

Experimentální ověření Talbot-Plateova zákona v režimu nočního vidění

Diplomová práce

Studijní program:

N3963 Biomedicínské inženýrství

Studijní obor:

Biomedicínské inženýrství

Autor práce:

Bc. Tereza Kadlecová

Vedoucí práce:

Ing. Leoš Kukačka, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky





Zadání diplomové práce

Experimentální ověření Talbot-Plateova zákona v režimu nočního vidění

Jméno a příjmení: **Bc. Tereza Kadlecová**
Osobní číslo: D18000095
Studijní program: N3963 Biomedicínské inženýrství
Studijní obor: Biomedicínské inženýrství
Zadávací katedra: Fakulta zdravotnických studií
Akademický rok: 2019/2020

Zásady pro vypracování:

Konzultant: MUDr. Petr Bulíř

Cíle práce:

Cílem práce je z nashromážděných dat ověřit, zda platí Talbot-Plateaův zákon při podmínkách nočního vidění. Dále by měla proběhnout příprava podkladů pro publikaci v odborném periodiku.

Teoretická východiska (včetně výstupu z kvalifikační práce):

Talbot-Plateaův zákon říká, že rychle pulzující světlo je člověkem vnímáno stále stejně jasně jako světlo o jasů rovném průměrnému jasů pulzů. Diplomová práce naváže na předchozí projekty provedené v tomto směru na TUL, ve smyslu ověření tohoto zákona při různých podmínkách. Teoretická část práce bude věnována přenosu světelného impulsu na elektrický vzruch v sítnici a studii frekvenčních vlastností sítnice. Dále budou shrnuty vlastnosti nočního (skotopického) vidění u člověka. Z těchto poznatků bude navržen průběh experimentu zaměřeného na ověření TP zákona během nočního vidění.

Metoda:

Praktická část práce se bude věnovat provedení a vyhodnocení experimentu ověření TP zákona na bílém světle v uměle vytvořených podmínkách pro noční vidění. Při práci budou využity probandi otestovaní na kvalitu zraku (kontrastní citlivost, barvocit).

Místo a čas realizace výzkumu:

Výzkum bude probíhat v laboratořích TUL a to v akademickém roce 2019/2020.

Vzorek:

Ověření Talbot-Plateova zákona bude provedeno na zhruba 10 probandech. Výzkum bude kvalitativní.

Rozsah práce:

Rozsah diplomové práce činí 70-90 stran (tzn. 1/3 teoretická část, 2/3 výzkumná část).

Forma zpracování kvalifikační práce:

Tištěná a elektronická.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

1. PLATEAU, J.: Betrachtungen Über Ein Von Hrn. Talbot Vorgeschlagenes Photometrisches Princip. *Pog Gendorf Ann. Physik. Chemie* 35, 457-468 (1835).
2. KUKAČKA, Leoš a Pascal DUPUIS. On correct evaluation techniques of brightness enhancement effect measurement data. *Optical Engineering* [online]. 2017, 56(11) [cit. 2019-08-07]. DOI: 10.1117/1.OE.56.11.114103. ISSN 0091-3286. Dostupné z: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/optical-engineering/volume-56/issue-11/114103/On-correct-evaluation-techniques-of-brightness-enhancement-effect-measurement-data/10.1117/1.OE.56.11.114103.full>.
3. KUKAČKA, Leoš, Pascal DUPUIS, Georges ZISSIS, Milan KOLAR a Jan KRAUS. LED Drivers: The Role of the Rectifier on Flicker Immunity in ELV DC Environment. In: *2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)* [online]. IEEE, 2018, 2018, s. 1-6 [cit. 2019-08-07]. DOI: 10.1109/IAS.2018.8544611. ISBN 978-1-5386-4536-9. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8544611/>
4. MOTOMURA H., IKEDA Y. a M. JINNO, Evaluation of Visual Perception Enhancement Effect by Pulsed Operation of LEDs, in *14th International Symposium on the Science and Technology of Lighting, Italy* [online], 2014, s. 1-13, [cit. 2019-07-07]. ISBN 978-1-5108-4085-0. Dostupné z: <http://toc.proceedings.com/34623webtoc.pdf>
5. CHEN, Tianran, Shenglong FAN, Xin GU a Muqing LIU. Toward Pulse Photometry: Influence of Pulse Light on Luminous Efficiency and Physiological Effects. *Journal of Science and Technology in Lighting* [online]. 2018, 41, 177-185 [cit. 2019-09-11]. DOI: 10.2150/jstl.IEIJ160000589. ISSN 2432-3225. Dostupné z: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jstl/41/0/41_IEIJ160000589/_article
6. SYNEK, Svatopluk a Šárka SKORKOVSKÁ. *Fyziologie oka a vidění. 2.*, dopl. a přeprac. vyd. Praha: Grada, 2014, 96 s., xi s. obr. příl. ISBN 978-80-247-3992-2.
7. FAN, S, X ZHANG, X GU, H SHEN a M LIU. Influence of pulse width on luminous efficiency for a two-degree field. *Lighting Research & Technology* [online]. 2017, 49(3), 357-369 [cit. 2019-09-12]. DOI: 10.1177/1477153515626772. ISSN 1477-1535. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1477153515626772>
8. RIEIRO, H., S. MARTINEZ-CONDE, A. P. DANIELSON, J. L. PARDO-VAZQUEZ, N. SRIVASTAVA a S. L. MACKNIK. Optimizing the temporal dynamics of light to human perception. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. 2012, 109(48), 19828-19833 [cit. 2019-10-02]. DOI: 10.1073/pnas.1213170109. ISSN 0027-8424. Dostupné z: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1213170109>
9. XIN, Gu. Pulse modulation effect of light-emitting diodes on human perception enhancement. *Optical Engineering* [online]. 2012, 51(7) [cit. 2019-10-02]. DOI: 10.1117/1.OE.51.7.073608. ISSN 0091-3286. Dostupné z: <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1.OE.51.7.073608>
10. KUKAČKA Leoš, LASSFOLK Christina, MOTOMURA Hideki, IKEDA Yoshihisa a Masafumi JINNO. Broca-Sulzer Effect Detection over Critical Fusion Frequency for Pulse Operated White LEDs with Varied Pulse Shape. In *15th International Symposium on the Science and Technology of Lighting, At Kyoto, Japan* [online], 2016, s. [cit. 2019-09-18].

Vedoucí práce:

Ing. Leoš Kukačka, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání práce: 2. září 2019
Předpokládaný termín odevzdání: 30. června 2020

L.S.

prof. MUDr. Karel Cvachovec, CSc., MBA
děkan

V Liberci dne 31. ledna 2020

Vážená paní
Tereza Kadlecová, Bc.
Svobody 324/81
460 15 Liberec

Vyřizuje/linka: Čermáková/485 353 194

V Liberci dne 17. června 2020
č. j.: TUL - 20/8511/021158-001

Vyjádření k žádosti o ponechání zadání a prodloužení odevzdání bakalářské práce

Vážená paní Kadlecová,

na základě Vaší žádosti ze dne 16. 06. 2020, zaevidované pod č. j.: TUL - 20/8511/021158 Vám sděluji, že **souhlasím** s ponecháním zadání bakalářské práce a s prodloužením termínu odevzdání do 30. 06. 2021.

S pozdravem

prof. MUDr. Karel Cvachovec, CSc., MBA

děkan



Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

20. dubna 2021

Bc. Tereza Kadlecová

Poděkování:

Chtěla bych poděkovat panu Ing. Leoši Kukačkovi, Ph.D. et Ph.D. za odborné vedení bakalářské práce, přínosné rady, ochotu a vstřícnost během společné spolupráce.

Mé poděkování dále patří panu primáři MUDr. Petru Bulířovi, FEBO za možnost spolupráce. Rovněž děkuji panu prof. Ing. Michalu Víkovi, Ph. D. za možnost pracovat v laboratoři FT TUL s použitím tamních přístrojů. Na závěr děkuji všem, kteří se podíleli na získání potřebných dat pro mou práci.

Anotace

Jméno a příjmení autora: Bc. Tereza Kadlecová
Instituce: Technická univerzita v Liberci, Fakulta zdravotnických studií
Název práce: Experimentální ověření Talbot-Plateova zákona v režimu nočního vidění
Vedoucí práce: Ing. Leoš Kukačka, Ph.D et Ph.D
Počet stran: 76
Počet příloh: 5
Rok obhajoby: 2020

Anotace: Diplomová práce navazuje na přechozí projekty provedené v tomto směru na Technické univerzitě v Liberci ve smyslu ověřování Talbot-Plateova zákona při různých podmínkách. Tato práce by se měla věnovat ověřování Talbot-Plateova zákona na bílém světle v podmínkách nočního vidění. Teoretická část práce se věnuje anatomicko-fyziologickými základy, které se týkají vnímání světla lidským okem a vlastností skotopického vidění. Dále teoretická část obsahuje vybrané fyzikální vlastnosti světla a LED a shrnutí dosavadních poznatků a experimentů týkajících se Talbot-Plateova zákona. Cílem práce je ověření, zda je pulzující světlo generované LED vnímáno stejně jasně, jako světlo stálé s jasnem rovným průměrné hodnotě pulzujícího zdroje v případě adaptace lidského zraku na noční vidění.

Klíčová slova: Talbot-Plateaův zákon, Broca-Sulzerův efekt, skotopické vidění, neviditelný flicker, LED spektrum, barvocit, kontrastní citlivost, sítnice, frekvenční vlastnosti sítnice, efekt zvýšení vnímání jasu.

Annotation

Name and surname: Bc. Tereza Kadlecová
Institution: Technical University Of Liberec, Faculty Of Health Studies
Title: Experimental Verification Of Talbot-Plateau Law In Night Vision Conditions
Supervisor: Ing. Leoš Kukačka, Ph.D et Ph.D

Pages: 76
Apendix: 5
Year: 2020

Annotation: The diploma thesis should build on previous projects carried out at Technical University of Liberec in the sense of TP law verification under different conditions. This diploma thesis should pay attention to TP law verification on white light in night vision conditions. The theoretical part of the work should be devoted to the anatomical-physiological fundamentals related to a light perception by a human eye and properties of scotopic vision. Further it contains selected physical properties of light and LEDs and summary of present knowledge and experiments concerning the Talbot-Plateau law. The aim of the work is to verify whether a pulsating light generated by LEDs is perceived as clearly as a stable light with a brightness equal to the average value of a pulsating light source in the case of adaption to night vision.

Keywords: Talbot-Plateau law, Broca-Sulzer effect, scotopic vision, invisible flicker, LED spectrum, colour blindness, contrast sensitivity, retinal frequency properties, brightness enhancement effect,

Obsah

Seznam použitých zkratek.....	12
Seznam použitých symbolů.....	13
1 Úvod.....	15
2 Teoretická část.....	16
2.1 Viditelné světlo a základní fotometrické a radiometrické veličiny.....	16
2.2 Základní vlastnosti LED.....	18
2.3 Současné poznatky problematiky Talbot-Plateova zákona.....	20
2.4 Lidské oko.....	23
2.4.1 Zornice.....	24
2.4.2 Fotoreceptory	24
2.5 Optické vlastnosti oka.....	26
2.5.1 Rozlišení a citlivost oka.....	27
2.5.2 Adaptace na jas.....	30
2.5.2.1 Vyšetření adaptace	39
2.6 Definice standardního pozorovatele.....	41
3 Výzkumná část.....	43
3.1 Výzkumné předpoklady a cíle.....	43
3.2 Metodika výzkumu.....	44
3.2.1 Experimentální zařízení.....	44
3.2.2 Kalibrace boxu.....	50
3.2.3 Výzkumný soubor.....	53
3.2.4 Postup provedení experimentu.....	53
3.3 Analýza získaných dat.....	55
3.3.1 Metoda A.....	58
3.3.2 Metoda B.....	59
3.3.3 Porovnání metod.....	60
3.4 Analýza výzkumných cílů, předpokladů a hypotéz.....	63

4 Diskuze.....	65
5 Návrh doporučení pro praxi.....	66
6 Závěr.....	67
Seznam literatury.....	69
Seznam obrázků.....	73
Seznam tabulek.....	74
Seznam grafů.....	75
Seznam příloh.....	76

Seznam použitých zkratek

LED	Light Emitting Diode
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage (Mezinárodní komise pro osvětlování)
TUL	Technická univerzita v Liberci
PMMA	polymethylmethakrylát
ID	Identifikační číslo
Resp.	Respektive
TLS	Total Least Squares
Tzn.	To znamená
Tj.	To je
Tzv.	Takzvaný
ČSN	Česká technická norma

Seznam použitých symbolů

λ	Vlnová délka [nm]
Φ_e	Zářivý tok [W]
Φ_v	Světelný tok [lm]
E_e	Intenzita ozáření [$W \times m^{-2}$]
E_v	Osvětlenost [lux]
E_r	Osvětlenost sítnice [$cd \times m^{-2} \times mm^{-2}$]
L_v	Jas [$cd \times m^{-2}$]
L_e	Zář [$W \times sr^{-1} \times m^{-2}$]
L_{ep}	Zář po průchodu difúzním plexi sklem [$W \times sr^{-1} \times m^{-2}$]
D	Průměr zornice [mm]
H_e	Expozice [$J \times m^{-2}$]
H_v	Osvit [$lx \times s$]
I_e	Zářivost [$W \times sr^{-1}$]
I_v	Svítivost [cd]
K	Světelná účinnost [$lm \times W^{-1}$]
R	Odrážnost [%]
S_λ	Spektrální složení světelného zdroje
T_r	Propustnost [%]
α	Hladina významnosti [-]
T	Testová statistika [-]
f	Frekvence [Hz]
V	Weber-Fechnerův zákon
S	Stevensova mocninná funkce
$V(\lambda) / V'(\lambda)$	Poměrná spektrální světelná účinnost [-] pro fotopické / skotopické vidění
T_{cp}	Náhradní teplota chromatičnosti [K]
F	Předmětová ohnisková vzdálenost
y'	Velikost obrazu na sítnici
C	Odhad rozptylu sklonu přímky [-]
k	Parametr k – sklon přímky [-]

N	Normální rozdělení
$t_{2 \times N - 1}$	Kvantil Studentova rozdělení

1 Úvod

Zrak je jedním z pěti lidských smyslů, díky kterým dokážeme vnímat svoje okolí a komunikovat s ním. Většinu informací z okolního světa získáváme právě zrakem. Orgány zraku jsou oči, které převádějí signál paprsků elektromagnetického vlnění na nervový vzruch. Tento nervový vzruch poté v mozku vytváří zrakový vjem, který je považován za subjektivní, nicméně odpovídá několika základním zákonitostem.

Tato diplomová práce se zabývá vnímáním pulzujícího a stálého světla. Touto problematikou se zabýval J. A. F. Plateau a W. H. F. Talbot již v 19. století a formulovali tzv. Talbot-Plateauův zákon. Tento zákon říká, že rychle pulzující světlo (myšleno tak rychle pulzující, že je vnímáno jako stálé) je vnímáno stejně jasně jako světlo stálé s jasnou rovnou střední hodnotou odpovídající pulzujícímu světlu. V 19. století však nebyly technologie tak vyspělé, aby mohly vytvořit rychlou náběžnou hranu. Dnešní technologie však pracují především se systémy, které používají rychlé náběžné a sestupné hrany (LED technologie) a v některých experimentech došlo ke zjištění, že za použití moderních technologií se vnímání jasu zvyšuje. Zde by tedy mohl nastat problém, protože všechny doposud uznávané poznatky stojí na Talbot-Plateauově zákoně.

Talbot-Plateauův zákon byl zatím ověřován za podmínek denního vidění. Tato práce bude ovšem ověřovat Talbot-Plateauův zákon během nočního vidění, kdy se mění citlivostní funkce, nejsou znatelné barvy ale pouze kontrasty a vidění je zajišťováno tyčinkami. Poznatky týkající se nočního (skotopického) vidění nejsou zdaleka tak obsáhlé jako poznatky o denním (fotopickém) vidění. Nejméně toho zatím víme o vidění mezopickém, tedy přechodovém stavu mezi viděním fotopickým a skotopickým.

Teoretická část práce se bude věnovat fyzikálním a anatomickým poznatkům, které s touto problematikou souvisí. Bude zmíněno i několik předchozích studií, které se věnují ověření Talbot-Plateauova zákona. Praktická část zahrnuje návrh a zpracování světelné masky, která musí odpovídat požadavkům nočního vidění. Dále bude v praktické části proveden samotný experiment a jeho výsledky budou vyhodnoceny.

2 Teoretická část

2.1 Viditelné světlo a základní fotometrické a radiometrické veličiny

Lidské oko vnímá pouze světelné paprsky o vlnové délce přibližně 400 až 760 nm. Tato část elektromagnetického spektra se nazývá viditelné světlo. Při dopadu světla těchto vlnových délek do lidského oka je vyvolán zrakový vjem. Světlo s vyšší vlnovou délkou než 760 nm nazýváme infračervené. Světlo s nižší vlnovou délkou než 400 nm je ultrafialové záření. (Kuchynka, 2016)

Fotometrické veličiny slouží k popisu vlastností světla, které je viditelné lidským okem. Jedná se především o definování světelného zdroje, dopadem světla na objekty a jeho přenosem v prostoru. Radiometrické veličiny popisují vlastnosti záření všech vlnových délek spektra, tedy i těch, které nelze vnímat lidským okem. Každá radiometrická veličina má ekvivalentní fotometrickou veličinu. Radiometrické veličiny vycházejí z fyzikální podstaty elektromagnetického vlnění. Naproti tomu fotometrické veličiny jsou již přizpůsobeny lidskému zraku. Mezi fotometrické veličiny patří svítivost, světelný tok, osvětlení, jas a osvit. Mezi radiometrické (též energetické) veličiny řadíme zářivost, zářivý tok, intenzita ozáření, zář a expozice. (Darula, 2009)

Elektromagnetické záření přenáší energii, kterou můžeme definovat pomocí zářivého toku (výkon záření) Φ_e [W]. Jedná se o množství energie, které projde plochou za jednotku času. (Anon, 1996) Zářivý tok, který vyvolá v lidském oku světelný vjem, je označován jako světelný tok Φ_v [lm] (Kuchynka, 2016).

Intenzita ozáření (osvětlení) E_e [$W \times m^{-2}$] je určena podílem zářivého toku dopadajícího na jednotkovou plochu. Intenzitu je možné přímo snímat pomocí fotodetektorů. (Kuchynka, 2016) Fotometrická veličina pro intenzitu ozáření je osvětlenost E_v [lux], která je určena podílem světelného toku na jednotku plochy (Anon, 1996).

Další důležitou veličinou je osvětlenost sítnice E_r [td]. Jedná se o intenzitu jasu na sítnici lidského oka (Floriánová, 2018):

$$E_r = \frac{\Pi \times L_v \times D^2}{4} \quad (\text{Rovnice 1})$$

L_v je jas sledovaného objektu a D je průměr zornice [mm] (Floriánová, 2018). Jas plošného zdroje [$cd \times m^{-2}$] je podíl svítivosti elementárního zdroje v určitém směru a kolmého průmětu plochy v tomto směru (Kuchynka, 2016). Jasu L_v [$cd \times m^{-2}$] odpovídá radiometrická veličina zář L_e [$W \times sr^{-1} \times m^{-2}$] (Darula, 2009).

Expozice H_e [$J \times m^{-2}$] je součinem intenzity ozařování a doby, po kterou ozaření trvá. Tato veličina je klíčová v určování škodlivosti záření na jednotlivé části oka. (Kuchynka, 2016) Ve fotometrii je jejím ekvivalentem osvit H_v (Darula, 2009).

Zářivost I_e [$W \times sr^{-1}$] je zářivý výkon vyzářený do prostorového úhlu (Anon, 1996). Fotometrickým ekvivalentem je I_v svítivost s jednotkou [cd] nebo [$lm \times sr^{-1}$], která patří mezi základní jednotky soustavy SI. (Darula, 2009)

Podíl světelného toku Φ_v a zářivého toku (odpovídajícího toku energie) Φ_e prošlého stejnou plochou nazýváme světelná účinnost K [$lm \times W^{-1}$]. Maximální hodnota této účinnosti je 683 $lm \times W^{-1}$ pro fotopické a 1700 $lm \times W^{-1}$ pro skotopické vidění. Z těchto hodnot lze usoudit, že při skotopickém vidění je citlivost oka mnohem vyšší. (Kuchynka, 2016) Na grafu 1 níže lze vidět tyto hodnoty světelné účinnosti v závislosti na vlnové délce pro fotopické a skotopické vidění.

Jednotkou svítivosti je 1 kandela [cd] a je definována jako monochromatické záření s vlnovou délkou 555 nm vyzařující v konkrétním směru. Zářivost zdroje je v tomto směru 1/683 [$W \times sr^{-1}$]. Převrácenou hodnotou je potom světelná účinnost K [$lm \times W^{-1}$] která je při této hodnotě (683 $cd \times sr \times W^{-1}$) konstantou maximální světelné účinnosti K_m při fotopickém vidění. Při vlnové délce 555 nm je spektrální citlivost stejná pro fotopické i skotopické vidění a je rovna 683 lm/W. Světelný tok Φ_v [lm] poté odpovídá zářivému toku při této vlnové délce. (Habel a Žák, 2007)

Průchod světla rozhraním dvou prostředí s různým indexem lomu způsobí vždy částečný nebo úplný odraz dopadajícího záření. Vzniká tedy veličina spektrální odraznost R [%], která je poměrem intenzity odraženého a dopadajícího záření pro danou vlnovou délku. Část světla prochází přes rozhraní do druhého prostředí. (Kuchynka, 2016)

Propustnost T_r [%] je jedna z optických vlastností materiálů. Je dána poměrem intenzity prošlého záření a intenzity dopadajícího záření opět pro danou vlnovou délku

(Kuchynka, 2016). Výsledkem je množství světla, které bylo materiálem propuštěno. Záření, které nebylo propuštěno, bylo pohlceno nebo odraženo. Propustnost závisí na vlnové délce světla, směru dopadajícího a propuštěného světla, typu a struktuře materiálu, jeho povrchu atd. (Anon, 2000)

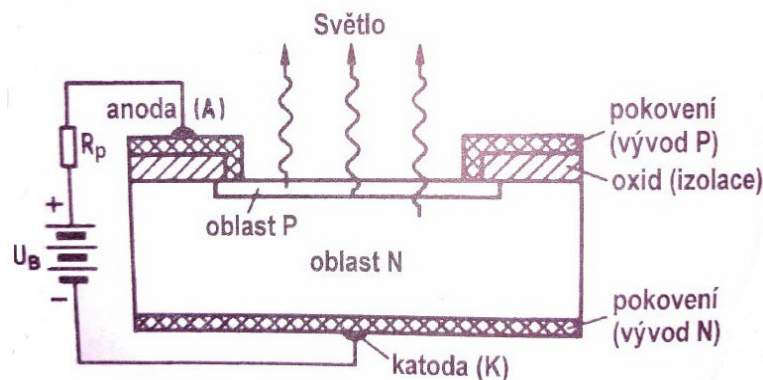
Každá látka absorbuje jinak určité vlnové délky. Měřením spektrální propustnosti záření lze zjistit absorpční spektrum vzorku. Absorpční spektrum je závislost absorpčního koeficientu na vlnové délce a lze ho měřit absorpčními spektrofotometry. Tato zařízení poměřují intenzitu záření absorbovaného vzorkem a referenční intenzitu v závislosti na vlnové délce záření, které dopadá na vzorek. (Navrátil a Rosina, 2019)

Hodnota odrazivosti rozhraní vzduch-rohovka je přibližně 2,5 a vyplývá z Fresnelových rovnic. Odrazivost závisí na indexech lomu, úhlu dopadu a polarizaci dopadajícího světla. (Kuchynka, 2016)

2.2 Základní vlastnosti LED

LED (Light Emitting Diode) je speciálním druhem diody. Je to polovodičová součástka, která při průchodu proudu v propustném směru emituje viditelné světlo.

Je tvořena, jako všechny diody, polovodičem typu N a P. Polovodič typu N (negativní) obsahuje prvky s převahou elektronů. Polovodič typu P (pozitivní) obsahuje menší počet elektronů a tím pádem větší počet elektronových děr. V případě spojení těchto dvou typů polovodičů se na jejich rozhraní naplní elektronové díry elektrony. Vznikne prázdná oblast, která neobsahuje díry ani elektrony. Tato prázdná oblast brání dírám a elektronům procházet přes rozhraní. Připojením kladného pólu zdroje k P typu a



Obrázek 1: Polovodičový krystal světelné diody
(Schreiber, 1997)

záporného pólu k N typu polovodiče, zmenší se prázdná oblast na minimum a přes rozhraní prochází elektrický proud. Toto je zapojení diody v propustném směru. Schéma tohoto jevu je zobrazeno na obrázku 1. Prohozením pólů se prázdná oblast zvětšuje a elektrický proud nemá možnost procházet. Toto je zapojení v závěrném směru. Někdy se vyzařená energie může projevit formou zahřívání. V tomto případě byla energie absorbována v krystalové mřížce. Proto musejí být některé diody chlazené. (Slavík a kol., 2013) Světelné záření vzniká přímo v oblasti P-N přechodu. Ne zcela průhledný polovodičový materiál způsobuje ztráty světla. To lze minimalizovat ztenčením oblasti vodivosti P. (Schreiber, 1997)

Světelná dioda se nikdy nezapojuje přímo na provozní napětí zdroje, vždy je mezi zdrojem a diodou zapojen rezistor. Pokud bychom rezistor nevradili, dojde ke zvýšené spotřebě proudu, dioda se bude přehřívat a následně se zničí. Rezistor omezí proud diody na požadovanou hodnotu dle Ohmova zákona. (Schreiber, 1997)

LED se připojují pouze ke zdroji stejnosměrného proudu a aby vyzařovaly světlo, musí být zapojeny v propustném směru. Průhledná vrstva materiálu kolem diody zajišťuje, aby měla potřebné optické vlastnosti. (Slavík a kol., 2013)

Charakteristickou vlastností LED je vyzařování pouze úzké části spektra. Pásmo tohoto světla je charakteristické pro různé materiály a může zasahovat i do ultrafialové či infračervené části spektra. (Slavík a kol., 2013)

Některé LED mohou mít ještě vrstvu luminoforu, který mění zastoupení jednotlivých složek spektra a upravuje tak výslednou barvu světla. Primární emisí označujeme emisí záření z P-N přechodu a sekundární emise je záření emitované vrstvou luminoforu – jde tedy o fluorescenci.

