



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ
Katedra biomedicínské techniky

**Analýza osvětlení operačního pole při
endoskopických operacích**

**Illumination of the operating field during
endoscopic operations**

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Biomedicínský technik

Autor bakalářské práce: Eliška Kudrnová

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Petráček

Kladno 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kudrnová** Jméno: **Eliška** Osobní číslo: **434165**
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**
Garantující katedra: **Katedra biomedicínské techniky**
Studijní program: **Biomedicínská a klinická technika**
Studijní obor: **Biomedicínský technik**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Osvětlení operačního pole při endoskopických operacích

Název bakalářské práce anglicky:

Illumination of the operating field during endoscopic operations

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je porovnání zdrojů světla pro endoskopické operace z hlediska svítivosti a kvality osvětlení na konci optického řetězce endoskopu. Navrhněte komplexní metodiku hodnocení svítivosti a kvality osvětlení operačního pole při endoskopických operacích, která bude sloužit pro vyhodnocení kvality světelného zdroje. Proveďte a vyhodnoťte měření osvětlení na konci optického řetězce u min. tří typů zdrojů světla (halogen, xenon, LED) pro endoskopické operace. Porovnejte osvětlení vzhledem k použitému zdroji světla v optickém řetězci a navrhněte další parametry, které ovlivňují kvalitu osvětlení na konci světelného řetězce endoskopu. Porovnejte kvalitu osvětlení vzhledem k pořizovací ceně zdroje světla a provozním nákladům během životnosti přístroje.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Palenčár, R., Vdoleček, F., Halaj, M., Nejistoty v měření I. až V., číslo 4, 5, 7, 8, 10, 12, 2001-2002, FCC Public s. r. o., AUTOMA, 1210-9592
- [2] Kol., Elektrická a elektronická měřicí zařízení – Vyjadřování vlastností, ed. 1, 2003, ČSN, ČSN EN 60 359
- [3] Skokanský, K. a kol., Světelná technika, 1.1.2011, [Citováno 27.1.2019], http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-6-Svetelna.pdf

Jméno a příjmení vedoucí(ho) bakalářské práce:

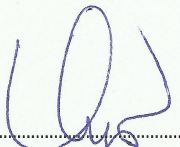
Ing. Jiří Petráček

Jméno a příjmení konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. Klára Hiřmanová (OBMI FN Motol)

Datum zadání bakalářské práce: **18.02.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**



prof. Ing. Peter Kneppo, DrSc.
podpis vedoucí(ho) katedry


prof. MUDr. Ivan Dylevský, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student(ka) bere na vědomí, že je povinnen(a) vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

24.1.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Osvětlení operačního pole při endoskopických operacích vypracovala samostatně a použila k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V Kladně

.....

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Jiřímu Petráčkovi za vedení bakalářské práce. Také děkuji Ing. Kláře Hiřmanové, která mi věnovala mnoho času a rad při získávání výsledků měření a zajišťovala přístup ke světelným zdrojům. Mé poděkování také patří FN Motol, kde jsem mohla měřit osvětlení na všech typech zdrojů světla. V neposlední řadě mé poděkování patří fakultě, která mi zapůjčila měřicí přístroj.

ABSTRAKT

Osvětlení operačního pole při endoskopických operacích

Cílem této práce je navrhnout metodu pro měření svítivosti a kvalitu osvětlení na konci optického řetězce při endoskopických operacích a provedení měření na třech typech světelných zdrojů.

Pro měření svítivosti byl zkonstruován kulový integrátor, do kterého je vyveden fotoreceptor luxmetru. Tímto zařízením je možné měřit celkový světelný tok, který do kulového integrátoru vstupuje. Pro měření barevného spektra byl zkonstruován spektrometr.

Obě metody měření byly aplikovány na tři druhy světelných zdrojů (xenonové, halogenové a LED) .

Získané výsledky dosahují dostatečné přesnosti, aby bylo možné jednotlivé zdroje mezi sebou porovnat.

Klíčová slova

endoskopické světelné zdroje, měření světla, kulový integrátor, spektrometr, osvětlení operačního pole při endoskopii

ABSTRACT

Illuminance of the operating field during endoscopic operations

The aim of this project is to design a method for measurement of luminance and quality of illumination at the end of the optical chain during endoscopic operations and execute pilot measurements on two types of light sources.

To measure the luminance, a spherical integrator with photodetector was built. With this device, it is possible to measure the total luminous flux entering the spherical integrator. Spectrometer was designed to measure the color spectrum.

Both methods of measurement were applied to three types of light sources. (xenon, halogen, LED)

The results obtained were accurate enough to compare the light sources with each other.

Keywords

light sources for endoscopy, light measurement, integrating sphere, spectrometer, illuminance of operating field during endoscopic surgery

Obsah

Seznam symbolů a zkratk.....	9
Seznam obrázků.....	10
Seznam tabulek.....	11
1 Úvod.....	13
1.1 Přehled současného stavu.....	13
1.2 Cíle práce.....	14
2 Problematika osvětlení operačního pole.....	15
2.1 Světlo.....	15
2.2 Fotometrické veličiny.....	15
2.2.1 Světelný tok.....	15
2.2.2 Svítivost.....	16
2.2.3 Intenzita osvětlení.....	16
2.2.4 Barva.....	16
2.2.5 Teplota chromatičnosti.....	17
2.3 Endoskopie.....	17
2.3.1 Zdroj záření.....	17
2.3.2 Světlovodný kabel.....	17
2.3.3 Optika.....	18
3 Experimentální zařízení a metody.....	20
3.1 Měření světelného toku na konci optického řetězce.....	20
3.1.1 Konstrukce kulového integrátoru.....	21
3.1.2 Luxmetr.....	23
3.2 Měření složení spektra na konci optického řetězce.....	23
3.2.1 Konstrukce spektrometru.....	24
3.3 Uspořádání měření.....	26
4 Výsledky.....	27
4.1 Návrh experimentálního měření.....	27
4.1.1 Kalibrace kulových integrátorů.....	27
4.2 Měřené optické řetězce.....	28
4.3 Naměřené a vypočtené hodnoty osvětlení a světelného toku.....	29

4.3.1	Hodnoty intenzity osvětlení a světelného toku xenonových zdrojů... 29
4.3.2	Hodnoty intenzity osvětlení a světelného toku halogenových zdrojů 31
4.3.3	Hodnoty intenzity osvětlení a světelného toku zdroje LED..... 32
4.4	Naměřená spektra světelných zdrojů..... 33
4.4.1	Spektra xenonových světelných zdrojů 33
4.4.2	Spektra halogenových světelných zdrojů 35
4.4.3	Naměřené spektrum LED světelného zdroje 36
5	Diskuse 37
5.1	Návrh metodiky měření..... 37
5.1.1	Měření celkového světelného toku 37
5.1.2	Měření složení spektra..... 38
5.2	Porovnání provozních nákladů a efektivity světelného zdroje..... 38
6	Závěr 40
	Seznam použité literatury 41
	Příloha A: Kompletní výsledky kalibrace všech kulových integrátorů 44
	Příloha B: Všechny naměřené hodnoty 45
	Příloha C: Obsah přiloženého CD..... 50

Seznam symbolů a zkratek

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
λ	m	Vlnová délka
ϕ	lm	Světelný tok
Ω	sr	Prostorový úhel
I	cd	Svítivost
E	lx	Intenzita osvětlení
A	m ²	Plocha
T_c	K	Teplota chromatičnosti
α	-	Součinitel pohltivosti
ρ	-	Součinitel odrazivosti

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
SI	Spherical Integrator – Kulový integrátor
Opt0	rigidní artroskop Olympus A3990
Opt30	rigidní artroskop Aesculap PE514A
W5132	Richard Wolf 5132
AA180	Aesculap AXeL 180
W5124	Richard Wolf 5124
OCLV	Olympus CLV-S45
KX175	Karl Storz Xenon Nova 175
W4215	Richard Wolf 4215
OCLK	Olympus CLK-4
KP175	Karl Storz Power LED 175

Seznam obrázků

Obrázek 1: Poměrná spektrální citlivost oka 1 - $V(\lambda)$ při denním vidění, 2 - $V'(\lambda)$ při nočním vidění. [4].....	15
Obrázek 2: Rozložení barev ve spektrální oblasti viditelného záření. [3].....	16
Obrázek 3: Teplota chromatičnosti. [3].....	17
Obrázek 4 : Skleněné vlákno, skleněná vlákna ve svazku. [10].....	18
Obrázek 5: Rigidní endoskop; 1. kovový tubus, 2. vstup světlovodného kabelu, 3. okulár. [9].....	18
Obrázek 6: Schéma zapojení optického řetězce. [10].....	19
Obrázek 7: Upořádání kulového integrátoru pro měření divergentních zdrojů světla. [15].....	21
Obrázek 8: Odrazivost barvy s obsahem BaSO ₄ , odrazivost Spectralonu® je nastavena jako 100 %. [17].....	22
Obrázek 9: Konstrukční náčrt vlastního kulového integrátoru. (vlastní tvorba).....	23
Obrázek 10: Konstrukční náčrt vlastního spektrometru. (vlastní tvorba).....	24
Obrázek 11: Princip funkce spektrometru. [22].....	24
Obrázek 12: Vzhled aplikace Theremino Spektrometr. [21].....	25
Obrázek 13: Pro měření byly používány následující komponenty: 1. kulový integrátor, 2. spektrometr, 3. luxmetr Malovux 5032 C, 4. aplikace pro spektrometr, 5. zdroj světla, 6. optický kabel, 7. optika. (vlastní tvorba).....	26
Obrázek 14: Naměřené spektrum xenonového světelného zdroje Richard Wolf 5132..	33
Obrázek 15: Naměřené spektrum xenonového světelného zdroje Aeskulap AXeL 180.	33
Obrázek 16: Naměřené spektrum xenonového světelného zdroje Richard Wolf 5124..	34
Obrázek 17: Naměřené spektrum xenonového světelného zdroje Olympus CLV-S45..	34
Obrázek 18: Naměřené spektrum xenon. světelného zdroje Karl Storz Xenon Nova 175.	35
Obrázek 19: Naměřené spektrum halogenového světelného zdroje Richard Wolf 4215.	35
Obrázek 20: Naměřené spektrum halogenového světelného zdroje Olympus CLK-4...	36
Obrázek 21: Naměřené spektrum světelného zdroje LED Karl Storz Power LED 175.	36

Seznam tabulek

Tabulka 1: Parametry optik artroskopů.	28
Tabulka 2: Parametry světlovodných kabelů.	28
Tabulka 3: Parametry zdrojů světla.	28
Tabulka 4: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení xenonového zdroje Richard Wolf 5132.	29
Tabulka 5: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení xenonového zdroje Richard Wolf 5132.	30
Tabulka 6: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení xenonového zdroje Aesculap AXeL 180.	30
Tabulka 7: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení xenonového zdroje Richard Wolf 5124.	30
Tabulka 8: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení xenonového zdroje Richard Wolf 5124.	30
Tabulka 9: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení xenonového zdroje Olympus CLV S45.	30
Tabulka 10: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení xenon. zdroje Karl Storz Xenon Nova 175.	31
Tabulka 11: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení halogenového zdroje Richard Wolf 4215.	31
Tabulka 12: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení halogenového zdroje Richard Wolf 4215.	31
Tabulka 13: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení halogenového zdroje Olympus CKL-4.	32
Tabulka 14: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení zdroje LED Karl Storz Power LED 175.	32
Tabulka 15: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení xenonového zdroje Aeskulab Axel 180.	45
Tabulka 16: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení xenon. zdroje Karl Storz Xenon Nova 175.	45

Tabulka 17: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení xenon. zdroje Karl Storz Xenon Nova 175.	46
Tabulka 18: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení LED zdroje Karl Storz Power LED 175.	46
Tabulka 19: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení halogenového zdroje Olympus CLK-4.	47
Tabulka 20: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení xenon. zdroje Olympus CLV S45.	47
Tabulka 21: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení halogenového zdroje Richard Wolf 4215.	48
Tabulka 22: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení halogenového zdroje Richard Wolf 4215.	48
Tabulka 23: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení xenon. zdroje Richard Wolf 5132.	49
Tabulka 24: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení xenon. zdroje Richard Wolf 5132.	49

1 Úvod

Endoskopie, jako zobrazovací metoda v medicíně, slouží k zobrazování tělních dutin, a to přirozenými i uměle vytvořenými přístupovými cestami. Přívod světla je tak nezbytnou součástí každého endoskopu. Zároveň lze tvrdit, že množství a kvalita přivedeného světla má zásadní vliv na kvalitu pořízeného obrazu, a tedy i na kvalitu léčby či diagnózy.

1.1 Přehled současného stavu

Světelné zdroje pro endoskopii jsou jednou z hlavních součástí endoskopické věže a určují do značné míry kvalitu zobrazení operačního pole. Jsou konstruovány jako přenosné kompaktní jednotky, které jsou umístěny do stojanu endoskopické věže. Obsahují samotnou lampu, která je nejčastěji tvořena xenonovou výbojkou, halogenovou žárovkou nebo LED diodou, clonou, přívodem napětí a kontrolním panelem. Z externího světelného zdroje je světlo vedeno optickými vlákny až na distální konec endoskopu. [1] [2]

Pro endoskopii se používají studená světla (hodnoty se pohybují okolo 6000 K). Světelné zdroje musejí splňovat vysoké požadavky ohledně světelného toku poskytujícího intenzitu osvětlení až 50 000 lx na konci optického řetězce a barvy světla, která by měla co nejvíce odpovídat přirozenému světlu. Kvalita výsledného obrazu výrazně závisí na spektrální kompozici světla a množství světla přeneseného ze světelného zdroje na konec optického řetězce. [1] [2]

V dokumentaci k jednotlivým zdrojům světla jsou pak udávány parametry lampy. Výsledné parametry osvětlení na konci optického řetězce jsou pak hodnoceny subjektivně lékaři podle výsledného obrazu. Jejich hlavním požadavkem je, aby tkáň byla dokonale osvětlena a obraz barevně odpovídal zobrazení pod přirozeným světlem. Právě barevné změny jsou pak důležitým diagnostickým vodítkem. Podle lékařů nejlepších výsledků dosahují světelné zdroje s xenonovou lampou, nejhorší pověst pak mají zdroje s LED diodou. Světelné zdroje s LED diodami se tak doposud používali minimálně, většinou při artroskopických zákrocích. LED diody jsou přitom nejnovější technologií a nejlevnější možnou alternativou. Proto se pomalu začínají využívat i v jiných chirurgických oborech. Objektivní zhodnocení kvality osvětlení na konci optického řetězce by tedy mohlo být důležitým parametrem pro výběr nových světelných zdrojů.

