

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

Přírodovědecká fakulta

Katedra optiky

Akademický rok: 2009 - 2010

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Rozlišovací schopnost oka při nízkých úrovních osvětlení

Vypracovala: Hana Kubičková

Studijní obor: Bakalářské studium-Přístrojová optika

Datum odevzdání: 30. července 2010

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jen pramenů, které jsem uvedla v seznamu literatury.

V Olomouci dne : 30. července 2010

.....

Hana Kubičková

Ráda bych poděkovala především firmě Meopta Přerov za zapůjčení nízko úrovňového jasoměru. Dále pak firmě Pramacon spol. s.r.o. za umožnění realizace jednoho měření v prostorách jejich laboratoře. Nakonec bych ráda poděkovala panu RNDr. Vladimíru Chlupovi za jeho pomoc, radu a za jeho pracovní i volný čas, který mi věnoval.

Úvod

Téma bakalářské práce bylo pro autorku zajímavé, protože sama nosí brýle (pouze slabé). Při sledování různých předmětů byla subjektivně schopna vidět, že viditelnost předmětů neovlivňuje pouze jejich vzdálenost od pozorovatele, ale i jiní činitele. Téma se autorce zdálo zajímavé a i pro ni osobně přínosné.

Cílem práce je uskutečnit měření při různých úrovních osvětlení (jasu). Naměřené hodnoty zaznamenat a porovnat s výsledky známými z literatury, které byly získány jinou metodou pozorování. Aby mohlo být pozorování uskutečněno, byly navrženy a vytvořeny čárové testy, na kterých měření probíhalo. Po uskutečnění pozorování byla vypočtena rozlišovací schopnost jednotlivých pozorovatelů.

V první části práce autorka popsala anatomii lidského oka. V dalších kapitolách jsou shrnuty základní optické vlastnosti oka. Dále je pak v teoretické části uveden přehled základních fotometrických veličin. Následuje popis Arnulfovy metody měření rozlišovací schopnosti a jeho výsledky. Na závěr teoretické části jsou zařazeny modely oka Gullstranda a Walkera vytvořené z hodnot známých z literatury a zpracovaných pomocí programu OSLO.

Následuje část popisující tvorbu Johnsonových testů, na kterých proběhly experimenty. Další částí práce je část, ve které jsou popisovány čtyři vlastní experimenty a jejich výsledky jsou zaznamenány v tabulkách. V závěru práce jsou zpracovány výsledky do podoby bodů v grafu a porovnány s křivkami navrženými Arnulfem.

Obsah

ÚVOD.....	4
OBSAH.....	5
1 LIDSKÉ OKO A VIDĚNÍ.....	8
1.1 Anatomie lidského oka.....	8
1.2 Přídavné orgány oka	9
1.2.1 Světlocitlivé receptory.....	9
1.2.1.1 Čípky.....	10
1.2.1.2 Tyčinky.....	12
2 SPEKTRÁLNÍ CITLIVOST LIDSKÉHO OKA.....	12
3 VZNIK ZRAKOVÉHO VJEMU	13
4 VIDITELNOST	14
4.1 Adaptace oka	14
4.1.1 Tři druhy adaptačních mechanismů	14
4.1.2 Dělení adaptace oka podle potřebného času	15
4.1.2.1 Světlá adaptace.....	15
4.1.2.1 Temná adaptace	15
4.2 Rozlišovací schopnost oka.....	15
4.2.1 Různé druhy testů rozlišovací meze užívaných v praxi.....	16
4.2.1.1 Landoltovy testy.....	16
4.2.1.2 Foucaultovy-Bigourdanovy testy.....	17
4.2.1.3 Argentieriovy testy.....	17
4.2.1.4 Jewelloy testy.....	18
4.3 Kontrast	19
5 AKOMODACE	20

6	ZÁKLADNÍ FOTOMETRICKÉ VELIČINY	22
6.1	Světelný tok	22
6.2	Svítivost	22
6.3	Osvětlení	23
6.4	Jas	23
6.5	Světlení	24
7	ARNULFOVO MĚŘENÍ ROZLIŠOVACÍ MEZE LIDSKÉHO OKA	25
8	MODELY OKA V PROGRAMU OSLO	27
8.1	Gullstrandův model oka	27
8.2	Walkerův model oka	29
9	VLASTNÍ MĚŘENÍ.....	31
9.1	Johnsonovy testy rozlišovací schopnosti	31
9.2	Johnsonovy testy rozlišovací schopnosti s jiným kontrastem	32
9.3	Měření a výpočet kontrastu testů	32
9.3.1	Výpočet kontrastu pro šesti čárový test o středním kontrastu	33
9.3.2	Výpočet kontrastu pro šesti čárový test o nejmenším kontrastu	34
9.4	První experiment.....	35
9.4.1	Příklad výpočtu rozlišovací meze u šesti čárového testu	35
9.4.2	Příklad výpočtu rozlišovací meze u 3 čárového testu	36
9.5	Druhý experiment	37
9.6	Třetí experiment	40
9.7	Čtvrtý experiment	41
10	VÝSLEDKY	43

ZÁVĚR 46

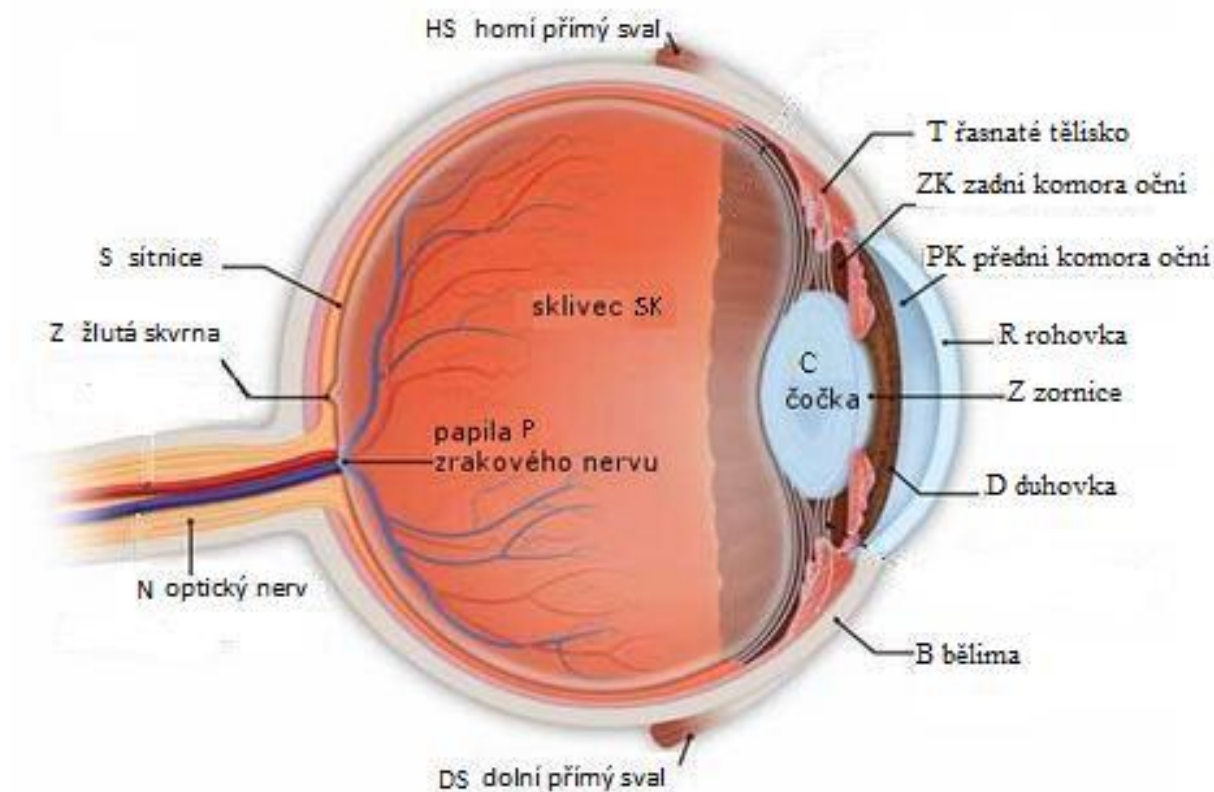
LITERATURA..... 47

1 Lidské oko a vidění

1.1 Anatomie lidského oka

Oční koule (obrázek 1) má přibližně kulový tvar s průměrem asi 24 mm, je uložena v očníci, která jí dovoluju pouze otáčivé pohyby. Tyto pohyby zajišťují tři páry svalů:

- a) přímé svaly-vnitřní a vnější;
- b) přímé svaly – horní HS (obr. 1) a dolní DS;
- c) šikmé svaly – malý a velký.



Obrázek 1 Vodorovný řez levého lidského oka¹

Obal oční koule tvoří tři blány. Vnější (povrchová) blána složená s bělimy *B* a rohovky *R*. Bělma má bílou vnější stranu, její vnitřní strana je hnědá. Vnitřní stěnu bělimy pokrývá cévnatka. Rohovka je viditelná, průhledná část vnější blány o značné optické mohutnosti (asi 40 D). Za touto povrchovou blánou je přední oční komora *PK*, vyplněná průhledným očním

¹ Obrázek byl převzat z <http://www.zeleny-zakal.cz/jak-vidime>, [03. 11. 2009], upraven.

mokem. Střední (cévnatá) blána je složená z cévnatky, řasnatého tělíska *T* a duhovky *D*. Řasnaté tělísko je paprskovitý sval, který svými pohyby umožňuje akomodaci čočky. Duhovka je kruhově uspořádaná svalovina, která umožňuje přizpůsobení velikosti zornice *Z* (pupily). To je kruhový otvor uprostřed duhovky. V duhovce jsou pigmentové buňky, které určují barvu očí a zároveň zabraňují průchodu světelných paprsků mimo zornici. Za touto střední blánou se nachází bikonvexní spojná čočka *C*. (Má zadní plochu zakřivenou víc, než plochu přední.) Za ní je zadní oční komora *ZK*, vyplněná průhledným rosolovitým sklivcem *SK*. Zadní stěnu oční koule pokrývá vnitřní blána. Vnitřní blána se nazývá sítnice *S*, na ní vzniká obraz, který je skutečný, zmenšený a převrácený. Na sítnici máme uloženy dva druhy světlocitlivých receptorů, ty se nazývají tyčinky a čípky. Nejcitlivějším místem sítnice je žlutá skvrna *Z*, ležící na optické ose oka. Její úhlová velikost je asi $6^\circ - 7^\circ$. Nejméně citlivým místem sítnice je slepá skvrna *P* (papila), to je místo, kde vstupuje do oka zrakový optický nerv *N* a nejsou zde žádné světlocitlivé receptory.

1.2 Přídavné orgány oka

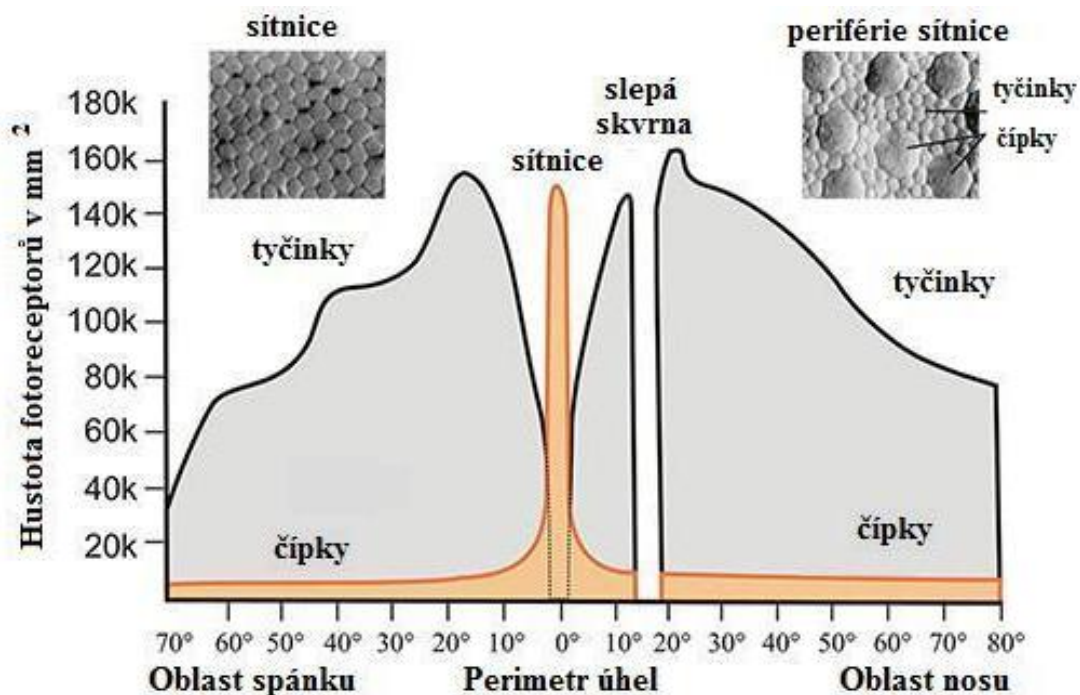
1.2.1 Světlocitlivé receptory



Zrakový vjem vzniká na sítnici tím, jak světelné paprsky přicházející po optické ose do oka, setkají se zde se světlocitlivými buňkami. Dopadem světla na ně, dochází k vzniku nervového podráždění. Tyto buňky nazýváme tyčinky a čípky (obr. 2). Jejich rozložení na sítnici není rovnoměrné (obr.:3).

