

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Katedra polygrafie a fotofyziky

Hodnocení perlescentních nátěrů pomocí gonio-spektrofotometrické aparatury
Michaela Houdková

Bakalářská práce
2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michaela Houdková**
Osobní číslo: **C16158**
Studijní program: **B3441 Polygrafie**
Studijní obor: **Polygrafie**
Název tématu: **Hodnocení perlescentních nátěrů pomocí
gonio-spektrofotometrické aparatury**
Zadávající katedra: **Katedra polygrafie a fotofyziky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

- 1) Z dostupné literatury nastudujte a popište přístupy pro hodnocení reflexních spekter v úhlové závislosti, zejména v případě nátěrů obsahujících perlescentní pigmenty.
- 2) Připravte řadu vzorků s nátěrem obsahujícím perlescentní pigmenty.
- 3) Vzorky proměřte pomocí gonio-spektrofotometrické aparatury a vyhodnoťte odrazivost a barevnost vzorků.
- 4) Získané výsledky přehledně zpracujte ve formě závěrečné práce.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Ondřej Panák, Ph.D.

Katedra polygrafie a fotofyziky

Datum zadání bakalářské práce: **27. února 2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **4. července 2019**



prof. Ing. Petr Kalenda, CSC.
děkan

L.S.



prof. Ing. Petr Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 27. února 2019

Prohlašuji:

Tuto práci 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., autorský zákon, 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. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 16. 4. 2019

Michaela Houdková

Bakalářská 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



Děkuji vedoucímu mé práce panu Ing. Ondreji Panákovi, Ph.D. za pomoc, trpělivost a cenné rady, které jsem během tvorby této práce dostala. Další poděkování patří mé rodině a přátelům za podporu během mého studia.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá hodnocením perlescentních nátěrů s využitím gonio-spektrofotometrické aparatury. Jsou zde popsány hlavní části gonio-spektrofotometru. Data naměřená pomocí gonio-spektrofotometru jsou vyhodnocována v barvovém prostoru CIELAB. Dále jsou diskutovány výsledky měření, které bylo prováděno pro čtyři druhy perlescentních pigmentů nanesené na podklady různých barev.

Klíčová slova

Gonio-spektrometrické měření, BRDF, gonio-spektrofotometr, perleťové nátěry, interferenční pigmenty, goniokolorimetrie

Annotation

This bachelor thesis deals with evaluation of perlescent coatings using gonio-spectrophotometric equipment. The main parts of the gonio-spectrophotometer are described herein. Gonio-spectrophotometer data are evaluated in CIELAB color space. Further, the results of the measurement, which were performed for four types of perlescent pigments applied on substrates of different colors, are discussed.

Keywords

Goniospectrometric measurements, BRDF, gonio-spectro-photometer, pearlescent coatings, interference pigments, goniocolorimetry

Obsah

1	Úvod	12
2	Teoretická část	13
2.1	Interakce světla s látkou	13
2.2	Perlescentní barvy	13
2.3	Radiometrie	14
2.3.1	Radiometrické veličiny	15
2.3.1.1	Zářivý tok (<i>radiant flux</i>)	15
2.3.1.2	Zářivost (<i>radiant intensity</i>)	15
2.3.1.3	Ozáření (<i>irradiance</i>)	15
2.3.1.4	Zář (<i>radiance</i>)	15
2.4	Lambertův zákon	16
2.5	Odrzivost (reflektance) a reflexní faktor	16
2.6	BRDF	17
2.6.1	Druhy BRDF	18
2.6.2	Měření BRDF	18
2.6.3	Popis gonio-spektrofotometru	19
2.7	Přístupy k měření	21
3	Experimentální část	22
3.1	Vzorky	22
3.1.1	Použité materiály a přístroje	22
3.1.2	Příprava vzorků	22
3.2	Gonio-spektrofotometr	23
3.2.1	Části gonio-spektrofotometru	24
3.2.1.1	Osvětlovací část	24
3.2.1.2	Držák vzorku	24
3.2.1.3	Detekční část	25
3.2.2	Kalibrace gonio-spektrofotometru	25
3.3	Měření tištěných vzorků	27
3.3.1	Hodnoty CIE L*a*b*	29
4	Výsledky a diskuze	30
4.1	Stálost zdroje	30
4.2	Vyhodnocení v barvovém prostoru CIELAB	31

4.2.1	Závislost hodnot a^*b^*	31
4.2.2	Závislost hodnot L^*a^*	35
4.2.3	Závislost L^* na úhlu pozorování	40
5	Závěr	42
6	Použitá literatura	44

Seznam použitých zkratek a značek

B	Černá barva (black)
BRDF	Bidirectional reflectance distribution function – Obousměrná distribuční funkce odrazu
C	Azurová barva (cyan)
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage
KPF	Katedra polygrafie a fotofyziky
M	Purpurová barva (magenta)
NIST	Národní institut pro normalizaci a technologie
PTFE	Polytetrafluorethylen
W	Bílá barva (white)
Y	Žlutá barva (yellow)

θ_i	Úhel dopadu
θ_r	Úhel odrazu
φ	Azimut
φ_r	Azimut odrazu
φ_i	Azimut dopadu
ω_i	Směr dopadajícího světla
ω_r	Směr odraženého světla
Ω	Prostorový úhel
sr	Steradián
W	Watt
Φ	Zářivý tok odražený od vzorku
Φ_{ref}	Zářivý tok odražený od difúzního standardu
I	Zářivost
E	Ozáření
L	Zář
L_r	Zář odražená od povrchu
R	Reflektance
\hat{R}	Reflexní faktor
λ	Vlnová délka
X, Y, Z	Trichromatické hodnoty

k	Konstanta, která normalizuje trichromatickou hodnotu Y
$M_e(\lambda)$	Standardizované spektrum osvětlení
$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$	Trichromatické funkce

1 Úvod

V dnešní době se čím dál větší oblibě těší opticky variabilní materiály, mezi které můžeme zařadit například kovové nebo perlescentní nátěry. Perlescentní nátěry se využívají především v automobilovém průmyslu pro svůj zajímavý optický efekt, kdy v závislosti na změně směru osvětlení nebo změně směru pozorování dochází ke změnám barvy [3].

Hodnocení klasických barev dosáhlo vysoké technické úrovně a my jsme schopni každou barvu pomocí dat získaných měřeními jednoznačně popsat [4]. Charakterizace perlescentních nátěrů oproti tomu zaostává. U těchto nátěrů je potřeba provádět měření pro různé úhly osvětlení a detekce, protože barva se může značně lišit v závislosti na geometrii měření, právě touto problematikou se tato bakalářská práce zabývá.

Pro hodnocení perlescentních nátěrů je využit gonio-spektrofotometr. Pomocí tohoto přístroje jsou vyhodnocovány změny barevnosti jednotlivých vzorků v závislosti na změně úhlu pozorování. Na výslednou barevnost mají vliv jak samotné perlescentní pigmenty, tak i barva, přes kterou jsou tyto pigmenty natištěny.

Cílem této práce je tedy zhodnotit, jaký vliv mají různé geometrie pozorování na měření reflektance a z ní získané hodnoty barevnosti.

2 Teoretická část

2.1 Interakce světla s látkou

Při dopadu světla na látku se může část světla odrazit od povrchu a část světla může látkou procházet [7]. Známe různé typy odrazů, jako ideálně difúzní, ideálně zrcadlový nebo lesklý [5]. Pokud světlo dopadá na rozhraní dvou různých optických prostředí, dochází k jeho lomu. Při šíření světla látkou může docházet k částečnému zeslabení světla vlivem absorpce, dále může docházet k rozptylu světla pod povrchem látky.

Interakce mezi světlem a látkou určují, jak se bude světlo po dopadu na povrch látky chovat a ovlivňují tak výsledný optický efekt. Vzhled materiálu je dán barvou, hladkostí, respektive drsností, odrazivostí a úhlem pozorování a osvětlení. Vztah odražené záře vůči záři dopadající na povrch objektu je dán odrazovými vlastnostmi materiálu.

Dominantní metodou pro kvantifikaci povrchového vzhledu je měření barvy [6]. V klasických barevných pigmentech je část dopadajícího světla absorbována, zatímco zbytek je difúzně rozptýlen. Proto je vnímaná barva nezávislá na geometrii měření včetně úhlu osvětlení a pozorování. Jednoduchá geometrie $0^\circ/45^\circ$ je dostatečná k tomu, aby charakterizovala barvu těchto povlaků [2].

2.2 Perlescentní barvy

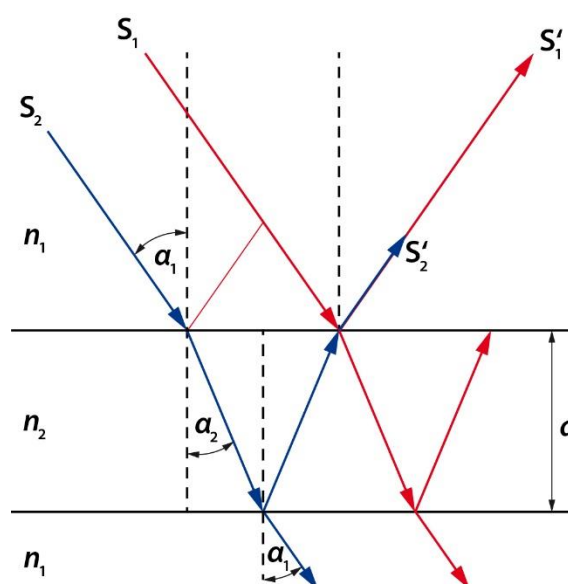
Perlescentní barvy a laky vytvářejí zajímavé optické efekty [8]. Povrchu dodávají lesk, třpyt, a především duhové barvy, dále vytvářejí dojem prostorového objektu. Velikost částic udává míru třpytu, od saténového až po brilantový lesk. Při změně úhlu pozorování nebo změně úhlu osvětlení dochází nejen ke změně lesku, ale i ke změně duhového zbarvení.

Nejčastěji jsou perlescentní pigmenty tvořeny nosnou destičkou o tloušťce 0,1–0,6 μm , která je ze slídy nebo oxidu hlinitého [8]. Firma MERCK dodává pigmenty Iriodin®, kde je nosným materiálem přírodní slída, dále pigmenty Xirallic®, u kterých je nosným materiálem oxid hlinitý. Tyto destičky mají velice hladký povrch a jsou transparentní. K projevení perlescentního efektu je nutné, aby byly destičky uspořádány rovnoběžně s potiskovaným povrchem.

Na nosné destičce je nanesena nanovrstva vysoce refrakčních oxidů kovů [9]. Stříbrno-bílé pigmenty, stejně jako pigmenty ve zlaté, červené, modré, zelené, fialové a tyrkysové barvě lze vytvořit použitím oxidu titaničitého v různých tloušťkách nánosu, tak tomu je například u pigmentů Xirallic®. Při použití oxidu železitého vznikají měděné a červené pigmenty [9], při použití oxidu chromitého zase pigmenty zelené [8].

V této vrstvě oxidů kovů dochází k interferenci světla [8]. Tato vrstva má vyšší index lomu než okolní prostředí a čím větší rozdíl indexů lomů mezi vrstvou oxidů kovů a okolním prostředím je, tím je výsledný optický efekt intenzivnější. Jedinčný perleťový efekt nastává, protože transparentní lesklé destičky např. slídy umožňují propustit část dopadajícího světla. Když se propuštěná část světla setkává s dalšími hraničními povrchy s různými indexy lomu, část světla se odráží, dochází tedy k několikanásobnému lomu a odrazu světla. Celkové odražené světlo pak vzniká interferencí částí světla, které procházely různými cestami materiálem [2].

Perlescentní pigmenty jsou dobře dispergovatelné v disperzních, rozpouštědlových i UV tvrditelných barvách a lacích [8]. Pastelových perlescentních barev lze dosáhnout přidáním bílého perlescentního pigmentu do pestrých barev. Perlescentní barvy je dobré aplikovat na hladce natírané papíry o vyšší plošné hmotnosti.



Obrázek 2.1: Princip interference světla
(adaptováno z [8])

2.3 Radiometrie

Následující informace jsou čerpány ze zdroje [10]. Radiometrie je věda zabývající se měřením záření. Zahrnuje studium záření vyzařované zdrojem, detekci, odraz nebo přenos záření optickými systémy. Základní radiometrické veličiny popisují geometrické rozložení energie v prostoru.

2.3.1 Radiometrické veličiny

Radiometrická pravidla jsou založena na čtyřech základních veličinách: zářivý tok, zářivost, ozáření a zář [10]. K určení směru v prostoru se kromě kartézských souřadnic zavádí úhel θ (úhel dopadu/odrazu), který určuje odchylku od osy z a úhel φ (azimutový úhel), který určuje odchylku od osy x . Směr dopadajícího (*incident*) a odraženého (*reflected*) světla nese označení ω_i a ω_r [3]. Dále je definován prostorový úhel Ω , což je soubor směrů, které vymezují určitou plochu na povrchu jednotkové koule, jednotkou je Steradián (sr). Koule libovolného poloměru má 4π steradiánů [10]. Následující informace jsou čerpány ze zdroje [10].

