451	45,1
Plexisklo 3 cm	3420	0,452	45,2
Sklo s fólií 0 cm	367	0,0485	4,85
Sklo s fólií 3 cm	352	0,0466	4,66
Sklo s mezifólií 0 cm	4960	0,656	65,6
Sklo s mezifólií 3 cm	4900	0,648	64,8

Tabulka 4.1: Jasoměrem změřené hodnoty jasu jednotlivých difuzorů a vypočítané činitelé prostupu

Ze změřených hodnot činitelů prostupu světla vyplývá, že různá vzdálenost difuzoru od LED čipů hraje marginální roli. Naopak mezi různými materiály difuzorů

jsou v činiteli prostupu světla velké rozdíly – hodnoty se pohybují od 4 % do 65 %. Ideální difuzor má co možná nejvyšší činitel prostupu světla. Z měření vyplývá, že difuzory z Corianu a skla s fólií jsou vzhledem k extrémně nízké propustnosti světla naprosto nevhodné. Plexisklo a sklo s mezifólií jsou vzhledem k dostatečné propustnosti vhodné. Dále bylo ověřeno, že LED moduly splňují výrobcem deklarovaný průměrný jas $7500 \frac{cd}{m^2}$.

4.2 Měření teploty chromatičnosti a spektra záření

Ekvivalentní teploty chromatičnosti i jednotlivá spektra záření byla měřena spektrometrem Uprtek MK350S. Měření ekvivalentní teploty chromatičnosti (CCT) má smysl pouze u bílých světelných zdrojů, proto bylo měřeno bílé světlo, které LED moduly vytváří spojením všech složek RGB.

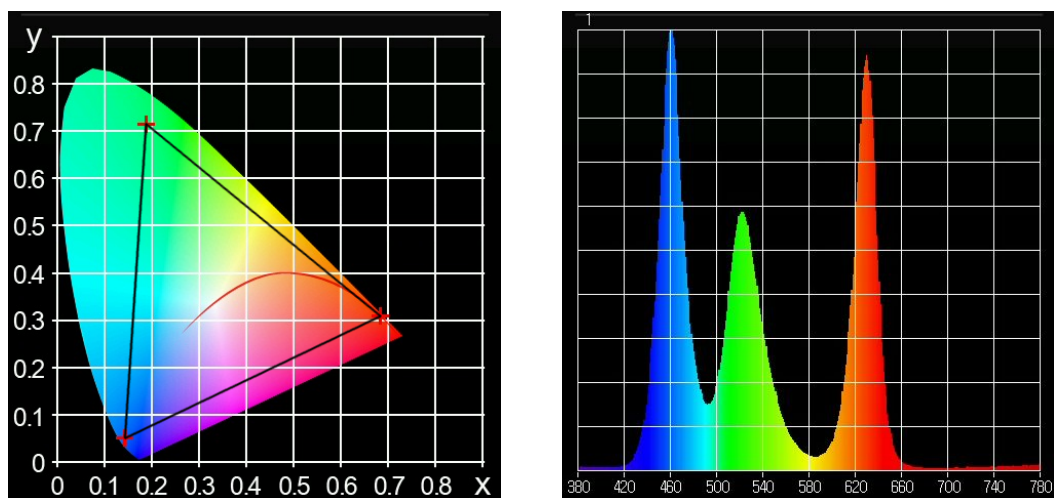
Zároveň je spektrometr schopný změřit spektrum záření a určit pro vyzařované světlo parametry x a y v barevném prostoru CIE1931, které jednoznačně definují barvu. Z těchto měření bude možné určit, jestli difuzory propouštějí, resp. pohlcují některé vlnové délky více než jiné. Pokud by difuzor některé vlnové délky pohlcoval více než jiné, mělo by to za následek změnu barvy procházejícího světla. Rozšířená nejistota měření je opět stanovena dle [33] $U_{95\%} = 5,04\%$.

V tabulce 4.2 jsou vlnové délky špičkových hodnot jednotlivých složek. Na obrázku 4.1 je chromatický diagram CIE1931 se znázorněním hranic barev, které jsou schopné LED čipy zobrazit, a spektrum bílé barvy. Na obrázku 4.2 jsou jednotlivá spektra základních barev LED modulů.

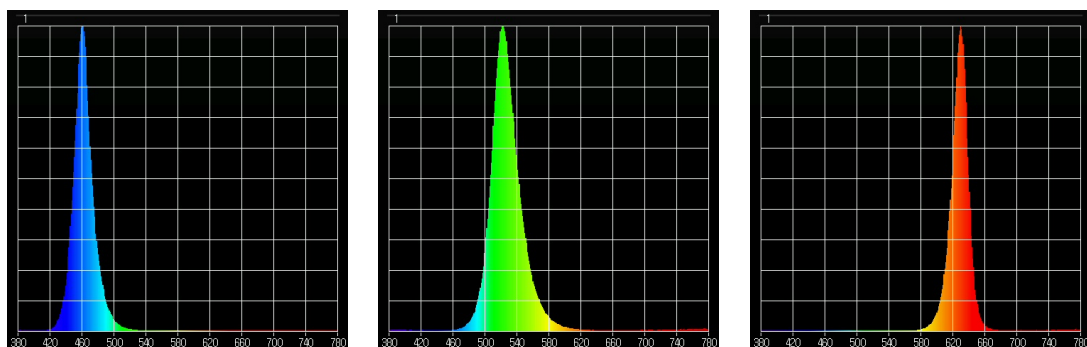
Barevná složka	Vlnová délka λ [nm]
Červená (R)	630
Zelená (G)	522
Modrá (B)	461

Tabulka 4.2: Změřené vlnové délky špičkových hodnot barevných složek RGB LED čipů v LED modulech

Naměřené spektrum záření odpovídá bílému světlu složenému z barevných složek RGB. Zároveň jsou ve spektru jasně rozeznatelné jednotlivé složky. Z tabulky 4.3 vyplývá, že různé vzdálenosti difuzoru od LED čipů nemají vliv na kolorimetrické parametry, což bylo očekáváno. Protože vzdálenost difuzoru od LED čipů nemá vliv na spektrum záření, není třeba provádět měření v obou vzdále-



Obrázek 4.1: Chromatický diagram CIE1931 a hranice zobrazitelných barev LED modulů (vlevo), spektrum bílého světla bez difuzoru (vpravo)

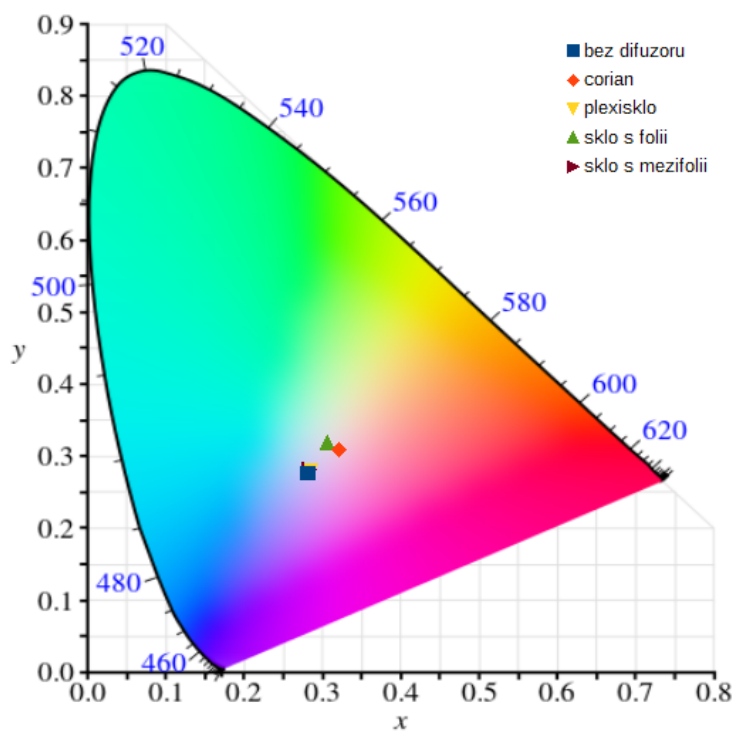


Obrázek 4.2: Relativní spektra jednotlivých základních barev LED modulů

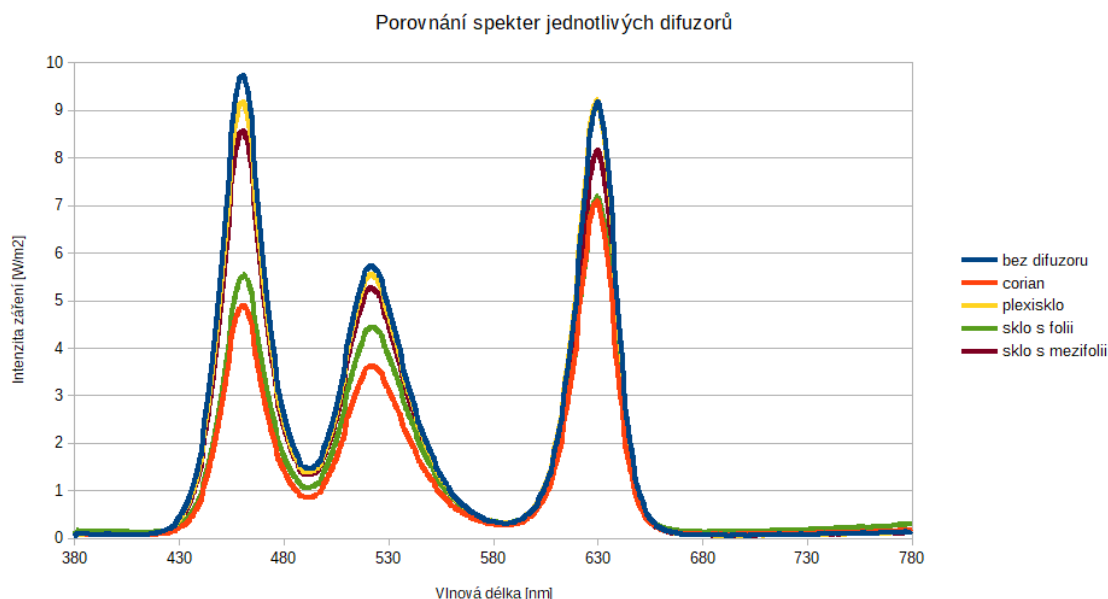
nostech, ale postačí pouze ve vzdálenosti 0 cm. Spektrum záření je zaznamenáno relativně, absolutní hodnoty intenzit jsou získány přepočtem.

Difuzor	Teplota chromatičnosti CCT [K]	Parametr x [-]	Parametr y [-]
Žádný	10 720	0,2812	0,2765
Corian 0 cm	6190	0,3205	0,3091
Corian 3 cm	6100	0,3220	0,3096
Plexisklo 0 cm	9950	0,2853	0,2799
Plexisklo 3 cm	9650	0,2875	0,2808
Sklo s fólií 0 cm	6970	0,3064	0,3185
Sklo s fólií 3 cm	6870	0,3079	0,3192
Sklo s mezifólií 0 cm	10 140	0,2823	0,2828
Sklo s mezifólií 3 cm	10 210	0,2819	0,2825

Tabulka 4.3: Ekvivalentní teploty chromatičnosti jednotlivých difuzorů, parametry x a y barevného prostoru CIE1931



Obrázek 4.3: Zobrazení teplot chromatičnosti jednotlivých difuzorů



Obrázek 4.4: Porovnání spekter jednotlivých difuzorů

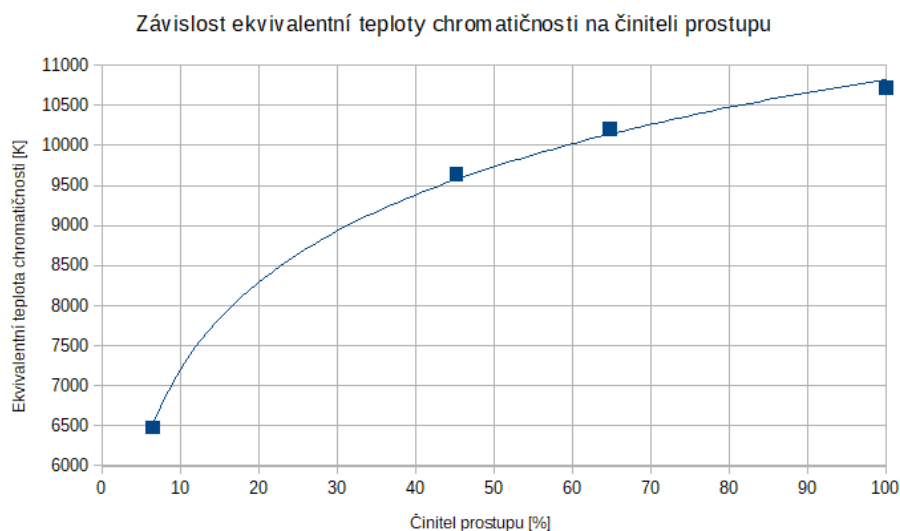
Z obrázku 4.3 vyplývá, že u Corianu a u skla s fólií dochází ke snížení ekvivalentní teploty chromatičnosti, resp. ke změně parametrů x a y barevného prostoru CIE1931. Pro zjištění příčiny je třeba porovnat spektra obou difuzorů se situací bez difuzoru. Z porovnání spekter na obrázku 4.4 vyplývá, že spektrum plexiskla a skla s mezifólií se od spektra LED čipů výrazně neliší. U skla s fólií je patrné, že difuzor výrazně více pohlcuje krátké vlnové délky v modré oblasti, což má za následek posun barvy směrem ke žluté barvě (k nižší ekvivalentní teplotě chromatičnosti). Ze spektra Corianu je vidět, že difuzor výrazně více pohlcuje krátké a střední vlnové délky v modré a zelené oblasti, což vede k posunu barvy směrem k oranžové barvě (k nižší ekvivalentní teplotě chromatičnosti).

Skutečnost, že k posunu ekvivalentní teploty chromatičnosti k nižším hodnotám dochází právě u difuzoru z Corianu a skla s fólií, mě přivedla k úvaze, jak souvisí ekvivalentní teplota chromatičnosti s činitelem prostupu světla. V tabulce 4.4 jsou uvedeny ekvivalentní teploty chromatičnosti a činitelé prostupu světla jednotlivých difuzorů a na obrázku 4.5 je graf závislosti ekvivalentní teploty chromatičnosti na činiteli prostupu světla. Z grafu je patrné, že předpokládaná závislost skutečně existuje a závislost má charakter logaritmické funkce.

Z měření chromatičnosti a spektra bylo zjištěno, že plexisklo a sklo s mezifólií nemají na procházející světlo vliv, zatímco Corian a sklo s fólií pohlcují nižší

Difuzor	Teplota chromatičnosti [K]	Činitel prostupu [%]
Žádný	10 720	100
Corian	6100	8,28
Plexisklo	9650	45,2
Sklo s fólií	6870	4,66
Sklo s mezifólií	10 210	64,8

Tabulka 4.4: Ekvivalentní teploty chromatičnosti jednotlivých difuzorů a jim odpovídající činitelé prostupu světla



Obrázek 4.5: Graf závislosti ekvivalentní teploty chromatičnosti na činiteli prostupu světla s proloženou křivkou logaritmické funkce

vlnové délky a způsobují posuv ekvivalentní teploty chromatičnosti k nižším hodnotám, teplejším odstínům. Zároveň se nepotvrdilo podezření, že zelený tón skla ovlivňuje spektrum procházejícího světla. Z grafu závislosti ekvivalentní teploty chromatičnosti na činiteli prostupu světla lze vyvodit obecný závěr, že s rostoucím činitelem prostupu klesá ekvivalentní teplota chromatičnosti.

4.3 Jasové mapy

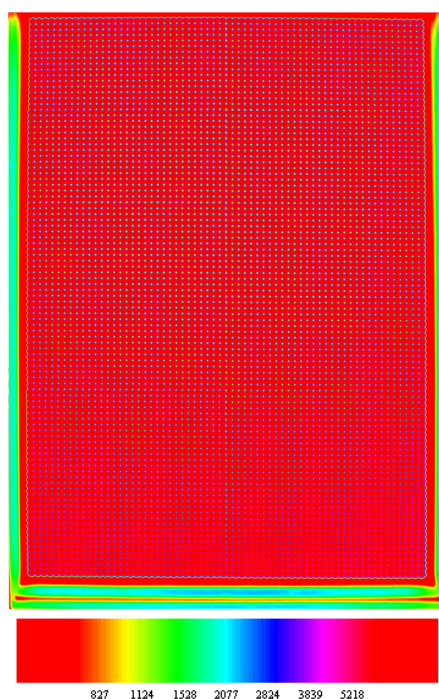
Jasové mapy mají za cíl určit, jaký efekt bude mít prosvícení difuzoru LED čipy, kdy jsou hledány rozdíly v jasech. Projeví se homogenita materiálu u Corianu a plexiskla, u skel se může projevit vliv odrazů od hran. Obecně je rovnoměrnost jasů očekávána relativně vysoká, protože difuzory jsou podsvětlovány plošně.

Nejlepšího výsledku dosáhne difuzor s nejnižšími rozdíly v jasech.

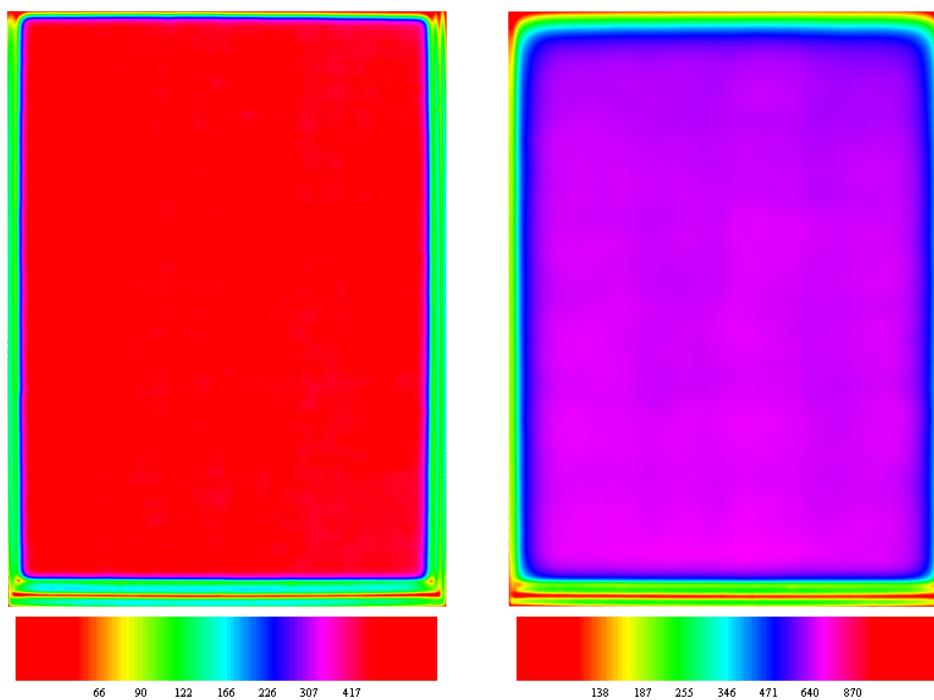
Všechny difuzory byly vyfotografovány experimentálním fotoaparátem Fujifilm Finepix S2 Pro, kterým disponuje Katedra elektroenergetiky Elektrotechnické fakulty a je upraven pro snímání jasových map. Poté byly všechny difuzory vyfotografovány fotoaparátem Raspberry Pi a vygenerovány jasové mapy podle postupu uvedeném v kapitole 2. Jasové mapy byly snímány pro každý difuzor ve dvou vzdálenostech od čipů – 0 cm a 3 cm.

