

8. Optické zobrazování

8.1 Pojem optického zobrazení

Z každého bodu svítícího nebo osvětleného předmětu vychází svazek paprsků. Přeměníme-li, tyto svazky nějakým zařízením v nové svazky nazýváme body, v nichž se paprsky sbíhají, optické obrazy bodů (předmětů).

Přeměnu světelných svazků lze provést lomem a odrazem při vhodné volbě rozhraní. Souhrn těchto rozhraní se nazývá **optická soustava**.

Daný předmět označujeme jako vzor a optická soustava se nazývá obraz.

Máme následující možnosti:

Jsou-li paprsky za optickou soustavou sbíhavé – obraz reálný (skutečný).

Jsou-li paprsky rozbíhavé – obraz virtuální (neskutečný, zdánlivý).

Nejvhodnější rozhraní – kulová, rovinná plocha:

- a) Při zobrazení odrazem – zrcadla.
- b) Při zobrazení lomem – čočky.

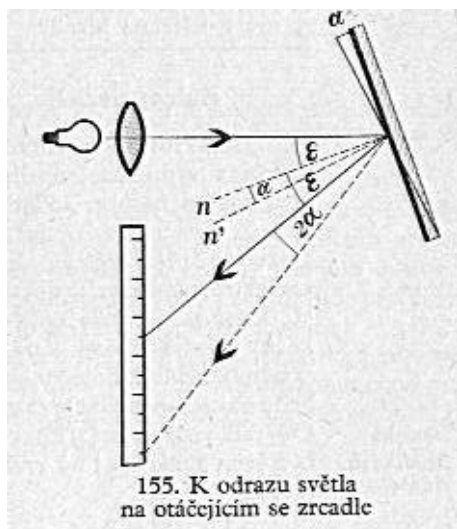
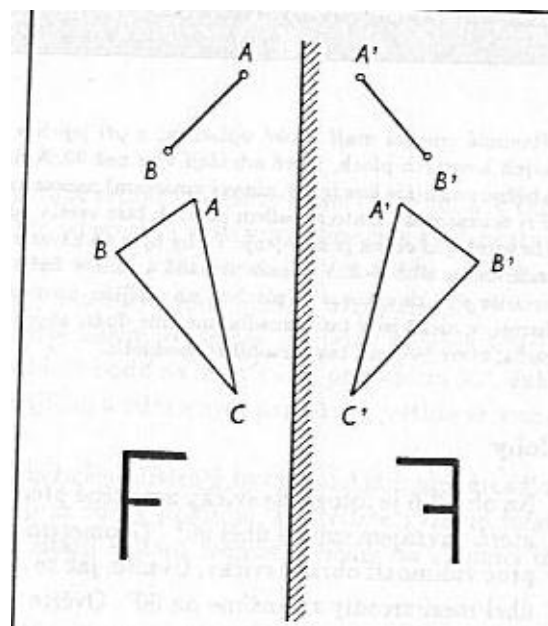
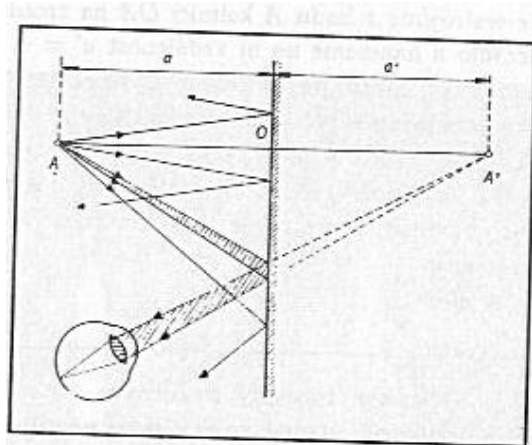
8.2 Zobrazení odrazem

a) Rovinné zrcadlo

Předmět a obraz jsou souměrně sdružené podle roviny zrcadla. Obraz je zdánlivý.

Nemá žádné optické vady.

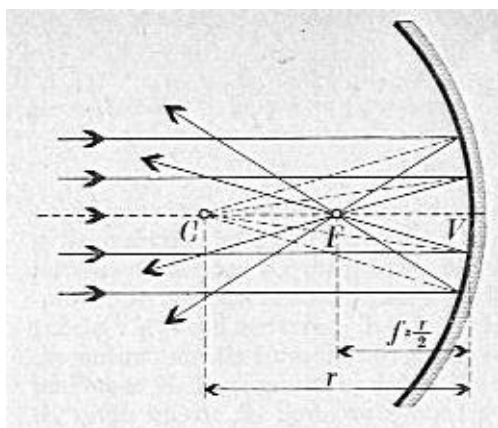
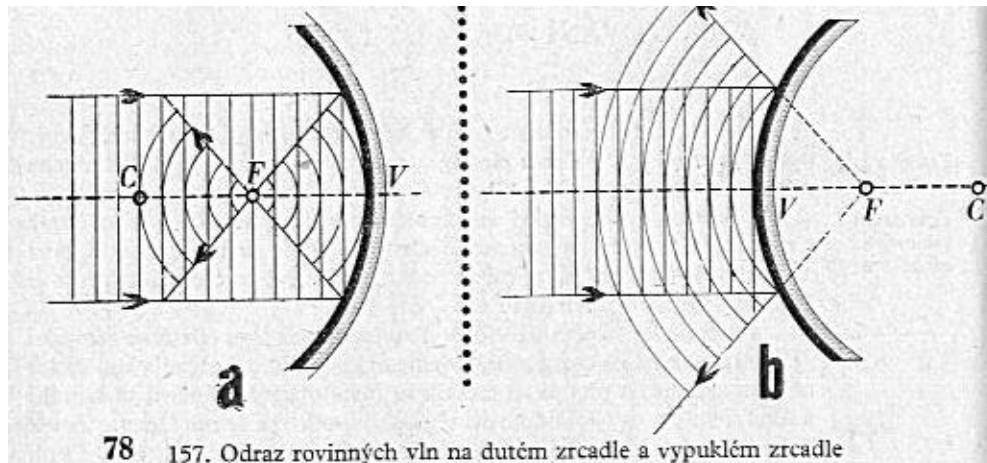
Při vytýčování určitých úhlů používáme úhlová zrcadla skloněná v úhlu φ . Toho využíváme v přístrojích. Rovinné zrcadlo se může otáčet či být nakloněno pod úhlem 45° .