2.3.1.1 Zářivý tok (*radiant flux*)

Zářivý tok Φ (nebo jen tok, také označován jako výkon) je energie vyzářená za jednotku času vyjádřená ve wattech (W).

2.3.1.2 Zářivost (*radiant intensity*)

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

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

2.3.1.3 Ozáření (*irradiance*)

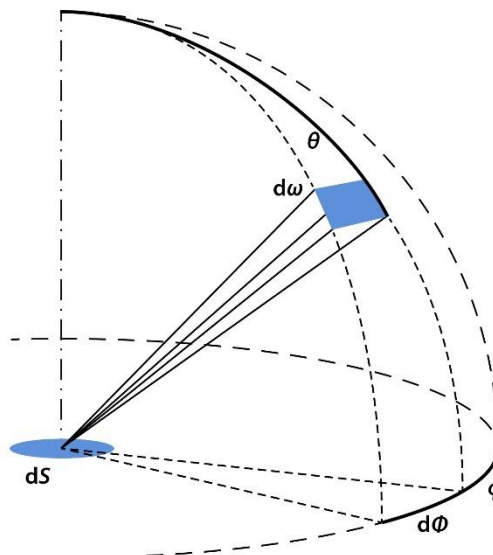
Ozáření E je hustota toku na jednotku plochy, která dopadá na určité místo na určitém povrchu, vyjádřená ve wattech na metr čtvereční ($W \cdot m^{-2}$). Pokud vezmeme v úvahu tok $d\Phi$ relativně k povrchovému prvku dS , je odpovídající ozáření

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

2.3.1.4 Zář (*radiance*)

Zář L je výkon na jednotkovou plochu kolmou k paprsku a na jednotkový prostorový úhel ve směru paprsku, jednotkou je watt na metr čtvereční na steradián ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$),

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



Obrázek 2.2: Prostorový úhel ve směrech θ a φ
(adaptováno z [10])

2.4 Lambertův zákon

Podle Lambertova zákona dokonale difúzní (rozptylující) povrch vyzařuje nebo odráží stejnou zář do všech směrů [10]. Takové povrchy nazýváme Lambertovské povrchy nebo reflektory.

V praxi jsou bílé standardy blízké se těmto vlastnostem vyrobeny z lisovaného síranu barnatého nebo PTFE (polytetrafluorethylen, známého jako Algoron, Halon nebo Spectralon) [10]. Odrazivost bílého difúzního standardu je rovna 1 a jeho BRDF je $1/\pi$ pro každý pár směrů dopadu a odrazu. Bílé standardy musí být kalibrovány z hlediska dokonale odrážejícího difuzoru.

Příkladem takového materiálu je Spectralon®, bílý difúzní standard od firmy Labsphere [11]. Spectralon® má nejvyšší difúzní odrazivost ze všech známých materiálů v rozsahu vlnových délek od 250 do 2500 nm.

2.5 Odrazivost (reflektance) a reflexní faktor

Termín odrazivost označuje jakýkoliv poměr odraženého zářivého toku k dopadajícímu zářivému toku, který je vztažen ke stejnému povrchu [10]. Reflektance je vždy menší než jedna.

$$R = \frac{\Phi}{\Phi_i} \quad (4)$$

Měření odrazivosti závisí na dvou měřeních toku: odraženém toku a dopadajícím toku. Protože většina přístrojů obsahuje jeden detektor, který se používá k zachycení odraženého toku, dopadající tok nelze měřit přímo. Měří se proto nepřímo pomocí dokonalého bílého

difúzního standardu schopného odrazet dopadající světlo rovnoměrně v celé hemisféře, aniž by ho absorbovalo. Tok zachycený detektorem je tedy úměrný dopadajícímu toku. Posuzovaný objekt i dokonalý difuzor musejí být osvětleny a pozorovány se stejnou geometrií. Poměr toku Φ odraženého od objektu k toku Φ_{ref} odraženého od difúzního standardu se nazývá reflexní faktor.

$$\hat{R} = \frac{\Phi}{\Phi_{\text{ref}}} \quad (5)$$

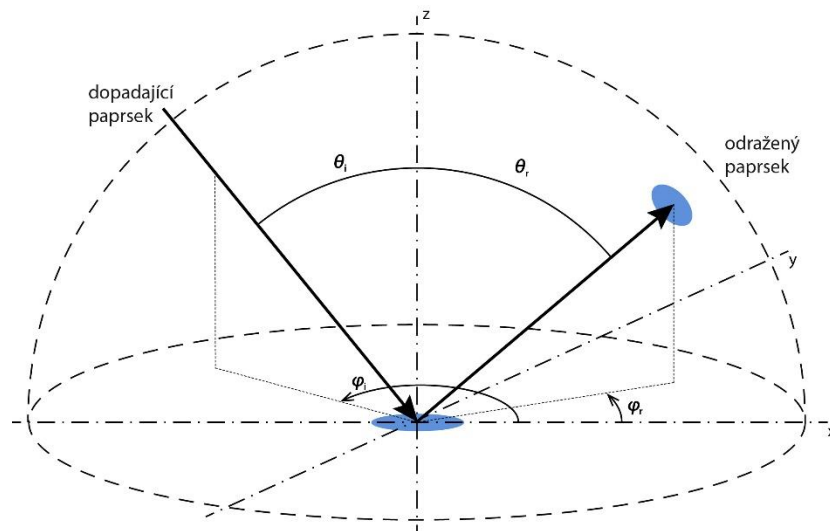
V některých případech vzorek odráží více světla směrem k detektoru než dokonalý difuzor a reflexní faktor je pak větší než jedna. Následující vztah může být využit pro výpočet Φ_i , hodnoty Φ_{ref} jsou experimentálně zjištěny.

$$\Phi_{\text{ref}} = \frac{\Phi_i}{\pi} \quad (6)$$

2.6 BRDF

BRDF je obousměrná distribuční funkce odrazu (*Bidirectional reflectance distribution function*), pomocí které popisujeme odrazové vlastnosti materiálu [5]. Poskytuje úplný popis odraženého světla uvnitř celé polokoule, který obsahuje jak směr dopadu, tak směr pozorování [3]. BRDF je definována rovnicí (7) jako poměr spektrální záře $L_r(\theta_r, \varphi_r, \lambda)$ odražené od povrchu v určitém směru pohledu (θ_r, φ_r) ke spektrálnímu ozáření $E_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)$ na povrchu ve směru (θ_i, φ_i) .

$$BRDF(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{L_r(\theta_r, \varphi_r, \lambda)}{E_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)} \quad (7)$$



Obrázek 2.3: Geometrie pro definici BRDF

(adaptováno z [3])

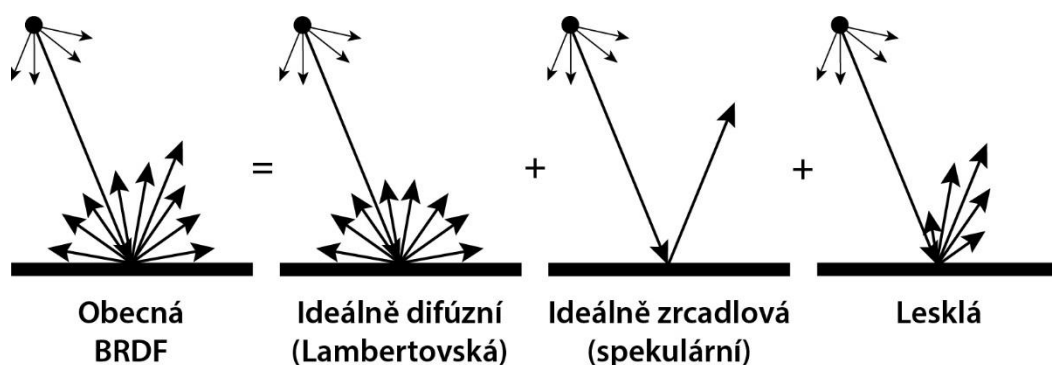
BRDF popisuje úplné optické chování povrchu a může být velmi zajímavá pro aplikace jako je kontrola kvality povrchu, vývoj materiálů a technologie nátěrů nebo realistické provedení simulace v počítačové grafice [3].

BRDF je funkce mnoha parametrů: čtyři úhly označující směr dopadu a směr pozorování, různé vlnové délky světla, polarizace, poloha na povrchu a tak dále. [10]. Není tedy možné vykreslit plnou BRDF pomocí 2D grafiky. Často je preferována 3D vizualizace pomocí softwaru.

2.6.1 Druhy BRDF

Na obrázku 2.4 jsou znázorněny části, na které můžeme BRDF rozdělit [5]:

- ideálně difúzní (Lambertovská), od neabsorbujícího Lambertovského reflektoru se světlo se stejnou pravděpodobností odrazí do všech směrů, protože nezávisí ani na směru osvětlení, tak na směru pozorování. Spektrální BRDF tedy závisí pouze na vlnové délce světla a měří se nejnádhěji [10].
- ideálně zrcadlová (spekulární)
- lesklá



Obrázek 2.4: Druhy BRDF
(adaptováno z [5])

2.6.2 Měření BRDF

BRDF lze experimentálně měřit pomocí gonio-spektrofotometru [3]. Měření spočívá v osvětlování vzorku a zaznamenávání odraženého světla pro všechny úhly polokoule, aby se znovu mohlo vytvořit úhlové rozložení odraženého světla. Dopadající světlo, většinou přivedené optickým vláknem, je kolimováno optickým systémem takovým způsobem, aby osvětlovalo vzorek rovnoběžnými paprsky [10]. V klasických konfiguracích umožňuje otočné rameno volit přesný směr osvětlení. Odražené světlo je zachyceno velmi malým prostorovým

úhlem optickým systémem umístěným na druhém otočném rameni. Světlo je poté přeneseno spektrofotometru. Spektrální měření se provádějí při různých pozicích detektoru, aby bylo možné snímat celou polokouli. Nevýhodou gonio-spektrofotometru jsou jeho velké rozměry a jeho křehkost, což omezuje jeho použití pro konkrétní aplikace v laboratoři. Další nevýhodou je náročnost tohoto měření na objem dat v závislosti na plánovaném úhlovém rozlišení.

2.6.3 Popis gonio-spektrofotometru

Jako příklad bude popsán goniometr OptiMines [3]. V tomto zdroji je navržen zajímavý přístup k měření povrchových dat BRDF v celém polokulovém poli současně založeném na polo-parabolickém zrcadle, mobilním laserovém zdroji, hranolovém děliči svazku světelných paprsků a plošném detektoru CCD. Úhlová distribuce odrazivosti povrchu v trojrozměrném prostoru je transformována na dvourozměrný planární obraz, který je zachycen CCD kamerou. Způsobem, jak zjednodušit nastavení, je uvažovat pouze odrazovou rovinu namísto celé odrazové polokoule, tato rovina totiž už obsahuje dostatek informací o chování povrchu při odrazu. Taková geometrická konfigurace byla vybrána Národním institutem pro standardy a technologie (NIST) pro jejich zařízení STARR. Osa osvětlení, osa detektoru a normálový vektor vzorku jsou v horizontální rovině, takže tento goniometr umožňuje pouze obousměrná měření v rovině. Aby bylo možné získat data z celé polokoule, je nejintuitivnější nastavení založeno na pevně uchyceném vzorku a mobilním zdroji světla a detektoru pohybujícím se nad pevně uchyceným vzorkem (pohyb umožňují dvě motorizovaná oblouková ramena pohybující se nad vzorkem). Jiné geometrické konfigurace pro sběr dat v celé polokouli jsou možné tam, kde se vzorek stává mobilním a detekční a osvětlovací zařízení mají méně stupňů volnosti.

Goniometr OptiMines se odlišuje od stávajících zařízení tím, že kombinuje mechanické a optické požadavky na charakterizaci opticky variabilních povrchů a malých rozměrů. Požadavek na vysokou směrovou přesnost je nezbytný pro opticky variabilní povrch. Směrová přesnost je dána jak mechanickou, tak optickou přesností. Mechanické přesnosti lze dosáhnout snadno použitím vysoce přesných polohovadel. Optická přesnost je parametr náročnější na osvojení. Optická přesnost je optimalizována minimalizací jak rozšiřování svazku dopadajícího světla, tak úhlového přijetí detektoru. Pro zlepšení směrové přesnosti je jedním z možných řešení zvýšení délky osvětlovacích a detekčních ramen, což vede k větším nástrojům, které jsou přijatelné pro laboratorní přístroje, ale ne pro komerční přístroje. Pro překonání tohoto problému je goniometr OptiMines vybaven speciální optikou na osvětlovacích a detekčních směrech, aby bylo možné získat zařízení velikosti stolu s dobrým spektrálním rozlišením a vysokou směrovou přesností.

