

Univerzita Hradec Králové
Přírodovědecká fakulta
Katedra fyziky

Zrak živočichů z pohledu fyziky

Bakalářská práce

Autor: Alena Pobudová
Studijní program: B0114A110004
Studijní obor: Fyzika se zaměřením na vzdělávání,
Matematika se zaměřením na vzdělávání
Vedoucí práce: RNDr. Leontýna Šlégrová, Ph.D.

Hradec Králové

červenec 2023

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a že jsem v seznamu použité literatury uvedla všechny prameny, ze kterých jsem vycházela.

V Hradci Králové dne

Jméno a příjmení

Poděkování:

Děkuji RNDr. Leontýně Šlégrové, Ph.D. za pomoc a cenné rady při vedení bakalářské práce. Také bych chtěla poděkovat RNDr. Michaele Křížové, Ph.D. a RNDr. Jířímu Kosovi za pomoc při uskutečnění praktické části práce.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá zrakem člověka. Teoretická část se nejprve věnuje anatomii lidského oka spolu se základními principy zraku. Po ní následuje kapitola popisující optické vlastnosti oka. Na závěr se teoretická část zaměřuje na světlo a barevné vidění. Praktická část se skládá z měření s čidly od firmy Vernier, které lze využít při výuce na střední škole.

Klíčová slova

Lidské oko, zrak, optika, světlo, barevné vidění

Annotation

This bachelor thesis deals with human vision. The first part is dedicated to the anatomy of the human eye, along with the basic principles of vision. This is followed by a chapter describing the optical properties of the eye. Finally, the theoretical part focuses on light and color vision. The practical part consists of measurements using sensors from Vernier, which can be used during high school teaching.

Keywords

Human eye, vision, optics, light, color vision

Obsah

1	Lidské oko	8
1.1	Oční koule (bulbus oculi)	8
1.2	Vazivová vnější vrstva	9
1.2.1	Bělima (sclera)	9
1.2.2	Rohovka (cornea)	9
1.3	Cévnatá střední vrstva	10
1.3.1	Cévnatka (choroidea)	10
1.3.2	Řasnaté těleso (corpus ciliare)	10
1.3.3	Duhovka (iris)	10
1.4	Nervová vnitřní vrstva	11
1.4.1	Sítnice (retina)	11
1.5	Vnitřek oční koule	13
1.5.1	Sklivec (corpus vitreum)	13
1.5.2	Čočka (lens)	13
1.5.3	Oční komory	14
2	Optika	15
2.1	Geometrická optika	15
2.1.1	Zákon lomu a odrazu	15
2.2	Vlnová optika	16
2.2.1	Interference světla	17
2.2.2	Difrakce světla	17
2.3	Kvantová optika	19
2.4	Optické zobrazování	19
2.4.1	Zobrazení odrazem	19
2.4.2	Zobrazení lomem	20
2.4.3	Oční vady a jejich korekce	22
3	Světlo	24
3.1	Záření látek	25
3.2	Vnímání světla okem	26
3.3	Barevné vidění	27
3.3.1	Elektrofyzologie barevného vidění	28
3.3.2	Poruchy barvocitu	30

3.4	Citlivost a adaptace oka	30
3.4.1	Rozlišování podnětů v čase	32
4	Praktická část	33
4.1	Vernier	33
4.1.1	Měřicí systémy	34
4.2	Difrakce světla	36
4.3	Ohnisková vzdálenost	39
4.4	Odrazivost různě barevných povrchů	41
4.5	Blikání žárovky	42
4.6	Spektrum světla LED žárovky	44
	Závěr	48
	Seznam obrázků	50

Úvod

Podstata lidského zraku zasahuje do mnoha oblastí včetně fyziky, neurověd a fyziologie. Fyzika se zabývá vznikem světla, které je pro vidění nezbytné. Také vysvětluje, jak se světlo šíří prostředím, jak interaguje s povrchy objektů, na které dopadá, jakým způsobem vstupuje do oka a jak vytváří obraz na sítnici. Z pohledu neurovědy lze zkoumat aktivitu mozkových center při zpracovávání zrakového podnětu a postupnou transformaci přenesené informace. Fyziologie se zabývá reakcemi receptorů sítnice na dopad světla, procesem změny fyzikálního podnětu na akční potenciály a přenosem nervového vzruchu zrakovými drahami do mozku.

Práce se zabývá způsobem zpracovávání zrakových vjemů nikoli, jejich interpretací, která spadá spíše do oblasti psychologie. Cílem práce je složitý koncept, jímž je vidění, čtenáři přiblížit alespoň z některých oblastí, které se zrakem souvisejí. Zvláště je pak kladen důraz na fyzikální vlastnosti zraku. K porozumění by měla být nápomocná také sada měření z optiky, která je popsána v praktické části práce. Důvodem je poznatek, že zrak není příliš probírán v učivu žádného předmětu na středních školách, pravděpodobně kvůli jeho mezioborovému charakteru. Přitom až 70 % z celkového počtu smyslových receptorů člověka se soustřeďuje právě v očích. Zrak je pro člověka samozřejmostí, vysvětlit jeho podstatu je však přinejmenším složitě.

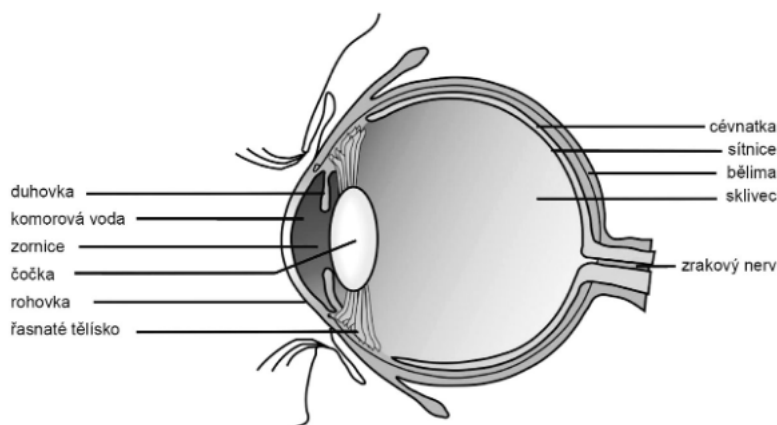
V první kapitole práce je popsána základní anatomie lidského oka. Druhá kapitola se věnuje optice. Jsou zde popsány některé spojitosti mezi fyzikální optikou a zrakem, jako korekce očních vad pomocí čoček. Poslední kapitola teoretické části se věnuje světlu a barevnému vidění. Praktická část je zaměřena na pokusy s čidly od firmy Vernier, které lze využívat při výuce.

1

Lidské oko

První kapitola práce se zabývá anatomíí lidského oka a popisuje, jak jednotlivé orgány ke zraku přispívají. Hlavním orgánem zrakového ústrojí je oko neboli oční koule. Jedná se o složitý párový orgán, který je schopný vnímat viditelné světlo. Světlo odražené od povrchů předmětů dopadá do oka a umožňuje tak celý proces vidění.

Světelné paprsky dopadají do oka skrze zornici, která reguluje množství vstupního světla. Rohovka a čočka poté soustředí paprsky na sítnici tak, aby zde vytvořily sítnicový obraz pozorovaných předmětů. Obraz vzniklý na sítnici je vždy zmenšený a převrácený. Dopadající paprsky způsobí podráždění receptorů sítnice a ta světlo přemění na elektrický signál, který vysílá skrze zrakový nerv do mozku. Zpracovávání zrakového podnětu se účastní oblasti mozkové kůry v týlním, temenním a spánkovém laloku. [1], [2], [3]



Obrázek 1.1: Řez bulbem. [2]

1.1 Oční koule (bulbus oculi)

Oční koule tvarem odpovídá přibližně kouli o průměru 2,5 cm. Přední a zadní oddíl oční koule mají různá zakřivení. Přední část má poloměr zakřivení 7–8 mm,

zadní část 11–12 mm. Viditelná je pouze přední část očního povrchu. Zbývající část oční koule je uložena v kostěné očnici, kde je oko obklopeno ochranným tukovým polštářem. Oční koule je tvořena stěnou oční koule a obsahem oční koule. Ze zadní části oční koule vystupuje silný zrakový nerv.

Na oční kouli rozlišujeme přední pól, který odpovídá vrcholu rohovky, a zadní pól. Oba póly spojuje oční osa. Tato geometrická osa oka není totožná se zornou osou oka.

K oční kouli náleží také přídatné orgány zajišťující ochranu, pohyblivost a další. Mezi ně patří okohybné svaly, fascie a vazivový aparát očnice, víčka, spojivka a slzní aparát.

Stěna oční koule se skládá ze tří vrstev. Vnější vazivová vrstva obsahuje bělimu a rohovku. Povrch přední části oční koule tvoří rohovka a povrch zadní části tvoří bělima. Střední cévnatá vrstva se skládá ze tří částí. Cévnatky v zadní části oční koule, která směrem dopředu přechází v řasnaté těleso, z jehož okraje vybíhá duhovka. Obsahuje krevní cévy, ze kterých je zásobována převážná část oční koule. Poslední vrstvou je vnitřní nervová vrstva, kterou tvoří sítnice obsahující fotoreceptory tyčinky a čípky. Vnitřní část oční koule se skládá ze sklivce, čočky a obsahu přední a zadní oční komory, které vyplňuje komorový mok. [4], [5], [6], [1]

1.2 Vazivová vnější vrstva

1.2.1 Bělima (sclera)

Bělima tvoří svým rozsahem téměř 80 % povrchu oční koule. Vytváří okolo oční koule tuhý a pevný obal, čímž udržuje její tvar a poskytuje pevnou oporu pro uchycení šlach okohybných svalů. Tloušťka bělimy kolísá v rozmezí 0,3 až 1,5 mm, přičemž nejsilnější je v zadní části bulbu. Bělima má mléčně bílou barvu a vzhledem připomíná šlachy. Je tvořena ze 70 % z vody. Přední část bělimy překrývá spojivka. Na přední straně skléry se nachází otvor o průměru asi 12 mm, do jehož okraje je vsazena rohovka. [5], [4], [6]

1.2.2 Rohovka (cornea)

Průhledná rohovka tvoří přední část obalu oka. Je vypuklá směrem dopředu a tvarem odpovídá kulovému vrchlíku. Tloušťka rohovky kolísá okolo 1 mm. Pravidelným uspořádáním jednotlivých vrstev rohovky je zajištěna její průhlednost. Rohovka neobsahuje cévy. Získává kyslík pouze ze vzduchu a spolu se živinami z komorového moku v nitru oka. Je bohatě zásobena nervovými zakončeními. Většinu z nich tvoří receptory bolesti. Proto je povrch rohovky velmi citlivý na dotek.

Přechod mezi rohovkou a bělimou není plynulý, protože oba segmenty oční koule mají různý poloměr zakřivení. V místě přechodu se nachází mělký žlábek, který

představuje tzv. mrtvý prostor oka. Při pohybech víček není dostatečně očišťován a může tak šířit infekci na rohovku.

Díky její průhlednosti se skrze rohovku do oka dostávají světelné paprsky. Představuje vstupní oddíl optického prostředí oka. Nepropouští pouze světlo do oka ale je také součástí lomivého aparátu oka. Rohovka spolu s čočkou, komorovou vodou, sklivcem a sítnicí tvoří optickou soustavu oka. Tato soustava zajišťuje souběh paprsků světla, které dopadají na přední plochu oka. Paprsky jsou rohovkou a následně čočkou lámány tak, aby došlo k jejich protnutí na sítnici. Na sítnici poté vzniká obraz sledovaného předmětu. [2], [5], [4], [1]

1.3 Cévnatá střední vrstva

1.3.1 Cévnatka (choroidea)

Cévnatka je svým rozsahem největší složkou střední vrstvy oka. Povrchovou stranou se přikládá na vnitřní plochu bělimy. Je tenká, sytě pigmentovaná a bohatá na cévy. Její bohaté cévní zásobení vyživuje ostatní obaly oka. Hnědé zabarvení cévnatky je zapříčiněno melanocyty, jejichž pigment melanin pomáhá pohlcovat světlo a tím zabraňuje jeho rozptylu v oku a vzniku zrakových klamů. Představuje tak temnou komoru pro optickou vrstvu sítnice.

Cévnatka táhne okraj řasnatého tělesa, k němuž je připojena, směrem dozadu. Tím napíná závěsný aparát čočky a pomáhá udržovat zaostření oka na dálku. Na předním okraji je cévnatka zesílena a spolu s ciliárním svalem tvoří řasnaté těleso. [5], [6]

1.3.2 Řasnaté těleso (corpus ciliare)

Řasnaté těleso má tvar zřaseného prstence, který obklopuje čočku. Na řezu má tvar trojúhelníku. Zadní okraj řasnatého tělesa se ztenčuje a plynule přechází do cévnatky, směrem dopředu se řasnaté těleso ztlušťuje a spojuje se s duhovkou.

Uvnitř řasnatého tělesa se nachází svazky hladké svaloviny, zvané ciliární sval. Zadní plocha ciliárního svalu, umístěná nejbliže k čočce je složena do drobných výběžků. Z těchto výběžků vycházejí jemná vlákénka, která se upínají podél celého obvodu čočky a tvoří závěsný aparát čočky. Ciliární sval svou kontrakcí uvolňuje závěsný aparát čočky. Uvolnění ciliárního svalu způsobí, že se pružná čočka vyklene, čímž zvýší svou optickou mohutnost a oko se zaostří na blízko. [5], [4], [1]

1.3.3 Duhovka (iris)

Duhovka je nejvíce dopředu vystupující část střední vrstvy oční stěny. Nachází se mezi rohovkou a čočkou. Má tvar mezikruží se středovým otvorem, jímž je zornice (pupila) neboli panenka. Zornice netvoří hmotný orgán. Její rozměry se v průběhu

dne mění, a to v rozmezí od 2 do 8 mm, což je dáno součinností dvojice svalů duhovky. Přední plocha duhovky je podle množství pigmentu individuálně různě zbarvená a podmiňuje barvu očí.

Duhovka je pro světlo nepropustná. Všechny paprsky dopadající na sítnici musí tedy procházet zornicí. Obsahuje vlákna hladké svaloviny, svaly svěrač a rozvěrač zornice, která slouží k regulaci velikosti zornice. Svěrač zornice je tvořen cirkulárně orientovanými svalovými buňkami. Kontrakcí svěrače duhovka zužuje zornici a tím omezuje množství světla, které vniká do oka. K zúžení zornice dochází reflexivně při vyšší hladině osvětlení. Zde je na oko kladena potřeba přesnosti zraku. Zúžení umožňuje, aby se vidění účastnil pouze střed zornice, který je z hlediska kvality vjemu nejužitečnější. Zúžení zornice při intenzivním osvětlení, které je oku potenciálně nebezpečné, se nazývá zornicový reflex na osvit. Ve spánku je zornice úzká, v bezvědomí se naopak rozšiřuje a schopnost reagovat na světlo se může ztratit.

