



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ
Katedra biomedicínské techniky

Analýza tepelného záření operačních svítidel

Thermal radiation analysis of theatre operating lamps

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Biomedicínský technik

Autor bakalářské práce: Barbora Chmelová

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Petráček

Kladno 2017

Katedra biomedicínské techniky

Akademický rok: 2016/2017

Z a d á n í b a k a l á ř s k é p r á c e

Student: **Barbora Chmelová**
Obor: Biomedicínský technik
Téma: **Analýza tepelného záření operačních svítidel**
Téma anglicky: Thermal radiation analysis of the operating theatres lamps

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Zpracujte požadavky na operační svítidla z hlediska ČSN a to zejména z hlediska tepelného záření. Stanovte metodu pro měření tepelného záření operačních svítidel na operačních sálech v experimentálních podmínkách. Proměřte operační svítidla všech výrobců nacházejících se na operačních sálech FN Motol a porovnejte spolu svítidla s halogenovými žárovkami a LED diodami. Pro tato svítidla vytvořte mapu rozložení tepelného záření s ohledem na vzduchotechniku. Naleznete metodu pro určování emisivity dané látky a určete emisivitu sterilní krycí roušky užívané při operacích a zjistěte, jak dané svítidlo ohřívá operační plochu v simulovaném reálném prostředí. Vyhodnoťte výsledky měření a doporučte vhodné alternativy pro klinickou praxi.

Seznam odborné literatury:

- [1] Kol., Elektrická a elektronická měřicí zařízení – Vyjadřování vlastností, ed. 1, ČSN, číslo ČSN EN 60 359, 2003
- [2] Palenčár, R., Vdoleček, F., Halaj, M., Nejistoty v měření I až V, číslo 7,8,10,12/2001, 4,5/2002, 2001/2002 , FCC Public s. r. o. , AUTOMA, 1210-9592
- [3] Novotný, J., Kolomazník, J., Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – Část 1: Vnitřní pracovní prostory, ČSN EN 12464-1, ročník ÚNMZ, 56 s., 2012
- [4] Rýmus, J., Živcová, M., Svítidla - Část 2: Zvláštní požadavky. Oddíl 25: Svítidla pro použití ve zdravotnických prostorech, nemocnicích a léčebnách, ČSN EN 60598-2-25, ročník ÚNMZ, 16 s., 1997
- [5] Vejrosta, V., Šesták, J., Zdravotnické elektrické přístroje - Část 2- 41: Zvláštní požadavky na základní bezpečnost a nezbytnou funkčnost operačních a vyšetřovacích svítidel, ed. 2, ÚNMZ, ročník 40 s., číslo ČSN EN 60601-2- 41, 2010
- [6] Skokanský, K. a kol., Světelná technika, Přístupné z: http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-6-Svetelna.pdf, číslo ISBN 978-80-01-04941-9, 2011

Zadání platné do: 11.09.2018

Vedoucí: Ing. Jiří Petráček

Konzultant: Ing. Jan Koutský

.....
vedoucí katedry / pracoviště

.....
děkan

V Kladně dne 20.02.2017

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem Analýza tepelného záření operačních svítidel vypracovala samostatně a použila k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové 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).

V Kladně 19.5.2017

.....

Barbora Chmelová

PODĚKOVÁNÍ

Rád/a bych poděkovala vedoucímu této práce, panu inženýrovi Jiřímu Petráčkovi, za jeho pomoc a ochotu. Dále svému konzultantovi, panu inženýrovi Janu Kouckému, který byl přítomen u všech mých měření a umožnil mi jejich provedení.

Poděkovat bych chtěla také Fakultní nemocnici v Motole za možnost využít jejich sálů pro svá měření a Fakultě biomedicínského inženýrství za zapůjčení měřících přístrojů a jejich příslušenství.

Speciální poděkování bych chtěla vyslovit panu inženýrovi Petru Volfovi a panu inženýrovi Jiřímu Tomčalovi, kteří mi poskytovali cenné konzultace ve svém volném čase.

ABSTRAKT

Analýza tepelného záření operačních svítidel

Hlavním cílem této práce bylo stanovit, jak různé typy operačních svítidel ohřívají operační pole. Dále zjistit, jaký rozdíl je mezi ohřevem různými typy operačních svítidel a jak je tento ohřev ovlivněn vzduchovou ventilací nacházející se na operačním sále. Pro vytvoření pracovního postupu bylo nutné zpracovat dané téma z pohledu norem ČSN.

