

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická

Spektrální hodnocení vybraných vzorků v úhlové závislosti

Diplomová práce

2021

Bc. Michaela Houdková

Prohlašuji:

Práci s názvem Spektrální hodnocení vybraných vzorků v úhlové závislosti jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 16.7.2021

Michaela Houdková v. r.

Tato práce byla podpořena Centrem materiálů a nanotechnologií Fakulty chemicko-technologické a projektem LM2018103 financovaným Ministerstvem školství mládeže a tělovýchovy České Republiky, kterým bych na tomto místě ráda poděkovala.

Diplomová práce vznikla za podpory projektu Modernizace praktické výuky a zkvalitnění praktických dovedností v technicky zaměřených studijních programech, reg. číslo CZ.02.2.67/0.0/0.0/16_016/0002458 operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání. Tento projekt je spolufinancován Evropskou unií.



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání


MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala panu doc. RNDr. Petru Janíčkovi, Ph.D. za vedení mé práce, za cenné rady, trpělivost a pomoc, které se mi při tvorbě této práce dostávalo. Dále bych ráda poděkovala panu Ing. Ondreji Panákovi, Ph.D. za konzultace. Také bych ráda poděkovala panu Ing. Jiřímu Filipovi, Ph.D. z Ústavu teorie informace a automatizace Akademie věd České republiky za ochotu, měření a poskytnutí dat. Další poděkování patří mé rodině a přátelům za podporu během mého studia.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá spektrálním hodnocením interferenčních pigmentů. K hodnocení těchto pigmentů byl sestaven gonio-spektrofotometr. Naměřená data jsou vyhodnocována v barvovém prostoru CIELAB. Dále jsou získaná data porovnávána s daty získanými pomocí zařízení sestaveném na AV ČR. Jsou zde diskutována různá nastavení aparatury a jejich vliv na naměřená data.

Klíčová slova

Gonio-spektrofotometr, BRDF, interferenční pigmenty, kolorimetrie, CIELAB

Annotation

This diploma thesis deals with the spectral evaluation of interference pigments. A custom gonio spectrophotometer was set up to evaluate these pigments. The measured data are evaluated in the CIELAB color space. Furthermore, the obtained data are compared with the data obtained using a device built at the Czech Academy of Sciences. Various settings of the apparatus and their influence on the measured data are discussed.

Keywords

Gonio-spectrophotometer, BRDF, interference pigments, colorimetry, CIELAB

Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam použitých zkratk a značek.....	12
1 Úvod	14
1.1 Návaznost na předchozí práce na KPF.....	15
1.2 Cíle práce	17
2 Teoretická část.....	18
2.1 Pigmenty se speciálním efektem.....	18
2.2 Radiometrie	20
2.2.1 Radiometrické veličiny.....	20
2.3 BRDF	21
2.4 Další funkce	22
2.4.1 BSSRDF	22
2.4.2 BTF.....	22
2.5 Reflektance.....	23
2.6 Popis měřicí aparatury.....	24
2.6.1 Konstrukce různých gonio-spektrofotometrů.....	26
2.6.2 Světelné zdroje	28
2.6.3 Snímače	28
2.7 Vliv konstrukčních prvků na BRDF	29
2.7.1 Rozložení záření	29
2.7.2 Rovnoměrnost ozáření na vzorku.....	29
2.7.3 Rozptýlené světlo	30
2.7.4 Vliv clony	30
2.8 Přesnost a co ji ovlivňuje	31
2.8.1 Směrová přesnost	31
2.8.2 Polarizace	33

2.8.3	Konečná velikost štěrbin	33
2.8.4	Vliv úhlové šířky pásma a spektrální šířky pásma	34
2.9	Linearita	35
2.10	Vyhodnocení měření	35
3	Praktická část.....	39
3.1	Vzorky.....	39
3.2	Gonio-spektrofotometr.....	40
3.2.1	Části gonio-spektrofotometru.....	40
3.3	Popis měřicího zařízení AV ČR.....	43
3.4	Kalibrace gonio-spektrofotometru	45
3.4.1	Mechanická kalibrace.....	46
3.4.2	Nastavení parametrů v programu SpectraWiz Shortcut.....	48
3.4.3	Stálost světelného zdroje.....	48
3.5	Měření vzorků	49
3.5.1	Zpracování naměřených dat	50
4	Výsledky.....	52
4.1	Porovnání měření provedených na KPF UPCE a AV ČR	52
4.2	Vliv barvy podkladu na barevnost	58
4.3	Vliv velikosti průměru clony na naměřené hodnoty.....	60
4.4	Opakovatelnost.....	63
4.5	Vliv vložení optiky před detektor	63
4.6	Vliv změny integračního času.....	65
5	Závěr.....	68
6	Použitá literatura.....	70

Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Různé geometrie měření	15
Obrázek 2.1: Závislost relativní intenzity na vlnové délce pro různé typy pigmentů	18
Obrázek 2.2: Druhy odrazů v závislosti na typu povrchu.....	19
Obrázek 2.3: Závislost interferenční barvy na tloušťce vrstvy TiO ₂	19
Obrázek 2.4: Princip interference světla na tenké průhledné vrstvě.....	19
Obrázek 2.5: Znázornění prostorového úhlu ve směrech θ a φ	20
Obrázek 2.6: Geometrie dopadajícího a odraženého paprsku	21
Obrázek 2.7: Řezy BRDF v rovině dopadu	22
Obrázek 2.8: Rozdíl mezi BRDF a BSSRDF	22
Obrázek 2.9 a 2.10: Závislost R (2.9) a R/R_{ref} (2.10) na úhlu detekce.....	24
Obrázek 2.11: Rovnoměrnost ozáření napříč vzorkem	30
Obrázek 2.12: Kolimační a telecentrická soustava osvětlovací části	31
Obrázek 2.13: Detekční část gonio-spektrofotometru OptiMines	32
Obrázek 2.14: Měření BRDF interferenčního pigmentu	32
Obrázek 2.15: Chromatický diagram CIEY _{xy} pro 2° pozorovatele.....	33
Obrázek 2.16: Konečné pevné úhly ozařování a detekce a konečná plocha měření	34
Obrázek 2.17: Závislost měrné světlosti na detekčním úhlu	36
Obrázek 2.18: Závislost chromy na detekčním úhlu	37
Obrázek 2.19: Závislost odstínu na detekčním úhlu.....	37
Obrázek 3.1: Gonio-spektrofotometr sestrojený na KPF.....	40
Obrázek 3.3: Detailní zobrazení držáku vzorku a optických soustav.....	43
Obrázek 3.4: Gonio-reflektometr sestrojený v AV.....	44
Obrázek 3.5: Geometrie osvětlení a pozorování.....	45
Obrázek 3.6: Závislost intenzity světelného zdroje gonio-spektrofotometru na čase	49
Obrázek 3.7: Schéma geometrie měření, úhel dopadu +45° a úhly detekce +5° až -65°	49
Obrázek 4.1: Rozložení hodnot pigmentu Pacific Lagoon v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF a AV pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce +5° až -65°	52
Obrázek 4.2: Rozložení hodnot pigmentu Securalic® Lilac-Green na černém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF a AV pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce +5° až -65°	53

Obrázek 4.3: Rozložení hodnot pigmentu Securalic® Lilac-Green na bílém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF a AV pro osvětlovací úhel 45°a pro úhly detekce +5° až -65°	54
Obrázek 4.4: Rozložení hodnot pigmentu Securalic® Blue-Lilac na černém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF a AV pro osvětlovací úhel 45°a pro úhly detekce +5° až -65°	55
Obrázek 4.5: Rozložení hodnot pigmentu Securalic® Blue-Lilac na bílém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF a AV pro osvětlovací úhel 45°a pro úhly detekce +5° až -65°	56
Obrázek 4.6: Rozložení hodnot pigmentu Ultra Green na bílém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF a AV pro osvětlovací úhel 45°a pro úhly detekce +5° až -60°...	57
Obrázek 4.7: Rozložení hodnot pigmentu Ultra Green na černém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF a AV pro osvětlovací úhel 45°a pro úhly detekce +5° až -60°...	57
Obrázek 4.8: Rozložení hodnot pigmentu Ultra Green na modrém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF a AV pro osvětlovací úhel 45°a pro úhly detekce +5° až -60°	58
Obrázek 4.9: Rozložení hodnot pigmentu Ultra Green na červeném podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF a AV pro osvětlovací úhel 45°a pro úhly detekce +5° až -60°	58
Obrázek 4.10: Rozložení hodnot pigmentu Ultra Green na bílém, černém, modrém a červeném podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* pro osvětlovací úhel 45°a pro úhly detekce +5° až -60° měřené na KPF	59
Obrázek 4.11: Závislost reflektance na vlnové délce pro pigment Securalic® Lilac-Green na bílém podkladu, pro různé úhly detekce měřeno s průměrem clony 2 mm.....	60
Obrázek 4.12: Závislost reflektance na vlnové délce pro pigment Securalic® Lilac-Green na bílém podkladu, pro různé úhly detekce měřeno s průměrem clony 3 mm.....	61
Obrázek 4.13: Závislost reflektance na vlnové délce pro pigment Securalic® Lilac-Green na bílém podkladu, pro různé úhly detekce měřeno s průměrem clony 4 mm.....	61
Obrázek 4.14: Rozložení hodnot pigmentu Securalic® Lilac-Green na černém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF s průměrem clony 2, 3 a 4 mm pro osvětlovací úhel 45°a pro úhly detekce +5° až -65°	62

Obrázek 4.15: Rozložení hodnot pigmentu Securalic® Lilac-Green na bílém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF s průměrem clony 2, 3 a 4 mm pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce +5° až -65°	62
Obrázek 4.16: Rozložení hodnot pigmentu Tropic Sunrise v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném 3x pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce +5° až -60°	63
Obrázek 4.17: Rozložení hodnot pigmentu Securalic® Lilac-Green na černém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF bez, a s optikou před detektorem pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce +5° až -60°	64
Obrázek 4.18: Rozložení hodnot pigmentu Securalic® Lilac-Green na bílém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF bez, a s optikou před detektorem pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce +5° až -60°	65
Obrázek 4.19: Rozložení hodnot Pacific Lagoon v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF pro různé integrační časy pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce +5° až -65°	66
Obrázek 4.20: Přiblížení oblasti mimo spekulární úhel z obrázku 4.19	67

Seznam použitých zkratek a značek

AV ČR	Akademie věd České republiky
BRDF	Bidirectional reflectance distribution function
BSSRDF	Bidirectional scattering surface reflectance distribution function
BTF	Bidirectional texture function
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage
KPF	Katedra polygrafie a fotofyziky
UPCE	Univerzita Pardubice
UV	Ultrafialové záření
θ_i	Úhel dopadu
θ_r	Úhel odrazu
λ	Vlnová délka
Φ	Zářivý tok odražený od vzorku
Φ_{ref}	Zářivý tok odražený od difúzního standardu
φ_i	Azimut dopadu
φ_r	Azimut odrazu
Ω	Prostorový úhel
ω_i	Směr dopadajícího světla
ω_r	Směr odraženého světla
a^* a b^*	Souřadnice v barvového prostoru CIELAB
C^*_{ab}	Chroma
E	Ozáření
h_{ab}	Úhel barevného tónu
I	Zářivost
k	Konstanta, která normalizuje trichromatickou hodnotu Y
L	Zář
L^*	Měrná světlost
$M_e(\lambda)$	Spektrální intenzita vyzařování světelného zdroje
R	Reflektance
\hat{R}	Reflexní faktor
R/R_{ref}	Relativní odrazivost
$r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda)$	Spektrální citlivosti kamery

sr	Steradián
W	Watt
X, Y, Z	Trichromatické hodnoty
$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda)$ a $\bar{z}(\lambda)$	Trichromatické členitele pro 2° nebo 10° standardního pozorovatele

1 Úvod

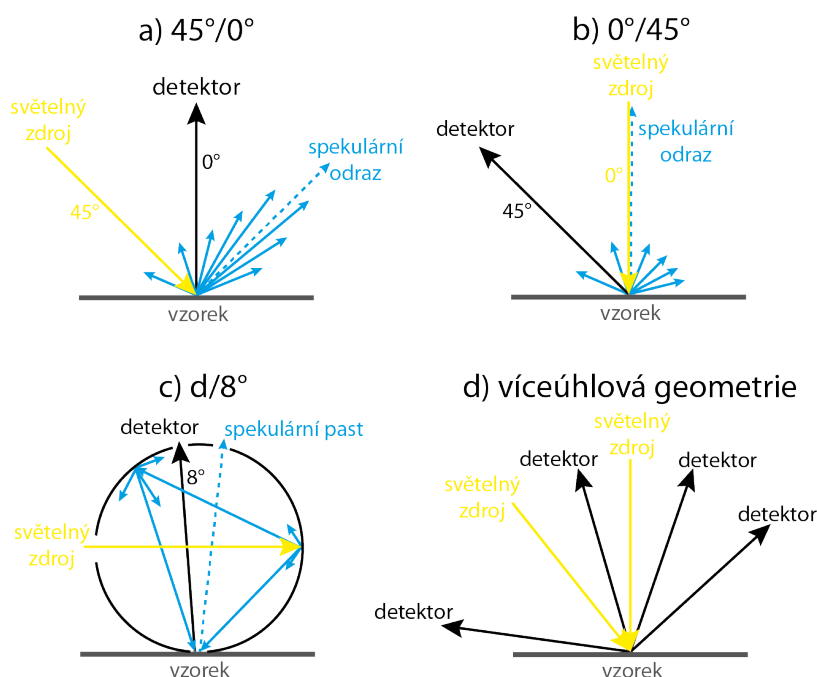
Barvy a nátěry se používají v různých průmyslových odvětvích, od automobilové výroby až po architekturu. Příkladem jsou fasády, spotřební elektronika nebo předměty každodenní potřeby. Mezi základní funkce všech nátěrů patří funkce ochranná nebo identifikační. V dnešní době jsou ale navíc velice žádané vizuální efekty, které zajišťují kromě barvy samotné další vlastnosti, jako je lesk, úhlová závislost barvy, struktura nebo textura. To nabízejí nátěry obsahující pigmenty se speciálními efekty, například interferenční pigmenty nebo kovové pigmenty. Tyto nátěry zajišťují produktům atraktivitu a výjimečnost, čímž zvyšují jejich přitažlivost. Nanášení povlaků patří mezi dokončovací procesy, které zajišťují zlepšení vizuální a funkční kvality povrchu. [1]

Interferenční pigmenty, které jsou charakterizovány velkými změnami optických vlastností v závislosti na malých změnách v detekčních nebo osvětlovacích směrech, našly z estetických důvodů široké uplatnění v oblastech, jako jsou barvy, plasty, tiskařské barvy a kosmetika [2] [3]. Tyto optické variace se mohou týkat buď změny intenzity nebo spektrálního rozložení odraženého světla [3]. Pigmenty se speciálními efekty, jakou jsou barva závislá na úhlu pohledu nebo dekorativní struktura, jsou velice žádané v automobilovém průmyslu, a roste tak jejich ekonomický význam [2]. Interferenční pigmenty se často využívají i v bezpečnostních aplikacích (hologramy na kreditních kartách či bankovkách), protože je nelze snadno kopírovat pomocí kopírky [2] [3]. Optická charakterizace těchto materiálů poskytuje data užitečná pro realistické vykreslení povrchů v počítačové grafice, dále také pro vývoj nových produktů a kontrolu kvality a padělků v průmyslové výrobě [3].

Výhodou interferenčních pigmentů je schopnost vytvářet iluzi optické hloubky, mohou vytvářet jemné až velice poutavé barevné efekty závislé na úhlu pohledu [2]. Další výhodou je možnost míchání těchto pigmentů s jinými pigmenty, což vede k široké škále různých barevných efektů. Tyto pigmenty mohou vytvářet kromě optických efektů i funkční efekty, jako je elektrická vodivost nebo infračervená odrazivost. Při pozorování úhlové závislosti interferenční barvy lze najít několik stupňů barevného posunu.

V grafice a tiskařském průmyslu jsou pro měření odrazivosti materiálů široce používány měřicí přístroje s geometrií $45^\circ:0^\circ$ nebo $0^\circ:45^\circ$ zobrazené na obrázku 1.1 a) a b) [5]. Geometrie na bázi integrační koule (obr. 1.1 c)) se používá hlavně v textilním a plastickém průmyslu. Barva speciálních efektních povlaků však silně závisí na geometrii osvětlení a detekce. Tradiční spektrofotometry nebo kolorimetry s jednou geometrií měření proto nemohou adekvátně charakterizovat optické vlastnosti těchto materiálů [6]. Použití nástroje založeného na

integrační kouli také nestačí, protože zachycuje průměrnou kolorimetrii vzorku, a nikoli podrobnou úhlovou variaci odraženého světla. Proto je důležité použít k charakterizaci těchto materiálů měřicí přístroje se zvýšenou složitostí a s vyšším počtem stupňů volnosti, aby mohla být prováděna měření ve více než jednom směru osvětlení a pohledu (obr. 1.1 d)) [7]. Přístroje měřící v širokém rozmezí úhlů se nazývají gonio-spektrofotometry. Interferenční pigmenty se obvykle hodnotí z hlediska barevného vzhledu v médiu, jako je barva nebo inkoust [6]. Získaná měřená veličina je poměrem odraženého a dopadajícího zářivého toku (Φ_r/Φ_i). Pomocí této měřené veličiny lze vypočítat obousměrnou distribuční funkci odrazu (BRDF).



Obrázek 1.1: Různé geometrie měření (adaptováno z [8])

1.1 Návaznost na předchozí práce na KPF

Problematice měření perlescentních vzorků se na Katedře polygrafie a fotofyziky (KPF) Univerzity Pardubice věnovaly již dvě práce.

První je diplomová práce Ing. Elišky Schützové s názvem Goniospektrometrické měření tištěných vzorků [9]. V této práci byly připraveny tři sady vzorků po sedmi barvách. V každé sadě byl použit jiný substrát, matný papír, lesklý papír a metalický papír se stříbrným metalickým nátěrem. Dále byly použity tyto barvy od firmy BRANCHER: Purple Pantone Krypto (P), Reflex Blue Pantone Krypto (RB), Proces Blue Pantone Krypto (PB), Green Pantone Krypto (G), Yellow Pantone Krypto (Y), Warm Red Pantone Krypto (WR) a Rubine Red Pantone Krypto (RR).

Pro tuto práci byla sestavena aparatura jejímž základem byl otočný stůl SIEMENS původního rentgenového difraktometru. Na tomto stole byly upevněny tři hlavní části goniospektrofotometru, osvětlovací část, otočný držák vzorku a detekční část. Osvětlovací část byla tvořena světelným zdrojem, kterým byla halogenová žárovka OSRAM s příkonem 100 W, ze které bylo světlo vedeno optickým vláknem do optické soustavy složené z čoček a clony. Osvětlovací soustava byla pevně zafixována. Ze světelného zdroje světlo dopadalo na vzorek. Detekční část je jediná, která se během měření pohybovala. Byla složena ze clony umístěné před vstupem do optického vlákna, které vede světlo odražené od vzorku do detektoru, v tomto případě do spektrofotometru. Dále byl signál veden do počítače, kde bylo možné signál zobrazit a dále zpracovat. V této práci byla zjištěna poměrně velká nestabilita světelného zdroje, intenzita nejprve rychle rostla a poté nepravidelně klesala s výrazným kolísáním. Toto zjištění bylo bráno v potaz u prací, které na KPF následovaly.

Vyhodnocení naměřených dat bylo provedeno pomocí BRDF a CIE $L^*a^*b^*$. Jako první bylo vyhodnocováno chování různých substrátů. Nejnižší hodnoty BRDF vykazoval matný papír, který odráží nejméně světla. Naopak nejvyšší hodnoty BRDF vykazoval metalický papír a papír lesklý se nacházel v nižším středu. Pro všechny papíry platí, že nejvyšších hodnot BRDF bylo dosaženo v okolí spekulárního úhlu odrazu. U matného papíru se ani v okolí spekulárního odrazu nenacházejí výrazné píky, u lesklých papírů dochází ke skokovému nárůstu hodnot BRDF ve spekulárních úhlech a u metalických papírů dochází k největšímu, ale postupnému nárůstu hodnot BRDF ve spekulárních úhlech. Dále byly vyhodnoceny papíry s nátěrem. U matného papíru barva zaplnila nerovnosti na povrchu papíru, čímž došlo k vyhlazení povrchu a nárůstu hodnot BRDF ve spekulárním úhlu. Co se týče barevnosti, barva nátěru se projevuje v úhlech mimo spekulární, okolo spekulárního úhlu převládá lesk, proto barva nátěru není pozorována. U lesklých papírů barva způsobí postupnější nárůst intenzity BRDF u spekulárních úhlů, ne skokový, jako tomu bylo bez nátěru. Barva lehce podpoří lesk papíru, a proto BRDF nabývá lehce vyšších hodnot než u papíru bez nátěru. U metalických vzorků se s nátěrem nemění tvar píky a hodnoty BRDF jsou jen o něco málo vyšší. Naopak barva nátěru je u těchto papírů pozorována pouze ve spekulárních úhlech, pravděpodobným důvodem je nízká intenzita signálu mimo spekulární úhly.

Druhou prací vytvořenou na KPF byla bakalářská práce s názvem Hodnocení perlescentních nátěrů pomocí goniospektrofotometrické aparatury [10]. V této práci byly připraveny čtyři sady vzorků po pěti barvách podkladu, azurová, purpurová, žlutá, bílá a černá. Každá sada byla vytvořena za použití jiného perlescentního pigmentu. Všechny vzorky byly zhotoveny na leskle natíraném papíru. Prvním úkolem této práce bylo stanovit optimální

koncentraci nátěru, rychlost nanášení, optimální hloubku drážek ve spirále, což ovlivňuje tloušťku naneseného filmu tak, aby vznikl rovnoměrný nátěr. Měření probíhalo pomocí goniospektrofotometru sestavného obdobně jako v práci [9]. V této práci byl použit jiný světelný zdroj, konkrétně halogenový světelný zdroj firmy Thorlabs [11]. Další modifikací bylo pevné uchycení držáku vzorku v jedné poloze. Mobilní tedy zůstal pouze detektor, pohybující se okolo vzorku. I zde byla proměřena stabilita světelného zdroje. Intenzita zdroje s časem sice klesala, ale nedocházelo k tak velkému kolísání intenzity, jako za použití zdroje v práci [9]. V práci [10] bylo zjištěno, že při úhlech vzdálených od spekulárního je barevnost ovlivněna především barvou podkladu. Na barevnost při spekulárních úhlech měla vliv kromě lesku i barva použitého perlescentního pigmentu, díky čemuž docházelo k barevnému posunu.

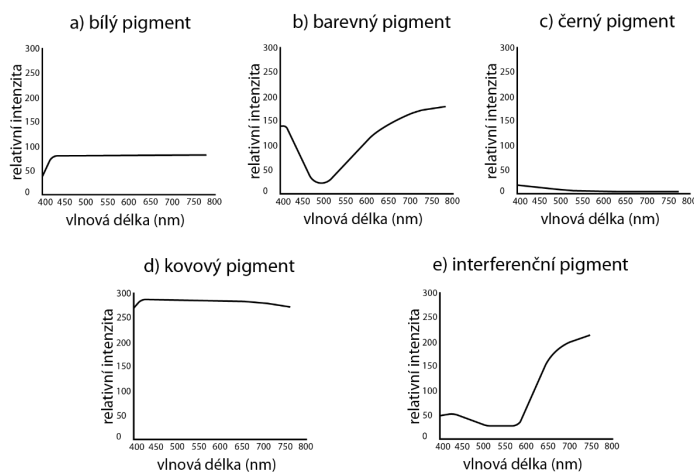
1.2 Cíle práce

Cílem práce je spektrálním hodnocením interferenčních pigmentů pomocí goniospektrofotometru a vyhodnocení dat v barvovém prostoru CIELAB. Výsledky měření budou porovnány s měřením na goniospektrometru sestrojeném na AV ČR. V diplomové práci budou diskutovány různá nastavení aparatury (velikost průměru vstupní clony, změna integračního času, vložení čočky před detektor) a jejich vliv na naměřená data. Dále bude ověřena opakovatelnost měření.

