

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI
KATEDRA OPTIKA

VLIV OSVĚTLENÍ NA STANOVENÍ PRESBYOPICKÉ KOREKCE

Diplomová práce

VYPRACOVALA:

Bc. Kateřina Drbálková

Obor 5345T008 OPTOMETRIE

Studijní rok 2017/2018

VEDOUcí DIPLOMOVÉ PRÁCE:

RNDr. Mgr. František Pluháček, PhD.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vliv osvětlení na stanovení presbyopické korekce vypracovala samostatně pod vedením RNDr. Mgr. Františka Pluháčka, PhD. za použití literatury uvedené v závěru práce.

V Olomouci dne 23. 4. 2018

.....

Bc. Kateřina Drbálková

Děkuji RNDr. Mgr. Františku Pluháčkovi, PhD., vedoucímu mé diplomové práce, za cenné rady a připomínky, které mi poskytl a za čas strávený při konzultacích. Dále bych chtěla poděkovat všem figurantům, kteří se účastnili výzkumu spojeného s touto prací a všem, kteří mě v průběhu psaní práce podporovali.

Tato práce vznikla za podpory projektu IGA PřF UP s názvem Optometrie a její aplikace, č. IGA_PrF_2018_007 a č. IGA_PrF_2017_003.

Obsah

ÚVOD	1
1 PROCES VIDĚNÍ	2
1.1 FYZIOLOGIE VIDĚNÍ.....	3
1.2 BIOCHEMIE ZRAKOVÝCH PIGMENTŮ	7
1.3 DALŠÍ NEURONY	10
1.4 AKOMODACE A PRESBYOPIE	12
2 FOTOMETRICKÉ VELIČINY.....	17
2.1 SVĚTELNÝ TOK	18
2.2 SVÍTIVOST	19
2.3 OSVĚTLENÍ	21
2.4 JAS.....	22
2.5 SVĚTLENÍ	23
3 SVĚTELNÉ ZDROJE.....	24
3.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY SVĚTELNÝCH ZDROJŮ.....	24
3.2 TRÍDĚNÍ UMĚLÝCH SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	28
4 OSVĚTLENÍ VNITŘNÍCH PROSTORŮ	32
4.1 NÁVRH A PARAMETRY OSVĚTLENÍ	32
4.2 MĚŘENÍ OSVĚTLENÍ VE VNITŘNÍCH PROSTORECH	37
4.2.1 Luxmetry.....	38
5 PRAKTICKÁ ČÁST	40
5.1 METODIKA	40
5.1.1 Vyšetřované osoby.....	41
5.1.2 Použité testy a pomůcky.....	41
5.1.3 Vyšetřovací postup	48
5.1.4 Metodika vyhodnocení dat	49
5.2 VÝSLEDKY EXPERIMENTU	50
5.2.1 Vliv osvětlení na zrakovou ostrost do blízka.....	50
5.2.2 Vliv osvětlení na stanovení adice	53
5.3 DISKUZE.....	54
6 ZÁVĚR.....	57
7 PŘÍLOHY.....	59

8	SEZNAM LITERATURY.....	60
----------	-------------------------------	-----------

Úvod

Osvětlení a světelné prostředí neboli světelné mikroklima při práci a při jakékoliv činnosti je považováno za důležitou podmínku existence člověka. Jelikož světlo umožňuje získávat zrakové informace jako výsledek interakce mezi zrakovým systémem člověka a pozorovanými předměty či jevy, podíl zrakové složky u žádné činnosti nechybí a v mnoha případech je rozhodující. Jaký způsob osvětlení je příhodný z hlediska vykonávané funkce osvětlovaného místa, kdy je nezbytné vycházet jak z fyziologie zrakového orgánu, tak i z psychologie zrakového vnímání.

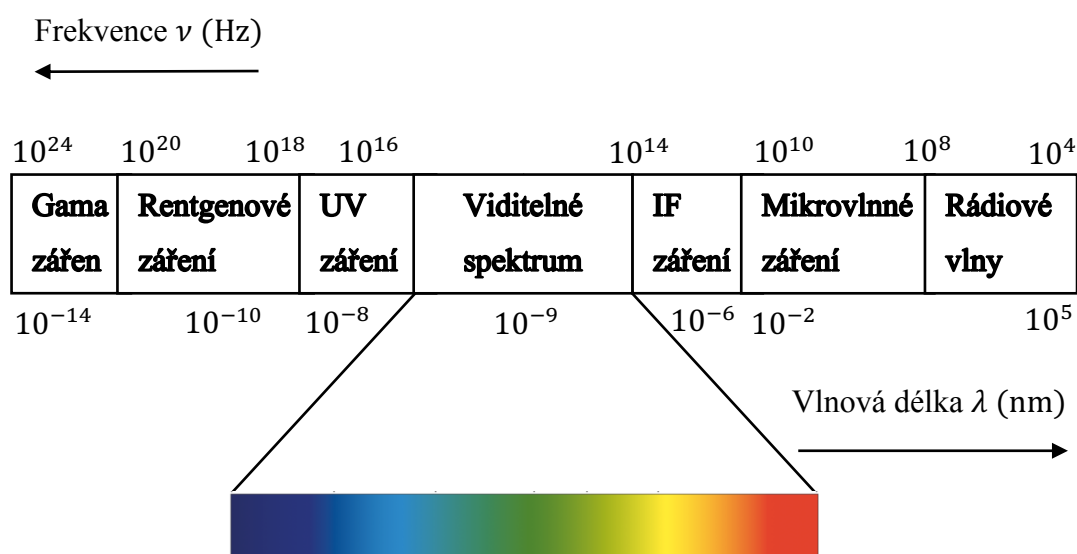
V praxi optometristy při vyšetření zrakových funkcí do blízka se setkáváme se situací, kdy je potřeba čtecí tabulku do blízka větší měrou osvětlit přídatným světelným zařízením. Je známo, že při presbyopii dochází k poklesu vidění do blízka při nedokonalém osvětlení, tudíž presbyop vyhledává intenzivnější osvětlení při pohledu do blízka, které navozuje miózu, a tedy zvýšení zrakové ostrosti čteného textu. Správná hodnota osvětlení má tedy významný vliv na zrakové funkce. Tato práce si klade za cíl popsat vliv osvětlení zejména na vidění do blízka, a to jak po stránce teoretické, tak experimentální.

Nejprve práce pojednává o optickém záření, procesu vidění, fyziologii zrakového systému a o některých dalších parametrech týkajících se zraku v souvislosti s osvětlením, ze které experimentální část vychází. Objasňuje základní světelně technické veličiny a jejich jednotky, zvláště ty fotometrické pojmy a veličiny, které respektují různou citlivost lidského oka pozorovatele k záření různých vlnových délek. Dále se práce zabývá rozdělením světelných zdrojů a jejich základními parametry. V závěrečném oddíle teoretické části jsou probrány zásady osvětlování vnitřních prostorů, pozornost je hlavně věnována nejdůležitějším informacím z technických norem pro návrh osvětlení v očních vyšetřovnách nejen v souladu s požadavkem dostatečného zrakového výkonu, ale i podle zásad potřebné zrakové pohody, bezpečnosti a vytvoření zdravého prostředí.

Cílem experimentální části práce je sledování změn zrakové ostrosti presbyopa při různých hladinách osvětlení a teplotách barvy LED světelných zdrojů a porovnání původní naměřené adice s optimální adicí při různých úrovních osvětlení. Výsledky budou diskutovány v kontextu české a evropské technické normy číslo 12464-1 (světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – část 1: Vnitřní pracovní prostory).

1 Proces vidění

Zrakový vjem či počitek je schopna vyvolat pouze viditelná část spektra elektromagnetického záření, označovaná jako světlo. Záření je přenos energie, která se šíří v podobě elektromagnetických vln prostorem o určité frekvenci (ν), popřípadě vlnové délce (λ). Nelze stanovit přesné hranice zmíněné viditelné oblasti elektromagnetického záření, záleží na individuálních vlastnostech každého oka. Spektrum elektromagnetického záření lze přibližně rozdělit tak, jak lze vidět na následujícím obrázku (viz obrázek 1).



Obrázek 1: Elektromagnetické spektrum [1]

Předpokládá se, že rozsah záření ve viditelné oblasti spektra je přibližně v rozmezí vlnových délek mezi 380 – 760 nm, které se dělí na světlo fialové, modré, zelené, žluté, oranžové a červené barvy, to odpovídá frekvenci vlnění v intervalu od $3,9 \times 10^{14}$ – $7,7 (9) \times 10^{14}$ Hz [2, 3]. Tyto barvy do sebe plynule přecházejí (viz obrázek 1).

1.1 Fyziologie vidění

Zrakové receptory (fotoreceptory) zaznamenávají informace o zevním prostředí a vytváří signál, který je odeslán zrakovou dráhou do korových zrakových center v týlním laloku mozku, kde vzniká vizuální vjem. Samotný biologický proces vidění začíná tak, že světelné paprsky přicházející do oka se lámou na sítnici, kde vytvoří zmenšený a převrácený obraz. Přitom projdou všemi lámavými plochami v oku (rohovkou, přední komorou vyplněnou komorovou vodou, dále čočkou a sklivcem) a na sítnici oka způsobují nervové podráždění.

Množství světla, které vstupuje do oka, je regulováno duhovkou. Pigment duhovky je pro světlo nepropustný. Šířka zornice se při velké světelné intenzitě stahuje (mióza) a při malé intenzitě světla se naopak pupila rozšiřuje (mydriáza). Duhovka pro tuto funkci disponuje dvojím typem hladkých svalů – svěračem a rozvěračem zornice, jejich hybnost (fotoreakce) je současně pro obě oči řízena vegetativním (autonomním) nervovým systémem. Svěrač zornice (musculus sphincter pupillae) je tvořen kruhovými svalovými vlákny od kořene duhovky směrem k pupile. Je inervovaný parasymptikem. Oproti tomu rozvěrač zornice (musculus dilatator pupillae) je formován paprscitými svalovými buňkami probíhajícími duhovkovým stromatem. Je inervovaný sympatikem. Při kontrakci svěrače dochází zároveň spolu s miózou ke zvýšení ostrosti obrazu na sítnici oka odcloněním okrajových paprsků a tím dochází ke zmenšení sférické a chromatické vady a ke zvýšení hloubky ostrosti pole oka. [4, 5]

Velikost oční pupily se mění v závislosti na věku, jak ukazuje tabulka 1, s přibývajícím věkem klesá šířka pupily na polovinu i méně, tato korelace je podle studií vysoká. Většina odborné literatury uvádí další možné faktory ovlivňující velikost zornice, a to intenzitu světla, stav adaptace sítnice, refrakci oka, barvu duhovky, pohlaví, národnost a emočním stav. Publikace [6, 7] naopak uvádí, že na velikost pupily nemá vliv pohlaví, refrakční vada oka a barva duhovky. Podle výzkumu [8] je zornice větší u modrých duhovek než u tmavých, a také je větší u žen než u mužů. Studie [7], porovnává velikost průměru pupily u lidí žijících v Evropě a v Egyptě. Skutečností je, že Egypťané mají menší průměr zornice než Evropané, což je dáno vyšším stupněm světla v této oblasti a vyšší pigmentací duhovky. Běžně je udáván rozměr průměru zornice od 7,5 do 1,8 mm, je-li zornice větší než 4 mm, označujeme tento stav jako mydriázu, je-li menší než 2 mm, hovoříme o mióze. Rozdílná velikost mezi pravou a levou zornicí je do 0,3 milimetru považována za fyziologický jev, tento stav se nazývá anizokorie [9]. Její plocha se může

měnit přibližně v poměru 1:16 až 1:20, a čas, za který pupila změni svoji velikost, kolísá kolem 360 – 380 ms. Reakce na změny v osvětlení jsou s rostoucím věkem nižší. [1, 4 - 11]

Tabulka 1: Závislost průměru zornice na věku [3]

Věk (roky)	Maximální průměr zornice (mm)
20	8,0
30	7,0
40	6,0
50	5,0
60	4,1
70	3,2
80	2,5

V sítnici jsou uloženy dva druhy světločivých buněk, které pohlcují částice světla a pomocí fotochemických reakcí přeměňují světelnou energii na nervový vzruch. Vnitřní vrstva oční koule obsahuje asi 120 milionů tyčinkových buněk, ale jen 6 milionů čípkových buněk [10, 11]. Dále se navzájem liší i funkcí, rozmístěním, tvarem, rozměrem i obsahem fotosenzitivních komplexů bílkovin (viz tabulka 2).

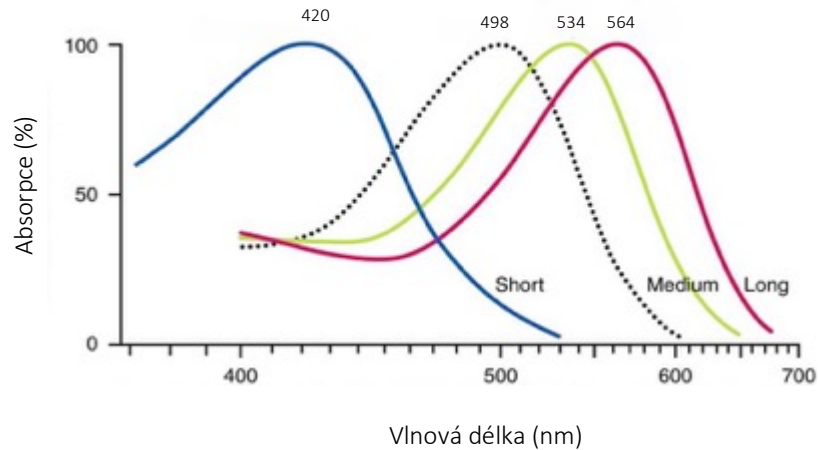
Tyčinky zajišťují skotopické vidění, to znamená vidění za zhoršených světelných podmínek, jejich nejvýznamnější předností je vysoká citlivost k rozdílům intenzity světla. Uplatňují se i při vnímání pohybu v periferii zorného pole, jelikož hustota tyčinek směrem do periferie narůstá a čípků ubývá (viz níže). Tyčinky jsou nejcitlivější za skotopických podmínek na vlnovou délku 507 nm, kdy mají citlivost 1700 lm/W [1]. Maximum křivky skotopického vidění se posouvá ke kratším vlnovým délkám, tento účinek jako první zaznamenal český lékař Jan Evangelista Purkyně v roce 1825, nazývaný jako „Purkyňův jev“. Adaptačním mechanismem je zvětšování průměru vjemových polí sítnice. Skotopické vidění se uplatňuje při hladinách jasu nižších než $10^{-2} \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ [1]. [1, 2, 11, 12, 13]

Tabulka 2: Charakteristika fotoreceptorů [13]

Tyčinky	Čípky
Aktivace při nižší hladině osvětlení	Aktivace při vyšší hladině osvětlení
75 až 120 milionů	6 milionů
Maximální koncentrace 20 ° od fovey	Maximální koncentrace ve fovei
Vysoká citlivost na světlo	Vysoká citlivost k detailu
Jeden druh fotoaktivního pigmentu	Tři druhy fotoaktivního pigmentu; možnost rozlišovat barvy
Adaptace na světlo za 20 - 30 minut	Adaptace na světlo za 1 minutu
Absorpční maximum 507 nm	Absorpční maximum 555 nm
Zrakový pigment: rhodopsin	Zrakový pigment: iodopsin

Čípky obstarávají fotopické vidění, to znamená vidění za vyšších světelných hodnot, jejich zásadní schopností je maximální citlivost k rozdílům vlnové délky, tím pádem dokážeme rozlišit barvy, ale i nejjemnější detaily v zorném poli. Adaptačním mechanismem je zmenšování průměru vjemových polí retiny. Tento děj se uskutečňuje při hladinách jasu vyšších než $10^0 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ [1].

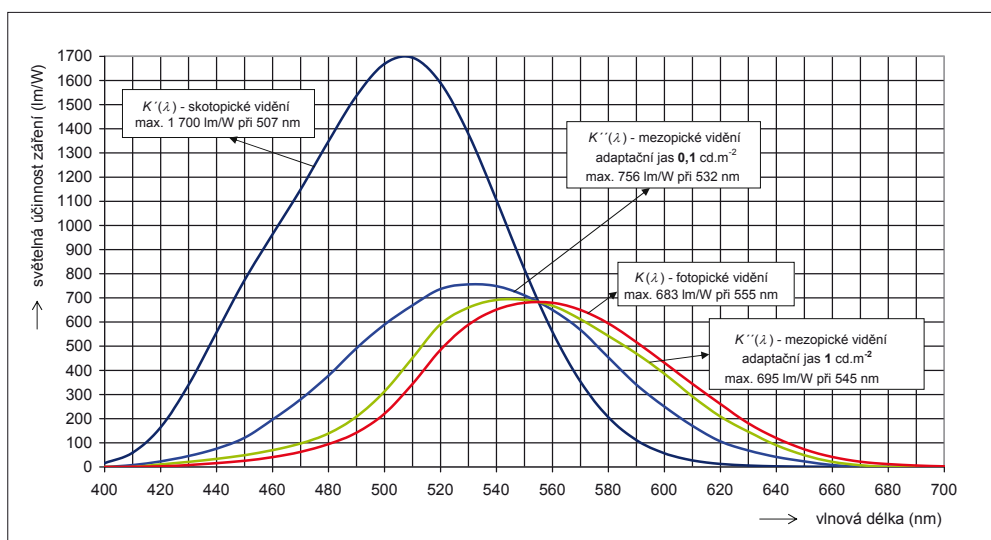
Lidská sítnice obsahuje tři samostatné druhy čípků, které se od sebe liší spektrálními odezvami fotosenzitivních pigmentů, to znamená, že každý čípek je rozdílně citlivý na světlo různých vlnových délek: krátkovlnné (414 – 424 nm), středněvlnné (522 – 539 nm) a dlouhovlnné (549 – 570 nm), jak lze vidět na obrázku 2 [14]. Čípky jsou nejcitlivější za fotopických podmínek na vlnovou délku 555 nm, kdy mají citlivost 683 lm/W [1]. [1, 2, 11, 12, 13]



Obrázek 2: Spektrální absorpční křivky krátkých (S), středních (M) a dlouhých (L) pigmentů u čípků a u tyčinek (R) [14]

Dalším typem vidění, při kterém pracují jak tyčinky, tak i čípky, je mezopické vidění. To se uskutečňuje při hladinách jasu v rozmezí od 10^{-2} do $10^0 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ [1].