b) Kulové zrcadlo

Máme dva základní druhy:

- Duté
- Vypuklé



C – střed křivosti; F – ohnisko; $f = \frac{1}{2}r$ -

označuje ohniskovou vzdálenost

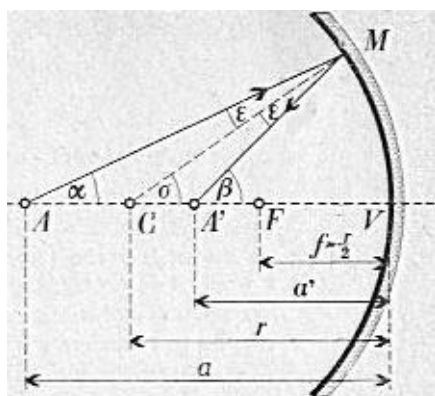
Střed křivosti zrcadla má tu vlastnost, že všechny paprsky, které jim procházejí, dopadají na plochu kulového zrcadla kolmo, a tedy odrážejí se zpět do bodu C. Všechny ostatní paprsky mění při odrazu od zrcadla směr a s optickou osou svírají různé úhly.

Máme zde tři paprsky:

První význačný paprsek prochází bodem C. Po odrazu na zrcadle má směr opačný než směr dopadající na zrcadlo.

Druhý význačný paprsek je rovnoběžný s optickou osou zrcadla. Na zrcadlo dopadá pod určitým úhlem, podle zákona odrazu mění svůj směr a optickou osu protíná v bodě F.

Třetí význačný paprsek prochází ohniskem a jeho vlastnost vyplývá ze záměnnosti chodu paprsků. Paprsek je po odrazu od zrcadla rovnoběžný s optickou osou zrcadla.



159. Zobrazení svítícího bodu na optické ose dutým zrcadlem

Bodový zdroj (A) světla je na optické ose ve vzdálenosti $a = VA$ od vrcholu zrcadla. Paprsek, který z něho vychází a probíhá optickou osou (paprsek hlavní), dopadá na zrcadlo kolmo a odráží se zpět do optické osy. Jiný paprsek, např. AM, dopadá na zrcadlo pod úhlem ε . Odráží se pod stejným úhlem a protíná optickou osu v bodě A' , který je od vrcholu zrcadla vzdálen $VA' = a'$. Pokusem na optické desce i konstrukcí se přesvědčíme, že i jiné paprsky, svírající s optickou osou malé úhly, se na dutém zrcadle odrážejí do téhož bodu A' .

Z obrázku plyne: $\sigma = \alpha + \varepsilon$, $\beta = \sigma + \varepsilon$.

Odečtením levé strany druhé rovnice od levé strany

první rovnice a dostaneme: $2\sigma = \alpha + \beta$.

Pro osové paprsky, jsou úhly malé. Pak lze oblouk VM považovat za tetivu kolmou na optickou osu a trojúhelníky AVM, CVM, A'VM za pravouhlé.

$$\text{Můžeme psát: } \operatorname{tg} \alpha \approx \alpha = \frac{VM}{VA} = \frac{VM}{a}; \operatorname{tg} \sigma \approx \sigma = \frac{VM}{VC} = \frac{VM}{r}$$

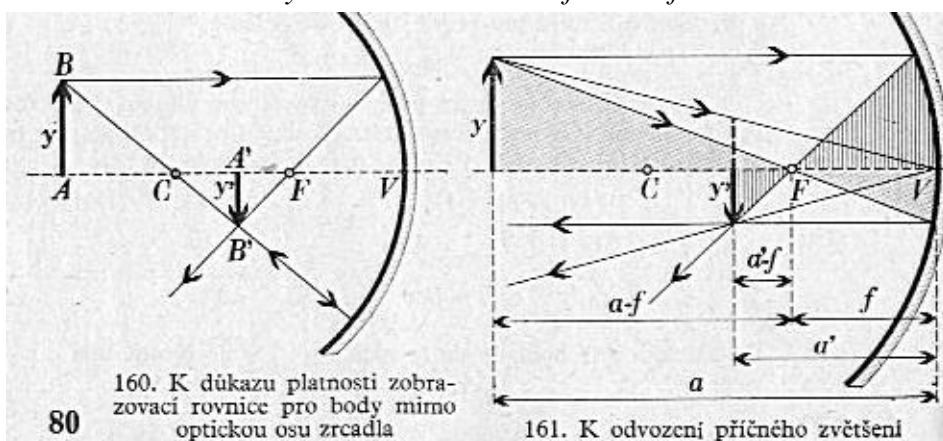
$$\operatorname{tg} \beta \approx \beta = \frac{VM}{VA'} = \frac{VM}{a'}$$