Rozvěrač zornice je tvořen paprscitě uspořádanými svalovými buňkami. Kontrakcí rozvěrače při nedostatku světla duhovka rozšiřuje zornici. Zornice díky tomu v potřebných situacích zajišťuje větší citlivost nebo rozlišení. Díky této flexibilitě může oko fungovat při různých světelných intenzitách. [5], [4], [1], [2], [3]

Zbarvení duhovky

Na zadní ploše duhovky se nachází pigmentová vrstva sítnice, která bývá klinicky označována jako pigmentový list duhovky a podmiňuje její černé zbarvení. Tento pigmentový list se přetáčí přes pupilární okraj duhovky na její přední stěnu a tvoří úzký černý lem kolem pupily. Barva duhovky se odvíjí od množství pigmentu melaninu. Pokud se nachází pigment pouze v sítnici a v duhovce chybí, má duhovka modrou barvu. Pokud tělo duhovky obsahuje také pigmentové buňky má podle množství pigmentu duhovka šedou až tmavě hnědou barvu. Barva duhovky se během dětství mění s postupným vývojem pigmentace. [1]

1.4 Nervová vnitřní vrstva

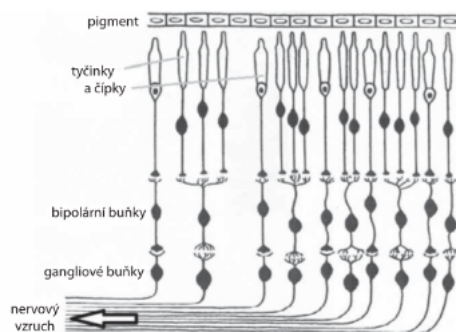
1.4.1 Sítnice (retina)

Sítnice je průhledná membrána, která tvoří nejvnitřnější vrstvu oka. Vystýlá celou vnitřní stranu oční koule až k vnitřnímu okraji duhovky. Sítnice se dělí na dva stovebně i funkčně odlišné oddíly. Zadní oddíl tvoří optická část sítnice, části více vpředu oční koule se přikládají k vnitřní straně řasnatého tělesa a k zadní ploše duhovky. Tyto dvě přední části sítnice bývají označovány jako slepá část sítnice. Obě hlavní části sítnice jsou od sebe odděleny klikatě probíhající čarou zvanou ora serrata. [5], [6]

Optická část sítnice

Optická část sítnice je funkčně nejvýznamnější vrstvou stěny oční koule. Je složena z 11 vrstev. Její zevní pigmentovaná vrstva přiléhá k cévnatce. Spolu s pigmentovou vrstvou cévnatky působí jako světelná izolační vrstva, která pohlcuje dopadající paprsky a zabraňuje jejich odrazu uvnitř oka. Vnitřní vrstva obsahuje fotoreceptory a neurony. Fotoreceptory pohlcují částice světla a přeměňují světelnou energii pomocí chemické reakce na nervový vzruch. Neurony odvádějí informace z fotoreceptorů oka do mozku.

Vodivé výběžky fotoreceptorů – tyčinek a čípků navazují na vrstvu bipolárních a horizontálních buněk, které reagují na světlo. Na vodivé výběžky těchto neuronů navazuje vrstva gangliových buněk, které komunikují se zrakovými centry v mozku. Jejich výběžky se sbíhají a jako zrakový nerv vystupují z oka.



Obrázek 1.2: Stavba sítnice. [7]

Tyčinky mají charakteristický tvar ve všech částech sítnice a jejich celkový počet je asi 130 milionů. Na rozdíl od tyčinek mají čípky různý tvar v závislosti na poloze v sítnici. Čípky uložené ve žluté skvrně jsou stejně dlouhé i delší nežli tyčinky. Mimo žlutou skvrnu mají čípky lahvovitý tvar. Je jich přibližně 7 milionů a jsou uloženy převážně ve žluté skvrně.

Součástí optické části sítnice je také oční pozadí, kde se nachází žlutá skvrna. Její tvar odpovídá kruhu o průměru zhruba 3 mm a leží v ose oka. Ve středu žluté skvrny je prohlubeň zvaná fovea centralis. Do tohoto místa se promítá obraz sledovaného objektu. Leží ve vrcholu optické osy oka a představuje místo nejostřejšího vidění a nejvyšší citlivosti k barvám. To je způsobeno vysokou koncentrací fotoreceptorů, především čípků. Podněty ležící mimo osu oka se jeví rozmazaně. Na rozdíl od svého okolí je žlutá skvrna bez větších cévních větví, což má za důsledek nažloutlou barvu.

Směrem dozadu od žluté skvrny se nachází místo, kterým odstupuje z oční koule zrakový nerv. Zrakový nerv neobsahuje žádné světločivé elementy a představuje tak fyziologickou slepou skvrnu. [5], [6], [1], [2], [7]

1.5 Vnitřek oční koule

1.5.1 Sklivec (corpus vitreum)

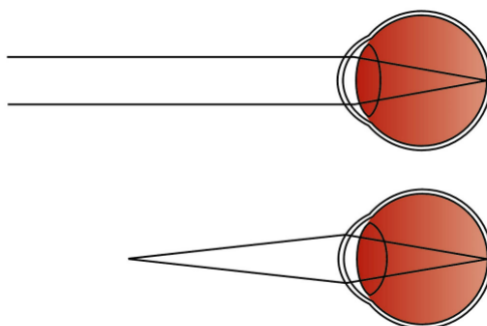
Sklivec je průhledná hmota, která vyplňuje vnitřní prostor oční koule od čočky dozadu, tzv. sklivcovou komoru. Na přední ploše se nachází jamka, do které je zadní plocha čočky vsazena. Sklivec je z 99 % tvořen vodou. Má polotekutou rosolovitou konzistenci a při poranění oka vyteče. [5], [1]

1.5.2 Čočka (lens)

Čočka je uložena v zadní komoře oční. Je obalena pouzdrem, které ji chrání před komorovou tekutinou, která by při přímém působení na hmotu čočky vyvolávala zakalení.

Role čočky při směřování paprsků je specifická tím, že její optická mohutnost není na rozdíl od ostatních světlohmotných struktur fixní. Optická mohutnost ostatních struktur je nastavena na souběh paprsků vycházejících od vzdáleného podmětu, které jsou před dopadem do oka téměř rovnoběžné. Díky tomu dopadá obraz vzdáleného předmětu na sítnici a můžeme ho vidět ostře. Čočka svou specifičností umožňuje, že můžeme ostře vidět i bližší podněty, k jejichž promítnutí na sítnici je potřeba zvětšit optickou mohutnost. Tyto paprsky totiž dopadají do oka různosměrně a je potřeba je více lámat, aby došlo k souběhu všech paprsků na sítnici. Umožňuje tedy navýšit lomivost podle vzdálenosti sledovaného předmětu. Celý proces se označuje jako akomodace a je umožněn skrze měnící se tvar čočky.

Čočka je přichycena závěsným aparátem ke svalu řasnatého tělesa. V klidovém stavu je sval napnutý a čočka zploštělá. V tomto stavu je čočka přizpůsobena vidění na dálku. V případě potřeby dochází v řasnatém tělesu ke kontrakci, která redukuje napětí svalu a způsobuje vyklenutí čočky. Vyklenutím se zvětší její optická mohutnost, dopadající světlo se tím více láme a čočka se přizpůsobí vidění do blízka.



Obrázek 1.3: Při sledování vzdálených předmětů jsou paprsky navzájem prakticky rovnoběžné a čočka je zploštělá. Při sledování bližších předmětů dopadají na přední stranu oka různosměrné paprsky a čočka musí být více vyklenutá.[2]

Při přílišném přiblížení sledovaného objektu se již čočka nedokáže dostatečně vyklenout a podmět tak vidíme rozostřeně. Nejmenší vzdálenost, ve které čočka ještě dokáže zprostředkovat ostrý obraz, se nazývá blízký bod. Nejvzdálenější bod, který je viděn okem ostře bez akomodace a u zdravého leží v nekonečnu, se nazývá vzdálený bod.

Ideální vztah mezi optickou mohutností a předozadní délkou oka, při němž se všechny paprsky světla sbíhají v jediném bodě na sítnici, se nazývá emetropie. Ametropie je naopak stav, při kterém je lomivá síla optické soustavy vůči délce oka nesprávná. Ametropie je též souhrnný název pro refrakční vady. Mezi refrakční vady se řadí krátkozrakost, dalekozrakost a astigmatismus. [2], [5], [1]

1.5.3 Oční komory

Oční komory jsou dva nitrooční prostory mezi zadní plochou rohovky a přední plochou čočky. Rozlišujeme přední a zadní oční komoru. Obě komory jsou vyplněny komorovým mokem, který pomáhá udržovat tvar oka a vzájemnou polohu rohovky, čočky a sítnice. Komorový mok slouží také k výživě čočky a rohovky. Vymění asi za 2–3 hodiny a jeho tlak závisí na rychlosti tvorby a vstřebávání komorového moku. [1], [3]

2

Optika

Fyzikální optika se zabývá vlastnostmi světla a zákonitostmi světelných jevů, které vznikají při šíření světla a jeho interakcí s okolím. Světlo je elektromagnetické vlnění o vlnových délkách 430-690 nm, které působí na fotoreceptory lidského oka a vyvolává zrakový vjem. Do optiky lze zahrnout také studium infračerveného záření a ultrafialového záření, které obklopují spektrum viditelného světla. Světlo lze popisovat třemi modely, z nichž se každý uplatňuje při popisu odlišných jevů. Jedná se o geometrickou optiku, vlnovou optiku a kvantovou optiku. [7], [8]

2.1 Geometrická optika

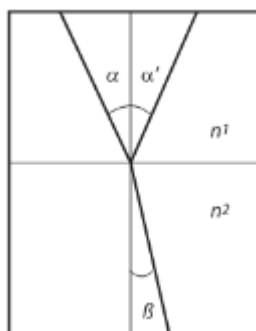
Geometrická optika je nejstarším oborem optiky. Světlo je zde chápáno jako paprsek a je založena na přímočarém šíření světla. Zákon přímočarého šíření světla je jedním ze základních zákonů geometrické optiky. Říká, že světelný paprsek se v opticky homogenním prostředí šíří po přímce. Přestože se světelná vlna vzdalující se od zdroje postupně rozšiřuje, lze aproximovat její dráhu přímkou. Geometrická optika zkoumá vlastnosti vln za této aproximace. Pomocí jejích zákonů lze vysvětlit průchod světla rozhraním prostředí s různou optickou hustotou.

Všechny zákony geometrické optiky vycházejí z obecného Fermatova principu. Podle Fermatova principu se světlo šíří v prostoru z jednoho místa do druhého po nejkratší optické dráze. Optická dráha je přitom taková dráha, kterou by světlo urazilo ve vakuu za stejný čas, za jaký by urazilo tuto dráhu v konkrétním optickém prostředí. [7], [9], [8]

2.1.1 Zákon lomu a odrazu

Pokud dopadá světlo na rozhraní dvou opticky odlišných prostředí, část paprsků se odrazí od povrchu a zbylá část projde do druhého prostředí. Při přechodu paprsků mezi prostředími dochází k jejich lomu neboli refrakci. Pokud paprsky nedopadají na povrch kolmo, vede lom ke změně směru jejich šíření. Ke změně směru dojde pouze na rozhraní dvou prostředí, poté se světlo šíří opět přímočaře.

Rovina, ve které leží dopadající paprsek, se nazývá rovina dopadu a leží v ní též



Obrázek 2.1: Odraz a lom světla. [7]

paprsek odražený. Úhel dopadu α se rovná úhlu odrazu α' , tedy platí $\alpha = \alpha'$, přičemž úhel, pod kterým světlo dopadá, láme se i odráží, se měří vzhledem k normále na rozhraní.

Označí-li se v_1 a v_2 rychlosti šíření světla v prostředích s indexy lomu n_1 a n_2 a úhel dopadu naměřený vzhledem k normále je α , pak pro úhel lomu β platí:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Pro index lomu n určitého prostředí platí vztah $n = \frac{c}{v}$, kde c je rychlost světla ve vakuu a v jeho rychlost v daném prostředí. Index lomu je bezrozměrná veličina a nahrazuje rychlost šíření záření v daném prostředí. Celý vztah se nazývá Snellův zákon.

Lom ke kolmici nastává při přechodu světla z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího. Tedy pokud index lomu n_1 je menší než index lomu n_2 , pak je úhel α větší než úhel β . Přitom lom nemůže lomený paprsek odchýlit natolik, aby byl na téže straně normály jako paprsek dopadající. Lom od kolmice poté nastává, pokud světlo prochází z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího prostředí.

S rostoucím úhlem dopadu roste i úhel lomu. Existuje tzv. mezní úhel dopadu α_m , při kterém se lomený paprsek šíří těsně podél povrchu rozhraní, tedy pod úhlem 90° . Je-li úhel dopadu větší než mezní úhel, tedy $\alpha > \alpha_m$, dochází k totálnímu odrazu, kdy se světlo pouze odrazí zpět do hustšího prostředí. [7], [9]

2.2 Vlnová optika

Mimo vlnových vlastností světla se zabývá vlnová optika popisem chování světla při dopadu na různé překážky. Jevy jako difrakci a interferenci světla již nelze popsat pomocí zákonů geometrické optiky.

Huygensův princip předpokládá, že světlo se ze zdroje šíří ve vlnoplochách. Tyto vlnoplochy jsou v izotropním prostředí v blízkosti zdroje světla kulové, ve velké vzdálenosti od zdroje je však možné části těchto vlnoploch považovat za roviny. Huygensova vlnová teorie je založena na geometrické konstrukci, která dovoluje stanovit, kde se bude nalézat vlnoplocha v libovolném pozdějším čase, pokud je známa

její současná poloha. Huygensova vlnová teorie také vysvětluje zákon odrazu a lomu pomocí šíření vln. [7], [9]

2.2.1 Interference světla

Při interferenci světla spolu interferují dvě koherentní vlny. Koherentní vlnění je takové, při němž se fázový rozdíl světelných vln, dopadajících do libovolného bodu stínítka, v čase nemění.

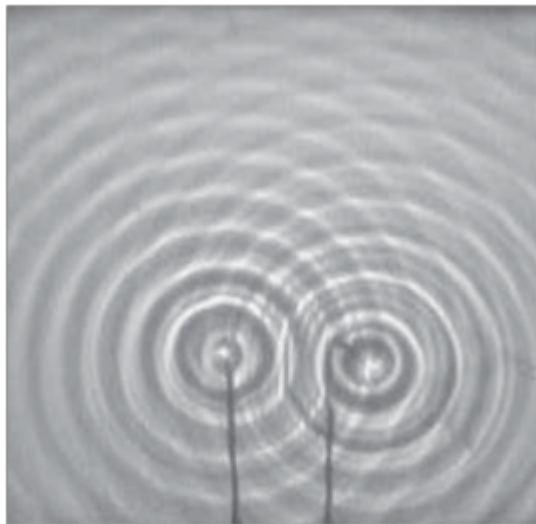
Světlo se interferencí zesiluje nebo zeslabuje. K maximální zesílení ve společném bodě neboli konstruktivní interferenci dojde, pokud je dráhový rozdíl roven nule nebo celočíselnému násobku vlnové délky, tedy:

$$\Delta L = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

Je-li dráhový rozdíl roven lichému násobku poloviny vlnové délky $(2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ dochází k destruktivní interferenci.

Výsledek interference lze pozorovat na stínítku. Body interferenčních maxim zde vytvářejí světlé proužky. Naopak tmavé neosvětlené oblasti jsou výsledkem destruktivní interference a jsou patrné mezi světlými proužky. Struktura světlých a tmavých proužků na stínítku se nazývá interferenční obrazec.