4.3.1 Jasové mapy pořízené fotoaparátem Finepix

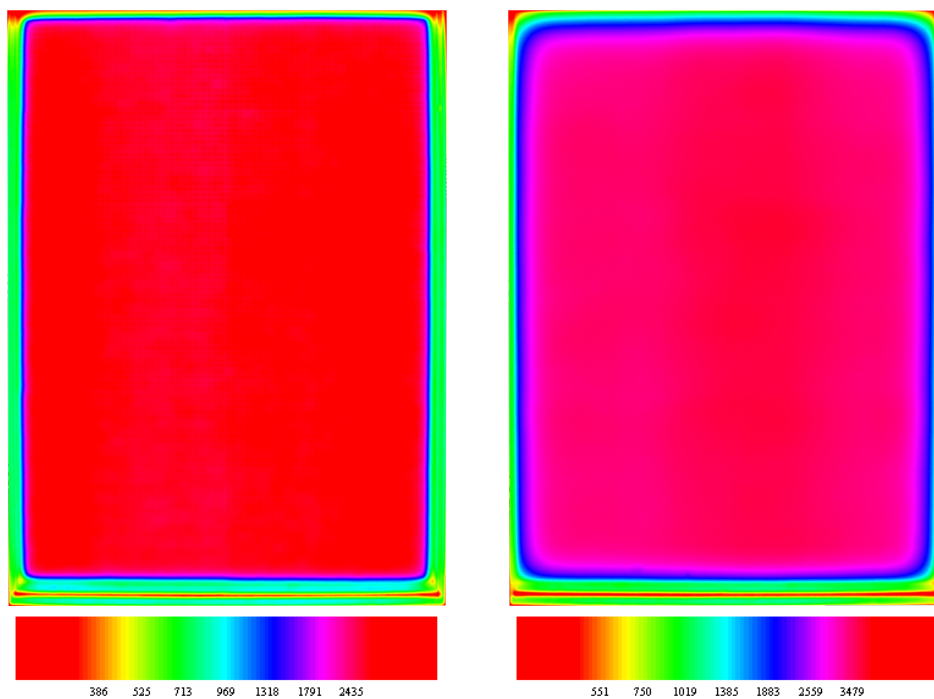
Postup snímání a generace map je popsán v kapitole 2. Získané jasové mapy zde budou především sloužit pro vzájemné porovnání s jasovými mapami pořízenými fotoaparátem Raspberry Pi. Pro fotoaparát byla provedena regresní analýza a naměřené hodnoty byly kalibrovány. Uvedené číselné hodnoty na stupnici jsou absolutními hodnotami jasu v jednotkách $\frac{cd}{m^2}$. Červená místa na jasové mapě jsou místa podexponovaná, nebo naopak přeexponovaná. Jasy v těchto oblastech není možné určit. Z tohoto důvodu jsou některé jasové mapy nepoužitelné.



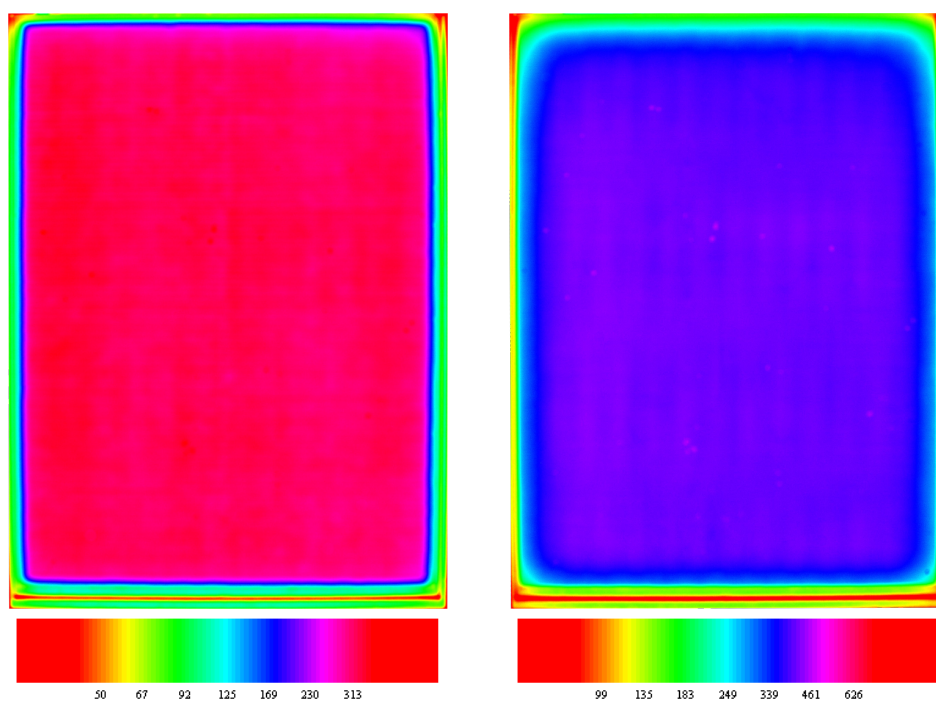
Obrázek 4.6: Fotoaparát Finepix S2 Pro: Jasová mapa LED čipů bez difuzoru



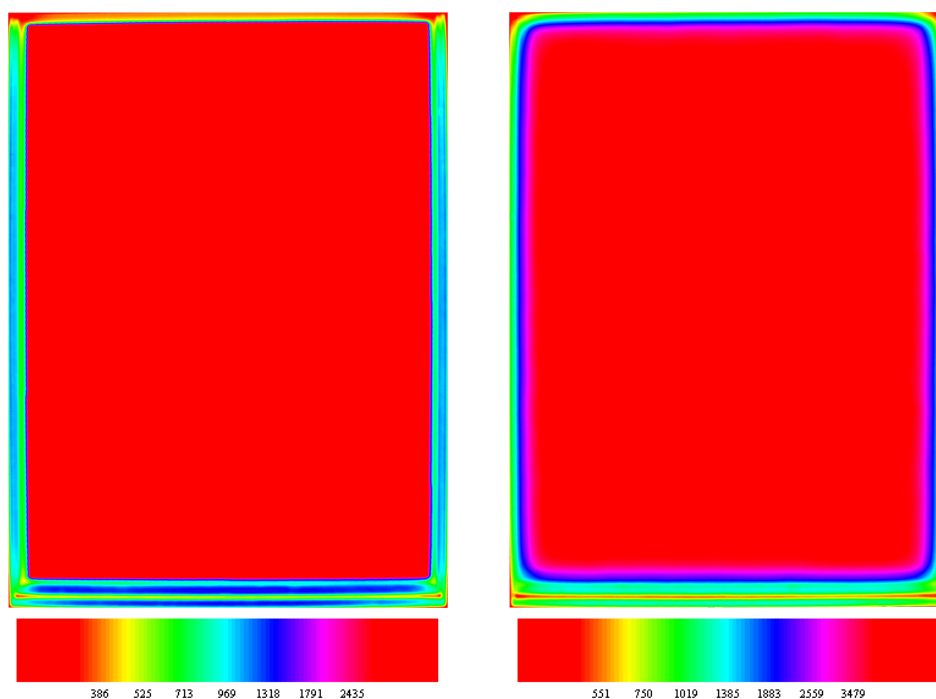
Obrázek 4.7: Fotoaparát Finepix S2 Pro: Jasové mapy difuzoru Corian, vlevo 0 cm a vpravo 3 cm



Obrázek 4.8: Fotoaparát Finepix S2 Pro: Jasové mapy difuzoru Plexisklo, vlevo 0 cm a vpravo 3 cm



Obrázek 4.9: Fotoaparát Finepix S2 Pro: Jasové mapy difuzoru Sklo s fólií, vlevo 0 cm a vpravo 3 cm

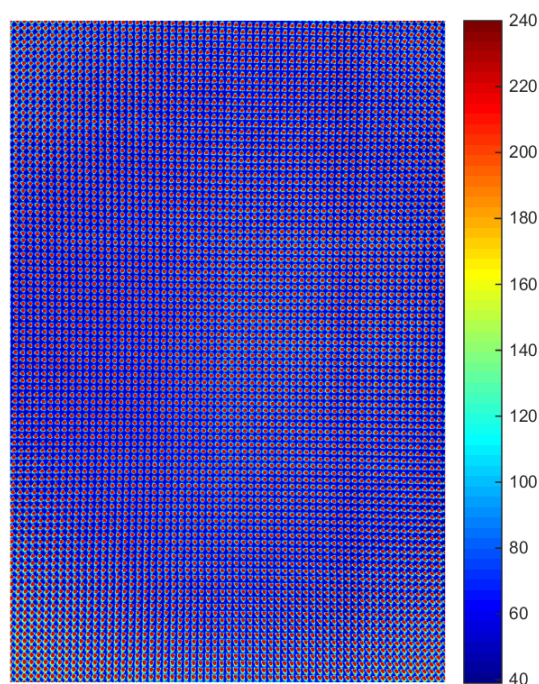


Obrázek 4.10: Fotoaparát Finepix S2 Pro: Jasové mapy difuzoru Sklo s mezifólií, vlevo 0 cm a vpravo 3 cm

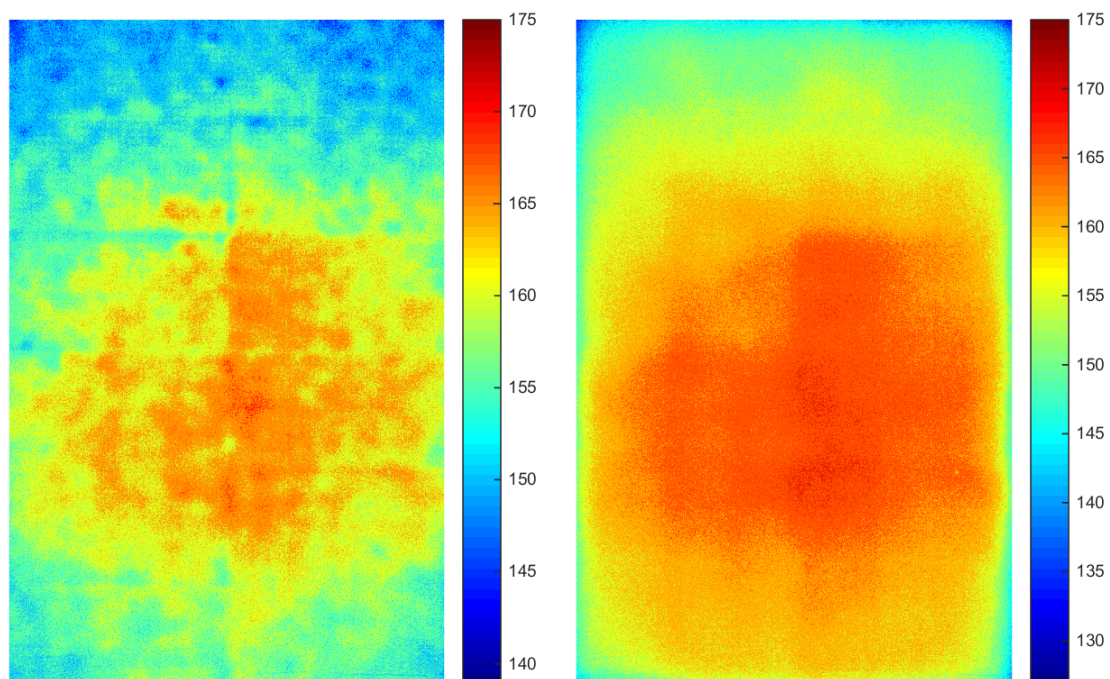
Z jasových map pořízených fotoaparátem Finepix S2 Pro je většina map pře-světlených, a nejsou tedy použitelné. U všech difuzorů je však patrný rozdíl v rychlosti přechodu jednotlivých jasů mezi vzdálenostmi 0 cm a 3 cm. U Corianu ve vzdálenosti 3 cm jsou vidět jisté „fleky“ a u Skla s fólií ve vzdálenosti 3 cm lze identifikovat bubliny pod nedokonale nalepenou fólií jako jasnější místa. Žádná jasová mapa ve vzdálenosti 0 cm nezachytila prokreslující se jednotlivé LED čipy, i když při pozorování se prokreslovaly velmi zřetelně. Je třeba pozitivně zhodnotit, že naměřené hodnoty absolutních jasů pořízené fotoaparátem Finepix S2 Pro odpovídají jasům naměřeným jasoměrem.

4.3.2 Jasové mapy pořízené fotoaparátem Raspberry Pi

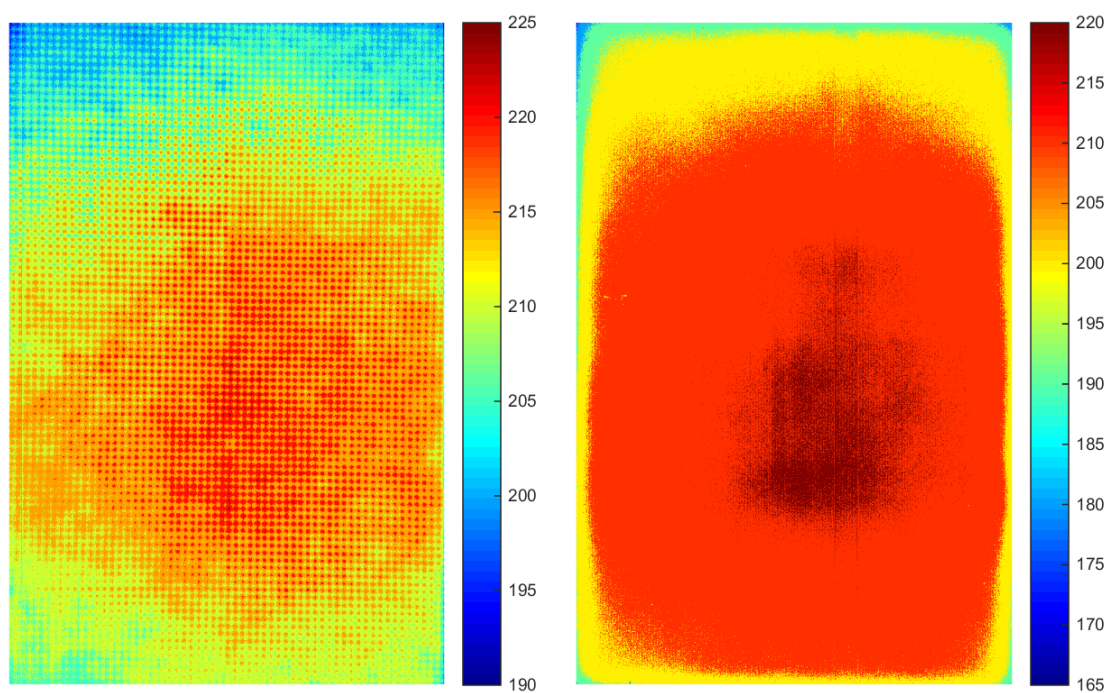
Jak již bylo zmíněno výše, nejsou absolutní hodnoty jasů mezi snímky porovnatelné. Hodnoty jasů zaznamenaných v jasových mapách pomocí fotoaparátu Raspberry Pi jsou relativní. Je možné z nich získat minimální, maximální a průměrnou relativní hodnotu a z nich je možné vypočítat rovnoměrnost, i když se jedná o relativní hodnoty.



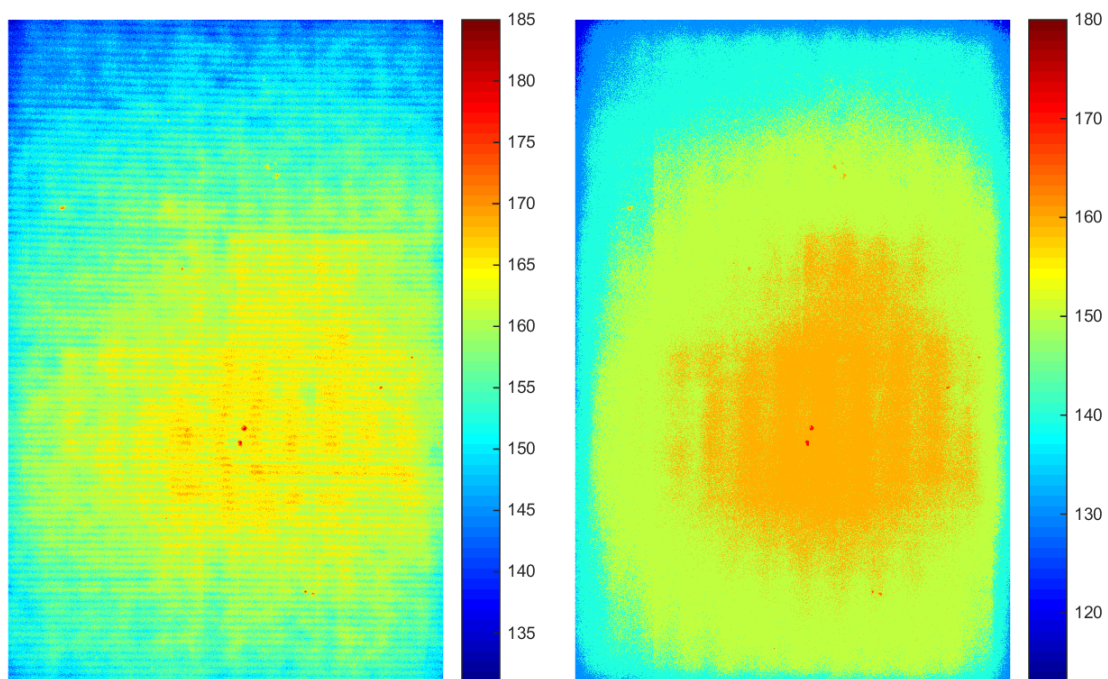
Obrázek 4.11: Fotoaparát Raspberry Pi: Jasová mapa LED čipů bez difuzoru



