

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

Katedra fyziky

# **Optické zobrazování, jeho vady a zpracování obrazu**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: **prof. Ing. Martin Libra, CSc.**

Autor: **Milan Strachota**

PRAHA 2011

zadání

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci jsem vypracoval zcela samostatně pod vedením prof. Ing. Martina Libry CSc. a použil jen pramenů citovaných v příložené bibliografii.

V Praze dne 8. dubna 2011

.....

Milan Strachota

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé práce prof. Ing. Martinu Librovi, CSc. za konzultace a cenné rady poskytnuté v průběhu psaní této práce.

**Abstrakt:** Tato bakalářská práce podává přehled základních znalostí z oblasti geometrické optiky, optických vad a metod zaznamenání a zpracování obrazu. V kapitole „Geometrická optika“ jsou vysvětleny základní pojmy týkající se geometrické optiky, popsány zákony šíření světla v prostředí a představeny základní prvky optických soustav – zrcadlové plochy a tenká čočka. Kapitola „Vady optického zobrazení“ tvoří přehled známých vad optického zobrazení a jejich vlivu na kvalitu obrazu. Pro každou vadu jsou uvedeny možnosti jejího potlačení či odstranění. Obsahem kapitoly „Vybrané optické přístroje“ je seznámení se základními zobrazovacími přístroji a jejich funkcí. U jednotlivých přístrojů jsou zmíněny požadavky na potlačení vad optických členů celé soustavy. Kapitola „Zpracování obrazu“ je zaměřena na proces záznamu a zpracování statického obrazu vytvořeného optickými soustavami. Tato kapitola je rozdělena na dvě části. Obsahem první části je popis fotografického procesu založeného na chemických změnách halogenidů stříbra za působení světla. Druhá část je věnována digitální fotografii a v některých ohledech i srovnání jejích vlastností s vlastnostmi fotografie klasické.

**Klíčová slova:** geometrická optika, optické vady, optické přístroje, fotografický proces, digitální fotografie

### **Optical Visualisation, Defects of Visualisation and Picture Processing**

**Summary:** This bachelor thesis gives an overview of basic knowledge of geometrical optics, optical aberrations and methods of image recording and processing. The basic terms relating to geometrical optics, the principles of light propagation in medium and the basic elements of optical devices – mirror surfaces and thin lens – are described in chapter „Fundamentals of geometrical optics“. Chapter „Aberrations of optical visualisation“ consists of an overview of known optical aberrations and their impact on image quality. For each defect, the possibilities of its suppression or elimination are proposed. Chapter „Selected optical devices“ gives an introduction to basic optical devices and their functions. The description of the individual devices is accompanied by the requirements on aberrations suppression in optical elements of the entire system. Chapter „Image processing“ is focused on recording and processing the still images created by the optical systems. This chapter is divided into two parts. The first part explains the photographic process based on chemical changes in silver halides caused by light. The second part is dedicated to digital photography, and in some respects, a comparison of its properties with those of conventional photography.

**Key words:** geometrical optics, optical aberrations, optical devices, photographic process, digital photography

---

# Obsah

---

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Cíl práce a metodika</b>	<b>2</b>
2.1	Cíl práce . . . . .	2
2.2	Metodika . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Základy geometrické optiky</b>	<b>3</b>
3.1	Základní pojmy . . . . .	3
3.2	Zákon odrazu a lomu . . . . .	3
3.3	Zvětšení při optickém zobrazení a zobrazovací rovnice . . . . .	5
3.4	Zrcadlové plochy . . . . .	6
3.5	Tenká čočka . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Vady optického zobrazení</b>	<b>12</b>
4.1	Monochromatické vady zobrazení . . . . .	12
4.1.1	Otvorová vada . . . . .	12
4.1.2	Koma . . . . .	13
4.1.3	Astigmatismus a zklenutí pole . . . . .	14
4.1.4	Zkreslení . . . . .	15
4.2	Chromatické vady zobrazení . . . . .	16
4.2.1	Barevná vada polohy . . . . .	17
4.2.2	Barevná vada velikosti . . . . .	18
4.3	Vinětace . . . . .	18
<b>5</b>	<b>Vybrané zobrazovací přístroje</b>	<b>19</b>
5.1	Lupa . . . . .	19
5.2	Mikroskop . . . . .	20
5.3	Dalekohled . . . . .	21
5.4	Fotografický přístroj . . . . .	23
<b>6</b>	<b>Zpracování obrazu</b>	<b>27</b>
6.1	Klasický fotografický proces . . . . .	27
6.1.1	Účinek světelného záření na halogenidy stříbra . . . . .	27
6.1.2	Vznik latentního obrazu . . . . .	28
6.1.3	Vyvolávání . . . . .	28
6.1.4	Ustalování a vypírání . . . . .	29
6.1.5	Vlastnosti světlocitlivých vrstev . . . . .	30
6.1.6	Vyvolávání fotografií . . . . .	33
6.1.7	Barevná fotografie . . . . .	34
6.2	Digitální fotografie . . . . .	35
6.2.1	Snímací čip . . . . .	36
6.2.2	Obrazový procesor . . . . .	38
6.2.3	Vlastnosti digitálního obrazu . . . . .	38
6.2.4	Formáty obrazových souborů . . . . .	40
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>41</b>
	<b>Literatura</b>	<b>42</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>43</b>

---

# 1. Úvod

---

Optika je věda zabývající se vlastnostmi světla a jeho šířením v různých prostředích a na jejich rozhraních. Z fyzikálního hlediska je světlo jak částicové, tak vlnové povahy. Vysvětlení tohoto dvojího pojetí světla podává teorie zvaná vlnově–korpuskulární dualismus. První část této práce je věnována stručnému popisu zákonitostí optiky, pro něž se lze omezit na chápání světla jako částicového záření. Částicovou podstatou světla se zabývá věda zvaná *geometrická optika*, která předpokládá, že rozměry prostředí a předmětů, v jejichž rámci se šíření světla studuje, jsou nepoměrně větší než vlnová délka světla. Vliv vlnové délky světla na jeho vlastnosti lze pak zanedbat. Pro paprsky světla v geometrické optice platí, že se šíří přímočaře a navzájem nezávisle. Chování světla na rozhraní dvou prostředí lze popsat pomocí jednoduchých zákonů odrazu a lomu. Geometrická optika je nejstarším odvětvím optiky a objevení jejích zákonitostí umožnilo sestavit první optické přístroje.

Vývoj optických přístrojů s sebou kromě jejich zdokonalování přinesl i mnoho problémů. Zobrazování skutečnými přístroji se v různých aspektech odchyluje od ideálního zobrazení popsaného základními vztahy geometrické optiky. Odchylky projevující se nežádoucími změnami obrazu se nazývají vadami optického zobrazení nebo též aberacemi. K popisu některých z nich lze vystačit s geometrickou optikou, u jiných se však projevuje vlnová povaha světla. V průběhu historického vývoje byl již vynalezen nespočet konstrukčních opatření, s jejichž pomocí lze optické vady zmírnit nebo v některých případech zcela eliminovat. Druhá část práce zahrnuje přehled optických vad, zhodnocení jejich vlivu na výsledný obraz a možnosti jejich odstranění.

První optické přístroje pomáhaly především vědcům v jejich experimentech a pozorováních. Postupem času se rozšířily do mnoha odvětví lidské činnosti. Optické přístroje dnes nenacházejí využití pouze ve vědě, ale poskytují lidem užitek při každodenní práci i ve volném čase. Brýle a kontaktní čočky pomáhají milionům lidí napravit zrakové vady, fotoaparáty a kamery se zásadní měrou podílejí na tvorbě zpravodajství. Fotografování pro zábavu se stalo zálibou mnoha lidí a představuje jeden z fenoménů moderní doby. Třetí část práce se zabývá principy, na kterých fungují základní typy zobrazovacích přístrojů. Znalost těchto principů je důležitá pro pochopení, jak tyto přístroje fungují, a je předpokladem pro jejich správné používání a využití možností, které nabízejí.

Poslední část práce nabízí pohled na způsoby, jakým lze obraz vytvořený optickými přístroji zachytit a uchovat. Omezuje se pouze na zachycení statického obrazu, tedy fotografie, která je základem všech ostatních obrazových technik. Záznam obrazu založený na chemickém procesu, jehož podstatou je černání halogenidů stříbra působením světelného záření se rozvíjí již od první poloviny 19. století a dlouhou dobu byl jedinou masově rozšířenou fotografickou technikou. S nástupem počítačů se jeho alternativou stala digitální fotografie. Poslední část práce popisuje základy obou technologií a vlastnosti obrazu pomocí nich zaznamenaného.

---

## 2. Cíl práce a metodika

---

### 2.1 Cíl práce

Cílem práce je představit problematiku geometrické optiky a uvést základní principy optického zobrazení. Dále by se měla práce zaměřit na popis optických vad a možnosti jejich odstranění. Následuje seznámení s principy optických přístrojů a technologiemi zpracování obrazu. Cílem je vytvořit základní přehled a zdůraznit provázanost oblasti zobrazování optickými přístroji, problémů, které při tomto zobrazení nastávají a oblasti technologií prvotního zpracování obrazu tvořeného optickými přístroji.

### 2.2 Metodika

Tato bakalářská práce byla vypracována formou rešerše ze zdrojů uvedených v seznamu literatury. Jako zdroje posloužily pouze tištěné publikace vydané v českém jazyce. Úvod práce shrnuje obsah jednotlivých kapitol a dává je do vzájemných souvislostí. Závěr poukazuje na možný přínos této bakalářské práce a představuje zhodnocení současného stavu popisované problematiky v kontextu historických souvislostí. Závěr též obsahuje osobní názor autora.



---

## 3. Základy geometrické optiky

---

### 3.1 Základní pojmy

*Index lomu* prostředí je veličina charakterizující dané prostředí a je dána vztahem

$$n = c/v \quad (3.1)$$

kde  $c \approx 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$  je rychlost světla ve vakuu a  $v$  je rychlost šíření světla v prostředí [2]. Při srovnání dvou prostředí s různými indexy lomu se nazývá prostředí s nižším indexem prostředím opticky řidším a prostředí s vyšším indexem prostředím opticky hustším [4].

*Optická soustava* představuje soubor optických prvků, které jsou navzájem uspořádány tak, aby optická soustava plnila zvolený účel. Jejím úkolem je transformovat svazek paprsků do ní vstupující na svazek paprsků z ní vystupující. Optické soustavy se dělí na centrované a decentrované. Optické prvky centrované optické soustavy jsou rotačně symetrické vzhledem ke společné ose, která se nazývá optickou osou soustavy. Decentrované optické soustavy tuto vlastnost nemají. Většina v praxi používaných optických soustav je centrovaných. Dále se budeme zabývat vlastnostmi pouze těchto soustav.

*Předmětem* nazýváme množinu bodů, které jsou zdrojem záření, *předmětovým prostorem* nazýváme množinu bodů prostoru, ve kterém se nachází předmět. *Obrazem* nazýváme zobrazení předmětu optickou soustavou, *obrazovým prostorem* nazýváme množinu bodů, ve kterém se nachází obraz předmětu.

*Příčné zvětšení* optické soustavy je definováno vztahem

$$Z = y'/y \quad (3.2)$$

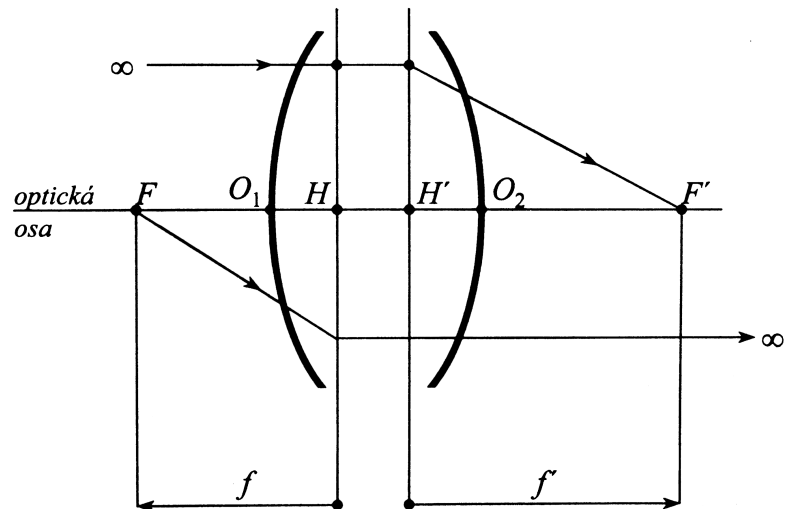
kde  $y$  značí velikost předmětu a  $y'$  velikost obrazu. Příčné zvětšení  $Z$  optické soustavy je konstantní pro každou dvojici sdružených rovin, kolmých na osu soustavy. Tato vlastnost příčného zvětšení automaticky zajišťuje geometrickou podobnost předmětu a obrazu [2]. Optické zobrazení charakterizují ve vztahu obrazu k předmětu tyto pojmy: zmenšený/zvětšený, skutečný/zdánlivý, vzpřímený/převrácený [4].

*Obrazové ohnisko*  $F'$  představuje obraz nekonečně vzdáleného bodu ležícího na optické ose soustavy v předmětovém prostoru. *Předmětové ohnisko* představuje bod ležící na optické ose soustavy v předmětovém prostoru, jehož obraz se vytváří v nekonečně velké vzdálenosti v obrazovém prostoru. *Hlavní body*  $H$  (předmětový hlavní bod),  $H'$  (obrazový hlavní bod) představují dvojici sdružených bodů, v nichž je příčné zvětšení rovno jedné ( $m = 1$ ). *Obrazová ohnisková vzdálenost* je vzdálenost  $f'$  obrazového ohniska  $F'$  od obrazového hlavního bodu  $H'$ . *Předmětová ohnisková vzdálenost* je vzdálenost  $f$  předmětového ohniska  $F$  od předmětového hlavního bodu  $H$ . 3.1. Optická soustava je plně charakterizována, jsou-li známy polohy jejích ohnisek a hlavních bodů (obr. 3.1) [2].

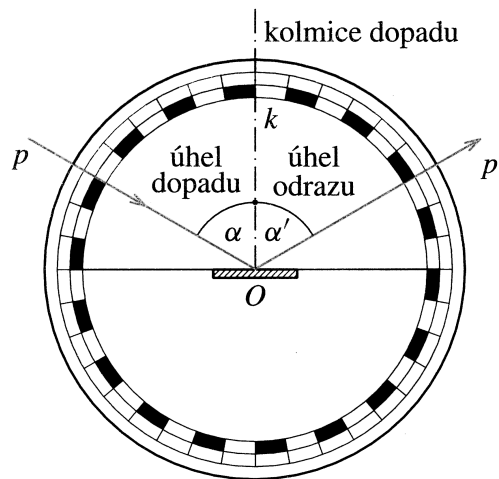
### 3.2 Zákon odrazu a lomu

Uvažujme přímočarý paprsek světla dopadající na rozhraní dvou prostředí. Část světla se na rozhraní odrazí a část jej projde rozhraním z prvního prostředí do druhého [3].

Paprsky, které se na rozhraní odrazí, neprocházejí do druhého prostředí. Pro paprsek dopadající na rozhraní a svírající s normálou k ploše rozhraní úhel  $\alpha$  a paprsek odraženého světla



Obrázek 3.1: Hlavní body a ohniska optické soustavy (zdroj: [1])



Obrázek 3.2: Zákon odrazu (zdroj: [4])

svírající s normálou k ploše rozhraní úhel  $\alpha'$  platí *zákon odrazu* (obr. 3.2) vyjádřený vztahem

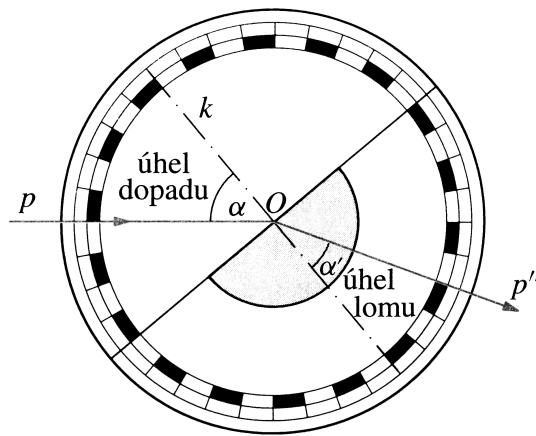
$$\alpha = \alpha'. \quad (3.3)$$

Dopadající i odražený paprsek a normála k ploše rozhraní spolu leží v jedné rovině, tzv. rovině dopadu [4].

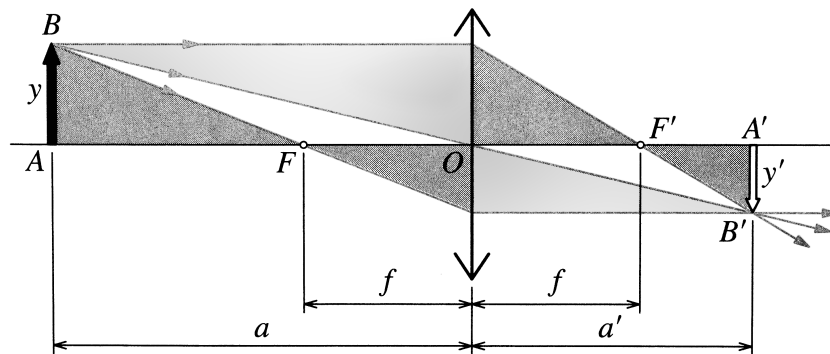
Dopadá-li světlo na rozhraní dvou různých prostředí, která se liší hodnotou indexu lomu, pod šikmým úhlem, dochází ke změně směru šíření světla při jeho průchodu rozhraním. Změna směru proběhne pouze na rozhraní, prostředím se světlo šíří dál opět přímočaře. Předpokládáme-li, že obě prostředí jsou průhledná (neabsorbují světlo) a první z nich má index lomu  $n$  a druhé  $n'$ , pak na rozhraní těchto dvou prostředí platí *zákon lomu* (obr. 3.3). Lze jej popsat rovnicí

$$n \sin \alpha = n' \sin \alpha', \quad (3.4)$$

kde  $\alpha$  je úhel dopadu tj. úhel, který svírá dopadající paprsek s normálou k ploše rozhraní a  $\alpha'$  je úhel lomu tj. úhel, který svírá lomený paprsek s normálou k ploše rozhraní. Oba paprsky leží v rovině dopadu [2].



Obrázek 3.3: Zákon lomu (zdroj: [4])



Obrázek 3.4: Zvětšení optické soustavy (zdroj: [4])

### 3.3 Zvětšení při optickém zobrazení a zobrazovací rovnice

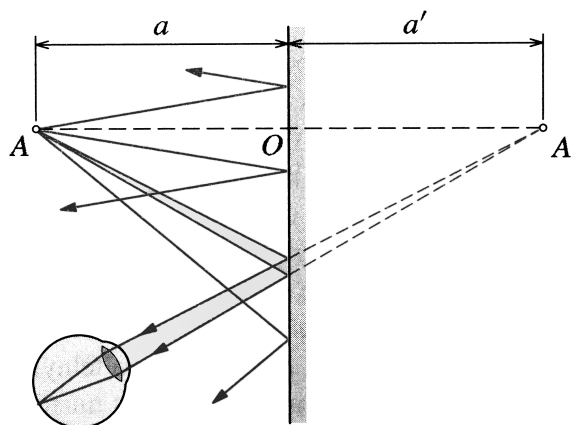
Jestliže je zvětšení vyjádřeno poměrem velikosti obrazu  $y'$  a velikosti předmětu  $y$ , označuje se jako příčné zvětšení, viz rovnice (3.2).

Vzdálenost předmětové roviny od předmětové hlavní roviny procházející bodem  $H$  se značí  $a$ , vzdálenost obrazové roviny od hlavní obrazové roviny procházející bodem  $H'$  se značí  $a'$ . Pomocí veličin  $a$ ,  $a'$ ,  $f$  lze příčné zvětšení vypočítat. Z obr. 3.4 vyplývají následující vztahy pro příčné zvětšení [4]:

$$Z = \frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a} = -\frac{a' - f}{f} = -\frac{f}{a - f}. \quad (3.5)$$

Mezi vzdáleností  $a$  předmětu od hlavní předmětové roviny, vzdáleností  $a'$  obrazu od hlavní obrazové roviny, předmětovou ohniskovou vzdáleností  $f$  a obrazovou ohniskovou vzdáleností  $f'$  existuje vzájemná souvislost, kterou vyjadřuje vztah

$$\frac{f}{a} + \frac{f'}{a'} = 1, \quad (3.6)$$



Obrázek 3.5: Zdánlivý obraz vytvořený rovinným zrcadlem (zdroj: [4])

což je známý Gaussův tvar *zobrazovací rovnice*. Jedná se o obecný tvar rovnice pro optické zobrazení [7].