1.2 Cíle práce

Cílem bakalářské práce je navrhnout objektivní metodu pro měření svítivosti a kvality osvětlení operačního pole při endoskopických operacích tak, aby bylo možné porovnat různé typy zdrojů světla dle výstupu na konci optického řetězce. Výsledkem práce by tak měla být komplexní metodika pro objektivní měření osvětlení operačního pole při endoskopických operacích.

Dalším cílem práce je pak danou metodu zrealizovat a ověřit u tří typů zdrojů světla (tedy xenonových, halogenových a zdrojů s LED diodou). Naměřené hodnoty osvětlení z těchto měření následně porovnat, a to jak z hlediska použitého zdroje světla, tak i z hlediska dalších parametrů optického řetězce.

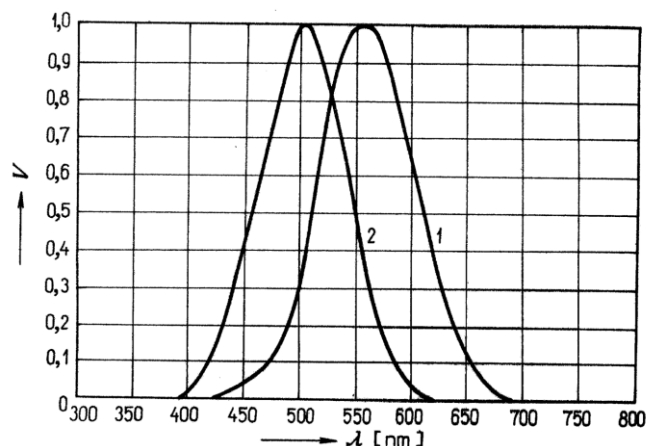
Posledním cílem práce je pak porovnat naměřené hodnoty osvětlení vzhledem k pořizovací ceně zdroje světla a jejich provozním nákladům.

2 Problematika osvětlení operačního pole

2.1 Světlo

Světlo je elektromagnetické vlnění, které jsme schopni vnímat okem. V elektromagnetickém spektru patří světlo do optického záření, které zahrnuje viditelné, ultrafialové a infračervené záření. Vlnová délka viditelného světla náleží rozmezí vlnové délky $\lambda = 380\text{--}780\text{ nm}$, ultrafialové záření pak náleží intervalu $\lambda = 100\text{--}380\text{ nm}$ a infračervené dosahuje vlnové délky $\lambda = 780\text{--}10^4\text{ nm}$. Spektrální rozsah vidění se přitom mění s pozorovatelem. [3] [4]

Světlo je vnímáno pozorovatelem, respektive mozkiem pozorovatele, jako dva nezávislé signály jasu a barvy. Proto u světelného zdroje posuzujeme nejen energetické hodnoty ale i účinky na receptor, tedy oko. To registruje rozsah vlnových délek viditelného záření (380-780 nm). V tomto rozsahu je oko nerovnoměrně citlivé. Spektrální citlivost oka je daná tzv. křivkou spektrální citlivosti $V(\lambda)$, jejíž závislost na vlnové délce záření je vykreslena na Obrázku 1. Hodnoty citlivosti jsou v poměrných číslech vztažených k maximum křivky. Při denním světle je maximum křivky při vlnové délce $\lambda = 555\text{ nm}$. Vzhledem k tomuto jevu je nutné při světelných měření počítat s fotometrickými veličinami, které tento jev zohledňují. [4]



Obrázek 1: Poměrná spektrální citlivost oka 1 - $V(\lambda)$ při denním vidění, 2 - $V'(\lambda)$ při nočním vidění. [4]

2.2 Fotometrické veličiny

2.2.1 Světelný tok

Světelný tok udává množství zářivé energie, kterou vyzáří světelný zdroj do svého okolí, a které lze zpracovat lidským okem. Pro výpočet světelného toku je tedy nutné uvažovat poměrnou spektrální citlivost oka $V(\lambda)$. Značka světelného toku je ϕ a udává se v lumenech [lm]. [3] [4]

2.2.2 Svítivost

Svítivost I je další fotometrickou veličinou, která popisuje šíření světelného záření do prostoru. Její jednotkou je kandela [cd], která je základní jednotkou SI soustavy. Tato veličina udává, jaký světelný tok se šíří od zdroje světelného záření v prostorovém úhlu do určitého směru. Prostorový úhel Ω je veličina, která vyjadřuje prostorovou rozbíhavost kužele (svazku paprsků vycházejících z bodového zdroje světla). Jednotkou prostorového úhlu je steradián [sr]. Svítivost je pak určena jako poměr světelného toku ϕ a jednotkového prostorového úhlu Ω , v němž je vyzařován,

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} \quad (2.1)$$

kde I je svítivost [cd], ϕ je světelný tok [lm] a Ω je prostorový úhel [sr]. [3] [4]

2.2.3 Intenzita osvětlení

Intenzita osvětlení E je odvozenou fotometrickou veličinou, která udává hodnotu světelného toku, který dopadá na jednotkovou plochu A (m^2). Tato fotometrická veličina se měří v luxech [lx] a udává podíl světelného toku a plochy na kterou dopadá [3] [4]

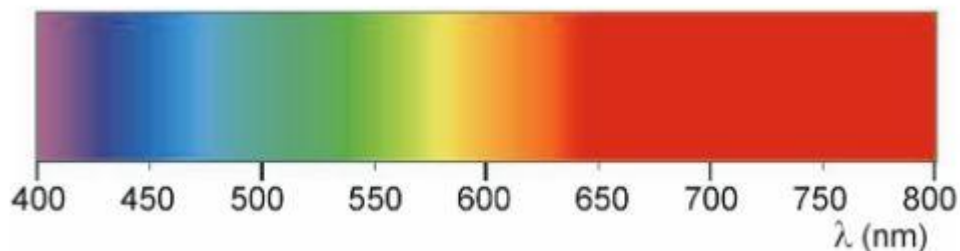
$$E = \frac{d\phi}{dA}, \quad (2.2)$$

kde E je intenzita osvětlení [lx], ϕ je světelný tok [lm] a A je plocha [m^2].

2.2.4 Barva

Barevné vlastnosti zdrojů světla (chromatičnost) jsou určeny spektrálním složením vyzařujícího světelného zdroje. Barevné vlastnosti materiálů (kolorita) jsou určeny spektrálním složením zdroje, který daný materiál osvětluje, a spektrální propustností a odrazivostí materiálu. Lidské oko nedokáže rozlišovat spektrální složení světla, jelikož ho vnímá aditivně, tedy spojuje více barevných podnětů do jednoho vjemu.

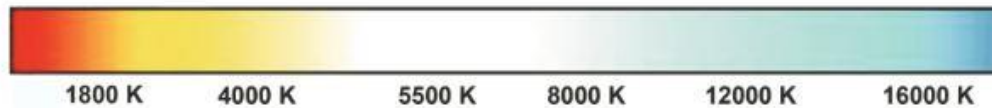
Každému barevnému tónu náleží přesně určená vlnová délka. Z Obrázku 2 vyplývá, že od nejnižší hodnoty vlnové délky viditelného světla jsou to: fialová, modrá, zelená, žlutá, oranžová a červená. Přechody jednotlivých barev nejsou ostré, barvy postupně přechází z odstínu do odstínu. [3]



Obrázek 2: Rozložení barev ve spektrální oblasti viditelného záření. [3]

2.2.5 Teplota chromatičnosti

Teplota chromatičnosti T_c , nebo barevná teplota udává, jestli se barvy označují za teplé či studené. Teplota chromatičnosti je dána teplotou černého tělesa, kterou má při vyzařování dané barvy světla. Na Obrázku 3 je patrné, že čím vyšší teplotu chromatičnosti světlo má, tím nabývá studenějšího odstínu. [3]



Obrázek 3: Teplota chromatičnosti. [3]

Pro endoskopii je charakteristická hodnota chromatičnosti okolo 6000 K, což odpovídá „studené“, „bílě“ barvě světla.

2.3 Endoskopie

Endoskopie je minimálně invazivní vyšetřovací metoda, která umožňuje zobrazení tělních dutin, popřípadě hlouběji uložených orgánů. Pro vstup do těla se využívají přirozené tělní otvory, popřípadě otvory vytvořené chirurgicky. K vyšetření je třeba přivádět světlo k zobrazované tkáni abychom byli schopni získat obraz. Osvětlení může být přímé, kdy je zdroj světla umístěn přímo v endoskopickém zrcátku, nebo nepřímé, kdy stojí samostatně, a je součástí endoskopické věže. Rozdělujeme několik druhů endoskopů, a to endoskopická zrcátka, rigidní endoskopy, flexibilní endoskopy a video endoskopy. Pro naše měření byl zvolen rigidní artroskop a nepřímým zdrojem světla. Světlo tak prochází následujícím optickým řetězcem: zdroj záření, světlovodný kabel a optika. [1] [2]

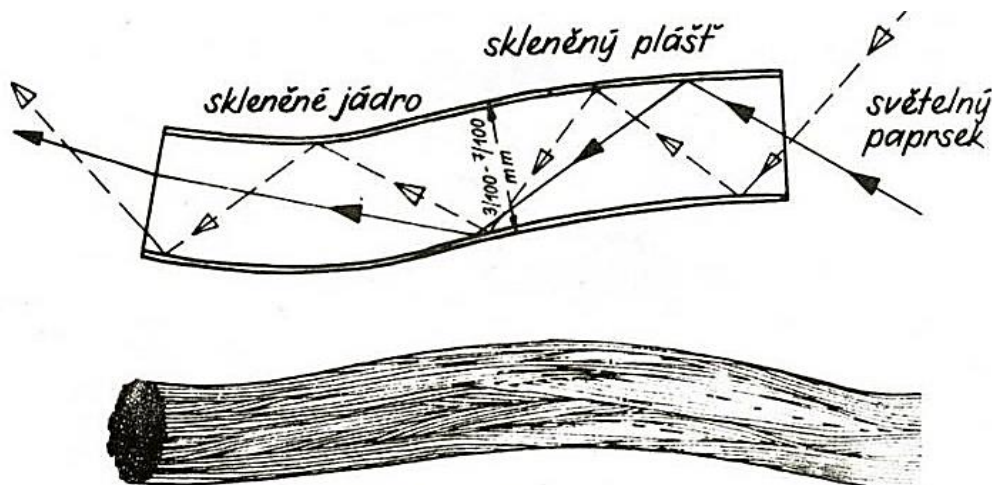
2.3.1 Zdroj záření

Při endoskopických operacích se využívá zdroj intenzivního studeného světla, jehož výkon se pohybuje ve stovkách Wattů, teplota chromatičnosti se pohybuje okolo 6000 K a dosahuje intenzity osvětlení 20 000 lx až 50 000 lx na výstupu světlovodného kabelu. Typicky jde o externí kompaktní jednotku umístěnou ve stojanu endoskopické věže. Tato jednotka je tvořena samotnou lampou (xenonová výbojka, halogenová žárovka nebo LED dioda), parabolickým zrcadlem, popřípadě čočkou, která fokusuje záření do světlovodného kabelu, clonou, přívodem napětí a kontrolním panelem. [1] [2] [5]

2.3.2 Světlovodný kabel

Světlovodný kabel navazuje v optickém řetězci na zdroj světla. Je sestaven ze svazku optických vláken, která jsou odstíněna od okolí reflexivní neprůsvitnou vrstvou. Světlovodný kabel v tomto zapojení nepřenáší prostorový obraz, proto jednotlivá vlákna ve svazku nemusejí být koherentně uspořádaná a jsou uložena náhodně. Vedení světla

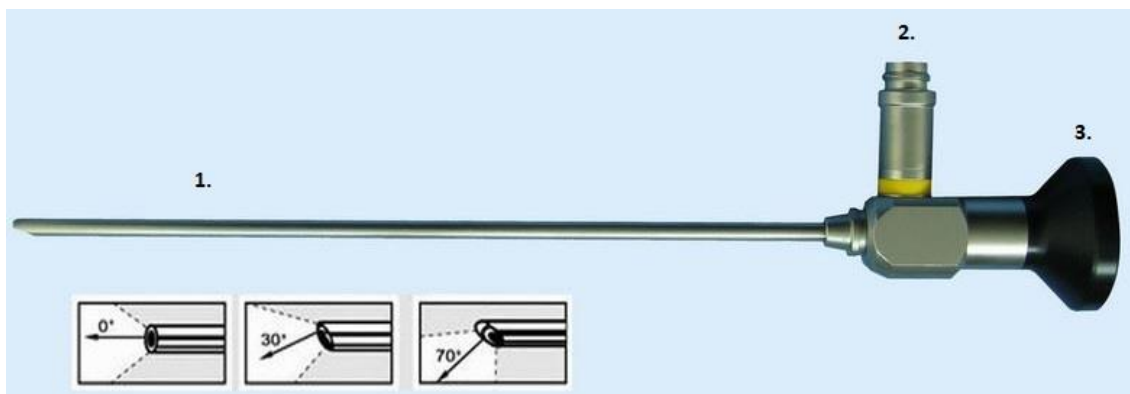
optickým vláknem je založeno na úplném odrazu světla, kde index lomu střední části vlákna je vyšší než index lomu obvodové vrstvy a světlo se tak od obvodové vrstvy zcela odráží a sleduje tak směr vlákna. Průchod paprsku světlovodným kabelem probíhá mnohočetnými odrazy od obvodové vrstvy způsobem naznačeným na Obrázku 4. Z optického kabelu pak světlo prochází do optiky endoskopu. Optické kabely jsou velmi náchylné k mechanickému použití, kdy při ohýbání, lámání a přílišnému stočení dochází k přelámání vláken a tím ke snížení efektivity přenosu světla. [2] [6] [7]