Vhodnou vlastností pro náš experiment je to, že při stmívání (tedy změně jasu úpravou proudu) mění své spektrum barev jen velmi málo, narozdíl od klasických žárovek. Mění se pouze primární emise, sekundární jen velmi málo. Rozsvícení primární emisí je uskutečněno v řádu nanosekund. LED umí pracovat s velmi nízkým napětím (v jednotkách voltů) i proudem (až miliampéry). Rychlost rozsvícení v případě sekundární emise je závislá na typu luminoforu, pohybuje se milisekundách až mikrosekundách. Je energeticky úspornější než klasická žárovka, protože při stejné spotřebě energie mají až desetkrát větší svítivost, je odolnější a má delší životnost. (Slavík a kol., 2013)

2.3 Současné poznatky problematiky Talbot-Plateova zákona

Talbot-Plateaův zákon byl formulován v roce 1835 v knize *Betrachtungen Über Ein Von Hrn. Talbot Vorgeschlagenes Photometrisches Princip*. Zákon je založen na experimentech, které potvrdily, že pokud na lidské oko dopadá pulzující světelný podnět s frekvencí vyšší než je kritická frekvence splývání, bude tento podnět vnímán jako stálý (tedy nepulzující) se střední hodnotou intenzity pulzujícího světla. Experimenty byly prováděny v režimu fotopického vidění a tehdejší světelné zdroje generovaly relativně pomalou náběžnou a sestupnou hranu. (Plateau, 1835)

Tento zákon lze demonstrovat Talbot-Plateaovým diskem. Jedná se o bílý disk se soustřednými pruhy, z nichž každý zobrazuje střídavě černou a bílou, ale se stejným množstvím černé i bílé. Když se disk otáčí, vykazuje jednotnou šedou barvu. V případě otáčení lze tedy podnět považovat za kontinuální. Efekt může být demonstrován také přerušením paprsku světla rotujícím diskem. Disk má v tomto případě vyřiznuté segmenty, takže určitý čas může světlo procházet. Pokud bude světlo procházet 50 % času a disk se bude točit pomalu - světlo je přerušeno pouze dvakrát nebo třikrát za sekundu, pozorovatel vidí světlo jako přerušované. Avšak jak se rychlost otáčení disku pomalu zvyšuje, je dosaženo bodu, ve kterém se světlo jeví jako nepřetržitě. Celkové množství světla se potom jeví jako by bylo rozloženo rovnoměrně po celé otáčce. (Roeckelein, 2006)

Broca-Sulzer efekt byl vysloven roku 1902 říká, že velmi krátký záblesk světla je vnímán mnohem intenzivněji, než je ve skutečnosti. Tento jev společně s Talbot-Plateaovým zákonem je důsledkem nelinearity vizuálního systému. (Fan et al., 2017)

Brücke-Bartley efekt říká, že pokud se frekvence světla pohybuje pod kritickou frekvencí, již ho vnímáme jako pulzující a toto světlo se jeví jasnější, než je jeho průměrný jas. Při zvyšování této frekvence bude vnímán jas nižší. (Solomon a Tyler, 2018)

Výše dva zmíněné efekty jsou důvodem, proč se Talbot-Plateaův zákon v této práci znovu ověřuje a to na světelných zdrojích LED, které jsou pro tyto experimenty nejvhodnější.

Dnešní polovodičové technologie (především LED) dovolují generovat mnohem

rychlejší náběžnou hranu a proto byly experimenty ověřovány na moderních zdrojích světla a nebylo dosaženo jednoznačných výsledků. Dnešní studie ověřují tento zákon na monochromatickém světle různé vlnové délky s různou frekvencí a střídou.

Spousta předchozích studií ovšem budí jisté pochybnosti a to především (Motomura et al., 2014) a (Fan et al., 2017). Některé chyby v těchto studiích mohly mít přímý vliv na získané výsledky. V jejich experimentech například nebyly LED nijak chlazeny, a proto mohlo dojít ke změně jejich vlastností kvůli nestabilním tepelným podmínkám. Různé studie též používají LED s různým spektrem vlnových délek. Dále byly použity rezistory ke snímání proudu s tolerancí 5 %, což je pro tyto účely příliš velká hodnota. V procesu získávání dat byl mezi pravým a levým kanálem signální přeslech. Pokud je tedy vypočítávána spotřeba energie u LED napájené stejnosměrným proudem, je výsledek ovlivněn pulzním průběhem druhého kanálu. Výsledek spotřeby energie stále svítící LED je tedy mírně nadhodnocen. Dále nebylo možné zaměnit druh provozu světla mezi pravým a levým segmentem, což mohlo způsobit určité zkreslení, pokud by byl u subjektu rozdíl mezi pravým a levým okem. Zkreslení též může být způsobeno rozdílným hardwarem. Každá LED či rezistor může být trochu odlišný. Proto je potřeba, aby jednou svítil pravý segment a podruhé zase levý. Navíc je nutné dělat tzv. kontrolní měření, kdy oba segmenty svítí stálým světlem. V některých experimentech chybí použití plastových difúzorů, se kterými lze dosáhnout rovnoměrnějšího rozložení světla v segmentech. Nepresvědčivý byl i přepočítání příkonu LED na svítivost. Konečné hodnocení bylo taktéž nevhodně provedeno. Pro každý subjekt byla nalezena shoda nejmenších čtverců, přičemž byly získány čtyři hodnoty. Poté byla zjištěna střední hodnota a směrodatná odchylka těchto čtyř hodnot. Tento postup zanedbává rozptyl v původních datech a neověřuje správnost regrese. (Kukačka et al., 2016)

Tyto pochybnosti z předešlých studií jsou hlavním důvodem vzniku této práce. V této diplomové práci se tedy snažíme neopakovat chyby vzniklé v předešlých experimentech a dosáhnout tak věrohodnějších výsledků.

Bylo prokázáno, že lidská sítnice dokáže detekovat frekvence až do 200 Hz a tento jev může být příčinou bolestí hlavy během delšího působení zdroje s takovou frekvencí. LED osvětlovací systémy se objevují stále a ke stmívání se používá modulace šířky pulzu při stovkách Hertzů. Správnou identifikací jasu rychle pulzujícího světla lze

pochopit, jak je pulzní světlo vnímáno lidským okem. (Kukačka a Dupuis, 2017)

Studie Motomury et al z roku 2014 ověřila, že pulzně ovládané LED při 0,765 W způsobují ekvivalentní vnímání jasu jako LED ovládané stejnosměrným proudem při 1 W. Minimalizace posunu vlnové délky pulzně ovládaných LED byla provedena rozdělením vstupního výkonu na více diod. Experiment došel k závěru, že 30 % zlepšení vizuálního vnímání bylo dosaženo bez posunu vlnové délky pulzně ovládaných LED. (Motomura et al., 2014)

Studie Chena T. et al z roku 2018 ověřila, že pulzní světlo má vliv na zvýšení jasu a tento účinek se mění v závislosti na vlnové délce a střídě. Maximální účinek na zvýšení jasu byl prokázán při vlnové délce 430 nm a nejnižší při 460 nm. Pokud jde o fyziologické účinky, výsledky ukazují, že pokud je člověk vystaven pulznímu světlu nad kritickou frekvencí, není ovlivněn krevní tlak ani srdeční frekvence. Pokud jsou však lidé vystaveni pulznímu světlu nad kritickou frekvencí s nízkou střídou po několik hodin, byl ovlivněn jejich krevní tlak i srdeční frekvence. (Chen et al., 2018)

Stejných závěrů, co se týče vlnové délky a střídy, bylo dosaženo ve studii Fana et al. roku 2017. Jinno et al. v roce 2008 zjistili, že Talbot-Plateauův zákon neplatí pro nepřetržitě pulzně ovládané LED systémy. V experimentu byly použity modré, zelené a červené LED a výsledky ukázaly, že efektivní zvýšení jasu při pulzním provozu bylo asi 1,01 až 2,22krát větší než při stejnosměrném provozu. V tomto experimentu ovšem subjekty pozorovaly přímo LED, tudíž mohl být jejich úsudek ovlivněn posunem spektra pulzně ovládaných LED. Výsledky byly ovšem dosaženy nevhodně provedenou lineární regresí a proto je nelze brát jako důvěryhodné (Fan et al., 2017)

Ve studii Fan et al. z roku 2017 byl porovnáván jas stejnosměrného a pulzního světla červené (640 nm) a zelené (550 nm) barvy. Vliv posunu vlnové délky byl eliminován použitím filtrů. Frekvence pulzního režimu byla 100 Hz a střída mezi 10 a 90 %. Výsledky ukázaly, že červené světlo mělo účinek na zvýšení jasu při malé střídě, zatímco světlo zelené mělo účinek zanedbatelný. Zde bylo též dokázáno, že různá vlnové délka a střída mají odlišný účinek na zvýšení jasu. (Fan et al., 2017)

Další studie od Xina et al. má podobné výsledky. Nižší střída zajišťuje vyšší intenzitu vnímání jasu. Při střídě 20 % a frekvenci 100 Hz byl účinek zvýšení vnímání

jasu asi 1,13krát větší než při stejnosměrném režimu. Při vyšší střídě se účinek pulzího režimu bude rovnat účinku stejnosměrného režimu a bude tak platit Talbot-Plateauův zákon, kde byla použita střída asi 71 %. (Xin et al., 2012)

Odlišný výsledek přináší studie Kukačky et al., kde byly pužity čtyři tvary pulzů LED. Zvýšení jasů oproti stejnosměrnému provozu byl pozorováno při obdélííkovém průběhu pulzu a to o 5 %. Ovšem ke zvýšení vnímání jasů nedošlo, pokud byla náběžná či sestupná hrana obdélííkového průběhu pomalejší než ta druhá. Toto zjištění potvrzuje hypotézu, že Talbot-Plateauův zákon platí pro neideální pulzy a pro ideální pulzy platí Broca-Sulzer efekt. (Kukačka et al., 2016)

2.4 Lidské oko

Světlo vstupuje do oka přes rohovku, komorovou vodu, čočku, sklívec a následně dopadá na sítnici. V sítnici dojde k přeměně na elektrický signál, který je vyslán dále do mozku. (Šikl, 2012)

Zraková dráha je složena z řetězce 4 neuronů. Ty vedou informaci ze sítnice do korové oblasti mozku. První neuron tvoří fotoreceptory – tyčinky nebo čípky. Čivé výběžky těchto fotoreceptorů zachytí světelné paprky a vodivé výběžky je předají dalšímu neuronu. Druhý neuron tvoří bipolární neurony v sítnici. Některé z nich sbírají informace z tyčinek a některé z čípků. Třetí neuron jsou velké multipolární neurony, které se nacházejí na povrchu sítnice. Jeden multipolární neuron sbírá informace z několika bipolárních neuronů. Jejich neurity se sbíhají k papile zrakového nervu a prochází oční stěnou. Za oční stěnou tvoří zrakový nerv. Ten se dále dělí a silnější *radix lateralis* se přepojuje na čtvrtý neuron. Radix medialis vede informaci ze sítnice k šedým hmotám centrálního nervového systému a ovlivňuje jejich funkce, ale již nemá úkol ve zpracování zrakových signálů. Část vláken končí ve středním mozku, jiná v hypotalamu. Zde ovlivňují metabolickou aktivitu podle množství světla dopadajícího na sítnici podle délky dne v ročním období. Další část vláken vede do středního mozku a ovlivňuje motoneurony okohybných svalů. Neurity čtvrtého neuronu končí v kortikálním zrakovém poli okcipitálního laloku. (Synek a Skorkovská, 2014)

2.4.1 Zornice

Zornice (panenka, pupila) je otvor v duhovce. Její průměr se mění v rozmezí 2 až 8 mm. Změna průměru je prováděna dvěma antagonistickými svaly duhovky – stažením jednoho a uvolněním druhého a to převážně nezávisle na naší vůli (Šikl, 2012).

K zúžení zornice dochází reflexivně při vyšší intenzitě osvětlení, k rozšíření zase při nízké intenzitě, aby na sítnici dopadlo více fotonů. Zornice při vidění tedy napomáhá k vyvážení citlivosti a rozlišení. Zúžení zornice přináší ještě jednu výhodu. Při přihmouření očí zmenšíme otvor, kterým do oka vstupuje světlo a paprsky dopadající na sítnici pod velkým úhlem jsou odfiltrovány. Paprsky, které prochází střední částí čočky není potřeba lámat, aby se sběhly na sítnici. Při zúžení zornice tedy čočka nefunguje plně jako světlolomný aparát. Není tedy tolik potřeba správné akomodace a zvyšuje se hloubka ostrosti. (Šikl, 2012)

Velikost zornice se mění i při jiných situacích, než je intenzita osvětlení. Zornice se zvětšuje například při usilovném přemýšlení, po požití některých látek, při silných (pozitivních i negativních) emocích. (Šikl, 2012)

Pupilární reflex je reakce oka na množství dopadajícího světla. Jeho dráha začíná v sítnici, kde detekuje množství dopadajícího světla. Zpětnovazebně poté reguluje osvit sítnice pomocí svalů duhovky. Výsledkem může být mióza nebo mydriáza. Mióza je zúžení zornice a tím je omezeno množství světla vnikajícího do oka. Mydriáza je rozšíření zornice a tím zvětšení toku světla do oka (Synek a Skorkovská, 2014).

2.4.2 Fotoreceptory

Fovea (ústřední jamka sítnice) je místo nejvyšší zrakové ostrosti a obsahuje téměř výhradně čípky. V zorném poli zabírá oblast o úhlu asi 1,5°. (Anon, 1996) Po zaznamenání zrakového jevu v periférii sítnice je oko automaticky natočeno tak, aby vjem dopadl do fovey. Uprostřed fovey je foveolární deprese. (Kolář, 2008)

Fovea se nachází v ose oka a promítá se na ni obraz sledovaného objektu. Obraz promítnutý přímo na ni vidíme ostřeji a detailněji než okolí a také je zde největší citlivost na barvy. Dále od fovey obraz bledne a v 45° je vidění zcela achromatické. Jediným místem, kde se nenachází ani jeden druh receptorových buněk se nazývá slepá skvrna. (Šikl, 2012) Ta se nachází nazálně od fovey v úhlu 15° až 20° (Kolář, 2008).

Tyčinky

Jejich počet je asi 100 milionů. Vytvářejí monochromatický obraz – v odstínech šedi. Oblast s maximální skotopickou aktivitou je v 5° od centra fovey. Celá zraková dráha je konstruovaná na světelný podnět o minimální intenzitě (1 foton). Prahová hodnota zrakového podnětu vzniká ze signálu z 5 až 10 tyčinek. Na jednu bipolární buňku se připojuje 20 až 100 tyčinek. Na jednu gangliovou buňku se připojuje 100 bipolárních buněk. Gangliová buňka tedy dostává signál z 10 000 tyčinek. Při podráždění všech 10 000 tyčinek vzniká absolutní prahová intenzita pro vznik světelného vjemu. (Kolář, 2008)

Tyčinky se aktivují za nižších intenzit (v noci). Jsou velmi citlivé na světlo. Mají pouze jeden druh pigmentu a proto není možné odlišit světla různých vlnových délek – nerozeznáváme barvy. Adaptace na tmu trvá přibližně 30 minut. Podle (Synek, Skorkovská, 2014) trvá ale tento proces až jednu hodinu. V úplné tmě je v oku nejvíce rhodopsinu. Na světle dochází k trans-izomerii rhodopsinu. Obnovení původního rhodopsinu zpětnou konverzí trvá podstatně déle než jeho trans-izomerace a proto je adaptace na tmu mnohem pomalejší než na světlo. Tyčinky se nenachází ve středu žluté skvrny ale přibližně 20° od ní, tedy v periferní části. Počet a druh světločivých buněk se mezi živočichy liší. Zvířata aktivní v noci mají vyšší počet tyčinek a zvířata aktivní ve dne mají naopak vyšší podíl čípků. (Šikl, 2012)

Čípky

Jejich počet je asi 5 milionů. Jsou větší než tyčinky a slouží ke vnímání barev. V lidské sítnici se nacházejí tři druhy čípků a odlišují se schopností vnímat určitou část viditelného spektra. Rozlišujeme je tedy na červené, zelené a modré. Modré čípky tvoří asi jen 10 %, ale díky dostatečné schopnosti redukce chromatické aberace v modré části spektra se jejich nízký počet kompenzuje. Pro modré čípky je charakteristická absence v centrální oblasti. (Kolář, 2008)

Čípky umožňují vidění za vyšších světelných intenzit. Vyšší intenzity jsou přítomny během dne či za umělého osvětlení. Díky nim jsme schopni rozlišit jemné detaily v zorném poli. Čípky se dělí do tří druhů (viz výše) a každý druh je citlivý na světlo jiných vlnových délek. Proto jsme schopni vnímat barvy. Adaptace na vysoké intenzity je možná během jedné minuty a maximální citlivost je na vlnové délce 555 nm, což

znamená, že lidské oko je nejcitlivější na zelenožlutou barvu. Nachází se převážně ve žluté skvrně, kde je jejich koncentrace 150 000 na 1 mm². Směrem od žluté skvrny čípků postupně ubývá a přibývá tyčinek. (Šikl, 2012)

Čípky modré (nebo-li čípky s krátkou vlnovou senzitivitou) mají maximální senzitivitu při 445 nm. Čípky zelené (nebo-li čípky se střední vlnovou intenzitou) mají maximum v 543 nm a červené čípky (s dlouhou vlnovou intenzitou) v 566 nm. (Kolář, 2008)

Tyčinky pracují v rozmezí 8 řádů jasů a čípky v 6 (Kolář, 2008). Oba druhy světločivých buněk obsahují pigment zvaný retinal, který se váže na různé opsinové báze. Tyčinky obsahují jen jednu variantu retinalu, čípky hned tři varianty (viz výše). (Šikl, 2012)

2.5 Optické vlastnosti oka

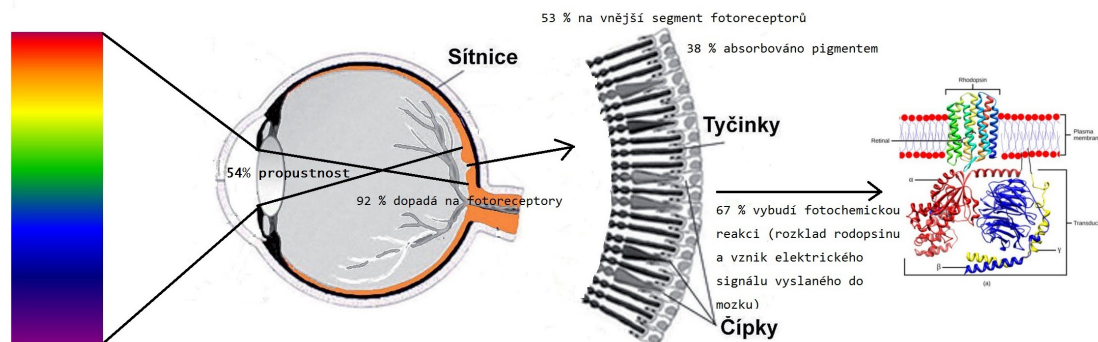
Optická soustava vytváří obraz na sítnici a patří sem rohovka, komorová voda, sklivce a čočka. Duhovka slouží jako aperturní clona. Existují různé optické modely oka. (Kuchynka, 2016)

Oko je na rozdíl od fotoaparátu aktivní optická soustava, která umí své parametry přizpůsobovat daným podmínkám. Základním procesem je akomodace, která změnou tvaru, pozice a rozložení indexu lomu mění optické vlastnosti oka. V tomto případě má oko možnost zaostřit na různě vzdálené předměty. Při akomodaci dochází k posunu zornice a vstupní a výstupní pupily směrem dopředu. Umístění a průměr vstupní pupily ovlivňuje kvalitu (tedy ostrost) a hloubku obrazu. Změna velikosti pupily se zapojuje i při adaptaci oka. Osvětlení sítnice se mění s druhou mocninou průměru pupily. Sítnice je jakýmsi fotodetektorem oka, je zde zpracováván obraz. Křivost sítnice odpovídá křivosti obrazu, což má pozitivní důsledky na zachování periferní ostrosti. Každý fotoreceptor je optický vlnovod, který směřuje ke středu pupily. Je ovšem omezen úhel paprsků, které do něho mohou vstoupit. Citlivost klesá se vzrůstajícím úhlem. Tento jev se nazývá Stilesův-Crawfordův jev. (Kuchynka, 2016)

Světlo zachycené receptory je absorbováno pigmentovým epitelem na vnější straně sítnice. Tato vrstva zabraňuje zpětnému rozptylu světelných paprsků do oční koule a ven z oka. Zde je rozdíl oproti nočním živočichům. Jejich zrak je vyvinut tak, aby byl

dostatečný i při nižším osvětlení. Za sítnicí mají tyto živočichové reflexní vrstvu zvanou *tapetum lucidum*. Ta světelné paprsky nepohlcuje, ale odráží je zpět na sítnici, kde opět prochází přes fotoreceptory a jsou zachyceny. Oblasti prvního a druhého průchodu fotoreceptory však nejsou vždy stejná a tak je jedna informace zachycena dvěma různými buňkami. Tento jev se projeví sníženou ostroť vidění. (Šikl, 2012)

Ztráty při průchodu světla okem jsou dány odrazem na jednotlivých rozhraních a absorpcích v různých očních prostředích, jak je znázorněno na obrázku 2. Celková propustnost oka pro celé spektrum je asi 54 %. 92 % světla dopadajícího na sítnici zachytí fotoreceptory, z toho 53 % dopadne na vnější segment fotoreceptorů, které obsahují zrakový pigment. Z toho je 38 % absorbováno pigmentem a 67 % vybudí fotochemickou reakci. Celková účinnost je tedy 12 % a po uvážení propustnosti 54 % se dostaneme na 7 %. (Kuchynka, 2016)



Obrázek 2: Účinnost oka (Carter a Scott, 2018) a (Maierová, 2017), (upraveno)

2.5.1 Rozlišení a citlivost oka

Základní výkonové funkce oka jsou rozlišení a citlivost. Každá z nich klade na oko jiné a dokonce protikladné nároky.

Rozlišení je schopnost vidět detaily v zorném poli. Dá se měřit pomocí zrakové ostrosti (vízu). Zraková ostrost je nejmenší zorný úhel nebo nejmenší vzdálenost dvou bodů, jež je oko ještě schopno rozlišit jako dva body. Rozlišovací schopnost značně klesá za šera a zmenšuje se směrem k periférii sítnice. Rozlišení je dáno správnou funkcí čípků, velikostí receptivního pole a mírou konvergence světelného signálu. (Šikl, 2012)

Konvergence je sdílení některých neuronů mezi vícero tyčinek. Informace z těchto

oblastí je proto méně přesná. (Langmeier, 2009) Větší míra konvergence (u periferie sítnice) snižuje rozlišování detailů, protože svedení informace z větší části zorného pole do jedné buňky neumožňuje zpětnou zprávu o tom, z kterého místa v prostoru informace přišla (Šikl, 2012).

Vzdálenost mezi dvěma receptory odpovídá právě oné nejmenší vzdálenosti mezi dvěma rozlišitelnými body v prostoru (Šikl, 2012). Tento způsob propojení však umožňuje sčítání signálů, což přináší vyšší citlivost (Langmeier, 2009). Nejmenší vzdálenost mezi dvěma ještě rozlišitelnými body v prostoru se uvádí formou úhlu – v minutách. Této hodnotě říkáme *minimum separabile*. Průměrná hodnota tohoto úhlu α je 1'. (Rutle, 1993) Výpočet této hodnoty se provádí takto:

$$\tan(\alpha) = \frac{y'}{F} \quad (\text{rovnice 2})$$

kde F je předmětová ohnisková vzdálenost Gullstrandova optického modelu lidského oka. Tato hodnota byla stanovena na 17,05 mm (Friedman et al., 2016). Y' je velikost obrazu na sítnici - tedy průměr čípku v místě s nejvyšším rozlišením (v optické ose oka – ve fovea centralis) a je roven 0,005 mm (Hrušková, 2015). Vzdálenost mezi dvěma receptory odpovídá průměru receptoru mezi nimi, který není podrážděn. Jedině tímto způsobem je možné dva body vnímat jako dva.

Citlivost je schopnost detekovat a zpracovat světlo k získání dostatečné informace. Citlivost je důležitá zejména v noci, kdy je fotonů velmi málo a snižuje se pravděpodobnost aktivace příslušných fotoreceptorů. Pokud je intenzita osvětlení příliš malá, nelze určovat detaily ani rozpoznávat barvy. Člověk ve tmě objekty vnímá pomocí kontrastu, tedy rozlišuje světlejší a tmavší plochy a kontury. Citlivost je zajištěna pomocí tyčinek. Opět záleží na velikosti receptivního pole a míře konvergence. Vyšší míra konvergence je zde ale výhodou, protože umožňuje sečtení lokálních podráždění receptorů v rámci receptivního pole a tím roste šance na aktivaci odpovídající buňky a tím i na detekci podnětu. Citlivost samozřejmě záleží na velikosti zornice, ta reguluje množství dopadajícího světla. U zvířat bývají zornice velmi velké vzhledem k velikosti oka a přináší výhodu živočichům žijícím v noci nebo u dna moře. (Šikl, 2012)

Při testování citlivosti oka na složky viditelného spektra je možné získat dvě křivky. Při fotopickém vidění (kdy je oko adaptované na světlo) jsou aktivovány čípky a citlivost je maximální při vlnové délce 555 nm, což odpovídá žlutozelené barvě. Při

skotopickém vidění (kdy je oko adaptované na tmu) jsou aktivní tyčinky a citlivost je posunuta na vlnovou délku 507 nm, což odpovídá modrozelené barvě. Mezopické vidění je pásmo, kde fungují tyčinky i čípky současně a jedná se o přechodný jev mezi fotopickým a skotopickým viděním. Posun maxima citlivosti poprvé popsal J. E. Purkyně ve své disertační práci Spis o zraku a vidění z roku 1818. Dodnes se je tato skutečnost nazývána Purkyňův jev. Rozdíl prahu citlivosti pro světlo a pro určitou barvu je tzv. fotochromatický interval. Lidský zrak umí rozlišovat odstín, sytost a jas. Trichromatické vidění je podmíněno přítomností třech druhů fotoreceptorů v sítnici (viz dále). Základní barvy (červená, zelená a modrá) jsou nasycené. Pokud k nim přidáme bílé světlo, nazýváme je nenasyčené. Při maximálním zvýšení intenzity světla jsme schopni vnímat pouze žlutobílou barvu. (Synek a Skorkovská, 2014)

Poznámka: Každou barvu je možno napodobit v kolorimetrickém prostoru XYZ. Tento třírozměrný prostor je určen třemi vzájemně kolmými osami, kam se vynášejí hodnoty trichromatických složek X, Y, Z. Toto prostorové zobrazení ale není příliš praktické a proto je nahazeno rovinným řezem kolorimetrického prostoru – kolorimetrickým trojúhelníkem nebo-li diagramem chromatičnosti. V něm je chromatičnost vyjádřena dvěma souřadnicemi. Chybějící souřadnici-jas je možno uvést jako číselný údaj přiřazený ke konkrétnímu bodu barvy. V kolorimetrickém prostoru XYZ i v jeho rovinném řezu neodpovídají lineární vzdálenosti v různých místech stejným subjektivně vnímaným rozdílům a naopak. Proto, pokud nás zajímá subjektivní vjem chromatičnosti, je vhodnější použít rovnoměrný kolorimetrický prostor, kde subjektivně vnímaný rozdíl odpovídá stejné vzdálenosti a naopak. Tyto rovnoměrné soustavy známe dvě: CIELUV a CIELAB (Anon, 1990).