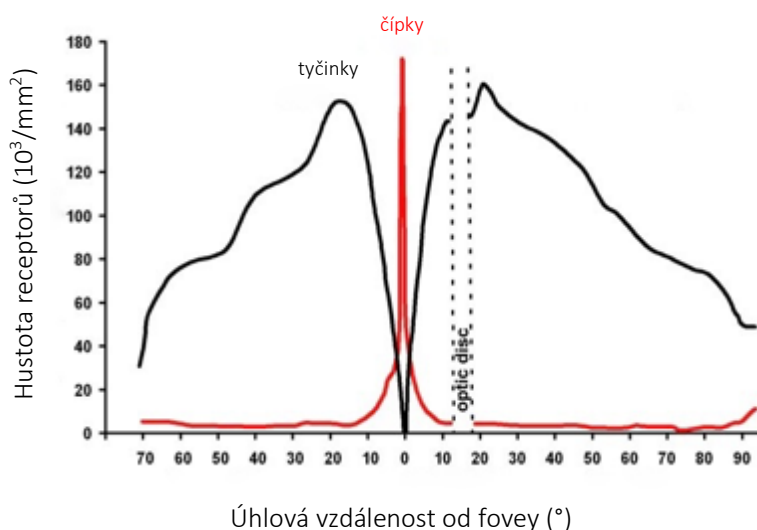
Z toho vyplývá, že oko není stejně citlivé na záření různých vlnových délek, tyto subjektivní pocity vidění se liší u jednotlivých osob. Průběhy hodnot světelných účinků záření v závislosti na adaptačním jasu zraku pozorovatele udávají grafy na následujícím obrázku 3.



Obrázek 3: Průběhy spektrálních citlivostí lidského zraku pro fotopické, mezopické a skotopické vidění [15]

Rozmístění buněk v sítnici není homogenní, jak je vidět na obrázku 4. Čípky jsou nejvíce koncentrovány v centrální části sítnice, v místě nazvané fovea centralis uprostřed žluté skvrny, v periférii sítnice jich je málo, ale jejich počet je konstantní. Na ploše o hodnotě 1 mm^2 je koncentrováno asi 150 tisíc čípků [13].

V periférii retiny je výrazně vyšší výskyt tyčinek, ale jejich hustota se postupně snižuje s rostoucí vzdáleností od fovey. Ve slepé skvrně (papile optického nervu), která se nachází v horizontální linii nazádně přibližně 18° (4 mm) od místa nejostřejšího vidění, nejsou přítomny žádné světločivé elementy [16]. Tomuto místu říkáme fyziologický skotom, jelikož mozek za normálních okolností chybějící části zorného pole doplní pohyby oka nebo informací z druhostranného oka. Nepravidelné rozložení světločivých buněk na sítnici zasahuje do vizuálního vnímání. [4, 10 - 16]

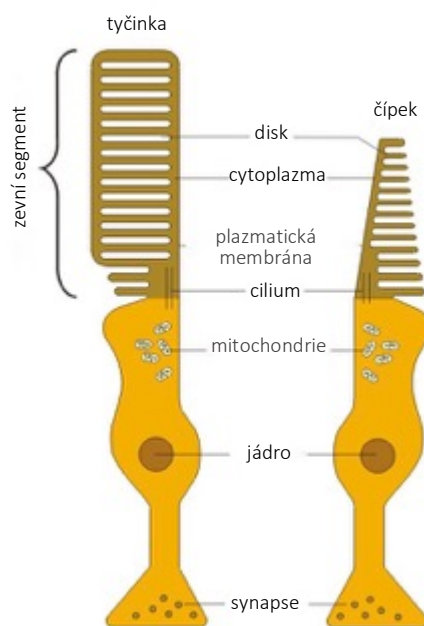


Obrázek 4: Rozmístění tyčinek a čípků na sítnici [17]

1.2 Biochemie zrakových pigmentů

Fotoreceptory se skládají ze synaptického zakončení, těla buňky a zevního segmentu. Popis světločivých buněk je na obrázku 5. Vnější část fotoreceptoru obsahuje hlavní bílkovinu, takzvaný fotosenzitivní protein, který u tyčinek je pojmenovaný jako rhodopsin a u čípků iodopsin, zde absorbované světlo vytváří elektrickou odezvu. Zevní fotoreceptorové konce leží částečně v pigmentovém epitelu sítnice a obsahují příčně skládané vrstvy membrán u čípků a vrstvy disků u tyčinek, a tam kde je vnější úsek spojen

se zbytkem buňky se nachází cilium (řasinky), které jsou uspořádány do mikrotubulů. Na protilehlých koncích, které jsou nejbližší zdroji světla, vytvářejí fotoreceptory synaptické zakončení s další buňkou sítnice, jež přenášejí signál do sítnicových sítí ganglionu. Ve vnitřní části fotoreceptoru jsou buněčné organely, jádro a nervová vlákna. Z tvaru vnějšího segmentu pochází jejich název.



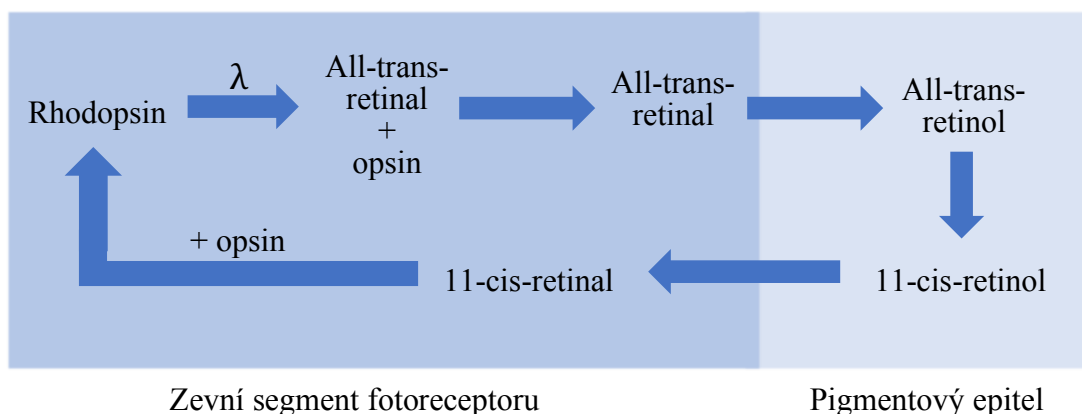
Obrázek 5: Stavba tyčinek a čípků [18]

Zrakový purpur (rhodopsin) se skládá z proteinové složky opsinu, který je vázán k molekule chromoforu, což je neproteinová část izomeru vitamínu A (11-cis-retinal). Iodopsin je též složen z retinaldehydu (11-cis-retinalu), který je kombinovaný se třemi druhy bílkoviny opsinu, proto čípkové pigmenty maximálně absorbují světlo různé vlnové délky (viz výše). Zdrojem vitamínu A v potravě jsou mrkev, játra, zelené a žluté listy, špenát, brokolice, dýně, rybí tuk, aj.

Biochemie vidění začíná stimulací rhodopsinu světlem, kde daný pigment absorbuje fotony světla a následně spouští fotochemický proces, v určitém okamžiku bělení rhodopsinu dochází k izomeraci retinalu z 11-cis-konfigurace do all-trans formy retinalu. Při ozáření opsinu a 11-cis-retinalu vznikají další bělicí meziproducty (bathorhodopsin, lumirhodopsin a metarhodopsin I, II). Konečná fáze bělení vede k uvolnění vitamínu A z proteinu a rhodopsin se štěpí na vazbu trans-retinal + opsin.

Převedení rhodopsinu na opsin je pouze začátkem fototransdukce. Po rozkladu rhodopsinu se aktivuje G-protein (transducin) a uzavírají se Na⁺ kanály v zevním segmentu fotoreceptoru. Při všech těchto pochodech má vzniklý receptorový potenciál formu hyperpolarizace a šíří se k synapsi, která obsahuje vezikuly s mediátorem. V gangliových buňkách vzniká akční potenciál vedoucí k přeměně světelného signálu na nervový vzruch, který je axony gangliových buněk veden zrakovými nervy do thalamu (viz níže).

Při regeneraci rhodopsinu musí být vitamín A při vstupu do pigmentové epiteliální buňky buď z jater nebo z vnějšího segmentu fotoreceptoru ve formě all-trans-retinol a následně je esterifikován a enzymaticky izomerizován na 11-cis-retinol. Před přenosem do fotoreceptoru se 11-cis-retinol převede na aldehyd, a posléze je 11-cis-retinal spontánně rekombinován s opsinem, aby se znovu vytvořil rhodopsin. Přehlednější uspořádání chemické podstaty procesu vidění pomocí tyčinek je na obrázku 6, který je nazýván jako tzv. Waldův cyklus. [10, 12, 13, 18 - 21]



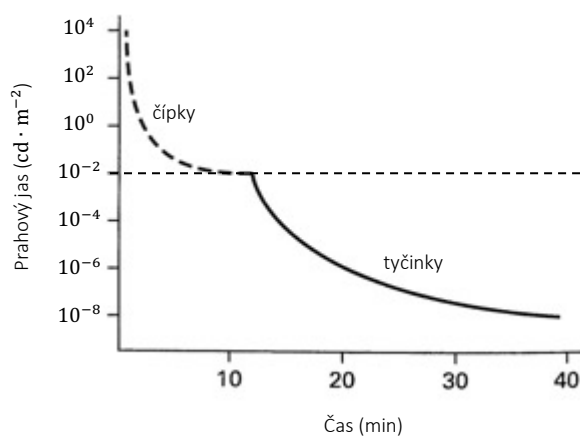
Obrázek 6: Schéma vizuálního cyklu

Představme si, že oko je vystaveno velmi vysoké hladině osvětlení, zrakový receptor již nedokáže reagovat s maximální účinností na slabé podmínky a oko se musí různým změnám osvětlení přizpůsobit. Rozlišujeme adaptaci na tmou a světlo, kdy oko na tyto dva stavy reaguje velmi odlišně.

Adaptace na světlo neboli čípková adaptace sítnice je rychlejší, trvá velmi krátkou dobu, obvykle několik sekund až jednu minutu, a následné doznívání setrvává asi tři až pět minut [2, 12]. Nastává při přechodu z temna na světlo, kdy se vlivem rozkladu fotopigmentů zmenšuje citlivost fotoreceptorů na světlo, oči jsou prudce oslněny, ale

rychle se přizpůsobují. Jak jde vidět na obrázku 3, kde jsou vyznačeny průběhy spektrálních citlivostí lidského zraku pro fotopické, mezopické a skotopické vidění, tak fotopická křivka pro osoby s normálním barevným viděním odpovídá téměř absorpčnímu spektru tří čípkových pigmentů sítnice, a proto umožňuje barevné vidění.

Adaptace na šero či tmu neboli tyčinková adaptace sítnice je významnější, dochází k přizpůsobení sítnice nižším hladinám osvětlení, nastává při přechodu ze světla do tmy. Tato fáze trvá obvykle několik minut až hodinu, jak ukazuje obrázek 7. Ihned po nástupu tmy se citlivost rychle zvyšuje po dobu prvních dvou až třech minut, po přibližně osmi až deseti minutách následuje poměrně stabilní období, kdy se postupně objevují tlumené objekty, po dvaceti až třiceti minutách se citlivost oka zvyšuje až dosáhne maximální vizuální senzitivity oka [2, 12]. Musí dojít k obnovení zásob fotopigmentu rhodopsinu v zevních segmentech tyčinek (viz podkapitola Biochemie zrakových pigmentů). Opět z obrázku 2 můžeme vidět, že spektrální citlivost lidského oka přizpůsobeného na tmu, téměř odpovídá absorpčnímu spektru rhodopsinu s vrcholnou citlivostí 498 nm a současně se mění citlivost oka k barvám (viz Purkyňův jev) [11]. [2, 4, 9 - 12]

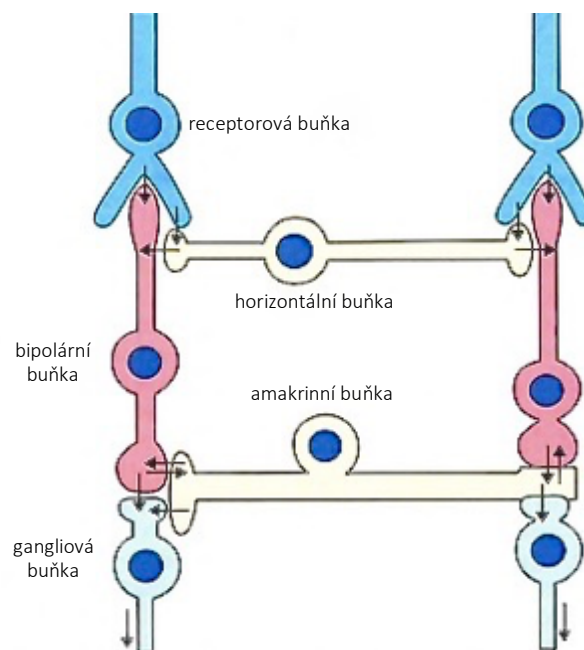


Obrázek 7: Křivka adaptace na tmu [10]

1.3 Další neurony

Kromě světločivých elementů jsou v sítnici ještě nervové elementy, a to multipolární (gangliové) a bipolární buňky, dále amakrinní a horizontální buňky, které vyplňují prostory mezi neurony a fotoreceptory a vytváří specializované podpůrné buňky a gliovou složku tvoří Müllerovy buňky. Fotoreceptory jsou s těmito typy neuronů sítnice propojeny synapticky.

Neurony, které přenášejí signály z oka do mozku, leží nejbližší vnějšímu světu, takže světlo musí nejdříve projít skrze celou šířku sítnice, aby se dostalo k fotoreceptorům, které se nacházejí v druhé vrstvě retiny a jsou prvním neuronem zrakové dráhy. Vzruch vzniklý dopadem fotonů ve fotoreceptorech je dendrity předáván na bipolární buňky, které jsou zároveň druhým neuronem zrakové dráhy a na horizontální buňky, které jsou orientované laterálně a zprostředkovávají postranní interakci mezi fotoreceptory a mezi receptorovými a bipolárními buňkami. Axony bipolárních neuronů jsou spojeny s gangliovými a amakrinními buňkami. Stejně jako horizontální neurony jsou amakrinní buňky uspořádány vodorovně a jejich boční působení je mezi bipolárními buňkami, mezi gangliovými buňkami i mezi nimi navzájem. Neurony uvnitř sítnice jsou vzájemně propojeny rovněž vertikální cestou od tyčinek a čípků přes bipolární a gangliové buňky a prostřednictvím horizontálního zapojení jsou všechny nervové elementy mnohočetně propojeny (jak je schematicky znázorněno na obrázku 8), a tudíž jsou některé informace zpracovány již na sítnici. Zapojení fotoreceptorů a neuronů sítnice je rozdílné v oblasti žluté skvrny a v periférii sítnice. V centrální oblasti je jedna bipolární a jedna gangliová buňka napojena na jeden čípek, v periférii jsou napojeny na několik tyčinek a čípků. Průměrný počet gangliových buněk je 1,2 milionů a bipolárních buněk je odhadováno na 25 milionů v lidské sítnici [19, 20]. Müllerovy buňky se rozprostírají po celé šířce sítnice a působí na všechny neurony.



Obrázek 8: Schéma zapojení fotoreceptorů a neuronů sítnice [18]

Gangliové buňky jsou třetím neuronem sítnice, jejich jádra leží ještě na sítnici, ale jejich dlouhá vlákna se sbíhají na papile zrakového nervu a opouštějí oko jako druhý hlavový nerv (nervus opticus) viz výše. Oční nervy procházejí očnicí do lebky, kde se část vláken zrakového nervu těsně před hypofýzou kříží v chiasma opticum a část se nekříží. Odtud pokračují dále jako zrakové trakty do thalamu a končí v corpus geniculatum laterale, jehož buňky tvoří čtvrtý neuron zrakové dráhy. Jeho neurity tvoří zrakovou radiaci (zvanou jako Gratioletův svazek), končí v okcipitálním laloku (v zóně pojmenované Brodmanova area 17) v buňkách korového zrakového centra, kde dochází k uvědomění si toho, co vidíme. [5, 10 - 13, 18 - 24]

1.4 Akomodace a presbyopie

Při pohledu do blízka nastává stah ciliárního svalu, konvergence os vidění a kontrakce svěrače duhovky, tato triáda nese označení akomodační reflex. Akomodace zajišťuje zvýšení optické mohutnosti čočky, změnu zakřivení hlavně přední, ale i zadní plochy čočky, její tloušťky a přizpůsobení dioptrického aparátu očí. Akomodace tedy zajišťuje zaostření optické soustavy oka na různé vzdálenosti. V klidu oko akomoduje zhruba +0,75 D až +1,5 D, což je dáno tónickou akomodací, která je vyvolána klidovým tonusem ciliárního svalu, kdy oko je zaostřeno na 1 metr a 33 centimetrů [21]. Akomodace je na obou očích téměř shodná.