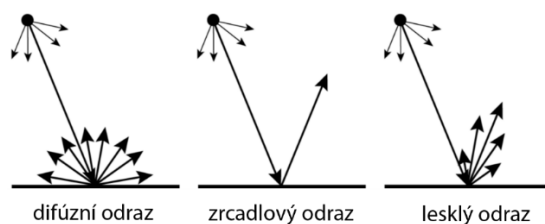
2 Teoretická část

2.1 Pigmenty se speciálním efektem

Pigmenty mohou být klasifikovány s ohledem na způsob, jakým interagují se světlem [12]. Nejdůležitější třídy pigmentů jsou pak bílé, barevné, černé a efektové pigmenty. Obrázek 2.1 znázorňuje interakci světla s těmito pigmenty. Částice bílého pigmentu (obr. 2.1 a) zcela rozptylují dopadající světlo rovnoměrně ve všech směrech (obr. 2.2 difúzní odraz). Částice barevných pigmentů (obr. 2.1 b) absorbují určité vlnové délky viditelného světla a rozptylují zbývající vlnové délky v závislosti na barvě (selektivní absorpce). Částice černého pigmentu (obr. 2.1 c) absorbují všechny vlnové délky viditelného světla (úplná absorpce). Pigmenty s kovovým efektem (obr. 2.1 d) sestávají z tenkých kovových (většinou hliníkových) destiček, nejsou transparentní a odrážejí veškeré dopadající světlo v jednom směru (obr. 2.2 zrcadlový odraz). Částice pigmentu působí jako malá zrcadla vedoucí k odrazu kovového lesku (metalický efekt), pokud jsou aplikovány tak, aby poskytovaly zarovnanou paralelní orientaci. Transparentní interferenční perleťové lesklé pigmenty (obr. 2.1 e) jsou tvořeny destičkami, které se snadno vyrovnají paralelně k orientaci povrchu, na který jsou aplikovány. Tyto pigmenty selektivně odrážejí část světla, které přímo dopadá na hladký povrch destiček (obr. 2.2 lesklý odraz). Druhá část světla vstupuje do průhledných částic a částečně se odráží buď na rozhraní uvnitř pigmentů, nebo na dně destiček. Vnitřně odražené světlo opouští destičky, což vede k interakcím s přilehlými pigmentovými částicemi a vytváří další odrazy (obr. 2.4 vícenásobný odraz). Částečný odraz světla a optická superpozice vytvářejí interferenční jevy, které spolu s několika vnitřními odrazy vedou k charakteristickému vzhledu perleťových pigmentů. Rozdíl v indexu lomu mezi pigmentem s vysokým indexem lomu (typické hodnoty 1,8 až 2,9) a aplikačním médiem (hodnoty v rozmezí od 1,5 do 1,6) je zásadní pro příslušné optické procesy (obrázek 2.3).

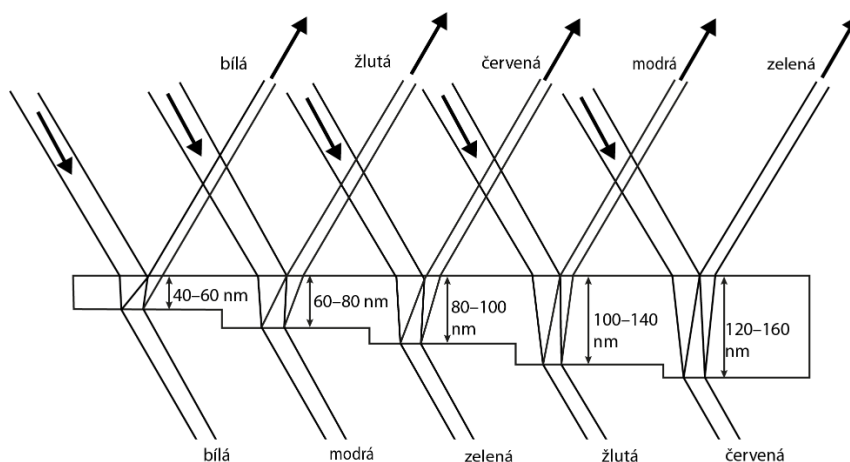


Obrázek 2.1: Závislost relativní intenzity na vlnové délce pro různé typy pigmentů (adaptováno z [12])



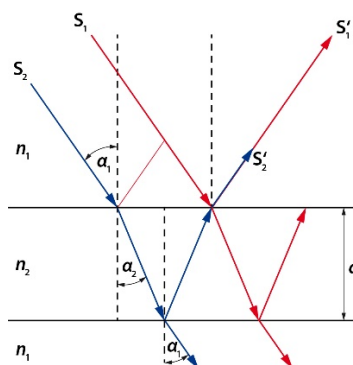
Obrázek 2.2: Druhy odrazů v závislosti na typu povrchu (adaptováno z [13])

Perleťové pigmenty jsou tvořeny slídovými destičkami s průměrem pohybujícím se v rozmezí 5–200 μm [2]. Na slídové destičky jsou nanášeny vrstvy oxidu kovu, k výrobě se často využívá oxid titaničitý TiO_2 . Interferenční barva těchto pigmentů závisí na tloušťce vrstev TiO_2 (obr. 2.3), která je obvykle v rozmezí 50–300 nm na obou stranách slídové destičky. Proto je kontrola této tloušťky jedním z nejdůležitějších faktorů pro reprodukovatelnou výrobu perleťových pigmentů. Dále se využívá železo, zdrojem může být síran železnatý nebo chlorid železitý.



Obrázek 2.3: Závislost interferenční barvy na tloušťce vrstvy TiO_2 (adaptováno z [12])

Jak bylo uvedeno, interferenční pigmenty se skládají ze dvou nebo více vrstev s vysokým indexem lomu [4]. Po několika odrazech na hranicích vrstev následuje interference světelných vln (obrázek 2.4). Tato interference, která vede k aditivnímu míchání barev, je pozorována pouze kolem zrcadlových směrů vzhledem k normále povrchu pigmentu.



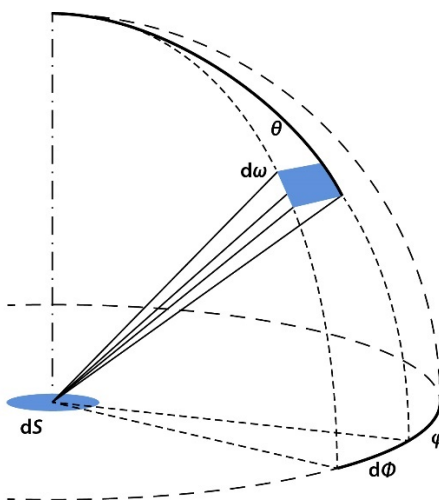
Obrázek 2.4: Princip interference světla na tenké průhledné vrstvě (adaptováno z [14])

2.2 Radiometrie

Předmětem radiometrie je měření světelných veličin a studium jejich distribuce v prostoru [15]. Radiometrie zahrnuje studium záření vyzařované zdrojem, jeho detekci, odraz nebo přenos optickými systémy. Základní radiometrické veličiny popisují geometrické rozložení energie záření v prostoru.

2.2.1 Radiometrické veličiny

Mezi čtyři základní radiometrické veličiny patří zářivý tok, zářivost, ozáření a zář [15]. K orientaci v prostoru slouží kromě kartézských souřadnic ještě úhel θ , který značí úhel dopadu θ_i a odrazu θ_r , určuje odchylku od osy z , dále pak úhel φ (azimutový úhel), který určuje odchylku od osy x . Dále je potřeba definovat směr dopadajícího ω_i a odraženého světla ω_r [3]. Jako poslední je potřeba definovat prostorový úhel Ω jehož jednotkou je steradián (sr) [15]. Prostorový úhel vymezuje určitou plochu na povrchu jednotkové koule, jak znázorňuje obrázek 2.5. Koule libovolného poloměru má 4π steradiánů.



Obrázek 2.5: Znázornění prostorového úhlu ve směrech θ a φ (adaptováno z [3])

2.2.1.1 Zářivý tok Φ (radiant flux)

Zářivý tok Φ je energie vyzářená za jednotku času vyjádřená ve watttech (W) [15].

2.2.1.2 Zářivost I (radiant intensity)

Zářivost I je hustota toku na jednotkový prostorový úhel vyzářená z bodového zdroje v prostoru a šířící se v daném směru $d\omega$ (jednotka $W \cdot sr^{-1}$) [15].

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (1)$$

2.2.1.3 Ozáření E (irradiance)

Ozáření E je hustota toku na jednotku plochy, která dopadá na určité místo na určitém povrchu, jednotkou je $W \cdot m^{-2}$. Ozáření se vypočítá jako poměr toku Φ k povrchovému prvku S [15].

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (2)$$

2.2.1.4 Zář L (radiance)

Zář L je výkon na jednotkovou plochu kolmou k paprsku a na jednotkový prostorový úhel ve směru paprsku (jednotka $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$) [15].

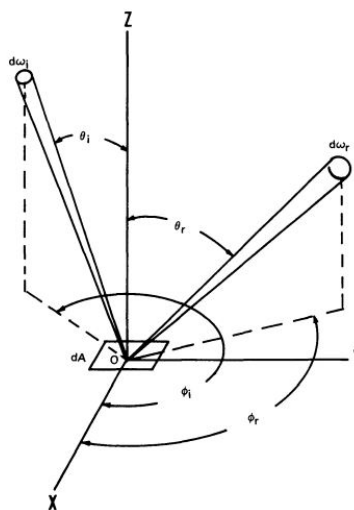
$$L = \frac{d^2\Phi}{\cos\theta \cdot dS \cdot d\omega} \quad (3)$$

2.3 BRDF

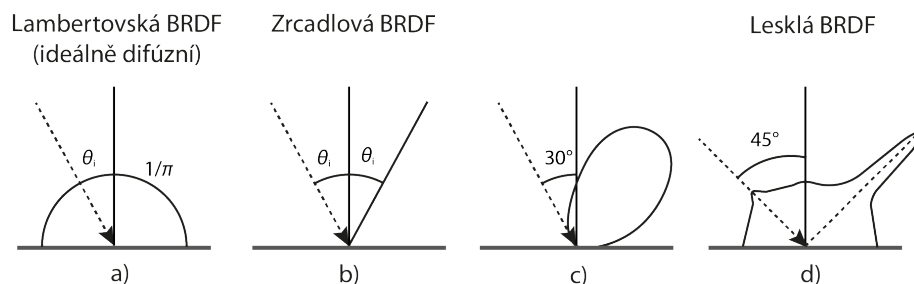
Pro ozáření na dostatečně velké ploše rovnoměrného a izotropního povrchu je základní veličinou, která charakterizuje (geometricky) odrazové vlastnosti tohoto povrchu, funkce f_r [16]:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_r, \lambda)}, \quad (4)$$

kteřá se nazývá BRDF (bidirectional reflectance distribution function), tedy obousměrná distribuční funkce odrazu. dL_r je odražená zář a dE_i je ozáření. Protože pro daný pár směrů je BRDF koncentrací odrazivosti (na steradián), může nabývat jakékoli hodnoty od nuly do nekonečna. Protože záleží pouze na směrech, můžeme reprezentovat geometrii dopadajícího a výstupního záření jednoduchým polárním diagramem jako na obrázku 2.6. Obrázek 2.7 znázorňuje řezy BRDF v rovině dopadu.



Obrázek 2.6: Geometrie dopadajícího a odraženého paprsku [16]

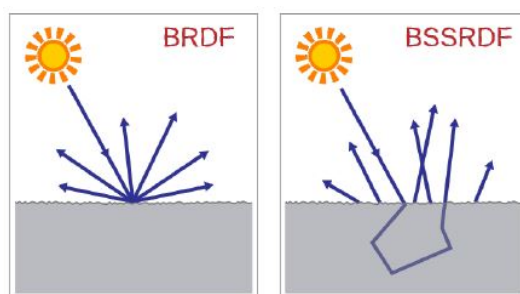


Obrázek 2.7: Řezy BRDF v rovině dopadu ($\varphi_i = \varphi_r = 0$), vynesené v polárních souřadnicích jako funkce θ_r , (a) lambertovského reflektoru, (b) hladkého povrchu, (c) zdrsněného hliníkového povrchu a (d) lesklý papír (adaptováno z [17])

2.4 Další funkce

2.4.1 BSSRDF

K určení vlastností geometrické odrazivosti jakéhokoli povrchu slouží BSSRDF (bidirectional scattering surface reflectance distribution function) [16]. Pomocí této funkce lze popsat objekty, na jejichž povrchu dochází kromě pohlcení, odrazení nebo lomu světla ještě dále k pohybu fotonů uvnitř materiálu [18]. BSSRDF v sobě tedy zahrnuje vstupní a výstupní směr a místo vstupu a výstupu paprsku z materiálu. Využití této funkce je ale výpočetně velmi náročné. BSSRDF slouží ovšem jako základ pro adekvátnější popis a specifikaci odrazových vlastností většiny povrchů [16]. Na obrázku 2.8 je znázorněn rozdíl mezi BRDF a BSSRDF.



Obrázek 2.8: Rozdíl mezi BRDF a BSSRDF [18]

2.4.2 BTF

Bidirectional texture function (BTF), tedy obousměrná texturní funkce, slouží k popisu povrchové struktury, zatímco BRDF slouží k popisu téměř plochých povrchů [19]. Drsné textury poskytují dostatek informací o povrchovém reliéfu materiálu. BTF je sedmirozměrná funkce, která závisí jak na směrech pohledu (detekce) a osvětlení, tak na rovinných souřadnicích textury. BTF se obvykle získává měřením tisíců obrazů, které pokrývají mnoho kombinací osvětlení a pozorovacích úhlů. Značná velikost (několik GB na jeden vzorek) těchto měření dlouho znemožňovala jejich praktické využití. Během posledních několika let byly vyvinuty metody měření, komprese, modelování a vykreslování BTF. Tato funkce se využívá k navrhování interiéru v automobilovém a leteckém průmyslu nebo v architektuře.

2.5 Reflektance

Odraz je proces, při kterém elektromagnetický tok dopadající na povrch opouští tento povrch ze strany dopadu beze změny frekvence [16]. Termín reflektance R označuje jakýkoli poměr odraženého toku Φ k dopadajícímu toku Φ_i , který je vztažen ke stejnému povrchu [17].

$$R = \frac{\Phi}{\Phi_i} \quad (5)$$

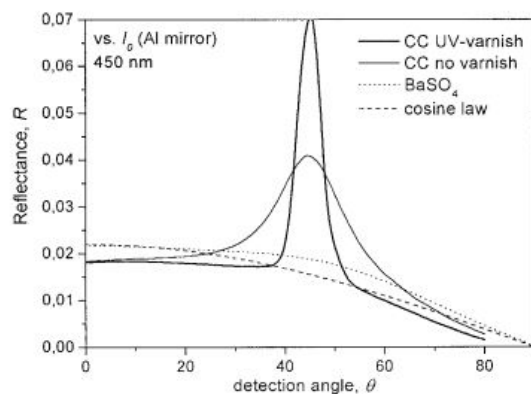
Je to bezrozměrná veličina v závislosti na vlnové délce, směru, polarizaci a poloze na povrchu. Pokud jde o BRDF, závislost na vlnové délce a polarizaci je vyjádřena nepřímo. Data o odrazivosti vypovídají o vizuálním vzhledu odrazných povrchů, popisují barvu, strukturu nebo lesk [16].

Měřicí nástroje obvykle obsahují jeden detektor, který slouží k zachycení odraženého toku, proto nelze dopadající tok měřit přímo [17]. Dopadající tok se měří nepřímo pomocí dokonale bílého difuzoru, který je schopen rovnoměrně odrazet dopadající světlo, aniž by ho absorboval. Příkladem dokonale bílého difuzoru je síran barnatý BaSO_4 nebo Spectralon. Ideální bílý standard musí být dokonale Lambertovský, neabsorpční a rozptylující. Tok zachycený detektorem je tedy úměrný dopadajícímu toku. Hodnocený vzorek a dokonalý difuzor jsou osvětlovány a pozorovány stejnou geometrií. Poměr toku Φ odraženého od objektu ku toku Φ_{ref} odraženého od bílého difuzoru se nazývá reflexní faktor \hat{R} .

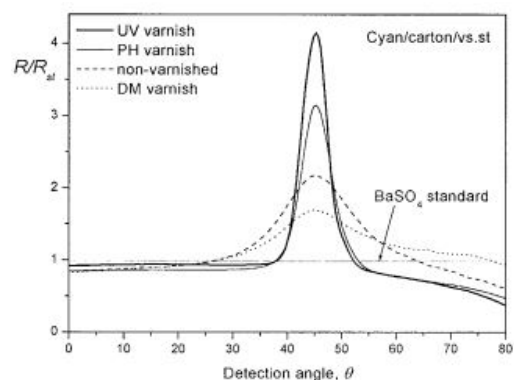
$$\hat{R} = \frac{\Phi}{\Phi_{\text{ref}}} \quad (6)$$

U lesklých vzorků může relativní odrazivost R/R_{ref} výrazně překročit hodnotu 1 v oblasti zrcadlového úhlu odrazu, kdy R je odrazivost vzorku a R_{ref} je odrazivost bílého standardu BaSO_4 [20]. Relativní odrazivost je dána rovnicí 7, kde I_r značí zářivost vzorku a $I_{r \text{ ref}}$ značí zářivost standardu. Relativní hodnoty jsou velice užitečné, protože díky nim je eliminována spektrální závislost vyzařování světelného zdroje a citlivost detektoru. Dále tím je vyloučen Lambertův kosinový zákon úhlové závislosti odrazivosti, a také lze potlačit některé možné systematické chyby měření. Naopak se může objevit malá chyba spojená s nedokonalostí difuzního bílého standardu. Úhlová závislost hodnot R se tedy odlišuje od úhlové závislosti R/R_{ref} v zásadě přítomností obecné závislosti na kosinovém zákoně (obr. 2.9 a 2.10).

$$\frac{R}{R_{\text{ref}}} = \frac{I_r(\theta, \lambda)}{I_{r \text{ ref}}(\theta, \lambda)} \quad (7)$$



Obrázek 2.9: Závislost R na úhlu detekce [20]



Obrázek 2.10: Závislost R/R_{ref} na úhlu detekce [20]

Na obr. 2.9 lze pozorovat nárůst relativní odrazivosti vzorků v porovnání bílého difúzního standardu. Vzorky jsou azurově potíštěné kartony bez laku, s UV lesklým lakem, s lesklým tiskovým lakem a disperzním matným lakem. Prudký nárůst reflektance je pozorován v oblasti spekulárního úhlu (osvětlovací úhel činí 45°) a je způsoben leskem povrchu. Reflexní spektrum dobře rozptylujících povrchů by mělo být konstantní, rovnoběžné se závislostí ideálního Lambertovského difuzoru (obr. 2.10).

Pokud je reflexní faktor větší než jedna, může být využit následující vztah (rovnice 8) pro výpočet Φ_i , hodnoty Φ_{ref} jsou naměřeny. Reflexní faktor je větší než jedna, pokud vzorek odráží více světla než dokonalý bílý standard.

$$\Phi_{ref} = \frac{\Phi_i}{\pi} \quad (8)$$

2.6 Popis měřicí aparatury

Gonio-spektrofotometry, i když jsou navrženy pro různé účely, lze klasifikovat podle jejich počtu stupňů volnosti. BRDF je pětirozměrná funkce (vlnová délka plus čtyři sférické souřadnice – polární a azimutální úhly pro směr osvětlování a pro směr pozorování) [7]. Aby byla BRDF plně charakterizována, je zapotřebí jeden stupeň volnosti pro každou dimenzi. Je zřejmé, že složitost systému se zvyšuje s počtem stupňů volnosti. Čím vyšší je počet stupňů volnosti, tím větší je potřeba tyto přístroje automatizovat, jednak kvůli obtížnosti ručního polohování, jednak za účelem zkrácení doby měření, která se zvyšuje s počtem proměnných.

V referenci [3] je navrženo geometrické uspořádání pro dosažení čtyř stupňů volnosti nezbytných k pokrytí celé polokoule, v níž dochází k odrazu světla. Toto uspořádání upřednostňuje pohyby vzorku tak, aby osvětlovací a detekční ramena měla každý pouze jeden stupeň volnosti. Jeden stupeň volnosti na každém optickém rameni umožňuje snadnou instalaci přesných optických systémů, což vede k velmi vysoké směrové přesnosti při malých rozměrech

ramen. Vysoká směrová přesnost je nezbytná pro jemnou analýzu povrchů interferenčních pigmentů.

Ve zdroji [21] je uvedena sada měřicích geometrií, které poskytují adekvátní informace pro kolorimetrickou charakterizaci perleťových interferenčních nátěrů, úhly osvětlení 15° , 45° a 65° a úhly detekce 15° , 35° , 45° , 70° a 85° pro každý úhel osvětlení.

Gonio-spektrofotometr dokáže měřit při velkém počtu osvětlovacích a pozorovacích úhlů, ale je pomalý [22]. Jedním z hlavních důvodů je to, že povrch vzorku je měřen naplocho, zatímco detektor a světelný zdroj nebo vzorek se otáčejí, aby provedli obousměrná měření. Geometrická kalibrace detektoru a zdroje světla nebo rotace držáku vzorku a spektrální kalibrace zdroje záření významně přispívají k době měření.

Ve zdroji [22] bylo hodnoceno nastavení víceúhlového měření na základě obrazu (vlastní nastavení měření) oproti komerčně dostupným gonio-spektrofotometrům (LAMBDA1050 a GCMS). Vzorek je umístěn na otočném válci. Nejprve byly pomocí zařízení LAMBDA1050 měřeny tři vzorky pro tři úhly osvětlení ($\theta_i = 25^\circ$, 35° a 45°) a pro 26 detekčních úhlů v rozsahu $\theta_r = +75^\circ$ až -75° s krokem 5° . Byly získány poměry dopadajícího zářivého toku k odraženému zářivému toku pro rozsah vlnových délek 380–730 nm v intervalech 10 nm.

Pomocí přístroje GCMS byly proměřeny dva vzorky. Reflexní faktor byl měřen v rozsahu vlnových délek 390–730 nm po 10 nm. Osvětlovací a detekční úhly byly v rozsahu $+80^\circ$ až -80° v intervalech po 5° .

Pro vlastní nastavení měření prováděné pomocí digitálního fotoaparátu se osvětlovací a pozorovací úhly počítají pro každý bod pixelu, který odpovídá danému bodu na zakřiveném vzorku. Počet směrů pozorování, které můžeme měřit, je pro daný směr osvětlení θ_i dán zakřivením vzorku, rozlišením digitálního fotoaparátu použitého jako detektor a vzdáleností mezi zakřiveným vzorkem a detektorem. Vlastním nastavením měření byly proměřeny všechny vzorky, které byly měřeny pomocí LAMBDA1050 i GCMS.

V článku [20] je popsáno měření pomocí víceúhlového spektrofotometru. Je studován vliv lesku na kolorimetrické parametry a ukázán velký rozsah tohoto vlivu v případě matných i lesklých materiálů. Experiment byl proveden pomocí dvou detektorů, které zaznamenávaly spektrální úhlovou distribuci světla odraženého od tištěných materiálů. Prvním je fotonásobič PMT IP 21, který využívá monochromátor k zaznamenávání hodnot odrazu s rozlišením úhlu při konstantní vlnové délce. Světelným zdrojem je pro obě zařízení halogenová žárovka. Druhým je spektrofotometr GretagMacbeth Spectrolino. Oproti fotonásobiči PMT tento

detektor zaznamenává celé spektrum viditelných vlnových délek, protože neobsahuje monochromátor. Úhel dopadajícího světla je stanovený k normále na 45° .

2.6.1 Konstrukce různých gonio-spektrofotometrů

Hlavním požadavkem na gonio-spektrofotometr OptiMines byla malá divergence dopadajícího světla a malý vstupní úhel detektoru. Požadavky, které řídily design, byly vysoká směrová přesnost a rozměry zařízení [3].