Obrázek 2: Tyčinky a čípky na sítnici primáta. Nasnímáno pomocí skenovací elektronové mikroskopie ²

² Obrázek byl převzat z <http://webvision.med.utah.edu/imageswv/scanEMphoto.jpg>, [13. 2. 2010].



Obrázek 3: Rozložení tyčinek a čípků na sítnici³

Čípky a tyčinky využívá oko k vidění *mezopického* (za šera nebo soumraku). Při adaptaci zraku na šero začne člověk v určitém okamžiku vnímat barvy okolních objektů jinak. Červené objekty se nám jeví tmavší, méně barevné. Naopak modré objekty začnou být jasnější. Tento jev nazýváme Purkyňův jev.

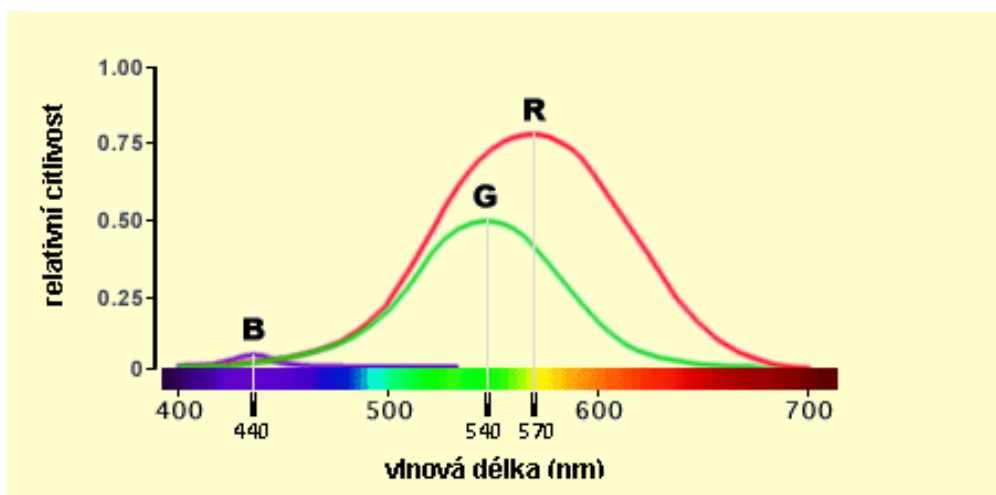
1.2.1.1 Čípky

Čípky jsou receptory reagující na barvu v oku, je jich něco okolo 7 milionů. V čípcích obsažený fotoaktivní pigment *iodopsin* způsobuje, že vidíme barevně. Díky existenci tří druhů těchto pigmentů, jsou čípky spektrálně selektivní částice. Každý druh pigmentu čípku je citlivý na jiný rozsah vlnových délek. Maximální citlivost modrých pigmentů čípků je zhruba asi okolo 440 nm, u zelených pigmentů čípků je to kolem hodnoty 540 nm a červené pigmenty čípků dosahují maxima u 570 nm.

Čípky oko využívá k vidění *fotopického* neboli dennímu.

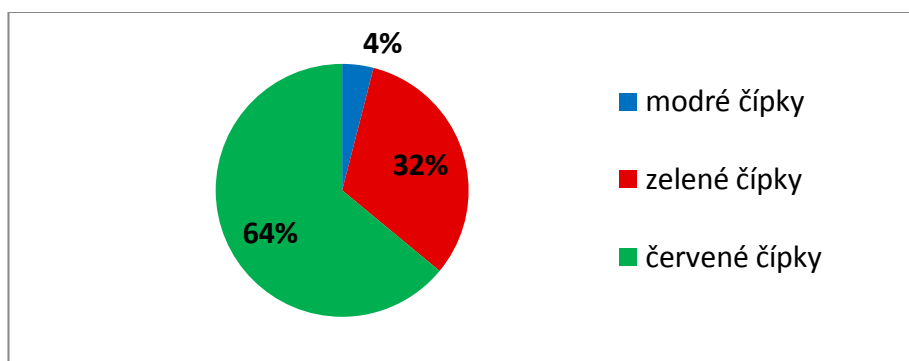
³ Obrázek byl převzat z <http://www.rags-int-inc.com/PhotoTechStuff/CameraEye/EyeConeDistrubition.jpg>, [17. 2. 2010], upraven.

Z obrázku č. 4 je patrné, že modré čípky mají výrazně odlišné vlastnosti, kdežto čípky zelené a červené jsou si svými vlastnostmi relativně podobné.



Obrázek 4: Relativní spektrální citlivost čípků⁴

Z grafu č. 1 je patrné, procentuelní zastoupení jednotlivých druhů pigmentů čípků na sítnici. Existují různé teorie objasňující, proč je modrých čípků málo a proč mají odlišné vlastnosti. Jedna z nich říká⁵, že se takto snižuje vliv chromatické aberace čočky, další zase, že je takto kompenzován vyšší podíl kratších vlnových délek v denním světle.



Graf 1: Procentuelní zastoupení druhů barevných pigmentů čípků na sítnici

⁴ Obrázek byl převzat z <http://www.paladix.cz/clanky/barevne-videni-druhy-pohled.html>, [03. 11. 2009].

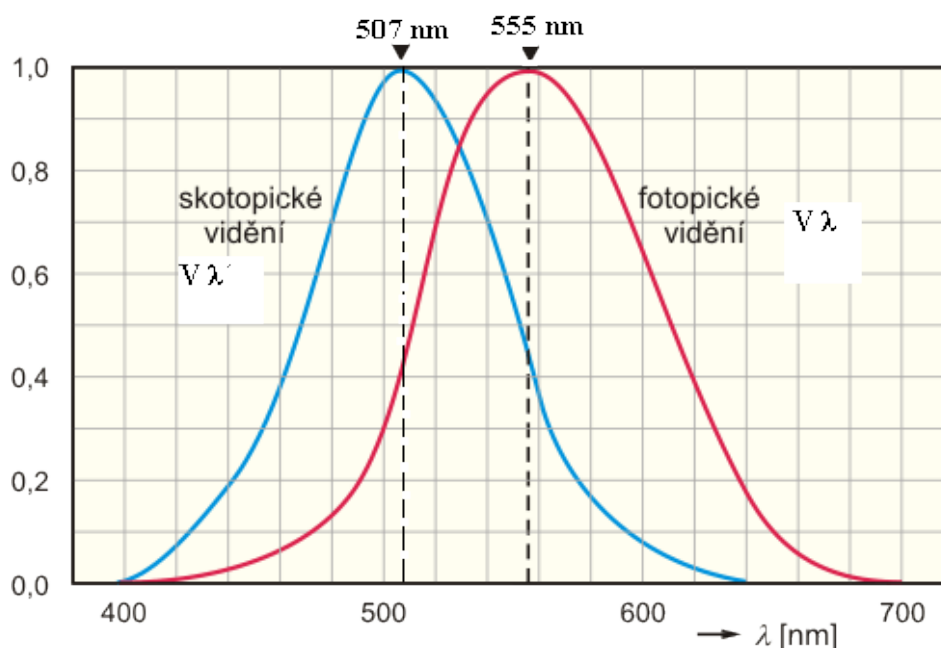
⁵ <http://www.paladix.cz/clanky/barevne-videni-druhy-pohled.html> [28. 10. 2009].

1.2.1.2 Tyčinky

Tyčinek máme asi 130 milionů, obsahují světlocitlivý pigment *rhodopsin*. Je citlivý na všechny vlnové délky světla, na některé více a na jiné méně. Tyčinky mají sice velkou citlivost na světlo, ale nedokáží rozlišit barvu. Jejich maximální citlivost je přibližně 500 nm. Pokud dopadá na sítnici větší množství světla, začne oko zprostředkovávat vidění pouze pomocí čípků. Tyčinky nám tedy slouží k vidění *skotopickému* (nočnímu).

2 Spektrální citlivost lidského oka

Spektrální citlivost oka se mění v závislosti na množství *jasu zorného pole*, je udávána *poměrnou světelnou účinností*. Existují dvě normalizované hodnoty *poměrné světelné účinnosti monochromatického záření* (obr. 5) a to V_λ pro denní (*fotopické*) vidění a V'_λ pro noční (*skotopické*) vidění. Pro mezopické (soumrakové) vidění zatím nebyla hodnota *poměrné světelné účinnosti* určena normou z důvodu nedostatku kvalitních údajů.⁶



Obrázek 5: Normalizované citlivosti oka pro denní a noční vidění⁷

⁶ Staněk, J., *Vizuální fotometrie a fyziologická optika*. Příloha k časopisu *Jemná mechanika optika*. Praha, SNTL, 1980-1982, s. 74.

⁷ Obrázek byl převzat z http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_s1_uni.php, [4. 2. 2010].

3 Vznik zrakového vjemu

Pokud do oka přicházejí paprsky z vnějších předmětů, spojují optickou soustavu v oku se sítnicí. Na sítnici se setkají se světlocitlivými receptory. Množství světla, které dopadne na sítnici, si řídí oko samo pomocí rozšiřování a stahování duhovky. Takže za různých světelných podmínek má oční *pupila* (duhovka) různý průměr. Při velké intenzitě světla se pupila stáhne do nejmenšího průměru (2 mm). Při malé intenzitě světla se pupila roztáhne do průměru asi 8 mm. (Obrázek 6.) S věkem se toto maximum průměru pupily mění.



Obrázek 6: Změny zornice oka při silném osvětlení, osvětlení normální intenzity a slabé intenzity.⁸

⁸ Obrázek vznikl úpravou obrázků očního simulátoru dostupného na: <http://cim.ucdavis.edu/EyeRelease/Interface/TopFrame.htm> [23. 7. 2010].

4 Viditelnost

Viditelnost předmětu je závislá na velkém počtu činitelů, nejdůležitějšími jsou dva, *rolišovací schopnost oka a kontrast předmětu vzhledem k pozadí*.

Příklady dalších činitelů významně ovlivňujících viditelnost:

- adaptace oka;
- jas pozadí na, kterém se nachází předmět;
- zorný úhel předmětu;
- čas pozorování;
- fotometrické vlastnosti pozorovaného předmětu;
- složení světla zdroje, osvětlujícího předmět;
- geometrické vlastnosti předmětu (podobnost, tvar);
- únava očí (Oko by mělo být normální a neunavené.).⁹

4.1 Adaptace oka

Adaptace oka je schopnost oka přizpůsobit se různým jasům zorného pole. Rozmezí jasů, ve kterém oko pracuje, se nazývá adaptační rozsah. Pohybuje se od $10^{-7} \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ do $10^5 \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$.

4.1.1 Tři druhy adaptačních mechanismů

1. Tvoření tyčinkami a čípkami. Ty pracují v určitém rozsahu jasů. Tyčinky pracují při jasech $10^{-7} \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ až do $1 \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Čípky při jasech od $1 \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ až do $10^5 \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$.
2. Dalším mechanismem adaptace je změna velikosti pupily oka. Oční pupila mění průměr od 2 do 8 mm v závislosti na jasu zorného pole.
3. Poslední adaptační mechanismus dělíme do dvou skupin
 - a, Při působení světla se zrakový purpur tvořený *světlocitlivým pigmentem (rhodopsinem)* rozkládá a bledne. Čím je jeho koncentrace menší, tím více světla na sítnici dopadá. Pokud osvětlení sítnice klesne, rozklad zrakového purpuru se zpomalí, a proto se jeho koncentrace zvýší.