Ke znázornění interference je možné využít interferenci vln na vodní hladině. [7], [9]



Obrázek 2.2: Interference na vodní hladině. [7]

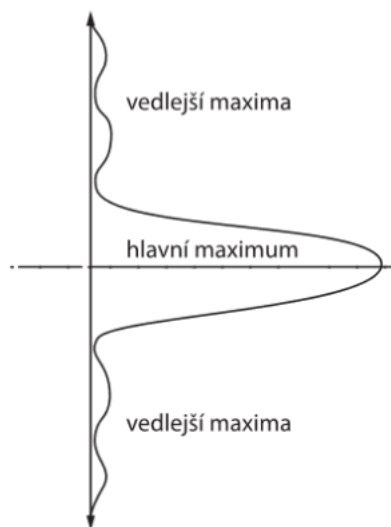
2.2.2 Difrakce světla

Při difrakci neboli ohybu světla dochází k vychýlení světla z přímočarého směru šíření. K ohybu dojde, když světlo obtéká překážky nebo mívá nějakou hranu, například

žiletky. K difrakci dochází pouze na překážkách, které mají velikost řádově srovnatelnou s vlnovou délkou světla.

Ohyb světla nastává také při průchodu štěrbinou. Podle Huygensova principu se štěrbina stává zdrojem elementárních vln. Z každého bodu se šíří světlo v elementárních vlnoplochách, tedy bude se šířit všemi směry. Vzniklé ohybové jevy jsou vyvolány právě interferencí světla.

Monochromatické světlo vycházející z laseru a procházející štěrbinou vytváří na stínítku difrakční obrazec. Tento obrazec tvoří široké centrální maximum a s několika užšími a méně intenzivními maximy po obou stranách. Tato maxima se označují jako vedlejší. Mezi maximy se nacházejí minima.



Obrázek 2.3: Difrakční obrazec. [8]

Rozložení maxim a minim na ohybovém obrazci závisí na šířce štěrbiny a vlnové délce světla. Užší štěrbina způsobuje větší ohyb světla a vzdálenosti mezi interferenčními minimy stejného řádu je tak větší. Ohybový obrazec lze také vytvořit, pokud světlo prochází více štěrbinami naráz. Toho lze docílit použitím tzv. difrakční mřížky.

Difrakční mřížka je tvořena soustavou štěrbin. Prochází-li štěrbinami monochromatické světlo, vznikají na stínítku úzké interferenční proužky, jež lze využít ke stanovení vlnové délky světla. Pro světlé čáry ohybových maxim platí, že dráhový rozdíl sousedních paprsků je celonásobkem vlnové délky:

$$d \sin \alpha = k\lambda, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Vzdálenost d mezi štěrbinami se nazývá mřížková konstanta. Číslo k se nazývá řád ohybového maxima a každé celé číslo k představuje určitou čáru. Dopadá-li na mřížku bílé světlo, vznikne na stínítku ohybové spektrum. Nulté maximum je bílé, v dalších maximech lze pozorovat rozklad světla. Platí, že nejvíce odchýlené od původního směru je světlo s největší vlnovou délkou. [7], [9], [8]

2.3 Kvantová optika

Kvantová optika se zabývá jevy, které vznikají při interakci záření a látky. Zářivá energie je atomy či molekulami emitována v energetických kvantech, jejichž nositeli jsou fotony o energii E , kdy platí:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda},$$

kde $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J·s označuje Planckovu konstantu, f je frekvence, λ vlnová délka a $c = 3 \cdot 10^8$ m·s⁻¹ je rychlost šíření světla ve vakuu. Foton má nulovou klidovou hmotnost a ve vakuu se pohybuje rychlostí světla. V látkovém prostředí se pohybuje vždy rychlostí menší. [7], [8]

2.4 Optické zobrazování

Jedním z uplatnění zákona lomu je zobrazování. Oko potřebuje k vidění zachytit některé z paprsků šířících se od předmětu a nasměrovat je na sítnici. Zrakový systém následně zpracuje informace poskytnuté světlem a přenesení do vědomí obraz daného předmětu. Díky tomu člověk vnímá předmět nacházející se ve směru, odkud přichází světlo a vidí ho ve správné vzdálenosti.

Optické zobrazování pomocí optické soustavy zobrazuje předmět viditelný na jiném místě. Příkladem optické soustavy je lidské oko. Zobrazením předmětu optickou soustavou vznikne jeho obraz. Vzniklý obraz může být reálný, pokud se po průchodu optickou soustavou paprsky sbíhají a protínají se v jednom bodě, nebo virtuální. Virtuální obraz nastane, pokud se po průchodu soustavou paprsky rozbíhají a jejich protnutí je možné pouze v jejich prodloužení do opačného směru. Optickou soustavu tvoří souhrn rozhraní, na kterých nastává lom nebo odraz světla. Nejčastěji se používají rozhraní kulová nebo rovinná, která jsou uspořádána tak, že jsou středy křivosti jednotlivých ploch umístěny na jedné přímce zvané optická osa soustavy. Takto uspořádaná soustava se nazývá centrovaná. Základní body optické soustavy tvoří předmětové ohnisko a odrazové ohnisko. Ohnisko je bod na optické ose, v němž se protínají po průchodu soustavou paprsky, které vstoupily do optické soustavy jako rovnoběžné. Ohnisková vzdálenost soustavy se udává jako vzdálenost ohniska od středu soustavy a značí se jako f pro předmětové ohnisko, případně f' pro obrazové ohnisko. Protože velikost obrazu může být jiná nežli velikost předmětu, popisuje se tato změna zvětšením. Zvětšení může být osové, úhlové nebo příčné. [7], [9], [8]

2.4.1 Zobrazení odrazem

Pokud je zobrazení předmětu použit pouze jeho odraz, jedná se o zrcadlení. Zrcadlo je povrch, který odráží většina paprsků na něho dopadajících. Na ploše zrcadla se

odráží úzký svazek světelných paprsků prakticky do jednoho směru. Jiné povrchy jej rozptylují do více směrů nebo pohlcují.

Podle tvaru se zrcadla dělí na rovinná, kulová, parabolická atd. Duté zrcadlo lze vytvořit zakřivením tak, že tvoří vydutou plochu. Vypuklé zrcadlo se tvoří zakřivením plochy tak, že vznikne plocha vypuklá. Zakřivením se mění některé charakteristiky zrcadla a obrazu jím vytvořeného. Zobrazovací rovnice pro kulové zrcadlo má tvar:

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

kde a je vzdálenost předmětu, a' vzdálenost obrazu od kulové plochy a f je ohnisková vzdálenost. Zatímco u rovinného zrcadla je předmětová i obrazová vzdálenost stejná, u kulových zrcadel toto neplatí. [7], [9]

2.4.2 Zobrazení lomem

K zobrazení lomem se používají čočky tvořené průhledným prostředím, nejčastěji sklem. Čočka je optická soustava se dvěma lomivými plochami. Světlo se láme ze vzduchu do čočky, prochází čočkou a poté se láme zpět do vzduchu. Při každém lomu se může změnit směr chodu paprsků světla. Čočka, která způsobí, že se původně rovnoběžné paprsky s optickou osou sbíhají, se nazývá spojka, neboli spojná čočka. Čočka, která naopak působí, že se paprsky budou rozbíhat, se nazývá rozptylka neboli rozptylná čočka. Speciálním případem čoček jsou tenké čočky. Jejich nejtlustší část je ve srovnání s předmětovou a obrazovou vzdáleností i s poloměry zakřivení obou povrchů čočky malá.

Polohu obrazu vzniklého při zobrazování čočkou lze určit pomocí zobrazovací rovnice. Pokud je x vzdálenost předmětu a x' vzdálenost obrazu od středu čočky, má zobrazovací rovnice tvar

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{x'} = \pm \frac{1}{f},$$

přičemž kladné znaménko platí pro spojky a záporné pro rozptylky. Tvar zobrazovací rovnice je stejný, jako pro kulová zrcadla.

Lomivé schopnosti čočky lze vyjádřit také pomocí veličiny zvané optická mohutnost D , která je definována vztahem:

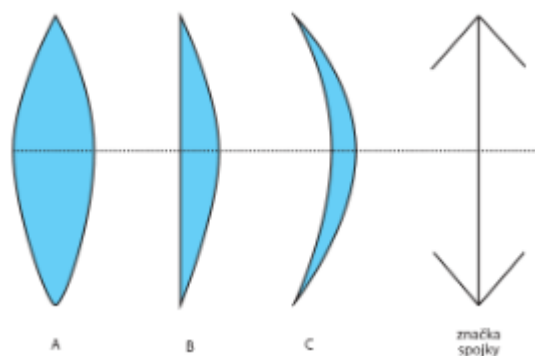
$$D = \frac{1}{f}.$$

Jednotkou optické mohutnosti jsou dioptrie (D). Spojné a rozptylné čočky se mohou kombinovat. Je-li výsledná optická mohutnost $D > 0$, je optická soustava spojná, je-li $D < 0$, je soustava rozptylná.

Při zobrazování spojkou vznikne reálný převrácený obraz na opačné straně čočky, než se nachází předmět. Pokud se však předmět umístí mezi ohnisko a čočku, vznikne virtuální obraz na téže straně čočky a se stejnou orientací jako předmět. Spojka tedy může vytvářet reálný i virtuální obraz v závislosti na umístění předmětu. Při zobrazování rozptylkou vzniká vždy obraz virtuální a stejně orientovaný jako předmět,

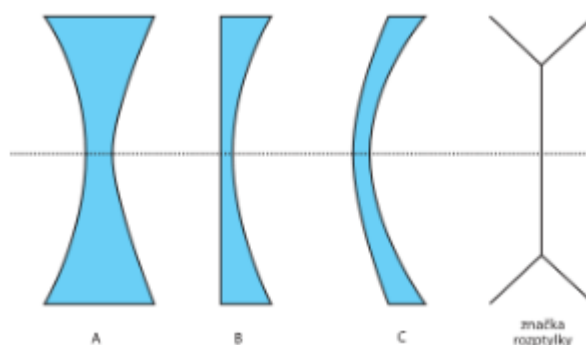
nezávisle na umístění předmětu. Virtuální obraz vždy leží na téže straně čočky jako předmět.

Spojné čočky jsou uprostřed silnější než na okrajích a mají vždy jeden vypuklý povrch. Rozlišují se spojky dvojevypuklé, ploskovypuklé a dutovypuklé.



Obrázek 2.4: Spojky: A - dvojevypuklá, B - ploskovypuklá, C - dutovypuklá [7]

Rozptylné čočky jsou naopak uprostřed tenčí než na okrajích a mají alespoň jeden povrch dutý. Rozlišují se zde rozptylky dvojduté, ploskodutá a vypuklodutá. [7], [9], [8]



Obrázek 2.5: Rozptylky: A - dvojdutá, B - ploskodutá, C - vypuklodutá [7]

Lomivé vlastnosti oka

Oko lze považovat za centrovanou spojnou optickou soustavu. Paprsky přicházející rovnoběžně do oka jsou lámány do zadního ohniska v oblasti fovey centralis, kde vzniká obraz pozorovaného předmětu. Fovea centralis je zároveň oblastí nejostřejšího vidění. Obraz vytvářený na sítnici je reálný, zmenšený a převrácený.

Protože se jedná o složitou strukturu, celková optická mohutnost oka nelze určit pouhým součtem mohutností jeho jednotlivých optických částí. Průměrná optická mohutnost celé soustavy se udává jako +60 D. Optická mohutnost čočky se však

Prostředí	Index lomu
Rohovka	1,37
Komorová voda	1,33
Čočka	1,42
Sklivec	1,33

Tabulka 2.1: Tabulka lomu. [1]

může měnit. To je možné díky její schopnosti akomodace, která je popsána v první kapitole práce.

Oko se skládá z několika opticky rozdílných prostředí. Světlo vytvářející obraz na sítnici prochází postupně čtyřmi optickými částmi s různými indexy lomu: rohovkou, komorovou vodou, čočkou a sklivcem. Hodnotu indexu lomu jednotlivých prostředí uvádí tabulka.

Čočka má různý poloměr křivosti zadní a přední stěny a neexistuje proto pro čočku jednotný index lomu. Index se zvětšuje směrem od povrchu do dovnitř čočky a pro praktickou potřebu je používán průměrný index lomu celé čočky. [1], [8], [7]

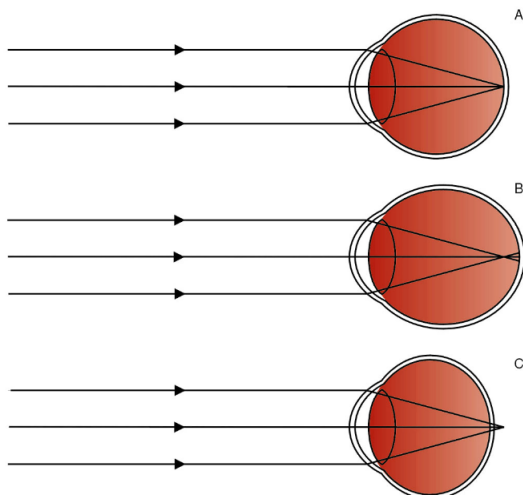
2.4.3 Oční vady a jejich korekce

Podmínkou správného vidění je, aby byl optický systém oka schopen vytvořit na sítnici ostrý obraz pozorovaného předmětu. K zajištění této podmínky musí být obrazem bodu opět bod a onen obraz musí vzniknout na sítnici. Při nesplnění prvního faktoru se jedná o astigmatismus, při nesplnění druhého pak o krátkozrakost či dalekozrakost. Pro všechny tři oční vady existuje souhrnný název amteropie. Oko, které nemá žádnou optickou vadu, se označuje jako emetropické. Nejběžnější ametropií je krátkozrakost (myopie). Při krátkozrakosti se světelné paprsky protínají před sítnicí. Pokud se bude předmět k oku přibližovat, místo soustředění světelných paprsků se bude posouvat směrem k sítnici a při určité blízkosti předmětu začne krátkozraký člověk vidět ostře. Naopak při dalekozrakosti (hyperopii) se světelné paprsky sbíhají až za sítnicí.

Při astigmatismu má rohovka, popřípadě čočka nepravidelnosti, které způsobují, že se lomivost v určitých směrech může odlišovat. Člověk postižený astigmatismem pak může například vidět vertikální linie ostře, kdežto horizontální rozmazaně.

K tomu, aby obraz vznikl na sítnici, oko využívá schopnost akomodace. Pojem vzdálený bod je definován jako vzdálenost od oka, ve které oko vidí správně bez akomodace. Naopak blízký bod je taková vzdálenost, při které vidí oko ostře za maximální akomodace. Blízký bod se nachází zdravého oka 25 cm před okem. Daleký bod se u zdravého oka nachází v nekonečnu.

U krátkozrakého oka je vzdálený bod v konečné vzdálenosti před okem a blízký bod je posunutý k oku. Krátkozraké oko vidí ostře jen předměty umístěné v konečné vzdálenosti menší, než je vzdálenost vzdáleného bodu. Obraz vzdálenějších předmětů



Obrázek 2.6: A - emetropické oko, B - krátkozraké oko, C - dalekozraké oko. [2]

vzniká před sítnicí. Důvodem krátkozrakosti je buď příliš velká délka oční koule nebo příliš velká lomivost optického systému.

U dalekozrakého oka je vzdálený bod je v nekonečnu a blízký bod je ve větší vzdálenosti od oka. Vstupující rovnoběžné paprsky se následkem toho lámou do ohniska, které se nachází za bulbem a vzniká tak obraz předmětu umístěný v nekonečnu za sítnicí. Optická mohutnost oka je vzhledem k jeho délce příliš malá.