Ve zdroji [7] je popsána konstrukce gonio-spektrofotometru GEFE, který byl vyvinut Španělskou radou pro vědecký výzkum CSIC (Spanish Council for Scientific Research). Tento přístroj zahrnuje tři systémy: osvětlovací a detekční systém a systém umístění vzorku. První je pevný, zatímco ostatní dva systémy jsou pohyblivé. Vzorek je umístěn s požadovanou orientací vzhledem k přicházejícímu paprsku, zatímco detektor je připevněn k ozubenému kolu, aby se mohl otáčet kolem vzorku. Toto uspořádání umožňuje rychlé a přesné vzorkování. Vzorek je držen šestiosým robotickým ramenem pomocí vakuového přísavného zařízení.

Počátek souřadného systému se nachází ve středu vzorku. Směr dopadu a pozorování (odrazu) je definován pomocí polárních θ a azimutálních φ úhlů [7]. Experimentální systém má sedm stupňů volnosti, šest daných šestiosým ramenem robota a sedmý vztahující se k úhlovému pohybu spektrometru Φ_A na ozubeném kole. Počátek Φ_A je směr dopadu. Tři stupně volnosti ramene robota se používají výhradně k umístění vzorku na počátek souřadnic, zatímco další tři umožňují tři rotace kolem os α_X , α_Y a α_Z .

Sférické souřadnice používané v definici BRDF musí být převedeny na stupně volnosti tohoto systému (α_X , α_Y , α_Z a Φ_A) pomocí geometrické transformace [7].

Ve zdroji [22] je porovnáno vlastní nastavení měření s využitím fotoaparátu jako detektoru s dvěma komerčně dostupnými zařízeními, LAMBDA1050 a GCMS s následující konfigurací zařízení: světelný zdroj a detektor jsou v pevné poloze od vzorku (například světelný zdroj při 45° a detektor při 0°) a měřený vzorek je připevněn k válci se známým poloměrem. Světelný zdroj i detektor míří do středu válce. Za předpokladu, že je zakřivený vzorek homogenní, světlo dopadající a odražené v jakémkoli bodě vzorku poskytuje informace o poloze zdroje světla, fotoaparátu a normálovém vektoru povrchu. Protože se měření provádějí pomocí digitálního fotoaparátu, odpovídá každý pixel v zachyceném obraze danému bodu (P) na zakřivené ploše vzorku. Protože každý bod (P) (na vzorku) vytváří odpovídající úhel dopadu (θ_i) a odrazu (θ_r) vzhledem k normále v bodě (P), informace zaznamenaná každým pixelem odpovídá obousměrnému měření v bodě (P).

Zachycený obraz zaznamenává informace o světle v digitálních hodnotách snímače kamery [22]. Naměřené spektrální citlivosti kamery ($r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$) spolu s 2° pozorovatelem a trichromatickými členitely (\hat{x} , \hat{y} a \hat{z}) se použijí k výpočtu matice \hat{M} 3×3 . Pomocí \hat{M} lze zachycená data RGB převést do kolorimetrického prostoru (CIEYxy).

Gonio-spektrofotometr LAMBDA1050 je přístroj s dvojitým svazkem paprsků, přičemž referenční svazek paprsků je veden přímo k detektoru, a tak se měří dopadající zářivý tok (Φ_i) [22]. Aby na vzorek dopadalo monochromatické světlo, je zde využita dvojitá holografická mřížka. U gonio-spektrofotometru LAMBDA1050 je vzorek umístěn na rotačním stolku a úhel dopadu se mění otáčením vzorku pomocí motoru. Světlo odražené od vzorku je detekováno integrující koulí o průměru 60 mm a sestává z fotonásobiče jako detektoru. Detektor se otáčí kolem vzorku a může být umístěn v různých úhlech vzhledem k normále povrchu vzorku, s výjimkou $\pm 10^\circ$ v blízkosti zdroje světla. Výstupem měření tohoto přístroje je poměr odraženého zářivého toku k dopadajícímu zářivému toku.

Gonio-spektrofotometr GCMS-3B má také dvoupaprskový design, ve kterém je zářivý tok odražený od povrchu vzorku kontinuálně porovnáván se zářivým tokem odraženým od bílého difuzního standardu [22]. Stejně jako u gonio-spektrofotometru LAMBDA1050 je světelný zdroj wolframová halogenová žárovka upevněná ve stálé poloze. Detektor, tvořen diodovým polem, se otáčí kolem vzorku v úhlovém rozsahu $\pm 80^\circ$ k rovině vzorku. Měřený vzorek je připevněn k desce, která se opět otáčí v úhlovém rozsahu $\pm 80^\circ$ vzhledem k dopadajícímu světelnému svazku kolmému k rovině vzorku. Světelný paprsek je pomocí zrcadel, čoček a tepelných filtrů rozdělen na dva identické paprsky, které současně osvětlují jak vzorek, tak bílý difuzní standard. Z důvodu rotace vzorku a detektoru přístroj automaticky reguluje změnu intenzity osvětlení a oblast osvětlení/pozorování. Výstupem měření tohoto zařízení je měření faktor radiance (β). Protože použitý referenční bílý standard je považován za perfektně odrážející difuzor, můžeme vypočítat BRDF f_r vzorku pomocí vztahu:

$$\beta = \pi \cdot f_r \quad (9)$$

Přesnost konstrukce, respektive správnost optického a geometrického nastavení gonio-spektrofotometru OptiMines, byla ověřena ještě před samotným měřením vzorků [3]. Ověření bylo provedeno proměřením difuzního bílého standardu (Spectralon) a následným porovnáním naměřených hodnot s experimentálními údaji dostupnými v literatuře. Měření bylo prováděno pro osvětlovací úhly 0° , -30° , -45° a -60° , a pro detekční úhly v rozmezí -90° až 90° (0° až 90° pro $\theta_i = 0^\circ$) s krokem 5° . Naměřené hodnoty se shodují s údaji v literatuře, což vypovídá o přesnosti a vhodnosti využití zařízení OptiMines k analýze difúzních vzorků.

2.6.2 Světelné zdroje

Gonio-spektrofotometr OptiMines [3] využívá halogenový světelný zdroj (žárovka s příkonem 50 W). Tento zdroj byl vybrán pro spojitě spektrum ve viditelné oblasti vlnových délek a vynikající stabilitu. Světelný zdroj byl vybaven optickým vláknem o průměru 1 mm (vstupní úhel 25°). Toto vlákno má vysokou a kontinuální propustnost v rozsahu viditelných vlnových délek a nabízí dobrou rovnoměrnost ozáření vzorku po kolimaci paprsku. Na výstup optického vlákna byl umístěn difuzér tvarující světlo, který zajistí homogenizaci osvětlovacího místa. Světlo z optického vlákna prochází kolimační soustavou.

U gonio-spektrofotometru GEFE [7] byl využit kolimovaný světelný zdroj. Kolimovaný zdroj má lepší výkon, pokud jde o dopadající zářivý tok, což je důležité, protože je v aparatuře použit dělič paprsků. Výhodou kolimovaného zdroje je jeho schopnost snižovat rozptýlené světlo na zanedbatelnou úroveň. Jako světelný zdroj byla použita xenonová výbojka (Hamamatsu SuperQuiet Xenon Lamp), která vyzařuje v rozsahu vlnových délek 185 až 2000 nm. Přestože je tento typ zdroje méně stabilní oproti žárovce, byl vybrán kvůli jeho obzvláště vysoké emisi energie v rozsahu krátkých vlnových délek, což je oblast, kde je odezva spektrofotometru nejmenší. Před zdroj světla byl umístěn optický systém, aby se dosáhlo rovnoměrného ozáření na vzorku. Aby se dosáhlo tohoto stupně uniformity a kolimace, byl využit systémem Köhler.

Ve zdroji [22] je u všech zařízení jako zdroj záření použita wolframová halogenová žárovka.

2.6.3 Snímače

Detekčním systémem goniometru OptiMines [3] je Maya2000 Pro Spectrometer od společnosti Ocean Optics. Je vybaven CCD polem s 2048×64 čtvercovými pixely se stranou $14 \mu\text{m}$. Tento dvourozměrný CCD se používá jako 1D pole (tj. všechny řádky se sečtou dohromady). Tento detektor nabízí 75% kvantovou účinnost v rozsahu viditelných vlnových délek. Šířka vstupní clony řídí spektrální rozlišení spektrometru. U této konfigurace je spektrální rozlišení přibližně 3 nm a vstupní úhel α_r je přibližně $0,1^\circ$. Spektrální odezva spektrometru Maya2000 Pro je kalibrována proti halogenovému světelnému zdroji HL-2000-CAL Calibrated Tungsten Halogen od společnosti Ocean Optics. Integrovaný čas lze zvolit mezi 6 ms a 10 s.

U gonio-spektrofotometru GEFE [7] byl pro detekci využit spektrometr (CS-2000 A, Konica-Minolta), který je založen na CCD detektoru. Spektrální odezva detektoru zahrnuje viditelný rozsah vlnových délek (380–780 nm) a má variabilní zorné pole ($0,1^\circ$, $0,2^\circ$ a 1°). Spektrometr je připevněn k podstavě, která se pohybuje po obvodu ozubeného kola

s průměrem 1,03 m pomocí krokového motoru (MForceMicroDrive MICROSTEPPING, IMS). Dále byla do detekčního systému přidána kamera s možnostmi prostorové analýzy, aby bylo možné určit BSSRDF na povrchu studovaného objektu.

V článku [22] je jako detektor použit digitální fotoaparát Nikon D200 DSLR. U goniospektrofotometru LAMBDA1050 je jako detektor použit fotonásobič.

2.7 Vliv konstrukčních prvků na BRDF

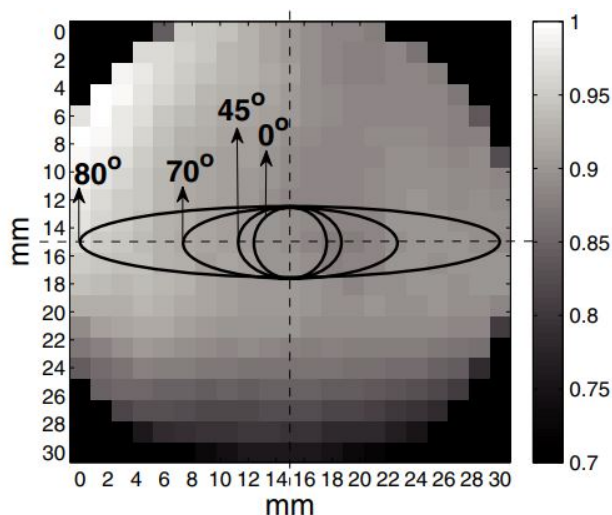
2.7.1 Rozložení záření

Teoreticky je BRDF vyjádřena jako funkce každého směru dopadu [7]. To znamená, že za účelem úplné charakterizace by měl být vzorek v ideálním případě ozařován paralelním svazkem paprsků a nikoli nenulovým prostorovým úhlem, jak je tomu v praxi. Důvodem je difrakční limit a omezení způsobená optickým systémem, především průměr vstupní clony a její vzdálenost od vzorku. Na rozdíl od ideálního případu, ne všechny paprsky uvnitř osvětlovacího kužele mají stejnou zář. Aby měření nebylo omezeno pevným pozorovacím úhlem, byla před objektivem detektoru umístěna štěrbina o průměru 2 mm. Pokud je divergence dostatečně malá, lze paprsek považovat za kolimovaný.

2.7.2 Rovnoměrnost ozáření na vzorku

Vzhledem k velikosti zorného pole spektrometru musí být ozářená oblast na vzorku jednotná a dostatečně velká, aby její projekce byla větší než zorné pole spektrometru, bez ohledu na úhel pozorování [7]. Pokud by to tak nebylo, nedostatek uniformity ozáření by vedl k odečtu záření, které by bylo závislé na pozorovacím úhlu.

Ve zdroji [7] bylo provedeno měření rovnoměrnosti ozáření napříč vzorkem pomocí fotodiody maskované otvorem o průměru 1,5 mm a držené robotickým ramenem. Během tohoto měření bylo posuzováno, jak moc se liší ozáření každé oblasti, která je během měření snímána. Kruh a elipsy na obrázku 2.11 představují oblasti, které jsou pozorovány 1° zorným polem spektrometru pro různé θ_r a pro $\theta_i = 0^\circ$. Ve středovém kruhu o poloměru 5,25 mm je uniformita ozáření (definovaná jako směrodatná odchylka naměřených hodnot) rovna 1,08 %, zatímco v kruhu o poloměru 10,5 mm činí 1,75 %.



Obrázek 2.11: Rovnoměrnost ozáření napříč vzorkem. Kruh a elipsy představují oblasti, které jsou zaznamenány spektrometrem se zorným polem 1° , pro různé hodnoty θ_s (0° , 45° , 70° , 80°) a pro $\theta_i = 0^\circ$ [7]

2.7.3 Rozptýlené světlo

Prvním zdrojem rozptýleného světla ve zdroji [7] je dělič paprsků. Rozptyl je způsoben odrazy mezi plochami děliče paprsků; dochází k němu dokonce i u děličů paprsků, které mají antireflexní vrstvu. Tato složka rozptýleného světla je úměrná zářivému toku dopadajícímu na vzorek a má stejné spektrální složení. Takto získaný signál byl 4×10^{-5} násobek intenzity ozáření. Druhým zdrojem rozptýleného světla je okolní prostředí, které může obsahovat různé emitující prvky. Tato složka rozptýleného světla má jiné spektrální složení a její hodnota se pohybuje mezi 10^{-7} a 10^{-8} násobkem toku dopadajícího na vzorek.

Ve zdroji [22] byla homogenita světelného zdroje kontrolována měřením dopadajícího světla v různých částech povrchu vzorku. Dopadající paprsek byl homogenní s variací přibližně 7,2 % na ploše o velikosti 10×5 cm na povrchu vzorku.

2.7.4 Vliv clony

Naměřené hodnoty jsou ovlivněny šířením detekčního paprsku použitého při měření (divergence dopadajícího paprsku a úhel štěrbiny detektoru) [20]. Efekt clony je silnější u lesklých povrchů, které mají ostřejší odrazové vlastnosti. Široké clony zvětšují měřenou oblast lesku, více u lesklých vzorků než u matných. Zdá se, že otvory clon pro měření s více úhly by měly být užší a přísněji definované než otvory pro standardní geometrie s jedním úhlem. V této souvislosti je užitečné vzít v úvahu úhlové podmínky v situaci vnímání a hodnocení dvěma lidskýma očima: dva úhly, malé detekční otvory, ale velké osvětlovací otvory (difúzní víceúrovňové osvětlení z velkoplošných zdrojů). V takovém případě je oblast geometrického úhlu efektu lesku značně zvětšena, takže vnímání barvy a lesku je značně ovlivněno.

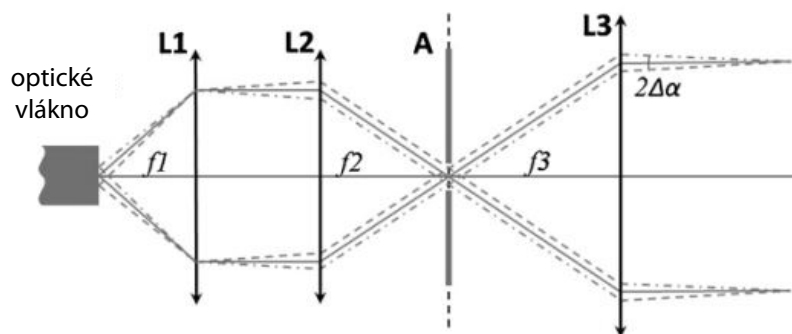
2.8 Přesnost a co ji ovlivňuje

2.8.1 Směrová přesnost

Nezbytným požadavkem při měření interferenčních povrchů je vysoká směrová přesnost [3]. Směrová přesnost se odvíjí od mechanické a optické přesnosti. Využití vysoce přesných polohovadel zajistí vysokou mechanickou přesnost. Dosáhnout optické přesnosti je mnohem náročnější. Optická přesnost závisí na divergenci dopadajícího světelného paprsku a úhlovém přijetí detektoru. Jednou možností, jak zlepšit směrovou přesnost, je prodloužit osvětlovací a detekční ramena, což by vedlo k větším rozměrům zařízení. Pro laboratorní využití by to bylo přijatelné, pro komerční nikoli. Další možností je vybavit zařízení specifickou optikou ve směrech osvětlení a detekce, tím nedojde ke zvětšení zařízení a bude získáno dobré spektrální rozlišení a vysoká směrová přesnost.

2.8.1.1 Divergence dopadajícího světelného paprsku

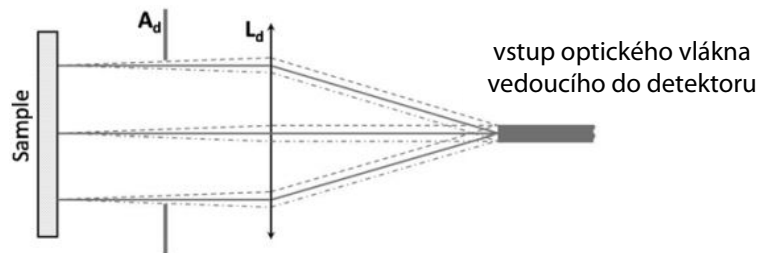
V osvětlovací části gonio-spektrofotometru OptiMines [3] je světlo vycházející ze zdroje skrze optické vlákno kolimováno achromatickou čočkou (L1) s ohniskovou vzdáleností 20 mm a průměrem 12,5 mm. Za kolimační čočku byla instalována telecentrická konfigurace (obrázek 2.12). Telecentrická konfigurace zajistí, že na všechny body napříč objektem dopadají světelné paprsky rovnoběžné s optickou osou. Tato vlastnost je zásadní, protože řídí divergenci paprsku a zaručuje, že směr dopadajícího paprsku je stejný pro všechny body povrchu. Telecentrická konfigurace je sestavena pomocí dvou čoček (L2, L3) a clony A (otvor 200 μm) umístěných v jejich společné ohniskové rovině. Přesnost úhlu je dána průměrem clony A. Průměr osvětlovacího paprsku je určen průměrem L3 (zde 25 mm). Ohnisková vzdálenost L1 byla zvolena tak, aby došlo k zachycení veškerého světla vycházejícího z vlákna. Pro L2 a L3 byly vybrány krátké ohniskové vzdálenosti, aby došlo ke snížení délky ramene osvětlení. Pro tuto konfiguraci je poloviční divergence dopadajícího světla $0,12^\circ$.



Obrázek 2.12: Kolimační a telecentrická soustava osvětlovací části [3]

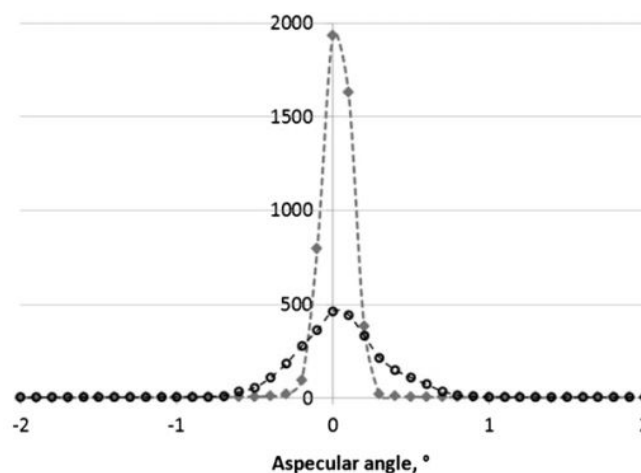
2.8.1.2 Vstupní úhel detektoru

V detekční části gonio-spektrofotometru OptiMines [3] je světlo odražené od povrchu vzorku směrováno do detektoru přes achromatickou sběrnou čočku (L_d), po které následuje optické vlákno, jehož vstup je umístěn v ohniskové vzdálenosti L_d (obrázek 2.13). Toto optické vlákno vede světlo ke vstupu do detekčního systému. Zjištěná povrchová plocha vzorku je definována průměrem clony (zde 2 mm) umístěného před čočkou L_d . Zobrazená oblast při normální detekci je tedy průměr kruhu 2 mm a pro detekci při různých úhlech θ_r je to elipsa s hlavní osou $2/\cos(\theta_r)$. Detekční oblast musí být menší než osvětlená oblast. Větší oblasti analýzy lze snadno dosáhnout změnou čočky L_3 a clony A_d .



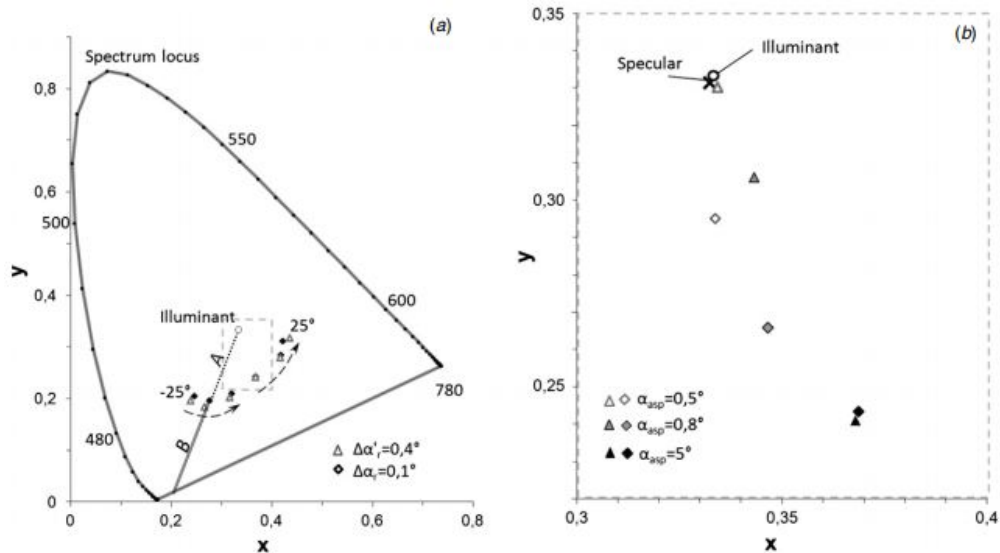
Obrázek 2.13: Detekční část gonio-spektrofotometru OptiMines [3]

Vliv velikosti vstupního úhlu detektoru na naměřená data je ukázán na obrázku 2.14, který znázorňuje redukci vstupního úhlu detektoru z $0,4^\circ$ na $0,1^\circ$ [3]. Čím menší je vstupní úhel detektoru, tím je zrcadlový pík vyšší a užší. Velikost vstupního úhlu detektoru je dána průměrem clony umístěné před detektorem. Hodnota maxima nižšího píku je čtyřikrát menší než hodnota maxima vyššího píku, což potvrzuje, že velký posun intenzity je lépe znázorněn při menším úhlovém přijetí detektoru. Na druhou stranu, zmenšení vstupního úhlu detektoru má za následek omezení při měření difúzních vzorků a při měření v úhlech vzdálených od zrcadlového, kde je zapotřebí, aby měl detektor vyšší citlivost a větší dynamický rozsah.



Obrázek 2.14: Měření BRDF interferenčního pigmentu pro $\lambda = 700 \text{ nm}$ s úhlovým přijetím detektoru $\Delta\alpha_r = 0,4^\circ$ (průměr clony $600 \mu\text{m}$ – nižší pík) a $\Delta\alpha_r = 0,1^\circ$ (průměr clony $200 \mu\text{m}$ – vyšší pík) [3]

Vliv velikosti vstupního úhlu detektoru se však příliš neprojevuje při měření v úhlech daleko od zrcadlového ($\alpha_{\text{zrcadlový}} = 0^\circ$), jak je znázorněno na obrázku 2.15 (a). Zatímco na obrázku 2.15 (b) jsou znázorněny hodnoty naměřené při úhlech blízkých zrcadlovému. Na tomto obrázku pozorujeme velký rozdíl hodnot naměřených při stejném úhlu, avšak s jiným úhlovým přijetím detektoru. Menší vstupní úhel detektoru umožňuje získat barevné informace velmi blízko zrcadlového směru.