Tyto hodnoty dosadíme do rovnice $2\sigma = \alpha + \beta$ a dostaneme $\frac{VM}{a} + \frac{VM}{a'} = 2 \frac{VM}{r}$

Po zkrácení: $\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{2}{r}$ či $\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}$ - **zobrazovací rovnice zrcadla**

a, a', r, f přiřadíme před zrcadlem znaménko kladné, za zrcadlem záporné. Tuto úmluvu nazýváme **znaménkovou konvencí**. U vypuklého zrcadla je r i f záporné.

$$\text{Příčné zvětšení: } |Z| = \frac{y'}{y} \quad Z = -\frac{a'}{a} = -\frac{f}{a-f} = -\frac{a'-f}{f}$$



Znaménko mínus je ve vzorci proto, že předmět a jeho obraz jsou na opačných stranách středu křivosti C. Je-li obraz skutečný, je vždy obrácený

a $Z < 0$. Je-li však $Z > 0$, je obraz vzpřímený a neskutečný. Při $|Z| > 1$ je obraz zvětšený, při $|Z| < 1$ je obraz zmenšený. Obrazy u vypuklého zrcadla jsou vždy zmenšené, vzpřímené a neskutečné.

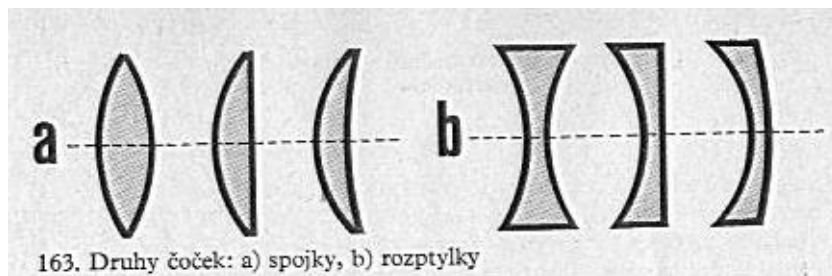
Užití zrcadel:

Kulových zrcadel se užívá v praxi při zobrazování a u měřicích přístrojů. Dutých zrcadel se užívá např. v lékařství, k osvětlování u mikroskopů a zrcadlových dalekohledů.

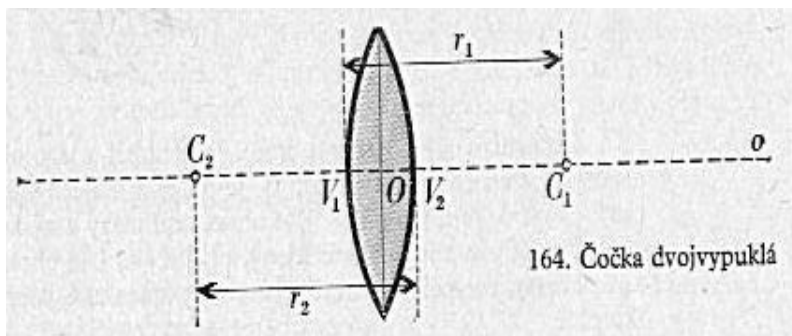
Dutá zrcadla mívají často tvar paraboloidový. Svazek paprsků, vycházejících z ohniska, se odrazí jako svazek paprsků rovnoběžných s optickou osou. Umístíme-li v ohnisku takového zrcadla bodový zdroj světla, odráží zrcadlo svazek rovnoběžných paprsků, přičemž ztráty světla se vzdáleností od zrcadla jsou malé. To je podstatou reflektorů, jichž se užívá ve vojenství k osvětlování, dále ve filmové výrobní technice, u motorových vozidel i u kapesních svítilen. Vypuklých zrcadel se užívá např. v dopravě na křižovatkách, u zrcadlových dalekohledů, k rozptylu světla apod.

8.3 Zobrazování lomem

K zobrazení lomem se nejčastěji používá čoček z opticky čirého prostředí o indexu lomu n, které jsou omezeny dvěma kulovými plochami nebo jednou plochou kulovou a jednou rovinnou. Jsou dva druhy čoček: **spojky a rozptylky**.



163. Druhy čoček: a) spojky, b) rozptylky



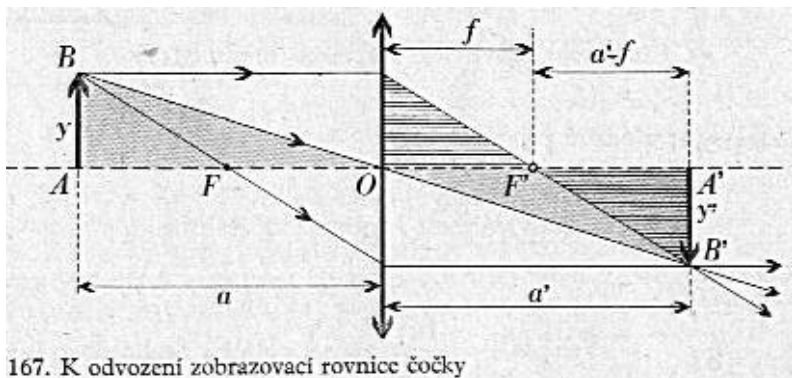
164. Čočka dvojevypuklá

Spojnice středů křivosti: C_1 , C_2 – optická osa o ; průsečíky s osou o – vrcholy V_1 , V_2
Bod O je optický střed čočky.

