



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



Název projektu	Rozvoj vzdělávání na Slezské univerzitě v Opavě
Registrační číslo projektu	CZ.02.2.69/0.0./0.0/16_015/0002400

Světlo a optika ve filmu a fotografii

Distanční studijní text

Martin Petrásek

Opava 2019



**SLEZSKÁ
UNIVERZITA**
FILOZOFICKO-
PŘÍRODOVĚDECKÁ
FAKULTA V OPAVĚ

Obor: Multimediální techniky

Klíčová slova: fotografie, audiovize, optika, objektivy, kinematografie, film

Anotace: Tento materiál je doplňujícím kurzem optiky. Je zaměřený na praktické využití znalostí získaných v základním kurzu Optiky v oblasti fotografie a filmu.

Autor: **Mgr. Martin Petrásek**

Obsah

ÚVODEM.....	6
RYCHLÝ NÁHLED STUDIJNÍ OPORY.....	7
1 SVĚTLO	8
1.1 Elektromagnetické záření.....	8
1.2 Oko.....	12
1.3 Perspektiva, geometrická optika	15
1.4 Fotometrie	17
1.4.1 Fotometrické veličiny	17
1.5 Praktický úvod do exponometrie.....	20
1.5.1 Měření světla odraženého od scény	20
1.5.2 Měření dopadajícího světla na scénu	21
1.6 Zdroje světla.....	22
1.6.1 Tepelné zdroje světla	22
1.6.2 Ostatní zdroje světla (netepelné).....	24
1.6.3 Blesk fotoaparátu	28
1.6.4 HMI.....	28
1.7 Vlnové a částicové vlastnosti světla.....	30
1.7.1 Huygensův princip a difrakce	30
1.7.2 Interference	31
1.7.3 Polarizace.....	34
2 ODRAZ A LOM SVĚTLA.....	37
2.1 Princip odrazu a odrazivost	37
2.2 Rovinná zrcadla.....	41
2.3 Dutá a vypouklá zrcadla.....	41
2.3.1 Zobrazení dutým zrcadlem	43
2.3.2 Zobrazení vypouklým zrcadlem	46
2.3.3 Skutečné kulové zrcadlo	47
2.3.4 Další tvary zrcadel, zrcadlové dalekohledy	47
2.4 Lom světla	51
2.4.1 Index lomu	51
2.4.2 Lom světla.....	53

2.4.3	Tenká spojná čočka.....	57
2.4.4	Tenká rozptylná čočka	58
2.4.5	Tlusté čočky	59
2.4.6	Hlavní rovina	61
2.4.7	Hranol	62
2.4.8	Planparalelní deska	64
2.5	Druhy optických skel	65
2.5.1	Křemenné sklo	67
2.5.2	sodno-vápenaté sklo.....	68
2.5.3	Borosilikátové sklo	68
2.5.4	Korunové sklo.....	68
2.5.5	Flintové sklo.....	68
2.5.6	Fluoritové sklo	69
2.6	Světelnost	71
2.6.1	Clonové číslo	72
2.7	Hloubka ostrosti	73
3	OPTICKÉ VADY	77
3.1	Pojem ostrosti.....	77
3.1.1	Rozlišovací schopnost oka	78
3.1.2	Druhy optických vad.....	79
3.1.3	Barevná vada.....	79
3.1.4	Otvorová vada.....	81
3.1.5	Astigmatizmus	82
3.1.6	Koma.....	84
3.1.7	Zkreslení	85
3.1.8	Zklenutí pole	86
4	HISTORICKÝ VÝVOJ OBJEKTIVŮ	88
4.1	Proč do historie?.....	88
4.2	Dírková komora.....	89
4.3	První fotografické objektivy.....	90
4.3.1	Chevalierův achromát	90
4.3.2	Petzvalův portrétní	91
4.3.3	Periskop.....	92

4.3.4	Aplanáty.....	92
4.3.5	První teleobjektivy.....	93
4.3.6	Anastigmaty.....	93
4.3.7	Triplety.....	94
4.3.8	Tessar.....	95
4.3.9	Sonnar.....	95
4.3.10	(dvojitý) Gaussův objektiv.....	96
4.3.11	Širokouhlé objektivy.....	97
4.3.12	Rybí oko.....	100
4.3.13	Objektivy typu ZOOM – transfokátory.....	100
4.3.14	Parfokální objektivy.....	103
4.3.15	Budoucnost objektivů.....	103
5	KVALITA OPTICKÉHO ZOBRAZENÍ.....	105
5.1	Hodnocení jakosti a praktické vady.....	105
5.2	Hodnotitelné vlastnosti objektivu.....	106
5.2.1	Ostrost a kontrast.....	106
5.2.2	Rozlišovací schopnost.....	107
5.2.3	Vinětace.....	108
5.2.4	Bokeh.....	109
5.2.5	Parazitní odrazy.....	109
5.2.6	Vycentrování objektivu.....	109
5.2.7	Hodnocení kvality filtrů.....	109
5.2.8	Zkreslení.....	109
5.3	MTF křivky a hodnocení jakosti objektivů.....	110
	LITERATURA.....	112
	CITOVANÁ LITERATURA.....	113
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	114
	SHRNUTÍ STUDIJNÍ OPORY.....	120
	PŘEHLED DOSTUPNÝCH IKON.....	121

ÚVODEM

Všichni pracujeme s fotografickými a filmovými přístroji. Obzvláště očekávám, že s nimi pracuje čtenář této knihy, ehm... tak nějak intenzivněji. Výsada mít fotoaparát nebo kameru se už netýká jen nadšenců a profesionálů. Prakticky všichni máme kamery a fotoaparáty zabudovány v mobilních telefonech, v tabletech, počítačích... Svět se přestal dělit na ty, kteří fotí a nefotí. A smazává se také hranice mezi těmi, kteří fotografickému a filmovému řemeslu rozumí. Rozuměj, vědí, s čím pracují, jak to funguje a svých cílů dosahují záměrně, nikoliv volbou několika nejlepších mezi tisíci náhodných snímků. Pochopení podstaty je jednou z klíčových výhod každého autora. Mít v moci všechny optické plochy objektivu vašeho fotoaparátu dodává nové možnosti v tvorbě ale především větší šanci na eliminaci nechtěných jevů. Volba správného filtru, objektivu, jejich nastavení a způsob použití v určitých situacích se opírá o znalosti optiky. Fyzikálních základů nauky o světle. Průchod, odraz a lom světla na různých optických plochách a různými prostředími dává radikálně jiné výsledky. Schopnost správné volby a nastavení optických prvků, především objektivů bude klíčovým cílem této knihy.

RYCHLÝ NÁHLED STUDIJNÍ OPORY

Cílem kurzu je zaměřit znalosti získané v základním kurzu optiky do oblasti pochopení nauky o světle a fungování fotografické a filmové optiky. Od úvodní rekapitulace vybraných témat vlnové a geometrické optiky se přesouváme k poznání toho, co je světlo a jak náš fotoaparát vytvářený obraz ovlivňuje. Dojdeme k praktickým ukázkám propojení principů a základů optiky s běžně používanými optickými systémy. Od těch nejjednodušších, jako je dírková komora, jako jsou planparalelní desky, až po pokročilé fotografické objektivy. Není ambicí se ovšem pouštět do podrobných popisů a důvodů skladby složitějších objektivů a už vůbec ne do výpočtové části. Cílem je získat jednak povědomí o fungování optických prvků u fotoaparátů a kamer a prostřednictvím pochopení podstaty s takovou technikou umět pracovat, rozumět patřičným nastavením a být schopen alespoň v základu řešit otázky defektů, vad, problémů, ke kterým dochází během používání těchto optických zařízení.

1 SVĚTLO



RYCHLÝ NÁHLED KAPITOLY

Základní poznatky o světle jako elektromagnetickém záření. Zdroje světla ve filmu a fotografii a vlnové vlastnosti světla.



CÍLE KAPITOLY

Seznámení se se základy ovlivňující práci s optickými přístroji ve filmu a fotografii.



ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU

Odpovídá 6 vyučovacím hodinám.



KLÍČOVÁ SLOVA KAPITOLY

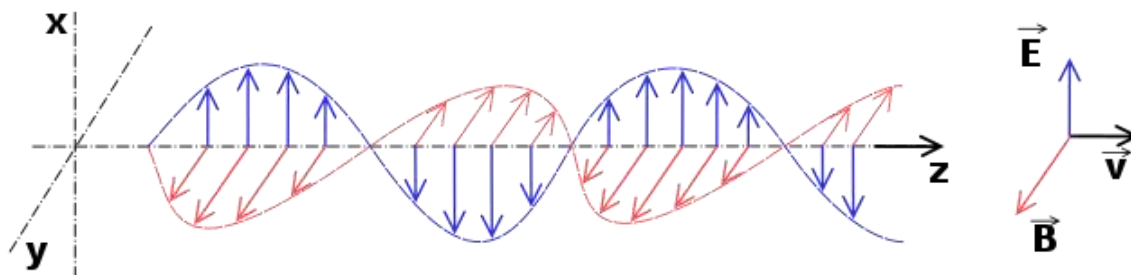
světlo, vlnění, elektromagnetismus, zdroje

1.1 Elektromagnetické záření

Optika je nauka o světle. Světlo je to co vnímáme okem. Naše oči jsou přizpůsobeny vnímat jen malou část z jinak širokého elektromagnetického spektra. A naše fotografické přístroje jsou uzpůsobeny tomu, aby vytvářely obraz stejně věrný, jako jej dává lidské oko. Abychom se však mohli věnovat fotografické a filmové optice, musíme znát také světlo.

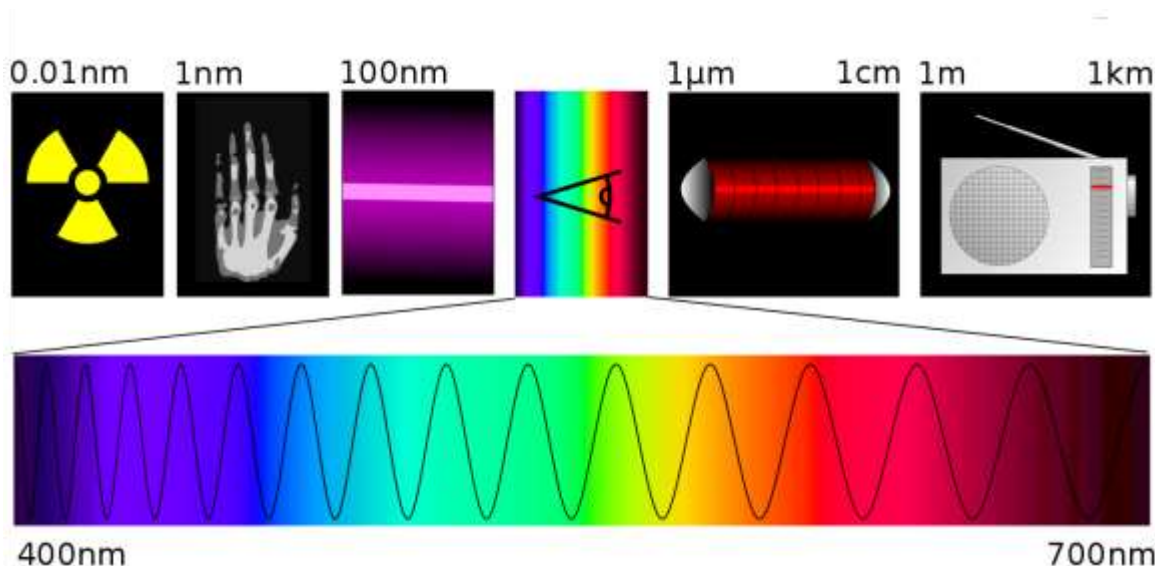
Elektromagnetické záření (nebo taky vlnění) je projevem existence elektromagnetického pole. Vzniká například přechodem elektronů na nižší orbitální hladinu v atomu, při jaderných reakcích, vzájemnou anihilací hmoty a antihmoty, apod. Dva názvy – vlnění či záření – má z toho důvodu, že se projevuje jako záření (tedy proud kvant, kterým říkáme fotony a přenáší energii), ale stejně tak jako vlnění (tedy má svou frekvenci, amplitudu a vlnovou délku). Toto vlnění se šíří podobně jako vlnění na hladině rybníka, když do něj

hodíte kámen. Klasifikujeme jej jako vlnění příčné, tedy amplituda je kolmá na směr šíření. Oproti vlnění na hladině rybníka bude rozdíl v tom, že vodní hladina je dvourozměrná, zatímco světlo se šíří trojrozměrným prostorem. Amplituda tohoto vlnění je kolmá na směr šíření a díky trojrozměrnému prostoru neexistuje za normálních okolností žádná preference směru výchylky (amplitudy) tohoto pole. Existují však materiály, které způsobují, že některý směr začne být preferován a pak se stane elektromagnetické záření polarizované – tak jak je znázorněno pro jednoduchost na následujícím obrázku (Obrázek 1-1), více v podkapitole Polarizace – 1.7.3.



Obrázek 1-1: Elektromagnetické vlnění na obrázku zjednodušeně ztvárněné kmitající v jediné rovině. Směr šíření je v , směr výchylky elektrického pole E je znázorněn modře, směr výchylky magnetického pole B je znázorněn červeně. (autor: Emanuel Boutet, CC BY-SA 3.0)

Světlo je malinkou částí elektromagnetického spektra. To dokážeme registrovat od „nejměkčího“ vlnění v podobě rádiových vln až po vlnění „nejtvrdší“ s největší energií, nejkratšími vlnami a nejvyššími frekvencemi v podobě gama záření. Bude dobré se na úvod alespoň zorientovat, v jaké rodině se světlo nachází.



Obrázek 1-2: Elektromagnetické spektrum se znázorněním viditelné části spektra (autor: Tatoute and Phrood CC-BY-SA 3.0).

Nejméně energetické a tedy nejměkčí vlnění jsou vlny rádiové. Délka těchto vln je v rozmezí metrů až kilometrů. Znat vlnovou délku může být užitečné právě proto, že podle ní si můžete představit, jak velké musí být detektory, které takové vlnění zachytávají. Antény rádia tak bývají pro příjem rádiových vln opravdu veliké, klidně i několik desítek metrů.

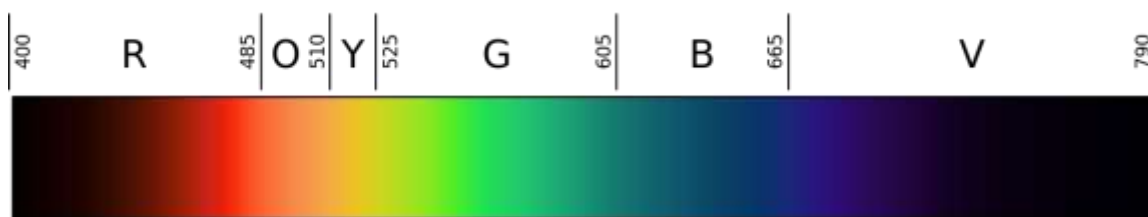
Kraší než rádiové vlny, řádově v centimetrech, jsou mikrovlny (například mikrovlnná trouba nebo wi-fi má délku vlny kolem 12 cm).

Se zkracující se vlnovou délkou a zvyšující se frekvencí se dostáváme do infračervené oblasti. I když se ještě stále nacházíme mimo oblast viditelnou a fotografovanou, už nás z hlediska fotoaparátů bude zajímat. Dnes nejčastěji používané snímače CMOS jsou totiž nativně citlivé nejen na viditelné světlo, ale jejich citlivost zasahuje až do infračervené oblasti. Z toho důvodu výrobci fotoaparátů a kamer instalují před čipy ochranné sklíčko, které funguje zároveň jako filtr zabráňující průchodu infračerveného záření. Tento filtr není nikdy 100% dokonalý, takže pokud naopak na objektiv nasadíte infračervený filtr, který blokuje viditelné světlo a propouští pouze infračervené záření, pak můžete vyzkoušet infračervenou fotografii. Bohužel díky zmíněnému filtru před čipem bude nutno použít řádově delší expoziční časy. Citlivost svého fotoaparátu si můžete vyzkoušet poměrně snadno. Použijte nějaký dálkový ovladač, například od televize. Mačkáním tlačítka směrem k fotoaparátu v režimu živého náhledu vás překvapí tím, že světýlko ovladače bude skutečně na displeji blikat, zatímco okem tuto blikající diodu nevidíte. (Pozor, nemusí to jít s každým ovladačem, někteří výrobci posunuli IR diody v novějších ovladačích do vzdálenější části spektra, kde už jej fotoaparát nezaznamená.)



Obrázek 1-3: Krajina pořízená v infračerveném oboru spektra (autor Jannis, CC-BY-SA 3.0)

Postupně se v elektromagnetickém spektru za hranicí infračerveného pásma dostáváme k červené barvě a tím i do viditelné části, tedy do vlnových délek 400–750 nm. Nejdelší vlnové délky má červená barva, nejkratší pak fialová. Barvy jsou naší interní interpretací mozku pro jednotlivé vlnové délky a budeme se jimi krátce zabývat v následující podkapitole. Pro tuto chvíli si vystačíme s informací, že probíháme viditelnou částí elektromagnetického spektra od nejméně energetické červené barvy, přes oranžovou, žlutou, zelenou, modrou, až po fialovou. A jak její název napovídá, za hranicí tohoto očima viditelného pásma se nachází ultrafialové spektrum.

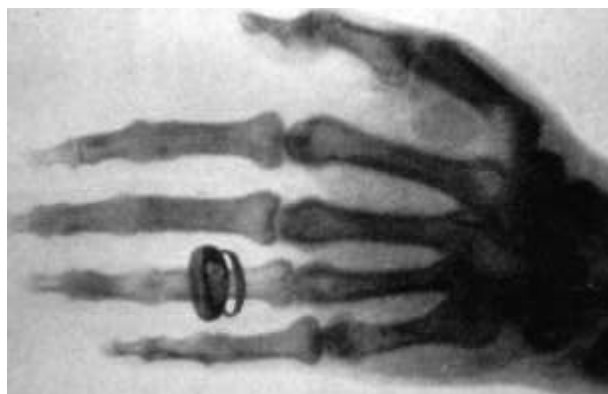


Obrázek 1-4: Spektrum viditelného světla v lineární škále podle frekvence.

Ultrafialové záření se dělí do několika spektrálních podoblastí (UVA, UVB, UVC) podle příslušného biologického působení. Zatímco za slunného dne na zem dopadá 99 % záření UVA, jen malý zbytek na zemi dopadne v UVB a prakticky žádné z oblasti UVC. To z toho důvodu, že ho zastaví ozónová vrstva Země. UVA záření je neškodné pro člověka, avšak nepříjemné pro fotografy a kameramany. Z toho důvodu se mnohé objektivy, často na stálo, doplňují tzv. UV filtry. CMOS snímače kamer a fotoaparátů jsou totiž na tento zárožek fialového spektra – UVA oblast – citlivé. V nízkých nadmořských výškách je vliv UVA záření zanedbatelný, avšak neplechu v podobě závoje může natropit již ve výškách nad 1000 m. n. m.

Ještě vlnově kratší a energetičtější následující podoblasti elektromagnetického spektra jsou významné pro člověka z toho důvodu, že energie kvant elektromagnetického záření již dosahuje takových hodnot, že je schopno ionizovat atomy. Říkáme, že má ionizační schopnost a záření od UVB ve směru ke kratším vlnovým délkám nazýváme ionizující záření. Schopnost ionizace má dalekosáhlé dopady na potenciální rizika rakovinných bujení, protože právě ionizace například kožních buněk může vést k mutaci DNA a vzniku nekontrolovatelného množení. V lepším případě vznikají znaménka, v horším maligní nádory rakovinného bujení.

Za pásmem UV záření je již energie vysoká a vlny ještě kratší (více než 10× oproti UV). Vstupujeme do rentgenovské oblasti, která se ve fotografii taky využívá, jde ale o fotografii lékařskou nebo technickou. Rentgenové paprsky mají schopnost vcelku dobře pronikat lidskou tkání. Podle hustoty tkáně dochází k absorpci. Na fotografických deskách citlivých na RTG záření pak vzniká obraz právě tím, že část záření je absorbována v tkáni, a takové místo se objeví jako méně exponované – na fotografické desce jako bílé. Dnes se však používají i digitální metody a tak digitální rentgenovská fotografie dorazila samozřejmě i do lékařství.



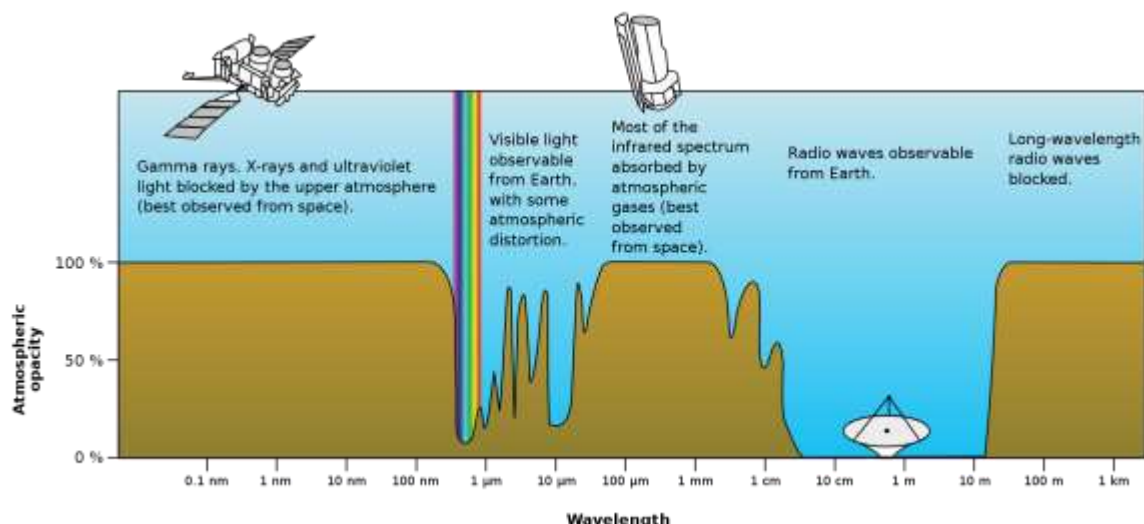
Obrázek 1-5: Rentgenový snímek levé ruky Alberta von Köllikera left pořizena Wilhelmem Röntgenem na jedné z jeho veřejných přednášek 23. ledna 1896.

Když opustíme oblast rentgenového záření, vstoupíme do oblasti nejtajemnější a nejenergetičtější. Jde o oblast gama záření. Rentgenové a gama záření jsme my lidé od sebe oddělili uměle, nicméně fyzikální původ se na části spektra obou pásem překrývá. Gama záření vzniká především při radioaktivních rozpadech atomových jader a při dalších subjaderných procesech. Takové záření můžeme také „fotografovat“, ale obrázky bychom již v klasické podobě viděli těžko. Používáme pro detekci nikoliv fotoaparáty, ale detektory.

1.2 Oko

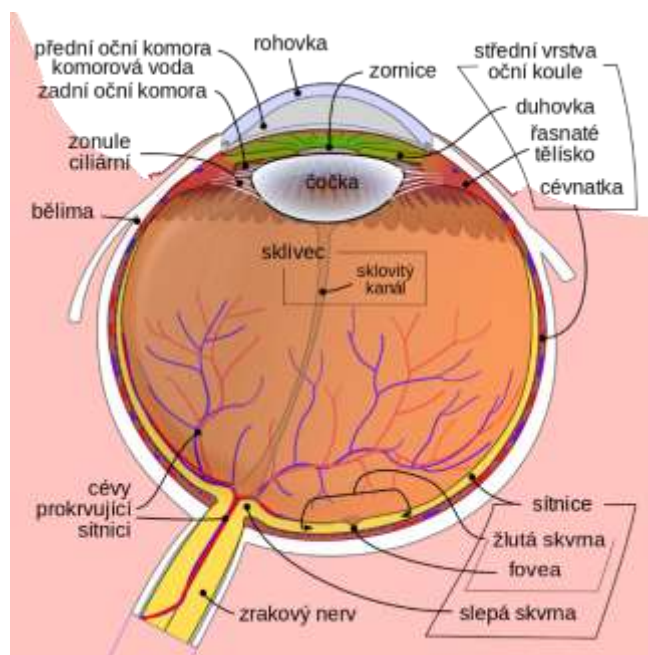
Pokud jsme proběhli celým elektromagnetickým spektrem, může nás napadnout otázka, proč vidí naše oko právě a pouze v rozsahu 400–750 nm. Odpověď je překvapivě jednoduchá. Lidé se vyvinuli na zemi, na souši a primárně v nížinách. Detektory, které se jim vyvinuly pro detekci elektromagnetického záření se tak musely vyvinout tak, aby měly co detekovat. Když se podíváme na obrázek níže (

Obrázek 1-6), můžeme si všimnout, že atmosféra je průhledná pro viditelné světlo. Infračervené záření (NIR) je ale blokováno díky tomu, že je brzděno vodními parami v atmosféře. Průhledné je pak až pro měkčí (FIR) infračervené záření, a pak část rádiových vln. Člověk, a mnozí živočichové vybavení očima (většina savců, ptáků, plazů a mnoho ryb), mají řádově stejnou velikost očí. Je to dáno evolučními procesy, které vedly k tomu, že detektory světla mají nějakou omezenou velikost. Abychom byli schopni vidět s rozumným rozlišením, potřebujeme určité množství světlocitlivých buněk. A abychom mohli opticky zpracovávat obraz, potřebujeme čočku, která bude na sítnici světlo fokusovat. Pro viditelné světlo jsou takové detektory – oči – veliké řádově centimetry. Kdybychom ale chtěli koukat na svět v infračerveném oboru kolem 20 μm , musely by naše oči mít při stejném rozlišení velikost cca 40 větší, tedy více než metr. No a s takovýma očima by se nám asi žilo obtížně.



Obrázek 1-6: Průhlednost atmosféry pro jednotlivé vlnové délky elektromagnetického záření. Atmosféra je dobře průhledná pro viditelné světlo, poměrně dobře pro měkké infračervené záření a pak pro rádiové vlny mezi 1 cm a 10 m.

Oko si pro účely našich skript popíšeme velmi zjednodušeně. Jde o smyslový světlocitlivý orgán vybavený fotoreceptory na sítnici, na kterou je promítán obraz skrze čočku. Tu chrání rohovka a množství světla vstupujícího do oka včetně základní akomodace oka se stará zornice, obdoba clony fotoaparátu.

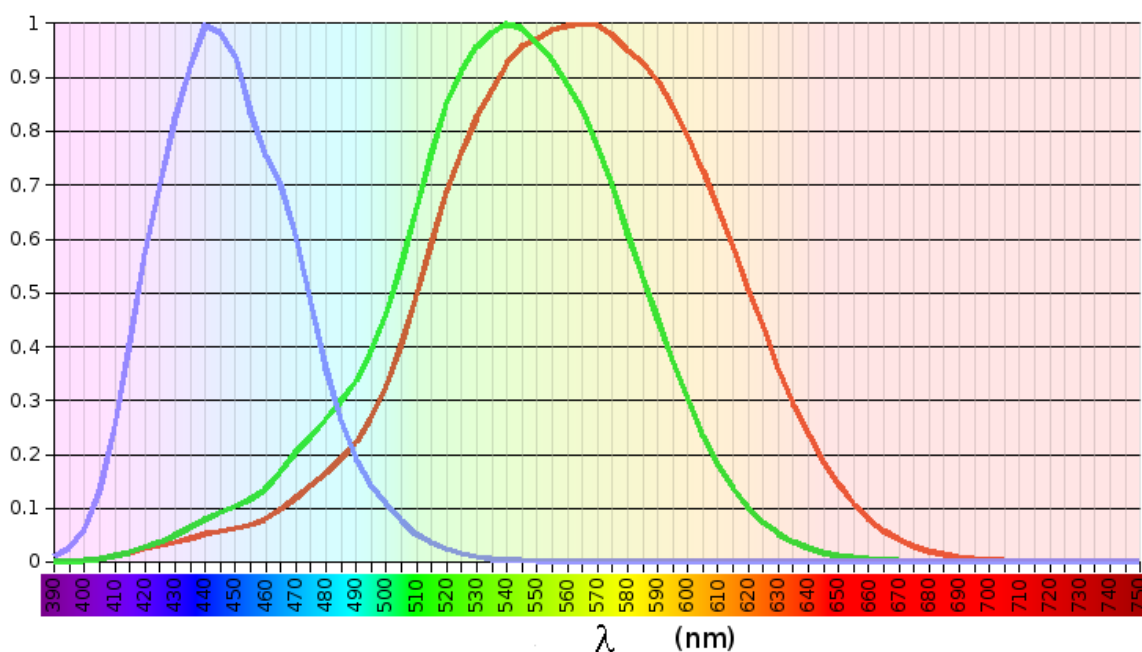


Obrázek 1-7: Řez lidským okem.

Světlocitlivé buňky sítnice jsou buňky vytvářející nervovou stimulaci na základě absorpce fotonu přicházejícího na sítnici. Tyto buňky jsou dvojího typu: tyčinky a čípky.

Tyčinky jsou světlocitlivé buňky reagující na nižší intenzitu osvětlení než čípky, ale nejsou schopny rozeznávat barvy. Zajišťují noční – skotopické vidění.

Čípky jsou citlivé na světlo různé barvy, čili různé vlnové délky, různé intenzity a různé sytosti barev. Jsou prvními neurony sítnice. Zajišťují fotopické vidění, jsou zodpovědné za zrakovou ostrost. Nacházejí se v nejhojnějším počtu v centrální jamce (fovea centralis), což je malá jamka ve žluté skvrně. Směrem k periférii sítnice jejich hustota postupně klesá. Celkově nacházíme na sítnici 6 milionů čípků. Rozlišujeme 3 typy čípků, které je možné rozlišit pouze podle pigmentu v cytoplasmě, nikoliv podle tvaru buňky. [1] Tyto pigmenty (fotopsiny) jsou tedy citlivé na světlo různých vlnových délek. Část je citlivá na červenou, část na zelenou a část na modrou. Pověšimněte si, jak podobný je systém citlivosti s dnešními CMOS snímači vybavenými barevným záznamem (RGB), tedy jde také o buňky citlivé na červenou (R), zelenou (G) a modrou barvu (B).



Obrázek 1-8: Spektrální citlivost čípků vybavených různými opsiny absorbují světlo různých vlnových délek.

Oko samo o sobě je velmi spolehlivý a objektivní orgán, avšak zpracování zraku mozkiem již přináší velmi subjektivní výsledky. Jednak do hry vstupují dva světlocitlivé orgány (tyčinky a čípky), které se mezi sebou při setmění nepřepínají diskrétně, ale jejich oblast citlivosti se překrývá; dále do hry vstupuje doba akomodace oka, a to jednak na tmou a jednak na náhlé zjasnění scény. A nakonec jsou to psychofyzikální zákony vidění, konkrétně Weberův zákon, který říká, že člověk některé fyzikální podněty vnímá nikoliv lineárně, ale logaritmicky. Logaritmickou závislost mezi velikostí podnětu (fyzikální příčina) a velikostí fyziologického vjemu objevil německý fyziolog Ernst Heinrich Weber (1795 - 1878). Později ji zdůvodnil zakladatel psychofyziky Gustav Theodor Fechner (1801 - 1887). Weberův-Fechnerův psychofyzikální zákon tedy říká: Mění-li se fyzikální podněty působící na naše smysly řadou geometrickou, vnímáme jejich změnu v řadě aritmetické.

[2] Proto měříme například intenzitu zvuku v decibelech [dB], anebo zdánlivé jasnosti hvězd v magnitudách [mag].

1.3 Perspektiva, geometrická optika

Máme k dispozici světlocitlivý orgán, oko. Ten slouží jako detektor světla a jistě tušíme, že vytvoření obrazu s určitým zorným polem a rozlišením se stará čočka, která obraz promítá na sítnici. My se ale budeme ještě chvíli věnovat principům zobrazení, které nás bude provázet po většinu knihy. Půjde o geometrickou optiku.

Záznam obrazu, ať už malba nebo fotografie je přenesením trojrozměrného světa na dvourozměrnou plochu. To je naprosto přirozený proces. Ale ne každý si je schopný jej intuitivně uvědomit. A vnímání prostoru ve dvojrozměrném obraze dokonce ani není přirozenou schopností člověka. Je to schopnost získaná. Teprve v antice se objevili první lidé, schopní ztvárnit prostor v obraze, snad díky prvním myšlenkám Euklidovým ohledně vnímání obrazu a světla. Teprve v dobách, do kdy datujeme narození Krista, začaly vznikat obrazy respektující perspektivu.

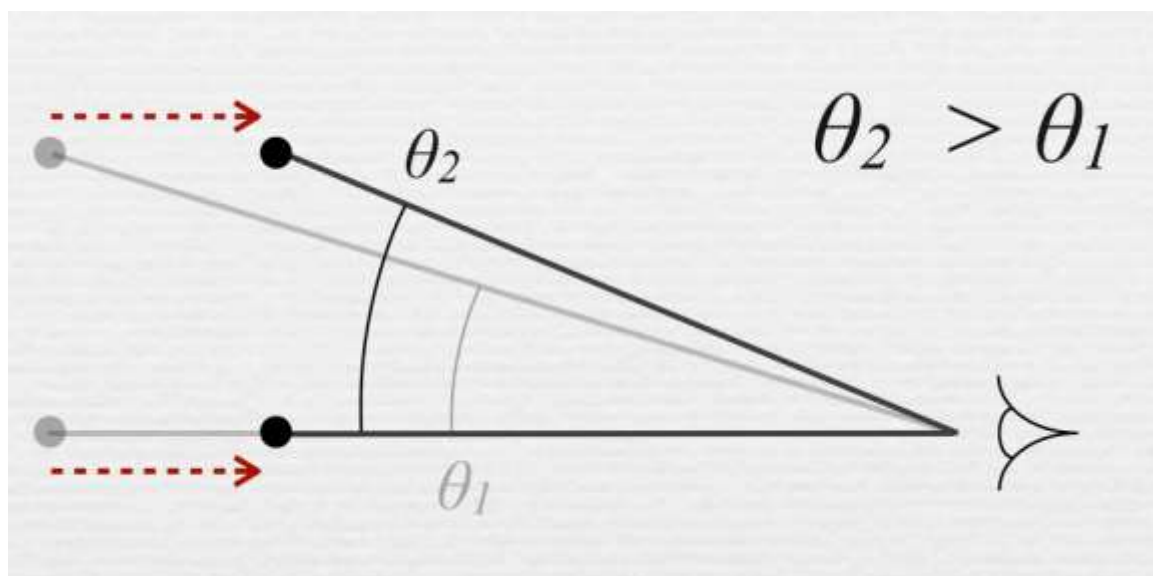
Začneme tedy zákony perspektivy a k nim definujeme dva důležité, leč triviální, předpoklady, díky kterým vidíme věci v prostoru:

1. Světlo se pohybuje po přímkách.
2. Světelné paprsky konvergují v oku.

Obě pravidla nám přijdou nejspíš naprosto samozřejmá, ovšem budou základem pro pochopení principů perspektivy, která se nám nakonec ve svém důsledku tak jednoduchá nebude muset zdát.

(1) Pochopit, že se světlo pohybuje po přímce je triviální úlohou. Rozsvítíme žárovku, kus od ní postavíme předmět a ten bude vrhat stín. Spojení žárovky, předmětu a stínu bude vždy v přímce. (2) Všechny body v prostoru vidíme díky tomu, že odráží (nebo v případě světelných zdrojů vytvářejí) světlo, které svou cestu končí na sítnici našeho oka.

Tyto dva předpoklady dávají vzniknout přirozené perspektivě. Tedy že vzdálené objekty se nám jeví menší, než stejně velké objekty blízké. To poprvé ve svém spise Optika popsal Euklides někdy kolem roku 300 př. n. l.



Obrázek 1-9: Euklidova přirozená perspektiva. Předměty vzdálenější se zobrazují pod menšími úhly než stejně velké předměty bližší.

Geometrická optika je pokračováním této Euklidovy nauky, generalizuje a popisuje chování světla v prostředí, které je významně větší, než je vlnová délka světla, stejně tak jako objekty, které do interakce se světlem přicházejí. Kromě principů přirozené perspektivy je geometrická optika postavena i na dalších principech:

- princip přímočarého šíření světla (tedy vychází z jednoho z předpokladů přirozené perspektivy, navíc nám ale vytváří pojem světelného paprsku)
- princip vzájemné nezávislosti paprsků (tento princip říká, že každý světelný paprsek se šíří prostorem tak, jakoby ostatní paprsky neexistovaly – pozor platí jen v geometrické optice, pokud bychom uvažovali vlnové vlastnosti světla, narušují tento princip ohybové jevy a interference)
- princip záměnnosti chodu paprsků (pokud se může světlo šířit z bodu 1 do bodu 2, pak se může šířit i naopak)
- zákon odrazu a lomu (této oblasti bude věnována celá následující kapitola)

Všechny zákony geometrické optiky lze shrnout do jednoho klíčového zákona zvaného **Fermatův princip**.

Světlo se v prostoru šíří z jednoho bodu do druhého po takové dráze, aby doba potřebná k proběhnutí této dráhy nabývala extrémní hodnoty.

Příčemž extrémní hodnotou je v praxi vždy minimum. Povšimněte si, že je v tomto principu použito **času** jako veličiny, která nabývá minima. Ukážeme si totiž později, že nejkratší trajektorie nemusí být vždy ta nejrychlejší. Patrné to bude například u zákona lomu.

1.4 Fotometrie

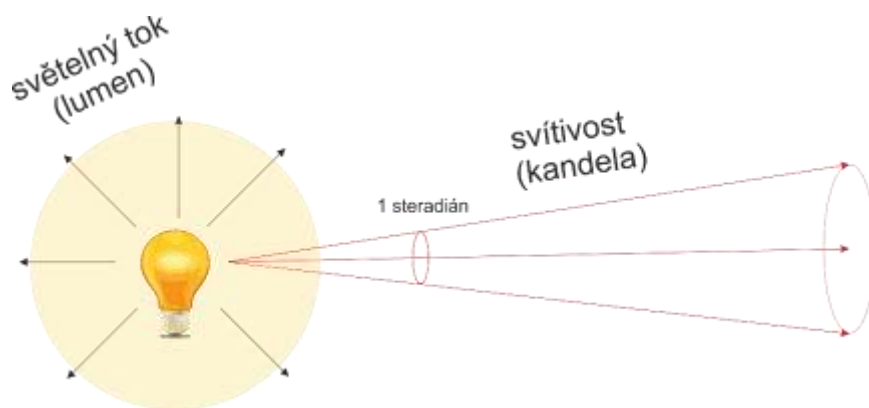
Pokud se zabýváme otázkou šíření světla, bude nezbytné se věnovat také způsobu, jak projevy světla měřit. Vědní disciplína, která se tímto zabývá, se nazývá fotometrie. Veškeré měření v ní, a zároveň v našich praktických situacích, probíhá pouze ve vztahu k lidskému zraku, fotometrie je tedy omezena pouze na rozsah vlnových délek 400–750 nm. Ve filmu a fotografii budeme prakticky neustále pracovat s expozimetry. A to i v situacích kdy to možná ani netušíme. I mobilní telefony s fotoaparáty jsou vybaveny vždy nějakým typem expozimetru. Ale k expozimetru je strastiplná cesta skrze fyzikální fotometrické veličiny.

Expozimetr a měření ve fotografii a filmu je zásadním bodem práce. Nemůžeme se totiž spoléhat na zrak ani subjektivní odhad. Můžeme se jen částečně spoléhat na automatiku měření nebo inteligentní režimy, ale pouze v jednoduchých situacích, bez kontrastních míst v obraze, za uniformního rozložení světla ve scéně. Dnešní inteligentní měřicí systémy jsou sice již velmi daleko ve schopnostech řídit expozici tak, aby dávala často lepší výsledky, než by zvládl amatér a laik. Ale ještě stále není tak dobrá, aby byla vždy lepší, než člověk znalý principů fotometrie a exponometrie. A základy fotometrie a exponometrie si tedy nyní projedeme. Budeme se soustředit primárně na ty fotometrické veličiny, které budou pro naši práci ve filmu a fotografii potřebné.

1.4.1 FOTOMETRICKÉ VELIČINY

Základní veličinou SI¹ je svítivost, tedy světelný tok vyzářený do jednotkového úhlu bodovým zdrojem. Měříme ji v jednotkách nazývaných *candela* [*cd*]. Jak se dá z anglického překladu vytušit, svítivost 1 *cd* má zhruba svíčka. Možná bude pro laika pochopitelnější, když bychom použili neoborné synonymum intenzita světla. Často se totiž tato veličina plete s druhou významnou veličinou nazývanou světelný tok, který má jednotku *lumen* [*lm*], což je celkový světelný výkon emitovaný ve všech směrech. Svítivost je světelný výkon v jednotkovém úhlu. Jestliže žárovka má světelný tok 1 *lm* a optika lampy směřuje světelný kužel pouze do paprsku o prostorovém úhlu 1 steradián, pak paprsek bude mít svítivost 1 *cd*. Pokud by byla optika upravena tak, aby se paprsek koncentroval na kužel o rozměru 1/2 steradiánu, potom bude mít zdroj svítivost 2 *cd*. Výsledný paprsek je užší a jasnější, i když jeho světelný tok zůstává nezměněn.

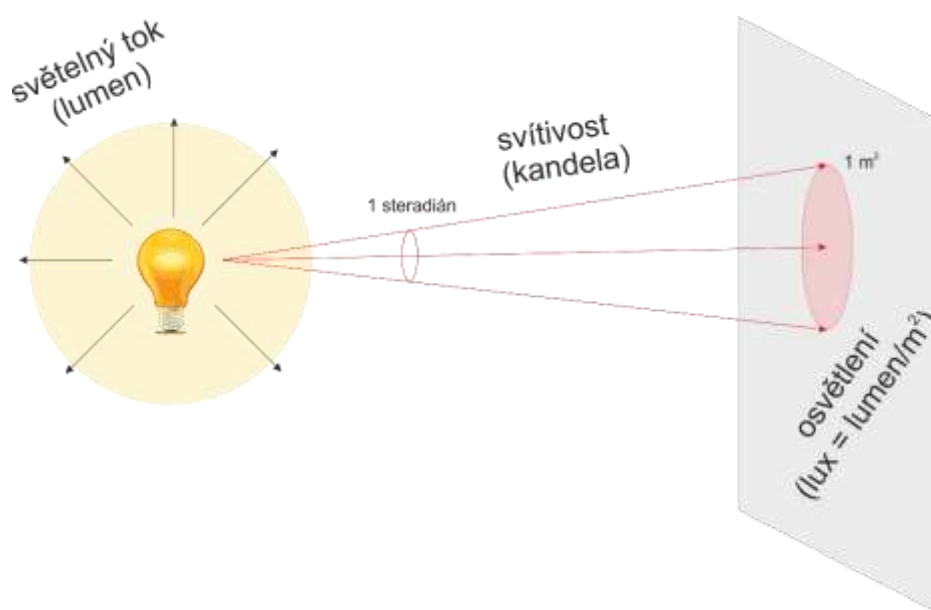
¹ zkratka z francouzského „Le Système International d'Unités“ – česky „Mezinárodní systém jednotek“



Obrázek 1-10: Svítivost a světelný tok.

Prakticky se setkáváte u světelných zdrojů nejčastěji s veličinou světelného toku, na krabičkách žárovek, výbojek a dalších světelných zdrojů je zpravidla informace o tom jak intenzivně svítí vyjádřena právě v *lumenech*. Typická 100 W žárovka má zhruba 1000 *lm*, stejný světelný tok má například běžná domácí LED „žárovka“ již při 12 W příkonu.