Obrázek 2.15: Chromatický diagram CIEYxy pro 2° pozorovatele s vyznačenou změnou barvy interferenčního vzorku daleko od zrcadlového směru (a) a blíže k zrcadlovému směru (b – přiblížení v diagramu a) [3]

2.8.2 Polarizace

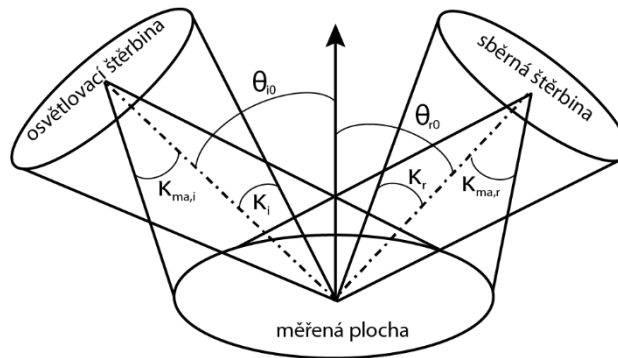
Při měření obousměrné distribuční funkce odrazu (BRDF) k charakterizaci typických materiálů se obvykle nebere v úvahu vliv polarizace světelného zdroje nebo závislost detektoru na polarizaci, i když mnoho studií prokázalo jejich dopad na chybu BRDF většiny materiálů, včetně standardů difúzní odrazivosti [23].

2.8.3 Konečná velikost štěrbin

Šíření světla určitým směrem nelze v praxi dokonale realizovat, protože fyzické otvory nejsou nekonečně malé, ale konečné [23]. Abychom správně pochopili dopad konečných otvorů na měření BRDF, byla teoreticky studována odchylka mezi skutečnými a teoretickými BRDF za použití reálných experimentálních podmínek s konečnými otvory pro povrchy s realistickými BRDF. Důsledkem použití konečné oblasti měření a konečných pevných úhlů ozařování a detekce je to, že BRDF je vyhodnocována jako vážený průměr ze sady párů směrů ozařování a detekce. Plocha ozařování, detekce a měřená plocha ovlivňují čtyři úhly (κ_i , κ_r , $\kappa_{\text{ma},i}$, $\kappa_{\text{ma},r}$) na obrázku 2.16. zatímco úhly κ_i a κ_r jsou konstantní pro jakoukoli dvojici směrů dopadu a detekce

(θ_{i0} a θ_{r0}), $\kappa_{ma,i}$ a $\kappa_{ma,r}$ mohou mít mírně odlišné hodnoty v závislosti na směrech osvětlení a detekce a vybraném bodě na obvodu měřicí plochy. Pokud se tento vážený průměr shoduje se skutečným BRDF se zanedbatelnou odchylkou, lze podmínky měření považovat za přiměřené.

V článku [23] bylo zjištěno, že použití konečných otvorů omezuje měření BRDF, když jeho distribuce má zakřivení v měřicím úhlovém rozsahu, přičemž kritičtější je, když je relativní variace distribuce vyšší. V tomto článku byl zohledněn pouze dopad způsobený geometrií. Ve zdroji [23] bylo zkoumáno, jak konečné intervaly (konečná oblast měření, konečné pevné osvětlovací a detekční úhly) ovlivňují měření BRDF. Relativní chyba způsobená konečnými intervaly, vypočtená jako relativní rozdíl mezi dvojkónickou integrací BRDF a skutečnou BRDF, se skládá ze dvou hlavních faktorů, které souvisejí s funkcí distribuce rozptylu povrchu a velikostí konečných intervalů. Kterýkoli z těchto faktorů může snížit na zanedbatelnou celkovou chybu, pokud je nastaven na dostatečně malou hodnotu. Velikost těchto prvků s plným úhlem musí být dostatečně malá, aby obsahovala pouze směry, ve kterých se zúčastněné veličiny (záře nebo obousměrná odrazivost) významně nemění.



Obrázek 2.16: Konečné pevné úhly ozařování a detekce a konečná plocha měření (adaptováno z [23])

2.8.4 Vliv úhlové šířky pásma a spektrální šířky pásma

V článku [4] byl hodnocen vliv úhlové šířky pásma a spektrální šířky pásma na chybu BRDF (95. percentil chyby BRDF) u vysoce goniochromatických interferenčních povlaků. V této práci bylo ověřeno, že trend výsledků je nezávislý na konkrétním vzorku. Z analýzy byla dána doporučení pro měření goniochromatických vzorků uvedené v tabulce 2.1 pro maximální hodnoty spektrální šířky pásma a úhlové šířky pásma, které musí měřicí přístroje mít, aby se zabránilo překročení indikovaných úrovní nejistoty v měření BRDF. Bylo zmíněno, že by měla být věnována pozornost vyvážení mezi spektrálními a úhlovými šířkami pásma, protože jejich dopad na měření není ekvivalentní.

Tabulka 2.1: Doporučené hodnoty spektrálních a úhlových šířek pásma pro měření spektrálního BRDF goniochromatických povlaků pro různé úrovně nejistoty [4]

Doporučené úhlové / spektrální šířky pásma	Relativní nejistota BRDF
$\leq 4^\circ/3 \text{ nm}$	<0,5 %
$\leq 5^\circ/7 \text{ nm}$	<1 %
$\leq 6^\circ/11 \text{ nm}$	<2 %
$\leq 6^\circ/17 \text{ nm}$	<3 %

2.9 Linearita

Absolutní kalibrace spektrometru není nutná, protože BRDF je vyjádřena jako poměr mezi dvěma měřeními (vzorku a reference) [7]. Je však nutné charakterizovat linearitu systému, což bylo provedeno pomocí paprsku odraženého děličem paprsků a paprskem, který prošel děličem paprsků. Zrcadla byla umístěna kolmo na každý paprsek za závěrku. Spektrometr byl umístěn za dělič paprsků. Měření bylo prováděno za střídavého otevírání a zavírání obou závěrek. Naměřeny byly následující hodnoty, L_r je záření, které bylo měřeno, když byla clona 2 zavřená, L_t je záření, které bylo měřeno, když byla clona 1 zavřená a L_{rt} je záření, které bylo měřeno, když byly obě clony 1 i 2 otevřené. Ve všech případech byl od naměřených hodnot záření odečten odraz od zavřených závěrek. Faktor linearity zprůměrovaný vlnovou délkou je přibližně 1,01 v celém zkoumaném rozsahu záření, takže korekci linearity lze považovat za konstantní. Tento výsledek znamená, že nelinearita je předvídatelná a opravitelná za pomoci matematických operací.

2.10 Vyhodnocení měření

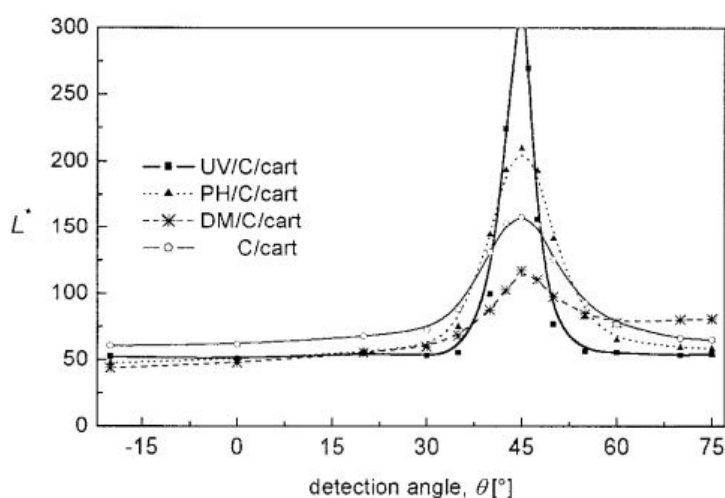
Ve zdroji [21] byl hodnocen vliv úhlu detekce na pozorovanou perleťovou složku a základní složku nátěru. Perleťová složka nátěru je pozorována blízko zrcadlového odrazu, například $15^\circ/0^\circ$. Barevná složka základního nátěru je pak pozorována především u geometrií vzdálených od zrcadlového odrazu, jako je $15^\circ/60^\circ$. U geometrií, kdy úhel osvětlení odpovídá středním úhlům, například 45° , se začíná projevovat interakce obou složek. Čirý nátěr odráží světlo zrcadlově, podobně jako zrcadlo. Perleťové interferenční pigmenty odrážejí zrcadlově pouze určitou část světla. Část, která se neodráží, prostupuje do další vrstvy, kde dochází k dalšímu zrcadlovému odrazu. Tento proces vede k rozdělení rozptylových úhlů blízko zrcadlové geometrie. Barva odražené perleťové interferenční složky je vidět na geometriích blízkých zrcadlové geometrii. Základní barevná vrstva odráží světlo difúzně ve všech úhlech a barva je pozorována v geometriích daleko od zrcadlové.

Reflexní faktor se vypočítá z poměru odraženého k dopadajícímu zářivému toku, vyděleného promítnutým plným úhlem a vynásobeného π [21]. Dopadající tok se měří se vzorkem umístěným mimo dráhu paprsku a detektorem umístěným tak, aby přijímal dopadající paprsek. Odražený zářivý tok se měří se vzorkem umístěným v dráze paprsku, vzorek a detektor jsou umístěny v požadované geometrii.

V článku [20] bylo zpracováno, jak lesk nebo rozptyl ovlivňují vzhled a barevné vnímání materiálu v poměrně širokém rozsahu pozorovacích úhlů. Následující čtyři odstavce čerpají ze zdroje [20].

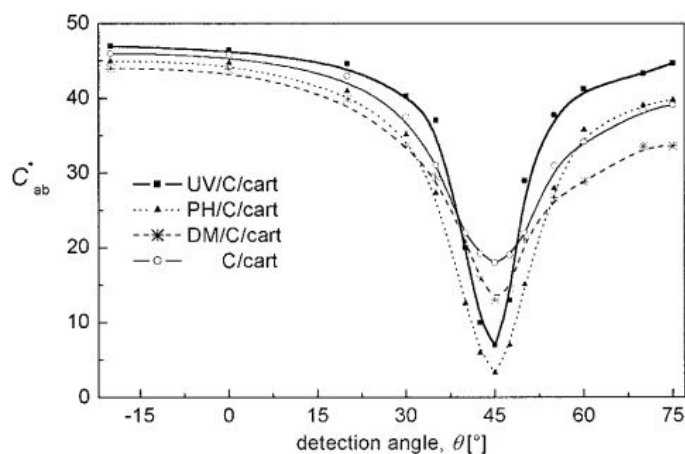
Nejprve byla naměřena reflexní spektra azurových vzorků. Vzorky byly připraveny nanesením azurové barvy na karton. První vzorek byl bez další úpravy, ostatní vzorky pak byly upraveny pomocí laku (UV lesklým lakem, lesklým tiskovým lakem a disperzním matným lakem). Z reflexních spekter vzorků a bílého standardu BaSO_4 byly vypočítány barevné souřadnice L^* , C^*_{ab} , h_{ab} pomocí dobře známých a běžných postupů v programu MATLAB. Výsledkem měření jsou pak obrázky 2.13–2.15 znázorňující vypočítané kolorimetrické souřadnice jako funkce detekčního úhlu [20].

Podle očekávání měrná světlost L^* vykazuje v závislosti na lesku rostoucí pík v oblasti zrcadlového úhlu (nejvyšší pro UV a nejnižší pro matný lak viz. obrázek 2.17). Maximální hodnota píku značně překračuje společný limit 100, což je způsobeno difuzním bílým standardem (s téměř nulovou složkou lesku) použitým při výpočtech barevných souřadnic. (Při použití lesklé referenční bílé by limit měrné světlosti 100 nemusel být překročen). Daleko od spekulárního úhlu vykazuje měrná světlost L^* stabilitu a nezávislost na použitém typu laku. Lehce vyšší hodnoty u neupraveného vzorku jsou způsobeny vyšším optickým rozptylem od difuzního povrchu [20].



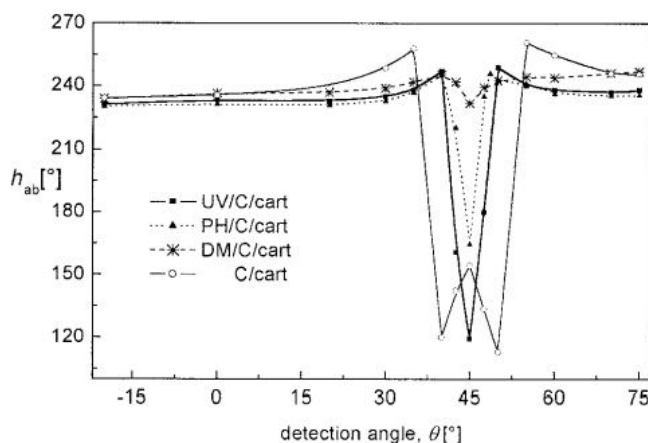
Obrázek 2.17: Závislost měrné světlosti na detekčním úhlu [20]

Zajímavější je podání chromy C_{ab}^* v úhlovém rozlišení (obrázek 2.18). Chroma výrazně klesá v zrcadlové oblasti v závislosti na lesku povrchu. U vzorku upraveného UV lakem dosahuje hodnota chromy v zrcadlovém úhlu téměř nuly, což je způsobeno přímým odrazem světla od vysoce lesklého povrchu, který převládá nad světlem rozptýleným barvou vrstvou. U úhlů pozorování vzdálených od zrcadlového úhlu je chroma UV lakovaného vzorku vyšší než u méně lesklých vzorků, tento jev je znám jako nárůst barevnosti při lakování. Chroma lesklých výtisků je skutečně vyšší v jakémkoli úhlu s výjimkou úzké oblasti zrcadlového úhlu (tiskový lak je výjimkou, pravděpodobně byl trochu zabarvený) [20].



Obrázek 2.18: Závislost chromy na detekčním úhlu [20]

Poslední hodnocenou souřadnicí je úhel barevného tónu h_{ab} . Nejmenší změny h_{ab} si můžeme všimnout u vzorku s matným lakem (obrázek 2.19), zatímco vzorky s vysoce lesklým lakem mají ostrý pík a neupravený vzorek má dvojitý pík. Píky značí nižší hodnotu úhlu barevného tónu při zrcadlovém odrazu, což znamená, že odstín azurové se posouvá směrem ke žluté. (Je to v souladu s barevným tónem žárovkového světelného zdroje, který pravděpodobně není zcela kompenzován normalizací proti $BaSO_4$ za těchto extrémních zrcadlových podmínek. [20])



Obrázek 2.19: Závislost odstínu na detekčním úhlu [20]

V článku [22] jsou z fotoaparátu získána data ve formátu RAW s hodnotami RGB. Při vyhodnocení pro daný bod se průměruje pět vertikálních pixelů od středu vzorku. Nastavení fotoaparátu bylo podobné při měření spektrálních citlivostí kamery a při měření vzorků. Tato data jsou příliš hustá, proto jsou pro srovnání použity informace zachycené na každém padesátém pixelu. Pro porovnání dat získaných z vlastního nastavení měření a gonio-spektrofotometrů je potřeba vypočítat reflexní faktor z měření dat RGB nebo naopak. Data RGB jsou převedena na trichromatické hodnoty X , Y , Z pomocí převodní matice (\hat{M}). Matice \hat{M} je odvozena od funkce citlivosti senzorů kamery měřené monochromátorem a funkcí trichromatických členitelů pro 2° pozorovatele. Výpočet trichromatických hodnot X , Y , Z pomocí matice \hat{M} je zatížen chybou. Proto je důležité při porovnávání s hodnotami získaných gonio-spektrofotometrem brát v úvahu tuto chybu měření. Dalším krokem byla interpolace dat naměřených gonio-spektrofotometrem, aby byla získána data odpovídající úhlům osvětlení a detekce vlastního nastavení měření. Porovnávány byly hodnoty jasu pro čtyři vzorky.

3 Praktická část

Praktická část této práce se zabývá sestavením měřicí aparatury a její kalibrací, vlastním měřením vzorků a vyhodnocením naměřených dat. Cílem této práce bylo zjistit, jaký vliv na naměřená data mají jednotlivé komponenty aparatury a jejich modifikace, dále jaký vliv mají různá nastavení v softwaru, pomocí kterého byla měřená data získávána. Jako reference byla použita data získaná na akademii věd ČR.

3.1 Vzorky

Jako vzorky byly využity materiály od firmy Merck. Tyto vzorky obsahují interferenční pigmenty. První vzorek obsahuje pigment z řady Colorstream® s názvem Pacific Lagoon a ze stejné řady ještě pigment Tropic Sunrise. Další vzorky obsahují pigmenty z řady Securalic®, konkrétně pigment Lilac-Green a Blue-Lilac. Poslední vzorek byl z řady Iriodin® Ultra Interference Pigments 7235 Ultra Green.

Colorstream® vícebarevné efektové pigmenty mění barvu s pozorovacím úhlem. Tyto pigmenty lze použít pro jemné nebo silné barevné efekty. Pigmenty Colorstream® zaručují neomezené možnosti designu s neustále se měnícími detaily, duhové barevné přechody, neočekávané změny, které upoutají pozornost a atraktivní barevné posuny, které jsou viditelné dokonce při tlumeném osvětlení. Jejich nosným materiálem je synteticky vyrobený oxid křemičitý SiO₂, na který jsou nanášeny oxidy kovů. Tenké a hladké destičky odrážející světlo vytváří mimořádně se měnící interferenční barvy [24].

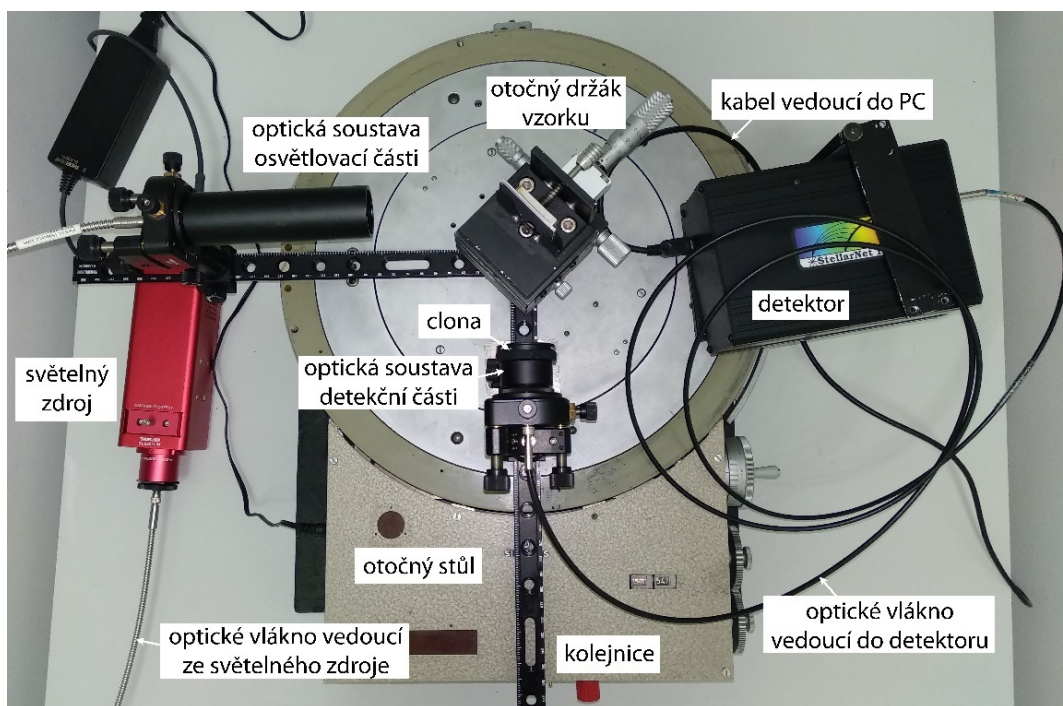
Řada pigmentů Securalic® je zaměřena na ochranu výrobků a značek před paděláním. Tyto pigmenty se uplatňují v módním průmyslu, kosmetice, léčivech nebo v automobilovém průmyslu. Tyto pigmenty není možné okopírovat, což chrání produkty před paděláním [25].

Pigmenty Iriodin® vytváří jedinečné perleťové efekty. Dají se využít pro vnitřní a vnější nátěry, tisk a plasty. Slídové perleťové pigmenty vytvářejí jedinečný lesk a barevné efekty, které se jinak vyskytují pouze v přírodě, od stříbrně bílých, červených a bronzově zbarvených zemitých tónů, až po efekt zlatého lesku. V závislosti na velikosti částic je možné dosáhnout buď jemného třpytu nebo výrazného lesku. Perleťové pigmenty Iriodin® v polygrafickém průmyslu umožňují vytvořit širokou škálu barevných efektů. Lze je zapracovat do tiskové barvy nebo použít při přetisku. Lze je nanést na materiály jako je papír, lepenka, keramické a skleněné povrchy, a dokonce i textilie. Iriodin® je zvláště vhodný pro použití v hlubotisku, flexotisku a sítotisku. V každém procesu platí, že čím hladší je povrch tiskového materiálu a čím silnější je vrstva, tím lepší jsou barevné a lesklé efekty [26].

Pro uschování a přenos vzorků byla pomocí řezacího plotteru Mimaki Cutter CFL 605 RT vytvořena krabička vybraná z katalogů v programu Artios Cad. Povrch krabičky byl polepen fólií potištěnou na tiskovém zařízení HP Latex 33.

3.2 Gonio-spektrofotometr

K hodnocení interferenčních pigmentů byl využit gonio-spektrofotometr. Toto zařízení bylo sestaveno na Katedře polygrafie a fotofyziky Univerzity Pardubice již dříve, pro účely prací zmíněných v odstavci 1.2. Byly ovšem provedeny jisté modifikace, které budou specifikovány níže. Stále platí, že toto zařízení sestává ze tří hlavních částí, osvětlovací a detekční části a držáku vzorku. Gonio-spektrofotometr byl vybrán pro svou schopnost charakterizovat vzorek v různých geometriích, jak je tomu u interferenčních vzorků zapotřebí. Při měření s pevnou geometrií by nebylo možné popsat úplné optické chování vzorku.



Obrázek 3.1: Gonio-spektrofotometr sestavený na KPF

3.2.1 Části gonio-spektrofotometru

Jednotlivé komponenty gonio-spektrofotometru byly připevněny ke stolku SIEMENS (obrázek 3.1). Tento stůl byl původně součástí rentgenového difraktometru, v posledních letech je ale využíván k sestavení právě gonio-spektrofotometru. Důvodem využití tohoto stolku je přítomnost prstence, který umožňuje rotaci kolem středu stolku. Ve středu stolku je umístěn držák vzorku. Tímto je možné nastavit úhel dopadu. Na okraj stolku byl pak nainstalován svítelný zdroj, který se během celého měření nacházel ve fixní poloze. Poslední částí gonio-

spektrofotometru je detektor, který je umístěn na pohyblivém prstenci, což mu umožňuje rotaci kolem vzorku nezávisle na úhlu dopadu a uskutečňovat tak měření pro různé geometrie.

Oproti dřívější sestavě byly k otočnému stolku připevněny kolejnice, což podstatně usnadnilo kalibraci a můžeme předpokládat, že i zpřesnilo měření. V předchozích pracích byly jednotlivé komponenty, jako optická soustava osvětlovací části nebo clona před detektorem, umístěny ke stolku jednotlivě pomocí držáků a šroubů. Nyní byly ke stolku připevněny kolejnice a teprve k nim byly upevňovány další komponenty, čímž se usnadnila manipulace. Kolejnice byly upevněny tak, aby se nacházely v jedné přímce, pokud se světelný zdroj a detektor právě nacházejí v poloze přímo naproti sobě.

3.2.1.1 Osvětlovací část

Osvětlovací část gonio-spektrofotometru se skládá ze světelného zdroje, optického vlákna a optické soustavy. Jejím úkolem je osvětlit vzorek. Ze světelného zdroje je světlo vedeno pomocí optického vlákna do optické soustavy, která má za úkol světlo kolimovat a zajistit, aby světelný svazek dopadající na vzorek byl co nejméně divergentní. Důležité je, aby paprsek dopadal na vzorek kolmo. Dále je důležité, aby osvětlovací soustava zajistila dostatečnou intenzitu světla, které na vzorek dopadá. Při nedostatečné intenzitě by detektor snímal pouze šum a žádný nebo minimální signál.