Kritická frekvence splývání

Kritická frekvence splývání je rychlost za sebou následujících podnětů, kdy už nelze rozlišit jednotlivé podněty. Jeho hodnota závisí na jasu podnětu. Čím je jas vyšší, tím je vyšší i tato frekvence. Tento jev popisuje Ferry-Porterův zákon. Určuje, kdy už je frekvence f nad kritickou hodnotou [Hz]. Zákon je dán vzorcem (Oka et al., 2000):

$$f_k = k_1 + k_2 \times \log_{10} L \quad (\text{Rovnice 3})$$

kde L je jas [$cd \times m^{-2}$], $k_1 = 30,26$ a $k_2 = 12,6$. Konstanty k_1 a k_2 jsou hodnoty dosažené experimenty (Oka et al., 2000).

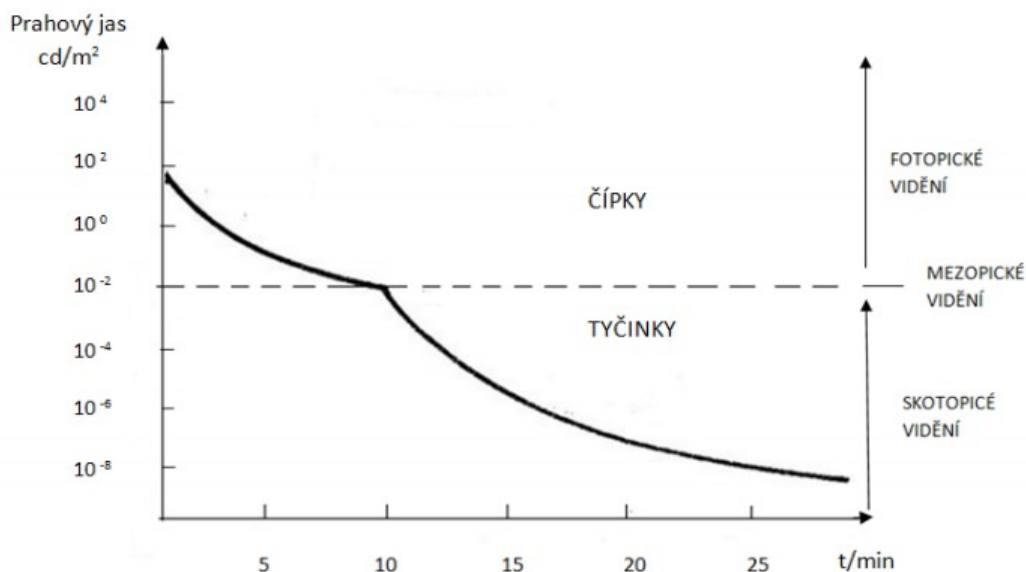
V našem experimentu bude použita na pulzních kanálech frekvence 50Hz. Dle vzorce výše je tato frekvence splynutí na úrovni fotopického jasu $37 \text{ [cd} \times \text{m}^{-2}]$, jas v našem experimentu se bude pohybovat do $0,004 \text{ cd} \times \text{m}^{-2}$, takže zde máme více než dostatečnou rezervu.

Rozlišení podnětů závisí i na šířce zornice. Při fotopickém vidění za optimálního osvětlení je tato frekvence až 60 podnětů za sekundu. Při skotopickém vidění se frekvence snižuje až na 5 podnětů za sekundu, protože tyčinky nejsou schopné vnímat rychlé změny intenzity světla. V případě periferního vidění není tato křivka lineární, je rozdělena do dvou křivek pro tyčinky a čípky zvlášť. (Synek a Skorkovská, 2014)

2.5.2 Adaptace na jas

Při pomalém snižování intenzity postupně přestáváme vnímat detaily, barvy, tvary. Při náhlém snížení intenzity je vidění velmi sníženo až znemožněno. (Atrata, 2002) První fáze adaptace je sítnicová, druhá fotosenzorická. Čípky se adaptují do 10 minut a jejich citlivost vzrůstá 50 krát. Tyčinky se adaptují do 30 minut, ale citlivost se zvýší asi 500x. (Pašta, 2017)

Zraková adaptace na tmou spočívá v postupné aktivaci tyčinek a deaktivaci čípků. Proto při přechodu z osvětlené místnosti do tmavé nějakou dobu nejsme schopni vnímat světelné podněty. Tento proces lze popsat adaptační křivkou. Ta se skládá ze dvou částí. První část je známá jako rychlá fáze nebo čípková adaptace sítnice. Citlivost se zde zvyšuje 100krát. Druhá část křivky se nazývá tyčinková, je pozvolnější a citlivost sítnice se zvýší až 100 000 krát. (Synek a Skorkovská, 2014) Z grafu 1 je možno vidět, že tyčinky přebírají funkci vidění při prahovém jasu v řádu $10^{-2} \text{ [cd} \times \text{m}^{-2}]$.



Graf 1: Adaptační křivka – adaptace na skotopické vidění (Pluháček, 2010)

Podmínkou adaptace na tmu je syntéza pigmentu rodopsinu, který se nachází ve světločivých buňkách sítnice, konkrétně v tyčinkách (Synek a Skorkovská, 2014). Název rodopsin dostala tato bílkovinná látka pro svou červenou barvu. Rhodopsin obsahuje vitamín A, který je rozpustný v tucích a je senzitivní na světlo. Za tmy je barva červená a za denního světla se mění na žlutou a bílou. (Autrata, 2002)

Fyziologicky je lidské oko schopno rozeznat světelné vjemy od jasného slunečního světla až to úplné tmy. Pokud se dostaneme mimo rozmezí fyziologické adaptace, jsme v podstatě slepí. Větší část adaptace se odehrává na fotoreceptorech a část také v nervových spojích sítnice. (Kolář, 2008)

Oko pracuje při velkém rozsahu hodnot jasu – od $10^6 \text{ cd} \times \text{m}^{-2}$ do $10^{-6} \text{ cd} \times \text{m}^{-2}$. Efektivně ale umí fungovat v krátkém časovém úseku asi v rozsahu $10^4 \text{ cd} \times \text{m}^{-2}$. Adaptace na nižší úrovně světla je dlouhá a čas k dosažení absolutního prahu citlivosti je asi 1 hodina. Skotopické vidění začíná na jasu $10^{-2} \text{ cd} \times \text{m}^{-2}$. Mezopické vidění funguje mezi 1 a $10^{-2} \text{ cd} \times \text{m}^{-2}$. Adaptace na tmu je hlavně záležitostí sítnice a změna průměru pupily nehraje tak důležitou roli. Proces adaptace na světlo je důležitý pro detekci prostorové změny jasu, rozlišení detailů apod. Je charakterizován minimálním rozdílem jasů, které jsou ještě rozlišitelné. Práh rozpoznání různých hodnot jasu stanovuje Weberův-Fechnerův zákon. Ten tvrdí, že subjektivní vjem změny jasu je úměrný relativní změně jasu $\Delta L/L$. Pro fotopické vidění platí, že

prahová hodnota vnímané relativní změny jasu je téměř konstantní $\Delta L/L \sim 1,5$ až 2 %. V případě mezopického a skotopického vidění prahová hodnota vzrůstá. To dokazuje, že kontrastní citlivost je lepší při fotopickém vidění a lze tedy detekovat nižší kontrasty. (Kuchynka, 2016)

Abychom tedy v nadprahové oblasti mohli odlišit dva různě silné podněty, hodnoty jejich intenzit musí být v minimálním poměru. Tento poměr je dán přírůstkem intenzity silnějšího podnětu ΔL k intenzitě podnětu slabšího L . Proto lze například vidět v noci hvězdy a ve dne nikoliv. G. T. Fechner z Weber-Fechnerova zákona odvodil vztah mezi intenzitou vjemu V a intenzitou podnětu S (Trojan, 2003):

$$V = k \times \log L / L_0 \quad \text{resp.} \quad (\text{Rovnice 4})$$

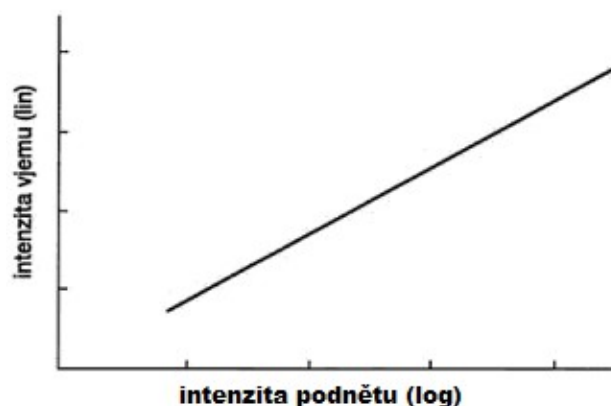
$$V = k \times \log S + C \quad (\text{Rovnice 5})$$

kde k a C jsou konstanty a L_0 prahová intenzita podnětu, tedy nejnižší možná intenzita, jakou jsme schopni vnímat. L je intenzita podnětu působící na daný receptor.

Ernst Heinrich Weber a Gustav Fechner došli po mnoha experimentech k tomu, že čím je vyšší hodnota standardního podnětu, tím méně citlivá je konkrétní smyslová soustava na změnu intenzity podnětu. Standardní podnět je jakákoliv daná hladina běžného podnětu stimulující naše smysly. Přesněji lze pro většinu situací říci, že hodnota, o kterou se musí zvýšit podnět, aby byla zaznamenána změna, je přímo úměrná intenzitě standardního podnětu. Nejmenší pozorovatelný rozdíl při vnímání intenzity světla (tedy procentuální změna nutná k spolehlivému rozeznání změny) je 8 %. Tato hodnota se nazývá konstanta úměry, nebo-li Weberova konstanta. Tuto hodnotu lze vysvětlit například takto: Místnost je osvětlená 100 svíčkami. Aby byla zaznamenána změna intenzity osvětlení, je zapotřebí přidat ještě dalších 8 svíček (tedy 8% navýšení intenzity osvětlení). Obecně je člověk vnímavější na změny světla a zvuku než na změny chuti a hmatu (Nolen-Hoeksema, 2012).

V případě jasu $0,004 \text{ cd} \times \text{m}^{-2}$ použitého v našem experimentu je intenzita vjemu dle Weber-Fechnerova zákona rovna 44,8 % změny jasu.

Dle tohoto zákona intenzita vjemu roste lineárně a intenzita podnětu logaritmičtě, jak lze vidět na grafu 2.



Graf 2: Závislost intenzity vjemu a intenzity podnětu (Trojan, 2003)

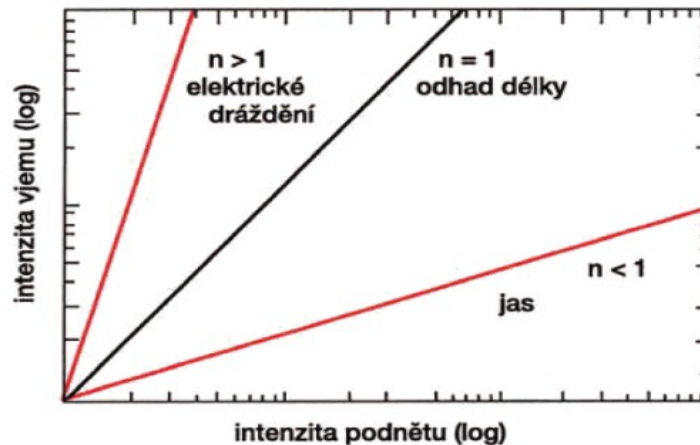
Subjektivně vnímaná malá změna vjemu je tedy přímo úměrná změně intenzity podnětu a nepřímo úměrná intenzitě vjemu. Závislost intenzity a vjemu je nejspíše dána membránovými strukturami receptorů a tím, že receptory jsou schopny vnímat široký rozsah intenzit a zároveň mají vysokou rozlišovací schopnost při nízkých intenzitách. (Trojan, 2003)

Ve větším rozsahu intenzit a lépe popisuje tuto závislost Stevensova mocninná funkce (Trojan, 2003):

$$S = k \times (L - L_0)^n \quad \text{resp.} \quad (\text{Rovnice 6})$$

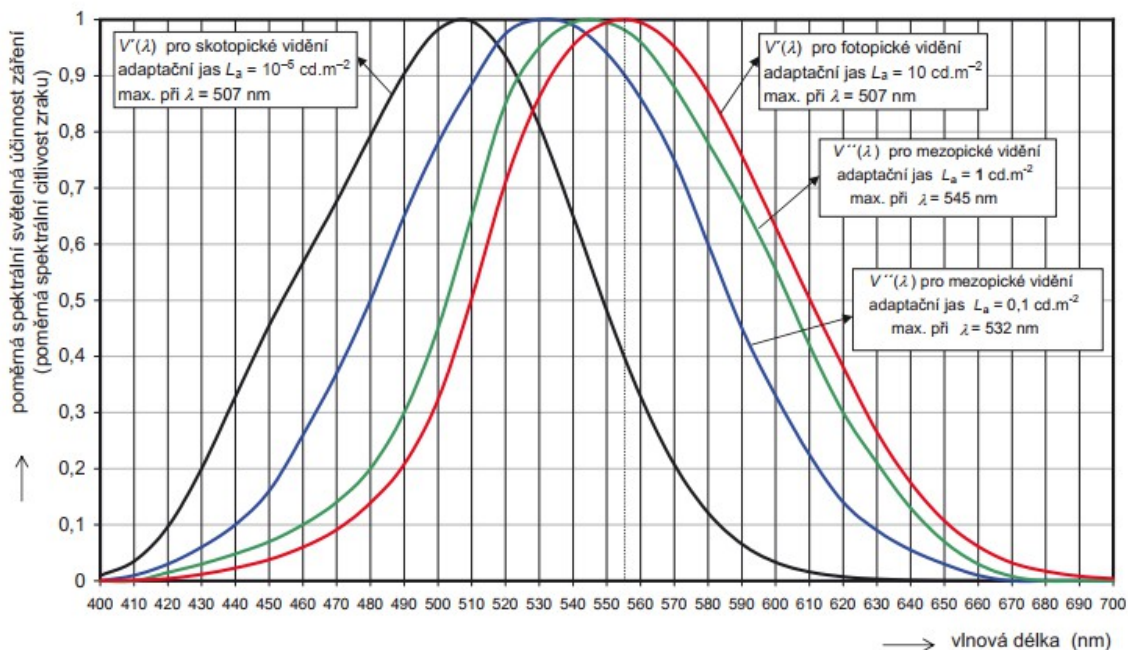
$$S = k \times L^n \quad (\text{Rovnice 7})$$

kde n charakterizuje funkci smyslového orgánu. Na grafu 3 vidíme logaritmické závislosti intenzity vjemu a intenzity podnětu. N je směrnice přímky v logaritmickém zobrazení a též exponentem. Pokud je n menší než 1, má přímka průběh méně strmý a odpovídá vnímání změny jasu. (Trojan, 2003)



Graf 3: Závislost intenzity vjemu a intenzity podnětu pro konkrétní druh počítku (Trojan, 2003)

Fotoreceptor rozezná malou změnu intenzity na adaptované úrovni světelné hladiny. Adaptační mechanismy sítnice mění senzitivitu do tak malé oblasti, že je odpověď směřována do dané oblasti adaptované hladiny nad širokým rozmezím různých hladin osvětlení. Tento proces je základem pro široký operační prostor zrakového systému. Lze měřit prahovou hodnotu vnímání podnětů pro pozadí se stabilní světelnou hladinou. Při změně světelné hladiny pozadí dochází ke zvýšení prahové hodnoty osvětlení a tyčinky a čípky se v tuto chvíli chovají zcela odlišně. S rostoucí hladinou osvětlení pozadí tyčinky plynule zvyšují intenzitu prahové hodnoty osvětlení a to až do chvíle, kdy je dosaženo saturační hodnoty. Tato hodnota je na nižší úrovni, než je registrovaná hladina oslnění. Čípky zvyšují plynule hodnotu prahového osvětlení až do úrovně oslnění. (Kolář, 2008)



Graf 4: Závislost poměrné spektrální citlivosti na vlnové délce pro fotopické, skotopické a mezopické vidění (Habel a Žák, 2007)

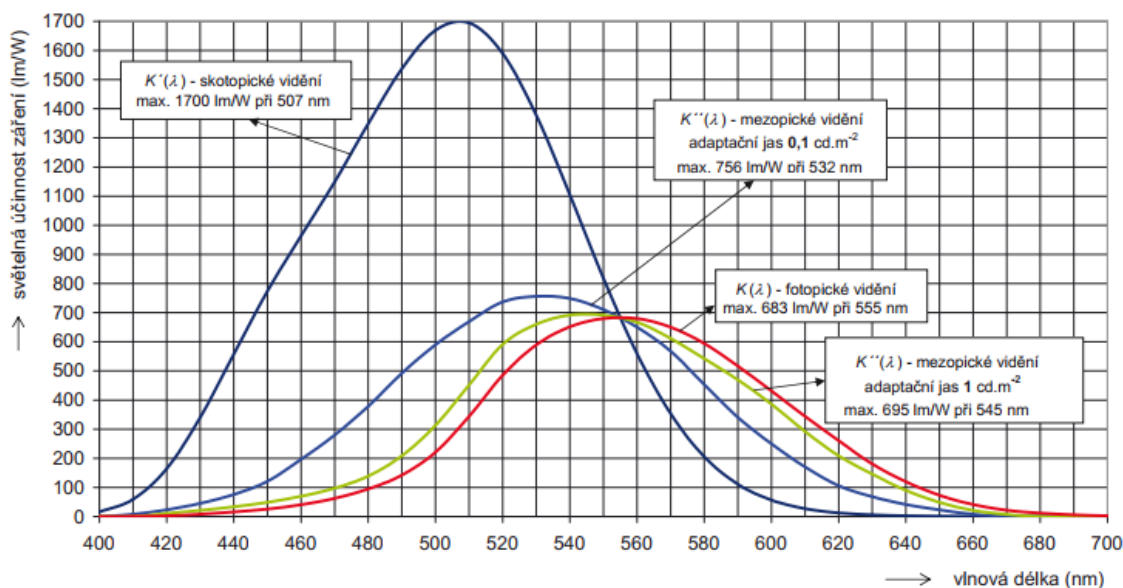
Weberovou oblastí je nazývána oblast, kde dochází k lineárnímu vzestupu hladiny osvětlení při stoupající hladině osvětlení pozadí. Čípky mají nižší hodnotu Weberova zlomku než tyčinky. Tyčinky vnímají rozdíl v kontrastu od 20 % a čípky již od 1 %. (Kolář, 2008)

Na grafu 4 se nachází křivky poměrné spektrální citlivosti pro fotopické, skotopické a mezopické vidění. Pro mezopické vidění jsou zde křivky dvě pro různé adaptační jasy. (Habel a Žák, 2007)

Poměrná spektrální světelná účinnost pro fotopické vidění je dána vztahem (Habel a Žák, 2007):

$$V(\lambda) = \frac{K}{K_m} \quad (\text{Rovnice 8})$$

Pro skotopické vidění je veličina značena $V'(\lambda)$ a výpočet je stejný.



Graf 5: Světelná účinnost pro fotopické, skotopické a mezopické vidění (Habel a Žák, 2007)

Z grafu 5 můžeme vidět závislost světelné účinnosti na vlnové délce pro fotopické, skotopické a dva mezopické jasy s rozdílným adaptačním jasnem.

Při fotopické vidění je maximální poměrná spektrální světelná účinnost rovna 1 a odpovídá vlnové délce 555 nm. Pro skotopické vidění je rovna 0,40176 a odpovídá vlnové délce 507 nm. (Habel a Žák, 2007)

Úpravou výše zmíněného vztahu z rovnice 7 získáme maxima průběhů světelných účinností záření. Pro fotopické vidění je toto maximum $683 \text{ lm} \times \text{W}^{-1}$ a pro skotopické $1700 \text{ lm} \times \text{W}^{-1}$, jak níž bylo zmíněno na začátku diplomové práce. (Habel a Žák, 2007)

Závislost fotopického a skotopického vidění vyjadřuje kvocient R_{SP} , který je poměrem světelného výkonu zdroje podle funkce skotopické spektrální světelné účinnosti $V'(\lambda)$ ku světelnému výkonu zdroje podle funkce fotopické spektrální světelné účinnosti $V(\lambda)$:

$$R_{SP} = \frac{K'_m \times \int_0^{\infty} S_{\lambda}(\lambda) \times V'(\lambda) d\lambda}{K_m \times \int_0^{\infty} S_{\lambda}(\lambda) \times V(\lambda) d\lambda} \quad (\text{rovnice 9})$$

K'_m je maximální světelná účinnost záření skotopického vidění a K_m je maximální světelná účinnost záření pro fotopické vidění, jak je již zmíněno výše. S_{λ} je

spektrální složení světelného zdroje. (Anon, 2017)

Mezopické vidění je považováno za kombinaci fotopického a skotopického vidění, tudíž lze i pro něj předpokládat, že spektrální průběhy citlivostí budou mít shodné hodnoty při vlnové délce 555 nm. (Habel a Žák, 2007)

Pro zvolené adaptační jasy mezopického vidění lze taktéž dopočítat maxima průběhů světelných účinností. Pro adaptační jas $0,1 \text{ cd} \times \text{m}^{-2}$ je maximální poměrná spektrální světelná účinnost rovna 0,9035 při 532 nm a maximální světelná účinnost je po dosazení rovna $756 \text{ lm} \times \text{W}^{-1}$. Pro adaptační jas $1 \text{ cd} \times \text{m}^{-2}$ je poměrná spektrální světelná účinnost 0,9825 při vlnové délce 545 nm a maximální světelná účinnost je poté $695 \text{ lm} \times \text{W}^{-1}$. Tyto hodnoty jsou znázorněny na grafu 5. Z grafu lze na první pohled vyčíst, že mezopické vidění má blíže spíše k fotopickému vidění, ovšem jisté odchylky tu jsou a proto je nelze zanedbat například při tvorbě norem pro venkovní osvětlení. (Habel a Žák, 2007)

Vliv spektrálního složení zdrojů světla může mít vliv na rozdílný výsledek mezi objektivními fotometrickými výpočty a subjektivním hodnocením jasu pozorovatele. Proto je vhodné zahrnout porovnání hodnot světelných toků zdrojů světla pro odlišné adaptační jasy. Pro teplotní světelné zdroje jsou tyto odchylky zanedbatelné, ale v případě monochromatických zdrojů (především LED) mohou být tyto odchylky až desetinásobné. Příkladem je pozorování při skotopických jasech (tedy nižších než $0,1 \text{ cd} \times \text{m}^{-2}$), kdy bude při stejné hodnotě fotopického jasu člověk vnímat modrou část spektra desetkrát intenzivněji než spektrum vzniklé teplotním zdrojem. (Habel a Žák, 2007)

Popis mezopického vidění nelze provést jednou křivkou, jako je tomu u fotopického a skotopického vidění, ale většího množství křivek, které se nacházejí mezi fotopickým a skotopickým viděním.

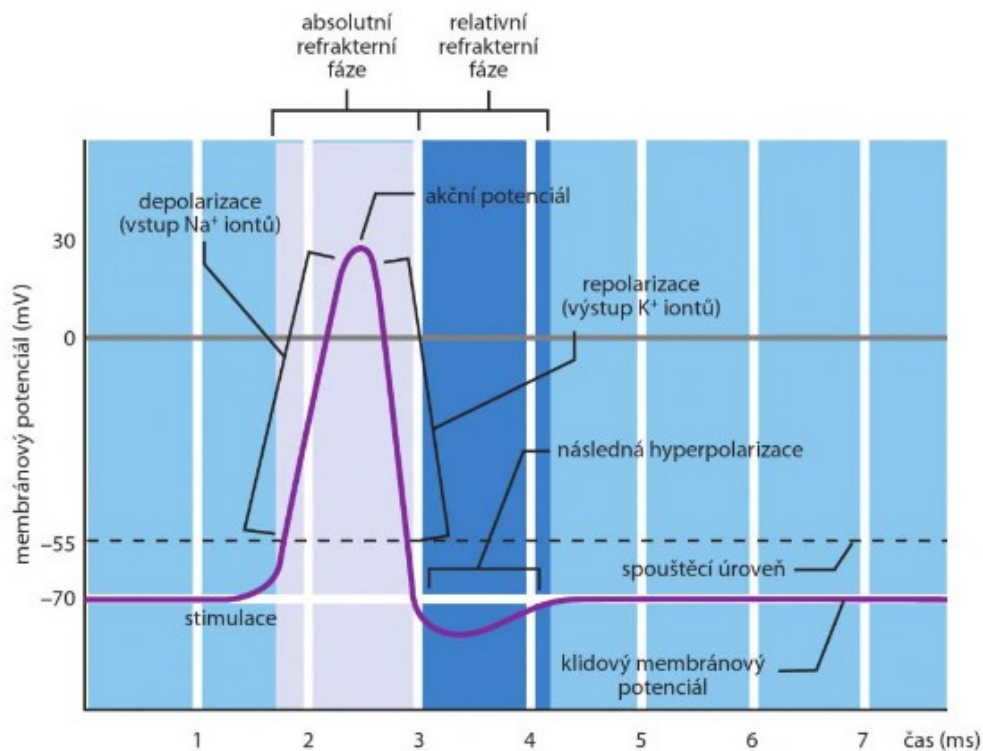
Pronikne-li foton viditelného světla do lidského oka, detekuje ho zrakový pigment tyčinek rodopsin. Několikastupňovým intracelulárním procesem se rodopsin rozkládá a tento proces chemických reakcí končí převedením světelného signálu na elektrický vzruch. Tyčinky i čípky jsou synapticky spojeny s bipolárními buňkami a ty dále s gangliovými buňkami sítnice. Každý receptor (tj. tyčinka nebo čípek) stimulovaný světlem působí na gangliové buňky buď přímo nebo nepřímo pomocí vymezených horizotálních a amakrinních neuronů. Výsledkem je, že signál vyvolá u některých

gangliových buněk excitaci a u jiných inhibici. (Rokyta, 2015)

Stejně jako u ostatních smyslů je v případě lidského oka převeden vnější stimul – světelný signál na nervový vzruch. Základní jednotkou nervové soustavy je neuron neboli nervová buňka. Tento druh buňky je schopen přijmout určitou formu signálu, odpovědět speciálním signálem a vést a vytvářet synapse (specifické kontakty) s ostatními neurony, efektory či receptory. (Langmeier, 2009)

Naše neurony neustále zpracovávají neuvěřitelné množství informací, které jsou pomocí nervových vláken přenášeny v podobě elektrických potenciálů. Pomocí chemických látek se informace předává z jednoho neuronu na druhý. Na plazmatické membráně nervové buňky mohou vzniknout tři typy elektrických potenciálů – klidový, receptorový a akční. (Orel, 2015)

Pokud na receptory lidského oka působí dostatečně velký podnět s minimální prahovou úrovní, vzniká tzv. akční potenciál. Ten má vždy stejný průběh a platí pravidlo, že jeden akční potenciál představuje jednu jednotku informace. Podstatou vzniku akčního potenciálu změna aktivity draslíkových a sodíkových kanálů. Změna toků iontů těmito kanály přes membránu neuronu vyvolá změnu polarizace. Na zobrazené křivce v grafu 6 lze vidět, že průběh akčního potenciálu má několik fází a to



Graf 6: Akční potenciál nervové buňky (Langmeier, 2009)

depolarizaci, transpolarizaci, repolarizaci, hyperpolarizaci a po odeznění akčního potenciálu se neuron vrací na svůj klidový potenciál. (Orel, 2015)

Nás zde ale zajímá především absolutní a relativní refrakterní fáze. Po dosažení spouštěcí úrovně akčního potenciálu je membrána zcela refrakterní k další stimulaci. To znamená, že jakkoliv silná stimulace neuronu nevede ke vzniku nového akčního potenciálu. (Langmeier, 2009) Absolutní refrakterní fáze je časový interval, kdy neuron nereaguje na žádný podnět. Tato fáze začíná po dosažení spouštěcí úrovně a končí přibližně v jedné třetině repolarizace. (Orel, 2015) Relativní refrakterní fáze je doba, kdy lze nový akční potenciál vyvolat pouze podnětem vysoce nadprahovým či opakovaným podnětem (Rokyta, 2015). Relativní fáze navazuje na absolutní a trvá až do fáze hyperpolarizace (Orel, 2015).