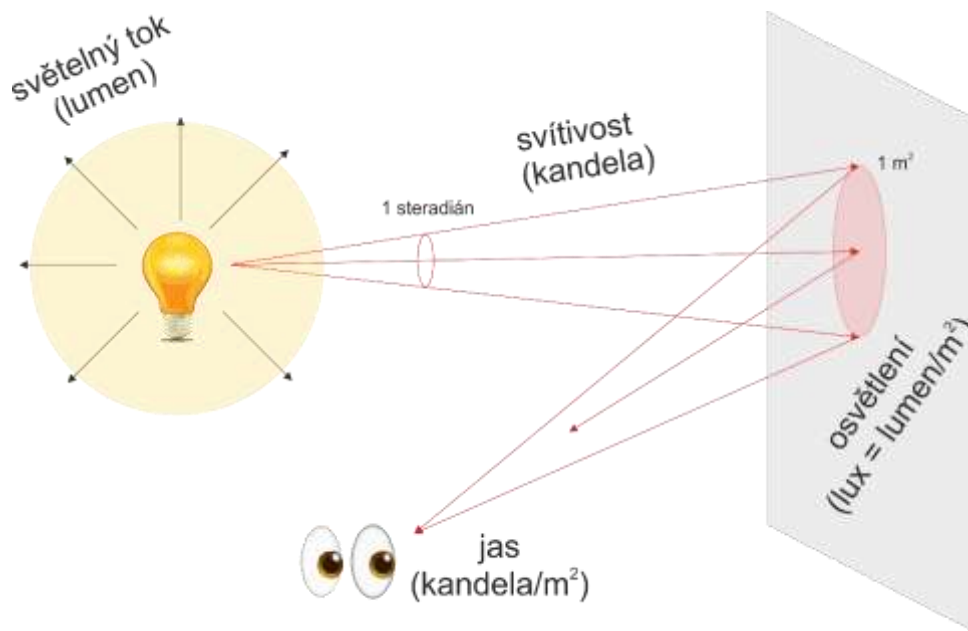
Světlo dopadající na plochu měříme jako osvětlení. Jednotkou osvětlení je *lux [lx]*. Tato veličina vyjadřuje, jak velké množství světla dopadá na jednotkovou plochu. Tou je v našem případě 1 m^2 . Žárovka se světelným tokem 1000 *lm* osvětluje plochu 1 m^2 intenzitou osvětlení 1000 *lx*.



Obrázek 1-11: Intenzita osvětlení.

Další důležitou fotometrickou veličinou je jas. Představte si scénu, ve které máte světlé a stinné partie a třeba i viditelný zdroj světla. Je zřejmé, že nejmenší jas budou mít stinné partie a nejvyšší ty světlé. Zdroj světla v podobě bodové žárovky však bude svým jasnem celé scéně dominovat. Důvodem je, že poměrně intenzivní světelný zdroj září navíc z malé plochy. Fotometrická veličina zvaná *jas* tedy klasifikuje, jak je daný zdroj jasný a

jeho jas je také logicky závislý na velikosti plochy, ze které vyzařuje. Jednotka této veličiny je cd/m^2 .



Obrázek 1-12: Jas.

Poslední jednotkou, na kterou má smysl brát v optice ve filmu a fotografii zřetel, je světelná účinnost zdroje. Ta říká, jak je schopen zdroj proměnit energii na světlo. Jeho jednotka je lm/W . Když se vrátíte o pár odstavců výše, je tam ostatně názorný příklad žárovky a LED. Obyčejná 100 W žárovka má zhruba 1000 lm , a tedy její účinnost je jen 10 lm/W . Stejný světelný tok z LED s 12 W příkonem znamená účinnost 83 lm/W . Znamená to tedy, že tato LED je 8× účinnější. Právě účinnost bude mít velký význam při výběru světel použitelných pro filmové svícení. Zatímco mnohé scény stačí pouze přisvětlovat a nevyžadují náročnější světelné zdroje, některé scény je potřeba svítit intenzivně. V takovém případě budete jako kameramani řešit právě dostatečnou intenzitu (a jak později poznáte, také barevnou věrnost) světelných zdrojů. Zatímco u fotografie jsme schopni řešit takové svícení záblesky, u stálého svícení se jedná o disciplínu mnohem (energeticky) náročnější.

Tabulka 1: Fotometrické veličiny

veličina	symbol	jednotka SI	označení	poznámka
světelný tok	Φ	lumen	lm	světelná energie za jednotku času procházející určitou plochou, někdy označovaný jako světelný výkon
svítivost	I	kandela	cd	základní jednotka SI

jas	L	kandela na metr čtverečný	$cd \cdot m^{-2}$	světelný tok do jednotkového prostorového úhlu na „promítnutou“ jednotkovou plochu zdroje
osvětlení	E_v	lux	lx	světelný tok dopadající na plochu
světelná účinnost	K	lumen na watt	$lm \cdot W^{-1}$	poměr světelného toku k zářivému toku

1.5 Praktický úvod do exponometrie

V návaznosti na fotometrické veličiny můžeme ve stručnosti představit také metody měření světla dopadajícího na světlocitlivé vrstvy kamer a fotoaparátů. Jako základ považujeme klasické expozimetry integrované do těla fotoaparátů, a to ať už se jedná selenový článek u starších přístrojů, CCD fotoodpor anebo odečítání z CMOS čipu. Vždy se jedná o měření světla, které je odraženo od fotografované scény.

1.5.1 MĚŘENÍ SVĚTLA ODRAŽENÉHO OD SCÉNY

Světlocitlivé vrstvy tak zaznamenávají **jas scény** a podle toho nastavují expozici. Kvalita takového měření je značně závislá na kvalitě a inteligenci měřícího přístroje, a to ve významu počtu měřících zón a schopnosti inteligentně volit scénu tak, aby měření pro maximální možný počet nastalých situací dávalo smysl. Zatímco jednoduchý selenový článek je v podstatě jednozónovým (plošným) jasoměrem – může tedy měřit jas scény jen velmi orientačně, nové digitální přístroje jsou schopny již mnoha velmi inteligentních postupů. Na profesionálních strojích bývá zvykem mít volbu měřit bodově, plošně, s vyvážením na střed, ale také zonálně. Pokud je zón dostatečné množství a přístroj je schopen je inteligentně zpracovat, může být přístroj schopný detekovat i situace typu krajiny při západu Slunce, bodového světla ve scéně, výskyt kontrastních ploch s vysokým jasem apod. [3], [4].

Expozimetry, které měří světlo odražené od scény, jsou vlastně jasoměry. Všechny expozimetry integrované do fotoaparátů jsou tím pádem jasoměry také. Externí expozimetr sloužící jako jasoměr může být někdy snadno přeměněn na expozimetr měřící osvětlení scény. Takové expozimetry mívají možnost nasadit na světlocitlivou buňku difuzor – mléčnou polokouli anebo destičku.

Externí expozimetry mají někdy také funkci spotmetru, který je schopen pomocí optiky měřit jas ve velmi malém úhlu. Prakticky se takové měření hodí například v živé scéně namířením na obličej a exponováním tzv. na pleťovku. Vyhněte se nebezpečí, že do scény zasáhne například bodový zdroj světla (příklady – koncerty, scéna s protisvětlem, zapadající Slunce, lesklé plochy, apod.)



Obrázek 1-13: Expozimetr s funkcí měření dopadajícího světla (bílá polokoule), jasoměru v podobě spotmetru (hledáček napravo).

1.5.2 MĚŘENÍ DOPADAJÍCÍHO SVĚTLA NA SCÉNU

Samotný fotoaparát nikdy nebude fungovat jako expoziometr měřící světlo dopadající do scény, právě proto, že scénu snímá, nemůže se tak nacházet přímo v ní. K tomu slouží výhradně expoziometry vybavené difuzorem (kalotou) anebo difuzní destičkou (s tou se však v běžné fotografii a kinematografii setkáme jen výjimečně). Z expoziometru se rázem stane luxmetr, který měří intenzitu osvětlení na kalotě. Měří tedy dopadající světlo a jeho měření je zřejmě nejspolehlivějším. Kalota zaznamenává dopadající světlo v rozsahu až 180 ° a při použití je namířena na objektiv kamery nebo fotoaparátu. Dává jasnou informaci o světle ve scéně bez ohledu na to, jak vypadá konstrukce scény samotné. Tato výhoda se nejzřetelněji ukáže v kinematografii, kde je nutné, aby každý záběr byl zaznamenán stejně. Pokud bychom svěřili měření expozice sebelepší automatické expoziometru vestavěného do kamery, pak by po každém posunu kamery, úpravy objektů ve scéně měřil trochu jiné parametry a záběr od záběru by se tak mohly (někdy i zásadně) lišit.

Speciálním případem jsou pak flashmetry, tedy expoziometry schopné měřit krátké záblesky. I zde se jedná o luxmetry, pouze se schopností zachytit a změřit krátký světelný pulz vydaný zábleskovým systémem. Flashmetrem tak měříme stejně jako expoziometrem výše.

Jako jednoduchá náhrada za expoziometr nám tedy očividně může sloužit i luxmetr. Lišit se budou od sebe pouze přesností měření, obzvláště v situacích s nízkým osvětlením (pod desítkami luxů) a ve své podstatě můžete použít i fotodiodu mobilního telefonu se staženou

aplikací luxmetr/expozimetr. Zde je ovšem vhodné zvážit vytvoření alespoň nějaké náhrady za kalotu. Popřípadě existují aplikace, které možnost dokoupení vlastní kaloty nabízejí. Měření je sice orientační, ale pro běžné amatérské použití může být dostačující.



Obrázek 1-14: Kalota jako nástavec na mobilní telefon umožňuje spolu s vhodnou aplikací využít světlocitlivou buňku na mobilním telefonu jako expozimetru měřící dopadající světlo.

1.6 Zdroje světla

Pro práci a celkové pochopení podstaty světla ve fotografii musíme nezbytně dojít také ke zdrojům světla. Každý zřejmě intuitivně chápe, že scéna osvětlená svíčkami, žárovkami, LED zdroji anebo Sluncem, bude dávat zásadně rozdílné výsledky, a to nejen co do intenzity světla. Podstatu pochopíme ze systematického rozdělení na zdroje tepelné a neteplené.

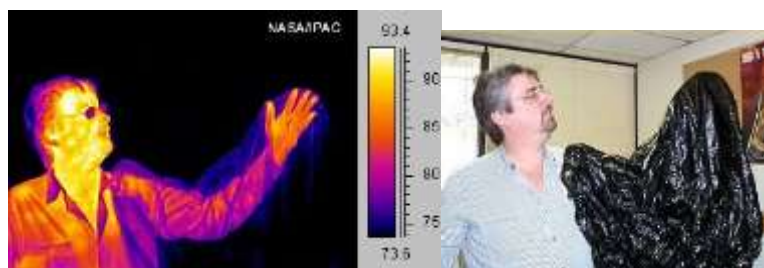
1.6.1 TEPELNÉ ZDROJE SVĚTLA

Každé těleso vyzařuje elektromagnetické záření. Proč tomu tak je a jak to vysvětlit matematicky, tak na tom si vylámal zuby ne jeden světový fyzik 19. století. Kirchhoff, Rayleigh, Jeans, Wien, Stefan, Boltzman... Ale díky jejich výzkumu zakončeném úspěšně Maxem Planckem dnes na fotoaparátech nastavujete barevnou teplotu v Kelvinech². Teplá bílá jako 2700 K, denní bílá 5000 K... Bude Dobré vědět³, jak vlastně tyto jednotky fungují a jak je používat. Každé těleso vyzařuje elektromagnetické záření, protože je v termodynamické rovnováze se svým okolím. Těleso přijímá teplo od okolních těles, a také je musí vyzařovat. Toto vyzařování má velmi specifický průběh a v podstatě závisí pouze na teplotě

² Kelvin je jednotka termodynamické teploty, velikost této jednotky je stejná jako °C, ale její začátek je posunut na tzv. teplotu absolutní nuly, což je $-273,15$ °C. Při této teplotě se zastavuje termální pohyb hmoty.

³ Pořad Dobré vědět vznikl na Slezské univerzitě v Opavě jako pokrčování úspěšné bakalářské práce studenta Jiřího Dobrého. Podstatou tohoto YouTube kanálu je přinášet zajímavosti ze světa vědy a techniky přístupnou a zábavnou formou. Jeho popularita v době psaní těchto skript prudce roste a stává se fenoménem české populárně-naučné mediální scény.

tělesa. Pokud se podíváte termovizí na radiátory anebo na člověka, bude zářit. Termovize je vlastně kamerou, která zaznamenává v infračerveném oboru spektra. Pokud budete těleso zahřívat více, například vezmete kancelářskou sponku a zahřejete ji nad plamenem hořáku, posune se s jeho rostoucí teplotou záření z infračerveného oboru až do oboru viditelného, sponka zčervená a začne být viditelná, jakmile dosáhne teploty větší než již cca 200 °C a pokud bude její teplota růst, tak postupně zežloutne, zezelená, když dosáhne teploty přes 5000 °C... Počkat, ale takové teploty nedosáhne, protože se před tím roztaví. (Ocel taje při 1600 °C.)



Obrázek 1-15: Díky tělesné teplotě kolem 36 ° člověk září v infračerveném spektru. Zároveň platí, že některé materiály jsou pro infračervené záření průhledné, zatímco pro viditelné mohou být zcela neprůhledné jako v případě PVC pytle.

Stejně to platí na druhou stranu elektromagnetického spektra, velmi studená tělesa také září, ale v infračerveném spektru. Pozůstatek po oddělení záření od hmoty v raném stádiu vývoje vesmíru, tzv. mikrovlnné kosmické pozadí, má barevnou teplotu 4 K, tedy září a má teplotu – 269 °C. Ale pravděpodobně se vám asi nestane, že byste někdy bílou museli vyvažovat na teplotu mikrovlnného kosmického pozadí.

Slunce svítí proto, že je jeho povrch zahřátý na teplotu ~ 5500 K. Povšimněte si, že pokud nastavujete na fotoaparátu vyvážení bílé na slunečný den, nastavujete zpravidla hodnotu 5500 K. Klasická žárovka s wolframovým vláknem svítí teplým bílým odstínem, vlákno je z wolframu, protože je to báječný odporový drát, který se neroztaví ani při zahřátí nad 3000 °C (teplota tání wolframu je 3400 °C). Těleso zahřáté na tak vysokou teplotu svítí nažloutle. A skutečně, pokud budete vyvažovat bílou na vlákno žárovky, budete nastavovat vyvážení bílé 2700 K.

Ve filmu staré osvědčené halogenové lampy s Fresnelovou čočkou jsou vybaveny halogenovými žárovkami, což je klasická žárovka, v jejíž baňce je snížený tlak a je napuštěna halovými plyny (halogenu, sloučeninami např. bromu nebo jodu). Díky tomu wolframové vlákno odolá vyšší teplotě, a tak může být zahřáto až na teplotu přes 2900 °C (3200 K). Sklo halogenové žárovky už není obyčejné, jako u žárovky klasické, je použito křemenné sklo. A jak se dá očekávat, vyvážení bílé u scény nasvícené tzv. halogeny nastavujeme na 3200 K. Oproti žárovkám je nutné dávat pozor a zachovat baňku skla naprosto čistou. Obzvláště bychom se jí neměli dotýkat rukama, protože soli obsažené v potu naleptají při vysokých teplotách sklo baňky a ta má tendenci brzy prasknout.

Celé toto kouzlo barevné teploty a skutečné teploty je snadno aplikovatelné a prosté u všech zdrojů, které jsou tepelné. Tedy světlo z nich září právě díky principu záření absolutně černého tělesa, na které přišel v roce 1862 Gustav Kirchhoff a které napočítal Max Planck v roce 1900. Tepelnými zářiči jsou Slunce, oheň, rozžhavená tělesa. V podstatě také Měsíc, ten však svítí odrazem slunečního světla. Všechny ostatní zdroje světla jsou zdroje netepelné. A u nich již opouštíme myšlenku tzv. barevné teploty a zavádíme pojem tzv. náhradní teploty chromatičnosti.

Tepelné zdroje:

- mají nízkou účinnost (cca 10–15 lm/W), protože
- velký podíl energie vyzáří v infračerveném spektru (jako teplo),
- mají spojité spektrum a perfektní (téměř 100%) barevnou věrnost,
- barevná teplota přímo úměrně závisí na teplotě zářiče a vyjadřuje se v $[K]$ kelvinech.

1.6.2 OSTATNÍ ZDROJE SVĚTLA (NETEPELNÉ)

Světlo je proud fotonů, které mohou být z hmoty vyzařovány i jinak, než prostřednictvím tepelného záření. Obvykle se jedná o principy elektrické. Tedy o změnu stavu elektronu v atomovém obalu. Přechodem elektronů z excitovaných stavů do základních je provázeno vyzářením fotonů. Proto můžeme zdroj světla vytvořit i tak, že dáme vzniknout excitovaným stavům hmoty. Například průchodem silného elektrického pole látkou, vysokou teplotou, anebo jinými mechanizmy (mechanickými nebo dokonce zvukovými). Nás budou zajímat především ty zdroje světla, které se objevují v optice ve filmu a fotografii, ale pozor, nepůjde jen o ateliérová světla. Jako autoři budete muset pracovat s různými zdroji, nejen těmi inscenovanými. Vaše scéna bude obsahovat například i pouliční sodíkové osvětlení, které se ve filmu jinak cíleně nepoužívá především pro svoji nízkou teplotu chromatičnosti a špatnou věrnost barev. A jako tvůrci si nejspíš málokdy budete moci dovolit v noční scéně z ulice nechat vyměnit zdroje světla v pouličních lampách za vlastní filmová (jako například ve filmovém muzikálu *La La Land*), nebo vytvořit vlastní měsíční světlo nad scénou osvětlující kilometr vzdálené kopce (jako ve filmu *Django Unchained*).

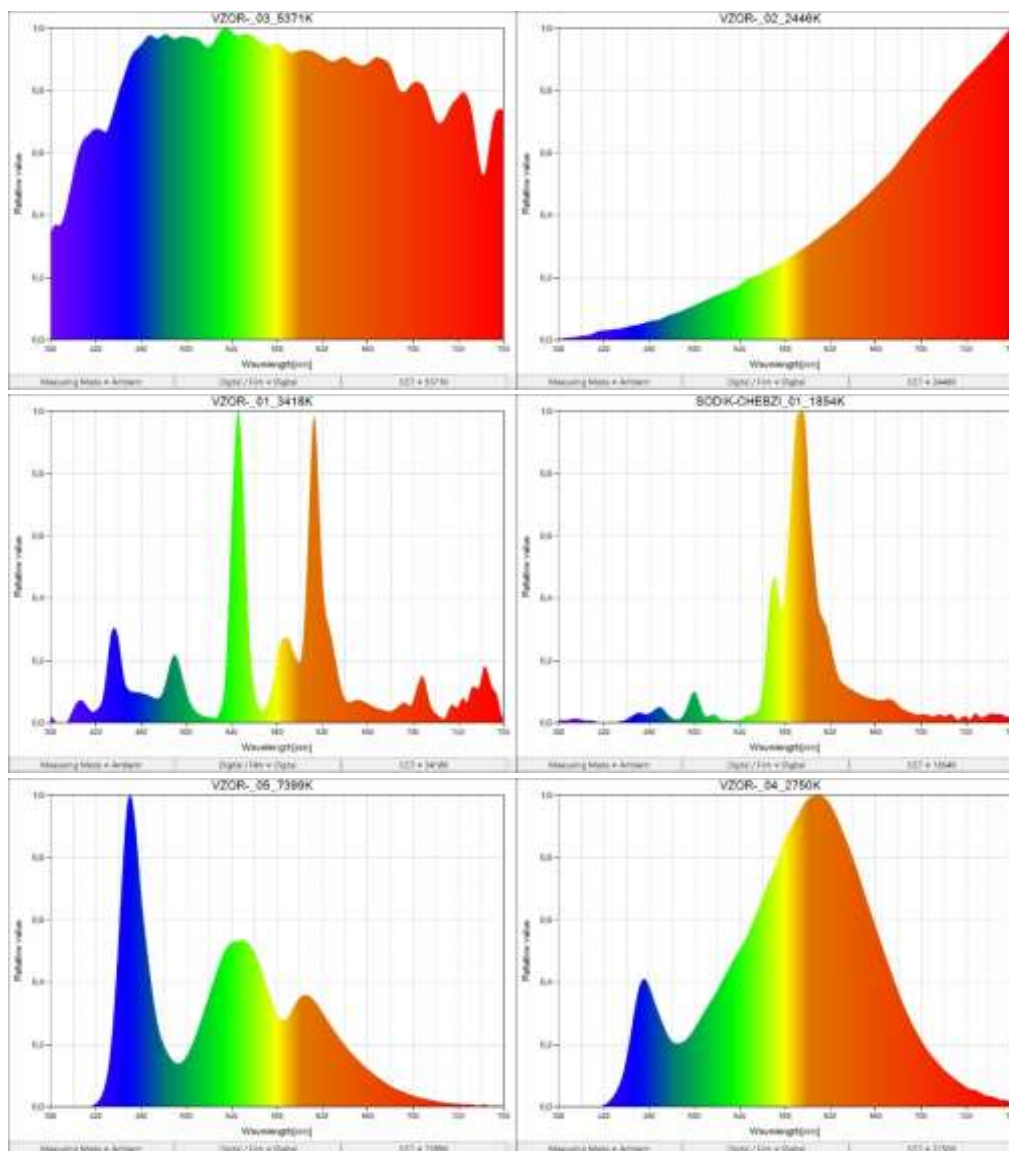


Obrázek 1-16: Screen z filmu *La La Land* (Damien Chazelle, 2016) – vlevo a z filmu *Django Unchained* (Quentin Tarantino, 2012). V případě muzikálu *La La Land* byly

lampy upraveny na barvu namodralých rtuťových výbojek a prostor byl vykryván až 15 kusy 6 kW HMI světly. V případě filmu Nespoutaný Django byla krajina nasvětlena z jeřábu celkem 24 kusy 6 kW HMI přes obří softboxy. Oba filmy byly natáčeny na film, nikoliv na digitální kameru.

Co je klíčové pro všechny netepelné zdroje světla je nespojité spektrum. Tato vlastnost má dalekosáhlé důsledky. Neexistuje zde pojem barevná teplota (i když se někdy slangově používá i pro netepelné zdroje). Světlo takto vzniklé má obvykle v nejlevnějších typech zdrojů špatnou věrnost barev a pro účely fotografické a filmové musí zdroje světla profesionální podstupovat různé ladění tak, aby se barevné věrnosti přiblížili (dnes se nicméně umíme dostat na 95+ tedy velmi kvalitní podání barev u většiny produkčních zdrojů).

A zpátky k fyzice: Přechod elektronu na základní stav je spojen s vyzářením fotonu. Ve valné většině případů pak platí, že daný excitační podnět je podle intenzity a zdroje svázán s konkrétním atomem a konkrétními elektronovými přechody. Světlo vyzářené takovým zdrojem je tak buď čárové anebo pásové. Tedy zdroj svítí jen v úzkém pruhu nějaké konkrétní barvy. Takovým případem jsou například lineární nebo kompaktní zářivky, LED diody, sodíkové a další výbojky. Světlo takového zdroje tedy nepůsobí jak nekoherentní tepelný zdroj, ale jako barevné světlo (viz např. neonky). Světlo, které pak budeme moci vydávat za bílé, dosáhneme pouze kombinací více pásových/čárových zdrojů a použitím materiálů, na kterých může dojít k luminiscenci (luminofor).



Obrázek 1-17: Spektrum různých světelných zdrojů. Vlevo nahoře Slunce s typickým spojitým spektrem 5500 K. Vpravo nahoře žárovka s valnou většinou vyzařování v infračervené části spektra, 2500 K. Vlevo uprostřed zářivka s typickým pásovým spektrem 3500 K. Vpravo uprostřed vysokotlaká sodíková výbojka s dominujícím oranžovým pásovým spektrem a minimálním zastoupením dalších barev 1800 K. Vlevo dole LED žárovka, které dominuje modré čárové spektrum luminoforem konvertováno částečně do oranžové, avšak modrá dominující barva dává CRI 7300 K (konkrétně se jedná o světlo výkonné COB LED na turistické čelovce). Vpravo dole také LED žárovka, avšak klasická pokojová s CRI 2700 K, většina modré je tedy již luminoforem konvertována do oranžové.

CRI a věrnost barev – Z průběhu spektra nezjistíte věrnost barev, ta je počítána složitějším postupem. Stejně tak můžete leda odhadnout náhradní teplotu chromatičnosti. Nicméně je možné docela dobře vypořadovat, které části spektra jsou zastoupeny skokově

méně a které více, ale co především, na případnou absenci některých barev. To může mít dalekosáhlé důsledky například v reprodukci pleťových tónů. Lidé se světlejší pleti tak budou mít problém s korektní interpretací pleťových tónů například u lineárních a kompaktních zářivek, byť by měly věrnost barev na vysoké úrovni. CRI (Color Rendering Index), jehož hodnota je od 0 do 100 a 100 pak znamená absolutní věrnost barev (kterou dává například žárovka anebo Slunce). Avšak například u nízkotlakých sodíkových výbojek (velmi chudé a dominující téměř čárové spektrum na oranžové barvě) při aplikaci těchto kritérií dostane CRI záporné. U moderních LED zase můžeme získat i CRI 98 a přesto nebude reprodukován obraz na filmovém materiálu anebo čipu subjektivně věrný. CRI tak sice má vyjadřovat věrnost barev ve vztahu k lidskému oku, ale v případě přenosu světla na čip nebo emulzi může částečně selhávat (rozsáhlou diskuzi v době psaní tohoto materiálu vedou výrobci LED filmových osvětlení). Z toho důvodu pro účely kinematografie a televize byl vyvinut doplňkový index TLCI. Zaveden byl jako norma EBU (European Broadcasting Union).

TLCI a věrnost podání televizních barev – Existují již v dnešních dnech výrobci, kteří poskytují světelné zdroje s TLCI 95+. Nicméně tato oblast vývoje je v tuto chvíli teprve v počátku. Rozhodně má smysl z hlediska barevného podání sledovat výrobky disponující TLCI minimálně 85, které jsou považovány za zdroje s věrnou reprodukcí barev pro účely filmu.

Náhradní teplota chromatičnosti – U tepelných zdrojů jsme měli barevnou teplotu vyjádřenou v kelvinech. I zde máme stejnou jednotku, stejné měření a stejné subjektivní vlastnosti „bílého světla“. Jde jen o to, že toto bílé světlo již není bílé, ale je složeno třeba jen z několika barevných pásů spektra. I zde však máme stejnou teplotu bílou 2700 K, halogenovou teplotu 3200 K, denní bílou 5000 K apod. V kombinaci s kvalitními CRI a TLCI indexy se pak můžeme přiblížit věrnosti tepelného zdroje. Vždy však musíme mít na paměti, že různé zdroje světla se od sebe liší a jejich vzájemná kombinace nemusí prospět výsledku a celkové CRI (TLCI) může kombinace například lineárních zářivek a LED zdrojů pokazit. Nemusí to být zásadní u nízkorozpočtových snímků s určitou tolerancí ke kvalitě barevného podání, avšak pro profesionální produkce se tyto nebezpečné kombinace musí brát v potaz.

Pro účely této knihy už budeme dále mluvit zjednodušeně pouze o „barevné teplotě“ s vědomím informací podaných výše.

Žárovka má barevnou teplotu cca 2500 K, halogenové lampy 3200 K, měsíc 4000 K, polední slunný den 5500 K, zamrčený den 8 až 9 tisíc K, hodně zamrčený den i více. Lineární a kompaktní zářivky, LED a další produkční zdroje mohou mít barevnou teplotu nastavitelnou podle použitého luminoforu. A tak je můžeme koupit ať jako teplé bílé, tak jako studené bílé.

Venkovní pouliční lampy se dnes dělají buď s LED zdroji s různými barevnými teplotami od 2700 do 6500 K a CRI kolem pouze 75 anebo nejrozšířenější typy veřejného osvětlení mají vysokotlaké sodíkové výbojky 2000 K s CRI pouze kolem 25. Povšimněte si, že

u sodíkových výbojek nebudete dost dobře schopni rozeznat barvy předmětů, které osvětlují, prakticky nemožné je rozeznat modré a zelené auto. I s tímto jevem musíte při venkovním natáčení ovlivněném sodíkovými výbojkami počítat.

1.6.3 BLESK FOTOAPARÁTU

Zcela samostatnou podkapitolu věnujeme blesku fotoaparátu. Ani blesk fotoaparátu není tepelným zdrojem, a přesto poskytuje velmi kvalitní kvazispojité spektrum s perfektní barevnou věrností. Dnešní blesky fotoaparátů jsou vybaveny xenonovými výbojkami. Tedy jde o skleněné trubice (obvykle tvaru U) naplněné xenonem s elektrodami na koncích. Elektrický proud do trubice vstupuje tak, že se uvolní z nabitého kondenzátoru a díky vysokému napětí dojde v plynu k emisi světla. Při nízkém napětí zasvítí v čárovém spektru, ale při velmi vysokém napětí dojde ke zhroucení těchto čárových spekter do širokých pásů až na takovou úroveň, že blesk vyprodukuje světlo v podstatě spojitého spektra. Nastavením napětí je pak možno vyladit barevnou teplotu, která bývá u produkčních blesků 5500 K. Z netepelných zdrojů je zatím blesk svou konstrukcí nejkvalitnějším světelným zdrojem. Záblesk však přetrvá jen velmi krátce, řádově tisíce sekundy.

Pozor samozřejmě na případnou záměnu s bleskem v mobilních telefonech, kde jsou blesky diodové a jde pouze o krátký puls (zasvícení) LED diody o nízkém výkonu.



Obrázek 1-18: Záblesk xenonové výbojky blesku. (Autor: Gregory Maxwell GFDL licence)

1.6.4 HMI

Speciální podkapitolu si zaslouží také dosud nejvíce zastoupené typy filmových světel, a to slangově tzv. HMI světla poskytující téměř denní světlo. Tato obdoba rtuťových výbojek přináší především vysokou účinnost, dlouhou životnost a velmi věrné podání barev. Mají však i své nevýhody, a tak se je dnes daří nahrazovat zlepšujícími se LED technologiemi.

HMI je proprietární značka společnosti Osram a značí patentovanou technologii tzv. stře-doobloukové rtuťovo—iodové výbojky. Obecně patří do kategorie metalhalidových výbojek a toto jméno si už zapamatujte, protože pro mnoho amatérů může být použití takových lamp alternativou k filmovému svícení (metalhalidové výbojky se prodávají zpravidla jako

efektivní náhrada světla pro pěstování při umělém světle). S vhodnou lampou a předřadníkem může stát kompletní alternativa HMI s výkonem 400 W klidně i pouhých několik tisíc při CRI 90+ a účinnosti kolem 100 lm/W. A to je stejně dobré jako LED technologie roku 2019!

HMI světla jsou obvykle vybavena Fresnelovou čočkou, avšak místo halogenové žárovky se nachází HMI výbojka. Ta se však nezapálí obyčejným proudem 220 V. První fáze zážehového xenonového výboje potřebuje několik tisíc voltů. Proto jsou lampy vybaveny předřadníkem (z anglického výrazu slangově ballast). Ten bývá z bezpečnostních důvodů umístěn mimo lampu. Proud tak přichází ze zdroje 220 V do předřadníku, z něj je pak kabely pro vysoké napětí veden do lampy.

Charakter svícení HMI má svá specifika, krom toho, že několik prvních hodin nově instalované výbojky je třeba zahřát, protože její barevná teplota je přes 15 000 K, barevná teplota HMI výbojky není ani potom stálá. Při každém zažehnutí je třeba vyčkat několik minut až se nahřeje a barevná teplota ustálí na hodnotě zhruba 5600 K, a pak je třeba brát v potaz, že v průběhu životnosti její barevná teplota dále klesá rychlostí zhruba 1 K za hodinu. Výhoda oproti halogenům však je, že méně hřeje.



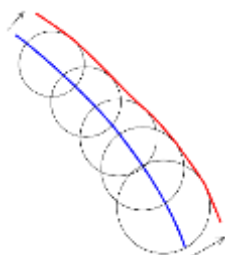
Obrázek 1-19: HMI světlo včetně předřadníku.

1.7 Vlnové a částicové vlastnosti světla

Snadno by se mohlo jevit, že vlnové a částicové vlastnosti světla jsou důležité pro fyziky, nikoliv pro kameramany a fotografy. Jenže existuje hned několik jevů, které jsou součástí běžné konzumní tvorby. Světlo se za prostých podmínek šíří přímočaře prostřednictvím paprsků a tedy v naprosté většině případů uvažujeme o světle v kontextu již probírané geometrické optiky. Jenže to neplatí například na rozhraní dvou optických prostředí a neplatí to ani v případě, že světlu postavíte do cesty nějakou překážku srovnatelnou s vlnovou délkou světla.

1.7.1 HUYGENSŮV PRINCIP A DIFRAKCE

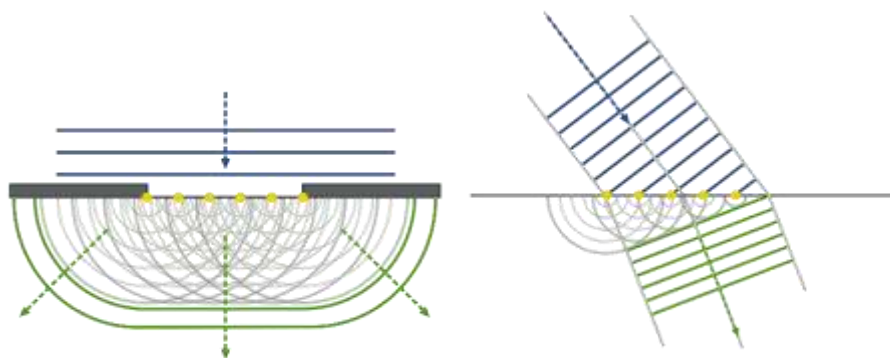
V prvním případě jde o pochopení principu, jak funguje lupa nebo objektiv. Protože světlo se šíří jako vlnění. A podle Huygensova principu je každý bod vlnoplochy⁴ sám zdrojem vlnění. To si možná za běžných podmínek bez překážek nedokážeme úplně představit, logický význam dává tento princip (zpřesněný o něco později Fresnelem), když světlo narazí na malý otvor anebo na opticky jinak hustý materiál.



Obrázek 1-20: Vlnoplocha sférického vlnění. Šipky ukazují směr šíření, barevné čáry jsou vlnoplochami v dvojrozměrném prostoru. (Autor: Pajs @ wikimedia CC BY-SA 3.0)

Světelná vlna dopadající na rozhraní dvou optických ploch (tedy například ze vzduchu na sklo) anebo procházející malým otvorem ne příliš větším než je vlnová délka světla, změní směr a způsob svého šíření. V makroskopickém měřítku to znáte jako například lom světla. Ponořená část brčka ve sklenici vody je vidět jinak, než ta, jehož část je nad hladinou. Posvícením laserovým ukazovátkem na malinkou špendlíkovou díрку v papíře způsobí, že paprsek za dírkou se na stínítko zobrazí jako soubor soustředných kruhů a nikoliv už jen jako tečka laserového ukazovátka.

⁴ Vlnoplocha je množina bodů vlny, které mají stejnou fázi. Vlnoplocha je kolmá na směr šíření vlnění.



Obrázek 1-21: Graficky znázorněný způsob šíření světelných vln podle Huygensova principu v prvním případě při dopadu na malý otvor a ve druhém případě při dopadu na opticky hustší prostředí.

Díky Huygensovu principu můžeme pochopit princip šíření vlnění i jevy jako je difrakce. Tedy ohyb na štěrbině nebo na mřížce. Nás pro účely této knihy bude zajímat difrakce na štěrbině, protože má zásadní důsledek ve fotografické optice. Z levého obrázku (Obrázek 1-21) je možno odůvodnit, že vlnění se šíří také do oblasti geometrického stínu. Každý okraj štěrbiny se stává novým zdrojem vlnění. Dochází zde k ohybu neboli difrakci. Tento jev má také rozptýlný charakter a může se projevit kupříkladu na velmi zavřené cloně objektivu. Většina fotografických objektivů cloní až do clony $f/22$ nebo i více. Jenže již clona $f/16$ na běžných zvětšeninách přináší viditelný pokles kontrastu a kresby. Pokud budete hledat příčinu, je jím právě difrakce. Clona $f/16$ ani $f/22$ není sice ani náhodou velká jako vlnová délka světla, je samozřejmě mnohem větší, avšak skrze ni proudí světlo na plochu snímáče, a tak se promítnuté nejmenší body obrazu s ohledem na zvětšení realizované objektivem ve svém poměru blíží vlnové délce světla. A stávají se tak díky jevu difrakce neostrými. Pokud tedy musíte clonit na $f/16$ a více, dělejte tak z rozmyslem, jelikož takový obraz bude zřetelně méně ostrý, než např. obraz na cloně $f/8$.

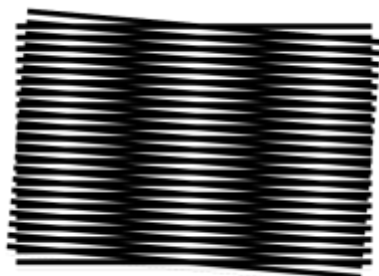


Samostatný úkol: Vyfotografujte zvolený testovací obrazec obsahující kontrastní černé i barevné linie, body, mřížku jak na středu snímku, tak v jeho rozích při stejném nastavení (použijte dostatečné osvětlení, pevný stativ, časovou spoušť a měňte pouze čas závěrky), jedním objektivem, s clonou 2.8, 5.6, 8, 11, 16 a 22. Porovnejte ostrost obrázku na zvětšení 1:1 a stanovte závěr.

1.7.2 INTERFERENCE

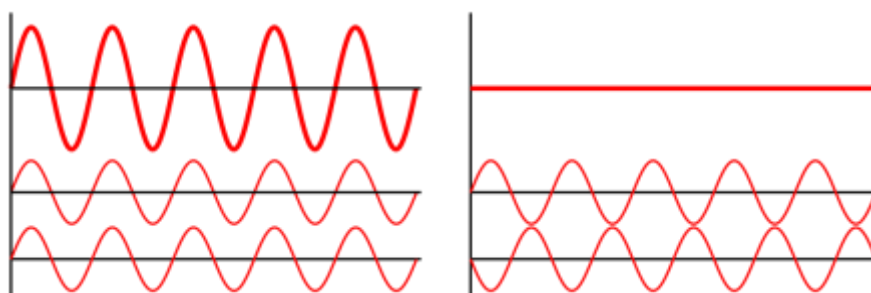
S difrakcí se pojí ještě jeden jev, který však nastává jen u koherentního světla. Pokud máme dvě světelné vlny, které se pohybují rovnoběžně, mají stejnou (nebo alespoň velmi blízkou frekvenci a amplitudu), pak jsou koherentní a může na nich nastat interference. Typickým příkladem je laserový paprsek.

Pokud se takové dvě navzájem koherentní vlny setkají, může při vhodném dráhovém rozdílu dojít k jejich zesílení anebo zeslabení. Takové situace jsou kupodivu ve fotografické optice taky naprosto běžné a nejen tam. I ve filmu je interference dosti obtížným jevem, který sice vzniká trochu odlišným způsobem než interferencí dvou koherentních vln, ale také se jedná o jev interferenční – říkáme mu moaré.



Obrázek 1-22: Moaré vzniká překrytím stejných nebo podobných vzorů navzájem pootočených o malý úhel, anebo navzájem posunutých. Může také vzniknout překrytím podobných vzorů anebo vhodně pravidelně uspořádaných vzorů. Na obrázku výše interferují (zesilují) se ta místa, kde se překrývá prázdná plocha s plnou a tvoří tak hustší síť které neumožňují oku rozlišit skutečný tvar obrazce v popředí a pozadí.

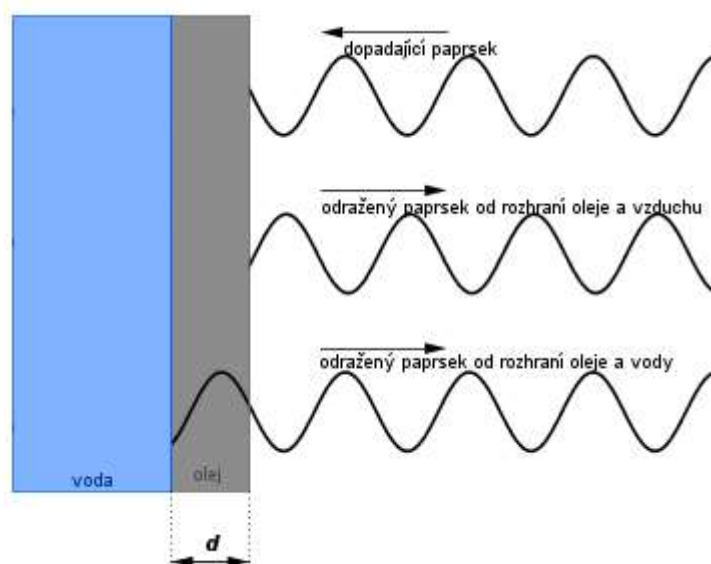
Interference světelných paprsků je postavena na tom, že stejné orientované vlny se stejnou frekvencí a amplitudou se navzájem vyruší anebo zesílí, podle toho, jak jsou vlny vůči sobě posunuty. Amplitudy vlny posunuté navzájem ve směru šíření o půl násobek vlnové délky se vyruší, vlny posunuté o násobek vlnové délky se ve svých amplitudách zesílí.



Obrázek 1-23: Interference vlnění. Vlevo zesilující amplituda vlnění u vln posunutých o celou délku vlny, vpravo díky posunutí o násobky poloviny délky vlny se vlnění vyruší. (Autor Haade.)

Pro nás důležitým využitím interference světla je tvorba antireflexních (protiodrazných) vrstev. Objektivy fotoaparátů se skládají často z mnoha optických prvků. Prochází-li takovým systémem světlo, odráží se na mnoha površích a na každém dojde k určité ztrátě nebo následném rozptylu. Aby se těmto odrazům předešlo, pokrývají se plochy optických skel tenkou vrstvou z průhledné látky o indexu lomu menším, než je index lomu optického skla. Díky tomu, že je taková vrstva velmi tenká, můžeme světlo, které se v ní šíří, považovat

téměř za koherentní. A můžeme vypočítat, při jak tenké vrstvě dojde při zpětném odrazu k interferenci, při které se vycházející světlo s dopadajícím zcela vyruší. Jelikož je interference závislá na vlnové délce, nemůžeme tenkou antireflexní vrstvou zabránit odrazům celého spektra, proto se používají odrazné vrstvy nastavené na vlnovou délku světla zelenožlutého, tedy toho, na kterém je maximum vyzařování denního světla (550 nm). Pokud se tedy podíváte na povrch objektivu s antireflexní vrstvou, bude se při naklánění zdát zabarvený nejčastěji do modra nebo do (v mnohem slabší míře) červena.