Na optické desce se přesvědčíme, že pro tenkou čočku a pro osové paprsky platí:

- 1) Paprsky rovnoběžné s optickou osou se po průchodu spojnou čočkou sbíhají v jednom bodě – ohnisku čočky; jeho vzdálenost od čočky je ohnisková vzdálenost f .
- 2) Paprsky vycházející z ohniska jsou po průchodu čočkou rovnoběžné s optickou osou.
- 3) Paprsky jdoucí optickým středem čočky zachovávají svůj směr.
- 4) Paprsky vycházející z jednoho bodu (na ose nebo mimo osu se po průchodu čočkou sbíhají opět v jednom bodě.

Z obrázku odvodíme vztah, platný pro vzdálenost a předmětu od čočky a vzdálenost a' obrazu od čočky. Je-li y velikost předmětu a y' velikost obrazu,



167. K odvození zobrazovací rovnice čočky

pak platí:

$$|Z| = \frac{y'}{y} \quad Z = -\frac{a'}{a} = -\frac{a'-f}{f}$$

Zobrazovací rovnice čočky:

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

Ohnisková vzdálenost f čočky je určena rovnicí: $\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right) \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)$, n_2 – index lomu čočky, n_1 – index lomu prostředí

Veličina $\varphi = \frac{1}{f}$ se nazývá **optická mohutnost čočky**. Její jednotkou je dioptrie (D). Je to optická mohutnost čočky s ohniskovou vzdáleností 1 m.

Znaménková konvence:

+a – předmět v předmětovém prostoru

-a – předmět v obrazovém prostoru
 +a' - obraz v obrazovém prostoru
 -a' - obraz v předmětovém prostoru
 +r₁ – přední plocha vypuklého předmětového prostoru
 -r₂ – zadní plocha vypuklého obrazového prostoru
 F – předmětové ohnisko, F' - obrazové ohnisko

Pro f platí: f > 0 – spojka; f < 0 – rozptylka

$$\text{Příčné zvětšení: } |Z| = \frac{y'}{y} \quad Z = -\frac{a'}{a} = -\frac{a'-f}{f} = -\frac{f}{a-f}$$

Pro spojku platí:

a > 2f – skutečný, obrácený, zmenšený f' < a' < 2 f'
 a = 2f – skutečný, obrácený, stejně velký a' = 2 f'
 2f > a > f – skutečný, obrácený zvětšený a' > 2f'
 F > a – zdánlivý, zvětšený, leží nalevo

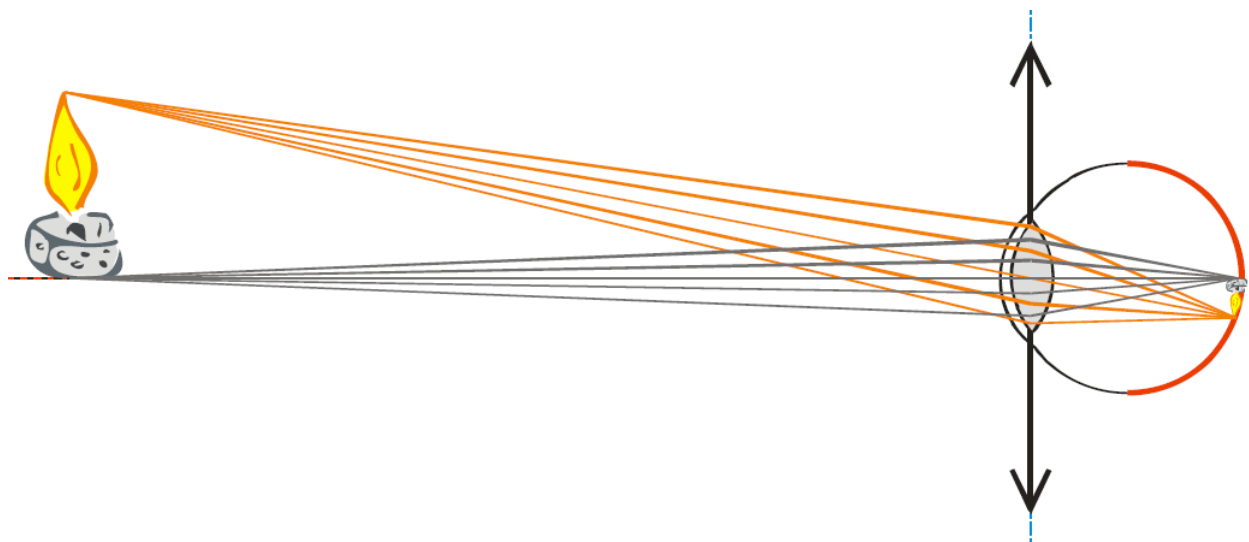
Pro rozptylku platí:

Obraz je vždy zdánlivý, přímý zmenšený.