### 3.4 Zrcadlové plochy

*Zrcadlo* je povrch, který odráží úzký svazek světelných paprsků prakticky do jediného směru. Jiné povrchy jej rozptylují do mnoha směrů nebo jej pohlcují. Zobrazování zrcadlem je založeno pouze na odrazu světla. Při výrobě zrcadel se využívají vlastnosti lesklých kovových ploch, které odrážejí více než 90% dopadajícího světla. U zrcadel pro běžné použití je kov nanesen na zadní stěně skleněné desky. Přední stěna skla však sama o sobě odráží část světla a proto vzniká obraz zdvojený. Ve složitějších optických přístrojích (fotografické přístroje, astronomické dalekohledy, měřicí přístroje) se proto používají zrcadla s vrstvou lesklého kovu nanesenou na vnějším povrchu skla [4].

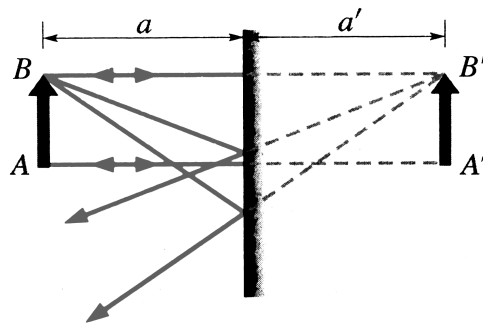
Nejjednodušším typem zrcadla je *rovinné zrcadlo*. Mějme bodový zdroj světla  $A$ , který leží ve vzdálenosti  $a$  před zrcadlem. Světlo dopadající na zrcadlo je znázorněno paprsky šířícími se ze zdroje  $A$ . Odraz světla je znázorněn paprsky šířícími se od zrcadla. Prodloužením odražených paprsků za zrcadlo zjistíme, že tyto paprsky se protínají v bodě ležícím ve vzdálenosti  $a'$  za zrcadlem [3]. Pro rozlišení polohy předmětu a obrazu se používá znaménková konvence, kde vzdálenost předmětu umístěného před zrcadlem je vždy kladná a vzdálenost obrazu za zrcadlem záporná. Pro vzdálenost předmětu a obrazu pak platí následující vztah [4]:

$$a = -a'. \quad (3.7)$$

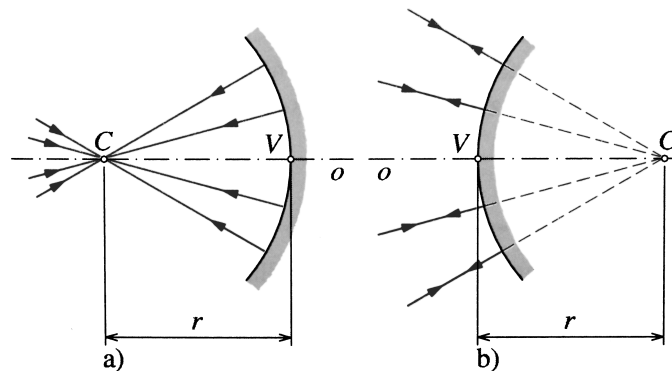
Při pohledu na zrcadlo zachytí naše oko některé z odražených paprsků. Vnímáme bodový zdroj světla umístěný v průsečíku prodloužených paprsků jako obraz  $A'$  předmětu  $A$  (obr. 3.5). Vzniká tak bodový zdánlivý obraz, protože leží pouze na průsečíku prodloužených paprsků a paprsky jím ve skutečnosti neprocházejí [3].

Shodným způsobem vzniká obraz každého bodu jakéhokoli složitějšího objektu. Obraz všech bodů pak vytváří zrcadlový obraz předmětu, který je vždy stejně veliký jako předmět, zdánlivý, stranově převrácený a ve svislém směru orientovaný stejně jako předmět, tedy vzpřímený (obr. 3.6) [4].

Zrcadlové plochy mohou být i různě zakřivené. V konstrukci optických přístrojů se nejčastěji používají zrcadla, u nichž tvoří odrazovou plochu část kulové plochy. Tato zrcadla se označují jako *kulová* nebo *sférická zrcadla*. Kulové zrcadlo obraz nedeformuje, ale pouze mění



Obrázek 3.6: Zobrazení předmětu rovinným zrcadlem (zdroj: [3])



Obrázek 3.7: Duté zrcadlo (a), vypuklé zrcadlo (b) (zdroj: [4])

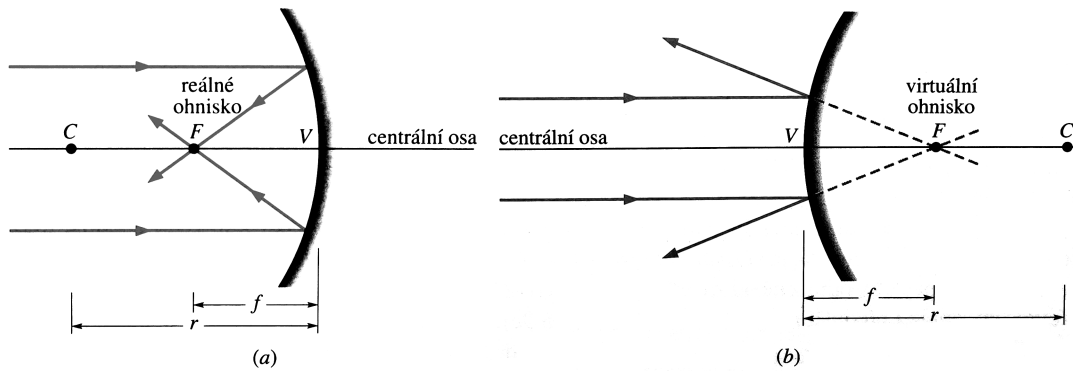
jeho velikost. Podle toho, na které straně kulové plochy se nachází odrazná plocha, se kulová zrcadla rozdělují na dutá a vypuklá.

Pro zobrazování kulovým zrcadlem je důležitá poloha dvou významných bodů – *středu křivosti*  $C$  zrcadla a *vrcholu*  $V$  zrcadla. U dutého zrcadla se nachází střed křivosti před zrcadlem a všechny paprsky, které jím procházejí, dopadají na plochu zrcadla kolmo a proto se odrážejí zpět do bodu  $C$  (obr. 3.7 a). U vypuklého zrcadla se nachází střed křivosti za odraznou plochou (obr. 3.7 b). Paprsky, jejichž prodloužení směřují do bodu  $C$ , dopadají na odraznou plochu kolmo. Přímka procházející body  $C$  a  $V$  se nazývá *optická osa*  $o$  zrcadla a vzdálenost  $r = |CV|$  vyjadřuje poloměr křivosti zrcadla.

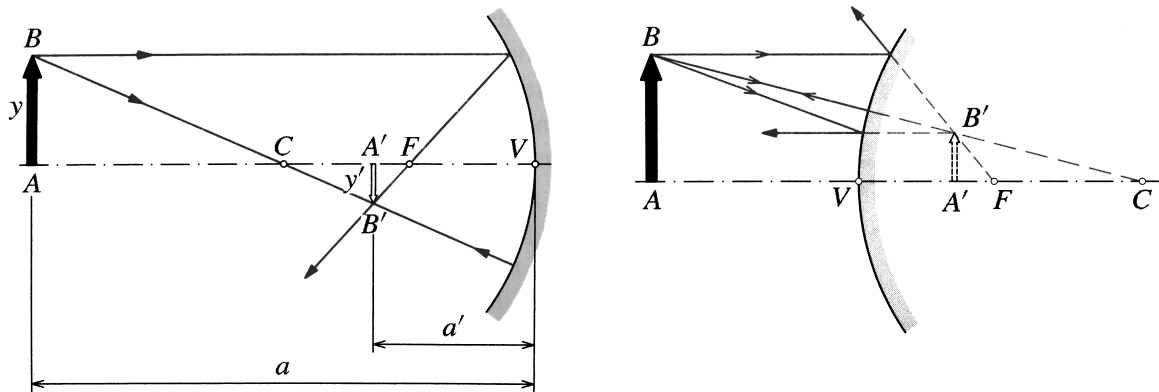
Pro konstrukci obrazu kulovým zrcadlem využíváme tři významné paprsky. Prvním z nich je již zmíněný paprsek procházející resp. směřující do středu křivosti zrcadla. Odražený paprsek má směr opačný oproti paprsku dopadajícímu. Druhý významný paprsek je rovnoběžný s optickou osou  $o$  zrcadla. Na zrcadlo dopadá pod určitým úhlem, podle zákona odrazu mění svůj směr a protíná optickou osu v bodě  $F$ . V tomto bodě protínají optickou osu všechny odražené paprsky, které k zrcadlu směřují rovnoběžně s osou  $o$ . Bod  $F$  se nazývá *ohniskem* zrcadla, vzdálenost ohniska od vrcholu  $V$  je *ohnisková vzdálenost* kulového zrcadla

$$f = |FV| = \frac{r}{2}. \quad (3.8)$$

U dutého zrcadla se paprsky v ohnisku skutečně protínají a bod  $F$  tedy představuje skutečné ohnisko (obr. 3.8 a). U vypuklého zrcadla jsou odražené paprsky rozbíhavé a protínají se pouze ve svém prodloužení za zrcadlem. Vypuklé zrcadlo má tedy *zdánlivé ohnisko* (obr. 3.8 b). V analogii se znaménkovou konvencí u rovinného zrcadla platí i znaménková konvence



Obrázek 3.8: Poloha ohniska dutého zrcadla (a) a vypuklého zrcadla (b) (zdroj: [3])



Obrázek 3.9: Konstrukce obrazu bodu tvořeného kulovým zrcadlem (zdroj: [4])

pro ohnisko kulového zrcadla. Ohnisková vzdálenost dutého zrcadla je vždy kladná, ohnisková vzdálenost vypuklého zrcadla je záporná.

Třetí význačný paprsek prochází ohniskem a po odrazu od zrcadla je rovnoběžný s jeho optickou osou. Ke konstrukci obrazu bodu vytvořeného zrcadlem vždy postačují dva význačné paprsky. Konstrukce obrazu je znázorněna na obr. 3.9.

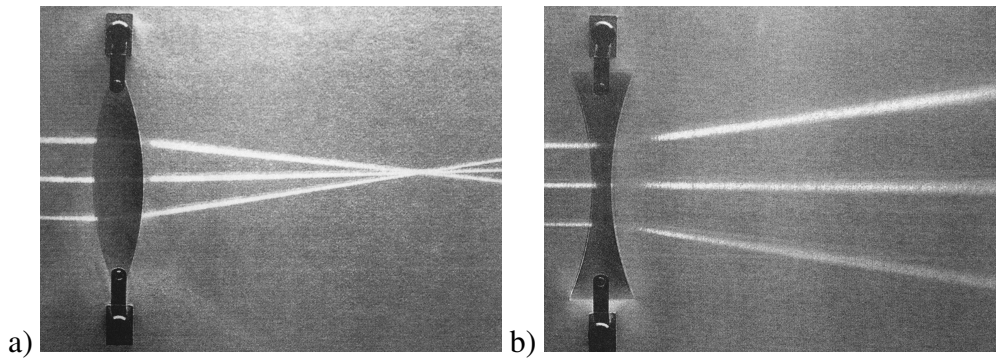
Úsečka  $AB$  představuje zobrazovaný předmět a její délka je *velikost předmětu*  $y$ . Vzdálenost předmětu  $a = |AV|$  od vrcholu zrcadla je *předmětová vzdálenost*. Poloha obrazu se získá sestrojením bodu  $B'$  pomocí dvou význačných paprsků. Obrazem úsečky  $AB$  je úsečka  $A'B'$  kolmá k optické ose a ležící ve vzdálenosti  $a' = |A'V|$  od vrcholu zrcadla. Vzdálenost  $a'$  je *obrazová vzdálenost* a délka úsečky  $|A'B'| = y'$  je *velikost obrazu*.

Kulové zrcadlo má pouze jedno ohnisko a platí pro něj obecná zobrazovací rovnice (3.6) v upraveném tvaru

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f} = \frac{2}{r}. \quad (3.9)$$

### 3.5 Tenká čočka

Čočka je zobrazovacím prvkem, u něhož je zobrazování založeno pouze na lomu světla. Čočka je průhledné (transparentní) těleso se dvěma lámavými povrchy, jejichž centrální osy splývají a tvoří jedinou centrální osu čočky. Čočky se vyrábějí zpravidla ze skla, jehož index lomu  $n_2$  je zpravidla vyšší než index lomu  $n_1$  prostředí, kterým obvykle bývá vzduch. Světlo



Obrázek 3.10: Průchod světla spojkou (a) a rozptylkou (b) (zdroj: [4])

dopadající na čočku se láme ze vzduchu do čočky, prochází čočkou a na rozhraní se opět láme do vzduchu, přičemž při každém lomu může změnit svůj směr.

Čočky se dělí na dva základní typy podle toho, jakým způsobem ovlivňuje průchod paprsků dopadajících rovnoběžně na povrch čočky (světelné paprsky z velmi vzdáleného zdroje, jakým je například Slunce). Pokud se tyto paprsky po průchodu čočkou sbíhají, nazývá se *spojkou* neboli spojnou (konvergentní) čočkou, pokud se rozbíhají, nazývá se *rozptylkou* neboli rozptylnou (divergentní) čočkou. Příklady průchodu světla čočkou jsou znázorněny na obr. 3.10.

Podobně jako zrcadlo lze čočku charakterizovat následujícími pojmy. Jde o optickou osu  $o$  procházející středy křivosti lámavých ploch  $C_1$ ,  $C_2$  a vrcholy lámavých ploch  $V_1$ ,  $V_2$ . Veličiny  $r_1$  a  $r_2$  jsou poloměry křivosti lámavých ploch čočky. Pro zjednodušení se budeme zabývat pouze speciálním případem tenké čočky, jejíž nejlustší část, tj. vzdálenost  $|V_1V_2|$  je ve srovnání s ostatními rozměry malá a lze ji zanedbat. Tím vrcholy lámavých ploch splývají do jediného bodu a tvoří optický střed  $O$  tenké čočky.

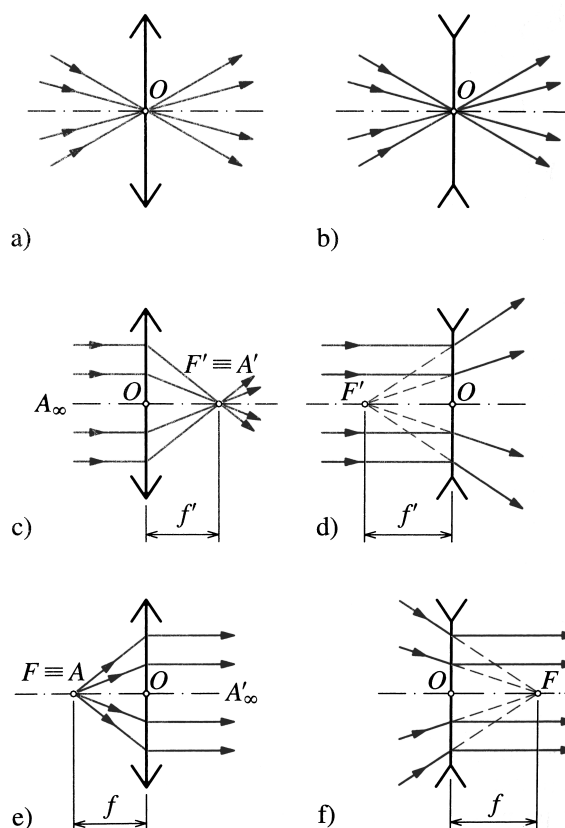
Prostor, ze kterého světlo do čočky vstupuje, se označuje jako prostor předmětový a prostor, do kterého se světlo po průchodu čočkou láme, jako prostor obrazový. Pro konstrukci obrazu vytvořeného tenkou čočkou jsou důležité opět tři význačné paprsky (obr. 3.11):

Paprsky procházející optickým středem tenké čočky nemění svůj směr. Paprsky v předmětovém prostoru rovnoběžné s optickou osou se při průchodu čočkou lámou tak, že v obrazovém prostoru směřují do bodu na optické ose, jenž se nazývá obrazové ohnisko  $F'$ . U spojky se paprsky v bodě  $F'$  protínají, tudíž ohnisko je skutečné. U rozptylky se paprsky po průchodu rozbíhají a jejich průsečík leží na jejich zpětném prodloužení v předmětovém prostoru, tzn. ohnisko je zdánlivé. Paprsky procházející předmětovým ohniskem spojky  $F$  ležícím v předmětovém prostoru jsou čočkou lámány tak, že v obrazovém prostoru směřují rovnoběžně s optickou osou. Předmětové ohnisko rozptylky ležící v obrazovém prostoru je zdánlivé. Sbíhavé paprsky, jejichž prodloužení se v něm protínají, jsou po průchodu rozptylkou rovnoběžné s optickou osou.

Vzdálenost  $|FO|$  se nazývá *předmětová ohnisková vzdálenost*, vzdálenost  $|F'O|$  *obrazová ohnisková vzdálenost*. Pro tenkou čočku obklopenou stejným prostředím se tyto vzdálenosti rovnají ( $f = f'$ ). Dále se tedy bude používat společné označení ohnisková vzdálenost  $f$ . Její velikost je závislá na indexu lomu skla čočky  $n_2$ , indexu lomu prostředí  $n_1$  (pro vzduch platí  $n_1 \approx 1$ ) a poloměrech křivosti  $r_1, r_2$  lámavých ploch a je vyjádřena vztahem

$$\frac{1}{f} = \left( \frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right). \quad (3.10)$$

Při výpočtu ohniskové vzdálenosti se používá znaménková konvence, kde je hodnota  $r$  vypuklých optických ploch kladná a dutých optických ploch záporná. Z toho vyplývá, že ohnisková vzdálenost spojky je rovněž kladná a její předmětové i obrazové ohnisko je skutečné. Ohnisková vzdálenost rozptylky je záporná a její ohniska jsou zdánlivá [4].



Obrázek 3.11: Význačné paprsky čočky (zdroj: [4])

Důležitou charakteristikou optického zobrazení je jeho zvětšení. Pro zvětšení čočky lze použít obecný vztah pro zvětšení obrazu, viz (3.5). Je ovšem nezbytné dodržovat znaménkovou konvenci. pro zobrazení čočkou platí, že předětová vzdálenost  $a$  je kladná, obrazová vzdálenost  $a'$  je kladná ve směru prostupu světla čočkou a v opačném směru je záporná [4].

Při zobrazování čočkou nastává několik možných případů zobrazení předmětu. Je-li předmět umístěn před ohniskem spojně čočky ( $a > f$ ), vzniká v obrazovém prostoru skutečný převrácený obraz (obr. 3.13 a). Ze znaménkové konvence platí, že  $a' > 0$ . Pokud se předmět nachází mezi ohniskem a optickým středem spojně čočky ( $a < f$ ), vzniká obraz v předmětovém prostoru, je tedy zdánlivý a má stejnou orientaci jako předmět, tzn. je vzpřímený (obr. 3.13 b). V tomto případě  $a' < 0$  [3].

Zvláštní případ nastane, umístíme-li předmět do ohniska spojně čočky (obr. 3.13). V tomto případě  $a = f$ , po dosazení do (3.5) vychází  $Z = -\frac{f}{f-f}$ , z toho vyplývá  $|Z| \rightarrow \infty$ . Vyjádříme-li ze vztahu (3.5) velikost obrazové vzdálenosti, pak  $a' = -Za$ , z čehož vyplývá  $a' \rightarrow \infty$ . Obraz je v nekonečnu [4].