Obrázek 4 : Skleněné vlákno, skleněná vlákna ve svazku. [10]

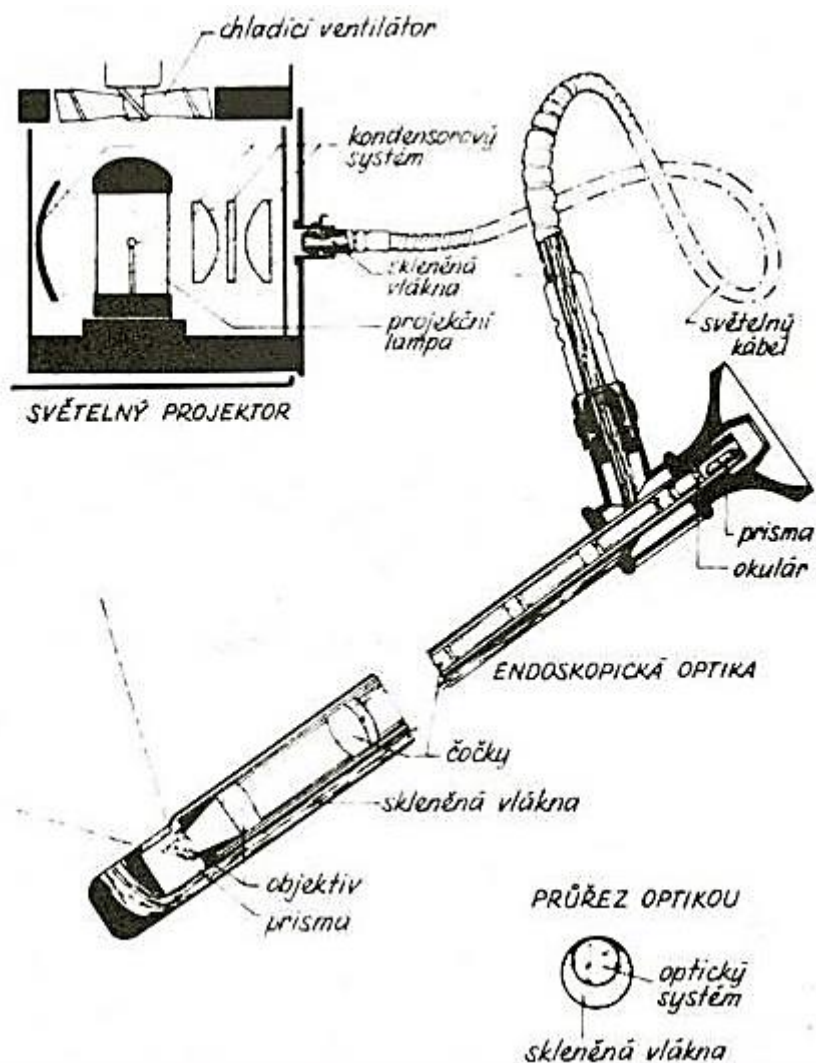
2.3.3 Optika

Rigidní endoskop je kovový tubus, který obsahuje systém čoček a světlovodných tyčinek, které přivádějí světlo přímo k zobrazované tkáni. Světlo je přiváděno z optického kabelu do optiky endoskopu a odtud je vedeno na distální konec endoskopu. Průměr tubusu endoskopu a tím i velikost čoček a světlovodných tyčinek značně ovlivňují množství propuštěného světla. Distální konec endoskopu, který je zaváděn do těla pacienta, může být zkosen (typicky 0° , 30° nebo 70°) a poskytovat tak možnost pohledu pod úhlem. Na opačné straně tubusu je pak okulár, kde vzniká výsledný obraz a kterým je možné zobrazovanou tkáň pozorovat. Obecná podoba rigidního artroskopu je znázorněna na Obrázku 5. [8]



Obrázek 5: Rigidní endoskop; 1. kovový tubus, 2. vstup světlovodného kabelu, 3. okulár. [9]

Optický řetězec, jehož zapojení je demonstrováno na Obrázku 6, je tedy sestaven z lampy daného zdroje, fokusační čočky, parabolického zrcadla, světlovodného kabelu a optiky rigidního endoskopu.



Obrázek 6: Schéma zapojení optického řetězce. [10]

3 Experimentální zařízení a metody

3.1 Měření světelného toku na konci optického řetězce

Svítivost se jako fotometrická veličina neměří přímo, ale převádí se na měření osvětlenosti. Ta se měří pomocí fotometrického čidla, jež má stejnou spektrální citlivost jako oko. Je hodnocena vždy v určitém směru. Výsledkem je pak křivka svítivosti v polárním diagramu, měří se v dané rovině a v ose 5° nebo 10° . Toto měření je velmi náročné na přesnost polohy fotoelektrického čidla, popřípadě světelného zdroje. K měření je proto většinou používán goniofotometr. [4] [11]

Celkový světelný tok vycházející na konci světelného řetězce je možné stanovit graficko-početními metodami z naměřených křivek svítivosti, nebo se měří v integrátoru. Ten může mít tvar krychle, kvádrů nebo koule, která je nejvhodnějším tvarem. Takový integrátor se pak nazývá kulovým integrátorem neboli Ulbrichtovou koulí. Jde o dutou kouli, která je zevnitř pokryta velmi odrazivou (tj. s malým součinitelem pohltivosti α) difúzní bílou vrstvou. Vrstva musí být barevně neselektivní. Nejlépe vyhovují nátěry zinkové, titanové nebo barytové bílé barvy. Světlo, které je přivedeno dovnitř kulového integrátoru se tak mnohonásobnými odrazy rozptýlí po celém vnitřním prostoru koule a vytvoří tak uniformní osvětlení. Na kouli je okénko, ke kterému lze přiložit fotometr, který je vhodně zacloněn tak, aby na něj nedopadalo přímé světlo. [4] [11] [12] [13] [14]

K měření pomocí kulového integrátoru se používá normálu o známém světelném toku. Při změření intenzity osvětlení E_N , při použití normálu ϕ_N , zjistíme součinitel integrátoru C_i . [4] [11]

$$C_i = \frac{\phi_N}{E_N} \quad (3.1)$$

Kde C_i je součinitel integrátoru [lm lx^{-1}], ϕ_N je známý světelný tok [lm] a E_N je změřená intenzita osvětlení [lx]. Součinitel integrátoru závisí na ploše integrátoru A a součiniteli odrazivosti $\rho = 1 - \alpha$. [4] [11]

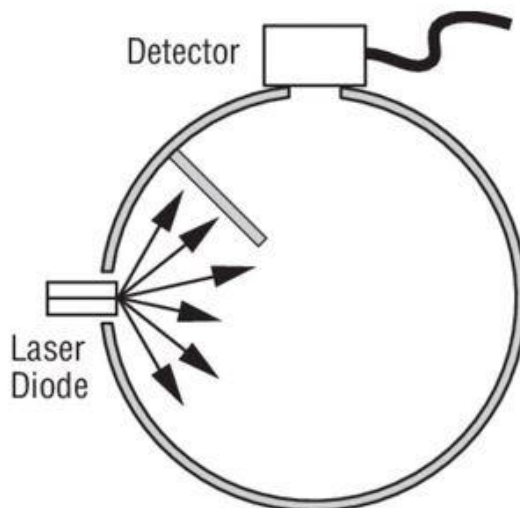
$$C_i = A_i \frac{1 - \rho}{\rho} \quad (3.2)$$

Měřený světelný tok neznámého zdroje ϕ_x potom vyjádříme jako: [4] [11]

$$\phi_x = E_x C_i \quad (3.3)$$

Fotočlánkem tedy měříme intenzitu osvětlenosti E , která je přímo úměrná světelnému toku ϕ . Citlivost kulového integrátoru, určený součinitelem integrátoru, určuje jeho průměr (respektive velikost vnitřní plochy A) a součinitel odrazivosti ρ .

Požizovací ceny průmyslově vyráběných kulových integrátorů jsou velmi vysoké, proto jsem se rozhodla pro vlastní konstrukci. Ačkoli nedosahuje přesnosti průmyslově vyráběných kulových integrátorů při měření absolutních hodnot světelného toku, pro účely porovnávání jednotlivých světelných zdrojů jde o zařízení dostatečné. Vnitřní uspořádání kulového integrátoru je uvedeno na Obrázku 7.



Obrázek 7: Uspořádání kulového integrátoru pro měření divergentních zdrojů světla. [15]

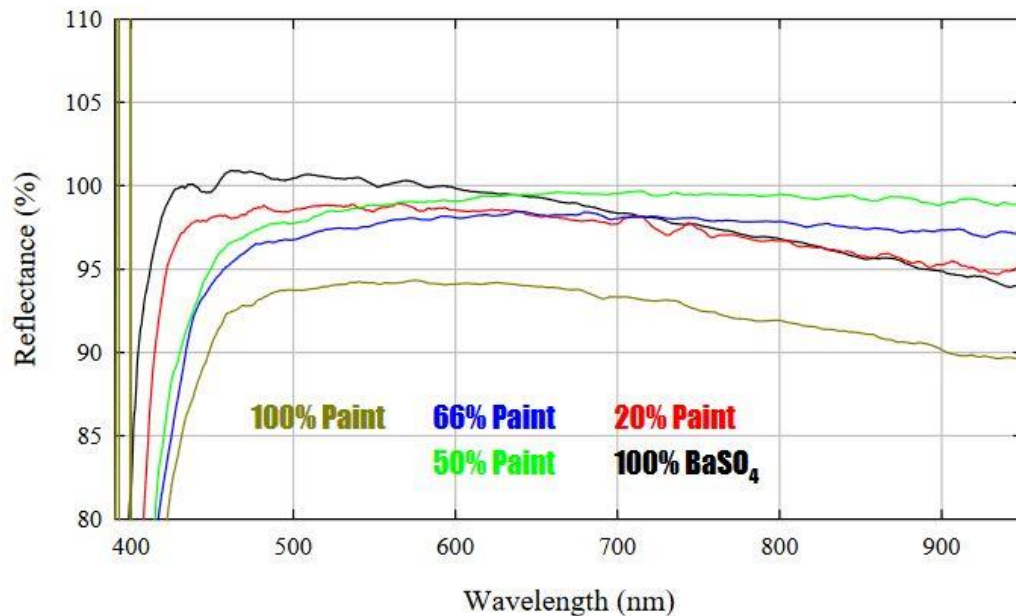
Toto uspořádání je vhodné pro všechny divergentní zdroje světla. Kulový integrátor je vybaven dvěma vstupními odpory. Vstup pro zdroj světla (v našem případě pro distální konec endoskopu) je umístěn v 0° , vstup pro detektor záření je pak umístěn v 90° , mezi těmito vstupy je umístěno stínítko, které je dostatečně velké, aby zabránilo přímému ozáření detektoru. [15]

3.1.1 Konstrukce kulového integrátoru

Celkem byli zkonstruovány tři kulové integrátory o různých průměrech (200 mm, 250 mm a 300 mm). Vlastní konstrukce kulového integrátoru byla zrealizována pomocí dvou polystyrenových polokoulí. Tloušťka stěny je pro všechny poloměry shodná, tedy 20 mm, vnitřní průměry pak jsou 160 mm, 210 mm a 260 mm.

Do těchto polokoulí byly vytvořeny dva otvory o průměru 20 mm v 90° tak, aby byly dostatečně velké pro fotoreceptor detektoru. Poučka pro velikost konstruovaného kulového integrátoru zní, že vnitřní průměr kulového integrátoru musí být nejméně trojnásobek průměrů vstupů. Tomu všechny zvolené rozměry odpovídají. [16]

Průmyslově vyráběné kulové integrátory mají vnitřní difuzní odrazivý nátěr realizován Spectralonem® (polytetrafluoroethylen; Labsphere, Inc., North Sutton, NH), tedy látkou s 99% odrazivostí, která slouží jako bílý standard. Tato látka lze nahradit bílou barvou s vysokým obsahem BaSO₄, která má podobnou odrazivost. Srovnání průběhu odrazivosti látek s různým obsahem BaSO₄ pro různé vlnové délky je uvedeno na Obrázku 8. Odrazivost Spectralonu je stanovena jako 100%. [17]



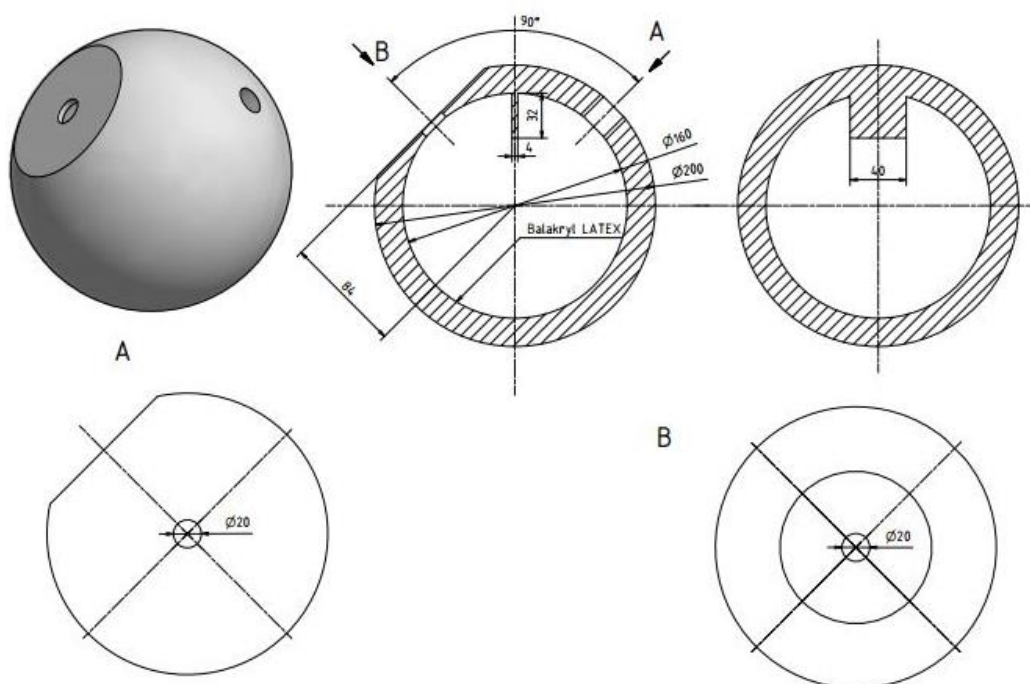
Obrázek 8: Odrazivost barvy s obsahem BaSO₄, odrazivost Spectralonu® je nastavena jako 100%. [17]

Pro svou realizaci jsem zvolila barvu Balakryl LATEX, která obsahuje 94 % BaSO₄ a je běžně dostupná. Z průběhu křivek odrazivosti (Obrázek 8) je patrné, že bílá barva s obsahem BaSO₄ mezi 80 % a 100 % (černá a červená křivka) má nejlepší schopnost odrazivosti v rámci rozsahu vlnových délek viditelného spektra (tj. 380 – 780 nm). Balakryl LATEX je barva ředitelná vodou, nehrozí tedy chemické narušení polystyrenu. Stínítko bylo realizováno tvrdým plastem opatřeným stejným nátěrem.