Délka absolutní a relativní refrakterní fáze je zhruba stejná a trvá přibližně 1 až 2 ms. To znamená, že oku trvá několik ms, než dokáže detekovat nový světelný signál.

2.5.2.1 Vyšetření adaptace

Poruchy adaptace jsou šeroslepost či hemeralopie. Ta může být způsobena absencí či špatným přívodem vitamínu A, jež se podílí na resyntéze rhodopsinu. Jinou příčinou mohou být poruchy pigmentového či smyslového epitelu sítnice atd. Zvláštní poruchou adaptace je nyktalopie, kdy je vidění lepší za šera než za dne a je provázeno totální barvoslepostí. (Otradovec, 2003)

U nás nejpoužívanější je Hartingerův adaptometr. Nejdříve probíhá desetiminutová preadaptace. Poté se ve třiminutových intervalech zjišťuje práh citlivosti sítnice. Vznikne křivka, která má dva úseky. V prvních minutách citlivost rychle stoupá, poté se mezi třetí a osmou minutou objeví tzv. Kohlrauschův zářez. Ten odděluje rychlejší adaptaci čípků od pomalé adaptace tyčinek. (Otradovec, 2003)

Poté už je jen patrný pozvolný postup do čtyřicáté minuty. Adaptometry nejsou běžným vybavením očních ordinací, objevují se spíše v leteckých výzkumných ústavech atd. K přibližnému testování adaptace se používá pacientův pohled do rtg negatoskopu a poté se změří čas, za který byl pacient schopen rozeznat fluoreskující číslice na ciferníku. Adaptace na světlo začíná krátkým oslepením a blefarospazmem – zúžením zornic a nemá patologické jevy. (Otradovec, 2003)

Vyšetření využívá principu stanovení časové závislosti prahové hodnoty světla, které je schopné vyvolat zrakový vjem. Vzniká tedy adaptační křivka, která již byla popsána výše.

Adaptometry

Za úplné tmy v krátkých intervalech spouštíme hraniční osvětlení, který pacient musí odlišit od tmy. Dále existují tzv. nyktometry. Ty sledují průběh zotavení po oslnění a používají se při vyšetření řidičů z povolání. (Autrata, 2002)

Prahová hodnota osvětlení klesá rychle během prvních pěti minut. Dalších pět minut se prahová hodnota nemění a poté opět klesá. Minimální prahové hodnoty je dosaženo po 40 až 50 minutách. První pokles je způsoben zotavením čípků a druhý zotavením tyčinek. Pokud má preadaptační jas vysokou intenzitu, bude adaptační čas delší. (Kolář, 2008)

Pokud míří měřící paprsek do fovey, měříme pouze adaptaci čípků a adaptační křivka bude monofazická. Pokud budeme měřit i v ostatních částech sítnice, bude mít křivka bifazický tvar. Nejvyšší schopnost adaptace je v místě největší koncentrace tyčinek. Čím kratší je vlnová délka dopadajícího světla, tím je senzitivita tyčinek vyšší. (Kolář, 2008)

Měření pomocí adaptometry je prováděno v 15° v horní části sítnice. Toto místo je obecně vždy předurčeno, aby bylo možné výsledky porovnávat s normativními daty. (Kolář, 2008)

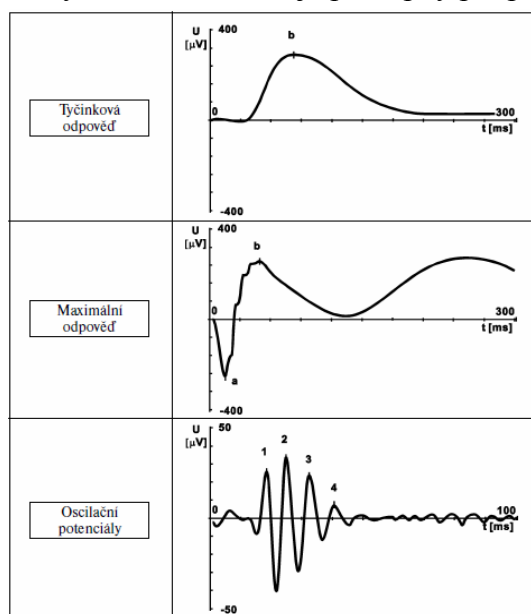
Dnes je toto vyšetření nahrazováno elektrofyziologickým vyšetřením sítnice (Heissigerová, 2018).

ERG

ERG (elektroretinografie) je záznam elektrickým potenciálů, které jsou odpovědí sítnice na stimulaci světlem. Bývá prováděno na specializovaných pracovištích s úzkou indikací. Akční potenciály jsou snímány přísavnou elektrodou na bulbární spojivce či zabudovanou elektrodou v kontaktní rohovkové čočce a indiferentní elektrodou na čele či ušním lalůčku. (Otradovec, 2003)

Klasické zábleskové ERG využívá 5 ms záblesk xenonové výbojky. Tvar a velikost ERG křivky záleží na intenzitě, délce, barvě záblesku a úrovni retinální adaptace.

Pohybuje se ve stovkách μV . V sítnici adaptované na tmu se při záblesku aktivují tyčinky i čípky. Skotopické a fotopické ERG však lze od sebe oddělit. Fotopické nebo-li čípkové ERG používá záblesků v počtu 30 na sekundu, jelikož tyčinky při této frekvenci nemohou reagovat. Skotopické ERG získáme po adaptaci oka na tmu a světelném stimulu modrým světlem, které je pro čípky podprahové. (Otradovec, 2003)



Graf 7: Normované průběhy ERG křivek při skotopickém vidění (Peregrin a Svěrák, 1999)

Typické průběhy ERG křivek při režimu skotopického vidění lze vidět na grafech 7 výše.

2.6 Definice standardního pozorovatele

Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE) vytváří již několik desetiletí jednotný systém pro popis barev, kvantitativní vlastnosti barev, definici barevnosti a pro podobné jevy. V roce 1931 přijala komise CIE systém, který popisuje světelné pozorovací podmínky pro budoucí experimentální sledování a měření barev. V rámci tohoto setkání (zasedání v Cambridge) v roce byl kromě dalších pojmů specifikován tzv. standardní pozorovatel. (Kohout, 2013)

Jedná se o definici parametrů průměrného lidského pozorovatele. Zorný úhel standardního pozorovatele byl stanoven na 2° . Tento úhel odpovídá foveole-středu žluté

skvrny na sítnici. Je to jediná oblast na sítnici kde množství čípků přesahuje množství tyčinek. Jedná se tedy o foveální, čistě barevné vidění. Pozorování pod tímto úhlem minimalizuje odchylku při vnímání barev způsobenou tyčinkami. Tato odchylka není nikterak velká, ale je již měřitelná. (Kohout, 2013) V roce 1964 byl během zasedání CIE definován tzv. doplňkový standardní pozorovatel s 10° zorným polem, kdy je do vidění zapojena i část tyčinek (ovšem ne za podmínek plně fotopické adaptace) (Anon, 2006). Od roku 2011 je definice standardního pozorovatele součástí dokumentu CIE 015:2018 – Colorimetry, 4th Edition. Bylo zjištěno, že 10° pozorovatel lépe odpovídá podmínkám praxe při vzorkování barev lidským okem a proto je dnes používán výhradně tento pozorovatel (Kohout, 2013).

3 Výzkumná část

Výzkumná část se věnuje popisu prováděného experimentu, metodice výzkumu, analýze a vyhodnocení získaných dat.

3.1 Výzkumné předpoklady a cíle

Cílem práce je ověření platnosti Talbot-Plateova zákona na vhodném světle v uměle vytvořených podmínkách pro noční vidění a shrnout dosavadní poznatky a experimenty týkající se Talbot-Plateova zákona. Ověření platnosti Talbot-Plateova zákona bylo provedeno formou experimentu na figurantech. Výzkum provedený v této diplomové práci navazuje na předchozí projekty provedené na TUL vy smyslu ověření tohoto zákona při různých světelných podmínkách.

Dle získaných teoretických znalostí je výzkumný předpoklad takový, že Talbot-Plateauv zákon pro světelné zdroje s rychlou náběžnou a sestupnou hranou neplatí. To by pro nás znamenalo, že existuje rozdíl ve vnímání jasu mezi stálým a pulzním světlem.

Dle tohoto předpokladu byla stanovena nulová H_0 a alternativní hypotéza H_1 :

$$H_0 : k = 1$$

$$H_1 : k \neq 1$$

kde je hodnota parametru k rovna poměru jasů pulzního a stálého světla:

$$k = \frac{L_{PL}}{L_{DC}} \quad (\text{Rovnice 10})$$

Hladina významnosti α byla zvolena na hodnotě 0,01.

3.2 Metodika výzkumu

3.2.1 Experimentální zařízení

K experimentu byl použit box osvětlený LED, řídicí obvod a detekční systém. Speciální hliníkový box byl vytvořen zaměstnanci TUL a byl použit již v přechozích experimentech. Box má rozměry 40 x 40 cm a je rozdělen na čtyři stejné části, jak je zobrazeno na obrázku 3.



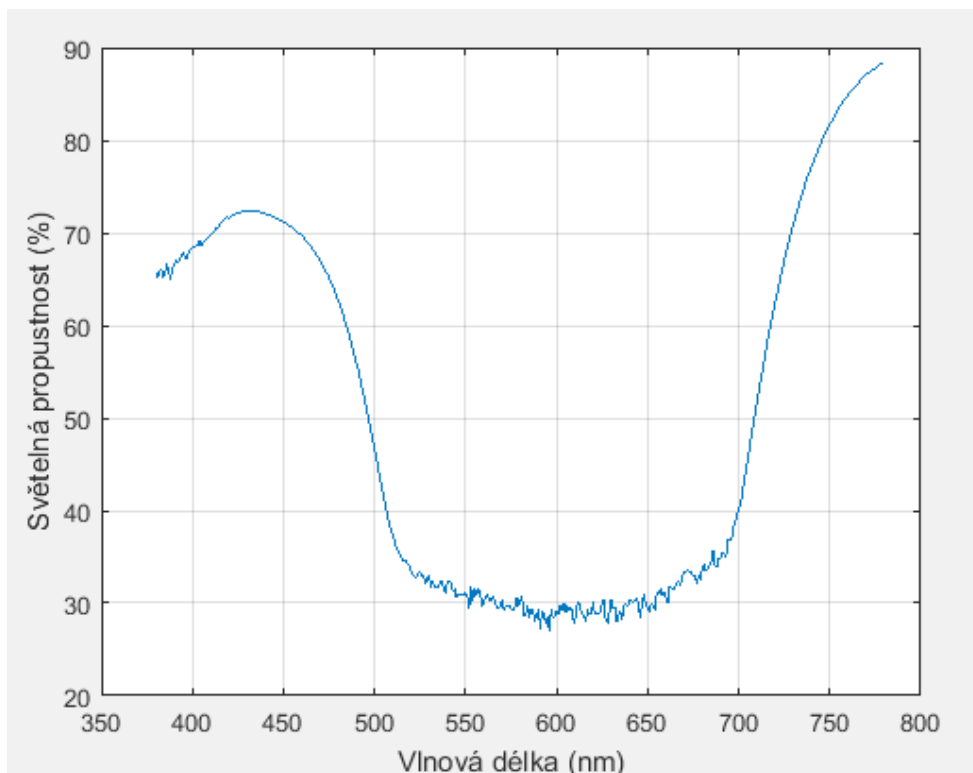
Obrázek 3: Vnitřní část boxu s LED (autor)

Na vnitřním obvodu těchto čtyř částí jsou umístěné LED ve formě dvou pásků. Jeden okruh pásků (36 diod) je určen pro pulzní světlo a druhý okruh (6 diod) je určen pro světlo stálé. Střída byla tedy zvolena 17 %. Jednalo se o LED pásek od výrobce FK technics s počtem 60 LED/m a krytím IP20. Světelný tok je $240 \text{ lm} \times \text{m}^{-1}$, vyzařovací úhel je 120° . LED pásek je napájen 12 V, výkon je 4,8 W/m a má dominantní vlnovou délku 518 nm. Tato vlnová délka odpovídá zelené barvě.

Detekce hodnot jasů a spektra na zkušebních typech folií a skel byla provedena spektrometrem SpectraScan PR-740 a programem SpectraWin. Při výběru vhodné folie či skla bylo nutné zohlednit jednak výsledný jas, který se pro naše potřeby pohybuje maximálně v řádu setin $\text{cd} \times \text{m}^{-2}$, a jednak vzniklé spektrum. V našem experimentu jsme chtěli napodobit spektrum světelného boxu citlivostní křivce pro skotopické vidění. Skotopické vidění má maximální citlivost na 507 nm, což odpovídá

zelenomodré barvě. Spektrum s peakem ve vzdálenější vlnové délce by zkreslovalo vnímaný jas oproti naměřenému. Dle simulací se pro naše potřeby různě zatmavená skla nehodila a to ani v kombinaci s různě barevnými foliemi (černá, fialová a modrá) a tak jsme přistoupili k výměně běžných LED za výše uvedené s vhodnější dominantní vlnovou délkou, snížení maximálního proudu LED a použití pouze modrých folií.

Nejdříve bylo změřeno spektrum samotných LED (graf 9) s plexi sklem. Poté bylo změřeno spektrum při použití jedné vrstvy modré folie. Z těchto údajů bylo možné provést výpočet světelné propustnosti (rovnice 11). Po zjištění světelné propustnosti jedné vrstvy modré folie bylo možné v programu Matlab simulovat různý počet vrstev této folie a vybrat ten počet vrstev, který bude nejvhodnější – tedy kompromis mezi počtem vrstev a jasem. Abychom se tedy co nejvíce přiblížili citlivostní křivce skotopického vidění, bylo zjištěno, že vhodný počet vrstev modré folie je 10. Propustnost jedné vrstvy modré folie na různých vlnových délkách je zobrazena na grafu 8.



Graf 8: Propustnost jedné vrstvy modré folie (autor, program Matlab)

Vzorec pro výpočet světelné propustnosti je:

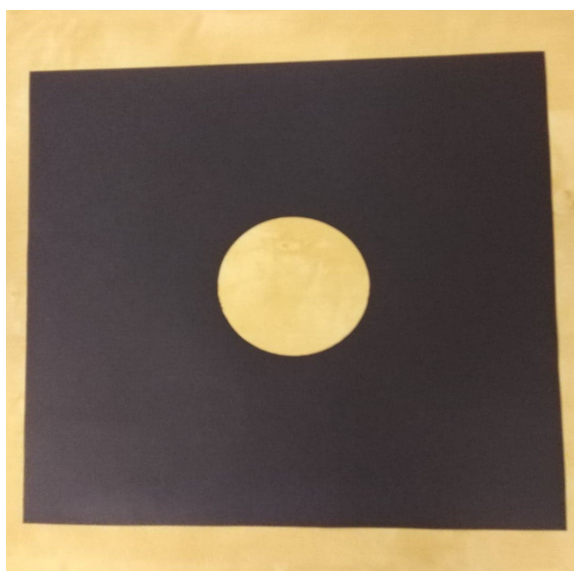
$$T_r(\lambda) = \frac{L_e(\lambda)}{L_{ep}(\lambda)} \times 100 \quad (\text{rovnice 11})$$

kde $L_e(\lambda)$ je zář na konkrétní vlnové délce od 380 do 780 nm. Tuto hodnotu je nutné vydělit zář $L_{ep}(\lambda)$ vzniklou průchodem přes samotné difúzní plexi sklo, aby nebyla vypočtená propustnost folie ovlivněna propustností tohoto plexi skla. Propustnost je poté tedy procentuální zastoupení jednotlivých vlnových délek prošlých materiálem – funkce podle λ . Světlo, které není propuštěno, je buď odraženo nebo pohlceno. Vynásobením světelného spektra vcházejícího do folie s danou propustností získáme prošlé spektrum. Integrací prošlého světelného spektra dostaneme výsledný jas (viz rovnice 13).

Dále byla v horním a dolním segmentu umístěna fotodiody. Z napětí fotodiody a dalších parametrů byla prováděna kalibrace boxu. Postup provádění kalibrace je popsán v kapitole 3.2.2 Kalibrace boxu.

Ovládání LED bylo provedeno pomocí programu LightBox2, který byl programován vedoucím této práce.

V každé ze čtyř částí jsou tedy dva typy LED pásků. Do kanálů na stále světlo je přiváděn stejnosměrný proud 17mA. Do kanálů s pulzujícím světlem jsou přiváděny

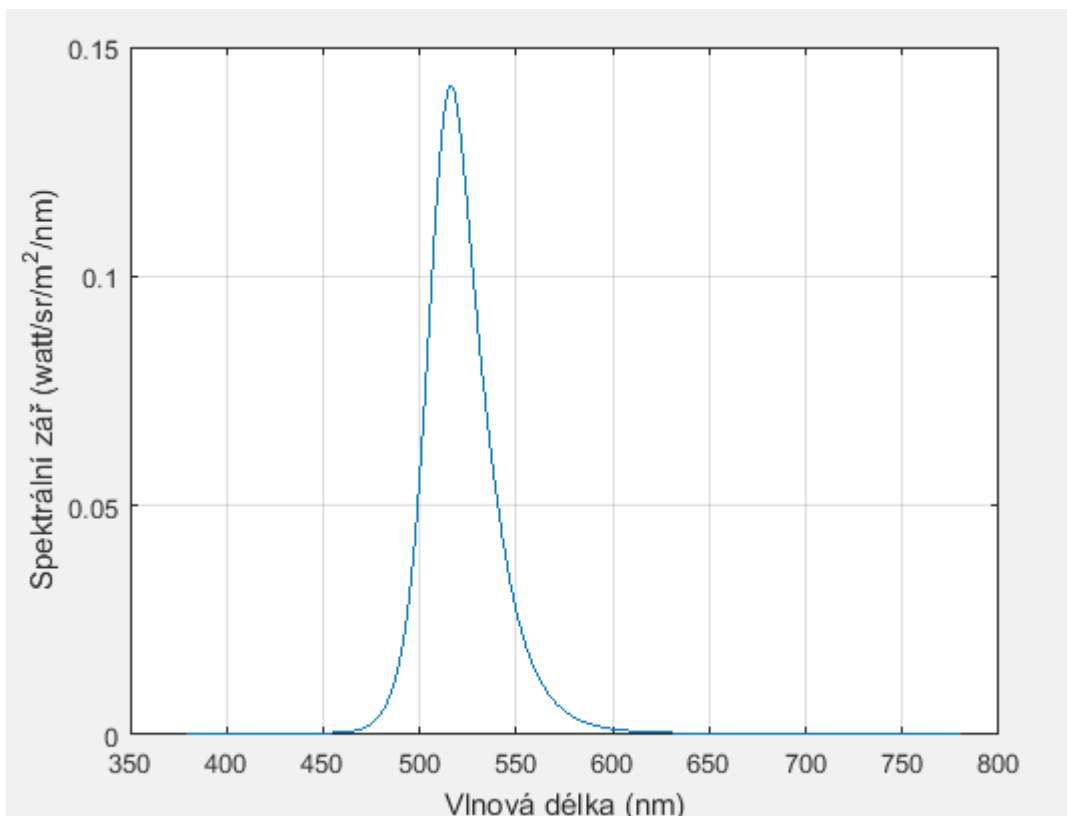


Obrázek 4: Výroba krytu pro desetistupňového pozorovatele (autor)

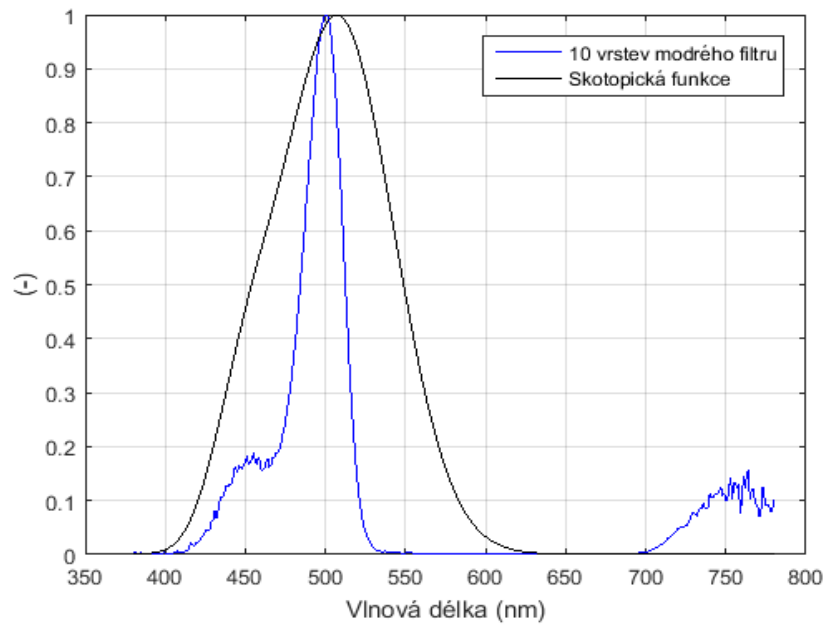
proudové pulzy s frekvencí 50Hz.

Napájecí vývody LED pásků jsou vyvedeny přes zadní stěnu mimo prostor boxu, kde se nachází řídicí část. Přední část boxu je pokryta dvěma zasouvatenými bílými difúzními plexi skly PMMA o tloušťce 3 mm a propustnosti 30 %. Tím je zabráněno přímému pozorování LED a následnému oslnění. Pro skotopické vidění je vhodné použít desetistupňového pozorovatele, protože při tomto úhlu zprostředkovávají vidění pouze tyčinky. Ze vzdálenosti 2 m je průměr tohoto kruhového pole roven 12 cm. Na celý box byl tedy umístěn černý karton a vyříznutým kruhem v jeho středu o průměru 12,4 cm (na obrázku 4). Střed tohoto zorného pole byl dále zakryt kruhem o průměru 5,5 cm, aby v průběhu experimentu nebyla stimulována fovea.

Spektrum LED s vloženým plexi sklem bez folií je vizualizováno na grafu 9. Na grafu 10 je poté vidět výsledné normalizované spektrum při použití 10 vrstev modré folie v porovnání s citlivostní křivkou skotopického vidění. Při proudu 17mA byl při použití této masky nasimulován a následně i naměřen fofopický jas $0,004 \text{ cd} \times \text{m}^{-2}$, který odpovídá $0,0303 \text{ cd} \times \text{m}^{-2}$ jasu skotopického.



Graf 9: Spektrální zář LED s plexi sklem před použitím masky (autor, program Matlab)



Graf 10: Poměrné spektrální složení světla LED s plexisklem a maskou v porovnání se skotopickou citlivostní funkcí (autor, program Matlab)

Normalizované spektrum se vypočte následovně:

$$Norm_{spec}(\lambda) = \frac{L_{ep}(\lambda) \times T_r^h(\lambda)}{\max(L_{ep}(\lambda) \times T_r^h(\lambda))} \quad (\text{rovnice 12})$$

Kde $L_{ep}(\lambda)$ je zář (světelné spektrum zelených LED pro průchodu plexi sklem) na každé vlnové délce od 380 do 780 nm při použití konkrétního proudu LED a $T_r(\lambda)$ je propustnost jedné vrstvy modré folie umocněná počtem vrstev folie h . V našem případě byl tento proud 17mA. Skotopická funkce na grafu 10 je též normalizovaná, aby bylo možné tyto dvě funkce vhodně porovnat. Výsledkem je spektrum, tedy funkce-křivka podle λ . Data pro zobrazení skotopické funkce byla získána z webu <http://www.cvrl.org/>, který spadá pod University College London – Institute of Ophthalmology (Stockman a Sharpe, 1995).

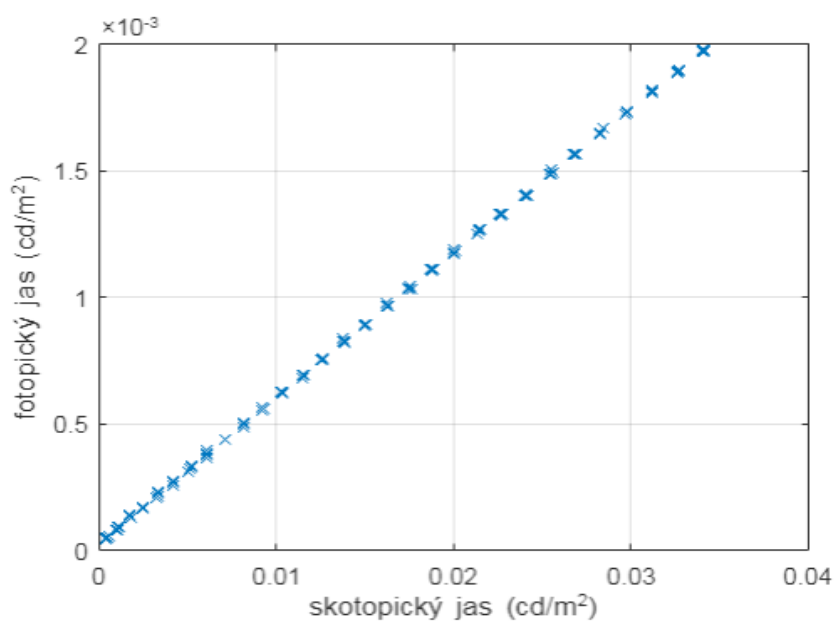
V simulaci vhodného počtu vrstev modré folie v závislosti na jasu a spektru byl výsledný jas vypočítáván takto:

$$L = \int_{380}^{780} T_r^h(\lambda) \times L_{ep}(\lambda) \times V(\lambda) \times K d\lambda \quad (\text{rovnice 13})$$

kde $T_r^h(\lambda)$ propustnost jedné vrstvy folie umocněná počtem použitých vrstev této folie h při konkrétním proudu LED, $L_{ep}(\lambda)$ je zář po průchodu plexi sklem. $V(\lambda)$ je normalizované zastoupení vlnových délek fotopického vidění (Stockman a Sharpe, 1995). K je maximální světelná účinnost pro fotopické vidění.

Zde vždy hovoříme o objektivní intenzitě zdroje světla a proto je vhodné použít fotopických veličin.