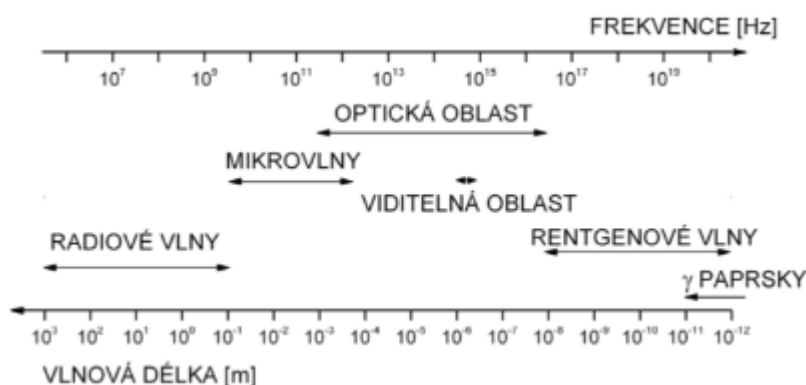
Korekce refrakčních vad se provádí brýlemi, jejichž čočky jsou umístěny zhruba 12 mm před rohovku, nebo kontaktními čočkami přiloženými k rohovce. Krátkozrakost se koriguje rozptylkami. Protože vzdálený bod je u krátkozrakého oka blíže než v nekonečnu, je potřeba pomocí čočky zajistit, aby oko vidělo předměty v nekonečnu ostře bez akomodace. Korekce dalekozrakosti se provádí spojkami. Refrakční vady se dají korigovat též operační cestou využitím laserového záření. [7], [2], [5], [1], [8]

3

Světlo

Světlo je úzká část ve spektru elektromagnetického vlnění, na kterou je citlivé lidské oko. Hranice této viditelné oblasti nejsou přesně definovány. Nachází se v rozmezí vlnových délek 430-690 nm, avšak lidské oko může vnímat i vlnové délky za těmito hranicemi, pokud je intenzita světla dosti velká. Viditelné světlo přináší informaci o okolním světě na fotoreceptory lidského oka a vyvolává zrakový vjem. Světlo je tak podnětem i prostředkem vidění.

Celé elektromagnetické vlnění je široké spektrum sahající od vlnových délek gama záření v řádu 10^{-14} m až po vlnové délky rádiového záření v řádu 10^4 m. Ačkoli je spektrum rozdělené na jednotlivé oblasti, které jsou ohraničené svou horní a dolní vlnovou délkou, stupnice má ve skutečnosti otevřené konce. Vlnové délky elektromagnetických vln nemají žádnou spodní ani horní hranici. V elektromagnetickém spektru nejsou žádné mezery a všechny elektromagnetické vlny se ve vakuu šíří stejnou rychlostí $c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obrázek 3.1: Spektrum elektromagnetického vlnění. [10]

Každé elektromagnetické vlnění je jednoznačně určeno svou frekvencí a vlnovou délkou. Vlnová délka se definuje jako vzdálenost mezi dvěma sousedními vrcholy vln a je nepřímo úměrná frekvenci. Pro vlnovou délku λ platí následující vztah:

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

kde c je rychlost světla ve vakuu a f je frekvence. Pro vlnovou délku je využívána

především jednotka nanometr (nm). Určitá vlnová délka odpovídá při vnímání určité barvě světla. Barvy se směrem od nižších hodnot vlnové délky mění v následujícím pořadí: fialová - indigo - modrá - zelená - žlutá - oranžová - červená. Pokud vyzařované světlo obsahuje pouze jednu vlnovou délku, označuje se jako světlo monochromatické. Zdrojem monochromatického světla je například laser.

Laser je zdroj světla vysílající koherentní světlo, jehož vlny mají konstantní, časově neproměnný fázový rozdíl. Světelné vlny jsou tedy nejen monochromatické, ale mají rovněž stejnou fázi. Laserové záření je nerozbíhavé, což umožňuje vyšší bodovou nebo čárovou fokusaci světla a mnohem vyšší intenzity osvitů. Díky své vysoké intenzitě má laserové záření specifické účinky a v lékařské praxi je využíváno především pro svoje tepelné účinky. Pomocí laserového záření lze například odstranit krátkozrakost a dalekozrakost. [7], [2], [9], [8]

3.1 Záření látek

Veškerá tělesa emitují zářivou energii. Tepelný pohyb v látce v ní vyvolá excitaci atomů či molekul, tím se zvýší celková energie elektronů atomových obalů a při deexcitaci je tato energie vyzářena ve formě kvanta elektromagnetického záření. Spektrum záření emitovaného pevnými látkami je spojitě a zářivá energie se šíří od zdroje do všech směrů.

Zářivou energii popisujeme pomocí dvou zákonů. Stefan-Bolzmannův zákon udává celkovou intenzitu záření H jako:

$$H = \sigma T^4,$$

kde $\sigma = 5,67374419 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ je Stefan-Bolzmannova konstanta a T termodynamická teplota. Intenzita záření je definována jako energie, která projde jednotkou plochy orientované kolmo na směr šíření za jednotku času. Udává se v $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Wienův zákon poté udává vlnovou délku λ_{max} nejvíce zastoupenou ve spojitěm spektru absolutně černého tělesa. Platí pro ni vztah:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T},$$

kde T je teplota tělesa a $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ Wienova konstanta.

Za jednotku času projde určitou plochou část zářivé energie, která se značí jako zářivý tok Φ . Světelný tok Φ_S pak vyjadřuje intenzitu zřakového vjemu normálního oka, která je vyvolána energií světelného záření, které projde za jednotku času určitou plochou v prostoru, jímž se světlo šíří. Jednotkou světelného toku je lumen (lm).

Světelná účinnost záření K se definuje jako poměr světelného toku k zářivému toku, tedy:

$$K = \frac{\Phi_S}{\Phi}.$$

Jednotkou je $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$. Vzhledem k různé citlivosti oka na různé vlnové délky je světelná účinnost funkcí vlnové délky světla.

Svítivost S světelného zdroje je světelný tok vysílaný zdrojem do jednotkového prostorového úhlu. Je dána vztahem:

$$S = \frac{d\Phi_S}{d\omega},$$

kde $d\omega$ je prostorový úhel a $d\Phi_S$ je tok světelného zdroje vyzařující do prostorového úhlu $d\omega$. Jednotkou je kandela (cd). Obecně je svítivost v různých směrech různá a u plošného zdroje světla klesá s rostoucím úhlem ve směru odchýleném od kolmého směru. Svítivost ve směru normály se značí S_n . Svítivost S_α ve směru odchýleném od směru normály o úhel α pak bude:

$$S_\alpha = S_n \cos \alpha.$$

Tento vztah se nazývá Lambertův zákon. Svítivost je definována pro bodový zdroj. Je-li zdroj plošný, definuje se jas plochy J jako:

$$J = \frac{S_n}{dP},$$

kde dP značí velikost této plochy. Jednotkou je $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Dopadá-li na plochu světelný tok Φ_S , pak je intenzita osvětlení plochy v určitém místě světelný tok vztahovaný na jednotku plochy. Intenzita osvětlení se značí E a platí:

$$E = \frac{d\Phi_S}{dP}.$$

Intenzita osvětlení plochy E je závislá na úhlu odchýlení od kolmého směru dopadajících paprsků. Rovněž platí, že s rostoucí vzdáleností této plochy od zdroje světla intenzita osvětlení rychle klesá. Jednotkou je lux (lx). Nejlépe je plocha osvětlena, pokud paprsky dopadají kolmo na ni. Pokud jsou paprsky s plochou rovnoběžné, je osvětlení plochy nulové. Lidské oko je schopno detekovat předměty již při intenzitě osvětlení $3\cdot 10^{-5}$ lx. [7], [8]

3.2 Vnímání světla okem

V přírodě má viditelné světlo význam při fotosyntéze, která je základním procesem udržujícím na Zemi život. Při fotosyntéze je využívána energie slunečního záření k syntéze jednoduchých organických látek na energeticky bohaté sloučeniny – cukry.

U živých organismů má světlo velký význam pro mnoho životních funkcí a také pro jejich periodicitu. U člověka navíc světelné podněty ovlivňují psychiku a tělesné reakce. Použitím vhodného osvětlení lze člověku vytvořit příznivé psychologické podmínky. Z fyziologického hlediska se zkoumají například změny tlaku, tepové frekvence, dechové frekvence a sledování změn rovnováhy těla.

Lidské oko má různou citlivost na záření o různých vlnových délkách. Zatímco infračervené a ultrafialové světlo nevyvolávají zrakový vjem, v rozmezí vlnových délek 380-760 nm k vjemu světla dochází. Paprsky kratší než 380 nm jsou pohlcovány čočkou. Oko je nejcitlivější na vlnové délky ležící uprostřed tohoto intervalu, kde se nachází žlutozelené světlo o vlnové délce 555 nm. Schopnost rozlišovat jednotlivé barvy světla je výhodná při pohybu v prostředí. Například při snaze lokalizovat určitý předmět v prostoru může barva nalezení předmětu velmi usnadnit.

Lidské oko obsahuje fotoreceptory, které dovedou vybrat a zachytit právě tuto oblast elektromagnetického záření. Citlivost na světlo je výhodná, protože v prostředí, ve kterém se pohybujeme je viditelného světla dostatek. Oproti tomu je například ultrafialové záření z velké části absorbováno v atmosféře.

Světlo není jedinou formou energie, kterou je dokáže člověk zachytit. Mezi důvody, proč se člověk spoléhá na tuto informaci, je například to, že se světlo šíří prostředím velmi rychle. Díky tomu můžeme získávat informace o vzdálených podnětech prakticky v čase, kdy se odehrály. Dalším důvodem je to, že se světlo šíří přímočaře. To znamená, že se základní geometrické vlastnosti objektu při přenosu a kontaktu s receptory zachovávají.

Světlo se rovněž při dopadu na povrch většiny předmětů z části absorbuje a částí odrazí zpět do prostoru, tedy i do oka. Díky tomu je možné získat nejen informaci o přítomnosti objektu, ale také informaci o jeho struktuře. Záření odlišných vlnových délek interaguje s povrchy předmětů velmi různě. [2], [1], [11]

3.3 Barevné vidění

K vnímání intenzity světla a rozlišování barev slouží fotoreceptory – tyčinky a čípky umístěné v sítnici. Jedná se o receptory elektromagnetického vlnění o vlnových délkách v rozmezí 430-690 nm.

Tyčinky i čípky obsahují pigment rhodopsin. Jedná o chemickou sloučeninu, která reaguje na světlo. Skládá se ze složky absorbující světlo, chromatoforu a z bílkoviny opsinu. V důsledku chemických dějů vyvolaných ozářením se mění membránový potenciál světločivé buňky. Tím dojde ke vniku nervového vzruchu, který mozek vnímá jako optický vjem. Čípky obsahují tři odlišné formy rhodopsinu, které se liší maximální citlivostí k různým vlnovým délkám viditelného světla. První druh čípků je citlivý na červenou barvu, druhý druh je citlivý na zelenou barvu a třetí druh na modrou barvu. Čípky jsou jedinečné tím, že zajišťují vnímání barev. Tyčinky reagují na nižší intenzitu osvětlení než čípky. Nejsou citlivé na červenou barvu a zajišťují vidění za tmy.

Barva je složena ze tří atributů, které odpovídají fyzikálním vlastnostem světla. Barevný tón se vztahuje pouze ke spektrálním barvám. Jiný barevný tón mají například modrá a zelená, ale nikoli oranžová a hnědá. Vztah mezi barevným tónem a vlnovou délkou je zatížen tím, že většina dopadajícího světla není monochromatická. Barevný tón tedy poskytuje nejzákladnější určení barvy a může mít různé

hodnoty jasů. Jas je vnímaným doprovodem intenzity světla při dopadu na sítnici. Platí, že čím je intenzita vyšší, tím je barva jasnější. Vnímaná barva se se zvyšujícím jasnem blíží k bílé barvě a se snižujícím k černé barvě. Posledním atributem je sytost, která představuje množství určitého spektrálního tónu ve vnímané barvě. Určuje, jaký je v barvě podíl tónu a jaký je zde podíl neutrální barvy. Monochromatické světlo je přitom nejvíce saturované a přidáváním bílého světla se jeho sytost snižuje.

Okem jsou rozlišovány barvy na základě tzv. trichromatické teorie. Ta říká, že kombinací základních tří barev červené, zelené a modré v různém poměru, je možné napodobit kteroukoli barvu. Při rovnoměrném podráždění všech tří barev vnímáme barvu bílou, při podráždění jen některého konkrétního čípku vznikne vjem příslušné základní barvy.

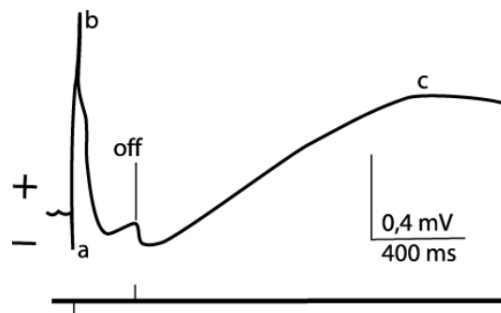
Později bylo proměřením absorpčních křivek čípkových segmentů lidské sítnice zjištěno, že sítnice obsahuje tři druhy čípků. Jejich maximální citlivost odpovídá vlnovým délkám 440, 535 a 565 nm, přičemž lidský zrak je schopen rozeznat rozdíl vlnové délky 1 nm. Pigment citlivý na červenou barvu má absorpční maximum v oblasti barvy žluté, nicméně je na červenou barvu mnohem citlivější než na ostatní pigmenty. [7], [2]

3.3.1 Elektrofyziologie barevného vidění

Elektroretinogram (ERG) je světlem vyvolaný záznam elektrické odpovědi fotoreceptorů a nervových buněk sítnice. Tato elektrická odpověď je důsledkem změn pohybu iontů v sítnici při osvětlení.

Elektroretinogram využívá rozdílného elektrického náboje rohovky (+) a sítnice (-), které jsou podstatou klidového potenciálu sítnice. Potenciál má charakteristický průběh a je složen ze tří komponent. Po osvětlení sítnice se nejprve objeví negativní vlna „a“, po ní následuje pozitivní vlna „b“ s obvykle vyšší amplitudou. Po ukončení osvětlení se dostaví pozitivní výkyv a následuje prodloužená pozitivní vlna „c“.

Vlna „a“ je pozdní receptorový potenciál tyčinek a čípků, vlna „b“ je vyvolána činností bipolárních buněk a vlna „c“ je zprostředkována aktivitou buněk pigmentového epitelu sítnice. Na ERG potenciálu se však nepodílejí gangliové buňky ani zrakový nerv.



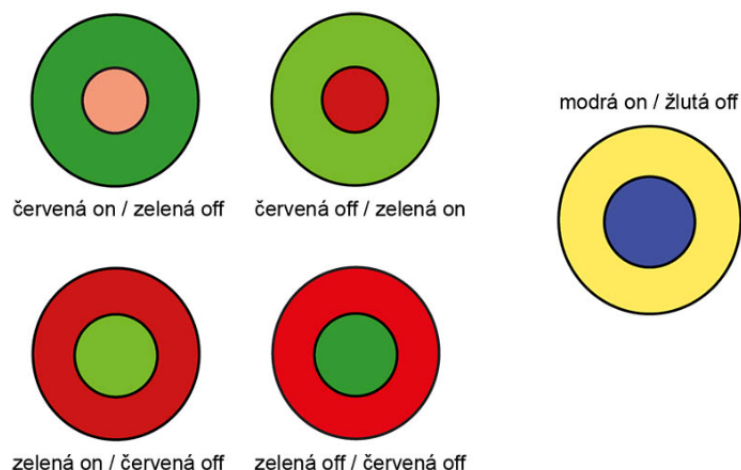
Obrázek 3.2: Záznam elektroretinogramu. [1]

Barevná informace se nejprve zpracovává v sítnici, kde jsou horizontálními buňkami přijímány signály z čípků. Horizontální buňky se vyznačují elektrickými potenciály, tzv. S-potenciály v odpovědi na stimulaci sítnice různými složkami barevného světla. Existují dva typy horizontálních buněk: L-typ, který reaguje na celé viditelné spektrum rovnoměrně a intenzita této reakce se zvyšuje úměrně s intenzitou osvětlení. Druhým typem je C-typ, který reaguje pouze na určitou složku spektra.