Při konstrukci goniometru OptiMines jsou pohyby v rovině spojeny se světelným zdrojem a detektorem a pohyby mimo rovinu jsou spojeny se vzorkem. Světelný zdroj a ramena detektoru jsou namontovány v rovině xy a mohou se otáčet kolem osy z od -90 do 90° s rozlišením vyšším než $0,01^\circ$. Vzorek je umístěn ve středu zařízení a může se otáčet kolem své normálové osy (úhel α) a kolem osy x (úhel β). Úhly α a β se mohou měnit od 0 do 360° a od -90 do 90° jednotlivě s rozlišením $0,02^\circ$ resp. $0,01^\circ$. Díky těmto čtyřem pohybům jsou získány čtyři stupně volnosti potřebné pro snímání celé odrazné polokoule.

Nejběžnějším řešením pro generování polychromatického viditelného světla jsou obloukové a halogenové zdroje. Halogenový světelný zdroj (50 W žárovka) je vhodný pro svůj kontinuální výkon v oblasti viditelných vlnových délek a vynikající stabilitu. Stabilizovaný halogenový zdroj byl vybaven optickým křemičítým vláknem o průměru 1 mm. Toto vlákno má vysokou a nepřetržitou propustnost v oblasti viditelných vlnových délek a nabízí lepší rovnoměrnost ozáření světlem po kolimaci. Difuzér pro homogenizaci paprsku byl umístěn na výstupu osvětlovacího vlákna za účelem homogenizace světelného bodu. Světlo z optického vedení je kolimováno achromatickou čočkou s ohniskovou vzdáleností 20 mm a průměrem 12,5 mm. Za kolimační čočkou byla instalována telecentrická konfigurace. V telecentrické konfiguraci jsou paprsky vedoucí všemi body přes objekt nebo obraz paralelní s optickou osou. Tato vlastnost je zásadní, protože řídí rozšiřování svazku paprsků a zaručuje, že směr dopadajícího paprsku bude stejný pro všechny body povrchu. Telecentrická konfigurace se provádí dvěma čočkami a clonou A (200 μm dírka) umístěnou v jejich společné ohniskové rovině.

Světlo odražené od povrchu vzorku je nasměrováno do detektoru pomocí achromatické sběrné čočky (L_d) následované vedením svazku vláken. Tento svazek vláken vede světlo ke vstupu do detekčního systému. Detekovaná plocha povrchu vzorku je definována průměrem clony (zde 2 mm) umístěného před čočkou L_d . Takže pozorovaná oblast při normálové detekci je kruh o průměru 2 mm a pro detekci při jiném úhlu θ_r je to elipsa s hlavní osou $2/\cos(\theta_r)$. Detekční oblast musí být menší než osvětlená plocha. Pro omezení slepého úhlu je výhodné použít malé prvky (okolo 10° pro tuto konfiguraci).

Detekční systém goniometru OptiMines je Maya2000 Pro Spektrometr. Je vybaven množstvím CCD čipů o 2048×64 pixelů se stranou 14 μm . Tento dvourozměrný CCD je používán jako 1D pole (tj. všechny řádky na čipu se sčítají). Tento detektor nabízí 75% kvantovou účinnost v rozsahu viditelných vlnových délek. Šířka vstupního štěrbinu udává spektrální rozlišení spektrometru. Pro zajištění lepšího vystavení pixelů CCD matice bez snížení spektrálního rozlišení je výhodný pravoúhlý vstup i výstup vláken detektoru. Na druhou stranu je důležité mít kruhový vstup svazku vláken, jehož průměr určuje přijetí úhlu detektorem.

Pokud není vstup do svazku vláken kruhový, pak by přijetí úhlu detektorem nebylo na různých směrech roviny xy stejné.

Požadavky, které vedly k návrhu goniometru OptiMines, byly vysoká směrová přesnost a rozměry zařízení.

2.7 Přístupy k měření

Kompletní postup od měření zářivého toku k souřadnicím CIEL*a*b* lze shrnout do tří následujících kroků:

1. měření:

- s použitím kolimovaného světla a gonio-spektrofotometru se při vysokém úhlovém rozlišení změří zářivý tok odražený vzorkem a dokonalým bílým difuzorem (slouží jako referenční hodnoty)
- naměřený zářivý tok odražený vzorkem se vydělí zářivým tokem odraženým bílým standardem a získá se tak reflexní faktor

2. podvzorkování:

- slouží k převodu vypočítaného reflexního faktoru do kartézských souřadnic a poté do barevných souřadnic CIEL*a*b*
- zvolí se 2° nebo 10° standardní pozorovatel
- znovu se vypočítá reflexní faktor z kroku 1., nyní ale se vzorkovací frekvencí odpovídající zvolenému úhlu pozorování

3. kolorimetrie:

- výpočet barevných souřadnic

Tento obecný postup musí být v praxi modifikován, protože v současné době zařízení zřídka dosahuje tak vysokého úhlového rozlišení a dostatečného spektrálního rozlišení pro kolorimetrické výpočty.

3 Experimentální část

3.1 Vzorky

Pro goniospektrometrické měření byly připraveny čtyři sady vzorků – každá sada vznikla použitím jiného perlescentního pigmentu. Všechny sady se skládají z azurové, purpurové, žluté, černé a bílé barvy podkladu (barva substrátu).

3.1.1 Použité materiály a přístroje

Barevné podklady byly vytištěny na stroji Konica Minolta AccurioPress C3070. Vzorky byly vytištěny na leskle natíraný papír MultiArt Gloss o plošné hmotnosti 150 gm^{-2} , výrobcem je firma Stora Enso Oulu Mill. Použity byly perlescentní pigmenty firmy MERCK: Iriodin Pearlets® Fine Green W, Iriodin® 507 Scarab Red, Iriodin Pearlprint® Litho Red S a Iriodin Pearlprint® Litho White. Perlescentní pigmenty byly dispergovány v disperzním laku s označením TerraWet lesklý lak G9/703 od firmy ACTEGA Coatings & Sealants. Perlescentní nátěry byly na substrát nanášeny pomocí stroje Elcometer, do kterého se vložila spirálová nanášecí tyčinka o šířce 140 mm. Nátěry byly nanášeny v tloušťce 8 μm .

3.1.2 Příprava vzorků

Na leskle natíraný papír byly natištěny všechny čtyři procesní barvy CMYK v pruzích o šířce 3 cm, potištěno bylo přibližně dvacet archů. Poté byly připraveny čtyři vzorky perlescentních nátěrů, smícháním pigmentu s disperzním lakem. Všechny pigmenty byly ve formě prášku, jen Iriodin Pearlets® Fine Green W byl ve formě kuliček o průměru pár milimetrů. Bylo nutné stanovit optimální koncentraci nátěru, rychlost nanášení a také optimální hloubku drážek ve spirále, kterou je ovlivněna tloušťka naneseného filmu. Nejprve byl připraven vzorek nátěru o koncentraci 20 hm. %, byl nanášen spirálou s drážkami s hloubkou 8 a 10 μm , rychlost nanášení byla nastavena na hodnotu 10. Po nanesení bylo zjištěno, že je nátěr příliš koncentrovaný, proto byly připraveny vzorky o koncentraci 10 a 5 hm. %. Nanášeny byly za použití spirály s drážkami s hloubkou 4 a 8 μm , u nátěru s koncentrací 10 hm. % a použití spirály s hloubkou drážek 8 μm byla rychlost snížena z hodnoty 10 na 8. Optimální hodnoty pro jednotlivé pigmenty jsou uvedeny v Tabulce 1.

Vzorky byly sušeny při pokojové teplotě. Poté byly nařezány na obdélníky o rozměru $3 \times 4 \text{ cm}$.

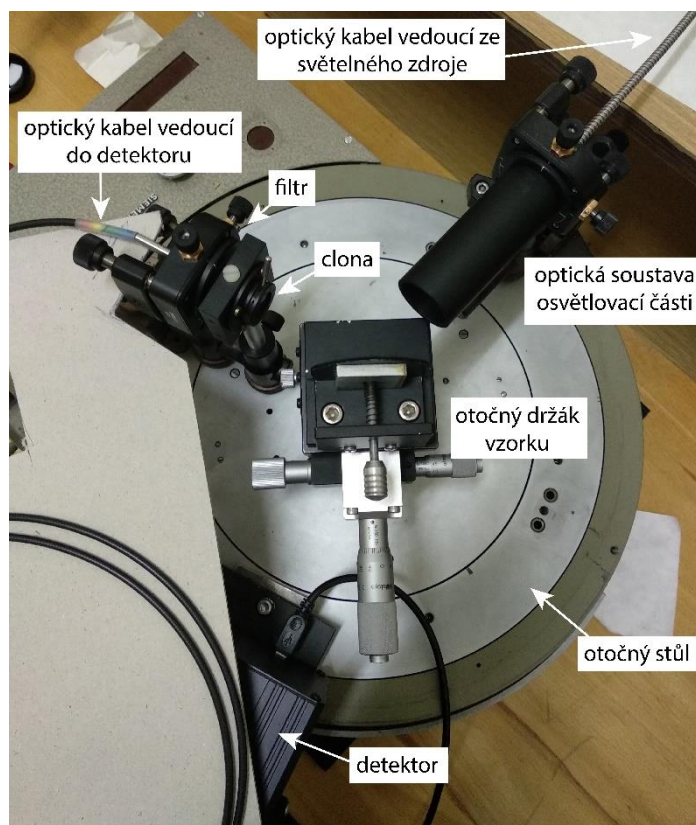
Tabulka 3.1.1: Hodnoty koncentrace, rychlosti nanášení a hloubky drážek spirály pro jednotlivé pigmenty

typ pigmentu	koncentrace [hm. %]	rychlost nanášení	hloubka drážek spirály [μm]
Green	10	7	8
Scarab Red	10	7	8
Litho Red	10	8	8
Litho White	10	8	8

3.2 Gonio-spektrofotometr

Pro hodnocení perlescentních nátěrů byl využit gonio-spektrofotometr, který byl na KPF sestaven již dříve pro účely jiné práce [14]. Na tomto gonio-spektrofotometru byly ovšem provedeny jisté modifikace týkající se především výměny zdroje záření a nastavení fixní relativní pozice spektrofotometru s připojeným optickým vláknem.

Gonio-spektrofotometr je zařízení skládající se ze tří hlavních částí, kterými jsou osvětlovací a detekční část a držák vzorku. Pro toto měření byla vyhodnocena jako nejvýhodnější konfigurace, ve které je světelný zdroj i otočný držák vzorku pevně zafixován v jedné poloze a mobilní je pouze detektor.



Obrázek 3.1: Části gonio-spektrofotometru

3.2.1 Části gonio-spektrofotometru

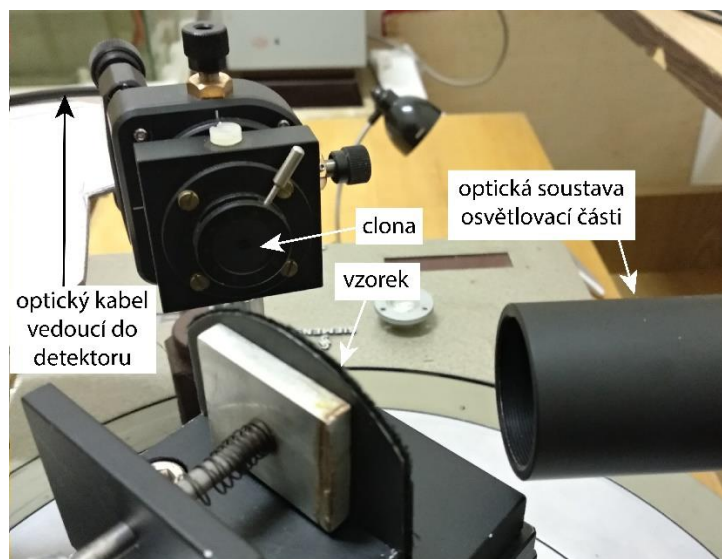
Všechny tři hlavní části gonio-spektrofotometru jsou upevněny na otočném stolku SIEMENS, který původně nesl rentgenový difraktometr. Důvodem využití tohoto stolku je možnost pohybovat s každou částí aparatury nezávisle na ostatních. Uprostřed stolku je umístěn držák vzorku, který je možno otáčet kolem vlastní osy, dále je možné ho vychylovat pomocí polohovadel, každé polohovadlo má vlastní úhlovou stupnici. Optická soustava osvětlovací části je umístěna na okraji stolku a nelze s ní pohybovat. Detektor je umístěn na pohyblivém prstenci stolku, lze s ním pohybovat okolo vzorku pomocí ručního pohonu. Na stolku je umístěn odečítač stupňů natočení tohoto prstence. Detektor je připojen k počítači, kde se pomocí softwaru zobrazuje snímání signál.