Pro vstup fotoreceptoru byla stěna seříznuta tak, aby bylo možné na zkonstruovaný kulový integrátor nasadit měřící sondu luxmetru. Vstup pro fotoreceptor byl vyříznut tak, aby byl těsný a nedocházelo tak ke světelným únikům a měřící sonda byla zajištěna proti vypadnutí a posunu.

Pro kalibraci kulových integrátorů byla použita svítidla NITECORE MH10, která má čtyři polohy s definovaným světelným tokem. [18]

Konstrukční náčrt kulového integrátoru o průměru 160 mm, který byl použit pro všechna měření je uveden na Obrázku 9.



Obrázek 9: Konstrukční náčrt vlastního kulového integrátoru. (vlastní tvorba)

3.1.2 Luxmetr

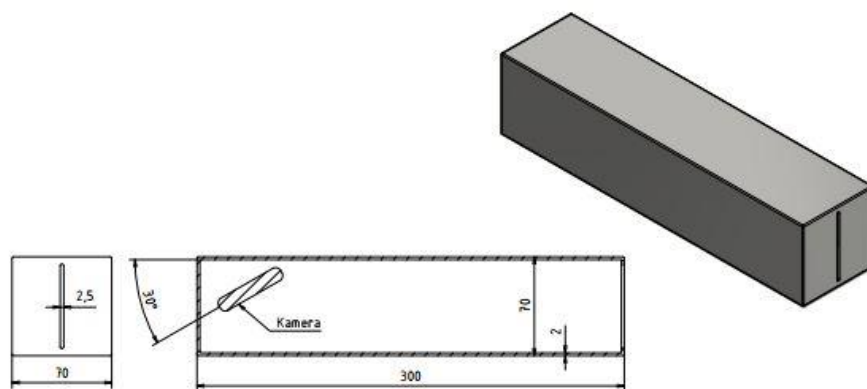
Fotoreceptorem používaným pro měření, příkládaným k otvoru kulového integrátoru, byl luxmetr. Luxmetr je měřič intenzity osvětlení, skládá se z fotometrické hlavy, kabelu a samotného těla přístroje s displejem. Fotometrická hlava obsahuje fotocitlivý snímač korigovaný podle křivky poměrné světelné účinnosti $V(\lambda)$ a podle kosinova zákona pro šikmo dopadající světlo. Používala jsem přístroj MAVOLUX 5032C, který obsahuje obě korekce. Měřicí rozsah daného přístroje je 0,1 – 199 000 lx s přesností $\pm 3 \%$ naměřené osvětlenosti + 1 digit. Výstupní veličinou při měření luxmetrem je intenzita osvětlení E , ta je přímo úměrná hodnotě světelného toku ϕ . [4] [19]

3.2 Měření složení spektra na konci optického řetězce

Pro měření spektrálního složení vysílaného záření je využívá spektrometrů. Spektrometr je zařízení, které rozkládá světlo na jednotlivé vlnové délky a zaznamenává jejich zastoupení v měřeném záření. [20]

3.2.1 Konstrukce spektrometru

Spektrometr byl zkonstruován dle návodu od Theremino System tak, aby bylo možné využít pro měření volně dostupnou aplikaci Theremino_Spektrometr pro měření vlnových délek zastoupených ve světelném záření. Byl zkonstruován neprůsvitný kvádr (300x70x70 mm) a na jedné z čtvercových podstav byl vytvořen úzký otvor pro vstup měřeného světla. Štěrbina pro vstup světla byla překryta difuzní clonou. K protilehlé čtvercové podstavě byla v úhlu 30° umístěna Webkamera Trust SpotLight Webcam Pro, které byl vyňat infračervený filtr, aby bylo možné detekovat i vlnové délky infračerveného záření. Před kameru byla umístěna difrakční mřížka, získaná z nepopsaného DVD, která rozkládá světlo na jednotlivé vlnové délky. Konstrukční náčrt zkonstruovaného spektrometru je zobrazen na Obrázku 10.



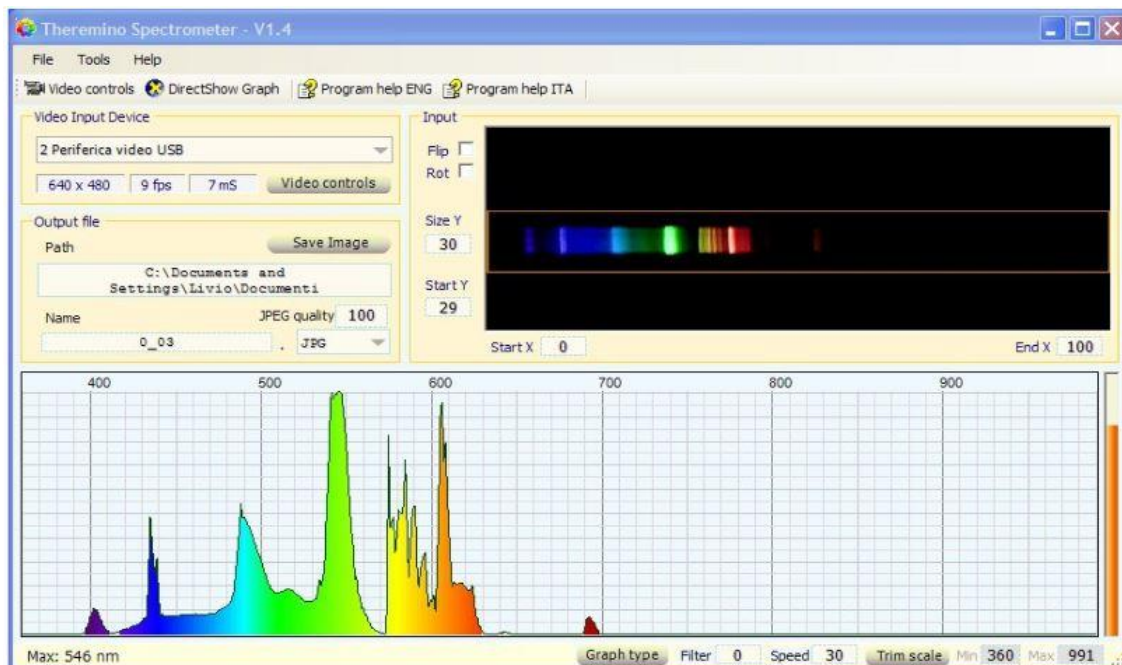
Obrázek 10: Konstrukční náčrt vlastního spektrometru. (vlastní tvorba)

Rozložené světlo je pak zaznamenáno kamerou, která je připojena přes USB do počítače. Princip funkce spektrometru je zobrazen na Obrázku 11.



Obrázek 11: Princip funkce spektrometru. [22]

Obsažené vlnové délky jsou pak zobrazeny v aplikaci Theremino Spectrometer. Pohled do aplikace je zobrazen na Obrázku 12. Aplikace obsahuje následující okna: Okno Video Input Device pro výběr a parametry vstupu (výběr webkamery), okno Output file pro výběr složky pro ukládání obrazu spektra, okno Input, kde je zobrazen pohled kamery, a okno se samotným spektrem.

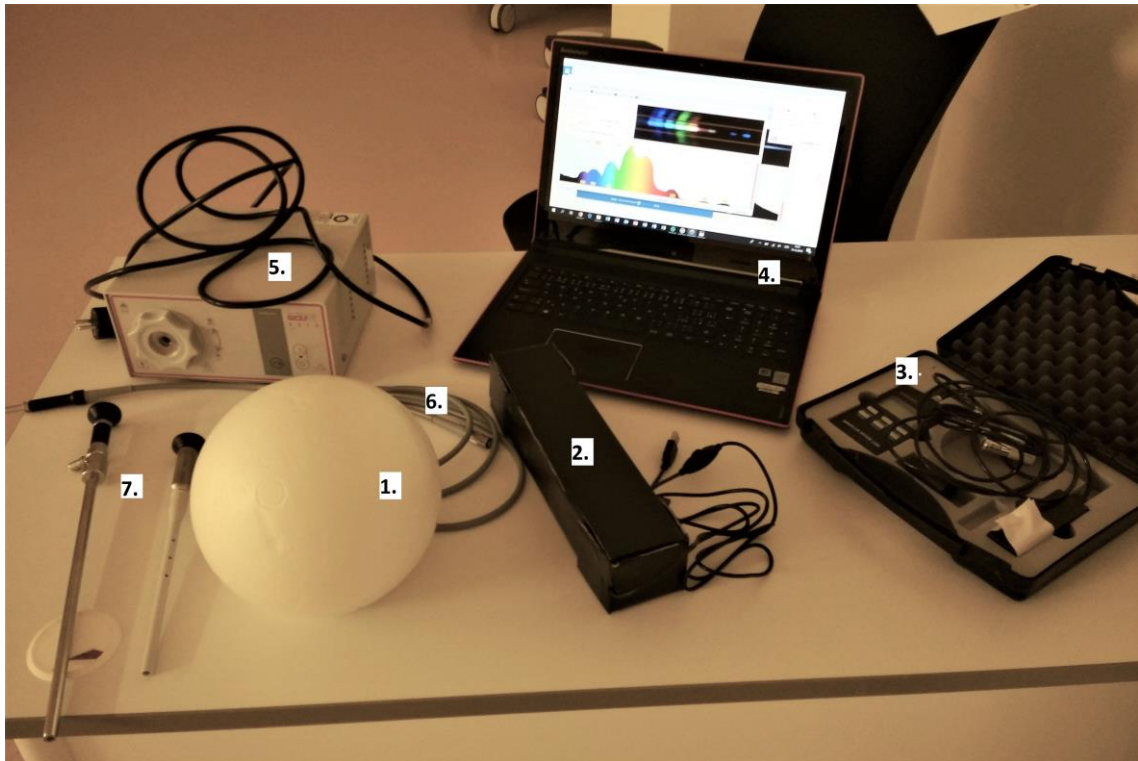


Obrázek 12: Vzhled aplikace Theremino Spektrometr. [21]

Pro zobrazované spektrum bylo nastaveno měřítko pomocí funkce Trim scale (viz Obrázek 12; vpravo dole) a pomocí úsporné zářivky tak, aby zobrazované spektrum odpovídalo barevně snímanému spektru. Spektrum úsporné zářivky má výrazné peaky ve vlnových délkách 436 nm a 546 nm, jde tedy o dvoubodovou kalibraci, díky které je možné nastavit přesně měřítko vlnových délek (osa x v grafu spektra).

3.3 Uspořádání měření

Měření probíhalo ve FN Motol v místnostech přilehlých k operačním sálům. Všechny používané pomůcky a vlastní uspořádání měření je znázorněno na Obrázku 13.



Obrázek 13: Pro měření byly používány následující komponenty: 1. kulový integrátor, 2. spektrometr, 3. luxmetr Malovux 5032 C, 4. aplikace pro spektrometr, 5. zdroj světla, 6. optický kabel, 7. optika. (vlastní tvorba)

Postup měření jednotlivých zdrojů probíhal dle následujícího schématu. Nejprve byl světelný zdroj zapojen do sítě, aby se lampa zahřála na provozní teplotu a ustálily se její světelně-technické parametry. Zdroj byl vždy nastaven na maximální intenzitu. Po zahřátí lampy byl zapojen optický kabel a optika artroskopu. Ne všechny zdroje, kabely a optiky jsou mezi sebou kompatibilní. Problémy se vzájemnou kompatibilitou jsou řešeny přechodkami. Následně byla změřena intenzita osvětlení pomocí kulového integrátoru a luxmetru. Poté bylo změřeno spektrum světla pomocí spektrometru a pořízen záznam spektra. Všechna měření probíhala ve ztemnělé místnosti, bez rušivého osvětlení.