8.4 Oko jako optická soustava

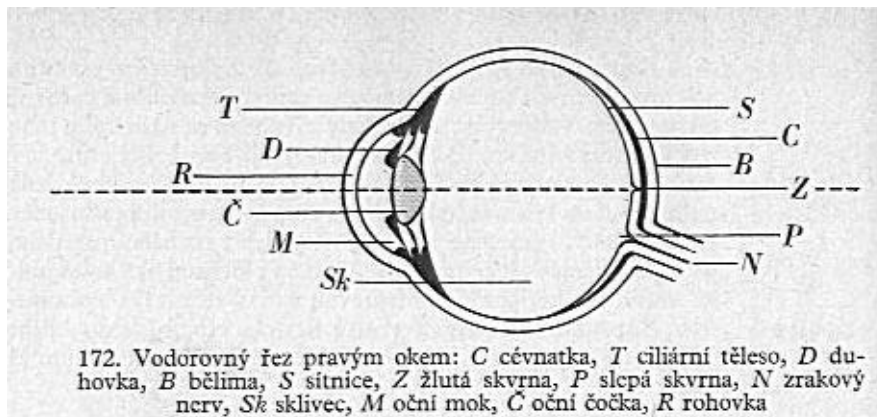
Lidské oko je nejdůležitější optická soustava, umožňující poznávání vnějšího světa. Je to spojná optická soustava, která na žluté skvrně sítnice, vytváří převrácené, zmenšené a skutečné obrazy vnějších předmětů. Zvykem získaným od narození však vidíme předměty přímé.

Princip vidění



Přední (černá) část oka láme světelné paprsky a vytváří skutečný, zmenšený, převrácený obraz na zadní (červené) části. Zde se nachází vrstva buněk citlivých na světlo, které zachycují obraz a informace o dopadajícím světle posílají do mozku. Průměr oční koule se udává většinou kolem 24 mm, vzdálenost mezi čočkou a sítnicí je však menší - 20 mm nebo i méně.

Části oka



172. Vodorovný řez pravým okem: C cévnatka, T ciliární těleso, D duhovka, B bělma, S sítnice, Z žlutá skvrna, P slepá skvrna, N zrakový nerv, Sk sklivec, M oční mok, C oční čočka, R rohovka

Nejprve prostudujeme zadní část oka – záznamovou vrstvu.

Nazývá se sítnice (na posledním obrázku žlutá vrstva), tvoří ji dva druhy buněk citlivých na světlo:

- čípky (7 miliónu buněk) vnímají barvu, méně citlivé, potřebují více světla,
- tyčinky (125 milionů buněk) nerozlišují barvy (vidí černobíle), podstatně citlivější než čípky.

Rozložení buněk na sítnici není rovnoměrné:

- **žlutá skvrna** – maximální hustota čípků (směrem od žluté skvrny hustota čípků klesá a zvětšuje se hustota tyčinek), místo nejostřejšího vidění,
- **slepá skvrna** – nejsou žádné tyčinky a čípky (zde vychází oční nerv z oka), dále od žluté skvrny kvalita zobrazení klesá (periferní vidění), ale oko velmi rychle dokáže zaměřit svou pozornost tam, kam potřebujeme.

Citlivost (schopnost rozlišit tmavá a světlá místa)

- statická (v jednom okamžiku) 100:1,
 - dynamická (mezi dvěma okamžiky, přispívá k ní duhovka i chemické změny sítnice) 1000000:1 (ale trvá to dlouho),
- za běžných podmínek 30000:1 (digitální fotoaparát asi 1000:1).

Duhovka

Kruhový terčik z hladkého svalstva, barva jeho pigmentových buněk určuje barvu očí, uprostřed tmavý otvor zornice, který propouští světlo do vnitřní části oka (zornice je černá, protože neodráží světlo, ale propouští ho do vnitřní části oka). Duhovka může měnit průměr zornice v rozsahu 2 – 8 mm a tím regulovat množství světla v oku (ochrana sítnice před spálením). Pokud i nejmenší průměr zornice propouští příliš mnoho světla, zavřeme oči. Koukání do slunce - vypálení sítnice (platí doslova jako u papíru) a konec kvalitního zraku.

Rohovka

Přední průhledná část oka, zakřivená ven (jako spojka), má na svědomí největší část optické mohutnosti oka (přibližně 40 D), dotek rohovky vyvolá nepodmíněný reflex zavření víček, nutnost neustálého zvlhčování.

Čočka

Dvojevypuklá spojka, druhá část optické soustavy, která vytváří obraz na sítnici.

Problém: Obrazy různě vzdálených předmětů vznikají různě daleko za čočkou oko musí být schopné měnit ohniskovou vzdálenost soustavy rohovka-čočka čočka je pružná a napojená na svalová vlákna

oko může čočku zakulacovat nebo zplošťovat a tím měnit její ohniskovou vzdálenost.

Zorné pole (jakou část prostoru vidíme):