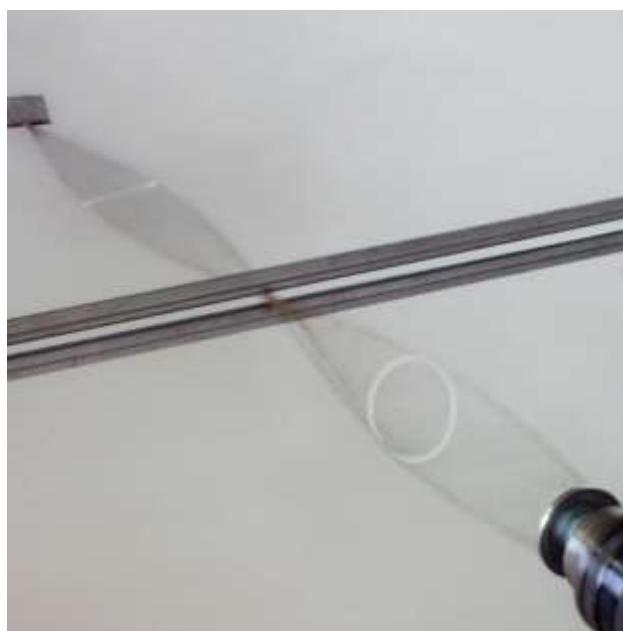
Obrázek 1-24: Interference na tenké vrstvě funguje jak u antireflexních vrstev, tak řeba na přirozených tenkých vrstvách, v uvedeném případě na oleji. (Autor, Magda Králová Techmania, CC BY-SA 3.0)

Interference světelných vln je ve fotografické optice tedy nesmírně důležitá, protože se jí zejména využívá při konstrukci antireflexních vrstev. V přírodě ji ale můžete nalézt snadno i v jiných situacích. Duhové zbarvení mýdlových bublin, olejová skvrna na vodě je typickým příkladem. Věděli jste ale, že perleťové zbarvení škeblí je také důsledek interference? Stěna mušle je pokryta hexagonálními destičkami aragonitu, který má velikost blízkou vlnové délce světla. Díky vrstvené struktuře a při různém natočení pak způsobují interferenci dopadajícího světla. Ale to není vše, také barevná křídla mnoha motýlů nejsou ve skutečnosti barevným pigmentem, ale jsou dána interferencí slunečního světla na struktuře křídel. Ta je složena z různých prohlubní, které některé vlnové délky zesilují a jiné zeslabují. Charakteristické tvary různých částí těchto křídel pak vytvářejí po proběhlé interferenci barevný vjem. Někteří motýli mají svou část z interference pocházejícího zbarvení stálé, někteří mají tvar prohlubní takový, že se jejich barvy při různém natočení jeví barevně různé tím, pod jakým úhlem světlo na povrch křídel vstupuje a jakým je odráží.

1.7.3 POLARIZACE

Vraťme se k vlnění na vodní hladině. Jedná se o dvourozměrnou plochu a vzedmutí nebo pokles hladiny nereprezentuje třetí dimenzi, ale amplitudu vlny. Jak se dá snadno představit, směr této výchylky vlny je skutečně kolmý na směr šíření. Pokud si něco podobného představíme v trojrozměrném prostoru, již se nám asi nepodaří představit si amplitudu vlny mířící do nějaké „čtvrté“ prostorové souřadnice, protože tím, že žijeme v trojrozměrném světě, žádná taková další vnímatelná dimenze pro nás neexistuje. Budeme tedy muset zapojit abstrakci a plně ji věřit. Světelné vlnění se tedy bude v prostoru šířit obdobně jako na hladině rybníka, také bude směr výchylky kolmý na směr šíření, ale nebude zde existovat nic, co by nutilo vlny, aby některý směr výchylky preferovaly a světelné vlnění se šířilo v rovině.

Existují však materiály, které nedovolí světelným vlnám projít jinak, než nějakou preferovanou rovinou. Pak říkáme, že se vlnění stává lineárně polarizované. Alespoň zhruba si můžete takový systém nepolarizovaného i polarizovaného vlnění představit u hry skákání přes švihadlo. Švihadlo drží dva lidé mezi sebou a jeden z nich švihadlem vlní. Pokud vlní v jednom směru, jde o obdobu vlnění lineárně polarizovaného, pokud s ním kroučí tak, jak bývá při hře skákání přes švihadlo zvykem, pak jde o polarizaci kruhovou. Pokud vlnil se švihadlem zcela náhodně a chaoticky bez preference směru, blížili bychom se něčemu, čemu říkáme nepolarizované vlnění. Rozdíl bude samozřejmě v tom, že takové vlnění na švihadle fixovaném na dva body se nešíří (je tzv. stojaté), ale pro názornost nám taková zkušenost bude stačit.



Obrázek 1-25: Ukázka změny kruhové polarizace na lineární polarizaci na příkladu gumového lanka roztočeného a rozvibrovaného zároveň. Sepnutím šterbiny je z kruhově polarizovaného pohybu preferován pohyb lineárně polarizovaný. (autor: Záttonyi Sándor, (ifj.) Fizped - Own work, CC BY-SA 3.0)

Světlo ze všech běžně používaných zdrojů (Slunce, žárovky, halogeny, LEDky, HMI, apod.) je nepolarizované. Avšak k polarizaci dochází například odrazem takového světla. Tedy odražené světlo je vždy částečně lineárně polarizované (neplatí pro vodivé, tedy například kovové, povrchy). K jak velké polarizaci dochází, závisí pouze na úhlu dopadu světla. Maximální lineární polarizace nastává podle tzv. Brewsterova zákona a závisí na indexech lomu uvažovaných optických prostředí. Například pro rozhraní vzduch/sklo je Brewsterův úhel (počítáno ke kolmici dopadu) 56° . U rozhraní vzduch/voda zhruba 53° .

Denní světlo vyzařované oblohou je také částečně polarizováno. Jak sluneční světlo vstupuje do atmosféry, rozptyluje se jeho část na aerosolech v atmosféře, což způsobuje typickou modrou barvu oblohy (protože nejvíce je rozptylováno světlo modré barvy). Tímto rozptylem však dochází také k částečné polarizaci, která je nejzřetelnější ze směru vychýleném od Slunce o 90° .

Polarizované je také světlo LCD monitorů, což je možno snadno poznat, pokud s polarizačními brýlemi zkusíte koukat na display notebooku anebo mobilního telefonu. Půjde to obtížně.

K polarizaci dochází také průchodem světla některými materiály. Fyzikálně využívají buď principů Brewsterova úhlu anebo interference, ale možností je mnoho. Nás budou zajímat jen materiály, které se používají ve fotografické optice, a těmi jsou planparalelní desky, tedy rovinná sklíčka, pokovená lineárně polarizující vrstvou. Vzniká polarizační filtr, nasazovaný zpravidla před objektiv. Musíme si samozřejmě uvědomit, že polarizací o část procházející energie přijdeme. Stejně tak platí, že souhlasně natočené polarizační filtry propouští maximum záření, avšak jejich vzájemným natočením se množství procházejícího světla snižuje. Pokud jsou polarizační filtry proti sobě natočeny o úhel 90° , pak systémem v podstatě žádné světlo neprojde.



Obrázek 1-26: Obrázek rozdělen na dvě poloviny. Horní část obrázku s polarizačním filtrem, dolní polovina bez polarizačního filtru. Povšimněte si, že fotograf je přes sklo vidět, polarizace funguje díky blízkosti Brewsterova úhlu. Avšak zadní okýnka se již od Brewsterova úhlu vzdalují a na nich polarizační filtr nefunguje. (Autor Sbittante @ wiki, CC BY-SA 3.0)

Využití polarizačních filtrů vyplývá ze situací popsaných výše.

- Může pomoci odstranit polarizaci odrazem, tedy například reflexe na vodní hladině, na kapotách aut, od skleněných ploch apod.
- Může ztmavit jinak přesvětlenou denní oblohu, zde však záleží, kterým směrem komponujeme, nejvyšší účinek je ve směru 90° od Slunce.
- Kombinací dvou polarizačních filtrů můžeme vytvořit variabilní ND filtr. Vzájemným otáčením dochází k plynulému ztmavování obrazu.



SHRNUTÍ KAPITOLY

V kapitole byly shrnuty základní poznatky o světle jako elektromagnetickém záření. Zdroje světla ve filmu a fotografii a vlnové vlastnosti světla byly diskutovány.

2 ODRAZ A LOM SVĚTLA

RYCHLÝ NÁHLED KAPITOLY



Geometrická optika a její využití ve filmu a fotografii.

CÍLE KAPITOLY



Získat povědomí o průchodu světla optickými prostředími.

ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU



6 vyučovacích hodin.

KLÍČOVÁ SLOVA KAPITOLY



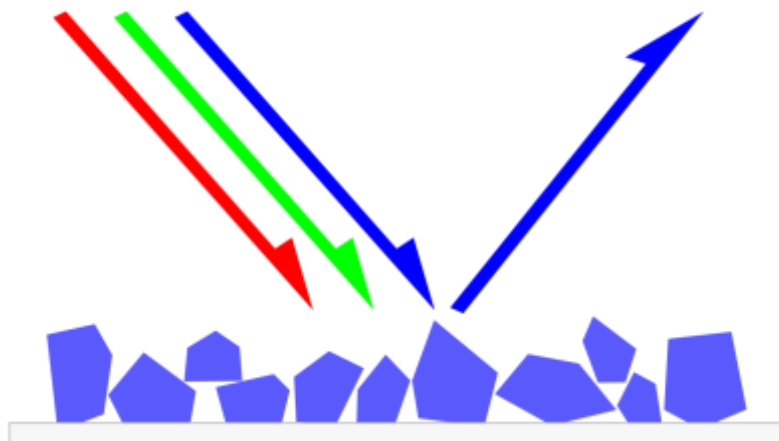
zrcadla, čočky, lom, odraz, sklo, optické sklo

2.1 Princip odrazu a odrazivost

Světlo dopadající na jakýkoliv povrch je částečně odraženo a částečně pohlceno. Světlo je nositelem energie, která se prostě částečně pohltí (anebo projde) a částečně odrazí, a to platí za všech okolností bez ohledu na typ materiálu, jeho odrazivé a absorpční schopnosti, bez ohledu na barvu, složení i „lesk“ anebo „průhlednost“. Existuje jediná výjimka, a tou je úplný odraz, o kterém se zmíníme později. Každopádně svůj díl energie pohltí i odráží jak zrcadlo, tak černá sametová látka.

Než se dostaneme k zákonu odrazu, měli bychom si uvědomit, co vše odraz světla ovlivňuje a jak. Na prvním místě budeme mluvit o odrazivosti, která nám říká, jak velké množství světelné energie látka odráží. Asi si dokážeme uvědomit, že bílý sníh odráží velmi mnoho světla a naopak čerstvě zorané pole odráží světla jen velmi málo.

Červená pohovka bude pravděpodobně odrážet hlavně červenou barvu a světlo modrých vlnových délek bude pohlcovat. Svou roli v množství a druhu odraženého světla hraje především tvar povrchu látky. Některé povrchy mají tvar, či chemickou strukturu, která prostě určitě vlnové délky pohltí a jiné odráží.



Obrázek 2-1: Barevná odrazivost modrého pigmentu. Struktura a složení modrého pigmentu je právě taková, že pohltí všechny vlnové délky světla krom modré. Tu odráží.

Barevnost pak ale záleží také na tom, jakým zdrojem je povrch látky ozářen. Zatímco denní světlo pocházející ze Slunce, jak víme, obsahuje všechny vlnové délky viditelného světla, existují zdroje, ve kterých jsou některé vlnové délky (barvy) zastoupeny výrazně méně. Proto se mohou stejné povrchy pod různými zdroji světla jevit mírně rozdílně barevné. Využívá se toho například v supermarketech, kde jsou vitríny s masem nasvíceny zdroji, které způsobí, že se nám maso jeví červenější.

Naopak problematické je takové míchání zdrojů, jak už ale bylo dříve řečeno, v případě ateliérového svícení, kde zásadním způsobem ovlivňuje druh zdroje světla pleťové tóny anebo objekty obsahující barevné kovy. Například vzhled zlata je prostřednictvím umělého světla velmi obtížně reprodukovatelný i v případech velmi vysokého CRI.

Také platí důležitá zásada, že vyjma látek fluorescentních nebo fosforeskujících, pigmenty látek některé barvy pohlcují, některé odrážejí, ale žádné nevytvářejí. Pokud ve zdroji chybí modrá vlnová délka, tak ji po odraze nemůžeme ani získat. Pozor, můžeme ale na principu subtrakce navodit určitý barevný vjem mícháním několika barev. Nicméně takové možnosti nejsou libovolné, ale jsou svázány zákony míchání barev.

Velmi strukturovaná látka s velikostí struktury o něco větší nebo blízké vlnovým délkám světla se tedy bude jevit spíše tmavá, protože na strukturách látky bude velká část světla pohlcena mnohonásobnými odrazy. Takového efektu můžeme dosáhnout i s většími strukturami vhodného tvaru, jakými jsou například miniaturní jehlany. Naopak velmi hladký povrch se strukturou výrazně menší než je vlnová délka světla se bude jevit jako lesklý anebo bílý. Bude odrážet velké množství světla. Takové pravidlo ale není ultimativní, jinak

velmi strukturovaný sníh odráží velké množství světla, ale odraz světla od sněhu je dán krystalickou strukturou sněhových vloček.

Znalost odrazivosti materiálu je užitečná pro objektivnější hodnocení scény, která je nasvětlována a zaznamenána. Právě zasněžená krajina bude při určování expozice způsobovat nemalé problémy stejně tak, jako například fotografování na scéně divadla vybaveného oponami a závěsy z černého sametu. Míra odrazivosti bude leccím užitečná pro účely určení správné expozice.

Tabulka 2: přibližná odrazivost některých látek pro úhel dopadu kolmo na látku

materiál	odrazivost
experimentální nanomateriál Vantablack	0,035 %
černý samet	0,2 %
tiskařská čern	3 %
louka, pole, les	3 %
voda	6 %
asfalt	10 %
hlína	20 %
plet'	25—35 %
bílá tkanina	~50 %
bílý papír	70—80 %
sníh	80—90 %
hliník	94 %
stříbro	96 %

Princip nízké i vysoké odrazivosti je důležitý také u optických prvků. Vnitřní plochy tubusů objektivů, clony, anebo vnitřek fotoaparátu, kterým procházejí optické dráhy světelných paprsků bývají vyčernovány proto, aby na nich nevznikalo parazitní světlo způsobené nechtěnými odrazy. Jak je z tabulky výše patrné, rozdíl mezi obyčejnou černou barvou a použitím černého strukturovaného materiálu podobného černému sametu snižuje parazitní světlo více než desetinásobně.

Naopak bílé plochy se používá v případě projekčních pláten, kde potřebujeme, aby se maximum světla dostalo odrazem od plátna do oka diváka. Jenže to má svá úskalí. Maximální odrazivost je v případě lesklých povrchů, jenže ty pak působí jako zrcadlo a na plátně nevidíme obraz nýbrž odraz. Plocha plátna tedy musí světlo odrážet trochu jinak, světlo musí rozptýlit takovým způsobem, aby byl obraz zachován odrazem do oka každého diváka ve scéně a nebyl plochou pohlcen. Intuitivně k tomu využíváme projekční plochy, které jsou „matné“ a obraz tedy rozptýlí „do všech směrů“. K tomu může sloužit jak stěna natřená na bílo, tak třeba mléčné sklo, kde je možno obraz pozorovat dokonce zadní projekcí.

V případě projekčních ploch je však výpočet dosti složitý tím, že míru odrazivosti můžeme regulovat vhodnou mírou a dokonce směrem rozptylu. V uživatelském slovníku je tato míra označována anglickým slovem „gain“, tedy zisk. Standardní normovaný odraz je označován bezrozměrným číslem 1,0. Ale vhodnou úpravou povrchů můžeme dostat zisky větší. Typicky kvalitní plátna mají zisk 1,4 ale je možno na trhu objevit i plátna se ziskem 2,0. Na zisk plátna však nemá vliv barevnost. Je ale logické, že je vhodné promítat na barevně neutrální povrchy. Ale nikoliv však jen bílé. Neutrální šedá plocha například může poskytnout mnohem kvalitnější obraz, než plocha bílá. (Projekce na barevné plochy, například na žlutou zeď, je také možná s většinou projekčních přístrojů, protože většina datových projektorů má možnost korekce barvy, avšak taková projekce je zákonitě mnohem méně kvalitní.)

Zákon odrazu je nám většinou doslova vryt do paměti ještě ze základní školy. Úhel dopadu se rovná úhlu odrazu. Doplníme k tomu, že paprsek se odráží ve stejné rovině, v jaké dopadá, přičemž tato rovina je dána dopadajícím paprskem a kolmicí k ploše dopadu, vztyčené v bodě dopadu. Množství odražené světelné energie závisí nejen na látce, ale také na úhlu dopadu.

V tabulce (Tabulka 2) není uvedena jedna důležitá látka pro optiku nejvýznamnější, a tou je sklo. Je to z toho důvodu, že odraznost skla je závislá také na materiálu, ze kterého je vyrobeno, resp. na indexu lomu. Se zvyšujícím se indexem lomu odraznost skla stoupá. S indexem lomu blízcím se 1 se odrazivost blíží k nule. Materiál o indexu lomu 2 již má odrazivost větší než 10 %.

Odrazivost se z úhlem dopadu zvětšuje. Při úhlu 45° je již dvojnásobná, pro úhel 75° již devítinásobná! U skla pak existuje tzv. mezní úhel odrazu. Při tomto nebo větším úhlu dopadu se odrazí 100 % dopadajícího světla. Tohoto principu je využíváno například v odrazných hranolech.

Z posledních dvou položek v tabulce odrazivosti můžeme vidět, že nejlepšími materiály pro tvorbu zrcadel jsou hliník a stříbro. Stříbro má ještě o kus lepší parametry, ale má jednu nepříjemnou vlastnost, a to nízkou odrazivost modré barvy. Obraz reprodukováný stříbrným zrcadlem (nebo postříbřeným) je tak mírně zabarven do žluta. Dnes se na profesionální odrazné vrstvy používá výhradně hliník v čisté podobě. Hliníková vrstva se napařuje ve vakuu na odpovídající povrch, kterým je v podstatě ve všech případech sklo. Aby však byly odrazivé vlastnosti zachovány za nejširšího rozsahu teplot, je třeba vybrat sklo s malou

tepelnou roztažností. Používá se tak nejčastěji borosilikátové sklo, nejčastěji reprezentované sklem značky Pyrex anebo českého výrobce značky Simax.

2.2 Rovinná zrcadla

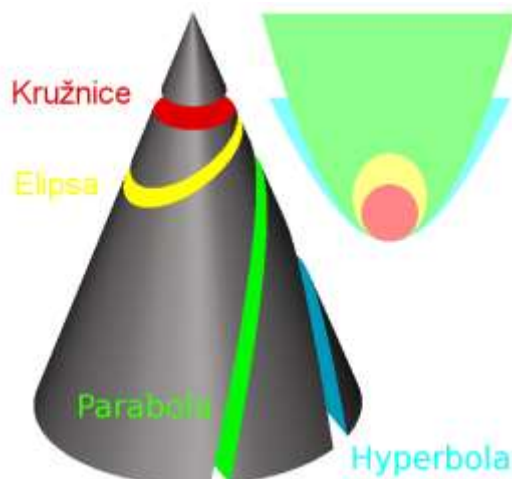
V rámci zobrazování začneme tedy nejjednodušším prvkem, kterým je rovinné zrcadlo. Můžete se s ním setkat nejen v koupelně, ale také v podobě například sklopného zrcátka ve vašich SLR fotoaparátech, tzv. zrcadlovkách. Na rozdíl od koupelňových zrcadel jsou ta optická výhradně pokovená z přední strany. Zadem pokovená zrcadla s sebou přinášejí nevýhodu toho, že obraz musí projít skleněnou vrstvou, na které dojde ke ztrátám i optickým vadám, pak je obraz odražen a opět musí stejnou optickou vrstvou projít zpátky. I když je tedy zadní pokovení v podobě aplikace hliníkové fólie poměrně snadné a levné, používá se opravdu jen v domácnostech.

Na optických zrcadlech, jak již bylo uvedeno výše, je použita napařená tenká vrstva hliníku. Ta je sice poměrně odolná, ale přesto se k ní musíme chovat mnohem opatrněji, než například k antireflexní vrstvě na objektivě. Lehce se na ni usazuje pot z rukou, snadno se poškrábe a velmi lehce se na ni usazují nečistoty, které je pak možno omýt pouze tekoucí vodou anebo sfouknout suchým vzduchem (nikoliv ústy!). Otázka čištění pokovených zrcadel by byla na samostatnou kapitolu. Platí však u nich ještě větší opatrnost, než v případě optických ploch objektivů.

Zobrazení zrcadlem je jednoduché, je prosto optických vad. Obraz je pouze stranově převrácený. Využití rovinného zrcadla je však pouze k zalomení optické dráhy paprsku. Proto se jím nemusíme zabývat podrobněji.

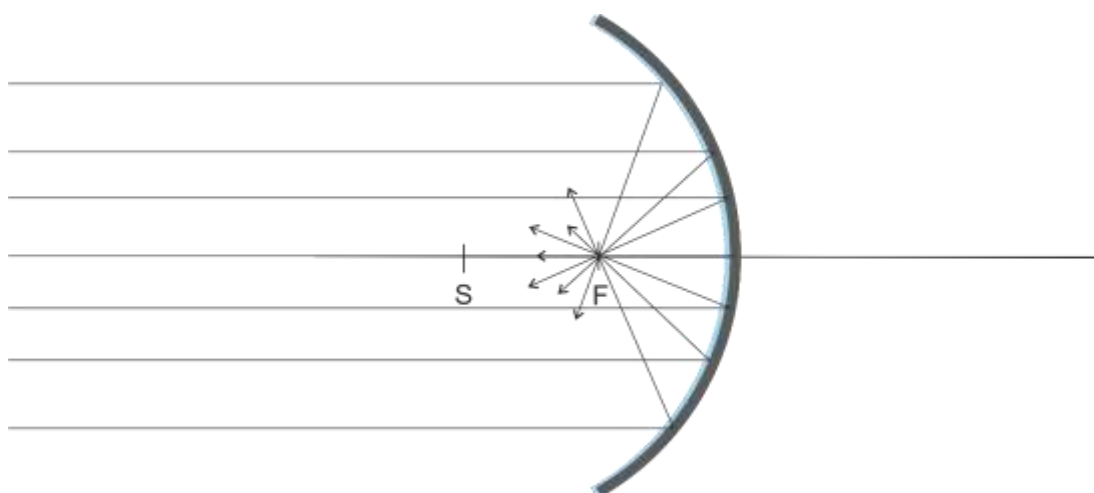
2.3 Dutá a vypouklá zrcadla

Jiným než rovinným tvarem jsou pak zrcadla vytvořené rotací kuželoseček. Vznikají plochy sférické, parabolické, eliptické a hyperbolické viz Obrázek 2-2. Začneme se zrcadlem sférickým, tedy takovým, které vzniklo rotací kružnice a takové zrcadlo je tedy tvarem nazýváno kulovým vrchlíkem.

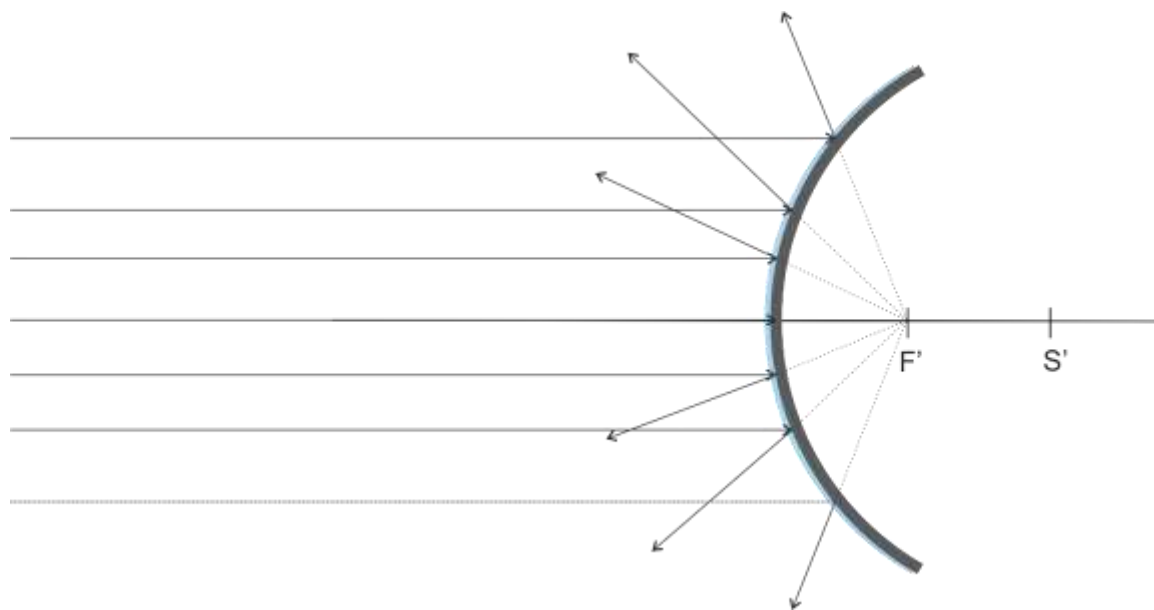


Obrázek 2-2: Tvary zakřivených zrcadlových ploch respektují v podstatě výhradně tvary kuželoseček.

Kulová zrcadla mohou být buďto pokovenou dutou stranu, anebo stranu vypuklou. V prvním případě vzniká duté zrcadlo, ve druhém případě zrcadlo vypuklé. Bod **S** je středem křivosti zrcadla a pokud bychom z celý řez zrcadla na obrázku dokončili do kružnice, bod **S** by byl středem této kružnice. Přímka, která prochází bodem **S** a středem zrcadla se nazývá optická osa. Paprsky přicházející rovnoběžně s optickou osou se promítají do ohniska **F**. V případě dutého zrcadla je ohnisko skutečné, obraz promítaný z velké vzdálenosti se soustřeďuje do ohniska. Ohnisko má svůj název, jak asi tušíte, podle toho, že sluneční paprsky soustředěné nějakým optickým systémem do ohniska (je jedno zda zrcadlem nebo lupou) mohou způsobit díky nahromaděné zářivé energii vzplanutí. V případě vypuklého zrcadla je projekce do ohniska zdánlivá, ve skutečnosti se paprsky rozptylují na kulové ploše. Můžeme je ale rekonstruovat zpátky do ohniska, které je zdánlivým. Pro účely konstrukce obrazu se tedy velmi hodí.



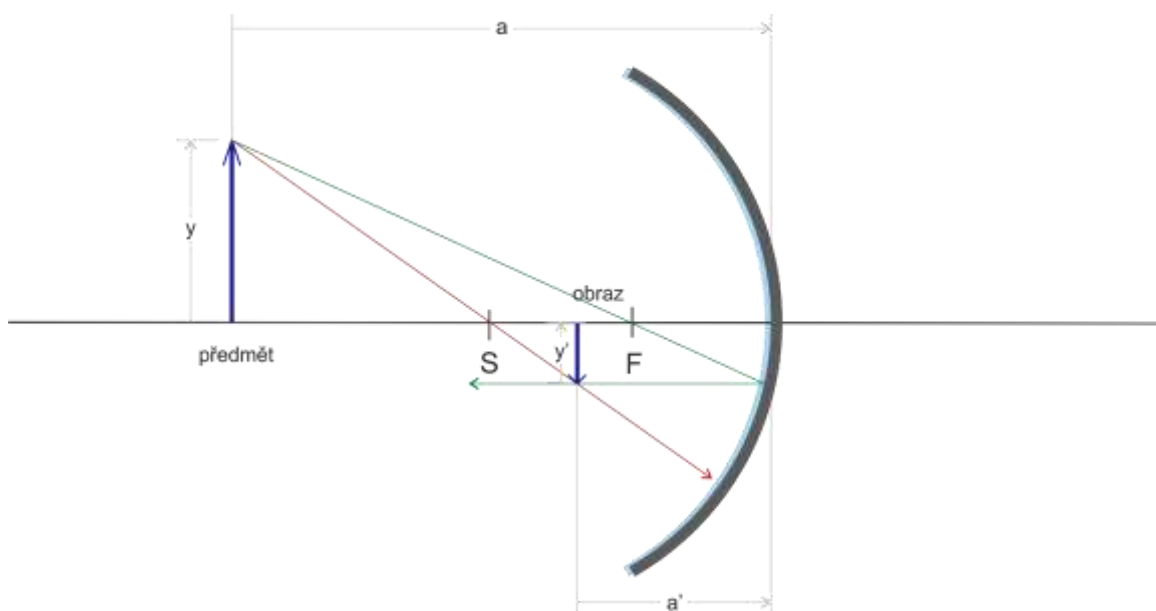
Obrázek 2-3: Duté zrcadlo -zobrazení paprsků do ohniska



Obrázek 2-4: Vypuklé zrcadlo – zobrazení paprsků.

Pro účely konstrukce obrazu budeme využívat dva význačné paprsky. Prvním je paprsek procházející z předmětu optickým středem. Druhým je paprsek jdoucí z předmětu paralelně s optickou osou, který se tím pádem zobrazí v ohnisku. Tyto paprsky nám budou postačovat při konstrukci jakéhokoliv zobrazení.

2.3.1 ZOBRAZENÍ DUTÝM ZRCADLEM



Obrázek 2-5: Zobrazení dutým zrcadlem.

Zavedeme si označení předmětu a obrazu (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). Předmět budeme vyznačovat svislou šipkou, vzdálenost předmětu od vrcholu zrcadla budeme nazývat předmětovou vzdáleností a značit ji budeme a . Vytvořený obraz budeme značit také

svislou šipkou, jeho vzdálenost od vrcholu se bude nazývat obrazovou vzdáleností a značit ji budeme a' . Velikost předmětu budeme značit y a velikost obrazu y' . Nyní můžeme definovat zvětšení z zobrazení.

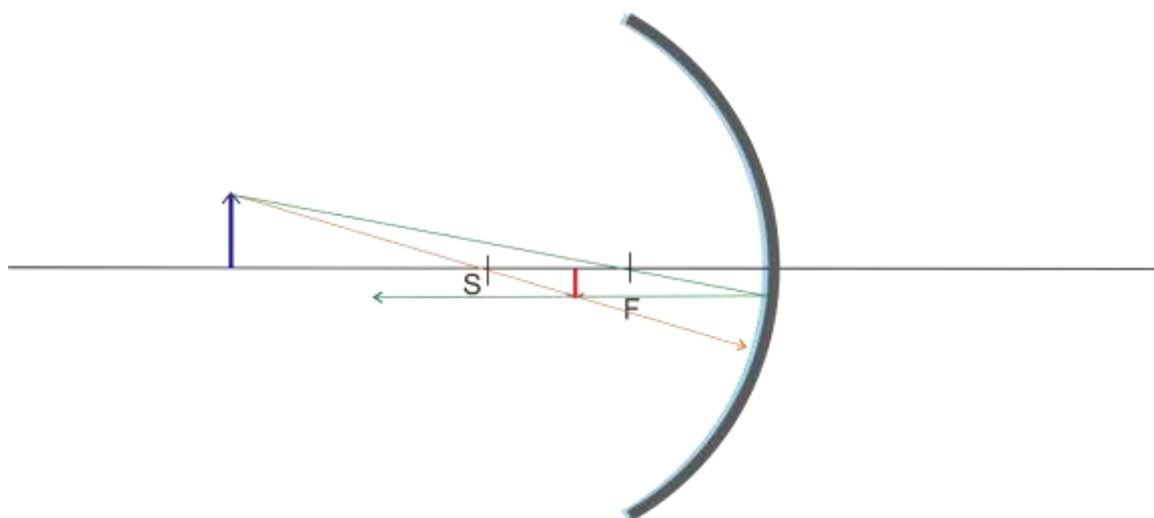
$$z = \frac{y'}{y},$$

A dále platí pro ohniskovou vzdálenost f , tedy vzdálenost ohniska F od vrcholu zrcadla

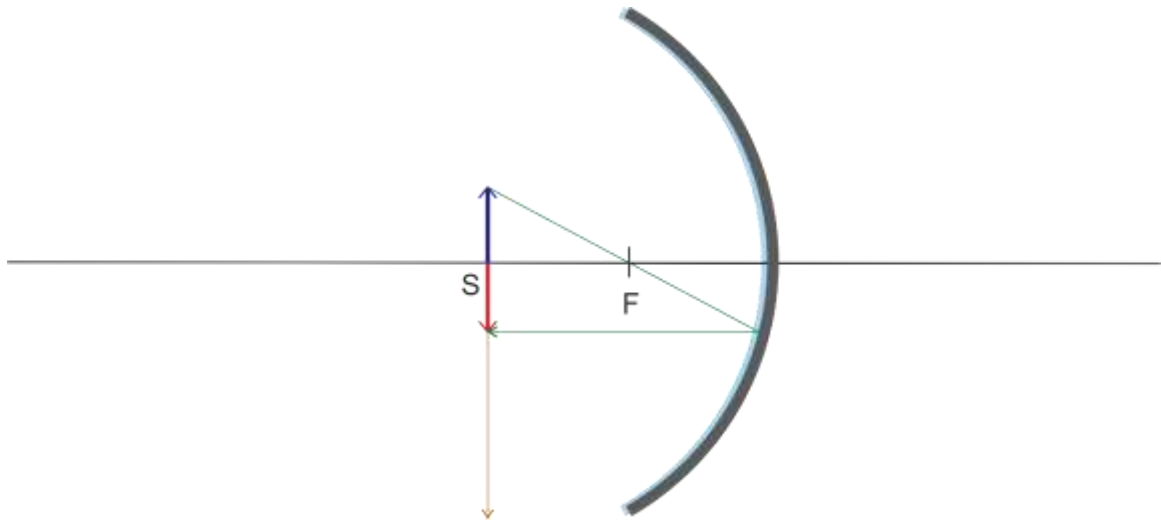
$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}.$$

Jak jste již jistě postřehli, ohnisková vzdálenost f se rovná polovině vzdálenosti vrcholu zrcadla od optického středu S.

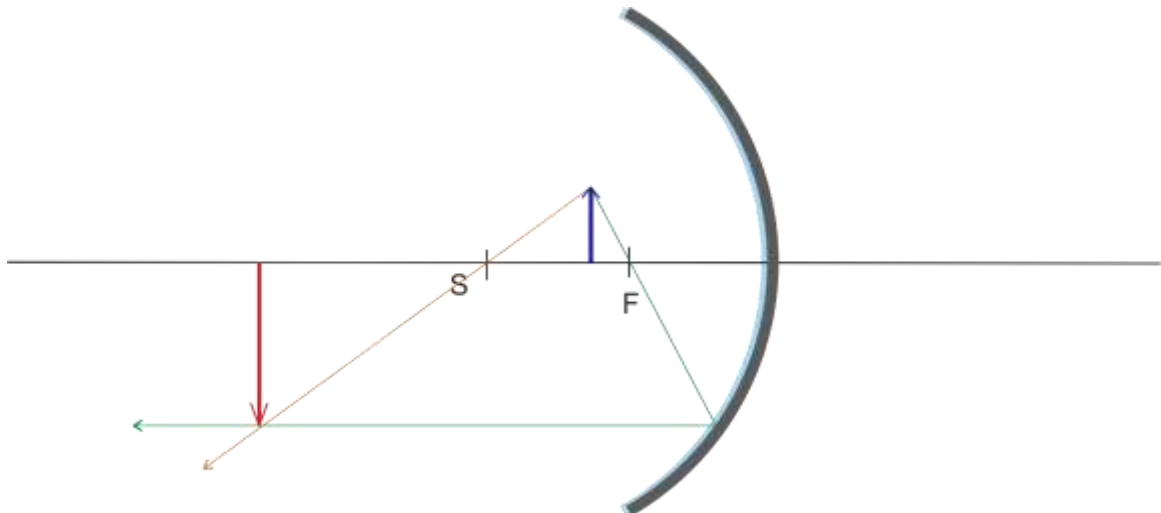
Velikost a orientace obrazu bude záviset pouze na velikosti předmětu a vzdálenosti předmětu od ohniska. Pomocí grafické konstrukce můžeme na následujících příkladech vidět všechny možný způsoby vytvoření obrazu.



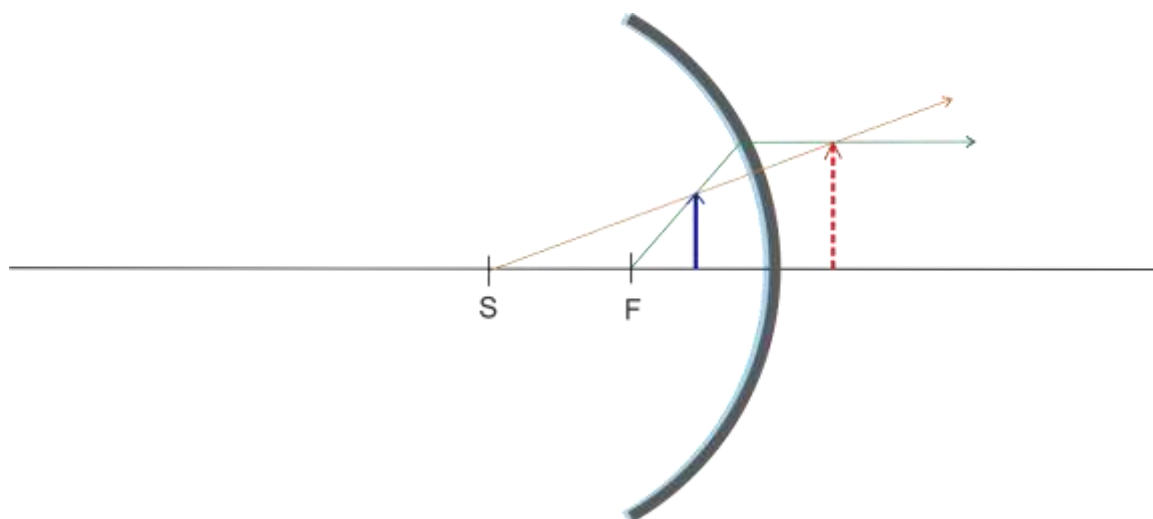
Obrázek 2-6: Zobrazení pro případ, že se předmět nachází od vrcholu zrcadla ve vzdálenosti větší než $2f$. Obraz je reálný, zmenšený a stranově a vrcholově převrácený.



Obrázek 2-7: Zobrazení pro případ, že se předmět nachází od vrcholu zrcadla ve vzdálenosti přesně $2f$, tedy ve vzdálenosti rovné poloměru zrcadla. Obraz je reálný, stejně velký jako předmět a je stranově a vrcholově převrácený.



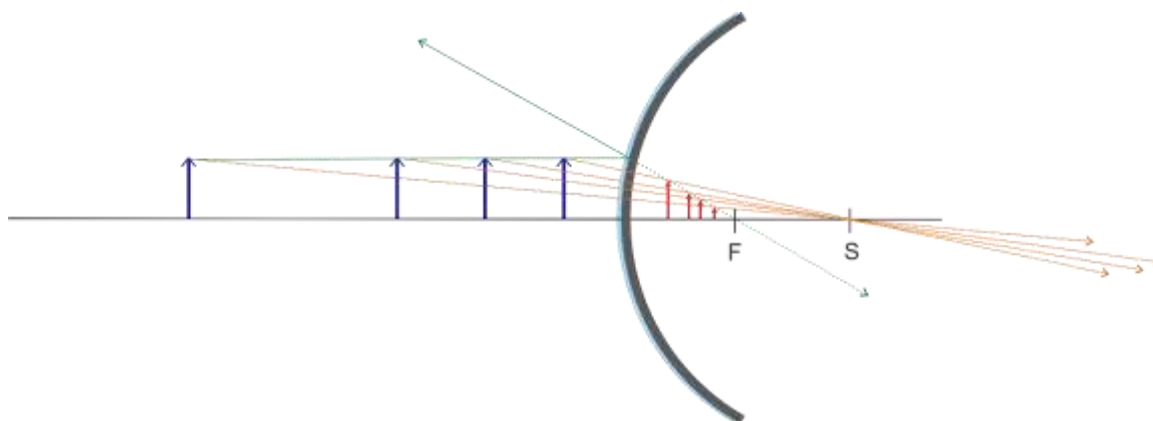
Obrázek 2-8: Zobrazení pro případ, že se předmět mezi optickým středem a ohniskem. Obraz je reálný, zvětšený a je stranově a vrcholově převrácený.



Obrázek 2-9: Zobrazení pro případ, že se předmět nachází ve vzdálenosti menší než f , tedy mezi ohniskem a vrcholem zrcadla. Toto je jediný případ, kdy je obraz nereálný (zdánlivý). Jinak je zvětšený a vzpřímený.

2.3.2 ZOBRAZENÍ VYPOUKLÝM ZRCDLEM

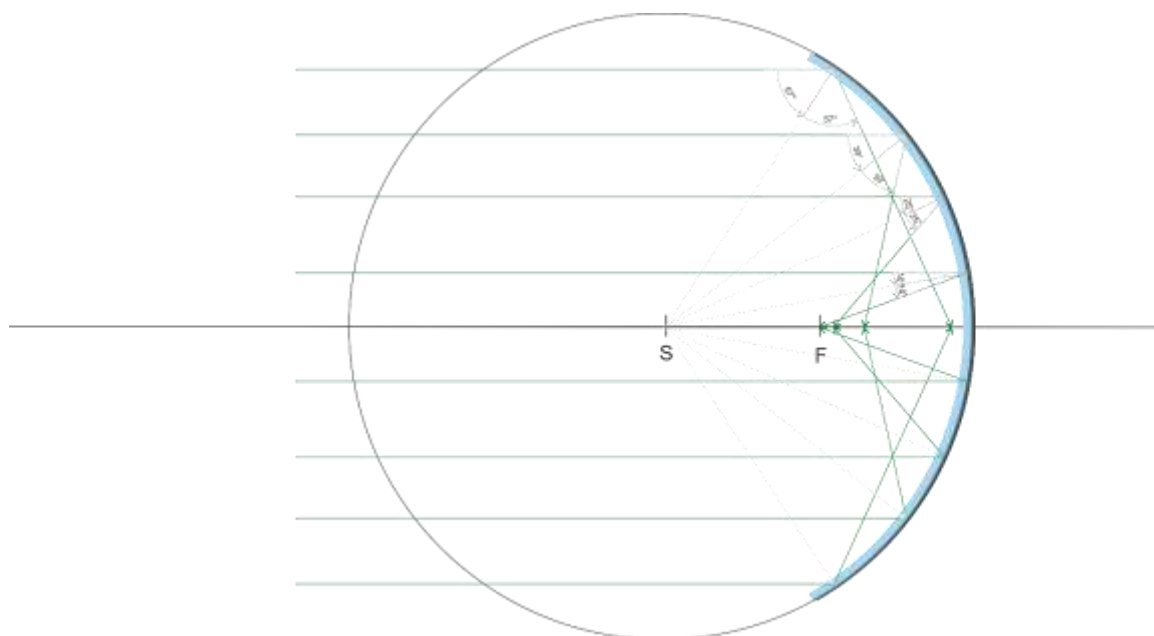
Pro zobrazení vypouklým zrcadlem je stavba obrazu mnohem snazší, protože ve všech případech dostáváme stejný druh obrazu. Obraz je vždy zdánlivý, zmenšený a vzpřímený. I zde konstruujeme obraz tak, že vedeme z libovolného bodu předmětu přímkou přes optický střed, a rovnoběžně s optickou osou přímkou, která se na ploše zrcadla odrazí podle zákona odrazu. Jelikož ale paprsky paralelní s optickou osou se také protínají v ohnisku, můžeme si takto pomoci konstrukcí paprsku do ohniska zrcadla. Tentokrát se ale ohnisko i optický střed nacházejí na druhé straně zrcadla.



Obrázek 2-10: Zobrazení vypuklým zrcadlem. Ve všech možných případech je obraz vytvořený vypuklým zrcadlem nereálný, vzpřímený a zmenšený.