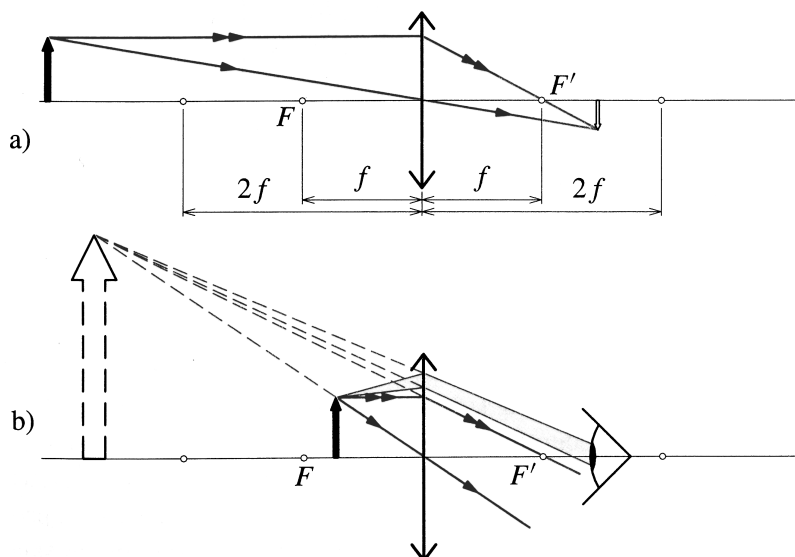
Při zobrazování rozptylnou čočkou vzniká nezávisle na předmětové vzdálenosti zdánlivý obraz v předmětovém prostoru, který je vzpřímený (obr. 3.14) [3].

Mezi předmětovou vzdáleností  $a$ , obrazovou vzdáleností  $a'$  a ohniskovou vzdáleností  $f$  tenké čočky platí vzájemný vztah, který vychází z obecné zobrazovací rovnice a nazývá se zobrazovací rovnicí tenké čočky [4]:

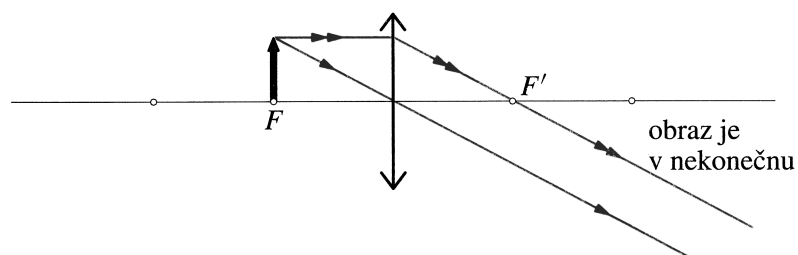
$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}. \quad (3.11)$$

Konstrukce obrazu vytvořeného čočkou vychází ze tří význačných paprsků, k sestrojení obrazu bodu stačí vždy dva z těchto tří paprsků [3].

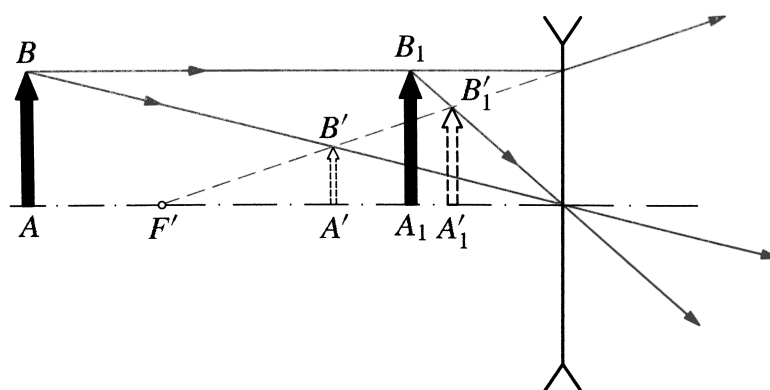




Obrázek 3.12: Zobrazení spojkou: předmět umístěný před ohniskem (a), předmět umístěný mezi ohniskem a optickým středem čočky (b) (zdroj: [4])



Obrázek 3.13: Zobrazení spojkou: předmět umístěný do ohniska (zdroj: [4])



Obrázek 3.14: Zobrazení rozptylkou (zdroj: [4])

---

## 4. Vady optického zobrazení

---

Způsoby zobrazení pomocí čoček a zrcadel popsané v předchozích kapitolách jsou platné v případě zobrazení souborem paprsků vedených v paraxiálním prostoru, tzn. pro paprsky procházející v malé vzdálenosti od osy optické soustavy a takové, které s ní svírají malý úhel. V případě zobrazení čočkou zatím nebyla uvažována závislost na vlnové délce světla.

Zobrazování skutečnými přístroji značně překračuje paraxiální prostor a zobrazení jimi poskytované se liší od dokonalého. Vyrůstá-li šíře pole nebo účinný průměr čočky, případně obojí současně, dochází k odchylkám od ideálního zobrazení. tyto odchylky se projevují zobrazením bodu jako plošky, zobrazením roviny kolmé k optické ose jako rotační plochy, zobrazením přímky ležící v předmětové rovině a neprotínající optickou osu jako křivky. Světlem různé vlnové délky se zobrazí předmět v různých místech a v různé velikosti [5].

Odchylky zobrazení se nevyskytují pouze na okrajích zorného pole, ale rovněž na optické ose a porušená je i podobnost mezi předmětem a obrazem. Odchylky v zobrazení reálnou optickou soustavou od zobrazení ideálního se nazývají *vadami optické soustavy* nebo také *aberacemi*. Některé aberace se vztahují pouze k monochromatickému světlu a nazývají se monochromatické vady. Patří k nim otvorová vada, koma, astigmatismus, zklenutí pole a zkreslení. Otvorová vada se projevuje při zobrazení bodu na optické ose monochromatickým světlem. Ostatní čtyři vady se projevují při zobrazení mimoosového bodu monochromatickým světlem [1]. Kromě toho se projevují vady zobrazení závislé na různosti vlnových délek světla, nazývané vady chromatické. Řadí se k nim barevná vada velikosti a barevná vada polohy [7].

### 4.1 Monochromatické vady zobrazení

#### 4.1.1 Otvorová vada

*Otvorová vada* (též *sférická aberace*) vzniká působením paprsků procházejících okrajem spojně čočky. Příčinou otvorové vady je to, že v předmětovém prostoru rovnoběžný paprsek s optickou osou vzdálenější od této osy vytvoří v obrazovém prostoru průsečík s optickou osou blíže k čočce než paprsek bližší, viz obr. 4.1. Otvorová vada vzniká, dopadá-li z bodu na optické ose na optickou soustavu široký svazek paprsků. Otvorová vada je tím výraznější, čím větší je vstupní otvor čočky [8].

V důsledku otvorové vady se jako obraz bodu v obrazové rovině nevytvoří opět bod, ale rozptylový kroužek o průměru  $2\Delta l_K$ . Otvorová vada je charakterizována veličinou  $\Delta s_K$ , která se nazývá osovou sférickou aberací. Je definována jako rozdíl sečných vzdáleností  $s_K$  pro daný průměr svazku paprsků  $2h_K$  pro obrazy paprsků z okraje otvoru a paraxiálních paprsků:

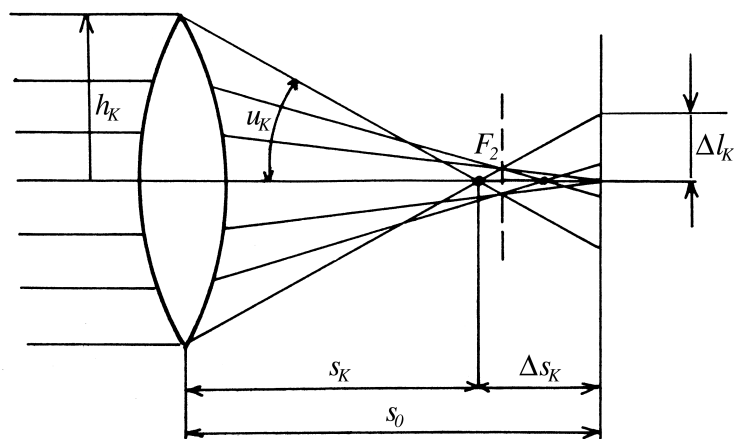
$$\Delta s_K = s_K - s_0. \quad (4.1)$$

Otvorová vada se posuzuje rovněž podle velikosti poloměru rozptylového kroužku  $\Delta l_K$ . Tato veličina se nazývá příčnou sférickou aberací a s osovou sférickou aberací  $\Delta s_K$  ji propojuje vztah

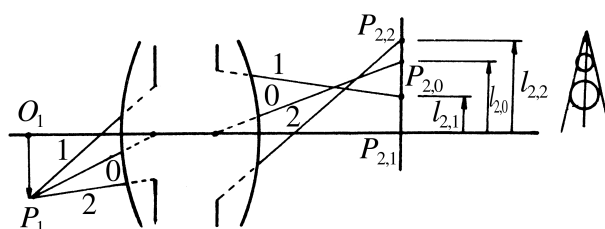
$$\Delta l_K = \Delta s_K \tan u_K,$$

kde  $u_K$  představuje úhel, který svírá nejkrajnější paprsek s optickou osou.

Pro spojně čočky platí  $\Delta s_K < 0$ , optická soustava je *nedokorigována*. Je-li  $\Delta s_K > 0$ , jedná se o soustavu *překorigovanou* a tento vztah platí pro čočky rozptylné. Sférickou aberaci lze korigovat spojením spojky a rozptylky do optické soustavy, nelze ji však odstranit úplně. Otvorová



Obrázek 4.1: Otvorová vada (zdroj: [1])



Obrázek 4.2: Vznik komy (zdroj: [1])

vada může být zcela odstraněna jen pro určitou výšku, tzv. zónu, ale pro ostatní zóny zůstane aberace zachována, i když v mnohem menší míře než bez korekce. Ve složitějších optických soustavách lze sférickou aberaci odstranit i pro více zón současně.

V závislosti na korekci sférické aberace nemusí nejostřejší obraz vznikat v ohniskové rovině paraxiálních paprsků, ale může vznikat v jiné obrazové rovině, v níž mají rozptylové kroužky vhodnější parametry. Tato rovina se nazývá *rovinou optimálního zaostření* [1].

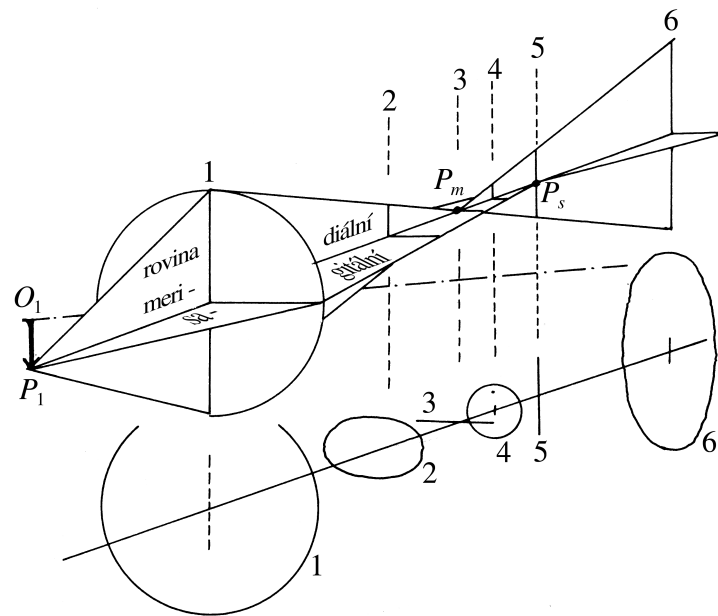
Otvorová vada je u čoček stejné ohniskové vzdálenosti a stejného otvoru závislá na poloze předmětu, na tvaru čočky a na indexu lomu skla čočky [5]. Otvorová vada se snižuje s rostoucím indexem lomu skla. Otvorová vada se snižuje zacloněním objektivu, tzn. zmenšením vstupního otvoru. Při tom se mění i poloha roviny optimálního zaostření [1].

#### 4.1.2 Koma

*Koma* je mimoosová aberace, při níž dochází k rozostření okrajů obrazu [8]. Vzniká, když na optickou soustavu dopadá svazek různoběžných paprsků vycházejících z bodu neležícího na optické ose. Krajiné paprsky svazku vycházející v předmětovém prostoru z bodu  $P_1$ , symetrické k hlavnímu paprsku, protnou v obrazovém prostoru obrazovou rovinu v bodech  $P_{2,1}$  a  $P_{2,2}$ , nesymetricky k průsečíku  $P_{2,0}$  hlavního obrazového paprsku s obrazovou rovinou (obr. 4.2). Výsledkem je asymetrický rozptylný kroužek podobající se kometě, jejíž chvost ubíhá směrem k okrajům obrazu.

Označíme  $l_{2,0}$ ,  $l_{2,1}$ ,  $l_{2,2}$  výšky obrazových bodů  $P_{2,0}$ ,  $P_{2,1}$ ,  $P_{2,2}$ . Pak lze velikost komy v dané obrazové rovině vyjádřit vztahem

$$K = \frac{1}{2} (l_{2,1} + l_{2,2} - l_{2,0}). \quad (4.2)$$



Obrázek 4.3: Astigmatismus (zdroj: [1])

Vada se zvětšuje při zvyšování zorného úhlu optické soustavy a velikosti vstupního otvoru. Společně s otvorovou vadou je koma nejvýraznějším nedostatkem optického zobrazení, neboť se projevuje v celém zorném poli včetně jeho středu. Korekce komy je nezbytná ve všech zobrazovacích systémech se širokými svazky paprsků, bez ohledu na zorný úhel.

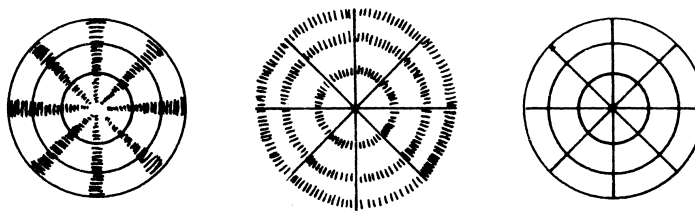
Komu nelze zcela odstranit, lze toho docílit jen pro paprsky určitého sklonu. Pro ostatní paprsky se aberace koriguje na přijatelnou míru [1]. Potlačení komy podobně jako sférické aberace lze dosáhnout vhodnou volbou tvaru čočky. Optické soustavy potlačující sférickou aberaci a komy se nazývají *aplanatické* [7].

### 4.1.3 Astigmatismus a zklenutí pole

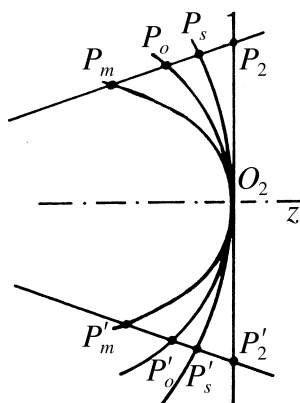
Při pozorování pod velkými zornými úhly se projevují další dvě vady, astigmatismus a zklenutí pole. *Astigmatismus* spočívá v tom, že dva ploché svazky paprsků vycházející z mimooosového bodu  $P_1$  a ležící ve dvou k sobě kolmých rovinách zobrazují v obrazovém prostoru bod  $P_1$  jako dva body  $P_m$  a  $P_s$  (obr. 4.3). Rovina, v níž leží paprsky zobrazující bod  $P_m$ , se nazývá *meridiánová* (též *tangenciální*) a prochází optickou osou a je svislá. V rovině *sagitální*, jež je kolmá na rovinu meridiánovou a prochází hlavním paprskem, leží paprsky zobrazující bod  $P_s$ .

Vzdálenost  $|P_m P_s|$ , měřená po hlavním paprsku, je charakteristickou veličinou astigmatismu a nazývá se *astigmatickou diferencí* [1]. Astigmatismus se projevuje tak, že při zobrazení bodu nedojde k vytvoření bodového obrazu, ale dojde ke vzniku dvou čárek ležících v různých rovinách a směrech. Vzdálenost obrazových čárek se zvětšuje směrem k okrajům obrazového pole a roste se zvyšující se šikmostí paprsků dopadajících na optickou soustavu, tzn. zvětšujícím se zorným úhlem [8]. Typicky se astigmatismus projevuje při zobrazování testovacího rovinného obrazce, sestávajícího z několika soustředných kružnic a jejich radiál (obr. 4.4). V obrazové rovině meridiálního zobrazení se zobrazí ostře kružnice, v rovině sagitálního zobrazení budou ostré radiály. Astigmatismus se odstraňuje vhodnou kombinací čoček [1].

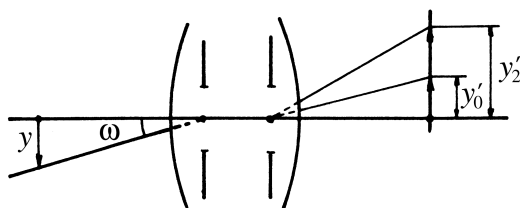
S astigmatismem souvisí další vada, *zklenutí pole*. Zklenutí způsobuje, že ostrý obraz není vytvořen na vyrovnaném poli, ale na části kulové plochy (obr. 4.5). To je rozdíl oproti teoretickému ideálnímu zobrazení, které předpokládá vznik obrazu v obrazové rovině. V praxi se zklenutí pole projevuje tak, že při zaostření předmětů na okrajích zorného pole se střed pole



Obrázek 4.4: Testovací obrazec pro astigmatismus (zdroj: [1])



Obrázek 4.5: Zklenutí pole (zdroj: [1])



Obrázek 4.6: Zkreslení (zdroj: [1])

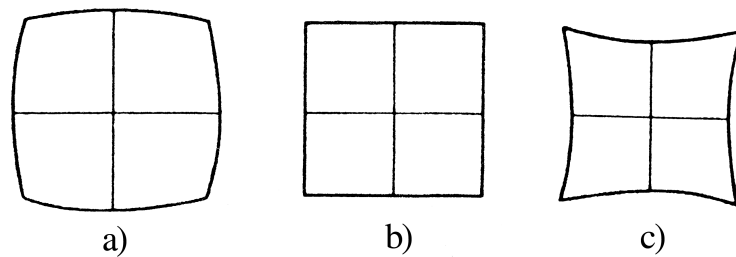
nezobrazí ostře a naopak. Zklenutí pole se odstraňuje vhodně umístěnou rovinou clony objektivu vzhledem k ostatním optickým členům[8]. Objektivy, u nichž jsou astigmatismus a zklenutí pole téměř dokonale odstraněny, se označují termínem *anastigmaty*[1].

#### 4.1.4 Zkreslení

V ideální optické soustavě platí pro příčné zvětšení  $Z = konst.$  Z toho vyplývá, že pro jakýkoli pár sdružených úseček ve sdružených rovinách je obraz přesně podobný předmětu. Tato vlastnost zobrazení se nazývá *ortoskopie* a příslušný optický systém je ortoskopický. Pro příčné zvětšení  $Z$ , velikost předmětu  $y$  a velikost obrazu  $y'$  pak platí vztah (3.2):

$$Z = \frac{y'}{y}. \quad (4.3)$$

V reálných optických soustavách však nedochází k dokonalé ortoskopii a proto je narušena podobnost mezi předmětem a jeho obrazem. Vada, která ortoskopii narušuje, se nazývá *zkreslení* (též *distorze*) [1]. Zkreslení obrazu se projevuje tím, že se měřítko zobrazení (velikost příčného zvětšení) mění ve směru od optické osy čočky směrem k okraji obrazového pole [8]. Předmět  $y$  se vlivem zkreslení zobrazí v délce  $y'_2$ , zatímco velikost ideálního obrazu je  $y'_0$ , viz obr. 4.6.



Obrázek 4.7: Zkreslení soudkovité (a), obraz bez zkreslení (b), zkreslení poduškovité (c) (zdroj: [8])

Pokud platí, že  $Z = \frac{y'_2}{y}$  je skutečné příčné zvětšení pro bod pozorovaný pod úhlem  $\omega$  a  $Z_0 = \frac{y'_0}{y}$  je příčné zvětšení pro tentýž bod v ideální soustavě, vyjadřuje míru zkreslení vztah

$$v = \frac{Z - Z_0}{Z_0} = \frac{Z}{Z_0} - 1, \quad (4.4)$$

kde  $v$  je veličina nazývaná se *relativní distorze*. Zpravidla je udávána v procentech. Nacházeli se předmět v nekonečnu, nelze relativní distorzi vypočítat z výše uvedeného vztahu (4.4). Dosazením příslušných poměrů do vztahu pro příčné zvětšení lze získat vztah

$$v = \frac{\frac{y'_2}{y} - \frac{y'_0}{y}}{\frac{y'_0}{y}} = \frac{y'_2 - y'_0}{y'_0} = \frac{\Delta y'}{y'_0}, \quad (4.5)$$

kde  $\Delta y'$  představuje *absolutní* nebo též *optickou distorzi*, pro kterou platí

$$\Delta y' = y'_2 - y'_0. \quad (4.6)$$

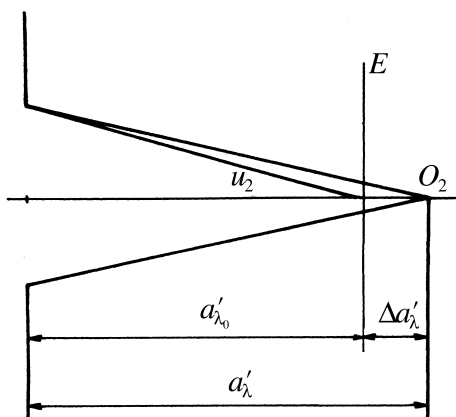
Vliv zkreslení se zpravidla znázorňuje na zobrazení, kde předmět tvoří pravidelná čtvercová mřížka [7]. Distorze může nabývat kladných nebo záporných hodnot. Pokud  $v > 0$ , tzn.  $Z > Z_0$ , vznikne při zobrazení čtvercové sítě deformovaný obraz ve tvaru podušky a zkreslení je nazýváno *poduškovité*. Je-li  $v < 0$ , tzn.  $Z < Z_0$ , dostaneme při zobrazení čtvercové sítě obraz soudkovitého tvaru a zkreslení se nazývá *soudkovité* (obr. 4.7) [1].