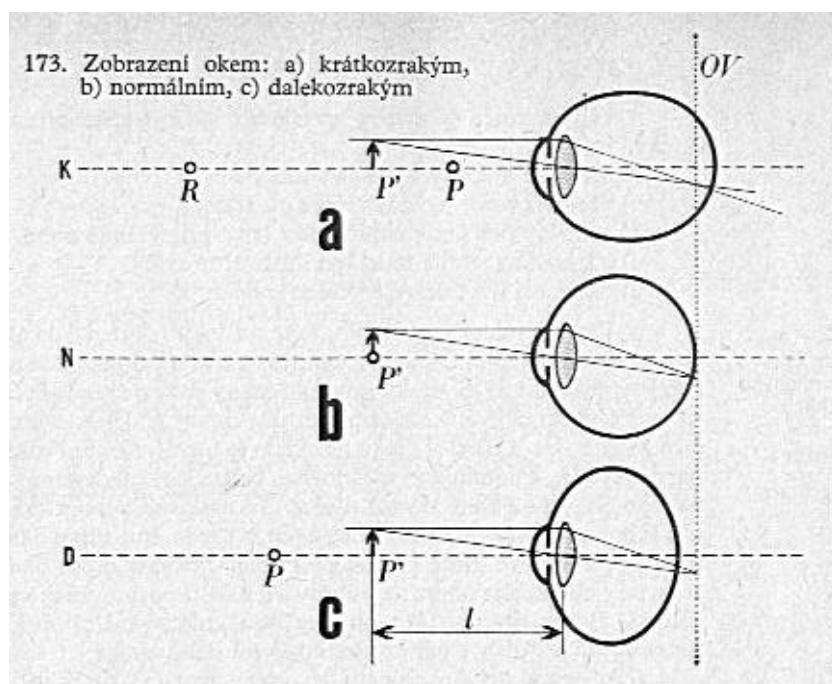
- jedno oko (130 stupňů ve svislém a 160 stupňů ve vodorovném směru,
- obě oči (200 stupňů ve vodorovném směru).

Oko rozlišuje přes 2,5 miliónů různých barev a dohromady může do mozku odesílat 72 GB za sekundu, vnímá však pouze světlo o vlnových délkách 400 až 700 nm.

Velký vliv na vidění má zpracování obrazu mozkiem:

- převrácení obrazu (mozek je schopen se naučit převracet obraz v případě, že člověk nosí dlouhodobě převracecí brýle),
- iluze plynulého pohybu,
- prostorové vidění.

Vady oka:



Krátkozrakost – oko vidí zřetelně jen blízké předměty. U krátkozrakého oka je daleký bod (R) v konečné vzdálenosti od oka a blízký bod (P) je značně posunut k oku. Aby oko vidělo ostře i vzdálené předměty, je nutné zmenšit jeho optickou mohutnost. Toho se dosáhne tím, že se oko opatří brýlemi s rozptylnými čočkami. Optická mohutnost rozptylky v dioptriích vyjadřuje stupeň krátkozrakosti.

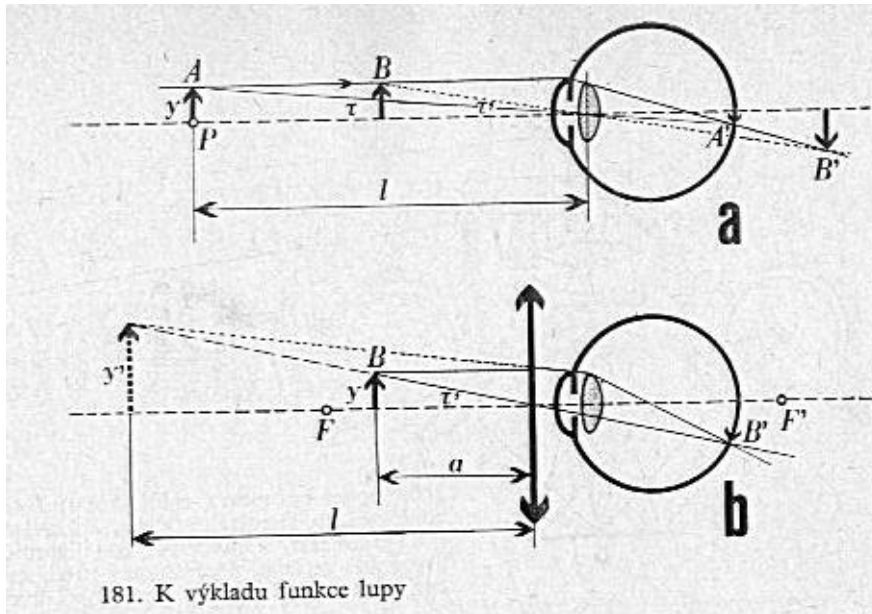
Dalekozrakost – z normální vzdálenosti vidí dalekozraký nezřetelně. Optická mohutnost dalekozrakého oka je malá. Je nutné ji zvětšit tak, aby byl blízký bod (P') posunut aspoň do konvenční zrakové vzdálenosti. Toho se dosáhne tím, že se před oko představí brýle se spojkami o vhodné optické mohutnosti. Optická mohutnost spojky v dioptriích vyjadřuje stupeň dalekozrakosti.

8.5 Mikroskop, lupa

Lupa a mikroskop slouží k rozlišení podrobností blízkých, ale velmi malých předmětů.

Lupa – zvětšovací sklo

Princip použití: přiložíme lupu k oku = přidáme k oku další spojku - zvětší se optická mohutnost oka (schopnost oka lámat paprsky) - můžeme pozorovat předměty ve větší blízkosti oka (a tedy pod větším zorným úhlem).



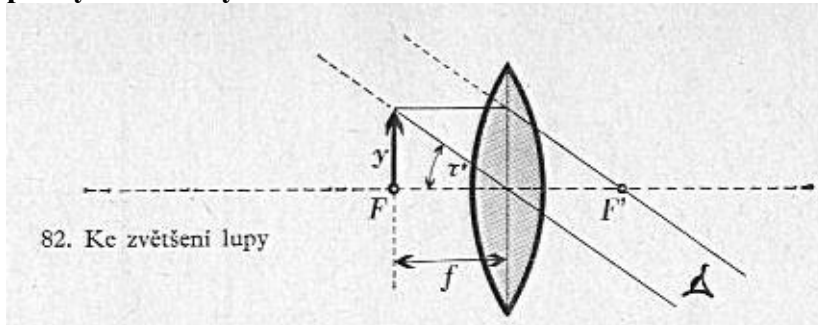
181. K výkladu funkce lupy

Při pozorování předmětu o velikosti y z konvenční zrakové vzdálenosti se vytvoří na sítnici oka zmenšený a skutečný obraz předmětu. Předmět se jeví v zorném úhlu

$$\operatorname{tg} \tau = \frac{y}{l}$$

Je-li $\tau < 60''$ vidíme předmět nezřetelně. Ke zvětšení úhlu slouží lupa. Pozorovaný předmět umístíme mezi lupou a okem. **Oko pozoruje zvětšený**

přímý a zdánlivý obraz.