⁹ <http://www.opto.cz/havelkall/t006.html#TOC1> [18. 11. 2009].

b, Při změně jasu zorného pole dochází na sítnici k přesunu zrn temného pigmentu. Pokud bude sítnice zvýšeně osvětlená, přesune se pigment na povrch sítnice. Což způsobuje stínění světlocitlivých elementů.

Oba tyto adaptační mechanismy neprobíhají okamžitě. Potřebují k adaptaci nějaký čas.

4.1.2 Dělení adaptace oka podle potřebného času

4.1.2.1 Světlá adaptace

Adaptace na světlo je schopnost oka přizpůsobit se přechodu ze tmy na světlo. Přizpůsobení oka na světlo trvá většinou několik vteřin až desítek vteřin. Reakcí očí na náhlé zvýšení intenzity světla je zúžení zornic. Při ještě větším vzrůstu intenzity jsou přivřena víčka a dojde k zaclonění očí například rukou.

4.1.2.1 Temná adaptace

Adaptace na temno je schopnost oka přizpůsobit se přechodu ze světla na tmou. Při adaptaci na temno je důležitá rychlost snížení osvětlení, pokud je snížení intenzity osvětlení postupné, přestáváme nejdříve vidět detaily předmětů, pak jejich barvy a tvar a při dalším snížení přestáváme vidět předměty úplně. Dojde-li však k náhlému snížení intenzity osvětlení, je vidění znemožněno nebo alespoň značně omezeno. Úplná adaptace oka na temno trvá 40 až 60 minut, u některých osob to může trvat i déle. Tento způsob adaptace není zatím jednoznačně vysvětlen.¹⁰

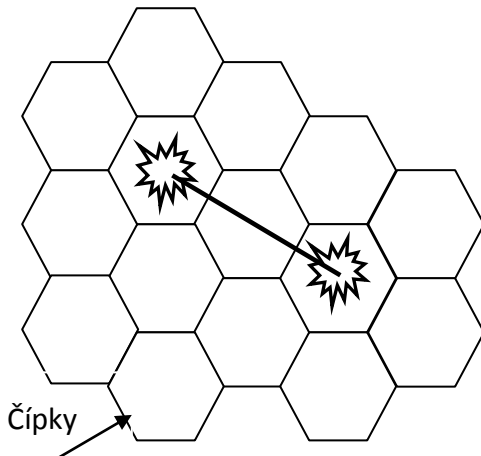
4.2 Rozlišovací schopnost oka

Důležitým činitelem viditelnosti je rozlišovací mez. Rozlišovací mez Ψ_0 lze vypočítat následovně. Průměr čípku je asi $5\mu = 0,005mm$. Sítnice je vzdálena od obrazového uzlového bodu oka $17mm$.

Z toho tedy:

$$\Psi_0 = \frac{0,005}{17} \approx 0,0003 \text{ rad} = 1'$$

¹⁰ Staněk, J., *Vizuální fotometrie a fyziologická optika*. Příloha k časopisu *Jemná mechanika optika*. Praha, SNTL, 1980-1982, s. 113,114.



Obrázek 7. Rozlišovací mez¹¹

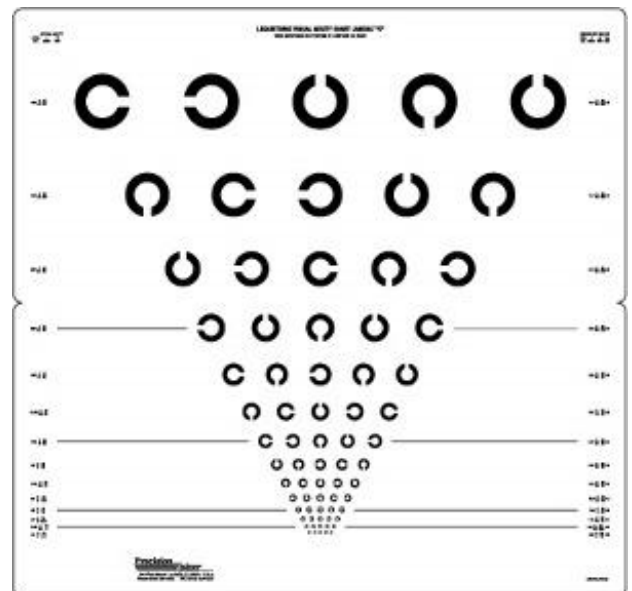
Sítnice zobrazuje bod jako malý *rozptylový kroužek*. Dva body od sebe rozeznáme tehdy, když mezi jejich *rozptylovými kroužky* na sítnici leží alespoň jeden čípek neosvětlený (obrázek 7). Z čehož vyplývá, že *úhlová vzdálenost* takových dvou bodů bude rovna $1'$ nebo bude případně větší.

Rozlišovací mez oka není stálá, je ovlivňována řadou činitelů. Značně se mění se změnou pozorovacích podmínek. Hodnota $\Psi_0 = 1' = 60''$ je konvenční hodnota. *Rozlišovací mez oka* i optických přístrojů měříme pomocí jemně členěných předmětů umělých (tzv. testů) nebo předmětů přirozených.¹²

4.2.1 Různé druhy testů rozlišovací meze užívaných v praxi

4.2.1.1 Landoltovy testy

Prstence (obrázky 8,9) o tloušťce d , které jsou přerušeny mezerou o totožné šířce (d). Test pozorujeme okem (přístrojem) z takové vzdálenosti L , aby byla právě rozlišena tato mezera. Pak je rozlišovací mez oka (přístroje) ve vteřinách dána vzorcem:

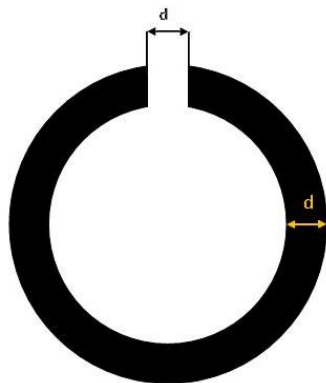


Obrázek 8: Landoltovy prstence¹³

¹¹ Obrázek vznikl překreslením z <http://www.opto.cz/havelkall/t010.html#TOC1>, [17. 2. 2010].

¹² Fuka, J., Havelka, B., I. *OPTIKA Fyzikální Komentář, 1 vyd.* Praha, Státní pedagogické nakladatelství, 1961, s. 230-231.

¹³ Obrázek převzat z <http://www.precision-vision.com/images/products/2205-400.jpg>, [17. 2. 2010].

Obrázek 9: Landoltův prstenec¹⁴

$$\psi \approx \frac{400 d}{L}$$

Do rovnice zadáváme vzdálenost L v metrech a šířku d v milimetrech.

4.2.1.2 Foucaultovy-Bigourdanovy testy

Test je tvořen čtvercem rozděleným na čtvrtiny. V každé čtvrtině jsou rovnoběžné černé proužky oddělené bílými mezerami. V každé čtvrtině jsou orientovány jiným směrem. Rozlišovací mez oka (přístroje) je pak ve vteřinách dána vzorcem:

$$\psi \approx \frac{200 d}{L}$$

Kde d je šířka černého a bílého pružku dohromady v milimetrech a L vzdálenost testu od oka (přístroje) v metrech. Nejčastěji se vedle sebe umístí několik takovýchto očíslovaných testů s různou šířkou mezery. Číslo odpovídá rozlišovací mezi ve vteřinách při pozorování ze vzdálenosti $10 m$. Takovéto testy pak pozorujeme okem (přístrojem) ze vzdálenosti L . Právě pokud rozlišíme všechny směry čar na testu čísla N , pak rozlišovací mez udává vzorec:

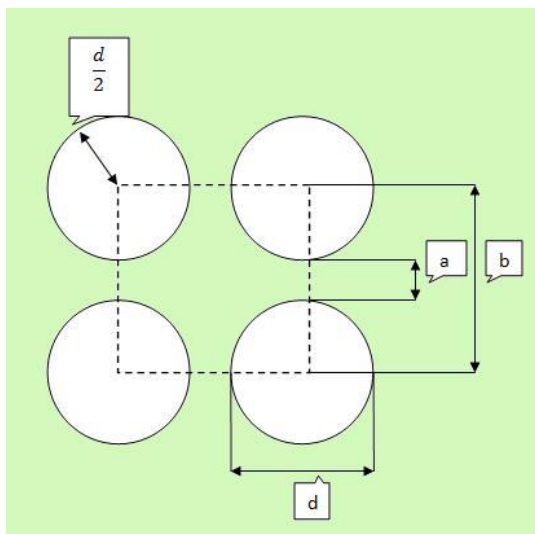
$$\psi_0 \approx \frac{10 N}{L}$$

4.2.1.3 Argentieriovy testy

Kruhové pole bílé (černé) barvy pokrývají přímé řady černých (bílých) kroužků. Plocha bílého (černého) kruhového pole je rovna ploše, kterou zabírají černé (bílé) kroužky v tomto poli. (Obrázek 10.)

$$\frac{b}{d} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \rightarrow d = \frac{4}{5} b, \quad a = \frac{1}{5} a$$

¹⁴ Obrázek vznikl překreslením z <http://www.opto.cz/havelkall/t012.html#TOC1>, [13. 2. 2010].

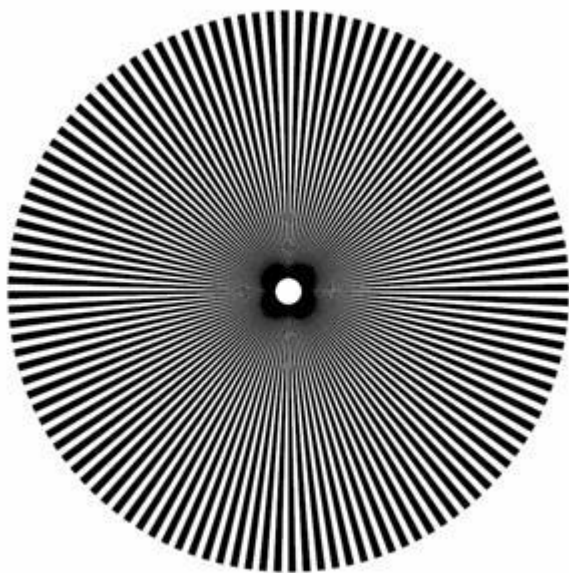
Obrázek 10: Argentierův test¹⁵

Právě pokud rozlišíme strukturu testu ze vzdálenosti L , je rozlišovací mez oka (přístroje) ve vteřinách dána vzorcem:

$$\Psi_0 \approx \frac{250 d}{L}$$

4.2.1.4 Jewellovy testy

Kruhová plocha (obrázek 11) rozdělená na 72 stejných výsečí, u kterých se střídá bílá a černá barva. Pokud, při pozorování ze vzdálenosti L právě rozeznáme hvězdicový charakter testu, pak je rozlišovací mez oka (přístroje) ve vteřinách udána vzorcem:

Obrázek 11: Jewellův test¹⁶

$$\Psi_0 \approx \frac{18 d}{L}$$

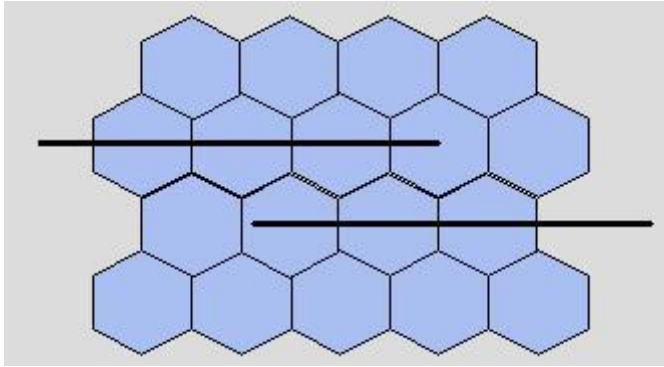
$$\Psi_{0n} < \Psi_0$$

Ψ_{0n} je *noniová rozlišovací mez oka*, ta udává míru dosažení splynutí (*coincidence*) dvou úseček. (Obrázek 12.)

Hodnoty Ψ_{0n} se průměrně pohybují okolo 10''.

¹⁵ Obrázek vznikl překreslením z <http://www.opto.cz/havelkall/t012.html#TOC1>, [13. 2. 2010].

¹⁶ Obrázek byl převzat z <http://www.bboy.org/gallery/data/4673/shimmer.gif>, [17. 2. 2010].



Obrázek 12: Míra dosažení splynutí (*koincidence*) dvou úseček¹⁷

4.3 Kontrast

„Vyniká-li určité místo zorného pole nad okolím, říkáme tomuto jevu kontrast. Kontrastu lze dosáhnout dvojm způsobem: buď růzností intenzity při jednobarevném osvětlení, nebo různobarevným osvětlením.“¹⁸

Pokud roste velikost rozdílu jasu dvou ploch, pak vzrůstá jeho vnímatelnost.