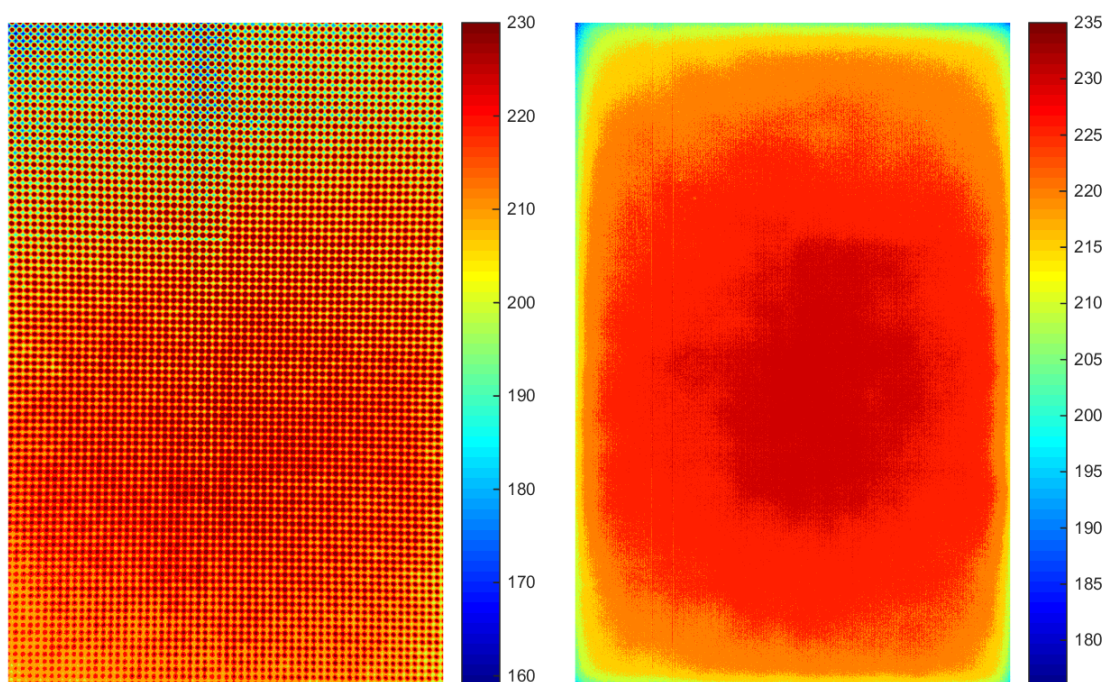
Obrázek 4.12: Fotoaparát Raspberry Pi: Jasové mapy difuzoru Corian, vlevo 0 cm a vpravo 3 cm



Obrázek 4.13: Fotoaparát Raspberry Pi: Jasové mapy difuzoru Plexisklo, vlevo 0 cm a vpravo 3 cm



Obrázek 4.14: Fotoaparát Raspberry Pi: Jasové mapy difuzoru Sklo s fólií, vlevo 0 cm a vpravo 3 cm



Obrázek 4.15: Fotoaparát Raspberry Pi: Jasové mapy difuzoru Sklo s mezifólií, vlevo 0 cm a vpravo 3 cm

U všech difuzorů je zřetelný rozdíl ve vzdálenosti difuzoru od LED čipů. Při vzdálenosti 0 cm jsou u většiny difuzorů zřetelné LED čipy, které se prokreslují skrze použitý materiál. U Corianu se body neprokreslují ani při vzdálenosti 0 cm, ale na difuzoru se tvoří jakési „fleky“. Ty byly zaznamenány již na jasové mapě pořízené fotoaparátem Finepix S2 Pro – jedná se o vnitřní strukturu materiálu. Při vzdálenosti 3 cm se již u žádného difuzoru body neprokreslují. Zároveň se při vzdálenosti 3 cm z hlediska rovnoměrnosti chovají všechny difuzory velmi podobně, jasové mapy jsou až na intenzitu srovnatelné. U difuzoru Sklo s fólií jsou na jasové mapě identifikovatelné bubliny, které vznikly nedokonalým přilepením fólie. Jsou to dva intenzivní body zhruba uprostřed snímku a jsou zřetelné v obou vzdálenostech.

4.4 Jasová analýza

Každá fotografovaná situace má specifické jasové podmínky a fotoaparát se těmito jasovými podmínkami přizpůsobuje nastavením hodnoty expozice, resp. expozičním časem. Hodnota expozice EV závisí na hodnotě citlivosti ISO , na hodnotě clonového čísla N a na expozičním čase t . Zároveň je potřeba hodnotu expozice uvádět pro základní citlivost $ISO = 100$, proto je nutný při snímání s jinou citlivostí přepočítání na základní hodnotu. Všechny uváděné hodnoty expozic jsou tedy přepočítány na základní citlivost a měly by být uváděny jako $EV = EV_{100}$. Pro výpočet je možné použít následující vzorec [19]:

$$EV = \log_2 \frac{N^2}{t} - \log_2 \frac{ISO}{100} \quad [-] \quad (4.2)$$

Hodnota clonového čísla je pevná $N = 2$, hodnota citlivosti je $ISO = 50$ a expoziční čas je automaticky volený parametrem fotoaparátem. V tabulce 4.5 jsou uvedeny hodnoty expozičního času a vypočítané hodnoty expozic jednotlivých jasových map. Hodnoty expozic jsou důležitým parametrem při hledání převodní regresní funkce pro výpočet absolutních hodnot jasů.

4.4.1 Měření rovnoměrnosti jasů

Měření rovnoměrnosti jasů bylo původně zamýšleno provést tak, že bude jasoměrem změřena matice kontrolních bodů, z nichž bude vypočítána rovnoměrnost. Ukázalo se však, že tento způsob měření je nepoužitelný. Byl změřen difuzor,

Difuzor	Expoziční čas [t]	Expozice EV [-]
Žádný	1/439	11,8
Corian 0 cm	1/196	10,6
Corian 3 cm	1/194	10,6
Plexisklo 0 cm	1/560	12,1
Plexisklo 3 cm	1/548	12,1
Sklo s fólií 0 cm	1/121	9,9
Sklo s fólií 3 cm	1/125	9,9
Sklo s mezifólií 0 cm	1/619	12,3
Sklo s mezifólií 3 cm	1/612	12,3

Tabulka 4.5: Expoziční časy a vypočítané hodnoty expozičních EV jednotlivých difuzorů jasových map pořízených fotoaparátem Raspberry Pi

u kterého byla odhadnuta nejhorší rovnoměrnost jasů. Výsledná rovnoměrnost byla vypočítána $U = 0,98$, což je zcela nevypovídající údaj. Podobné hodnoty se daly očekávat u všech difuzorů.

Důležitým analytickým nástrojem tedy budou jasové mapy – především snímky pořízené fotoaparátem Raspberry, protože jejich výstupem jsou číselné hodnoty, které lze statisticky zpracovávat.

Rovnoměrnost jasů byla počítána standardním způsobem, jak je ve světelné technice běžné. Rovnoměrnost jasů se určí podle následujícího vzorce:

$$U = \frac{L_{min}}{L_p} \quad [-] \quad (4.3)$$

,kde L_{min} je minimální hodnota jasu difuzoru

a L_p je průměrná hodnota jasu difuzoru.

V tabulce 4.4.1 jsou uvedeny rovnoměrnosti jednotlivých difuzorů. Jak je ale vidět ze samotného vzorce, je rovnoměrnost velmi závislá na minimální hodnotě. Z toho důvodu byla také vypočítána směrodatná odchylka pro každý difuzor a byl sestaven histogram. Směrodatná odchylka na rozdíl od rovnoměrnosti lépe postihuje rozkolísanost dat, vyjadřuje, jak moc jsou jednotlivé hodnoty vzdálené od průměrné hodnoty. Zatímco rovnoměrnost by měla být co nejvyšší, směrodatná odchylka naopak co nejnižší. Směrodatná odchylka se vypočítá podle vzorce:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad [-] \quad (4.4)$$

,kde n je počet výpočetních bodů difuzoru

a \bar{x} je průměrná hodnota jasu difuzoru $\bar{x} = L_p$.

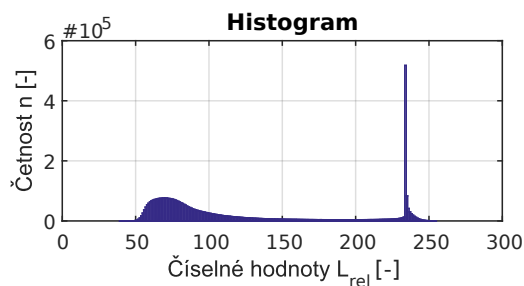
Difuzor	Rovnoměrnost $U [-]$	Směrodatná odchylka $s [-]$
Žádný	0,324	64,5
Corian 0 cm	0,869	4,94
Corian 3 cm	0,792	5,81
Plexisklo 0 cm	0,859	5,13
Plexisklo 3 cm	0,775	5,85
Sklo s fólií 0 cm	0,823	6,07
Sklo s fólií 3 cm	0,737	7,29
Sklo s mezifólií 0 cm	0,720	11,5
Sklo s mezifólií 3 cm	0,783	5,37

Tabulka 4.6: Vypočítané rovnoměrnosti jasů a směrodatné odchylky hodnot jasů

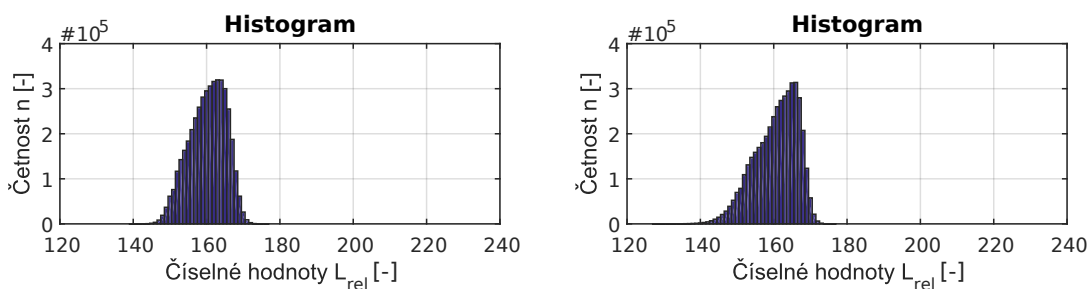
Rovnoměrnost jasů se u všech difuzorů pohybuje od 72 % do 87 %, což je relativně malé rozpětí. Znamená to, že všechny difuzory mají rovnoměrnost podobnou, žádný nijak výrazně nevybočuje. Rovnoměrnost ve vzdálenosti 0 cm je u většiny difuzorů větší zhruba o sedm procentních bodů oproti vzdálenosti 3 cm. Rovnoměrnost u vzdálenosti 3 cm je horší vlivem okrajů, lepší hodnoty u vzdálenosti 0 cm jsou dány tím, že se jedná o plošné podsvětlení. Jedinou výjimkou je Sklo s mezifólií ve vzdálenosti 0 cm, které má rovnoměrnost jasů neúměrně nízkou. Hodnoty rovnoměrností potvrzují i směrodatné odchylky, které se pohybují od 5 do 7, což je malé rozpětí. Opět hodnotově vybočuje Sklo s fólií ve vzdálenosti 0 cm, které má směrodatnou odchylku dvojnásobnou oproti ostatním difuzorům.

4.4.2 Histogramy difuzorů

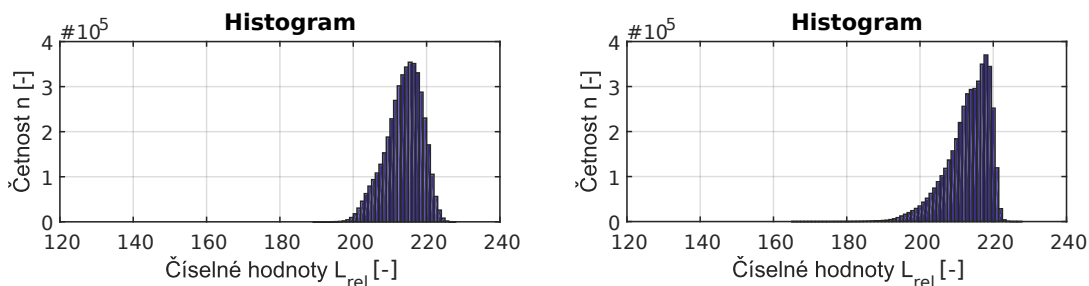
Asi nejnázorněji postihuje rozložení hodnot histogram, který zobrazuje četnosti jednotlivých číselných hodnot. Ideální tvar histogramu je jeden úzký symetrický kužel, což znamená, že všechny hodnoty jsou blízko střední (průměrné) hodnotě. Pokud je histogram příliš široký (obsahuje velké množství různých hodnot), budou na difuzoru velké rozdíly jasů, což není žádoucí. Osu x histogramu tvoří zaznamenané číselné hodnoty a osu y jejich četnosti.



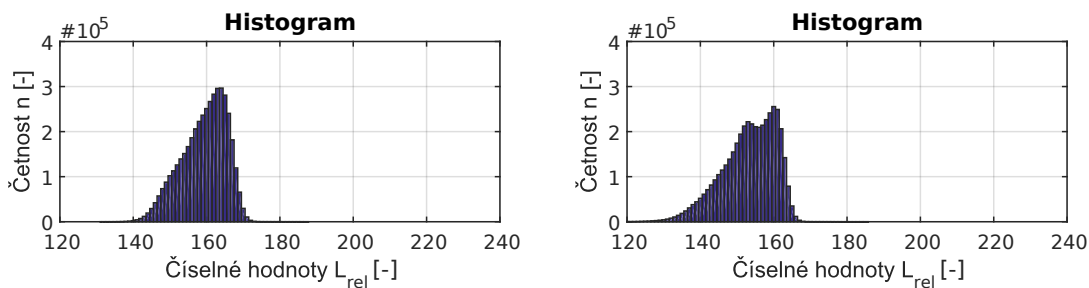
Obrázek 4.16: Histogram LED čipů bez difuzoru



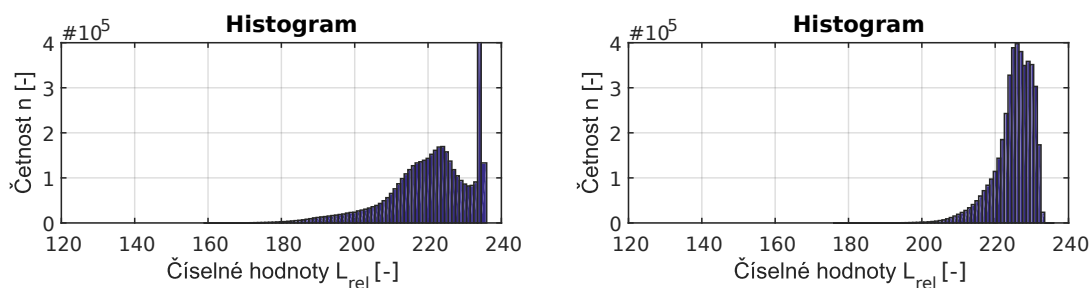
Obrázek 4.17: Histogram difuzoru Corian, vlevo 0 cm a vpravo 3 cm



Obrázek 4.18: Histogram difuzoru Plexisklo, vlevo 0 cm a vpravo 3 cm



Obrázek 4.19: Histogram difuzoru Sklo s fólií, vlevo 0 cm a vpravo 3 cm



Obrázek 4.20: Histogram difuzoru Sklo s mezifólií, vlevo 0 cm a vpravo 3 cm

Z grafů histogramů výrazně vybočuje jediný, a to Sklo s mezifólií ve vzdálenosti 0 cm. Tento histogram je podobný histogramu bez difuzoru. Existuje velké množství bodů, které jsou přesycené a velice intenzivní a zároveň zbylá místa jsou výrazně méně intenzivní. Dochází k velkým rozdílům v jasech, takže se sklo s mezifólií nechová jako správný difuzor. Je to také příčina malé rovnoměrnosti tohoto difuzoru. Zbylé histogramy jsou velmi podobné a mají očekávaný tvar.

Z hlediska rovnoměrnosti jasů vyplývá, že mezi vzdáleností 0 cm a 3 cm není žádný podstatný rozdíl. Zároveň nejsou ani mezi jednotlivými difuzory velké rozdíly v rovnoměrnostech, s výjimkou Skla s fólií, který má nejvyšší světelnou propustnost, ale byly u něj naměřeny velké rozdíly v jasech. To značí malou difuzní schopnost a pro využití pro LED stěnu je tedy nevhodný. Z jasových map byly u Skla s fólií zřetelně zjištěny velmi jasné body v místech bublin, které zůstaly po nedokonalém nalepení fólie. Při použití fólie je nutné dodržet dokonalé nalepení fólie na sklo a vyvarovat se bublin, protože by tím byl zcela degradován výsledek.

Při porovnání jasových map pořízených oběma fotoaparáty se jeví snímky z fotoaparátu Raspberry Pi jako zřetelnější a s vyšší hloubkou. Tyto jasové mapy byly schopné zachytit prokreslující se LED čipy a zároveň z nich bylo možno získat data pro kvantifikaci jasových poměrů difuzorů. Snímky ve větším rozlišení jsou součástí práce jako příloha.

4.5 Subjektivní analýza

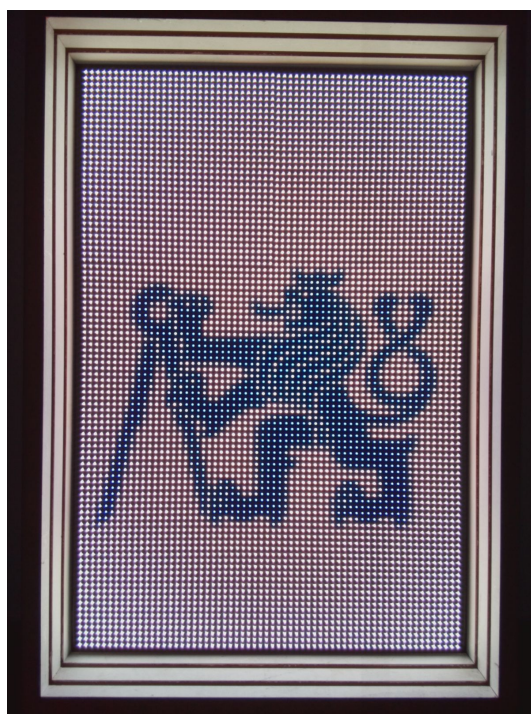
Dosud prováděná analýza byla založena na měření, byla tedy kvantifikovatelná. Neméně důležitou součástí analýzy LED stěny je ale i subjektivní analýza, tedy hodnocení, které je založeno na vnímání.

Na modelu LED stěny byl zobrazen testovací obrázek a byl hodnocen estetický dojem. Obrázek byl záměrně volen tak, aby obsahoval přiměřené množství detailu.

Jako vhodný obrázek bylo vybráno logo ČVUT, modrý lev na bílém pozadí. Analýza byla prováděna z bezprostřední blízkosti cca 2 m, což je minimální pozorovací vzdálenost i ve skutečnosti. Výsledné snímky byly konzultovány s architekty.

Ze srovnání vyplývá, že vzdálenost LED čipů od difuzoru hraje zásadní roli. Ve vzdálenosti 3 cm je již obrázek tak rozmazán, že již není zřetelný. To bylo pozorováno u všech difuzorů. Ve vzdálenosti 0 cm se ale naopak u většiny difuzorů prokreslují LED čipy. Prokreslování je nejvíce patrné u skla s mezifólií a plexiskla, méně už u skla s fólií. Prokreslování LED čipů kopíruje jasové mapy pořízené fotoaparátom Raspberry Pi. Je ale otázkou, zda-li je prokreslování LED čipů negativní vlastnost, nebo je naopak vyžadováno.