Akomodaci charakterizujeme pomocí dalekého a blízkého bodu, akomodačního intervalu a akomodační šíře. Nejvzdálenější a nejbližší bod, který ještě vidíme ostře při nulové a maximální akomodaci, se nazývají daleký (R) a blízký (P) bod akomodace. Vzdálenost dalekého bodu od oka (přesněji od předmětové hlavní roviny oka) označujeme a_R a vzdálenost blízkého bodu jako a_P , tyto délky jsou měřeny v metrech. Převrácenou hodnotou vzdálenosti dalekého bodu vypočítáme momentální refrakční stav oka, který definuje axiální refrakci oka A_R . Axiální refrakce oka je udávána v dioptriích a její vzorec lze vyjádřit jako

$$A_R = \frac{1}{a_R}.$$

Akomodační interval Δa je vymezený vzdáleností dalekého (a_R) a blízkého bodu (a_P), v jehož oblasti můžeme pohybovat předmětem, aniž by se jeho obraz rozmazal. Měříme ho v metrech. Akomodační šíře (A_ξ), amplituda akomodace vyjadřuje rozsah akomodace v dioptriích, kterou vypočítáme jako rozdíl převrácených hodnot vzdáleností dalekého a blízkého bodu, podle následujícího vzorce

$$A_\xi = A_R - A_P = \frac{1}{a_R} - \frac{1}{a_P}.$$

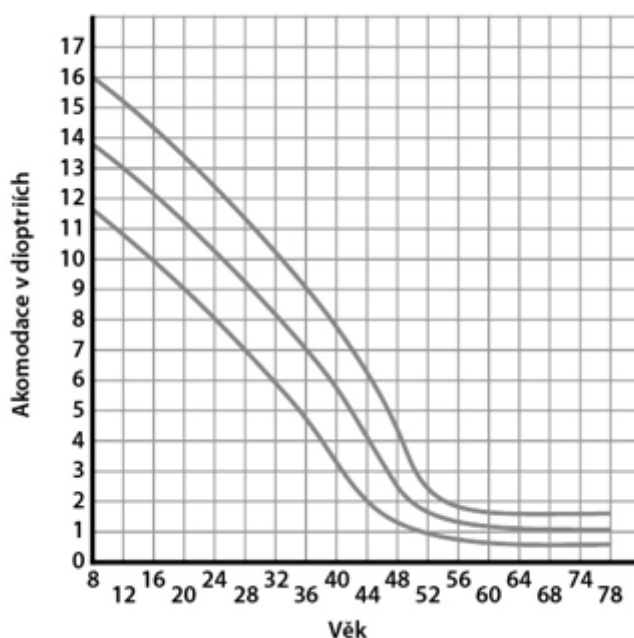
S věkem akomodační schopnost oka postupně klesá, tento proces se označuje termínem presbyopie, kdy v ciliárním svalu se snižuje počet svalových vláken, čímž se uvolní závěsná vlákna čočky a zvyšuje se množství vazivové tkáně ve svalu, ubývá elasticita oční čočky, její jádro tuhne, zvětšuje se i tloušťka pouzdra čočky. S přibývajícím věkem poloha blízkého bodu vzrůstá od oka a mění se i poloha vzdáleného bodu, hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3. K vidění využíváme pouze dvě třetiny akomodace, jedna třetina akomodační šíře nám slouží jako akomodační rezerva [9]. Akomodační šíře je ovlivněna i refrakční vadou. Myop má nižší hodnotu akomodační šíře vzhledem k méně vyvinutému ciliárnímu svalu, protože krátkozraký člověk méně akomoduje. Hypermetrop má silněji vyvinutý ciliární sval, protože je nucen více akomodovat a jeho akomodační šíře je vyšší. [2, 4, 5, 9, 22]

Tabulka 3: Závislost vzdálenosti blízkého a dalekého bodu akomodace na věku [2]

Věk (roky)	Vzdálenost bodu v (cm)		Akomodační šíře (D)
	Blízkého (a_P)	Dalekého (a_R)	
10	-7	∞	14,3
20	-10	∞	10,0
30	-14	∞	7,1
40	-22	∞	4,5
50	-40	∞	2,5
60	-200	+200	1,0
70	+100	+80	0,3
75	+57	+57	0,0
80	+40	+40	0,0

Závislost akomodační šíře na věku vyjadřuje Dondersova křivka (viz obrázek 9), která ukazuje empiricky stanovené hodnoty akomodační šíře dle Donderse a Duana. V dětství je průměrná hodnota akomodace až 14 dioptrií a více, ve 30 letech klesá na 7 dioptrií a ve věku 60 let již jen 1 dioptrií [2]. Vývoj presbyopie je individuální u každého člověka, proto je nutné ji individuálně řešit.

Akomodace může být ovlivněna léky, které způsobují zúžení zornice (parasymptomimetika), nebo obráceně které mají vliv na rozšíření zornice a na obrnu akomodace (cykloplegika), dále drogami, celkovým zdravotním stavem pacienta a pigmentací duhovky oka. Světle zbarvené duhovky jsou více citlivé na světlo než tmavé. [2, 5, 9, 21, 22]



Obrázek 9: Závislost úbytku akomodace na věku [23]

Presbyopie se nejčastěji objevuje kolem čtyřicátého a pětáctýřicátého roku života, kdy začínají být problémy s viděním do blízka, nastávají tyto projevy: prodlužuje se čtecí vzdálenost, říká se „že člověk má „krátké ruce“, text si oddaluje od očí. Dalšími příznaky jsou neostře, zamlžené vidění, dvojité vidění, pokles vízu do blízka při nedokonalém osvětlení (při nedostatečné mióze), astenopické potíže (bolest očí, bolest hlavy, slzení, překrvení spojivek), únava, ospalost, zhoršování symptomů během dne, zamlžené vidění a problémy při přeastřování vzdáleností. Může dojít k oslabení konvergence z důvodu ztráty akomodace, a tím k problémům při práci do blízka. [4, 24]

Obvyklým řešením presbyopie je tzv. přídavek (adice) do blízka – jedná se o kladnou dioptrickou hodnotu, která se připočítá ke korekci do dálky. Ke stanovení přídavku do blízka (adice) lze použít několik metod. Přibližně lze hodnotu odhadnout podle věku (viz tabulka 4) a pracovní vzdálenosti nebo podle akomodační šíře a pracovní vzdálenosti. Pro praktické stanovení lze použít předkládání spojek a rozptylek při pozorování vhodného testu na blízko (doporučuje se ucelený text), popř. je možné využít též červeno-zelený test. K odhadnuté korekci binokulárně překládáme +0,25 D do té doby, než figurant přečte poslední řádek, tedy dokud se text zlepšuje. Ověření, zda korekce je správná, zjistíme po předložení -0,25 D, kdy text se musí mírně zhoršit, pokud je text lepší či stejný, musíme adici zeslabit. Orientačním vyšetřením je červeno-zelený test do blízka (viz obrázek 21), kde se pacienti ptáme na kontrast a ostrost znaků v jednotlivých barevných polích. Jestli je vidění stejné v obou polích, nepřidáváme k adici žádné dioptrie, pokud vidí znaky kontrastněji v červeném poli, přidáme -0,25 D, pokud v zeleném sloupci, vložíme k adici +0,25 D, a to vždy před obě oči. [22, 23]

Tabulka 4: Odhad přídavku do blízka podle věku na vzdálenost 33 cm [25]

Věk (roky)	Adice (D)	
	Pro vzdálenost 33 cm	Pro vzdálenost 40 cm
45	+1,25	+0,75
50	+1,75	+1,25
55	+2,25	+1,75
> 60	+2,50	+2,00

Pro určení zrakové ostrosti (vízu) do blízka, a především pro subjektivní stanovení správné hodnoty přídavku do blízka, se používají optotypové tabulky. Provedení testů do blízka je buď ve formě tištěných, fotografických nebo světelných optotypů s různou velikostí písma textu, číslic, znaků nebo obrázků. V České republice se nejvíce používají k vyšetření zrakové ostrosti do blízka tzv. Jägerovy tabulky, modifikací Jägerových tabulek je Snellenova tabulka do blízka.

Tabulky jsou sestaveny do krátkých odstavců s požadovanou velikostí písmen, vyhovujícím kontrastem a ostrostí. Odstavce jsou seřazeny od největšího po nejmenší a označeny čísly zrakové ostrosti. K vyjádření pořadového čísla vízu lze použít klasický

decimální, logaritmický či Jägerův zápis. Text v jednotlivých odstavcích je složen do celých vět, proto zrakovou ostrost do blízka nelze hodnotit minimálním úhlovým rozlišením oka jako při vyšetření vízu do dálky, tedy nelze počítat s úhlovou velikostí 1' (minimum separabile), ale je měřena v jednotkách minimum legibile, což je prahová hodnota pro vnímání a pochopení čteného textu o minimální velikosti, přizpůsobená na vzdálenost 30 – 40 cm [26]. V tomto případě se uplatňuje i psychologický faktor – schopnost pochopení a domyšlení si souvislého textu. Každý autor si volí typ, odstupňování, velikost písma i grafickou stránku čtecí tabulky, využívá se speciálních příloh jako například map, not, křížovek, novinového textu, jízdních řádů, složení potravin apod. [2, 22, 26]

Čtecí tabulka (pracovní vzdálenost klienta) by měla být při vyšetření zrakové ostrosti do blízka v jedné třetině akomodačního intervalu mezi dalekým a blízkým bodem oka [27]. Interval ostrého vidění (od blízkého po daleký bod oka) pro konkrétní pracovní vzdálenost 40 cm je uveden v tabulce 5.

Tabulka 5: Rozsah ostrého vidění na pracovní vzdálenost 40 cm [25]

Věk (roky)	Rozsah ostrého vidění (cm)	
	Blízký bod (a_P)	Daleký bod (a_R)
45	24	133
50	27	80
55	31	57
> 60	33	50

2 Fotometrické veličiny

Světelné zdroje, ať již primární (žárovka), či sekundární (osvětlený text papírového optotypu), vyzařují elektromagnetickou energii, můžeme je tedy charakterizovat energetickými parametry (radiometrickými veličinami). Avšak vzhledem ke spektrální citlivosti lidského oka nelze ve světelné technice používat energetické pojmy a veličiny (např. zářivý tok, intenzitu záření atd.), ale pracuje se s fotometrickými veličinami, které zohledňují proces vidění a vznik zrakového vjemu. Mezi radiometrickými a fotometrickými veličinami je souvislost, například radiometrické veličině zářivý tok Φ_e odpovídá fotometrická veličina světelný tok Φ a podobně.

Fotometrie se zabývá měřením světelného záření ve viditelné oblasti spektra a metody měření těchto veličin dělíme na vizuální (subjektivní) a fyzikální (objektivní). U fyzikální fotometrie je přijímačem záření detektor, u vizuální je to lidské oko. Pro zajištění uniformity světelně technických výpočtů byla přijata dohoda o spektrální citlivosti oka tzv. normálního fotometrického pozorovatele, podle Mezinárodní komise pro osvětlování (Commission Internationale de l'Eclairage, CIE).

Základními světelně technickými veličinami jsou světelný tok Φ , svítivost I , osvětlenost E , jas L a světlení M . Mezi základní jednotky v mezinárodní soustavě jednotek SI pro fotometrii patří kandela, tj. jednotka svítivosti, od ní se ostatní jednotky fotometrických veličin odvozují (viz níže). [1, 3, 28]

Tabulka 6: Přehled fotometrických veličin

Fotometrické veličiny	Značení	Jednotka - zkratka
Světelný tok	Φ	lm
Svítivost	I	cd
Osvětlení	E	lx

Jas	L	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$
Světlení	M	$\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$

2.1 Světelný tok

Světelný tok je fotometrickým ekvivalentem zářivého toku Φ_e , který vyjadřuje výkon přenášený zářením, jeho jednotkou je watt (W). Světelný tok Φ představuje zářivý tok přepočtený s ohledem na vlastnosti lidského zrakového vnímání. Reprezentuje množství světla, které dopadá na určitou plochu nebo je vyzařován do určitého prostorového úhlu za jednotku času, tedy kolik světelné energie vyzáří zdroj do okolí. Je to tedy světelný výkon vyjádřený funkcí spektrální citlivosti oka, který způsobí zrakový počitek. Jednotkou je lumen (lm). Světelný tok monochromatického záření pro danou konkrétní vlnovou délku, například pro $\lambda = 555 \text{ nm}$, na kterou je oko nejcitlivější, určíme následujícím vztahem

$$\Phi(\lambda) = K(\lambda) \Phi_e(\lambda) = K_m V(\lambda) \Phi_e(\lambda),$$

kde zavádíme veličinu $K(\lambda)$ neboli světelnou účinnost monochromatického světla, která je dána poměrem světelného toku Φ a odpovídajícího zářivého toku Φ_e ,

$$K(\lambda) = \frac{\Phi}{\Phi_e}.$$

A jelikož z definice kandely (viz níže) je světelný účinek záření definován pro vlnovou délku světla $\lambda = 555,0155 \text{ nm}$, je spektrální citlivost lidského oka pro normálního fotometrického pozorovatele pro všechny stavy adaptace, tedy při fotopickém a skotopickém vidění identická,

$$K(555,0155) = K'(555,0155) = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}.$$

Další veličinou je tzv. poměrná světelná účinnost monochromatického záření $V(\lambda)$, což je bezrozměrná veličina, která byla standardizována orgánem CIE a přijata Mezinárodní komisí pro míry a váhy (CIMP), specifikována v tabulkách pro jednotlivé

vlnové délky záření. Pro vlnovou délku $\lambda = 555,0155$ nm je standardní spektrální funkce světelné účinnosti při fotopickém vidění rovna $V(555,0155) = 0,999\,9971$ a při skotopickém vidění je rovna $V'(555,0155) = 0,4017529$ a jsou definovány vztahem

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m}$$

Maximální světelnou účinnost záření K_m pro fotopické vidění vypočítáme vztahem

$$K_m = \frac{683}{0,999\,997\,1} \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}.$$

A maximální světelnou účinnost záření K_m pro skotopické vidění vypočítáme vztahem

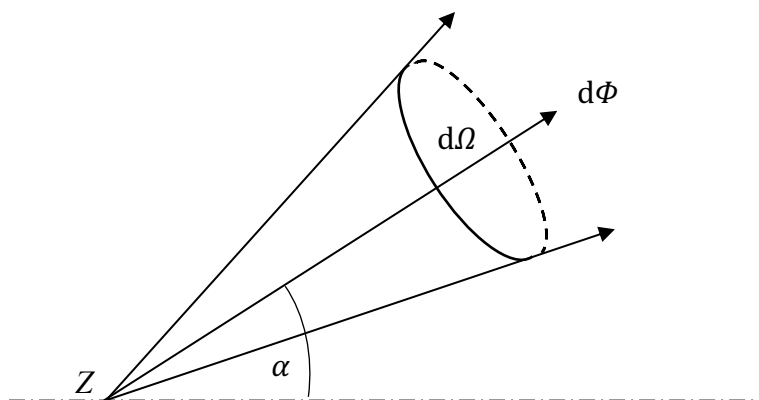
$$K'_m = \frac{683}{0,401\,752\,9} \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} = 1700 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}.$$

Jednotka lumen představuje světelný tok, který vyzařuje do prostorového úhlu jednoho steradiánu bodový zdroj o směrové svítivosti jedné kandely. [1, 3, 28, 29]

2.2 Svítivost

Světelné zdroje nevyzařují záření do prostoru ve všech směrech rovnoměrně, z tohoto důvodu zavádíme veličinu zvanou svítivost I , která představuje světelný tok $d\Phi$ vyzářený určitým směrem do prostorového úhlu $d\Omega$ (viz obrázek 10). Svítivost se spočte podle vzorce

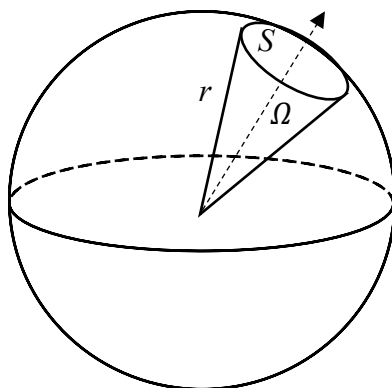
$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}.$$



Obrázek 10: Obrázek k definici svítivosti [3]

Zavádíme pojem prostorový úhel Ω , jehož jednotkou je steradián (sr). Velikost prostorového úhlu je definována jako poměr velikosti plochy S vyřatě kuželovou plochou na povrchu jednotkové koule a druhé mocniny poloměru r této koule (viz obrázek 11),

$$\Omega = \frac{S}{r^2}.$$



Obrázek 11: Obrázek k definici prostorového úhlu [3]

Jednotkou svítivosti je kandela (cd), jedna kandela je definována mezinárodní dohodou jako svítivost zdroje monochromatického záření o jediné frekvenci $540 \cdot 10^{12}$ Hz, jehož zářivost v daném směru je $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$. Kandelu lze vyjádřit také jako lumen na steradián ($\text{cd} = \text{lm} \cdot \text{sr}^{-1}$). Frekvence záření svítidla odpovídá přibližně vlnové délce 555,0155 nm, určené podle vzorce

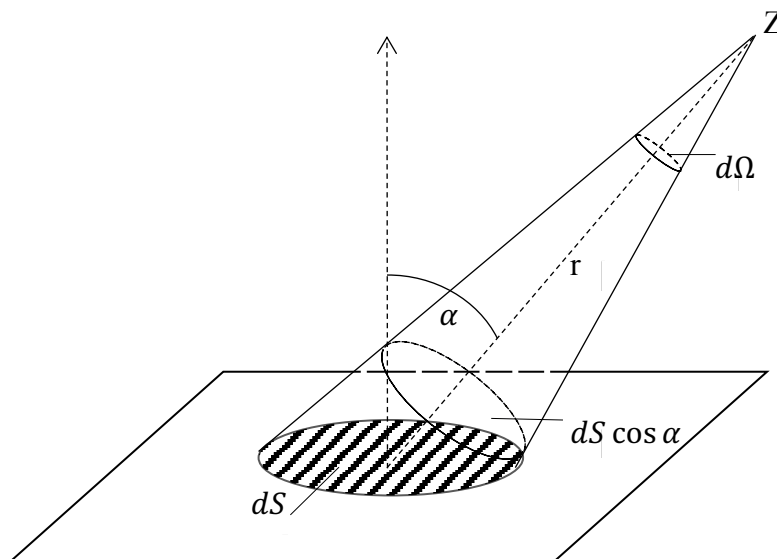
$$\lambda = \frac{c}{\nu},$$

kde je rychlost světla rovna $c = 2,997\,086\,40 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pro standardní prostředí, která je stanovena na základě rychlosti světla ve vakuu $c_0 = 2,997\,92459 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a indexu lomu $n = 1,000\,279\,668$, při teplotě okolí 293,15 K (20 °C), za normálního atmosférického tlaku 101 325 Pa a relativní vlhkosti 50 %. [1, 3, 28, 29]

2.3 Osvětlení

Osvětlení je veličina udávající, jak je určitá plocha osvětlována, to znamená, že osvětlení je plošná hustota světelného toku $d\Phi$ v daném bodě plochy dS (viz obrázek 12). Značí se písmenem E ,

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



Obrázek 12: Obrázek k definici osvětlení [3]

Jako jednotka pro měření osvětlení se zavádí lux se zkratkou (lx), $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm} \cdot \text{m}^{-2}$, popřípadě $1 \text{ lx} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{m}^{-2}$.