Funkce závislosti skotopického a fotopického jasu je znázorněna na grafu 11. Data byla získána při jednom z kalibračních měření.



Graf 11: Závislost skotopického a fotopického jasu (autor, program Matlab)

3.2.2 Kalibrace boxu

Kalibrace boxu je prováděna proto, abychom mohli nastavit správný proud LED, aby poté svítily požadovaným jasnem. Data byla sbírána pro horní a dolní segment a stálé i pulzní světlo. Kalibrace vždy probíhala ve stejných podmínkách, v jakých byl následně proveden experiment. V místnosti nesměl být žádný světelný zdroj kromě našeho boxu. Bylo zhasnuté stropní osvětlení, zataženy žaluzie a utěsněny mezery u dveří atd.

Kalibrace boxu vycházela z těchto dat: skotopický jas naměřený přístrojem SpectraScan PR-740, napětí získané z fotodiody a proud k napájení LED. Proložení bodů bylo provedeno pomocí regrese metodou nejmenších čtverců. Všechna data byla pomocí programu LightBox2 ukládána do tabulky. Regrese dat pak byla zpracovávána v programu Matlab a provedena příkazem `fitlm`.

Byly provedeny tři regrese. V první regresi je nezávisle proměnnou napětí z fotodiody a závisle proměnnou je skotopický jas. Tímto modelem bylo z napětí fotodiody zjišťováno, jaký byl na daném segmentu jas.

V druhé regresi je nezávisle proměnnou jas a závisle proměnnou proud. Tento regresní model nám pomohl odhadnout hodnotu proudu LED, abychom získali požadovaný jas. Ve třetí regresi se také jednalo o závislost jasu a proudu, ale zde byl nezávisle proměnnou proud a závisle proměnnou jas. Tato závislost nám pomohla k tomu, aby se dal jas také dopočítat z naměřeného proudu LED. Proud lze nejen nastavit na požadovanou hodnotu, ale také posléze měřit jeho skutečnou hodnotu.

Pro každý model byly získány koeficienty k a q daného řádu. Provedením regrese bylo získáno 12 regresních modelů ve tvaru:

$$y = k_1 x^1 + k_2 x^2 + k_3 x^3 + \dots + k_m x^n \quad (\text{rovnice 14})$$

kde x značí nezávisle proměnnou (v našem případě napětí jedné z fotodiody, proud LED nebo naměřený jas) a k její příslušný koeficient. Y je závisle proměnná a značí fotopický jas v první a třetí regresi a proud LED v druhé regresi. Výslednou rovnicí je vlastně předpis křivky, která bude zobrazovat závislost mezi dvěma či třema výše uvedenými veličinami. Obecně platí, že mezi světelným tokem LED a proudem je vztah 4. řádu. V modelů s fotodiody je to obdobně dané chováním fotodiody a zesilovače.

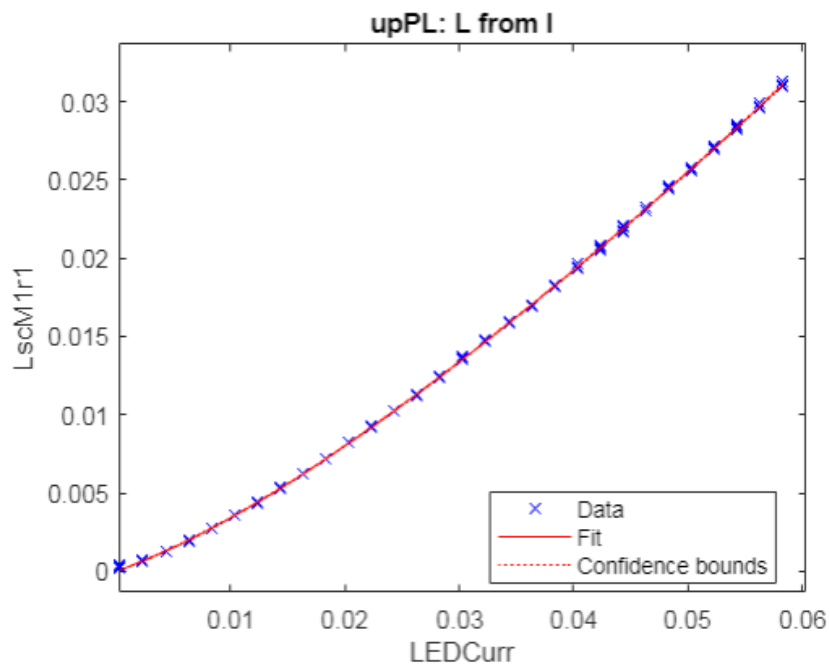
V tabulce 1 níže lze vidět řád každého provedeného modelu. *Up* znamená horní

segment, *lo* dolní. *DC* je kanál stálého světla a *PL* je kanál pulzního. *PD* je napětí z fotodiody a *jas* je jas změřený jasoměrem.

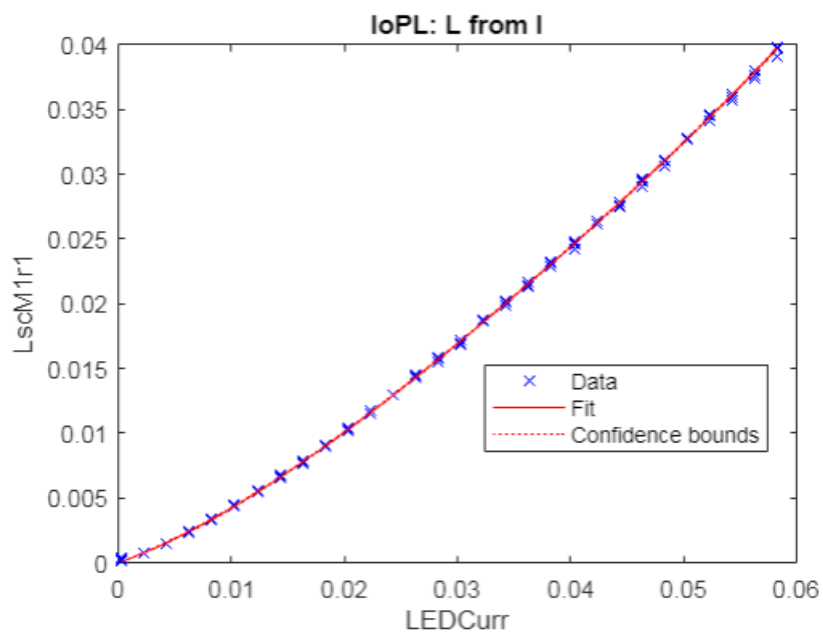
Tabulka 1: Řády kalibračních regresních modelů

Segment a kanál	Nezávislá veličina	Závislá veličina	Řád modelu
upDC	PD	Jas	4
	Proud LED	Jas	4
	Jas	Proud LED	5
loDC	PD	Jas	3
	Proud LED	Jas	4
	Jas	Proud LED	5
loPL	PD	Jas	3
	Proud LED	Jas	4
	Jas	Proud LED	6
upPL	PD	Jas	3
	Proud LED	Jas	4
	Jas	Proud LED	5

Na grafu 12 a 13 jsou příklady regresních modelů. Graf 12 je regresí pro horní pulzní kanál – závislost jasu na proudu LED. Řád modelu je 4. Graf 13 je regresí pro dolní pulzní kanál – opět závislost jasu na proudu LED. Řád je také 4.



Graf 12: Regresní model: závislost jasu na proudu LED, horní pulzní kanál



Graf 13: Regresní model: závislost jasu na proudu LED, dolní pulzní kanál

Zda byla kalibrace boxu správně provedená nám ověřilo tzv. reprodukční měření. V tomto měření se zároveň zaznamenával mimo jiné především požadovaný jas, jas změřený jasoměrem a jas vypočtený z proudu LED.

3.2.3 Výzkumný soubor

Výzkumu se účastnilo 8 osob ve věku 23 až 63 let, z toho 3 ženy a 5 mužů. Před samotným experimentem dostal figurant krátký dotazník týkající se kvality jeho zraku (viz příloha C). Rovněž podepsal souhlas se zpracováním osobních údajů a seznámení s riziky spojenými s pulzujícím světlem – tedy informovaný souhlas (viz příloha D). Osobní údaje osob byly ID osoby, věk, pohlaví, oční vady či nemoci, nošení brýlí či kontaktních čoček, prodělané oční operace či úrazy, kontrastní citlivost a zraková ostrost. Anonymní tabulka výše uvedených údajů u jednotlivých figurantů je v příloze E.

3.2.4 Postup provedení experimentu

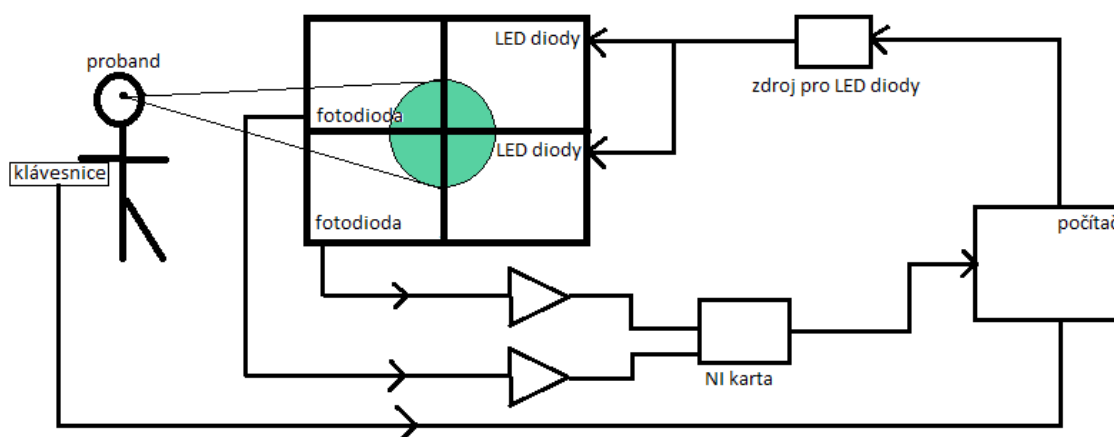
Pro dosažení podmínek nočního vidění musela být celá místnost kompletně zbavena veškerých světelných zdrojů (viz výše), které by narušily přizpůsobení figuranta nočnímu vidění. Před experimentem musel být figurant adaptován na noční vidění. Tato adaptace trvala vždy 30 minut, což je průměrná doba adaptace na noční jasy. Figurant byl tedy umístěn do zatemněné místnosti 30 minut před experimentem a adaptoval svůj zrak. Světelné podmínky tedy byly při každém experimentu stejné.

Box byl umístěn na kraji stolu v takové výšce, aby byl střed boxu v úrovni očí figuranta. Vzdálenost boxu a figuranta byla 2 m, z důvodu zajištění správné fúze obrazu oběma očima. Tato vzdálenost minimalizuje rozdíl mezi pravým a levým okem a obraz z obou očí je již mozkiem zprůměrován. Fotografie celé sestavy lze vidět na obrázku 5. Schéma experimentu je zobrazeno na obrázku 6.



Obrázek 5: Sestava experimentu (autor)

Figurant seděl na židli. Na stolku před sebou měl klávesnici a podbradník, který přesněji reguloval výšku jeho hlavy a tím i očí. Figurant byl instruován, aby při sledování boxu fixoval pouze černý terčík uprostřed. Experiment byl proveden dvěma metodami.



Obrázek 6: Schéma experimentu (autor)

V metodě A figurant rozhodoval pouze o tom, který segment se mu zdá jasnější. Tato metoda se nazývá metodou konstantních podnětů. Pokud vnímal jasněji horní segment, zmáčkl šipku nahoru, pokud dolní segment, stiskl šipku dolů. Pokud se mu zdáli oba segmenty stejně jasné, stiskl enter. Analyzovány byly pouze ty pokusy, kde figurant odpověděl, že jsou oba segmenty stejně jasné. Program generoval náhodně tři jasové úrovně (kontrasty) – 0 %, 5 % a 10 %. Každá kombinace jasů a druhu světla LED (stálé nebo pulzní) byla v průběhu experimentu opakována 10 krát. Tím vzniklo celkem 180 pokusů s dvouminutovou pauzou po 30 pokusech. Kontrast mezi dolní a horním segmentem byl vypočten následovně:

$$C = \frac{A - B}{A + B} \times 100 \quad (\text{rovnice 14})$$

kde A je jas jasnějšího segmentu a B je jas méně jasného segmentu.

V metodě B bylo probadovým úkolem aktivně regulovat šipkami na klávesnici jas spodního segmentu tak dlouho, dokud mu nepřišly oba segmenty stejně jasné. Šipka nahoru zvyšovala jas, šipka dolů ho snižovala. Jakmile byl figurant rozhodnut o svém mínění, stiskl klávesu Enter. Jeden stisk šipky nahoru nebo dolů odpovídal změně proudu LED o 0,1 mA. Horní segment svítil buď stálým světlem nebo pulzním o frekvenci 50 Hz a střídě 17 %. Po pár sekundách byl experiment opakován. Vždy byla provedena série 50 měření s dvouminutovou pauzou po 25 pokusech.

3. 3 Analýza získaných dat

Data získaná jednotlivými figuranty byla ukládána do tabulkového souboru. Tento soubor obsahoval časovou značku, číslo pokusu, režim, napětí z obou fotodiod, proud a napětí na obou segmentech a jas horního a dolního segmentu a v případě metody A i rozhodnutí figuranta o jasnějším segmentu. Režim byl DCPL, PLDC nebo DCDC. Režim DCPL znamená, že horní segment svítil stálým světlem a dolní pulzním světlem, režim PLDC zase naopak. Režim DCDC je pouze kontrolní a znamená, že oba segmenty svítily stálým světlem.

Závislost jasů horního a dolního segmentu byla proložena přímkou pomocí metody totálních nejmenších čtverců (TLS) v programu Matlab. Byl zjištěn parametr k , který

udával sklon přímky. Předpis přímky závislosti obou segmentů tedy vypadá následovně:

$$y = k \times x + b \quad (\text{rovnice 15})$$

kde y je jas ze segmentu, který svítil pulzně a x je jas ze segmentu stálého. Parametr b je v našem případě roven nule. V obou režimech se na vodorovné ose nachází jas stálého světla a na svislé ose jas světla pulzního. Pokud $k=0$, pak se figurantovi zdály oba segmenty stejně jasné. Pokud $k < 0$, pak se figurantovi zdál jasnější segment se stálým světlem. Pokud $k > 0$, pak se naopak figurant rozhodl, že jasněji svítí segment s pulzním světlem.

Pro porovnání byla do grafu navíc zanesena přímka s parametrem $k = 1$, která odpovídá naší nulové hypotéze, aby se přímka proložená našimi daty dala snadněji interpretovat.

Nulovou hypotézu lze při rozhodování pouze zamítnout či nezamítnout (přijmout). Zamítneme ji, pokud pozorovaná hodnota spadá do kritického oboru. Nulovou hypotézu nezamítáme, pokud pozorovaná hodnota spadá do oboru přijetí. Když zamítneme nulovou hypotézu, ač platí, dopouštíme se chyby I. druhu. Chyba II. druhu vznikne v opačném případě, tedy pokud přijmeme nulovou hypotézu, ačkoli neplatí. Hranice kritického oboru určujeme tak, aby pozorované hodnoty do tohoto oboru padly za platnostu nulové hypotézy nejvýše s pravděpodobností α . Hladina významnosti α je volena spolu s hypotézami před samotným statistickým vyhodnocením. P-value je pravděpodobnost chyby I. druhu. Nulovou hypotézu tedy zamítáme jen, pokud je p-value $\leq \alpha$. (Zvára, 2013)

Hodnota T (statistického testu) byl spočtena následovně:

$$T = \frac{|k-1|}{\sqrt{C}} \quad (\text{rovnice 16}) \quad (\text{Kukačka et al., 2017})$$

kde k je sklon přímky (naš parametr k), 1 odpovídá hodnotě k při nulové hypotéze a C je odhad rozptylu sklonu přímky – parametru k .

Pomocí výše uvedeného statistického testu T lze vypočítat hodnotu p-value a to následovně:

$$p\text{-val} = 2 \times (1 - t_{2 \times N - 1}(T)) \quad (\text{rovnice 17}) \quad (\text{Kukačka et al., 2017})$$

kde 2 značí, že p-value je oboustranné, $t_{2 \times N - 1}$ je kvantil Studentova rozdělení, $2N - 1$ je počet stupňů volnosti, tedy počet parametrů modelu odečtený od dvojnásobku počtu pozorování jevu.

P-value je pravděpodobnost, že platí nulová hypotéza. Hodotu p-value srovnáváme s $1 - \alpha$. Hadina významnosti α byla zvolena na 0,99. Na této hladině významnosti je pouze 1% šance, že bychom se dopustili chyby I. druhu. Pokud nám vyjde hodnota p-value menší než 0,01, zamítneme H_0 a přijmeme H_1 . Pokud bude p-value mezi 0,01 a 0,0001, tak přijímáme H_1 , ale s jistou rezervou. Pokud bude p-value menší než 0,0001, tak H_1 plně přijímáme a můžeme si být výsledkem stoprocentně jistí. To v našem případě znamená, že je ověřeno, že je statisticky významný rozdíl mezi vnímání stálého a pulzního světla. Pokud bude p-value větší než 0,01, tak nezamítáme H_0 a nepřijímáme H_1 . To by znamenalo, že nelze říci, že je mezi vnímání obou druhů světél statisticky významný rozdíl.

Další možností interpretace výsledků je stanovení 99% intervalu spolehlivosti CI (nebo-li koinfidenční interval). Tento údaj nám říká, že s 99% pravděpodobností se naše hodnota nachází právě v tomto intervalu. Statisticky významný pro nás bude výsledek, kdy tento interval nebude zahrnovat 1. Pro stanovení intervalu spolehlivosti byly použity dva výpočty. První za použití Studentova rozdělení pro metodu A a tam, kde byl počet pozorování menší než 30:

$$CI = k \pm t_{2 \times N - 1}(0,995) \times \sqrt{C} \quad (\text{rovnice 18}) \quad (\text{Kukačka et al., 2017})$$

Všechny použité veličiny jsou již definovány u rovnic 16 a 17. Druhý výpočet byl použit u dat normálního rozdělení a tam, kde byl počet pozorování větší nebo roven 30:

$$CI = k \pm N(0,995) \times \sqrt{C} \quad (\text{rovnice 19}) \quad (\text{Kukačka et al., 2017})$$

N značí Normální rozdělení.

3.3.1 Metoda A

V následující tabulce jsou parametry analyzovaných dat jednotlivých figurantů. Přímkou byla proložena ta data, kde se figurant rozhodl, že oba segmenty svítí stejně jasně. V příloze A jsou grafy dat jednotlivých figurantů. Na vodorovné ose jsou hodnoty jasů pro stálé světlo (DC) a na svislé ose jsou hodnoty jasů pulzního světla (PL). Modré křížky značí samotná data, modrá přímka je přímka po proložení dat pomocí metody TLS a červená přímka vždy odpovídá parametru $k=1$. Pokusy nebyly generovány náhodně, ale měli stejné pořadí dvojic jasů pro každého figuranta.

Pokud je parametr $k=1$, pak se jas stálého světla zdál figurantovi stejný, jako jas pulzního světla. V tomto případě není pozorován efekt zvýšení vnímání jasů pro konkrétní druh světla a Talbot-Plateauův zákon tedy platí. Pokud $k>1$, pak by pro dosažení subjektivně stejného jasů obou segmentů musel být zvýšen jas pro pulzní LED. A naopak, pokud $k<1$, musel by být zvýšen jas stále svítících LED, aby figurant vnímal oba segmenty stejně jasně.

Tabulka 2: Souhrn výsledků - metoda A

ID figuranta	Počet pozorování	Parametr k	P-value	99% interval spolehlivosti
1	124	0,9959	0,7987	1,00 ± 0,05
2	37	0,9764	0,3366	0,98 ± 0,07
3	52	0,9769	0,3093	0,98 ± 0,06
4	55	0,9974	0,9182	1,00 ± 0,07
5	51	0,9787	0,4196	0,98 ± 0,07
6	67	0,9941	0,7639	0,99 ± 0,06
7	54	0,9856	0,4917	0,99 ± 0,06
8	26	1,0184	0,5005	1,02 ± 0,08

V tabulce 2 vidíme potřebné parametry k vyhodnocení metody A. Metoda A byla provedena na osmi figurantech. Ve všech případech byla hodnota p-value větší než 0,01. Na hladině významnosti 99 % tedy nulovou hypotézu nezamítáme a lze tedy říci, že není statisticky významný rozdíl mezi vnímání stálého a pulzního světla. V 7 případech byl parametr $k<1$ a pouze v jednom případě byl tento parametr $k>1$. Průměrná hodnota

parametru k je 0,9904. Ve všech případech interval spolehlivosti obsahuje nebo může obsahovat 1, což opět potvrzuje naši nulovou hypotézu.

3.3.2 Metoda B

Při metodě B figuranti nastavovali jas dolního segmentu tak dlouho, až se jim zdál stejně jasný, jako segment horní. Zde nebyla sada dat stále stejná, jako tomu bylo u metody A, ale jasy byly náhodné s náhodným pořadím. V tomto případě byla vyhodnocována všechna data krom dat kontrolních (režim DCDC). Ta byla vyhodnocována zvlášť. Grafy pro metodu B jsou v příloze B.

První tabulka (3) se týká dat, kde se skutečně lišil zdroj světla. V druhé tabulce (4) jsou výsledky pro kontrolní data, kde oba segmenty svítily stálým světlem. V případě kontrolních dat by měl být parametr k ideálně roven 1.

Tabulka 3: Souhrn výsledků - metoda B

ID figuranta	Počet pozorování	Parametr k	p-value	99% interval spolehlivosti
1	38	0,8692	0,0410	$0,87 \pm 0,17$
2	35	0,9013	0,1434	$0,90 \pm 0,18$
3	34	0,9052	0,0485	$0,91 \pm 0,13$
4	40	1,0442	0,7637	$1,0 \pm 0,4$
5	31	0,8762	0,1559	$0,88 \pm 0,23$
6	35	0,8784	0,0424	$0,88 \pm 0,16$
7	32	0,9993	0,9943	$1,00 \pm 0,26$
8	29	0,8378	0,0236	$0,84 \pm 0,19$

V tabulce 3 lze vidět výsledky pro metodu B. Metoda B byla provedena také na osmi figurantech, jak tomu bylo u metody A. V 7 případech byl parametr $k < 1$ a pouze v jednom případě byl vyšší než 1. Opět ve všech případech byla hodnota p-value větší než 0,01. U čtyřech figurantů se p-value blíží k hodnotě 0,01, ale stále je vyšší. V tomto případě lze tedy opět říci, že na hladině významnosti 99 % není statisticky významný rozdíl mezi vnímání obou druhů světla. Ve všech případech interval spolehlivosti

obsahuje nebo může obsahovat 1, což potvrzuje nulovou hypotézu. Průměrná hodnota parametru k je 0,9140, což je méně než v případě metody A.

Tabulka 4: Souhrn výsledků - kontrolní data pro metodu B

ID figuranta	Počet pozorování	Parametr k	p-value	99% interval spolehlivosti
1	12	1,1365	0,1964	1,14 ± 0,29
2	15	0,9175	0,0692	0,92 ± 0,13
3	16	1,0461	0,6946	1,0 ± 0,4
4	10	0,9708	0,9028	1,0 ± 0,7
5	19	0,8759	0,4101	0,9 ± 0,5
6	15	1,0714	0,4693	1,07 ± 0,27
7	18	0,6821	$1,6269 \times 10^{-10}$	0,7 ± 0,1
8	21	0,8833	0,0064	0,88 ± 0,12

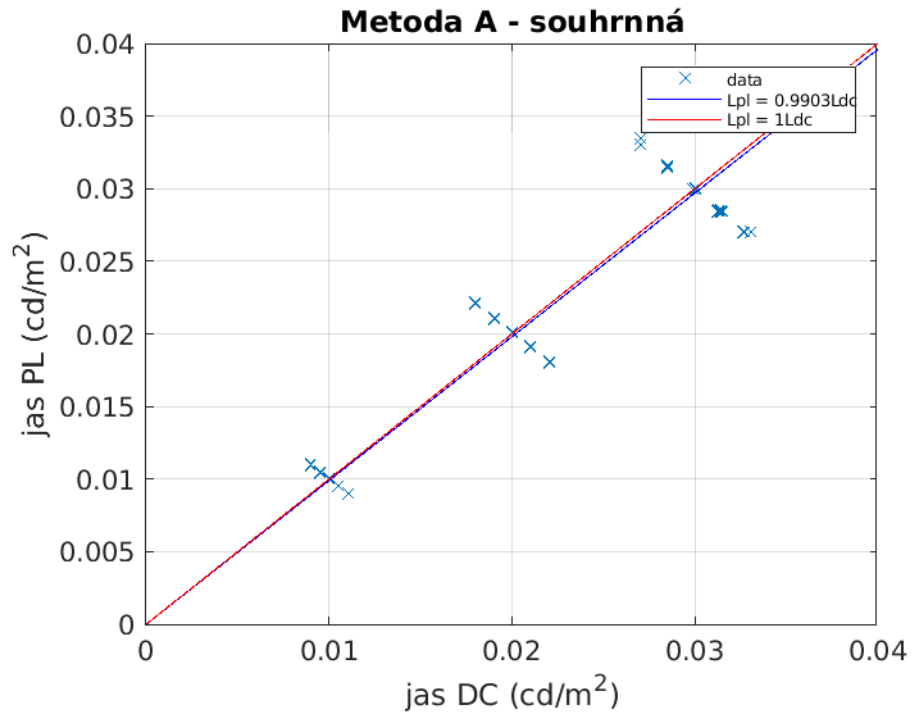
Tabulka 4 ukazuje výsledky všech figurantů v případě kontrolních dat metody B. Parametr k by v kontrolních datech měl být ideálně roven 1, protože oba segmenty svítily stálým světlem. U 3 figurantů byl parametr $k > 1$ a u ostatních byl menší než 1. Velmi blízko ideální hodnotě jsou parametry k u třetího, čtvrtého a šestého figuranta. Naopak u sedmého figuranta je parametr k velmi vzdálený od 1. To mohlo být způsobeno velmi malým počtem dat nebo jejich velkým rozptylem. U tohoto figuranta si lze též všimnout, že, jako u jediného, interval spolehlivosti nemůže obsahovat 1. Z toho si lze všimnout, že interval spolehlivosti koresponduje s p-value. Průměrná hodnota parametru k je 0,9480, což je více, než u metody A a méně než u metody B, kde se zdroj světla mezi segmenty lišil.