Sklo s fólií nepůsobí dobrým dojmem, protože ačkoli je difuzor málo jasný, prokreslují se LED čipy. Obrázek s Corianem působí celistvě, bez viditelných LED čipů, jsou však patrné jisté „fleky“ ve struktuře difuzoru. Nevýhodou Corianu je též nízký jas. Sklo s mezifólií je pozitivně hodnoceno jako velmi jasné, nevýhodou je ale prokreslování LED čipů, které je až příliš výrazné a ostré. Obrázek se tak jeví jako kostkovaný. Dobře bylo hodnoceno plexisklo, jas je vysoký a prokreslování LED čipů je akorát na hranici mezi ostrými hranami a vyhlazeností.



Obrázek 4.21: Obrázek bez difuzoru



Obrázek 4.22: Obrázek s difuzorem Corian, vlevo 0 cm a vpravo 3 cm



Obrázek 4.23: Obrázek s difuzorem Plexisklo, vlevo 0 cm a vpravo 3 cm



Obrázek 4.24: Obrázek s difuzorem Sklo s fólií, vlevo 0 cm a vpravo 3 cm



Obrázek 4.25: Obrázek s difuzorem Sklo s mezifólií, vlevo 0 cm a vpravo 3 cm

4.6 Vyhodnocení výsledků měření

Vyhodnocení výsledků všech měření je obtížné. Nebyla stanovena metodika hodnocení, protože vzhledem k charakteru měření ji ani nelze stanovit. Není možné určit váhu jednotlivých měření, ani určit, jaký vliv na celkový výsledek mají jednotlivá měření. Jediná možná cesta komplexního hodnocení je pro každé jednotlivé měření posuzovat, zda-li jsou naměřené parametry konkrétního difuzoru akceptovatelné. Případně jsou-li v porovnání s ostatními difuzory naměřené parametry natolik odlišné, že je konkrétní difuzor tímto parametrem diskvalifikován. Nyní tedy budou výsledky jednotlivých měření rekapitulovány a sumarizovány.

Neexistuje jeden difuzor, který má ve všech parametrech nejlepší vlastnosti. Za nejlepší difuzor bude vybrát ten, který má nejméně podstatné nedostatky. V případě porovnávání dvou difuzorů bude záležet na tom, který z posuzovaných parametrů bude vyhodnocen jako důležitější.

Z měření činitele prostupu světla vyplynulo, že difuzory z Corianu a skla s fólií mají extrémně nízké hodnoty činitele prostupu světla (4 %, resp. 8 %). Tyto hodnoty jsou z ekonomického hlediska nevyhovující a pro použití jako difuzory jsou absolutně nevhodné. Difuzor z plexiskla má činitel prostupu 45 %, což je dobrá hodnota. Nejlepšího výsledku dosáhl difuzor ze skla s mezifólií, u něhož je činitel prostupu světla 65 %. Také bylo zjištěno, že vzdálenost difuzorů od LED čipů nemá na činitel prostupu vliv.

Z měření teploty chromatičnosti vyplynulo, že u difuzorů z Corianu a skla s fólií dochází k výraznému posunu teploty chromatičnosti do nižších hodnot (na 6190 K, resp. 6970 K). Je to dáno pohlčením krátkých (modrých a částečně zelených) vlnových délek difuzorem. Bylo dokázáno, že tento jev souvisí s činitelem prostupu světla – s rostoucím činitelem prostupu klesá teplota chromatičnosti. Takovýto pokles teploty chromatičnosti je výrazný a tyto difuzory musí být hodnoceny negativně. Naopak u difuzorů z plexiskla a skla s fólií dochází k velmi malému posunu teploty chromatičnosti, jsou tedy hodnoceny pozitivně. Byl ověřen předpoklad, že vzdálenost difuzorů od LED čipů nemá na teplotu chromatičnosti vliv. Také bylo ověřeno, že zelený tón skla u skleněných difuzorů nemá žádný vliv na spektrum procházejícího světla.

Při měření barevného spektra LED modulů byl zjištěn překvapivě velký barevný gamut, tedy široký rozsah zobrazitelných barev.

Z jasových map vyplynulo několik poznatků. Jasové mapy pořízené fotoaparát-

tem Raspberry Pi se osvědčily jako perspektivní. Všechny jasové mapy pořízené při vzdálenosti difuzorů 3 cm od LED čipů jsou velmi podobné a až na velikost hodnot jasu prakticky identické. Nejzajímavější jsou jasové mapy pořízené ve vzdálenosti 0 cm od LED čipů. U difuzoru z Corianu jasová mapa zachytila „fleky“, které byly pozorovány i okem. U difuzoru ze skla s fólií jasová mapa zachytila bubliny vzniklé nedokonalým nalepením fólie jako jasné body. Také tyto body byly zpozorovatelné okem. U difuzorů z plexiskla a ze skla s mezifólií je jasová mapa rovnoměrná s prokreslujícími se body, u skla s mezifólií jsou body výrazně ostřejší. Z hodnocení jasových map jsou tedy dobře hodnoceny difuzory z plexiskla a ze skla s mezifólií.

U měření rovnoměrnosti jasů se skoro všechny difuzory chovaly velmi podobně a dosahovaly vysokých hodnot rovnoměrnosti jasu U od 72 % do 87 %. Difuzor ze skla s mezifólií byl jediný, který v tomto směru vybočoval. Měl nejnižší rovnoměrnost a dvojnásobnou směrodatnou odchylku oproti ostatním difuzorům.

Grafy histogramů potvrdily měření rovnoměrnosti jasů, kdy skoro všechny difuzory vykázaly očekávané grafy. Vyjímkou byl opět difuzor ze skla s mezifólií ve vzdálenosti 0 cm, který byl na horní hranici hodnot výrazně přesycen. To znamená, že difuzor v této situaci neplní svou difuzní funkci. Nejlepší tvar histogramu měl difuzor z plexiskla ve vzdálenosti 0 cm od LED čipů.

Subjektivní analýza byla posledním hodnotícím kritériem. Všechny obrázky s difuzory ve vzdálenosti 3 cm od LED čipů byly rozmazané. Tím bylo určeno, že difuzor musí být umístěn těsně před LED čipy, tedy do vzdálenosti 0 cm. Jako dobré byly ohodnoceny difuzory z Corianu a plexiskla.

Výběr nejlepšího difuzoru nakonec proběhl vyřazovací metodou. Ze subjektivní analýzy vyplynulo umístění difuzoru do vzdálenosti 0 cm od LED čipů. Měřením činitele prostupu a měřením teploty chromatičnosti byly vyřazeny difuzory z Corianu a ze skla s fólií. Měřením rovnoměrnosti a histogramem byl vyřazen difuzor ze skla s mezifólií.

Jako nejlepší byl vybrán difuzor z plexiskla, který byl dobře hodnocen ve většině měření. Jistou nevýhodou tohoto difuzoru je samotný materiál (PMMA), který má nižší tepelnou odolnost. Je tedy vhodnější používat slabší LED moduly (svítivostí i příkonem), jinak by mohlo docházet k nežádoucím deformacím.

Při výběru vhodných světelných zdrojů byly uvažovány dvě formy RGB LED čipů - LED pásy a LED moduly. Tyto byly podrobně popsány a pro realizaci LED stěny byly vybrány LED moduly. Hlavním důvodem výběru byla jejich modularita a kvalita řídicích jednotek.

Dále byl zkonstruován funkční model RGB LED stěny o rozměrech 64×96 cm. Model se skládá z 12 LED modulů o celkovém rozlišení 64×96 bodů a osazen řídicí jednotkou. Rozměry modelu jsou Tento model má podobu boxu s drážkami, do kterých lze zasouvat vyměnitelné difuzory v různých vzdálenostech od LED čipů. Původně uvažovaný krok vzdáleností difuzorů od LED čipů byl 5 cm, to se ale v průběhu měření rovnoměrnosti ukázalo jako nevyhovující a bylo nutné vzdálenost upravit operačně podle možností hotové konstrukce. Měření tak byla prováděna ve dvou vzdálenostech difuzorů od LED čipů - 0 cm a 3 cm.

Součástí vývoje LED stěny byl i výběr vhodného difuzoru. Pro testování byly vybrány čtyři difuzory z různých materiálů: Corian, plexisklo, sklo s bílou fólií a sklo s matnou mezifólií.

Poté byla provedena řada měření světelně-technických parametrů RGB LED stěny se všemi difuzory. Byl změřen činitel prostupu světla, protože pro většinu difuzorů byl neznámý. Tím bylo zároveň ověřeno, že LED moduly mají deklarovaný jas.

Byla změřena teplota chromatičnosti jednotlivých difuzorů. Při tom byla zjiš-

těna závislost teploty chromatičnosti na činiteli prostupu světla – s rostoucím činitelem prostupu roste teplota chromatičnosti. Tato závislost platí obecně pro všechny průsvitné materiály (stejně se například chová sluneční záření při průchodu zemskou atmosférou).

Byly vygenerovány jasové mapy ze dvou fotoaparátů – z laboratorního fotoaparátu Finepix a z fotoaparátu Raspberry Pi, který byl pro potřeby diplomové práce upraven. Zatímco z fotoaparátu Finepix byly jasové mapy generovány podle odvozené procedury, generování jasových map z fotoaparátu Raspberry Pi bylo nutné odvodit. Byl popsán celý způsob generace jasových map od snímání přes zpracování dat až po zobrazení včetně výpisů zdrojových kódů. Jasové mapy jsou ale v relativních hodnotách, jejich převod do absolutních znamená nalézt převodní funkci a provést kalibraci. Tímto směrem se bude ubírat další výzkum.

Byla provedena analýza jasů z naměřených dat fotoaparátem Raspberry Pi, tedy statistické zpracování rovnoměrnosti jasů. Byly vyneseny histogramy jednotlivých jasových map.

Poslední analýzou bylo subjektivní hodnocení, kdy byl hlavním kritériem estetický vjem. Při této analýze vyvstala otázka, zda-li mají být na LED stěně viditelné jednotlivé obrazové body, nebo má-li difuzor body spojovat do spojitého obrazu.

Nakonec byl vybrán nejvhodnější materiál pro difuzor - plexisklo. Je to zejména z důvodu relativně vysokého činitele prostupu světla, malého posunu teploty chromatičnosti a optimálním difuzním vlastnostem.

Poslední dobou je patrná snaha používat pro difuzory netradiční materiály s neznámými parametry (např. Corian). Tato práce však prokázala, že tyto materiály jsou pro takové využití naprosto nevhovující.

Literatura

- [1] SOKANSKÝ, K., NOVÁK, T., BÁLSKÝ, M., BLÁHA, Z., CARBOL, Z., DIVIŠ, D., ... & ZÁVADA, J. Š. A. P. *Světelná technika*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 255 s. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [2] HABEL, Jiří, et al. *Světlo a osvětlování*. Vyd. 1. Praha: FCC Public, 2013. 624 s. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [3] HABEL, Jiří. *Světelná technika a osvětlování*. Vyd. 1. Praha: FCC Public, 1995. 437 s. ISBN 80-901-9850-3.
- [4] HABEL, Jiří. *Základy světelné techniky (1)*. Světlo: časopis pro světelnou techniku a osvětlování. Praha: FCC Public, 2008, 4. ISSN 1212-0812.
- [5] HABEL, Jiří. *Základy světelné techniky (3): Světelnětechnické veličiny (2. část)*. Světlo: časopis pro světelnou techniku a osvětlování. Praha: FCC Public, 2009, 2. ISSN 1212-0812.
- [6] HABEL, Jiří. *Základy světelné techniky (4): Základy fotometrie (1. část)*. Světlo: časopis pro světelnou techniku a osvětlování. Praha: FCC Public, 2009, 3. ISSN 1212-0812.
- [7] HABEL, Jiří. *Základy světelné techniky (5): Základy nauky o barvě (1. část)*. Světlo: časopis pro světelnou techniku a osvětlování. Praha: FCC Public, 2009, 5. ISSN 1212-0812.

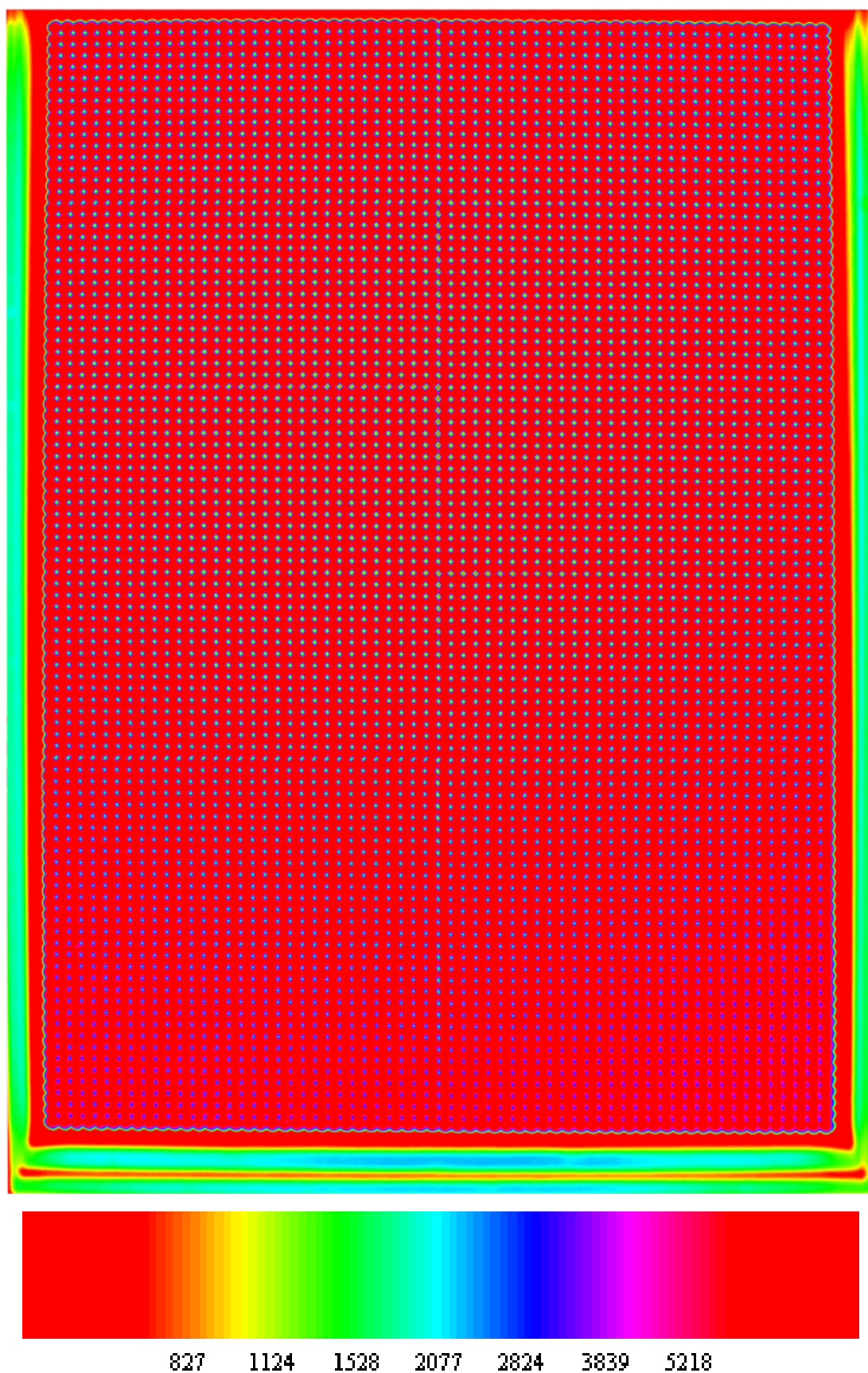
- [8] File:Color temperature.svg In: *Wikimedia Commons* [online]. [cit. 2017-12-15]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1570047>
- [9] File:CIE1931xy blank.svg In: *Wikimedia Commons* [online]. [cit. 2017-12-15]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7889658>
- [10] File:Synthese+.svg In: *Wikimedia Commons* [online]. [cit. 2017-12-15]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=818982>
- [11] File:SubtractiveColorMixing.png In: *Wikimedia Commons* [online]. [cit. 2017-12-15]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=113383>
- [12] YUV In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/YUV>
- [13] File:YUV UV plane.svg In: *Wikimedia Commons* [online]. [cit. 2017-12-18]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6977944>
- [14] FORD, Adrian; ROBERTS, Alan. *Colour space conversions*. Westminster University, London, 1998, 1998: 1-31.
- [15] File:Spectrometer schematic.gif In: *Wikimedia Commons* [online]. [cit. 2017-12-3]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2790976>
- [16] UPRtek. *MK350S LED Meter User Manual* [online]. [cit. 2017-12-3]. c2014. Dostupné z: <http://support.uprtek.com/DB/uploads/PDF/user%20manual-MK350S-en.pdf>
- [17] LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin. *Luminance Meters L 1000* [online]. [cit. 2017-12-3]. Dostupné z: http://smart-systems.su/files/modules/items/428/ru/smart_systems_lmt_lichtmesstechnik_gmbh_luminance_meters_l1000.pdf
- [18] FUJIFILM. *FinePix S2 Pro Owner's manual* [online]. [cit. 2017-12-3]. c2002. Dostupné z: https://www.fujifilmusa.com/shared/bin/S2_Manual.pdf
- [19] BÁLSKÝ, Marek. *Luminance values extraction from digital images*. In: *Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen)*, IEEE. IEEE, 2016. p. 1-3.

-
- [20] *Camera Module* [online]. [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/camera/README.md>
- [21] *Raspberry Pi Camera Module* [online]. [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/documentation/raspbian/applications/camera.md>
- [22] File:Yuv420.svg In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Yuv420.svg>
- [23] HISCOCKS, Peter D.; ENG, P. *Measuring Luminance with a Digital Camera*. Syscomp Electronic Design Limited, 2014.
- [24] WÜLLER, Dietmar; GABELE, Helke. *The usage of digital cameras as luminance meters*. In: Digital Photography. 2007. p. 65020U.
- [25] JANŽURA, Petr. *EXX: ArtGen* [fotografie]. [cit. 2017-03-02]. Dostupné z: <http://exx.cz/cs/realizace/artgen/>
- [26] LUIJTEN, Hans. *Arduino and WS2812 LEDs* [online]. Tweaking4All 2014. [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <https://www.tweaking4all.com/hardware/arduino/arduino-ws2812-led/>
- [27] MACUTONG, Jhon Carlo. *APA102 aka "Superled"* [online]. Tim's Blog 2014. [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <https://www.adafruit.com/product/2343>
- [28] *APA102* [online]. [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <http://catcatcat.d-lan.dp.ua/wp-content/uploads/2015/02/APA102-LED-STRIP.pdf>
- [29] *Medium 16x32 RGB LED matrix panel* [online]. Adafruit Industries. [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <https://www.adafruit.com/product/420>
- [30] BURGESS, Phillip. *32x16 and 32x32 RGB LED Matrix* [online]. Adafruit Industries 2016. [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/32x16-32x32-rgb-led-matrix.pdf>
- [31] *P10 RGB Module P10RGB -OSAB1S- 32 16* [online]. SANDER Electronics. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.sanderled.com.tw/english/sdm-p10rgb-osab1s-3216.pdf>
- [32] ČSN EN 13032: *Světlo a osvětlení - Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel*. Praha: ÚNMZ, Říjen 2012.