¹⁷ Obrázek vznikl překreslením z <http://www.opto.cz/havelkal/t014.html#TOC1>, [13. 2. 2010].

¹⁸ <http://www.opto.cz/havelkal/t010.html#TOC1> [10. 1. 2010].

Použitá literatura ke kapitole 4: [2], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [15], [17], [18].

5 Akomodace

Oko vidí předměty, které leží v různých vzdálenostech od něj. To je možné díky přizpůsobení oka (*akomodaci*). Změna zakřivení přední plochy čočky způsobí změnu ohniska oka. (Obrázek 14,15.) Oko díky tomu může pozorovat různě vzdálené předměty. Bod ostře zobrazený na sítnici při maximální akomodaci, nazýváme *blízký bod (punctum proximum)*. Při nulové akomodaci je oko v klidu, takto ostře zobrazený bod na sítnici se nazývá *vzdálený bod (punctum remotum)*. U normálního oka leží vzdálený bod v nekonečnu. Poloha blízkého bodu se mění, jeho vzdálenost se zvětšuje s věkem, klesá schopnost akomodace (tabulka č. 1). Poloha vzdáleného bodu se začíná měnit mezi 40 - 50 lety.

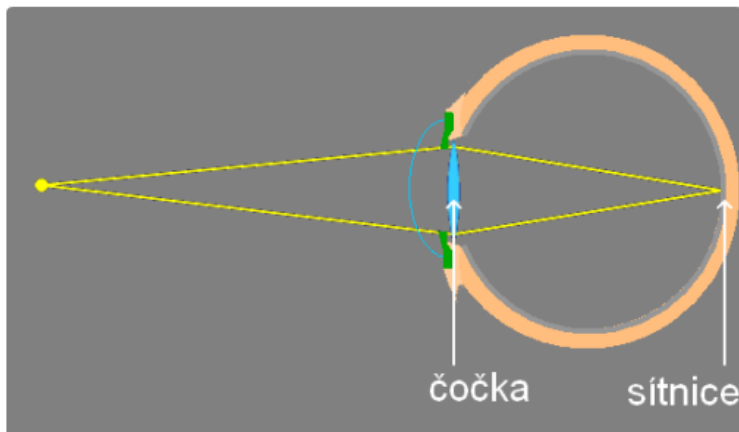
Tabulka 1 Tabulka vztahu věku člověka a jeho schopnosti rozlišovat blízký a vzdálený bod¹⁹

Věk	Vzdálenost bodů v cm	
	blízký bod	vzdálený bod
10	-7	∞
20	-10	∞
30	-14	∞
40	-22	∞
50	-40	∞
60	-200	+200
70	+100	+80
75	+57	+57
80	+40	+40

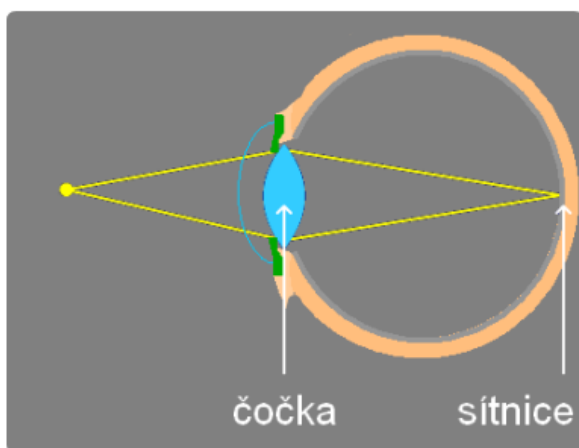
Pro čtení a pozorování drobných předmětů, byla zavedena jednotná hodnota *konveční zrakové vzdálenosti* $l = 250\text{mm}$. Pokud je vzdálenost blízkého bodu větší než l , pak mluvíme o oku *starozrakém (presbyotickém)*. (Obrázek 15.) Z výše uvedené tabulky je patrné že oko se stává *starozrakým (presbyotickým)* okolo 40 - 50 let. Aby *starozraké (presbyotické)* oko dál vidělo na konveční zrakovou vzdálenost, je třeba umístit před oko čočku, která zajistí zobrazení pozorovaného předmětu do blízkého bodu.²⁰

¹⁹ Tabulka převzata z <http://www.opto.cz/havelka/t016.html#TOC1>, [16. 2. 2010].

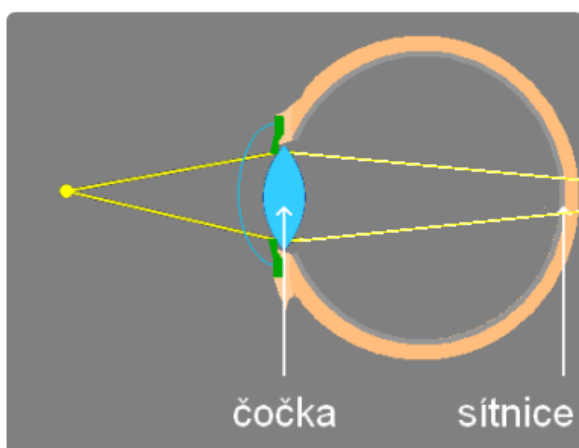
²⁰ Fuka, J., Havelka, B., I. *OPTIKA Fyzikální Komentář, 1 vyd.* Praha, Státní pedagogické nakladatelství, 1961, s.233 - 234.



Obrázek 13: Akomodace čočky oka při velké vzdálenosti oka od předmětu



Obrázek 14: Akomodace čočky oka při malé vzdálenosti oka od předmětu



Obrázek 15: Akomodace čočky oka starozrakého²¹

²¹ Obrázky 13, 14, 15 převzaty z: <http://pepinator.tym.cz/online/fyzika/optika/oko.php>, [23. 7. 2010].
Použitá literatura ke kapitole 5:[2].

6 Základní fotometrické veličiny

6.1 Světelný tok

Světelný tok značíme Φ , jeho jednotkou je *lumen* [lm].

Zdroj světla vyzařuje všude kolem sebe zářivou energii. Pokud nějakou ploškou za určitý čas projde tato zářivá energie, lze její množství změřit. Množství energie nazýváme *zářivý tok* označený

$$\Phi = K_m \int_{3,8 \cdot 10^{-7}}^{7,8 \cdot 10^{-7}} \Phi_{e\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

Kde $K_m = V(\lambda_0)$ je maximální spektrální světelná účinnost denního vidění.

„Výkon zářivé energie zhodnocený podle světelného vjemu, který vyvolává, nazýváme světelným tokem;“²²

$$V(\lambda) = \frac{K\lambda}{K_m} \quad K\lambda - \text{světelná účinnost jednobarevného záření}$$

Světelný tok lze tedy vypočítat ze zářivého toku přepočteného na citlivost oka.

6.2 Svítivost

Svítivost značíme I jeho jednotkou je *kandela* [cd].

Máme-li zdroj vyzařující do všech směrů, pak je svítivost podíl části světelného toku $d\Phi$ a malého prostorového úhlu $d\Omega$. Prostorový úhel je vymezen kuželem vycházejícím ze světelného zdroje.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

Toto je obecný vztah, který platí pro zdroj s různou svítivostí v různých směrech od zdroje.

Pokud je svítivost zdroje ve všech směrech stejná, jedná se o zdroj *izotropní*. Pro takový zdroj platí vztah.

²² Fuka, J., Havelka, B., I. *OPTIKA Fyzikální Kompendium, 1 vyd.* Praha, Státní pedagogické nakladatelství, 1961, s. 199.

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}$$

Lze tedy říci, že *izotropní* zdroj světla o svítivosti I vyzáří do celého prostoru světelný tok Φ .

$$I = \frac{\Phi}{4\pi}$$

6.3 Osvětlení

Osvětlení značíme E , jeho jednotkou je *lux* [lx].

Osvětlení v daném bodě plochy určíme jako podíl světelného toku $d\Phi$, dopadajícího na element dS této plochy a velikosti tohoto plošného elementu dS .

$$E = \frac{d\Phi}{dS}$$

Tabulka 2 Některé hodnoty intenzity osvětlení²³

Způsob osvětlení	Intenzita osvětlení [cd.m]
V létě v poledne na volném prostranství	100000
V létě v poledne ve stínu	10000
Při východu slunce	300
Při úplňku	0,2

6.4 Jas

Jas značíme L , jeho jednotkou je $cd. m^{-2}$

Jas určitého místa plochy zdroje v daném směru je podíl svítivosti plošného elementu zdroje v daném směru a průmětu tohoto plošného elementu do roviny kolmé k danému směru.

²³ Tabulka převzata z Polášek, J., *Technický sborník oční optiky*, Praha, SNTL, 1975 s. 159.

$$L = \frac{dJ}{dS \cos \alpha}$$

Pokud je na dokonale rozptylující ploše osvětlení E [lx], lze její jas L vypočítat ze vzorce.

$$L = \frac{E}{\pi}$$

Tabulka 3 Hodnoty jasu některých světelných zdrojů²⁴

Zdroj	Jas [cd . m ⁻²]
Slunce	2000000000
Bílý papír při slunečním osvětlení	25000
Plamen svíčky	5000
Obloha při mírné oblačnosti	3200
Měsíc	2900
Bílý papír při měsíčním osvětlení	0,03

6.5 Světlení

Světlení značíme H , jeho jednotkou je $lm. m^{-2}$.

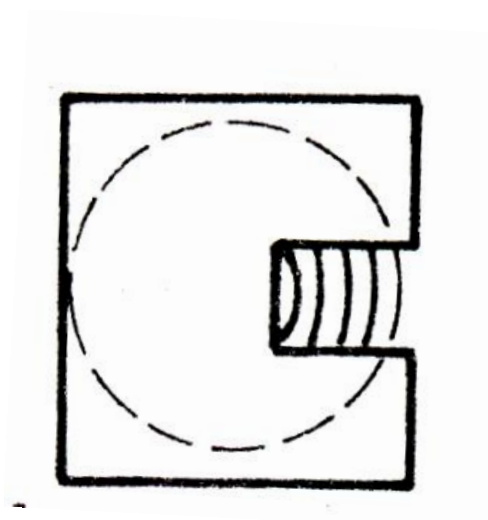
$$H = \frac{d\Phi}{dS'}$$

S' – je plocha ze které světlo vychází

²⁴ Tabulka převzata z Polášek, J., *Technický sborník oční optiky*, Praha, SNTL, 1975 s. 160.

7 Arnulfovo měření rozlišovací meze lidského oka

Arnulf zkoumal kvalitu zobrazení ovlivněného jasem a kontrastem předmětu a průměrem oční pupily pozorovatele. Své měření provedl tak že, umístil před pozorovatele test pevných rozměrů, ke kterému se pozorovatel přibližoval a vzdaloval tak, aby test pozoroval na hranici viditelnosti. Osvětlení a kontrast testů se měnil. Průměr oční pupily byl při pozorování upraven pomocí clonky. „Při zkouškách byly užity testy na Folcaultově principu. Předmět byl tvořen testem s čarami střídavě bílými a černými o stejné šířce a dokonale tmavým pozadím. Čáry byly nakresleny na papírovém kotouči pohybujícím se rychlým rotačním pohybem. Stínítko s vyříznutým obdélníkovým otvorem vymezovalo pro pozorování čtverec o rozměrech asi 100 x 100 mm.“²⁵ (Obrázek č. 16.)