3.2.1.1 Osvětlovací část

Osvětlovací část se skládá ze světelného zdroje, optického vlákna a optické soustavy. Optické vlákno s průměrem 1 mm nese signál ze zdroje do kolimační soustavy. Světelný zdroj je od firmy THORLABS s označením SLS201L(/M). Je to stabilní halogenový světelný zdroj, s rozsahem vlnových délek 360 až 2600 nm, obsahuje žárovku s výkonem 9 W. Světelný paprsek procházel před vstupem do světelného vlákna Daylight filtrem. Výrobce udává, že by se výkon během hodiny mohl změnit o 0,01 %. U optického vlákna je důležité zajistit jeho stabilní polohu bez možnosti pohybu, což bylo zajištěno umístěním světelného zdroje dostatečně daleko od otočného stolku tak, aby bylo vlákno napnuté. Jak bylo uvedeno výše, optická soustava osvětlovací části je pevně zafixována na okraji otočného stolku tak, aby nebyl možný žádný pohyb. Úkolem optické soustavy je přivést na vzorek kolimovaný a co nejméně divergentní světelný paprsek. Optická soustava se skládá z kolimační čočky (L1), která je umístěna hned u vstupu optického vlákna, za ní je umístěna telecentrická konfigurace, která se skládá ze dvou čoček (L2 a L3) a clony (A) umístěné v jejich společné ohniskové rovině.

3.2.1.2 Držák vzorku

Otočný držák nesoucí vzorek je umístěn uprostřed stolku. Na vzorek dopadá světlo z optické soustavy osvětlovací části a světlo odražené od vzorku je snímáno detektorem. U držáku vzorku je možná rotace kolem vlastní osy, k odečítání stupňů slouží stupnice umístěná ve spodní části, dále lze nastavit výšku držáku. Na vzorek dopadá světelný paprsek pod úhlem 45°, tento úhel je zachován během celého měření, výška umístění vzorku byla nastavena při kalibraci. Část vzorku, která bude osvětlena je dána černým plíškem s půlkruhovým vykrojením.



Obrázek 3.2: Detail upevnění vzorku a clony před optickým kabelem vedoucím do detektoru

3.2.1.3 Detekční část

Zářivý tok odražený od povrchu vzorku je nasměrován do detektoru, v tomto případě je detektorem spektrofotometr BLACK-Comet firmy StellarNet. Tento spektrofotometr snímá vlnové délky v rozsahu 190 až 850 nm. Odražený zářivý tok prochází clonou umístěnou před spektrofotometrem a dále je pomocí optického kabelu s průměrem 0,6 mm a kolimační čočkou od stejného výrobce signál veden do spektrofotometru. Detekovaná plocha povrchu vzorku je definována průměrem clony, který je 3 mm. Stejně jako u osvětlovací části i zde během měření nesmí docházet k posunutí optického kabelu, proto je zafixován pomocí desky z lepenky, aby byla jeho poloha při pohybu spektrofotometru stabilní. Spektrofotometr je propojen s počítačem a v programu SpektraWiz Shortcut dochází k vykreslení závislosti zářivého toku na vlnové délce.

3.2.2 Kalibrace gonio-spektrofotometru

Než započne samotné měření připravených vzorků, je nutné provést mechanickou kalibraci gonio-spektrofotometru. Kalibrují se všechny tři hlavní části gonio-spektrofotometru, nejprve optická soustava osvětlovací části, poté clona před detektorem a samotný detektor a na konec držák vzorku. Kalibrace je nutná z toho důvodu, aby signál procházející všemi částmi aparatury neubýval na intenzitě a docházelo k co možná nejmenšímu šumu.

Mechanická kalibrace

Optická soustava osvětlovací části byla nastavena pomocí vodováhy do polohy rovnoběžné s otočným stolek. Toto první nastavení je velice důležité, protože se od něho odvíjí všechny

následující kroky kalibrace. Pro přesnost měření je důležité, aby světlo z optické soustavy dopadalo kolmo na povrch vzorku, a každá část vzorku tak byla osvětlena se stejnou intenzitou.

Další nastavovanou částí byla clona umístěná před detektorem, která byla nastavována podle optické soustavy světelného zdroje. Nejprve byla nastavena poloha ramene, na kterém jsou upevněny jak clona, tak detektor, do polohy 0° . Dále byla nastavena výška clony tak, aby se štěrbina clony nacházela ve středu „obrazu“ světelného svazku. Clona byla k rameni upevněna pomocí šroubů. Důležité je, aby světelný svazek dopadal kolmo na clonu.

Dále byl nastaven už samotný detektor, který byl nastavován stejným způsobem jako clona. Opět bylo cílem kalibrace umístit kondenzor detektoru do středu „obrazu“ světelného svazku. Byla tak nastavena výška detektoru a poté se detektor pomocí šroubů upevnil k již nastavenému rameni nesoucímu clonu. Poté bylo nastaveno vychýlení detektoru, k čemuž byl využit program SpektraWiz Shortcut, ve kterém byla sledována intenzita zářivého toku měnící se v závislosti na stupni vychýlení. Detektor byl zafixován pomocí šroubů v poloze, ve které byla zjištěna nejvyšší intenzita zářivého toku.

Posledním nastavovaným prvkem byl otočný držák vzorku, který byl nastavován jak podle optické soustavy osvětlovací části, tak podle detektoru. Nejprve byl držák nastaven do polohy 0° , v této poloze zářivý tok dopadá kolmo na povrch vzorku. Výška držáku byla nastavena tak, aby se kruhová plocha zářivého toku promítaná na držák shodovala s půlkruhovým vykrojením vymezení plíšku. Po tomto základním nastavení bylo do držáku umístěno zrcátko a poloha držáku byla upravena podle odrazu tak, aby zrcátko odráželo veškerý zářivý tok zpět do optické soustavy světelného zdroje. Tímto byla upravena konečná nulová poloha otočného držáku vzorku, držák byl upevněn pomocí šroubů. Dále bylo nutné zajistit, aby při změně úhlu dopadu záření na vzorek byl vzorek vždy ve středu zářivého toku, toho bylo docíleno nastavením pomocí mikrošroubů.

Po nastavení všech tří prvků bylo nutné provést zkoušku jejich kompatibility. V držáku vzorku bylo ponecháno zrcátko a byly nastavovány různé úhly dopadu pomocí natočení držáku vzorku, tak různé úhly odrazu pomocí posunu detektoru. V programu SpektraWiz Shortcut byla kontrolována intenzita zářivého toku dopadajícího na detektor. Podmínkou bylo, aby byla při spekulárním odrazu detekovaná maximální intenzita zářivého toku. Při kontrole kompatibility bylo zjištěno, že maximální intenzita zářivého toku pro různé úhly je vždy naměřena v poloze o 1° vyšší, než je spekulární úhel. Protože byla všechna měření prováděna při úhlu dopadu $\theta_i = 45^\circ$, byla tato chyba započítána a otočný držák vzorku byl nastaven do polohy 46° .

Všechny části gonio-spektrofotometru byly během kalibrace upevňovány pomocí šroubů, což způsobilo při dotažení posun prvku. Velikost posunutí se dala odhadnout a bylo možné tedy

prvek před samotným utažením ještě posunout o tuto hodnotu, aby se po utažení prvek skutečně dostal do požadované polohy. Z tohoto důvodu může být měření zatíženo nepřesností optické soustavy, zejména prvků, kterými bylo prováděno dotažení držáků. Jediný prvek, který je opatřen stupnicí je otočný držák vzorku, kde lze otočení nastavit o přesný počet stupňů a dále je tento držák opatřen mikrošrouby, které mají opět každý vlastní stupnici.

Nastavení parametrů v programu SpektraWiz Shortcut

Před samotným měřením je kromě kalibrace nutné provést nastavení v programu SpektraWiz Shortcut, konkrétně se jedná o tyto tři parametry:

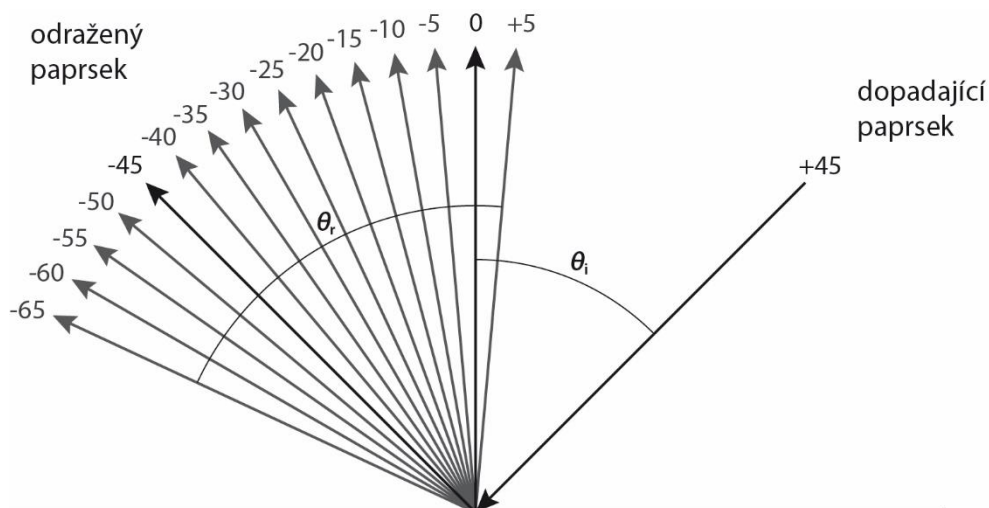
- *Detector integration time* na hodnotu 150 ms (integrační čas ovlivňuje sílu signálu)
- *Number of Scans to Average* na hodnotu 10 (toto číslo udává počet spekter, ze kterých je průměrován výsledný signál, což ovlivňuje šum signálu)
- *XTiming resolution control* na hodnotu 3-high (tento parametr ovlivňuje kvalitu a sílu signálu)

Hodnoty jednotlivých parametrů byly zvoleny na základě pozorování změny intenzity a kvality snímaného signálu při změnách hodnot těchto parametrů. Při nastavení výše uvedených hodnot u již zmíněných parametrů, bylo dosaženo nejsilnějšího a nejkvalitnějšího signálu při relativně krátké době záznamu. Tyto hodnoty zůstaly neměnné po celou dobu měření pro všechny vzorky. Dále byl nastaven rozsah snímaných vlnových délek na 380 až 740 nm s krokem 5 nm.

3.3 Měření tištěných vzorků

Před samotným měřením připravených vzorků byla proměřena stabilita světelného zdroje. Po dobu 210 minut byl snímán signál v intervalu deseti minut. Snímaný signál byl odražen od bílého difúzního standardu, který byl umístěn v držáku vzorků.

Všechny čtyři sady tištěných vzorků byly osvětlovány a snímány pod stejnými úhly během celého měření. Úhel dopadu světla $\theta_i = 45^\circ$, tento úhel zůstal zachován pro veškerá měření (Obrázek 3.3.1). Úhly odrazu byly vymezeny na základě pohybu detektoru kolem vzorku, aniž by došlo ke kontaktu s optickou soustavou osvětlovací části gonio-spektrofotometru. Světlo odražené od vzorku bylo snímáno v rozpětí úhlů $\theta_r = +5^\circ$ až -65° . Kladné znaménko mají úhly napravo od normály, záporné znaménko pak mají úhly nalevo od normály.



Obrázek 3.3: Schéma znázorňující úhel dopadu světla a snímané úhly odrazu světla

Proměřen byl každý vzorek všech čtyř sad, celkem bylo tedy proměřeno 20 vzorků. Dále byl proměřen bílý difúzní standard Spectralon®, který v tomto měření sloužil k získání referenčních hodnot. Bílý difúzní standard byl proměřen třikrát s každou sadou (aby bylo získáno dostatečné množství dat pro následné zpracování), vždy ve stejných úhlech jako vzorky. Dále byl Spectralon® měřený s ohledem na stabilitu zdroje (viz kapitola 4.1). Pořadí měření bylo následující: bílý standard, vzorek pigmentu na černém a bílém podkladu, bílý standard, vzorek pigmentu na azurovém, purpurovém a žlutém podkladu a na konec opět bílý standard. Naměřené hodnoty intenzit byly z programu SpektraWiz Shortcut importovány a dále zpracovávány v programu Microsoft Excel.

Aby byly výsledky měření co nejpřesnější, pomocí interpolace byly dopočítány aktuální hodnoty bílých standardů v časech, ve kterých byly proměřovány samotné vzorky. Tok Φ odražený od bílého standardu v čase t , kdy byl měřen vlastní barevný vzorek se vypočítá podle rovnice:

$$\Phi = \Phi_0 + \frac{\Phi_1 - \Phi_0}{t_1 - t_0} \cdot (t - t_0), \quad (8)$$

kde Φ_0 je hodnota toku odraženého od bílého standardu před proměřením vlastního vzorku, Φ_1 je hodnota toku odraženého od bílého standardu po proměřením vlastního vzorku, t_0 je čas, při kterém byla naměřena hodnota Φ_0 a t_1 je čas, při kterém byla naměřena hodnota Φ_1 .