Osvětlení od bodového zdroje o svítivosti I_α , který plochu ve vzdálenosti r osvětluje pod úhlem α , lze spočítat podle vztahu

$$E = \frac{I_{\alpha} \cos \alpha}{r^2},$$

který vyplývá z definice osvětlení a z relací

$$d\Phi = I_{\alpha} d\Omega,$$

$$d\Omega = \frac{dS \cos \alpha}{r^2}.$$

Z výsledku je zřejmé, že osvětlení plochy klesá s rostoucí vzdáleností r od bodového zdroje a se vzrůstajícím náklonem osvětlené plochy, proto maximální intenzity osvětlení dosáhneme při kolmém dopadu paprsků, kdy $\cos 0^{\circ} = 1$. [1, 3, 28, 29]

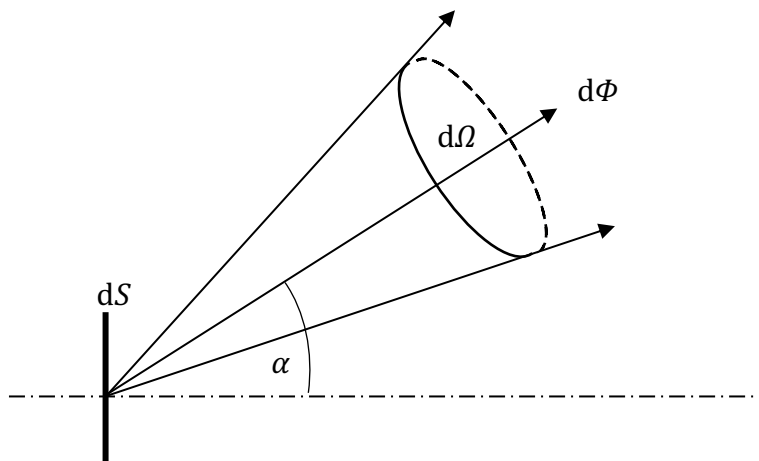
2.4 Jas

Jas je obecně určen plošnou a prostorovou hustotou světelného toku, takže na rozdíl od svítivosti vždy záleží na poloze pozorovatele a na směru jeho pohledu. Jas označujeme písmenem L a jednotkou je kandela na čtvereční metr ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$). Jas L_{α} plošného elementu ve směru α můžeme vyjádřit jako podíl svítivosti dI_{α} plošky zdroje a plochy elementu $dS \cos \alpha$ promítnuté na rovinu kolmou ke směru α (viz obrázek 13), platí tedy

$$L_{\alpha} = \frac{dI_{\alpha}}{dS \cos \alpha}.$$

Pro intenzitu zrakového vjemu je rozhodující jas plochy a jeho kontrast, který je dán poměrem rozdílu maximálního a minimálního jasu dvou částí zorného pole pozorovatele viděných současně a součtem obou hodnot jasů. Pomocí kontrastu hodnotíme subjektivně viditelnost pozorovaného předmětu L_{\max} a jeho pozadí L_{\min} . Objektivně je kontrast C definován podílem, pomocí vzorce

$$C = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}.$$



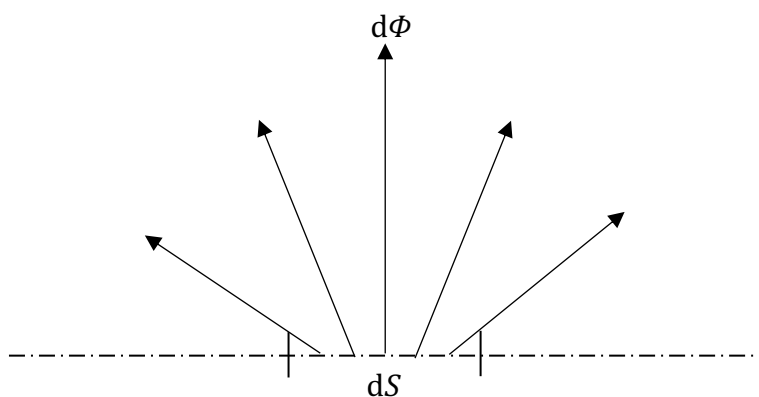
Obrázek 13: Obrázek k definici jasů [3]

[1, 3, 22, 28, 29]

2.5 Světlení

Světlení neboli intenzita světlení vyjadřuje plošnou hustotu světelného toku $d\Phi$, vysílaného zářivou plochou dS do celého poloprostoru všemi směry (viz obrázek 14). Světlení se označuje písmenem M a měří se v lumenech na čtvereční metr ($\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$). Tato velikost světelného toku vycházejícího z plochy je definována podílem dle vztahu

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



Obrázek 14: Obrázek k definici světlení [22]

[1, 3, 22, 28, 29]

3 Světelné zdroje

Světelné zdroje jsou hlavní složkou osvětlovacích soustav, které vyzařují viditelné záření. Nejčastější dělení je na přírodní a umělé zdroje světla. Dalším řazení je podle původu na primární a sekundární zdroj světla, za primární zdroj pokládáme objekt nebo plochu tělesa, které vyzařuje světlo vzniklé v důsledku přeměny jeho energie, zatímco jako sekundární zdroj bereme objekt nebo povrch tělesa, který uvolněnou světelnou energii odráží či propouští.

Primárním zdrojem optického záření je Slunce, které na zemský povrch vyzařuje jen část svého elektromagnetického záření, podstatná část je pohlcena atmosférou nebo odvrácena magnetickým polem zeměkoule. Denní světlo je pro lidský organismus nenahraditelné, má příznivý vliv na lidské zdraví, ale také hospodářské, ekologické a hygienické hledisko při tvorbě zrakové pohody v interiérech. Intenzita slunečního osvětlení se mění v závislosti na poloze Slunce vůči Zemi, mluvíme o denním a nočním světle.

Umělé zdroje optického záření jsou uměle vytvořené zdroje světla, které nahrazují nějaký druh energie (elektrickou, chemickou, biologickou) na optické záření. Umělé světelné zdroje přiměřeně doplňují či naprosto nahrazují denní osvětlení, kterým chceme zajistit vhodné světelné podmínky pro zrakový úkol, podporující zrakovou pohodu člověka. [1, 29, 30, 31]

3.1 Základní parametry světelných zdrojů

Světelné zdroje jsou hodnoceny základními parametry, které popisují jejich funkční vlastnosti a kvalitu světla, tyto parametry lze rozdělit na světelně technické, elektrické a ekonomické. Mezi hlavní kritéria, které budou nadále podrobněji popsány, patří světelný tok, měrný výkon, teplota chromatičnosti, index podání barev, dalšími jsou životnost, cena a design. První dva parametry patří mezi standardní fotometrické veličiny a jsou popsány v kapitole Fotometrické veličiny. [1, 29, 32]

Měrný výkon

Z ekonomického hlediska je podstatná účinnost přeměny napájecí energie na energii světelnou charakterizovaná měrným výkonem. Přehled hodnot měrných výkonů u různých typů světelných zdrojů je v tabulce 7. Měrný výkon η se vypočítá poměrem produkovaného světelného toku Φ a elektrickým příkonem P světelného zdroje, platí vztah

$$\eta = \frac{\Phi}{P}$$



Obrázek 15: Energetický štítek pro elektrické světelné zdroje [33]

Tabulka 7: Měrný výkon základních skupin světelných zdrojů [1]

Druh světelného zdroje	Měrný výkon ($\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$)
Žárovky	10 – 18
Halogenové žárovky	20 – 30
Světelné diody (LED)	60 – 160
Směsové výbojky	20 – 28
Vysokotlaké rtuťové výbojky	40 – 60
Indukční výbojky	60 – 97
Kompaktní zářivky	40 – 87

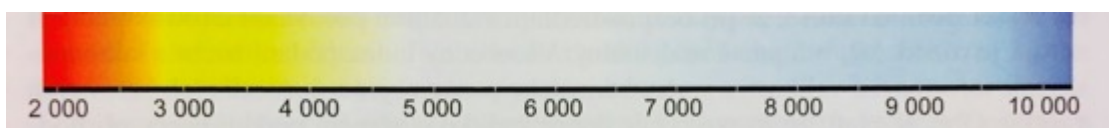
Lineární zářivky	50 – 104
Halogenidové výbojky	50 – 130
Sírné výbojky	135
Vysokotlaké sodíkové výbojky	70 – 150
Nízkotlaké sodíkové výbojky	100 – 200

Zdroje světla napájené z elektrické sítě jsou opatřeny viditelně umístěným energetickým štítkem (který je zobrazen na obrázku 15), který poskytuje údaje o názvu nebo ochranné známce dodavatele, identifikační značce modelu dodavatele, třídě energetické účinnosti A⁺⁺ až E (A⁺⁺ – úsporné, E – nejméně úsporné) a spotřebě energie E_c udávané v kWh za 1 000 hodin [33]. Od 1. 8. 2017 vstoupilo v platnost nařízení Evropského parlamentu a Rady č. 2017/1369, které stanovuje rámec pro označování energetickými štítky a ruší předchozí směrnici Evropského parlamentu a Rady č. 2010/30. Hlavní změnou je kategorizace energetické účinnosti za účelem zajištění homogenní stupnice A až G (A – úsporné, G – nejméně úsporné). Přejít na nové energetické štítky má být nejpozději do 2. 11. 2019 [34]. [1, 29, 32, 33, 34]

Teplota chromatičnosti

Kvalita světla je charakterizována indexem podání barev R_a , CRI a teplotou chromatičnosti T_c , CCT (též teplota barvy či barevný vjem), které vystihují barevné vlastnosti světla. Tato veličina určuje barevný odstín vyzářeného světla, který odpovídá teplotě vlákna tzv. ideálního zářiče zahřátého na tuto teplotu. Teplota chromatičnosti se měří v kelvinech (K) a je shodná u klasických žárovek u výbojových světelných zdrojů se používá termín náhradní teplota chromatičnosti. Barevné schéma teplot chromatičnosti je k vidění na obrázku 16. Má vliv na případné využití zdroje světla pro daný zrakový úkol. Volba teploty barvy světelného zdroje záleží na hladině osvětlení, barevné úpravě místnosti, nábytku, klimatickém pásmu a druhu prostoru, jelikož je podmíněna psychologickou, estetickou a přirozenou potřebou uživatele.

V současné době je většina světelných zdrojů rozlišována podle teploty chromatičnosti do tří základních kategorií barevného dojmu, ale není předepsaným kritériem pro osvětlování vnitřních prostorů. Jako „teplé bílé“ světlo je vnímán světelný zdroj při hodnotách teploty chromatičnosti nižších než 3 300 K, „neutrálně bílé“ světlo je při hodnotách v rozmezí od 3 300 do 5 300 K a „studené bílé“ světlo je při hodnotách vyšších než 5 300 K [35]. Standardizované „denní bílé“ světlo je při teplotě chromatičnosti 6 500 K, mající modrý nádech barvy světla. Žárovky prezentují teplotu chromatičnosti obvykle 2 700 K, která je přiřazována k teplotě barvy při východu a západu Slunce [29]. Se zvyšující teplotou barvy určitého zdroje světla klesá jeho světelný tok, a tedy i měrný výkon a opačně. [1, 29, 32, 35]



Obrázek 16: Orientační barevné znázornění teplot chromatičnosti v kelvinech [1]

Index podání barev

Podání barev se hodnotí indexem podání barev, je to schopnost světelného zdroje poskytnout svým světelným tokem barvy okolních předmětů věrohodně ve srovnání s ideálním zdrojem světla. Index podání barev je dán stupnicí v rozsahu 0 až 100, čím vyšší hodnota indexu, tím přirozenější barevné rozlišení, podobné dennímu světlu. Například klasické žárovky mají vysoký index podání barev dosahující hodnoty $R_a = 100$, nízkotlaké sodíkové výbojky mají $R_a = 0$, kdy není možné rozlišit barvy, jelikož vyzařují veškerý světelný tok na jedné vlnové délce [35]. Zdroje světla by měla při osvětlování vnitřních prostorů s trvalým pobytem osob vykazovat kvalitní barevné podání $R_a \geq 80$. Závěrem můžeme říci, že barevné podání není závislé na barvě světla. [1, 29, 32, 35]

Životnost světelného zdroje, cena

Další veličinou, kterou lze najít na obalu světelného zdroje, je životnost, je to celková doba svícení do okamžiku, kdy přestane vykonávat tyto požadavky. Životnost světelných zdrojů je vyjadřována v hodinách (h). Životnost je provázaná s ekonomickou a ekologickou efektivitou, kdy je potřeba minimalizovat celkové náklady na nákup a výměnu světelných

zdrojů. Ceny modernějších zdrojů světla rostou, na druhou stranu, pokud mají delší životnost a vyšší účinnost, může dojít k úsporám nákladů. Výrobci by měli uvádět i počet cyklů zapnutí a vypnutí světelných zdrojů. [1, 29, 32]

3.2 Třídění umělých světelných zdrojů

Podle způsobu vzniku světla se umělé elektrické zdroje světla klasifikují do třech základních skupin: teplotní zdroje (klasické a halogenové žárovky), výbojové zdroje (zářivky a výbojky) a elektroluminiscenční zdroje (světelné diody). Tato kapitola je věnována popis umělých světelných zdrojů používaných při osvětlování vnitřních prostorů. [1, 29, 30, 31]

Žárovky

Klasické žárovky spolu s halogenovými patří mezi teplotní zdroje světla, u nichž dochází ke vzniku optického záření zahřátím pevné vodivé látky (wolframového vlákna) elektrickým proudem na vysokou teplotu. Fungují na principu tepelné emise světla, kdy až 95 % elektrické energie se mění na teplo a zbývajících 5 % se mění na světlo [29].

K výhodám standardních žárovek zahrnujeme jednoduchou konstrukci, instalaci a údržbu, malé proporce a hmotnost, nízkou pořizovací cenu, široký rozsah napájecího napětí a příkonů, okamžitý start bez blikání, spojitě spektrum vyzařovaného světla, vysoký index podání barev a příjemnou teplou barvu světla (viz výše).

Velmi malý měrný výkon, nízká životnost (průměrná životnost je tisíc hodin), výrazný úbytek světelného toku v průběhu života zdroje, výrazná závislost parametrů žárovek na napájecím napětí a negativní vliv na životní prostředí to jsou podstatné nedostatky žárovek. [1, 29, 30]

Halogenové žárovky

Halogenové žárovky pracují na stejné tezi jako standardní žárovky, obsahují též wolframové vlákno a válcovou baňku s inertním plynem s příměsí halogenů nebo jejich sloučenin (jód, brom, xenon). Uvnitř baňky dochází k halogenovému regeneračnímu cyklu, kdy oproti klasické žárovce, ve které dochází k usazování vypařeného wolframu na vnitřní stranu skla (začernání baňky), halogen působí tlakem na vypařovaný wolfram, který se

následně usazuje na vlákne a plyn se vrací k vnitřnímu povrchu baňky a celý proces se opakuje. Tím se dosáhne vyššího měrného výkonu, většího a stabilnějšího světelného toku, delší životnosti (až pět tisíc hodin) a vyšší účinnosti světelného záření halogenových žárovek. Dalšími klady jsou vyšší teplota chromatičnosti 2 900 K až 3 100 K, poskytují příjemnější bílé světlo, vysoký index podání barev (srovnatelný s klasickými žárovkami), větší odolnost vůči teplotním změnám, menší rozměr baňky a nanášení reflexních vrstev na povrch baňky s cílem zvýšit měrný výkon. Halogenové žárovky mohou uvolňovat škodlivé ultrafialové záření, proto u modernějších typů se použitím křemenného skla baňky potlačuje toto záření, které v některých případech (při osvětlování citlivých materiálů) je nežádoucí a jsou označovány jako UV-stop [1].

Nevýhodami je náročnější technologie výroby, vyšší cena, výrazná závislost parametrů na napájecím napětí a nemožnost stmívání.

Použití halogenových žárovek je především v reklamním osvětlení, v galeriích a muzeích, ve výlohách obchodů, v automobilovém průmyslu, v promítací technice atd. [1, 29, 30]

Zářivky

Zářivky patří mezi nízkotlaké výbojové zdroje spolu s kompaktními zářivkami, nízkotlakými sodíkovými výbojkami a indukčními výbojkami. Nízkotlaké rtuťové zdroje se skládají z trubice plněné směsí rtuťových par a inertním plynem (argonem), na obou koncích trubice je zatavena wolframová elektroda a působením elektrického pole vzniká vlastní výboj v nasycených parách rtuti za nízkého tlaku, ve kterých dochází k vybuzení ultrafialového záření. Zářivky obsahují vrstvy luminoforů, jsou to pevné látky nanášené na vnitřní stěnu skleněné trubice nebo baňky zářivky, které transformují neviditelné záření rtuťového výboje na viditelné světlo. Zářivky umožňují dosahovat vysokých měrných výkonů a lepšího barevného podání vyzařovaného světla v závislosti na typu použitého luminoforu.

Zářivky přísluší mezi efektivní zdroje světla, mezi jejich výhody řadíme vysokou energetickou účinnost, vysoký index podání barev $R_a \geq 80$, velmi široké spektrum teploty chromatičnosti od 2 700 K do 17 000 K, delší životnost (více než dvacet tisíc hodin), která je závislá na počtu zapnutí, možnost různých konstrukčních typů, velké spektrum příkonů od 4 W do 200 W, rychlý start bez blikání [1].