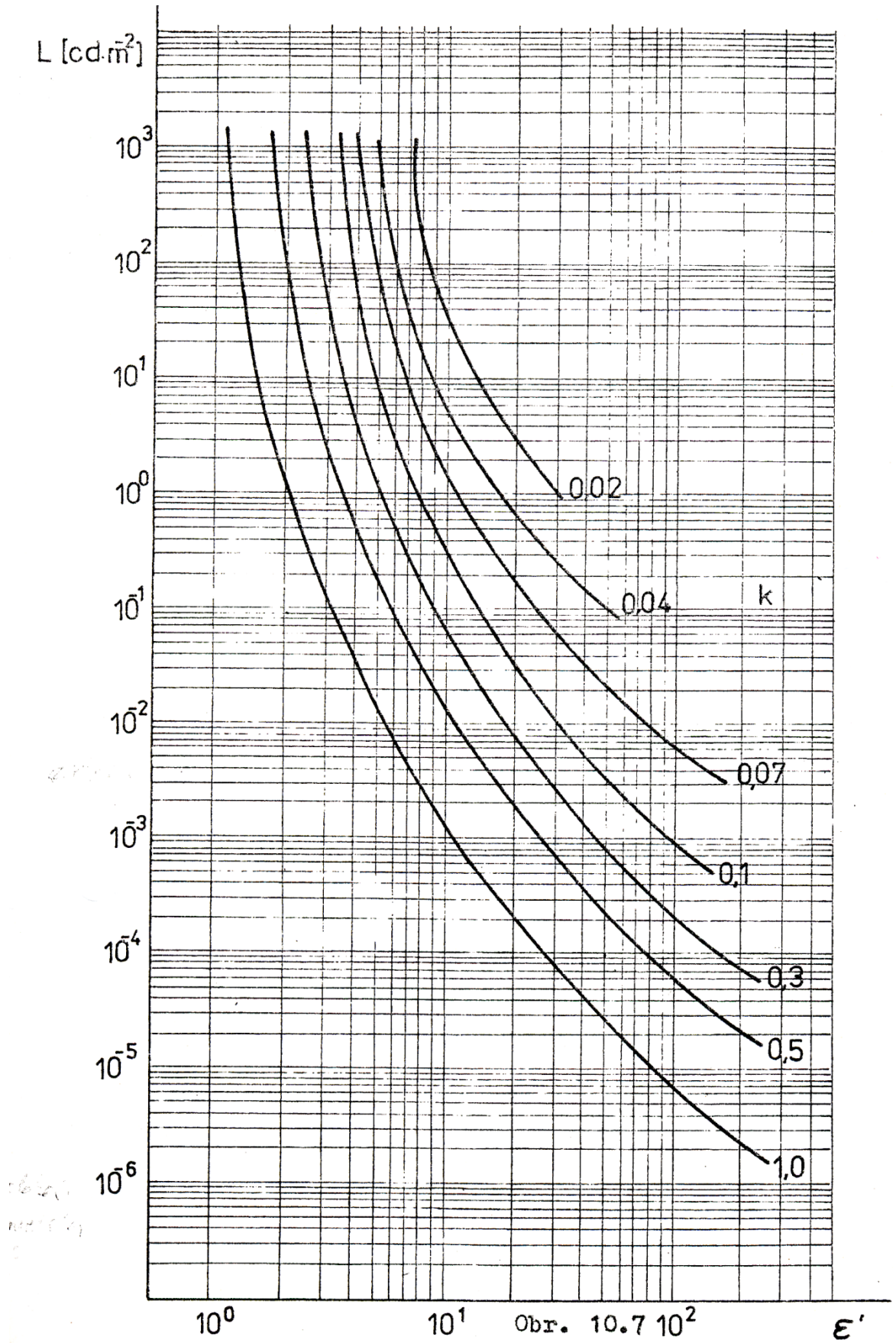


Obrázek 16: Test na Foulcautově principu²⁶

Pro velké jasy byl použit test o šířce intervalu černé a bílé poloviny proužku 10 mm. Pro normální jasy byl použit test o šířce bílé a černé 20 mm. Pro průměr oční pupily měnící se od 0,113 mm do 6 mm byla určována rozlišovací mez v minutách. Při nízkých úrovních jasů se při pozorování clonky nepoužívaly. Kontrasty testů se měnily od 1 do 0,02. Výsledky Arnulf předložil jako křivky (obrázek č. 17).

²⁵ Langer, V., Energetika optických soustav, 1 vyd. Olomouc, 1987, s. 196.

²⁶ Obrázek 16 a 17 převzaty z Langer, V., Energetika optických soustav, 1 vyd. Olomouc, 1987 s. 196 (16) a s. 201 (17).



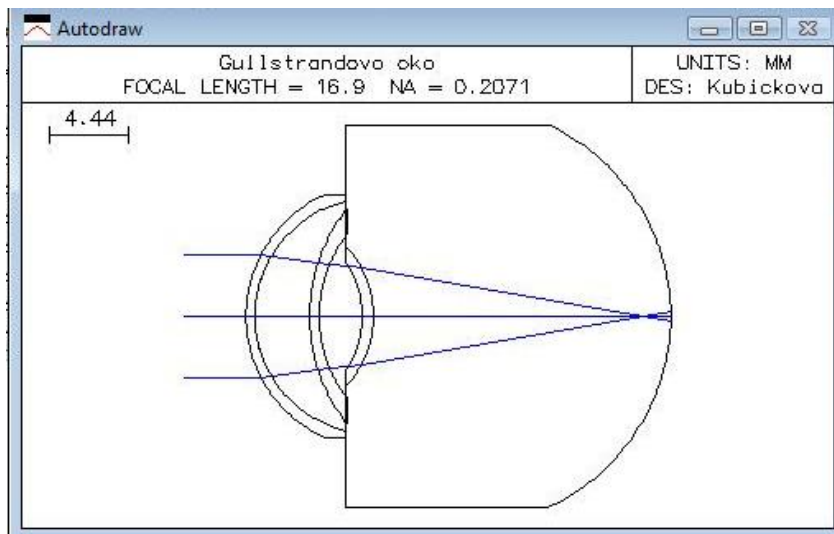
Obrázek 17: Arnulfovy křivky

8 Modely oka v programu OSLO

Pro oba modely byly zadány váhové koeficienty pro vybrané vlnové délky převzaté z knihy Fischer, R.E., Tadic-Galeb, B. Optical System Design. Lze je vidět na obrázku 20, 21, 24, 25.

8.1 Gullstrandův model oka

Model oka byl vytvořen Gullstrandem asi před 100 lety. Model oka (obrázek 18,19) byl



vytvořen z těchto navržených hodnot pomocí programu OSLO. Gullstrandovy hodnoty popisují rádius, tloušťku a index lomu jednotlivých částí optické soustavy lidského oka.

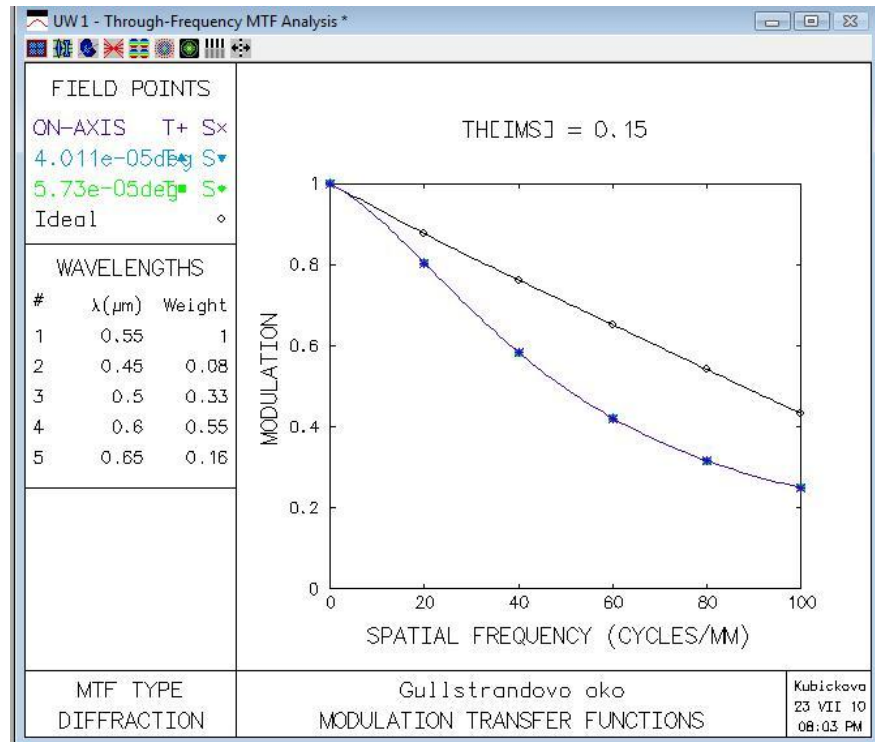
Obrázek 18: Gullstrandův model oka

Funkce přenosu kontrastu (Modulation Transfer Function) oka byla spočítána programem OSLO pro průměr pupily 2 mm a pro průměr 7 mm. Na obrázcích 20, 21, 24, 25 je černou

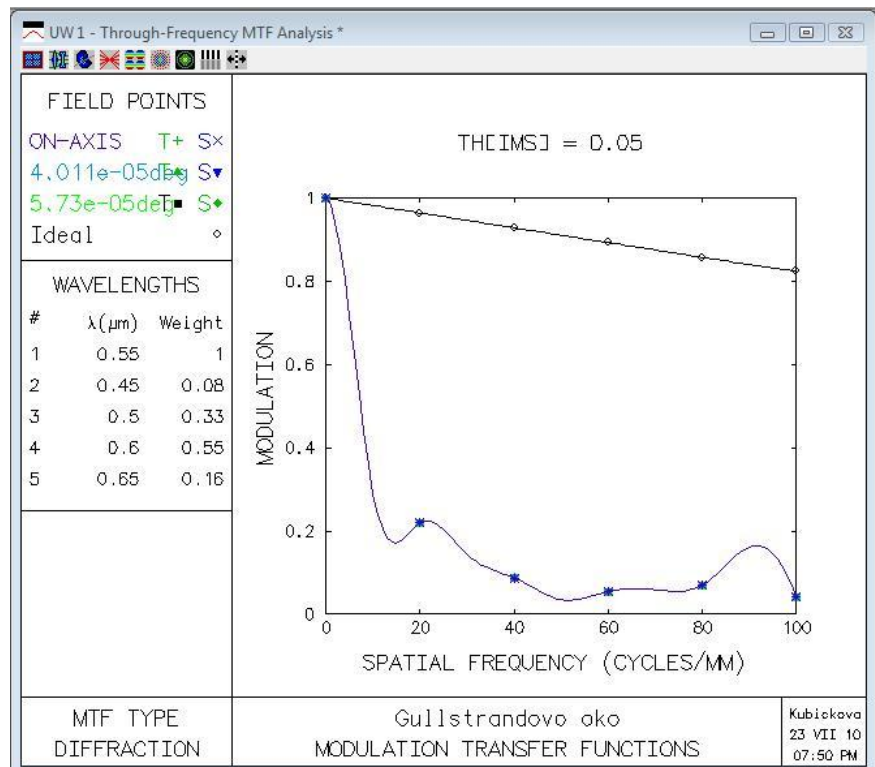
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	1.0000e+14	AIR	
1	7.700000	0.500000	7.000000	GLASS1	M
2	6.800000	3.100000	6.600000	GLASS2	M
3	10.000000	0.546000	6.100000	GLASS3	M
4	7.911000	2.419000	4.700000	GLASS4	M
AST	-5.760000	0.635000	3.100000	GLASS5	M
6	-6.000000	16.800000	4.000000	GLASS6	M
7	-12.193500	0.000000	11.000000	AIR	
IMS	0.000000	0.150000	0.006780	S	

barvou znázorněn ideální průběh funkce přenosu kontrastu (MTF) neovlivněný aberacemi a modrou barvou jsou znázorněny reálné funkce přenosu kontrastu.