Dále byla pomocí kombinace rovnic (4) a (6) vypočítána reflektance vzorku pro zvolený úhel odrazu.

$$R = \frac{\Phi}{\Phi_{\text{ref}} \cdot \pi} \quad (9)$$

3.3.1 Hodnoty CIE L*a*b*

Barva je vizuálním atributem, jehož mechanismus vnímání lidského vizuálního systému byl nejlépe charakterizován Komisí Internationale de l'Eclairage (CIE) během 20. století [1]. Každá barva je reprezentována trichromatickými hodnotami X , Y a Z definovanými z funkcí CIE odpovídajících barev standardního pozorovatele. Ze získané reflektance pak byly vypočteny trichromatické hodnoty X , Y a Z podle vztahu [8]:

$$X = k \sum_{\lambda=380}^{\lambda=740} M_e(\lambda)R(\lambda)\bar{x}(\lambda) \quad (10)$$

$$Y = k \sum_{\lambda=380}^{\lambda=740} M_e(\lambda)R(\lambda)\bar{y}(\lambda) \quad (11)$$

$$Z = k \sum_{\lambda=380}^{\lambda=740} M_e(\lambda)R(\lambda)\bar{z}(\lambda) \quad (12)$$

K je konstanta, která zajišťuje, aby se trichromatická hodnota Y rovnala stu, $M_e(\lambda)$ označuje osvětlení, v tomto případě je použit zdroj D50, hodnota reflektance $R(\lambda)$ se mění v závislosti na naměřených datech a $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ označují trichromatické funkce pro 2° pozorovatele [12]. Data pro zdroj D50 jsou dostupná z: CIE Standard Illuminant Data [12] a pro 2° pozorovatele jsou data dostupná z: CIE Standard Colorimetric Observer Data [13].

Z těchto hodnot jsou poté vypočítány jednotlivé souřadnice $L^*a^*b^*$. Pro komplexnost tohoto výpočtu nejsou uvedeny rovnice. Výpočty byly provedeny dle rovnic [13].

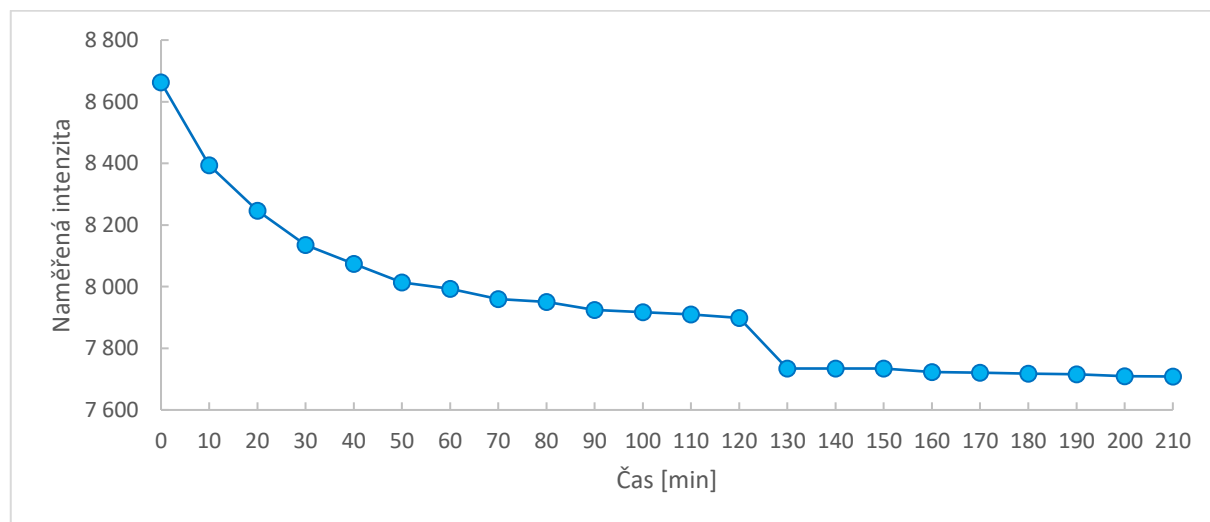
Při promítání barvového prostoru CIELAB do dvourozměrného prostoru se na ose a v kladné části nachází červená, v záporné části zelená. Na ose b se v kladné části nachází žlutá, v záporné modrá. V průsečíku os a a b se nacházejí barvy achromatické. Osa L je kolmá na rovinu, ve které se nacházejí osy a a b a prochází jejich průsečíkem. L^* (*Lightness*) značí měrnou světlost, čím je hodnota L^* větší, tím je barva světlejší.

4 Výsledky a diskuze

V této kapitole jsou uvedeny výsledky měření perlescentních nátěrů pomocí gonio-spektrofotometrické aparatury. V obrázku 4.2–4.6 jsou uvedeny souřadnice a^*b^* a v obrázku 4.7–4.11 jsou uvedeny souřadnice L^*a^* prostoru CIELAB, v těchto obrázcích jsou uvedeny výsledné hodnoty všech měřených pigmentů na všech podkladech.

4.1 Stálost zdroje

Stabilita světelného zdroje výrazně ovlivňuje naměřené hodnoty, proto byla před vlastním měřením vzorků stabilita světelného zdroje firmy THORLABS s označením SLS201L(/M) proměřena. Měření probíhalo pro vlnovou délku 565 nm a bylo provedeno pomocí Spektralonu. Z naměřených dat vyplývá (Obrázek 4.1), že světelný zdroj není tak stabilní, jak uvádí výrobce. Během první hodiny po zapnutí zdroje intenzita výrazně klesá. Intenzita dále klesá i během druhé hodiny, pokles však není tolik výrazný. K ustálení intenzity dochází až po dvou hodinách od zapnutí světelného zdroje. Proto bylo nutné světelný zdroj včetně celé aparatury zapnout dvě hodiny před samotným měřením, aby během měření nedocházelo k tak výraznému kolísání intenzity zdroje a tím pádem i ke zkreslení naměřených dat. Náhlý skok závislosti viditelný mezi 120. a 130. minutou měření byl zřejmě způsoben poklesem napětí v síti.



Obrázek 4.1: Závislost intenzity světelného zdroje gonio-spektrofotometru na čase.

Měřeno pro vlnovou délku 565 nm, což je lokální maximum závislosti ve všech měřených časech

4.2 Vyhodnocení v barvovém prostoru CIELAB

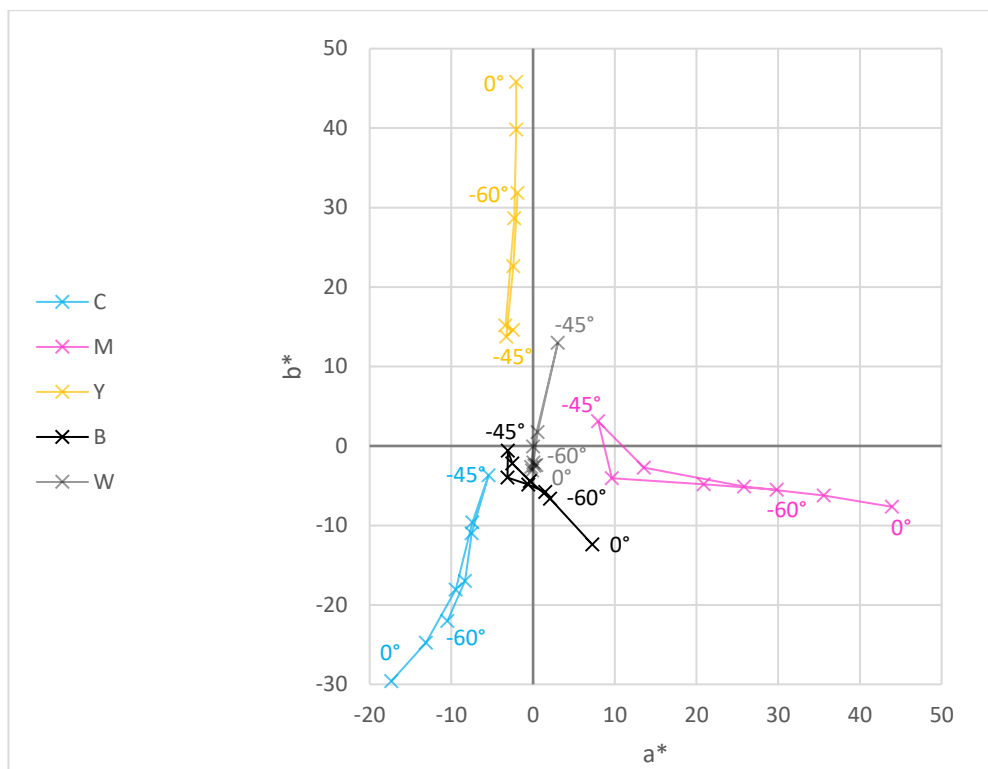
4.2.1 Závislost hodnot a^*b^*

Při porovnání naměřených hodnot barev bez perslescentních pigmentů (Obr. 4.2) a s nimi (Obr. 4.3–4.6) vidíme, že barvy s nanesenými perlescentními pigmenty zabírají lehce menší gamut než samotné barvy. V obrázku 4.2, kde jsou uvedeny procesní barvy, bylo měření provedeno pro menší rozpětí úhlů než pro vzorky s perslescentními pigmenty (Obr. 4.3–4.6). Všechny hodnoty vzorků s nanesenými perlescentními pigmenty jsou posunuté blíže nespektrálním barvám oproti barvám bez perlescentních pigmentů, především hodnoty naměřené při spekulárním úhlu.

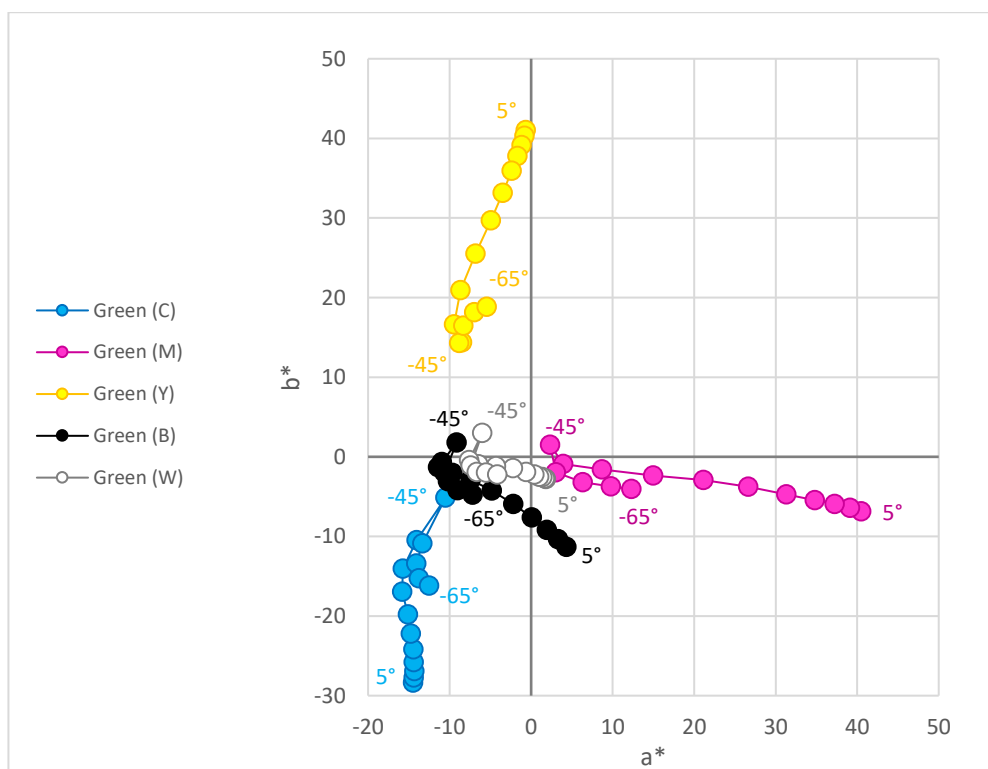
Z naměřených hodnot jednotlivých pigmentů na různých podkladech (Obrázky 4.3–4.6) v barvovém prostoru CIE a^*b^* lze vyčíst, že barva podkladu se nejvíce projeví v úhlech vzdálených od spekulárního úhlu. Čím blíže spekulárnímu úhlu se nacházíme, tím více se projeví vliv lesku, dochází ale i k mírným posunům způsobených perlescentním pigmentem. Změna barevnosti způsobená perlescentním pigmentem je nejvýraznější u pigmentu Litho red. V úhlech detekce kolem 30° se projeví jak barva podkladu, tak barva perlescentních pigmentů. V blízkosti průsečíku osy a a b se nacházejí nepestré barvy.

Perleťové interferenční pigmenty odrážejí pouze část světla zrcadlově [2]. Část, která není odražena se láme do další vrstvy, kde dochází k dalšímu lomu a odrazu. Barva odrazu perleťové interferenční složky je pozorována v úhlech blízkých spekulárnímu úhlu.

Hodnoty naměřené při spekulárním úhlu se jeví spíše jako málo chromatické barvy, což je způsobeno tím, že více než barva se při spekulárním odrazu projevuje lesk podkladové vrstvy. Lesk je vnímáný relativní jas zrcadlově a difúzně odrážejících oblastí (geometrie $45^\circ/45^\circ$ resp. $45^\circ/0^\circ$). V případě barevných objektů je obtížné z optického měření oddělit lesklou složku od interferenční.