2.3.3 SKUTEČNÉ KULOVÉ ZRCADLO

Správné polohy a velikosti obrazu a předmětu, stejně jako zvětšení můžete buďto snadno spočítat z jednoduchých dříve uvedených vztahů, anebo můžete pro konstrukci použít pravidel geometrických a polohy předmětu a obrazu narýsovat. Připomeňme si, že platí pravidlo, že ohnisko kulového zrcadla se nachází od vrcholu zrcadla ve vzdálenosti poloviční poloměru křivosti. Pojďme si ale zkusit ohnisko narýsovat podle pravidel odrazu. Povedeme rovnoběžné paprsky s optickou osou v různých vzdálenostech od této osy. Je třeba vytvořit kolmice v místech dopadu paprsku a podle pravidla odrazu vytvořit příslušný odražený paprsek. Asi budeme překvapeni, že jediný paprsek, který se skutečně protne s ohniskem, které bude v polovině poloměru křivosti zrcadla, bude ten, který vyšleme přímo po ose. Všechny vzdálenější rovnoběžné paprsky se budou postupně více a více blížit vrcholu zrcadla. Tento jev je zcela přirozený kulovému zrcadlu a nazývá se „kulovou“ anebo archaicky také otvorovou vadou. Podrobněji na tento problém narazíme v kapitole o optických vadách.

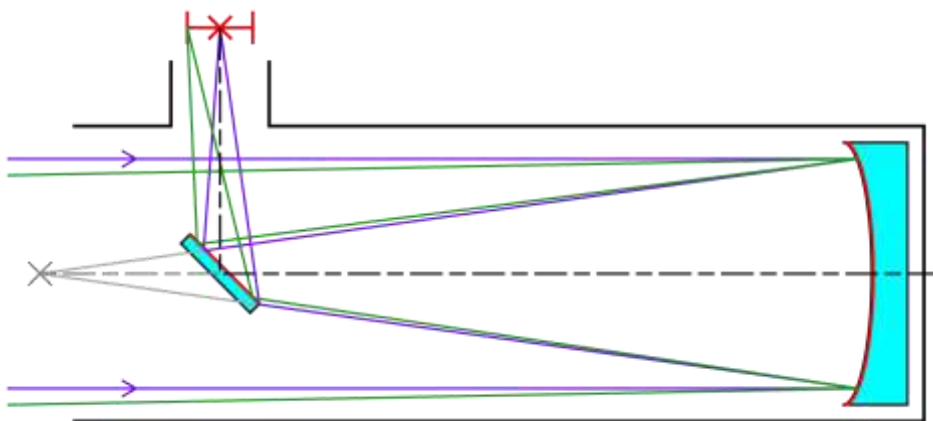


Obrázek 2-11: Kulová, sférická, anebo také zvaná otvorová vada kulových zrcadel.

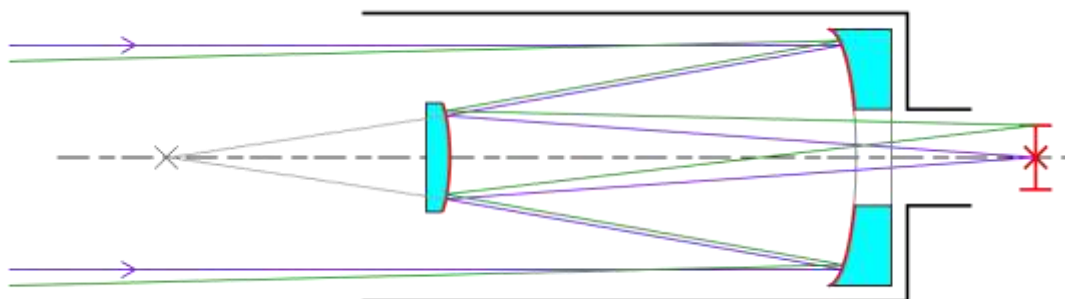
2.3.4 DALŠÍ TVARY ZRCADEL, ZRCADLOVÉ DALEKOHLEDY

Z tohoto důvodu bude právě teď vhodné, vrátit se k úvodu této podkapitoly, ke kuželosečkám. Zatímco kulové zrcadla trpí tím nedostatkem paprsky dopadající dále od osy se neprotínají ve stejném ohnisku, jinak tomu je u zrcadel parabolického tvaru, u nich se paprsky z nekonečna protínají v jediném ohnisku bez ohledu na to, jak jsou vzdáleny od optické osy. Trpí však jinou vadou, a to špatným zobrazením paprsků šikmých. Pokud tedy máte parabolické zrcadlo, bodové objekty na okraji zorného pole (protože z nich paprsky dopadají po jiném úhlem než paprsky poblíž centra zorného pole) se zobrazují s vadou

zvanou koma. Parabolické plochy zrcadel se používají například v astronomických dalekohledech typu Newton anebo Cassegrain. Díky komě mívají zpravidla menší zorné pole, což však u dalekohledů pro astronomická pozorování obvykle nevadí. Komu a některé další nedostatky pak mohou odstranit například sekundární hyperbolické zrcátko u dalekohledu cassegrainova typu anebo použití i primárního zrcadla hyperbolického. Například dalekohled na opavské univerzitní observatoři WHOO! je vybaven právě systémem primárního i sekundárního hyperbolického zrcadla, takovému systému se říká Ritchey-Crétien. A jedná se o stejnou konfiguraci, jakou má i Hubbleův kosmický dalekohled. Taková soustava nemá ani komu, ani kulovou vadu a pro fotografické účely má také fokální rovinu plochou, nedeformovanou.



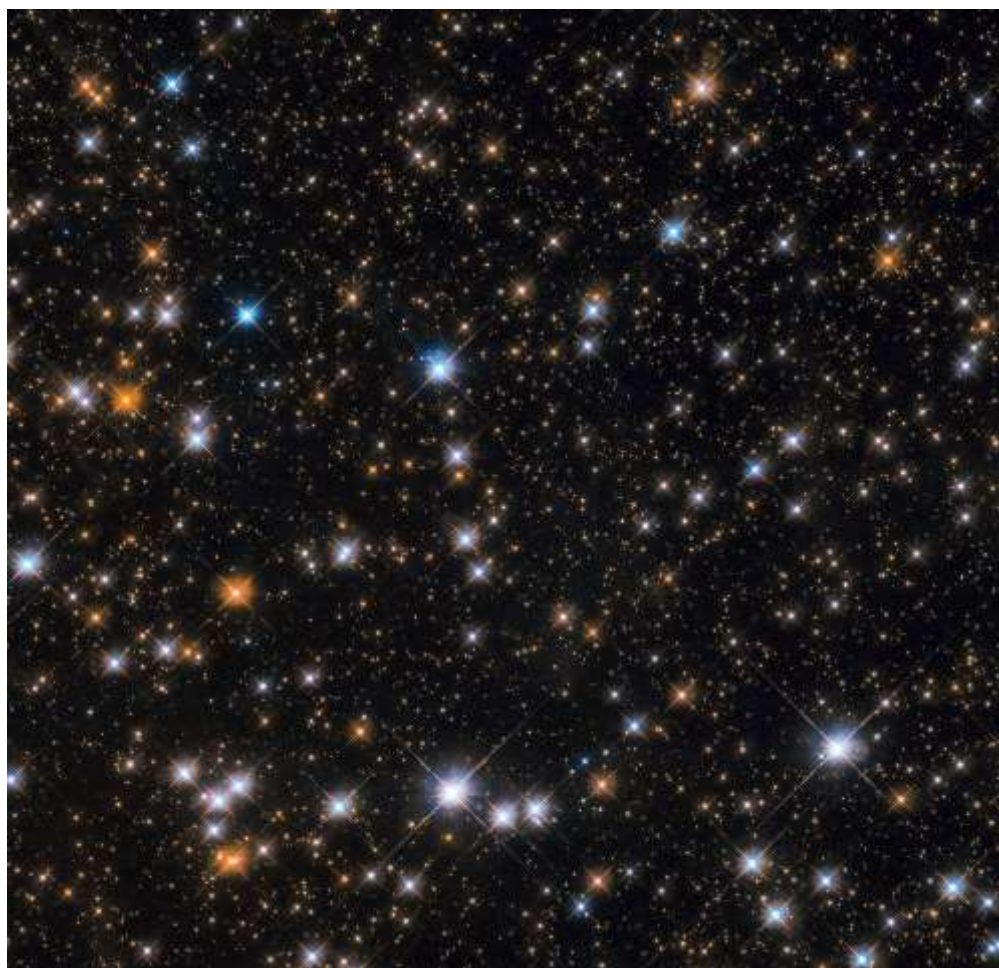
Obrázek 2-12: Duté zrcadlo použité v systému Newtonova astronomického dalekohledu. U malých průměrů bývalo obvyklé použití sférických zrcadel, větší průměry pak, právě z důvodu kulové vady, používají zrcadla parabolická. Tento typ dalekohledu vykazuje vysokou světelnost, avšak z důvodu komy je mírně omezen v zorném poli. Jak je vidět, světlo odražené od primárního zrcadla dopadá na zrcadlo sekundární, které je rovinné a odvádí paprsky z tubusu do místa, kde je okulárový výtah. Obraz je pak možno buďto zaznamenat na čip fotoaparátu (tedy dalekohled slouží jako klasický fotografický objektiv) anebo do okulárového výtahu umístit okulár, tedy spojnou soustavu, kterou je možno obraz v ohnisku prohlédnout.



Obrázek 2-13: Cassegrainův typ dalekohledu, kde je zrcadlo opatřeno otvorem a sekundární zrcátko posílá obraz tímto otvorem za tubus. Tvar sekundárního zrcátka bývá hyperbolický, ale existují i jiné sestavy.

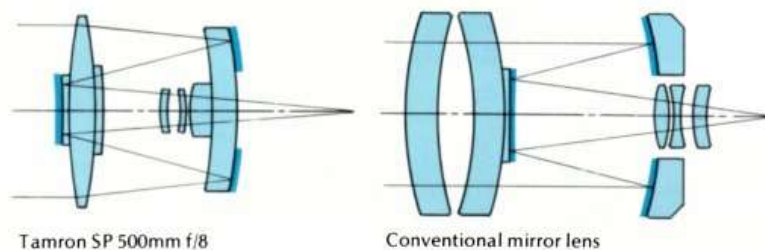
Z obrázků je patrné, že světlo vniká do tubusu dalekohledu a odráží se ve stejném směru zpátky. Aby bylo možno obraz „prohlédnout“ a nestínit přitom paprskům, používá se sekundární zrcátko, které obraz dokáže odklonit mimo tubus. Typické jsou dva základní systémy. Newtonův systém, kde je k odklonění použito rovinné zrcátko a obraz se dostává z tubusu bokem, anebo Cassegrainův typ, kde je použito vypouklé sekundární zrcátko, které paprsek posílá nazpět k zrcadlu. To je však ve svém středu opatřeno otvorem, skrze které se paprsky dostanou za zrcadlo opět d okulárového výtahu, kde pak mohou být snímány fotoaparátem anebo prohlíženy okulárem.

Je vhodné upozornit, že pro kresbu obrazu nemá stínění způsobené sekundárním zrcátkem žádný vliv. A dokonce ani skutečnost, kdy je sekundární zrcátko upevněno na křížci. Tvar kříže je možno vytušit jen u bodových zdrojů světla, v astronomických dalekohledech jsou to typické obrázky hvězd se čtyřmi paprsky. Další optické korekce jsou ale vykonávány stále častěji také skleněnými korekčními deskami, které pak sekundární zrcátko nesou a potřeba upnutí do kříže tak vymizí. Tyto korekční desky v podobě různě sféricky ale i asféricky tvarovaných skleněných ploch vytváří systémy zrcadlo-čočkové, obvykle a častěji nazývané „katadioptrické“.



Obrázek 2-14: Snímek otevřené hvězdokupy M 11 pořízený Hubbleovým kosmickým dalekohledem. Typické paprsky kolem hvězd jsou difrakční paprsky způsobené křížem, který nese sekundární zrcátko.

Dalekohled cassegrainova typu je pak nejčastějším zástupcem na poli zrcadlových (přesněji však spíše katadioptrických) objektivů. Takovéto fotografické objektivy, jejichž primární optickou plochou bývá duté zrcadlo můžeme ve fotografii potkat především ve sportovní fotografii, kde je možno vytvořit, objektivy s velmi dlouhými ohniskovými vzdálenostmi při relativně malých konstrukčních rozměrech. Světelnosti obvykle bývají nižší, ale optická kvalita není o moc horší, než v případě objektivů čočkových. Naopak, jednoduchost systému často přináší mnohem lepší kresbu i při nízkých cenách.



Obrázek 2-15: Dva příklady katadioptrických fotografických objektivů, jeden konkrétní značky Tamron 500mm f/8 a druhý obvyklého výpočtového tvaru pro 500 mm. (Zdroj: Tamron inc.)



Obrázek 2-16: Katadioptrický objektiv Tamron 500 mm, f/8.



Samostatný úkol: Pomocí kružítka vytvořte duté zrcadlo o poloměru křivosti 15 cm. Průměr zrcadla postačí 14 cm. Narýsujte optickou osu. Narýsujte k této ose rovnoběžky vzdálené na obě strany osy postupně 1, 3, 5 a 6,5 cm. Tyto rovnoběžky považujte za paprsky, které se mají od dutého zrcadla odrazit podle zákona odrazu. Aplikujte zákon odrazu (narýsujte kolmice k místu dopadu a narýsujte co nejpřesněji odražené paprsky). Zjistěte, kde odražené paprsky protínají optickou osu. Proč paprsky neprotínají osu v ohnisku?

2.4 Lom světla

Světlo se šíří jak v podobě paprsků, tak v podobě vlnění. Jeho rychlost je konstantní, avšak závisí na prostředí, ve kterém se šíří. Podle toho rozlišujeme tzv. optickou hustotu prostředí. Čím je prostředí opticky hustší, tím se šíří pomaleji. Nejřidším prostředím, ve kterém se může světlo šířit, je vakuum. Ve vakuu se tedy světlo šíří nejrychleji. Jeho rychlost se označuje písmenem c a pro vakuum má přesně stanovenou hodnotu

$$c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

2.4.1 INDEX LOMU

Přechází-li světlo z jednoho prostředí do druhého, mění se také jeho rychlost. Tato změna má z Fermatova principu (str. 30, kapitola 1.7) ale také za následek, že se změní směr šíření světla prostředím. A velikost této změny, označovaný jako lom světla je vyjádřen prostřednictvím indexu lomu. Ten definujeme jako poměr rychlosti světla ve dvou optických prostředích.

Pro jednoduchost si nejprve zavedme absolutní index lomu n , definovanou jako poměr rychlosti světla ve vakuu c k rychlosti v pro určité prostředí

$$n = \frac{c}{v}.$$

A dále také relativní index lomu pro průchod světla mezi dvěma různými prostředím

$$n_{12} = \frac{v_1}{v_2},$$

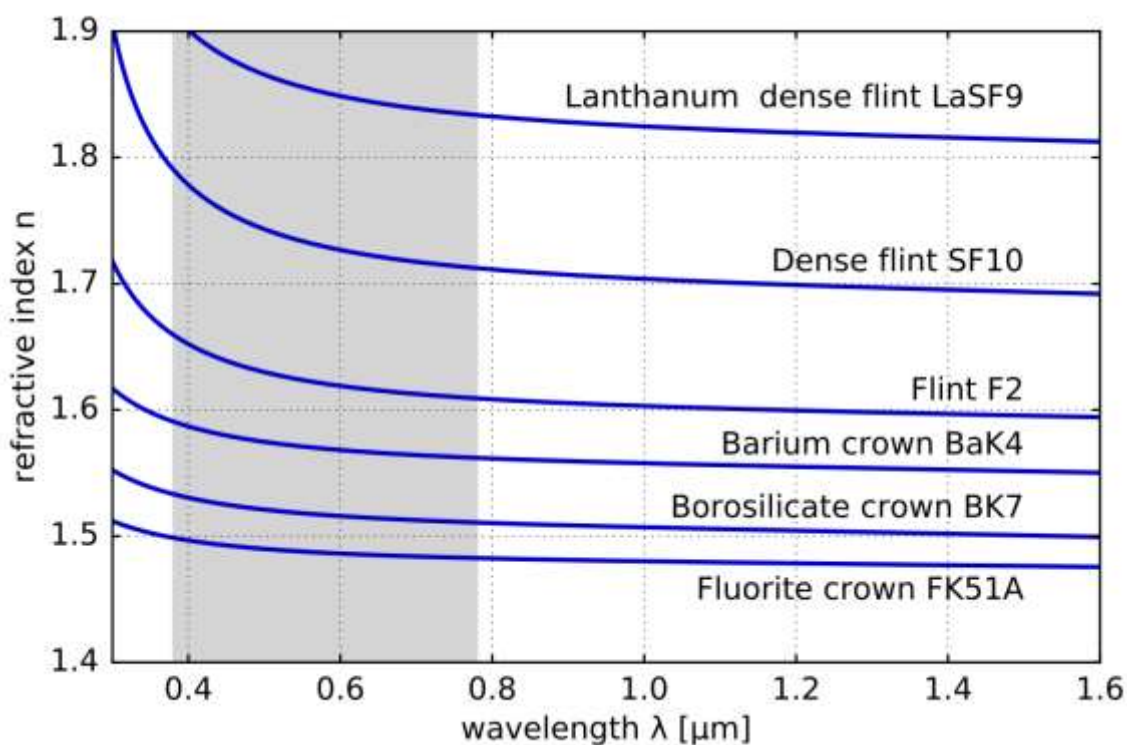
kde n_{12} je relativní index lomu a v_1 je rychlost v prvním prostředí v_2 je rychlost v druhém prostředí. Jednoduchou úpravou dojdeme k tomu, že

$$n_{12} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\frac{v_1}{c}}{\frac{v_2}{c}} = \frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Relativní index lomu je tedy převrácenou hodnotou poměru rychlostí světla v jednotlivých prostředích.

Optické prostředí se však ke všem vlnovým délkám nechová stejně. Některé vlnové délky dokáže pohltit, jiné propustit. V určitém rozsahu vlnových délek se pak v podstatě vždy setkáme s tím, že se zkracující se vlnovou délkou klesá rychlost průchodu světla prostředím a zvyšuje se index lomu. To má klíčový důsledek: index lomu je závislý na vlnové délce světla. Světlo červené barvy se tak bude lámat při průchodu do opticky hustšího prostředí méně, než světlo modré barvy. Po lomu jsou tedy paprsky rozptylovány, a proto se

tento jev nazývá barevný rozptyl (disperze). Bylo stanoveno, že index lomu materiálu je stanoven pro paprsky světla zelenožluté barvy, tedy 550 nm.



Obrázek 2-17: Závislost indexu lomu na vlnové délce pro některá optická skla. Šedý pás vyjadřuje oblast vlnových délek viditelného světla. Tato optická skla jsou nejčastěji používanými ve fotografické optice. (Autor Geek3 @ Wikimedia, CC BY-SA 3.0.)

Index lomu je tedy pro vakuum roven jedné. Vzduch je však opticky velmi řídkým prostředím a proto v praxi používáme index lomu vzduchu $n = 1$.

Tabulka 3: Absolutní index lomu některých látek [3]

Látka	index lomu
vakuum	1
vzduch (normální tlak)	1,00026
led	1,31
voda	1,33
etanol	1,36
slunečnicový olej https://cs.wikipedia.org/wiki/Glycerol	1,473

křemenné sklo	1,46
plexisklo	1,49
okenní sklo	1,52
korunové sklo	1,52
polykarbonátové sklo	1,58
flintové sklo	1,62
sůl	1,52
safír	1,77
diamant	2,42
moissanit ⁵	2,65

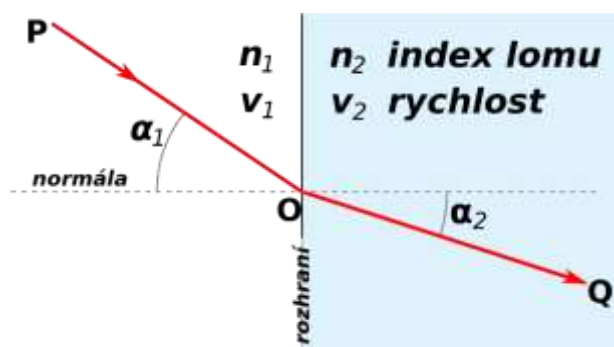
2.4.2 LOM SVĚTLA

Lom světla nastává na rozhraní dvou prostředí, ve kterých se mění fázová rychlost vlnění. Vychází z Huygensova principu a matematicky je možno ji popsat pomocí Snellova zákona

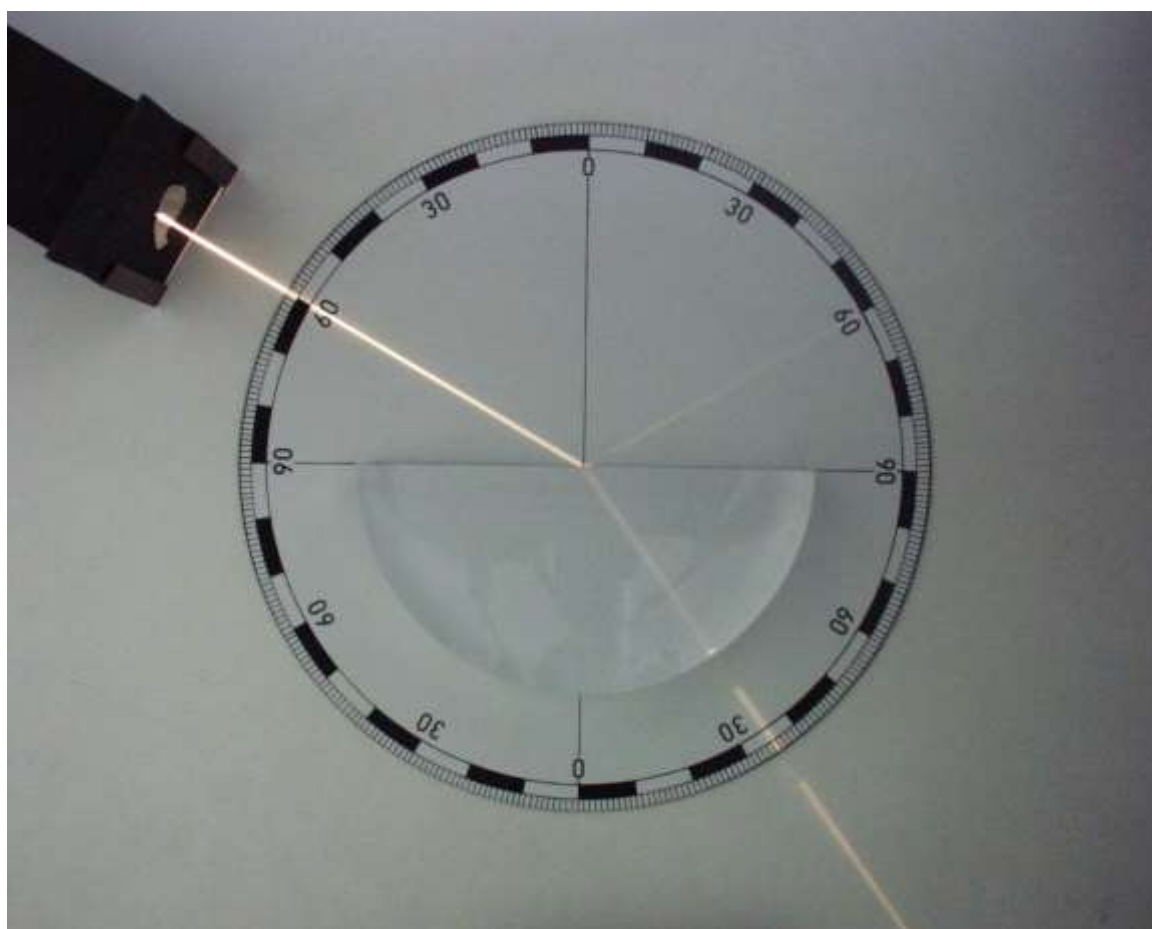
$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2 .$$

Úhly α_1 a α_2 se měří stejně jako v případě zákona odrazu vzhledem ke kolmici.

⁵ Svůj název získal tento karbid křemíku a vzácný minerál po svém objeviteli francouzském chemikovi Henrim Moissanovi, který na něj narazil náhodou už v roce 1893 při zkoumání vzorků hornin z meteorického kráteru v arizonském kaňonu Diablo a nejprve ho mylně identifikoval jako diamant.



Obrázek 2-18: Grafické znázornění lomu světla z opticky řidšího do opticky hustšího prostředí.



Obrázek 2-19: Lom světla z opticky řidšího do opticky hustšího prostředí zobrazený laserem. Povšimněte si, že část energie je odražena podle zákona odrazu. Paprsek, který vstupuje do opticky hustšího prostředí, se láme ke kolmici. Paprsek, který pak z opticky hustšího prostředí vystupuje, se neláme, protože vystupuje pod úhlem 0° .
(Zátonyi Sándor (ifj.) Fizped @Wikimedia CC BY-SA 3.0)

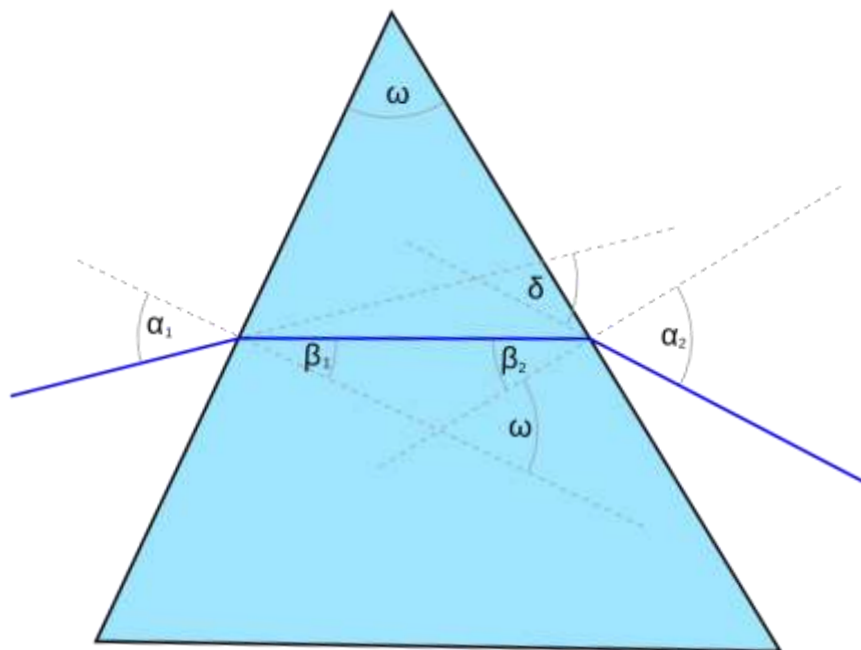
Rozptyl světla je nejčastěji ukazován na hranolu, který následně světlo rozloží do celého spektra. To je způsobeno tím, že lom je proveden dvakrát na vhodně pootočených plochách. Tuto skutečnost poprvé vyzkoušel Isaac Newton, který čistotu a unitárnost bílého světla popisovanou Aristotelem vyvrátil. Nejenže rozložil hranolem světlo na duhové spektrum,

ale také opačným hranolem světlo složil ve světlo bílé. Čímž vlastně nechtěně také sestrojil první achromatický optický systém.



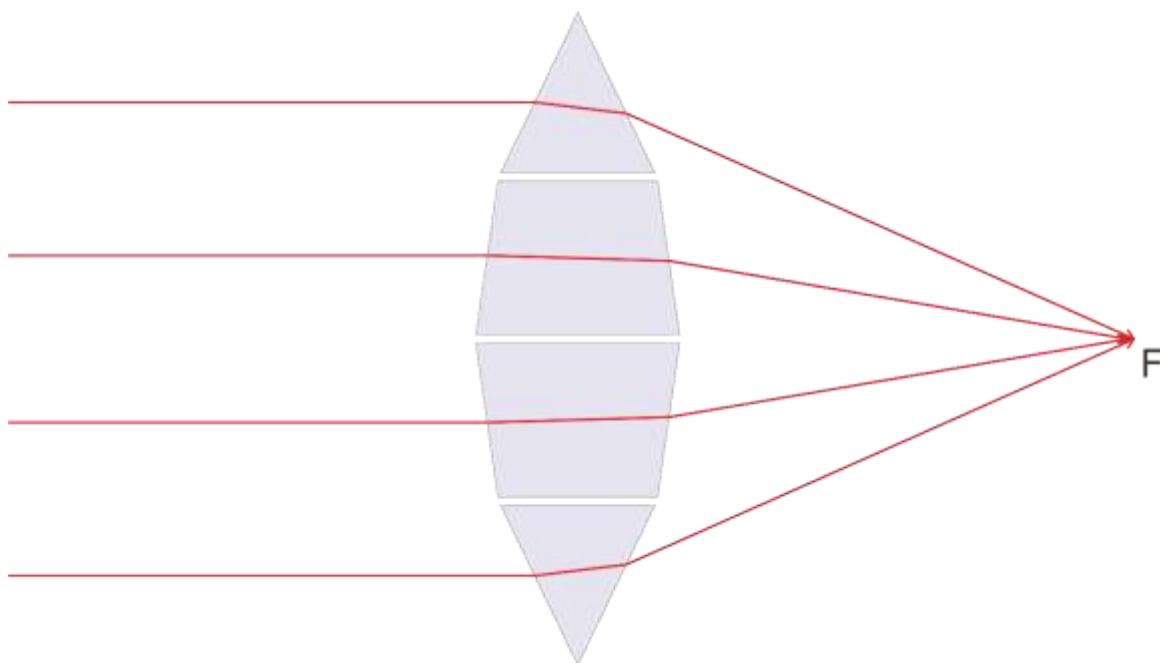
Obrázek 2-20: Rozklad světla na spektrum pomocí hranolu. Demonstrace disperze světla na hranolu. (Autor D-Kuru @ Wikimedia CC BY-SA 3.0)

Ukažme si lom světla na hranolu podrobněji. Aplikujeme Snellův zákon na vstupu, zde se tedy světlo láme ke kolmici, protože vstupuje ze vzduchu do skleněného hranolu. Při výstupu se světlo láme od kolmice, protože vystupuje ze skleněného hranolu do vzduchu.



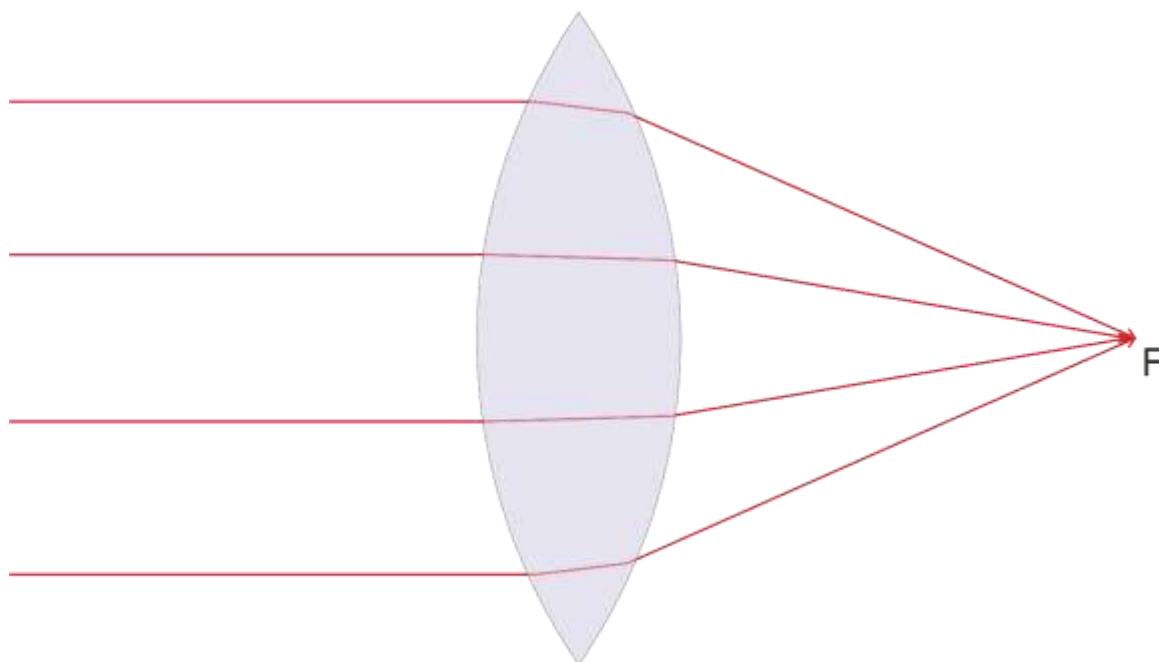
Obrázek 2-21: Lom světla na hranolu.

Povšimněte si zobecnění, jaké může nastat, pokud vytvoříme následující sestavu hranolů.



Obrázek 2-22: Lom světla na několika hranolech.

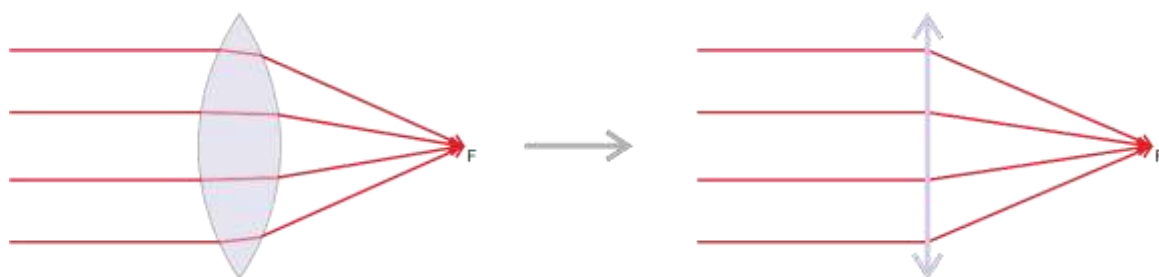
Pokud bychom počet hranolů v tomto tvaru přidávali a jejich počet by rostl do nekonečna, získáme spojnou čočku. Odtud je možno si názorně představit lom světla spojnou čočkou. Přicházíme tak k prvnímu zobrazení čočkou, k první konstrukci obrazu refrakčním členem. A tím nejdůležitějším.



Obrázek 2-23: Zobrazení spojnou čočkou. Paprsky přicházející rovnoběžně s optickou osou jsou soustředěny do ohniska.

2.4.3 TENKÁ SPOJNÁ ČOČKA

Jak se dá odtušit z výše uvedeného obrázku, při výpočtu čočky budou do hry vstupovat dvě optické plochy. Jedna, do které paprsky vstupují, a jedna, ze které vystupují. Pokud je však v optice více čoček uspořádaných za sebou, nemusí být nakonec ani počáteční index lomu stejný, protože za spojkou může následovat rozptylka ze zcela jiného optického materiálu. Při více čočkách jsou pak výpočty značně komplikované a není předmětem této knihy s nimi čtenáře podrobně seznamovat. Začneme tedy nejjednodušším příkladem. Máme spojnou čočku, u které zanedbáme nejen její tvar a tloušťku, ale představíme si výsledné zobrazení obou zakřivených ploch jako plochu jedinou.



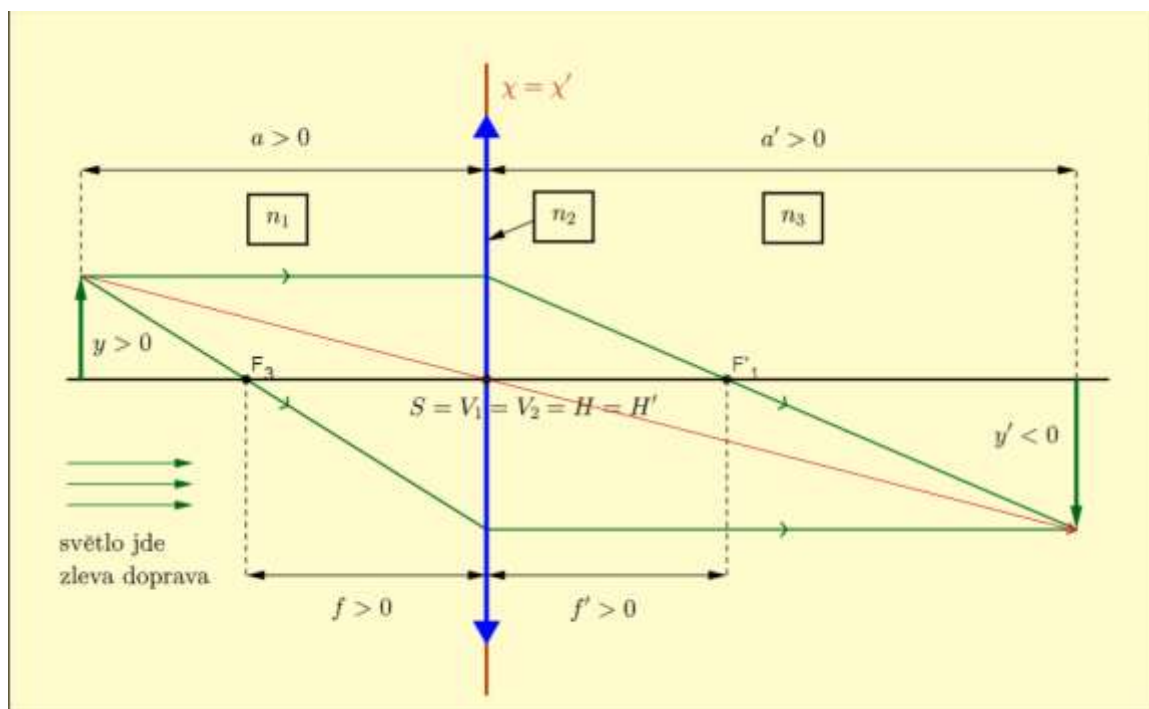
Obrázek 2-24: Zanedbání tvaru a tloušťky čočky.

Uvažujeme tedy průchod ze vzduchu do skla a zpátky do vzduchu, tedy $n_1 = n_2 \rightarrow f = f'$. Zobrazovací rovnice je pak stejná jako v případě zrcadla.

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f},$$

kde a a a' je vzdálenost předmětu od hlavní roviny. Zvětšení je pak dáno

$$z = \frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a} = -\frac{f}{a-f} = -\frac{a'-f}{f}.$$



Obrázek 2-25: Zobrazení tenkou čočkou.

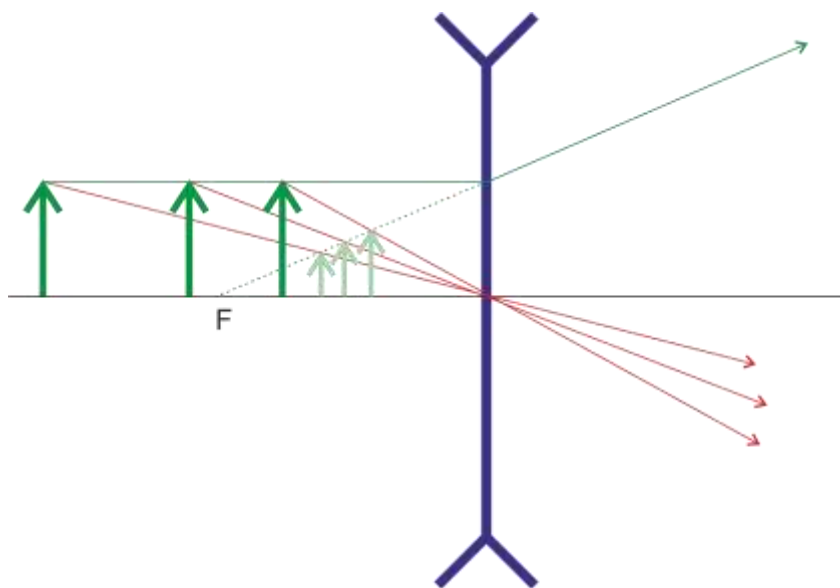
Geometrická konstrukce obrazu je snadná a obdobná jako u zrcadla. Význačnými paprsky jsou:

- paprsek mířící rovnoběžně z optické osy ze zobrazovaného předmětu, na tenké čočce se láme a směřuje do ohniska (na obr. Obrázek 2-25 zeleně),
- paprsek vycházející z předmětu, procházející ohniskem a dopadající na tenkou čočku, kde se láme a pokračuje rovnoběžně s optickou osobou obrazovou rovinou (na obr. Obrázek 2-25 také zeleně),
- paprsek procházející vrcholem tenké čočky, ten se neláme a je tedy vždy přímkou (na obr. Obrázek 2-25 červeně).

2.4.4 TENKÁ ROZPTYLNÁ ČOČKA

Uvedené zobrazovací rovnice mají obecnou platnost i pro tenkou rozptylnou čočku. Konstrukce jejího obrazu je ale oproti spojce odlišná díky záporné křivosti. Zelené paprsky

jdoucí od předmětu rovnoběžně s optickou osou z Obrázek 2-25 se tak budou po dopadu na tenkou rozptylku „rozptylovat“ a jejich projekce nastane do ohniska F_3 a nikoliv F'_1 .



Obrázek 2-26: Zobrazení tenkou rozptylkou.

2.4.5 TLUSTÉ ČOČKY

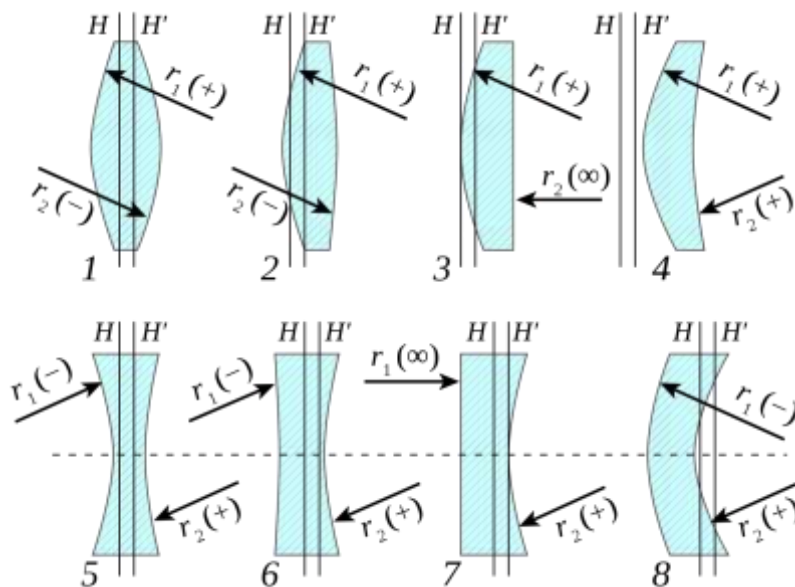
Zobrazování tenkými čočkami je jednoduché. Jenže reálné čočky nejsou tenké a mají dva poloměry křivosti. A tento fakt zásadním způsobem ovlivňuje kvalitu zobrazení. Čočky musíme nejdříve rozdělit podle tvarů (Obrázek 2-27). Spojky: 1-2) dvojevypuklá (bikonvexní), 3) ploskovypuklá (plankonvexní), 4) dutovypuklé (konkávkonvexní). Rozptylky: 5-6) dvojduté (bikonkávni), 7) ploskoduté (plankonkávni), 8) vypukloduté (konvexkonkávni). Tlustou čočku definujeme tehdy, pokud je její tloušťka d řádově blízká poloměru křivosti.