Poduškovité zkreslení nastává v případech, kdy je clona objektivu umístěna před čočkou obrácenou vydutou stranou do předmětového prostoru. K soudkovitému zkreslení dochází v případech, kdy je clona umístěna za čočkou vypuklou směrem do předmětového prostoru. Potlačení zkreslení lze dosáhnout změnou polohy clony nebo umístěním kompenzačních členů (čoček) do optické soustavy [8]. Skvělých výsledků v korekci zkreslení dosahují objektivy, které mají symetrickou stavbu čoček vzhledem ke cloně [1].

## 4.2 Chromatické vady zobrazení

V předchozích sekcích byly popsány vady optického zobrazení, které vznikají při zobrazování paprsky jednobarevného (monochromatického) světla). Žádný skutečný zdroj však nevysílá záření, které by bylo přesně monochromatické. Ve skutečnosti je světlo vysílané předměty do okolí složeno z paprsků různých vlnových délek. Většina zdrojů světla, s nimiž se v praxi setkáváme, vysílá světlo širokého spektra vlnových délek, tj. světlo polychromatické [5].

Vlastností optických materiálů je *disperze*, tzn. závislost indexu lomu materiálu na vlnové délce světla, které jím prochází. Zobrazuje-li se předmět polychromatickým zářením, odpovídá



Obrázek 4.8: Barevná vada polohy (zdroj: [1])

paprsku tohoto záření vstupujícímu do optické soustavy celé spektrum paprsků z ní vystupujících. Vystupující paprsky odpovídají jednotlivým vlnovým délkám, na které bylo rozloženo polychromatické světlo v důsledku disperze optického materiálu [2].

#### 4.2.1 Barevná vada polohy

Pro zobrazení polychromatickým světlem existuje závislost ohniskové vzdálenosti čočky na vlnové délce světla díky disperzi optického materiálu. Z toho důvodu se poloha ohnisek čočky liší pro různé druhy světla [7]. Zobrazovací rovina optického přístroje, v níž vzniká obraz předmětu, může být ztotožněna s rovinou zaostření vždy jen pro světlo určité vlnové délky  $\lambda_0$ . Toto záření se nazývá *nejúčinnější záření* a volí se jako střední z celého spektra vysílaného zdrojem, s ohledem na citlivost přijímače (filmu, snímače) na jednotlivé složky spektra. Přijímač se umístí uje do zobrazovací roviny ležící kolmo k optické ose v ohnisku  $F_0$ , jehož polohu určují paprsky světla o vlnové délce  $\lambda_0$ . Pro ostatní vlnové délky obsažené ve spektru záření předmětu vznikají ohniska mimo polohu bodu  $F_0$ , ostré obrazy se tedy vytvářejí mimo zobrazovací rovinu a v rovině přijímače vznikají rozptylové kroužky (obr. 4.8). Tato vada se nazývá *chromatická vada polohy* [1].

Ostrý obraz  $P_2$  bodového zdroje  $P_1$  umístěného na optické ose se vytvoří pro určitou vlnovou délku  $\lambda$  odlišnou od  $\lambda_0$  ve vzdálenosti  $\Delta a'_\lambda$  od obrazové roviny. Veličina

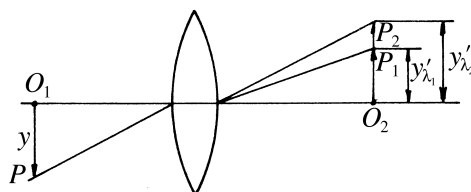
$$\Delta a'_\lambda = a'_\lambda - a'_{\lambda_0} \quad (4.7)$$

se nazývá *chromatická aberace*. Svazek paprsků světla vlnové délky  $\lambda$  vytvoří v obrazové rovině rozptylový kroužek o poloměru

$$r_\lambda = \Delta a'_\lambda \cdot \tan u_2, \quad (4.8)$$

kde  $u_2$  je úhel paprsku ležícího v obrazovém prostoru po průchodu optickou soustavou (obr. 4.8). Hodnota  $\Delta a'_\lambda$  je nezávislá na průměru výstupního otvoru čočky, zatímco závislost velikosti rozptylového kroužku na velikosti výstupního otvoru je daná velikostí úhlu  $u_2$ .

Hodnoty chromatické aberace  $\Delta a'_\lambda$  nabývají pro spojné a rozptylné čočky opačného znaménka. Toho lze využít při korekci vady [1]. Chromatickou vadu lze korigovat v okolí určité vlnové délky kombinací spojné a rozptylné čočky umístěných těsně za sebou, přičemž materiál každé čočky má jiný index lomu světla [7]. Odstraněním chromatické vady polohy se tato vada neodstraní pro paprsky všech vlnových délek. Pokud  $a'_{\lambda_1} = a'_{\lambda_0}$ , je vada odstraněna právě pro tyto dvě vlnové délky. Chromatická vada ve zbyvajícím spektru se nazývá *sekundární spektrum*. Objektivy s korekcí tohoto typu se nazývají *achromáty*. Ve zvláštních případech lze docílit



Obrázek 4.9: Barevná vada velikosti (zdroj: [1])

totožné polohy ohnisek pro tři vlnové délky. Zbývající chromatickou vadu pak nazýváme *terciárním spektrem* a optickou soustavu s touto korekcí *apochromátem*. Apochromáty se využívají v konstrukci moderních dalekohledů a fotoaparátů pro barevnou fotografii. U širokouhlých fotografických objektivů je odstranění chromatické vady polohy velmi obtížné [1].

### 4.2.2 Barevná vada velikosti

*Barevná vada velikosti* se projevuje při zobrazení mimoosových bodů předmětu. Její příčina spočívá v tom, že výška obrazu závisí na vlnové délce světla vyzařovaného předmětem. Obraz předmětu je pak barevně lemován. Barevná vada velikosti je znázorněna na obr. 4.9. Hlavní paprsek bílého světla vycházející z mimoosového bodu  $P$  předmětu ve vzdálenosti  $y$  od optické osy se po průchodu optickou soustavou rozloží na celé spektrum paprsků odpovídajících jednotlivým vlnovým délkám světla. Tyto paprsky protínají obrazovou rovinu v různých vzdálenostech od optické osy. Odpovídající paprsky pro vlnové délky světla  $\lambda_1$  a  $\lambda_2$  protínají obrazovou rovinu v bodech  $P'_1$  a  $P'_2$ , které se nacházejí ve vzdálenostech  $y'_{\lambda_1}$  a  $y'_{\lambda_2}$  od optické osy.

Veličina

$$\Delta y'_{\lambda} = y'_{\lambda_1} - y'_{\lambda_2} \quad (4.9)$$

charakterizuje chromatickou vadu velikosti [2]. Podle [1] se aberace odstraňuje vhodným rozestavením čoček s ohniskovými vzdálenostmi  $f_1$  a  $f_2$  ze skla o stejném indexu lomu do vzdálenosti

$$d = \frac{f_1 + f_2}{2}. \quad (4.10)$$

## 4.3 Vinětace

*Vinětace* není optickou vadou v pravém slova smyslu, jedná se o vlastnost některých optických soustav. Projevuje se ztmavením okrajů obrazu u optických zařízení se širokým úhlem záběru, její výskyt je typický u fotografických objektivů. Příčinou vinětace je nedostatečný osvit okrajů snímací plochy vzhledem k jejímu středu. Tento nedostatečný osvit je způsoben pohlcováním světelných paprsků procházejících okraji optické soustavy. Paprsky jsou pohlcovány jak stěnou tubusu, tak samotnými čočkami, jejichž zakřivené okraje vykazují odlišnou pohltivost světla proti střední části. Efekt vinětace může být v obraze škodlivý, v některých případech však může podpořit výtvarný fotografický záměr.



## 5. Vybrané zobrazovací přístroje

Zobrazovací přístroje se rozdělují na dva druhy podle toho, zda vytvářejí obraz zdánlivý nebo skutečný. První skupina se nazývá přístroje *subjektivní* a patří do ní například lupy, mikroskopy a dalekohledy. Druhou skupinu tvoří přístroje *objektivní* a tvoří ji přístroje fotografické, zvětšovací, reprodukční a promítací [6]. V následující podkapitole budou popsány vybrané zobrazovací přístroje z obou skupin.

### 5.1 Lupa

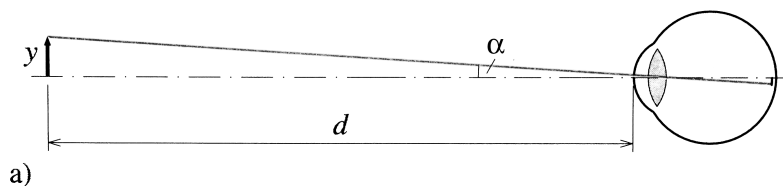
Lidské oko je schopno zaostřit obraz na sítnici, je-li předmět umístěn ve vzdálenosti od nekonečna až po určitý bod, který se nazývá blízkým bodem. Posune-li se předmět blíže oku, než v jaké vzdálenosti leží blízký bod, oko jej již na sítnici nedokáže zaostřit a vnímaný obraz je rozostřen. Poloha blízkého bodu se mění s věkem. V následujících vztazích bude blízký bod položen do vzdálenosti  $d = 25$  cm od oka. Vzdálenost  $d$  se nazývá *konvenční zraková vzdálenost*. Velikost obrazu vykresleného na sítnici závisí na zorném úhlu  $\alpha$ , který předmět zabírá v zorném poli oka (obr. 5.1). Předmět výšky  $y$  vidíme v konvenční zrakové vzdálenosti  $d$  pod zorným úhlem  $\alpha$ , pro který platí  $\tan \alpha = \frac{y}{d}$ , pro malé hodnoty zorného úhlu lze vztah upravit na

$$\alpha = \frac{y}{d}. \quad (5.1)$$

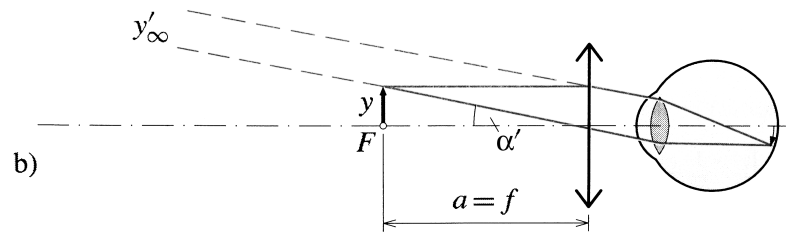
Přiblížením předmětu k oku se zvětší zorný úhel a tím i zvětšení obrazu předmětu na sítnici. Pokud je však předmět blíže, než je vzdálenost blízkého bodu, není předmět zaostřený, tzn. je nezřetelný. Ostrost obrazu lze obnovit prohlížením předmětu přes spojnou čočku [3].

*Lupa* je nejjednodušší optické zařízení, které dovoluje člověku pozorovat malé předměty nebo detaily, jež není schopen pouhým okem rozlišit. Lupa představuje spojnou soustavu, tvořenou nejčastěji jedinou vypuklou čočkou, případně jejich dvojicí či trojicí [7]. Poskytuje zdánlivý zvětšený obraz, který oko převádí na obraz skutečný. Zvětšení lupy závisí na její ohniskové vzdálenosti  $f_L$ , akomodaci oka a vzájemné poloze předmětu, oka a lupy. Pro ohniskovou vzdálenost lupy zpravidla platí  $f_L < d$ . Zvětšení lupy se obvykle uvádí pro dva případy [4].

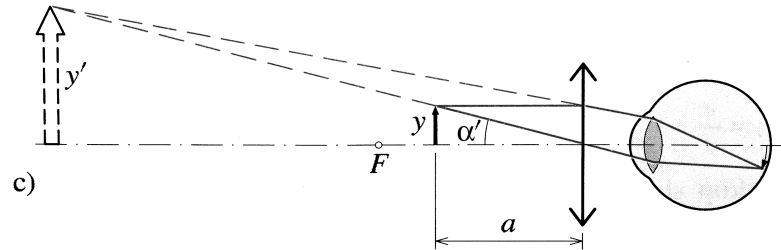
V prvním případě je předmět umístěn do předmětového ohniska lupy, takže v obrazovém prostoru jsou paprsky rovnoběžné a předmět pozorujeme okem bez akomodace, jako by ležel v nekonečnu (obr. 5.2). Předmět pozorujeme pod zorným úhlem  $\alpha'$ , pro který platí (pro malé úhly)  $\alpha' = \frac{y}{f_L}$ . Zobrazení předmětu lupou pak charakterizuje úhlové zvětšení  $\gamma$ , které je dáno vztahem:



Obrázek 5.1: Zorný úhel pro předmět v konvenční zrakové vzdálenosti (zdroj: [4])



Obrázek 5.2: Pozorování předmětu lupou bez akomodace oka (zdroj: [4])



Obrázek 5.3: Pozorování předmětu lupou při akomodaci oka (zdroj: [4])

$$\gamma_{\infty} = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{\frac{y}{f}}{\frac{y}{d}} = \frac{d}{f} = \frac{25 \text{ cm}}{f}. \quad (5.2)$$

Druhým případem, v praxi obvyklejším, je umístění předmětu do vzdálenosti  $a$ , která je menší než ohnisková vzdálenost lupy ( $a < f_L$ ). Vzniká tak zdánlivý vzpřímený obraz předmětu, což je nezbytné například pro čtení [7]. Lupa je v tomto případě bezprostředně před okem, takže vzájemnou vzdálenost lze zanedbat. Předmětovou vzdálenost  $a$  volíme tak, aby zdánlivý obraz vznikl v konvenční zrakové vzdálenosti  $d$  (obr. 5.3). V tomto případě dochází k akomodaci oka. Pro zorný úhel (pro malé úhly) pak platí  $\alpha' = \frac{y'}{d} = \frac{y}{a}$  a pro úhlové zvětšení

$$\gamma_L = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{\frac{y}{a}}{\frac{y}{d}} = \frac{d}{a} = \frac{25 \text{ cm}}{a}. \quad (5.3)$$

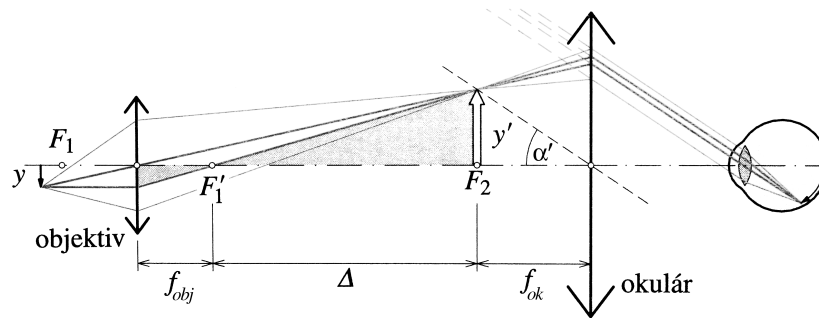
Pro daný případ ( $a' = -d$ ) lze pak psát zobrazovací rovnici čočky ve tvaru  $\frac{1}{a} - \frac{1}{d} = \frac{1}{f}$ . Po vyjádření  $a$  a dosazení do vztahu (5.3) dostaneme

$$\gamma_L = \frac{d}{f} + 1. \quad (5.4)$$

## 5.2 Mikroskop

Pro pozorování velmi malých objektů lze výrazně zvýšit zvětšení optické soustavy, když k lupě přidáme ještě jednu čočku. Nejjednodušší *mikroskop* je sestaven ze dvou spojných čoček ležících na společné optické ose, objektivu a okuláru. Objektiv má malou ohniskovou vzdálenost, ohnisko okuláru je výrazně větší [7]. Odstup mezi objektivem a okulárem je větší než součet ohniskových vzdáleností obou čoček. Vzdálenost mezi obrazovým ohniskem objektivu a předmětovým ohniskem okuláru se nazývá optická délka tubusu, přesněji *optický interval*  $\Delta$  (obr. 5.4) [1].

Předmět se umístí uje před objektiv do vzdálenosti ležící mezi jedno- a dvojnásobkem ohniskové vzdálenosti  $f_{obj}$  objektivu [1]. Pokud je mikroskop zaostřen, tj. je vhodně nastaven



Obrázek 5.4: Schema mikroskopu (zdroj: [4])

optický interval, vznikne prvotní obraz vytvořený objektivem v ohniskové rovině okuláru, což znamená, že po průchodu okulárem vstupují do oka rovnoběžné paprsky. Za těchto podmínek platí pro zvětšení okuláru vztah (5.2). Příčné zvětšení při zobrazení objektivem je dáno vztahem  $\gamma = -\frac{\Delta}{f_{obj}}$ . Pro celkové zvětšení optické soustavy mikroskopu pak platí

$$\gamma_M = \gamma_{obj} \cdot \gamma_{ok} = -\frac{\Delta}{f_{obj}} \frac{d}{f_{ok}} = \frac{-25 \text{ cm} \cdot \Delta}{f_{obj} \cdot f_{ok}} \quad (5.5)$$

Objektivem vytvořený skutečný obraz v ohniskové rovině okuláru musí být v co největší míře zbaven vad, které by omezovaly rozlišovací schopnost mikroskopu. Podmínky kladené na objektiv mikroskopu jsou: korekce barevné vady polohy, korekce otvorové vady. Korekce barevné vady polohy není obtížná, naproti tomu není snadné odstranit barevnou vadu velikosti [6]. Pro malá zvětšení objektivu ( $3\times - 5\times$ ) se užívají achromáty se smolenými čočkami, pro střední zvětšení se dává přednost apochromátům [1].

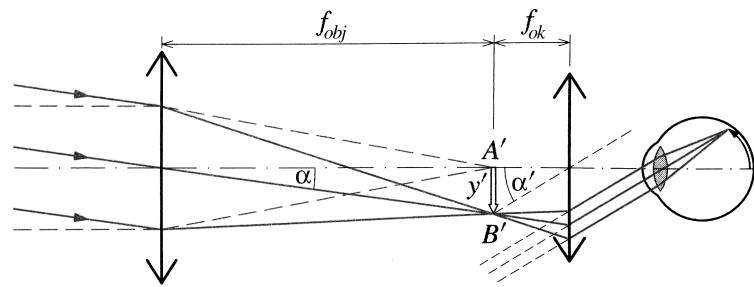
V obraze získaném objektivem zůstává zklenutí pole, barevná vada velikosti a zkreslení. Úplného odstranění zklenutí lze dosáhnout použitím achromatické rozptylné čočky. Pomocí nich se zobrazí rovina tak, že křivost jejího obrazu má právě opačné znaménko než křivost obrazu vytvořeného objektivem. Každý objektiv mikroskopu lze kombinovat s vhodně zvolenou rozptylkou a získat dokonale rovinný obraz. Barevnou vadu velikosti a zkreslení lze odstranit okulárem [6].

Okuláry musí být zbaveny barevné velikosti a zklenutí pole. Vada otvorová a koma mají menší význam [1].

### 5.3 Dalekohled

*Dalekohled* je optický přístroj sloužící k rozlišení podrobností velmi vzdálených předmětů. Uspořádání dalekohledu je podobné jako u mikroskopu – obraz je též vytvářen pomocí soustavy dvou čoček, objektivu a okuláru. Dalekohled však musí být uzpůsoben pro pozorování vzdálených předmětů [3]. Jelikož oko pozoruje vzdálené předměty bez akomodace, je nezbytné, aby rovněž obraz vzdáleného předmětu, získaný optickou soustavou, byl pozorován bez akomodace oka. Toho je dosaženo vzájemnou polohou objektivu a okuláru, kdy obrazová ohnisková rovina objektivu splývá s předmětovou ohniskovou rovinou okuláru [6]. Objektivem vstupuje do dalekohledu svazek rovnoběžných paprsků a v obrazovém ohnisku objektivu vzniká obraz  $y'$ . Jelikož obraz vzniká v předmětovém ohnisku okuláru, vystupuje z okuláru opět svazek rovnoběžných paprsků, který pozorujeme okem bez akomodace [4].