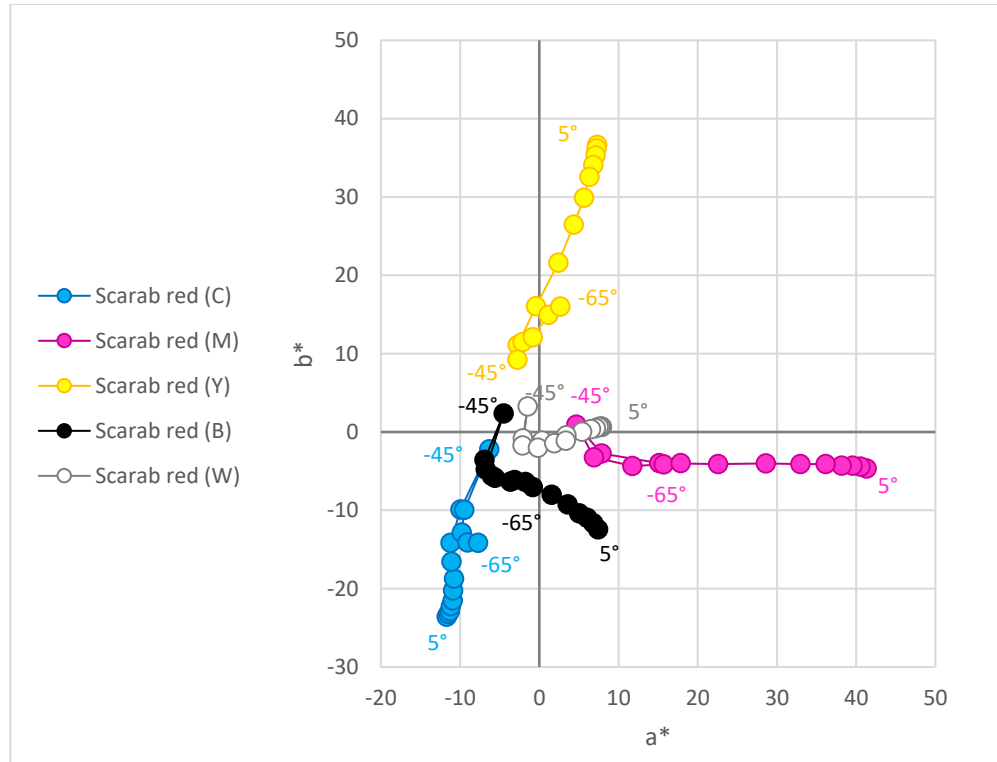


Obrázek 4.2: Rozložení naměřených hodnot barev C, M, Y, B a W v barvovém prostoru CIE a^*b^* pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce 0° až -60°



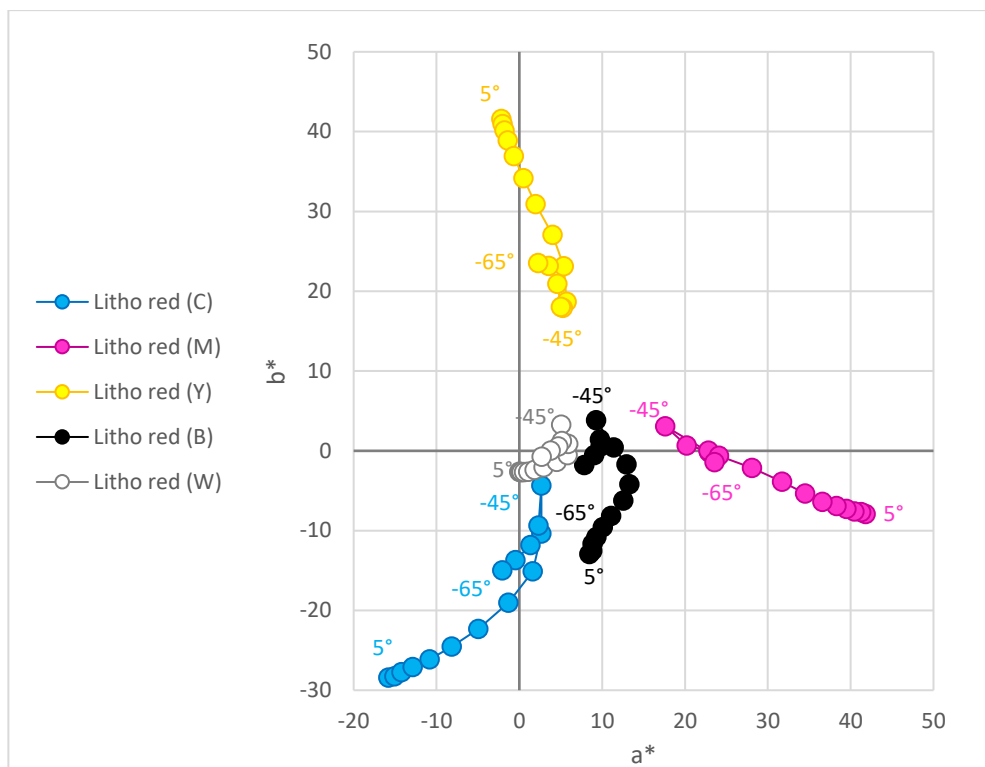
Obrázek 4.3: Rozložení naměřených hodnot perlescentního pigmentu Green na různých podkladech v barvovém prostoru CIE a^*b^* pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -65°

U pigmentu Green (Obrázek 4.3) je pigmentem nejvíce ovlivněna barva snímaná při spekulárním odrazu, barvy jsou posunuty více do zelené oblasti (vzhledem k obrázku 4.2). Barvy snímané při jiných úhlech jsou ovlivněny především odstínem podkladu.



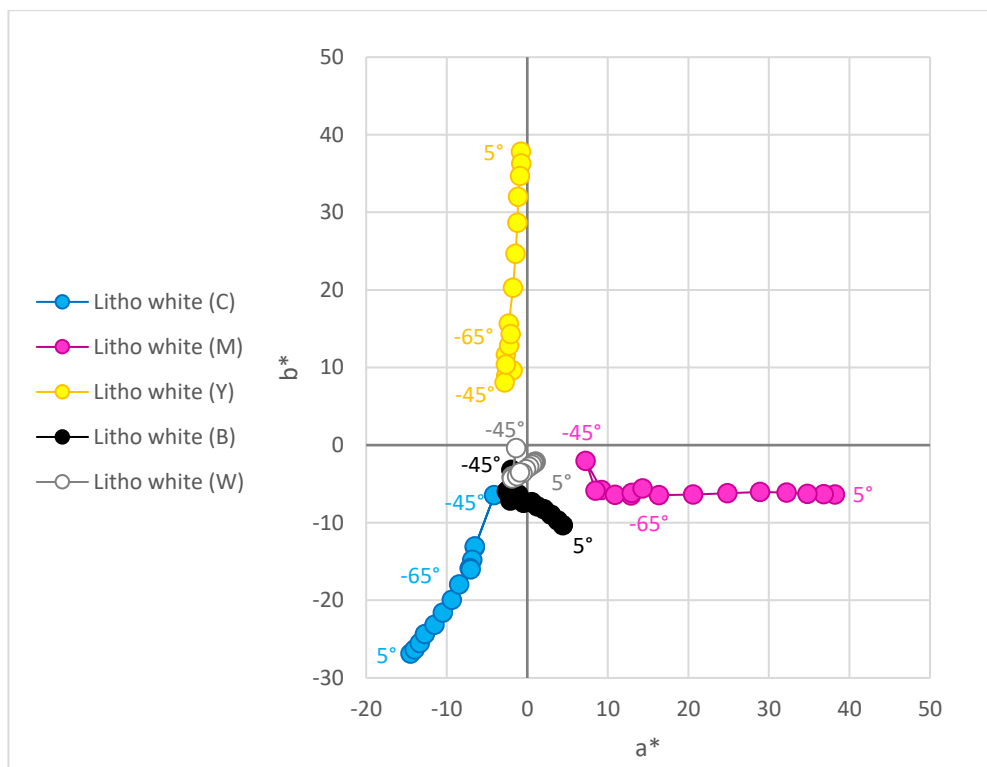
Obrázek 4.4: Rozložení naměřených hodnot perlescentního pigmentu Scarab red na různých podkladech v barvovém prostoru CIE a^*b^* pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -65°

Pigment Scarab red (Obrázek 4.4) způsobil nejvýraznější změnu odstínů všech natištěných podkladů pozorovanou pouhým okem. Proto nanesení pigmentu způsobilo nejvýraznější změny barvy v celém rozsahu úhlů u všech barev kromě purpurové. Vidíme, že hodnoty naměřené při všech úhlech detekce jsou posunuty směrem k červené oblasti (kromě purpurové). Tímto se pigment Scarab red liší od ostatních použitých pigmentů.



Obrázek 4.5: Rozložení naměřených hodnot perlescentního pigmentu Litho red na různých podkladech v barvovém prostoru CIE a^*b^* pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -65°

U pigmentu Litho red (Obrázek 4.5) je barva snímaná při spekulárním odrazu ovlivněna barvou pigmentu, a proto je barva posunuta více do červené oblasti. Na barvu viděnou při úhlech daleko od spekulárního pigment Litho red nemá až takový vliv.



Obrázek 4.6: Rozložení naměřených hodnot perlescentního pigmentu Litho white na různých podkladech v barvovém prostoru CIE a^*b^* pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -65°

Na obrázku 4.6 můžeme pozorovat, že pigment Litho white barvu měřenou při úhlech daleko od spekulárního ovlivňuje minimálně, zatímco při spekulárním odrazu jsou odstíny všech barev posunuty více do modré oblasti. Výjimkou je žlutá barva, u které můžeme pozorovat posun po ose b^* k nižším hodnotám, tedy směrem k modré oblasti, i u úhlů daleko od spekulárního.

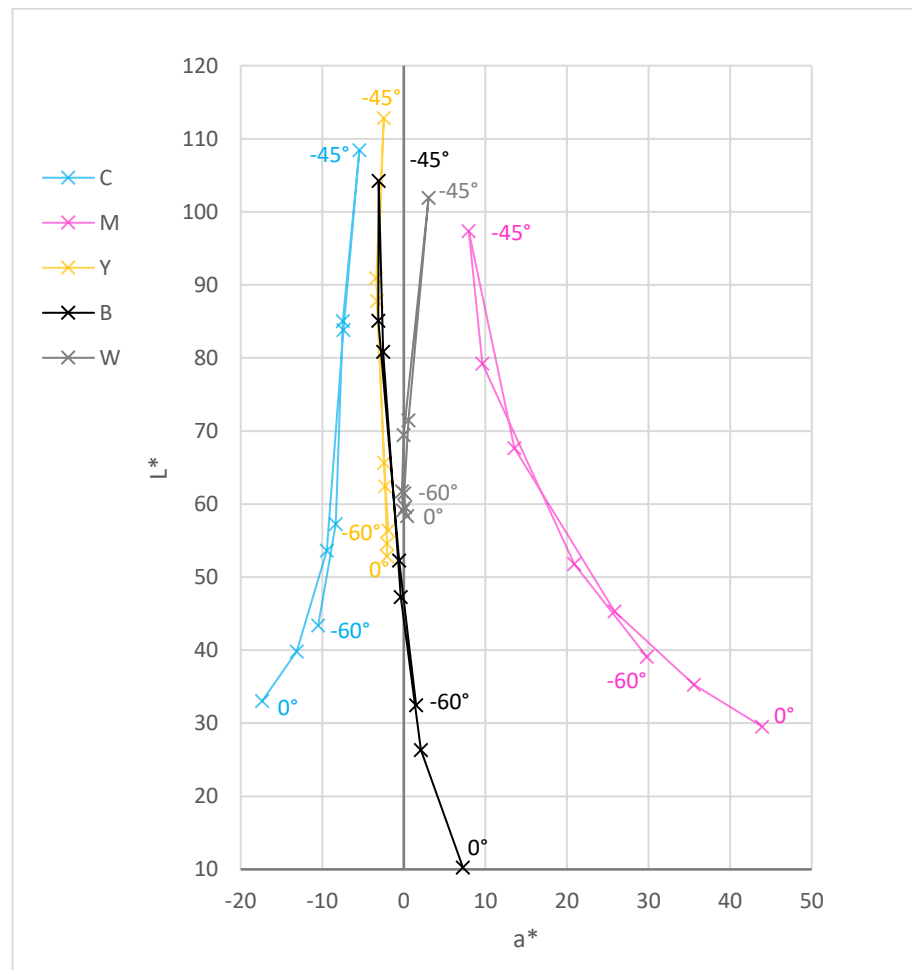
4.2.2 Závislost hodnot L^*a^*

V obrázku 4.7, kde jsou uvedeny procesní barvy bez naneseného perlescentního pigmentu, bylo měření provedeno pro menší rozpětí úhlů než pro vzorky s perslescentními pigmenty (Obr. 4.8–4.11). Jak již bylo zmíněno výše, hodnoty vzorků s nanesenými perlescentními pigmenty jsou posunuté blíže nespektrálním barvám (Obrázek 4.8–4.11).