Obrázek 19: Tabulka hodnot z programu OSLO pro Gullstrandův model oka



Obrázek 20: Funkce přenosu kontrastu pro průměr pupily 2 mm



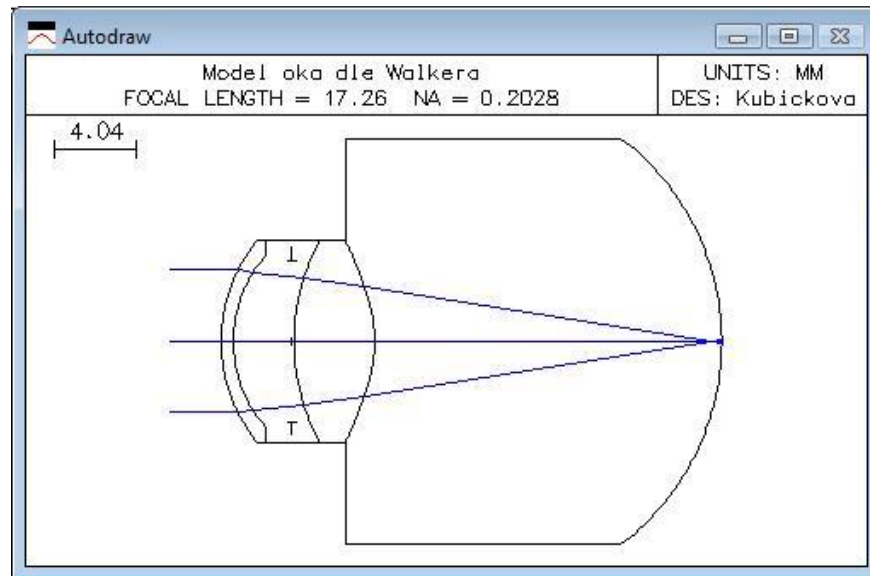
Obrázek 21: Funkce přenosu kontrastu pro průměr pupily 7 mm

Lze říci, že při frekvenci 100 čar/mm je rozlišovací schopnost oka 2' na proužek (pár čar).

$$\frac{0,01}{17} = 5,88 \cdot 10^{-4} \text{ rad} \equiv 0,033^\circ = 2'$$

8.2 Walkerův model oka

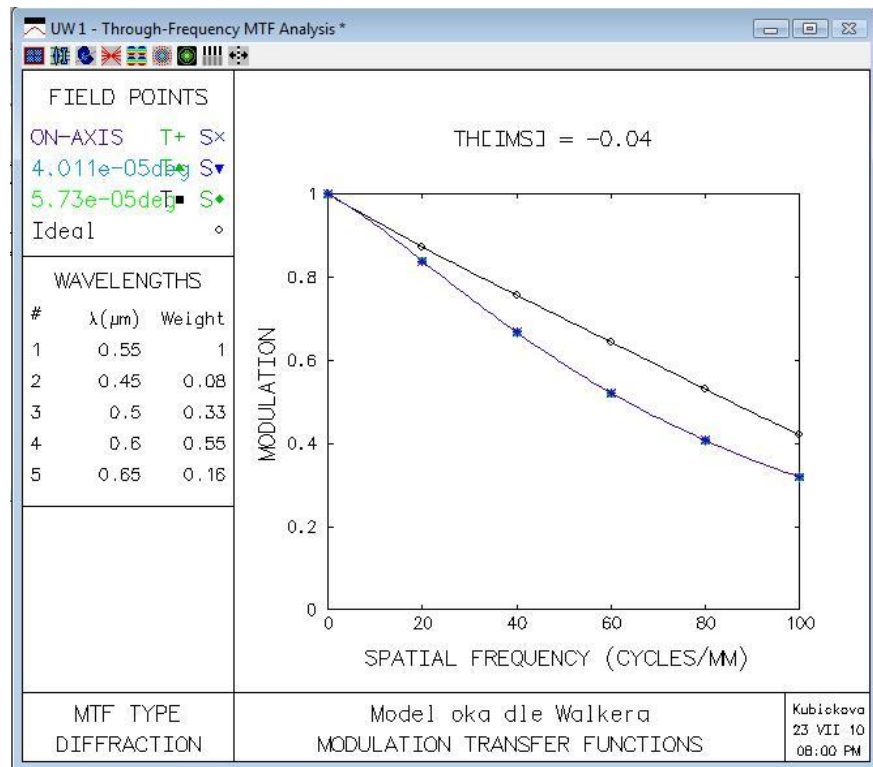
Model oka byl zpracován z hodnot navržených B. H. Walkerem, publikovaných v roce 2000. (Obrázek 22,23)



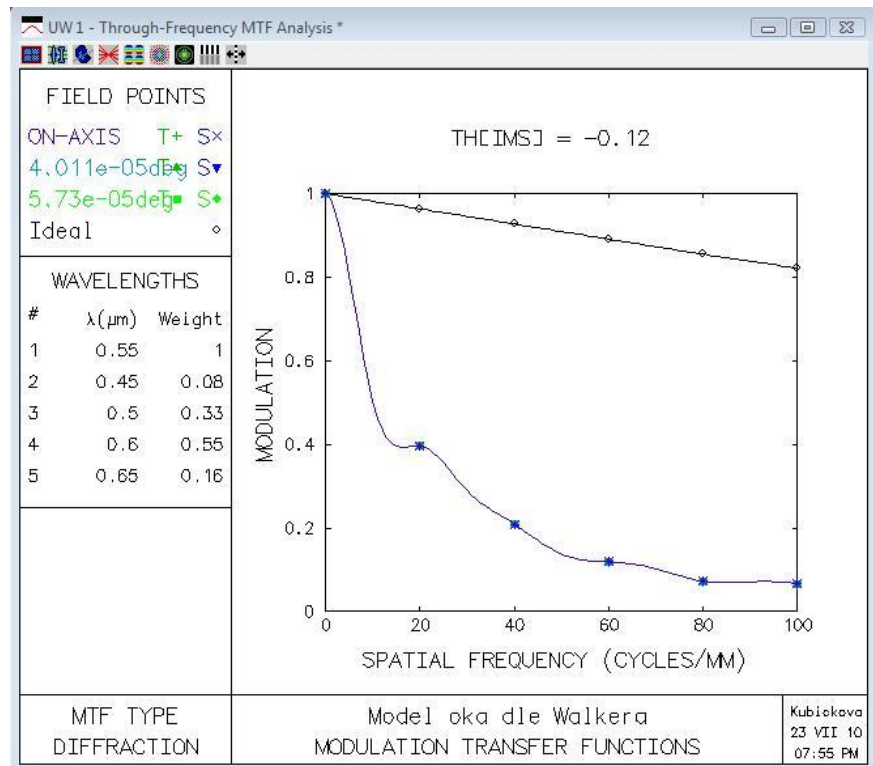
Obrázek 22: Walkerův model oka

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	1.0000e+14	AIR	
1	7.800000	0.600000	5.000000	GLASS1	M
2	6.400000	2.900000	4.200000	GLASS2	M
AST	0.000000	0.100000	4.000000	GLASS2	M
4	10.100000	4.000000	5.000000	GLASS3	M
5	-6.100000	17.200000	5.000000	GLASS4	M A
6	-12.500000	0.000000	10.000000	AIR	
7	0.000000	0.000000	0.006254	AIR	
8	0.000000	0.000000	0.006254	AIR	
IMS	0.000000	-0.120000	0.030592	AIR	

Obrázek 23: Tabulka hodnot z programu OSLO pro Walkerův model oka



Obrázek 24: Funkce přenosu kontrastu pro průměr pupily 2 mm



Obrázek 25: Funkce přenosu kontrastu pro průměr pupily 7 mm

9 Vlastní měření

9.1 Johnsonovy testy rozlišovací schopnosti

Pro měření byly navrženy nejdříve tři čárové Johnsonovy testy typu člověk. (Obrázky 26,27,28.) Testy byly vytištěny na matný papír v tiskárnách firmy **GRAPO, s.r.o. Olomouc**.

Jedna čára takového typu testu odpovídá bílému a černému pruhu.



Obrázek 26: Jedno čárový test
ODHALENÍ



Obrázek 27: Tří čárový test
ROZPOZNÁNÍ



Obrázek 28: Šesti čárový test
IDENTIFIKACE

Prvním navrženým a zhotoveným testem byl šesti čárový test o rozměru 1500x600mm. Další dva čárové testy (jedno čárový, tří čárový) byly zhotoveny o rozměrech 1600x600mm, protože tento rozměr více odpovídá „velikosti“ průměrného dospělého člověka. Testy byly připevněny k podložkám, aby se s nimi dalo lépe manipulovat.

9.2 Johnsonovy testy rozlišovací schopnosti s jiným kontrastem

Po provedení prvního experimentu byly dotištěny dva šesti čárové testy o jiném kontrastu než 0,8. (Obrázky 29, 30.) Testy byly vytištěny v rozměru 1500 x 600mm na matný papír v tiskárnách firmy **GRAPO, s.r.o. Olomouc**.



Obrázek 29: 6 čárový test o kontrastu $K= 0,5$



Obrázek 30: 6 čárový test o kontrastu $K= 0,2$

9.3 Měření a výpočet kontrastu testů

Jas ploch testu byl měřen pomocí nízko úrovněvého jasoměru LMT (Digital Luminance Meters Series) L 1000. Pomocí tohoto typu jasoměru, upevněného na stativu, byl změřen jas

bílých a černých ploch testu. Jasoměr byl umístěn kolmo k ploše testu. Po jeho zapnutí, byla nastavena velikost kruhové plochy. (Plocha je měřicí plochou přístroje.)

Naměřené hodnoty dosadíme do vzorce:
$$K = \frac{(L_{max} - L_{min})}{(L_{max} + L_{min})}$$

Příklad výpočtu:
$$K = \frac{(23,8 - 1,8)}{(23,8 + 1,8)} = \frac{22}{25,6} = 0,859357 \cong \mathbf{0,86}$$

Výsledky měření a výpočtů jsou uvedeny v tabulce 4. Výsledný vypočtený kontrast se blíží u všech měření k hodnotě kontrastu jedna, Takže lze říci, že šesti čárový, tři čárový a jedno čárový test „typu člověk“ mají kontrast $K = 0,8$.

Tabulka 4 Tabulka měření a výpočtu kontrastu

Velikost měřících ploch	Jas bílých ploch	Jas černých ploch	Výsledný kontrast
6'	23,8 cd.m ⁻²	1,8 cd.m ⁻²	0,86
20'	24,7 cd.m ⁻²	1,3 cd.m ⁻²	0,9
1°	23,9 cd.m ⁻²	1,47 cd.m ⁻²	0,92
3°	23,5 cd.m ⁻²	1,87 cd.m ⁻²	0,85

9.3.1 Výpočet kontrastu pro šesti čárový test o středním kontrastu

Naměřené hodnoty dosadíme do vzorce:
$$K = \frac{(L_{max} - L_{min})}{(L_{max} + L_{min})}$$

Příklad výpočtu:
$$K = \frac{(260 - 70)}{(260 + 70)} = \frac{190}{330} = 0,5757 \cong \mathbf{0,5}$$

Výsledky měření a výpočtů jsou uvedeny v tabulce č. 5. Lze tedy říci, že šesti čárový test o středním kontrast má kontrast $K = 0,5$.

Tabulka 5 Tabulka měření a výpočtu kontrastu

Velikost měřících ploch	Jas bílých ploch	Jas černých ploch	Výsledný kontrast
1°	260 cd.m ⁻²	70 cd.m ⁻²	0,57
3°	250 cd.m ⁻²	78 cd.m ⁻²	0,52

9.3.2 Výpočet kontrastu pro šesti čárový test o nejmenším kontrastu

Naměřené hodnoty dosadíme do vzorce:
$$K = \frac{(L_{max} - L_{min})}{(L_{max} + L_{min})}.$$

Příklad výpočtu:
$$K = \frac{(97,5 - 71)}{(97,5 + 71)} = \frac{26,5}{168,5} = 0,15 \cong 0,2$$

Výsledky měření a výpočtů jsou uvedeny v tabulce 6. Lze tedy říci, že šesti čárový test o nejmenším kontrastu má hodnotu kontrast K= 0,2.

Tabulka 6 Tabulka měření a výpočtu kontrastu

Velikost měřících ploch	Jas bílých ploch	Jas černých ploch	Výsledný kontrast
3°	102 cd.m ⁻²	77,5 cd.m ⁻²	0,13
1°	97,5 cd.m ⁻²	71 cd.m ⁻²	0,15

9.4 První experiment

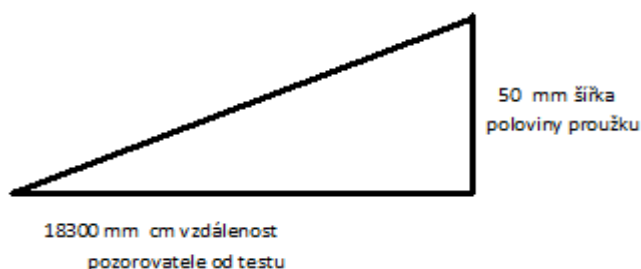
Experiment byl proveden v laboratoři firmy Pramacon spol. s.r.o.. Měření proběhlo za účasti 4 pozorovatelů. Pozorovatelé začali pozorovat dva testy (tří čárový test a šesti čárový test) ze vzdálenosti 37,7 m při jasu bílé plochy $25,7 \text{ cd.m}^{-2}$. Při tomto osvětlení byli všichni pozorovatelé schopni bezpečně rozlišit počet čar na tří čárovém testu po celé délce. Pozorovatelé by byli schopni rozlišit tří čárový test i z větší vzdálenosti, bohužel, jsme byli prostorově omezeni, protože měření probíhalo uvnitř budovy.

Pozorování šesti čárového testu probíhalo tak, že každý pozorovatel se začal přibližovat k testu z výchozí vzdálenosti do takové vzdálenosti, ze které byl schopen bezpečně rozlišit počet čar na testu po celé jejich délce. Tato vzdálenost se u různých pozorovatelů lišila. Výsledky jsou zaznamenány v tabulce 7.