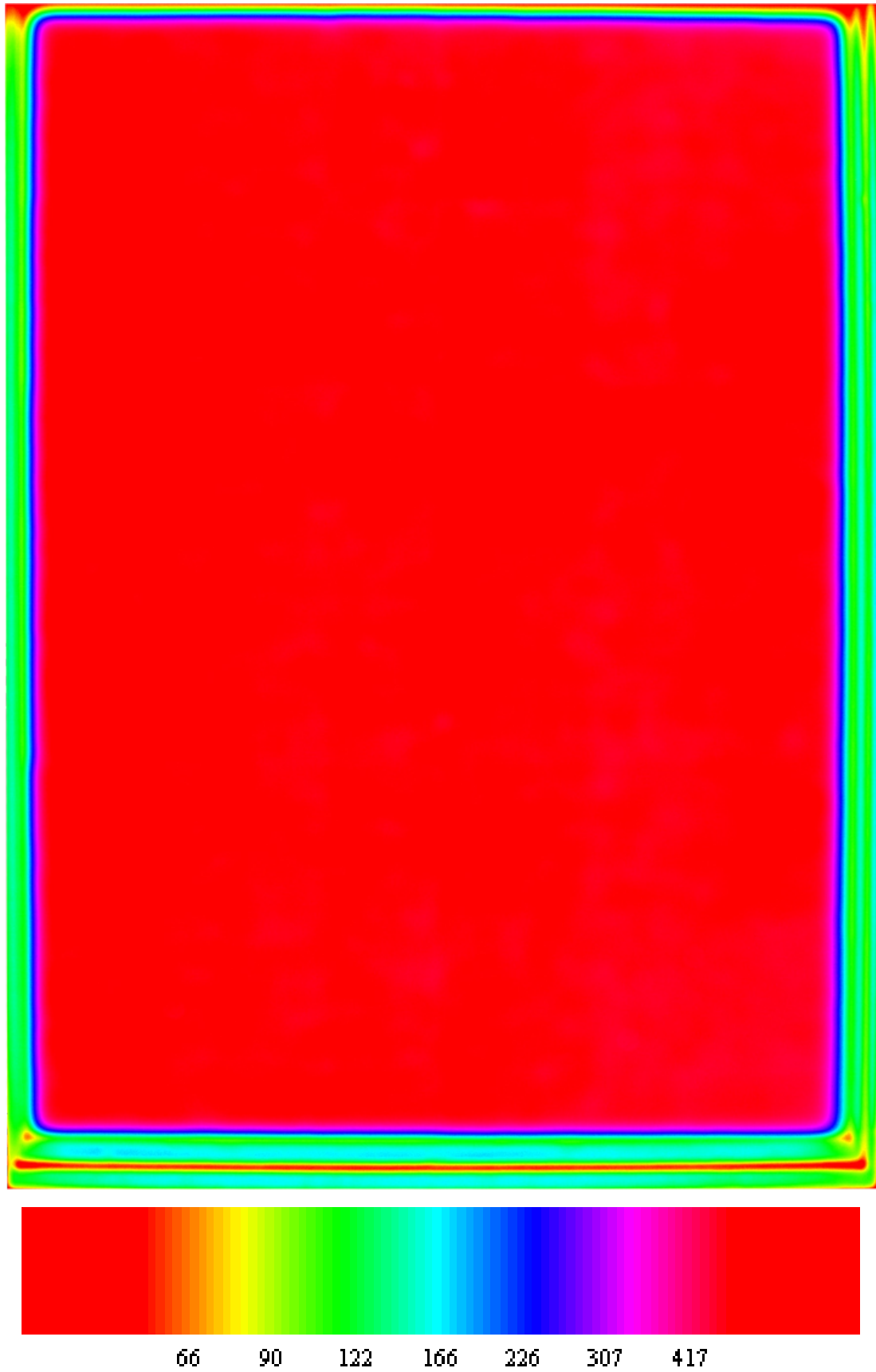
- [33] MOTYČKA, M., ŠKODA, J., ŠTĚPÁNEK, J., *The comparison of different types of spectroradiometers in terms of uncertainty of measurement In: Lux Europa 2017*, Ljubljana, September 18-20 2017. p. 684-688.

PŘÍLOHA A

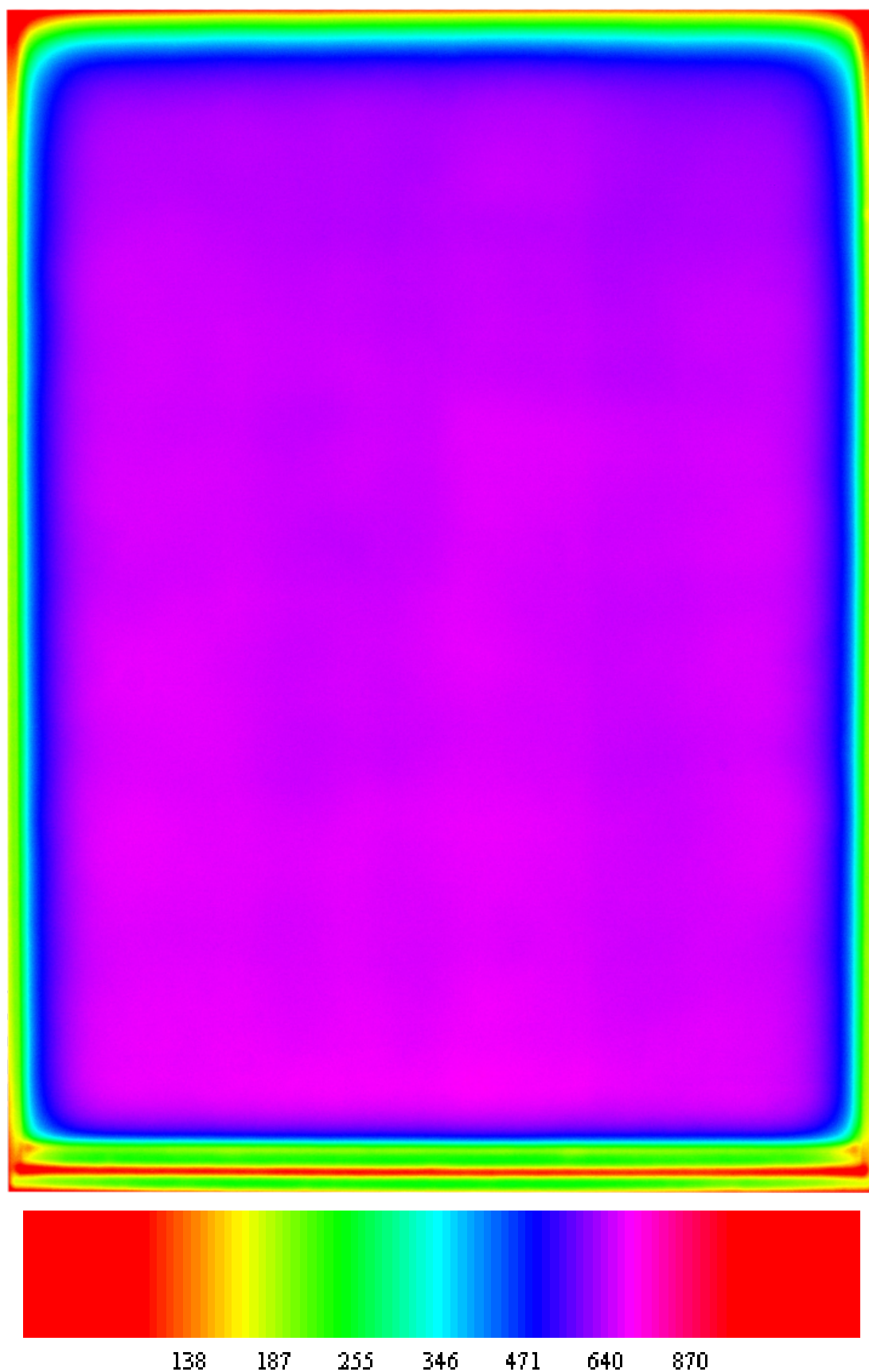
Příloha - Jasové mapy pořízené fotoaparátem Finepix



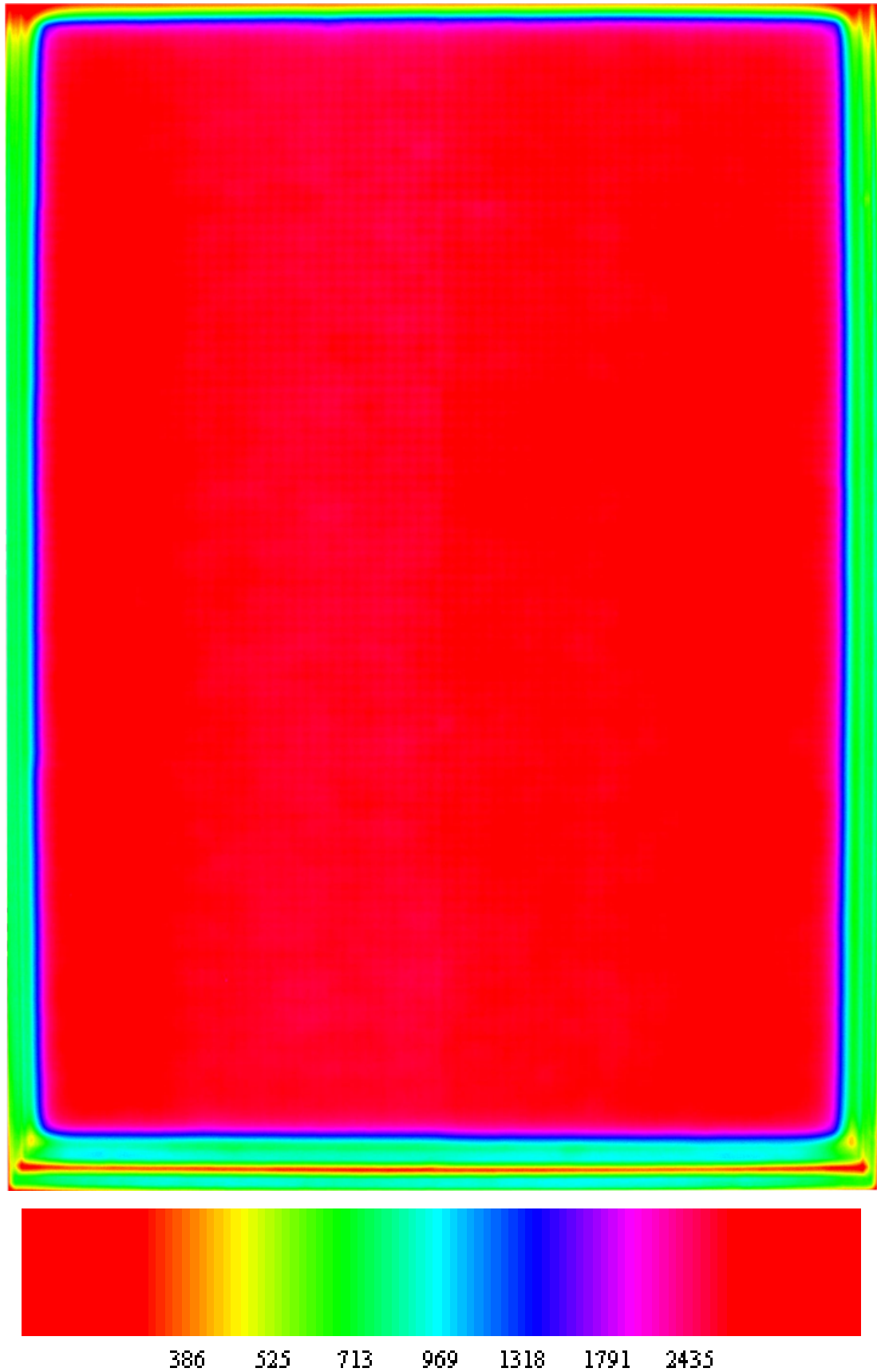
Obrázek A.1: Fotoaparát Finepix S2 Pro: Jasová mapa LED čipů bez difuzoru
ii



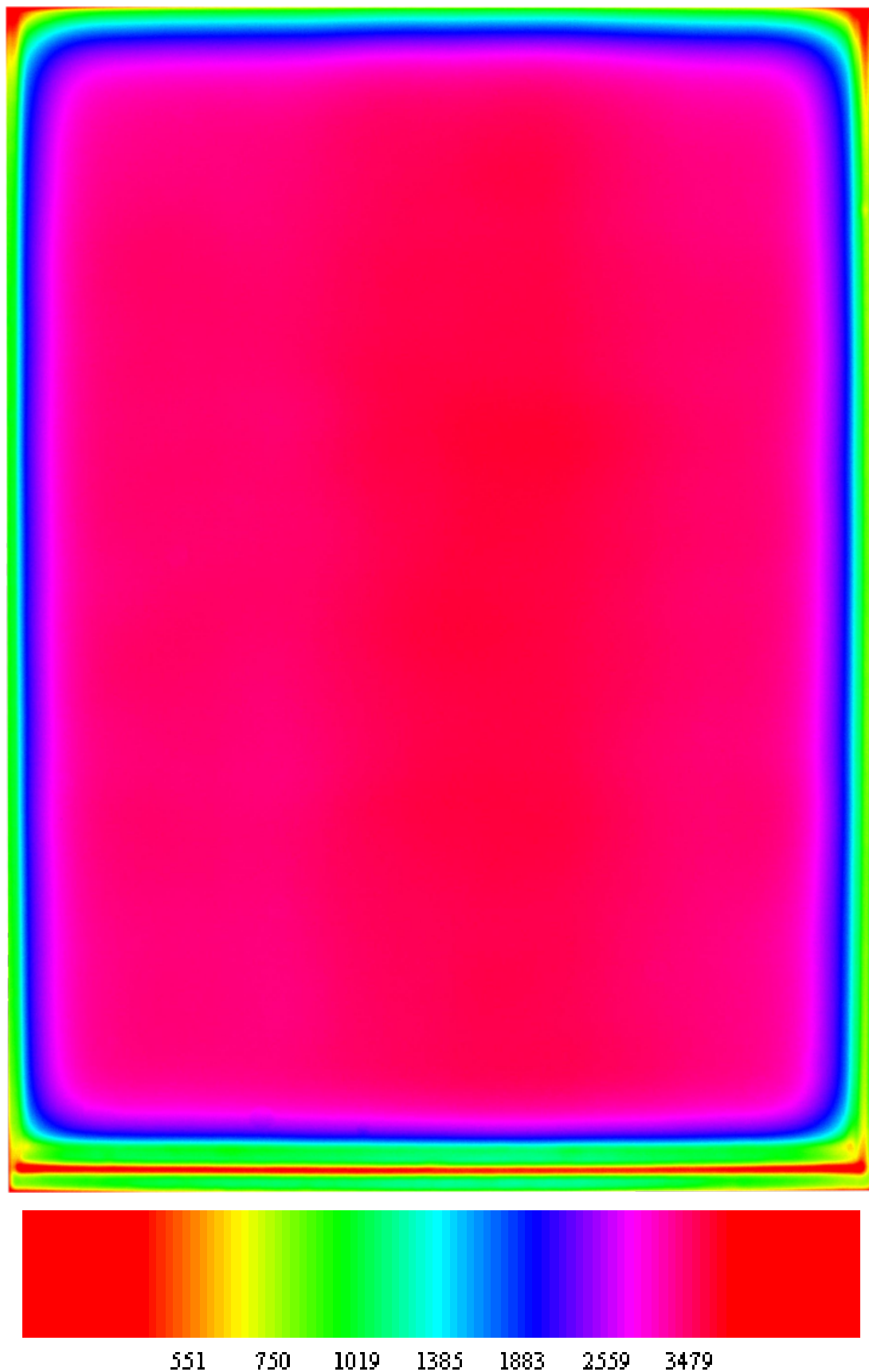
Obrázek A.2: Fotoaparát Finepix S2 Pro: Jasová mapa difuzoru Corian 0 cm



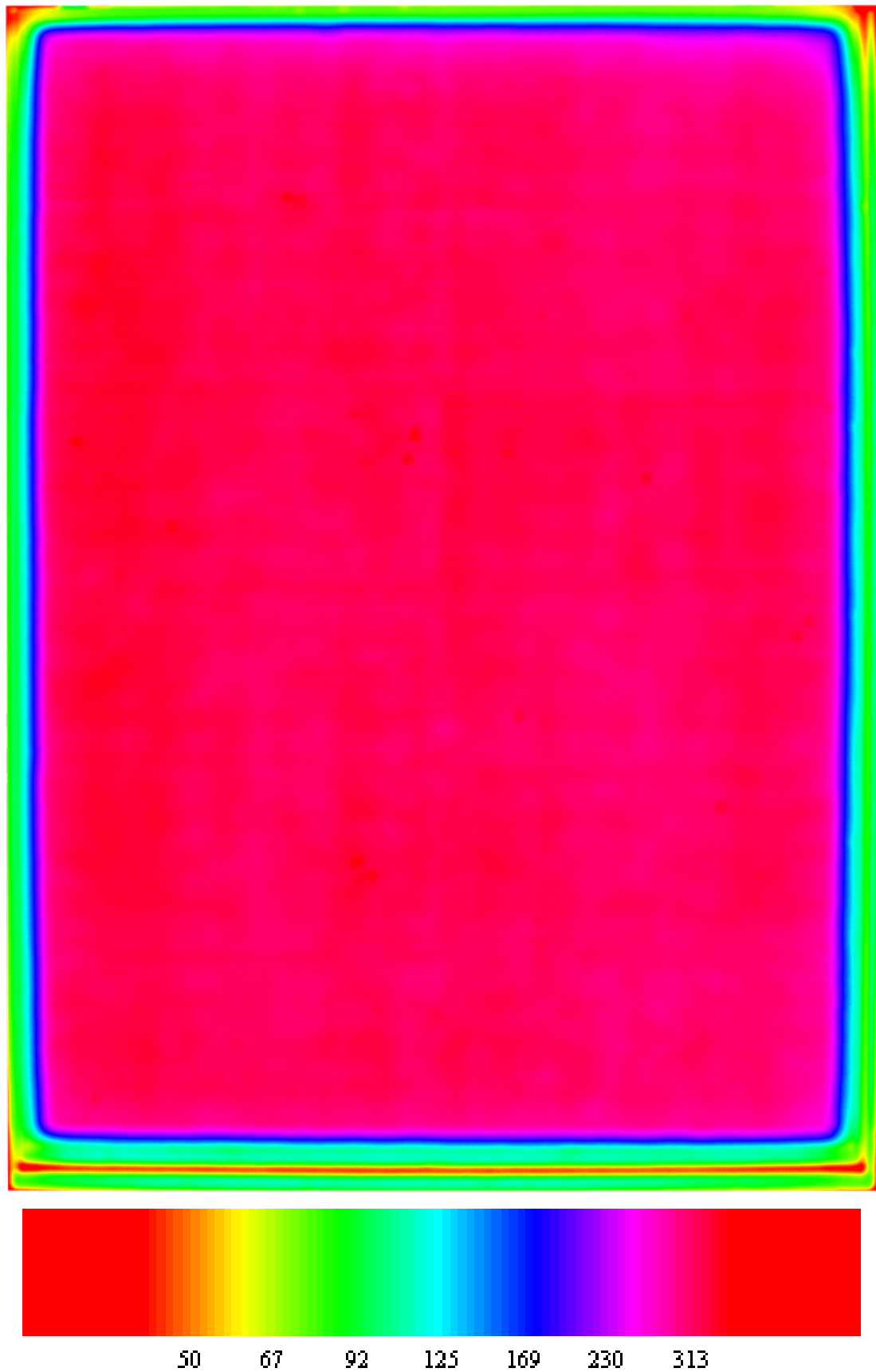
Obrázek A.3: Fotoaparát Finepix S2 Pro: Jasová mapa difuzoru Corian 3 cm
iv