Mezi nevýhody zářivek patří závislost světelného toku na teplotě okolního prostředí, nutnost předřadných a startovacích obvodů, obsah rtuti (musí být likvidovány jako nebezpečný odpad).

Použití zářivek je především v osvětlování vnitřních prostorů v domácnostech, v průmyslových a administrativních budovách, školních a nemocničních zařízeních, obchodech, restauracích.

Zářivky se od sebe liší konstrukčními prvky, nejvíce se klasickým žárovkám podobají kompaktní zářivky, které mají provedení s jedním závitem (E27, E14, B22). Baňky se vyrábějí v nejrůznějších tvarech: hruškovém, kulovém, svíčkovém, ve tvaru písmene U nebo ve formě různých šroubovic. Lineární zářivky mají na obou koncích patice s kolíky (G5, G13) a jsou vytvářeny v rozdílných variantách průměrů a délek. [1, 29, 30]

Světelné diody

Světelné diody (Light Emitting Diode, zkratkou LED) přísluší do skupiny elektroluminiscenčních světelných zdrojů, které se v posledních letech stále více využívají v osvětlování interiérů a nejen tam. Technologie LED spočívá na principu PN přechodu, jelikož světelné diody představují polovodičové součástky, které generují viditelné záření, je-li PN přechod buzen průchodem elektrického proudu. U LED diod jde o nekoherentní světlo, které se vyznačuje velmi úzkou křivkou spektrálního složení a zářením v podstatě monochromatickým. Vývojem modré diody byla získána dioda se světlem bílé barvy, a to dvojitým způsobem. Za prvé aditivním mísením několika komplementárních vlnových délek (světlo červené, zelené a modré LED) ve stanoveném poměru nebo na bázi fosforescence luminoforů, tato metoda je obdobná principu vzniku viditelného záření u zářivek. Nebo vzniklé modrozluté spektrum, které je složeno z luminiscence modrého světla a fosforescence žlutého, kdy je potlačeno zelené a červené světlo a je přeměno na bílé světlo.

LED zdroje poskytují energeticky efektivní osvětlení z hlediska vysokého měrného výkonu (viz tabulka 7), které je vyšší než u žárovek, zářivek i některých výbojek, dále vysokého indexu podání barev $R_a \geq 90$, široké škále barevných kombinací, dlouhé životnosti (udává se šedesát až sto tisíc hodin, která závisí na okolní teplotě), okamžitého startu, možnosti nejrůznějších tvarů a rozměrů, schopnosti stmívání, mechanické odolnosti

vůči vibracím a otřesům a žádných stopách rtuti. Teplota chromatičnosti bílé svítící diody odpovídá teplotě „studeného“ a „teplého“ bílého světla (viz výše) [1].

Mají i některé nedostatky, jako je vysoká cena a závislost některých parametrů na teplotě okolí. I přes tyto nevýhody se použití světelných diod rozšiřuje a v budoucnosti nahradí značné množství světelných zdrojů. Aplikace LED světel je velmi různorodá, využití je například v automobilovém průmyslu, v dopravním značení, pouličním osvětlení, v tunelech, v osvětlení silnic, stezek a chodníků, ve veřejných budovách, v reklamním osvětlení, ve zdravotnictví, v zobrazovací technice a samozřejmě v osvětlení interiérů v domácnostech. [1, 29, 30]

4 Osvětlení vnitřních prostorů

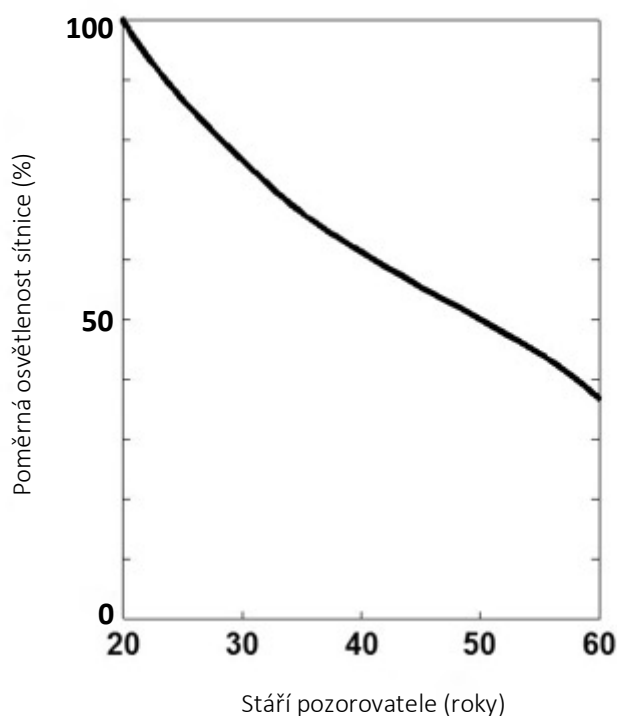
Účelem vhodného osvětlení je vytvořit takové světelné prostředí, aby lidé byli schopni vykonávat zrakové činnosti a úkoly účinně a přesně podle zásad současné světelné techniky. Světelné prostředí lze hodnotit z pohledu osvětlení prostoru či z pohledu osvětlení místa zrakového výkonu, kde dané osvětlení může být poskytnuto denním nebo umělým osvětlením, eventuálně jejich kombinací.

Tato kapitola je zaměřena na požadavky osvětlení interiérů z hlediska zrakové pohody a zrakového výkonu člověka a na řešení osvětlení z hlediska jeho kvality a kvantity. Závěr kapitoly je specializován na osvětlení zdravotnických zařízení, respektive způsob a provedení osvětlení očních vyšetřoven, a na požadavky správného osvětlení pro daný pracovní úkol při vyšetření zraku, který zabezpečuje správnou funkci zrakového orgánu. Osvětlení vnitřních pracovních prostorů, tudíž i očních vyšetřoven vychází z české a evropské technické normy ČSN EN 12464-1 Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – část 1: Vnitřní pracovní prostory z března roku 2012 formou obecných ustanovení či taxativně pro různé zrakové úkoly, činnosti nebo prostory.

4.1 Návrh a parametry osvětlení

Měřítkem pro navrhování osvětlení vnitřního světelného prostředí je zraková pohoda, zrakový výkon a bezpečnost lidského organismu, účelem návrhu osvětlení je nabídnout uživateli vhodné světelné podmínky. Způsob osvětleného prostoru ovlivňuje úroveň vidění a rozložení jasu v prostoru, tato kritéria mají zásadní vliv na adaptaci lidského oka. Zrakový výkon při dané zrakové činnosti je podmíněn více fyziologickými vlastnostmi lidského zraku, přičemž zraková pohoda zahrnuje i psychické faktory organismu, proto je spíše ovlivněna subjektivními vlastnostmi uživatelů. Takže můžeme říci, že správné osvětlení respektuje psychologické, fyziologické a biologické požadavky lidského organismu. Světelně technická kritéria stanovená v normách jsou určena pro průměrného člověka středního věku s normálním zrakem, pro tzv. normálního fotometrického pozorovatele, ale ve skutečné situaci se mohou lišit. Rozdílné světelné parametry souvisí nejvíce s věkem uživatele, ale, jak už jsme uvedli, i se zdravotním stavem zraku a psychickým stavem člověka. S rostoucím věkem dochází ke snížení

propustnosti očních médií a ke zmenšení velikosti průměru zornice, proto na povrch sítnice dopadá méně světla, a tím pádem starší osoby potřebují vyšší hladiny osvětlení než mladší lidé, jak lze vidět na obrázku 17. [1, 29, 35]



Obrázek 17: Pokles osvětlenosti sítnice v závislosti na věku pozorovatele [1]

Základními parametry vymezující světelné prostředí jsou rozložení jasu, osvětlení prostoru, směrovost světla, variabilita světla, kolorimetrické vlastnosti světla, zábrana oslnění a míhání světla. Kolorimetrické vlastnosti (teplota chromatičnosti a index podání barev) jsou popsány v podkapitole Základní parametry světelných zdrojů. [1, 29, 35]

Rozložení jasu

Jas a jeho rozložení v zorném poli uživatele ovlivňuje viditelnost zrakového vjemu v daném prostoru, je tedy rozhodující pro zrakovou pohodu a zrakový výkon. Míra jasu v daném místě zrakového úkolu přímo souvisí s adaptační úrovní zraku, která působí na vizuální funkce oka, jako je zraková ostrost, kontrastní citlivost, akomodace, konvergence, zmenšení průměru zornice, oční pohyby atd. Pokud je rozložení jasu vyvážené a správně zvolené, dochází ke zlepšení zraku, při nerovnoměrném prostorovém rozložení jasu se musí oko ustavičně adaptovat na rozdílné jasové podmínky. Příliš velké jasy mohou

způsobit oslnění, největší kontrasty jasů mohou zapříčinit únavu a příliš malé jasy a kontrasty jasů směřují k monotónnímu prostředí a tím dochází ke zhoršení zrakového výkonu a zrakové pohody.

Potřeby na rozložení jasů se rozlišují podle typu prostoru. Tam, kde je zrakový úkol prováděný delší časovou dobou, je třeba zajistit dostatečnou úroveň jasů a jeho vhodné rozložení. [1, 29, 35]

Osvětlení

Úroveň osvětlení je v praxi charakterizována hodnotami osvětlenosti, které udávají minimální úroveň osvětlení místa zrakového výkonu pro normální zrak, tak aby mohl být zrakový úkol vykonáván s příslušnou zrakovou pohodou, celkovou pohodou, zrakovou ergonomií, praktickými zkušenostmi, provozní bezpečností a hospodárností. Osvětlení a jeho rovnoměrné rozložení přímo souvisí s tím, jak rychle, bezpečně a pohodlně člověk vykonává zrakový úkol.

Doporučená řada osvětlenosti v luxech podle české a evropské normy ČSN EN 12665 tvoří tyto hodnoty osvětlení: 20 – 30 – 50 – 75 – 100 – 150 – 200 – 300 – 500 – 750 – 1 000 – 1 500 – 2 000 – 3 000 – 5 000 [36]. Jako nejnižší hodnota osvětlení byla uznána hodnota 20 lx, jelikož průměrný jedinec je schopen rozeznat rysy lidského obličeje v běžných podmínkách při jasů asi $1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$, tato hodnota je považována za minimální (mezní) hladinu osvětlení v mimopracovních prostorech, a tudíž jako nejnižší pro řadu osvětlenosti. Při jasech od 10 do $20 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$, což v běžných podmínkách přibližně odpovídá osvětlenosti 100 lx, lze obličej rozlišit bez námahy. V prostorech s trvalým pobytem osob bez ohledu na požadavky vyplývající z určitého zrakového úkolu, hladina osvětlení nesmí být menší než 200 lx. Habel [1] udává, že za uspokojivé osvětlení vnitřních pracovních prostorů považuje rozmezí osvětleností od 1 000 do 2 000 lx. Požadované minimální průměrné množství světla v místě zrakového úkolu je popsáno tzv. udržovanou osvětleností \bar{E}_m , měřenou v luxech, pod kterou nesmí skutečná hodnota osvětlení klesnout, bez ohledu na stáří a stav osvětlovací soustavy. Požadované hladiny osvětlení pro dané pracovní činnosti jsou uvedeny v tabulce 8.

Četné změny osvětlení v okolí místa zrakového úkolu mohou zapříčinit snížení zrakové pohody a zvýšení námahy zrakového orgánu. Proto jsou definované dvě prostorové zóny v okolí zrakového úkolu, a to osvětlení pozadí úkolu v pracovních

prostorech, které má šířku nejméně tři metry a obklopuje bezprostřední okolí pracovního úkolu. Je třeba, aby udržovaná hodnota osvětlenosti v pozadí úkolu byla rovna nebo větší než 1/3 osvětlení bezprostředního okolí zrakového úkolu. Pás o šířce minimálně půl metru v blízkosti místa zrakového úkolu, který se nachází v zorném poli uživatele se nazývá bezprostřední okolí úkolu. Jeho osvětlení může být menší než osvětlenost plochy zrakového úkolu, musí poskytnout přiměřený adaptační jas a vytvářet vyvážené rozložení jasů v zorném poli, ale nesmí být menší než hodnoty osvětlení, které jsou uvedeny v normě ČSN EN 12464-1. Rovnoměrnost osvětlení místa zrakového úkolu U_0 je definována jako poměr minimální a průměrné hodnoty osvětlenosti. U bezprostředního okolí zrakového úkolu musí být $U_0 \geq 0,4$ a u pozadí zrakového úkolu $U_0 \geq 0,1$. [1, 29, 35]

Tabulka 8: Doporučené rozsahy osvětlení podle CIE [29]

Osvětlení (lx)	Prostor, místo, druh činnosti
20 – 30 – 50	Základní jednoduchá zraková orientace v prostředí
50 – 75 – 100	Jednoduchá orientace, kratší doba jednoduché činnosti
100 – 150 – 200	Prostory, které nejsou dlouhodobě užívány pro pracovní účely, prostory obytné a společenské
200 – 300 – 500	Zraková místa pro jednodušší, běžné pracovní úkoly (kanceláře, školy)
500 – 750 – 1 000	Zraková místa pro vizuálně náročnější déletrvající pracovní úkony
1 000 – 1 500 – 2000	Zvláště náročné zrakové úkoly
2 000 – a více	Velmi náročné zrakové úkoly

Oslnění

K oslnění oka dochází, pokud je sítnice nebo její část ozářena jasnějším, než kterému je uzpůsobena, tím pádem dochází k překročení adaptační schopnosti lidského zraku. Je to nepříznivý stav zraku, který může ovlivnit požadovanou úroveň zrakového výkonu a zrakové pohody. Rozlišujeme oslnění rušivé a omezující, které musí být redukováno, aby se předešlo chybám, únavě, zdravotním a psychickým potížím a nehodám. Omezující oslnění zhoršuje viditelnost předmětů, ale nemusí zapříčinit zrakovou nepohodu, zatímco u rušivého oslnění tomu je dočista naopak. Oslnění může být

způsobeno osvětlenými povrchy, částmi svítidel, světelnými zdroji, okny nebo odrazem světla těchto zdrojů od lesklých nebo polomatných ploch a předmětů ve vnitřním prostoru, proto musí být zajištěna v interiéru naprostá eliminace omezujícího oslnění a kontrola míry rušivého oslnění. Oslnění lze omezit například snížením jasů zdroje cloněním, zvýšením jasů pozadí, speciálními optickými systémy, nepřímým osvětlením, změnou polohy zdroje, antireflexní úpravou povrchů, polarizací světla a jinými způsoby.

Pro hodnocení rušivého oslnění se používá normalizovaná metoda doporučená komisí CIE (jednotný systém hodnocení oslnění *UGR*), podle kterého lze určit hodnoty indexu oslnění. Ty se zjišťují v místě pracovního úkolu při běžných směrech pohledu.

Za znepokojující se považuje i mihání světla a stroboskopické jevy, které mohou vyvolat astenopické potíže a nepříznivé fyziologické projevy (například bolesti hlavy, nauzeu a další). [1, 29, 35]

Parametry a požadavky na osvětlení v očních vyšetřovnách a očních optikách

Oční vyšetřovny spadají do kategorie osvětlování zdravotnických zařízení, kde se klade velký důraz na vytvoření příznivých světelných podmínek pro oko. Prostor vyšetřovny musí být rovnoměrně osvětlený, aby nedocházelo ke kolísavému přizpůsobování oka různým hladinám osvětlení při měření zraku, nevznikaly odrazy od okolního prostředí a nedocházelo k oslnování vyšetřovaného. Tabulka 9 uvádí hodnoty udržované osvětlenosti \bar{E}_m na srovnávací rovině pro prostor, úkol nebo činnost uvedené ve sloupci jedna, maximální mezní hodnoty indexu oslnění podle UGR_L , minimální rovnoměrnost osvětlení U_0 na srovnávací rovině pro udržované osvětlenosti uvedené ve sloupci dva, minimální indexy podání barev R_a pro situace uvedené ve sloupci jedna a specifické požadavky pro situace uvedené ve sloupci jedna, charakterizují náhradní teplotu chromatičnosti T_{CP} pro celkové osvětlení v očních vyšetřovnách. V oční vyšetřovně použijeme teplé bílé zdroje světla. Při vyšetřování barvocitu je nutno zachovat přirozené podání barev, proto se používají světelné zdroje s indexem podání barev ($R_a \geq 90$). Obchodní prostory, do kterých se zařazuje prodejna oční optiky, by měly mít osvětlení o velikosti 300 lx a prostor nad pultem 500 lx. [1, 29, 35]

Tabulka 9: Přehled požadavků na osvětlení očních vyšetřoven [35]

Druh prostoru, úkolu nebo činnosti	\overline{E}_m (lx)	UGR_L (-)	U_O (-)	R_a (-)	Specifické požadavky
Celkové osvětlení	500	19	0,6	90	$4\ 000\ K \leq T_{CP} \leq 5\ 000\ K$
Vyšetřování vnějšího oka	1 000	-	-	90	
Testy čtení a barvocitu na testovacích tabulkách	500	16	0,7	90	

4.2 Měření osvětlení ve vnitřních prostorech

Měřením fotometrických veličin, kam řadíme i měření osvětlení, lze zjišťovat a ověřovat parametry nových světelných zdrojů a svítidel, kvalitu osvětlovacích soustav při uvedení do běžného provozu, ale i změny světelně technických veličin v průběhu provozu (při kontrole provozních parametrů světelných zdrojů). Měření světelně technických veličin se dělí podle požadavků na přesnost měření (viz tabulka 10) a podle účelu měření na přesná, jenž se používají při tvorbě etalonů, při kalibracích, pro výzkumné práce a při posuzování náročných osvětlovacích soustav, provozním měřením se obvykle ověřují a porovnávají parametry světelných zdrojů, svítidel a osvětlovacích soustav a orientační je určené pro kontrolu základních funkcí zařízení a ověřování zrakové pohody. [1, 29, 35, 37]

Tabulka 10: Požadavky na přesnost měření světelně-technických veličin [37]

Měření	Odhad rozšířené nejistoty výsledků měření (%)
Přesná	$U \leq 8$
Provozní	$8 < U \leq 14$
Orientační	$14 < U \leq 20$

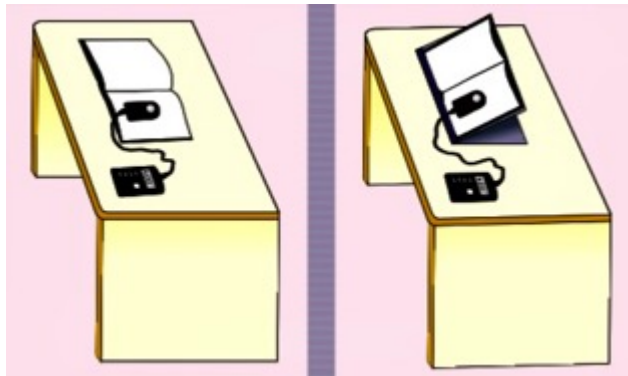
4.2.1 Luxmetry

Luxmetry jsou objektivními přístroji, které se uplatňují k měření osvětlení (rovinného, kulového, válcového, polokulového, poloválcového atd.), pokud není napsáno jinak, je na mysli luxmetr pro měření rovinného osvětlení. Obecně jsou luxmetry sestaveny z přijímače s fotoelektrickým článkem, který je vybaven kosinovým nástavcem (fotonka musí být korigována na směrovou odchylku) a filtrem pro přizpůsobení spektrální citlivosti. Dále se skládá z měřicí a vyhodnocovací soustavy s digitálním či analogovým ukazatelem. Norma [37] doporučuje, aby průměr přijímací plochy čidla luxmetru nebyl větší než 60 mm, nejlépe by neměl překročit ani rozměr 30 mm. Před měřením je třeba přístroj zapnout a nechat čidlo odkryté po dobu asi pět až patnáct minut v měřeném prostředí, z důvodu přizpůsobení a stabilizace fotoelektrického článku příslušným podmínkám.