Na rozdíl od mikroskopu tedy není objektiv oddělen od okuláru optickým intervalem, resp. má optický interval dalekohledu hodnotu  $\Delta = 0$ . Objektiv má poměrně velkou ohniskovou vzdálenost, zatímco ohnisková vzdálenost okuláru je podstatně menší. Objektivem dalekohledu je



Obrázek 5.5: Keplerův dalekohled (zdroj: [4])

vždy spojná čočka, případně spojná soustava čoček. Okulár může představovat soustavu spojnou, pak se jedná o *Keplerův dalekohled*, nebo rozptylnou, potom se přístroj nazývá *Galileův dalekohled* [6].

Aby se usnadnilo pozorování předmětů, vyrábějí se vedle dalekohledů pro pozorování jedním okem (monokulární dalekohledy) i dalekohledy pro pozorování oběma očima (binokulární dalekohledy) [1].

Objektiv Keplerova dalekohledu (obr. 5.5) vytváří v předmětovém ohnisku skutečný převrácený obraz a na sítnici oka vzniká obraz vzpřímený, proto jej vnímáme jako převrácený. Pro astronomické a geodetické účely to však nevádí. Do splývajícího ohniska objektivu a okuláru, kde vzniká primární obraz, lze umístit měřicí značky, které pak vidíme společně s obrazem, což vyvolává pocit, jako by byly umístěny v krajině. Pro pozemské pozorování je nutné převrátit obraz vzniklý objektivem, čehož lze docílit použitím čoček nebo zrcadel, resp. optických hranolů. Hranoly mají tu výhodu, že významně sníží délku přístroje a v případě binokulárního dalekohledu umožňují umístit objektivy od sebe dále než je oční rozestup, což napomáhá vnímání hloubky prostoru. Dalekohled s těmito parametry se nazývá *triedr* [6].

Obraz vytvořený objektivem Galileovým dalekohledem je pro rozptylnou soustavu okuláru zdánlivým předmětem. Tento typ dalekohledu nemá reálnou obrazovou rovinu, v níž by bylo možné umístit měřicí značky. Výhodou Galileova dalekohledu je, že vytváří vzpřímený obraz [6].

Úhlové zvětšení dalekohledu

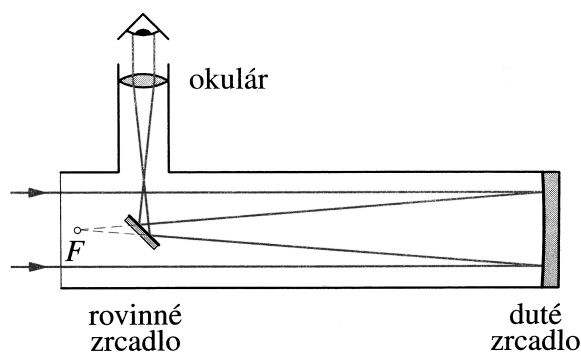
$$\gamma = \frac{\alpha'}{\alpha} \quad (5.6)$$

je dáno poměrem zorného úhlu obrazu  $\alpha'$  tvořeného dalekohledem a zorného úhlu  $\alpha$  vzdáleného předmětu, který pozorujeme pouhým okem. Předpokládáme-li, že jsou oba zorné úhly malé, platí pro ně podle obr. schema dalekohledu vztahy  $\alpha' = \frac{y'}{f_{ok}}$  a  $\alpha = \frac{y'}{f_{obj}}$ . Po dosazení do vztahu (5.6) dostáváme

$$\gamma = \frac{f_{obj}}{f_{ok}} \quad (5.7)$$

Dalekohledy, které jako objektiv využívají čočky, se nazývají *refraktory*, neboť využívají zobrazení lomem světla. U objektivu dalekohledu je požadována korekce otvorové vady, komy a barevné vady polohy. Dokud se pro objektiv používala jednoduchá čočka, byla kvalita obrazu velmi nepříznivě ovlivněna barevnou vadou polohy. Teprve konstrukcí achromatické čočky byl tento problém odstraněn. Korekční požadavky u objektivu jsou menší než u okuláru, u kterého je třeba korigovat astigmatismus, zklenutí, zkreslení a barevnou vadu velikosti. Naopak výroba objektivu musí být přesnější než výroba okuláru, neboť chyby zobrazení objektivem jsou okulárem zvětšovány v poměru  $\frac{25 \text{ cm}}{f_{ok}}$  [6].

K vědeckým účelům v astronomii slouží *zrcadlové dalekohledy*, které k zobrazování využívají odraz světla (obr. 5.6). Proto jsou označovány jako *reflektory*. Objektivem je duté zrcadlo velkých rozměrů, které má tvar rotačního paraboloidu. Rovnoběžné paprsky přicházející od



Obrázek 5.6: Zrcadlový dalekohled (zdroj: [4])

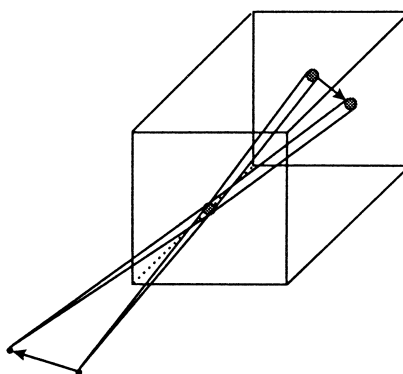
vzdáleného objektu jsou dutým zrcadlem soustředěny do ohniska zrcadla. Aby bylo možné obraz pozorovat, jsou paprsky ještě před ohniskem odchýleny rovinným zrcadlem mimo tubus, kde v přemístěném ohnisku vytvářejí primární obraz. Do přemístěného ohniska je umístěno předmětové ohnisko okuláru. Ohnisková vzdálenost reflektoru je dána křivostí zrcadla, otvorová vada jeho tvarem, barevná vada se nevyskytuje. Koma není korigována, z toho důvodu mají zrcadlové dalekohledy malé zorné pole.

## 5.4 Fotografický přístroj

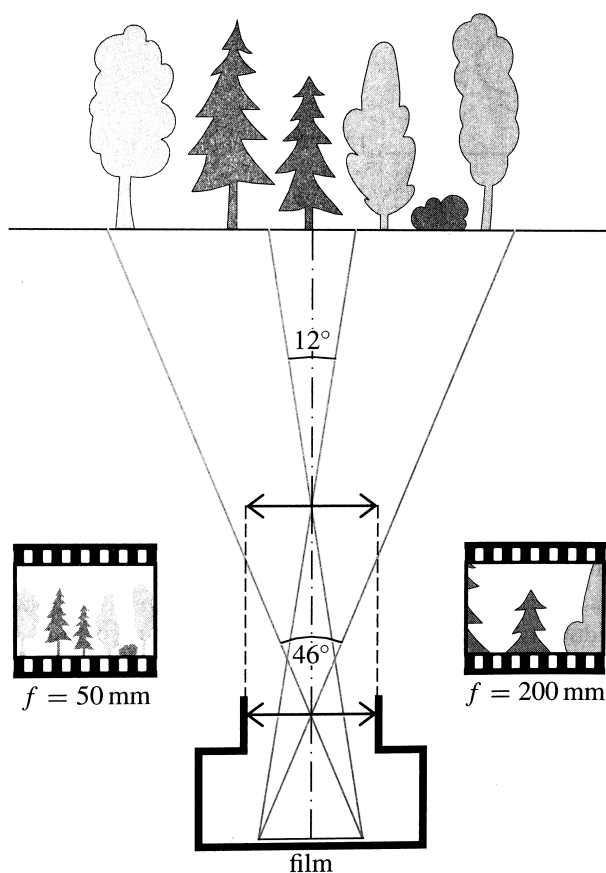
Fotoaparát je zobrazovací přístroj sloužící k záznamu obrazu. Proto musí být konstruován jako objektivní přístroj, vytvářející skutečný obraz. Fotoaparátem vytvořený skutečný obraz vzniká na rovinné snímací ploše a je zaznamenáván na fotografický film nebo pomocí elektronického snímače.

Nejjednodušším typem fotoaparátu je *camera obscura* (dírková komora), krabice s jediným otvorem na přední stěně v podobě malé kruhové clony, kterou dovnitř vniká světlo (obr. 5.7). Fotografický film je umístěn na stěně ležící naproti kruhové cloně. Paprsky vycházející z každého bodu předmětu se šíří všemi směry, pouze jejich malá část projde clonou a dopadne na film na zadní stěně. Každému bodu předmětu tak odpovídá obraz v podobě malého kroužku v rovině filmu. Velikost kroužku je přímo úměrná průměru clony. Příliš velký poloměr clony způsobí, že se jednotlivé kroužky výrazně překrývají a obraz se jeví nezřetelný, pro velmi malou clonu se již projevuje difrakce a obraz je opět nejasný. Těmito podmínkami je ohraničen interval pro optimální velikost clony pro tvorbu ostrého obrazu. Optimální clonou však projde malé množství světla a je nutné použít dlouhý expoziční čas ke správné expozici filmu. Z toho důvodu jsou fotografické přístroje vybaveny objektivy, které jsou schopny vytvořit požadovaný obraz a exponovat film za použití mnohem kratších časů [7].

Objektiv fotoaparátu je tvořen spojnou zobrazovací soustavou, v nejjednodušším případě jedinou spojnou čočkou. Obraz vytvořený objektivem je skutečný, převrácený a zmenšený [4]. Fotografický obraz se na snímací ploše vytváří středovým promítáním. Obrazy předmětů se s jejich vzdáleností zmenšují, rovnoběžky jsou zobrazeny rovnoběžně jen v případě, když jsou rovnoběžné s obrazovou rovinou, jinak se zobrazují jako sbíhající se přímky s průsečíkem na horizontu. Tyto vlastnosti jsou charakteristické pro perspektivu [1]. Základními parametry objektivu jsou ohnisková vzdálenost a světelnost. *Ohnisková vzdálenost* rozhoduje o úhlu, který vymezují krajní paprsky přicházející z objektu. Tento úhel se nazývá *úhel záběru* (obr. 5.8). S klesající ohniskovou vzdáleností roste úhel záběru a tím i velikost prostoru, který bude na snímku zobrazen. Objektiv, jehož ohnisková vzdálenost se rovná délce úhlopříčky filmového políčka, nebo také jehož perspektiva se blíží perspektivě, s jakou vnímá skutečnost lidské oko,



Obrázek 5.7: Camera obscura (zdroj: [7])



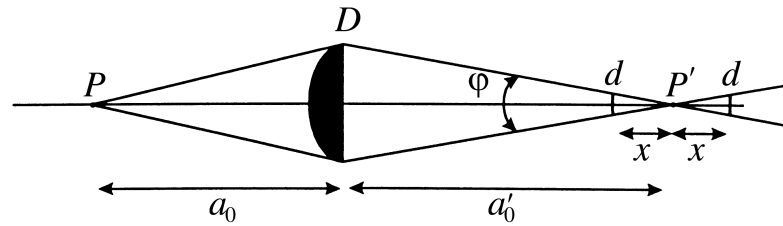
Obrázek 5.8: Úhel záběru fotoaparátu (zdroj: [4])

se nazývá *normální objektiv*. Pro standardní rozměr kinofilmového políčka 36 x 24 mm je tato vzdálenost 43 mm. Objektivy s kratší ohniskovou vzdáleností se nazývají *širokouhlé objektivy*, objektivy s delší ohniskovou vzdáleností jsou *teleobjektivy* [4].

*Světelnost* objektivu rozhoduje o toku světla, které prochází objektivem na snímací médium. Čím je světelnost vyšší, tím více světla dopadá na film, a to umožňuje pro danou expozici zkrátit expoziční čas. Poměr

$$\frac{D}{f} = \frac{1}{N} \quad (5.8)$$

kde  $D$  je průměr clonového otvoru a  $f$  je ohnisková vzdálenost objektivu, se nazývá *geometrický relativní otvor* objektivu a představuje jeho světelnost. Jeho převrácená hodnota  $N$  je *geome-*



Obrázek 5.9: Hloubka ostrosti (zdroj: [7])

*trické clonové číslo.* Při nastavení nejvyššího možného průměru  $D_{max}$  clonového otvoru (tzv. účinný otvor) má objektiv nejvyšší světelnost. Té odpovídá základní clonové číslo  $N_{max}$ , které bývá vyznačeno na objímce objektivu spolu se jmenovitou ohniskovou vzdáleností udávanou v mm (např. 1,4/50). U starších objektivů je místo clonového čísla vyznačena světelnost: 1:1,4/50. U moderních složitějších objektivů se udávají *efektivní clonová čísla*  $N_e$ , v jejichž hodnotě je zahrnut i vliv výsledné světelné propustnosti objektivu [1].

Světelný tok procházející na citlivou vrstvu musí být regulovatelný. K tomu slouží clona s měnitelným průměrem a závěrka. Množství světla, které projde *clonou*, je úměrné druhé mocnině jejího průměru. Řada clonových čísel má takový krok, aby se při nastavení vyššího clonového čísla snížila expozice filmu přesně  $2\times$ . Aby se tak stalo, musí se průměr  $D$  clonového otvoru snížit  $\sqrt{2}\times$ . Při volbě řady se vycházelo z clonového čísla 1 a vznikla tak geometrická řada clonových čísel s kvocientem  $\sqrt{2}$ . Její podoba v přibližném tvaru je následující:

$$1 - 1,4 - 2 - 2,8 - 4 - 5,6 - 8 - 11 - 16 - 22 \dots \quad (5.9)$$

*Závěrka* slouží k nastavení expozičního času fotoaparátu. Po stisknutí spouště se závěrka na určitou dobu otevře a probíhá osvit snímacího média. Závislost hodnoty expozice na expozičním čase je lineární. Podobně jako řada clonových čísel, i kroky rychlosti závěrky udávané ve zlomcích sekundy jsou nastavené tak, aby se s každým krokem snížila expozice  $2\times$ . Řada je kvůli přehlednosti mírně upravena a čísla ve jmenovatelných zlomků tak neodpovídají vždy mocninám čísla 2 [4]:

$$1 - 1/2 - 1/4 - 1/8 - 1/15 - 1/30 - 1/60 - 1/125 - 1/250 - 1/500 \dots \quad (5.10)$$

Je-li objektiv fotoaparátu zaostřen na určitou vzdálenost  $a_0$ , vznikne obraz v rovině filmu ve vzdálenosti  $a'_0$ . Bližší, resp. vzdálenější předměty se zobrazí před, resp. za rovinou filmu. V rovině filmu tedy nevznikne ostrý obraz těchto bodů, ale body se zobrazí jako kroužky. Pokud je ovšem průměr kroužku menší, než je schopen film rozlišit, působí obraz těchto bodů stejně ostře jako obraz bodů ležících v zaostřené vzdálenosti. Vzdálenost mezi nejbližšími a nejbližšími předměty, pro něž se při určitém zaostření jeví jejich zobrazení jako ostré, se nazývá *hloubka ostrosti* (obr. 5.9).

Jeví-li se zobrazení bodu jako ostré při poloměru  $d$  vzniklého kroužku v rovině filmu, znamená to, že obraz odpovídající hranicím hloubky ostrosti může být posunut o  $\pm x$  vůči rovině filmu. Poloze obrazu  $a'_0 \pm x$  odpovídají polohy předmětu  $a_1$ , resp.  $a_2$ . Vztah mezi příslušnými dvojicemi předmětových a obrazových vzdáleností vyjadřuje Gaussova zobrazovací rovnice (3.6):

$$a'_0 = \frac{f' a_0}{f' + a_0}, \quad (5.11)$$

$$a_1 = \frac{(a'_0 + x) f'}{f' - a'_0 - x}, \quad (5.12)$$

$$a_2 = \frac{(a'_0 - x)f'}{f' - a'_0 + x}. \quad (5.13)$$

Z obrázku vyplývá (pro malé úhly)  $\tan \varphi \approx \frac{D}{a'_0} = \frac{d}{x} \implies x \approx \frac{da'_0}{D}$ , kde  $D$  je průměr vstupního otvoru. Pro hloubku ostrosti pak platí

$$a_2 - a_1 = \frac{2Nda_0(a_0 - f')f'^2}{f'^4 - N^2d^2a_0^2}, \quad (5.14)$$

kde  $N = \frac{f'}{D}$  je clonové číslo, viz vztah (5.8) [7].

Objektiv je nejcennější součástí fotoaparátu. Na rozdíl od objektivu mikroskopu či dalekohledu existuje u fotoaparátu požadavek na vykreslení značného pole při velkém otvoru. Optická soustava objektivu fotoaparátu je nejnáročnější na výpočet, neboť musí být korigovány všechny vady [6].



---

## 6. Zpracování obrazu

---

### 6.1 Klasický fotografický proces

#### 6.1.1 Účinek světelného záření na halogenidy stříbra

Existuje mnoho sloučenin, které podléhají účinkem světelného záření chemickým změnám, avšak jen jedna z těchto reakcí má velký význam pro použití ve fotografii. Touto reakcí je fotolytický rozklad halogenidů stříbra (chloridy, jodidy, bromidy) na kovové stříbro a volné halogeny. Roku 1727 německý lékař a vědec Johann Heinrich Schulze dospěl ke zjištění, že chlorid stříbrný na světle tmavne [8]. Černání chloridu stříbrného, které pozoroval, však ještě nevedlo k objevu fotografie. Aby došlo k fotolytickému rozkladu chloridu stříbrného, byly nutné neúnosně dlouhé expozice slunečním světlem, v řádu stovek hodin. Teprve Francouz Louis Daguerre roku 1839 a nezávisle na něm Angličan William Talbot roku 1835 zjistili, že k získání přijatelného obrazu stačí vrstvu chloridu nebo jodidu stříbra osvětlovat nepoměrně kratší dobu, projde-li následně dodatečným chemickým zpracováním. Pro získání obrazu pak stačila je nepatrná, pouhým okem neviditelná chemická změna halogenidu stříbrného, která se označuje jako vznik *latentního obrazu*. Při této změně vznikají ve vrstvě halogenidu stříbra tzv. vyvolávací centra, na nichž se při dodatečném chemickém zpracování, tzn. při vyvolávání, vylučuje kovové stříbro. Tato procedura zesiluje působení světla  $10^8 \times$  až  $10^9 \times$  a tvoří základ fotografického procesu založeného na využití rozkladu halogenidů stříbra [9].

Daguerre své pokusy založil na účinku par jodu. Působením jodových par na povrchu kovového stříbra vznikne vrstva velice jemných krystalků jodidu stříbrného. Po expozici se desky vyvolávaly vystavením účinku rtuťových par, což zapříčinilo tvorbu stříbrného amalgámu. Amalgám je na rozdíl od černého jemně rozptýleného stříbra světlem zbarven, a tak se tímto postupem tvořil ihned pozitivní obraz. Tento proces je po svém vynálezcovi nazýván *daguerrotypie*.

Roku 1840 provedl Talbot pokus s papírem napuštěným roztokem jodidu draselného a roztokem dusičnanu stříbrného obsahujícím kyselinu gallovou. Jako výsledek reakce dvou roztoků se na papíře vysrážel jodid stříbrný. Když se tento papír ještě mokřý vložil do kamery obskury a nechal exponovat, bylo po jeho vyjmutí možné pozorovat vznikající obraz. Kyselina gallová obsažená v roztoku posloužila jako vývojka. Tímto postupem vznikl obraz s převrácenou stupnicí jasů – černobílý negativ. Když se papír zprůhlednil napuštěním roztaveným parafínem, bylo možné prosvětlením takto upraveného negativu exponovat další papír s vysráženým jodidem stříbrným a získat tak pozitivní obraz. Tento proces se nazývá *talbotypie* a dnešní fotografické procesy z něj vycházejí [9].

Chloridy, jodidy a bromidy jsou soli, jejichž molekuly se skládají z kladně a záporně nabitých částic – kationtů a aniontů. Kationty, jako např.  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{K}^+$  nebo  $\text{Na}^+$ , a anionty, např.  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{Br}^-$  nebo  $\text{S}^{2-}$  jsou elementárními částicemi solí. Z těchto elementárních částic tvoří soli v tuhém stavu krystaly přesně definovaného tvaru. V krystalu bromidu stříbrného je okolo každého kationtu  $\text{Ag}^+$  rozmístěno 6 aniontů  $\text{Br}^-$  a okolo každého aniontu  $\text{Br}^-$  6 kationtů  $\text{Ag}^+$ . Tím vzniká pravidelně uspořádaná krystalová mřížka, v tomto případě krychlová.