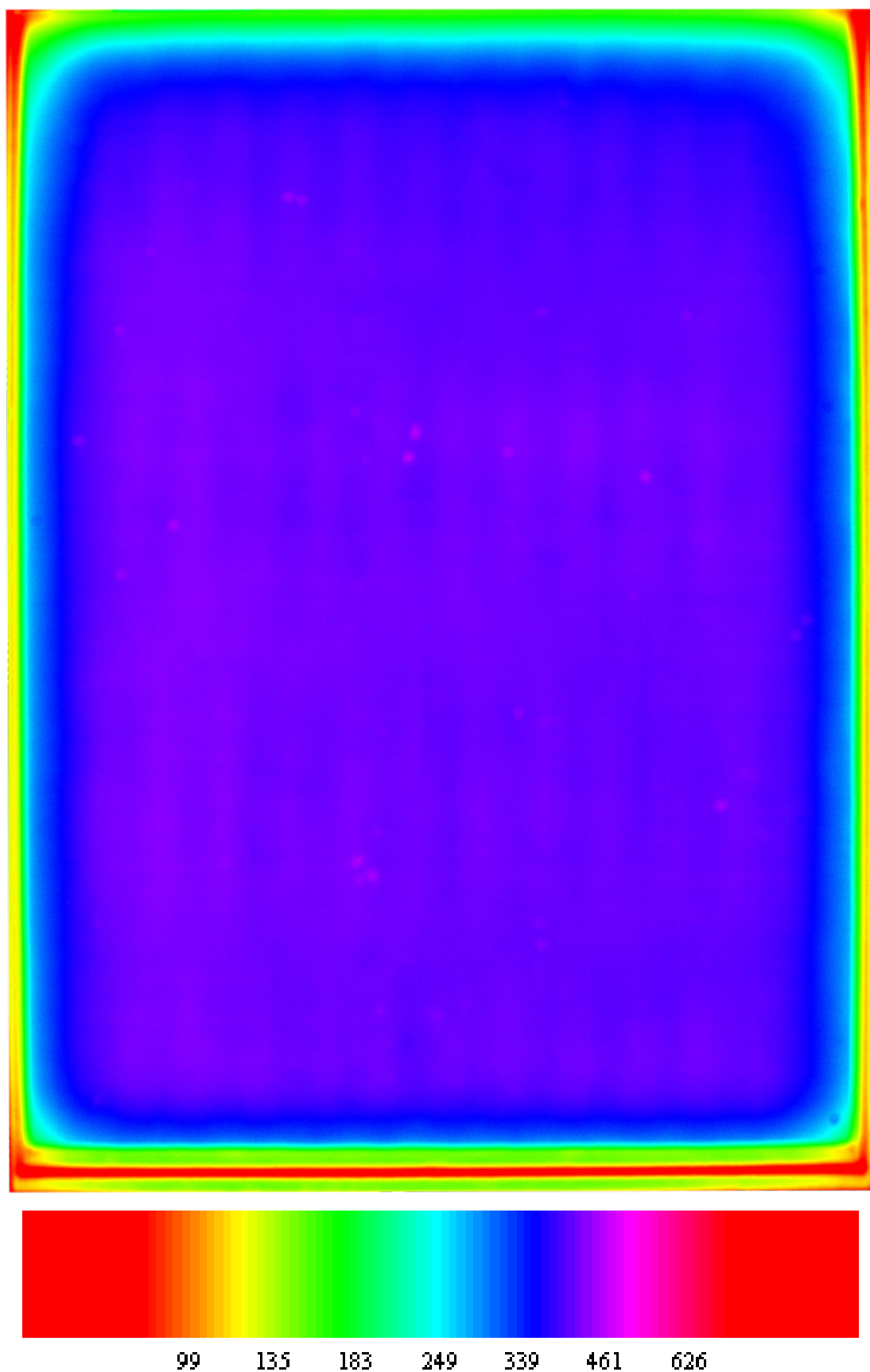
Obrázek A.4: Fotoaparát Finepix S2 Pro: Jasová mapa difuzoru Plexisklo 0 cm



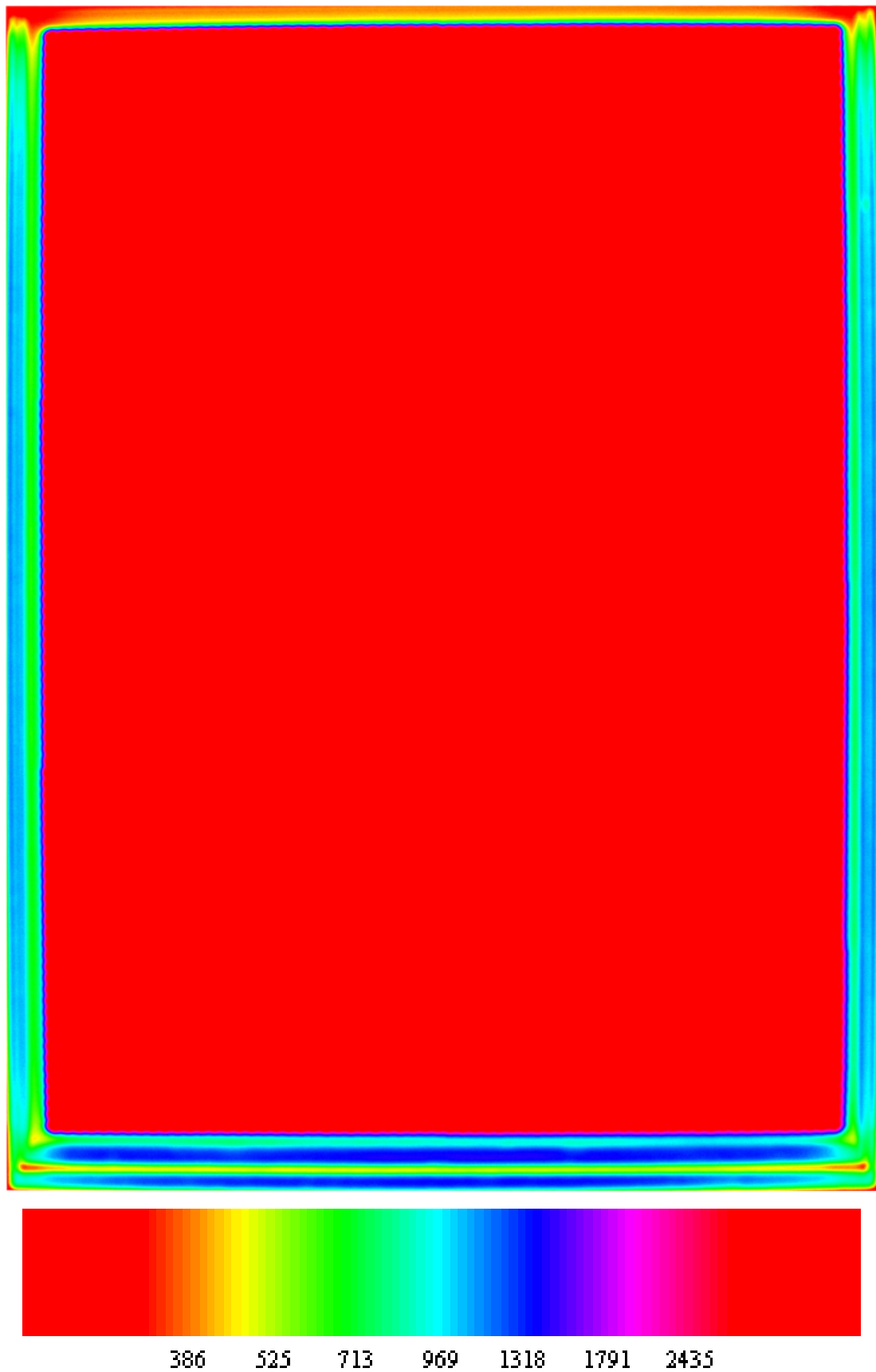
Obrázek A.5: Fotoaparát Finepix S2 Pro: Jasová mapa difuzoru Plexisklo 3 cm vi



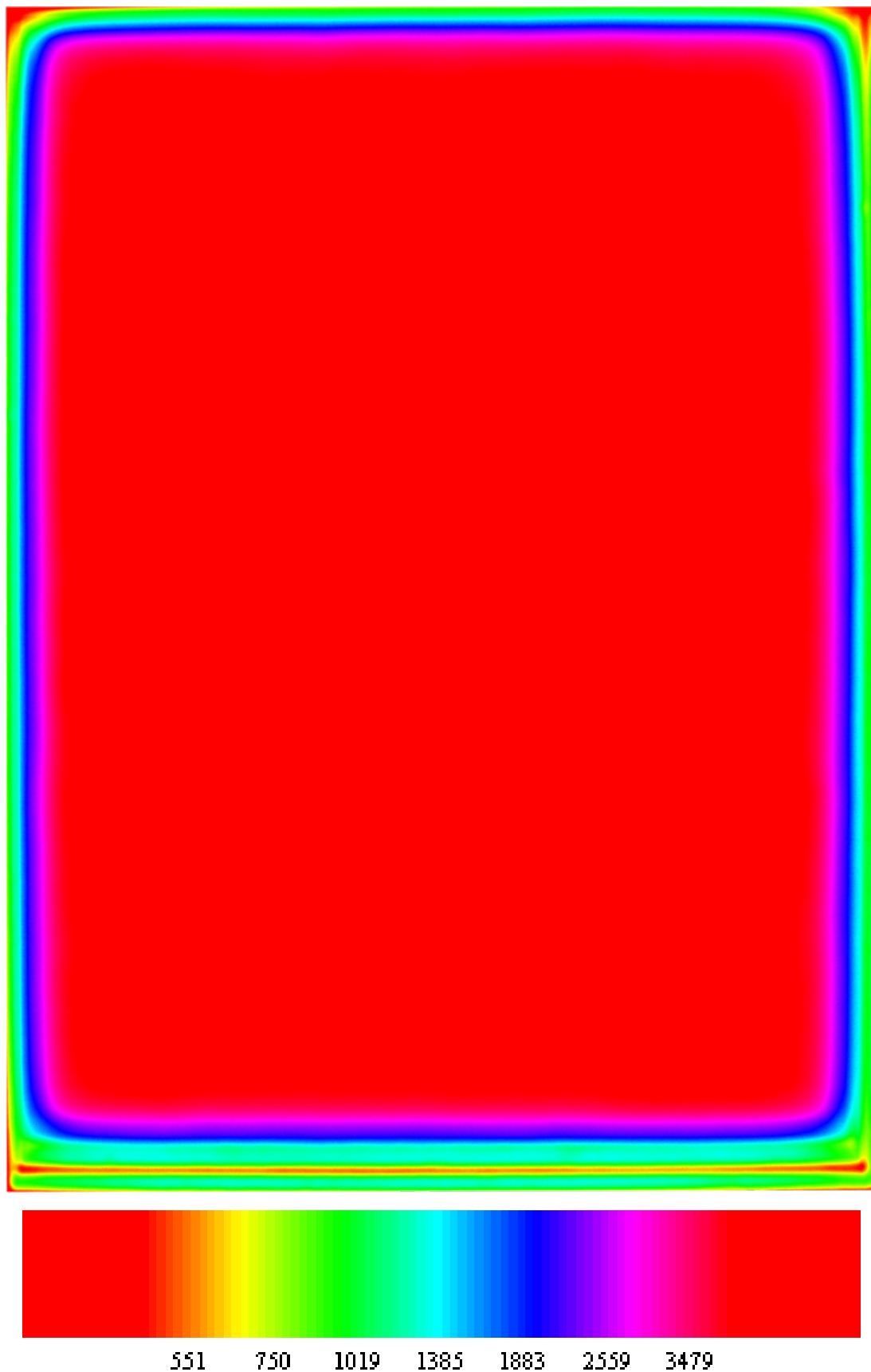
Obrázek A.6: Fotoaparát Finepix S2 Pro: Jasová mapa difuzoru Sklo s fólií 0 cm
vii



Obrázek A.7: Fotoaparát Finepix S2 Pro: Jasová mapa difuzoru Sklo s fólií 3 cm
viii



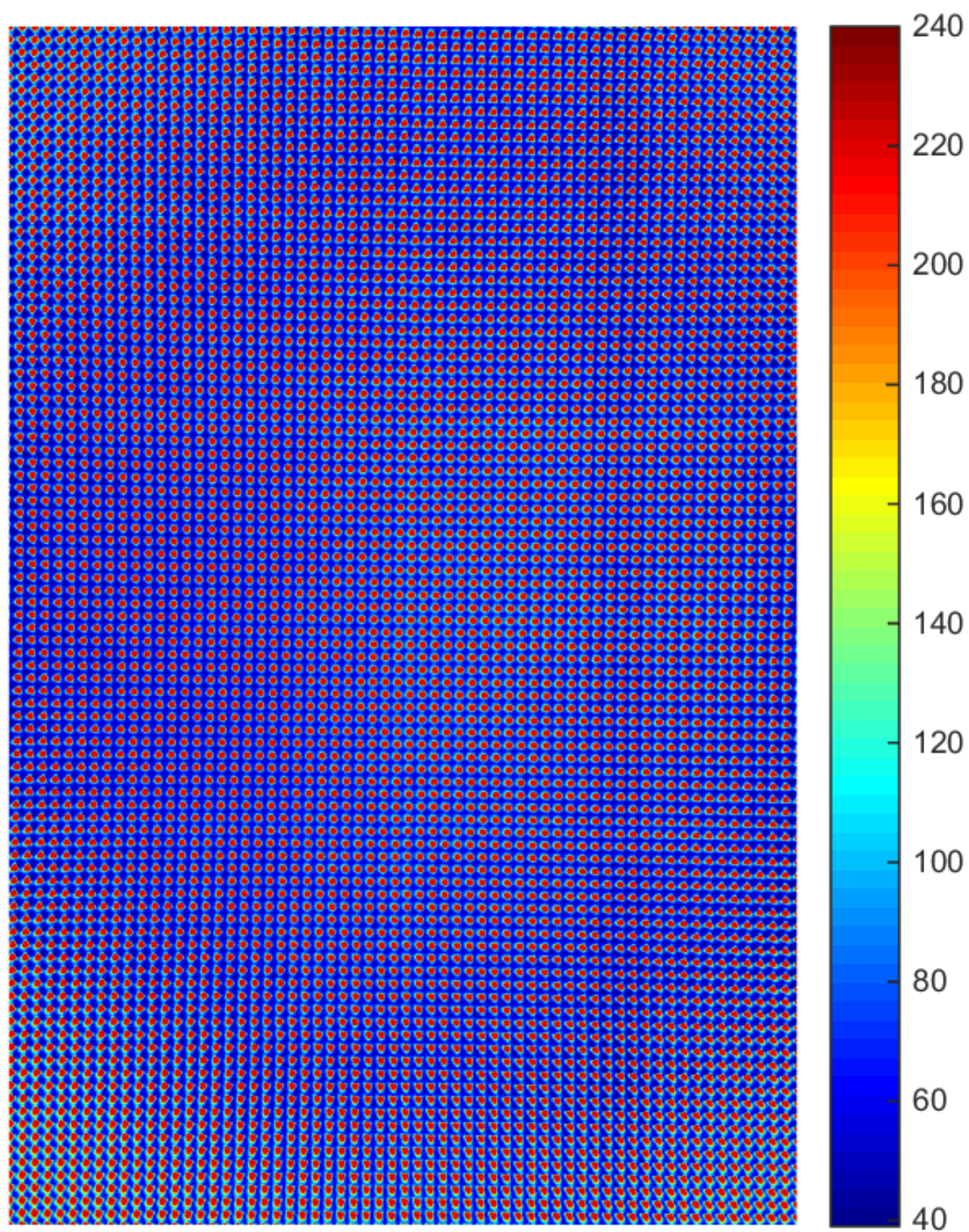
Obrázek A.8: Fotoaparát Finepix S2 Pro: Jasová mapa difuzoru Sklo s mezifólií
0 cm ix