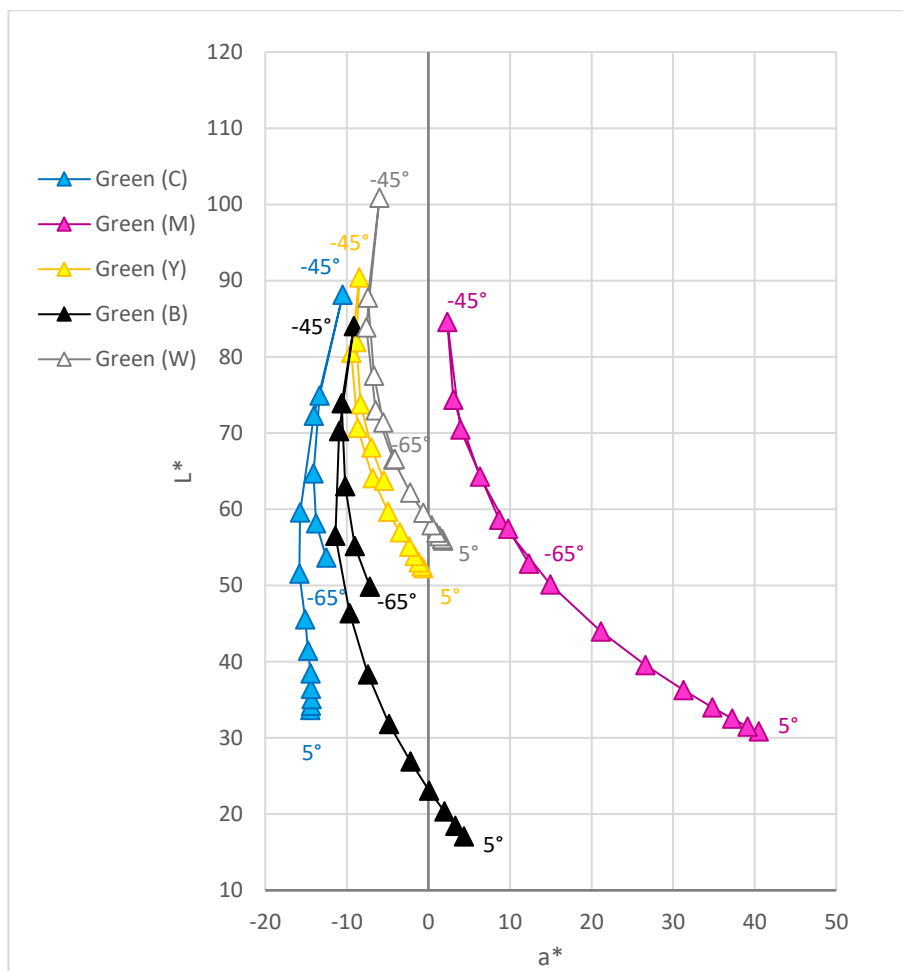
Nejvyšších hodnot L^* je dosaženo při spekulárním odrazu, pro tuto geometrii tedy při úhlu pozorování -45° , při tomto úhlu pozorování se tedy barvy jeví jako nejsvětější. Nejvyšších hodnot L^* ($\theta_r = 45^\circ$) dosahuje bílá a žlutá, žlutá barva bez použití perlescentního pigmentu a s použitím pigmentu Litho red, bílá barva při použití pigmentů Scarab red, Litho white a Green. Purpurová barva dosahuje mírně nižších hodnot L^* než azurová barva, což platí pro všechny druhy perlescentních pigmentů. Největší rozsah hodnot L^* má černá barva, která také dosahuje nejnižších hodnot L^* ze všech vzorků (při úhlech daleko od spekulárního odrazu).

Vůbec nejnižší hodnoty L^* je dosaženo u černé barvy bez naneseného perlescentního pigmentu, je to způsobeno tím, že černá barva bez perlescentních pigmentů absorbuje více záření.

Porovnání hodnot mezi nenalakovanými vzorky (Obr. 4.7) a vzorky s perlescentním nátěrem (Obr. 4.8–4.11) je ztíženo faktem, že hodnota měrné světlosti L^* pro nenatírané vzorky dosahuje hodnot značně přes 100. Proto nejsme schopni jednoznačně určit, jestli opravdu u vzorků s perlescentním nátěrem dochází k poklesu lesku nebo nikoliv.

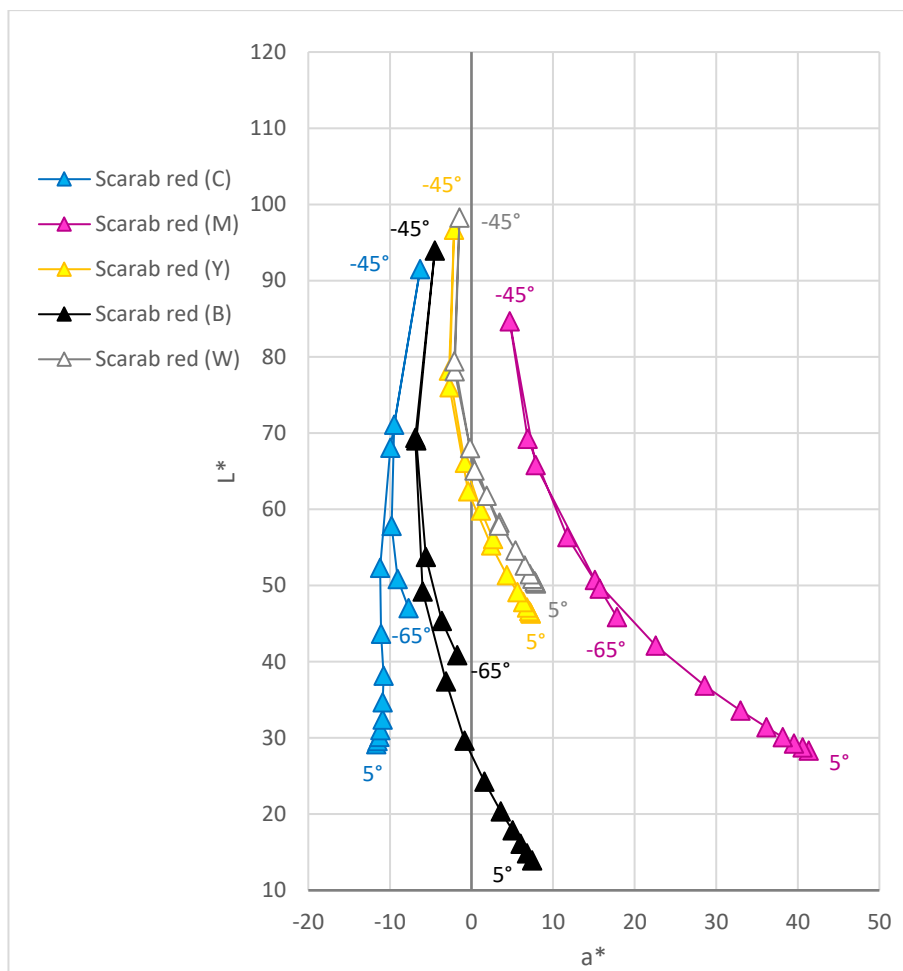


Obrázek 4.7: Rozložení naměřených hodnot barev C, M, Y, B a W v barvovém prostoru CIE L^*a^* pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce 0° až -60°



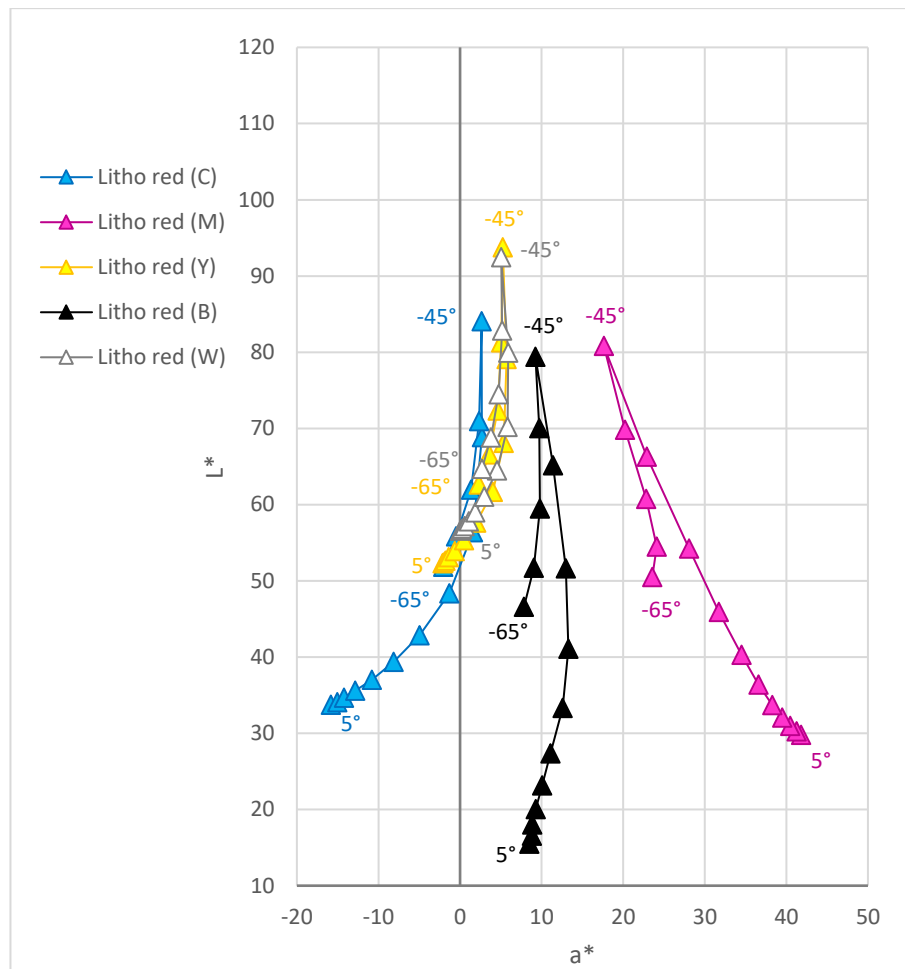
Obrázek 4.8: Rozložení naměřených hodnot perlescentního pigmentu Green na různých podkladech v barvovém prostoru CIE L^*a^* pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -65°

U pigmentu Green (Obrázek 4.8) dosahuje nejvyšší hodnoty L^* bílá barva při spekulárním odrazu. Nejtmaší je naopak černá barva při $\theta_t = 5^\circ$.



Obrázek 4.9: Rozložení naměřených hodnot perlescentního pigmentu Scarab red na různých podkladech v barvovém prostoru CIE L^*a^* pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -65°

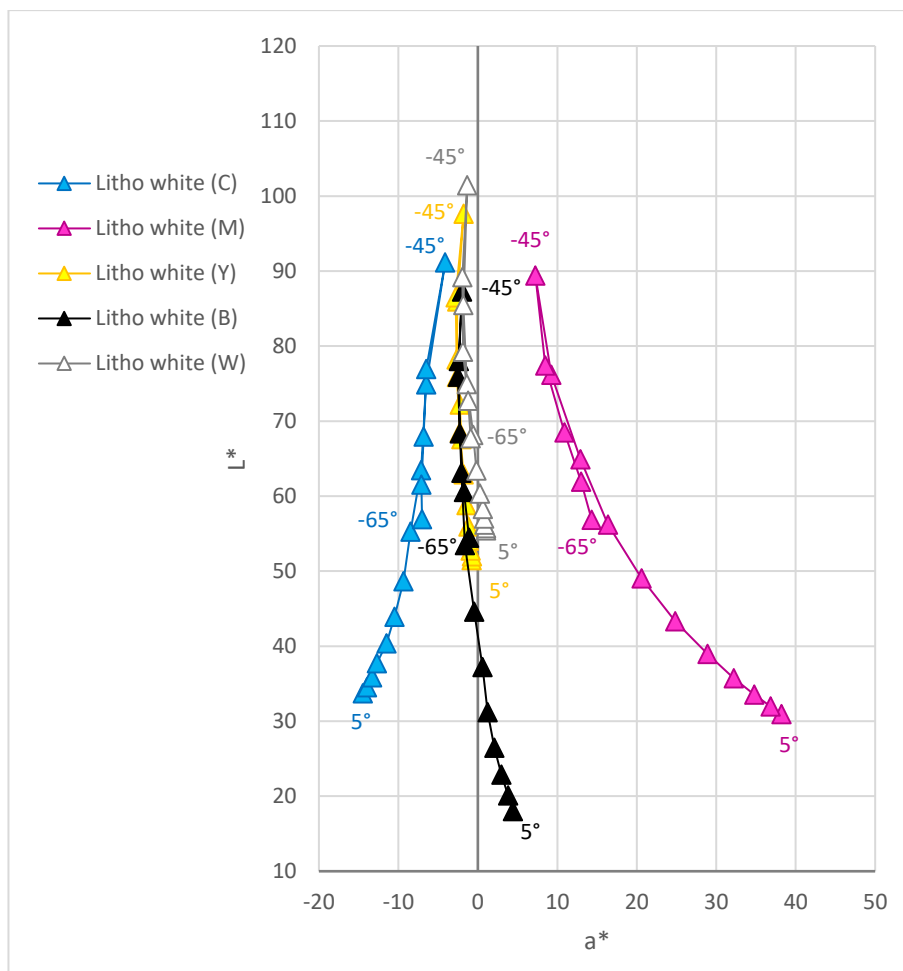
U pigmentu Scarab red na černém pozadí pro $\theta_r = 5^\circ$ byla zjištěna nejnižší hodnota L^* ze všech vzorků s perlescentními pigmenty (černá barva má ještě nižší hodnotu L^* než s nátěrem Scarab red), při tomto úhlu je tedy barva nejtmaší. Naopak nejsvětlejší je opět bílá barva při spekulárním odrazu. Na rozdíl od ostatních pigmentů způsobuje pigment Scarab red při spekulárním odrazu u černé barvy vyšší hodnoty L^* než při tom samém úhlu pro azurovou a purpurovou.