Bipolární buňky na podráždění odpovídají dvojím způsobem. Na dopad světla do vnitřní části reaguje bipolární buňka zvýšením aktivity vyjádřené jako změna frekvence akčního potenciálu. Dopadem světla do vnější části aktivita naopak klesá.

Velmi podobný systém existuje i u gangliových buněk. Ty se vyznačují on-reakcemi na začátku osvětlení a off-reakcemi po vypnutí světla. Tyto odpovědi jsou obdobné S-potenciálům horizontálních buněk. Při osvětlení centra receptivního pole jednou určitou barvou gangliové buňky zvyšují svoji aktivitu a při osvětlení periferie pole aktivitu sníží. Na osvit doplňkovou barvou reagují tytéž buňky opačně. Druhý typ gangliových buněk však reaguje jen na osvětlení jednou barvou a pouze zvyšuje svoji aktivitu při osvětlení centra receptivního pole a snižuje ji při osvětlení periferie.

On a off-reakce gangliových buněk souvisí s teorií oponentního procesu. Tato teorie se zakládá na výběru tzv. čistých barev, které nemohou vzniknout kombinací jiných barev. Jedná se o červenou, žlutou, zelenou a modrou barvu. Některé z čistých barev lze vzájemně kombinovat, jiné nikoli. Výskyt červené barvy se vzájemně vylučuje s výskytem zelené barvy, obdobně se vylučuje kombinace modré a žluté barvy. Tyto dvojice barev se označují jako oponentní. [3], [7], [2]



Obrázek 3.3: Činnost buněk při zpracovávání informace o barvě. [3]

3.3.2 Poruchy barvocitu

Barvocit, schopnost oka správně vnímat barvy, může být narušen. Tento stav se nazývá barvoslepost. Ta může být úplná nebo částečná. Poruchy barvocitu dělíme na získané a vrozené, dále je rozlišujeme podle stupně postižení barevného vidění a podle toho, která barva je vnímána chybně. Úplná barvoslepost se pojí s dalšími vadami. Je obvykle dědičná a současně s ní bývá porušena centrální zraková ostrost. U barvosleposti se většinou jedná o poruchu čípků, které nemusí být v sítnici přítomny. V takovém případě se hovoří o monochromazii. Při barvosleposti jsou barvy vnímány jen v odstínech šedé jako na černobílé fotografii.

Ztrátu nebo oslabení vnímání některé barvy mohou způsobit některé toxické látky nebo vzniká na základě dědičné poruchy tvorby příslušného zrakového pigmentu. Porucha barvocitu, při které není rozlišována jedna ze základních barev, se nazývá dichromazie. Dichromazie se dělí na protanopii – porucha vidění červené barvy, deuteranopii - porucha vidění zelené barvy a tritanopii – porucha vidění modré barvy. U částečné se nejčastěji jedná o poruchu vnímání zelené a červené barvy.

Dalším typem poruchy barevného vidění je anomální trichromazie. Při této poruše je změněn poměr vnímání základních barev. Anomální trichromazie se dělí podle toho, u které ze základních barev je vnímání oslabeno.

Tyčinky v sítnici umožňují rozlišit hodnotu intenzity světla dopadajícího na sítnici. Pokud není organismem vytvářeno dostatečné množství pigmentu rhodopsinu, který je obsažen v tyčinkách, dochází k poruše zvané šeroslepost. Šeroslepost způsobuje zhoršenou adaptaci na tmu. [7], [2], [1], [11]

3.4 Citlivost a adaptace oka

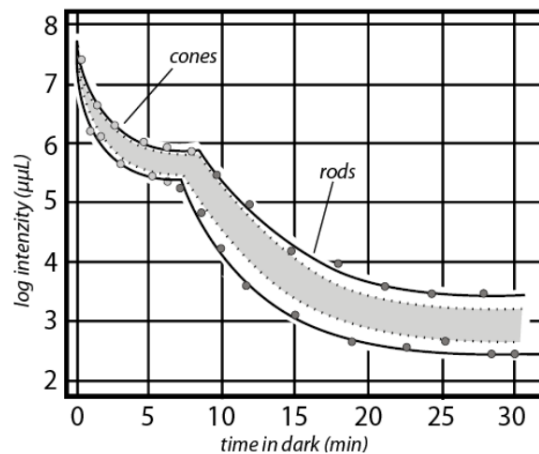
Sítnice je nestabilní, její percepční vlastnosti se mění v závislosti na čase a podle stupně osvětlení. Za soumraku se zvyšuje citlivost oka pro kratší vlnové délky. Červenou barvu tedy rozeznáváme za sníženého osvětlení hůře než modrou.

Při dostatečně velkých intenzitách světla má křivka citlivosti maximum u vlnové délky 555 nm. Intenzita osvětlení se ale během denní doby i v závislosti na dalších podmínkách mění. Proto jsou rozeznávány tři oblasti vidění. Fotopické, skotopické a mezopické vidění.

1. Fotopické vidění odpovídá jasu většímu než $10^2 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Jedná se o oblast denního vidění při dostatečném osvětlení. Křivka citlivosti pro různé vlnové délky je stabilní a má maximum u vlnové délky 555 nm. Adaptace oka na světlo je rychlá, pohybuje se v rozmezí 20-60 s. Fotopické vidění je barevné vidění a je zajištěno převážně čípkami.
2. Skotopické vidění odpovídá jasu menšímu než $10^{-3} \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Skotopické vidění je oblast nočního vidění. Křivka citlivosti pro různé vlnové délky je stabilní,

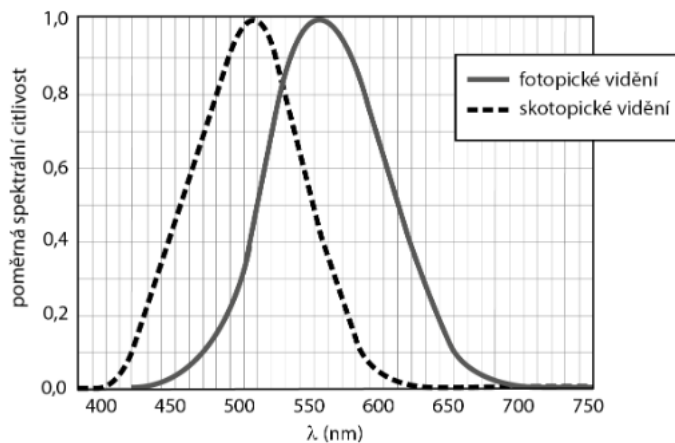
ale její maximum je posunuto zhruba o 50 nm směrem ke kratším vlnovým délkám. Vidění zprostředkovávají především tyčinky a vnímány jsou pouze změny v intenzitě osvětlení. Při této hladině osvětlení oko barvy nerozeznává. Adaptace na tmu je pomalá a úplné adaptace se dosáhne až po 40-60 minutách.

Vyjádřením závislosti prahové citlivosti na čase lze získat dvoufázovou křivku adaptace na tmu. Adaptační křivka se skládá ze dvou částí. V první části se citlivost sítnice zvyšuje 100krát a nazývá se rychlou fází nebo čípkovou adaptací sítnice. Druhá část křivky je pozvolnější, trvá 40-60 minut a citlivost sítnice se zvýší až 100 000krát. Tato část křivky se nazývá tyčinková.



Obrázek 3.4: Adaptační křivka. [1]

- Mezopické vidění odpovídá jasu v rozmezí 10^{-3} až $10^2 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Citlivost v této oblasti závisí na osvětlení a nelze zkonstruovat její křivku. Vidění zprostředkovávají tyčinky i čípky. Při vyšších intenzitách světla zajišťují vidění čípky, při nižších intenzitách citlivost čípků klesá a citlivějšími se stávají tyčinky.

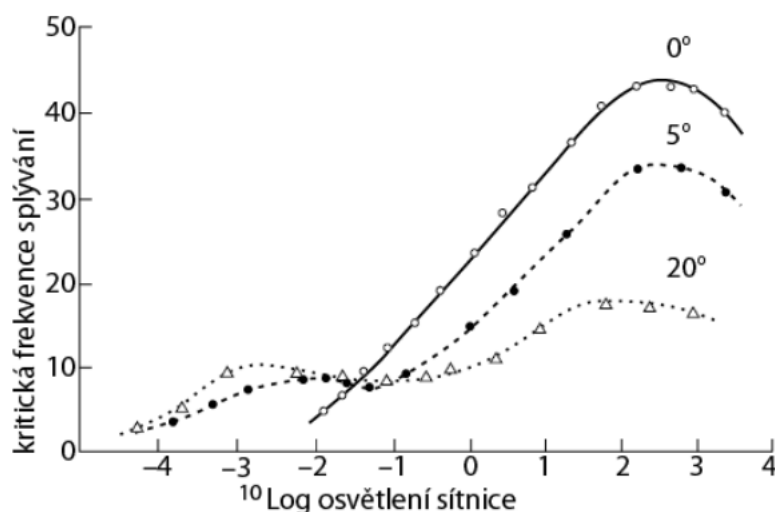


Obrázek 3.5: Fotopické a skotopické vidění. [11]

Receptory lidského oka dovedou zachytit podněty z širokého rozpětí světelných intenzit. Například bílý papír má za svitu hvězd jas $10^{-4} \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ a v přímém slunečním svitu $10^4 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. [1], [7]

3.4.1 Rozlišování podnětů v čase

Pro oko existuje jistá kritická frekvence splývání. Kritickou frekvencí je taková rychlost následných podnětů, kdy již jednotlivé podněty nelze rozlišit. Využívá se například ve filmu, kdy jsou jednotlivé obrázky za sebou promítány rychlostí, která převyšuje frekvenci splývání. Hodnota kritické frekvence splývání závisí na jasu podnětu a platí, že čím vyšší je jas, tím vyšší frekvence. V případě foveolárního vidění je tato závislost v určitém rozmezí lineární (Ferryův-Porterův zákon). Rozlišení předmětů závisí i na šíři zornice. Maximum kritické frekvence je při optimálním osvětlení 50-60 podnětů za sekundu. Ve skotopických podmínkách se snižuje až na 5 podnětů za sekundu. Na následující obrázku lze vidět, jak ovlivňuje místo osvětlení kritickou frekvenci splývání. V případě periferního vidění už není tato křivka lineární, ale skládá se ze dvou částí, přičemž první odpovídá tyčinkám a druhá čípkům. [1]



Obrázek 3.6: Závislost kritické frekvence splývání na intenzitě a místě osvětlení sítnice. [1]

4

Praktická část

Praktická část práce se skládá z pěti pokusů z oblasti fyzikální optiky. K pokusům je využit měřicí systém od firmy Vernier, který je určen pro využití na školách. Praktická část se věnuje především práci s jednotlivými pomůckami. Je zde popsáno několik čidel a softwarů Graphical Analysis a Spectral Analysis, jež byly při pokusech použity. Veškeré návody lze dohledat také na stránkách Vernier.cz. [12] K prvním dvěma pokusům je připraven pracovní list, k dalším jsou návody v tzv. Kuchařce pro začátečníky. [12] Všechna uvedená měření je vhodné provádět v zatemněné místnosti. Kromě měřicího systému Vernier jsou potřebné další laboratorní pomůcky. Ty lze získat například z různých dalších laboratorních sad, které se na škole nacházejí, nebo dokoupit přímo od firmy Vernier. Sestavování podle uvedených schémat se tedy může zkomplikovat tím, jakými konkrétními pomůckami daná škola disponuje.

4.1 Vernier

Firma Vernier nabízí desítky různých senzorů pro využití v biologii, fyzice a chemii. Tým Vernieru tvoří více než sto zaměstnanců a je složen z mnoha bývalých pedagogů. Produkty jsou díky tomu vyvinuty přímo na základě potřeb učitelů. Vernier poskytuje též akreditovaná školení a technickou i metodickou podporu. Provádět měření je možné v terénu i v laboratoři a experimenty jsou určeny jak pro základní, tak i pro střední školy. Vernier nabízí také různé didaktické materiály ve formě videí, návodů a pracovních listů. Jedním z didaktických materiálů je zmíněná Kuchařka pro začátečníky, vychází také v papírové podobě a momentálně čítá pět dílů. Kuchařka s každým pokusem obsahuje návod a ukázkou naměřených dat.

U některých pokusů existují dvě verze. Jedna s využitím starších čidel a datalogeru s displejem a druhá verze, která využívá modernější typ čidel Go Direct a software v počítači. Čidla i způsoby zobrazení naměřených dat lze mezi sebou kombinovat, takže starší čidla je k softwaru také možné připojit. [13], [12]

4.1.1 Měřicí systémy

Vybavení pro realizaci pokusů lze rozdělit do tří základních skupin – senzory, rozhraní s programem určeným ke zpracování dat a ostatní pomůcky. Senzory slouží k získávání dat měření. Tyto senzory je pak nutné připojit k rozhraním určeným ke zpracovávání dat. Jedním z rozhraní je datalogger, který může obsahovat vlastní displej a slouží k přímému zpracování dat. Příkladem takového dataloggeru je LabQuest 3. Lze k němu připojit několik senzorů současně a to po drátu i bezdrátově a naměřená data může pomocí zabudovaných nástrojů analyzovat i vizualizovat. Datalogger s displejem se hodí především pro práci v terénu. Dále existují rozhraní určená pro připojení k počítači se staženým softwarem pro zpracování dat. Tato rozhraní již nemají vlastní displej. Mohou se lišit například v počtu vzorků, které zvládnou za daný čas zpracovat. Datalogger s displejem je rovněž možné připojit k počítači a naměřená data do něho přenášet.

U novějších senzorů je možnost připojení přímo k softwaru v počítači pomocí USB kabelu nebo bezdrátově pomocí Bluetooth bez nutnosti využití rozhraní. Novější senzory také umožňují měřit více fyzikálních veličin zároveň, přičemž při připojení senzoru stačí vybrat, která veličina bude měřena. Novějším typem senzorů, které lze připojovat bezdrátově jsou například Go Direct čidla.

Již zmíněný software, který lze stáhnout do počítače, slouží ke zpracovávání dat bez použití dataloggeru. K novějšímu typu čidel tedy stačí pro měření pouze stáhnout tento software, který je dostupný na stránkách Verniera. Existují celkem tři softwary – Graphical Analysis, Spectral Analysis a Instrumental Analysis, z nichž každý slouží ke zpracovávání dat z různých čidel.

Graphical Analysis umožňuje měřit pomocí senzorů desítky veličin a naměřená data zpracovávat i vizualizovat. Pomocí Graphical Analysis byla zpracována data ze senzorů Go Direct Light and Color a Light Sensor LS-BTA. Senzor Go Direct Light and Color je bezdrátové čidlo, kterým lze měřit intenzitu světla, UV záření a funguje rovněž jako RGB senzor. Čidlo využívá křemíkovou fotodiodu, která vytváří napětí úměrné intenzitě dopadajícího světla. Spektrální odezva pak přibližně kopíruje citlivost lidského oka.



Obrázek 4.1: Light and Color. [13]

Pro připojení se čidlo nejprve zapne krátkým stisknutím tlačítka pro zapnutí respektive vypnutí přístroje. Na počítači je potřeba mít zapnuté Bluetooth a spustit aplikaci Graphical Analysis. Dále se vybere možnost *Měření pomocí senzorů*, čímž se otevře seznam nalezených čidel. Čidlo, se kterým se bude měřit se ze seznamu vybere kliknutím na *Připojit* a vše se potvrdí tlačítkem *Hotovo*.