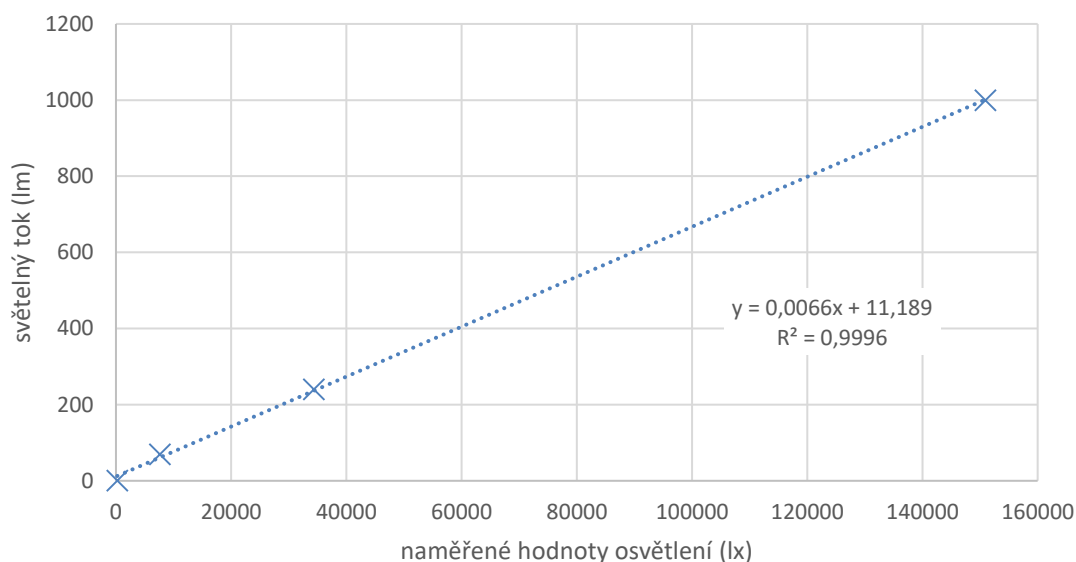
4 Výsledky

4.1 Návrh experimentálního měření

4.1.1 Kalibrace kulových integrátorů

Pro měření celkového světelného toku byly vytvořeny tři kulové integrátory o různých průměrech, které byly kalibrovány kalibrovanou svítilnou NITECORE MH10. Všechna výsledná měření byla provedena s kulovým integrátorem s nejpřesnější kalibrační křivkou, tedy kulový integrátor s průměrem 160 mm. Kalibrační křivky všech integrátorů jsou uvedeny v Příloze A.

Byla provedena kalibrace kulového integrátoru pomocí svítilny NITECORE MH10 s danými světelnými toky pro různé polohy spínače (1000 lm, 240 lm, 70 lm, 1 lm).



Graf A: Kalibrační přímka, závislost světelného (lm) na naměřeném osvětlení (lx).

Výsledná kalibrační rovnice,

$$y = 0,0066x + 11,189 \quad (4.1)$$

je použita pro přepočítání naměřených hodnot intenzity osvětlení E v luxech na odpovídající hodnoty světelného toku ϕ [lm].

Koeficient determinace R^2 dat je 0,9996.

4.2 Měření optické řetězce

Optický řetězec, na kterém probíhalo experimentální měření, byl tvořen optikou artroskopu, světlovodným kabelem a světelným zdrojem.

Všechna měření byla provedena na dvou artroskopických optikách o rozdílné délce, průměru a pozorovacím úhlu. Pro měření byly používány dva typy optiky, a to optika Aesculap PE514A s úhlem pohledu 30° (v tabulkách jen Opt30) a optika Olympus A3990 s úhlem pohledu 0° (v tabulkách jen Opt0). Parametry zvolených optik naleznete v Tabulce 1.

Tabulka 1: Parametry optik artroskopů.

optika	vnější průměr	pracovní délka	pozorovací úhel	zkratka
Olympus A3990	8 mm	280 mm	0°	Opt0
Aesculap PE514A	4 mm	140 mm	30°	Opt30

Pro experiment bylo použito pět typů optických kabelů, a to Karl Storz 495ND, Olympus WA03310A, Olympus WA03312A, Richard Wolf 8061.353 a Richard Wolf 809509. Parametry zvolených světlovodných kabelů naleznete v Tabulce 2.

Tabulka 2: Parametry světlovodných kabelů.

Označení	Světlovodný kabel	průměr	délka
1_3mm/3m	Karl Storz ND 495	3 mm	3 m
2_4,25mm/3m	Olympus WA03310A	4,25 mm	3 m
3_4,25mm/3m	Olympus WA03312A	4,25 mm	3 m
4_3,5mm/3m	Richard Wolf 8061.353	3,5 mm	2,3 m
5_5mm/2,3m	Richard Wolf 809509	5 mm	2,3 m

Celkem bylo změřeno pět xenonových světelných zdrojů, dva halogenové světelné zdroje a jeden světelný zdroj s LED. Parametry zvolených zdrojů jsou popsány v Tabulce 3.

Tabulka 3: Parametry zdrojů světla.

zdroj	typ lampy	příkon	životnost lampy	teplota chromatičnosti	značka
Richard Wolf 5132	xenon	300 W	500 h	6 000 K	W5132
Aesculap AXeL 180	xenon	180 W	500 h	6 000 K	AA180
Richard Wolf 5124	xenon	180 W	500 h	5 600 K	W5124
Olympus CLV-S45	xenon	300 W	500 h	6 000 K	OCLV
Karl Storz Xenon Nova 175	xenon	175 W	500 h	6 000 K	KX175
Richard Wolf 4215	halogen	150 W	50 h	3 500 K	W4215
Olympus CLK-4	halogen	150 W	50 h	3 250 K	OCLK
Karl Storz Power LED 175	LED	-	30 000 h	6 500 K	KP175

Kompatibilita mezi jednotlivými prvky světelného řetězce je zajišťována přechodkami, a to jak na rozhraní světelný zdroj-světlovodný kabel tak i na rozhraní světlovodný kabel-rigidní endoskop.

4.3 Naměřené a vypočtené hodnoty osvětlení a světelného toku

Výsledky uvedené níže obsahují mediány naměřených hodnot intenzity osvětlení E se směrodatnou odchylkou. Hodnoty světelného toku ϕ jsou vypočteny dle kalibrační rovnice (4.1).

Konkrétní naměřené hodnoty experimentu naleznete v Příloze B.

4.3.1 Hodnoty intenzity osvětlení a světelného toku xenonových zdrojů

Tabulka 4 a Tabulka 5 obsahují naměřené hodnoty intenzity osvětlení E xenonového zdroje Richard Wolf 5132 v kombinaci s oběma optikami a čtyřmi různými kabely. Hodnoty světelného toku ϕ jsou vypočteny dle kalibrační rovnice (4.1).

Tabulka 4: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení a vypočtené hodnoty světelného toku xenonového zdroje Richard Wolf 5132.

W5132	Opt0			
	1_3mm/3m	4_3,5mm/3m	3_4,25mm/3m	2_4,25mm/3m
E [lx]	34000 ± 350	36600 ± 359	20400 ± 94	37200 ± 242
ϕ [lm]	236 ± 2	253 ± 2	146 ± 1	257 ± 2

Tabulka 5: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení a vypočtené hodnoty světelného toku xenonového zdroje Richard Wolf 5132.

W5132	Opt30			
	1_3mm/3m	4_3,5mm/3m	3_4,25mm/3m	2_4,25mm/3m
E [lx]	17510 ± 76	21000 ± 175	14240 ± 62	26200 ± 346
ϕ [lm]	127 ± 1	150 ± 1	105	184 ± 2

Změřené hodnoty intenzity osvětlení E a vypočtené hodnoty světelného toku ϕ xenonového zdroje Aesculap AXeL 180 jsou uvedeny v Tabulce 6. Měření proběhlo s oběma optikami a s dvěma světlovodnými kabely stejného typu a různého stáří.

Tabulka 6: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení a vypočtené hodnoty světelného toku xenonového zdroje Aesculap AXeL 180.

AA180	Opt0		Opt30	
	1_3mm/3m – starší	1_3mm/3m	1_3mm/3m – starší	1_3mm/3m
E [lx]	10180 ± 29	22600 ± 164	6390 ± 32	16240 ± 91
ϕ [lm]	78	160 ± 1	53	118 ± 1

Tabulka 7 a Tabulka 8 obsahuje hodnoty světelného toku ϕ vypočtené z naměřených hodnot intenzity osvětlení E pomocí kalibrační rovnice (4.1) pro xenonový světelný zdroj Richard Wolf 5124. Zdroj byl zapojen do optických řetězců s oběma optikami a třemi různými světlovodnými kabely.

Tabulka 7: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení a vypočtené hodnoty světelného toku xenonového zdroje Richard Wolf 5124.

W5124	Opt0		
	1_3mm/3m	5_5mm/2,3m	2_4,25mm/3m
E [lx]	16720 ± 61	14460 ± 191	23100 ± 232
ϕ [lm]	121	107 ± 1	164 ± 2

Tabulka 8: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení a vypočtené hodnoty světelného toku xenonového zdroje Richard Wolf 5124.

W5124	Opt30		
	1_3mm/3m	5_5mm/2,3m	2_4,25mm/3m
E [lx]	7620 ± 29	6030 ± 284	8980 ± 67
ϕ [lm]	61	51 ± 2	70

Následující Tabulka 9 uvádí výsledky měření intenzity osvětlení E xenonového zdroje Olympus CLV S45 a vypočtené hodnoty celkového světelného toku ϕ na konci optického řetězce. Zdroj je kompatibilní pouze se světlovodnými kabely téhož výrobce.

Tabulka 9: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení a vypočtené hodnoty světelného toku xenonového zdroje Olympus CLV S45.

OCLV	Opt0		Opt30	
	3_4,25mm/3m	2_4,25mm/3m	3_4,25mm/3m	2_4,25mm/3m
E [lx]	8120 ± 25	4530 ± 52	8500 ± 40	4290 ± 25
ϕ [lm]	65	41	67	40

V Tabulce 10 jsou uvedeny změřené hodnoty intenzity osvětlení E xenonového zdroje Karl Storz Xenon Nova 175. Hodnoty světelného toku ϕ jsou vypočteny podle kalibrační rovnice (4.1). Zdroj je kompatibilní pouze se světlovodnými kabely téhož výrobce.

Tabulka 10: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení a vypočtené hodnoty světelného toku xenonového zdroje Karl Storz Xenon Nova 175.

KX175	Opt0		Opt30	
	1_3mm/3m – starší	1_3mm/3m	1_3mm/3m – starší	1_3mm/3m
E [lx]	16360 ± 142	33700 ± 296	11950 ± 182	20500 ± 192
ϕ [lm]	119 ± 1	234 ± 2	90 ± 1	146 ± 1

4.3.2 Hodnoty intenzity osvětlení a světelného toku halogenových zdrojů

Halogenový zdroj Richard Wolf 4215 je kompatibilní pouze se světlovodnými kabely stejného výrobce a hodnoty intenzity osvětlení E jsou změřeny pro obě optiky. Světelný tok ϕ byl vypočten dle kalibrační rovnice (4.1). Získané hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 11.

Tabulka 11: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení a vypočtené hodnoty světelného toku halogenového zdroje Richard Wolf 4215.

W4215	Opt0		Opt30	
	4_3,5mm/3m	5_5mm/2,3m	4_3,5mm/3m	5_5mm/2,3m
E [lx]	13740 ± 52	8330 ± 117	4290 ± 25	2970 ± 20
ϕ [lm]	102	66 ± 1	40	31

Naměřené hodnoty intenzity osvětlení a vypočtené hodnoty světelného toku halogenového zdroje Richard Wolf 4215 jsou zaznamenány v Tabulce 12. Světelný zdroj je kompatibilní se světlovodnými kabely téhož výrobce.

Tabulka 12: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení a vypočtené hodnoty světelného toku halogenového zdroje Richard Wolf 4215.

W4215	Opt0		Opt30	
	1_3mm/3m	5_5mm/2,3m	1_3mm/3m	5_5mm/2,3m
E [lx]	6140 ± 26	5010 ± 52	2640 ± 67	1907 ± 7
ϕ [lm]	52	45	29	24

Halogenový světelný zdroj Olympus CKL-4 je kompatibilní pouze s jedním kabelem. Hodnoty intenzity osvětlení E a světelného toku ϕ byly změřeny pro obě optiky. Výsledky jsou uvedeny v Tabulce 13.

Tabulka 13: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení a vypočtené hodnoty světelného toku halogenového zdroje Olympus CKL-4.

W4215	Opt0	Opt30
	2_4,25mm/3m	2_4,25mm/3m
E [lx]	9940 ± 49	5010 ± 23
ϕ [lm]	77	44

4.3.3 Hodnoty intenzity osvětlení a světelného toku zdroje LED

Jediný světelný zdroj LED, Karl Storz Power LED 175, je kompatibilní pouze se světlovodným kabelem téhož výrobce. Hodnoty intenzity osvětlení a vypočtené hodnoty světelného toku jsou uvedeny v Tabulce 14. Měření proběhlo pro obě optiky.

Tabulka 14: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení a vypočtené hodnoty světelného toku zdroje LED Karl Storz Power LED 175.