82. Ke zvětšení lupy

Zvětšení lupy: $Z = \frac{\tau'}{\tau}$. τ' - zorný úhel pod lupou, τ - zorný úhel bez lupy

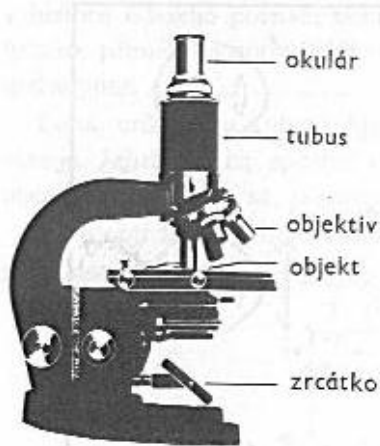
$$Z = \frac{\tau'}{\tau} = \frac{\operatorname{tg} \tau'}{\operatorname{tg} \tau} = \frac{\frac{y'}{a}}{\frac{y}{l}} = \frac{l}{a}$$

Vztah pro zvětšení ukazuje,

že zvětšení je závislé na akomodaci našeho oka. Proto se uvažuje případ, kdy oko je akomodováno na nekonečno. Předmět je pak v ohniskové rovině lupy, zdánlivý obraz je v nekonečné vzdálenosti. Pro zvětšení pak vychází $Z = \frac{l}{f}$

Lupa se používá k malému zvětšení. Maximální zvětšení je 20.

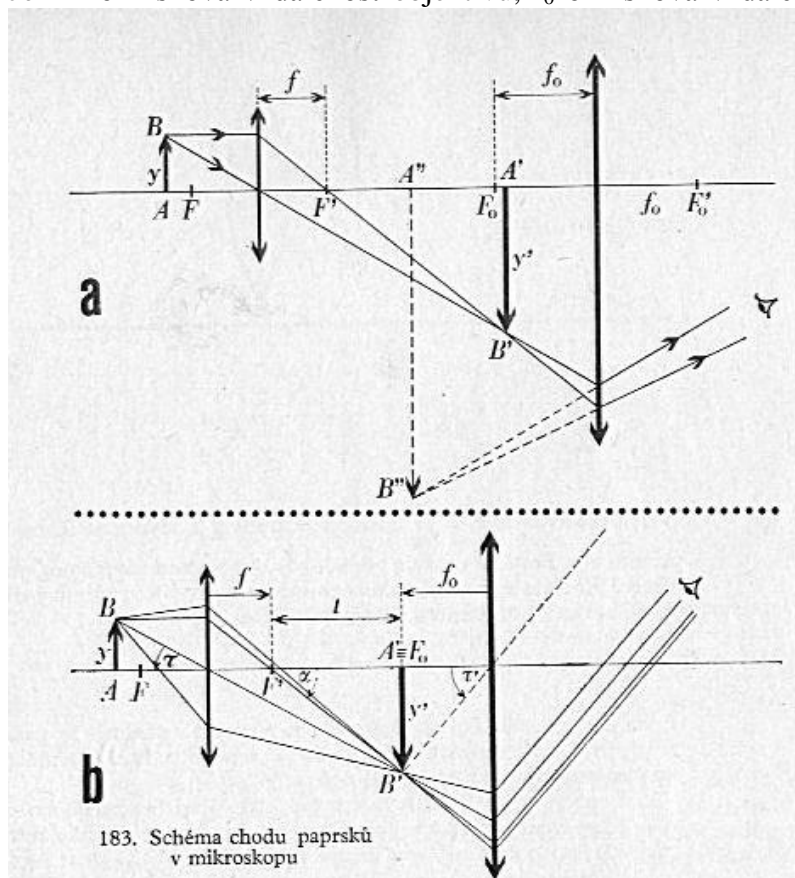
Mikroskop



Pro větší zvětšení užíváme mikroskop. Skládá se ze dvou spojených soustav čoček, z nichž prvá je na straně předmětu vytvoří jeho skutečný a zvětšený obraz, který pozorujeme druhou soustavou jako lupou. Obě soustavy jsou upevněny v kovové trubce zvané tubus mikroskopu. První soustava se nazývá objektiv, druhá okulár. Objektivy a okuláry lze vyměňovat.

Objektiv mikroskopu má malou ohniskovou vzdálenost f pozorovaný předmět (preparát) umístíme poněkud dál od objektivu, že je jeho ohnisková vzdálenost. Objektivem se vytvoří obraz y' předmětu y okulár nařídíme tak, aby se tento obraz vytvořil buď mezi ohniskovou rovinou okuláru a okulárem, nebo v jeho ohniskové rovině.