Byl použit světelný zdroj SLS201L(/M) od firmy Thorlabs [11]. Je to stabilizovaný světelný zdroj obsahující halogenovou žárovku s wolframovým vláknem s výkonem 9 W, s rozsahem vlnových délek 360–2600 nm. Nejvyšší intenzity záření je dosaženo při 1000 nm. Kromě žárovky obsahuje sférickou a asférickou čočku, díky kterým dochází k propojení záření s optickým vláknem. Dále tento světelný zdroj obsahuje denní filtr. Divergence paprsku je 8,2°, s použitím kolimátoru by měla být 2°. Průměr paprsku je 24 mm. Teplota chromatičnosti je 2796 K. Stabilita výstupního výkonu by měla být <0,05 %.

Optické vlákno vedlo světlo ze zdroje do optické soustavy, která byla tvořena asférickou kondenzační čočkou ACL2520U od firmy Thorlabs s ohniskovou vzdáleností 20 mm [27]. Čočka byla umístěna za výstup optického vlákna v tubusu o délce 102 mm.

Optická soustava byla pevně zafixována během celého měření.

3.2.1.2 Držák vzorku

Držák vzorku slouží k uchycení vzorku a byl umístěn uprostřed otočného stolku. Držák se nachází uprostřed sestavy gonio-spektrofotometru tak, aby na něj dopadalo světlo přicházející z osvětlovací soustavy, a aby světlo odražené od vzorku mohlo dále putovat k detektoru.

Držák vzorku byl nastaven pomocí šroubů a mikrošroubů. Pomocí šroubů bylo možné nastavit výšku a natočení držáku vzorku, další jemné posuny bylo možné provést pomocí mikrošroubů. Držák vzorku byl ve spodní části opatřen stupnicí, která umožňovala nastavení úhlu dopadu světla na vzorek. Tento úhel byl stanoven na 45° pro veškerá měření, držák vzorku byl tedy zafixován v této poloze po celou dobu měření.

Vzorek byl vždy upevňován mezi destičku a vymezovací plíšek, který měl půlkruhové vykrojení zajišťující přesné vymezení dopadu světla.

3.2.1.3 Detekční část

Detekční část se skládá ze štěrbin, detektoru, v tomto případě spektrofotometru, a počítače. Úkolem detekční části je zachytit světelný tok odražený od vzorku a následně jej zaznamenat. Světelný tok odražený od vzorku prochází štěrbinou, jejíž průměr musí být menší, než je stopa dopadající na vzorek. Pro některá měření byla za štěrbinu umístěna optika. Dále prochází signál pomocí optického vlákna s průměrem 0,6 mm do spektrofotometru, kde je zachycen a převeden do počítače, kde je pomocí softwaru SpectraWiz Shortcut od firmy StellarNet zobrazen a je možné ho dále zpracovat [28].

Pro toto měření byla nově použita štěrbin od firmy Thorlabs, kterou bylo možné upevnit přímo ke vstupu do optického vlákna [29]. Tato štěrbin je opatřena stupnicí, díky které je možné velice přesně nastavit průměr štěrbin. Průměr štěrbin definuje detekovanou plochu na povrchu vzorku. U většiny měření byl průměr štěrbin nastaven na 3 mm, dále bylo pozorováno, k jejím změnám dojde, pokud se průměr štěrbin zvětší nebo naopak zmenší.

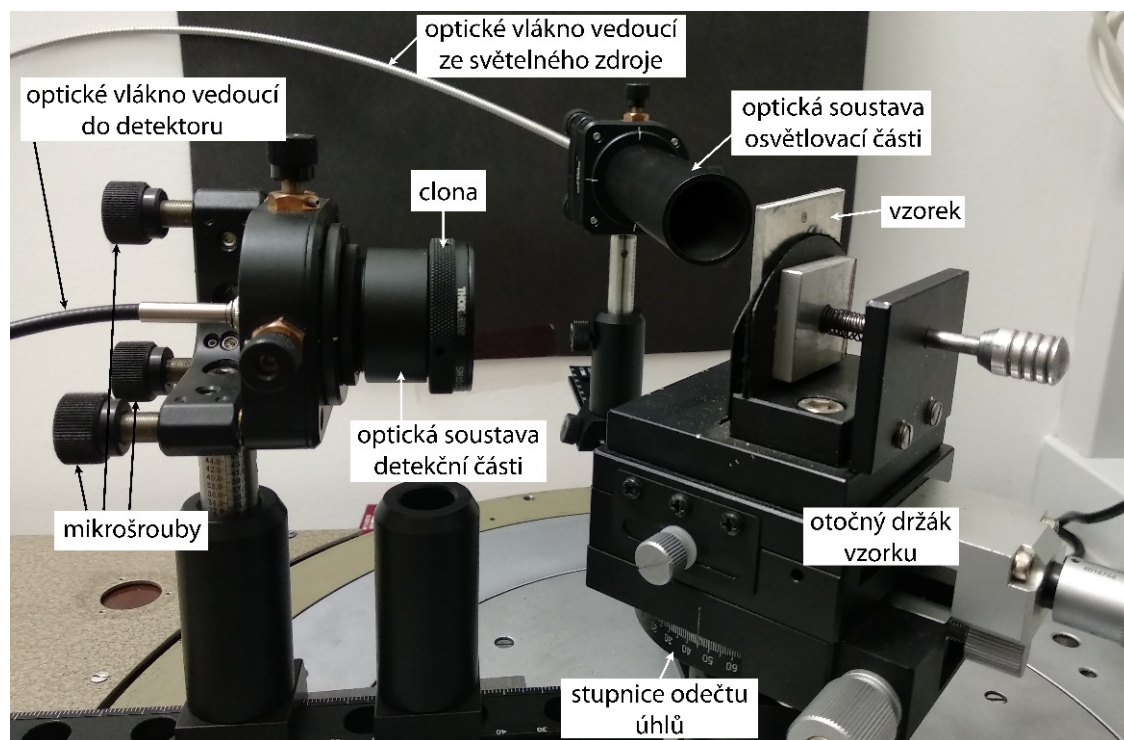
Hlavním článkem detekční části je detektor, jak bylo zmíněno výše, spektrofotometr. Pro toto měření byl použit spektrofotometr BLACK-Comet od firmy StellarNet [30]. Tento spektrofotometr měří v rozsahu vlnových délek 190–850 nm, je tedy vhodný pro využití v oblasti UV-VIS. V této práci byly snímány vlnové délky ve viditelné oblasti spektra, 380–740 nm. Tento spektrofotometr pracuje na principu konkávní optické mřížky.

Spektrofotometr byl propojen s počítačem, kde pomocí softwaru SpectraWiz Shortcut od firmy StellarNet docházelo k vykreslení závislosti zářivého toku na vlnové délce. Naměřená data byla uložena a dále zpracovávána v programu MS Excel. V programu SpectraWiz Shortcut byly nastaveny tyto tři parametry:

- *Detector integration time* (Integrační čas) – tento parametr ovlivňuje sílu snímaného signálu
- *Number of Scans to Average* (Počet spekter) – tento parametr určuje, z kolika spekter je výsledný signál průměrován (umožňuje regulovat šum snímaného signálu)

- *XTiming resolution control* – tento parametr ovlivňuje sílu a kvalitu snímaného signálu

Detektor byl jediným mobilním prvkem gonio-spektrofotometru. Během měření byla jeho poloha měněna z důvodu změny úhlu pozorování. Rozsah úhlů, pro které mohlo být měření prováděno, bylo dáno konstrukcí gonio-spektrofotometru. Z jedné strany limitovala pohyb detektoru optická soustava osvětlovací části, z druhé strany šrouby držáku vzorku (obr. 3.3). Proto byl rozsah úhlů pozorování $+5^\circ$ až -65° .



Obrázek 3.2: Detailní zobrazení drážky vzorku a optických soustav jak detekční, tak osvětlovací části

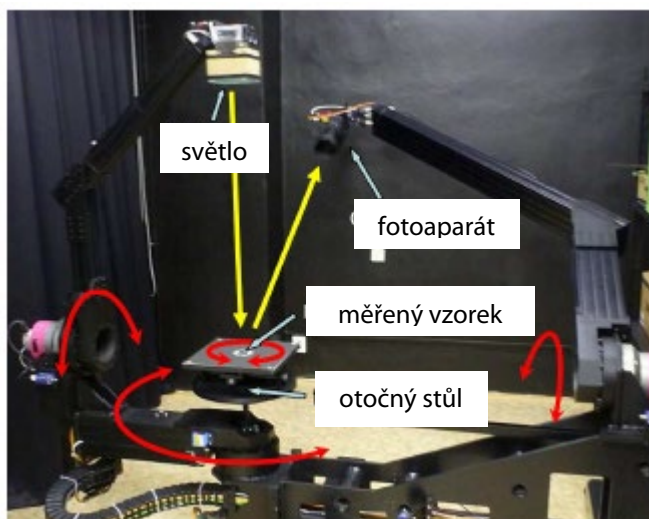
3.3 Popis měřicího zařízení AV ČR

Hodnoty naměřené pomocí gonio-spektrofotometru sestaveném na Katedře polygrafie a fotofyziky Univerzity Pardubice byly v kapitole 4.1 porovnány s hodnotami, které byly získány v Ústavu teorie informace a automatizace Akademie věd České republiky.

Mechanická konstrukce

Toto nejmodernější zařízení měří distribuci obousměrné odrazivosti a skládá se z měřeného vzorku, který je umístěn na rotujícím stolku, a dvou nezávisle ovládaných ramen. Jedno nese kameru (jedna osa) a druhé světlo (dvě osy), jak je znázorněno na obrázku 3.4. Tato sestava umožňuje flexibilní a adaptivní měření téměř libovolných kombinací osvětlení a směru pozorování. I když může dojít k okluzi pohledu kamery s ramenem osvětlení, lze ji analyticky

detekovat a ve většině případů je možné alternativní umístění. Úhlová přesnost polohování ramen osvětlení a kamery jsou $\pm 0,03^\circ$ [1] [31].



Obrázek 3.3: Gonio-reflektometr sestavený v Ústavu teorie informace a automatizace Akademie věd České republiky [31]

Světelný zdroj

Jako zdroj osvětlení bylo sestaveno pole jedenácti LED Cree XML, z nichž každá měla tok 280 lm při 0,7 A (maximální proud 3 A). LED byly vybrány pro svoji dlouhou životnost a stabilitu barev. Každá LED byla vybavena vlastní optikou vytvářející úzký a rovnoměrný paprsek světla. Rameno drží LED světelný zdroj 1,1 m od vzorku. Získání HDR je dosaženo adaptivními expozičními časy a proměnnou intenzitou osvětlení (proudem napájeným do LED diod), obojí je ovládáno dálkově v závislosti na dynamickém rozsahu měřeného vzorku [1] [31].

Zobrazovací zařízení

V této sestavě byla jako detektor použita průmyslová full-frame 16Mpix RGB kamera AVT Pike 1600C obsahující CCD snímač Kodak KAI-16000 (14 bitů/kanál) s rozlišením 4872×3248 pixelů a nejkratší dobu integrace 0,6 ms. Vzdálenost snímače od vzorku byla 2 m. Použitím dvou různých optik je možné dosáhnout dvou prostorových rozlišení: 350 DPI (tj. $73 \mu\text{m}/\text{pixel}$) a 1071 DPI (tj. $24 \mu\text{m}/\text{pixel}$), což omezilo maximální velikost vzorku na 140×140 mm a 44×44 mm [31].

Kalibrace systému a zpracování dat

Nulové počáteční polohy všech os byly nalezeny pomocí vodováhy, olovnice a průsečíku os zařízení. Na fotografiích byly detekovány a interpolovány vadné pixely fotoaparátu. Interní Bayerův vzor v surových datech byl interpolován do RGB pomocí lokální lineární interpolace. Vinětace optiky je odhadována z fotografie bílého archu a její nerovnoměrnost je

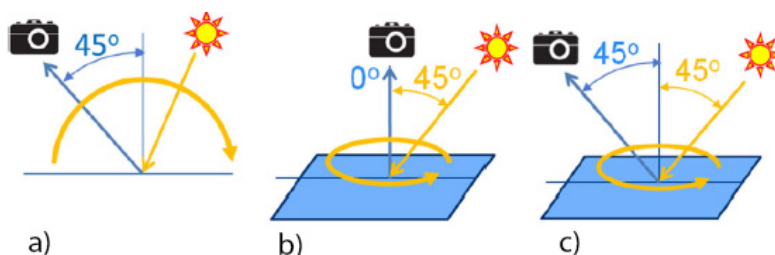
kompenzována. Kolorimetrická kalibrace matice 3×3 byla získána řešením sady lineárních rovnic vztahujících se ke známým a měřeným barevným vzorkům testovacího obrazce Xrite target v barvovém prostoru CIE XYZ [31].

Řízení systému

Celý proces měření je automaticky řízen jedním serverem. Řídící aplikace ukládá seznam požadovaných měřených pozic, které lze během měření adaptivně upravovat. Měřená data jsou uložena na disk o velikosti 20 TB a jsou přístupná prostřednictvím rychlé 10 Gbit optické LAN. Mechanické polohování, expozice a přenos dat 6561 měření trvalo obvykle přibližně 18 hodin [31].

Popis geometrie

Toto zařízení umožňuje provádět měření v rovině i mimo rovinu, na rozdíl od zařízení sestaveném na KPF. Pro měření v rovině se využívá geometrie zobrazená na obrázku 3.5 a), kdy je kamera fixována v polárním úhlu 45° od normály povrchu vzorku, zatímco polární úhly osvětlení pokryjí celou rovinu od 90° do -90° (záporné hodnoty mají polární úhly orientované k poloze kamery). Pro měření mimo rovinu je možné využít dvě geometrie. Při využití první, znázorněné na obrázku 3.5 b), je kamera zarovnána s normálou povrchu vzorku, zatímco světlo obíhá azimutálně kolem vzorku v polárním úhlu 45° od normály povrchu vzorku. Při využití druhé geometrie, znázorněné na obrázku 3.5 c), je kamera upevněna v polárním úhlu 45° od normály povrchu. Krok vzorkování měření pro všechny tři geometrie bývá jeden stupeň. Geometrie v rovině a druhá mimo rovinu mají slepý bod kolem 25° kvůli okluzi pohledu kamery s ramenem osvětlení [1].



Obrázek 3.4: Geometrie osvětlení a pozorování pro měření a) v rovině, b) a c) mimo rovinu [1]

3.4 Kalibrace gonio-spektrofotometru

Sestrojení gonio-spektrofotometru obnášelo zároveň i jeho kalibraci. Kalibrace byla provedena před vlastním měřením vzorků. Cílem kalibrace bylo zajistit, aby na detektor dopadal co možná nejsilnější signál s minimálním šumem. Docíleno toho mělo být pomocí mechanické kalibrace,

tedy mechanického nastavení jednotlivých prvků gonio-spektofotometru. Další nastavení pak byla provedena v softwaru SpectraWiz Shortcut.

3.4.1 Mechanická kalibrace

Před vlastní kalibrací bylo nutné nastavit otočný stolek do vodorovné polohy. Otočný stolek stojí na třech nožičkách, které jsou opatřeny šrouby. Tyto šrouby umožňují nastavit výšku nožiček. Pomocí nastavení výšky nožiček je možné otočný stolek nastavit do vodorovné polohy, což je nezbytné udržet po celou dobu měření.

Při mechanické kalibraci byly jako první nastaveny kolejnice, které byly připevněny k otočnému stolku a k nimž pak byly připevněny jednotlivé komponenty sestavy, jako držáky optických soustav osvětlovací a detekční části. Dále pak byla nastavována optická soustava osvětlovací části. Jako další byl nastaven detektor, respektive optická soustava detekční části včetně clony, která byla umístěna před vstup do optického vlákna vedoucího do detektoru. Jako poslední byl nastavován držák vzorku.

Jako první byly připevňovány kolejnice nesoucí další komponenty gonio-spektofotometru. Jedna kolejnice byla upevněna k nepohyblivému okraji otočného stolu. K ní pak byla připevněna optická soustava osvětlovací části. Druhá kolejnice byla upevněna k otočnému prstenci. K této kolejnici byla poté upevněna optická soustava detekční části, která musela být během měření mobilní. Důležité bylo kolejnice připevnit tak, aby se nacházely v jedné přímce, která prochází středem otočného stolku. Kolejnice nesoucí detekční soustavu se nacházela v poloze 0° vzhledem ke kolejnici nesoucí optickou soustavu osvětlovací části. Uprostřed otočného stolku se nachází držák, který slouží k připevnění držáku vzorku. Tento držák je součástí otočného stolku a nelze jej sundat. Proto bylo nastavení kolejnic do jedné přímky poměrně obtížné a provedeno tak bylo na základě odhadu. Jakmile byly kolejnice pevně nainstalovány, mohlo se přejít k uchycení dalších částí gonio-spektofotometru.

Jako další byla nastavována optická soustava osvětlovací části. Optická soustava byla připevněna k držáku, do kterého vedlo optické vlákno ze světelného zdroje. Tento držák byl upevněn pomocí šroubů ke kolejnici. Na kolejnici byla nastavena vzdálenost od středu optické soustavy gonio-spektofotometru. Pomocí šroubu držáku pak byla nastavena výška. Bylo důležité dát pozor na to, aby veškeré prvky sestavy mohly být nastaveny do stejné výšky, protože například držák vzorku měl celkem omezené možnosti nastavování do výšky. Kromě výšky bylo pomocí šroubu držáku nastaveno také natočení optické soustavy. Důležité bylo, aby optická soustava tvořená čočkou směřovala rovnoběžně s kolejnicí. Jakmile bylo hotové nastavení pomocí šroubu držáku, pokračovalo se v nastavování pomocí mikrošroubů. Pomocí

vodováhy a mikrošroubů byla optická soustava nastavena do vodorovné polohy. Toto nastavení zajišťuje, že na vzorek dopadá světelný tok rovnoběžně a vzorek je v celé ploše osvětlen stejnou intenzitou světelného toku.

Jako další byla nastavována detekční část. Opět byl nastavován držák, ze kterého vedlo optické vlákno do detektoru. K tomuto držáku byla připevněna clona. Pro některá měření byla k držáku připevněna nejprve optická soustava a teprve až na konec optické soustavy byla upevněna clona. Tento držák byl upevněn pomocí šroubů ke kolejnici. Na kolejnici byla nastavena vzdálenost od středu optické soustavy gonio-spektrofotometru. Poté byla nastavena výška držáku pomocí šroubu. Při tomto nastavování byl na clonu promítnut obraz světelného toku. Držák byl nastaven do takové výšky, aby se clona nacházela uprostřed obrazu světelného toku. Poté bylo nastaveno natočení optické soustavy. Prvotní nastavení bylo provedeno tak, aby měl obraz světelného toku promítnutý na clonu kruhový tvar. Další nastavení pak bylo provedeno pomocí softwaru SpectraWiz Shortcut. V tomto programu byla sledována změna intenzity v závislosti na nastavení výšky a natočení clony, resp. optické soustavy. Držák byl upevněn v poloze, ve které na detektor dopadal signál s nejvyšší intenzitou.

Jako poslední byl nastaven držák vzorku. Držák vzorku byl nastaven podle dvou již dříve nastavených částí, jak podle optické soustavy osvětlovací části, tak podle detektoru. Držák byl nastaven do polohy 0° . Poté byla nastaveno jeho výška tak, aby světelný tok dopadal do prostoru, který udával vymežovací plíšek. Pro přesnější nastavení držáku vzorku vzhledem k osvětlovací části bylo použito zrcátko. Zrcátko bylo vloženo do držáku vzorku. Držák vzorku byl nastaven tak, aby veškerý světelný tok dopadající na zrcátko, byl odražen zpět do optické soustavy. To znamená, že se optická soustava nacházela ve středu obrazu odraženého světelného toku od zrcátka. Dalším krokem bylo natáčení držáku vzorku do různých úhlů. V různých úhlech bylo zjišťováno, zda světelný tok dopadá stále do středu vzorku. Docíleno toho bylo pomocí mikrošroubů.

Posledním krokem mechanické kalibrace byla kontrola kompatibility všech tří částí. Do držáku vzorku bylo opět vloženo zrcátko. Držák vzorku byl nastaven do různých úhlů. Pomocí pohybu detektoru bylo zjišťováno, zda je při spekulárním odrazu v programu SpectraWiz Shortcut zaznamenaná maximální intenzita. Tímto byla ověřena správná kalibrace gonio-spektrofotometru.

Mechanická kalibrace je prováděna na základě citu a odhadu, protože jednotlivé komponenty aparatury neobsahují žádné stupnice (pouze otočný držák vzorku obsahuje stupnici) nebo jiné prvky, kterými by bylo možné se řídit. Je velice pravděpodobné, že každý uživatel by při kalibraci zařízení nastavil trochu jinak. Při utahování šroubů je nutné počítat

s tím, že vlivem dotažení dojde k posunutí prvku. Během měření je velice důležité pohybovat se kolem aparatury opatrně, protože jen malé zavadění o kteroukoli část aparatury znamená její posunutí a opětovnou kalibraci. Přesto že jsou prvky upevněny pomocí šroubů, není jejich uchycení příliš pevné. Můžeme tedy říci, že mechanická kalibrace gonio-spektrofotometru je poměrně náročná jak na provedení, tak na udržení během celého procesu měření.

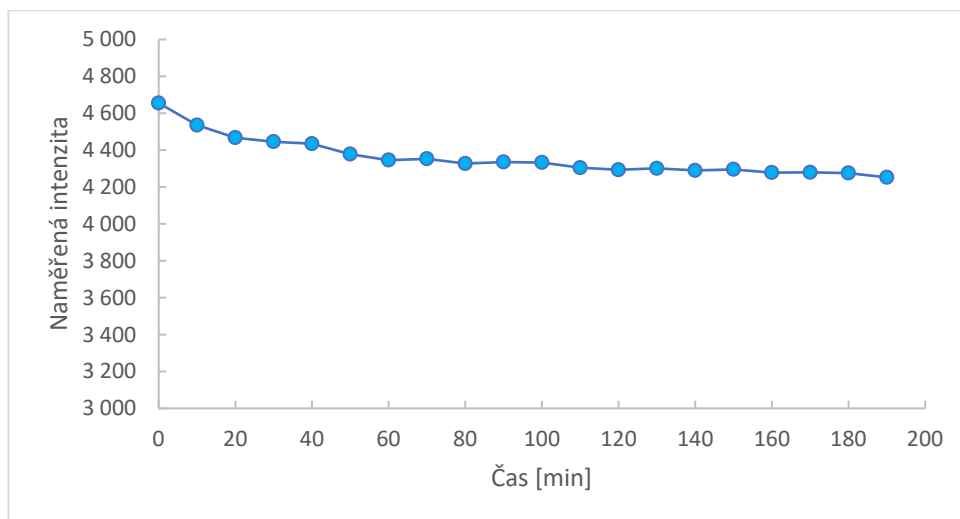
3.4.2 Nastavení parametrů v programu SpectraWiz Shortcut

Nastavení parametrů v programu SpectraWiz Shortcut probíhalo pro každý vzorek zvlášť. Záleželo na samotném pigmentu, tak i na barvě podkladu. Jednotlivé vzorky byly vloženy do připraveného nakalibrovaného gonio-spektrofotometru. U každého vzorku byla pozorována intenzita signálu dopadajícího na detektor. Parametry v programu SpectraWiz Shortcut byly nastaveny tak, aby byla získána co největší intenzita signálu. V programu SpectraWiz Shortcut byly nastaveny tyto parametry:

- Integrační čas (Detector integration time)
 - Tento parametr byl nastaven pro každý vzorek zvlášť tak, aby bylo dosaženo co nejvyšší intenzity signálu.
- Počet spekter (Number of Scans to Average)
 - Tento parametr určuje, z kolika spekter je výsledný signál zprůměrován. Tento parametr byl nastaven na hodnotu 10 pro veškeré vzorky.
- XTiming resolution control
 - Tento parametr udává sílu a kvalitu signálu. Byl nastaven na hodnotu 3 high pro veškeré vzorky.