Kromě těchto základních tvarů jsou i tvary jiné, než sférické. K některým se během skript dostaneme i blíže. Takovým zástupcem může být třeba cylindrická čočka, tedy čočka s válcovým tvarem, používaná ve filmové optice k anamorfickému roztažení obrazu. Také dnešní objektivy často obsahují členy asférické (obvykle tvarů jiných kuželoseček) korigující různé optické vady. Dále máme třeba čočky toroidní, ke korekci astigmatismu. Tyto čočky mají v na sebe kolmých rovinách různé zakřivení. Některé brýle jsou vybaveny multifokálními čočkami, které mají v různém směru nebo různé zóně různou ohniskovou vzdálenost. Dá se jich tak využívat například k současnému nošení brýlí na dálku i na blízku. Poslední by za zmínku mohly stát čočky Fresnelovy. Jedná se o plochou a na sklo tedy nenáročnou čočku, vzniklou frézováním jedné kulové čočky. Používá se například ve filmovém průmyslu k fokusaci paprsků filmových světel. Ale můžeme ji taky najít jako jednoduchou plastovou lupu, která je velmi tenká (jako hrubší list papíru) ale přitom má velkou optickou mohutnost.

Poprvé jsem zmínil optickou mohutnost. Nadešla tedy chvíle, abychom si ji nadefinovali. Jedná se o převrácenou hodnotu ohniskové vzdálenosti.

$$D = \frac{1}{f},$$

kde ohnisková vzdálenost je uváděna v metrech a jednotka optické mohutnosti se nazývá *dioptrie*.



Obrázek 2-27: rozdělení čoček podle tvaru. (Autor Fred the Oyster @ Wikimedia CC BY-SA)

Pokud se máme zabývat optikou objektivů, lze očekávat, že jen velmi pečlivě zvolené a precizně vypočítané optické sestavy budou vyhovovat našim požadavkům. Zjistíme, že na kvalitu zobrazení má vliv tvar i tloušťka čočky. Následující vztahy uvádíme pro představu výpočtu jediné ještě tlusté čočky. Přičemž v nejjednodušším případě, můžeme uvažovat $n_1 = n_3 = 1$, pokud jde o čočku okolo které je vzduch.

Míra vypuklosti čočky se definuje jako

$$\sigma = \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2},$$

kde r_1 a r_2 jsou poloměry křivosti obou ploch čočky.

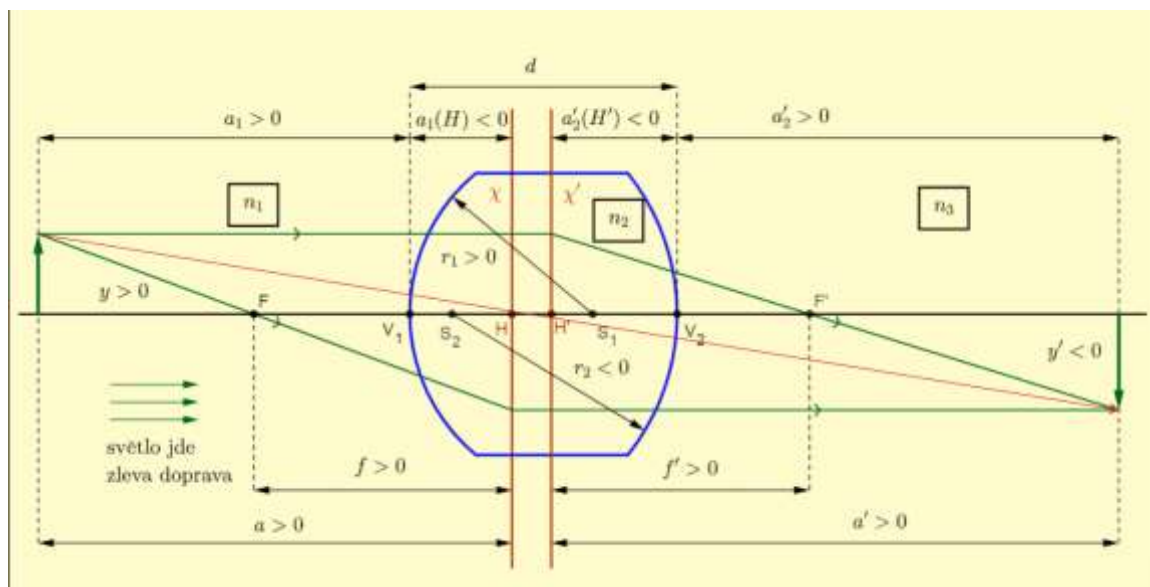
A dále platí, že

$$\frac{1}{f} = (n_2 - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \left[\frac{(n_2 - 1)^2}{n_2} \cdot \frac{d}{r_1 r_2} \right],$$

tedy

$$f = \frac{n_1 r_1 r_2}{(n_2 - 1)[n_2(r_2 - r_1) + (n_2 - 1)d]}$$

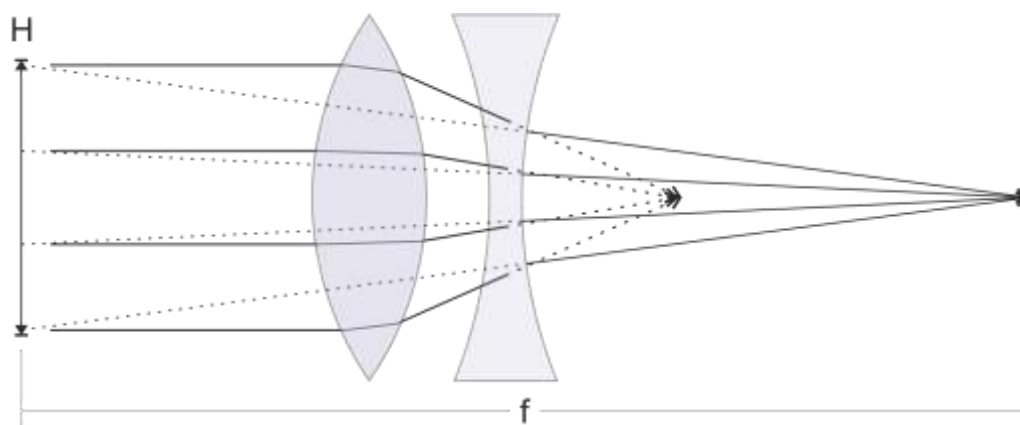
kde d je tloušťka čočky. U tlustých čoček se většina vzdáleností (ohnisko, předmětová i obrazová vzdálenost, atd.) počítají od tzv. hlavních bodů čočky H . Ty jsou dány výpočtem a jsou symetricky rozmístěny kolem pravého optického středu čočky. V případě, že uvažujeme čočku tenkou, pak hlavní body H se kryjí s optickým středem i vrcholy čočky V .



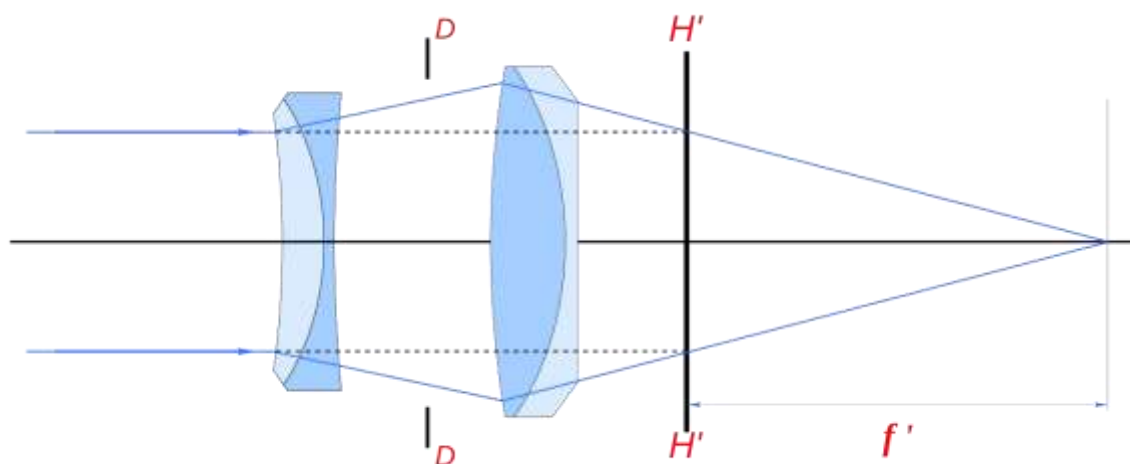
Obrázek 2-28: Zobrazení tlustou čočkou. Pro náš případ uvažujeme $n_1 = n_3 = 1$, tedy čočka se nachází ve vzduchu.

2.4.6 HLAVNÍ ROVINA

Paprsky se mezi rovinami danými hlavními body přenášejí rovnoběžně s optickou osou. Toto „rozdvojení“ hlavního bodu může být i užitečné, například při konstrukci objektivů. Vhodnou konstrukcí je možno dosáhnout toho, že se například u teleobjektivu posune předmětová hlavní rovina před objektiv, čímž je možné zkrátit stavební délku objektivu. Naopak v případě velmi širokoúhlých objektivů je nutno konstrukční délku prodloužit, pak se volí uspořádání čoček takové, aby předmětová hlavní rovina ležela až v obrazové části.



Obrázek 2-29: Použitím rozptylky můžeme vysunout hlavní rovinu před objektiv a tím zkrátit konstrukční délku objektivu.



Obrázek 2-30: Hlavní rovina v případě skutečného širokouhlého objektivu. Rovina je posunuta až do obrazové části, čímž umožňuje prodloužit konstrukční délku objektivu v tom smyslu, že paprsky jsou schopny dopadnout i na snímač fotoaparátu přesto, že ohnisková vzdálenost objektivu je mnohem menší, než šachta fotoaparátu.
(autor: Patrick Horgan @ Wikimedia)

2.4.7 HRANOL

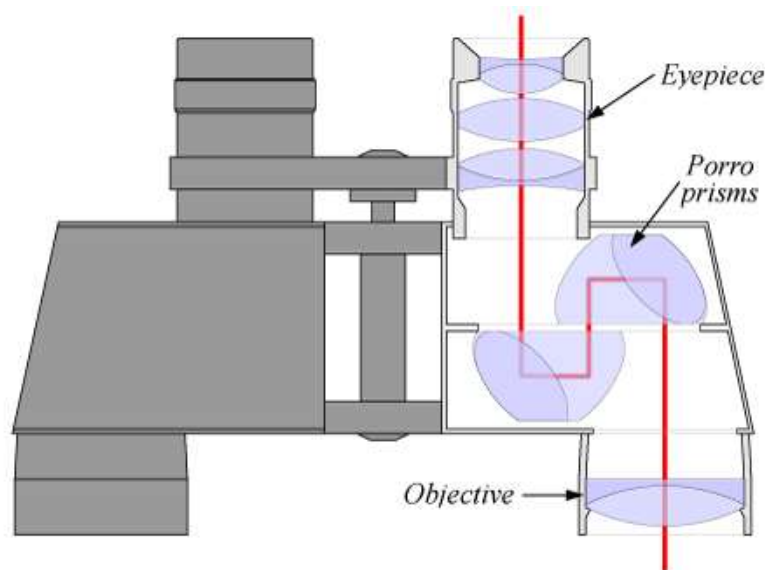
Optický hranol je důležitou součástí mnoha fotografických i pozorovacích přístrojů. Jeho využití nespočívá pouze v efektu disperze. Největší užitek přináší hranol díky zákonu totální reflexe, tedy česky: úplného odrazu. Již jsem se o něm zmínil v zákonu odrazu, kde se stoupajícím úhlem dopadu stoupá i odrazivost. Úplný odraz ale nejlépe pochopíme prostřednictvím Snellova zákona. Představíme-li si světelné paprsky procházející z opticky hustšího prostředí do prostředí opticky řidšího, platí, že se světlo láme od kolmice. S rostoucím úhlem dopadu se pak zvětšuje i úhel lomu a při určitém mezním úhlu dopadu α_m bude úhel $\beta = 90^\circ$.

$$\frac{\sin \alpha_m}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1},$$

a protože $\sin 90^\circ = 1$, platí

$$\sin \alpha_m = \frac{n_2}{n_1}.$$

Toho se využívá nejen v optických hranolech, ale také například ve světlovodech anebo optických vláknech.

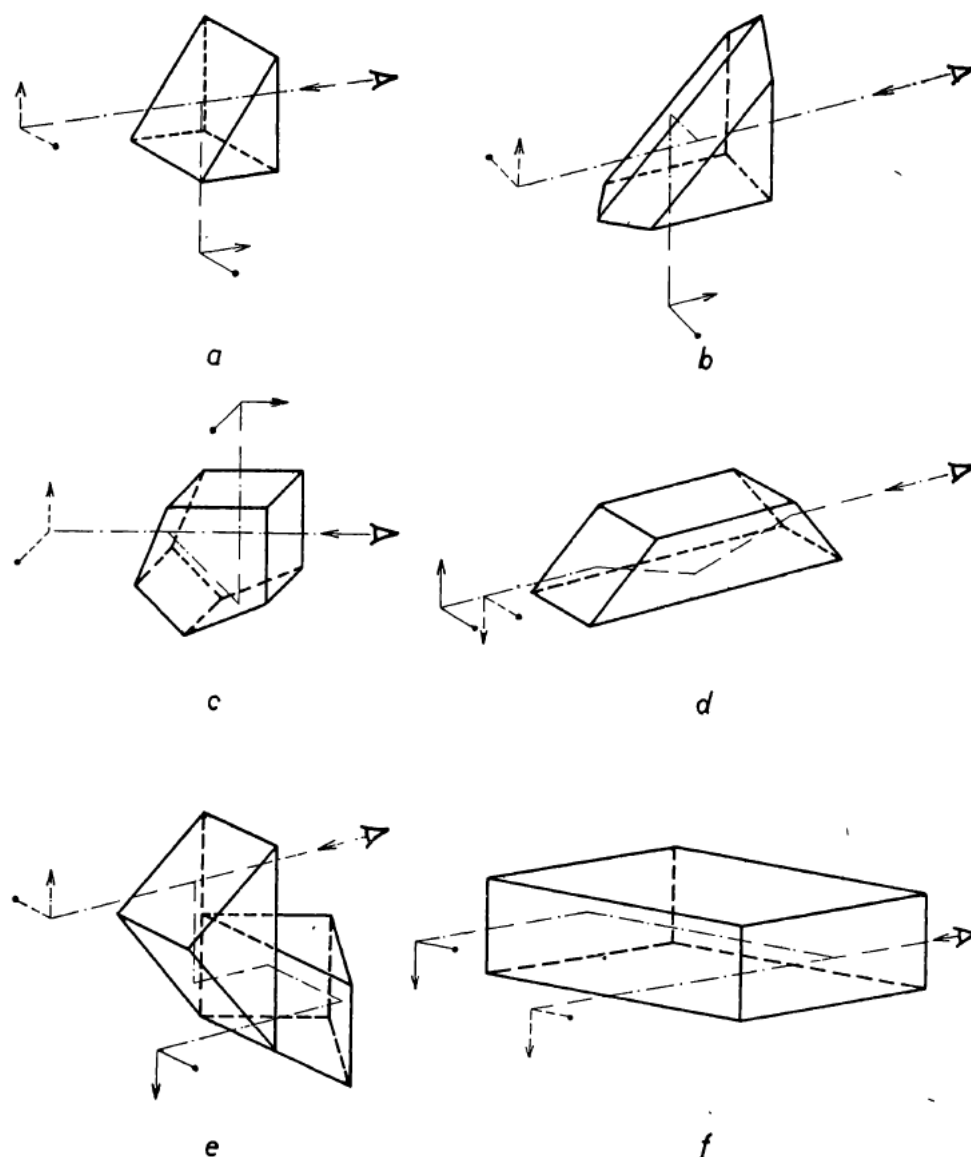


Obrázek 2-31: Příklad použití hranolu a zároveň využití úplného odrazu. Dvojce hranolů nejenže zajišťuje, že se obraz ze dvou širokých objektivů dostane po rovnoběžných drahách do obou očí položených poměrně blízko sebe. Ale především, zprostředkuje stranové a vrcholové převrácení obrazu tak, aby pozorovatel viděl v okularu obraz vzpřímený a stranově nepřevrácený.

Hranolů se tedy používá místo rovinných zrcadel, protože se odráží od skleněné plochy beze ztrát díky úplnému odrazu.

Dalším využitím je efekt možného převrácení obrazu, čehož se využívá například v triedrech. Legendární je také díky svému pentagonálnímu hranolu fotoaparát Pentacon Six, který dříve dvouokou zrcadlovku změnil na jednookou, díky použití uvedeného hranolu. Pentagonální hranol převrací obraz stranově. U dvouokých zrcadlovek je na matnici obraz výškově správně. Použitím pentagonálního hranolu s tedy obraz v hledáčku jevil převrácený do správné polohy.

Vhodnou kombinací a tvary hranolu dokážeme obraz posunout paralelně, převrátit v libovolné ose, posunout stranově, atd.

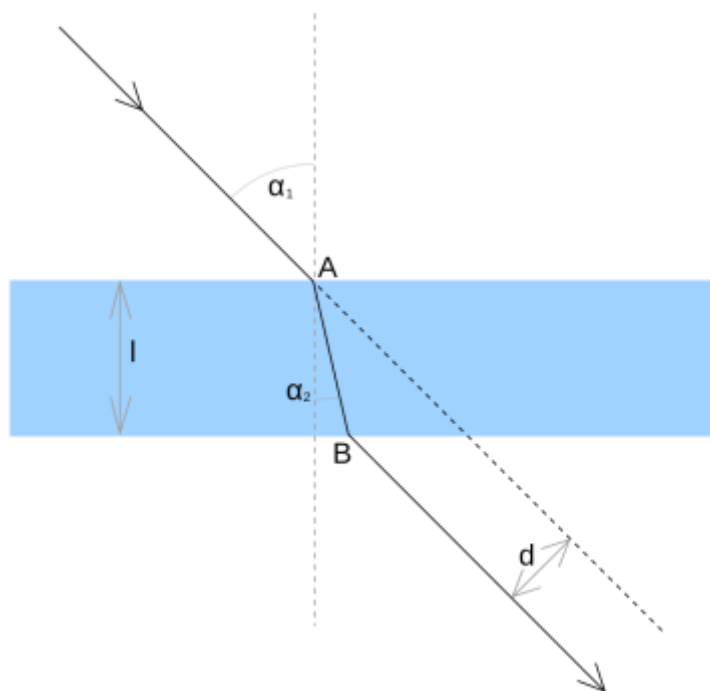


Obr. 34. Některé typy hranolů. Silně vytažený obraz ukazuje skutečnou polohu předmětu, čárkovaně je vytažen obraz, jak jej vidí divák. a) Jednoduchý hranol převrací výškově, ale ne stranově; b) střežový hranol převrací obraz i stranově; c) pětiboký hranol (pentagon) mění směr pozorovacího paprsku, zachovává polohu předmětu; d) Wollastonův hranol převrací obraz výškově, při otáčení hranolu se otáčí i obraz; e) Porrova kombinace převrací výškově i stranově (triedry); f) rhombický hranol posouvá pouze obraz stranově.

Obrázek 2-32: Některé typy hranolů. (Převzato z [4])

2.4.8 PLANPARALELNÍ DESKA

Jeden důležitý refrakční člen jsme ještě nezmínili, je jím rovinná (planparalelní) skleněná deska. Její vliv na kvalitu obrazu je závislý na materiálu (indexu lomu) a tloušťce. Zásadní vliv je v podobě posunutí optického obrazu a u tlustých planparalelních desek v existenci barevné vady.



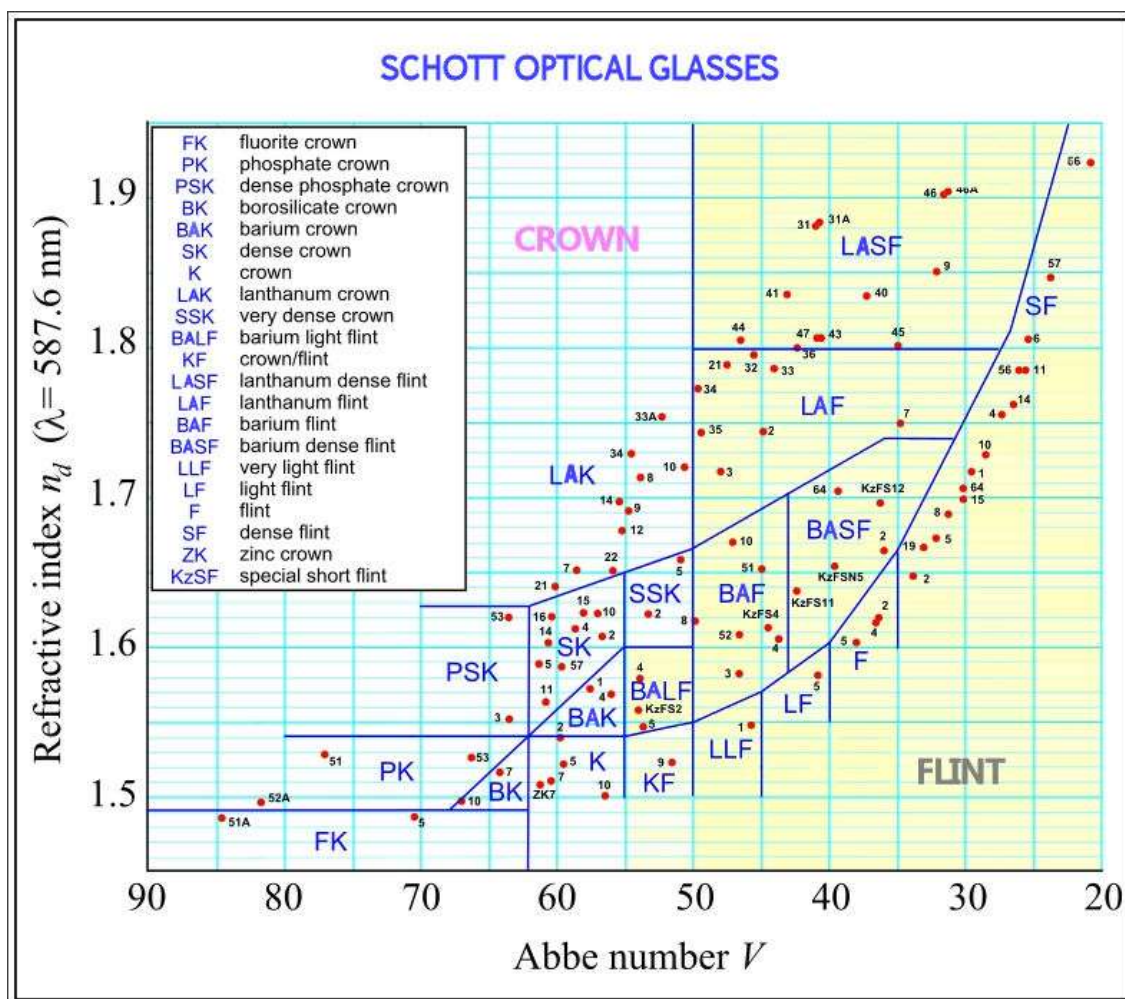
Obrázek 2-33: Lom světla na planoparalelní desce. Dochází k posunu ohniskové vzdálenosti, jinak je obraz nedeformován.

Využívají se velmi hojně, především v podobě fotografický filtrů. Ty se umísťují buďto před objektiv, zřídka (občas u širokoúhlých objektivů a fish eye objektivů) za objektiv v podobě želatinových filtrů. Dále bývají téměř vždy umístěny ochranná sklíčka před čipy fotoaparátů, které také působí jako planoparalelní deska. Ty zároveň obsahují filtr, pohlcující infračervené záření, na které bývají CMOS čipy také citlivé popřípadě jsou ještě osazeny tzv. low-pass filtrem, který specifickým způsobem snižuje kontrast aby zabránil moiré. Některé úpravy vedoucí k odstranění tohoto ochranného sklíčka vedou ke zvýšení citlivosti na infračervené světlo, avšak také ke ztrátě schopnosti přístroje vyvážit bílou a hlavně, v důsledku posunu ohniskové vzdálenosti planoparalelní destičkou, ke ztrátě schopnosti korektně zaostřit.

2.5 Druhy optických skel

Optické sklo musí mít některé klíčové vlastnosti. Musí být precizně čiré a mít konstantní vlastnosti v celé ploše. Chemicky se jedná o křemičitan sodný, vápenný anebo draselný, do kterého bývají přidávány další přísady upravující optické vlastnosti (olovo, bór, atd.). Základní členění máme na skla korunová a flintová. Korunové skla mají menší index lomu. Flintové vyšší. Jejich kombinací můžeme upravit disperzi tak, abychom alespoň částečně eliminovali barevnou vadu objektivů.

Existuje velké množství optických skel a účelem této knihy není, je všechny poznat a popsat. Zmíníme některé význačné a hlavně se zaměříme na jejich obecné využití ve fotografické a filmové optice.



Obrázek 2-34: Abbeův diagram s vyznačenými cca 120 typy optických skel firmy Schott. Diagram zobrazuje závislost indexu lomu na disperzním čísle. V základu dělí skla do jednotlivých segmentů podle složení, kterým přiřazují míru barevné disperze a index lomu.

V roce 1802 si anglický chemik William Hyde Wollaston všiml, že na některých místech slunečního spektra je světlo rázem slabší než by mělo být. Joseph von Fraunhofer v roce 1814 tyto mezery v intenzitě slunečního světla znovuobjevil a začal pečlivě zkoumat a měřit jejich vlnové délky. Nakonec byly vlnové délky, na kterých se nacházely dané propady v intenzitě, nazvány Fraunhoferovy čáry. Během života objevil Fraunhofer na 570 spektrálních čar a díky moderním přístrojům můžeme zjišťovat rychle tisíce takových spektrálních čar. Hlavní Fraunhoferovy čáry jsou označeny písmeny A, B, C, D, E, F, G, H, K. Pro označení slabších čar se používají další písmena abecedy. Později bylo zjištěno, že pokles intenzity vlnové délky odpovídající Fraunhoferově čáře je způsoben absorpcí světla různými složkami atmosféry. Kupříkladu čáry A a B jsou způsobeny kyslíkem a H a K jsou způsobeny ionty vápníku. Vlnové délky Fraunhoferových čar jsou docela dobře určené a používají se jako normály pro určování indexu lomu. Většinou jsou indexy lomu látek určené pro lom paprsku světla o vlnové délce Fraunhoferovy čáry D (z toho se pak daný index lomu označuje n_D). [8]

Hlavní Fraunhoferovy spektrální čáry:

- A – 759,37 až 760,82 nm
- B – 686,719 nm
- C – 656,281 nm
- D – 587,56 až 589,3 nm
- E – 527 až 527,039 nm
- F – 486,134 až 486,14 nm
- G – 430,774 až 430,79 nm
- H – 396,847 nm
- K – 393,368 nm

Základní dělení optických skel je podle míry disperze a indexu lomu světla. Míra disperze se počítá nikoliv vůči jedné vlnové délce, ale vůči několika vybraným vlnovým délkám. Z historického důvodu jsou používány Fraunhoferovy⁶ spektrální čáry D, F a C, které formují tzv. Abbeovo číslo.

$$V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C},$$

kde dolní indexy u jednotlivých indexů lomu odpovídají příslušným Fraunhoferovým spektrálním čarám.

Naprostá většina skel je křemičitých. Výjimky existují v podobě znečlových skel (vznikající tavením znečlových hornin), chalkogenidová skla (používaná pro konstrukci optických disků). Křemičitá skla pak dělíme podle vlastností a chemického složení.

2.5.1 KŘEMENNÉ SKLO

Je nejčistší formou klasického skla, tedy křemičité sklo bez příměsí je křemenné sklo. Má teplotu tání 1600 °C, index lomu 1,54 a propouští velmi dobře široké spektrum viditelného světla včetně UV záření (příměsová skla prakticky UV nepropouští). Díky vysoké teplotě tání je ale náročné na výrobu a tak se v optice používá pouze tam, kde ho není možno příměsovými skly nahradit. Typický příklad použití jsou baňky halogenových žárovek. Ale například exkluzivní typy skleníků mohou být vybaveny křemennými tabulemi,

⁶ Fraunhoferovy čáry jsou spektrální čáry pojmenované po německém optikovi Josephu von Fraunhoferovi, který se významně zasloužil o jejich prozkoumání.

keré zajistí přístup světla k rostlinám v širší, spektru, než přes klasické okenní tabule sodno-vápenatých skel.

2.5.2 SODNO-VÁPENATÉ SKLO

Je nejběžnějším typem skla používané v okenních tabulích a ve stavebnictví obecně. Obsahuje 72% SiO₂, 14, 2% oxidu sodného (Na₂O), 10% oxidu vápenatého (CaO), 2,5% oxidu hořečnatého (MgO) a 0,6% oxidu hlinitého (Al₂O₃). Je průhledné, snadno se tvaruje, má však vysokou teplotní roztažnost a odolává teplotě pouze do 500–600 °C). Propouští UVA záření (340–400 nm) ale nepropouští UVB a UVC (<315 nm), z toho důvodu pod sklem sluneční záření neopaluje [5]. S větším podílem hliníku a vápníku bývá vyráběno sklo obalové.

2.5.3 BOROSILIKÁTOVÉ SKLO

Typicky známé pod pseudonymem Pyrex, tento název je ale proprietární značkou, podobně jako český Simax. V obou případech se jedná o sklo s velmi malou tepelnou roztažností ($\approx 3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ při 20 °C), čehož je využíváno nejčastěji v podobě varného skla, ale také ke konstrukci optických zrcadel, u kterých je třeba, aby si tvarovou stálost zachovávaly při nejrůznějších rozsazích teplot.

2.5.4 KORUNOVÉ SKLO

Je nejčastější a nezákladnější typ optického skla. Má relativně nízký index lomu ($\sim 1,52$) a nízkou disperzi Abbeovo číslo od 50. Dnes se tedy dá tvrdit, že jde o rodinu několika typů skel, dříve se však vyrábělo pouze jediný typ právě pod názve „korunové sklo“ pro které byla typická příměs 10 % oxidu křemičitého a toto sklo bylo také prvním nízkodisperzním sklem v optice. Dnes máme třeba typické borosilikátové korunové skla BK7 obsahující příměs 10 % oxidu boritého nebo bariové korunové skla BAK4. Jedná se o systém vyráběný především německou věhlasnou firmou Schott, ale na trhu je možno nalézt také výrobky čínské s podobným označením, např. BaK4 (které však nemá nic společného s BAK4). Nemusí být nutně špatné, jsou zajisté levnější, ale právě výrobci jako Carl-Zeiss, Schott a Swarovski jsou garancí, že sklo projde pečlivou kontrolou a nevyhovující kusy jsou vyřazeny. To je ostatně nezbytné při výrobě optického skla, protože na menší optice probíhá měření výsledné optické kvality až po přebroušení a vyleštění. Speciálně BaK4 čínské CDGM, které je fosfátové korunové sklo a má větší náchylnost na tvorbu bublinek a tedy může způsobovat zřetelný rozptyl u nekvalitního výrobku.

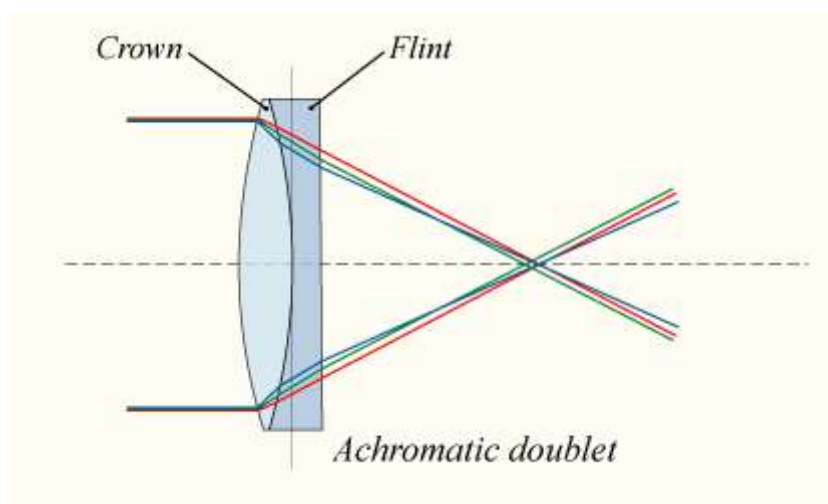
2.5.5 FLINTOVÉ SKLO

Sklo s Abbeovým číslem menším než 50 (index lomu má od 1,5 do 2) je zařazováno do kategorie flintových skel. Je typické příměsí olova a vysokou disperzí. Oxidu olovnatého

obsahuje typicky 24 %, ale množství se mění podle určení a potřeb. Rozlišujeme tak flint podle množství olova lehký, střední a těžký. Příměs olova dodává sklu větší hustotu, menší tepelnou vodivost, vyšší index lomu (vyšší lesk), větší odolnost. Olovnaté sklo je možná neznámým pojmem, ale pokud se vysloví „křišťál“ budeme okamžitě doma. Křišťál je totiž také olovnaté, a vlastně flintové sklo. Důvod je prostý, čiré materiály s vysokým indexem lomu odjakživa přitahovaly pozornost. Jsou třpytivější než běžné sklo. Proto přitahuje pozornost diamant (index lomu 2,6!) anebo křišťál (index lomu 1,8). (Někteří výrobci křišťálu ale vyrábí i sklo s podobnými vlastnostmi, avšak bez olova, například karlovarský Moser.)

Flint je anglický název pro pazourek, takže česky bychom mohli také používat název pazourkového skla. A skutečně, pazourek je předchůdcem flintového skla i křišťálu a první vysoce lesklé sklo z něj přetavil již kolem roku 1670 anglický sklář George Ravenscroft.

Kombinací korunového a flintového skla dosáhneme jednoduchého způsobu jak zmenšit barevnou vadu. Obvykle se tak koná vytvořením tzv. achromatického dubletu, tedy těsným spojením dvojbypuklé spojky z korunového skla a dvojduté rozptylky ze skla flintového.

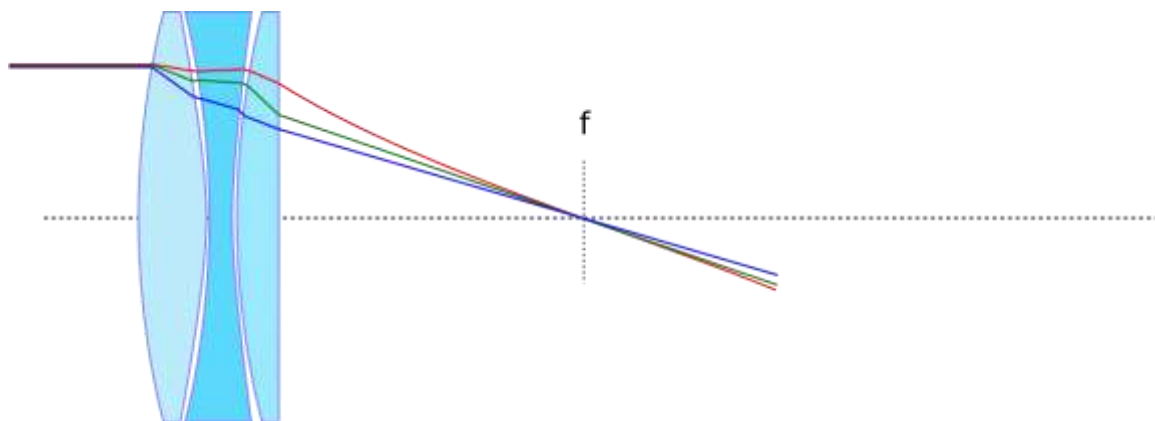


Obrázek 2-35: Achromatický dublet, vhodnou kombinací korunového a flintového skla můžeme dosáhnout snížení barevné vady a mírné snížení otvorové vady. Typicky se používá konvexní BK7 korunového skla v kombinaci s konkávním F2 flintovým sklem. Jejich spojení, obvykle tmelení k sobě a tvar zajišťuje aby se disperze vzájemně vynuřily alespoň ve dvou vlnových délkách (F a D Fraunhoferových čarách, tedy červené a zelené). Modrá stále ještě zůstává mimo ohnisko.

2.5.6 FLUORITOVÉ SKLO

Pod tímto ne zcela přesným termínem se skrývá varianta s monokrystalem fluoritu vápenatého. Skutečně, takové sklo není taveno, ale vzniká tak, že se nechá uměle narůst krystal CaF_2 a následně se zpracovává. Má extrémně nízký index lomu ($\sim 1,44$) a Abbeovo číslo 95!, a tak se používá jako náhrada nebo častěji jako doplněk k achromatizaci objektivu. V kombinaci s dubletem z korunového a flintového skla vytváří tzv. APO triplet s velmi

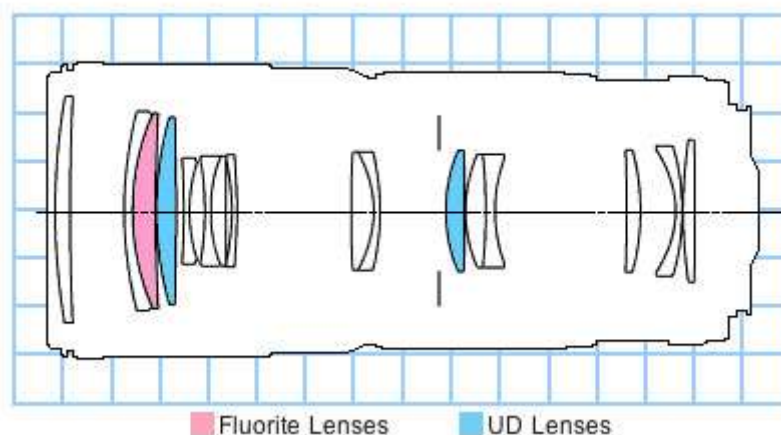
dobře korigovanou barevnou vadou. Fluoritové sklo je sice velmi drahé, cena APOchor-matu je řádově větší než achromatu, avšak také barevná vada a kulová vada je korigována o řád lépe. Nevýhodou fluoritového krystalu je, že na vzduchu degraduje, proto je zvykem jej buďto lepit mezi členy anebo v případě že výpočet požaduje mezeru, bývá vyplněna kapalinou nebo nějakým plynem. Jako krystal má také strukturu oktahedronu, a tak má tendenci se štípat a může být snadno poškrábán.



Obrázek 2-36: Apochromatický objektiv kde třetí člen je z fluoritového krystalu. Obvykle se objektivy obsahující skla nebo členy s velmi nízkou disperzí označují jako extra-low dispersion (ED) ve zkratce za názvem. Takovéto objektivy mají velmi dobře vykorigovanou barevnou vadu hned ve třech spektrálních čarách (přidává k achromatu korekci modré), což v případě viditelného světla přináší pro naprostou většinu aplikací neznatelnou barevnou vadu.

Fluoritové sklo je v moderních objektivěch často nahrazováno jeho syntetickými variantami, a to naprosto oprávněně. Je levnější. Avšak do doby napsání této knihy autorovi není znám příklad, kdy by bylo nejen levnější, ale zároveň také srovnatelné kvality jako fluoritový krystal. Proto je stále obvyklé, že fluoritové krystalové skla jsou součástí moderních objektivů.

Zatímco CaF_2 krystal má Abb. č. 94,99, jeho náhražky jsou možné. Tzv. Nízkoindexový fluorofosfát FPL-53 vyvinutý japonskou Ohara corp. má Abb. č. 94,94 a $n = 1,4387$. Je levnější a chemicky stabilnější. Často se mu říká syntetický fluorit. Oproti opravdovému fluoritu ale má větší tepelnou roztažnost, což zhoršuje kvalitu zobrazení při extrémních teplotách. FPL-51 také od japonské Ohara má Abb. č. 81,61 a $n = 1,4387$. Zdánlivě horší parametry ale vyrovnává nižší cena a menší tepelná roztažnost. To jsou jen dvě z mnoha příkladů náhrad za fluoritový krystal. Přesto je stále fluorit součástí objektivů. Někdy samostatně, někdy právě v kombinaci se syntetickým FPL. Například Canon objektivy řady L obsahují často obojí typy. Typickým zástupcem a velmi populárním objektivem EF70-200mm f/4L USM obsahuje jak člen z fluoritu tak ze náhražky (označovaný společností Canon jako UD – Ultra-low Dispersion již od roku 1978).



Obrázek 2-37: Objektiv Canon EF 70-200mm f/4L USM obsahuje jeden fluoritový člen a dva členy z UD skla.



Samostatný úkol: Projděte objektivy, které používáte pro fotografování nebo natáčení a zjistěte jejich průřez a složení jednotlivých elementů podle typu použitého optického skla. Vysvětlete v pár větách, proč jsou tyto elementy použity.

2.6 Světelnost

Poměr osvětlení obrazu a jasu předmětu nazýváme světelnost optického systému. Pro osvětlení v rovině obrazu E platí následující vztah

$$E = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot \tau \cdot B,$$

kde D je průměr vstupní pupily objektivu, f je ohnisková vzdálenost objektivu, τ je koeficient útlumu a B je jas předmětu.

Za našich běžných okolností je vstupní pupilou D průměr nezacloněné přední čočky objektivu, tedy zpravidla vnitřní průměr tubusu. Ohnisková vzdálenost je jasně dána výrobcem. Ztráty τ jsou dány množstvím členů, jejich optickými vlastnostmi, především transmisivitou a je vždy menší než 1.

Světelnost jakožto poměr osvětlení obrazu a jasu předmětu pak tedy definujeme jako

$$\frac{E}{B} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot \tau.$$

V těchto vztazích závisí na světelnosti objektivu tři hodnoty: propustnost objektivu, průměr vstupní pupily a ohnisková vzdálenost. Ve zjednodušených případech se první člen (propustnost) zanedbává a uvažuje se jen závislost na čtverci poměru D/f . Tento poměr se nazývá poměrný otvor objektivu a vyjadřuje se vždy v zápise $1:\dots$. A číslo uváděné místo trojtečky se nazývá clonové číslo. Ovšem je třeba upozornit, že D je průměr vstupní pupily a nikoliv průměr clony. A stejně tak je třeba upozornit, že světelnost objektivu není D/f , protože jak už bylo uvedeno, tento podíl se nazývá poměrný otvor, protože nás zajímá osvětlení na snímači, které je úměrné čtverci poměrného otvoru.

2.6.1 CLONOVÉ ČÍSLO

Možnosti nastavení clonových čísel jsou obvykle uvedeny (nacejchovány) mechanicky na anebo elektronicky v objektivu. Protože je osvětlení úměrné čtverci poměrného otvoru, potřebujeme mít možnost nastavit clonové číslo v řadách tak, aby změnou o jeden stupeň se osvětlení zvětšilo nebo zmenšilo o dvojnásobek. Proto se musí clonové číslo měnit s druhou odmocninou clonového čísla.

Mějme poměr ohniskové vzdálenosti f a průměru vstupní pupily D , tedy převrácenou hodnotu poměrného otvoru rovnu jedné.

$$\frac{f}{D} = 1,$$

například objektiv s ohniskovou vzdáleností 50 mm a průměrem vstupní pupily (průměrem objektivu) také 50 mm . Pokud konstrukce umožní mít clonu 1 (obvykle se z důvodu optických vad objektivy přirozeně cloní na nějakou základní a vždy vyšší hodnotu) můžeme použít následující příklad.