3.3.3 Porovnání metod

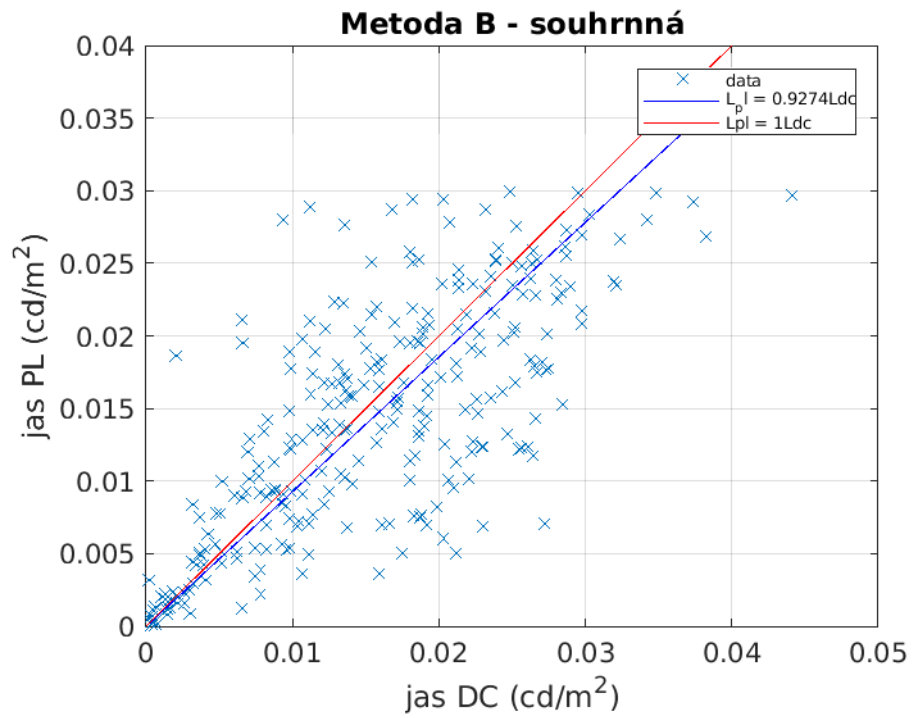
Při metodě A byly figurantovi ukázány dva segmenty s jasnem, který byl pevně nastaven. Zde figurant pouze rozhodoval, který se segmentů se mu zdá jasnější, popř. zda jsou oba stejně jasné. V metodě B byl pevně nastaven jas pouze horního segmentu a

jas dolního segmentu byl regulován figurantem tak, aby měli podle něj segmenty shodný jas.

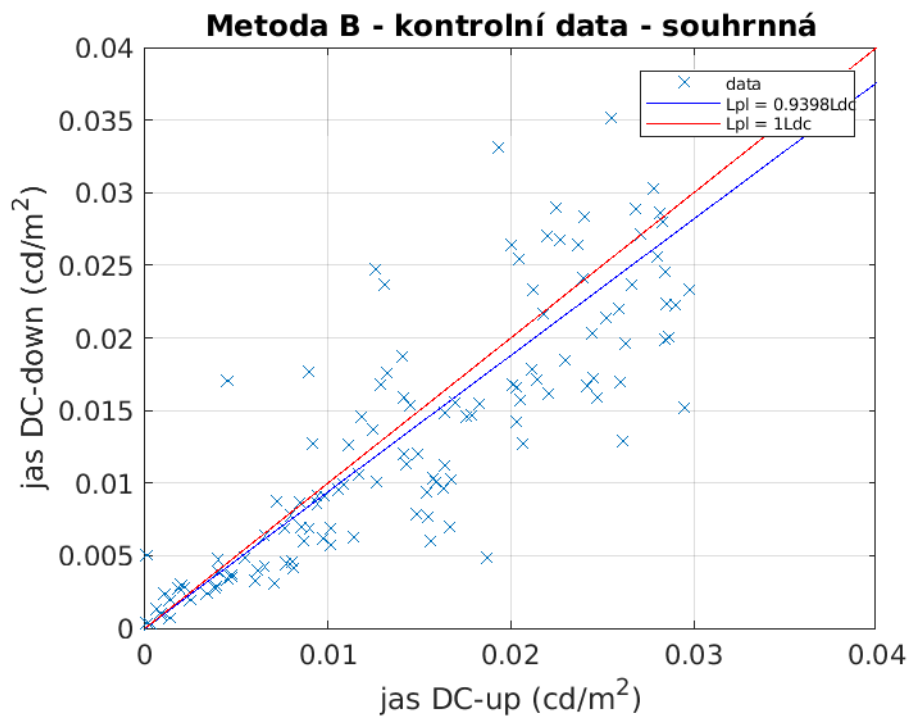
V metodě A se hodnotila pouze ta data, kde figurant rozhodl, že jsou stejně jasná. V metodě B se vyhodnocovala všechna data, ovšem data DCDC zvlášť.



Graf 14: Souhrnný graf pro metodu A



Graf 15: Souhrnný graf pro metodu B



Graf 16: Souhrnný graf pro kontrolní data metody B

Tabulka 5: Souhrnné výsledky obou metod

Metoda	Počet dat	Parametr k	P-value	99% interval spolehlivosti
A	521	0,9903	0,1979	$0,99 \pm 0,02$
B	314	0,9274	0,0152	$0,93 \pm 0,08$
Kontrolní data pro B	136	0,9398	0,1091	$0,9 \pm 0,1$

Při tomto analyzování byly výsledky všech figurantů vyhodnocovány dohromady. Grafy 14, 15 a 16 ukazují proložení souhrnných dat přímkou. V tabulce 5 jsou parametry potřebné k vyhodnocení. V případě souhrnné metody A byla hodnota p-value větší než 0,01, což opět potvrzuje nulovou hypotézu o shodném vnímání obou druhů světla. U metody B bylo p-value též větší než 0,01. To také potvrzuje výsledky, kde byla data každého figuranta hodnocena zvlášť. Interval spolehlivosti ve všech třech případech může zahrnout 1. Co se týče kontrolních dat metody B, tak tam se parametr k liší od předpokládané hodnoty 1. Dle výsledků souhrnných dat obou metod lze říci, že ani v jednom případě není statisticky významný rozdíl mezi vnímáním stálého a pulzního světla.

3.4 Analýza výzkumných cílů, předpokladů a hypotéz

Cílem výzkumné části této diplomové práce bylo praktické ověření Talbot-Plateova zákona pro rychle pulzující světlo se strmou náběžnou hranou v případě nočního vidění. Předpokladem výzkumu bylo tvrzení, že pro takové zdroje světla Talbot-Plateaův zákon neplatí. Jinými slovy, že existuje rozdíl mezi vnímáním jasu stálého a pulzního světla. Dle tohoto tvrzení byla určena nulová a alternativní hypotéza:

$$H_0 : k = 1 \text{ (bez rozdílu vnímání stálého a pulzního světla)}$$

$$H_1 : k \neq 1 \text{ (existuje rozdíl ve vnímání stálého a pulzního světla)}$$

Data byla analyzována dvěma způsoby. Jednak z hlediska výsledků jednotlivých figurantů pro obě metody. Ve všech případech nebyly výsledky v souladu s našimi výzkumnými předpoklady. Vždy jsme H_0 nezamítli a tudíž jsme neprokázali, že je statisticky významný rozdíl mezi vnímáním stálého a pulzního světla.

Druhou možnou analýzou je shrnutí výsledků všech figurantů, ale zvlášť pro každou metodu. Při metodě A byla přijmata H_0 a neprokázána H_1 . Stejně tomu bylo i v

případě metody B. Přijmutím H_1 bychom mohli tvrdit, že pulzní světlo vnímá člověk jasněji, než světlo stálé. V tomto případě ale bylo statisticky ověřeno, že vnímání pulzního světla o vysoké frekvenci s rychlou náběžnou hranou není ovlivněno Broca-Sulzer efektem a Talbot-Plateauův zákon platí.

4 Diskuze

Pohled na jednotlivé grafy z měření nám ukazuje, že data od jednotlivých figurantů jsou často velmi rozptýlena a nelze z nich vyčíst jednoznačný trend. To může být způsobeno nedokonalostí použitých metod nebo fyziologickými vlastnostmi nočního vidění. Člověk jako takový není nočním tvorem a jeho zrak je v nočních podmínkách značně omezený.

V této práci byly odstraněny nedostatky z předchozích experimentů, které byly uvedeny ve studii (Kukačka et al., 2016). LED v našem případě měly tak nízký výkon, že byly minimalizovány změny vlastností, které jsou ovlivněny nestálými teplotními podmínkami. Dále byl program a hardware upraven tak, aby byly oba druhy světla možné spustit na obou segmentech a ne jen na jednom vybraném. Zdokonalení pozorování světelného boxu bylo provedeno použitím difúzního plexi skla, které rovnoměrně rozloží světlo v daném segmentu. Dalším vylepšením je zahrnutí kontrolního měření, při kterém oba segmenty svítí stálým světlem. Při analýze získaných dat bylo použito vhodnější statistické vyhodnocení a též metoda totálních nejmenších čtverců (TLS), která oproti klasické metodě nejmenších čtverců (OLS) minimalizuje čtverec vzdálenosti bodů od regresní křivky stálého i pulzního jasu.

Předchozí studie a diplomové práce ověřovaly Talbot-Plateauův zákon při různých podmínkách. Například studie (Fan et al., 2014) ověřovala vnímání pulzujícího světla při různých spektrech LED a při různých střídách. Nejvyšší vnímání pulzního světla bylo při střídě 20 % a za použití červených LED. Studie (Fan et al., 2016) prokázala, že čím vyšší je střída pulzů pulzního světla, tím nižší byl efekt zesílení jasu. Další studie (Kukačka a Dupuis, 2017) ověřuje vliv různých frekvencí pulzního světla. Lidská sítnice umí detekovat i frekvence vysoko nad frekvencí kritickou, ač vědomě pulzování světla už nevnímáme.

Tato diplomová práce ověřovala Talbot-Plateauův zákon pouze na jedné frekvenci, jedné střídě a jednom spektru LED. Byla však ověřována při podmínkách nočního vidění, kdy se různé parametry zraku značně mění. Jedná se o vůbec první studii v této oblasti, kde bylo prováděno ověřování různých zákonů při skotopických jasech. Z tohoto důvodu ji nelze s předchozími studii striktně porovnávat.

5 Návrh doporučení pro praxi

Tento výzkum neslouží přímo pro konkrétní využití v praxi. Je spíše prohloubením znalostí o lidském zraku a to zvláště v případě nočního vidění, o kterém doposud víme daleko méně, než o vidění denním. Talbot-Plateauův zákon byl doposud různými způsoby zkoumán pouze při denním vidění. Tato práce je vůbec první, kde se tento zákon ověřoval při podmínkách nočního vidění.

Práce sice navazuje na předešlé výzkumy, ale jelikož šlo o noční vidění, bylo nutno tomu mnoho věcí přizpůsobit a sbírat úplně nové zkušenosti. Proto existuje několik návrhů, jak v dalších výzkumech tento experiment zdokonalit.

Při příštích experimentech by bylo vhodné při metodě B použít fixní sestavu dvojic jasů se stejným počtem kontrolních (DCDC) bodů, stejně tak, jak je tomu u metody A. Dále by bylo vhodné po posledním pokusu při obou metodách použít zvukovou výstrahu oznamující konec metody, jelikož i obsuha počítače sedí v absolutní tmě bez možnosti sledovat monitor. Tuto situaci by ale mohlo řešit i to, že by byla celá sestava kromě boxu přesunuta za nějakou zástěnu či závěs z důvodu světelného rušení. Všechny použité přístroje (laboratorní zdroje, počítač atd.) vyzařují světlo, kvůli kterému je experiment neproveditelný. V našem případě byly přístroje pouze obklopeny černými kartony a látkami, aby veškeré světlo pohltily. Rovněž by bylo vhodné místo klávesnice pro figuranta použít joystick, který lze v temné místnosti lépe ovládat.

Dalším doporučením je, aby všichni figuranti před samotným experimentem podstoupili testování na kontrastní citlivost v nočním vidění na našem světelném boxu, která bude ověřovat, zda je kontrastní citlivost v normě.

Několik figurantů si stěžovalo na výšku umístění podbradníku. Podbradník byl umístěn na nízkém stole a někteří figuranti tak museli být více předklonění. Příště je tedy nutné posadit celý box o asi 20 cm výše a tedy i zvětšit výšku podbradníku, popř. použít vyšší stolek. Tato poznámka od figurantů nabízí možnost výzkumu toho, zda bolest či neergonomická poloha krční páteře neovlivňuje zrakové vnímání.

6 Závěr

Tato práce obsahovala jak teoretickou, tak experimentální část. V teoretické části byly uvedeny všechny fyziologické a fyzikální poznatky a zákony, které souvisí se skotopickým viděním a vnímáním jasu lidským okem. Teoretická část též obsahovala shrnutí výsledků z dřívějších experimentů. Na tyto experimenty tato práce navazuje a snaží se je zdokonalit a rozšířit.

Experimentální část ověřovala platnost Talbot-Plateova zákona při nočním vidění, kdy se vidění účastní pouze tyčinky. Byly popsány základní hypotézy, výzkumné cíle, postup provedení experimentu, metodika a interpretace výsledků, který byla jak číselná, tak grafická. Výzkumným předpokladem bylo tvrzení, že existuje rozdíl mezi vnímání pulzního a stálého světla, tedy zamítnutí Talbot-Plateova zákona. Experimentální ověření bylo provedeno dvěma metodami. Při obou metodách byl náš předpoklad mylný - byla potvrzena platnost Talbot-Plateova zákona při nočním vidění. Nutno ovšem také dodat, že 8 figurantů není dostačující počet na spolehlivé závěry. Spolehlivé vyvrácení Talbot-plateova zákona by vyžadovalo velmi silná data, protože obecně je kontrastní citlivost člověka velmi nízká – od 20 %. I kdyby byl zjištěn 8% efekt zvýšení vnímání jasu, stále by to bylo málo, protože při takové hodnotě není rozdíl jasů člověkem detekován. Tato skutečnost byla našim experimentem potvrzena.

Vyhodnocení dat a metodika byla převzata z předchozích diplomových prací s drobnými vylepšeními. Výsledky jednotlivých figurantů byly porovnávány jak mezi sebou tak i mezi oběma metodami. Zároveň byla provedena i souhrnná analýza, která analyzovala společně výsledky všech figurantů najednou. I při souhrnné analýze byla potvrzena platnost Talbot-Plateova zákona. Výsledky z této diplomové práce jsou odlišné od výsledků z přechozích diplomových prací. V nich byl Talbot-Plateaův zákon vyvrácen a byla potvrzena platnost Broca Sulzer efektu. Následkem tohoto efektu je, že velmi krátký záblesk světla je vnímán jasněji, než je ve skutečnosti. Podobných výsledků bylo dosaženo i v mnoha studiích, které jsou shrnuty v teoretické části této práce. Opět je ale nutno připomenout, že veškeré předchozí experimenty byly prováděny při denním vidění, kde vidění zprostředkovávají čípky. Noční vidění má mnoho odlišných vlastností od denního a proto nelze tuto práci plně srovnávat s předchozími.

Výsledky výzkumné části nemají jednoznačný přínos a uplatnění pro praktické použití. Jde o prohloubení znalostí o lidském zraku, konkrétně o nočním vidění, které není zdaleka tak probádáno jako vidění denní. Mnohem častěji přebírá osvětlování nejrůznějších prostor právě LED technologie, která má odlišné vlastnosti od ostatních dříve užívaných světelných zdrojů a proto je nutné znát její účinky na lidský organismus ve všemožných podmínkách.

Seznam literatury

ANON, *Světlo: Časopis pro světelnou techniku a osvětlování* [online]. Praha: FCC Public, 2007, (6) [cit. 2020-04-23]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36187.pdf>

ANON, *Západočeská univerzita v Plzni, Nové technologie - výzkumné centrum. Propustnost* [online]. In: . [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/opticke-vlastnosti/opticke-vlastnosti/propustnost>

AUTRATA, Rudolf. *Nauka o zraku*. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 2002. ISBN 80-7013-362-7.

CARTER, Shelli a Monisha SCOTT. *Lumen Learning - Biology for Majors II: Module 17: Sensory Systems - Transduction of Light* [online]. [cit. 2020-06-30]. Dostupné z: <https://courses.lumenlearning.com/wm-biology2/chapter/transduction-of-light/>

CIE Standard S 014-1/E:2006. *Colorimetry: Part 1: CIE Standard Colorimetric Observers*, 2nd Edition. 2006.

CIE TN 007:2017. *Technical note: Interim Recommendation for Practical Application of the CIE System for Mesopic Photometry in Outdoor Lighting*. 2017.

ČSN IEC 50-845 (33 0050). *Mezinárodní elektrotechnický slovník: Kapitola 845: Osvětlení*. 1996.

ČSN 01 1718. *Měření barev: Československá státní norma*. 1. Praha: Vydavatelství norem Praha, 1990.

DARULA, Stanislav. *Osvětlování světlovody*. Praha: Grada, 2009. Stavitel. ISBN 978-80-247-2459-1.

FAN, S. et al.. *Influence of pulse width on luminousefficiency fora two-degree field*. *Lighting Research & Technology* [online]. 2017, 49(3), 357-369 [cit. 2020-04-12]. DOI: 10.1177/1477153515626772. ISSN 1477-1535. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1477153515626772>

FAN, S. et al. *Optical Engineering* 53(6), 065105 (June 2014): *Human perception on pulsed red and green lights* [online]. [cit. 2021-03-30]. ISSN 0091-3286.

FLORIÁNOVÁ, Lucie. *Vnímání jasu rychle pulzujícího světla člověkem*. Liberec, 2018. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Leoš Kukačka, Ph.D. et Ph.D.

FRIEDMAN, Neil, Peter KAISER a William TRATTLER. *Review of Ophthalmology: E-Book: Expert Consult* [online]. 3. Elsevier Health Sciences, 2016 [cit. 2021-03-23]. ISBN 9780323390576.

HEISSIGEROVÁ, Jarmila. *Oftalmologie: pro pregraduální i postgraduální přípravu*. Praha: Maxdorf, [2018]. Jessenius. ISBN 978-80-7345-580-4.

HERŮFKOVÁ, Šárka. *Adaptace, její měření, vliv patologie na kvalitu života jedince*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Masarykova univerzita. Vedoucí práce Mgr. Radek Anderle.

HRUŠKOVÁ, Jana. *Fyziologie oka* [online]. Informační systém Masarykovy univerzity, 2015 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: https://is.muni.cz/www/345402/66012191/Fyziologie_oka.pdf

CHEN, T. et al. *Toward Pulse Photometry: Influence of Pulse Light on Luminous Efficiency and Physiological Effects*. *Journal of Science and Technology in Lighting* [online]. 2018, **41**, 177-185 [cit. 2020-05-01]. DOI: 10.2150/jstl.IEIJ160000589. ISSN 2432-3225. Dostupné z: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jstl/41/0/41_IEIJ160000589/_article

KOHOUT, Václav. *Školská fyzika 2013/2 - Fyzika kolem nás: Historie a elementární základy teorie barev III*. [online]. Plzeň: Fraus [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://sf.zcu.cz/data/2013/sf2013_02_8.pdf

KOLÁŘ, Petr. *Věkem podmíněná makulární degenerace*. Praha: Grada, 2008. ISBN 978-80-247-2605-2.

KUCHYNKA, Pavel. *Oční lékařství*. 2., přepracované a doplněné vydání. Praha: Grada Publishing, 2016. ISBN 978-80-247-5079-8.

KUKAČKA, L. et al. *Broca-Sulzer Effect Detection over Critical Fusion Frequency for Pulse Operated White LEDs with Varied Pulse Shape*. In 15th International Symposium on the Science and Technology of Lighting, At Kyoto, Japan [online], 2016, s. [cit. 2020-04-18].

KUKAČKA, L. et al. 2017. *On Correct Evaluation Techniques of Pulsing Light Brightness Enhancement Effect Measurement Data*. *Optical Engineering* [online]. 2017, 56(11) [cit. 2020-04-01]. DOI: 10.1117/1.OE.56.11.114103. ISSN 0091-3286. Dostupné z: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/optical-engineering/volume-56/issue-11/114103/On-correct-evaluation-techniques-of-brightness-enhancement-effect-measurementdata/10.1117/1.OE.56.11.114103.full>

LANGMEIER, Miloš. *Základy lékařské fyziologie*. Praha: Grada, 2009. ISBN 978-80-247-2526-0.

MAIEROVÁ, Lenka. *Světlo v budovách – nevizuální vnímání světla* [online]. 2. 6. 2017, s. 1 [cit. 2020-06-30]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/okna-dvere/svetlo-v-budovach-nevizualni-vnimani-svetla>

MOTOMURA H., IKEDA Y. a M. JINNO, *Evaluation of Visual Perception Enhancement Effect by Pulsed Operation of LEDs*, in 14th International Symposium on the Science and Technology of Lighting, Italy [online], 2014, s. 1-13, [cit. 2020-04-07]. ISBN 978-1-5108-4085-0. Dostupné z: <http://toc.proceedings.com/34623webtoc.pdf>

NAVRÁTIL, Leoš a Jozef ROSINA. *Medicínská biofyzika*. 2., zcela přepracované a doplněné vydání. Praha: Grada Publishing, 2019. ISBN 978-80-271-0209-9.

NOLEN-HOEKSEMA, Susan. *Psychologie Atkinsonové a Hilgarda*. Vyd. 3., přeprac. Přeložil Hana ANTONÍNOVÁ. Praha: Portál, 2012. ISBN 978-80-262-0083-3.

OKA, Shunichi, C. Richard CHAPMAN a Robert C. JACOBSON. Phasic Pupil Dilation Response to Noxious Stimulation. *Journal of Psychophysiology* [online]. 2000, 14(2), 97-105 [cit. 2020-06-22]. DOI: 10.1027//0269-8803.14.2.97. ISSN 0269-8803. Dostupné z: <https://econtent.hogrefe.com/doi/10.1027//0269-8803.14.2.97>

OREL, Miroslav. *Nervové buňky a jejich svět*. Praha: Grada, 2015. Psyché (Grada). ISBN 978-80-247-5070-5.

OTRADOVEC, Jiří. *Klinická neurooftalmologie*. Praha: Grada, 2003. ISBN 80-247-0280-0.

PAŠTA, Jiří. *Základy očního lékařství*. Praha: Univerzita Karlova, Nakladatelství Karolinum, 2017. ISBN 978-80-246-2460-0.

PEREGRIN, Jaroslav; SVĚRÁK, Jaroslav. *Elektroretinografie s elektrodami DTL: normativní data*. Lék. zpr. LF UK Hradec Králové. 1999, s.161-166

PLATEAU, J.: *Betrachtungen Über Ein Von Hrn. Talbot Vorgeschlagenes Photometrisches Princip*. Pog Gendorf Ann. Physik. Chemie 35, 457?468 (1835).

PLUHÁČEK, F. *Fyziologická optika – výukové materiály k předmětu Fyziologická optika*. Katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Olomouc, 2010.

ROECKELEIN, J.E., ed. *Elsevier's Dictionary of Psychological Theories*. 1. Elsevier Science, 2006. ISBN 9781493302338.

ROKYTA, Richard. *Fyziologie a patologická fyziologie: pro klinickou praxi*. Praha: Grada Publishing, 2015. ISBN 978-80-247-4867-2.

RUTRLE, Miloš. *Brylová optika*. 2. přeprac. vyd. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 1993. Učební text pro střední zdravotnické školy. ISBN 80-701-3145-4.

SCHREIBER, Herrmann. *50 praktických zapojení se světelnými diodami*. Praha: BEN - technická literatura, 1997. ISBN 80-86056-23-6.

SLAVÍK, Jakub et al. *Víte, jak funguje LED a OLED dioda?* [online]. In: . 1.3.2013, s. 1 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/vzdelavani/15.php>.

SOLOMON, Joshua A. a Christopher W. TYLER. *A Brücke–Bartley effect for contrast*. *Royal Society Open Science* [online]. 2018, 5(8) [cit. 2020-05-01]. DOI: 10.1098/rsos.180171. ISSN 2054-5703. Dostupné z: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsos.180171>

STOCKMAN, Andrew a L.T. SHARPE. Luminous efficiency. *Colour & Vision Research laboratory* [online]. 1995 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <http://www.cvrl.org/lumindex.htm>

SYNEK, Svatopluk a Šárka SKORKOVSKÁ. *Fyziologie oka a vidění*. 2., dopl. a přeprac. vyd. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-3992-2.

ŠIKL, Radovan. *Zrakové vnímání*. Praha: Grada, 2012. Psyché (Grada). ISBN 978-80-247-3029-5.

TROJAN, Stanislav. *Lékařská fyziologie*. 4. vyd. přepr. a dopl. Praha: Grada Publishing, 2003. ISBN 9788024705125.