Obrázek 4.2: Připojení čidla

Senzor Light Sensor LS-BTA funguje obdobně jako čidlo Go Direct Light and Color. Umožňuje však zkoumat osvětlení v širokém rozmezí světelných podmínek díky třem měřicím rozsahům. Na rozdíl od novějších senzorů typu Go Direct nelze připojit k aplikaci na počítači pomocí Bluetooth. K připojení se zde využije USB kabel a dále se pokračuje stejně jako u Go Direct čidel.



Obrázek 4.3: Light Sensor. [13]

Spectral Analysis je specializovaná aplikace pro studium spekter. Lze díky ní zpracovávat data ze senzoru Go Direct SpectroVis, který byl využit při měření. Pro měření emisních spekter je potřeba dokoupit optické vlákno, které se vloží do kyvetové šachty na spektroskopu.



Obrázek 4.4: SpectroVis. [12]

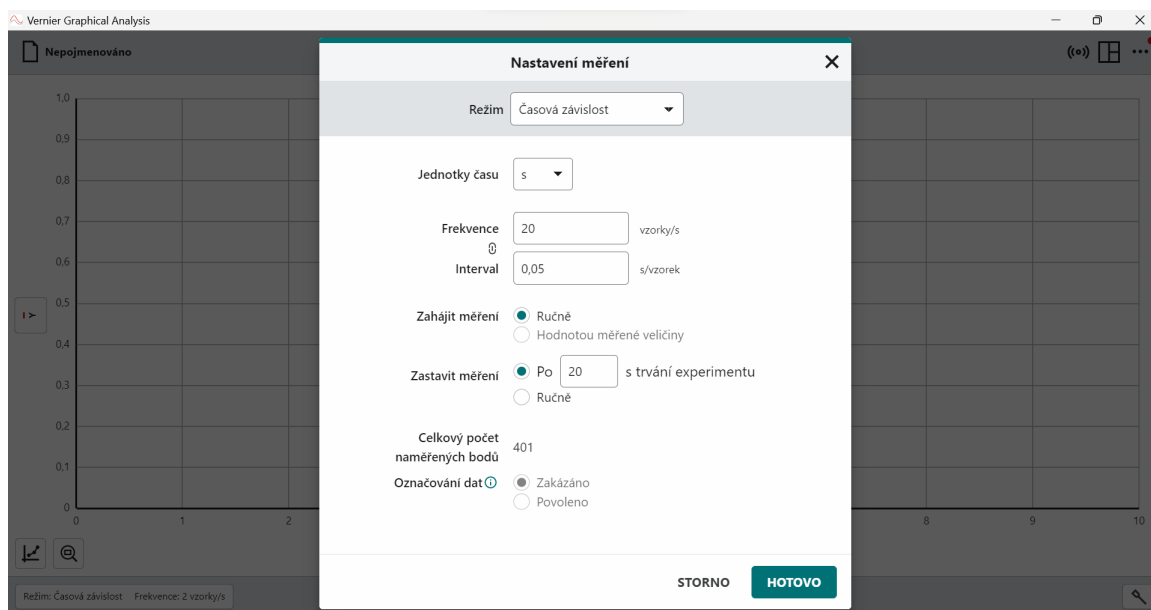
Pro připojení se spektrometr zapne krátkým stisknutím tlačítka na boku přístroje. LED indikátor poté začne zeleně svítit. Na počítači je potřeba mít zapnuté Bluetooth a spustit aplikaci Spectral Analysis. Z nabídky se poté vybere požadovaný režim měření. V seznamu nalezených čidel se čidlo připojí pomocí ikony *Připojit* a vše se potvrdí tlačítkem *Hotovo*. [12]

4.2 Difrakce světla

Při difrakci světla dochází k vychýlení světla z přímočarého směru šíření a na stínítku v důsledku toho vzniká ohybový obrazec. Cílem tohoto pokusu je vytvořit ohybový obrazec na stínítku pomocí optické mřížky.

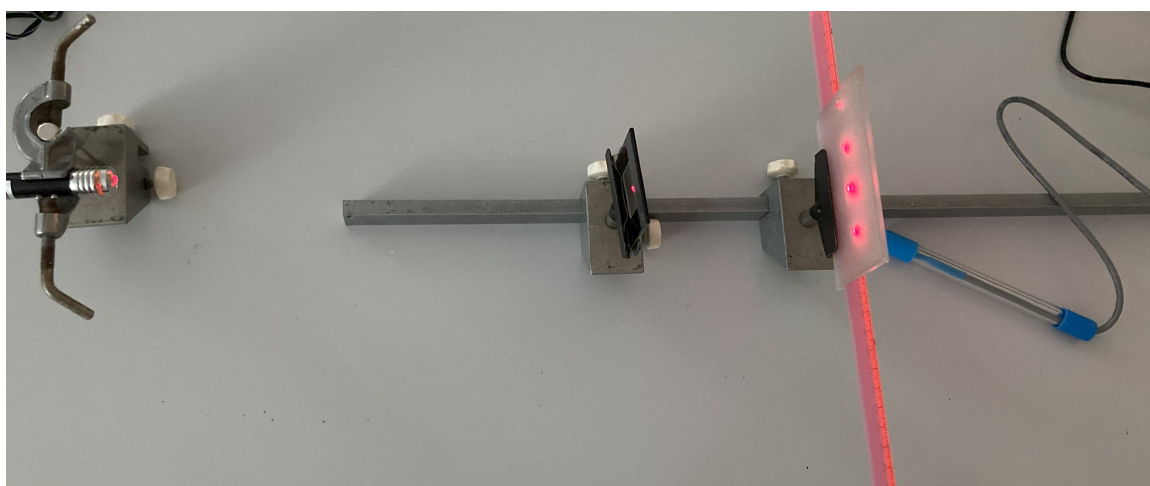
Pomůcky: Využitými pomůckami od firmy Vernier jsou zde Light Sensor LS-BTA a software Graphical Analysis. Namísto softwaru v počítači lze využít například Datalogger s displejem, který dovede data zpracovat bez nutnosti stahování softwaru. Čidlo Light Sensor LS-BTA je možné nahradit modernějším čidlem Go Direct Light and Color. Ostatními potřebnými pomůckami jsou laser, rozptylka, stínítko vyrobené z mléčného skla a lišta, která lze přidělat ke stínítku. V pracovním listu dostupném na stránkách Verniera je na mřížce uvedeno označení M-1b. Tato konkrétní mřížka se na univerzitě nenacházela, nicméně k měření poslouží i jiná mřížka s více podélnými štěrbinami. Jako lišta zde bylo použito pravítko.

Postup měření: Nejprve se čidlo připojí k aplikaci Graphical Analysis. U čidla Light Sensor je toto nutné provést pomocí USB kabelu. Návod na připojení čidla k aplikaci je popsán výše. Po připojení čidla se v aplikaci nastaví měření v dolním levém rohu – *Časová závislost: frekvence* na 20 vzorků za sekundu, *Zastavit měření* po 20 s trvání experimentu. Zvolí se zobrazení Graf.



Obrázek 4.5: Nastavení časové závislosti.

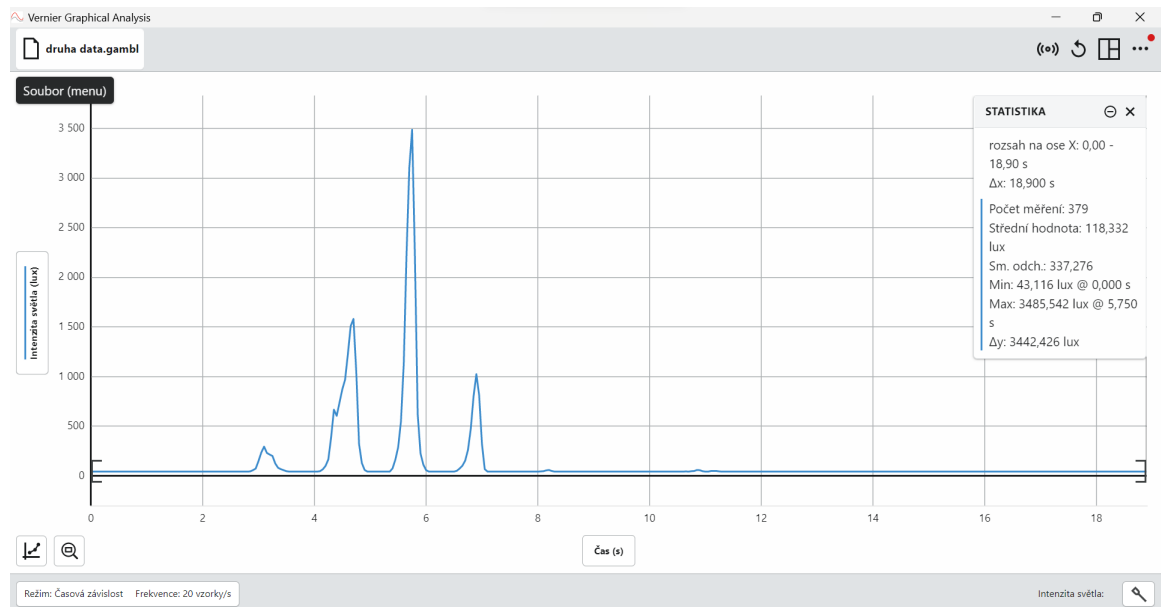
Poté se měření sestaví podle schématu uvedeného v pracovním listě. Laser, rozptylka, mřížka a stínítko se umístí za sebou do jedné osy tak, aby laser svítil skrze mřížku na stínítko. Pomůcky je vhodné umístit na optickou lavici. Po stisknutí tlačítka zahájit měření se čidlo posunuje pomalu a rovnoměrně podél pravítka přidělaného ke stínítku. Měření trvá 20 sekund, posun pravítkem by měl tedy trvat tuto dobu. Během měření se v aplikaci postupně vykresluje ohybový obrazec.



Obrázek 4.6: Sestava.

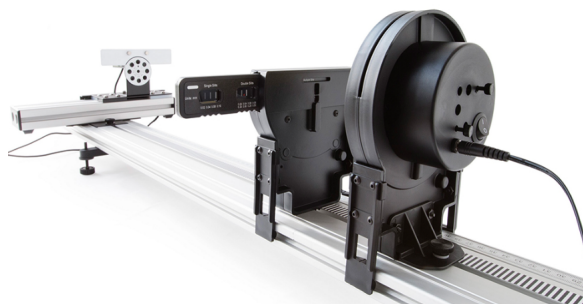
Výsledky měření: Na stínítku vznikl skutečně ohybový obrazec. To, jak výrazné měl nulté maximum, záviselo na intenzitě světla laseru. Měření je možné v aplikaci několikrát opakovat a poté je možné zobrazit více měření najednou. Protože laser se kterým bylo měření prováděno rychle slábl, nebyly ostatní měření příliš povedená.

Následující obrázek ukazuje výsledný ohybový obrazec z prvního měření. Svislá osa ukazuje intenzitu osvětlení. V poli *Nastavení grafu* v pravé dolní části obrazovky lze zobrazovat statistiku. Z ní je možné získat maximální hodnotu osvětlení, v tomto případě 3485,542 lux, která odpovídá nultému maximu. Vodorovná osa ukazuje čas během kterého měření probíhalo.



Obrázek 4.7: Difrakční obrazec.

Měření s Diffraction Apparatus: Celé měření lze provést také pomocí soupravy pro studium difrakce, kterou Vernier nabízí. Sada se připojuje k optické lavici. Tato lavice je součástí jiných měření, takže pokud má škola například sadu s vozíčky DTS-GDX nemusí se lavice dokupovat. Sada obsahuje laserový zdroj o vlnové délce 635 nm. Ohyb světla zaznamenává světelné čidlo umístěné na pohyblivé kolejnici. [12]



Obrázek 4.8: Difrakční sada Diffraction Apparatus. [13]

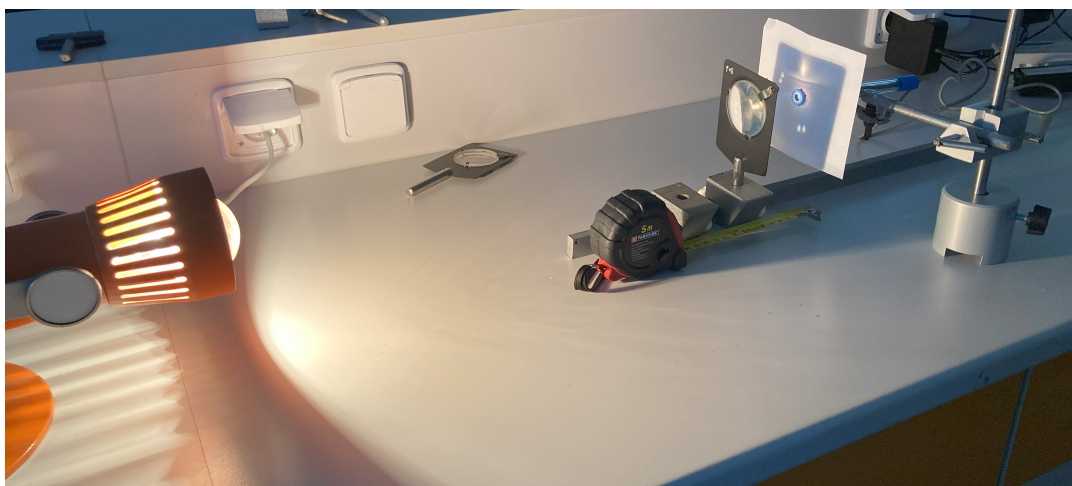
4.3 Ohnisková vzdálenost

Čočky se používají k zobrazování lomem. Jedná se o optickou soustavu se dvěma lomivými plochami. Ohnisková vzdálenost soustavy f je vzdálenost ohniska od středu soustavy. Cílem měření je určit ohniskovou vzdálenost tenkých čoček.

Pomůcky: Využitými pomůckami od firmy Vernier jsou zde opět Light Sensor LS-BTA a software Graphical Analysis, případně Datalogger s displejem. Dalšími potřebnými pomůckami jsou žárovka 12 V/20 W, čočky s různými ohniskovými vzdálenostmi ($f = +10, -10, +6$ cm), stínítko z tvrdého bílého papíru a pravítko.

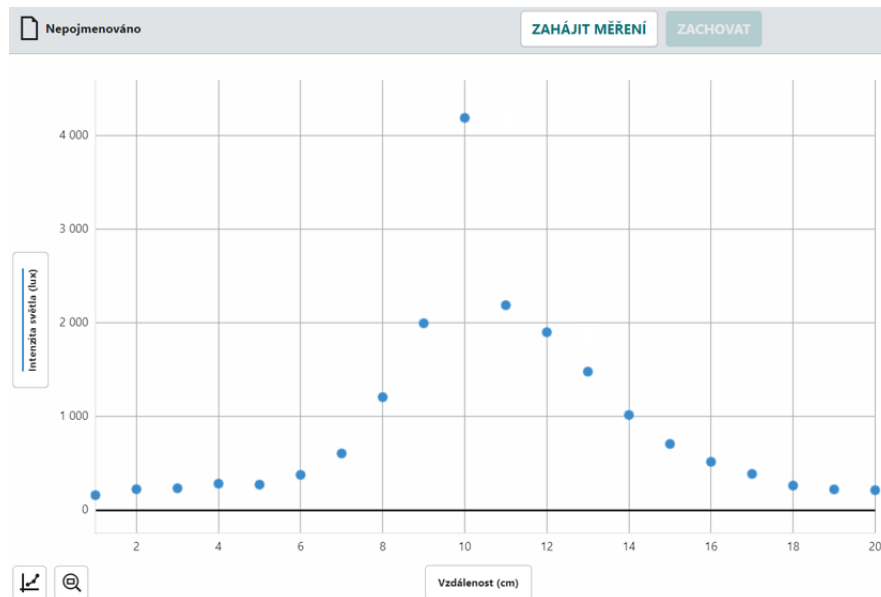
Postup měření: Nejprve se čidlo připojí k aplikaci Graphical Analysis. Po připojení čidla se v aplikaci nastaví v dolním levém rohu – *Režim* na *Události a hodnoty*, *Veličina*: Vzdálenost, *Jednotky*: cm. Zvolí se zobrazení Graf. Poté se sestaví měření dle schématu vyobrazeného v pracovním listě. Zde bude opět nápomocná optická lavice neboť čidlo musí být v jedné ose se středem čočky a žárovkou. V pracovním listě je požadována vzdálenost žárovky a luxmetru 5 m. Při takové vzdálenosti ale nebylo měření možné provést, protože žárovka byla příliš daleko a luxmetr neukazoval téměř žádnou hodnotu osvětlení. Je tedy pravděpodobné, že tato hodnota je uvedena chybně.