Pokud chceme změnit clonu 1 tak, aby na snímač dopadala polovina světla, než na něj dopadá při cloně 1, bude clona nastavena na $1 \cdot \sqrt{2} \cong 1,4$. Naopak, pokud budeme chtít aby na snímač zacloněný clonou 1 dopadala polovina světla, musíme změnit clonu na $1:\sqrt{2} \cong 0,7$. Takto vznikla také clonová řada. Každé další clonové číslo vyjde vynásobením $\sqrt{2}$, každé nižší clonové číslo vyjde vydělením $\sqrt{2}$. Takto získáme clonovou řadu, u níž každá clona v clonové řadě znamená expozici dvojnásobnou anebo na druhou stranu poloviční. Proto máme clonovou řadu právě:

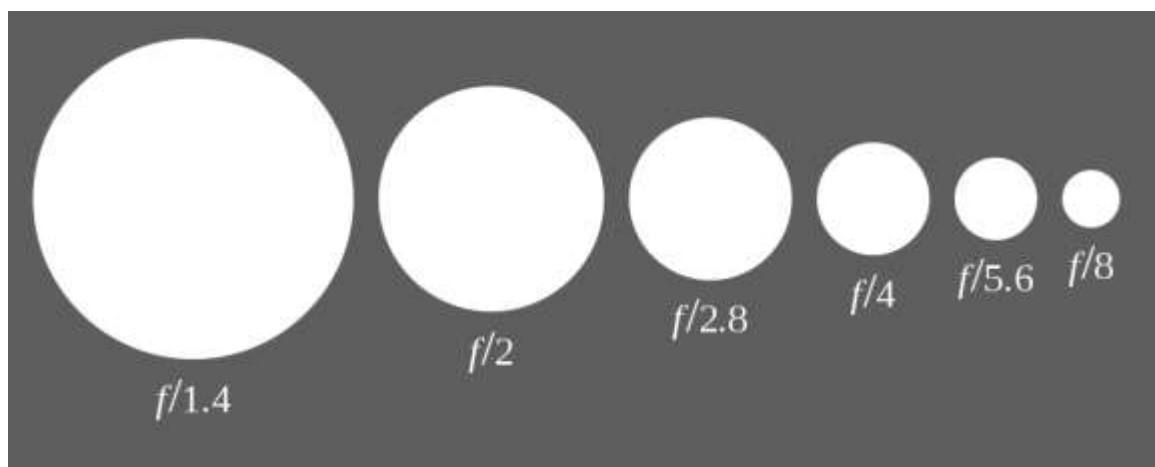
0,7 1 1,4 2 2,8 4 5,6 8 11 16 22

Pokud narazíte na clonová čísla mezi těmito čísly v základní řadě, jedná se pravděpodobně o změnu expozice o krok menší než jeden expoziční stupeň (tzv. exposure value - EV).

Na závěr je důležité zmínit, že světelnost není v ploše snímače konstantní. Uvedený matematický vztah platí pro jediný bod obrazu ležící na optické ose. Jenže jakmile se od optické osy odchýlíme, zmenší se osvětlení obrazu na snímači tím víc, čím více jsme od osy odchýleni. Osvětlení klesá se čtvrtou mocninou kosinu úhlu, který svírá paprsek spojující předmět a bod na snímači s optickou osou. To se dá názorně pochopit snadno tak, že se podíváme na objektiv z většího úhlu. Pod velmi malým úhlem nezpozorujeme žádnou změnu, ale s velkým úhlem bude zřejmé, že viditelná plocha předního členu objektivu je plošně menší, projde jím tedy méně světla než v případě kruhu, tak jak se jeví při pohledu kolmém.

Druhým důvodem je vinětace, tedy skutečnost, že objektiv není nikdy nekonečně tenký, ale má nějakou tloušťku a v tom případě je obraz omezován ještě tubusem, popř. sluneční clonou. A vinětace je tím zřetelnější směrem do rohu obrazu, čím menší je clonové číslo (tedy čím více je odcloněno).

Pokles světelnosti se tedy projevuje postupným tmavnutím obrazu od středu k rohům obrazu a jde o fyzikálně technickou vlastnost, kterou nelze vyrušit, pouze omezit. Ze znalosti optických objektivů je však z uvedených vztahů možno tuto kumulovanou vinětaci spočítat a následně softwarově upravit. Mnoho těchto algoritmů pro eliminaci vinětace nalezneme přímo ve fotoaparátech, které mají algoritmy pro softwarovou úpravu vinětace přímo zabudovány ve svém firmwaru.



Obrázek 2-38: Znárodnění skutečných otvorů clonové řady.

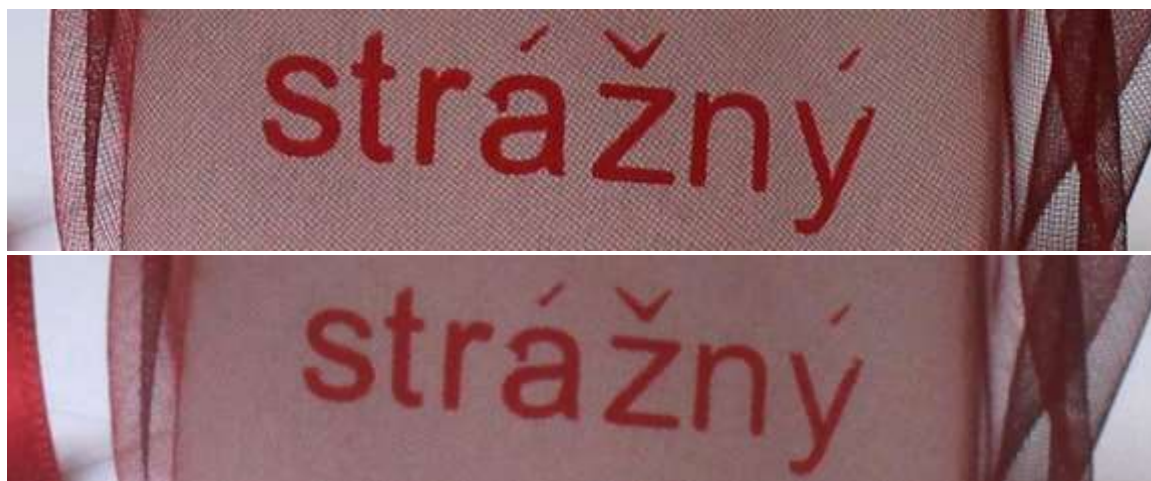
2.7 Hloubka ostrosti

Obraz každého bodu na světlocitlivé vrstvě snímače je tvořen kuželem paprsků, které začínají jako kužel o velikosti vstupního otvoru (vstupní pupily) objektivu a protínají se v ohnisku. Toto protnutí ale není bodové, jak jsme již poznali. Výsledkem je vždy ploška, jejíž velikost závisí na dvou podstatných parametrech. Tím prvním je kvalita optického systému a tím druhým je difrakce. Ideální optický systém může vytvořit bodový průmět, ale takové systémy neexistují. V reálných optických systémech vždy pracujeme s nějakou

mírou optických vad, o kterých se budeme bavit v následující kapitole. U difrakce neexistuje nikdy perfektně ostrý bod, protože difrakce existuje vždy, ovšem u velkých poměrných otvorů je naprosto zanedbatelná. Tato ohybová (difrakční) ploška se však stává patrná u malých poměrných otvorů, u světelnosti 16-22 již téměř vždy překonává velikostí rozptylovou plošku vzniklou optickými vadami. Pokud tedy vyfotografujete předmět na $f/6,3$ a potom na $f/22$, snadno rozpoznáte, že je na $f/22$ je výrazně méně ostrý. Je to dáno právě ohybovými jevy.



Obrázek 2-1: Vlevo vyfotografováno na $f/5,6$ vpravo na $f/22$.



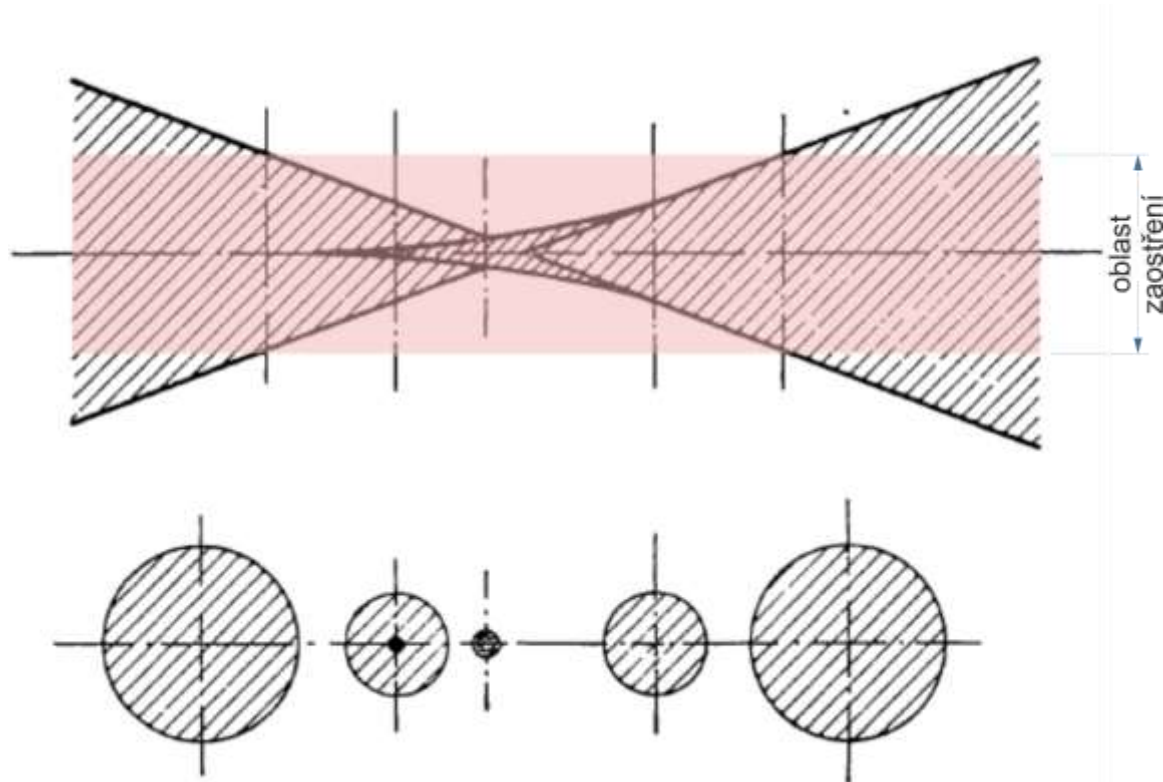
Obrázek 2-2: Vliv difrakce na obraz. Horní obrázek vyfotografován při $f/5,6$, dolní při $f/22$. Ohyb světla na cloně objektivu způsobuje výrazné zhoršení kresby.



Samostatný úkol: Vyberte libovolný objektiv se světelností alespoň $f/2,8$ a proveďte testování scény tak, abyste ukázali kvalitu snímku na jednotlivých clonových číslech. Dodejte výřezy středové oblasti snímků.

Jenže pro oko se bod jeví ostrý, pokud je jeho velikost menší, než rozlišovací schopnost oka. Většina optických vad se tak může stát korigovaná ve chvíli, kdy tyto vady budou pod rozlišovací schopností diváka. Pokud se vrátíme k části se světelným kuželem, bude

zřejmé, že pro určitý úsek se průměr tohoto světelného kužele bude jevit menší, než je rozlišovací schopnost. Pak se nám celý tento rozsah na světelném kuželu bude jevit ostrý. A tomuto rozsahu se říká hloubka ostrosti. Rozlišujeme tedy záběry s malou hloubkou ostrosti jako ty, které mají výraznou část předmětového pole neostrou a obrazy s velkou hloubkou ostrosti, které mají významnou část předmětového pole ostrou.



Obrázek 2-3: Oblast zaostření. Tam kde je průměr rozptylového kroužku menší než rozlišovací schopnost, se jeví obrázek zaostřen. Rozsah na optické ose, ve které se obrázek jeví zaostřený, se nazývá hloubka ostrosti.

Hloubku ostrosti ovlivňuje několik faktorů:

- clona,
- ohnisková vzdálenost objektivu,
- vzdálenost předmětu od fotoaparátu.

Čím větší je poměrný otvor (a tedy čím menší je clonové číslo), tím bude hloubka ostrosti menší. Dále, se zvětšující se ohniskovou vzdáleností objektivu se také zmenšuje hloubka ostrosti. Se zmenšující se vzdáleností předmětu od objektivu také klesá hloubka ostrosti. Obzvláště je to patrné v makrofotografii, kde může hloubka ostrosti dosahovat i desetin milimetru.



Obrázek 2-4: Obrázek vlevo má velkou hloubku ostrosti ($f/16$), obrázek vpravo má malou hloubku ostrosti ($f/2,8$).



SHRNUTÍ KAPITOLY

Byla probána geometrická optika a její využití ve filmu a fotografii. Studenti získali povědomí o průchodu světla optickými prostředími.

3 OPTICKÉ VADY

RYCHLÝ NÁHLED KAPITOLY



Optické vady ovlivňují kvalitu zobrazení. V kapitole je diskutováno, jaké vady existují a jak zobrazení ovlivňují.

CÍLE KAPITOLY



Cílem kapitoly je seznámit studenty s druhy optických vad ve vztahu filmu a fotografii.

ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU



4 vyučovací hodiny.

KLÍČOVÁ SLOVA KAPITOLY



vady, optika, zobrazení, objektivy

3.1 Pojem ostrosti

Dosud jsme se pohybovali v prostředí geometrické optiky ideálních zobrazení. Ale už v průběhu čtení o základních vlastnostech světla a zobrazování jednoduchými systémy jsem zmiňoval, že ideální zobrazení vlastně neexistuje. Dalo se to rozpoznat jak v případě problémů, které způsobuje vlnově-částicový charakter světla, tak například komplikace, které vyvstanou, když uvažujeme místo tenké čočky čočku tlustou.

Také zobrazení, byť sebestřednější, fotografickým objektivem, nebude nikdy perfektní. Už díky tomu, že je objektiv upnutý v objímce a má tak „vstupní pupilu“. Pokud se pokusíme zobrazit bodový zdroj světla (třeba vzdálenou hvězdu), neuvidíme přesnou tečku, ale uvidíme tzv. rozptylový kroužek. A to vždy, i při perfektním zobrazení a perfektním zaostrění. Tento rozptylový kroužek bude tím menší, čím lépe budou korigovány optické vady takového systému a dále, jeho tvar bude odpovídat tvaru vstupní pupily. Proto se mu říká

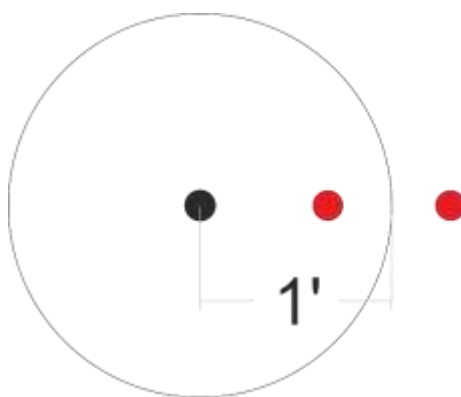
rozptylový kroužek, protože tvarem objímky každého objektivu je kruh. Pokud by byl tvarem vstupní pupily čtverec, bude tvar rozptylového kroužku čtvereček (vlastně budeme mít rozptylový čtvereček). V případě správného zaostření a kvalitní optické soustavy, bude velikost rozptylového kroužku výrazně menší, než rozlišovací schopnost systému, a pak se nám rozptylový kroužek bude jevit skutečně jako bod (tedy nebudeme schopni rozlišit jeho velikost).

Definujme tedy pojem „zaostření“, jako klíčový vstupní parametr pro hodnocení jakosti optického systému. Co je to vlastně zaostřený obraz?

3.1.1 ROZLIŠOVACÍ SCHOPNOST OKA

Rozlišovací schopnost oka je 1 úhlová minuta ($1'$). To platí pro žlutou skvrnu a oko, které není zatíženo nějakými vlastními optickými vadami. Rozlišovací schopnost oka se směrem k periférii snižuje. Rozestup čípků v blízkosti žluté skvrny jsou jednotky mikrometrů ($\sim 5 \mu\text{m}$). Při standardní čtecí vzdálenosti (40 cm) jsme schopni rozlišit dva body vzdálené od sebe cca $0,2 \text{ mm}$. Nakreslíme-li s kolem bodu ve čtecí vzdálenosti kružnici o poloměru $0,2 \text{ mm}$, bude se nám vše uvnitř této kružnice jevit spojené s pozorovaným bodem. Vše vně této kružnice budeme vnímat jako samostatné body. Zde je však vidět jedno úskalí, znamená to, že když bude mít bod rozměr $0,2 \text{ mm}$, bude se nám jevit jako bod a když těsně vedle něj bude další stejně veliký, který se jej bude dotýkat, bude se jevit jako další samostatný bod? Ano i ne. Musíme uvažovat, že body by v ideálním případě měli být pro tyto účely vzdáleny právě o rozlišovací schopnost oka. Ale naše zobrazení aktuálně komplikuje pojem, který zavedeme později, a tou je kontrast obrazu.

Kružnice, která má úhlový rozměr $1'$ se nazývá kružnice splynutí (v angličtině obvyklé jako CoF – circle of confusion). Určuje nám, jaká je přípustná velikost rozptylového kroužku, aby se ještě jevil obraz ostrý.

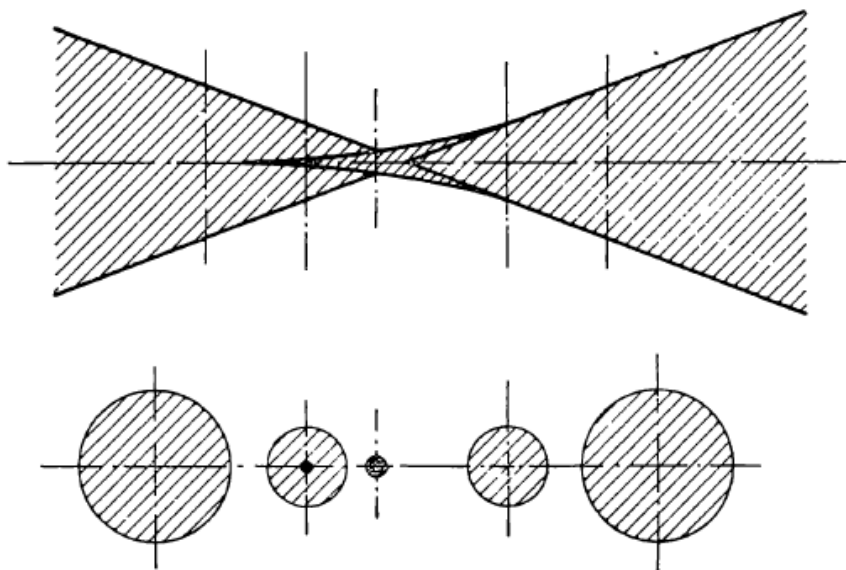


Obrázek 3-1: Velikost rozptylového kroužku. Bod vzdálenější než $1'$ splývá, body vzdálenější než $1'$ se jeví jako samostatné. Z toho důvodu konstruujeme tzv. kružnici splynutí.

Pokud vyfotíme fotografii na políčko kinofilmu ($24 \times 36 \text{ mm}$) a zvětšíme z něj fotografii na rozměr $13 \times 18 \text{ cm}$, tedy $5 \times$, bude CoF mít průměr $\sim 0,03 \text{ mm}$. Z uvedených informací se dá usoudit, že body jsou od sebe rozlišitelné, pokud se nacházejí od sebe dále než $\sim 1/3500$ pozorovací vzdálenosti, nebo taky ohniskové vzdálenosti!

Kromě rozptylového kroužku se, a bude se nám to hodit v hodnocení kvality objektivů, používá také soubor černých a bílých čar. Rozlišení je pak možno uvádět v počtu čar na milimetr, přičemž platí, že tloušťka černé a bílé čáry je shodná. Šířka těchto čar pak odpovídá velikosti CoF kroužku.

Máme-li například objektiv o ohniskové vzdálenosti 50 mm a požadujeme obraz v ohnisku reprodukovatelný tak, aby se jevil ostrý, musí objektiv poskytovat rozlišení 70 čar na milimetr.



Obrázek 3-2: Rozložení světla ve skutečném paprskovém kuželu u systému s otvorovou vadou. [4]

3.1.2 DRUHY OPTICKÝCH VAD

Optické vady rozlišujeme na chromatické (barevné) a monochromatické (nezávislé na vlnové délce).

3.1.3 BAREVNÁ VADA

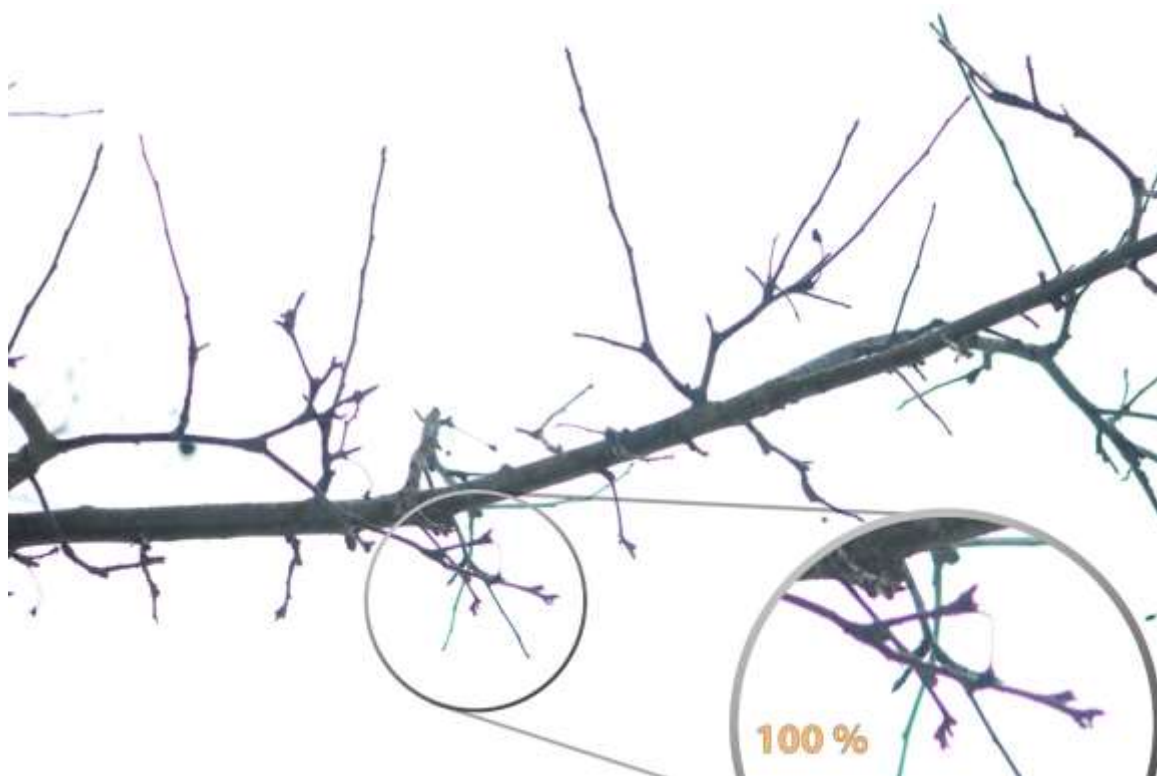
Barevná vada nebo-li chromatická aberace souvisí s barevnou disperzí. Jednotlivé vlnové délky se při přechodu mezi různými optickými prostředími lámou různě. Díky tomu je poloha ohniska pro jednotlivé barvy umístěna různě. Eliminovat barevnou vadu můžeme

vhodnou kombinací skel o různých indexech lomu a různém Abbeově čísle, použitím fluoritových krystalů anebo skel nízkodisperzních.

Existují dva typy chromatických aberací: axiální (podélná, neboli barevná vada polohy) a příčná (laterální, neboli barevná vada zvětšení).

Barevná vada polohy (axiální vada) nastává, když jsou různé vlnové délky světla zaostřeny v různých vzdálenostech od objektivu (posun zaostření). Je typická pro dlouhé ohniskové vzdálenosti. Barevná vada polohy se projevuje sice správným zvětšením, ale díky různým polohám ohniska se na okrajích jeví neostrý, popřípadě má na kontrastních přechodech barevné okraje. Tuto vadu dokážeme zmírnit zacloněním, protože souvisí s projekcí předmětu z optické osy.

K barevné vadě zvětšení dochází, když různé vlnové délky dávají různé zvětšení a/nebo zkreslení obrazu. Laterální aberace je typická pro krátké ohniskové vzdálenosti. Jednotlivé obrazy se sice promítnou do stejné polohy ohniska, avšak jejich okrajové charakteristiky (zvětšení a zkreslení) je různě veliké a tedy vytváří kolem ostrých kontrastních přechodů patrné barevné okraje.

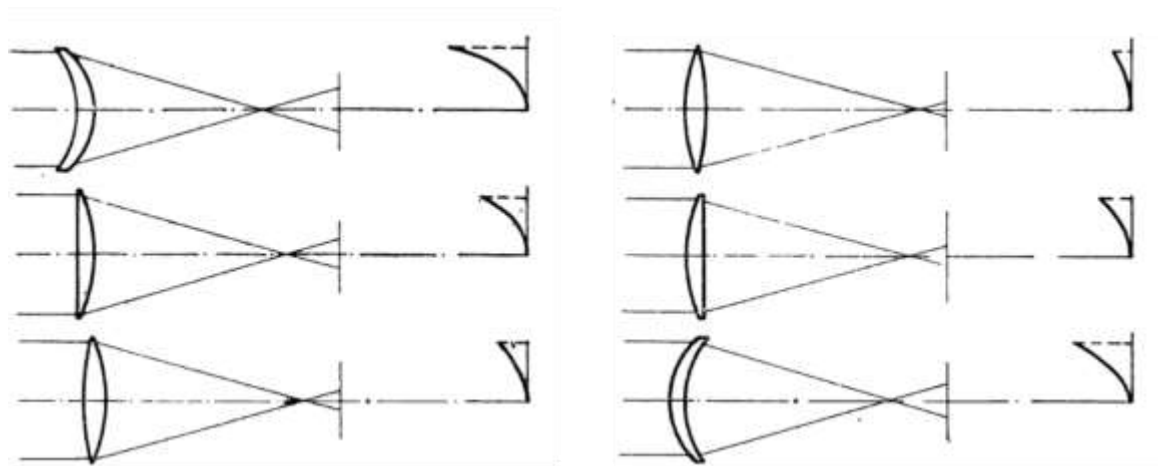


Obrázek 3-3: Příklad barevné vady polohy. Větvičky se jeví do fialova, což naznačuje sice achromatickou korekci, avšak degeneraci na modré vlnové délce. (Autor: Wilder Kaiser @ English Wikipedia, CC BY-SA 3.0)

3.1.4 OTVOROVÁ VADA

Také otvorovou (nebo-li sférickou, či kulovou) vadu jsme již rozebírali. Je způsobována tím, že paprsky procházející sféricky symetrickým systémem se zvětšující se vzdáleností od osy lámou blíže k vrcholu spojně čočky (mají kratší ohnisko). U rozptylky je tomu naopak, tam se ohnisko se vzdalováním se paprsků od osy prodlužuje. Paprsky nevytváří obraz bodový, ale osově symetrickou plochu, která však není osvětlena rovnoměrně (viz Obrázek 3-2: Rozložení světla ve skutečném paprskovém kuželu u systému s otvorovou vadou. Obrázek 3-2). Nemusí tak platit, že správného zaostření dosáhneme v místě, kde je svazek nejúžší. Obvykle otvorová vada vytváří slabší plochu rozptylového kroužku a velmi intenzivní jádro. Takový obraz se pak jeví zaostřený lépe, než obraz, kde je slabší plocha rozptylového kroužku potlačena a naopak jasné jádro zvětšeno. I když bude tato konfigurace mít menší celkový průměr kaustiky⁷, nebude se jevit ostřejší.

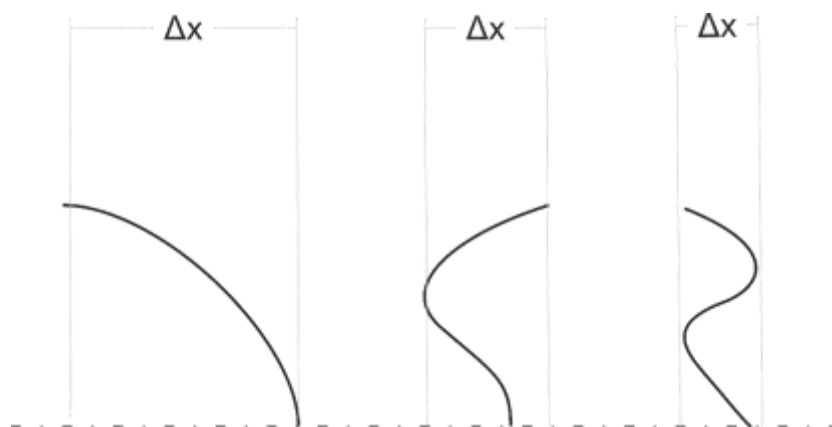
Průběh otvorové vady je značně závislý na tvaru a tloušťce čočky. Zatímco dvojbypuklé spojky mají barevnou vadu menší, dutovypuklé spojky ji mají zdaleka nejzřetelnější.



Obrázek 3-4: Vliv otvorové vady na prohnutí spojně čočky [4].

Na obrázku je zaznamenán průběh otvorové vady i poloha ohniska pro jednotlivé paprsky s různou vzdáleností od osy. Podobný průběh bychom zaznamenali také u rozptylek, ale jak bylo uvedeno, byl by opačný. Odtud se dá tušit, že vhodnou kombinací spojky a rozptylky bychom mohli dosáhnout (alespoň částečné) kompenzace otvorové vady. Skutečný výpočet kompenzace otvorové vady je složitější, takže se omezíme jen na následující dva způsoby kompenzace: jednoduchá a dvojnásobná.

⁷ Kaustika je obálka světelných paprsků.



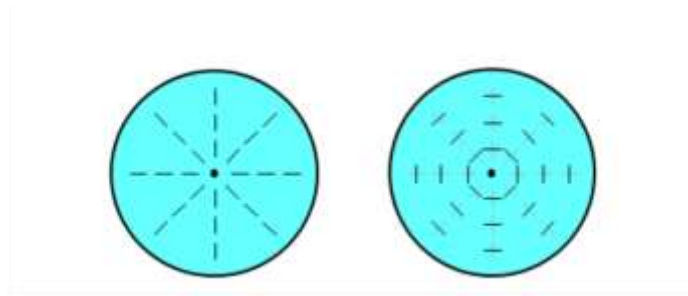
Obrázek 3-5: Průběh otvorové vady spojky. Nalevo bez korekce, uprostřed jednoduchá korekce a vpravo korekce dvojnásobná.

3.1.5 ASTIGMATIZMUS

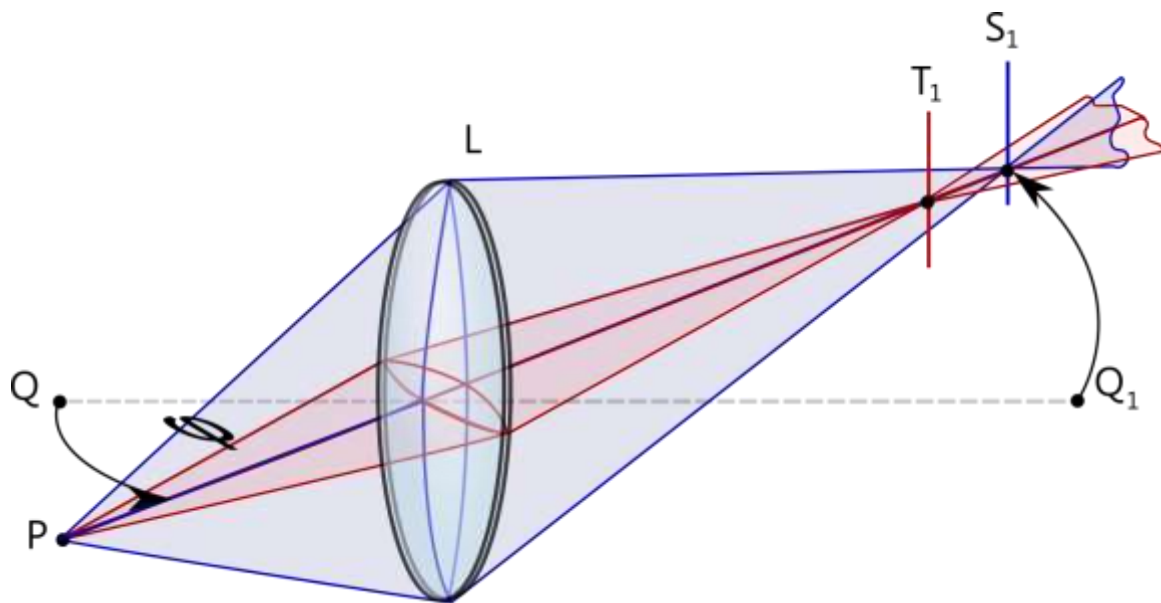
Astigmatismus je obvykle spojován s oční vadou, kde tvar čočky a tedy její ohnisková vzdálenost je v různých osách různá. U oka je tomu obvykle tak, že deformace je realizována jen v jedné ose, na kterou se pak musí nasadit příslušná korekce. Děje se tak použitím válcové čočky. Válcová čočka je taková čočka, která mění ohnisko jen v jediném směru a ano, lze si ji představit jako skleněný válec. Ten je v jedné ose opticky rovný, v ose na ni kolmé je pak sférický a má tedy spojné ohnisko. (Je možné mít i záporný astigmatismus a tedy pak je také použita válcová čočka, ale nemá tvar válce, ale tvar inverzní – tedy v jedné ose dává záporné ohnisko a tvoří tedy rozptylku).

Ve fotografické a filmové optice nás tento typ astigmatismu příliš zajímat nebude, jelikož očekáváme alespoň základní kvalitu optických systémů, které nebudou cylindrickou čočku vyžadovat. Avšak jinak tomu bude v situaci, kdy astigmatickou vadu využijeme ku prospěchu a vytvoříme anamorfní obraz. Mezi astigmatické vady můžeme také zařadit situaci, kdy jsou optické členy špatně zarovnány. Pak se paprsky v různých směrech a osách zobrazují s posunutým ohniskem a vytvářejí také vadu podobnou astigmatismu.

Skutečný fotografický astigmatismus souvisí s problémem zobrazování šikmých paprskových svazků. Při dopadu je účinný průměr kulové plochy různý pro paprsky v ose meridiální (poledníkové, nebo tangenciální) a jiný pro paprsky dopadající ve směru sagitálním (rovnoběžkovém). Z toho důvodu je ohnisková vzdálenost pro obě roviny takových řezů různá. Důsledkem toho je, že nelze přímky v jednom směru důsledně zaostřit zároveň s přímkami ve směru na ně kolmém.

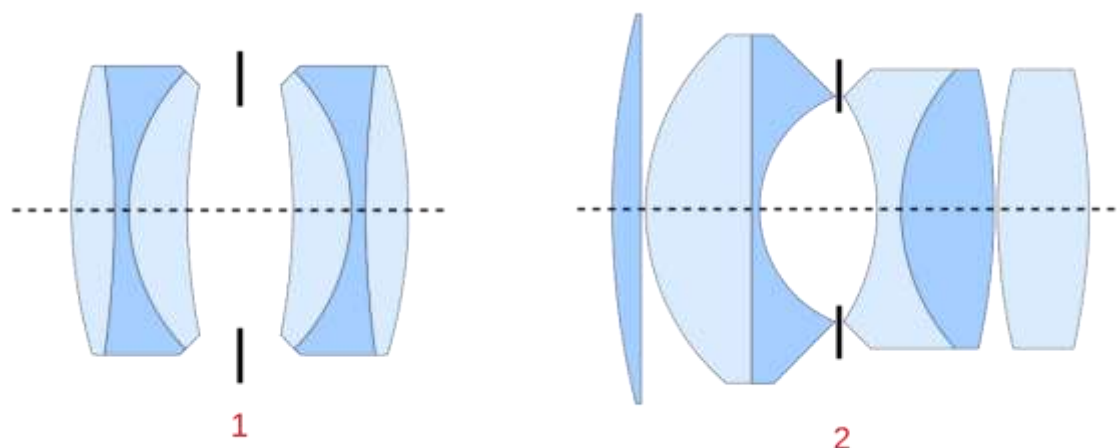


Obrázek 3-6: Vlevo meridiální (neboli poledníkové či tangenciální) roviny a vpravo sagitální (neboli rovnoběžkové) roviny.



Obrázek 3-7: Astigmatismus. Paprsky v sagitálním řezu se protínají v bodě S1, paprsky v meridiálním řezu v bodě T1.

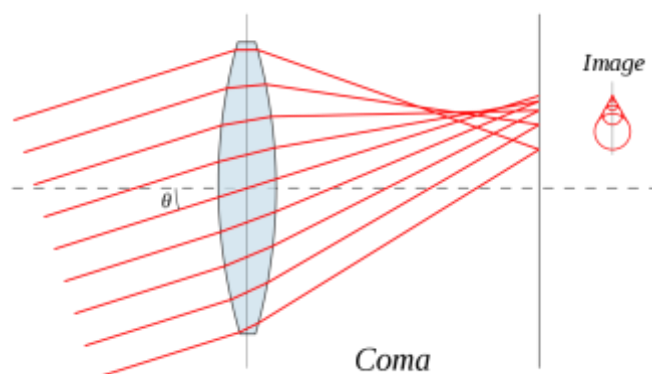
Astigmatismus je možno korigovat vhodnou kombinací optických členů různé křivosti a optické mohutnosti. Optická soustava, která je prosta astigmatismu se nazývá anastigmat. Prvním takovým objektivem byl Protar vyrobený Carl Zeissem již v roce 1890.



Obrázek 3-8: Dvě varianty historických anastigmatických objektivů. Doppel Anastigmat Series III neboli Dagor z roku 1904 který je symetrickým objektivem. Vedle něj pak novější (1920) nesymetrický anastigmat Taylor, Taylor & Hobson Co-oke Amotal Anastigmat. (autor: Panther @ Wikimedia CC BY-SA 3.0)

3.1.6 KOMA

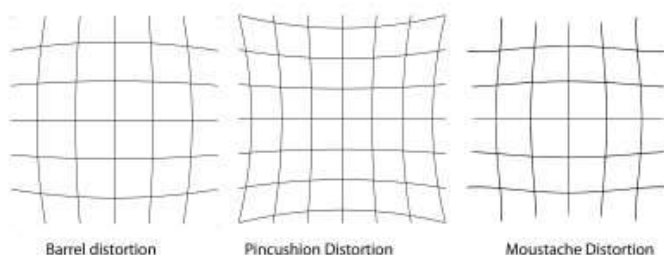
Také koma již byla zmíněna, a to v případě zobrazení parabolickým zrcadlem. I zde se jedná o vadu šikmých paprskových svazků. Zatímco u astigmatizmu se jednalo o vadu úzkých paprsků procházejících šikmo čočkou, tentokrát jde o svazek široký. Název *koma* vychází z historického pojmenování připodobněného ke kometě, jelikož rozptylový kroužek je ve skutečnosti složen z několika kroužků postupně se zmenšujícím směrem k okraji zorného pole. Vzniká tak, že paprsky přicházející sice rovnoběžně spolu, avšak pod úhlem vzhledem k optické ose, se nezobrazí na jediný bod, ale v ohnisku také šikmo. V ohniskové rovině se tak velikosti rozptylových kroužků pro jednotlivé zóny budou zvětšovat směrem k optické ose.



Obrázek 3-9: Vznik komy jako vady šikmých paprskových svazků.

3.1.7 ZKRESLENÍ

Zatím jsme řešili problém zobrazení do ohniska. Ovšem nyní se jedná o vadu způsobenou korektním umístěním v ohniskové rovině. Jenže i v této rovině může dojít k posunu zobrazení, a to buď směrem od osy, nebo k ose. Pokud dojde k posunu zobrazení obrazových bodů směrem od osy, vzniká soudkovité zkreslení. Pokud dojde k posunutí směrem k ose, pak vzniká zkreslení poduškovité. Nežřídkou může dojít také ke kombinovanému zkreslení, kdy obraz v určitých zónách blízko osy tvoří obraz soudkovitý, který směrem od osy přechází na obraz poduškovitý, říká se mu knírovité zkreslení.



Obrázek 3-10: Vlevo soudkovité, uprostřed poduškovité a vpravo knírovité (kombinované) zkreslení.

Abychom pochopili princip této vady, je potřeba si uvědomit, že se jedná o vadu radiální. Nejlépe bychom tak mohli provést měření tím, že bychom fotografovali soustředné kružnice, u nichž bychom měřili jejich radiální vzdálenost od optické osy.

Soudkovitost je typická pro zobrazení širokoúhlými objektivy a rybími oky, kde je prakticky nevyhnutelná. Obecně se zkreslení objevuje nejčastěji u objektivů s transfokátorem⁸. U něj dochází ke zkreslení díky tomu, že jsou mezi sebou navzájem posouvány minimálně dva optické systémy, výpočet takového uspořádání je velmi složitý a prakticky nejde uskutečnit bez nějakého vlivu na zkreslení, které se projevuje tím zřetelněji, čím větší je rozsah transfokátoru a čím více je tento rozsah posunut k širokému ohnisku. Klasický setový objektiv Canon 18-55 mm, f/4.0-5,6 je toho dobrým příkladem.

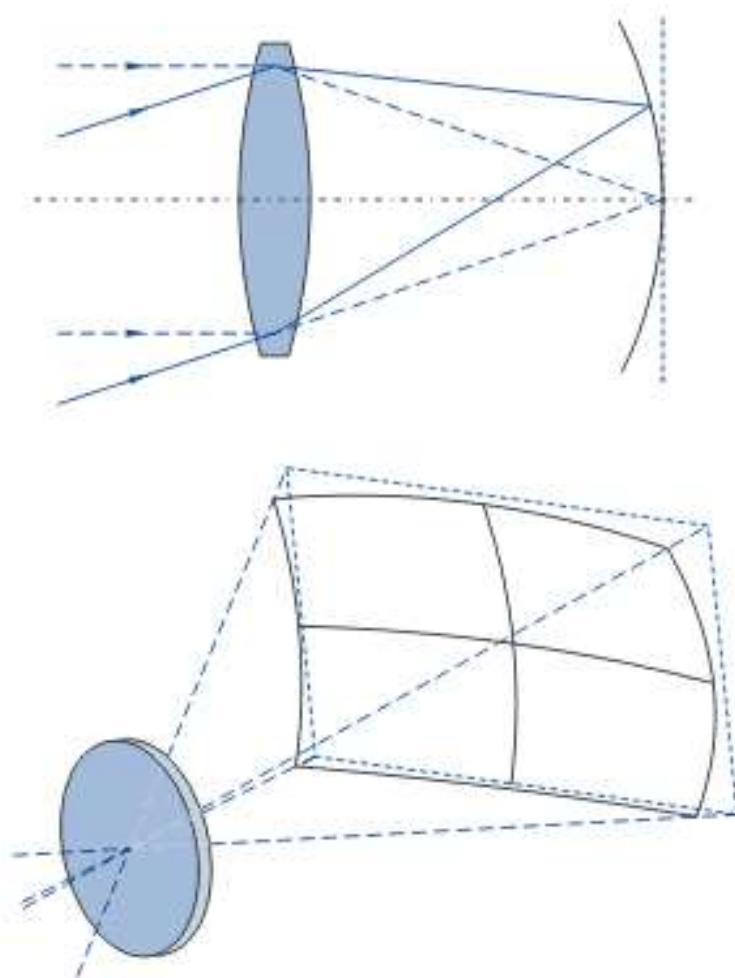


Samostatný úkol: Sežeňte si některý ze základních objektivů 18-55 mm libovolné značky, a nafoťte na třech ohniskových délkách (18 mm, 35 mm a 55 mm) testovací obrazec, který bude složen ze sítě pravoúhlých čar. Testovací obrazec narýsujte na tabuli alespoň o velikosti 1 m² nebo vytiskněte na papír velikosti A1 (popř. nalezněte vhodnou pravoúhlou strukturu v exteriéru). Porovnejte jednotlivé objektivy napříč stářími, výrobci či kvalitou.