Je-li f ohnisková vzdálenost objektivu, f_0 ohnisková vzdálenost okuláru, t vzdálenost jejich



183. Schéma chodu paprsků v mikroskopu

vnitřních ohnisek, pak platí $\text{tg } \tau = \frac{y}{l}$, $\text{tg } \tau' = \frac{y'}{f_0}$.

Velikost obrazu y' lze psát:

$$y' = t \cdot \text{tg } \alpha, \quad \text{tg } \alpha = \frac{y}{f} \quad \text{a z toho}$$

$$\text{plyne } y' = \frac{t y}{f}.$$

Pro zvětšení mikroskopem tedy dostaneme:

$$Z = \frac{\tau'}{\tau} = \frac{\text{tg } \tau'}{\text{tg } \tau} = \frac{\frac{y'}{f_0}}{\frac{y}{l}} = \frac{y' l}{y f_0} = \frac{t l}{f f_0}$$

kde $\frac{t}{f} = \beta$ - zvětšení

objektivu a $\frac{l}{f_0} = Z_0$ -

zvětšení okuláru

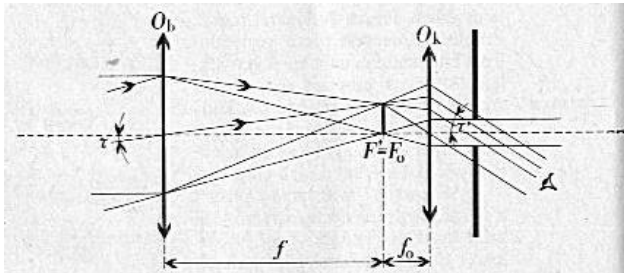
Největšího zvětšení, kterého

lze prakticky užít, je asi 2000.

8.6 Dalekohledy

Zorný úhel vzdálených, třeba i velmi velikých předmětů je malý, takže na nich nemůžeme pouhým okem rozeznávat podrobnosti. Optické přístroje, kterými je možno uměle zvětšit zorný úhel vzdálených předmětů, se nazývají dalekohledy. Dalekohledy, u nichž je použito výhradně čoček, se nazývají refraktory. Dalekohledy, u nichž je užito zrcadel, se nazývají reflektory.

Keplerův dalekohled



Má spojný okulár. Má objektiv o velké ohniskové vzdálenosti f a okulár o malé ohniskové vzdálenosti f_0 . Objektivem se vytvoří obraz vzdáleného předmětu v ohniskové rovině obrazového prostoru. Obraz je převrácený, zmenšený a skutečný. Okulár je umístěn na společné ose tak, aby obraz vytvořený objektivem vznikl v jeho

ohniskové rovině v předmětovém prostoru. Délka tohoto dalekohledu je rovna $f + f_0$.

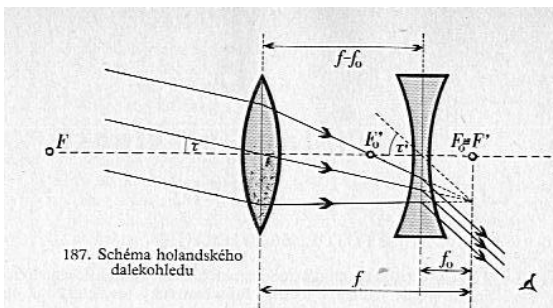
Zvětšení dalekohledu je dáno součinem zvětšení objektivu a okuláru: $Z = \gamma \cdot Z_0$

Pro zvětšení okuláru platí: $\frac{l}{f_0} = Z_0$

Pro zvětšení objektivu γ objektivu platí: $\gamma = \frac{f}{l}$

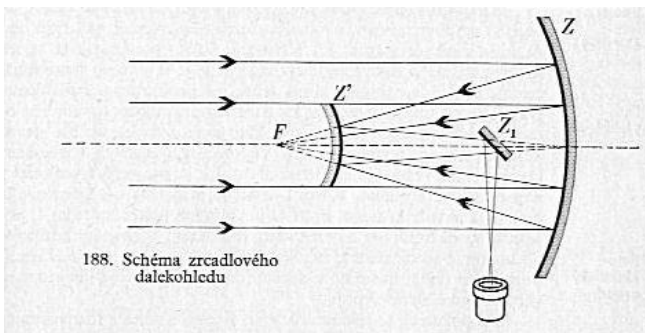
Zvětšení dalekohledu je: $Z = \frac{f}{f_0}$.

Gallileův dalekohled = Holandský dalekohled



U dalekohledu holandského je objektivem spojná soustava o větší ohniskové vzdálenosti f a okulárem rozptylná soustava s malou ohniskovou vzdáleností f_0 . Chod paprsků je znázorněn na obrázku. Zvětšení tohoto dalekohledu je rovněž dáno podílem ohniskových vzdáleností objektivu a okuláru. Obrazy jsou vzpřímené. Užíváme ho jako divadelního kukátka.

Zrcadlový dalekohled



Slouží pro astronomická pozorování. U něj je objektiv nahrazen dutým zrcadlem, jež vytvoří skutečný obraz, který pozorujeme okulárem jako lupou. Paprsky, vycházející ze vzdáleného předmětu, ležícího v optické ose zrcadla, se sbíhají po odrazu v dutém zrcadle v jeho ohnisku. Obraz, který zde vznikl, by byl nevhodný pro pozorování. Před ohnisko umístíme malé vypuklé zrcátko

Z' . Pomocí rovinného zrcátka usměrníme obraz tak, abychom ho mohli pozorovat okulárem.