Jsou-li všechna místa v krystalové mřížce zaplněna, jsou rovněž zcela vyrovnány náboje elementárních částic. Je-li některé místo neobsazené, nebo jej obsadil cizí ion, např.  $\text{S}^{2-}$ , dochází ke vzniku tzv. mřížkové poruchy. Místa s mřížkovou poruchou jsou pro fotografii velmi důležitá, neboť ovlivňují citlivost fotografického materiálu. Světelná energie působící na krystal

halogenidu stříbrného umožní odtržení jednoho elektronu z bromidového aniontu:



Z bromidového aniontu vznikne atom bromu. Atom bromu může reagovat s jinou látkou nebo s dalším atomem bromu, pak vytvoří molekulu bromu, která se vypaří do okolí. Atom bromu se rovněž může spojit zpět s elektronem a vytvořit bromidový ion z vzniku tepla. Pokud k žádné z těchto reakcí nedojde, zůstává v krystalové mřížce přebytek volných elektronů. Ty se spojují se stříbrnými kationty a vznikají atomy kovového stříbra [9]:



Citlivá vrstva v dnešní době běžně používaných fotografických negativních filmů je v podstatě tenká vrstvička želatiny, v níž je jemně rozptýlena světlocitlivá látka, nejčastěji směs bromidu, chloridu a jodidu stříbrného. Želatina nepředstavuje pouze prostředí pro halogenidy stříbra, ale je sama aktivní složkou, která má vliv na fotografické vlastnosti materiálu, jako jsou jeho obecná citlivost, zrnitost a strmost [10].

### 6.1.2 Vznik latentního obrazu

Velmi čisté krystaly halogenidů stříbra, v nichž jsou zcela vyrovnány náboje elementárních částic, jsou jen velmi málo citlivé ke světlu. Příčinou zvýšené citlivosti jsou mřížkové poruchy, tj. příměsi jiných iontů, nerovnoměrnosti ve stavbě krystalové mřížky a neobsazená místa v krystalové mřížce. Poruchy krystalové stavby nastávají zabudováním cizího iontu nebo tím, že krystal vyrostl příliš rychle. Nejvíce zárodků latentního obrazu vzniká na nových hranách a vrcholech, protože náboje iontů zde nejsou navzájem tak dokonale kompenzovány jako uvnitř krystalu. Tato místa se označují jako *centra citlivosti*.

Nachází-li se v mřížce na místě jednovazného bromidového iontu dvou vazný sulfidový ion, je jeho přebytečný záporný náboj kompenzován přítomností kationtu stříbra v tzv. mezimřížkové (intersticiální) poloze. Také vlivem tepelného pohybu mohou některé ionty stříbra vyskočit ze své správné polohy do intersticiální polohy. Bromidové ionty se ze svých poloh tak snadno neuvolňují. Kompenzace nábojů pak není dokonalá a vzniká další porucha.

Absorbuje-li krystal bromidu stříbrného jeden foton, odtrhne se z bromidového iontu jeden elektron. Uvolněné elektrony se slučují se stříbrnými kationty, čímž vzniknou atomy stříbra. Tento děj však neprobíhá kdekoli v krystalu, ale jen na zvýhodněných místech, v centrech citlivosti. Tyto děje se musí v centru citlivosti několikrát zopakovat, aby vznikly agregáty atomů stříbra schopné vytvořit vyvolatelný zárodek.

Účinnost center citlivosti se násobí tím, že do nich přitáhne více než jeden ion stříbra, čímž vznikne stabilní vyvolatelný zárodek, tzv. *vyvolávací centrum*. Nejsnáze se s volnými elektrony slučují ionty stříbra ležící na vrcholech krystalů. Atomy stříbra, které zde vzniknou, se stabilizují zachycením dalšího intersticiálního stříbrného iontu. Vzniklý agregát  $\text{Ag}_2^+$  je zárodkem vyvolávacího centra. Postupně se na něm zachycují další elektrony a intersticiální stříbrné ionty a vytvoří se vyvolávací centrum [9].

### 6.1.3 Vyvolávání

*Vyvoláváním* se latentní obraz zesílí  $10^8 \times$  až  $10^9 \times$  a získá se tím viditelný obraz. Podstatou vyvolávání je redukce exponovaných stříbrných iontů vyvolávací látkou. Redukční činidlo reaguje s exponovaným halogenidem stříbra podstatně rychleji než s neexponovaným. Příčinou tohoto urychlení jsou vyvolávací zárodky latentního obrazu v exponovaných místech citlivé vrstvy. Obvykle se vyvolávání provádí tak, že se na fotografický materiál působí roztokem obsahujícím vyvolávací látku. Kromě ní roztok obsahuje ještě další podpurné látky, zajišťující

stabilitu a správnou funkci vývojky. jedná se zejména o látky chránící vyvolávací látku před oxidací a látky sloužící k potlačení závoje.

Redukce, která při vyvolávání probíhá, je nutně spjata s oxidací. Zatímco se halogenidy stříbra redukují na kovové stříbro, látkou, která se oxiduje, je vyvolávací látka. Příkladem tohoto děje může být použití železnaté vývojky, která se hojně využívala v minulosti. Vyvolávací látku zde představuje dvouvalný železnatý kation, který se oxiduje na třívalný kation železitý:

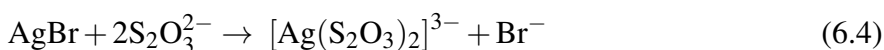


V současné době se jako vývojky používají téměř výhradně organické sloučeniny, přičemž nejúčinnějšími látkami jsou aromatické sloučeniny, především hydroxyderiváty a aminoderiváty benzenu.

Kovové stříbro a s ním i viditelný obraz nezačne v citlivé vrstvě filmu vznikat ihned po jejím styku s vývojkou, ale teprve po uplynutí určité doby. Tato doba se nazývá indukční perioda. Poté se rychlost vzniku stříbra postupně zvyšuje až do dosažení maximální optické hustoty. Celý vyvolávací proces trvá u negativů obvykle 6 až 14 minut. Po určité době je dosaženo maximální optické hustoty v exponovaných místech filmu a zárodky latentního obrazu se přestanou vyvolávat. Neukončíme-li v tuto chvíli vyvolávání, redukce pokračuje dále na neosvětlených místech a vzniká závoj. Prodlužováním vyvolávací doby roste citlivost, strmost, zrnitost a závoj. Tyto vlastnosti fotografického materiálu budou podrobněji popsány v části 6.1.5. Pro získání bezvadných negativů je nutné dodržet určitou dobu vyvolávání, pro daný typ filmu předem pokusně zjištěnou. Delší doba způsobí vyvolání i neexponovaného halogenidu stříbra a v málo osvětlených místech obrazu vzniknou tmavé plochy bez kresby [9].

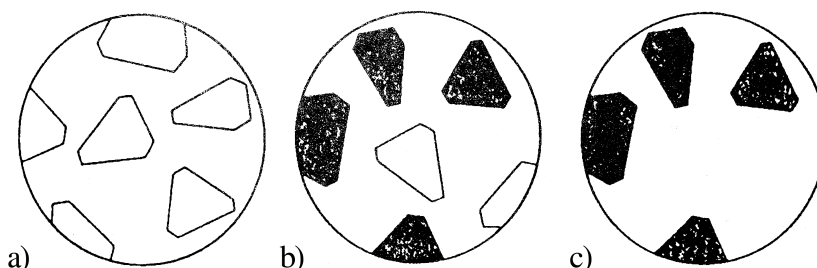
#### 6.1.4 Ustalování a vypírání

Správně vyvolaná citlivá vrstva filmu obsahuje na neexponovaných místech nepřeměněné halogenidy stříbra. Tyto částice by při styku se světlem jeho působením zčernaly a došlo by ke znehodnocení obrazu. Proto musí citlivá vrstva po vyvolání projít procesem stabilizace, který se nazývá *ustalování*. Ustalování se provádí prakticky výhradně působením roztoku thiosíranu na citlivou vrstvu, při kterém se mění nerozpustný halogenid stříbra na rozpustnou komplexní sloučeninu, viz rovnice (6.4). Ta se pak odstraňuje *vypíráním* v čisté vodě.

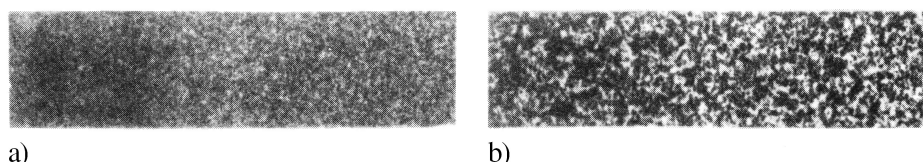


Pro praxi je důležité, aby se ustalování nepřerušilo příliš brzy a aby byl po celou dobu v lázni přítomen dostatečný nadbytek thiosíranových iontů. Ve vyčerpaném ustalovači se pochod zastaví ve stadiu thiosíranových komplexů  $[\text{Ag}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^-$ , které jsou nesnadno rozpustné a z citlivé vrstvy se obtížně vypírají. Jejich přítomnost v citlivé vrstvě způsobuje pozdější pozvolné znehodnocování obrazu. Opakovaným užíváním se v ustalovači zvyšuje obsah halogenidu stříbra, což je příčinou klesající rychlosti ustalování. Zvláště výrazné zpomalení ustalovacího účinku způsobuje přítomnost jodidů, které se v ustalovači vždy vyskytují, neboť fotografické materiály obsahují většinou směs halogenidů stříbra, tedy i jodid stříbrný. Použití příliš vyčerpaného ustalovače s vysokým obsahem rozpuštěných halogenidů stříbra může způsobit, že bromid stříbrný se rozpustí, avšak jodid v citlivé vrstvě zůstane. Na obr. 6.1 je schematicky znázorněn stav citlivé vrstvy po jednotlivých základních operacích, tzn. po expozici a vzniku latentního obrazu, po vyvolávání a po ustalování.

Z ustáleného materiálu je nutné důkladným vypráním čistou vodou odstranit veškerý thiosíran. Při nedostatečném vyprání dochází k jeho pozvolnému rozkladu za působení kyslíku a vzdušné vlhkosti, stříbro v ustálené vrstvě se pak mění na hnědý sulfid stříbrný, čímž dojde k znehodnocení obrazu. Dokonalé vyprání ustalovače z filmu nepředstavuje problém, neboť je



Obrázek 6.1: Latentní obraz (a), vyvolaný obraz (b), ustálený obraz (c) (zdroj: [8])



Obrázek 6.2: Zrnitost málo citlivého materiálu (a) a vysoce citlivého materiálu (b) (zdroj: [9])

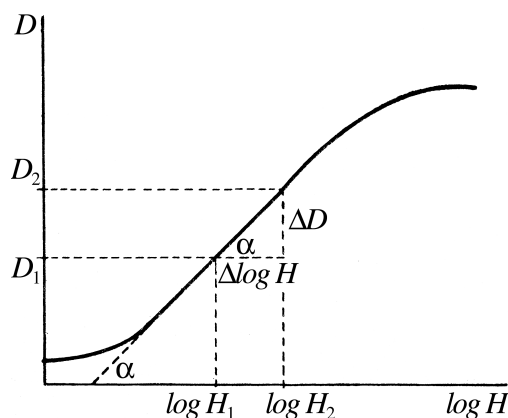
zde citlivá vrstva nanese na tenkou želatinovou vrstvu. U fotografických papírů je však vypírání mnohem obtížnější z důvodu jejich nasákovosti. papírová podložka zadržuje ustalovač a to tím pevněji, čím déle byl papír ponořen v lázni a čím byla tato lázeň kyselejší. Z papírů se silnou kartonovou podložkou ustalovač prakticky nelze dokonale odstranit. Pro zvýšení účinnosti vypírání je vhodné před samotným praním ponechat papíry po dobu 2 až 3 minut v roztoku uhličitanu sodného o koncentraci 1% [9].

### 6.1.5 Vlastnosti světlocitlivých vrstev

Jakost vzniklého obrazu se určuje podle toho, do jaké míry obraz splňuje požadavky na něj kladené. Pro fotografické citlivé vrstvy jsou důležité zejména tyto vlastnosti: zrnitost, citlivost, strmost, rozlišovací schopnost, hranová ostrost, a trvanlivost. Kvalitativním a kvantitativním stanovením těchto vlastností se zabývá fotografická senzimetrie.

*Zrnitost* citlivé vrstvy je dána velikostí a rozložením zrn halogenidů stříbra v želatinové vrstvě [10]. Velikost zrn v jedné vrstvě se pohybuje v okolí určité střední hodnoty, která je velmi rozdílná podle technologie výroby a účelu, k jakému je daný fotografický materiál uzpůsoben. Velikost zrn významně ovlivňuje další fotografické vlastnosti. Čím větší rozměry má krystal halogenidu stříbra, tím větší je pravděpodobnost, že bude exponován dostatečně velkým kvantem světla a stane se tak vyvolatelným. Hrubozrnná citlivá vrstva je tak citlivější k dopadajícímu světlu než vrstva jemnozrnná (obr. 6.2). Z této úměry vyplývá vyloučení možnosti dosažení velké citlivosti při zachování jemnozrnnosti. Velmi citlivé materiály vždy disponují hrubším zrnem. Z toho vyplývá omezení, které se projeví při pořizování zvětšenin velkých rozměrů. Při dosažení určité míry zvětšení se v šedých plochách pozitivu objeví viditelná nehomogenní struktura. Míra zvětšení, při kterém tato struktura ještě není viditelná, se nazývá mezním zvětšením a slouží jako kvalitativní ukazatel míry zrnitosti fotografických materiálů. Spíše než zrnitost citlivé vrstvy, na které závisí další vlastnosti materiálu, je ve fotografické praxi sledována zrnitost vyvolaného obrazu, která je tvořena shluky stříbrných zrn [9].

*Citlivost* je schopnost fotografické vrstvy pozměnit se působením určitého množství světla nebo jiného záření. Mírou citlivosti je nejmenší množství světla, které je schopné vyvolat v citlivé vrstvě prakticky použitelnou změnu. V běžné fotografii je nejdůležitější citlivost k bílému dennímu světlu nazývaná obecná citlivost. Veličina, která ji vyjadřuje, se značí  $S$ . Citlivost je nezbytnou složkou pro výpočet expoziční doby materiálu [10].



Obrázek 6.3: Senzitometrická charakteristika (zdroj: [9])

Pro výklad citlivosti je třeba uvést definici optické hustoty  $D$ . Optická hustota vyjadřuje míru zčernání resp. světelné propustnosti fotografického materiálu na logaritmické stupnici. Vrstva s optickou hustotou  $D = 1$  propouští  $10^{-1}$  násobek dopadajícího světla, vrstva s optickou hustotou  $D = 2$  propouští  $10^{-2}$  násobek světla atd. Z řady  $10^{-1}$ ;  $10^{-2}$ ;  $10^{-3}$  ... vyčteme, že hodnoty optické hustoty  $D = 1$ ;  $2$ ;  $3$  ... odpovídají záporným dekadickým logaritmům činitele prostupu světla (*transmittance*). Pro fotografii významné hodnoty optické hustoty se nacházejí v intervalu  $D \in (0, 1; 3)$ , což odpovídá transmittanci 80 až 0,1%. Velikost optické hustoty je dána vztahem

$$D = \log(Et), \quad (6.5)$$

kde  $E$  je intenzita osvětlení a  $t$  expoziční doba [9].

Závislost optické hustoty na hodnotě expozice vyjadřuje charakteristická křivka, nazývaná *senzitometrická charakteristika* (obr. 6.3). Na svislou osu  $y$  se vynáší optická hustota  $D$  a na vodorovnou osu  $x$  logaritmy expozice  $H = Et$ . Pouze střední část křivky, která je lineární, splňuje vztah (6.5), v krajních hodnotách expozice se závislost od tohoto vztahu již odchyľuje. To znamená, že míra zčernání citlivé vrstvy není zcela lineárně závislá na osvětlení. Křivka začíná v bodě  $D_0$  na ose  $y$  a zpočátku probíhá rovnoběžně s osou  $x$ . Míra zčernání v této oblasti je velmi malá a není způsobena osvětlením. Toto slabé zčernání se nazývá závoj. V bodě  $D_{max}$  je dosaženo maximálního zčernání, což značí, že všechna zrna halogenidu stříbra v dané oblasti byla redukována na kovové stříbro. Senzitometrická charakteristika nejlépe charakterizuje chování fotografických citlivých vrstev.

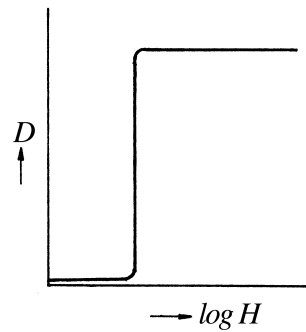
Ze senzitometrické charakteristiky lze odečíst i obecnou citlivost. Číselně ji lze vyjádřit jako převrácenou hodnotu expozice potřebné k dosažení určité míry zčernání. Ve světě dosud nebylo dosaženo jednotného názoru na základní velikost této hodnoty. Německá norma DIN, americká ASA a jiné státní normy volí jako základ takovou hodnotu expozice, která způsobí v citlivé vrstvě zčernání hodnoty 0,1 nad závojem. Americká norma ASA stanoví citlivost vztahem

$$S_{ASA} = \frac{0,8}{H}, \quad (6.6)$$

kde  $H$  značí expozici nutnou k dosažení  $D = D_0 + 0,1$ .

Sklon přímky ve střední části senzitometrické charakteristiky (viz obr. 6.3) lze vyjádřit úhlem  $\alpha$ , který svírá přímka se základnou. Tangenta tohoto úhlu se nazývá *strmost citlivé vrstvy* (též koeficient kontrastu)  $G$  a lze ji vyjádřit vztahem

$$G = \tan \alpha = \frac{D_2 - D_1}{\log H_2 - \log H_1} = \frac{\Delta D}{\Delta \log H}, \quad (6.7)$$



Obrázek 6.4: Vysoká strmost materiálu (zdroj: [9])

kde  $D_1$  a  $D_2$  jsou dvě hodnoty optické hustoty, mezi kterými se strmost sleduje, a  $H_1$ ,  $H_2$  jsou jim odpovídající hodnoty expozice.  $\Delta D$  představuje rozdíl optických hustot a  $\Delta \log H$  rozdíl logaritmů odpovídajících expozic. Strmost udává, jakým způsobem podává citlivá vrstva rozdíly jasů zobrazované skutečnosti, tedy jejich kontrasty. Při sklonu přímky  $45^\circ$ , tedy  $G = \tan 45^\circ = 1$ , zobrazuje citlivá vrstva rozdíly jasů předmětu zcela věrně a jedná se o tzv. strmost normální. Při strmosti  $G > 1$  jsou kontrasty zvětšeny a při strmosti  $G < 1$  jsou kontrasty menší, rozdíly jasů jsou méně výrazné a obraz působí plošším dojmem [10].

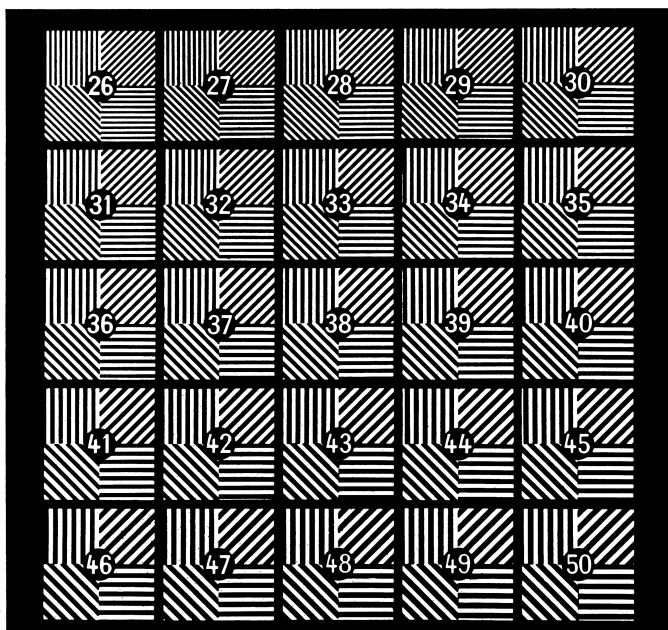
V případě citlivé vrstvy, kde by byly všechny krystaly halogenidu stříbra stejně velké a měly přesně stejnou citlivost ke světlu, by měla citlivá vrstva senzimetrickou charakteristiku jako na obr. 6.4. Expozice pod mezní hodnotou by na citlivou vrstvu neměla žádný vliv, zatímco osvit jen mírně vyšší by způsobil vyvolatelnost zárodků ve všech krystalech. Materiály s takto vysokou strmostí existují a využívají se pro speciální účely. Běžně však citlivost stejně velkých zárodků halogenidu stříbra není shodná díky rozdílům ve struktuře a povrchu krystalů. Velikost krystalů ve vrstvě je také značně rozdílná a tak se citlivost běžné fotografické vrstvy pohybuje v poměrně širokém rozmezí. Díky tomu je strmost standardních fotografických materiálů nižší, což umožňuje obrazovou fotografii [9].