Luxmetry se třídí do čtyř tříd přesnosti, podle úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví se označují číslicemi 1, 2, 3 a 4 a podle Mezinárodní komise pro osvětlování se označují písmeny L, A, B a C, těmito třídám přesnosti odpovídají celkové přípustné chyby luxmetrů 2, 5, 10 a 20 %. Luxmetry klasifikované třídou přesnosti 1 a 2 se používají pro přesné laboratorní a výzkumné účely. Pro ověření správnosti navržených a realizovaných podmínek osvětlení a zrakové pohody postačují přístroje s třídou přesnosti 3 a pro ověření základních podmínek zrakové pohody lze použít luxmetry s třídou 4. Luxmetry se musí pravidelně ověřovat podle pokynů od výrobce, maximální lhůty pro kalibraci jsou dva roky u přístrojů pro přesné měření, tři roky u přístrojů pro provozní měření a pět let u přístrojů pro orientační měření. Kalibrace provádí pověřené pracoviště.

Měření osvětlení je ovlivňováno mnoha faktory, především vlastnostmi světelných zdrojů, například změnou světelného toku zdrojů v závislosti na změnách napájecího napětí, na teplotě okolí, na době jejich provozu, na znečištění činných ploch svítidel a osvětlovaného prostoru. Je nutné dodržovat tyto zásadní pokyny: nové světelné zdroje musí být před zahájením měření v provozu minimálně sto hodin (u žárovek je to alespoň celkem deset hodin), před každým měřením musí být světelný tok zdrojů ustálen (jednotlivé světelné zdroje mají jinou dobu stabilizace), je třeba uvést teplotu vzduchu v okolí světelného zdroje, a pokud jsou tyto údaje k dispozici musí se při měření kontrolovat i napětí. Umělé osvětlení se ve vnitřních prostorech měří ve vhodně zvolených kontrolních bodech při zatemněných oknech či po setmění, kdy je potřebné eliminovat

působení denního světla. V interiérech se osvětlení a její rozložení měří v pravidelně čtvercové síti po celé srovnávací rovině v celé místnosti nebo na pracovních místech v místě zrakového úkolu a v blízkém okolí místa zrakového úkolu, avšak rozteč se bere menší. Srovnávací rovina může mít mnoho variant - vodorovná, svislá, nakloněná. [1, 29, 35, 37]



Obrázek 18: Umístění světelného senzoru luxmetru na pracovní rovině [38]

5 Praktická část

V rámci experimentální části práce byly zkoumány vlivy určitých parametrů při pozorování osvětlené čtecí tabulky do blízka na zřakovou ostrost (minimum legibile) probanda při různém stupni intenzity osvětlení LED světelných zdrojů a dále na stanovení přídávku do blízka (adice). Tato problematika byla dosud sledována minimálně na rozdíl od pohledu do dálky.

Problematicke závislosti subjektivní refrakce a vízu při pohledu do dálky na dvou různých úrovních osvětlení místnosti pomocí tří různých optotypů se věnoval Ai-Hong Chen ve studii [39]. Výzkum byl prováděn na Malajské univerzitě katedry optometrie Fakulty zdravotnických věd a zúčastnilo se ho 30 figurantů. Z něj vyplývá, že dvě různé úrovně osvětlení místností, při zapnutém a vypnutém osvětlení místnosti, neměly statisticky významný vliv na subjektivní refrakci figuranta. Ani různé typy optotypů (Snellenův, nástěnný a projekční optotyp), které byly použity jako fixační předmět, neměly vliv na subjektivní měření probanda. Bylo zjištěno, že subjektivní refrakce není ovlivněna intenzitou osvětlení, ani použitými testovými značkami. Další experiment [40] byl proveden roku 2013 na Illinoiské vysoké škole oboru Optometrie, kterého se zúčastnilo 71 jedinců. Autorkou je Elyse Chaglasian a výsledkem je, že nebyl zjištěn žádný statisticky významný vliv na refrakci mezi dvěma intenzitami osvětlení místnosti.

Konkrétním cílem mé studie bylo ověřit, jestli se změni vidění do blízka s adicí stanovenou za laboratorních světelných podmínek odpovídajících kvalitnímu osvětlení (638 lx, norma uvádí 500 lx) při změně teploty barvy světla a při změně osvětlení. Předpokladem bylo, že zřaková ostrost do blízka by měla být horší při nižší intenzitě osvětlení daného čteného textu. Dalším cílem tedy bylo zjistit případnou změnu adice, se kterou by bylo za nižších úrovní osvětlení opět dosaženo kvalitního vidění.

5.1 Metodika

Realizace výzkumu probíhala od května 2017 do prosince 2017 v laboratoři na katedře optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci.

V této podkapitole jsou podrobně popsány jednotlivé části experimentu, a to testované osoby, použité testy, nástroje a vyšetřovací metody.

5.1.1 Vyšetřované osoby

Do experimentu se zapojilo 30 presbyopů, z toho 14 žen a 16 mužů. Průměrný věk celé skupiny byl 58 let se směrodatnou odchylkou 5 let. Všichni zúčastnění byli starší 45ti let, bez očních abnormalit a bez umělé nitrooční čočky v oku. Účastníci měli nasazenou korekci do blízka ve zkušební obrubě spolu s korekcí do dálky, žádný figurant neměl multifokální korekci v kontaktních čočkách. Délka trvání samotného výzkumu byla asi 45 minut a nijak výrazně figuranta nezatěžovala, takže byl schopen po jeho skončení ihned pokračovat v jakékoli činnosti. Měření s každým figurantem proběhlo pouze jednou. Všichni probandi byli před samotným experimentem seznámeni s metodikou a požadavky výzkumu jak ústně, tak i písemně. Účast všech figurantů byla dobrovolná, což potvrdili podepsáním informovaného souhlasu.

5.1.2 Použité testy a pomůcky

Vyšetřovací stanoviště, jak je ukázáno na obrázku 19, bylo vytvořeno z místa pro figuranta (stolek, židle, opěrka brady a čela), tabulkou na čtení a lampou s LED diodami, které byly upevněny na stolec tak, aby osvětlovala rovnoměrně celou plochu čtecí tabulky. Vyšetřovací vzdálenost čtecí tabulky byla 40 cm, která byla pevně stanovena a dodržována fixující opěrkou hlavy, úhel pohledu nelze přesně stanovit, jelikož se liší u každého jedince v závislosti na anatomii hlavy. Pro zachování konstantních podmínek osvětlenosti v místnosti pro všechna měření byla v laboratoři zatemněna veškerá okna a zhasnuta světla s výjimkou testovaných LED světelných zdrojů, čímž se zachovala intenzita osvětlení měřená přímo na testované čtecí tabulce do blízka.

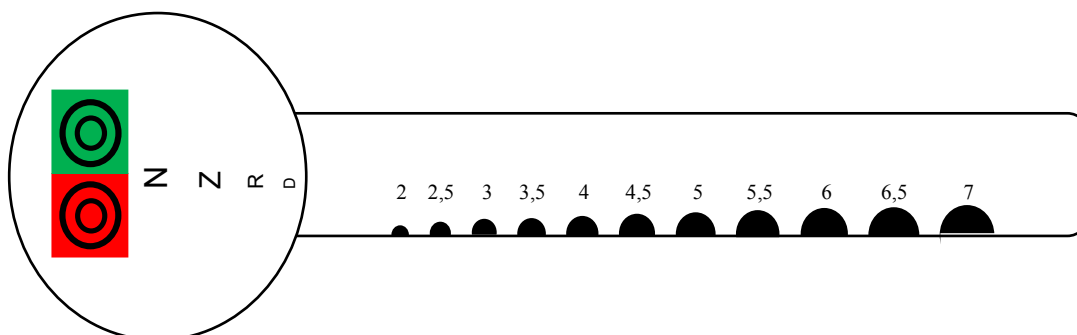


Obrázek 19: Vyšetřovací stanoviště

Pravítko k měření průměru zornice

Původně bylo uvažováno korelovat získaná data s velikostí zornice při daných úrovních osvětlení. Proto bylo součástí metodiky a protokolu též toto měření. Pro finální vyhodnocení však nebylo z důvodu nemožnosti změřit přesně zornici za nízkých úrovní osvětlení využito. Metodika měření zornice je uvedena pouze pro úplnost postupu. K měření velikosti průměru zornice byla použita plastová lišta se sloupcem černých pultěrčků, jejichž velikost byla odstupňována po 0,5 mm v rozsahu od 2 mm do 7 mm (viz obrázek 20). Měřicí zařízení je obdobou Haabova pupilometru. Fotoreakce byla u figurantů vždy měřena do blízka a do dálky. Do blízka měření probíhalo na pracovní vzdálenost 40 cm, aby oči konvergovaly na danou distanci. Figurant sledoval osvětlený první řádek čtecí tabulky od shora, abych lépe viděla do očí. Po předložení pravítka jsem srovnala velikost pupily s velikostí kotouče a hodnotu zaznamenala do protokolu. Velikost pupily do blízka byla měřena vždy při maximální hodnotě osvětlení přídavné lampy, při nižším osvětlení nebyla velikost zaznamenána z důvodu nízkého osvětlení přilehlých částí oka. Proto velikost zornice nebyla do statistických výsledků zaznamenávána. Pro přesnější měření by musel být použit elektronický pupilometr či pupilograf. Do dálky měření probíhalo na vyšetřovací vzdálenost 6 m při maximální intenzitě osvětlení stropních

svítidel v laboratoři. Proband se díval uvolněně na protější zeď, jako by se chtěl podívat skrz stěnu. Opět po předložení lišty jsem zapsala hodnotu průměru zornice do dálky. Hodnoty velikosti zornice jsou udávány v milimetrech. Pohlaví a barva duhovky nejsou faktory této studie, proto též nebyly zohledněny ve výsledcích. [41]



Obrázek 20: Pravítko na měření průměru zornice

Čtecí tabulka

Byla použita čtecí tabulka (více v kapitole Akomodace a presbyopie) vytvořená na katedře optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci v rámci projektu Inovace výuky optiky se zaměřením na získání experimentálních dovedností s registračním číslem CZ.1.07/2.2.00/28.0157, na jejíž realizaci spolupracoval tým pracovníků oboru Optometrie (viz obrázek 21) [42].

Čtecí tabulka je zhotovena v tištěné formě na bílém papíře. Odstavce jsou seřazeny od největšího po nejmenší a označeny klasickým decimálním zápisem zrakové ostrosti do blízka (0,20 – 1,00), které udávají přibližnou hodnotu vízu do blízka na pracovní vzdálenost 40 cm. Autor zvolil typ písma Arial a velikost fontu písma pro zrakovou ostrost 0,20 je 14 bodů a pro 1,00 je 3,98 bodů.



Obrázek 21: Čtecí tabulka do blízka [42]

Světelné diody

LED světelné zdroje byly zakoupeny od firmy Osram pod obchodním názvem LED Superstar Classic A60 Advanced. Světla byla vybrána s možností stmívání, aby se dala nastavit požadovaná úroveň osvětlení. Mají tvar klasické baňky. Jako výhody produktu jsou udávány nízká spotřeba energie, okamžitě 100 % světla, bez náběhu, dobrá kvalita světla, konstantní barevnost a světelné zdroje bez obsahu rtuti. Řadí se do třídy energetické účinnosti A⁺ (více informací v podkapitole Základní parametry světelných zdrojů).

Tabulka 11: Technické údaje výroby LED Superstar Classic A60 Advanced dané výrobcem* [43]

Příkon	10 W
Světelný tok	806 lm
Termodynamická teplota	2 700 K = teplá bílá 4 000 K = studená bílá
Index podání barev	≥ 80
Napětí	220 – 240 V / 50 – 60 Hz

* Výrobce udává, že veškeré technické parametry se vztahují na celý světelný zdroj. Vzhledem ke složitému postupu při výrobě světelných diod jsou typické hodnoty uvedené v souvislosti s technickými parametry LED pouze statistickými hodnotami, které nemusí nezbytně odpovídat skutečným technickým parametrům jednotlivých výrobků, jednotlivé výrobky mohou vykazovat odchylky vůči typickým hodnotám [43].

Světelné zdroje jsem vždy před měřením nechala zahřát, aby se jejich světelný tok ustálil, stanovila jsem si dobu stabilizace čtyřicet minut. Zkontrolovala i znečištění svítidla, kdy veškerá manipulace se světelnými zdroji probíhala pomocí ochranných pomůcek. Pro měření jsem zvolila tři hladiny osvětlení LED světelných zdrojů. Při maximálním stupni osvětlení se zkratkou MAX světelné zdroje vykazovaly hodnotu 2 300 lx, tato hodnota se během měření snižovala, což bylo dáno nestabilitou světelného zdroje. Rozsah při maximální úrovni osvětlení u teplého bílého světla byl od 1 625 lx do 2 300 lx, průměrná hodnota byla 1 946 lx se směrodatnou odchylkou 136 lx. Rozsah při maximální úrovni osvětlení u studeného bílého světla byl od 1 672 lx do 2 300 lx, průměrná hodnota byla 1 959 lx se směrodatnou odchylkou 138 lx. Střední a nízký stupeň osvětlení byl nastaven pomocí adaptéru do zásuvky s nastavitelným rotačním stmívačem, který umožňuje individuální nastavení osvětlení standartních svítidel na požadovanou úroveň. Provozní napětí 230 V / 50 Hz, připojená zátěž 40 – 300 W. Při středním stupni osvětlení se zkratkou MED byla adaptérem nastavena hodnota co nejbližší úrovni 500 lx, při minimálním stupni osvětlení se zkratkou MIN pak 50 lx. Výsledné průměrné hodnoty použitých osvětlení, směrodatné odchylky a rozsah uvádí tabulka 12 a tabulka 13.

Tabulka 12: Hodnoty osvětlení pro teplé bílé světlo

	MAX (lx)	MED (lx)	MIN (lx)
Minimální hodnota	1 625	495	48
Maximální hodnota	2 300	510	53
Průměrná hodnota	1 946	502	51
Směrodatná odchylka	136	3	1

Tabulka 13: Hodnoty osvětlení pro studené bílé světlo

	MAX (lx)	MED (lx)	MIN (lx)
Minimální hodnota	1 672	497	50
Maximální hodnota	2 300	508	53
Průměrná hodnota	1 959	501	51
Směrodatná odchylka	138	2	1

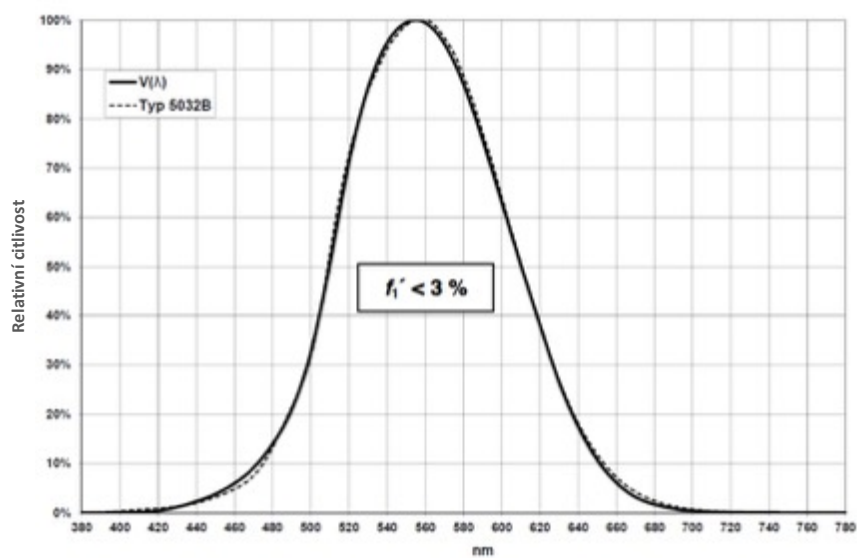
Luxmetr

Intenzita osvětlení byla měřena pomocí digitálního luxmetru od německé firmy Gossen s názvem MAVOLUX 5032 B USB (více obecných informací lze najít v podkapitole Luxmetry). Osvětlení se měřilo na nakloněné pracovní ploše, jak je ukázáno na obrázku 18, kde byla umístěna čtecí tabulka do blízka, v oblasti řádku s vížem jedna. Přístroj se skládá z kruhového přijímače s křemíkovým fotoelektrickým článkem a z vlastního systému opatřeného displejem, tlačítky a USB portem, jak lze vidět na obrázku 22. Tento luxmetr je řazen do třídy přesnosti B (podle mezinárodního doporučení CIE), která odpovídá celkové přípustné chybě luxmetrů 10 %, a proto vyhovuje pro běžná provozní měření osvětlenosti. Umožňuje přesné měření osvětlení v jednotkách se zkratkou (lx) nebo (fc) s vysokou počáteční citlivostí a rozlišením 0,01 lx nebo 0,001 fc až po velké hodnoty osvětlení 199 000 lx nebo 19 990 fc v pěti rozsazích, při měření experimentu byly hodnoty osvětlení zapisovány v luxech. Dále je přístroj vybaven pamětí měřených hodnot se sty datovými prostory, které lze číst a zpracovávat přímo pomocí tlačítek a displeje, ale také prostřednictvím integrovaného USB konektoru a standardního softwaru dodaného s přístrojem. Výhodou je podsvícení displeje, které umožňuje čtení v tmavém prostředí. [44]



Obrázek 22: Luxmetr MAVOLUX 5032 B USB [44]

Relativní spektrální odezva světelného senzoru byla přizpůsobena lidskému oku $V(\lambda)$ s minimální přípustnou chybou 3 %, jak je znázorněno na obrázku 23 [44].