XIN, Gu. *Pulse modulation effect of light-emitting diodes on human perception enhancement*. *Optical Engineering* [online]. 2012, **51**(7) [cit. 2020-05-01]. DOI: 10.1117/1.OE.51.7.073608. ISSN 0091-3286. Dostupné z: <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1.OE.51.7.073608>

ZVÁRA, Karel. *Základy statistiky v prostředí R*. Praha: Karolinum, 2013. Biomedicínská statistika. ISBN 978-80-246-2245-3.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Polovodičový krystal světelné diody (Schreiber, 1997).....	18
Obrázek 2: Účinnost oka (Carter a Scott, 2018) a (Maierová, 2017), (upraveno).....	27
Obrázek 3: Vnitřní část boxu s LED (autor).....	44
Obrázek 4: Výroba krytu pro desetistupňového pozorovatele (autor).....	46
Obrázek 5: Sestava experimentu (autor).....	54
Obrázek 6: Schéma experimentu (autor).....	54

Seznam tabulek

Tabulka 1: Řády kalibračních regresních modelů.....	51
Tabulka 2: Souhrn výsledků - metoda A.....	58
Tabulka 3: Souhrn výsledků - metoda B.....	59
Tabulka 4: Souhrn výsledků - kontrolní data pro metodu B.....	60
Tabulka 5: Souhrnné výsledky obou metod.....	62

Seznam grafů

Graf 1: Adaptační křivka – adaptace na skotopické vidění (Pluháček, 2010).....	31
Graf 2: Závislost intenzity vjemu a intenzity podnětu (Trojan, 2003).....	33
Graf 3: Závislost intenzity vjemu a intenzity podnětu pro konkrétní druh počítku (Trojan, 2003).....	34
Graf 4: Závislost poměrné spektrální citlivosti na vlnové délce pro fotopické, skotopické a mezopické vidění (Habel a Žák, 2007).....	35
Graf 5: Světelná účinnost pro fotopické, skotopické a mezopické vidění (Habel a Žák, 2007).....	36
Graf 6: Akční potenciál nervové buňky (Langmeier, 2009).....	38
Graf 7: Normované průběhy ERG křivek při skotopickém vidění (Peregrin a Svěrák, 1999).....	41
Graf 8: Propustnost jedné vrstvy modré folie (autor, program Matlab).....	45
Graf 9: Spektrální zář LED s plexi sklem před použitím masky (autor, program Matlab).....	47
Graf 10: Poměrné spektrální složení světla LED s plexisklem a maskou v porovnání se skotopickou citlivostní funkcí (autor, program Matlab).....	48
Graf 11: Závislost skotopického a fotopického jasu (autor, program Matlab).....	49
Graf 12: Regresní model: závislost jasu na proudu LED, horní pulzní kanál.....	52
Graf 13: Regresní model: závislost jasu na proudu LED, dolní pulzní kanál.....	52
Graf 14: Souhrnný graf pro metodu A.....	61
Graf 15: Souhrnný graf pro metodu B.....	61
Graf 16: Souhrnný graf pro kontrolní data metody B.....	62

Seznam příloh

Příloha A – Grafy výsledků pro metodu A (autor)

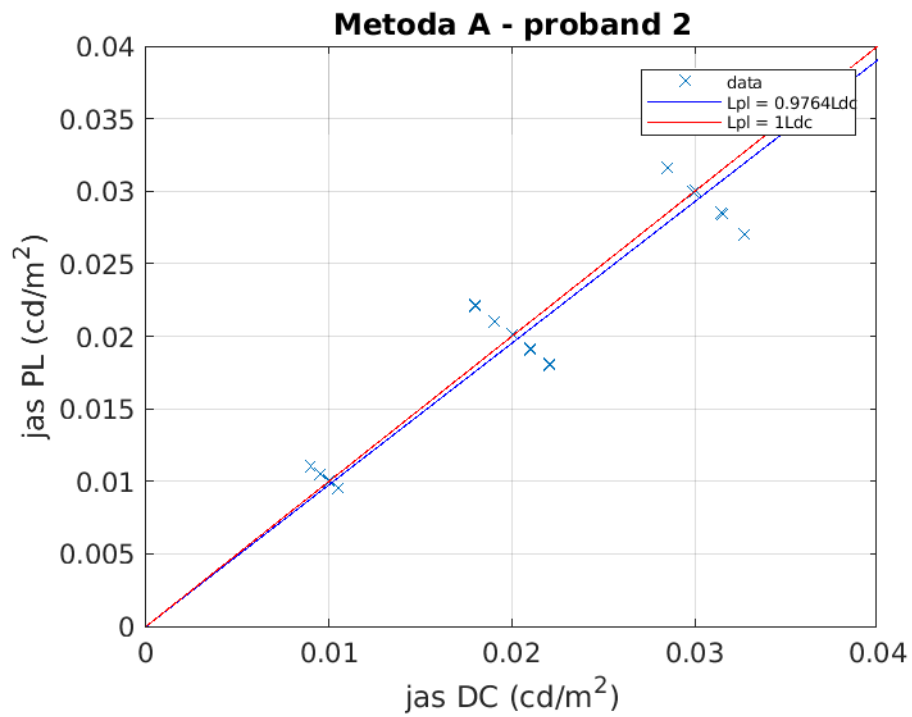
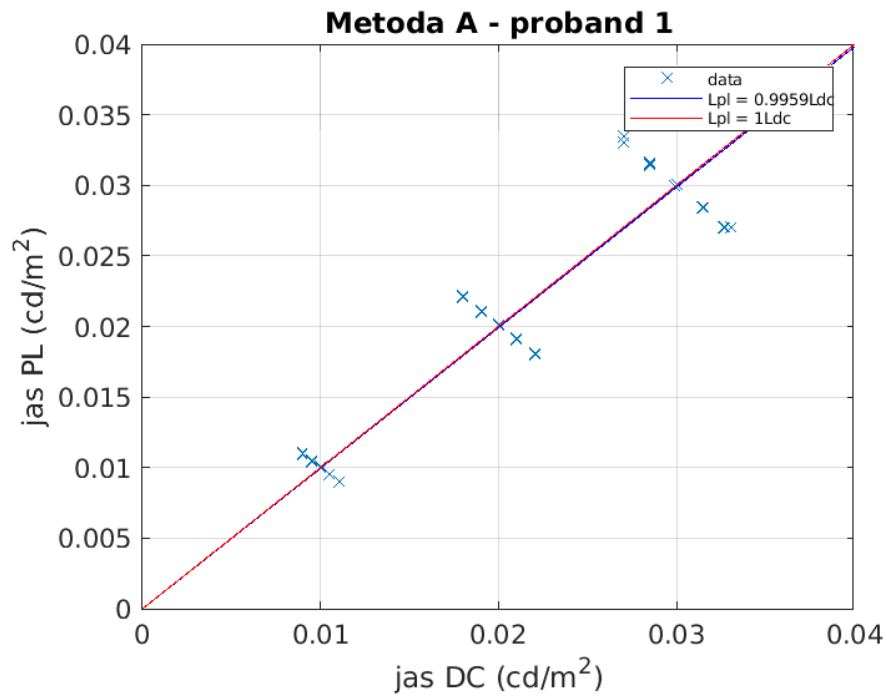
Příloha B – Grafy výsledků pro metodu B spolu s kontrolními daty (autor)

Příloha C - Osobní dotazník (Kukačka, 2018)

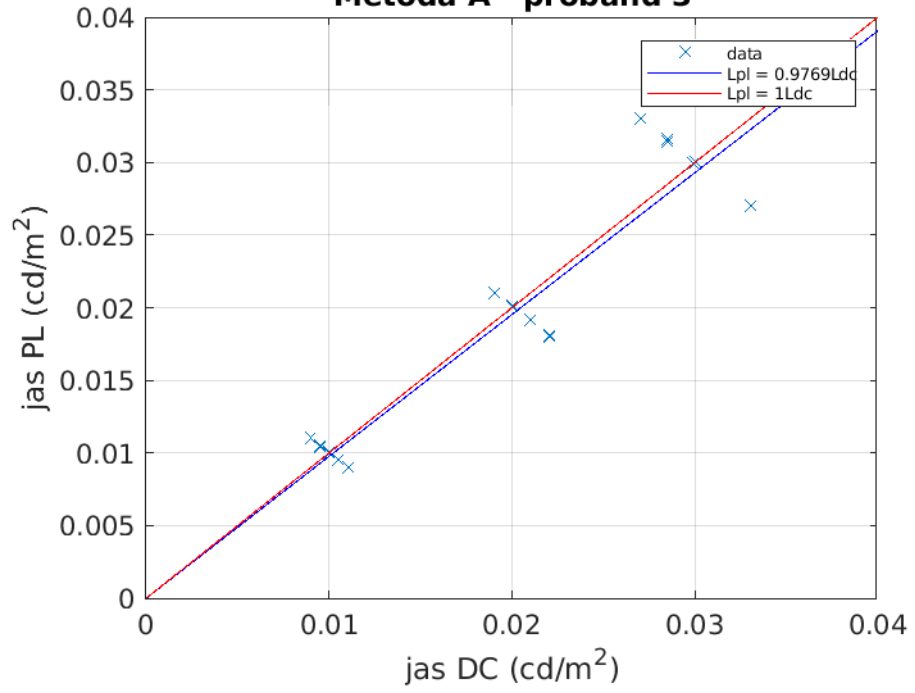
Příloha D - Seznámení s riziky spojenými s pulzujícím světlem a souhlas se zpracováním osobních údajů (Kukačka, 2018)

Příloha E – tabulka údajů o figurantech (autor)

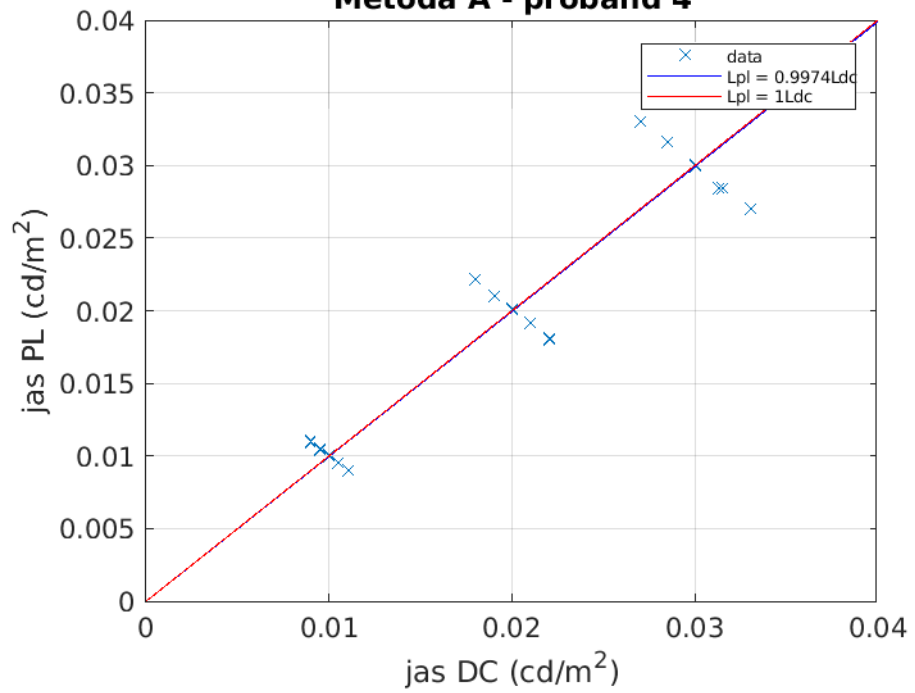
Příloha A – Grafy výsledků pro metodu A (autor)



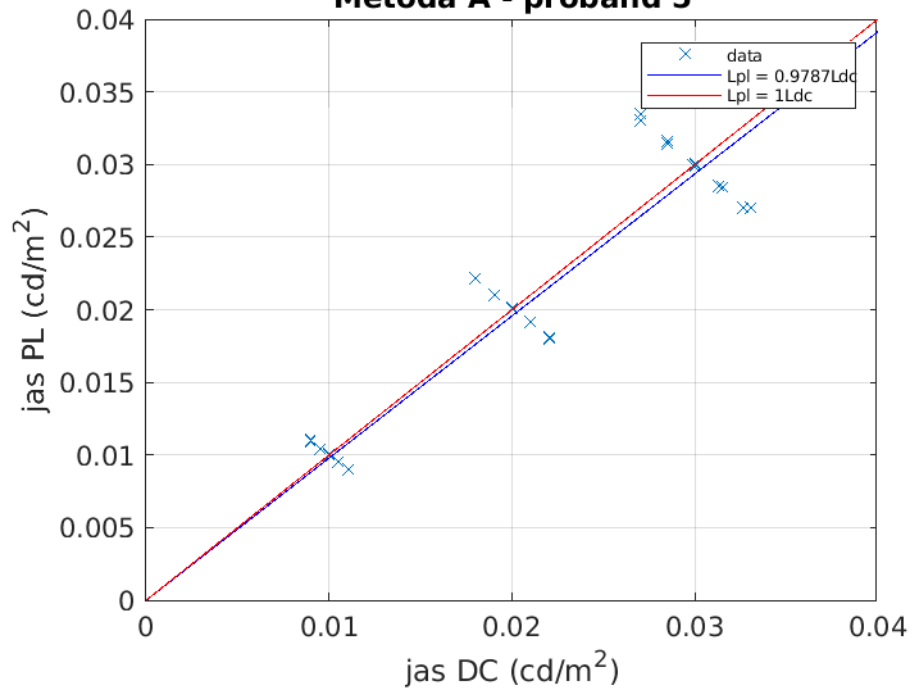
Metoda A - proband 3



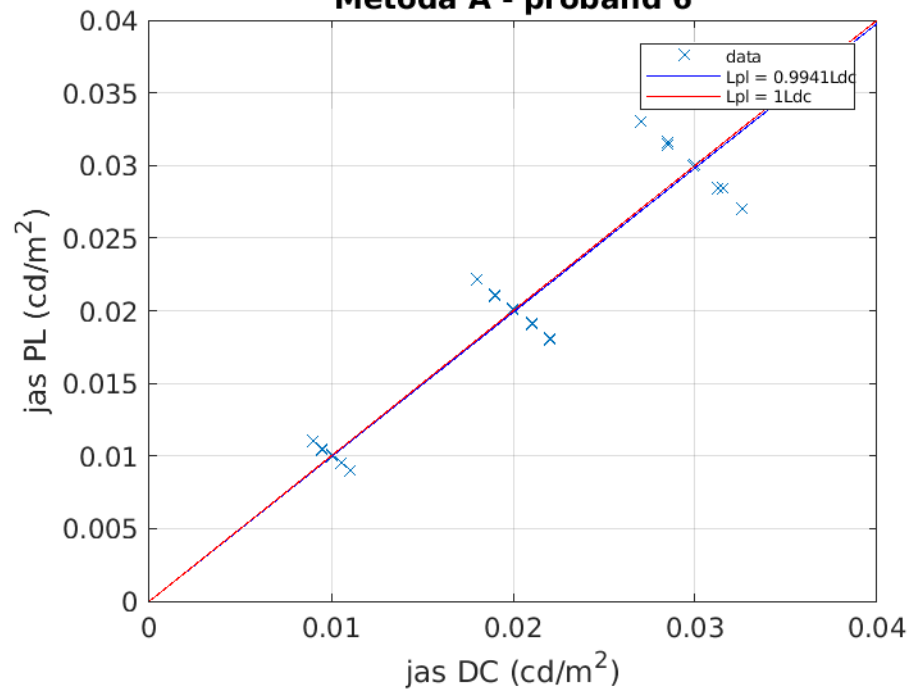
Metoda A - proband 4



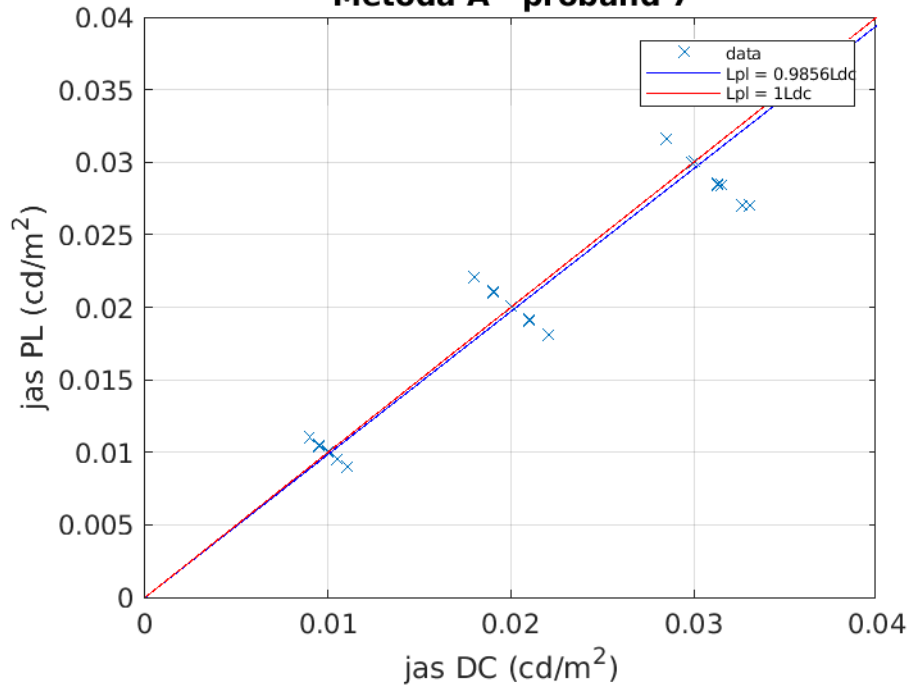
Metoda A - proband 5



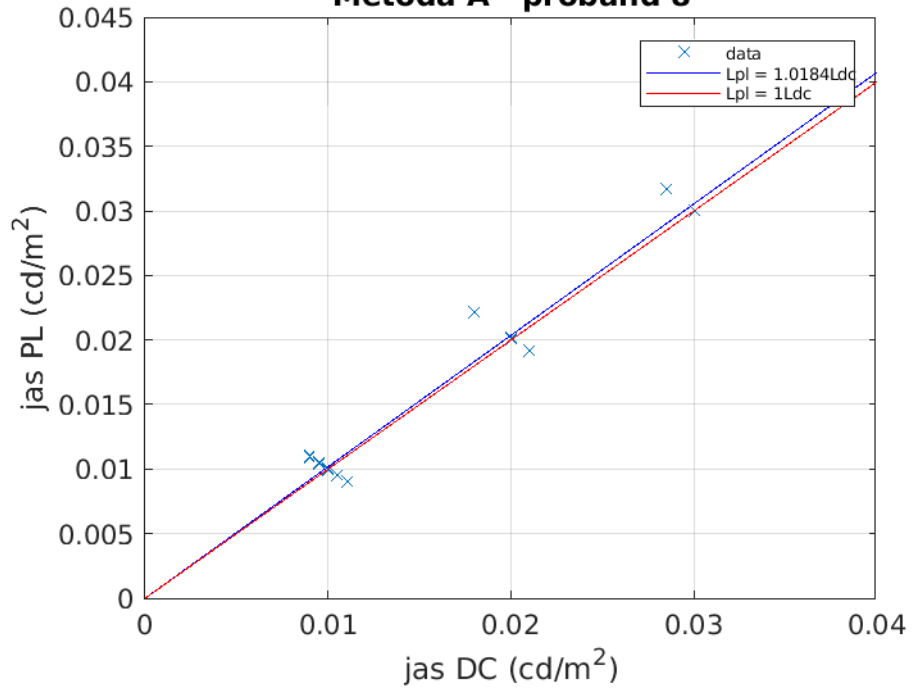
Metoda A - proband 6



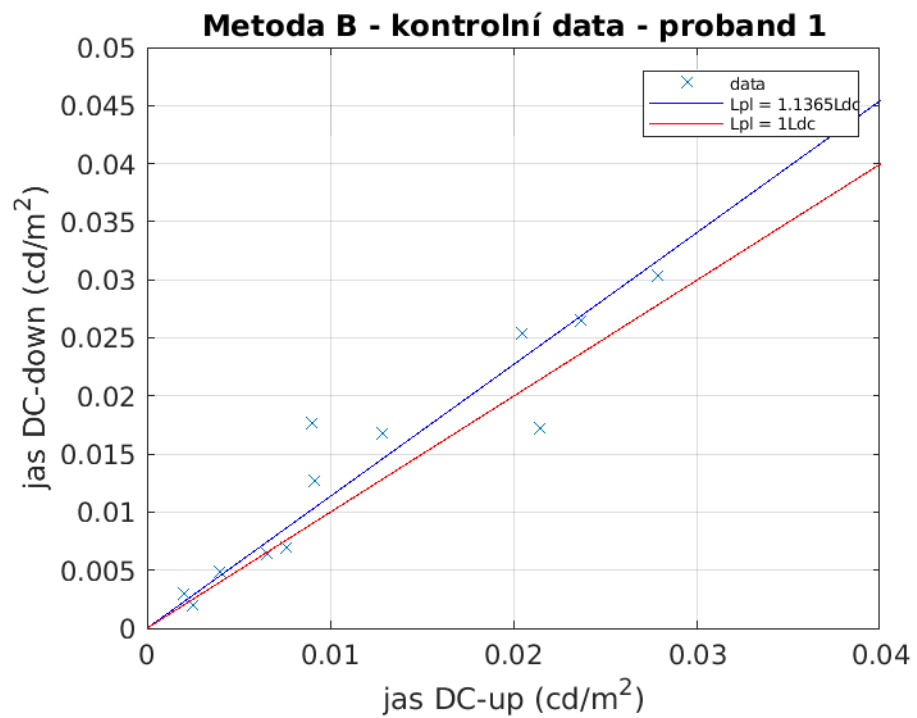
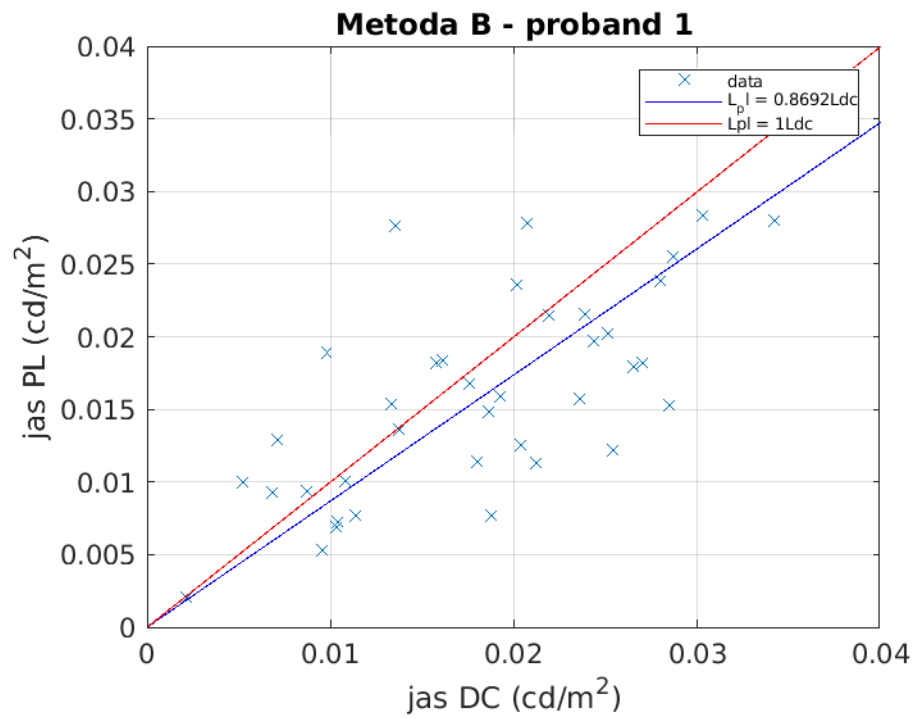
Metoda A - proband 7

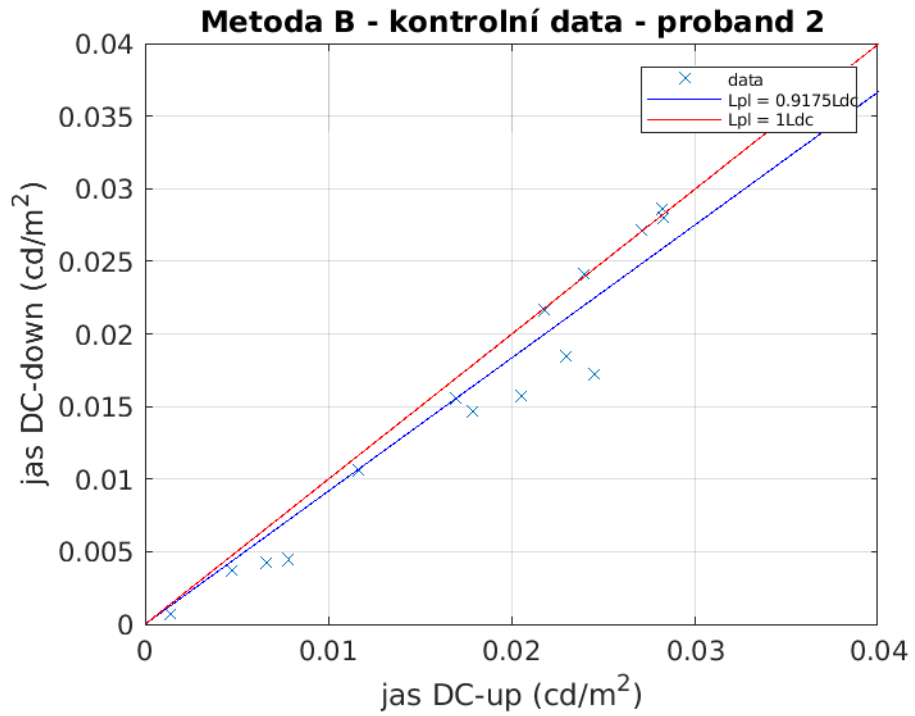
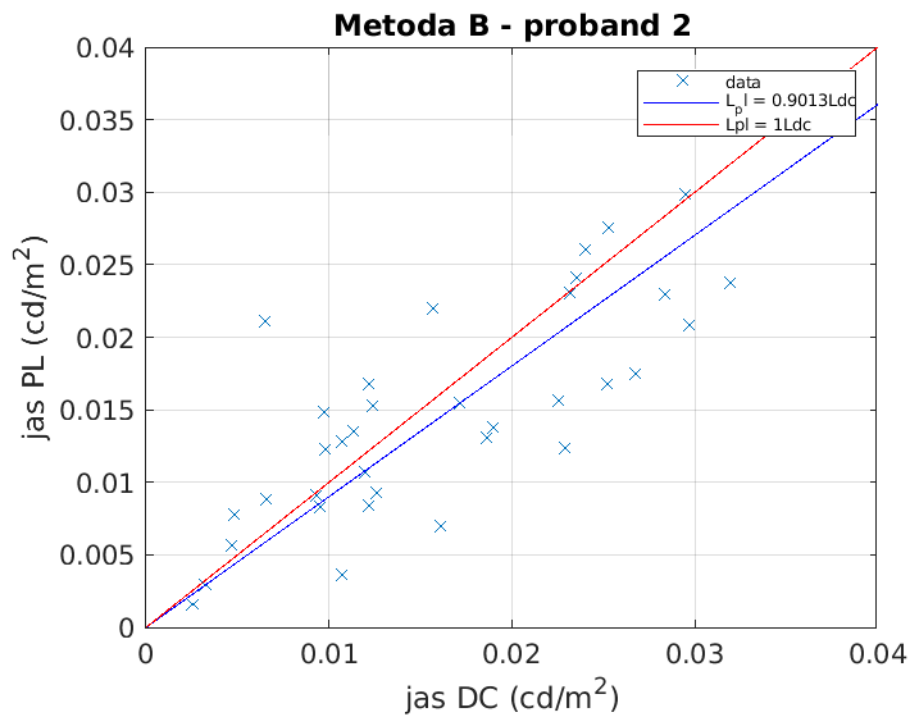