Zrnitost citlivé vrstvy ovlivňuje další velmi důležitou vlastnost vrstvy, zvanou *rozlišovací schopnost*. Určuje, do jaké míry je obraz vzniklý ve fotografické vrstvě schopen reprodukovat podrobnosti předmětu. V praxi se vyjadřuje počtem čárek zobrazených na 1 mm délky, přičemž mezery mezi čárkami jsou stejně široké jako čárky. Stanovení se provádí ofotografováním předlohy, např. Foucaultova testu (obr. 6.5). Rozlišovací schopnost  $R$  stanovená výsledkem Foucaultova testu se pak vypočítá použitím vzorce

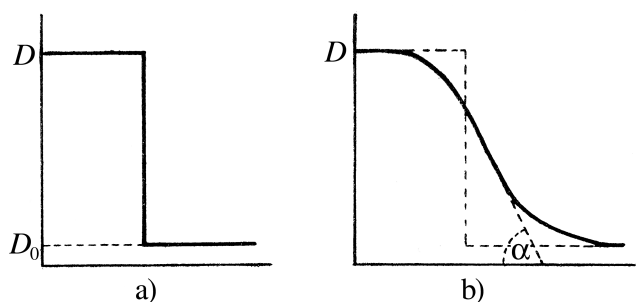
$$R = \frac{20 \cdot V}{n}, \quad (6.8)$$

kde  $V$  udává míru zmenšení testu a  $n$  je nejnižší číslo pole, kde ještě došlo k rozlišení čar. Šířka čar v jednotlivých polích má hodnotu  $\frac{n}{20}$  mm, proto se ve vzorci vyskytuje číslo 20. Jelikož rozlišovací schopnost závisí na zrnitosti materiálu, závisí zároveň i na jeho citlivosti. U velmi citlivých negativních filmů je podle normy ČSN udávána rozlišovací schopnost  $R = 40 \div 55 \text{ č} \cdot \text{mm}^{-1}$ , u málo citlivých filmů je tato hodnota  $R = 80 \text{ č} \cdot \text{mm}^{-1}$  [10].

Ostrost je subjektivní pojem, kdy snímek považujeme za ostřejší, když v něm lze rozlišit více podrobností nebo když má větší kontrasty mezi světlými a tmavými plochami a rozhraní mezi těmito plochami se nerozplývá. Na ostrost snímku má vliv mnoho činitelů již při pořizování fotografie, dále pak zrnitost materiálu, jeho rozlišovací schopnost a ve velké míře také *hranová ostrost*. Jako příklad ideální hranové ostrosti si lze představit rozhraní mezi dvěma plochami, z nichž jedna má jistou optickou hustotu  $D$  a při přechodu na druhou plochu tato hustota klesne skokově na hodnotu  $D_0$ . Takový případ však v praxi nenastává, místo toho dochází k více či



Obrázek 6.5: Foucaultův test (zdroj: [9])



Obrázek 6.6: Hranová ostrost ideální (a) a skutečná (b) (zdroj: [9])

méně neostrému přechodu, kdy se optická hustota při přechodu z jedné plochy do druhé mění pozvolna (obr. 6.6) [9].

Vlastnosti citlivých vrstev nejsou v čase konstantní, ale postupně se mění. Změny jsou tím rychlejší, čím je složitější stavba materiálu. Nejméně stálé jsou vysoce citlivé materiály, filmy pro infračervené snímání a barevné filmy. Nejméně stálými vlastnostmi materiálů jsou citlivost, strmost a sklon k tvorbě závoje, přičemž citlivost a strmost v průběhu času klesají, zatímco závoj narůstá. Teplá a vlhká prostředí urychlují stárnutí fotografických materiálů, a tak je nutné skladovat je v chladu a suchu. Je nezbytné zabránit styku filmů s některými látkami, především amoniakem, peroxidem vodíku, sulfanem, formaldehydem a terpentýnovým olejem [9].

### 6.1.6 Vyvolávání fotografií

Po vyvolání a ustálení fotografického filmu následuje tvorba samotných fotografií. Fotografie vznikne prosvětlením negativu a exponováním fotografického papíru. Citlivá vrstva fotografického papíru má stejné složení jako citlivá vrstva filmu. Zčernalá místa na negativu omezí expozici odpovídajících míst na papíru a proto zde nevzniknou vyvolávací centra. Naopak neexponovaná místa negativu propustí k papíru dostatek světla a papír zde bude exponován. Tím vznikne pozitivní latentní obraz. Exponovaný fotografický papír je pak stejně jako film nutné

vyvolat a ustálit, aby vznikla hotová fotografie. Film po ustálení již nereaguje na působení světla, tudíž lze pomocí jednoho negativu zhotovit více pozitivních kopií.

Fotografie lze exponovat jako kontaktní kopie, tzn. přiložením negativu přímo na fotografický papír, nebo jako zvětšeniny, což se provádí pomocí *zvětšovacího přístroje*. Zvětšovací přístroj je zařízení funkčně podobné fotografickému přístroji, jeho princip je však obrácený. Paprsky ze světelného zdroje zabudovaného ve zvětšovacím přístroji procházejí negativem, čímž vzniká základ pozitivního obrazu, a pak jsou objektivem usměřňovány na projekční plochu, na které leží fotopapír. Objektiv slouží také k zaostření obrazu do roviny fotopapíru. V závislosti na parametrech této optické soustavy je dosaženo určitého zvětšení. Stejně jako expoziční dobu při fotografování je nutné nastavit dobu osvitů fotopapíru, tzn. dobu aktivace světelného zdroje. Ta je závislá na citlivosti fotopapíru, světelnosti zvětšovacího objektivu a výkonnosti světelného zdroje [8].

### 6.1.7 Barevná fotografie

Snaha vytvářet barevné fotografie věrně zobrazující skutečnost je téměř stejně stará jako samotný fotografický proces. V minulosti bylo provedeno mnoho pokusů o zobrazení prostředí ve věrných barvách a některé z nich stály za vznikem úspěšných metod a postupů k dosažení požadovaného cíle. V historii fotografie existuje několik technologií tvorby barevné fotografie a všechny jsou založeny na principu vnímání barev lidským okem. Lidské oko skládá barevný obraz ze tří základních barevných podnětů: červeného, zeleného a modrého. Na základě toho jsou i barevné obrazy konstruovány ze tří monochromatických dílčích obrazů, červeného, zeleného a modrého. Barevný obraz může vzniknout na principu aditivního nebo subtraktivního mísení barev.

*Aditivní mísení barev* (obr. 6.7 a) pracuje se světly tří základních barev, které jsou třetinami spektra bílého viditelného světla. Jejich syntézou lze vytvořit každou přirozenou barvu. Světla základních barev se na projekční ploše skládají následujícím způsobem:

- červená a zelená tvoří žlutou,
- zelená a modrá tvoří modrozelenou,
- červená a modrá tvoří purpurovou.

Všechny tři základní barvy o stejné velikosti světelného toku svým složením tvoří bílou. Změnou světelného toku jednotlivých složek vznikají další odstíny. Barevné světlo se vytvoří z bílého pomocí selektivních filtrů, přičemž každý filtr dvě třetiny spektra absorbuje a třetinu propouští:

- červený filtr absorbuje zelenou a modrou,
- zelený filtr absorbuje červenou a modrou,
- modrý filtr absorbuje červenou a zelenou.

Dva filtry položené přes sebe nepropouštějí téměř žádné světlo.

*Subtraktivní mísení barev* (obr. 6.7 b) též využívá bílého světla a selektivních filtrů. Filtry pro subtraktivní mísení barev však absorbují pouze jednu třetinu spektra a dvě třetiny propouštějí. Barevný odstín se pak vytváří řazením subtraktivních filtrů za sebe. Subtraktivní filtry fungují následujícím způsobem:

- modrozelený filtr absorbuje červenou,
- purpurový filtr absorbuje zelenou,

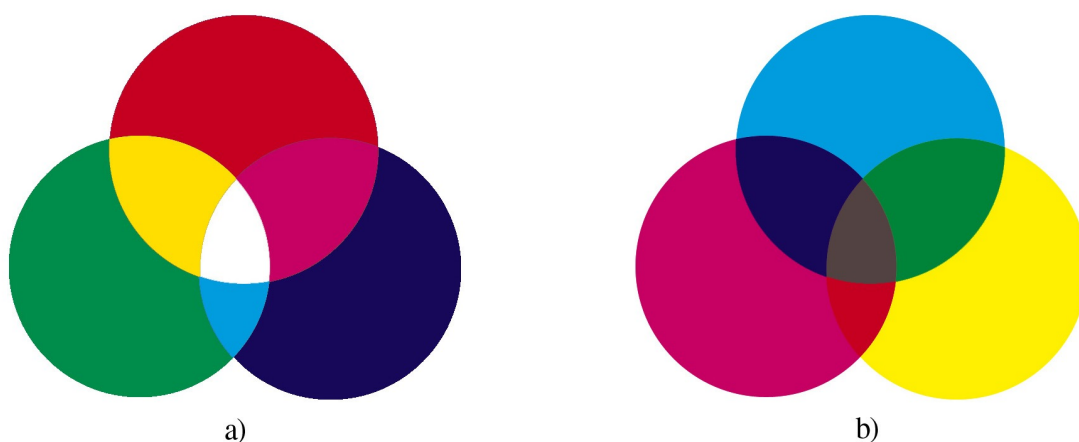


- žlutý filtr absorbuje modrou.

Kombinací filtrů pak vznikají základní barvy:

- z modrozeleného a purpurového barva modrá,
- z modrozeleného a žlutého barva zelená,
- z purpurového a žlutého barva červená.

Kombinací všech tří filtrů o stejné hustotě vzniká barva černá. Kombinací tří na sobě ležících jednobarevných výtažků lze snadno vytvořit tiskem nebo fotografickým procesem barevný obraz.



Obrázek 6.7: Aditivní mísení barev (a), subtraktivní mísení barev (b) (zdroj: [4])

V současné době nejvýznamnější technologií pro tvorbu barevných fotografií představují vícevrstvé materiály založené na principu subtraktivního mísení barev barvotvorným vyvoláváním složek obsažených ve vrstvách. Úspěšnost tohoto procesu zajistil objev *senzibilace* želatinnových citlivých vrstev halogenidu stříbrného. Senzibilací je možné zvýšit citlivost halogenidů stříbra k jednotlivým barvám. Film složený ze tří vrstev, přičemž každá je senzibilována k jiné barvě světla, umožňuje tvorbu barevných fotografií [9].

## 6.2 Digitální fotografie

*Digitální fotografie* je oproti klasickému fotografickému procesu ještě velmi mladou technologií a stále se prudce rozvíjí. Její vznik umožnil roku 1969 objev snímače typu CCD (Charge Coupled Device), pracujícího na principu fotoelektrického jevu. Obvody tohoto snímače převádějí dopadající světlo na elektrický náboj, jehož intenzita je měřena a převedena na digitální číselnou hodnotu. První systém využívající digitální technologie záznamu obrazu představila firma Sony v roce 1981 pod názvem Mavica, ale do prodeje se tehdy ještě nedostal. Rozvoj digitální fotografie nastal teprve koncem 80. let 20. století a k jejímu velkému rozmachu došlo v druhé polovině let devadesátých. V současné době je digitální fotografie masovou záležitostí a do jisté míry zatlačila klasickou fotografii do pozadí, a to jak v amatérské, tak v profesionální sféře. Přímé nahrazení jedné technologie druhou však očekávat nelze, každá má své výhody i nevýhody, a tak se uplatňují obě současně.

Konstrukce digitálního fotoaparátu vychází z konstrukce přístrojů využívajících k záznamu obrazu klasický halogenidostříbrný film. Vznik obrazu je zcela shodný. Pomocí objektivu jsou

světelné paprsky usměrněny a zaostřeny do obrazové roviny, ve které leží snímací prvek. Největší odlišnost je v principech záznamu tohoto obrazu a jeho následného uchování [12].

V klasické fotografii dochází působením světla na film ke vzniku latentního obrazu, jenž se po vyvolání, ustálení a vyprání stane viditelným a stálým. Obraz je tak uchován přímo na filmu. Vyvolaný negativ představuje jediný originál. Pomocí něj lze vytvořit množství kopií, které se ovšem od originálu budou vždy do jisté míry lišit, v závislosti na pracovním postupu kopírování a přesnosti a správnosti provedení.

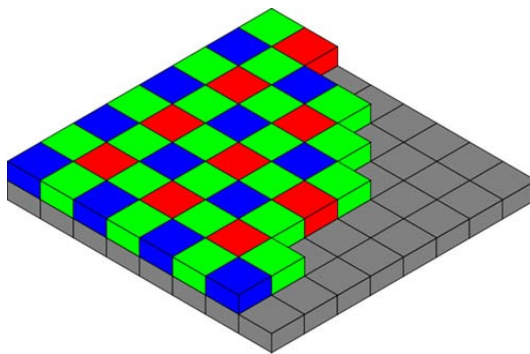
V digitální fotografii je obraz zaznamenán pomocí snímacího čipu, což je soustava světlocitlivých buněk sestavených do husté mřížky. Čip samotný však není schopen obraz uchovat. Signál z každé buňky je odeslán do ADC převodníku (Analog to Digital Converter) a po digitalizaci následně zpracován obrazovým procesorem. Výstupem procesoru je pak datový soubor v některém z obrazových formátů. Soubory jsou ukládány na paměťovou kartu ve fotoaparátu nebo na pevný disk počítače a mohou být libovolně šířeny dále. Z jednoho souboru lze vytvořit nekonečně mnoho identických kopií. Obrazové soubory lze upravovat ve specializovaných editačních programech [11].

### 6.2.1 Snímací čip

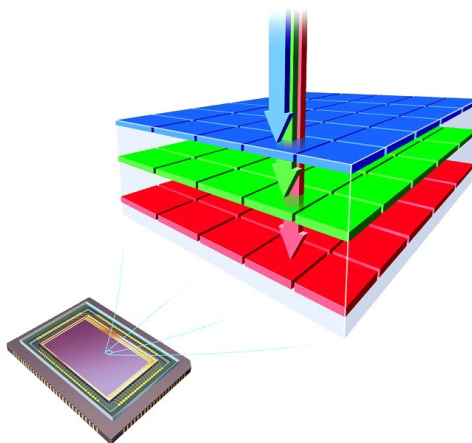
*Snímací čip* digitálního fotoaparátu neplní pouze snímací funkci jako film u klasického fotoaparátu, ale zajišťuje rovněž přenos signálu k obrazovému procesoru. Informace získané z čipu mohou být použity i pro měření expozice a pro automatické zaostřování fotoaparátu. Čip představuje soustavu buněk citlivých ke světelnému záření, které tvoří velmi hustou matici. Každá buňka je osazena fotodiódou, která převádí fotony dopadajícího světla na elektrický náboj [11]. Když fotony dopadají na atom, jeho elektronový obal při tom absorbuje energii těchto fotonů. Některé elektrony z obalu jsou touto energií vybuzeny do vyšší energetické hladiny a mohou se volně pohybovat. Tento děj se nazývá *fotoelektrický jev*. Počet vybuzených elektronů je úměrný intenzitě a vlnové délce světla. Jsou-li tyto elektrony zachyceny a je-li změřena jejich intenzita, získáme informaci o intenzitě dopadajícího světla. Každá buňka je také vybavena mikroskopickou čočkou, která usměrňuje světlo dopadající na fotodiodu a zajišťuje optimální podmínky pro zachycení fotonů [12]. Aby mohl být signál z jednotlivých buněk předán ke zpracování, jsou buňky navzájem propojeny a čip vybaven složitými obvody. Obvody jsou vyleptány do desky čipu, která rovněž nese soustavu buněk. Signál z každé buňky představuje počáteční informaci o hodnotě intenzity světla pro každý pixel, který tvoří základní jednotku výsledného obrazu.

Fotodiody jsou schopny zaznamenat pouze intenzitu světla, nikoli však jeho vlnovou délku. Barevná informace je získána až filtrováním polychromatického světla. Senzor je pokryt soustavou barevných filtrů zvanou Color Filter Array (CFA). Jedná se o matici jednotlivých červených, zelených a modrých filtrů, která překrývá matici buněk, přičemž nad každou buňkou leží filtr pouze jedné ze tří základních barev. Barevná informace pro každou buňku (pixel na výsledném obrazu) je v následném procesu dopočítána z okolních osmi buněk. V soustavě CFA nejsou filtry všech tří barev zastoupeny ve stejném počtu. Z důvodu přiblížení k vnímání lidského oka, které je nejcitlivější k odstínům zelenožluté, je v CFA obsaženo dvakrát více zelených filtrů než modrých nebo červených. Soustava filtrů těchto parametrů se nazývá *Bayerova matice* (obr. 6.8). Filtrování světla je v digitální fotografii nejpoužívanější metodou k získání barevné informace.

Zcela jiný postup pro získání barevné informace používá snímač typu Foveon patentovaný společností Sigma. Tento patent využívá vlastnosti křemíku, z něhož jsou čipy vyrobeny. Křemík je průhledný a v závislosti na tloušťce vrstvy materiálu pohlcuje některé vlnové délky světla. V čipu Foveon jsou každému pixelu přiřazeny tři fotodiody umístěné nad sebou ve třech vrstvách křemíku, z nichž každá zaznamená světlo jedné základní barvy (obr. 6.9). Pro každý pixel je tak vytvořena samostatná a úplná barevná informace. Tato technologie nejvíce připomíná



Obrázek 6.8: Bayerova matice (zdroj: [11])



Obrázek 6.9: Barevný filtr snímače Foveon (zdroj: [11])

princip třívrstvého barevného filmu. Výhody čipu Foveon oproti čipům pracujících s Bayerovou maticí jsou však obtížně měřitelné [11].

V současné době se používají dva typy snímacích čipů, kromě typu CCD je využívána také technologie CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). Tyto dva typy se liší především metodou převodu signálu z exponovaného čipu na procesor a také technologií výroby.

Snímací čip typu CCD vyžaduje speciální podkladovou desku a unikátní technologii výroby, odlišnou od jiných integrovaných obvodů. Většina řídicích obvodů a ADC převodníky musí být umístěny mimo samotný čip. Výroba těchto zařízení je poměrně drahá a jejich provoz náročný, neboť jsou napájeny poměrně vysokým napětím 15V. Výhodou je čistý signál [12]. Technologie CCD využívá schopnost přenášet signál z buňky přes jiné buňky, aniž by tím byla kvalita signálu narušena. Hodnoty napětí z fotocitlivých buněk jsou předávány po sloupcích do čtecího modulu, který je součástí čipu a je umístěn po straně vedle buněk. Řádky buněk jsou zpracovávány po jednom, přičemž konec každého řádku je provázán se začátkem následujícího. Signály zachycené čtecím modulem jsou zesíleny zesilovačem a jsou předávány do ADC převodníku. Tato metoda se nazývá *Interline transfer* a její nevýhodou je časová náročnost zpracování signálu. Čtecí modul je umístěn vedle fotocitlivých buněk, což omezuje jejich plochu a tím citlivost k dopadajícímu světlu.

Čipy typu CMOS lze vyrábět na stejných linkách jako ostatní integrované obvody, čímž je dosaženo nižších nákladů výroby. Technologie výroby integrovaných obvodů je starší a pokročilejší oproti výrobě CCD, proto lze u čipů typu CMOS dosáhnout větší hustoty buněk s vyšší precizností. Obvody pro zpracování signálu lze integrovat přímo do čipu a jeho napájecí napětí je pouze 2,5V. Každá fotocitlivá buňka má vlastní zesilovač a je zpracovávána samostatně, čímž je výrazně zkrácen čas potřebný ke zpracování signálu. Tato technologie se nazývá *X-Y*

*addressing*. Vyžaduje umístit přepínač ke každé buňce, což opět snižuje účinnou plochu buněk.

Problém snižování účinné plochy řeší metoda zpracování signálu nazývaná *Full frame transfer*. Čip je v tomto případě opatřen další vrstvou ležící pod fotocitlivými buňkami, ve které se nachází čtecí oblast. Veškeré informace z buněk jsou do čtecí oblast předány současně. Tato metoda umožní zvětšit prostor pro fotocitlivé buňky a zvýšit rychlost zpracování signálu.