Po stisknutí tlačítka *Zahájit měření* se podle pravítka umístí čočka do vzdálenosti 20 cm od čidla. Poté se stiskne tlačítko *Zachovat* a do textového pole se vloží hodnota 20, která odpovídá vzdálenosti 20 cm. Tímto způsobem se zaznamenají hodnoty ve vzdálenostech až po 1 cm. Na stínítku je přitom možné sledovat postupné zaostřování předmětu, když se přibližuje do ohniskové vzdálenosti.



Obrázek 4.9: Sestava.

Výsledky měření: Měření bylo prováděno pro spojnou čočku s ohniskovou vzdáleností + 10 cm.



Obrázek 4.10: Ohnisková vzdálenost pro spojku $f = +10$ cm.

V pravé části obrazovky se během měření vypisuje datová řada, ve které jsou uvedeny jednotlivé vzdálenosti a jim odpovídající intenzity osvětlení. Během měření hodnoty naměřené luxmetrem hodně kolísaly a měření se muselo provést vícekrát. Protože celou datovou řadu nebylo možné zobrazit a některé hodnoty by nebyly vidět na obrázku, jsou veškeré hodnoty osvětlení uvedeny v následující tabulce.

Vzdálenost (cm)	Intenzita světla (lux)	Vzdálenost (cm)	Intenzita světla (lux)
1	160	11	2312
2	223	12	1538
3	233	13	1883
4	282	14	1016
5	272	15	707
6	376	16	515
7	605	17	386
8	1206	18	262
9	1995	19	221
10	4189	20	213

Z obrázku je patrné, že ohnisková vzdálenost skutečně odpovídá předpokládaným 10 cm. Sledovaný obraz předmětu je v této vzdálenosti nejostřejší, protože světlo vstupující do čočky se lomí a sbíhá do jednoho bodu, kterým je právě ohnisko čočky.

U rozptylné čočky nelze použít stejné uspořádání jako u spojně, neboť obraz předmětu vytvořený rozptylkou zde není reálný. Rozptylka vytváří reálný obraz tehdy když je předmět umístěn za rozptylkou. Ten lze vytvořit pomocnou spojkou a jeho polohu lze najít pomocí stínítka. Rozptylka se umístí do vhodné vzdálenosti za pomocnou spojkou před obraz vytvořený spojkou.

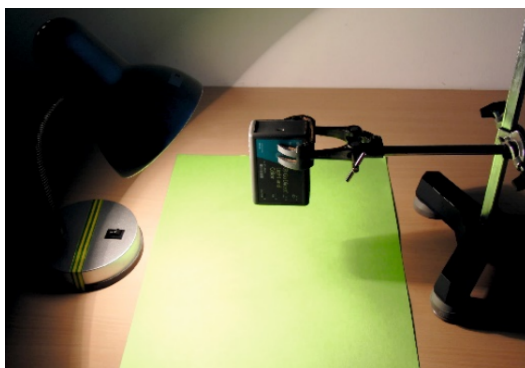
Měření s Optics Expansion Kit: Měření je možné provést také se soustavou pro výuku optiky, kterou Vernier nabízí. Skládá se z čoček, jejich držáků, světelného zdroje, držáku luxmetru, destiček s aperturou a stínítka použitelných s optickou lavicí. Destičku s aperturami lze umístit těsně před čočku a měnit tak efektivní průměr a tvar čočky. Pro měření je sadu potřeba doplnit o zmíněný luxmetr a měřící program. [12]

4.4 Odrazivost různě barevných povrchů

Předměty lidské oko vnímá jako barevné, protože se světlo různých vlnových délek odráží od různých předmětů odlišnou měrou. Například bílé plochy odrážejí většinu dopadajícího světla, černé povrchy naopak většinu světla pohltí a odrážejí jen velmi málo. Cílem pokusu je pomocí čidla porovnat, kolik světla produkovaného klasickou žárovkou odrazí papíry různých barev.

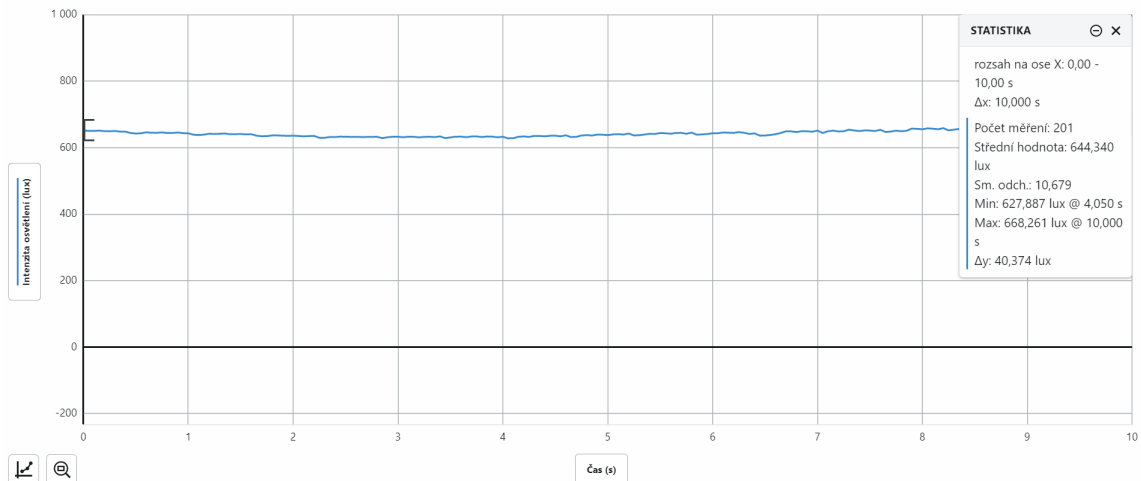
Pomůcky: Využitými pomůckami od firmy Vernier jsou zde čidlo světla Go Direct Light and Color a aplikace Graphical Analysis. Dále je potřebný stojan k zafixování čidla, lampička s klasickou žárovkou a barevné papíry. Zde je důležité, aby měly papíry stejný povrch, tedy buď lesklý, nebo matný. Namísto žárovky lze využít diodu zabudovanou v čidle. Světlo produkované diodou má však jiný charakter nežli světlo žárovky a získané výsledky se mohou mírně lišit.

Postup měření: Nejprve se připojí čidlo světla v aplikaci Graphical Analysis. Měřící prvek se zafixuje tak, aby mířil svisle dolů a snímal plochu papíru, která je osvětlena lampičkou. Měřící prvek se nachází zcela u kraje vedle svítivé diody.



Obrázek 4.11: Soustava pro měření odrazivosti. [12]

Papír se umístí pod čidlo a tlačítkem *Zahájit měření* se spustí záznam dat. Tento záznam se sám ukončí. Poté se papír vymění za jinak barevný papír, přičemž čidlo i lampička musejí zůstat ve stejné poloze. V pravé části okna se vybere *Zobrazit statistiky*. Ve statistikách se nacházejí základní údaje o měření. Důležitým pro měření je údaj o střední hodnotě.



Obrázek 4.12: Odrazivost pro bílý papír.

Výsledky měření: Následující tabulka udává přehled středních hodnot intenzit osvětlení pro jednotlivé barevné papíry:

Barva	intenzita osvětlení [lux]
Bílá	644.34
Žlutá	575.94
Červená	347.84
Zelená	370.25
Modrá	207.11
Černá	76.50

Z tabulky je patrné že nejvíce světla odráží skutečně bílá barva. Nejméně světla odráží barva černá. Naměřené hodnoty jsou ovlivněny výkonem žárovky, povrchem papírů a vzdáleností mezi žárovkou, papírem a čidlem. [12]

4.5 Blikání žárovky

Po zapnutí lampičky začne žárovkou procházet střídavý proud o frekvenci 50 Hz. Proud procházející vláknem žárovky tak dosáhne 50× za sekundu své maximální kladné hodnoty a rovněž 50× za sekundu své maximální záporné hodnoty. Při dosažení každé z těchto maximálních hodnot žárovka nejvíce svítí. Celkem tedy dosáhne jas žárovky svého maxima 100× za sekundu. Mezi jednotlivými maximy

žárovka pohasíná a vlastně tedy „bliká“ – ovšem tak rychle, že lidské oko toto blikání nedovede zaznamenat. To souvisí s dříve zmíněnou kritickou frekvencí splývání. Maximum kritické frekvence je při optimálním osvětlení 50-60 podnětů za sekundu. Žárovka těchto podnětů poskytuje za sekundu 100 a lidské oko je tak nedokáže rozlišit.

Oproti tomu, zdroje napájené bateriemi využívají stejnosměrný proud a svítí proto se stále stejnou intenzitou.

Pomůcky: Využitými pomůckami od firmy Vernier jsou zde opět čidlo světla Go Direct Light and Color a aplikace Graphical Analysis. Dalšími potřebnými pomůckami jsou lampička s klasickou žárovkou a žárovka napájená baterií, například žárovka mobilního telefonu.

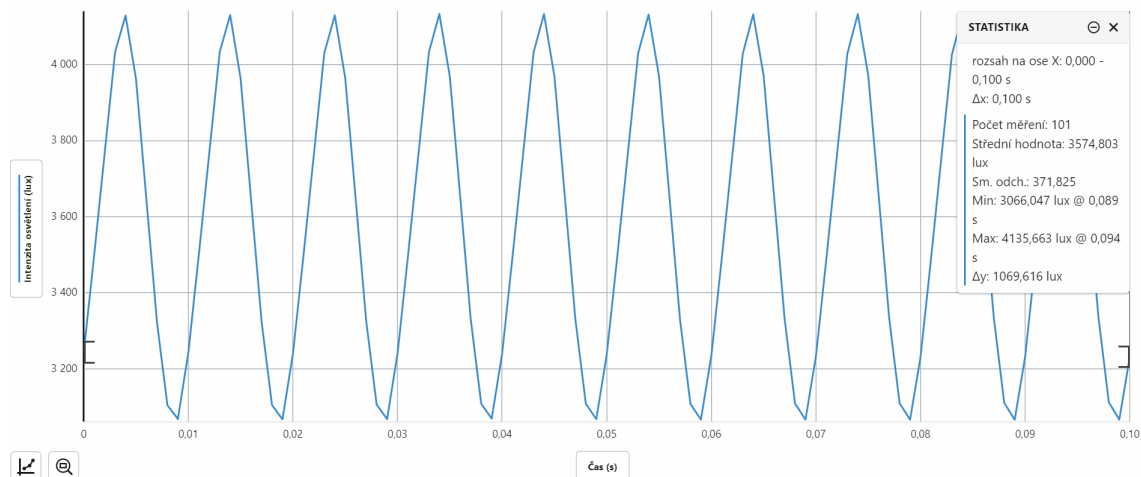
Postup měření: Nejprve se čidlo připojí v aplikaci Graphical Analysis. Poté se postaví pod lampičku tak, aby jeho měřicí prvek mířil svisle vzhůru a snímal světlo žárovky. Lampička se postaví do takové výšky nad čidlo, aby se hodnota osvětlení pohybovala mezi 2000 až 4000 luxy.



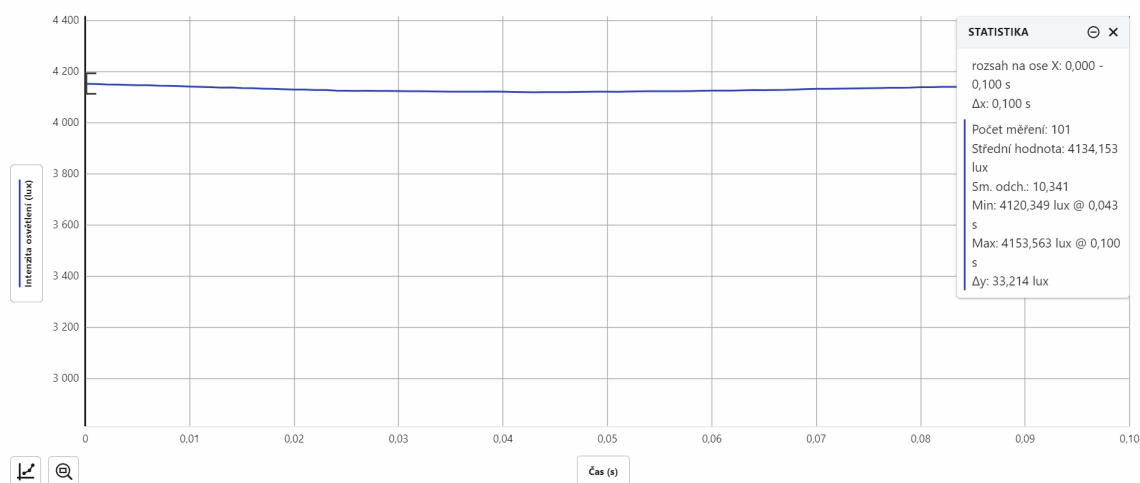
Obrázek 4.13: Sestava pro měření blikání žárovky. [12]

Kliknutím na pole *Režim* v levém dolním okraji se nastaví *Frekvence* na 1000 vzorků za sekundu a doba měření na 0,1 sekundy. Tlačítkem *Zahájit měření* se spustí záznam dat. Měření se samo ukončí. Poté se nad čidlo umístí žárovka napájená stejnosměrným proudem a měření se zopakuje.

Výsledky měření: První graf ukazuje blikání klasické žárovky. Žárovka za 0,1 sekundy dosáhne desetkrát své maximální kladné hodnoty a desetkrát své maximální záporné hodnoty. Za jednu sekundu těchto maximálních hodnot tedy dosáhne stokrát, což odpovídá teorii. Je také patrné, že intenzita osvětlení se mění podle funkce sinus. Druhý graf potvrzuje, že zdroj světla napájený bateriemi svítí se stále stejnou intenzitou. [12]



Obrázek 4.14: Blikání klasické žárovky.



Obrázek 4.15: Blikání žárovky napájené stejnosměrným proudem.