⁸ Transfokátor = zoom objektiv

3.1.8 ZKLENUTÍ POLE

Je optickou vadou občas nazývanou po slovenském fyzikovi (maďarské národnosti) Josephu Petzvalovi. Způsobuje, že se jinak normálně plochý objekt (vzhledem k optické ose), aneb objekty v hypofokální vzdálenosti, promítnou jako objekty nikoliv na plochu rovnou a komou k optické ose, ale na plochu zaklenutou (zaoblenou). Tedy, že ohnisko bude pro různě vzdálené body od osy různé, bude se jeho poloha měnit v závislosti na radiální vzdálenosti od osy. Zklenutí je vada, kterou lze pouze minimalizovat. Zatímco teleobjektivy mají tuto vadu prakticky nepostřehnutelnou, hůře se koriguje u objektivů širokoúhlých. Možnou variantou by pro případ pevného objektivu se stálým zklenutím mohlo být použití zaobleného tvaru snímací plochy, což se však nedělá. Výjimku tvoří fotografické vědecké přístroje, například snímáče některých astronomických dalekohledů.



Obrázek 3-11: Zklenutí pole.

SHRNUTÍ KAPITOLY



Cílem kapitoly bylo seznámit studenty s druhy optických vad ve vztahu filmu a fotografií.

4 HISTORICKÝ VÝVOJ OBJEKTIVŮ



RYCHLÝ NÁHLED KAPITOLY

Studenti pochopí podstatu a skladbu dnešních objektivů na principu postupné historické exkurze, skrze kterou byly vyvíjeny jednotlivé objektivy a do dnešních dnů.



CÍLE KAPITOLY

Cílem kapitoly je seznámit studenty s podstatou a skladbou dnešních objektivů na principu postupné historické exkurze, skrze kterou byly vyvíjeny jednotlivé objektivy a do dnešních dnů.



ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU

4 vyučovací hodiny



KLÍČOVÁ SLOVA KAPITOLY

objektivy, zobrazení

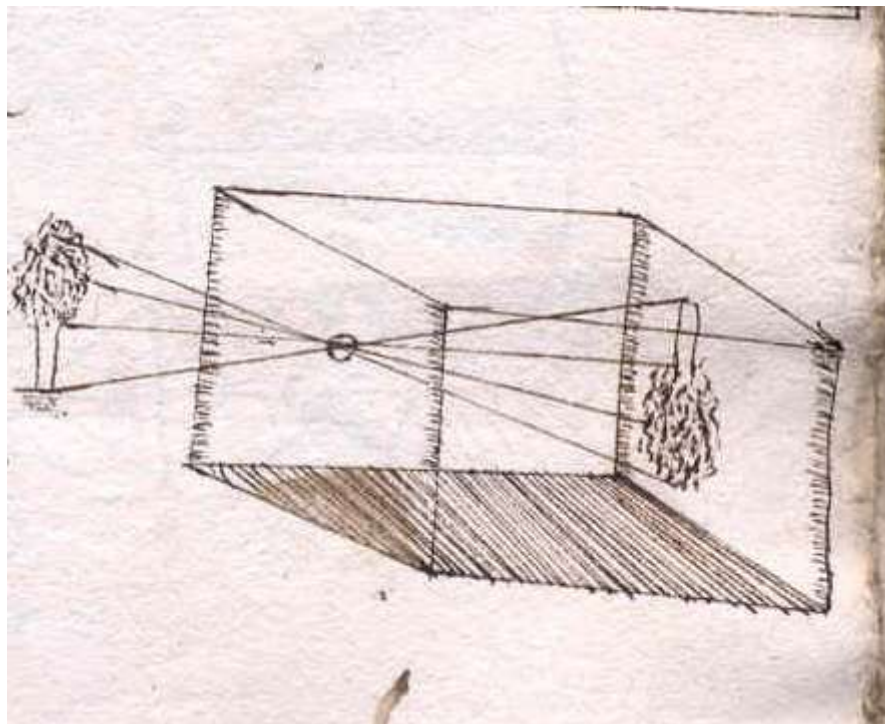
4.1 Proč do historie?

Jak jsme si mohli povšimnout v předchozích kapitolách, obyčejné zobrazení sponou čočkou nepřináší vůbec kvalitní obraz. Čočky i zrcadla jsou zatížena vadami, která musíme kompenzovat, což je možné jejich kombinací (ať už pořadím, typem, či vzájemnými vzdálenostmi), měněním křivosti jednotlivých ploch, volbou optického skla, tloušťkou elementů, apod. Provést zkratku k vysvětlení principu moderního objektivu, ideálně transformátorového by čtenáři nepřineslo pražádnou pomoc. Něco by mezi moderním objektivem a poznáním základních elementů chybělo. A tím je vývoj. Vývoj optiky pro fotografii je totiž přenádherným exkurzem do principů a způsobů a důvodů konstrukce toho-kterého

dnešního objektivu. Začneme tedy od těch nejprostších a nultou podkapitolu (bohužel tato projektová šablona neumožňuje tvorbu nulté podkapitoly) budeme věnovat dírkové komoře, avšak jen krátce a stručně.

4.2 Dírková komora

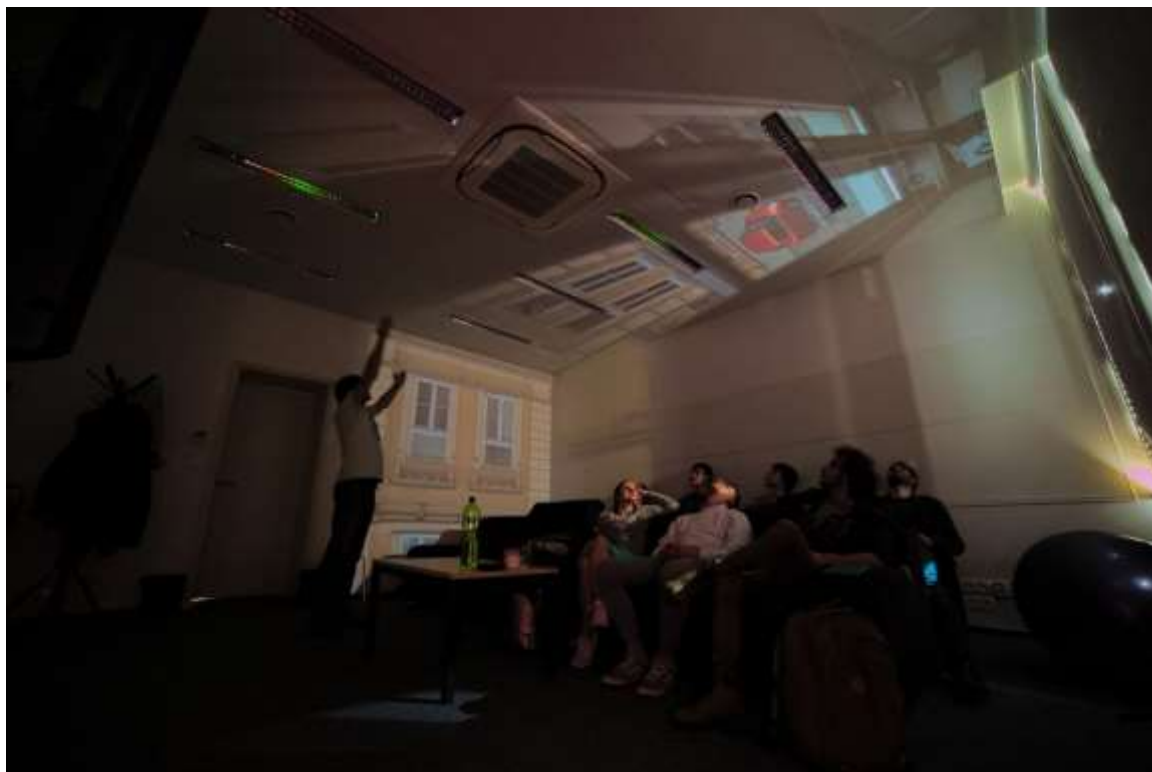
Je nejjednodušším optickým zobrazením fungujícím na principu funkce přímočarého šíření světla. Máme světlotěsnou krabici s dírkou na jedné straně a světlocitlivou vrstvou na protější straně dírky. Světlo z předmětu dopadající na malou díрку v uzavřené krabici se zastaví všude, kromě dírky, kterou pokrčuje přímočaře dovnitř krabice na protější stěnu. Na místě kam dopadne, se promítne ploška zobrazující předmět v podobě rozptylového kroužku, který je přímo úměrný velikosti dírky a vzdálenosti dírky od plochy. Každý bod z předmětové plochy, kterou snímáme, tak má svůj rozptylový kroužek.



Obrázek 4-1: Camera obscura v manuskriptu Principia Optices, 17. století.

Dírková komora (nebo latinsky camera obscura) tedy vytváří obraz, který je stranově i vrcholově převrácený, protože paprsky vždy v tomto tzv. lineárním perspektivním zobrazení překříží optickou osu, kterou je právě dírka. Jelikož je rozptylový kroužek závislý pouze na velikosti dírky a vzdálenosti obrazové roviny (tedy vzdálenosti dírky a plochy, na kterou zachytáváme obraz) má dírková komora nekonečnou hloubku ostrosti. Obraz je stejně zaostřený pro předměty ležící těsně u dírky jako v nekonečnu. Z principu lineárního zobrazení si také můžete snadno náčrtkem ověřit, že všechny vertikální linie se zobrazí rovnoběžně a vertikální a všechny rovnoběžky rovnoběžné i s obrazovou rovinou se zobrazí rovnoběžně. Pokud nejsou rovnoběžné s obrazovou rovinou, pak se zobrazí jako úběžníky, které se protnou v bodech vymizení (viz. body perspektivy).

První dírkovou komoru vytvořil Leonardo da Vinci a dodnes je oblíbenou fotografickou kratochvílí. Pokud si chcete vyzkoušet vyrobit dírkovou komoru, popřípadě se o ní dozvědět více, nahlédněte na stránky www.pinhole.cz



Obrázek 4-2: Camera obscura vytvořená na Slezské univerzitě v Opavě na oboru Multimediální techniky pomocí dírky o velikosti 1 cm^2 v zatemňovací roletě.

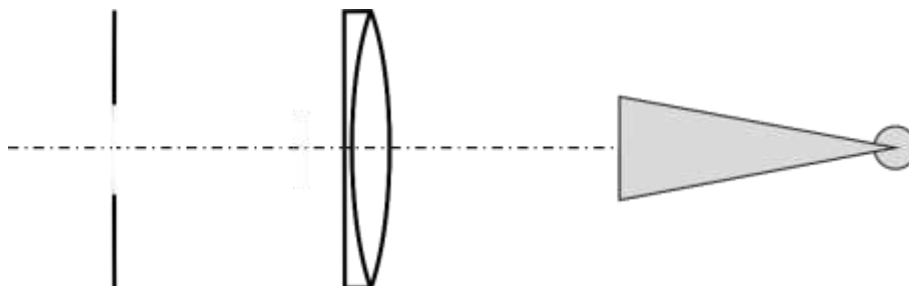
4.3 První fotografické objektivy

První fotografické experimenty, které prováděli Thomas Wedgwood, Nicéphore Niépce, Henry Fox Talbot nebo Louis Daguerre se uskutečňovali na přístrojích vybavených obyčejnou spojnou čočkou. Vzhledem k tomu, že jako světlocitlivé desky byly používány opravdu velkoformátové desky (Pohled z okna v Le Gras měl $20 \times 25 \text{ cm}$), trpěly samozřejmě obrazy zásadními vadami. Nejzřetelněji se projevovalo zklenutí pole, otvorová vada a axiální barevná vada. Barevná vada se u jinak černobílých desek projevovala, protože zatímco fotografové ostřili na maximum žlutozelené barvy vnímané okem, tedy na vlnové délky, kde mělo maximum denní světlo, fotografické emulze byla citlivá nejvíce na modrou barvu, která se u spojky láme nejvíce. Bylo tedy obtížné zaostřit.

4.3.1 CHEVALIERŮV ACHROMÁT

Tak spojnou čočku rychle nahradil nový optický systém, který pro Niépceho i Daguerra vyrobil francouzský optik Charles Chevalier v roce 1839. V podstatě se jednalo o něco, co tady již bylo dlouho, tedy achromatický objektiv (složený ze spojky z korunového skla a

rozptylky ze skla flintového) používaný v dalekohledech. Pro účely fotografie byl ale otočen a byla mu předřazena clona. Tím se získal obraz s menším zklenutím a úpravou taky přiblížil Chevalier modrou do ohniska žlutozelené barvy, avšak trpěl silnou sférickou vadou a tak musel být výrazně cloněn. Díky tomu, že měl malé zorné pole a vysoké clonové číslo dostal název Landscape, později u nás Frontar, podle německého výrobce.



Obrázek 4-3: Achromatický dublet otočený rozptylkou směrem k předmětu. tzv. krajinářský objektiv. Vyznačoval se malou světelností a malým zorným polem (na obrázku názorně napravo).

4.3.2 PETZVALŮV PORTRÉTNÍ

Protože krajinářský objektiv Chevaliera měl vysokou clonu, vyhlásila Francouzská společnost pro podporu národního průmyslu v roce 1840 soutěž o „rychlejší“ sklo, jak se přezdívá objektivům s menšími clonovými čísly. Tu vyhrál slovenský matematik a fyzik Joseph Petzval. Nebyl sice optik, ale měl za sebou slušný tým výpočtářů, kteří mu dopomohli k tzv. Petzvalovu portrétnímu sklu. Objektiv měl čtyři čočky ve dvou skupinách. První byl tmelený achromát (správně orientovaný), pak byla umístěna clona a za ní vzdušnou mezerou oddělený dublet rozptylky a spojky. Objektiv měl světelnost $f/3,6$ a umožňoval s ehdy dostupnou daguerrotypii venkovní expozice kolem minuty. S tím, jak přišel mokřý koloidový proces tak byl možno dosáhnout interiérových snímků kolem minuty. (Petzval bohužel vzhledem k francouzskému nacionalizmu soutěž nevyhrál)

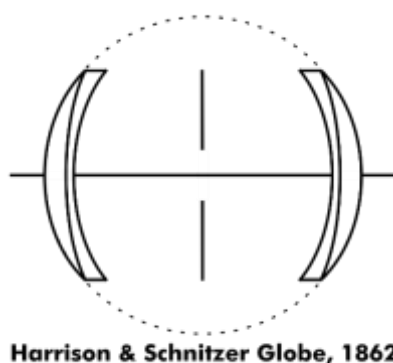


Petzval Portrait, 1840

Obrázek 4-4: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0)

4.3.3 PERISKOP

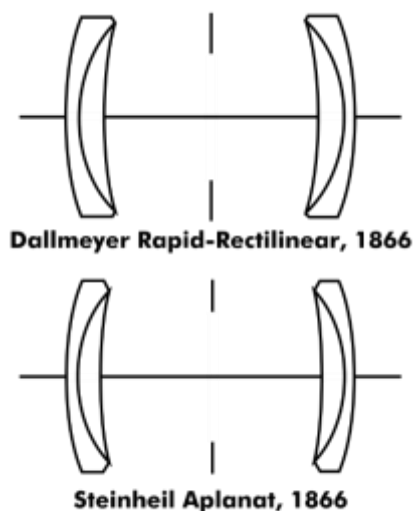
Pokus o překonání bariér optických vad, především zkreslení, které také provázelo první achromatický, a především získání širšího ohniska přivedlo první optické konstruktéry k myšlence symetrického objektivu. Symetrické osazení čoček kolem osy má za následek, že některé vady vznikající na čočce první jsou na druhé straně obráceně umístěnou čočkou kompenzovány. To se týká právě zkreslení, ale také zklenutí a částečně komy. Barevná vada polohy ale zůstává nekompenzována, pokud jsou použity pouze dvě dutovypuklé spojky v symetrickém osazení (tzv. periskop). Ovšem rychlého řešení se dostalo s osazením symetrického objektivu dvěma tmelenými achromatickými dublety. Konstrukce kolem kruhu přinesla americké firmě Harrison & Schnitzer Globe v roce 1862 prvenství v širokoúhlých objektivěch a světlo světa spatřil Globe (80°), avšak jeho clonění muselo být minimálně $f/16$, spíše $f/30$.



Obrázek 4-5: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0)

4.3.4 APLANÁTY

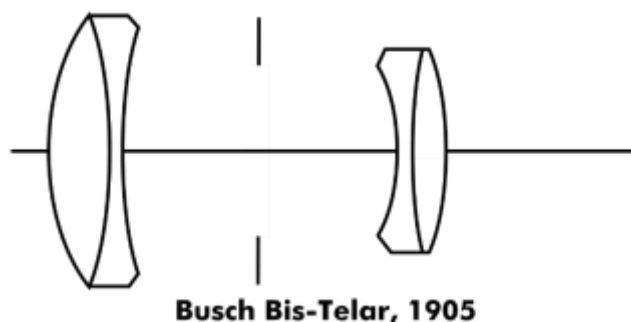
Symetrie nicméně přinesla v kombinaci achromátů korekci zkreslení, komy a barevných vad a objektivy tohoto typu se rozšířili pod názvy aplanát. Dosahovaly světelnosti $f/8$. Jejich vývoj byl tak překotný, že například nezávisle na sobě přišel se stejným optickým řešením John Dallmayer a Adolph Steinheil (1866). Tyto objektivy korigovaly na únosnou úroveň všechny vady krom zklenutí a kulové vady a staly se tak nedílnou výbavou fotografů celého 19. století.



Obrázek 4-6: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0)

4.3.5 PRVNÍ TELEOBJEKTIVY

Požadavek na dlouhá ohniska ke konci 19. století expandoval také na požadavek rozumné konstrukční délky. Ten přinesl výpočet s posunutou hlavní obrazovou rovinou, resp. její vysunutí před objektiv. Toho se podařilo docílit u objektivů typu Telexenar nebo Busch Bis-Telar. Přední člen je silně konvexní (spojný) a druhý je rozptylný achromát. Do té doby pokusy o teleobjektivy sice přinášely funkční skla, avšak pro nesoulad v korekcích prvních a druhých párů fungoval zadní rozptylný člen jako zvětšovací přístroj na všechny optické vady.



Obrázek 4-7: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0)

4.3.6 ANASTIGMATY

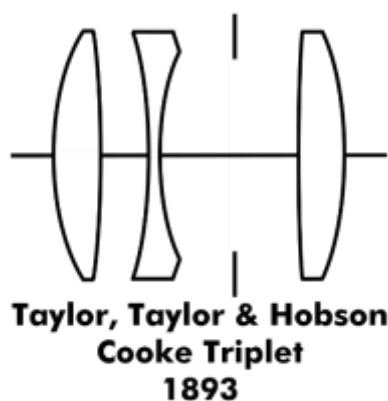
Objektivy anastigmatické se staly klíčovým prvkem vývoje na počátku 20. století. První přišel již v roce 1890 a stvořil jej ve firmě Carl Zeiss Jena německý fyzik Paul Rudolph

Protar. Dostal název Protar a dokázal korigovat mnoho optických vad včetně astigmatizmu, světelnost dosahoval až $f/4,5$ a měl již proměnnou lamelovou clonu až po $f/18$. Jeho skvělé výsledky by ale nebyly možné, bez použití čerstvě vyvinutého bariového korunového skla, které vynalezli Ernst Abbe a Otto Schott. Právě tyto nové Schottovy skla měly vysoký index lomu oproti dosud používaných sodno-vápenatých skel, ale zachovávali si stejnou disperzi. V podstatě všechny lepší objektivy po roce 1930 vykazovali vlastnosti anastigmatu.

4.3.7 TRIPLETY

Anglický šéfkonstruktor Denis Taylor přišel v roce 1893 se velmi jednoduchým tripletem, který se nazval Cooke triplet, podle firmy T. Cooke & sons, ve které Taylor pracoval. Vnější čočky byl tvořeny silně spojnými členy z korunového skla, prostřední člen z flintového skla byl silnou rozptylkou. Genialita sestavy spočívala v tom, že optická mohutnost prostředního záporného členu byla stejná jako součet mohutností vnějších spojek, přesto byl objektiv schopen vytvořit sbíhavé paprsky do ohniska. To proto, že paprsky z prvního členu dopadaly na prostřední rozptylku, která byla umístěna blízko ohniska první čočky. Křivost se pak vykompenzovala díky tomu, že je dána součtem dioptrií. Ale to neplatí pro výslednou ohniskovou vzdálenost. Díky tomuto uspořádání bylo dosaženo rovného pole, světelnosti $f/3,5$ (později až 2,8) a stal se tak klíčovým objektivem 20. století.

Cooke triplet se stal základem konstrukce prakticky všech moderních objektivů, dokonce je stále využíván (s použitím asférických a fluoritových členů) v mnoha objektivěch levnějších mobilních telefonů.



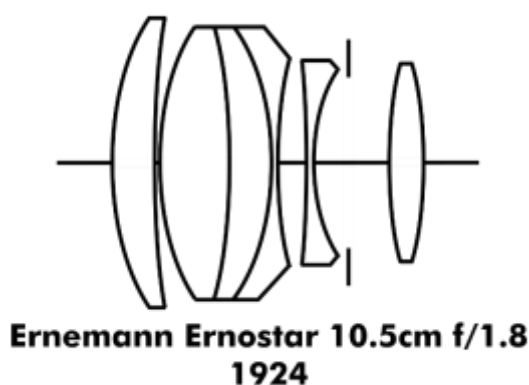
Obrázek 4-8: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0)

4.3.8 TESSAR

Legendárním objektivem se stal v cyklu vývoje Tessar vyvinutý Paulem Rudolphem, autorem Protaru. Nechal se očividně inspirovat u Cooke tripletu a jeho kus s původní světelností $f/6,3$ se postupně do roku 1930 zlepšoval až na hodnotu $f/2,8$. Nicméně se stal velmi běžným objektivem 20. století, který na tu dobu poskytoval vysoký standard v oblasti středních ohnisek (a tedy normální perspektivy).

4.3.9 SONNAR

S tím jak bylo dosaženo u většiny objektivů anastigmatismu, přišel na řadu boj o dosažení rychlého anastigmatu. Jako první se objevil díky německému optikovi Ludwigu Bertelemu Ernemann Ernostar v roce 1924 vyladěná při 105 mm na $f/1,8$. A také Ernostar byl odvozeninou Cooke tripletu, typické pro něj ale bylo, že měl jednu spojnou čočku předsazenou celému systému. Tento objektiv je spojen například s významným novinářem Erichem Salomonem, který se i díky novému rychlému objektivu stal průkopníkem moderní fotožurnalistiky.



Obrázek 4-9: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0)

Bertele obětoval dalších deset let zlepšování Ernostaru, aniž si téměř všiml, že firmu Ernemann, ve které pracoval, pohltit Zeiss-Jena. V roce 1926 pak již pod značkou Zeisse vydává další legendu světové fotografické optiky Zeiss Sonar 50 mm $f/1,5$ určenou pro 35 mm fotoaparát Contax I. Díky přednímu spojnému členu se Sonnar častěji vyskytuje jako teleobjektiv nebo mírný teleobjektiv. Legendární se tak stal například v roce 1936 Zeiss Olympia Sonnar 180mm $f/2,8$ postavený pro fotoaparát Contax II.

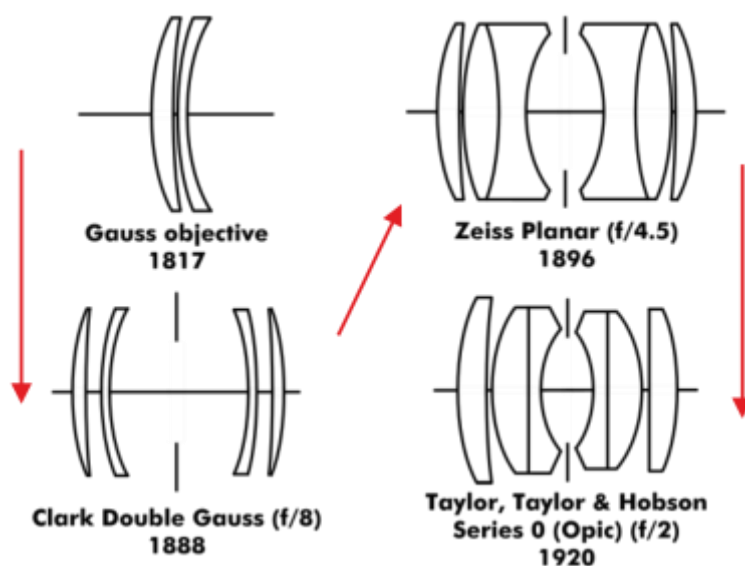


Zeiss Sonnar 50mm f/1.5, 1932

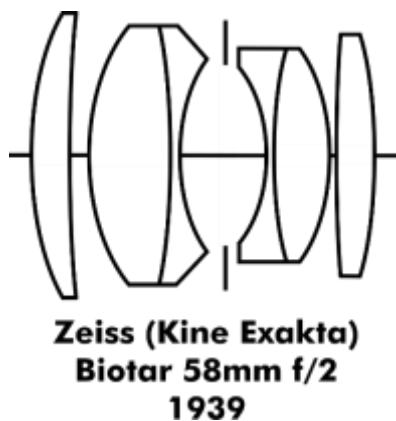
Obrázek 4-10: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0)

4.3.10 (DVOJITÝ) GAUSSŮV OBJEKTIV

Pokud se nějaký objektiv stal naprostým fenoménem bez konkurence do dnešních dnů, je jím objektiv Gaussova typu. Na počátku byl achromatický objektiv dalekohledu složený ze dvou čoček, který sestavil Carl Friedrich Gauss jako vylepšení Fraunhoferova Achromatického objektivu. Alvan Clark a Bausch & Lomb dále zdokonalili design v roce 1888 tím, tento objektiv zdvojili a druhý element otočili symetricky zády, čímž vznikl „dvojitý Gaussův objektiv“. Když Paul Rudolph zesílil vnitřní rozptylky a později je dokonce změnil na tmelené dublety se stejným indexem lomu ale různou (1896) eliminoval velmi dobře barevné vady. Vznikla opět původní, symetrický, dvojitý Gausův dublet Zeiss Planar s f/4,5. Angličan Horace William Lee z Taylor, Taylor & Hobson přidal mírnou asymetrii a vytvořil Lee Opic, f/2 objektiv (1920). Tento objektiv sice nebyl komerčně úspěšný, ale stal se předchůdcem všech moderních objektivů (dvojitých) Gaussova typu, včetně objektivu Zeiss Biotar.



Obrázek 4-11: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0)



Obrázek 4-12: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0)

Biotar byl dalším evolučním stupněm, který jako první vznikl pro potřeby filmu v roce 1927 jako Biotar 50 mm f/1,4 a později pro fotografii, konkrétně pro první (SLR) zrcadlovku Kine Exakta v roce 1936: 58 mm, f/2. Tento design následně kopírovali například Sověti s u nás jediným dostupným a legendárním objektivem Helios-44 (58 mm, f/2). Objektivy Gaussova typu měly následně klíčový vliv a bouřilvý vývoj napříč fotografickou i filmovou optikou.

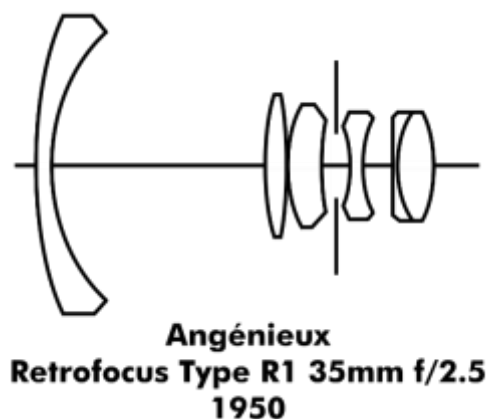
Tento design tedy nezestárl a je používán dodnes pro velmi levné, světlé a přitom na svou cenu extrémně kvalitní Canon EF 50mm f/1.8 nebo Nikorr 50 mm f/1.8D. Ano vyrábí se s různými nepatrnými úpravami a vylepšeními dodnes. I když jeho nízká cena mnoho začínajících fotografů a kameramanů odradí, není zřejmě v kategorii do 20 tis. Kč žádné konkurence a měl by být začínajícím autorům doslova nucen pod pohružkou násilí, namísto zažitých setových objektivů typu 18-55 .

4.3.11 ŠIROKOUHLÉ OBJEKTIVY

Širokoúhlé objektivy se vyznačují širokým zorným polem a tedy krátkou ohniskovou vzdáleností, obvykle je jejich ohnisková vzdálenost kratší než diagonální průměr záznamového média. S tím vyvstává potřeba změnit konstrukci objektivu tak, aby se hlavní obrazová rovina nacházela dostatečně hluboko v obrazovém prostoru a paprsky tak mohly dopadnout na snímač nebo světlocitlivou vrstvu. V podstatě máme dvě možnosti jak toho dosáhnout. Buďto použít konstrukcí odvozených od základních řad objektivů u nichž je pouze zajištěna krátká ohnisková vzdálenost a velkého zorného úhlu je dosaženo na úkor světelnosti. Druhá možnost je dnes vývojově lepší, jde o objektivy konstruované jako převrácené teleobjektiv. Vstupní čočka má zápornou mohutnost a je obvykle vypuklodutá a druhý člen je v podstatě normální objektiv. Tím se dosahuje posunu hlavní roviny dovnitř systému.

První takovým objektivem byl Taylor, Taylor & Hobson 35 mm f/2 (1931) určený pro první plnobarevnou Technicolor filmovou kameru (byl za objektivem potřeba prostor pro hranol dělící paprsky pro jednotlivé barvy na tři negativní filmové pásy).

Fotografové se dočkaly až s příchodem chráněného „retroohniskového“ objektivu, kterým byl francouzský Angénieux Retrofocus Type R1 35 mm f/2.5. A vyjma přední rozptylky byl jinak pětičočkovým Tessarem. Mimochodem název retroohniskový objektiv byl pod ochranou právě dlouhé roky u Angénieux, a tak se právě vžil pojem převráceného teleobjektivu, jako obecného názvu ro tyto typy objektivů.



Obrázek 4-13: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0)

Retroohniskové objektivy zasáhly i konstrukce jinak nepřilíš širokoúhlých objektivů jelikož obzvláště u jednookých zrcadlovek (SLR) bylo třeba se vypořádat s hloubkou šachty pro sklopné zrcátko, což přidávalo požadavek na min. 40 mm prostoru navíc.

Mezi širokoúhlými objektivy, později vyvíjenými, vyniká jeden více než ostatní. Je jím Nikkor 13 mm f/5.6. Má totiž při takovémto ultra-širokoúhlém formátu pro 35 mm snímač v podstatě perfektní rektilineární zobrazení. Obsahuje 16 elementů ve 12 skupinách. Přední část je klasická širokoúhlá skupina, následuje clona a za ní je triplet typu Tessar pro klíčové korekce. Jedná se o extrémní verzi retroohniskového designu s posunem ohniska do obrazového prostoru na trojnásobek ohniskové vzdálenosti objektivu.



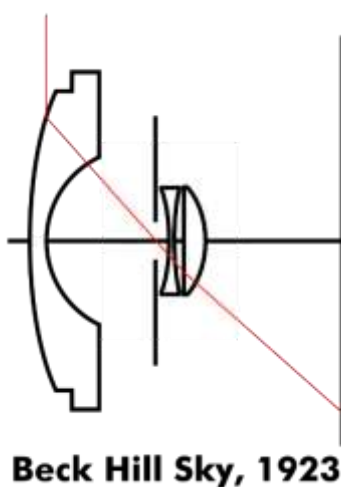
**Obrázek 4-14: Nikkor 13mm f/5.6 rektilineární objektiv.
(Dan Lindsay @ Wikipedia CC BY 3.0)**



**Obrázek 4-15: Rektilineární zobrazení u Nikkor 13mm f/5.6.
(Dan Lindsay @ Wikipedia CC BY 3.0)**

4.3.12 RYBÍ OKO

Extrémní část širokoúhlých objektivů zabírají objektivy typu rybí oko. Nikdo u nich nečeká například rektilinearitu, protože to z principu není možné. Většina objektivů typu rybí oko (fish eye) dokáže pokrýt zorné pole 180° , některé i více. Aby to bylo vůbec možné, je nutné konstruovat jako první člen objektivu silně vypukloutou rozptylku, která poskytne pro paprsky přicházející z okraje zorného pole ještě dostatek možností vstoupit do optického systému beze ztrát a zároveň paprsky usměrnit tak, aby do klíčového optického elementu vstupovaly pod přijatelným úhlem. Prvním takovým objektivem, který to dokázal, byl anglický Beck Hill Sky již v roce 1923. Určený byl nicméně pro meteorologické stereoskopické pozorování oblohy. Jeho ohnisková vzdálenost byla 21 mm a $f/8$, přičemž vykroužil kruhové zorné pole 180° o průměru 63 mm .



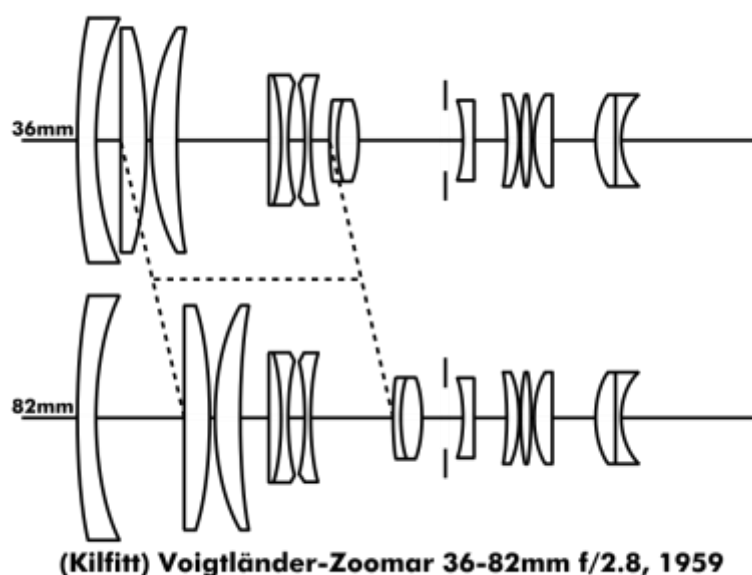
Obrázek 4-16: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0)

4.3.13 OBJEKTIVY TYPU ZOOM – TRANSFOKÁTORY

Objektivy s transfokátorem se vyvinuly z teleobjektivů. Posunem zadního členu se totiž mění zvětšení systému. Jenže tak jednoduchá cesta ke kvalitnímu zoomu nebyla. Na vzájemných vzdálenostech je závislá také korekce optických vad a především zkreslení. Opravdový transfokátorový objektiv je třeba doplnit o korekční člen, který bude kompenzovat změny při posunu systému. Tedy velmi zjednodušeně řečeno. Trvalo desítky let vývoje, než byl představen funkční a praktický zoom pro fotografické přístroje. Pro filmové kamery, které nevyžadovaly tak přesné zobrazení jako fotografické přístroje, byli první transfokátory uvedeny již v třicátých letech minulého století. Před nimi se ještě objevili sádkové objektivy, kde odstraněním nebo přidáním poloviny objektivu přibýlo nebo ubylo polovina ohniskové vzdálenosti.

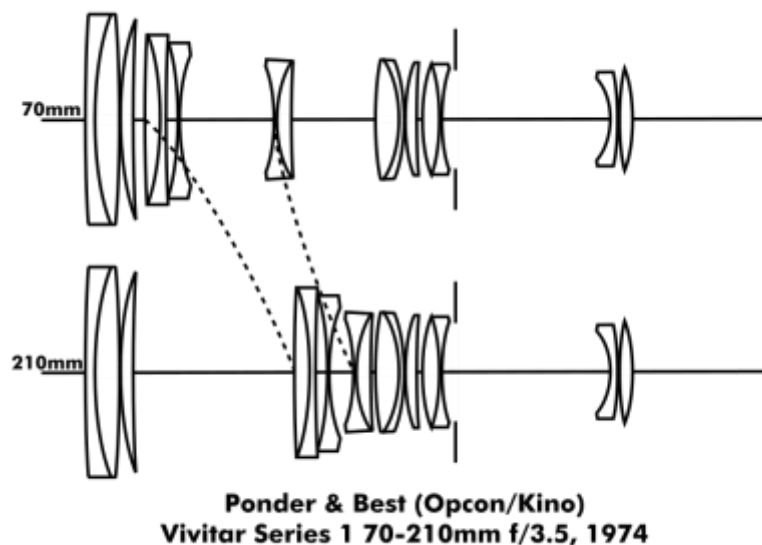
První fotografický ZOOM byl nejspíše Voigtländer-Zoomar 36-82mm f/2.8 v roce 1959. Jednalo se o americko-německou kooperaci. Design navrhla americká Zoomar a konstrukce byla svěřena západoněmeckému Voigtländeru. Objektiv byl ale velmi těžký a obrovský, průměr filtrového závitu byl 95 mm. Klíčovým vývojářem byl Franck Back, který byl doslova průkopníkem transfokátorů. Proslavil se například objektivem pro 16 mm kamery Zoomar 17-53 mm, f/2,9. Jenže tyto první zoom objektivy byly díky komplikovaným výpočtům spíše mizerné, počítání transfokátorů bylo prostě úlohou pro počítače, které toho byly schopny až v sedmdesátých letech.

Do té doby tedy byly transfokátory určeny pro televizní kamery anebo amatérské filmové kamery typu 8 mm a 16 mm. Pro fotografii nebyly zatím použitelné.



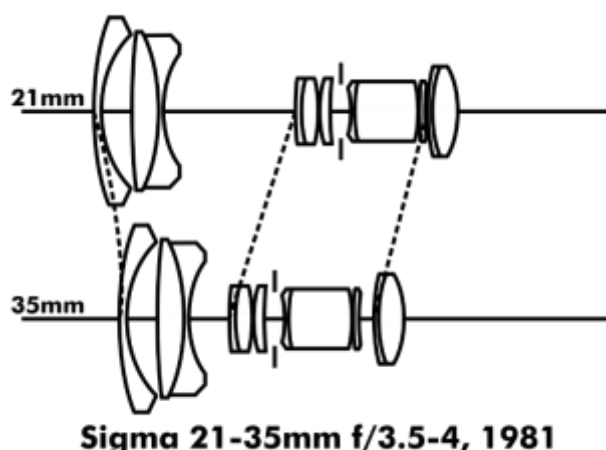
Obrázek 4-17: První transfokátor typický tím, že existuje jediný spárovaný posuvný člen. Bylo jasné, že další design se musí ubírat rozdělením členu na části, které budou zodpovědné za transfokaci a člen, který bude schopný korigovat lépe optické vady. (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0)

V roce 1974 přišel první, počítačem vypočítaný objektiv Vivitar Series 1 70-210 mm f/3.5 Macro Focusing Zoom. Jednalo se o americko-japonský projekt, který rozdělil vnitřní posuvný člen na dvě části. Konečně se rozhýbal transfokační člen a kompenzační člen samostatně.



Obrázek 4-18: Nový posun ve výpočtech na počítačích umožnil oddělení transfokačního a kompenzačního členu, které se pohybovali s ohledem na nastavené ohnisko závisle, ale rozdílně. (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0)

Vývoj pak postoupil rychle kupředu a prvním objektivem, který se začal prodávat základní objektiv byl japonský Fuji Fujinon-Z 43-75 mm f/3.5-4.5 na 35 mm fotoaparát Fujica AZ-1. Vznikly tak první náhrady za základní ohnisko 50 mm, kterým se říkalo supernormální rozsahy. V roce 1981 přišel první širokoúhlý zoom – japonská Sigma 21-35 mm f/3.5-4, který byl kombinací rektilineárního širokoúhlého objektivu, rektofokálního objektivu a transfokátorového objektivu. Takový výpočet prováděný jinak než počítačem si nikdo nedokázal ani představit a oříškem to bylo i pro tehdejší výpočetní techniku.



Obrázek 4-19: Hned tři pohybující se elementy byly průběžným kamenem tvorby širokoúhlých objektivů. (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0)

Stavba širokoúhlých zoom objektivů je dodnes nejnáročnější optickou výpočetní disciplínou. A se zmenšujícími se snímači v dnešní digitální době je obtížné a vlastně zatím i nemožné pro nejmenší čipy vytvořit dostatečně širokoúhlý transfokátorový objektiv. S příchodem MFT rozměrů a také s rozvojem miniaturních snímačů v mobilních telefonech je zatím extrémně komplikované vytvořit objektiv s polem větším než 90° a schopný alespoň trojnásobné změny ohniska.

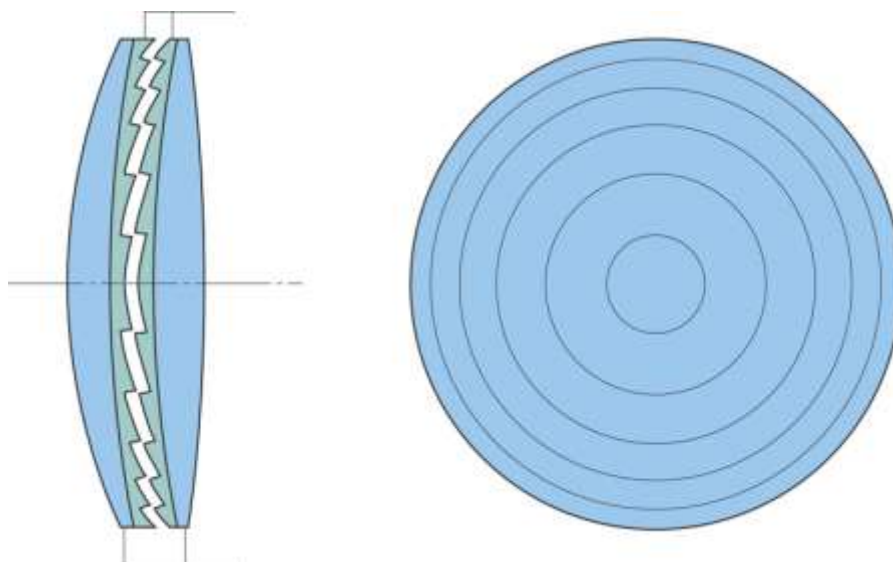
Velkou vypočetní zkouškou pak jsou zoom objektivy s rozsahem ohnisek větším než trojnásobek nejkratší ohniskové délky. V podstatě precizní optické korekce najdeme jen u objektivů vhodných pro filmové použití s omezením na fullHD, výjimečně na 4K rozlišení. Nejpokročilejší systémy poskytuje Angénieux s legendárními 25-250 anebo 44-440 *mm*. Určeny jsou ovšem pro 35 *mm* formáty s bezpečným vykroužením 31 *mm* kruhu. Objektivy s větším rozsahem určené pro fotografii zatím vždy trpí většími optickými vadami, než jejich kolegové se zoom rozsahem maximálně trojnásobným.

4.3.14 PARFOKÁLNÍ OBJEKTIVY

Pokud jsme zmínili zoom objektivy, bylo by vhodné upozornit, že ne každý transfokátorový objektiv je parfokální. Tedy, že při změně ohniska zůstane zaostřen. Takové výsostné postavení mají objektivy filmové, u který je tato funkce nutností (vyjma nejobyčejnějších čínských náhražek). Proto je dobré dávat při výběru vhodného objektivu, ať už při koupi nebo při rentalu, pozor na to, k čemu má být určen. U fotografování je to v podstatě jedno, nicméně u filmového použití je parfokální objektiv velmi usnadňující práci. Jednak v případě potřeby zaostřit, pak se hodí si objekt přiblížit a zaostřit a pak překomponovat na příslušné ohnisko, anebo při práci s transfokací během záběru.