Snímací čipy se vyrábějí v různých velikostech podle typu fotoaparátu. Pro digitální zrcadlovky je nejčastěji používán formát zvaný APS-C s rozměry čipu přibližně 23 mm × 15 mm, jeho úhlopříčka je tedy zhruba 1,5× kratší než úhlopříčka kinofilmového políčka. Některé profesionální zrcadlovky jsou vybaveny čipem velikosti kinofilmového pole, tedy s rozměry 36 mm × 24 mm. Čipy tohoto rozměru jsou označovány pojmem *full-frame*. Kompaktní fotoaparáty disponují čipy mnohem menších rozměrů. Existuje mnoho typů, obvyklá délka úhlopříčky snímače se pohybuje kolem 7 mm. Velikosti snímacího prvku musí být přizpůsobeny rozměry optické soustavy (jako ohnisková vzdálenost objektivu), aby bylo v každém případě dosaženo požadovaného zobrazovacího úhlu [11].

## 6.2.2 Obrazový procesor

Procesor neboli *modul zpracování obrazu* má na starosti přepočítání dat získaných z čipu a z převodníku ADC. Jsou zde spouštěny algoritmy, které vedou k vytvoření výsledného obrazu a procesor je rovněž odpovědný za převod obrazových dat do určeného souborového formátu a jeho zápis na paměťovou kartu. Procesor úzce spolupracuje s vyrovnávací pamětí, do které jsou data ukládána z převodníku ADC. Procesor následně tato data zpracovává, zatímco fotoaparát je schopen současně pořizovat nové snímky. Po zaplnění vyrovnávací paměti není možné pořizovat snímky, dokud se zpracovávají obrazové soubory neuloží na paměťovou kartu a kapacita vyrovnávací paměti se neuvolní.

Činnost procesoru lze ovlivnit uživatelskými nastaveními některých parametrů fotografie, jako je vyvážení barev, rozlišení, doostření, potlačení šumu, komprese obrazových dat a další. Algoritmy provádějící tyto zásahy, které se následně projeví ve výsledném obraze, jsou však tajemstvím výrobce procesoru a běží skrytě. Procesor dále provádí mnoho operací sloužících k optimalizaci výstupu z čipu, které uživatel nemůže ovlivnit. Mezi tyto činnosti patří například interpolace barevné informace z okolních pixelů. Barevná informace z konkrétního pixelu je porovnávána s barvou načtenou ze sousedních pixelů a vyhodnocována procesorem. Cílem je dosažení hladkého odstupňování barev na souvislých plochách a zachování kontrastního přechodu v místě hran.

Vývoj procesoru často probíhá současně s vývojem čipu, aby bylo dosaženo perfektního sladění činnosti obou zařízení. Prvotní zpracování obrazových dat procesorem má klíčový vliv na kvalitu výsledných fotografií a je pro digitální fotografii stejně zásadní jako kvalita použitého objektivu a dalších mechanických zařízení fotoaparátu [11].

## 6.2.3 Vlastnosti digitálního obrazu

U klasické fotografie závisí její rozlišovací schopnost na zrnitosti filmového materiálu. *Rozlišení* digitální fotografie je dáno hustotou *pixelů*, elementárních jednotek digitálního obrazu. Jednomu pixelu výsledného obrazu odpovídá jedna světlocitlivá buňka na snímacím čipu. Rozlišovací schopnost se udává počtu pixelů na jednotku délky, obvykle na palec nebo centimetr. Velice populární je rovněž uvádět rozlišení digitální fotografie jako celkový počet pixelů. Toto rozlišení je běžně udáváno v milionech pixelů, tzn. v *megapixellech*. V dnešní době mají digitální zrcadlovky s full-frame snímačem rozlišení až 24 megapixelů. pro zrcadlovky formátu APS-C je obvyklé rozlišení 12 – 16 megapixelů. I mnohem menší čipy kompaktních fotoaparátů dosahují běžně rozlišení 12 megapixelů a více. Takto vysoká hustota fotocitlivých buněk má za

následek snížení jejich účinné plochy a tím i snížení citlivosti ke světlu. Signál pak musí být více zesilován, což přináší i vyšší hladinu šumu, který musí být procesorem silně potlačován a tím dochází ke zhoršení kvality obrazu. Reálná rozlišovací schopnost kompaktních fotoaparátů nedosahuje takové hodnoty jako u zrcadlovek se stejným rozlišením čipu. Rozlišovací schopnost barevného negativu rozměru kinofilmového políčka odpovídá přibližně 20 megapixelům u digitální fotografie. Výsledné rozlišení fotografie nezávisí jen na rozlišovací schopnosti snímacího prvku, ale může být omezeno kvalitou objektivu.

*Citlivost* v klasické fotografii znamená schopnost citlivé vrstvy přeměnit se působením světla. V digitální fotografii lze nalézt analogii k této definici, jen je třeba ji přeformulovat jako schopnost fotocitlivé buňky přeměnit dopadající světlo na elektronický náboj. Již byla zmíněna závislost citlivosti na velikosti plochy fotocitlivé buňky. Čím je tato plocha větší, tím je buňka schopna zachytit více dopadajících fotonů a generovat větší elektrický náboj. Se zvýšením rozlišení při zachování rozměrů snímacího čipu dojde ke zmenšení fotocitlivých buněk a tedy snížení jejich citlivosti ke světlu. Stejně tak fotocitlivé buňky malého snímače kompaktního fotoaparátu jsou méně citlivé než buňky většího snímače digitální zrcadlovky o stejném rozlišení. Pro praxi je však užitečnější výsledná citlivost snímacího čipu, které je dosaženo určitou mírou zesílení signálu. Aby bylo dosaženo stejné výsledné citlivosti u různých fotoaparátů, musí být tato míra zesílení také různá. Hodnoty výsledné citlivosti jsou stanoveny mezinárodní normou ISO, která vychází z americké ASA. Pro převod mezi hodnotami citlivosti v těchto normách platí vztah

$$S_{ISO} = \frac{S_{ASA}}{0,8}. \quad (6.9)$$

U snímacích čipů digitálních fotoaparátů je běžná možnost zvyšovat citlivost v určitém rozsahu. Se zesílením signálu však dochází i k zesílení chyb v něm obsažených. Chyby ve výstupním signálu z fotocitlivých buněk se nazývají *digitální šum*. Proto se zvýšením citlivosti dochází k nárůstu šumu, který zhoršuje kvalitu obrazu. Stejně tak čipy kompaktních fotoaparátů s malými fotocitlivými buňkami, u kterých je nutné signál výrazněji zesilovat, trpí výskytem šumu více než čipy digitálních zrcadlovek při nastavení stejné hodnoty výsledné citlivosti.

Šum v digitální fotografii do jisté míry připomíná zrnitost fotografického filmu, příčina jeho vzniku je však zcela odlišná. Příčiny vzniku šumu jsou dvě. *Fotonový šum* vzniká náhodným chováním fotonů v paprsku světla a elektronů ve snímacím čipu. Díky němu se ve fotografiích objevují pixely s nižším či vyšším jasnem nebo odlišnou barvou, než by odpovídalo předloze. Je nejvíce zřetelný v hladkých plochách se středními tóny. Nelze mu předcházet a vyskytuje se ve všech digitálních fotografiích. *Šum na výstupu* závisí na reakci čipu na světlo a na způsobu zpracování signálu procesorem. Čím více je signál zesílen, tím je šum zřetelnější. Je v některých ohledech předvídatelný a při zpracování obrazu procesorem může být částečně potlačen.

*Dynamický rozsah* je podíl mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou intenzity světla, jakou je snímací čip schopen zachytit. Rozsah těchto hodnot určuje nejnižší expozice, při které dojde k prakticky použitelnému zvýšení jasu fotografie, a nejvyšší expozice, při které jas dosáhne hodnoty, kterou již nelze dále zvyšovat. Stejně jako u negativního filmu určuje závislost mezi hodnotou expozice a zčernáním materiálu senzimetrická charakteristika, lze tuto charakteristiku sestavit i pro snímací čip digitálního fotoaparátu. Charakteristická křivka filmu se v blízkosti krajních hodnot expozice odchyluje od přímkového tvaru (obr. 6.3), čemuž odpovídá zpomalení reakce na světlo a zvýšení dynamického rozsahu. Přejechy mezi částmi snímku s vykreslenými detaily a zčernalými plochami jsou vždy pozvolné. Naproti tomu senzimetrická charakteristika digitálního snímače má tvar přímky v celém rozsahu. Reflektuje to vlastnost fotocitlivých buněk. Ty od určité hodnoty expozice generují elektrický náboj, který se s rostoucí expozicí přímo úměrně zvyšuje až do maximální hodnoty, od které je fotocitlivá buňka tzv. nasycena a další zvyšování hodnoty expozice nemá na výstupní signál vliv. Kromě menšího dynamického rozsahu mají digitální snímače tedy ještě jednu nevýhodu, kterou je náhlá ztráta kresby v místech, kde byly fotocitlivé buňky nasyceny [11].

### 6.2.4 Formáty obrazových souborů

Výsledný obraz je možné zakódovat do množství souborových formátů. V současné době fotoaparáty ukládají snímky na paměťovou kartu v některých ze tří formátů, označovaných zkratkami JPEG (Joint Photographic Experts Group), TIFF (Tagged Image File Format) a RAW (z anglického *raw*, česky *surový*). Tyto formáty se liší způsobem uložení obrazových dat, jejich kompresí a barevnou hloubkou. Kompresie představuje zmenšení datového objemu. Může být buď bezztrátová, kdy dochází pouze ke zhuštění zápisu dat, nebo ztrátová, kdy dochází k úbytku informací a obraz nelze přesně rekonstruovat. Kompresní algoritmy počítají se subjektivním vnímáním obrazu a jejich cílem je maximalizovat úsporu dat při minimalizaci subjektivně vnímaných změn v obraze. Barevná hloubka deklaruje míru přesnosti zobrazení barev. Udává se v bitech na barevný kanál. 8bitová barevná hloubka umožňuje zobrazit  $2^8 = 256$  odstínů na jeden kanál, celkově  $256^3 \approx 16,7 \times 10^6$  barevných odstínů. Celkový počet barevných odstínů je velmi vysoký, avšak na souvislých barevných přechodech, kde se vyskytuje pouze jedna barva (např. obloha), může být 256 odstínů nedostačujících a přechod není zcela plynulý. 16bitová barevná hloubka umožňuje zobrazit  $2^{16}$  odstínů na jeden kanál a dovoluje perfektní zobrazení plynulých barevných přechodů.

Formát JPEG pracuje s 8bitovou hloubkou barev a ztrátovou kompresí. Při kompresi jsou některé informace ze souboru vypuštěny a dochází k jisté degradaci obrazu, jejíž úroveň závisí na povaze snímku i úrovni komprese. Vzniklé změny v obraze jsou však za předpokladu správně nastavené míry komprese při pouhém pohledu na fotografii nerozeznatelné. Výhodou tohoto formátu je jeho malý datový objem. Malá barevná hloubka jej činí nevhodným k úpravám v grafických editorech. Fotografie uložené v 8bitové hloubce obsahují příliš málo informací pro nedestruktivní úpravy kontrastu, tonálního rozsahu aj. Formát je vhodný pro ukládání fotografií po konečných úpravách a k jejich prezentaci.

Formát TIFF podporuje až 16bitovou barevnou hloubku a je vhodný pro zápis digitálního obrazu s maximem detailů. Jeho vysoká barevná hloubka umožňuje provádět následné úpravy obrazu bez vážných ztrát na jeho kvalitě.

Formát RAW uchovává obrazová data získaná ze snímače a nastavení fotoaparátu odděleně. Umožňuje změnit nastavení fotoaparátu jako korekci expozice, vyvážení bílé barvy, doostření atd. dodatečně v obrazovém editoru bez vlivu na kvalitu obrazu. Fotografie ukládané v tomto formátu mají barevnou hloubku 12 nebo 14 bitů. Fotografie ve formátu RAW není digitálním obrázkem v pravém slova smyslu, představuje pouze obrazová data určená k aplikaci určitého nastavení, úpravám v grafickém editoru a uložení v některém z jiných obrazových formátů [11].

---

## 7. Závěr

---

Tato bakalářská práce nabízí základní pohled na současný stav znalostí v oblasti geometrické optiky a uvádí přehled známých optických vad. Na popis principů vzniku obrazu navazuje popis možností jeho zachycení, což v současné době zahrnuje tradiční chemický fotografický proces a stále v podstatě nastupující a prudce se rozvíjející technologii digitální fotografie. Práce svým zaměřením může být prospěšná zájemcům o fotografii a optiku obecně. Vzhledem ke svému rozsahu není a ani nemůže být příručkou fotografa ani učebnicí optiky, avšak umožňuje nahlédnout do určitých oblastí s oběma obory úzce souvisejícími.

Společně s uvedením současného stavu problematiky se nabízejí rovněž otázky týkající se jejího historického vývoje a výhledu do budoucnosti. Schopnost skla určitého tvaru lámat světelné paprsky znali již filosofové starověkého Řecka a tato doba položila základy optiky. První *cameru obscura* vynalezl v 15. století Leonardo da Vinci a první dalekohled sestrojil o století později Galileo Galilei. Konstrukce prvních optických přístrojů z této doby a jejich následníků byla komplikovaná především po stránce výpočetní. Zvyšující se nároky na kvalitu zobrazení a potlačení optických vad měly za následek nesmírnou výpočetní náročnost. Výpočet optické soustavy složené z více čoček mohl trvat i několik let a tento stav trval víceméně až do 19. století. Teprve nástup početních strojů a hlavně počítačů tyto výpočty mnohonásobně usnadnil. Vlastnosti objektivů a jejich vady lze dnes sledovat a korigovat prostřednictvím počítačových simulací bez nutnosti nákladné výroby. Výroba samotná dosahuje díky přesným programově řízeným strojům mnohem větší kvality a také objem výroby optických zařízení se s nástupem počítačů mnohonásobně zvýšil. Současné objektivy přístrojů pro profesionální použití poskytují vysoce kvalitní obraz s vadami potlačenými na minimum.

Chemický fotografický proces, jehož vývoj se téměř ustálil kolem poloviny 20. století, se zdál být nepřekonatelným až do nástupu digitální fotografie. Některé vlastnosti klasické fotografie, jako například dynamický rozsah nebo rozlišovací schopnost velkoformátových filmů, zůstávají stále nenahraditelné, přesto je dnes digitální fotografie mnohem populárnější. Jednoduchost pořízení digitální fotografie, možnost okamžité vizuální kontroly a snadné šíření pomocí počítačových sítí přesvědčilo mnoho fotografů k přechodu k této technologii. Digitální záznam obrazu má však i nedostatky a rovněž nutnost práce s počítačem a přechovávání fotografií v podobě pouhých dat namísto fyzické přítomnosti není pro každého výhodou. Obě technologie proto přetrvávají vedle sebe.

Zatímco se však vývoj klasického fotografického procesu zdá být ukončen, digitální fotografii na tomto poli čeká ještě dlouhá cesta. Lze očekávat stále užší propojení mezi pořízením fotografie a následným procesem jejích úprav na počítači. Tvůrčí proces zdaleka nekončí pořízením fotografie, počítač jej umožňuje výrazně rozvinout. Také samotné fotoaparáty již dnes provádějí mnoho automatických úprav a oprav obrazu. To se týká i optických vad objektivů. Kvalita obrazu vytvořeného pomocí digitálních snímacích čipů za posledních deset let také výrazně stoupla a je předpoklad pro její stálé zvyšování. Může nastat doba, kdy digitální fotografie ve všech ohledech dožene klasickou a kromě toho nabídne snazší přístup a širší spektrum možností v samotné tvorbě.

---

# Literatura

---

- [1] HAUF Miroslav. *Aplikovaná optika*. 1. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1981. 182 s.
- [2] MIKŠ Antonín. *Aplikovaná optika*. 1. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009. 230 s. ISBN 978-80-01-04254-0.
- [3] HALLIDAY David, RESNICK Robert, WALKER Jearl. *FYZIKA, část 4: Elektromagnetické vlny - Optika - Relativita*. 1. vydání. Brno: Vutium, 2006. 181 s. ISBN 80-214-1868-0.
- [4] LEPIL Oldřich. *Fyzika pro gymnázia - Optika*. 3. vydání. Praha: Prometheus, 2004. 206 s. ISBN 80-7196-237-6.
- [5] HAVELKA Bedřich. *Geometrická optika, 1. díl*. 1. vydání. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1955. 346 s.
- [6] HAVELKA Bedřich. *Geometrická optika, 2. díl*. 1. vydání. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1956. 296 s.
- [7] MALÝ Petr. *Optika*. 1. vydání. Praha: Univerzita Karlova v Praze, 2008. 362 s. ISBN 978-80-246-1342-0.
- [8] PINĎÁK Miroslav. *Fototechnika*. 1. vydání. Olomouc: Rubico, 2000. 248 s. ISBN 80-85839-38-5.
- [9] JUNGE Karl-Wilhelm, HÜBNER Günter. *Fotografická chemie*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1987. 312 s.
- [10] HRUBÝ František, SCHLEMMER Jan. *Chemie a fotografické materiály*. 2. vydání. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1981. 204 s.
- [11] FREEMAN Michael. *DSLR - naučte se fotografovat digitální zrcadlovkou*. 1. vydání. Praha: Zoner Press, 2007. 256 s. ISBN 978-80-86815-79-4.
- [12] ANG Tom. *Digitální fotografie pro pokročilé*. 1. vydání. Praha: Nakladatelství Slovart, 2004. 144 s. ISBN 80-7209-563-3.



---

# Seznam obrázků

---

3.1	Hlavní body a ohniska optické soustavy . . . . .	4
3.2	Zákon odrazu . . . . .	4
3.3	Zákon lomu . . . . .	5
3.4	Zvětšení optické soustavy . . . . .	5
3.5	Zdánlivý obraz vytvořený rovinným zrcadlem . . . . .	6
3.6	Zobrazení předmětu rovinným zrcadlem . . . . .	7
3.7	Duté zrcadlo (a), vypuklé zrcadlo (b) . . . . .	7
3.8	Poloha ohniska dutého zrcadla (a) a vypuklého zrcadla (b) . . . . .	8
3.9	Konstrukce obrazu bodu tvořeného kulovým zrcadlem . . . . .	8
3.10	Průchod světla spojkou (a) a rozptylkou (b) . . . . .	9
3.11	Význačné paprsky čočky . . . . .	10
3.12	Zobrazení spojkou: předmět před ohniskem a za ohniskem . . . . .	11
3.13	Zobrazení spojkou: předmět umístěný do ohniska . . . . .	11
3.14	Zobrazení rozptylkou . . . . .	11
4.1	Otvorová vada . . . . .	13
4.2	Vznik komy . . . . .	13
4.3	Astigmatismus . . . . .	14
4.4	Testovací obrazec pro astigmatismus . . . . .	15
4.5	Zklenutí pole . . . . .	15
4.6	Zkreslení . . . . .	15
4.7	Zkreslení soudkovité (a), obraz bez zkreslení (b), zkreslení poduškovité (c) . . . . .	16
4.8	Barevná vada polohy . . . . .	17
4.9	Barevná vada velikosti . . . . .	18
5.1	Zorný úhel pro předmět v konvenční zrakové vzdálenosti . . . . .	19
5.2	Pozorování předmětu lupou bez akomodace oka . . . . .	20
5.3	Pozorování předmětu lupou při akomodaci oka . . . . .	20
5.4	Schema mikroskopu . . . . .	21
5.5	Keplerův dalekohled . . . . .	22
5.6	Zrcadlový dalekohled . . . . .	23
5.7	Camera obscura . . . . .	24
5.8	Úhel záběru fotoaparátu . . . . .	24
5.9	Hloubka ostrosti . . . . .	25
6.1	Latentní obraz (a), vyvolaný obraz (b), ustálený obraz (c) . . . . .	30
6.2	Zrnitost málo citlivého materiálu (a) a vysoce citlivého materiálu (b) . . . . .	30
6.3	Senzitometrická charakteristika . . . . .	31
6.4	Vysoká strmost materiálu . . . . .	32
6.5	Foucaultův test . . . . .	33
6.6	Hranová ostrost ideální (a) a skutečná (b) . . . . .	33
6.7	Aditivní mísení barev (a), subtraktivní mísení barev (b) . . . . .	35
6.8	Bayerova matice . . . . .	37
6.9	Barevný filtr snímače Foveon . . . . .	37