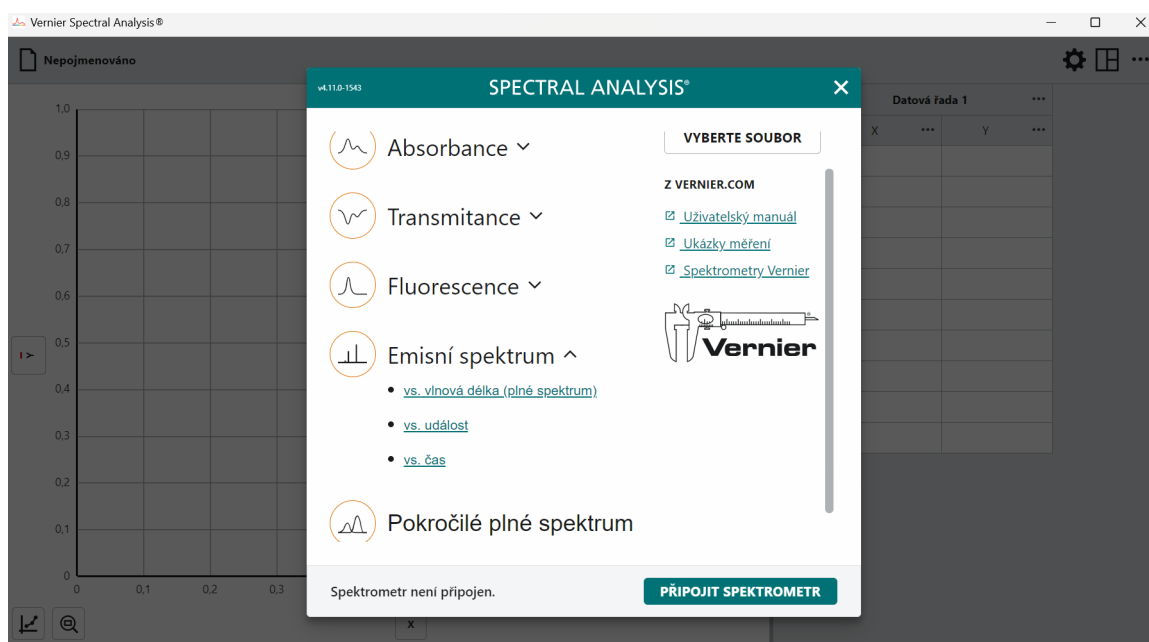
4.6 Spektrum světla LED žárovky

Podle trichromatické teorie se modrá, zelená a červená barva označují jako základní barvy, které vnímá lidské oko. Kombinací těchto základních barev v různém poměru je možné napodobit kteroukoli další barvu. Při rovnoměrné podráždění všech tří základních barev je vnímanou barvou barvou bílá.

Pod označením RGB žárovka se skrývá světelný zdroj, v němž jsou ukryty tři diody odpovídající právě základním barvám. Cílem experimentu je demonstrovat, že další barvy mohou skutečně vznikat kombinací základních barev.

Pomůcky: Využitými pomůckami od firmy Vernier jsou zde čidlo Go Direct SpectroVis s optickým vláknem VSP-FIBER a aplikace Spectral Analysis. Dále je potřeba jenom lampička s LED žárovkou, která umožňuje nastavování barvy.

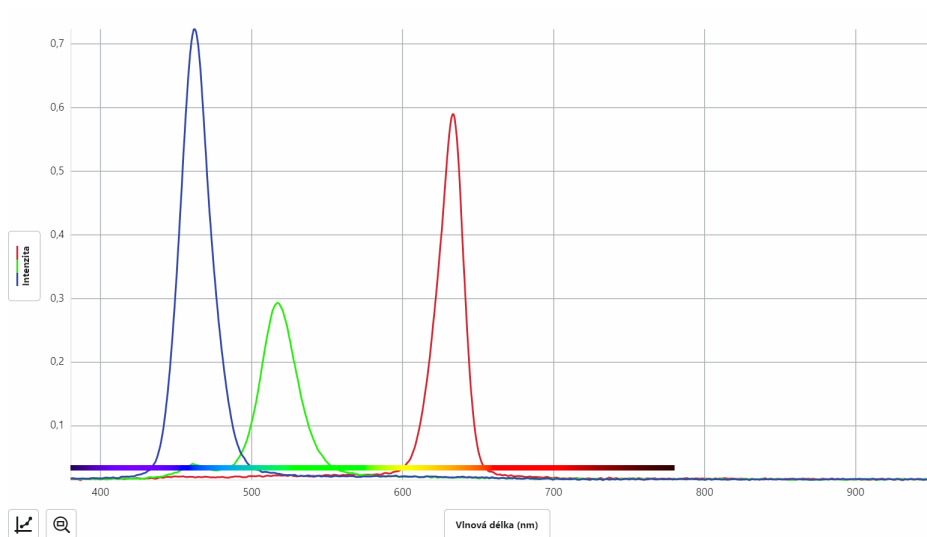
Postup měření: Po spuštění aplikace Spectral Analysis se z nabídky vybere *Emisní spektrum* a zde *vs. vlnová délka (plné spektrum)*. Poté se k ní připojí spektrometr stejným způsobem jako ostatní čidla.



Obrázek 4.16: Nastavení aplikace Spectral Analysis.

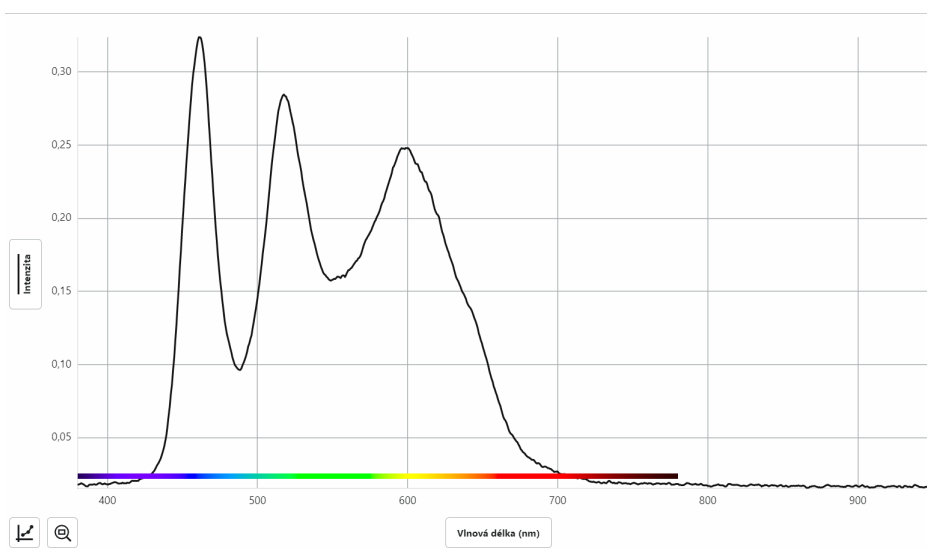
Do květové šachty spektrometru se vloží optické vlákno. Konec vlákna se za-fixuje vůči žárovce do vzdálenosti přibližně 10 cm. Nejprve se žárovka nechá svítit maximálním jasnem modrou barvou. Tlačítkem *Zahájit měření* se spustí záznam dat. Do grafu se přitom zakreslí spektrální závislost pro modrou barvu. Měření je zde potřeba ukončit tlačítkem *Zastavit*. Stejným způsobem se proměří červená a zelená barva. Následně se na žárovce postupně nastaví fialová, žlutá a bílá barva a u těchto barev se se opět naměří závislost. Je možné, že píky získané měřením se do grafu ne-vejdou. V tomto případě stačí vzdálit optické vlákno od žárovky a měření zopakovat.

Výsledky měření: V prvním grafu jsou zobrazeny právě tři základní barvy. Pro toto zobrazení stačí kliknou na popisek svislé osy *Intenzita* a vybrat z datových řad tu, jejíž křivka bude v grafu viditelná. Zde je možné také změnit barvy jednotlivých grafů, které se při měření přidělují náhodně. Pro každou měřenou barvu lze tedy vybrat odpovídající barvu grafu. V grafu je vidět, které vlnové délce odpovídá jaká barva a rovněž, že barvy nejsou složené z více barev.



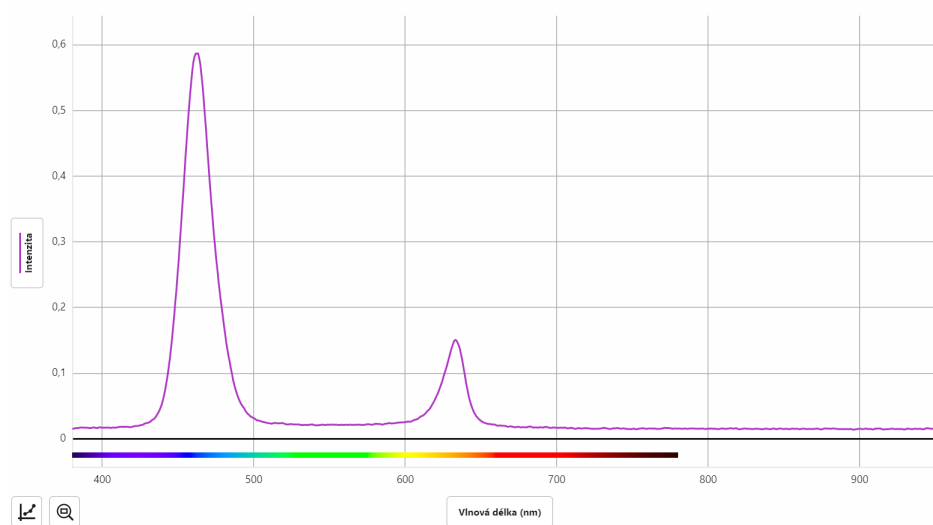
Obrázek 4.17: Spektrální závislosti základních barev.

Následující graf ukazuje spektrální závislost pro bílou barvu. Z grafu je patrné, že bílá barva je skutečně složená ze tří základních barev.



Obrázek 4.18: Spektrální závislost bílé barvy.

Poslední křivka ukazuje spektrální závislost pro barvu fialovou. Ta je složena z červené a modré barvy. Použitá LED žárovka tedy skutečně vytváří barevné světlo skládáním tří základních barev – červené, modré a zelené. [12]



Obrázek 4.19: Spektrální závislost žluté barvy.

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vysvětlit, jak funguje lidský zrak a demonstrovat vybudované poznatky na měřeních v praktické části. Práce se nejprve zabývá anatomíí lidského oka, bez které by se zraku nešlo vůbec věnovat. Je zde popsána především optická soustava oka, která je tvořena rohovkou, čočkou, komorovou vodou, sklivcem a sítnicí. V kapitole věnující se fyzikální optice je popsán lom světla, ke kterému dochází, když světlo prochází optickou soustavou oka. Lomené paprsky se protnou ve žluté skvrně, kde se nacházejí fotoreceptory – tyčinky a čípky. Činnost tyčinek a čípků je popsána v poslední kapitole teoretické části věnující se především světlu a barevnému vidění. Ačkoli se v teoretické části nachází mnoho poznatků, které mohou napomoci pochopit proces vidění, nejedná se zdaleka o souhrn všeho, co s touto oblastí souvisí.

Měření v praktické části byla realizována pomocí měřicích systémů od firmy Vernier. Firma Vernier nabízí čidla, rozhraní s programem i další pomůcky. Při sestavování experimentů byly využity pomůcky z jiných sad, což přípravu lehce komplikuje. Vzhledem k tomu, že ne každá škola zřejmě disponuje penězi na nákup všech součástí přímo od Verniera, je ale pozitivním zjištěním, že i tak lze měření uskutečnit.

Do počítače lze také zdarma stáhnout softwary Graphycal Analysis a Spectral Analysis, které veškerá naměřená data přímo zpracovávají a přehledně vizualizují. Toto může upoutat pozornost žáků základních i středních škol více, než když si naměřená data musejí zapisovat a zpracovávat sami. Křivky vytvořené z jednotlivých datových řad lze navíc zobrazovat v jednom grafu. Díky tomu může žák vidět, jak se například liší spektrální závislosti pro různé barvy, nebo jak moc se jednotlivé pokusy podobají, aniž by musel cokoli počítat. Vzhledem k tomuto zjednodušení jsou měření vhodná spíše jako demonstrace určitých jevů nežli laboratorní cvičení, kde by měl žák s daty umět pracovat a zaznamenávat je sám. Vhodné mohou být softwary také tam, kde by bylo zaznamenávání dat zbytečně zdlouhavé či repetitivní.

Seznam obrázků

1.1	Řez bulbem. [2]	8
1.2	Stavba sítnice. [7]	12
1.3	Při sledování vzdálených předmětů jsou paprsky navzájem prakticky rovnoběžné a čočka je zploštělá. Při sledování bližších předmětů dopadají na přední stranu oka různosměrné paprsky a čočka musí být více vyklenutá.[2]	13
2.1	Odraz a lom světla. [7]	16
2.2	Interference na vodní hladině. [7]	17
2.3	Difrakční obrazec. [8]	18
2.4	Spojky: A - dvojevypuklá, B - ploskovypuklá, C - dutovypuklá [7] . . .	21
2.5	Rozptylky: A - dvojdutá, B - ploskodutá, C - vypuklodutá [7]	21
2.6	A - emetropické oko, B - krátkozraké oko, C - dalekozraké oko. [2] . .	23
3.1	Spektrum elektromagnetického vlnění. [10]	24
3.2	Záznam elektroretinogramu. [1]	28
3.3	Činnost buněk při zpracovávání informace o barvě. [3]	29
3.4	Adaptační křivka. [1]	31
3.5	Fotopické a skotopické vidění. [11]	31
3.6	Závislost kritické frekvence splývání na intenzitě a místě osvětlení sítnice. [1]	32
4.1	Light and Color. [13]	34
4.2	Připojení čidla	35
4.3	Light Sensor. [13]	35
4.4	SpectroVis. [12]	36
4.5	Nastavení časové závislosti.	37
4.6	Sestava.	37
4.7	Difrakční obrazec.	38
4.8	Difrakční sada Diffraction Apparatus. [13]	38
4.9	Sestava.	39
4.10	Ohnisková vzdálenost pro spojku $f = +10$ cm.	40
4.11	Soustava pro měření odrazivosti. [12]	41
4.12	Odrazivost pro bílý papír.	42

4.13 Sestava pro měření blikání žárovky. [12]	43
4.14 Blikání klasické žárovky.	44
4.15 Blikání žárovky napájené stejnosměrným proudem.	44
4.16 Nastavení aplikace Spectral Analysis.	45
4.17 Spektrální závislosti základních barev.	46
4.18 Spektrální závislost bílé barvy.	46
4.19 Spektrální závislost žluté barvy.	47

Literatura

- [1] Šárka Skorkovská Svatopluk Synek. *Fyziologie oka a vidění*. Grada, 2014.
- [2] Radovan Šíkl. *Zrakové vnímání*. Grada, 2013.
- [3] Kittnar Otomar a kolektiv. *Lékařská fyziologie*. Grada, 2020.
- [4] Mallatt Jon Marieb Elaine Nicpon. *Anatomie lidského těla*. Computer Press (CP Books), 2005.
- [5] Radomír Čihák. *Anatomie 3*. Grada, 2016.
- [6] Ivan Dylevský. *Funkční anatomie*. Grada, 2009.
- [7] Vítek František Beneš Jiří, Jaroslava Kymplová. *Základy fyziky pro lékařské a zdravotnické obory*. Grada, 2015.
- [8] Vítek František Beneš Jiří, Jirák Daniel. *Základy lékařské fyziky*. Karolinum, 2022.
- [9] Jearl Walker David Halliday, Robert Resnick. *Fyzika 2*. Vutium, 2019.
- [10] Malý Petr. *Optika*. Karolinum, 2013.
- [11] Kolářová Hana Rosina Jozef, Vránová Jana. *Biofyzika Pro zdravotnické a bio-medicínské obory, 2., doplněné vydání*. Grada, 2021.
- [12] Vernier science education. <https://www.vernier.cz/>.
- [13] Vernier science education. <https://www.vernier.com/>.