3.4.3 Stálost světelného zdroje

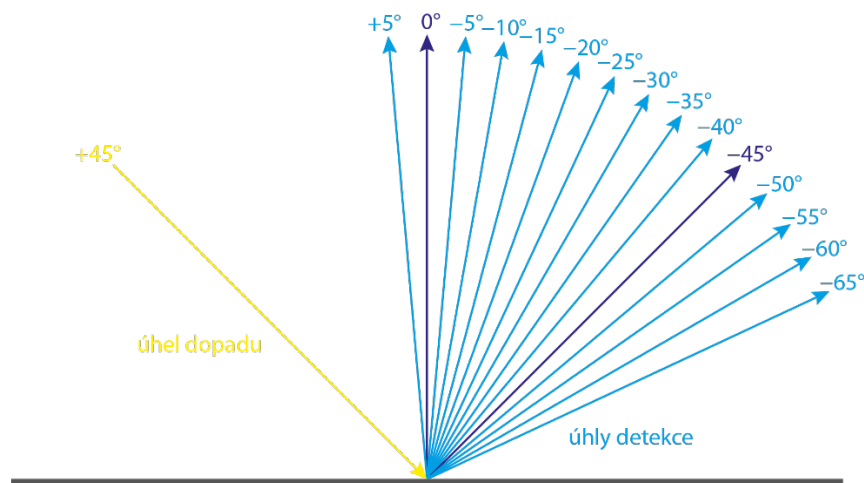
Před vlastním měřením vzorků byla proměřena stabilita světelného zdroje. Měření bylo provedeno pomocí Spectralonu. Úhel dopadu světla byl nastaven na 45° a úhel detekce na -45° . Měření probíhalo pro vlnovou délku 560 nm, což je lokální maximum ve všech měřených časech. Měření probíhalo po dobu 190 minut. Měření potvrdilo, že intenzita zdroje s časem klesá, jak je vidět na obrázku 3.6. Nejvýrazněji intenzita klesala během první hodiny od zapnutí. Proto byl zdroj zapnut vždy hodinu před samotným měřením.



Obrázek 3.5: Závislost intenzity světelného zdroje gonio-spektrofotometru na čase

3.5 Měření vzorků

Veškeré vzorky byly měřeny pro úhel dopadu světla $\theta = 45^\circ$. Úhel odrazu byl dán konstrukčními možnostmi gonio-spektrofotometru, proto byl zvolen rozsah 5° až -65° . Měření bylo prováděno s krokem 5° (obrázek 3.7).



Obrázek 3.6: Schéma geometrie měření, úhel dopadu $+45^\circ$ a úhly detekce $+5^\circ$ až -65°

V programu SpectraWiz Shortcut byl parametr *Detector integration time* nastaven tak, aby bylo dosaženo maximální hodnoty, kterou je detektor schopen snímat, což je přibližně 60000 counts (velikost zářivého toku). Čemuž odpovídaly nízké hodnoty tohoto parametru okolo spekulárního odrazu, rozsah v závislosti na typu vzorku mezi 100 a 200. Se vzdáleností od spekulárního odrazu klesala intenzita záření dopadajícího na detektor, a proto bylo zapotřebí zvyšovat integrační čas. Maximální hodnota integračního času byla 1000. Další parametr *Number of Scans to Average* byl nastaven na hodnotu 10 a *XTiming resolution control* na 3 high.

3.5.1 Zpracování naměřených dat

Kromě samotných vzorků byl proměřen i bílý difúzní standard Spectralon. Spectralon byl využit k získání referenčních hodnot. Spectralon byl proměřen vždy před a po každém vzorku. Naměřené hodnoty zářivého toku, pro vzorky i Spectralon, byly z programu SpectraWiz Shortcut importovány do MS Excel, kde byly dále zpracovávány. Nejprve bylo nutné pomocí interpolace (rovnice 10) dopočítat hodnoty bílého standardu pro aktuální časy, ve kterých byly měřeny vzorky.

$$f(x) = f_0 + \frac{f_1 - f_0}{x_1 - x_0} \cdot (x - x_0) \quad (10)$$

Obecná rovnice pro interpolaci byla upravena pro výpočet aktuálního zářivého toku (rovnice 11). Tok Φ odražený od bílého standardu v čase t , kdy byl změřen vlastní barevný vzorek, se vypočítá podle rovnice:

$$\Phi(t) = \Phi_0 + \frac{\Phi_1 - \Phi_0}{t_1 - t_0} \cdot (t - t_0), \quad (11)$$

kde Φ_0 je hodnota toku odraženého od Spectralonu před měřením vzorku, Φ_1 je hodnota toku odraženého od Spectralonu po měření vlastního vzorku, t_0 je čas, při kterém byla změřena hodnota Φ_0 a t_1 je čas, při kterém byla změřena hodnota Φ_1 .

Dalším krokem zpracování dat byl výpočet reflektance R (rovnice 12). Reflektance byla vypočítána pomocí kombinace rovnic (5) a (8). Reflektance byla vypočítána pro každý úhel odrazu.

$$R = \frac{\Phi}{\Phi_{ref} \cdot \pi} \quad (12)$$

Φ značí tok odražený od vzorku a Φ_{ref} značí tok odražený od Spectralonu dopočítaný pomocí interpolace.

3.5.1.1 Hodnoty CIE $L^*a^*b^*$ a jejich stanovení

Vzorky byly vyhodnocovány pomocí barvových souřadnic CIE $L^*a^*b^*$. Pro výpočet těchto souřadnic bylo nutné nejprve získat trichromatické hodnoty X , Y a Z , která se vypočítají podle následujících rovnic [14]:

$$X = k \sum_{\lambda=380}^{\lambda=740} M_e(\lambda) R(\lambda) \bar{x}(\lambda) \quad (13)$$

$$Y = k \sum_{\lambda=380}^{\lambda=740} M_e(\lambda) R(\lambda) \bar{y}(\lambda) \quad (14)$$

$$Z = k \sum_{\lambda=380}^{\lambda=740} M_e(\lambda)R(\lambda)\bar{z}(\lambda) \quad (15)$$

$$k = \frac{100}{\int_{\lambda} M_e(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda} \quad (16)$$

$M_e(\lambda)$ značí spektrální intenzitu vyzařování světelného zdroje, $R(\lambda)$ značí spektrální odrazivost, reflektanci, někdy označovanou jako koeficient odrazu povrchu vzorku a $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ a $\bar{z}(\lambda)$ značí trichromatické členitele pro 2° nebo 10° standardního pozorovatele. Konstanta k neboli korekční faktor zajišťuje, že se hodnota Y rovná stu (rovnice 16). Pro účely této práce byl použit světelný zdroj D50, hodnoty reflektance byly vypočítány podle rovnice 12 zmíněné výše a použity byly trichromatické funkce pro 2° pozorovatele.

Dále byly vypočítány souřadnice a^* a b^* barvového prostoru CIELAB.

$$a^* = 500 \cdot \left[\left(\frac{X}{X_0} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} \right] \quad (17)$$

$$b^* = 200 \cdot \left[\left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{1/3} \right] \quad (18)$$

Jestliže platí, že jeden z poměrů:

$$\frac{Y}{Y_0} : \frac{X}{X_0} : \frac{Z}{Z_0} \text{ obecně } F < 0,008856.$$

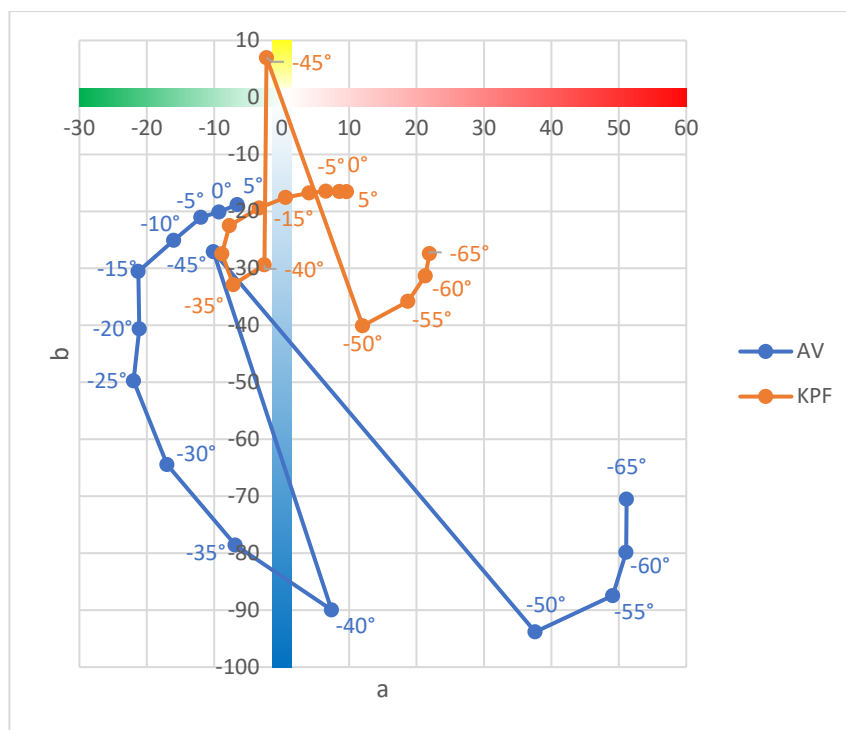
Pak je $F^{1/3}$ nahrazeno výrazem $7,787 F + \frac{16}{116}$.

4 Výsledky

V této kapitole jsou popsány výsledky měření interferenčních vzorků pomocí gonio-spektrofotometru. Měření bylo prováděno pro rozsah vlnových délek 380–740 nm. V první části jsou vzájemně porovnaná měření provedená na KPF UPCE a AV ČR, kde byly proměřeny ty samé vzorky. Další části se zabývají vlivem nastavení jednotlivých komponentů nebo různými nastaveními v programu SpectraWiz Shortcut.

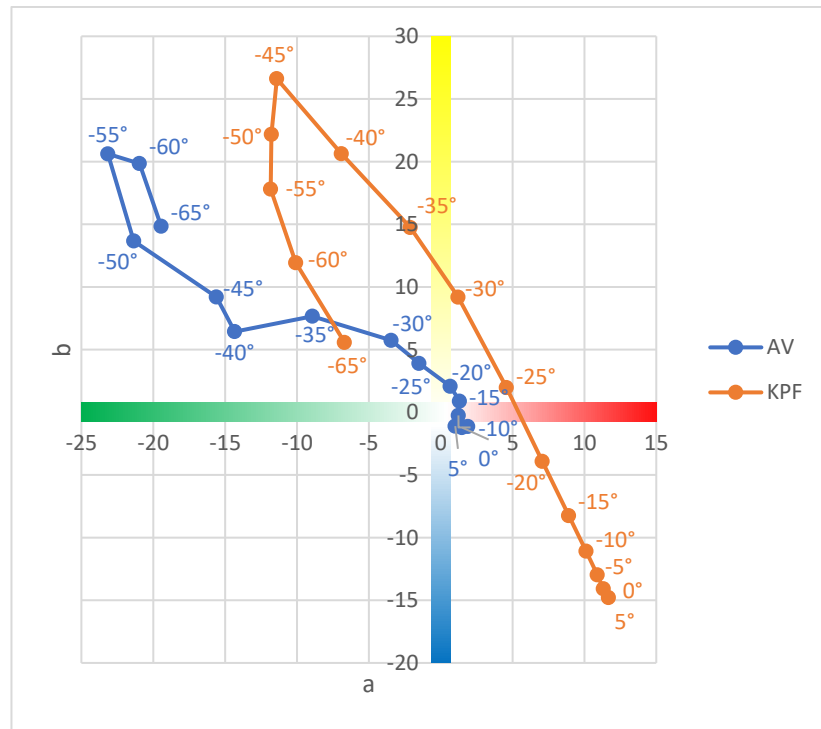
4.1 Porovnání měření provedených na KPF UPCE a AV ČR

Při pozorování pigmentu Pacific Lagoon pouhým okem pozorujeme změnu barvy od tyrkysové při kolmém pohledu, přes modrou až k fialové při šikmém pohledu. Tento popis se shoduje s podklady od výrobce. Na obrázku 4.1 vidíme, že ani na jednom zařízení nebyla příliš výrazně zaznamenána zelená oblast. Gonio-spektrofotometr sestavený na KPF zaznamenal barevnost při úhlech $\theta = 60^\circ$ a 65° jako světle fialovou, zařízení AV spíše jako tmavě modrou. Náhlá změna barevnosti při spekulárním úhlu ($\theta = 45^\circ$) je způsobena leskem, který při této geometrii silně převažuje nad barevnou složkou. Tvary obou závislostí můžeme považovat za podobné, je však nutno říci, že hodnoty naměřené na KPF nemají takový rozsah a jsou blíže neutrálním tónům.



Obrázek 4.1: Rozložení hodnot pigmentu Pacific Lagoon v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF a AV pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -65°

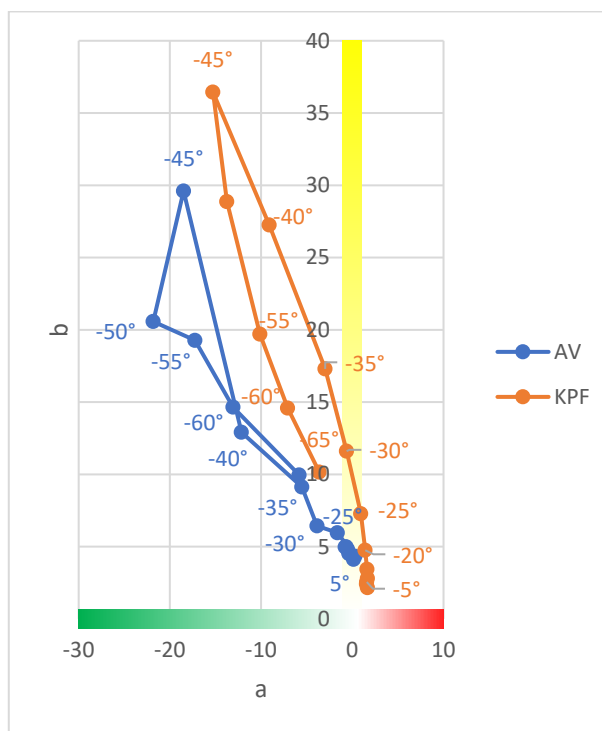
Při pozorování pigmentu Lilac-Green na černém podkladu pouhým okem pozorujeme změnu barvy od fialové při kolmém pohledu k zelené při šikmém pohledu. Fialovou oblast (obrázek 4.2) pro úhly $\theta = -5^\circ$ až 20° lépe zachycuje detektor KPF, naopak ale nezachycuje zelenou oblast tak, jako zařízení na AV.



Obrázek 4.2: Rozložení hodnot pigmentu Securalic® Lilac-Green na černém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF a AV pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -65°

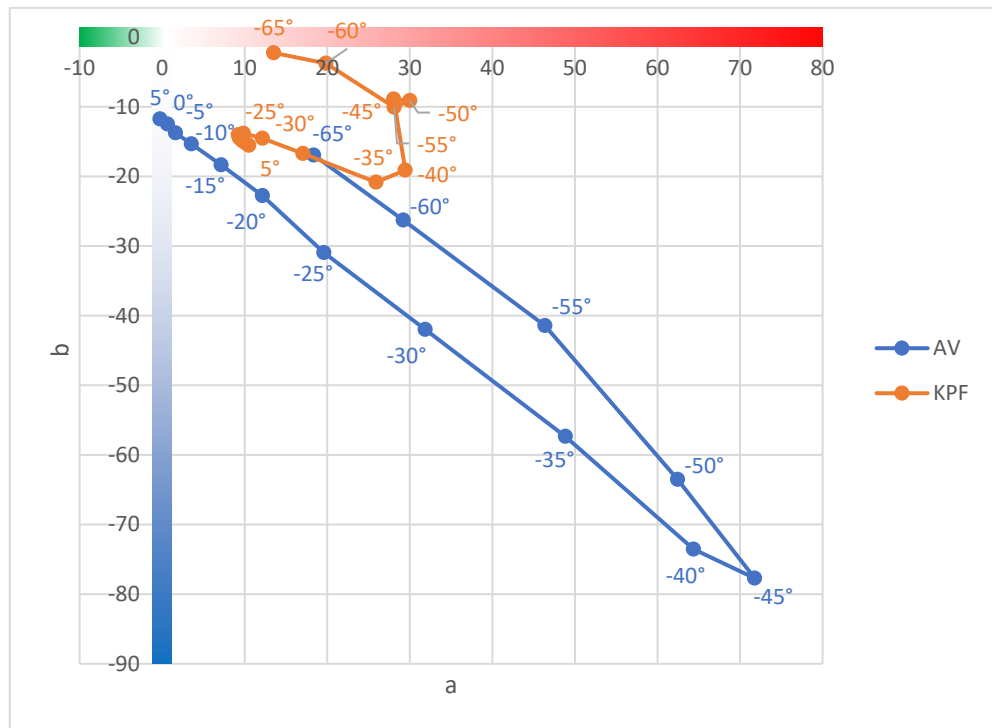
Při pozorování pigmentu Lilac-Green na bílém podkladu pouhým okem pozorujeme změnu barvy od bílé při kolmém pohledu přes fialovou k zelené při šikmém pohledu. Ani jedno zařízení ale fialovou oblast nezachytilo (obrázek 4.3), protože okem je pozorována při spekulárním úhlu, při kterém zařízení zaznamenají pouze lesk, nikoli barevnou složku.

Při porovnání tohoto pigmentu na černém a bílém podkladu (viz. obr. 4.4) vidíme, že na bílém podkladu došlo k posunu více do žluté oblasti.



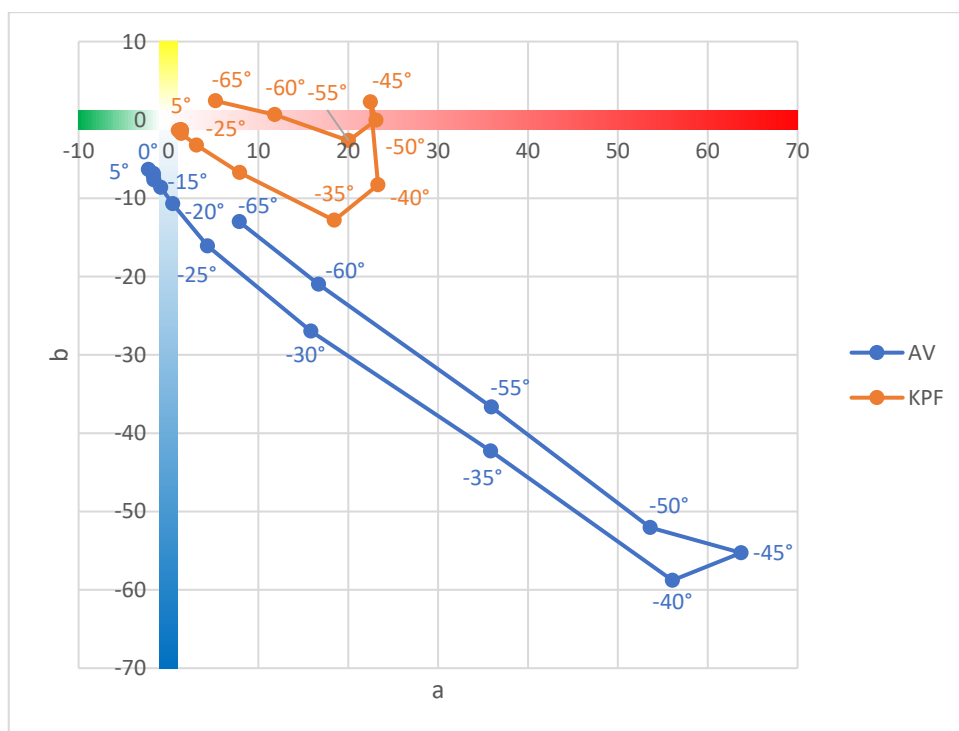
Obrázek 4.3: Rozložení hodnot pigmentu Securalic® Lilac-Green na bílém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF a AV pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -65°

Při pozorování pigmentu Blue-Lilac na černém podkladu pouhým okem pozorujeme změnu barvy od modré při kolmém pohledu k fialové při šikmém pohledu. Z obrázku 4.4 je zřejmé, že gonio-spektrofotometr KPF zachycuje modrou oblast nedostatečně.



Obrázek 4.4: Rozložení hodnot pigmentu Securalic® Blue-Lilac na černém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF a AV pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -65°

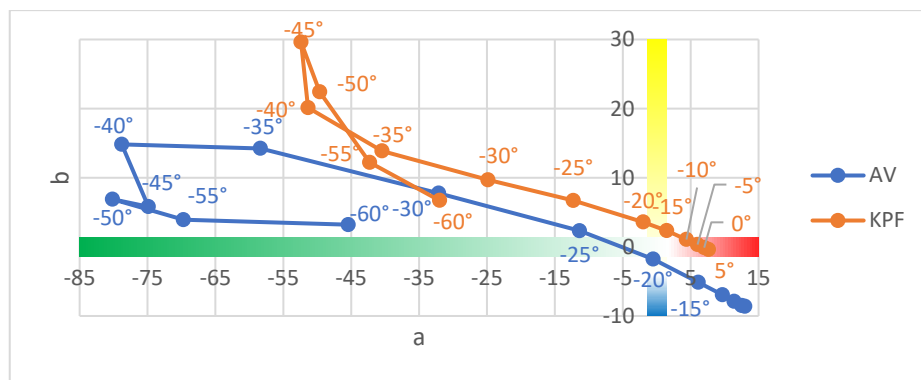
Při pozorování pigmentu Blue-Lilac na bílém podkladu (obr. 4.5) pouhým okem pozorujeme změnu barvy od bílé při kolmém pohledu přes modrou k fialové při šikmém pohledu. Na rozdíl od pigmentu Lilac-Green u pigmentu Blue-Lilac nepozorujeme výrazný barevný posun v závislosti na barvě podkladu (viz. obr. 4.2 a 4.3 versus obr. 4.4 a 4.5).



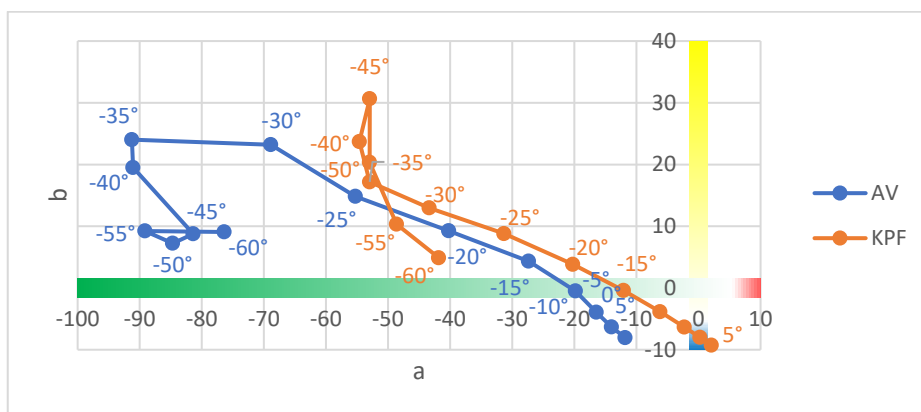
Obrázek 4.5: Rozložení hodnot pigmentu Securalic® Blue-Lilac na bílém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF a AV pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -65°

Při pozorování pigmentu Ultra Green pouhým okem pozorujeme změnu barvy v závislosti na barvě podkladu od bílé pro bílou barvu podkladu, zelené pro černou barvu podkladu, světle modré pro modrou barvu podkladu a oranžové pro červenou barvu podkladu k zelené při šikmém pohledu.

Z obrázků 4.6 a 4.7 je patrné, že gonio-spektrofotometr KPF není schopen dostatečně zaznamenat rozsah hodnot v zelené oblasti. Gonio-spektrofotometr KPF zaznamenal rozsah hodnot na černém i bílém podkladu velice podobně. Zařízení AV zaznamenalo na černém podkladu posun ke žluté oblasti oproti hodnotám získaným na bílém podkladu. Na bílém podkladu je pozorován přechod od zelené k neutrálním tónům, na černém podkladu je pozorován přechod od zelené k modrým tónům.