Obrázek 23: Spektrální citlivost světelného senzoru [44]

Jasoměr

Pro dané hodnoty hladin intenzit osvětlení byla pomocí jasoměru zjištěna průměrná hodnota jasu měřené plochy ze vzdálenosti 50 cm od měřeného povrchu. Cílem měření bylo zjistit, zda příslušné osvětlení odpovídá fotopickým jasovým podmínkám. Měřená plocha se pozoruje v okuláru a měřená oblast je v zorném poli vyznačena kroužkem, podle velikosti clony určující zorný úhel přístroje, v našem případě byla velikost clony 1°. Jas pozorovaného předmětu byl měřen při výšce jasoměru 110 cm (výška sedící osoby při měření) a při různých úrovních osvětlení (maximální, střední a minimální). Průměrné hodnoty jasu jsou uvedené v následující tabulce 14.

Tabulka 14: Průměrné hodnoty jasu pro jednotlivé úrovně osvětlení

Úroveň osvětlení (lx)	Průměrné hodnoty jasu ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	
	Teplé bílé světlo	Studené bílé světlo
MAX	483	473
MED	123	120
MIN	13	12

5.1.3 Vyšetřovací postup

Refrakční vada figuranta do dálky a stanovení výchozí hodnoty adice byly před samotným výzkumem zkontrolovány, popřípadě změřeny. Přídavek do blízka se vždy měřil binokulárně na vzdálenost 40 cm, proto se hodnota refrakční vady do blízka kontrolovala, jelikož každý figurant mohl mít své brýle do blízka měřeny na jinou pracovní vzdálenost, a hodnota adice byla vždy pro obě oči identická (viz kapitola Akomodace a presbyopie). Figuranti s jinou hodnotou adice mezi pravým a levým okem byli z experimentu vyřazeni. Astigmatická hodnota do dálky byla ponechána i do blízka o stejné hodnotě cylindru v dané ose. Hodnota adice byla stanovena za laboratorních podmínek při průměrném osvětlení 638 lx, které dobře koresponduje s požadavkem české

a evropské technické normy ČSN EN 12464-1 Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – část 1: Vnitřní pracovní prostory, jejíž hodnota odpovídá minimální průměrné hodnotě udržované osvětlenosti v místě zrakového úkolu při práci do blízka a která činí 500 luxů.

Figurant byl usazen na židli ke stolku s opěrkou hlavy, kde měl opřené čelo a bradu. Měření zrakové ostrosti do blízka při různých intenzitách osvětlení probíhalo v nacentrované zkušební obrubě s naměřenou korekcí do blízka. Text byl osvětlován dvěma druhy LED světelných diod, které tvořily teplé a studené bílé světlo. Figurant při měření udával číslo řádku na čtecí tabulce, které přečetl pohodlně, nesměl přivírat oči ani zaostřovat vůli na text.

V první sérii byly postupně promítány jednotlivé stupně osvětlení LED světelných zdrojů, začínalo se na maximální hodnotě (plný výkon světelných diod se během měření snižoval kvůli nestabilitě světelných zdrojů) a končilo se na přibližné hodnotě 50 lx, vždy pro jednu teplotu barvy světla. Následující fáze proběhla při osvětlení druhou teplotou barvy světla. Pořadí zdrojů přitom bylo náhodné. Při minimální úrovni osvětlení LED světelných zdrojů jsem nechala figuranty na daný stupeň osvětlení adaptovat, jelikož tato hodnota se blížila vidění za mezopických podmínek. Adaptace byla individuální, podle požadavků každého figuranta. U jednotlivých hladin osvětlení jsem si vždy zapsala hodnotu zrakové ostrosti do blízka, takže celé experimentální měření se skládalo ze šesti dílčích vyšetření. Pokud proband udával zhoršení zrakové ostrosti, zkoušela jsem, zda navýšení adice pomůže ke zlepšení zrakové ostrosti figuranta při dané hladině osvětlení. Přídavek do blízka se binokulárně zvyšoval do doby, než bylo dosaženo uspokojivé zrakové ostrosti o hodnotě jedna nebo dokud nedošlo k rozmazání textu.

Na závěr jsem se každého figuranta ptala na subjektivní spokojenost při čtení za použití daných světelných zdrojů, tedy při jaké teplotě barvy světla se jim lépe četlo. Probandi mohli odpovídat ze tří možností: teplé bílé světlo, studené bílé světlo nebo obě bílá světla (nevnímali rozdíl mezi teplotou barvy zdroje na čtení textu). Záznam protokolu k experimentálnímu měření je přiložen na konci práce viz příloha 1.

5.1.4 Metodika vyhodnocení dat

Veškerá naměřená data v průběhu experimentu byla zapsána do tabulky a průměrné hodnoty měření spolu se směrodatnými odchylkami byly zpracovány pomocí programu

Microsoft Excel 2017. Zraková ostrost do blízka a adice stanovená jednotlivými stupni intenzit LED světelných zdrojů byla porovnáována metodou ANOVA s opakovaným měřením pomocí software Statistica 12 na hladině významnosti 5 % (to znamená, že při zamítnutí rovnosti testovaných dat je 5% riziko, že se data skutečně rovnají). V textu jsou též u jednotlivých výsledků uvedeny mezní hodnoty hladin významnosti p , při kterých by právě došlo k zamítnutí testované rovnosti.

5.2 Výsledky experimentu

Pro přehlednost jsou výsledky rozděleny do dvou podkapitol. V první jsou prezentovány výsledky, kde byly sledovány změny zrakové ostrosti presbyopa při třech úrovních osvětlení pro oba LED světelné zdroje. Byla uvažována zraková ostrost jak s původní adicí, měřenou za laboratorních podmínek, tak s adicí optimalizovanou pro dané osvětlení. V druhé podkapitole jsou představeny výsledky změny původní adice při testování třech hladin osvětlení LED světelných zdrojů, kdy jsme docílili nejlepší možné zrakové ostrosti s optimální adicí.

5.2.1 Vliv osvětlení na zrakovou ostrost do blízka

Změny ve zrakové ostrosti do blízka pro teplé a studené bílé světlo bylo hodnoceno s původní adicí a doplněno o výsledky zrakové ostrosti s optimální adicí do blízka, vždy pro tři úrovně osvětlení. Průměrné hodnoty zrakové ostrosti jsou zapsány v tabulce 15 a tabulce 16.

V obrázku 24 jsou zobrazeny průměrné hodnoty zrakové ostrosti naměřené do blízka s původní adicí a průměrné hodnoty zrakové ostrosti s optimální adicí do blízka, které jsou vždy rozděleny pro teplé a studené bílé světlo. U maximální úrovně osvětlení nedocházelo ke změně zrakové ostrosti, jen u studeného bílého světla došlo k jednomu případu, kdy figurant viděl s původně stanovenou adicí horší vízus (0,8). K poklesu zrakové ostrosti do blízka docházelo u střední úrovně osvětlení LED světelných zdrojů, kdy zraková ostrost v průměru se zhoršila o hodnotu 0,08. K výraznějšímu poklesu zrakové ostrosti do blízka nastávalo u minimální úrovně osvětlení, kdy zraková ostrost v průměru se blížila vízu 0,8 (o jeden řádek horší vízus). Z obrázku 24, lze též názorně

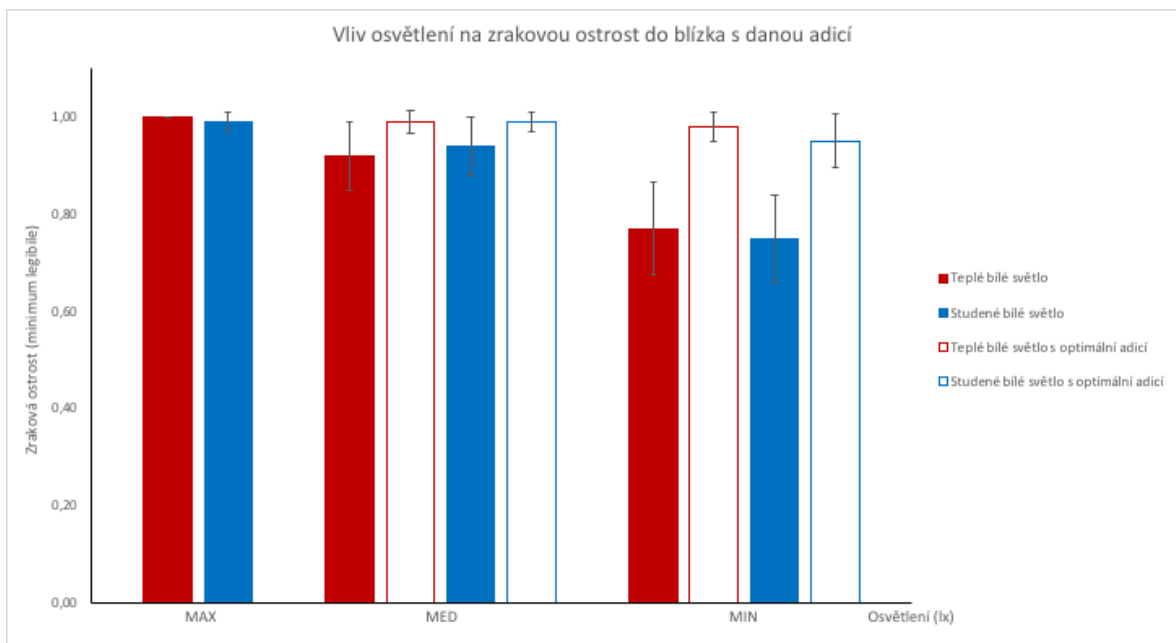
vidět, že hodnoty zrakové ostrosti do blízka s optimální adicí jak u středního osvětlení, tak i u minimálního osvětlení dosahují nejlepší možné zrakové ostrosti jedna.

Tabulka 15: Průměrné hodnoty zrakové ostrosti s původní adicí (v minimum legibile) od všech subjektů a příslušné směrodatné odchylky

Úroveň osvětlení (lx)	Průměrné hodnoty zrakové ostrosti do blízka		Směrodatné odchylky zrakové ostrosti do blízka	
	Teplé bílé světlo	Studené bílé světlo	Teplé bílé světlo	Studené bílé světlo
MAX	1,00	0,99	0,00	0,04
MED	0,92	0,94	0,14	0,12
MIN	0,77	0,75	0,19	0,18

Tabulka 16: Průměrné hodnoty zrakové ostrosti do blízka s optimální adicí (v minimum legibile) od všech subjektů a příslušné směrodatné odchylky

Úroveň osvětlení (lx)	Průměrné hodnoty zrakové ostrosti do blízka s optimální adicí		Směrodatné odchylky zrakové ostrosti do blízka s optimální adicí	
	Teplé bílé světlo	Studené bílé světlo	Teplé bílé světlo	Studené bílé světlo
MAX	-	-	-	-
MED	0,99	0,99	0,05	0,04
MIN	0,98	0,95	0,06	0,11



Obrázek 24: Graf závislost zrakové ostrosti do blízka na jednotlivých úrovních osvětlení LED světelných zdrojů s původní adicí a s optimalizovanou adicí

Analýza ANOVA potvrdila statisticky významný vliv úrovně osvětlení na zrakovou ostrost do blízka ($p < 10^{-10}$). Vliv teploty barvy světla a jeho interakce s úrovní osvětlení byly statisticky nevýznamné ($p = 0,79, p = 0,25$). Tukeyho HSD post-hoc testem bylo prokázáno, že rozdíl v hodnotách zrakové ostrosti byl mezi všemi hladinami osvětlení ($p = 0,028$ mezi maximálním a středním osvětlením a vždy $p = 0,00012$ mezi minimálním a každým z dalších hladin osvětlení).

Srovnání hodnot zrakové ostrosti s původní adicí při maximální hladině osvětlení s hodnotami zrakové ostrosti při nižších úrovních osvětlení s optimální hodnotou adice nevykázalo žádný statisticky významný rozdíl pro světlo teplé bílé barvy ($p = 0,91$ a $p = 0,65$). Pro studené bílé světlo byl zjištěn statisticky významný rozdíl zrakové ostrosti s původní adicí při maximální hodnotě osvětlení a minimální hladině osvětlení s optimální adicí ($p = 0,011$), přičemž za nízkého osvětlení byla zraková ostrost do blízka nižší.

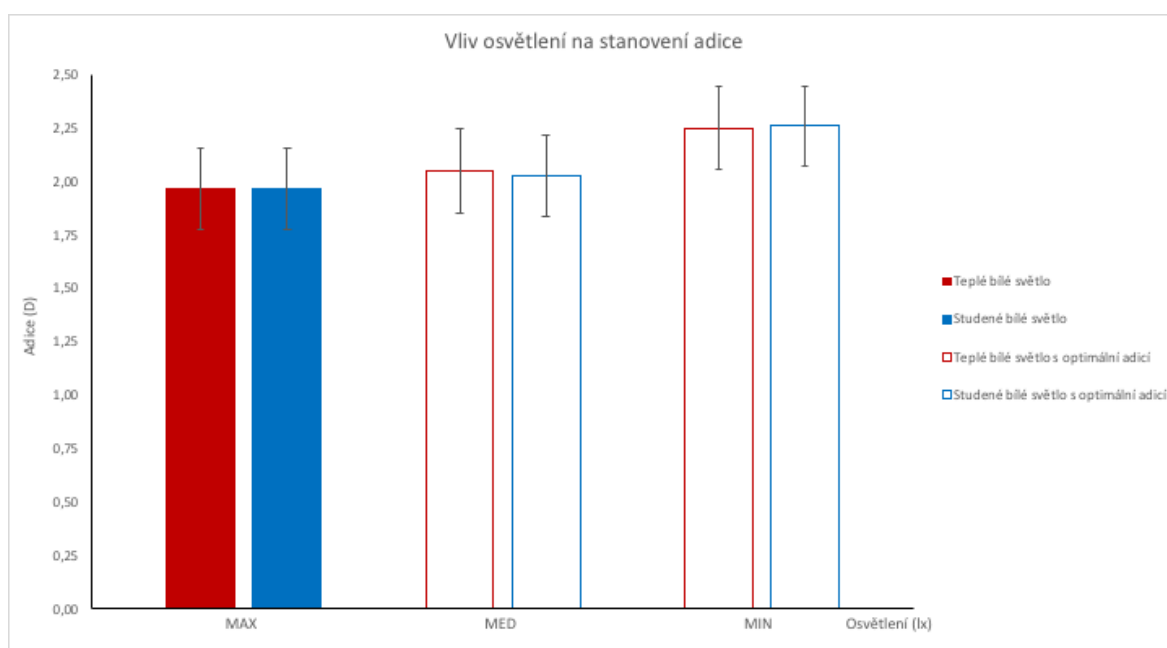
5.2.2 Vliv osvětlení na stanovení adice

Změny původního přídávku do blízka pro teplé a studené bílé světlo bylo posuzováno též pro tři úrovně osvětlení oproti původní hodnotě, stanovené za laboratorních podmínek. Původní adice byla v průměru 1,97 D se směrodatnou odchylkou 0,38 D. Průměrné hodnoty optimální adice jsou zapsány v tabulce 17.

Z obrázku 25 lze vyčíst, že nově stanovená optimalizovaná adice s nižší intenzitou osvětlení LED světelných zdrojů vždy narůstala. U maximální a střední úrovně osvětlení jsou tyto změny adice zanedbatelné. U středního a minimálního stupně osvětlení je změna přibližně o 0,25 D. Tyto výsledky podporuje i statistická analýza níže.

Tabulka 17: Průměrné hodnoty optimální adice (v dioptriích) od všech subjektů s příslušnými směrodatnými odchylkami

Úroveň osvětlení (lx)	Průměrné hodnoty optimální adice do blízka		Směrodatné odchylky s optimální adicí do blízka	
	Teplé bílé světlo	Studené bílé světlo	Teplé bílé světlo	Studené bílé světlo
MAX	-	-	-	-
MED	2,05	2,03	0,40	0,38
MIN	2,25	2,26	0,39	0,37



Obrázek 25: Graf závislost osvětlení na stanovení adice naměřené při jednotlivých úrovních osvětlení LED světelných zdrojů a porovnání s optimální adicí

Vyhodnocení metodou ANOVA ukázalo, že statisticky významný vliv na přídavek do blízka má úroveň osvětlení čteného textu ($p < 10^{-8}$). Vliv teploty barvy použitého světelného zdroje byl statisticky nevýznamný ($p = 0,87$), taktéž interakce teploty barvy světla a úrovně osvětlení byla statisticky nevýznamná ($p = 0,72$). Tukeyův HSD post-hoc test ukázal, že hodnota adice při maximálním a středním osvětlení se statisticky významně neliší ($p = 0,075$), zatímco adice stanovená při nejnižším osvětlení se od obou předchozích úrovní osvětlení statisticky významně liší (vždy $p < 0,00012$).