4.3.15 BUDOUCNOST OBJEKTIVŮ

Vývoj objektivů se ubírá jednak vývojem nových nízkodisperzních skel a technikou levné výroby asférických členů. Mezi specifické typy asférických členů patří difrakční optika, která je nyní komplikovaná a nákladná, ovšem v rozumné době může přinést řešení mnoha optických výpočtových problémů, stejně jako otázku rozměrů objektivů. V roce 2001 byl například představen Canon EF 400 *mm* f/4 DO IS USM s difrakční optikou, která se vyznačuje podobným schématem jako má Fresnelova čočka. Díky precizní tvorbě je takto možno vytvořit člen se zápornou disperzí eliminující sférickou a barevnou vadu velmi kvalitně. Následoval ještě EF70-300 *mm* f/4.5-5.6 DO IS USM v roce 2004. Ovšem další se od té doby neobjevily.



Obrázek 4-20: Difraktivní optický člen v objektivě Canon. (Autor: Canon inc.)



SHRNUTÍ KAPITOLY

V kapitole byli studenti seznámeni s podstatou a skladbou dnešních objektivů na principu postupné historické exkurze, skrze kterou byly vyvíjeny jednotlivé objektivy a do dnešních dnů.

5 KVALITA OPTICKÉHO ZOBRAZENÍ

RYCHLÝ NÁHLED KAPITOLY



Hodnocení jakosti objektivů v dostupné podobě i pro posluchače.

CÍLE KAPITOLY



Cílem je seznámit studenty s možnostmi a způsoby hodnocení jakosti objektivů.

ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU



2 vyučovací hodiny

KLÍČOVÁ SLOVA KAPITOLY



objektivy, kvalita, hodnocení, jakost

5.1 Hodnocení jakosti a praktické vady

Lidský mozek nemá schopnost smyslově vnímat hodnoty a parametry (nejen) optických systémů lineárně. Je tedy neobjektivní. Neumíme objektivně odhadnout, o kolik víc světla je v místnosti, o kolik EV upravit expozici aby odpovídala scéně, nad kterou zajde Slunce a neumíme ani odhadnout rozlišení objektivu či kontrast a kresbu.

Mnoho postupů pro kontrolu kvality objektivů (na které se zaměříme výhradně) nám vlastně nebudou k ničemu, protože oprava špatné optiky je dnes v podstatě bezpředmětná, nejedná-li se o velmi drahý kus. Můžeme je ale využít pro reklamaci zakoupeného skla anebo v případě možnosti, k výběru toho pravého.

Hodí se znát zobrazovací křivky v recenzích objektivů, stejně jako je vhodné si některé parametry po zakoupení ověřit. A nakonec se budeme věnovat také otázce, jak poznat některé vady vzniklé používáním objektivů.

5.2 Hodnotitelné vlastnosti objektivu

Mezi hodnocené a hodnotitelné vlastnosti patří světelnost, ohnisková vzdálenost, zorný úhel, rozlišovací schopnost, ostrost, sestavení, parazitní odrazy, ale najdu se jistě i další.

Zatímco světelnost, ohnisková vzdálenost a zorné pole je dána výrobcem, nebudeme se jí zabývat. Rozlišovací schopnost je sice výrobcem také dána, stejně tak jako můžeme důvěřovat v kvalitní sestavení, kde nebudou čočky posunuty nebo sklopeny jinak než bychom potřebovali. Přesto rozlišovací schopnost je parametr, který má smysl testovat. A sestavení a vycentrování je vhodné také podrobit alespoň základnímu testu, byť nikdy nemůžeme přesně zjistit, který člen, jak moc a z jakého důvodu není správně adjustován. Nicméně se může stát, že některé objektivy, obzvláště pofiderních anebo méně renomovaných výrobců, mohou vykazovat v jediné řadě objektivů značné kvalitativní rozdíly. A minimálně úroveň kvality je možno některými následujícími postupy rozpoznat a takový objektiv buďto nekupovat vůbec, anebo včas reklamovat.

Špatný kus ve výrobní sérii je velmi málo pravděpodobný u renomovaných výrobců, ovšem nedá se vyloučit zcela. Kupujete-li si tedy objektiv, popřípadě půjčujete-li si i velmi drahá skla pro účely důležitého natáčení, není od věci si sklo otestovat alespoň v základu. U nakupovaného objektivu je to zřejmé, chcete předejít výběru špatného kusu. U pronájemného je důvod taky prostý, technika, která prošla zástupy filmových štábů může být opotřebovaná nejen povrchově, ale i opticky, z důvodů pádů, nárazů a dalšího neodborného zacházení, které po běžné očištění nemusí jít vůbec vidět.

5.2.1 OSTROST A KONTRAST

Ostrost a kontrast je nejméně čitelný a nejvíce subjektivní bod testování. Ostrost chápeme jako rychlost změny jasů na zkoumaném rozhraní. Představme si ideální rozhraní černé a bílé. Maximální ostrost bude snímek pořízený příslušným objektivem tehdy, když po zvětšení na úroveň rozlišovací schopnosti nebude mezi černou a bílou patrný žádný přechod. Taková situace je hypotetická a takto ostře kreslící objektivy nemáme. Vždy se vyskytuje nějaký přechod a ten můžeme vyjádřit jako derivaci funkce takového přechodu v bodě, kde se má matematicky nacházet hrana.

Do hry s ostroty však vstupuje také kontrast, což je poměr rozdílu mezi jasem objektu a jasem pozadí k jasům tohoto pozadí. Při vysoké ostroty může být kontrast nízký. Tedy modelový přechod mezi černou a bílou nebude černý a bílý, ale například černá bude posunuta do tmavě šedé a bílá do světle šedé.

Aby to nebylo málo komplikované, můžeme také subjektivně zvýšit ostrost lokálním zvýšením kontrastu. Takový příklad vidíte níže. Kolem šedé spirály je na vnitřní straně přidán černý proužek o tloušťce 1 px a na vnější straně bílý proužek o tloušťce 1 px. Výsledek je kontrastnější, ale také subjektivně ostřejší obraz.

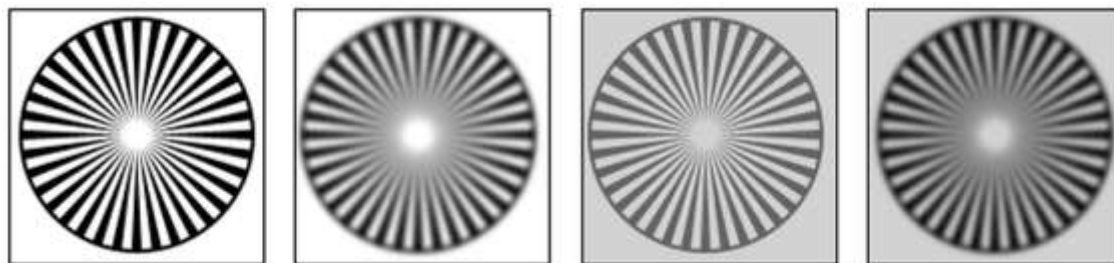


Obrázek 5-1: Lokální zvýšení kontrastu způsobí nejen kontrastnější snímek, ale při oddálení snímek také ostřejší.

Protože ostrost kresby do značné míry ovlivňuje rozlišovací schopnost objektivu, je možno ostrost hodnotit z testovacích obrazců zkoumáním vzorů pro měření rozlišení v počtech čar na milimetr. Pro základní orientaci a případné porovnání takovéto měření stačí.

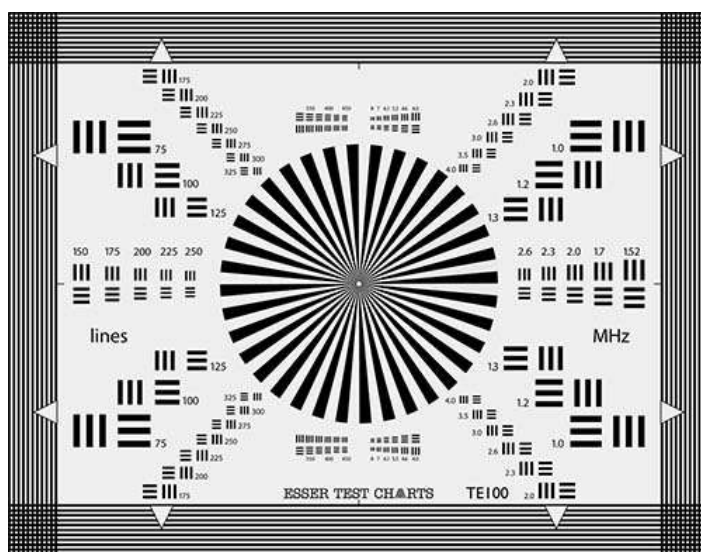
5.2.2 ROZLIŠOVACÍ SCHOPNOST

Rozlišovací schopnost je dána minimální vzdáleností dvou bodů, které je ještě schopna optika rozlišit. Zde je nutné si uvědomit, že objektiv má své omezení rozlišovací schopnosti, ale snímač (ať už čip nebo film) také. Při hodnocení rozlišovací schopnosti to tedy musíme mít na paměti, abychom s testovacím obrazcem nepřekonali rozlišení čipu anebo naopak. Většina objektivů je pro dané zařízení konstruována tak, aby jejich optická kvalita byla s rezervou větší, než záznamové médium. A to nejen co do rozlišení, ale také optických vad a hlavně rozsahu, ve kterém jsou ještě korigovány (efektivní zorné pole).



Obrázek 5-2: Vlevo – vysoký kontrast a vysoká ostrost. Druhý zleva – vysoký kontrast, nízká ostrost. Třetí zleva – nízký kontrast, vysoká ostrost. Vpravo – nízký kontrast a nízká ostrost.

Rozlišení objektivů se udává v počtu čar na milimetr a posuzuje se na obrazcích, které obsahují rovnoběžné čáry střídavě bílé a černé o stejné šířce. Různě veliké obrazce s různými průměry čar pak dávají možnost rozpoznat, zda pro ně ještě objektiv poskytuje dostatečné rozlišení, či nikoliv. Tyto obrazce se na testovací plochu umísťují jednak ke středu a jednak k rohům a jsou vždy orientovány minimálně ve směru meridiálním (kolmo na úhlopříčky) a sagitální (úhlopříčné). Rozlišení, jak víte z části věnované astigmatismu, se může právě vzhledem k různým rovinám lišit. Místo čtvercových obrazců je také možno používat o něco efektivnější Nutting-Jewellovy kružnice, což jsou čáry uspořádané do hvězdy. Výhodou je, že jsou čáry plynule přecházející a orientovány do všech směrů. Průměr již nerozlišitelného vnitřního kruhu informuje o velikosti rozlišení a případná nesymetrie o astigmatismu.



Obrázek 5-3: Testovací obrazce pro rozlišení a zkreslení TE 100.

5.2.3 VINĚTACE

Vinětace je ztmavení obrazu směrem k okrajům, kterou jsou postiženy všechny optické systémy, a nedá se jí zabránit. Můžeme ji vhodným způsobem pouze minimalizovat na únosnou mez. Vinětaci objektivu můžete zjistit snadným testem na mracích anebo na uniformně osvětleném pozadí. Druhá možnost je ale velmi komplikovaná, protože přesnost osvětlení plochy musí být velmi vysoká. Velmi dobré výsledky je ale možno dosáhnout pod zamračenou oblohou, kde nejsou vidět struktury mraků (tzv. mlíko), pokud vyfotíte snímek skrze testovaný objektiv zády ke směru, kde by se mělo nacházet Slunce, dostanete naprosto dostačující snímek pro zjištění vinětace. Nastavte expozici tak, aby byl histogram snímku uprostřed, foťte do RAW. Uniformní podmračená obloha poskytne šedý snímek, který můžete po vyvolání zesvětlit a následně pomocí nástroje na zvýšení kontrastu získáte dobrý přehled o tom, jak moc je obrázek směrem k okrajům tmavší.

5.2.4 BOKEH

Bokeh je charakter bodových zdrojů v neostrosti. Obvykle má bokeh tvar vstupní pupily, v případě zacloněného objektivu tvar clony. Pokud máte clonu lamelovou, bude její tvar odpovídat mnohoúhelníku adekvátně počtu lamel. Co je však o bokehu málo známé je skutečnost, že jeho charakter není dán jen okrajem snímku. Subjektivní charakter bokehu je ovlivňován ostrostí objektivu rozložením této ostrosti a kontrastu směrem k okrajům. Dnes neexistuje žádný nástroj, jak jej měřit, ale bývá často zmiňováno, že na tzv. MTF grafech sloužících pro testování objektivů se příjemnější bokeh vyskytuje u objektivů, která mají blízko sebe křivky meridiální a sagitální.

5.2.5 PARAZITNÍ ODRAZY

Jsou nemilou součástí fotografování v protisvětle. Měly by je eliminovat jak antireflexní vrstvy, tak korektní vyčernění objektivu. Ovšem zabránit se jim nedá. Obzvláště se stárnutím objektivu a opotřebením antireflexních vrstev popřípadě se špínou na objektivu přibývají. Testy jsou snadné, protisvětlo snímané pod různými úhly může přinést dobrou a objektivní informaci o existenci parazitních paprsků přicházejících na snímač. Doporučeno je, používat sluneční clonu.

5.2.6 VYCENTROVÁNÍ OBJEKTIVU

Špatně vycentrovaný objektiv samozřejmě neopravíte, nicméně usazení optických členů a průběh vady je možno získat také fotografií testovacího obrazce. Pokud se v zónách směrem od centra testovacího obrazce chovají jednotlivé testovací tvary odlišně, pak se dá očekávat, že objektiv není zcela přesně adjustován.

5.2.7 HODNOCENÍ KVALITY FILTRŮ

Také fotografické filtry je možno podrobit testování. Nemůžeme sice zkoumat kvalitu aplikované filtrovací/korekční vrstvy (popřípadě jen omezeně a v závislosti na typu filtru), ale co je pro kvalitu filtrů v prvním kroku podstatné, je kvalita planparalelní destičky. To lze odzkoušet i pouhým okem přesněji pak skrze dalekohled. Nakloněním filtru by totiž nemělo dojít k deformacím obrazu. Jakmile se obraz procházející skrze filtr začne vlnit popřípadě měnit poměry velikostí v obraze, nebude deska na horní a dolní ploše dostatečně rovnoběžná. Také kolmost na optickou osu, tedy adjustáž je vhodné pohlídat. Nemá sice vliv na zobrazení, ale může přinést do systému barevnou vadu.

5.2.8 ZKRESLENÍ

Zkreslení je typickou vlastností širokoúhlých objektivů a naprosto samozřejmou vlastností objektivů typu rybí oko. V obou případech očekáváme soudkovité zkreslení. Opačně,

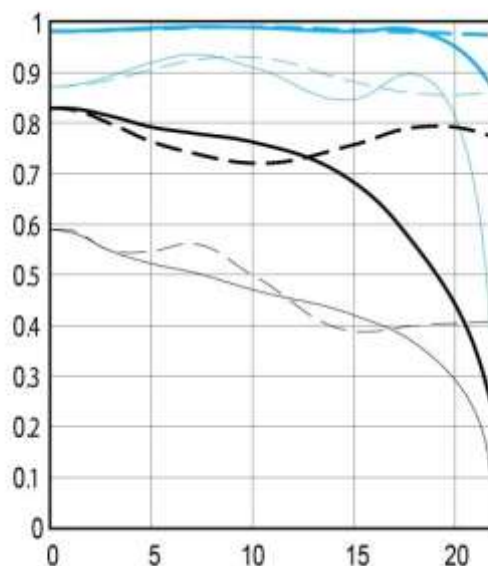
poduškovité se objevuje u středních a delších ohnisek a především u objektivů typu zoom. U nich právě zkreslení je nejkomplicovanějším bodem optických korekcí a výpočtů.

Kontrola zkreslení se provádí snadno. Postačí vyfotit pravouhlou mřížku umístěnou kolmo k fotoaparátu. Může to být klidně i plot, zeď z cihel. Povšimněte si, jak se u transfokátorových objektivů mění zkreslení zpravidla od soudkovitého v nejšířším ohnisku až po poduškovité při nejdelším ohnisku. Typické je to u levnějších objektivů setových (18—55 mm) a stejně tak u transfokátorových objektivů s většími ohniskovými rozsahy.

5.3 MTF křivky a hodnocení jakosti objektivů

Ve fotografii se pro hodnocení kresby objektivu používá graf tzv. MTF (modular transfer function). Jedná se o rozlišení objektivu v radiálním přenosu (tedy od středu k okrajům) pro sagitální a meridiální paprsky. A pro dvě hustoty čar. Přenos čar při hustotě 10 čar/mm definuje přenos kontrastu. Přenos čar o hustotě 30 čar/mm definuje přenos ostrosti nebo taky rozlišení. Graf má dvě osy, na svislé je kvalita přenosu od 0 do 100 %. Na vodorovné ose vynášíme vzdálenost od středu snímáče.

Všechny grafy mají nejlepší kresbu v centru a postupně k okrajům kvalita zobrazení klesá, nejen kvůli vinětaci, ale taky kvůli vlastně všem optickým vadám. Křivky přenosu se uvádí plná pro meridiální linie (rovnoběžně s úhlopříčkami) a přerušované pro sagitální linie (kolmo na úhlopříčku). Pokud je linií více, jsou obvykle rozlišeny tloušťkou nebo barvami a definují různé clonové čísla.



Obrázek 5-4: MTF křivka pro objektiv Canon EF 50 mm, f/1,8 STM. Modré čáry jsou pro clonu f/8, černé čáry pro plnou díru f/1,8. Povšimněte si vodorovné osy, zde stojí za připomenutí, že jde o vzdálenost od středu, tedy že APS-C formát končí kousek za 15 mm a FF formát sahá až na konec grafu.



Samostatný úkol: Dohleďte na internetu MTF křivky objektivů, které používáte, a interpretujte výsledky MTF ve vztahu k ostatní testovaným sklům. Vlastním i od kolegů.

SHRNUTÍ KAPITOLY



Studenti byli seznámeni s možnostmi a způsoby hodnocení jakosti objektivů.

LITERATURA

Seznam použité literatury. Rozšiřující literaturu uvádějte do textu v příslušných pasážích. Odkazy na povinnou literaturu uvádějte např. pomocí průvodce textu nebo jiného vhodného prvku zachovávejte však kontinuitu.

- M. Jiráček, *Fotografická optika*, Praha: Orbis, 1960.
- A. Szomolányi, *Základy kamerové tvorby*, Opava: Slezská univerzita v Opavě, 2015.
- A. Szomolányi, *Kamera! Běží...*, Praha: Citadella, 2016.

CITOVANÁ LITERATURA

- [1] „Wikiskripta, oko,“ Wikimedia foundation, [Online]. Available: [https://www.wikiskripta.eu/w/Oko_\(biofyzika\)](https://www.wikiskripta.eu/w/Oko_(biofyzika)). [Přístup získán 03 08 2019].
- [2] M. V. Jaroslav Reichl, „Enycklopedie fyziky,“ [Online]. Available: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/210-weber-fechneruv-psychofyzikalni-zakon>. [Přístup získán 11 03 2019].
- [3] A. Szomolányi, *Základy kamerové tvorby*, Opava: Slezská univerzita v Opavě, 2015.
- [4] A. Szomolányi, *Kamera! Běží...*, Praha: Citadella, 2016.
- [5] „Index Lomu,“ Wikimedia foundation, [Online]. Available: https://cs.wikipedia.org/wiki/Index_lomu. [Přístup získán 06 04 2019].
- [6] M. Jiráček, *Fotografická optika*, Praha: Orbis, 1960.
- [7] „Sklo,“ Wikipedia inc., [Online]. Available: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Sklo>. [Přístup získán 07 04 2019].
- [8] Wikiskripta, „Kompozice obrazu,“ [Online]. Available: https://cs.wikiversity.org/wiki/Kompozice_obrazu. [Přístup získán 01 01 2019].
- [9] „Wikipedie - Daguerrotypie,“ Wikimedia Foundation, Inc., [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Daguerreotype>. [Přístup získán 14 01 2019].
- [10] A. Šnajdrová, *Lineární perspektiva ve výtvarném umění. Náměty pro mezioborovou výuku geometrie a výtvarné výchovy na základní škole.*, Brno: Masarykova univerzita v Brně, 2014.
- [11] „Fraunhoferovy čáry,“ Wikipedia inc., [Online]. Available: https://cs.wikipedia.org/wiki/Fraunhoferovy_%C4%8D%C3%A1ry. [Přístup získán 07 04 2019].

SEZNAM OBRÁZKŮ

<u>Obrázek 1-1: Elektromagnetické vlnění na obrázku zjednodušeně ztvárněné kmitající v jediné rovině. Směr šíření je v, směr výchylky elektrického pole E je znázorněn modře, směr výchylky magnetického pole B je znázorněn červeně. (autor: Emmanuel Boutet, CC BY-SA 3.0)</u>	9
<u>Obrázek 1-2: Elektromagnetické spektrum se znázorněním viditelné části spektra (autor: Tatoute and Phrood CC-BY-SA 3.0).</u>	9
<u>Obrázek 1-3: Krajina pořízená v infračerveném oboru spektra (autor Jannis, CC-BY-SA 3.0)</u>	10
<u>Obrázek 1-4: Spektrum viditelného světla v lineární škále podle frekvence.</u>	11
<u>Obrázek 1-5: Rentgenový snímek levé ruky Alberta von Köllikera left pořízená Wilhelmem Röntgenem na jedné z jeho veřejných přednášek 23. ledna 1896.</u>	12
<u>Obrázek 1-6: Průhlednost atmosféry pro jednotlivé vlnové délky elektromagnetického záření. Atmosféra je dobře průhledná pro viditelné světlo, poměrně dobře pro měkké infračervené záření a pak pro rádiové vlny mezi 1 cm a 10 m.</u>	13
<u>Obrázek 1-7: Řez lidským okem.</u>	13
<u>Obrázek 1-8: Spektrální citlivost čípků vybavených různými opsiny absorbují světlo různých vlnových délek.</u>	14
<u>Obrázek 1-9: Euklidova přirozená perspektiva. Předměty vzdálenější se zobrazují pod menšími úhly než stejně velké předměty bližší.</u>	16
<u>Obrázek 1-10: Svítivost a světelný tok.</u>	18
<u>Obrázek 1-11: Intenzita osvětlení.</u>	18
<u>Obrázek 1-12: Jas.</u>	19
<u>Obrázek 1-13: Expozimetr s funkcí měření dopadajícího světla (bílá polokoule), jasoměru v podobě spotmetru (hledáček napravo).</u>	21
<u>Obrázek 1-14: Kalota jako nástavec na mobilní telefon umožňuje spolu s vhodnou aplikací využít světlocitlivou buňku na mobilním telefonu jako expoziometru měřící dopadající světlo.</u>	22
<u>Obrázek 1-15: Díky tělesné teplotě kolem 36° člověk září v infračerveném spektru. Zároveň platí, že některé materiály jsou pro infračervené záření průhledné, zatímco pro viditelné mohou být zcela neprůhledné jako v případě PVC pytle.</u>	23
<u>Obrázek 1-16: Screen z filmu La La Land (Damien Chazelle, 2016) – vlevo a z filmu Django Unchained (Quentin Tarantino, 2012). V případě muzikálu La La Land byly lampy upraveny na barvu namodralých rtuťových výbojek a prostor byl vykrýván až 15 kusy 6 kW HMI světly. V případě filmu Nespoutaný Django byla krajina nasvětlena z jeřábu celkem 24 kusy 6 kW HMI přes obří softboxy. Oba filmy byly natáčeny na film, nikoliv na digitální kameru.</u>	24
<u>Obrázek 1-17: Spektrum různých světelných zdrojů. Vlevo nahoře Slunce s typickým spojitým spektrem 5500 K. Vpravo nahoře žárovka s valnou většinou vyzářování v infračervené části spektra, 2500 K. Vlevo uprostřed zářivka s typickým pásovým spektrem 3500 K. Vpravo uprostřed vysokotlaká sodíková výbojka s dominujícím oranžovým pásovým spektrem a minimálním zastoupením dalších barev 1800 K. Vlevo</u>	

<u>dole LED žárovka, které dominuje modré čárové spektrum luminoforem konvertováno částečně do oranžové, avšak modrá dominující barva dává CRI 7300 K (konkrétně se jedná o světlo výkonné COB LED na turistické čelovce). Vpravo dole také LED žárovka, avšak klasická pokojová s CRI 2700 K, většina modré je tedy již luminoforem konvertována do oranžové.</u>	26
<u>Obrázek 1-18: Záblesk xenonové výbojky blesku. (Autor: Gregory Maxwell GFDL licence).</u>	28
<u>Obrázek 1-19: HMI světlo včetně předřadníku.</u>	29
<u>Obrázek 1-20: Vlnoplocha sférického vlnění. Šipky ukazují směr šíření, barevné čáry jsou vlnoplochami v dvojrozměrném prostoru. (Autor: Pajs @ wikimedia CC BY-SA 3.0)</u>	30
<u>Obrázek 1-21: Graficky znázorněný způsob šíření světelných vln podle Huygensova principu v prvním případě při dopadu na malý otvor a ve druhém případě při dopadu na opticky hustší prostředí.</u>	31
<u>Obrázek 1-22: Moaré vzniká překrytím stejných nebo podobných vzorů navzájem pootočených o malý úhel, anebo navzájem posunutých. Může také vzniknout překrytím podobných vzorů anebo vhodně pravidelně uspořádaných vzorů. Na obrázku výše interferují (zesilují) se ta místa, kde se překrývá prázdná plocha s plnou a tvoří tak hustší síť které neumožňují oku rozlišit skutečný tvar obrazce v popředí a pozadí.</u>	32
<u>Obrázek 1-23: Interference vlnění. Vlevo zesilující amplituda vlnění u vln posunutých o celou délku vlny, vpravo díky posunutí o násobky poloviny délky vlny se vlnění vyruší. (Autor Haade.)</u>	32
<u>Obrázek 1-24: Interference na tenké vrstvě funguje jak u antireflexních vrstve, tak řeba na přirozených tenkých vrstvách, v uvedeném případě na oleji. (Autor, Magda Králová Techmania, CC BY-SA 3.0)</u>	33
<u>Obrázek 1-25: Ukázka změny kruhové polarizace na lineární polarizaci na příkladu gumového lanka roztočeného a rozvibrovaného zároveň. Sepnutím štěrbinu je z kruhově polarizovaného pohybu preferován pohyb lineárně polarizovaný. (autor: Zátonyi Sándor, (ifj.) Fizped - Own work, CC BY-SA 3.0)</u>	34
<u>Obrázek 1-26: Obrázek rozdělen na dvě poloviny. Horní část obrázku s polarizačním filtrem, dolní polovina bez polarizačního filtru. Povšimněte si, že fotograf je přes sklo vidět, polarizace funguje díky blízkosti brewsterova úhlu. Avšak zadní okýnka se již od Brewsterova úhlu vzdalují a na nich polarizační filtr nefunguje.(Autor Sbittante @ wiki, CC BY-SA 3.0)</u>	35
<u>Obrázek 2-1: Barevná odrazivost modrého pigmentu. Struktura a složení modrého pigmentu je právě taková, že pohltí všechny vlnové délky světla krom modré. Tu odrazí.</u>	38
<u>Obrázek 2-2: Tvary zakřivených zrcadlových ploch respektují v podstatě výhradně tvary kuželoseček.</u>	42
<u>Obrázek 2-3: Duté zrcadlo -zobrazení paprsků do ohniska</u>	42
<u>Obrázek 2-4: Vypuklé zrcadlo – zobrazení paprsků.</u>	43
<u>Obrázek 2-5: Zobrazení dutým zrcadlem.</u>	43
<u>Obrázek 2-6: Zobrazení pro případ, že se předmět nachází od vrcholu zrcadla ve vzdálenosti větší než $2f$. Obraz je reálný, zmenšený a stranově a vrcholově převrácený.</u>	44

<u>Obrázek 2-7: Zobrazení pro případ, že se předmět nachází od vrcholu zrcadla ve vzdálenosti přesně $2f$, tedy ve vzdálenosti rovné poloměru zrcadla. Obraz je reálný, stejně velký jako předmět a je stranově a vrcholově převrácený.</u>	45
<u>Obrázek 2-8: Zobrazení pro případ, že se předmět mezi optickým středem a ohniskem. Obraz je reálný, zvětšený a je stranově a vrcholově převrácený.</u>	45
<u>Obrázek 2-9: Zobrazení pro případ, že se předmět nachází ve vzdálenosti menší než f, tedy mezi ohniskem a vrcholem zrcadla. Toto je jediný případ, kdy je obraz nereálný (zdánlivý). Jinak je zvětšený a vzpřímený.</u>	46
<u>Obrázek 2-10: Zobrazení vypuklým zrcadlem. Ve všech možných případech je obraz vytvořený vypuklým zrcadlem nereálný, vzpřímený a zmenšený.</u>	46
<u>Obrázek 2-11: Kulová, sférická, anebo také zvaná otvorová vada kulových zrcadel.</u>	47
<u>Obrázek 2-12: Duté zrcadlo použité v systému Newtonova astronomického dalekohledu. U malých průměrů bývalo obvyklé použití sférických zrcadel, větší průměry pak, právě z důvodu kulové vady, používají zrcadla parabolická. Tento typ dalekohledu vykazuje vysokou světelnost, avšak z důvodu komy je mírně omezen v zorném poli. Jak je vidět, světlo odražené od primárního zrcadla dopadá na zrcadlo sekundární, které je rovinné a odvádí paprsky z tubusu do místa, kde je okulárový výtah. Obraz je pak možno buďto zaznamenat na čip fotoaparátu (tedy dalekohled slouží jako klasický fotografický objektiv) anebo do okulárového výtahu umístit okulár, tedy spojnou soustavu, kterou je možno obraz v ohnisku prohlédnout.</u>	48
<u>Obrázek 2-13: Cassegrainův typ dalekohledu, kde je zrcadlo opatřeno otvorem a sekundární zrcátko posílá obraz tímto otvorem za tubus. Tvar sekundárního zrcátka bývá hyperbolický, ale existují i jiné sestavy.</u>	48
<u>Obrázek 2-14: Snímek otevřené hvězdokupy M 11 pořízený Hubbleovým kosmickým dalekohledem. Typické paprsky kolem hvězd jsou difrakční paprsky způsobené křížem, který nese sekundární zrcátko.</u>	49
<u>Obrázek 2-15: Dva příklady katadioptrických fotografických objektivů, jeden konkrétní značky Tamron 500mm f/8 a druhý obvyklého výpočtového tvaru pro 500 mm. (Zdroj: Tamron inc.)</u>	50
<u>Obrázek 2-16: Katadioptrický objektiv Tamron 500 mm, f/8.</u>	50
<u>Obrázek 2-17: Závislost indexu lomu na vlnové délce pro některá optická skla. Šedý pás vyjadřuje oblast vlnových délek viditelného světla. Tato optická skla jsou nejčastěji používanými ve fotografické optice. (Autor Geek3 @ Wikimedia, CC BY-SA 3.0.)</u>	52
<u>Obrázek 2-18: Grafické znázornění lomu světla z opticky řidšího do opticky hustšího prostředí.</u>	54
<u>Obrázek 2-19: Lom světla z opticky řidšího do opticky hustšího prostředí zobrazený laserem. Povšimněte si, že část energie je odražena podle zákona odrazu. Paprsek, který vstupuje do opticky hustšího prostředí, se láme ke kolmici. Paprsek, který pak z opticky hustšího prostředí vystupuje, se neláme, protože vystupuje pod úhlem 0°. (Zátonyi Sándor (ifj.) Fizped @Wikimedia CC BY-SA 3.0)</u>	54
<u>Obrázek 2-20: Rozklad světla na spektrum pomocí hranolu. Demonstrace disperze světla na hranolu. (Autor D-Kuru @ Wikimedia CC BY-SA 3.0)</u>	55
<u>Obrázek 2-21: Lom světla na hranolu.</u>	56
<u>Obrázek 2-22: Lom světla na několika hranolech.</u>	56

<u>Obrázek 2-23: Zobrazení spojnou čočkou. Paprsky přicházející rovnoběžně s optickou osou jsou soustředěny do ohniska.</u>	57
<u>Obrázek 2-24: Zanedbání tvaru a tloušťky čočky.</u>	57
<u>Obrázek 2-25: Zobrazení tenkou čočkou.</u>	58
<u>Obrázek 2-26: Zobrazení tenkou rozptylkou.</u>	59
<u>Obrázek 2-27: rozdělení čoček podle tvaru. (Autor Fred the Oyster @ Wikimedia CC BY-SA)</u>	60
<u>Obrázek 2-28: Zobrazení tlustou čočkou. Pro náš případ uvažujeme $n_1 = n_3 = 1$, tedy čočka se nachází ve vzduchu.</u>	61
<u>Obrázek 2-29: Použitím rozptylky můžeme vysunout hlavní rovinu před objektiv a tím zkrátit konstrukční délku objektivu.</u>	62
<u>Obrázek 2-30: Hlavní rovina v případě skutečného širokouhlého objektivu. Rovina je posunuta až do obrazové části, čímž umožňuje prodloužit konstrukční délku objektivu v tom smyslu, že paprsky jsou schopny dopadnout i na snímač fotoaparátu přesto, že ohnisková vzdálenost objektivu je mnohem menší, než šachta fotoaparátu. (autor: atrick Horgan @ Wikimedia)</u>	P 6
2	
<u>Obrázek 2-31: Příklad použití hranolu a zároveň využití úplného odrazu. Dvojce hranolů nejenže zajišťuje, že se obraz ze dvou širokých objektivů dostane po rovnoběžných drahách do obou očí položených poměrně blízko sebe. Ale především, zprostředkuje stranové a vrcholové převrácení obrazu tak, aby pozorovatel viděl v okuláru obraz vzpřímený a stranově nepřevrácený.</u>	63
<u>Obrázek 2-32: Některé typy hranolů. (Převzato z [4])</u>	64
<u>Obrázek 2-33: Lom světla na planoparalelní desce. Dochází k posunu ohniskové vzdálenosti, jinak je obraz nedeformován.</u>	65
<u>Obrázek 2-34: Abbeův diagram s vyznačenými cca 120 typy optických skel firmy Schott. Diagram zobrazuje závislost indexu lomu na disperzním čísle. V základu dělí skla do jednotlivých segmentů podle složení, kterým přiřazují míru barevné disperze a index lomu.</u>	66
<u>Obrázek 2-35: Achromatický dublet, vhodnou kombinací korunového a flintového skla můžeme dosáhnout snížení barevné vady a mírné snížení otvorové vady. Typicky se používá konvexní BK7 korunového skla v kombinaci s konkávním F2 flintovým sklem. Jejich spojení, obvykle tmelení k sobě a tvar zajišťuje aby se disperze vzájemně vyrušily alespoň ve dvou vlnových délkách (F a D Fraunhoferových čarách, tedy červené a zelené). Modrá stále ještě zůstává mimo ohnisko.</u>	69
<u>Obrázek 2-36: APOCHROMATICKÝ objektiv kde třetí člen je z fluoritového krystalu. Obvykle se objektivy obsahující skla nebo členy s velmi nízkou disperzí označují jako extra-low dispersion (ED) ve zkratce za názvem. Takovéto objektivy mají velmi dobře vykorigovanou barevnou vadu hned ve třech spektrálních čarách (přidává k achromatu korekci modré), což v případě viditelného světla přináší pro naprostou většinu aplikací neznamatelnou barevnou vadu.</u>	70

Obrázek 2-37: Objektiv Canon EF 70-200mm f/4L USM obsahuje jeden fluoritový člen a dva členy z UD skla.	71
Obrázek 2-38: Znárodnění skutečných otvorů clonové řady.	73
Obrázek 3-1: Velikost rozptylového kroužku. Bod vzdálenější než 1' splývá, body vzdálenější než 1' se jeví jako samostatné. Z toho důvodu konstruueme tzv. kružnici splynutí.	78
Obrázek 3-2: Rozložení světla ve skutečném paprskovém kuželu u systému s otvorovou vadou. [4]	79
Obrázek 3-3: Příklad barevné vady polohy. Větvičky se jeví do fialova, což naznačuje sice achromatickou korekci, avšak degeneraci na modré vlnové délce. (Autor: Wilder Kaiser @ English Wikipedia, CC BY-SA 3.0)	80
Obrázek 3-4: Vliv otvorové vady na prohnutí spojné čočky [4].	81
Obrázek 3-5: Průběh otvorové vady spojky. Nalevo bez korekce, uprostřed jednoduchá korekce a vpravo korekce dvojnásobná.	82
Obrázek 3-6: Vlevo meridiální (neboli poledníkové či tangenciální) roviny a vpravo sagitální (neboli rovnoběžkové) roviny.	83
Obrázek 3-7: Astigmatismus. Paprsky v sagitálním řezu se protínají v bodě S1, paprsky v meridiálním řezu v bodě T1.	83
Obrázek 3-8: Dvě varianty historických anastigmatických objektivů. Doppel Anastigmat Series III neboli Dagor z roku 1904 který je symetrickým objektivem. Vedle něj pak novější (1920) nesymetrický anastigmat Taylor, Taylor & Hobson Cooke Amotal Anastigmat. (autor: Panther @ Wikimedia CC BY-SA 3.0)	84
Obrázek 3-9: Vznik komy jako vady šikmých paprskových svazků.	84
Obrázek 3-10: Vlevo soudkovité, uprostřed poduškovité a vpravo knírovité (kombinované) zkreslení.	85
Obrázek 2-1: Vlevo vyfotografováno na f/5,6 vpravo na f/22.	74
Obrázek 2-2: Vliv difrakce na obraz. Horní obrázek vyfotografovaný při f/5,6, dolní při f/22. Ohyb světla na cloně objektivu způsobuje výrazné zhoršení kresby.	74
Obrázek 2-3: Oblast zaostření. Tam kde je průměr rozptylového kroužku menší než rozlišovací schopnost, se jeví obrázek zaostřen. Rozsah na optické ose, ve které se obrázek jeví zaostřený, se nazývá hloubka ostrosti.	75
Obrázek 2-4: Obrázek vlevo má velkou hloubku ostrosti (f/16), obrázek vpravo má malou hloubku ostrosti (f/2,8).	76
Obrázek 3-11: Zklenutí pole.	86
Obrázek 4-1: Camera obscura v manuskriptu Principia Optices, 17. století.	89
Obrázek 4-2: Camera obscura vytvořená na Slezské univerzitě v Opavě na oboru Multimediální techniky pomocí dírky o velikosti 1 cm ² v zatemňovací roletě.	90
Obrázek 4-3: Achromatický dublet otočený rozptylkou směrem k předmětu. tzv. krajinářský objektiv. Vyznačoval se malou světelností a malým zorným polem (na obrázku názorně napravo).	91
Obrázek 4-4: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0)	91
Obrázek 4-5: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0)	92
Obrázek 4-6: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0)	93
Obrázek 4-7: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0)	93























Obrázek 4-8: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0).....	94
Obrázek 4-9: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0).....	95
Obrázek 4-10: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0).....	96
Obrázek 4-11: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0).....	96
Obrázek 4-12: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0).....	97
Obrázek 4-13: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0).....	98
Obrázek 4-14: Nikkor 13mm f/5.6 rektilineární objektiv. (Dan Lindsay @ Wikipedia CC BY 3.0).....	98
Obrázek 4-15: Rektilineární zobrazení u Nikkor 13mm f/5.6. (Dan Lindsay @ Wikipedia CC BY 3.0)	99
Obrázek 4-16: (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0).....	100
Obrázek 4-17: První transfokátor typický tím, že existuje jediný spárovaný posuvný člen. Bylo jasné, že další design se musí ubírat rozdělením členu na části, které budou zodpovědné za transfokaci a člen, který bude schopný korigovat lépe optické vady. (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0).....	101
Obrázek 4-18: Nový posun ve výpočtech na počítačích umožnil oddělení transfokačního a kompenzačního členu, které se pohybovali s ohledem na nastavené ohnisko závisle, ale rozdílně. (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0).....	102
Obrázek 4-19: Hned tři pohybující se elementy byly průběžným kamenem tvorby širokoúhlých objektivů. (autor: Paul1513 @ Wikipedia CC BY-SA 3.0).....	102
Obrázek 4-20: Difraktivní optický člen v objektivě Canon. (Autor: Canon inc.).....	104
Obrázek 5-1: Lokální zvýšení kontrastu způsobí nejen kontrastnější snímek, ale při oddálení snímek také ostřejší.	107
Obrázek 5-2: Vlevo – vysoký kontrast a vysoká ostrost. Druhý zleva – vysoký kontrast, nízká ostrost. Třetí zleva – nízký kontrast, vysoká ostrost. Vpravo – nízký kontrast a nízká ostrost.	107
Obrázek 5-3: Testovací obrazce pro rozlišení a zkreslení TE 100.	108
Obrázek 5-4: MTF křivka pro objektiv Canon EF 50 mm, f/1,8 STM. Modré čáry jsou pro clonu f/8, černé čáry pro plnou díru f/1,8. Povšimněte si vodorovné osy, zde stojí za připomenutí, že jde o vzdálenost od středu, tedy že APS-C formát končí kousek za 15 mm a FF formát sahá až na konec grafu.	110

SHRnutí STUDIjNÍ OPORY

Filmová a fotografická optika se ve svém obsahu značně prolíná. Pokud získáte dostatečný základ v oblasti optiky fotografické, je nasnadě se věnovat optice filmové, rozumět jí z uživatelského hlediska a umět vybrat správné parametry a znát důvod, proč a jak jsou ty které objektivy značeny, jak jsou ceněny a hodnoceny a jak poznat jejich kvality a slabiny. V přímé výuce se pak věnujeme také praktickým rozdílům mezi skly, objektivy a porovnáváme objektivy fotografické a filmové.

Pochopení podstaty fungování optiky ve fotografii získá autor nejen nezbytný přehled, ale napomůže mu to ve výběru a práci právě v oblasti objektivů a řešení potíží souvisejících s optickou kvalitou. Z tohoto důvodu byl hlavně text napsán. Jeho podoba ale není konečná, bude ještě čase rozšířen a doplněn o některé další vhodné oblasti poznání fotografické optiky a dojdeme i do větší hloubky fyzikálního chápání světla ve filmu a fotografii.

PŘEHLED DOSTUPNÝCH IKON

	Čas potřebný ke studiu		Cíle kapitoly
	Klíčová slova		Nezapomeňte na odpočinek
	Průvodce studiem		Průvodce textem
	Rychlý náhled		Shrnutí
	Tutoriály		Definice
	K zapamatování		Případová studie
	Řešená úloha		Věta
	Kontrolní otázka		Korespondenční úkol
	Odpovědi		Otázky
	Samostatný úkol		Další zdroje
	Pro zájemce		Úkol k zamyšlení

Pozn. Tuto část dokumentu nedoporučujeme upravovat, aby byla zachována správná funkčnost vložených maker. Tento poslední oddíl může být zamknut v MS Word 2010 prostřednictvím menu Revize/Omezit úpravy.

Takto je rovněž omezena možnost měnit například styly v dokumentu. Pro jejich úpravu nebo přidávání či odebrání je opět nutné omezení úprav zrušit. Zámek není chráněn heslem.

Název: **Světlo a optika ve filmu a fotografii**

Autor: **Martin Petrásek**

Vydavatel: Slezská univerzita v Opavě
Filozoficko-přírodovědecká fakulta v Opavě

Určeno: studentům SU FPF Opava

Počet stran: 122

Recenzní řízení / oponentský posudek:

- Doc. Mgr.art Lubomír Viluda, ArtD. (Vedoucí katedry Dokumentárnej tvorby, Fakulta dramatických umení, Akadémia umení v Banskej Bystrici)
- doc. Mgr. Anton Szomolányi, ArtD. (Vedoucí Ústavu dizajnu médií, Fakulta masmédií, Paneurópska vysoká škola v Bratislave)

Tato publikace neprošla jazykovou úpravou.