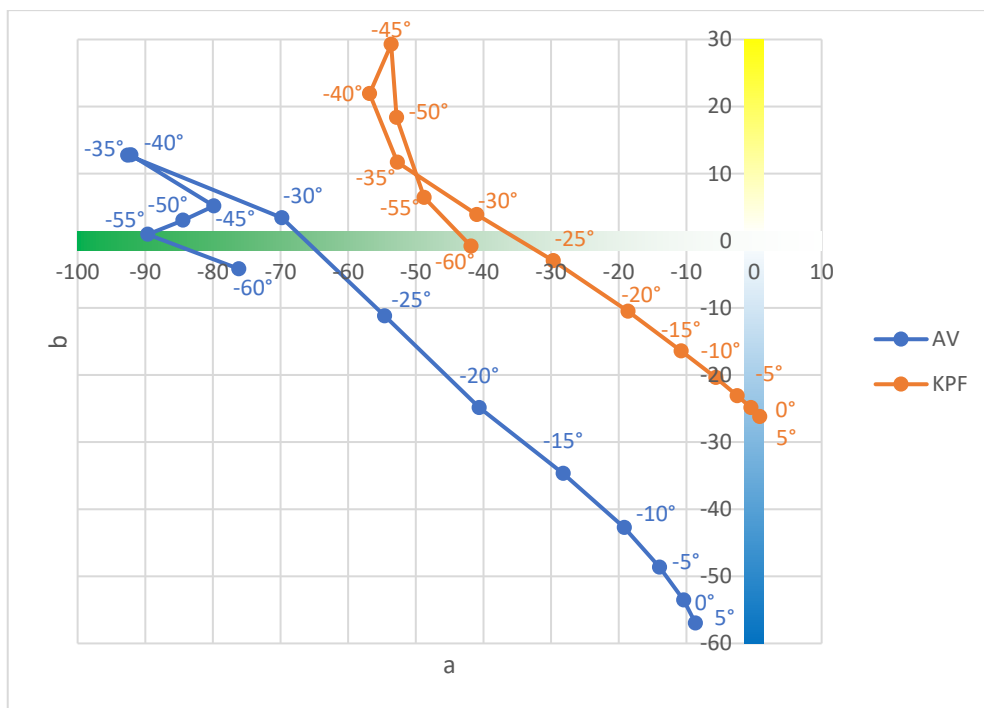


Obrázek 4.6: Rozložení hodnot pigmentu Ultra Green na bílém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF a AV pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -60°



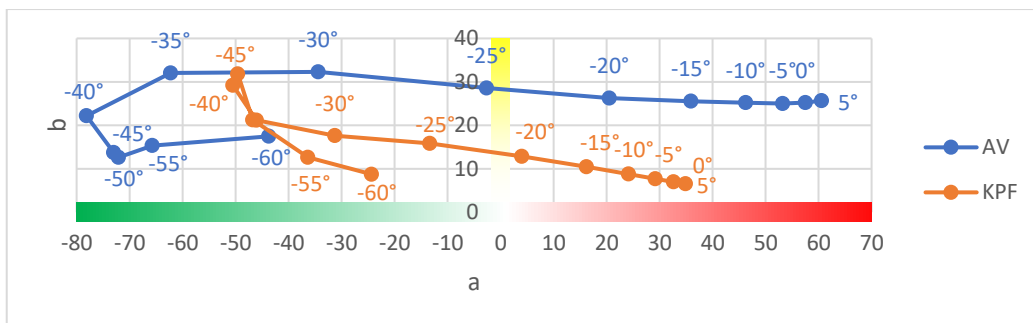
Obrázek 4.7: Rozložení hodnot pigmentu Ultra Green na černém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF a AV pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -60°

Na modrém podkladu (obr. 4.8) pozorujeme barevný přechod od zelené k modré. Hodnoty získané gonio-spektrofotometrem KPF jsou posunuty více ke středu barvového prostoru, tedy k neutrálním tónům, což potvrzuje již zmíněné tvrzení, že tento přístroj není schopen dostatečně zaznamenat hodnoty v modré a zelené oblasti.



Obrázek 4.8: Rozložení hodnot pigmentu Ultra Green na modrém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF a AV pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -60°

Na červeném podkladu (obr. 4.9) pozorujeme barevný přechod od zelené k červené.



Obrázek 4.9: Rozložení hodnot pigmentu Ultra Green na červeném podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF a AV pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -60°

Obecně můžeme říci, že gonio-spektrofotometr na KPF lépe zaznamenává odstíny purpurové. Naopak zařízení AV lépe zachycuje odstíny zelené a modré. Důvodem, proč gonio-spektrofotometr na KPF nezobrazuje odstíny modré v takovém rozsahu, je pravděpodobně nízká intenzita vyzařování světelného zdroje Thorlabs v krátkovlnné oblasti.

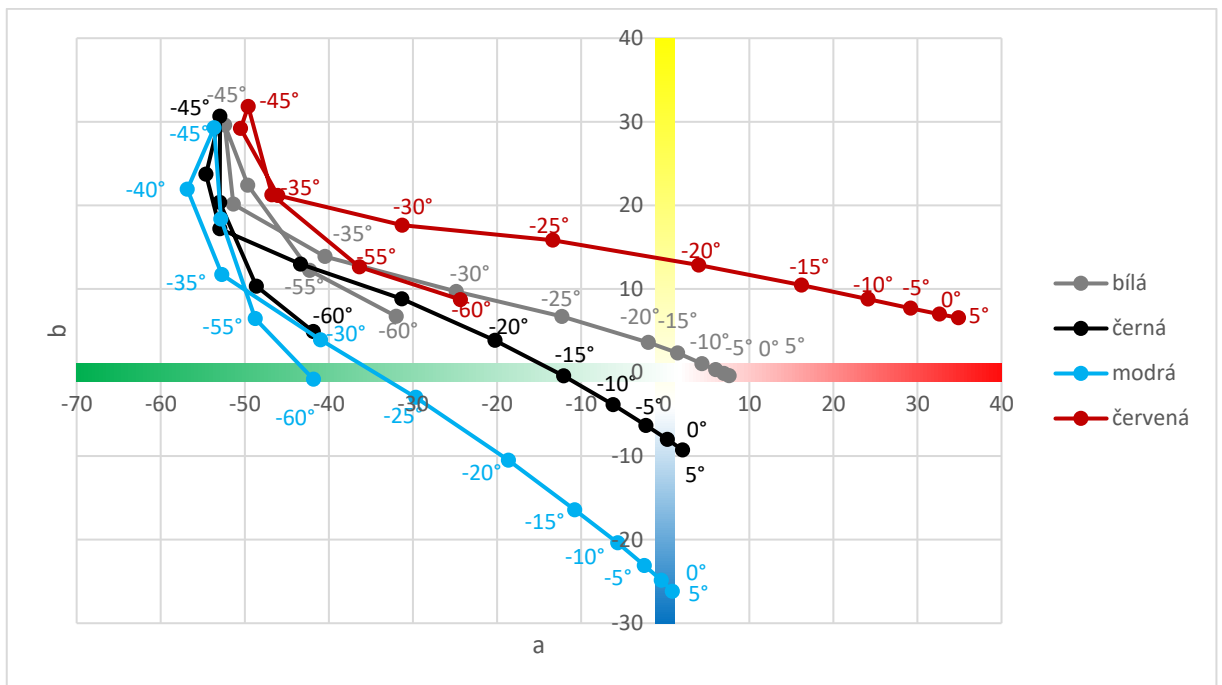
4.2 Vliv barvy podkladu na barevnost

Toto měření bylo provedeno pro pigment Ultra Green z řady Ultra Interference Pigments od firmy Merck. Pigment Ultra Green byl nanesen na bílý, černý, modrý a červený podklad.

Tvar závislosti je velice podobný pro všechny čtyři barvy podkladu. Vidíme, že body pro spekulární úhel, tedy úhel detekce -45° , se nacházejí ve stejné oblasti barvového prostoru.

Je to způsobeno tím, že při spekulárním úhlu je kromě lesku pozorována barva interferenčního pigmentu. Všechny čtyři vzorky se nám tedy jeví jako zelené, pouze s odlišnou světlostí, což popisuje parametr L^* měrná světlost. Nejsvětější je vzorek natištěný na bílém podkladu, má nejvyšší hodnotu měrné světlosti. Se snižující se měrnou světlostí pak přichází vzorek na modrém a černém podkladu. Jako nejtmavší se jeví vzorek na červeném podkladu. Při úhlu detekce -45° můžeme pozorovat i vliv barvy podkladu, která ovšem způsobuje minimální posun v barvovém prostoru. Hodnoty pro vzorek na černém a bílém podkladu se nacházejí v těsné blízkosti. Hodnota vzorku na modrém podkladu je lehce posunuta směrem k modré oblasti barvového prostoru, naopak hodnota vzorku na červeném podkladu je lehce posunuta směrem k červené oblasti barvového prostoru. Tyto změny barevnosti jsou ale zanedbatelné vzhledem ke změnám barevnosti, ke kterým dochází mimo spekulární úhel.

Obrázek 4.10 znázorňuje, že jsou barvy podkladu pozorovány při úhlech mimo spekulární. U vzorků na bílém a černém podkladu vidíme barevný posun od zelené k neutrálním tónům. Na modrém podkladu vidíme posun od zelené k modré a na červeném podkladu posun od zelené k červené. Z konstrukčních důvodů nebylo možné měřit pro úhel detekce větší než -60° , můžeme ale předpokládat, že s rostoucí vzdáleností od spekulárního úhlu by pokračovala barevná změna směrem k barvě podkladu.



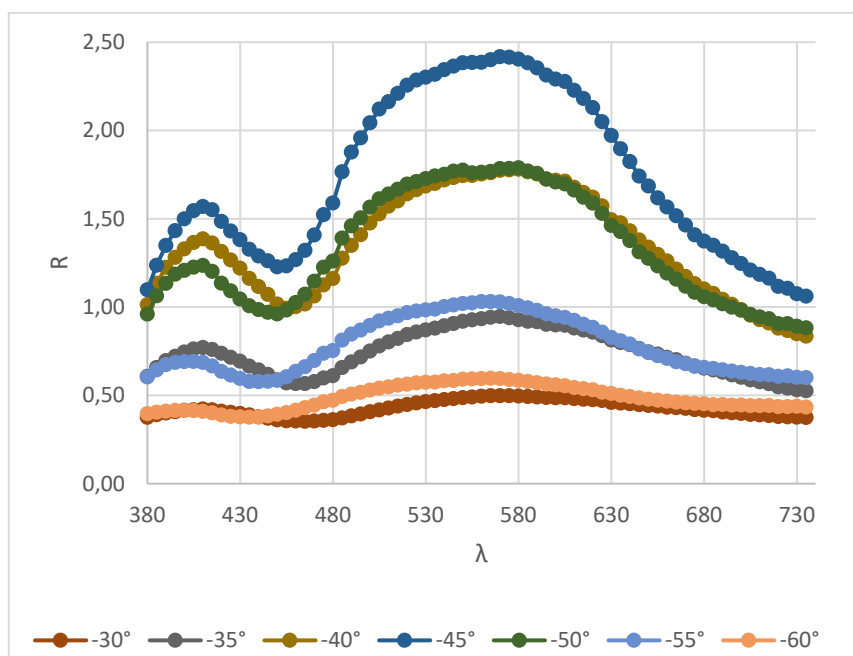
Obrázek 4.10: Rozložení hodnot pigmentu Ultra Green na bílém, černém, modrém a červeném podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -60° měřené na KPF

Obecně můžeme říci, že barva interferenčního pigmentu je pozorována především při spekulárním úhlu. Naopak barva podkladu je pozorována mimo spekulární úhel, čím větší je vzdálenost od spekulárního úhlu, tím silněji se projevuje barva podkladu.

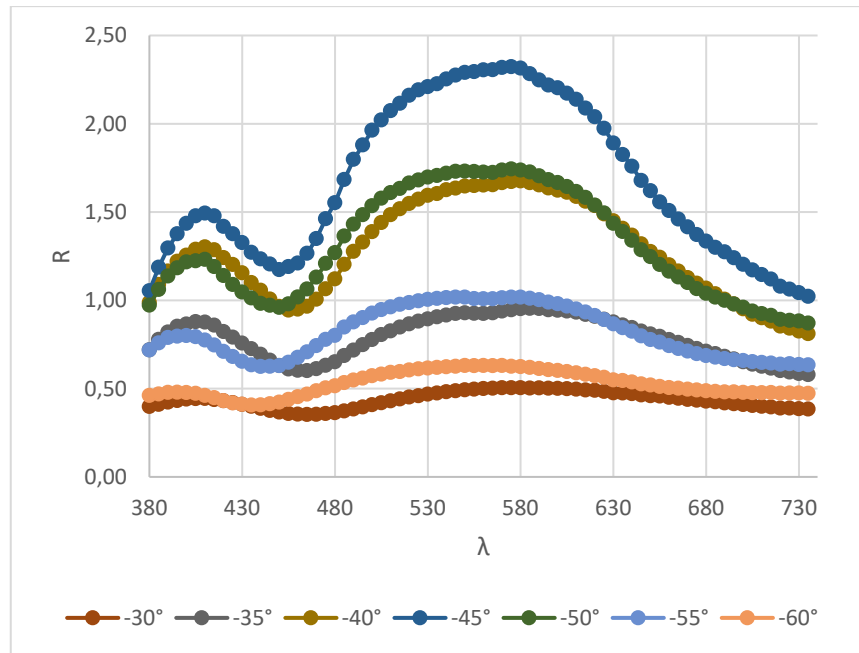
4.3 Vliv velikosti průměru clony na naměřené hodnoty

Pro pigment Securalic® Lilac-Green byla provedena měření s různým průměrem clony. Cílem těchto měření bylo zjistit, jaký vliv má průměr clony na naměřená data. Jak již bylo zmíněno, pomocí clony je regulováno množství světla dopadajícího na detektor.

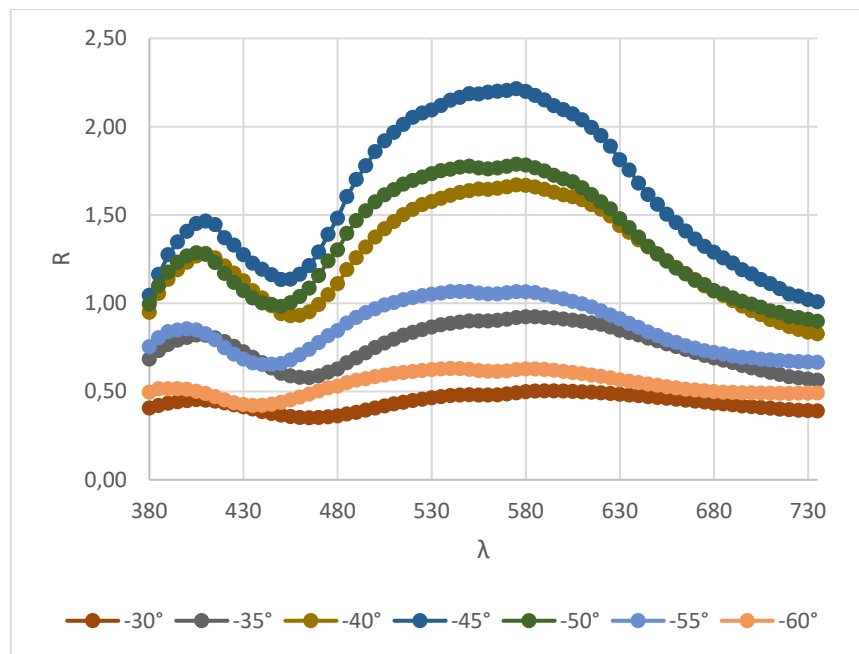
Na obrázcích 4.11 – 4.13 je znázorněna závislost reflektance na vlnové délce pro různé úhly detekce. Výraznou změnu reflektance pro různou velikost clony nepozorujeme.



Obrázek 4.11: Závislost reflektance na vlnové délce pro pigment Securalic® Lilac-Green na bílém podkladu, pro různé úhly detekce měřeno s průměrem clony 2 mm

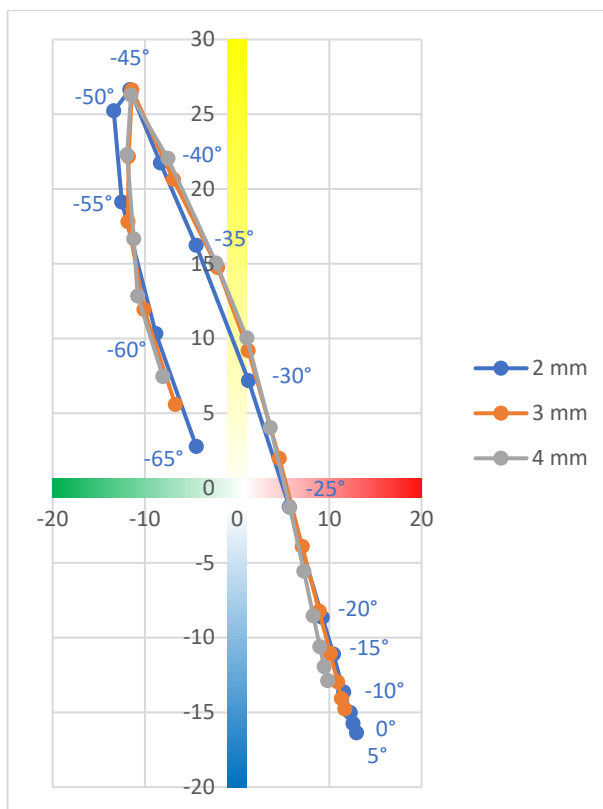


Obrázek 4.12: Závislost reflektance na vlnové délce pro pigment Securalic® Lilac-Green na bílém podkladu, pro různé úhly detekce měřeno s průměrem clony 3 mm

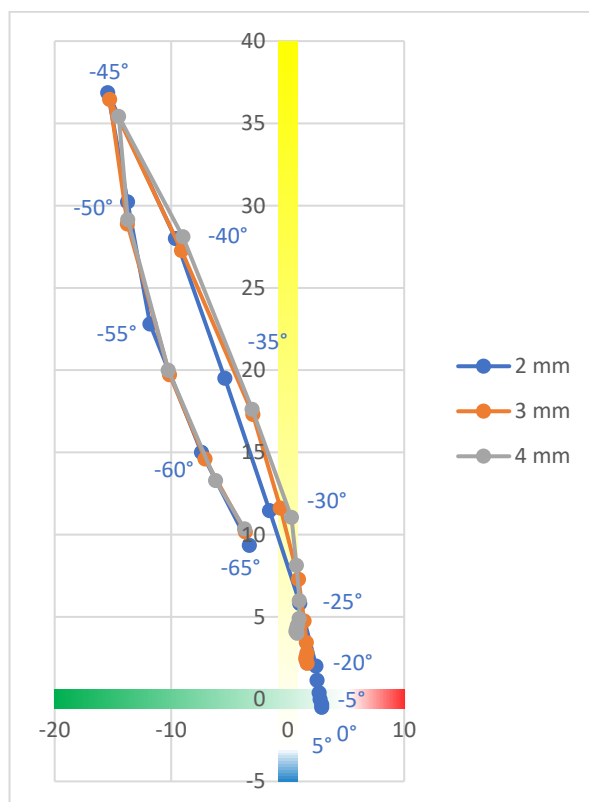


Obrázek 4.13: Závislost reflektance na vlnové délce pro pigment Securalic® Lilac-Green na bílém podkladu, pro různé úhly detekce měřeno s průměrem clony 4 mm

Při pohledu na obrázky 4.14 a 4.15 můžeme říci, že velikost clony nemá příliš velký vliv na naměřené hodnoty a tím pádem na výslednou barevnost.



Obrázek 4.14: Rozložení hodnot pigmentu Securalic® Lilac-Green na černém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF s průměrem clony 2, 3 a 4 mm pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -65°

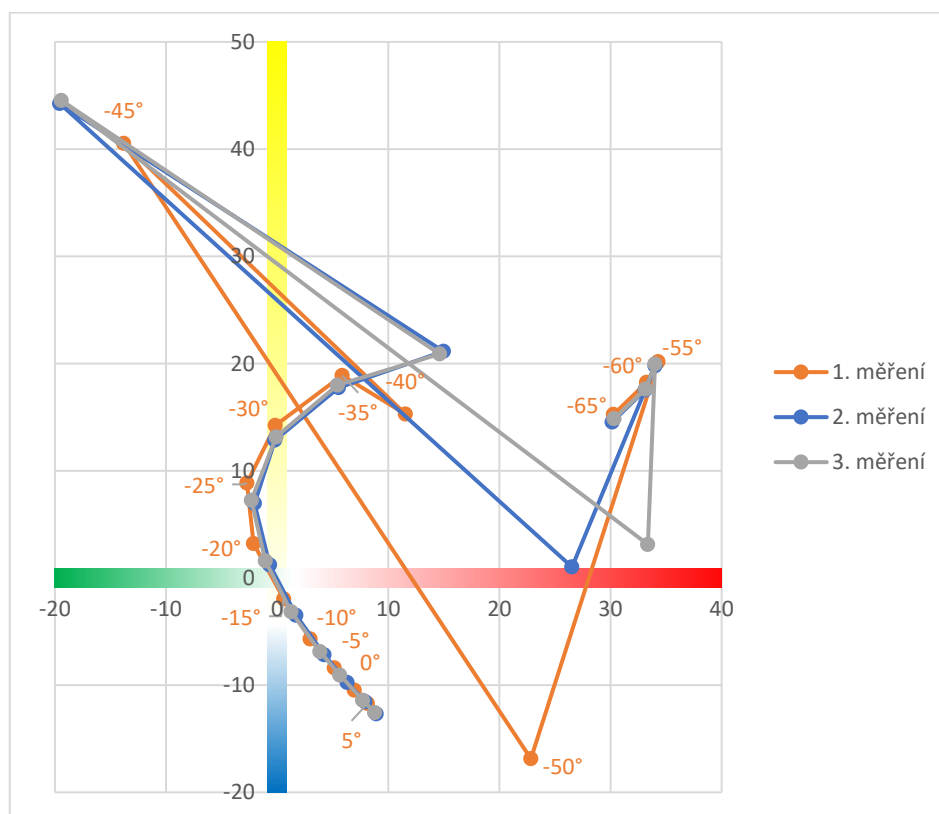


Obrázek 4.15: Rozložení hodnot pigmentu Securalic® Lilac-Green na bílém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF s průměrem clony 2, 3 a 4 mm pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -65°

Obecně můžeme říci, jak již bylo zmíněno výše, že velikost clony nemá příliš velký vliv na naměřené hodnoty. Toto tvrzení má ovšem své limity, při velmi malém průměru clony už by na detektor nemusel dopadat dostatečně velký signál a naměřené hodnoty by byly pouze šum.

4.4 Opakovatelnost

Pigment Tropic Sunrise byl změřen třikrát během dvou dnů, čímž měla být ověřena opakovatelnost měření na sestrojeném gonio-spektrofotometru. Na obrázku 4.16 vidíme, že hodnoty naměřené v rozsahu úhlů 5° až -35° a -60° až -65° jsou téměř identické. Okolo spekulárního úhlu se nepodařilo naměřit stejné hodnoty.



Obrázek 4.16: Rozložení hodnot pigmentu Tropic Sunrise v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném 3x pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -60°

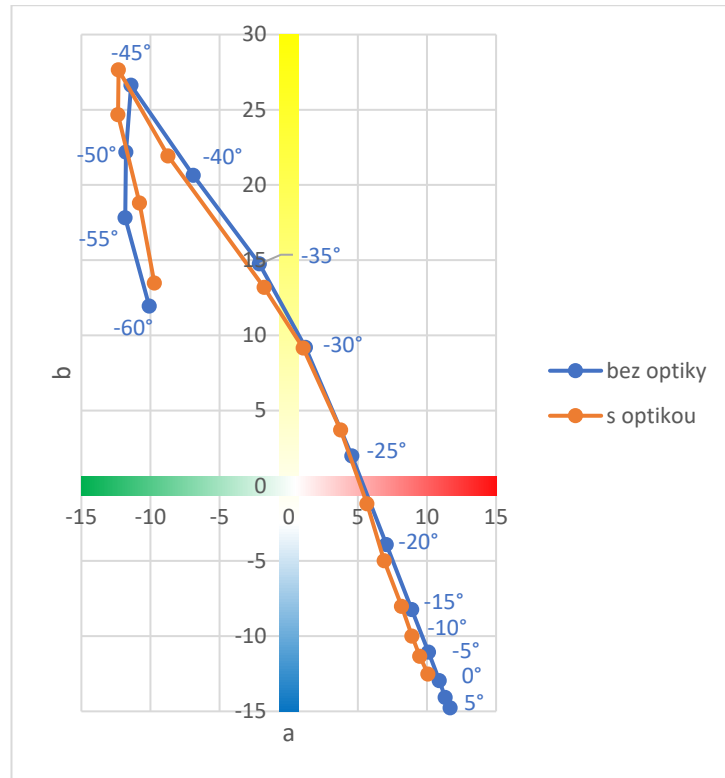
V průběhu všech měření, kdy byly měřeny stejné vzorky s různými nastaveními aparatury, se závislosti velice podobaly. Proto můžeme tvrdit, že opakovatelnost na sestaveném gonio-spektrofotometru je dobrá.