Obrázek 4.10: Rozložení naměřených hodnot perlescentního pigmentu Litho red na různých podkladech v barvovém prostoru CIE L^*a^* pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -65°

U pigmentu Litho red je jako u jediného perlescentního pigmentu dosaženo nejvyšší hodnoty L^* při spekulárním odrazu u žluté barvy namísto bílé.

Při spekulárním odrazu na všech barevných podkladech je dosaženo nižších hodnot L^* než u zbylých vzorků měřených při stejném úhlu.

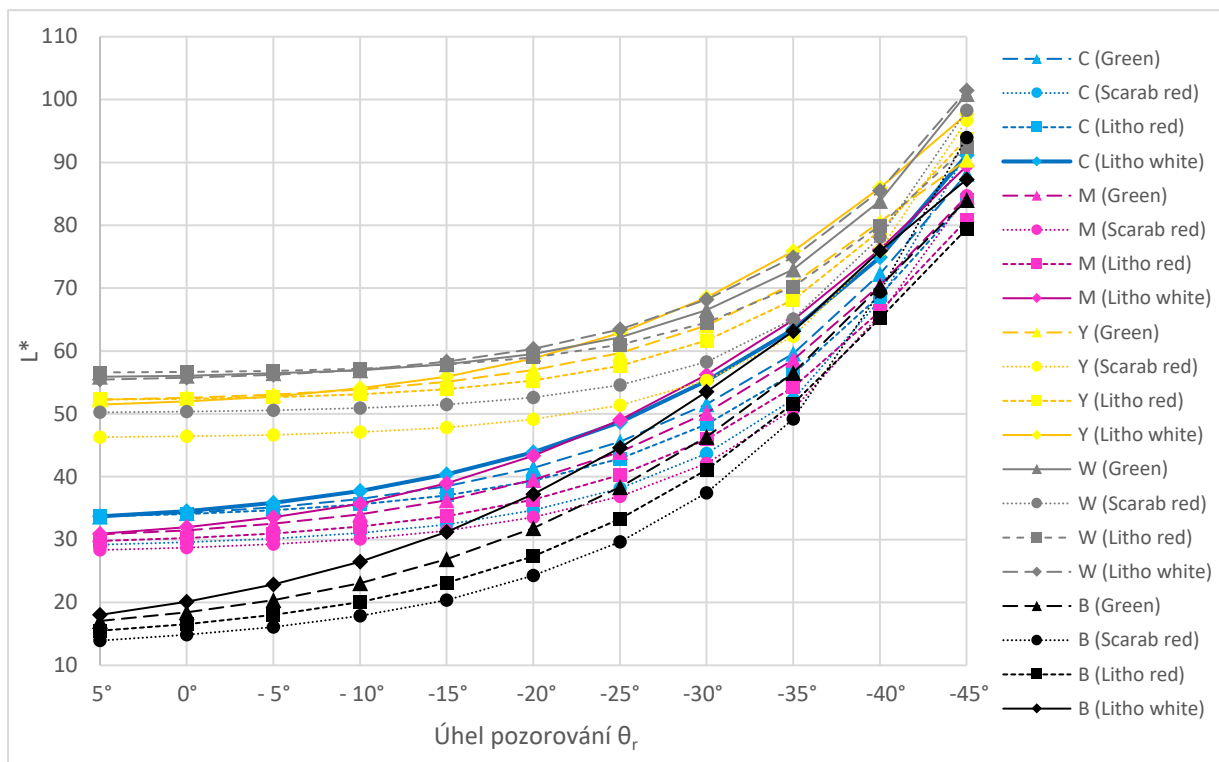


Obrázek 4.11: Rozložení naměřených hodnot perlescentního pigmentu Litho white na různých podkladech v barvovém prostoru CIE L^*a^* pro osvětlovací úhel 45° a pro úhly detekce $+5^\circ$ až -65°

U pigmentu Litho white na bílém pozadí při spekulárním odrazu byla získána nejvyšší hodnota L^* ze všech perlescentních vzorků.

4.2.3 Závislost L^* na úhlu pozorování

Měrná světlost při úhlech vzdálených od spekulárního úhlu dosahuje nízkých hodnot, jak je vidět v levé části obrázku 4.12. V těchto úhlech je nejtmavší, a tedy hodnota L^* nejmenší, pro černou, dále pro purpurovou a azurovou je L^* o něco vyšší a nejsvětlejší, tedy s nejvyšší hodnou L^* , je žlutá a bílá. Čím blíže spekulárnímu úhlu se budeme pohybovat, tím bude měrná světlost L^* vyšší. Při spekulárním odrazu se projevuje nanesený perlescentní pigment.



Obrázek 4.12: Závislost měrné světlosti L^* na úhlu pozorování vzorků s perlescentním nátěrem

5 Závěr

V rámci této závěrečné práce bylo připraveno 20 vzorků, čtyři druhy perlescentních nátěrů nanesené vždy na pěti různě barevných podkladech. Tyto vzorky byly proměřeny pomocí gonio-spektrofotometru. Při osvětlování vzorku s perlescentním pigmentem dochází k širokému úhlovému rozptýlení odraženého světla. Což znamená, že vzorky mohou být plně charakterizovány pouze tehdy, jsou-li vyhodnoceny z mnoha směrů, a to nám umožňuje právě gonio-spektrofotometr. Barevnost perlescentních nátěrů závisí na úhlu pozorování a úhlu osvětlení, při změně těchto úhlů dochází i ke změně vnímané barvy. V této práci byla využita geometrie, při které je osvětlovací úhel $\theta_i = +45^\circ$ a úhel pozorování se pohyboval v rozmezí $\theta_r = +5^\circ$ až -65° .

Před vlastním měřením byla provedena kalibrace gonio-spektrofotometru. Vlivem mechanických prvků mohlo být měření zatíženo nepřesnostmi, zejména pak prvky, které byly upevňovány pomocí šroubů. Při samotném měření bylo k odečítání stupňů úhlů dopadu a odrazu využíváno stupnic, které zajišťovaly přesnost.

Další nepřesnost byla způsobena nestabilitou světelného zdroje, která výrazně ovlivňuje naměřené hodnoty. Výsledné hodnoty v prostoru CIELAB byly ovlivněny touto nestabilitou, která se snažila být kompenzována měřením signálu odraženého od bílého standardu mezi měřeními samotných perlescentních nátěrů. Avšak tato kompenzace nebyla dostačující, protože z naměřených dat byly získány hodnoty L^* větší než 100, což ale prakticky není možné.

Vzorky byly proměřeny pro vlnové délky λ v rozsahu 380 až 740 nm s krokem 5 nm, signál odražený od vzorku byl snímán v rozmezí úhlu $\theta_r + 5^\circ$ až -65° s krokem 5° .

Naměřená data byla vyhodnocena pomocí barvového prostoru CIELAB. Nejprve byl sledován vliv perlescentních pigmentů na změnu barvy vzorků a dále byla zkoumána měrná světlost vzorků. Bylo zjištěno, že perlescentní pigmenty nejvíce ovlivňují odstín vzorku, který je snímán pod spekulárním úhlem. Odstín vzorků snímaných pod úhly vzdálenými od spekulárního úhlu je ovlivněn především barvou podkladu. Toto ale neplatí pro pigment Scarab red, kde byla změna odstínu způsobená pigmentem sledována v celém rozsahu úhlů u všech barev kromě purpurové. Hodnoty naměřené při všech úhlech detekce byly posunuty směrem k červené oblasti (kromě purpurové). Pigment Scarab red se tedy nejvíce projevoval v difúzní části. Naopak ve spekulární části se nejvíce projevoval pigment Litho red. U něho byla pozorována největší změna barevnosti směrem k červené oblasti. Bylo zjištěno, že kolorimetrické veličiny L^* , a^* , b^* vykazují silnou závislost na geometrii měření. Pro zhodnocení vlivu perlescentního nátěru na lesk vzorku by bylo zapotřebí reálnějších hodnot,

než které jsou uvedeny v obrázku 4.7. S ohledem na tuto chybu nelze říci, jestli u vzorků s perlescentním nátěrem došlo nebo nedošlo k poklesu lesku oproti vzorkům bez nátěru. I u vzorků pigmentů Green a Litho white na bílém podkladu došlo k překročení hodnoty 100, ovšem mnohem méně než u nenatíraných vzorků. V těchto dvou případech způsobila hodnotu L^* větší než 100 nestabilita zdroje.

6 Použitá literatura

- [1] SIMONOT, Lionel, Mathieu HÉBERT a Damien DUPRAZ. *Goniocolorimetry: From Measurement to Representation in the CIELAB Color Space* [online]. 23 March 2011, s. 170-175 [cit. 2019-06-12]. DOI: 10.1002/col.20704. Dostupné z: databáze Wiley Online Library.
- [2] NADAL, Maria E. a Edward A. EARLY. *Color Measurements for Pearlescent Coatings* [online]. 10 February 2003, s. 38-42 [cit. 2019-06-12]. DOI: 10.1002/col.10210. Dostupné z: databáze Wiley Online Library.
- [3] MATSAPEY, N., J. FAUCHEU, M. FLURY a D. DELAFOSSE. *Design of a gonio-spectro-photometer for optical characterization of gonio-apparent materials* [online]. 8 March 2013, 1-4 [cit. 2019-06-5]. DOI: doi:10.1088/0957-0233/24/6/065901. Dostupné z: stacks.iop.org/MST/24/065901.
- [4] KIRCHNER, Eric, Geert-Jan VAN DEN KIEBOOM, Lan NJO *et al.* *Observation of Visual Texture of Metallic and Pearlescent Materials* [online]. 31 August 2006, s. 256-265 [cit. 2019-06-6]. DOI: 10.1002/col.20328. Dostupné z: databáze Wiley Online Library.
- [5] KADLEČEK P. Odraz světla, BRDF. Skupina počítačové grafiky – Univerzita Karlova [online]. 2011, 17. 10. 2011 [cit. 2019-06-5]. Dostupné z: <https://cgg.mff.cuni.cz/~jaroslav/teaching/2011-pg3/poznamky/03%20-%20odraz%20svetla,%20BRDF.pdf>.
- [6] DEKKER, N., E. J. J. KIRCHNER *et al.* *Total Appearance Differences for Metallic and Pearlescent Materials: Contributions From Color and Texture* [online]. 6 June 2009, s. 4-6 [cit. 2019-06-25]. DOI: 10.1002/col.20586. Dostupné z: databáze Wiley Online Library.
- [7] MALÝ, Petr. *Optika*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Karolinum, 2013, 368 s. ISBN 978-80-246-2246-0.
- [8] KAPLANOVÁ, M. a kol. *Moderní polygrafie*. Praha: Svaz polygrafických podnikatelů, 2009. ISBN 978-80-254-4230-2.
- [9] Xirallic®. MERCK [online]. Německo, 2019 [cit. 2019-06-15]. Dostupné z: <https://www.merckgroup.com/en/brands/pm/xirallic.html>.
- [10] HÉBERT M., R. D. HERSH A P. EMMEL, *Fundamentals of Optics and Radiometry for Color Reproduction. Handbook of Digital Imaging* [online]. Chichester, UK: John

Wiley & Sons, 2015, [cit. 2019-06-5]. ISBN 9781118798706. Dostupné z:
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781118798706.hdi062>.

- [11] Spectralon® Diffuse Reflectance Standards. Labsphere [online]. 2019 [cit. 2019-06-15]. Dostupné z: <https://www.labsphere.com/labsphere-products-solutions/materials-coatings-2/targets-standards/diffuse-reflectance-standards/diffuse-reflectance-standards/>.
- [12] WYSZECKI, Günther a W. S. STILES. Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae. 2nd ed. New York: John Wiley, c1982. Wiley classics library. ISBN 0-471-39918-3.
- [13] Useful Color Data [online]. [cit. 2019-06-20]. Dostupné z:
https://www.rit.edu/cos/colorscience/rc_useful_data.php.
- [14] SCHÜTZOVÁ, Eliška. Goniospektrometrické měření tištěných vzorků. Pardubice, 2017. Diplomová práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce RNDr. Petr Janíček, Ph.D.