Tabulka 7 Výsledky pozorování

Jas $25,7 \text{ cd.m}^{-2}$	Tří čárový test	Rozlišovací mez	Šesti čárový test	Rozlišovací mez
pozorovatel č.: 1	> 37,7 m	< 9'	18,3 m	9'
pozorovatel č.: 2	> 37,7 m	< 9'	26,2 m	6'
pozorovatel č.: 3	> 37,7 m	< 9'	27,4 m	6,4'
pozorovatel č.: 4	> 37,7 m	< 9'	22,9 m	7'

9.4.1 Příklad výpočtu rozlišovací meze u šesti čárového testu



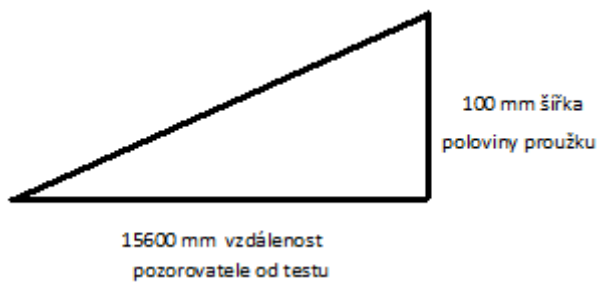
$$1' \cong 3 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{tg } \alpha = \frac{50}{18300} = 2,7 \cdot 10^{-3}$$

$$\frac{2,7 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-4}} = 9,1' \cong 9'$$

Obrázek 31:

9.4.2 Příklad výpočtu rozlišovací meze u 3 čárového testu



$$1' \cong 3 \cdot 10^{-4}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{100}{15600} = 6,4 \cdot 10^{-3}$$

$$\frac{6,4 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-4}} = 21,36' \cong 21'$$

Obrázek 32:

Další měření probíhalo po změně okolního osvětlení, když jas bílé plochy dosahoval hodnoty $0,13 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Po změně okolního osvětlení před samotným pozorováním probíhala asi 10 minutová adaptace (přizpůsobení očí pozorovatelů nižšímu osvětlení). Výsledky pozorování jednotlivých pozorovatelů jsou zaznamenány v tabulce 8.

Tabulka 8 Výsledky pozorování

Jas $0,13 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$	Tří čárový test	Rozlišovací mez	Šesti čárový test	Rozlišovací mez
pozorovatel č.: 1	15,6 m	21'	10,9 m	15'
pozorovatel č.: 2	13,8 m	24'	10,8 m	15'
pozorovatel č.: 3	14,8 m	23'	11,2 m	14,8'
pozorovatel č.: 4	15,6 m	21'	10,8 m	15'

Při dalším měření bylo okolní osvětlení změněno tak, že jas bílé plochy měl hodnotu $0,03 \cdot 10^{-2} \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Po změně okolního osvětlení proběhla u pozorovatelů asi 10 minutová adaptace. Výsledky pozorování jsou zaznamenány v tabulce 9.

Tabulka 9 Výsledky pozorování

Jas $0,03 \cdot 10^{-2} \text{ cd.m}^{-2}$	Tří čárový test	Rozlišovací mez	Šesti čárový test	Rozlišovací mez
pozorovatel č.: 1	10,3 m	32'	7,2 m	23'
pozorovatel č.: 2	10,2 m	32,4'	8,2 m	20'
pozorovatel č.: 3	12,6 m	26'	6,4 m	26'
pozorovatel č.: 4	9,4 m	36'	6,2 m	27'

Při posledním měření bylo okolní osvětlení změněno tak, že jas bílé plochy měl hodnotu $0,00001 \text{ cd.m}^{-2}$. Před tímto měřením proběhla asi 15 minutová adaptace na velmi nízké okolní osvětlení. Tří čárový test při této hodnotě jasu pozorovatelé nebyli schopni rozlišit. Posledního pozorování se zúčastnili pouze 2 pozorovatelé, výsledky jsou uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 10 Výsledky pozorování

Jas $0,0001 \text{ cd.m}^{-2}$	Šesti čárový test	Rozlišovací mez
pozorovatel č.: 1	4,6 m	36'
pozorovatel č.: 2	3,2 m	52'

9.5 Druhý experiment

Druhé měření bylo uskutečněno vedle budovy přírodovědecké fakulty. Měření bylo konáno s třemi šesti čárovými testy o různých kontrastech. Pozorování proběhlo za účasti čtyř pozorovatelů. Při tomto měření nebyl měřen jas bílých čar testů, ale hodnota okolního osvětlení pomocí fotometru. Jas byl z osvětlení spočítán dle vzorce.
$$L = \frac{E}{\pi}$$

Po upevnění testů, začalo pozorování ze vzdálenosti 251 metrů. Nejdříve bylo v této vzdálenosti změřeno osvětlení. Z této vzdálenosti nebyli, tři ze čtyř pozorovatelů schopni rozpoznat žádné čáry na testech, byli schopni rozeznat pouze to, že se před nimi nachází

nějaký objekt. Čtvrtý pozorovatel tušil na objektu (šesti čárový test $K= 0,8$) čáry už z této vzdálenosti (251 m). Jeho komentář: “Je tam asi tak sto čar”.

Pozorovatelé se začali pomalu přibližovat k testu. Snažili se najít takovou vzdálenost od testu, aby na testu byli schopní rozeznat čáry po celé jejich délce a zároveň je i spočítat. Výsledky pozorování pro první šesti čárový test s kontrastem $K= 0,8$ jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11 Výsledky pozorování

Šesti čárový test $K= 0,8$						
Jas $9,5 \cdot 10^3 \text{ cd.m}^{-2}$	Zpozorování objektu		Rozpoznání čar na objektu		Identifikace počtu čar testu	
	Vzdálenost od testu	Rozlišovací mez	Vzdálenost od testu	Rozlišovací mez	Vzdálenost od testu	Rozlišovací mez
pozorovatel č.: 1	251 m	0,6'	195	0,85' m	157 m	1'
pozorovatel č.: 2	251 m	0,6'	176	0,9' m	157 m	1'
pozorovatel č.: 3	251 m	0,6'	206	0,8' m	157 m	1'
pozorovatel č.: 4	251 m	0,6'	195	0,85' m	151 m	1,1'

Ve vzdálenosti 157 metrů od testů byli všichni čtyři pozorovatelé schopni rozlišit to, že jsou na dalším objektu (šesti čárový test $K= 0,8$) čáry, ale nebyli je schopni spočítat. Opět se začali přibližovat k testu do takové vzdálenosti, ze které byli schopni čáry spočítat a zároveň je rozlišit po celé délce. Výsledky měření pro šesti čárový test s kontrastem $K= 0,5$ jsou uvedeny v tabulce 12.

Tabulka 12 Výsledky pozorování

Šesti čárový test K= 0,5				
Jas 127. 10 ² cd.m ⁻²	Rozpoznání čar na objektu		Identifikace počtu čar testu	
	Vzdálenost od testu	Rozlišovací mez	Vzdálenost od testu	Rozlišovací mez
pozorovatel č.: 1	157 m	1'	116 m	1,4'
pozorovatel č.: 2	157 m	1'	116 m	1,4'
pozorovatel č.: 3	157 m	1'	116 m	1,4'
pozorovatel č.: 4	157 m	1'	108 m	1,5'

Poslední šesti čárový test s kontrastem K= 0,2 zpozorovali pozorovatelé z různé vzdálenosti. V těchto vzdálenostech pozorovatelé nebyli schopni identifikovat přesný počet čar na testu, ale byli schopni rozpoznat to, že se na testu nacházejí čáry. Potom opět hledali vzdálenost, ze které byli schopni identifikovat přesný počet čar na testu. Výsledky měření pro tento 6 čárový test s kontrastem K= 0,2 jsou uvedeny v tabulce 13.

Tabulka 13 Výsledky pozorování

Šesti čárový test K= 0,2				
Jas 127. 10 ² cd.m ⁻²	Rozpoznání čar na objektu		Identifikace počtu čar testu	
	Vzdálenost od testu	Rozlišovací mez	Vzdálenost od testu	Rozlišovací mez
pozorovatel č.: 1	108 m	1,5'	70 m	2,3'
pozorovatel č.: 2	89 m	1,8'	55 m	3'
pozorovatel č.: 3	75 m	2,2'	55 m	3'
pozorovatel č.: 4	72 m	2,3'	55 m	3'

9.6 Třetí experiment

Měření proběhlo dne 16. 7. 2010 od 19:15 do 20:10 na polní cestě v katastru obce Rataje. Polní cesta směřuje ke Slatinicím. Experiment proběhl za účasti 9 pozorovatelů. K pozorování byly využity tři šesti čárové testy o různém kontrastu ($K=0,8$, $K=0,5$, $K=0,2$). Pozorování testů probíhalo stejně jako u předchozích experimentů. Výsledky pozorování jsou shrnuty v tabulce 14.

Tabulka 14 Výsledky pozorování

Čas 19:15 - 20:10	Šesti čárový test $K=0,2$	Šesti čárový test $K=0,5$	Šesti čárový test $K=0,8$	Šesti čárový test $K=0,5$	Šesti čárový test $K=0,2$
Jas	1300 cd.m^{-2}	1250 cd.m^{-2}	1200 cd.m^{-2}	960 cd.m^{-2}	720 cd.m^{-2}
	m	m	m	m	m
pozorovatel č. 1	24 : 7'	100 : 1,6'	--- : ---	103 : 1,6'	24 : 7'
pozorovatel č. 2	58 : 3'	145 : 1'	240 : 0,6'	142 : 1'	59 : 3'
pozorovatel č. 3	57 : 3'	125 : 1'	178 : 1'	103 : 1'	44 : 4'
pozorovatel č. 4	57 : 3'	145 : 1'	178 : 1'	151 : 1'	65 : 2,5'
pozorovatel č. 5	66 : 2,5'	175 : 1'	265 : 0,6'	189 : 1'	71 : 2'
pozorovatel č. 6	67 : 2,5'	177 : 1'	270 : 0,6'	184 : 1'	88 : 2'
pozorovatel č. 7	75 : 2'	148 : 1'	250 : 0,6'	162 : 1'	65 : 2,5'
pozorovatel č. 8	89 : 1,8'	187 : 0,8'	270 : 0,6'	--- : ---	--- : ---
pozorovatel č. 9	70 : 2'	145 : 1'	250 : 0,6'	151 : 1'	58 : 3'

Zajímavé na tomto pozorování byl fakt, že se ho zúčastnil pozorovatel ve věku 77 let (pozorovatel č. 1), který je dalekozraký (4 D na obou očích). Pozorování se zúčastnil bez korekce, což je jasně patrné z výsledků měření (tabulka 14).

Druhá část experimentu probíhala od 21:10 do 21:23. Jas bílého půl proužku měl na počátku pozorování hodnotu 9 cd.m^{-2} . Pozorování se zúčastnilo už jenom 6 pozorovatelů. Na konci měření byla hodnota jasu bílého půl proužku $1,7 \text{ cd.m}^{-2}$. Výsledky pozorování jsou shrnuty v tabulce 15.

Tabulka 15 Výsledky pozorování

Čas 21:10 - 21:23	Šesti čárový test K= 0,2	Šesti čárový test K= 0,5	Šesti čárový test K= 0,8	Šesti čárový test K= 0,5	Šesti čárový test K= 0,2
pozorovatel č. 1	24 m 7'	86 m 2'	137 m 1'	69 m 2,5'	14 m 12'
pozorovatel č. 2	22 m 7,5'	64 m 3'	103 m 1,5'	64 m 2,5'	17 m 10'
pozorovatel č. 3	27 m 6'	92 m 2'	148 m 1'	65 m 2,5'	14 m 12'
pozorovatel č. 4	24 m 7'	74 m 2'	116 m 1,4'	66 m 2,5'	11 m 15'
pozorovatel č. 5	30 m 5,5'	94 m 2'	152 m 1'	74 m 2'	17 m 10'
pozorovatel č. 6	36 m 5'	100 m 1,5'	158 m 1'	74 m 2'	12 m 14'

9.7 Čtvrtý experiment

Měření proběhlo 17. 7. 2010 v katastru obce Rataje, přímo na návsi. K pozorování byly opět využity tři šesti čárové testy o různém kontrastu ($K= 0,8$, $K= 0,5$, $K= 0,2$). Tento experiment se od předchozích poněkud lišil. Pozorování proběhlo za účasti pouze dvou pozorovatelů a jedné osoby, která měřila jas ve chvílích, kdy pozorovatelé byli ještě schopni identifikovat počet čar na testu a měřili tuto vzdálenost od testu. Měření bylo tři krát zopakováno v různém čase.