4.5 Vliv vložení optiky před detektor

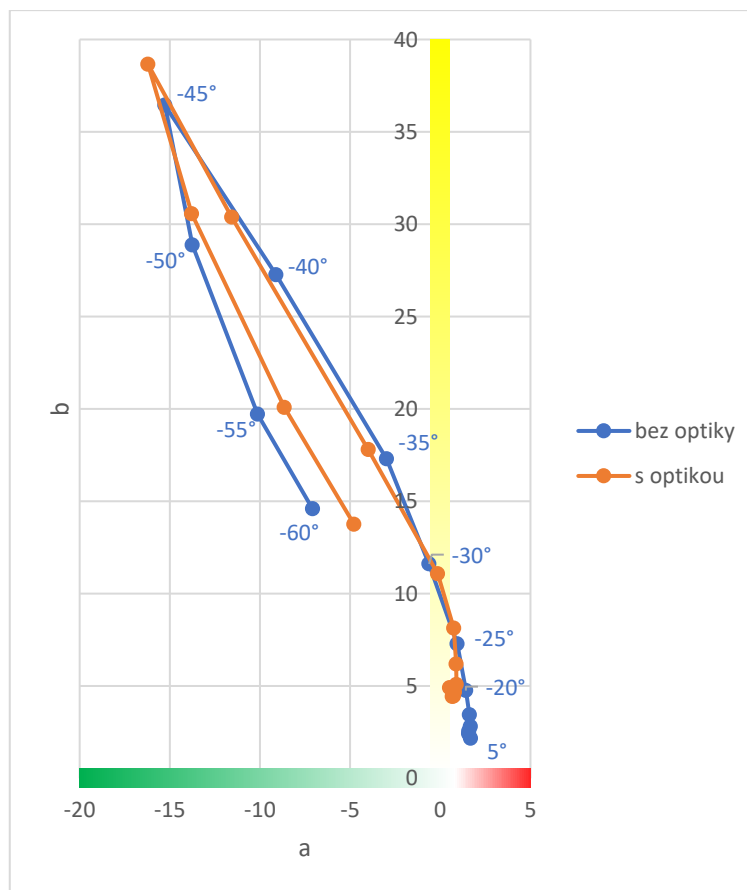
Veškerá předcházející měření byla provedena bez optických prvků před detektorem. Pigment Securalic® Lilac-Green byl znovu proměřen, ovšem nyní s optickým prvkem vloženým před

detektor (obr. 4.17 a 4.18). Jednalo se konkrétně o asférickou kondenzační čočku ACL2520U firmy Thorlabs. Tento typ čočky je ideální k zaostření světla na detektor.

Data získaná při měření, s čočkou i bez čočky umístěné před detektor, jsou velice podobná. Můžeme tedy říci, že tento prvek přidaný do gonio-spektrofotometru příliš neovlivnil měření.



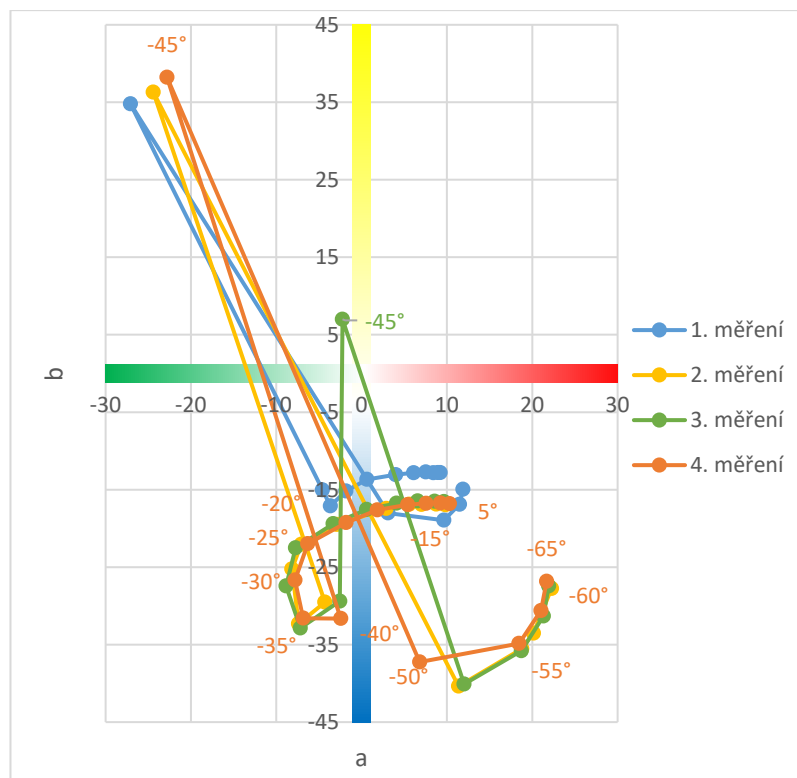
Obrázek 4.17: Rozložení hodnot pigmentu Securalic® Lilac-Green na černém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF bez, a s optikou před detektorem pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -60°



Obrázek 4.18: Rozložení hodnot pigmentu Securalic® Lilac-Green na bílém podkladu v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF bez, a s optikou před detektorem pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -60°

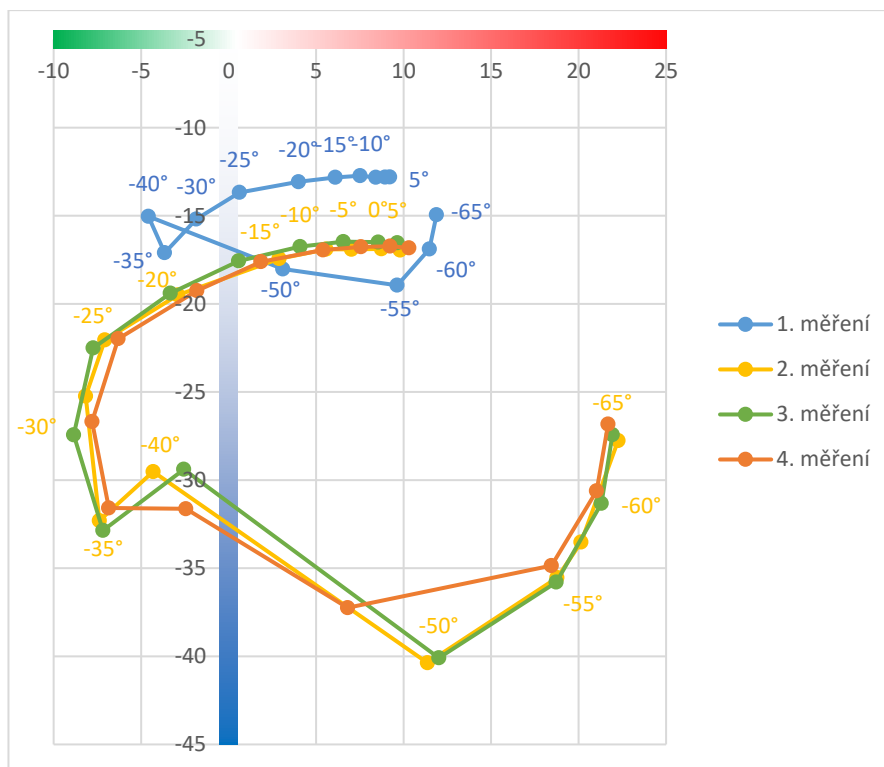
4.6 Vliv změny integračního času

Integrační čas je parametr, který byl nastavován v softwaru SpectraWiz Shortcut, při měření interferenčních pigmentů. Jak již bylo zmíněno, tento parametr ovlivňuje sílu snímaného signálu. Toto měření bylo provedeno pro pigment Pacific Lagoon (viz. obr. 4.19). Nejprve bylo provedeno měření, kdy byl integrační čas nastaven na hodnotu 130 ms pro všechny měřené úhly detekce. Při druhém měření byla hodnota integračního času nastavena také na 130 ms, ale pouze pro spekulární úhel, pro všechny zbylé detekované úhly byl nastaven integrační čas na hodnotu 1000. Při třetím a čtvrtém měření byly nastaveny hodnoty integračního času tak, aby bylo dosaženo maximální hodnoty, kterou je detektor schopen snímat, což je přibližně 60000 counts (velikost zářivého toku). Pro veškeré úhly kromě spekulárního byl integrační čas nastaven na 1000, pro spekulární úhel na 140. U jiných pigmentů byla potřeba měnit integrační čas i v blízkosti spekulárního úhlu, v rozsahu úhlů -35° až -55° .



Obrázek 4.19: Rozložení hodnot Pacific Lagoon v barvovém prostoru CIE a^*b^* měřeném na KPF pro různé integrační časy pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -65°

Na obrázku 4.20 je znázorněno, že pokud pro měření veškerých detekčních úhlů nastavíme jednu hodnotu integračního času (1. měření), nezískáme tak velký rozsah hodnot (měření 2 až 4), jako když pro každý detekční úhel nastavíme integrační čas tak, aby byl signál dopadající na detektor maximální. Při volbě integračního času je důležité nepřesáhnout maximální hodnotu, kterou je detektor schopen zaznamenat. Nevýhodou tohoto postupu je velká časová náročnost, kdy se nejprve musí zjistit optimální hodnota integračního času pro jednotlivé detekční úhly a teprve poté je možné zahájit měření. Stanovení optimálního integračního času pro různé úhly se stanovuje pro každý vzorek samostatně.



Obrázek 4.20: Přiblížení oblasti mimo spekulární úhel z obrázku 4.19

Obecně můžeme říci, že pokud je měření prováděno tak, aby pro veškeré úhly detekce dopadal na detektor nejvyšší možný signál, získáme tak větší rozsah hodnot oproti měření, kdy je nastaven pouze jeden integrační čas pro všechny detekované úhly. Pokud je integrační čas příliš malý, je dobře změřen signál dopadající při úhlu detekce -45° , pro ostatní úhly je ale při tomto integračním času velikost signálu hodně malá. Naopak při vysoké hodnotě integračního času jsou dobře změřeny úhly vzdálené od spekulárního, samotný spekulární úhel pak nemůže být změřen, protože detekovaný signál je příliš velký a je mimo rozsah detektoru a nemůže být zaznamenán. Jedinou nevýhodou tohoto postupu je velká časová náročnost měření. Pro každý úhel je potřeba zjistit maximální integrační čas, při kterém je detektor ještě schopen zaznamenat signál odražený od vzorku.

5 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá charakterizací interferenčních pigmentů. Běžně dostupné spektrofotometry nejsou schopny dostatečně vyhodnotit barevnost interferenčních pigmentů. Důvodem je změna barvy interferenčních pigmentů, kterou pozorujeme se změnou úhlu pozorování nebo se změnou úhlu osvětlení. Běžné spektrofotometry mají pevnou geometrii $45^\circ/0^\circ$ nebo $0^\circ/45^\circ$, což nepokryje celou hemisféru a není tak možné charakterizovat barvu závislou na úhlu pozorování. Proto byl na KPF sestrojen gonio-spektrofotometr, který se skládá ze tří částí, světelného zdroje, držáku vzorku a detektoru. Dvě komponenty této sestavy jsou mobilní, proto je možné měřit vzorek při různých geometriích. Toto zařízení umožňuje měření v jedné rovině, ne mimo rovinu. Teoreticky by bylo možné provádět měření pro celou hemisféru. V praxi nás ale limitují konstrukční prvky aparatury, což nám umožnilo měřit v rozsahu úhlů detekce 5° až -65° při úhlu osvětlení 45° . Měřeny byly reklamní vzorky interferenčních pigmentů od firmy Merck.

Před vlastním měřením vzorků byla provedena kalibrace. Při kalibraci byly nastaveny veškeré komponenty aparatury tak, aby na vzorek dopadal co nejsilnější signál s minimálním šumem. Dalším požadavkem na světelný tok bylo, aby byl co nejméně divergentní, aby dopadal na vzorek rovnoběžně a osvětloval ho v celé ploše se stejnou intenzitou. Kalibrace, konkrétně mechanická kalibrace, byla prováděna pomocí šroubů. Většina prvků aparatury není opatřena stupnicí, proto je polohování založeno především na citu a odhadu. Je velice pravděpodobné, že každý uživatel by při kalibraci se stejným postupem nastavil zařízení odlišně. Byť jsou jednotlivé prvky upevňovány pomocí šroubů, aparatura není příliš odolná vůči posunutí a je nutné se kolem ní pohybovat velice opatrně, protože při sebemenším posunutí některé z částí je zapotřebí nová kalibrace.

Vlastní měření probíhalo pro rozsah vlnových délek 380 až 740 nm s krokem 5 nm. Úhel osvětlení θ byl stanoven pro všechna měření stejně a to na 45° a úhel detekce θ byl stanoven v rozsahu 5° až -65° s krokem 5° . Proměřeno bylo několik vzorků interferenčních pigmentů. Výsledky byly vyhodnocovány v barvovém prostoru CIELAB. Naměřen byl světelný tok, ze kterého byla vypočítána reflektance R , pomocí té byly vypočteny trichromatické hodnoty X , Y a Z a díky nim byly pak vypočítány barvové souřadnice a^* a b^* .

Jako první byly porovnány výsledky získané na KPF s výsledky získanými na AV ČR. Z tohoto porovnání můžeme vyvodit, že tvary závislostí v barvovém prostoru se většinou podobají. Gonio-spektrofotometr sestrojený na KPF lépe zaznamenává odstíny purpurové.

Naopak oproti zařízení AV hůře zaznamenává odstíny zelené a modré, což je pravděpodobně způsobeno nízkou intenzitou vyzařování světelného zdroje v krátkovlnné oblasti.

Dále byl vyhodnocován vliv barvy podkladu na celkovou barevnost. Toto měření bylo provedeno pro pigment Ultra Green, což je zelený pigment. Tento pigment byl nanesen na černý, bílý, modrý a červený podklad. Hodnoty naměřené ve spekulární části u všech barevných podkladů se nacházejí v zelené oblasti. Projevuje se tedy barva interferenčního pigmentu a tvar všech závislostí je identický. Čím více se nacházíme v difuzní části, tím více se tvary závislostí odlišují, což je způsobeno barvou podkladu. Hodnoty získané v difuzní části na černém a bílém podkladu se nacházejí kolem průsečíku os a^* a b^* , tedy kolem neutrálních tónů. Hodnoty získané v difuzní části na modrém podkladu se nacházejí více v modré oblasti, stejně jako hodnoty získané na červeném podkladu se nacházejí více v červené oblasti barvového prostoru.

Dalším zkoumaným prvkem byl vliv velikosti průměru clony na naměřené hodnoty. Měření bylo provedeno s průměrem clony 2, 3 a 4 mm. Bylo zjištěno, že se změnou průměru clony nedochází ke změně tvaru závislosti v barvovém prostoru.

Dále byla pozorována opakovatelnost měření. Během všech měření každého vzorku s různými nastaveními byl pozorován velice podobný tvar závislosti v barvovém prostoru. Dále byla proměřena opakovatelnost u jednoho pigmentu se stejným nastavením. Bylo zjištěno, že závislost v barvovém prostoru v difuzní části má vždy identický tvar, pouze ve spekulární oblasti se nepodařilo naměřit shodné hodnoty a^* a b^* . Na základě těchto zjištění můžeme tvrdit, že opakovatelnost sestrojeného gonio-spektrofotometru je dobrá.

Jako další byl zkoumán vliv vložení optiky před detektor. Hodnoty a^* a b^* získané při měření, s čočkou i bez čočky umístěné před detektorem, jsou velice podobné. Můžeme tedy říci, že tento prvek gonio-spektrofotometru nemá téměř žádný vliv na naměřené hodnoty.

Jako poslední byl pozorován vliv změny integračního času. V této práci bylo zjištěno, že nejkvalitnějšího signálu je dosaženo, pokud nastavíme integrační čas na maximální hodnotu, při které je detektor schopný signál zaznamenat. Při překročení této maximální hodnoty jsou naměřená data oříznuta a výsledek je zkreslený. Pokud je integrační čas příliš malý, je dobře změřen signál dopadající ve spekulární části, pro ostatní úhly je ale při tomto integračním času velikost signálu hodně malá. Naopak při vysoké hodnotě integračního času jsou dobře změřeny úhly v difuzní oblasti, samotný spekulární úhel pak nemůže být změřen, protože detekovaný signál je příliš velký a je mimo rozsah detektoru a nemůže být zaznamenán. Proto byl pro každý úhel detekce nastaven vlastní integrační čas.

6 Použitá literatura

- [1] FILIP, Jiří, Radomír VÁVRA a Frank J. MAILE. Optical analysis of coatings including diffractive pigments using a high-resolution gonioreflectometer. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2018, , 18. ISSN 1547-0091. Dostupné z: doi:10.1007/s11998-018-0137-5
- [2] MAILE, F., G. PFAFF a P. REYNDERS. *Effect pigments—past, present and future* [online]. , 1-14 [cit. 2021-01-05]. Dostupné z: doi:10.1016/j.porgcoat.2005.07.003
- [3] MATSAPEY, N., J. FAUCHEU, M. FLURY a D. DELAFOSSE. Design of a gonio-spectro-photometer for optical characterization of gonio-apparent materials. *Measurement Science and Technology* [online]. **24**(6), 11 [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/24/6/065901
- [4] FERRERO, A. a J. CAMPOS. Angular and Spectral Bandwidth Considerations in BRDF Measurements of Interference and Diffraction-Based Coatings. *Coatings 2020*, *10*, 1128 [online]. , 1-12 [cit. 2021-01-13]. Dostupné z: doi:10.3390/coatings10111128
- [5] FERRERO, A., J. CAMPOS a E. PERALES. Measuring and specifying goniochromatic colors. *23rd ICO conference, Santiago de Compostela* [online]. , 1-3 [cit. 2021-01-25].
- [6] E 2539. *Standard Practice for Multiangle Color Measurement of Interference Pigments*. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States: ASTM International.
- [7] RABAL ET AL, A. Automatic gonio-spectrophotometer for the absolute measurement of the spectral BRDF at in and out-of-plane and retroreflection geometries. *Metrologia* *49* 213 [online]. , 1-12 [cit. 2021-01-25]. Dostupné z: doi:10.1088/0026-1394/49/3/213
- [8] *OBRÁZEK* [online]. [cit. 2021-06-27]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/perfect-reflecting-diffuser>

- [9] SCHÜTZOVÁ, Eliška. *Goniospektrometrické měření tištěných vzorků*. Pardubice, 2017. Diplomová práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce RNDr. Petr Janíček, Ph.D.
- [10] HOUDKOVÁ, Michaela. *Hodnocení perlescentních nátěrů pomocí goniospektrofotometrické aparatury*. Pardubice, 2019. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ondřej Panák.
- [11] *Thorlabs* [online]. 2021 [cit. 2021-06-22]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7269&pn=SLS201L/M
- [12] PFAFF, Gerhard, Peter GABEL, Manfred KIESER, Frank J. MAILE a Joachim WEITZEL. *Special Effect Pigments*. 2. Hannover: Vincentz Network (European Coatings Tech Files), 2008. ISBN 978-3-86630-905-0.
- [13] BÁRTOVÁ, Kristina. *Počítačová grafika III, 3. přednáška: Odraz světla, BRDF* [online]. , 1-7 [cit. 2021-06-28]. Dostupné z: <https://cgg.mff.cuni.cz/~jaroslav/teaching/2012-NPGR010/notes/NPGR010-2012%20-%2003%20-%20poznamky.pdf>
- [14] KAPLANOVÁ, Marie. *Moderní polygrafie*. 3. Praha: Svaz polygrafických podnikatelů, 2012. ISBN 978-80-254-4230-2.
- [15] HÉLBERT, M., R. D. HERSH a P. EMMEL. *Handbook of Digital Imaging: Fundamentals of Optics and Radiometry for Color Reproduction* [online]. Chichester, UK: John. [cit. 2021-02-01]. ISBN 978-0-470-51059-9.
- [16] NICODEMUS, F.E., J.C. RICHMOND, J.J. HSIA, I.W. GINSBERG a T. LIMPERIS. *Geometrical considerations and nomenclature for reflectance*. Washington, DC: NBS Monograph 160, National Bureau of Standards, 1977, 2, 6, 7.
- [17] HÉLBERT, M., R. HERSH a P. EMMEL. *Fundamentals of Optics and Radiometry for Color Reproduction*. *Handbook of Digital Imaging*. 2015. s. 57. ISBN 978-0-470-51059-9.

- [18] RŮŽIČKA, M. *Subsurface scattering* [online]. In: . [cit. 2021-01-25]. Dostupné z: <https://cgg.mff.cuni.cz/~jaroslav/teaching/2011-npgr031/11-stgi-subsurface%20scattering%20-%20poznamky%20-%20martin%20ruzicka.pdf>
- [19] FILIP, Jiří a Michal HAINDL. Bidirectional Texture Function Modeling: A State of the Art Survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2008, **31**(11), 1921-1940. Dostupné z: doi:0.1109/TPAMI.2008.246
- [20] MIKULA, M., K. VAŠKO a M. ČEPPAN. *Gloss and Goniospectrometry of Printed Materials* [online]. , 1-8 [cit. 2021-01-25].
- [21] NADAL, M. a E. EARLY. Color Measurements for Pearlescent Coatings. *COLOR research and application* [online]. [cit. 2021-01-25].
- [22] SOLE, A., P. FARUP, P. NUSSBAUM a S. TOMINAGA. *Evaluating an Image Based Multi-angle BRDF Measurement Setup* [online]. , 1-11 [cit. 2021-01-25]. Dostupné z: doi:10.1364/ao.XX.XXXXXX
- [23] FERRE, A. *Theoretical evaluation of the impact of finite intervals in the measurement of the bidirectional reflectance distribution function* [online]. , 1-10 [cit. 2021-01-25]. Dostupné z: doi:10.1007/s11998-019-00241-2
- [24] *Merck Colorstream®* [online]. Darmstadt, Německo, 2020 [cit. 2021-06-22]. Dostupné z: <https://www.merckgroup.com/en/brands/pm/colorstream.html>
- [25] *Merck Securalic®* [online]. Darmstadt, Německo, 2020 [cit. 2021-06-22]. Dostupné z: <https://www.merckgroup.com/en/brands/pm/securalic.html>
- [26] *Merck Iriodin®* [online]. Darmstadt, Německo, 2020 [cit. 2021-06-23]. Dostupné z: <https://www.merckgroup.com/en/brands/pm/iriodin.html>
- [27] *Thorlabs Aspheric Condenser Lenses* [online]. 2021 [cit. 2021-06-22]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3835&pn=ACL2520U
- [28] *StellarNet SpectraWiz® Spectroscopy Software* [online]. Tampa, Florida, USA, 2021 [cit. 2021-06-22]. Dostupné z: <https://www.stellarnet.us/software/>

- [29] *Thorlabs Ring-Actuated, SM-Threaded Iris Diaphragms* [online]. 2021 [cit. 2021-06-22]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1479
- [30] *StellarNet BLACK-Comet UV-VIS Spectrometer* [online]. Tampa, Florida, USA, 2021 [cit. 2021-06-22]. Dostupné z: <https://www.stellarnet.us/spectrometers/black-comet-uv-vis-concave-grating-spectrometers/>
- [31] FILIP, Jiří, Radomír VÁVRA, Michal HAINDL, Pavel ŽID, Mikuláš KRUPÍČKA a Vlastimil HAVRAN. *BRDF Slices: Accurate Adaptive Anisotropic Appearance Acquisition* [online]. 2013 [cit. 2021-06-21]. Dostupné z: doi: 10.1109/CVPR.2013.193. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Institute of Information Theory and Automation of the AS CR, Prague; Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University in Prague.