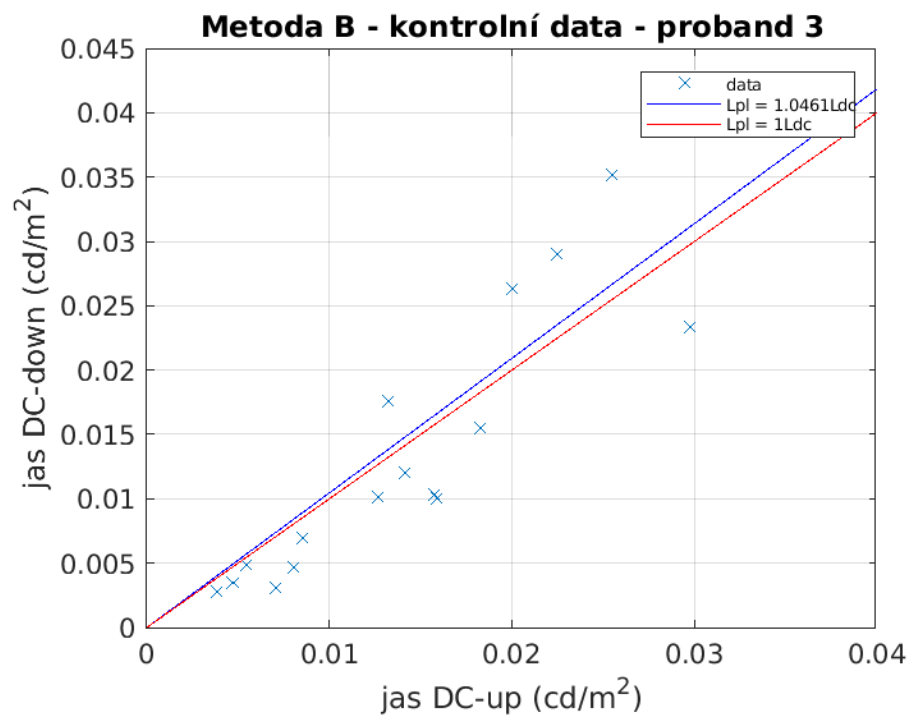
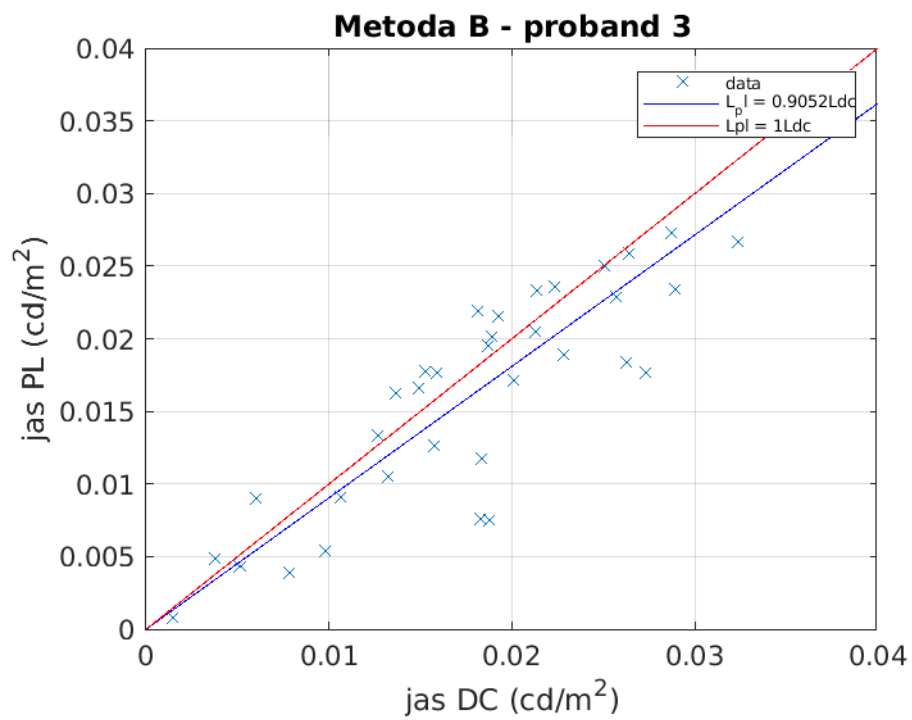
Metoda A - proband 8

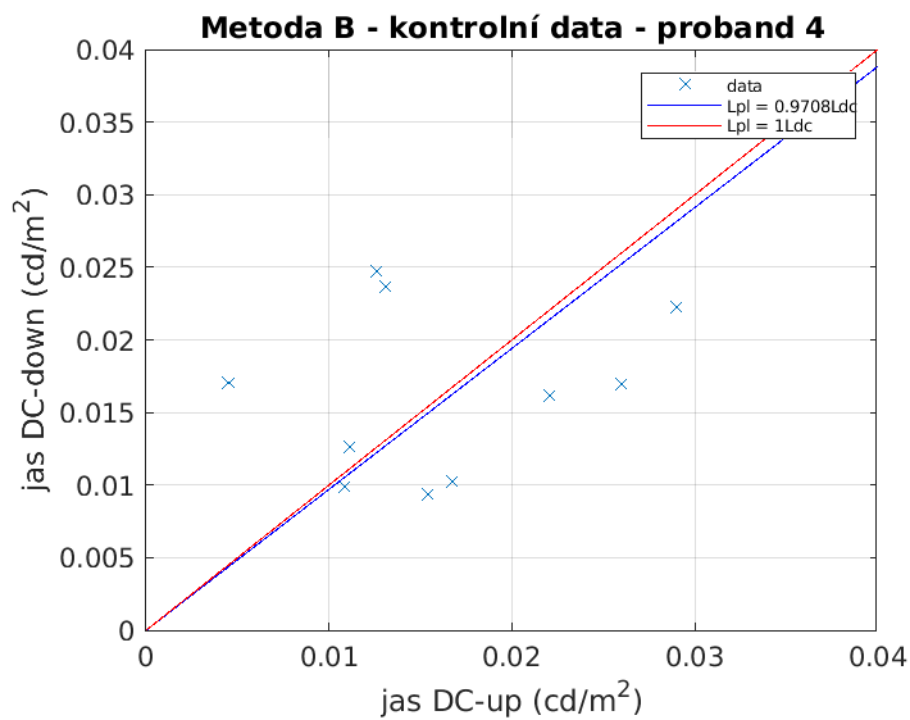
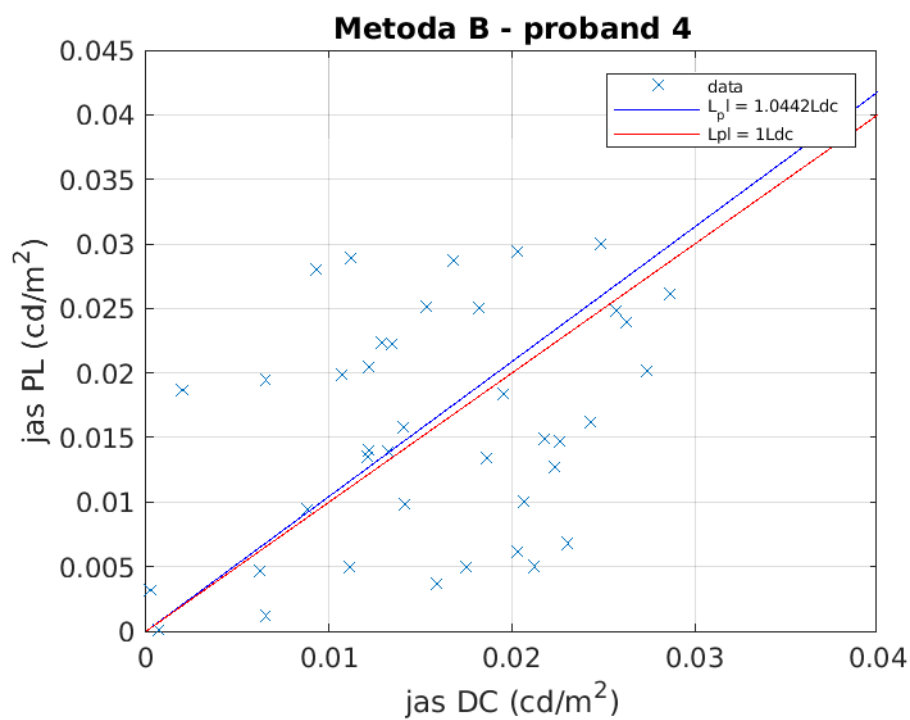


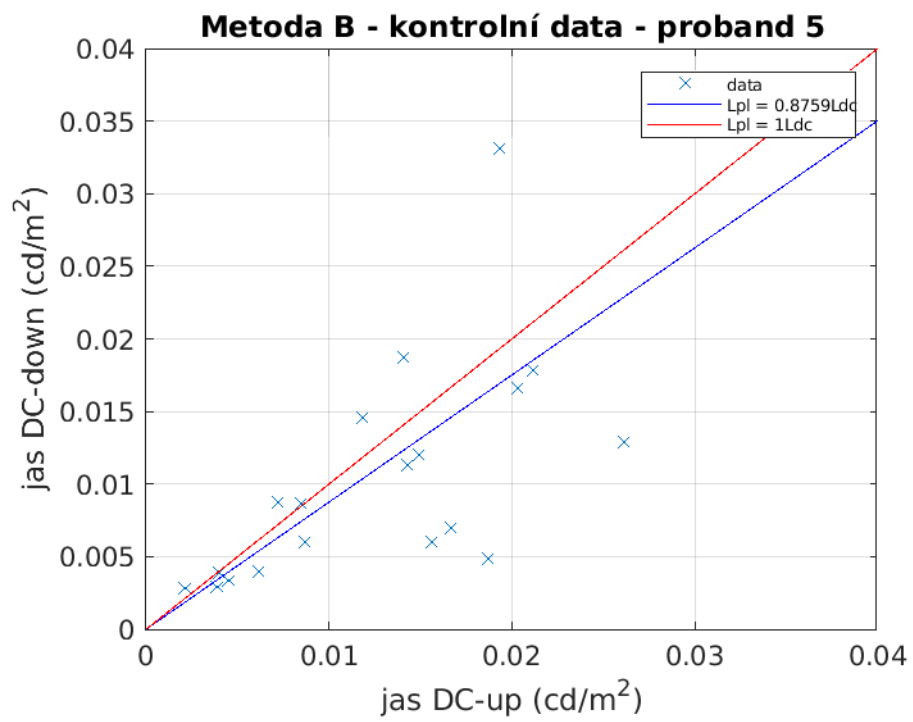
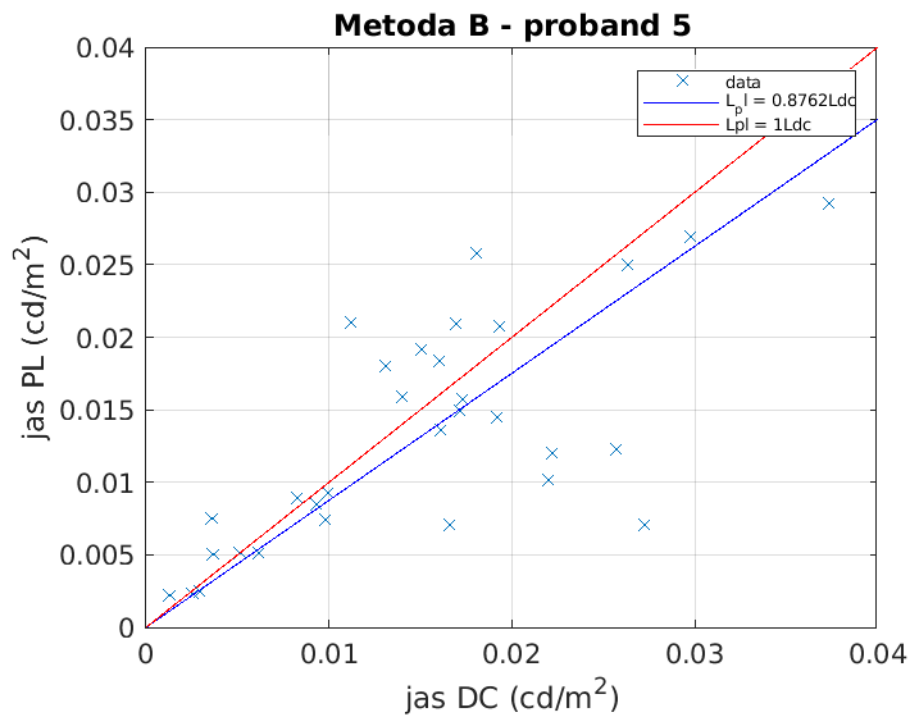
Příloha B – Grafy výsledků pro metodu B spolu s kontrolními daty
(autor)



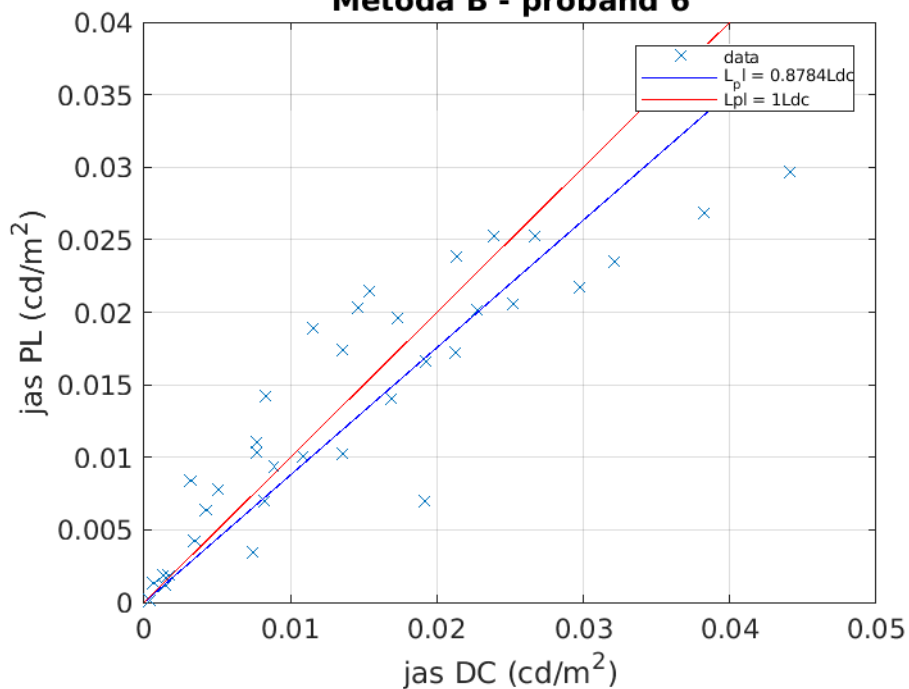




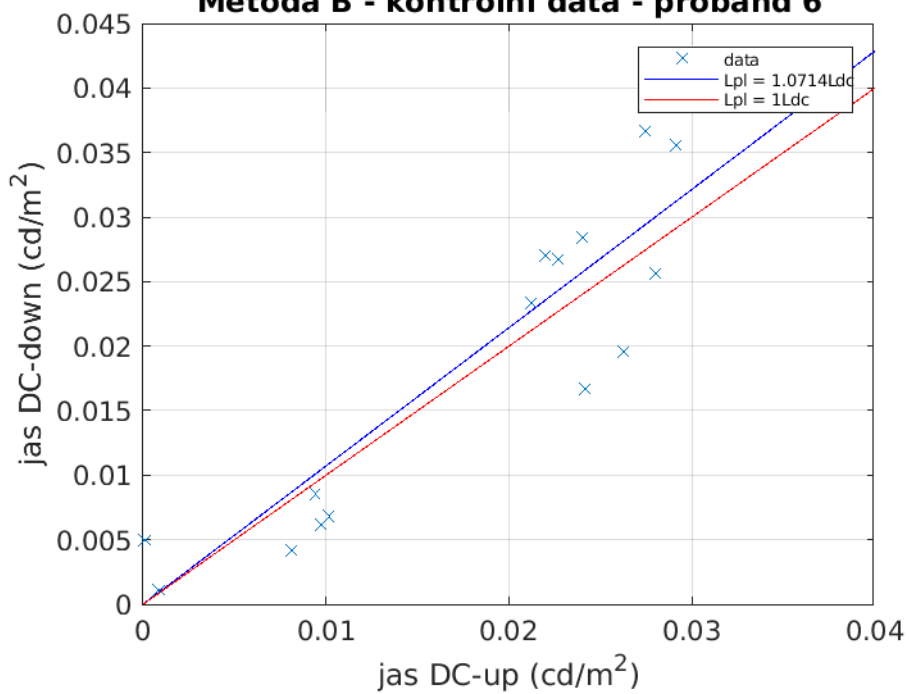


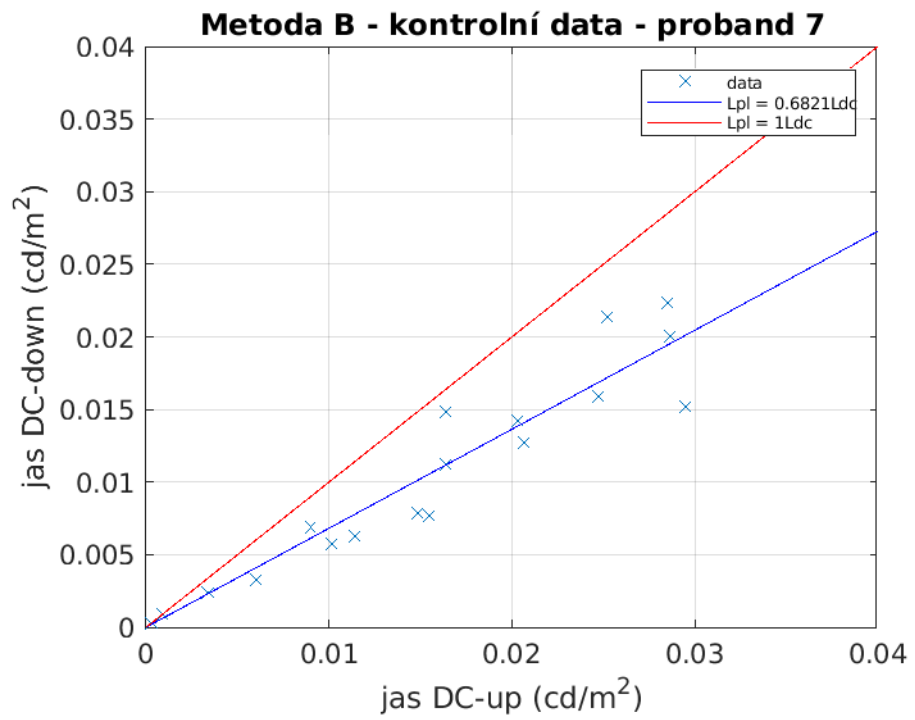
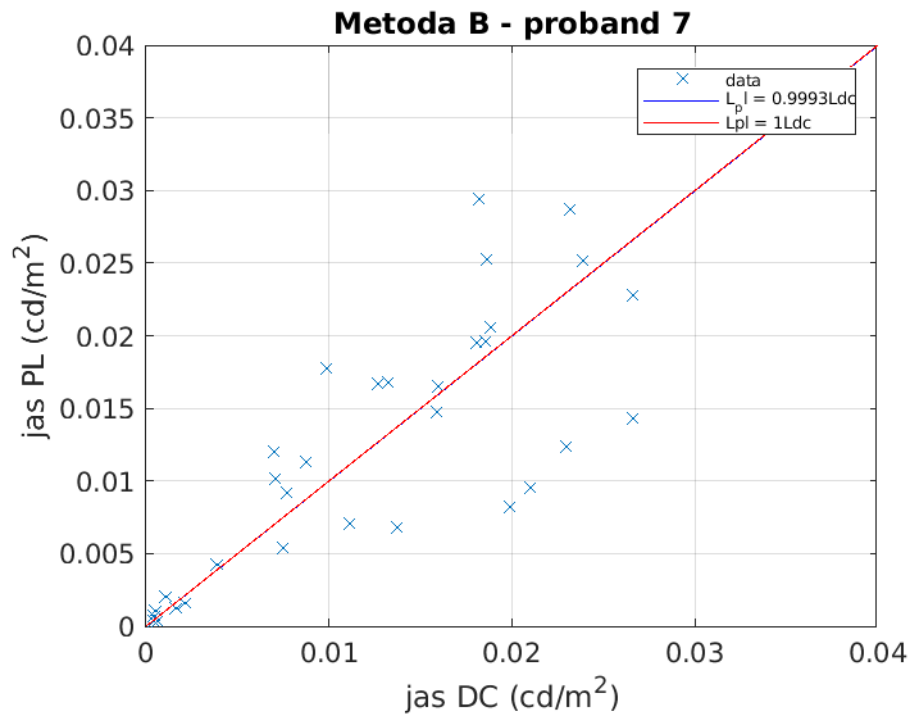


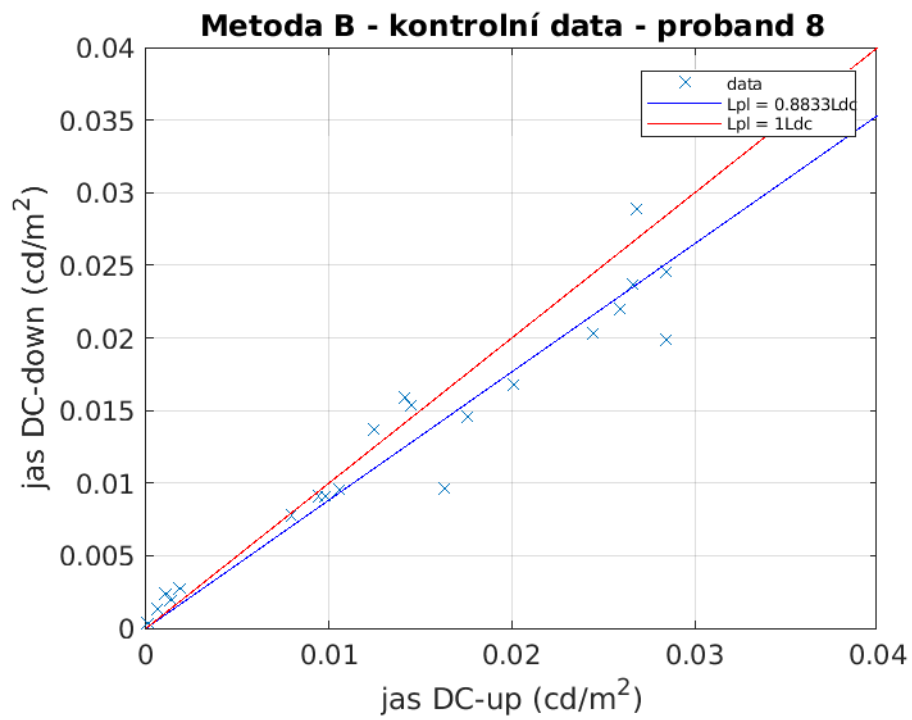
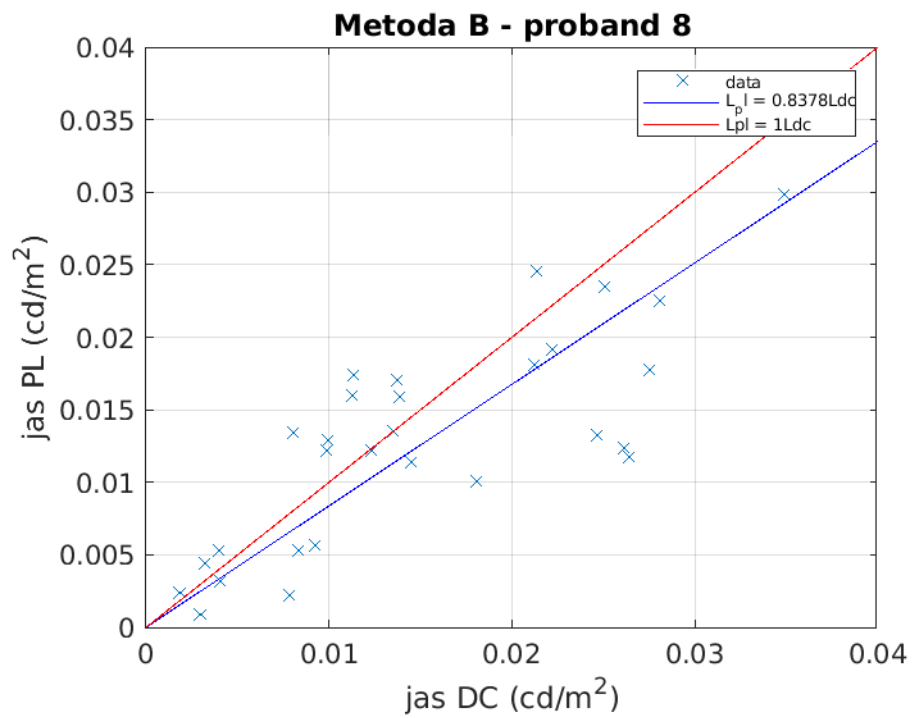
Metoda B - proband 6



Metoda B - kontrolní data - proband 6







Příloha C – Osobní dotazník (Kukačka, 2018)

Osobní dotazník pro potřeby experimentu v rámci diplomové práce Experimentální ověření

Talbot-Plateova zákona v režimu nočního vidění

Přidělené ID probanda: _____

Poučení: Veškeré uvedené informace budou použity pouze pro potřeby této studie. Vaše osobní údaje budou uvedeny pouze prostřednictvím přiděleného ID (identifikačního) čísla.

Vyplňte, prosím, následující údaje:

Věk: _____

Pohlaví: žena muž

Oční vady/nemoci: žádné

Nosím brýle / kontaktní čočky: ano ne

Prodělané oční operace/úrazy: žádné

Zraková ostrost: v normě korigovaná v normě

Kontrastní citlivost: v normě

Barvocit: v normě

Prohlašuji a svým podpisem stvrzuji, že jsem veškeré údaje vyplnil/a pravdivě a rozumím poučení v úvodu dotazníku. Byl/a jsem seznámen/a s průběhem experimentu a veškerými riziky. Souhlasím s mou účastí ve výzkumu. Moje účast ve výzkumu je dobrovolná.

Místo, datum

Podpis probanda

Příloha D – Seznámení s riziky spojenými s pulzujícím světlem a souhlas se zpracováním osobních údajů (Kukačka, 2018)

Seznámení s riziky spojenými s pulzujícím světlem (Kukačka, 2018)

V experimentu budete pracovat se světlem pulzujícím na kmitočtu 50 Hz. Přestože je tento kmitočet za hranicí viditelnosti a rozeznatelnosti, může pulzující světlo za určitých okolností u citlivých jedinců způsobovat tyto zdravotní problémy:

- únava očí,
- bolest hlavy, migréna,
- závrat', nevolnost,
- epileptický záchvat,
- zhoršení autistického chování.

Riziko výskytu těchto komplikací je minimalizováno vysokým kmitočtem pulzů a malou plochou světelného zdroje. Přesto, pokud jste autista, epileptik, trpíte migrénami či máte jinak pocit, že by se Vás některý z těchto příznaků mohl týkat se zvýšenou pravděpodobností, doporučujeme se výzkumu raději neúčastnit. Pokud v průběhu či bezprostředně po skončení experimentu budete mít nějaké zdravotní problémy, okamžitě o tom informujte osobu, která dohlíží na experiment. Svým podpisem stvrdíte, že jste byl/a s těmito riziky seznámen/a, že tomuto poučení rozumíte, že tato rizika berete na vědomí a souhlasíte s účastí na experimentu.

datum, podpis

Souhlas se zpracováním osobních údajů

Svým podpisem stvrdíte svůj souhlas s tím, že budou Vaše osobní údaje na pracovišti MTI FM TUL uschovány a anonymně zpracovávány v rozsahu nezbytném k vyhodnocení experimentu. Po dokončení experimentu budou Vaše data bezpečně smazána. Svůj souhlas můžete kdykoliv odvolat zasláním emailu na adresu leos.kukacka@tul.cz.

datum, podpis

Příloha E – tabulka údajů o figurantech (autor)

ID figuranta	Věk	Pohlaví	Oční vady/nemoci	Brýle/kon. čočky	Oční operace/úrazy	Zrak. ostrost	Kontrast. citlivost	barvocit
1	32	Muž	Dalekozrakost	Ano	Žádné	Korigovaná v normě	V normě	V normě
2	59	Muž	Dalekozrakost	Ano	Žádné	Korigovaná v normě	V normě	V normě
3	41	Žena	Krátkozrakost	Ano	Žádné	Korigovaná v normě	V normě	V normě
4	63	Muž	Dalekozrakost	Ano	Žádné	Korigovaná v normě	V normě	V normě
5	35	Muž	Krátkozrakost	Ano	Žádné	Korigovaná v normě	V normě	V normě
6	23	Žena	Dalekozrakost	Ano	Žádné	Korigovaná v normě	V normě	V normě
7	25	Žena	Žádné	Ne	Žádné	V normě	V normě	V normě
8	29	Muž	Dalekozrakost	Ano	Žádné	Korigovaná v normě	V normě	V normě