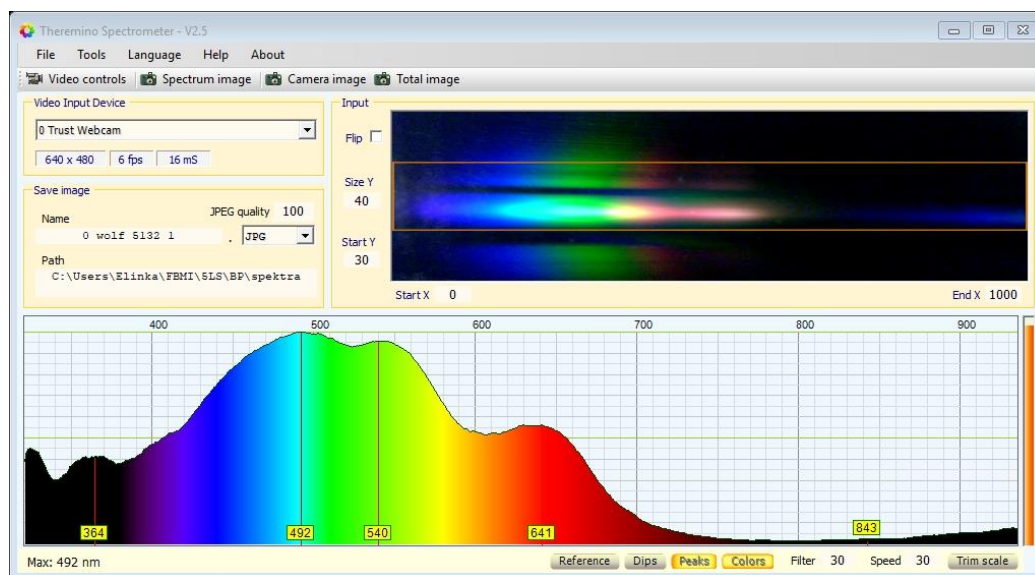
W4215	Opt0	Opt30
	1_3mm/3m	1_3mm/3m
E [lx]	28500 ± 232	13450 ± 58
ϕ [lm]	199 ± 2	100

4.4 Naměřená spektra světelných zdrojů

Zastoupení vlnových délek v měřeném světle bylo měřeno zkonstruovaným spektrometrem, obrázky jsou výstupem aplikace Theremino Spectrometer.

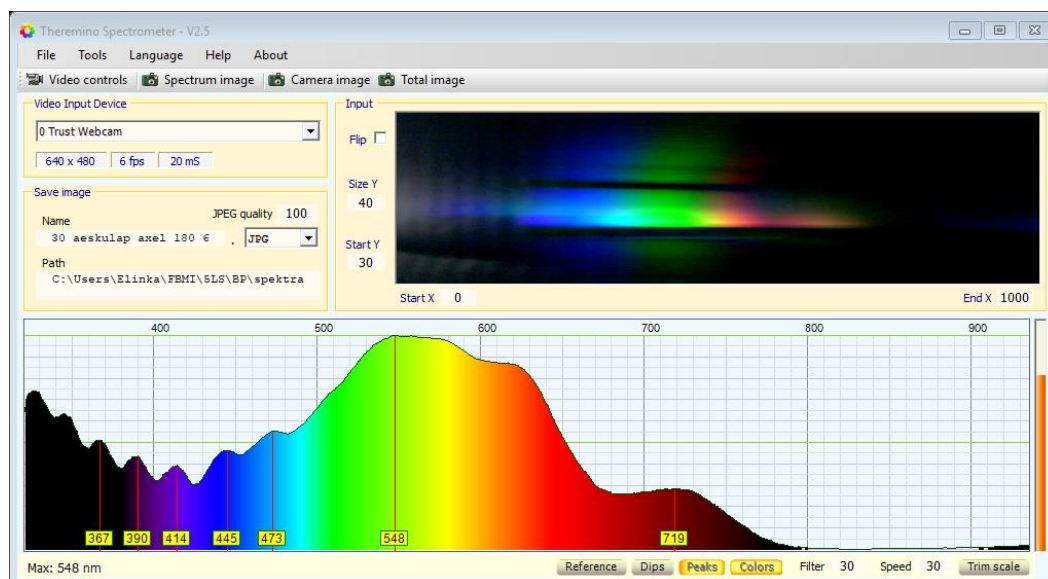
4.4.1 Spektra xenonových světelných zdrojů

Naměřené spektrum xenonového světelného zdroje Richard Wolf 5132 je zobrazeno na Obrázku 14. Maxima křivka nabývá při 492 nm, druhého významného peaku pak nabývá při 540 nm. Zobrazované spektrum obsahuje záření v ultrafialové oblasti. Zdroj výrazně nevyzařuje v infračervené oblasti spektra.



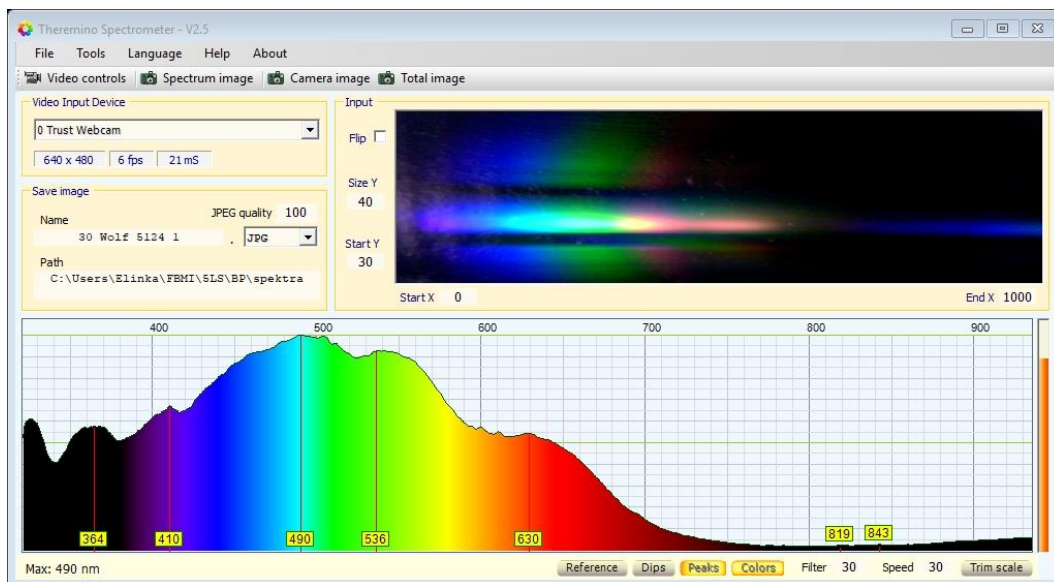
Obrázek 14: Naměřené spektrum xenonového světelného zdroje **Richard Wolf 5132**.

Na Obrázku 15 je vyobrazeno spektrum xenonového světelného zdroje Aesculap AXeL 180. Maximální hodnoty křivka dosahuje při 548 nm. Jsou obsaženy vlnové délky ultrafialové oblasti. Zdroj vyzařuje minimálně v oblasti infračerveného záření.



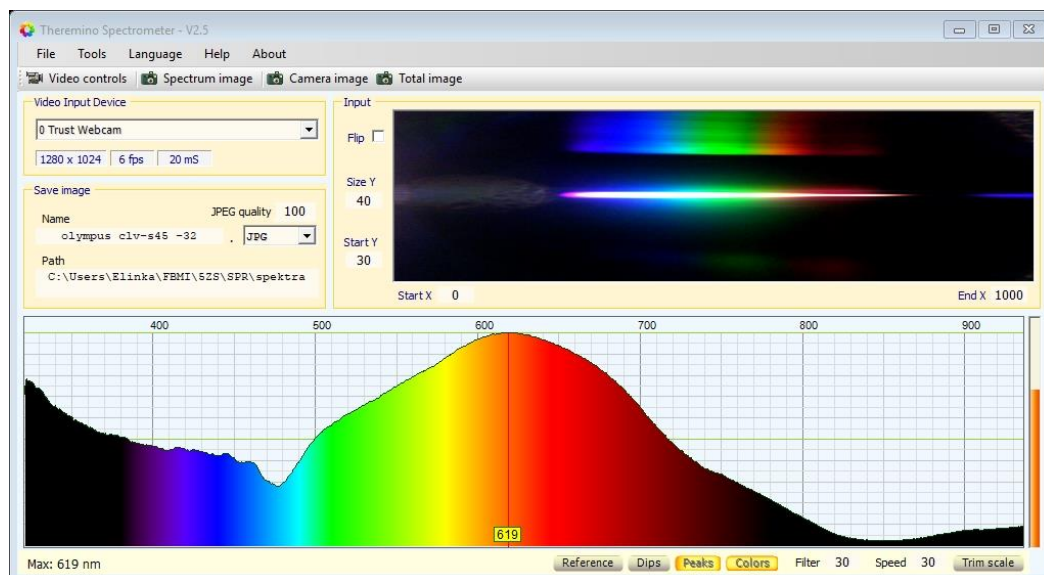
Obrázek 15: Naměřené spektrum xenonového světelného zdroje **Aesculap AXeL 180**.

Spektrum xenonového světelného zdroje Richard Wolf 5124 je znázorněno na Obrázku 16. V daném spektru je nejvíce zastoupeno záření o vlnové délce 490 nm a 536 nm. Obsahuje ultrafialové záření. Tento zdroj téměř nevyzařuje v oblasti infračerveného světla.



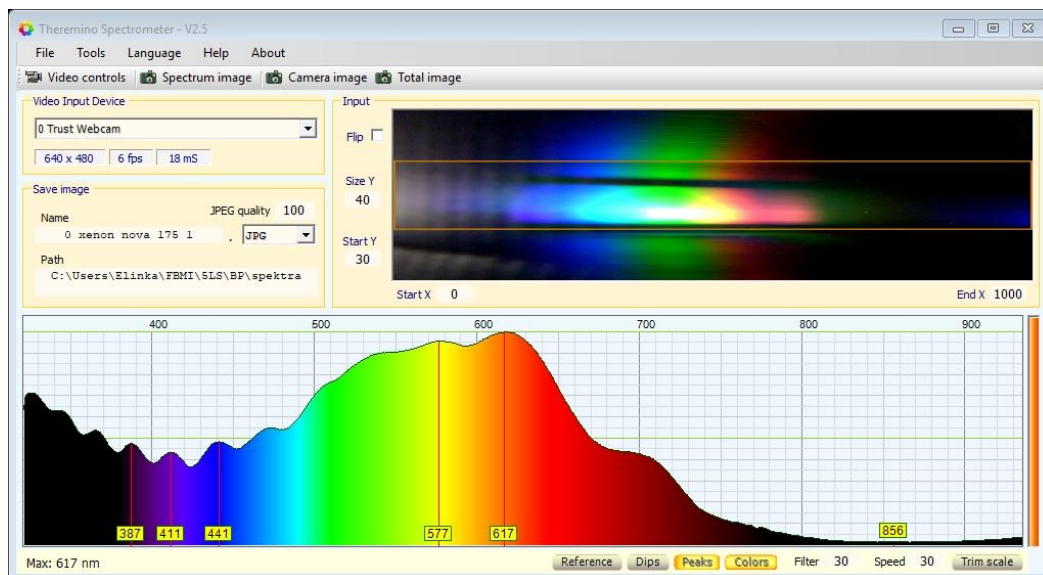
Obrázek 16: Naměřené spektrum xenonového světelného zdroje **Richard Wolf 5124**.

Obrázek 17 znázorňuje průběh spektra xenonového světelného zdroje Olympus CLV-S45. Maximum křivky je umístěno v 619 nm vlnové délky. Zdroj vyzařuje ultrafialové záření. Vlnové délky z infračervené oblasti téměř nejsou obsaženy.



Obrázek 17: Naměřené spektrum xenonového světelného zdroje **Olympus CLV-S45**.

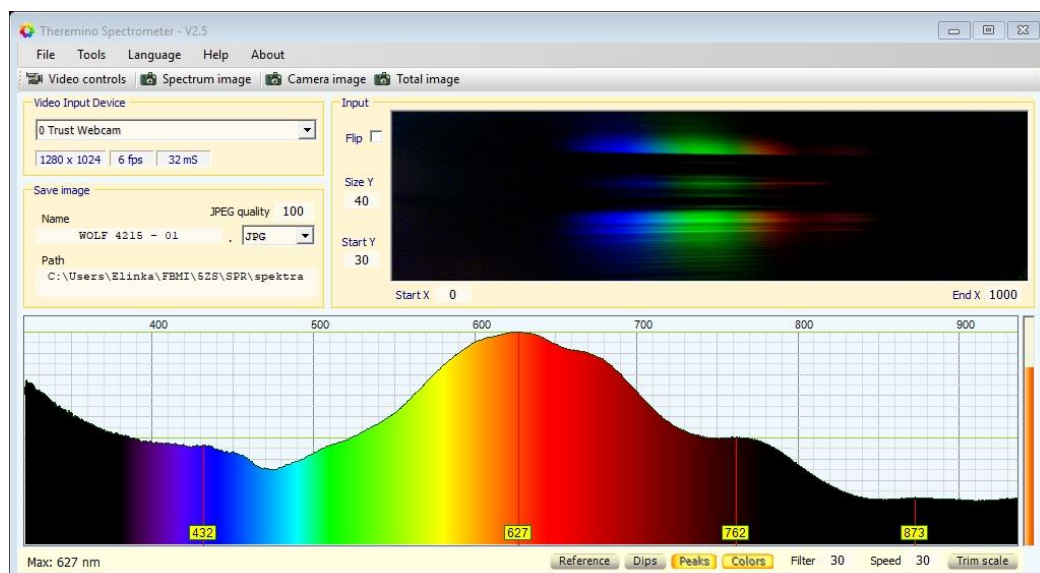
Obrázek 18 zachycuje naměřené spektrum xenonového světelného zdroje Karl Storz Xenon Nova 175. Graf obsahuje dva výrazné peaky při vlnových délkách 577 nm a 617 nm. Ve spektru jsou čteně zastoupeny vlnové délky z ultrafialové oblasti. Infračervená oblast naopak téměř není zastoupena.



Obrázek 18: Naměřené spektrum xenon. světelného zdroje **Karl Storz Xenon Nova 175**.