První měření začalo v 17:00 a skončilo v 17:13. Jas bílého půl proužku měl na začátku měření hodnotu 1420 cd.m^{-2} . Při tomto měření byl nakonec znovu pozorován 6 čárový test o kontrastu $K= 0,2$, protože se pozorovatelům zdálo, že nastala výraznější změna okolního osvětlení, což se po změření jasu potvrdilo. Na konci měření měl jas bílého půl proužku hodnotu 1460 cd.m^{-2} . Výsledky pozorování jsou shrnuty v tabulce 16.

Tabulka 16 Výsledky pozorování

Čas 17:00 - 17:13	Šesti čárový test K= 0,2	Šesti čárový test K= 0,5	Šesti čárový test K= 0,8	Šesti čárový test K= 0,2
Jas	1520 cd.m^{-2}	1530 cd.m^{-2}	1601 cd.m^{-2}	1460 cd.m^{-2}
pozorovatel č. 1	54 m 3'	118 m 1,4'	187 m 0,8'	44 m 4'
pozorovatel č. 2	50 m 3,3'	144 m 1'	209 m 0,7'	40 m 4'

Druhé měření začalo v 18:02 a skončilo v 18:09. Hodnota jasu bílého půl proužku na začátku měření byla 377 cd.m^{-2} . Na konci měření byla hodnota jasu bílého půl proužku 365 cd.m^{-2} . Výsledky pozorování jsou shrnuty v tabulce 17.

Tabulka 17 Výsledky pozorování

Čas 18:02 - 18:09	Šesti čárový test K= 0,2	Šesti čárový test K= 0,5	Šesti čárový test K= 0,8
Jas	330 cd.m^{-2}	343 cd.m^{-2}	365 cd.m^{-2}
pozorovatel č. 1	34 m 5'	113 m 1,4'	193 m 0,8'
pozorovatel č. 2	28 m 6'	105 m 1,5'	187 m 0,8'

Třetí měření začalo v 19:23 a skončilo v 19:33. Jas bílého půl proužku měl na začátku měření hodnotu 133 cd.m^{-2} . Na konci měření byla hodnota jasu bílého půl proužku 76 cd.m^{-2} . Výsledky pozorování jsou shrnuty v tabulce 18.

Tabulka 18 Výsledky pozorování

Čas 19:23 - 19:33	Šesti čárový test K= 0,2	Šesti čárový test K= 0,5	Šesti čárový test K= 0,8
Jas	100 cd.m^{-2}	115 cd.m^{-2}	82 cd.m^{-2}
pozorovatel č. 1	28 m 6'	94 m 1,7'	184 m 0,9'
pozorovatel č. 2	25 m 7'	104 m 1,6'	181 m 0,9'

10 Výsledky

V experimentální části práce si autorka stanovila cíl určit dosahy vidění (určit limitní vzdálenosti pro rozlišení) pro různé typy Johnsonových testů při různých úrovních osvětlení. Pro měření byly použity 3 základní Johnsonovy testy typu člověk s kontrastem 0,8 (maximální kontrast, kterého se při výrobě testu dosáhlo).

V tabulce jsou shrnuty výsledky měření pro šesti čárový test typu identifikace. Hodnoty v tabulce uvedené jsou střední hodnoty vybraných pozorovatelů, a to takových, kteří vykazovali stabilní a opakovaně reprodukovatelné výsledky pozorování. Výsledky jsou shrnuty ze všech měření šesti čárového testu typu identifikace.

Tabulka19 Výsledky měření pro šesti čárový test typu identifikace

Osvětlení	Dosah	Úhel rozlišení
0,0003 lx	3,9 m	43´
0,0009 lx	7 m	24´
0,4 lx	10,9 m	15´
81 lx	24 m	7´
361 lx	99 m	1,6´
1077 lx	109 m	1,5´
5027 lx	198 m	0,8´

Autorka práci dále rozšířila o měření Johnsonových testů typu identifikace, modifikovaných pro nižší úrovně kontrastu. Měření na těchto testech proběhlo pouze při vyšších úrovních osvětlení. V tabulce jsou shrnuty výsledky z druhého experimentu pro všechny kontrasty

Tabulka 20 Výsledky pro testy typu identifikace o různém kontrastu při různém osvětlení

Osvětlení	Kontrast	Dosah	Úhel rozlišení
30000 lx	0,8	157 m	1´
40000 lx	0,5	116 m	1,4´
40000 lx	0,2	55 m	3´

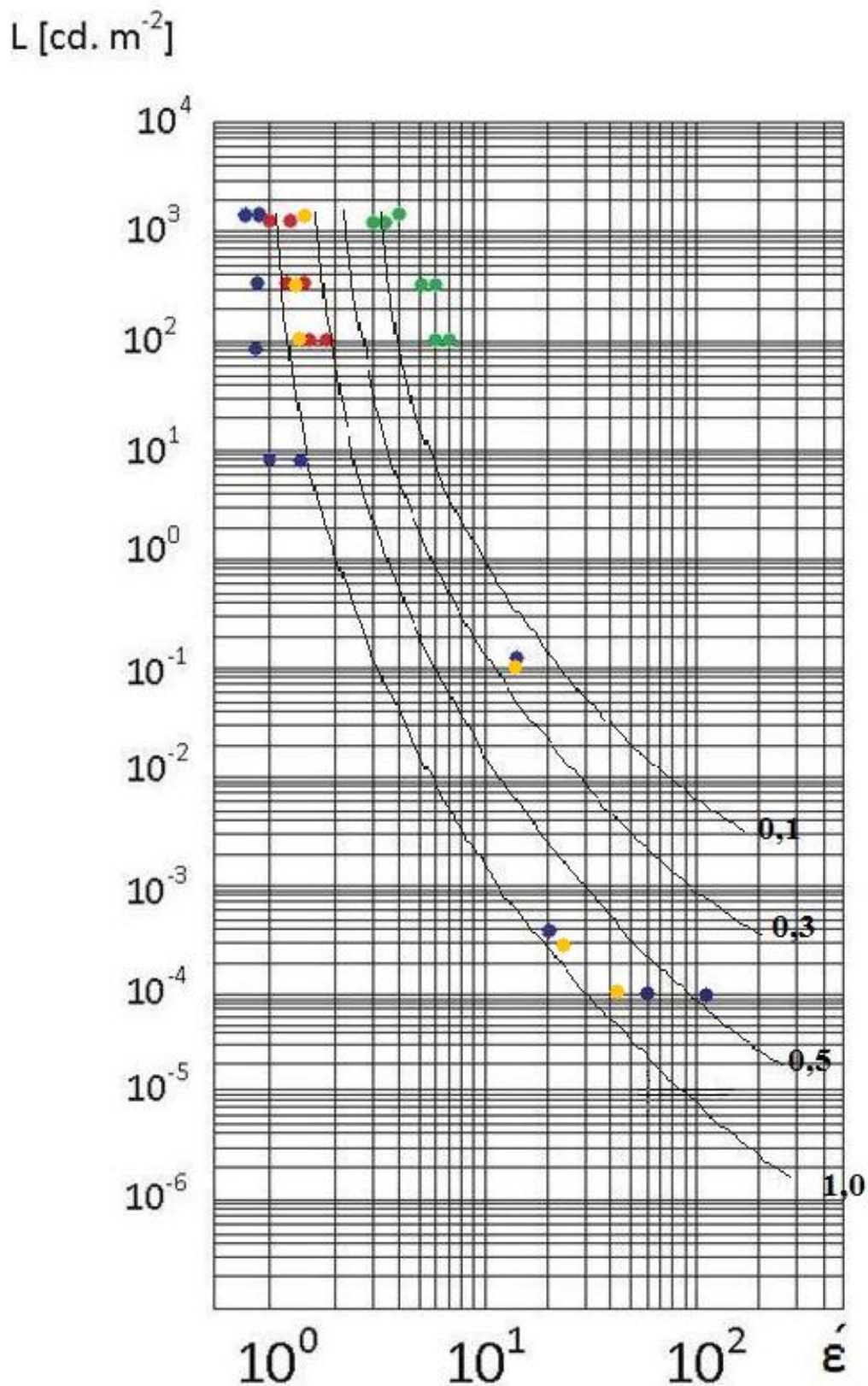
V následující tabulce jsou shrnuty výsledky z třetího experimentu pro všechny kontrasty

Tabulka 21 Výsledky pro testy typu identifikace o různém kontrastu

Osvětlení	Kontrast	Dosah	Úhel rozlišení
4000 lx	0,8	237 m	0,7´
4000 lx	0,5	155 m	1´
4000 lx	0,2	67 m	2,5´
20 lx	0,8	136 m	1,2´
20 lx	0,5	85 m	2´
20 lx	0,2	27 m	6´

Na obrázku 33 je uvedena rozlišovací schopnost dvou nejlepších pozorovatelů, kteří se zúčastnili všech experimentů a zároveň hodnoty s tabulky 19. Modré body odpovídají kontrastu $K=0,8$. Červené body odpovídají kontrastu $K=0,5$. Zelené body odpovídají kontrastu $K=0,2$. Žluté body odpovídají kontrastu $K=0,8$ a shrnují výsledky měření pro střední hodnoty. Na obrázku 33 jsou znázorněny Arnulfovy grafy (pro kontrasty 1; 0,5; 0,3; 0,1) pro snadné porovnání výsledků. Z obrázku je patrné, že lze dosáhnout při některých

jasech lepší rozlišovací schopnosti, než uvádí Arnulf ve svých křivkách. Na to, aby se daly vytvořit křivky nové, by se muselo provést větší množství pozorování s větším počtem předem vybraných pozorovatelů.



Obrázek 33: Porovnání výsledků s literaturou

Závěr

Studiem odborné literatury a vlastními experimenty se autorka práce pokusila ověřit rozlišovací schopnost lidského oka. Určit limitní vzdálenosti rozlišení pro různé typy Johnsonových testů při měnících se úrovních osvětlení. Měření byla provedena odlišnou metodou, než jakou použil Arnulf ve svých měřeních. Dosažené výsledky pro střední hodnoty se shodují s výsledky uváděnými v literatuře. V některých pozorováních, při určitých vyšších jasech, bylo dosaženo lepší rozlišovací schopnosti, než jakou uvádí Arnulf. Lze říci, že pokud by proběhlo větší množství experimentů, mohli by být takové výsledky zpracovány ve formě křivek a upřesnit Arnulfovy křivky.

Literatura

1. Fischer, R.E., Tadic-Galeb, B. *Optical System Design*. McGraw-Hill 2000.
2. Fuka, J., Havelka, B., I. *OPTIKA Fyzikální Kompendium, 1 vyd.* Praha, Státní pedagogické nakladatelství, 1961.
3. Havelka, B., *Geometrická optika I*, ČSAV 1956.
4. http://cs.wikipedia.org/wiki/Lidsk%C3%A9_oko, [28. 10. 2009].
5. <http://mfweb.wz.cz/fyzika/180.htm>, [28. 10. 2009].
6. http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=23169, [18. 11. 2009].
7. http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36187, [18. 11. 2009].
8. <http://www.opto.cz/havelkal/t192.html#TOC1>, [28. 7. 2010]
9. <http://www.opto.cz/havelkal/index.html#TOC1>, [18. 11. 2009].
10. <http://www.opto.cz/havelkal/t006.html#TOC1>, [18. 11. 2009].
11. <http://www.opto.cz/havelkal/t010.html#TOC1>, [10.1.2010].
12. <http://www.opto.cz/havelkal/t012.html#TOC1>, [10. 1. 2010].
13. <http://www.opto.cz/havelkal/t014.html#TOC1>, [10. 1. 2010].
14. <http://www.paladix.cz/clanky/barevne-videni-druhy-pohled.html>, [28. 10. 2009].
15. <http://www.wavelkal/t008.html#TOC.opto.cz/h1>, [18. 11. 2009].
16. Langer, V., *Energetika optických soustav*, 1 vyd. Olomouc, 1987.
17. Polášek, J., *Technický sborník oční optiky*, Praha, SNTL, 1975.
18. Staněk, J., *Vizuální fotometrie a fyziologická optika*. Příloha k časopisu *Jemná mechanika optika*. Praha, SNTL, 1980-1982.
19. Švec, M., *Aplikovaná optika*, Brno, Akademické nakladatelství CERM Brno, 1995.

20. Walker, B. H., Optical design for visual systems, SPIE, 2000.