5.3 Diskuze

Experiment měl stanovit, zda existuje rozdíl ve zrakové ostrosti do blízka při pozorování čtecí tabulky, která je osvětlena různou intenzitou LED světelných zdrojů, a porovnat vliv úpravy adice na zrakovou ostrost do blízka a teplotu barvy světla použitých zdrojů. Dále bylo cílem ověřit původní hodnotu přídavku do blízka pro jednotlivé stupně osvětlení LED světelných zdrojů, zda je postačující pro nejlepší možnou hodnotu zrakové ostrosti do blízka a stanovit (novou) optimalizovanou hodnotu presbyopické korekce.

Vliv osvětlení na zrakovou ostrost do blízka byl zřetelně prokázán, vizek při neměnné adici klesá a hodnota optimální adice s osvětlením roste. Z grafu na obrázku 24

vyplývá, že zraková ostrost s původní adicí se snížila v průměru o 0,08 při středním osvětlení. V průměru se tedy jedná o malou změnu na hranici klinické významnosti. U jednotlivých klientů však došlo i k podstatně většímu posunu. Vízus při nejnižším osvětlení se zhoršil až o hodnotu 0,23, která je klinicky významná. Pokud se při nižší hladině osvětlení použije stanovená optimální hodnota adice pro toto osvětlení, zraková ostrost do blízka se blíží hodnotám při maximální úrovni osvětlení s odpovídající adicí. Při adici stanovené za obvyklých podmínek lze navrhnout dodržení doporučeného osvětlení při práci do blízka. Pokud je nutné pracovat za zhoršených světelných podmínek, výsledek experimentu ukazuje na nutnost úpravy adice.

Při měření zrakové ostrosti do blízka u maximální hladiny osvětlení docházelo ke kolísání osvětlení o 29 %. Vzhledem k tomu, že cíleně navozené změny osvětlení (maximální, střední a minimální) byly několikanásobně větší, lze vliv této variability zanedbat. Při nižší střední a minimální hodnotě bylo osvětlení stabilnější.

Vliv teploty barvy na optimální zrakovou ostrost se ukázal jako statisticky nevýznamný vzhledem ke stanovení optimální adice, při hodnocení zrakové ostrosti vykazalo studené bílé LED světlo signifikantně nižší optimální zrakovou ostrost, příslušný rozdíl oproti teplému bílému světlu (0,03) je však klinicky nevýznamný. Z hlediska subjektivního hodnocení většina figurantů upřednostňovala teplé bílé LED světlo (třináct osob), pouze sedm osob uvedlo jako vhodnější studené bílé světlo a deset osob nemělo vyhraněný názor na teplotu barvy světla. Vzhledem ke zrakové ostrosti tedy není podstatný rozdíl mezi testovanými barvami světla. Na základě vyhodnocení odpovědí na vhodnost jednotlivé teploty barvy světla lze většinově doporučit teplou bílou barvu světelných zdrojů, která je podle normy [35] preferována i při vyšetření zrakové ostrosti do blízka v očních vyšetřovnách. Tato barva je též vhodnější např. večer vzhledem k nižšímu podílu modrého světla.

Rozdíl v průměrných hodnotách adice (původní a optimální) mezi maximálním a středním osvětlením není ani 0,25 D, tento rozdíl je na hranici statistické významnosti ($p = 0,075$), z pohledu dioptrií se jedná o velmi malou změnu. Tomu odpovídá i výše diskutovaná malá změna vízu. Rozdíl průměrné adice mezi středním a minimálním osvětlením je opět přibližně 0,25 D, avšak oproti původní adici se jedná o statisticky i klinicky významnou změnu o 0,50 D. Při provádění vlastního měření bylo též obtížnější

stanovit přesnou adici za nízkého osvětlení. Uvedené výsledky potvrzují již výše zmíněný závěr, že práce do blízka při nízké úrovni osvětlení vyžaduje optimalizovanou (zvýšenou adici). Rozdíl oproti adici stanovené za obvyklých podmínek se v průměru pohybuje od 0,25 D do 0,50 D v závislosti na konkrétní hodnotě osvětlení, přičemž maximální individuální rozdíl byl 0,75 D. Stanovení adice je tedy individuální a záleží na konkrétních požadavcích pacienta včetně požadavku na pracovní osvětlení.

Studie prokázala závislosti zrakové ostrosti i adice do blízka na osvětlení, nikoliv na teplotě barvy. Příčinou tohoto jevu může být jednak pokles citlivosti sítnice při nižších úrovních osvětlení. Další příčinou může být rozšíření zornice a tím zmenšení hloubky ostrosti, popřípadě větší míra výskytu aberací vyšších řádů. Tento efekt však nebylo možné potvrdit, protože se ukázalo jako nemožné proměřit velikost zornice za všech potřebných světlených podmínek.

6 Závěr

Diplomová práce umožňuje porozumět souvislosti mezi viděním do blízka a nezbytným osvětlením, které zajišťuje potřebný zrakový výkon a celkovou zrakovou pohodu. Teoretická část je věnována komplexnímu popisu vnímání světla a mechanismu vytváření zrakových vjemů a počitků. Součástí výkladu je stručný popis optického záření, jelikož světlo je pro člověka prostředkem k přenosu a získání informací o prostředí. Seznamuje se základy anatomie zraku a jeho fyziologií, které vedou k lepšímu pochopení podstaty procesu vidění. V následující podkapitole je charakterizovaná akomodace, která úzce souvisí s presbyopií a vyšetřováním zrakové ostrosti do blízka. Do této části byl zahrnut i přehled fotometrických veličin (světelný tok, svítivost, osvětlenost, jas, světlí) a jejich jednotky, které jsou sjednoceny pod záštitou Mezinárodní komise pro osvětlování CIE. Tyto fyzikální pojmy, veličiny a jednotky se vztahují na takzvaného normálního fotometrického pozorovatele, neboť každý jedinec představuje individuální charakter spektrální citlivosti zraku k různým vlnovým délkám světla. Ve třetí části jsou popsány a rozděleny světelné zdroje, a to především ty, které mohou být nejvíce zastoupeny při osvětlování běžného čteného textu. Líčí jejich základní parametry, konstrukční principy, výhody a nevýhody. V poslední kapitole je rozebrán přístup k osvětlování vnitřních prostorů, především návrh osvětlení při vyšetřování zrakových funkcí, tak aby byly zajištěny dostatečné světelné podmínky pro danou zrakovou činnost.

Praktická část se věnovala porovnání zrakové ostrosti do blízka, kdy byla uvažována zraková ostrost jak s původní adicí, tak s adicí optimalizovanou, při třech úrovních osvětlení LED světelných zdrojů. Byl zkoumán vliv hladiny osvětlení a teploty barvy použitého světla. Bylo zjištěno, že úroveň osvětlení má na zrakovou ostrost do blízka při neměnné adici významný vliv, ale teplota barvy světelných diod byla nevýznamná. Z výsledků vyplývá, že zraková ostrost klesá s klesající úrovní osvětlení čteného textu. Druhým cílem bylo na základě původního přídavku do blízka, stanovit optimální hodnotu adice do blízka při třech hladinách osvětlení LED světelných zdrojů. Obdobně jako u vízu bylo i zde zjištěno, že významný vliv na přídavek do blízka má hladina osvětlení, nikoliv teplota barvy. Ke značné změně (přibližně o 0,50 D) docházelo u nejnižšího použitého stupně osvětlení. Při optimálním přídavku do blízka bylo téměř vždy dosaženo stejných hodnot vízu za všech úrovní osvětlení a při všech testovaných

barvách světla s výjimkou studeného bílého světla, kde byla optimální zraková ostrost statisticky mírně nižší, avšak klinicky byl tento rozdíl zanedbatelný. Při práci do blízka lze tedy vždy doporučit dostatečné osvětlení, optimálně odpovídající příslušné normě nebo vyšší. V případě výrazně nižších jasů se jeví jako vhodné použít optimalizovanou adici. Přitom teplota barvy světelného zdroje je na individuálním posouzení, častěji je preferována teplá bílá barva světla oproti studené bílé.

7 Přílohy

Příloha 1: Protokol k experimentálnímu měření

Číslo figuranta:										
Datum:										
Jméno a příjmení:										
Pohlaví:	Muž			Žena						
Věk:										
Poznámka:										
V sc dálka				Velikost zornice		V sc blízko			Velikost zornice	
OD				mm					mm	
OS				mm					mm	
Optimální brýlová korekce:										
	sph	cyl	ax	V cc dálka		ADD	V cc blízko			
OD			°							
OS			°							
Teplé bílé světlo					ADD	V cc BINO				
MAX		lx		mm						
MED		lx		mm						
MIN		lx		mm						
Poznámka:										
Studené bílé světlo					ADD	V cc BINO				
MAX		lx		mm						
MED		lx		mm						
MIN		lx		mm						
Poznámka:										

8 Seznam literatury

- [1] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [2] POLÁŠEK, Jaroslav. *Technický sborník oční optiky*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1974.
- [3] FUKA, Josef a Bedřich HAVELKA. *Optika a atomová fyzika: fyzikální kompendium pro vysoké školy*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961.
- [4] AUTRATA, Rudolf. *Nauka o zraku*. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 2002. ISBN 80-7013-362-7.
- [5] SYNEK, Svatopluk a Šárka SKORKOVSKÁ. *Fyziologie oka a vidění*. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-3992-2.
- [6] WINN, B., D. WHITAKER, D. B. ELLIOTT a N. J. PHILLIPS. *Factors affecting light-adapted pupil size in normal human subjects* [online]. © Investigative Ophthalmology & Visual Science, 1994, Vol. 3, Iss. 3, pp. 1132-1137, [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: <http://www.iovs.org/content/35/3/1132.full.pdf>
- [7] SAID, F. S. a W. S. SAWIRES. *Age dependence of changes in pupil diameter in the dark*. Optica Acta: International Journal of Theoretical and Applied Optics, London: Taylor & Francis, 1972, Vol. 19, Iss. 5, pp. 359 – 361, [cit. 2018-01-10]. ISSN 0030-3909.
- [8] DUKE-ELDER, Stewart. *System of ophthalmology vol. 4, the physiology of the eye and of vision*. St. Louis: C.V. Mosby Company, 1968. ISBN 85313-626-2.
- [9] ROZSÍVAL, Pavel. *Oční lékařství*. Praha: Galén, 2006. ISBN 80-7262-404-0.
- [10] DOWLING, John E. a Joseph L. DOWLING. *Vision: how it works and what can go wrong*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2016. ISBN 9780262034616.
- [11] ROSENFELD, Mark., Nicola. LOGAN a Keith EDWARDS. *Optometry: science techniques and clinical management*. New York: Butterworth Heinemann Elsevier, 2009. ISBN 978-0-7506-8778-2.
- [12] HART, William M. *Adler's physiology of the eye: clinical application*. St. Louis: Mosby-Year Book, 1992. ISBN 0-8016-2107-0.
- [13] ŠIKL, Radovan. *Zrakové vnímání*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-3029-5.

- [14] BOWMAKER, J. K. a H. J. A. DARTNALL. *Visual pigments of rods and cones in a human retina* [online]. © The journal of physiology, [cit. 2018-01-7]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Photoreceptor_cell.
- [15] ŽÁK, Petr. *Barva světla ve veřejném osvětlení – část 2. Vliv prostředí a adaptačních podmínek na zrakový vjem* [online]. © 2014 – 2018 – FCC Public s. r. o., [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/barva-svetla-ve-verejnem-osvetleni-cast-2-vliv-prostredi-a-adaptacnich-podminek-na-zrakovy-vjem--1239>.
- [16] ROKYTA, Richard. *Fyziologie pro bakalářská studia v medicíně, přírodovědných a tělovýchovných oborech*. Praha: ISV, 2000. ISBN 80-85866-45-5.
- [17] OSTERBERG, After. *Topography of the layer of rods and cones in the human retina* [online]. © Acta Ophthalmologica, 1935. Vol. 6, 1–102, [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: <http://webvision.med.utah.edu/imageswv/Ostergr.jpeg>.
- [18] KITTNAR, Otomar. *Lékařská fyziologie*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3068-4.
- [19] CURCIO, C. A. a K. A. ALLEN. *Topography of ganglion cells in human retina* [online]. © 1999 - 2018 John Wiley & Sons, Inc., [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/f93d/c0b8368ef7dcdac5ea3f0ca8074db7e73a02.pdf>.
- [20] OYSTER, Clyde W. *The human eye: structure and function*. Sunderland, Mass.: Sinauer Associates, 1999. ISBN 0-87893-645-9.
- [21] SCHEIMAN, Mitchell a Bruce WICK. *Clinical management of binocular vision: heterophoric, accommodative, and eye movement disorders*. Philadelphia: Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins, 2008. ISBN 978-0-7817-7784-1.
- [22] PLUHÁČEK, František. *Fyziologická optika – výukové materiály k předmětu Fyziologická optika*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013.
- [23] SEVERA, D., P. VESELÝ a P. BENEŠ. *Stanovení a ověření přídavku na blízko u presbyopie* [online]. © Lékařská fakulta Masarykovy univerzity, Brno 2016, [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/lf/js16/refrakcni_vady/web/pages/10-presbyopie.html.
- [24] GROSVENOR, Theodore P. *Primary care optometry*. St. Louis, Mo.: Butterworth

- Heinemann Elsevier, 2007. ISBN 978-0-7506-7575-8.
- [25] PLUHÁČEK, František. *Presbyopie a související vergenční potíže*. © 2008 Katedra optiky, Univerzita Palackého v Olomouci [cit. 2018-01-28]. Dostupné z: <http://www.optometry.cz/obsah/materialy/PSVP.pdf>.
- [26] SEVERA, D., P. VESELÝ a P. BENEŠ. *Stanovení naturální zrakové ostrosti* [online]. © Lékařská fakulta Masarykovy univerzity, Brno 2016, [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/lf/js16/refracni_vady/web/pages/03-naturalni-zrakova-ostrost.html.
- [27] ELLIOTT, David B. *Clinical Procedures in Primary Eye Care*. Edinburgh: Butterworth Heinemann Elsevier, 2007. ISBN 978-07506-8896-3.
- [28] BAJER, Jiří. *Optika I*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2015. ISBN 978-80-244-4532-8.
- [29] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [30] VRBÍK, Petr. *Hygiena optického záření a osvětlování*. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 1998. ISBN 80-7013-265-5.
- [31] ČSN EN 12665. *Světlo a osvětlení – základní termíny a kritéria pro stanovení požadavků na osvětlení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. Třídící znak 36 0001.
- [32] DAŠEK, Martin. *Osvětlování vnitřních prostorů: praktické rady nejen pro elektrikáře*. Praha: SEVEn, Středisko pro efektivní využívání energie, 2002. ISBN 80-238-9285-1.
- [33] EUR-Lex, přístup k právu Evropské unie. *Nářízení komise v přenesené pravomoci (EU) č. 874/2012 ze dne 12. července 2012, kterým se doplňuje směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/30/EU, pokud jde o uvádění spotřeby energie na energetických štítcích elektrických světelných zdrojů a svítidel* [online]. © Evropská unie, 1998-2018 [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=celex%3A32012R0874>.
- [34] EUR-Lex, přístup k právu Evropské unie. *Nářízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2017/1369 ze dne 4. července 2017, kterým se stanoví rámec pro označování*

- energetickými štítky a zrušuje směrnice 2010/30/EU* [online]. © Evropská unie, 1998-2018 [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R1369&from=IT>.
- [35] ČSN EN 12464-1. *Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – Část 1: Vnitřní pracovní prostory*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. Třídící znak 36 0450.
- [36] ČSN 36 0011-3. *Měření osvětlení vnitřních prostorů – část 3: měření umělého osvětlení*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [37] ČSN 36 0011-1. *Měření osvětlení vnitřních prostorů – část 1: základní ustanovení*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [38] Occupational Safety and Health Branch, Labour Department. *Lighting Assessment in the Workplace* [online]. © 2008 Labour Department, [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: www.labour.gov.hk/eng/public/oh/Lighting.pdf
- [39] CHEN, Ai-Hong. *Comparison of subjective refraction findings in two different levels of room illumination using three different types of letter charts* [online]. © 2012 Korea Institute of Science and Technology Information KISTI [cit. 2018-01-25]. Dostupné z: http://www.koreascience.or.kr/search/articlepdf_ocean.jsp?admNo=OGHHBL_2010_v15n1_67.
- [40] CHAGLASIAN, Elyse. *Effect of room illumination on manifest refraction and patient preference* [online]. © 2013 American Academy of Optometry [cit. 2018-01-25]. Dostupné z: <https://www.aaopt.org/detail/knowledge-base-article/effect-room-illumination-manifest-refraction-and-patient-preference>.
- [41] OTRADOVEC, Jiří. *Klinická neurooftalmologie*. Praha: Grada, 2003. ISBN 80-247-0280-0.
- [42] WAGNER, Jaroslav. *Čtecí tabulka*. Inovace výuky optiky se zaměřením na získání experimentálních dovedností. Registrační číslo: CZ.1.07/2.2.00/28.0157. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci.
- [43] Osram. *LED Superstra Classic A* [online]. © 2017, Osram GmbH., [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: https://www.osram.cz/osram_cz/produkty/svetelne-zdroje/svetelne-zdroje-led/led-zdroje-s-klasickym-tvarem-banky/led-superstar-classic-a/index.jsp#.

[44] Gossen. *Manuál k luxmetru - Mavolux 5032C/B USB* [online]. © 2017 GOSSEN Foto- und Lichtmesstechnik GmbH [cit. 2018-02-5]. Dostupné z: <https://gossen-photo.de/en/mavolux-5032-b-usb/>.