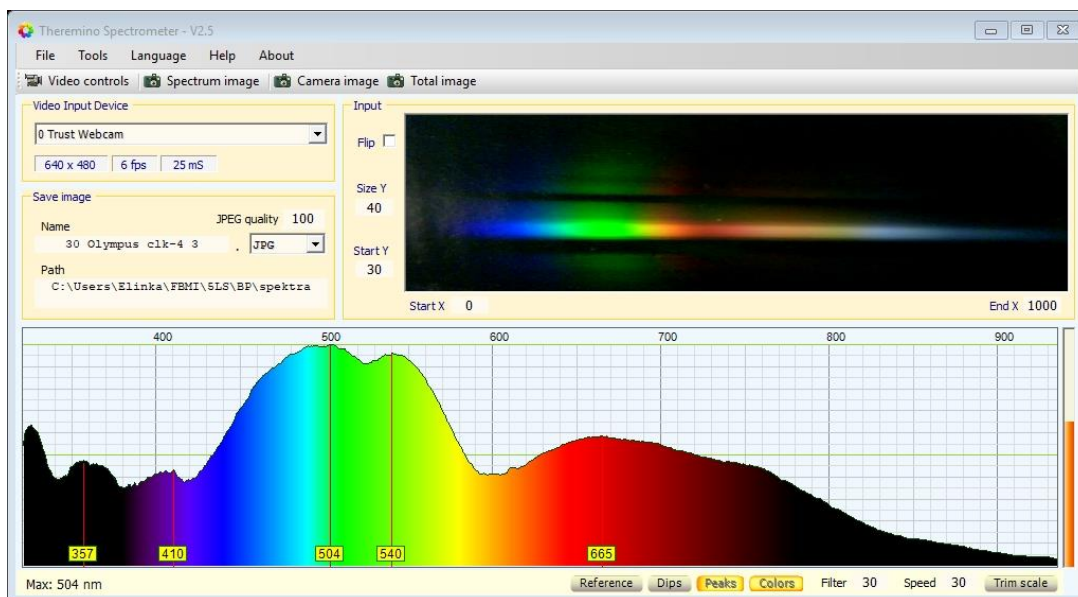
4.4.2 Spektra halogenových světelných zdrojů

Změřené spektrum halogenového světelného zdroje Richard Wolf 4215 je uvedeno na Obrázku 19. Maximum křivky je při 627 nm vlnové délky. Zdroj vyzařuje v infračervené i ultrafialové části spektra.



Obrázek 19: Naměřené spektrum halogenového světelného zdroje **Richard Wolf 4215**.

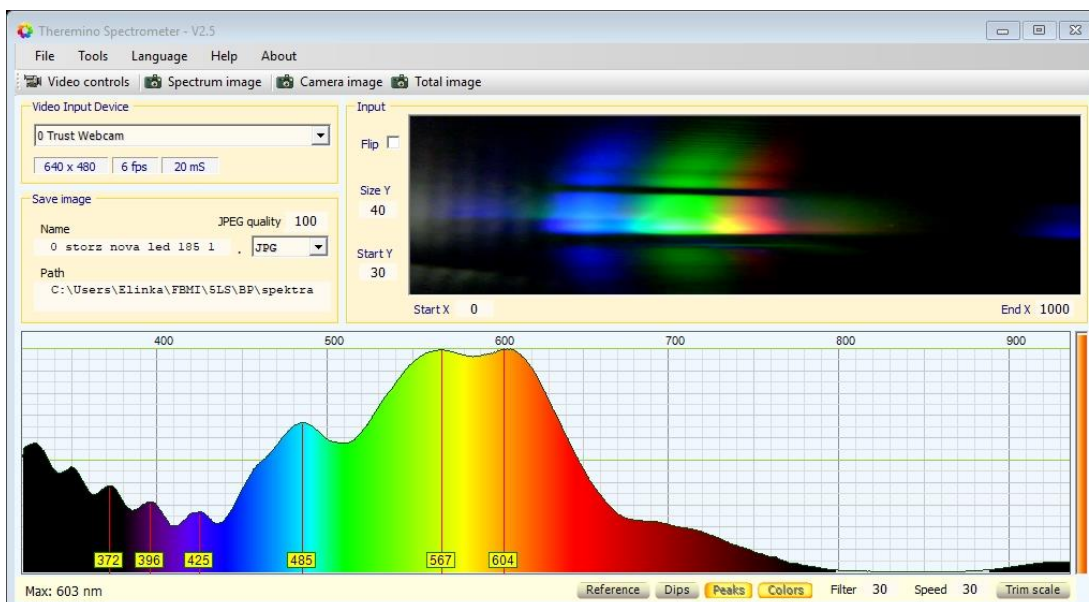
Spektrum halogenového světelného zdroje Olympus CLK-4 je znázorněno Obrázkem 20. Maximum křivky je dosaženo při vlnové délce 504 nm. Jsou čteně zastoupeny vlnové délky z infračervené části spektra.



Obrázek 20: Naměřené spektrum halogenového světelného zdroje Olympus CLK-4.

4.4.3 Naměřené spektrum LED světelného zdroje

Naměřené spektrum světelného zdroje s LED je zobrazeno na Obrázku 21. Křivka nabývá svého maxima při vlnových délkách 567 nm a 604 nm. V zobrazovaném spektru je zastoupeno ultrafialové záření. Zdroj téměř nevyzařuje infračervené záření.



Obrázek 21: Naměřené spektrum světelného zdroje LED Karl Storz Power LED 175.

5 Diskuse

Hlavním výstupem bakalářské práce je vytvoření funkční metody pro porovnávání svítivosti a kvality osvětlení operačního pole při endoskopických operacích na konci optického řetězce pro různé typy světelných zdrojů.

5.1 Návrh metodiky měření

Navržená metoda je rozdělena na dvě části; měření celkového světelného toku a měření složení spektra. Stejně jako lidské oko tak pracujeme se dvěma atributy světla, tedy atribut jasu a barvy.

5.1.1 Měření celkového světelného toku

Měření svítivosti se neprovádí přímo, ale převádí se na objektivní měření osvětlenosti, což je velmi náročná disciplína na přesnost umístění zdroje světla a detektoru, která vyžaduje velmi specializovanou techniku. Proto bylo měření převedeno na měření celkového světelného toku vycházejícího z distálního konce endoskopu. Světelný tok byl měřen pomocí navrženého kulového integrátoru.

Výsledky měření intenzity osvětlení jsou uvedeny v Tabulkách 4 až 14. Pro malý počet měření byl jako odhad střední hodnoty naměřených výsledků zvolen medián. Ve zvoleném výběru mají nejnižší intenzitu osvětlení zdroje s halogenovou žárovkou, zároveň jsou to však zdroje s nejnižším příkonem. Světelný zdroj s LED dosahoval podobného světelného toku jako výkonnější xenonové typy zdrojů.

Xenonový světelný zdroj Richard Wolf 5132, jehož naměřené hodnoty intenzity osvětlení a vypočtené hodnoty světelného toku jsou uvedeny v Tabulkách 4 a 5 je velmi univerzální a snadno kompatibilní. Obsahuje otočnou přípojku pro optické kabely od všech velkých výrobců. Hodnoty uvedené v těchto dvou tabulkách potvrzují předpoklad, že čím větší průměr optiky a světlovodného kabelu tím vyšší je hodnota naměřené osvětlenosti, a tedy i světelného toku. Optika Aesculap 30° má oproti optice Olympus 0° poloviční průměr a poskytuje tak přibližně poloviční světelný tok

Stáří světlovodného kabelu má značný vliv na míru propuštěného světla. Optická vlákna jsou velmi náchylná k poškození a vzhledem k častému používání, nutnosti sterilizace, a ne vždy správného uskladnění dochází k poškození vláken velmi snadno. V Tabulce 6, která obsahuje naměřené hodnoty intenzity osvětlení a vypočtené hodnoty světelného toku xenonového zdroje Aesculap AXeL 180 a v Tabulce 10, která obsahuje hodnoty xenonového zdroje Karl Storz Xenon Nova 175 je možné srovnat hodnoty typově stejného kabelu, různého stáří. Naměřená intenzita osvětlení je při použití staršího kabelu přibližně poloviční.

Měření halogenového světelného zdroje Richard Wolf 4215, jehož výsledky jsou uvedeny v Tabulce 12, probíhalo ve dvou etapách měření několik měsíců od sebe. Během této doby došlo k výměně žárovky. Proto jsou výsledky daných světlovodných kabelů přesně opačné než u všech ostatních měření.

5.1.2 Měření složení spektra

Výsledky měření složení spektra jsou znázorněny na Obrázcích 14 až 21. Zřejmě nejmarkantnější rozdíl je ve vyzařování v infračervené oblasti spektra. Xenonové zdroje světla i zdroj s LED obsahují vlnové délky z infračervené oblasti minimálně. Naproti tomu halogenové zdroje vyzařují v infračervené oblasti mnohem výrazněji. Odpovídá to předpokladům, protože halogenová žárovka mění většinu dodané elektrické energie na teplo.

Teplota chromatičnosti byla porovnávána pouze subjektivně. Halogenové zdroje světla jsou vnímány jako nejvíce teplé, což odpovídá i informacím z datasheetů jednotlivých zdrojů, kde je pro halogenové světelné zdroje uvedena teplota chromatičnosti 3500 K a 3250 K. Zobrazení pod xenonovým světlem se jeví jako nejvíce přirozené.

5.2 Porovnání provozních nákladů a efektivity světelného zdroje

Pořizovací cena zdroje světla pro endoskopické operace je obecně nejvyšší u zdrojů s xenonovou výbojkou. Životnost xenonové výbojky je přitom několik stovek hodin. Halogenové endoskopické zdroje jsou levnější, halogenové lampy ovšem mají kratší životnost (spíše v řádu desítek hodin) a musejí se častěji vyměňovat. Oproti xenonovým výbojkám jsou však halogenové žárovky levnější. Světelně-technické parametry těchto lamp se v průběhu jejich životnosti mění. U zdrojů záření s LED technologií k žádným výměnám LED diod nedochází. Jejich životnost dosahuje desítek tisíc hodin, což při běžném pracovním zatížení znamená desítky let provozu. Během této doby nedochází k výrazným změnám vyzařovaného světla. Světelné zdroje s LED technologií jsou nejlevnější možnou alternativou z hlediska pořizovací ceny i provozních nákladů. Světelnými parametry se přitom přibližovali více xenonovým zdrojům světla než halogenové světelné zdroje

Navržená metoda měření může v budoucnu sloužit k ověřování technického stavu světlovodných kabelů, u zdrojů světla bez ukazatele počtu hodin svícení žárovky pak k ověření technického stavu zdroje (žárovky).

6 Závěr

Hlavním výsledkem bakalářské práce je vytvoření metodiky hodnocení svítivosti, resp. celkového světelného toku, a kvality osvětlení operačního pole při endoskopických operacích. Metodika je rozdělena na měření celkového toku na konci optického řetězce a měření vyzařovaného spektra.

Tato metoda byla vyzkoušena na třech typech světelných zdrojů, tedy na světelných zdrojích s halogenovou žárovkou, xenonovou výbojkou a zdroje s LED. Nejnižších hodnot intenzity osvětlení, a tedy i světelného toku, dosahovaly světelné zdroje s halogenovou žárovkou. Z hlediska intenzity osvětlení byl zdroj světla s LED technologií srovnatelný s výkonnějšími světelnými zdroji s xenonovou výbojkou. Při měření světelného spektra bylo ověřeno, že halogenové zdroje světla produkují významné množství tepla. Proto jsou v jejich spektrech výrazněji zastoupeny vlnové délky v infračervené oblasti. Barva světla xenonových světelných zdrojů je nejvíce podobná dennímu osvětlení.

Na výstupu na konci optického řetězce se významně podílejí všechny jeho komponenty. Zásadní vliv na kvalitu osvětlení má stav světlovodného kabelu. Dalším zásadním parametrem je stáří samotné lampy. Halogenové i xenonové lampy mění během své životnosti světelně-technické parametry.

Světelné zdroje s LED technologií jsou nejlevnější možnou alternativou z hlediska pořizovací ceny i provozních nákladů. Světelnými parametry se přitom přibližovaly více xenonovým zdrojům světla než halogenové světelné zdroje.

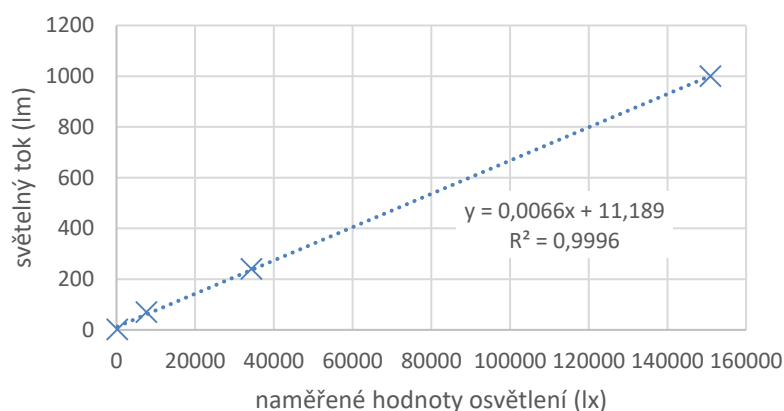
Navržená metoda měření může v budoucnu sloužit k ověřování technického stavu světlovodných kabelů, u zdrojů světla bez ukazatele počtu hodin svícení žárovky pak k ověření technického stavu zdroje (žárovky).