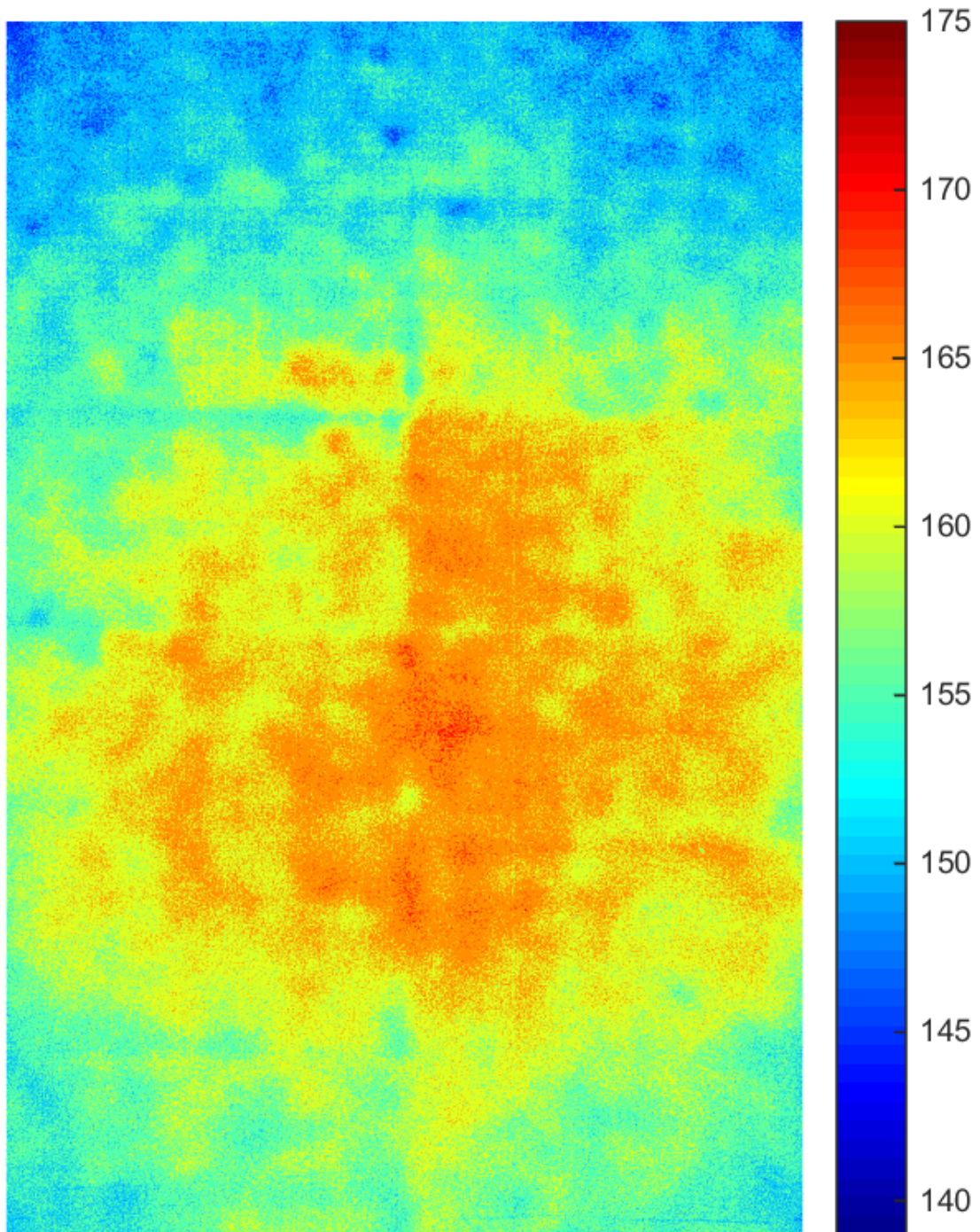
Obrázek A.9: Fotoaparát Finepix S2 Pro: Jasová mapa difuzoru Sklo s mezifólií
x 3 cm

PŘÍLOHA B

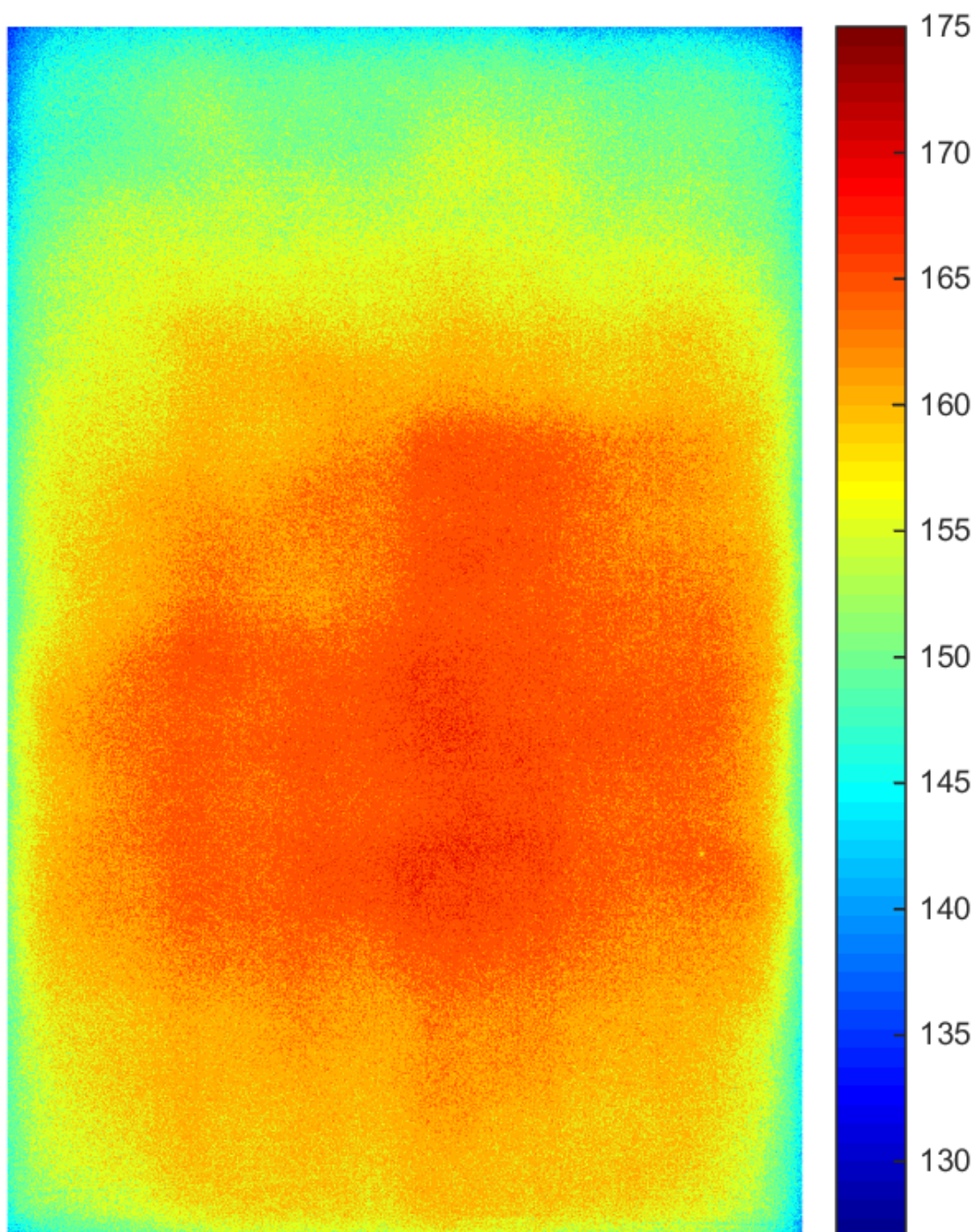
Příloha - Jasové mapy pořízené fotoaparátem Raspberry Pi



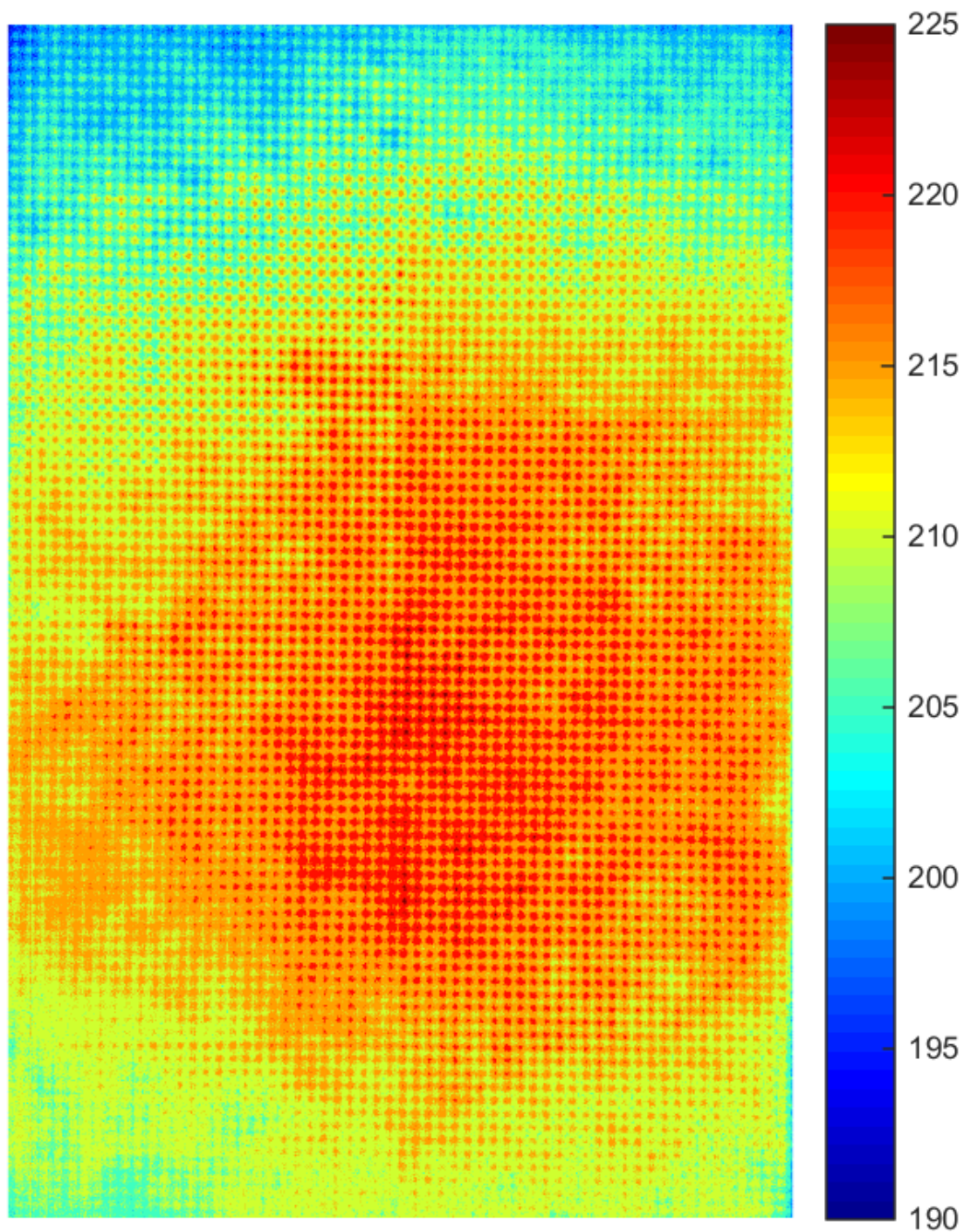
Obrázek B.1: Fotoaparát Raspberry Pi: Jasová mapa LED čipů bez difuzoru



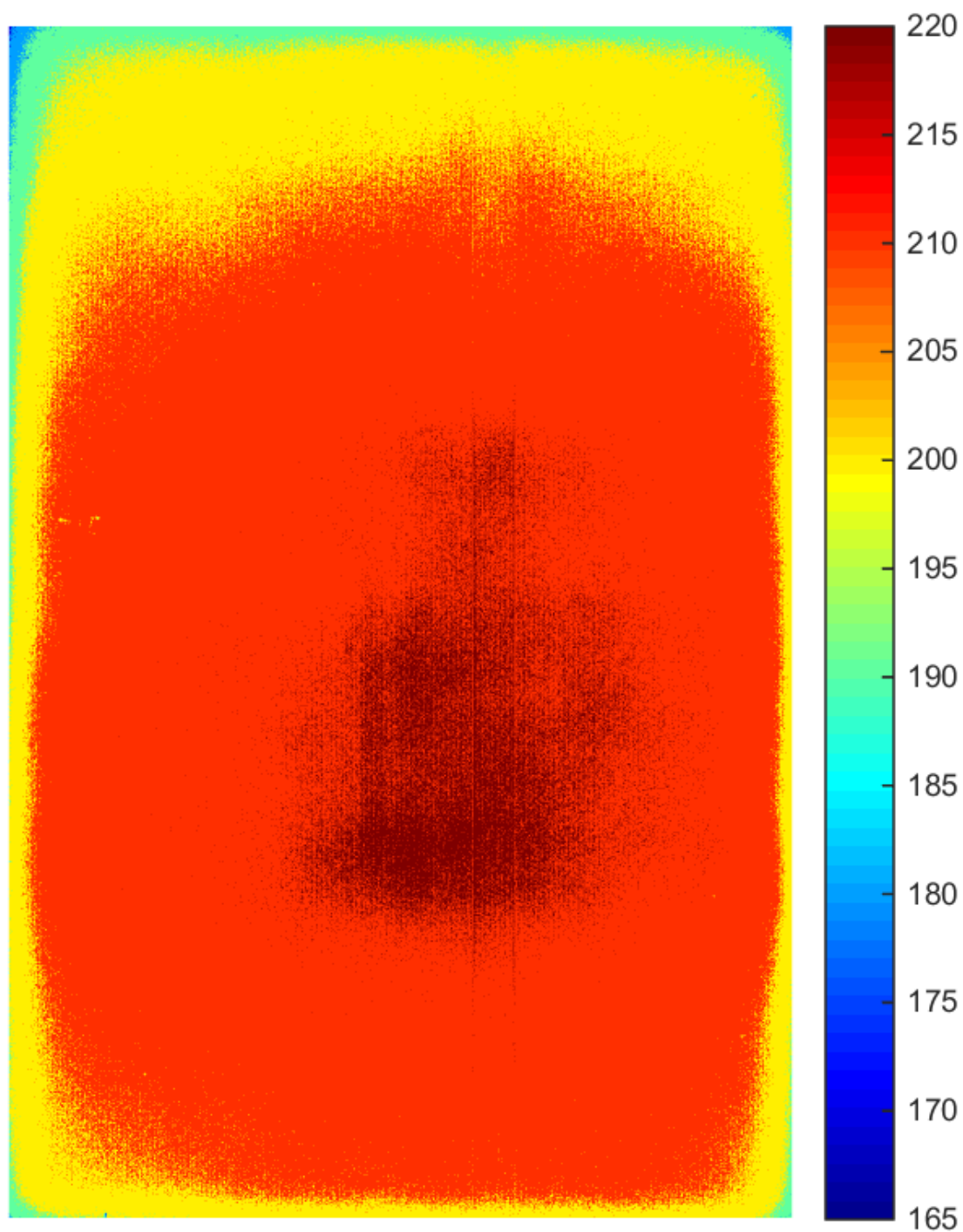
Obrázek B.2: Fotoaparát Raspberry Pi: Jasová mapa difuzoru Corian 0 cm



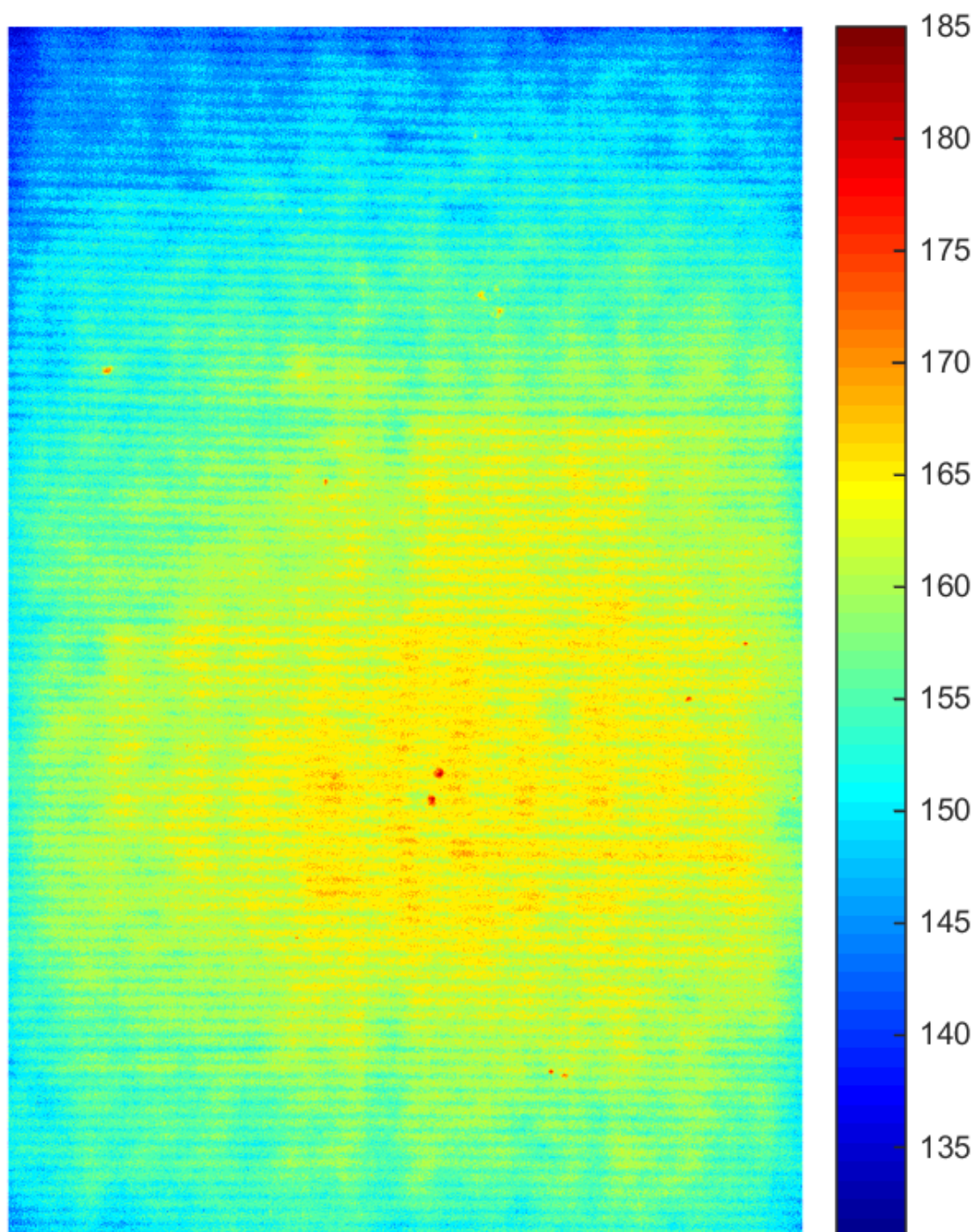
Obrázek B.3: Fotoaparát Raspberry Pi: Jasová mapa difuzoru Corian 3 cm