Seznam použité literatury

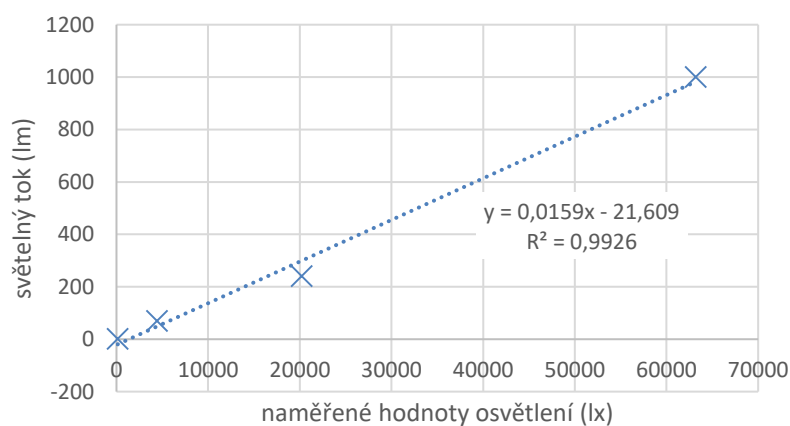
- [1] OGURTSOVSKII, Yu. G. a A. V. KUZNETSOV. Endoscopic Xenon Light Sources. *Biomedical Engineering*. **37**(3), 163-164. DOI: 10.1023/A:1025875332388. ISSN 00063398. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1023/A:1025875332388>
- [2] COTTON, Peter B a Christopher B WILLIAMS. *Practical Gastrointestinal Endoscopy* [online]. 6th ed. Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 2008 [cit. 2019-05-06]. DOI: 10.1002/9781444300819. ISBN 9781444300819. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781444300819.ch2>
- [3] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [4] MIŠKAŘÍK, Stanislav. *Moderní zdroje světla*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979. Řada elektrotechnické literatury.
- [5] SOSNOV, D. L., MOLEV, A.I. and Kurochkin, E. D. The OS-250-01 Light Source for Endoscopic Equipment. *Biomedical Engineering*, **36**(3),183. DOI: 10.1023/A:1020268511881. ISSN 00063398. Dostupné také z: <https://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1020268511881>
- [6] BENEŠ, Jiří, Daniel JIRÁK a František VÍTEK. *Základy lékařské fyziky*. 4. vydání. V Praze: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 2015. ISBN 978-80-246-2645-1.
- [7] MAHLKE, Günter a Peter GÖSSING. *Fiber optic cables: fundamentals ; cable technology ; installation practice*. Chichester: Siemens Aktiengesellschaft, 1987. ISBN isbn3800914735.
- [8] GAAB, Michael R. Instrumentation: Endoscopes and Equipment. *World Neurosurgery*. 2013, **79**(2), ISSN 1878-8750 Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878875012001659?via%3Dihub>
- [9] Orthopedics Rigid Endoscope Arthroscope. In: *EndoTop* [online]. Čína: HANGZHOU ENDOTOP MEDI-TECH CO., kjh [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://www.endotopmed.com/Orthopedics-Rigid-Endoscope-Arthroscope-pd6316693.html>
- [10] HOLÝ, Petr. Endoskopie. Thomayerova nemocnice. [Online] 2016-2019. [Citace: 12. 4 2019.] http://www.ftn.cz/upload/ftn/Kliniky/Urologie/Dokumenty/Endoskopie_v_urologii.pdf.

- [11] HABEL, Jiří. Základy světelné techniky (4): Základy fotometrie (2. část). *Světločasopis pro světelnou techniku a osvětlování*. 2009, **2009**(4), 50-53. ISSN 1212-0812.
- [12] ARECCHI, Angelo V., R. John KOSHEL a Tahar MESSADI. *Field guide to illumination*. Bellingham, Wash.: SPIE, c2007. ISBN 9780819467683.
- [13] Labshere. Technical guide: Integrating Shere Theory and Application. www.labshere.com. [Online] [Citace: 2. 11 2018.] https://www.labsphere.com/site/assets/files/2551/integrating_sphere_theory_apps_tech_guide.pdf
- [14] FUSSEL, W.B. Approximate theory of the photometric integrating sphere. Optical radiation measurements.: místo neznámé : National Bureau of Standards (U.S.), March, 1974. Sv. NBS Technical Note, 594-7.
- [15] Newport Comporation (c) 2019. Integrating Sphere Fundamentals and Applications. [Online] [Citace: 3. 11 2018.] <https://www.newport.com/t/integrating-sphere-fundamentals-and-applications>.
- [16] Labshere. Technical Guide: Integrating shpere uniform light source applications. www.labsphere.com. [Online] [Citace: 2. 11 2018.] <https://www.labsphere.com/site/assets/files/2552/a-guide-to-integrating-sphere-uniform-light-source-applications.pdf>
- [17] KNIGHTON N., BUGBEE B. A Mixture of Barium Sulfate and White Paint is a Low-Cost Subtitute Reflectance Standard for Spectralon. *Techniques and instruments: Crop Physiology Lab*, 2005. https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1010&context=cpl_techniquesinstruments.
- [18] NITECORE MH10. Manuál. místo neznámé: SYSMAX Innovations Co.,Ltd. <https://flashlight.nitecore.com/product/mh10>.
- [19] Gossen Metrawatt Camille Bauer. MAVOLUX 5032B/C Digitální luxmetr. Návod k obsluze. místo neznámé: Gossen Metrawatt Camille Bauer. 3-349-038-15.
- [20] MALACARA, Daniel a Brian J. THOMPSON. *Handbook of optical engineering*. New York: Marcel Dekker, 2001. Optical engineering (Marcel Dekker, Inc.), v. 73. ISBN 9780824799601.
- [21] Theremino System. Technology. Theremino Spectrometer. 2014. https://www.theremino.com/wp-content/uploads/files/Theremino_Spectrometer_Technology_ENG.pdf.
- [22] Theremino Systems. Construction. Theremino Spectrometer. místo neznámé Theremino, 2014. http://www.theremino.com/wp-content/uploads/files/Theremino_Spectrometer_Construction_ENG.pdf.

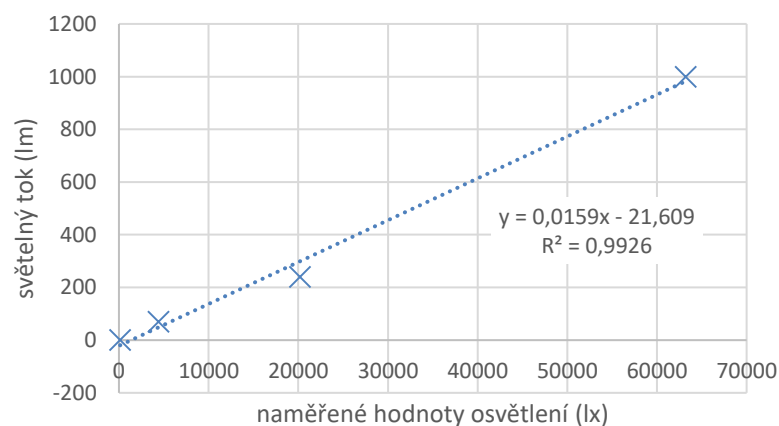
Příloha A: Kompletní výsledky kalibrace všech kulových integrátorů



Graf A: Kalibrační přímka, závislost světelného (lm) na naměřeném osvětlení (lx) pro kulový integrátor o vnitřním průměru 160 mm.



Graf B: Kalibrační přímka, závislost světelného (lm) na naměřeném osvětlení (lx) pro kulový integrátor o vnitřním průměru 210 mm.



Graf C: Kalibrační přímka, závislost světelného (lm) na naměřeném osvětlení (lx) pro kulový integrátor o vnitřním průměru 260 mm.

Příloha B: Všechny naměřené hodnoty

Tabulka 15: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení xenonového zdroje Aeskulab Axel 180.

Aeskulab Axel 180 SN004548				
Optika 0° A3990		Optika 30° PE514A		
Karl Storz 495ND – starší	Karl Storz 495ND	Karl Storz 495ND – starší	Karl Storz 495ND	
10170	22400	6410	16 340	
10110	22700	6390	16300	
10160	22500	6380	16260	
10190	22300	6440	16220	
10200	22500	6480	16280	
10170	22800	6380	16240	
10210	22700	6390	16250	
10180	22500	6410	16190	
10200	22700	6400	16170	
10180	22600	6390	16220	
10210	22800	6370	15990	
Medián:	10180	22600	6390	16240
Směrodatná odchylka:	29	164	32	91

Tabulka 16: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení xenon. zdroje Karl Storz Xenon Nova 175.

Karl Storz Xenon Nova 175 OU0700978				
Optika 0° A3990		Optika 30° PE514A		
Karl Storz 495ND - starší	Karl Storz 495ND	Karl Storz 495ND - starší	Karl Storz 495ND	
16070	34200	11940	20100	
16050	34400	11920	20700	
16380	33800	11970	20500	
16330	33800	11950	20600	
16400	33700	11980	20500	
16430	33400	11950	20600	
16470	33600	11360	20500	
16340	33500	11980	20400	
16360	33600	11950	20300	
16230	33700	11930	20800	
16430	33900	12010	20600	
Medián:	16360	33700	11950	20500
Směrodatná odchylka:	142	296	182	192

Tabulka 17: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení xenon. zdroje Karl Storz Xenon Nova 175.

Richard Wolf 5124 SN1100151745					
Optika 0° A3990			Optika 30° PE514A		
Karl Storz 495ND	Richard Wolf 809509	Olympus WA03310A	Karl Storz 495ND	Richard Wolf 809509	Olympus WA03310
16760	14680	23100	7590	6030	8840
16670	14690	22700	7610	5980	8950
16620	14490	23400	7600	5990	9040
16710	14460	22800	7640	6000	9030
16740	14440	23200	7630	6040	8980
16690	14300	23100	7570	6030	9050
16720	14340	23300	7620	5960	8970
16740	14420	23000	7640	6040	8990
16750	14710	22900	7560	6050	8900
16690	14840	23400	7630	6020	8910
16860	14250	23200	7640	6950	9030
Medián:	16720	14460	23100	7620	6030
Směrodatná odchylka:	61	191	232	29	284

Tabulka 18: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení LED zdroje Karl Storz Power LED 175.

Karl Storz Power LED 175	
Optika 0° A3990	Optika 30° PE514A
Karl Storz 495ND	Karl Storz 495ND
29000	13480
28900	13500
28400	13490
28300	13450
28400	13400
28500	13370
28700	13320
28700	13440
28500	13460
28400	13510
28800	13430
Medián:	28500
Směrodatná odchylka:	232

Tabulka 19: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení halogenového zdroje Olympus CLK-4.

Olympus CLK – 4 SN7728187		
	Optika 0° A3990	Optika 30° PE514A
	Olympus WA03310A	Olympus WA03310A
	10010	5010
	10020	5020
	9890	4990
	9900	5030
	9950	5040
	9940	5000
	10000	4970
	9980	5010
	9940	4990
	9880	5040
	9920	5030
Medián:	9940	5010
Směrodatná odchylka:	49	23

Tabulka 20: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení xenon. zdroje Olympus CLV S45.

Olympus CLV S45 SN 7110590				
	Optika 0° A3990		Optika 30° PE514A	
	Olympus WA03312A	Olympus WA03310A	Olympus WA03312A	Olympus WA03310A
	8140	4550	8450	4330
	8090	4530	8540	4290
	8130	4540	8520	4320
	8100	4530	8480	4300
	8150	4400	8460	4310
	8080	4530	8500	4290
	8140	4510	8510	4270
	8120	4550	8530	4280
	8090	4440	8410	4240
	8130	4510	8530	4270
	8090	4440	8490	4300
Medián:	8120	4530	8500	4290
Směrodatná odchylka:	25	52	40	25

Tabulka 21: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení halogenového zdroje Richard Wolf 4215.

Richard Wolf 4215 SN1100151464				
	Optika 0° A3990		Optika 30° PE514A	
	Richard Wolf 8061.353	Richard Wolf 809509	Richard Wolf 8061.353	Richard Wolf 809509
	13490	8400	4330	2 930
	13370	8200	4290	2940
	13490	8030	4320	2990
	13430	8390	4300	2980
	13500	8400	4310	2970
	13470	8390	4290	2980
	13450	8360	4270	2970
	13480	8320	4280	2990
	13470	8330	4240	2980
	13350	8290	4270	2960
	13390	8190	4300	2950
Medián:	13470	8330	4290	2970
Směrodatná odchylka:	52	117	25	20

Tabulka 22: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení halogenového zdroje Richard Wolf 4215.

Richard Wolf 4215 SN1100151458				
	Optika 0° A3990		Optika 30° PE514A	
	Karl Storz 495ND	Richard Wolf 809509	Karl Storz 495ND	Richard Wolf 809509
	6120	5010	2580	1 923
	6160	5050	2670	1917
	6140	5090	2680	1909
	6160	4990	2650	1910
	6170	4980	2540	1902
	6180	5020	2660	1907
	6130	5040	2470	1906
	6140	5030	2570	1909
	6100	4920	2600	1907
	6100	4950	2640	1898
	6140	4940	2680	1899
Medián:	6140	5010	2640	1907
Směrodatná odchylka:	26	52	67	7

Tabulka 23: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení xenon. zdroje Richard Wolf 5132.

Richard Wolf 5132 SN1100151244				
Optika 0° A3990				
	Karl Storz 495ND	Richard Wolf 8061.353	Olympus WA03312A	Olympus WA03310A
	33700	36700	20200	37500
	34200	36300	20400	37400
	34300	36400	20500	37300
	33700	36300	20400	37200
	33900	36600	20300	37200
	33100	35500	20400	37100
	33900	36300	20500	37000
	34200	36800	20300	37300
	34000	36700	20400	36700
	34200	36600	20400	37200
	34200	36600	20500	36800
Medián:	34000	36600	20400	37200
Směrodatná odchylka:	350	359	94	242

Tabulka 24: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení xenon. zdroje Richard Wolf 5132.

Richard Wolf 5132 SN1100151244				
Optika 30° PE514A				
	Karl Storz 495ND	Richard Wolf 8061.353	Olympus WA03312A	Olympus WA03310A
	17490	21100	14240	26400
	17620	20800	14180	26700
	17510	21000	14240	25900
	17460	20900	14290	26400
	17490	20900	14180	26800
	17430	20600	14260	26100
	17370	20800	14220	26200
	17530	21100	14400	26200
	17580	21100	14240	25800
	17550	21200	14190	26200
	17610	21000	14270	25700
Medián:	17510	21000	14240	26200
Směrodatná odchylka:	76	175	62	346

Příloha C: Obsah přiloženého CD

1. Abstract.pdf
2. Abstrakt.pdf
3. Bakalářská práce.pdf
4. Klíčová slova/Keywords.pdf
5. Zadání bakalářské práce.pdf