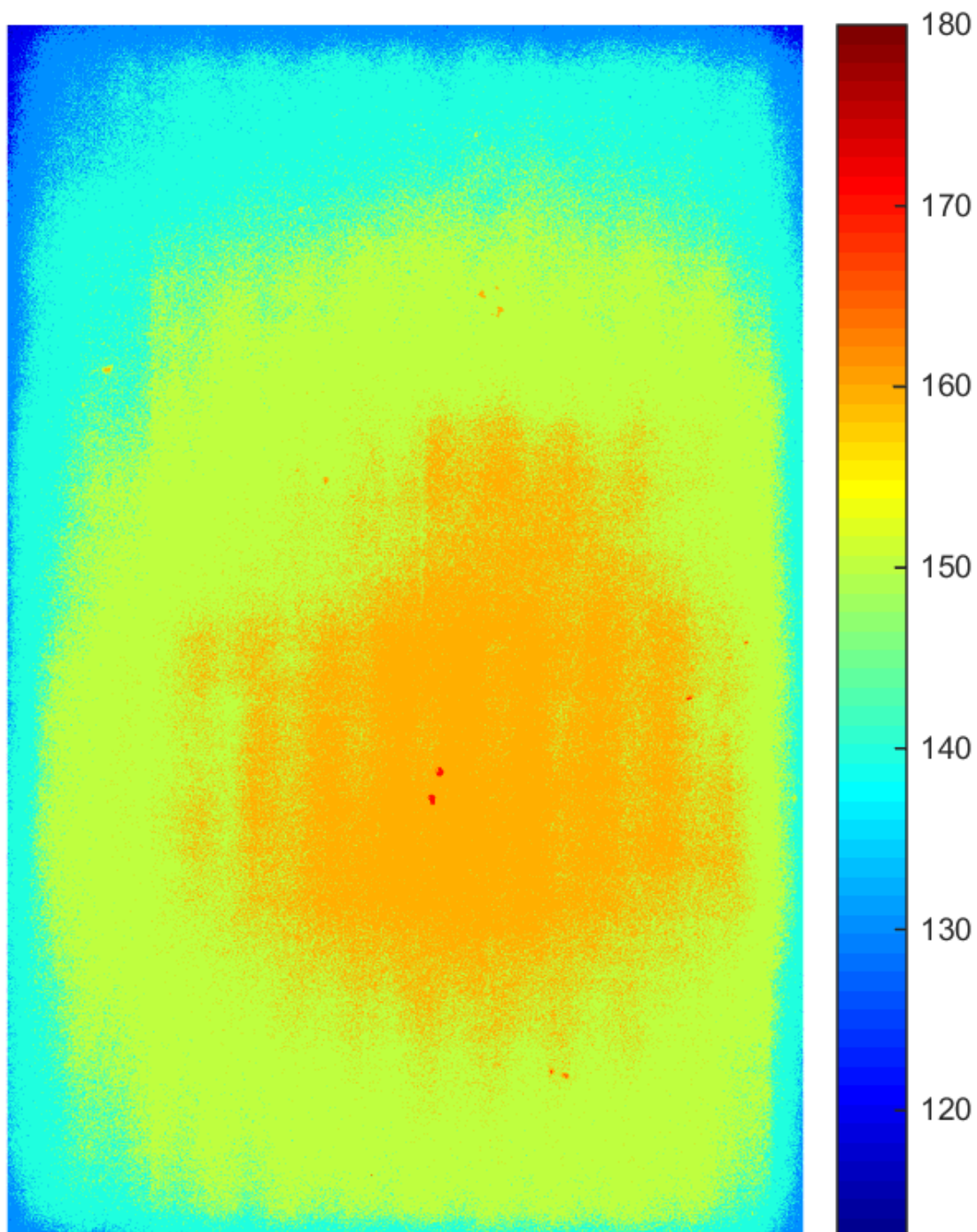
Obrázek B.4: Fotoaparát Raspberry Pi: Jasová mapa difuzoru Plexisklo 0 cm



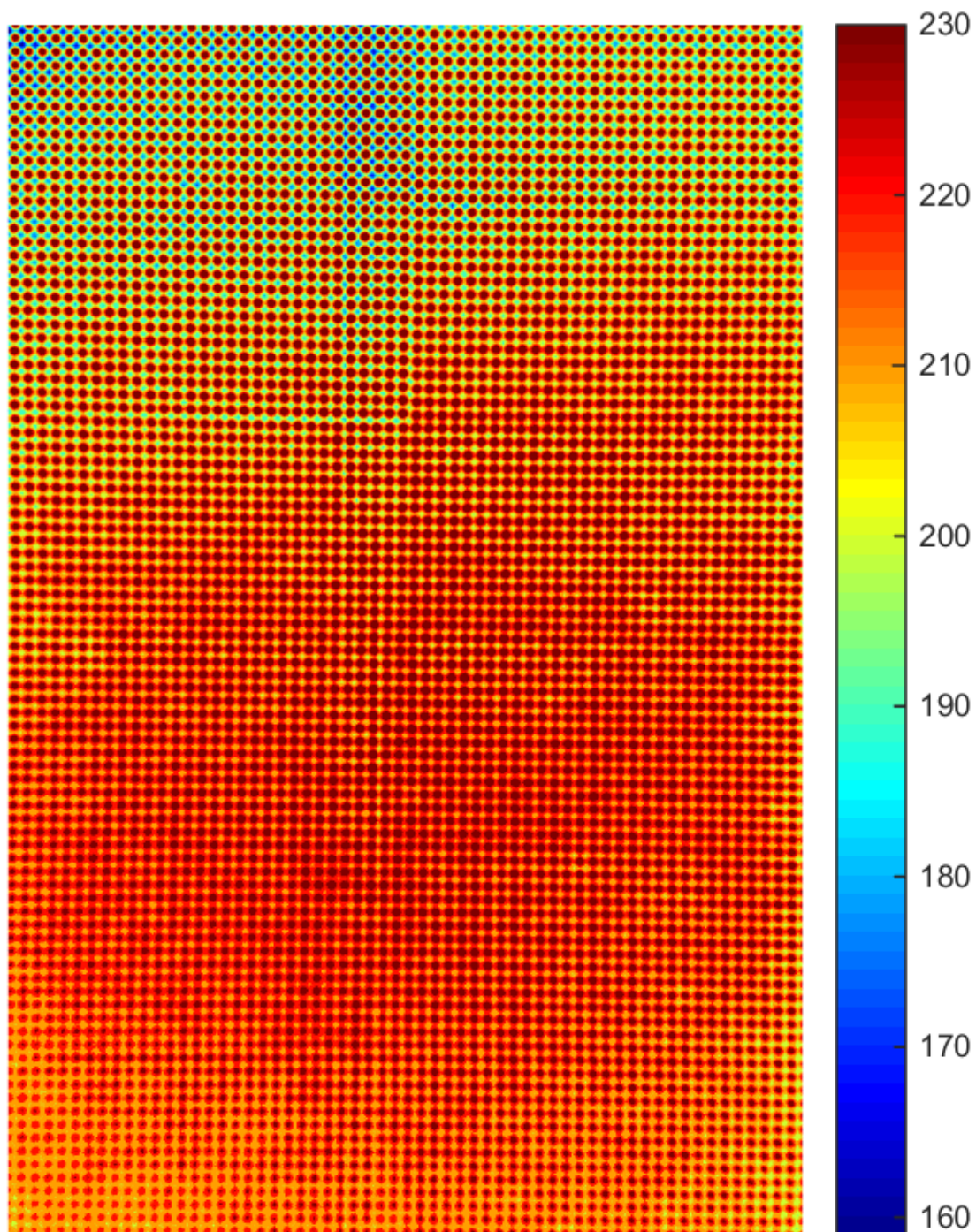
Obrázek B.5: Fotoaparát Raspberry Pi: Jasová mapa difuzoru Plexisklo 3 cm



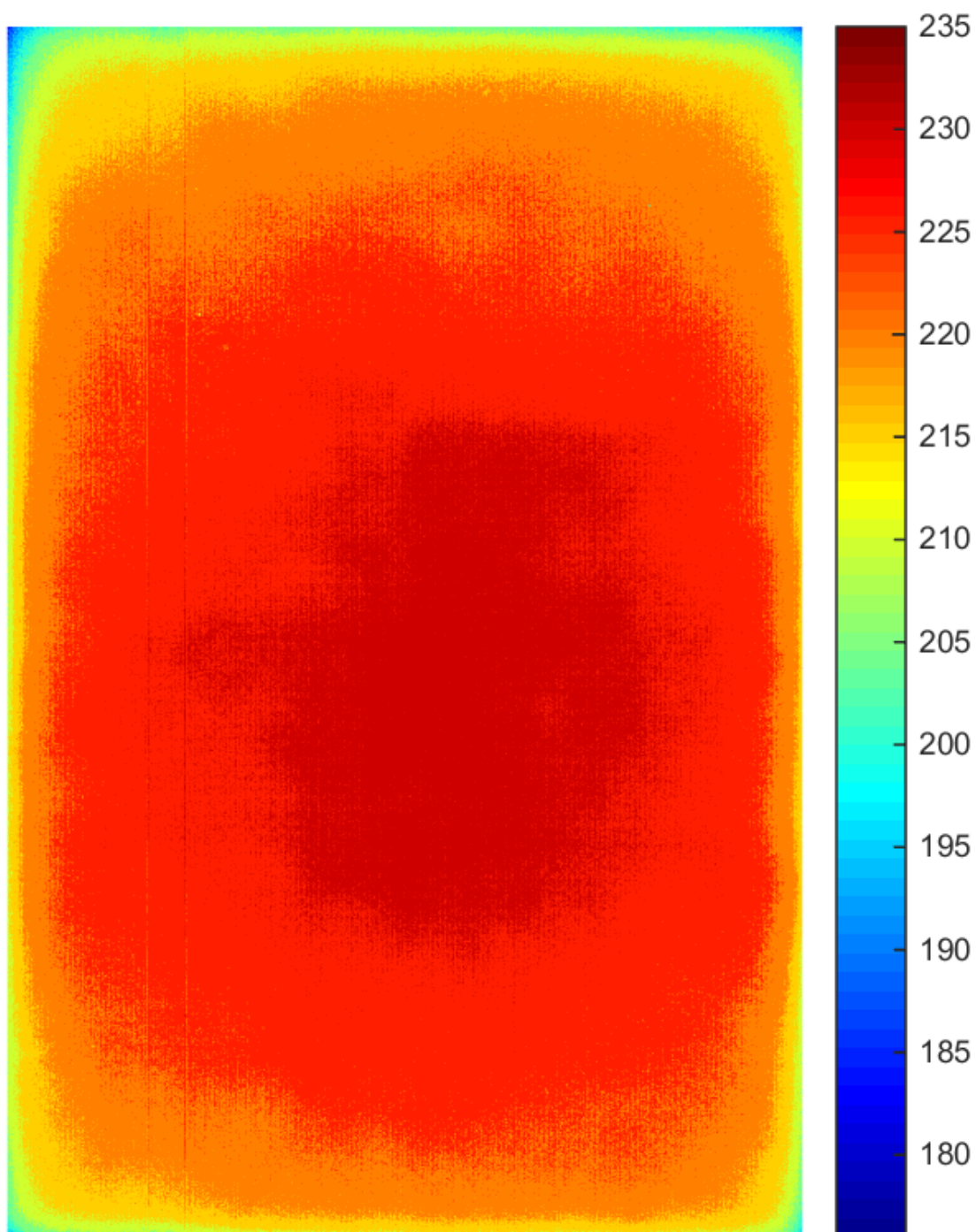
Obrázek B.6: Fotoaparát Raspberry Pi: Jasová mapa difuzoru Sklo s fólií 0 cm



Obrázek B.7: Fotoaparát Raspberry Pi: Jasová mapa difuzoru Sklo s fólií 3 cm



Obrázek B.8: Fotoaparát Raspberry Pi: Jasová mapa difuzoru Sklo s mezifólií 0 cm



Obrázek B.9: Fotoaparát Raspberry Pi: Jasová mapa difuzoru Sklo s mezifólií 3 cm

PŘÍLOHA C

Příloha - Obrázky



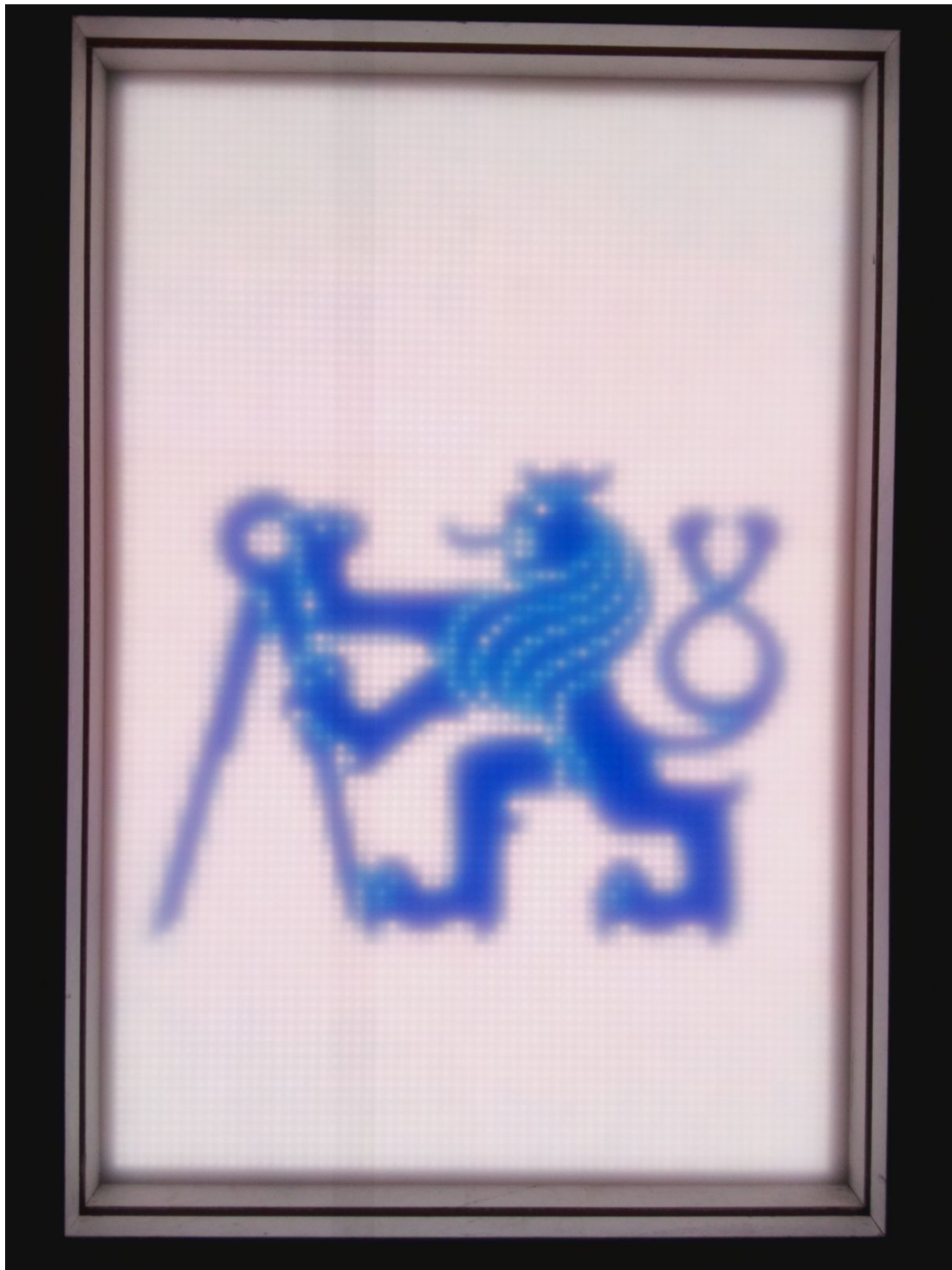
Obrázek C.1: Obrázek bez difuzoru



Obrázek C.2: Obrázek s difuzorem Corian 0 cm



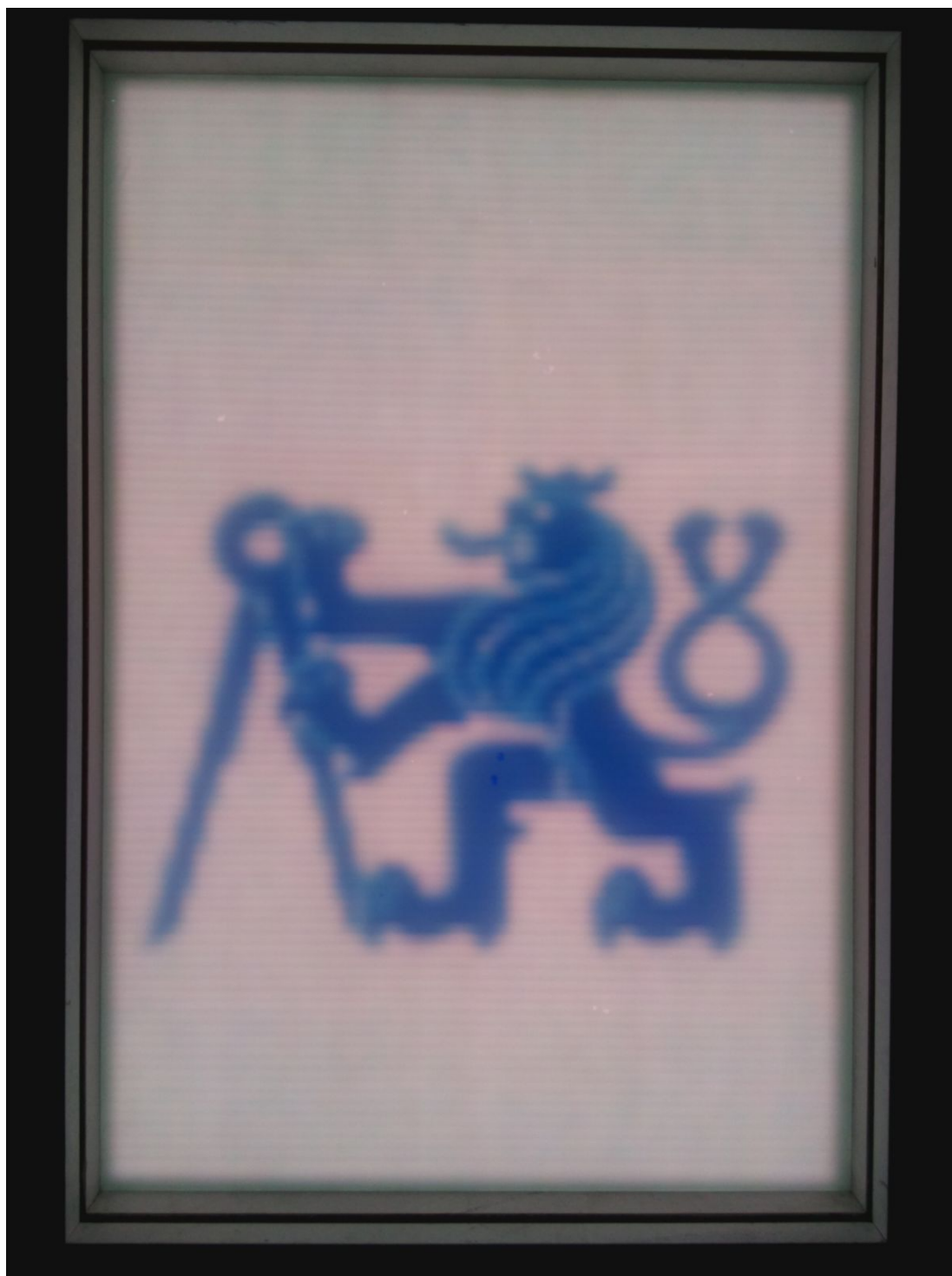
Obrázek C.3: Obrázek s difuzorem Corian 3 cm



Obrázek C.4: Obrázek s difuzorem Plexisklo 0 cm



Obrázek C.5: Obrázek s difuzorem Plexisklo 3 cm



Obrázek C.6: Obrázek s difuzorem Sklo s fólií 0 cm



Obrázek C.7: Obrázek s difuzorem Sklo s fólií 3 cm



Obrázek C.8: Obrázek s difuzorem Sklo s mezifólií 0 cm



Obrázek C.9: Obrázek s difuzorem Sklo s mezifólií 3 cm