Měření probíhala na sálech Fakultní nemocnice v Motole a jednalo se konkrétně o dvě halogenová a čtyři svítidla s LED diodami. Ohřev operačního pole jsem zaznamenávala termovizní kamerou FLIR umístěnou jeden metr nad podložkou, ve výšce operačního svítidla. Byly využity dva různé materiály podložek, jeden jako experimentální a druhý jako simulované reálné prostředí.

Ze získaných dat bylo patrné, že operační svítidla ohřívají operační pole tak, že tento ohřev není zanedbatelný. Neprokázalo se, že by vzduchová ventilace měla vliv na změnu teploty operačního pole způsobenou operačním svítidlem.

Klíčová slova

Termovize, tepelné záření, emisivita, halogenové žárovky, LED diody.

ABSTRACT

Thermal radiation analysis of theatre operating lamps

The main objective of this measurement was to define how different types of operating lamps are heating surgical space and how is this heating influenced by air ventilation at the operating room. It was needed to process information from ČSN to invent the best way of measurement.

The measurements were held in operating rooms of Faculty Hospital of Motol. There were two halogen operating lamps and four lamps with LED diodes. The heating of the surface of surgical space was measured by thermovision camera FLIR. The camera was situated 1 meter above the operating table, as well as the operating lamp. Two different types of material were used as cover of surgical space, one as experimental and one as simulated real environment.

The data showed us after evaluation that operating lamps heated the surgical space as much, that this heating can't be neglected. There was no proof of air condition influence to the change of temperature caused by operating lamps.

Keywords

Thermovision, thermal radiation, emissivity, halogen bulb, LED diode

Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	13
Seznam symbolů a zkratek	14
1 Úvod	15
1.1 Přehled současného stavu	15
1.2 Cíle práce.....	16
2 Teoretická část práce	17
2.1 Tepelné záření	17
2.2 Termovize.....	18
2.2.1 Termovizní kamery	21
2.2.2 Emisivita.....	21
2.3 Operační svítidla	22
2.3.1 Halogenová svítidla	23
2.3.2 LED svítidla.....	23
3 Metody	25
3.1 Termovizní kamera	26
Referenční měřidlo	28
3.2 Měřicí podložka.....	29
3.2.1 Podložka s danou emisivitou	29
3.2.2 Sterilní krycí rouška	30
3.3 Měřená operační svítidla	30
3.3.1 MarLux	32
3.3.2 Hanaulux.....	32
3.3.3 Maquet Volista	33
3.3.4 Trumpf TruLight	33
3.3.5 Steris Xled	34
3.3.6 Mach LED	34
4 Výsledky	35
4.1 Halogenová svítidla.....	35
4.2 LED svítidla	40

4.3	Vliv vzduchové ventilace	48
4.4	Statistické zhodnocení výsledků	50
5	Diskuse	53
6	Závěr	54
	Seznam použité literatury	55
	Příloha A.....	57

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: Rozdělení elektromagnetického spektra [4].....</i>	17
<i>Obrázek 2: Graf závislosti emisivity na vlnové délce [6]</i>	22
<i>Obrázek 3: Princip IRC technologie [18]</i>	23
<i>Obrázek 4: Schéma LED diody [19].....</i>	24
<i>Obrázek 5: Rozložení měřicí soustavy na operačním sále v průběhu měření</i>	25
<i>Obrázek 6: Termovizní kamera FLIR E6 [9].....</i>	26
<i>Obrázek 7: Multimetr UT56 [10]</i>	28
<i>Obrázek 8: Therma Spray 500 využitý k úpravě povrchu [11].....</i>	29
<i>Obrázek 9: Přenos výkonu při provozu světel</i>	31
<i>Obrázek 10: Záznam pro malé světlo MarLux v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou</i>	35
<i>Obrázek 11: Záznam pro malé světlo MarLux v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou</i>	35
<i>Obrázek 12: Záznam pro malé světlo MarLux v rozsahu 22-37 °C s rouškou.....</i>	36
<i>Obrázek 13: Záznam pro malé světlo MarLux v rozsahu 22-32 °C s rouškou.....</i>	36
<i>Obrázek 14: Záznam pro velké světlo MarLux v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou</i>	36
<i>Obrázek 15: Záznam pro velké světlo MarLux v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou</i>	36
<i>Obrázek 16: Záznam pro velké světlo MarLux v rozsahu 22-37 °C s rouškou</i>	36
<i>Obrázek 17: Záznam pro velké světlo MarLux v rozsahu 22-32 °C s rouškou</i>	36
<i>Obrázek 18: Záznam pro kombinaci světel MarLux v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou</i>	37
<i>Obrázek 19: Záznam pro kombinaci světel MarLux v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou</i>	37
<i>Obrázek 20: Záznam pro kombinaci světel MarLux v rozsahu 22-37 °C s rouškou</i>	37
<i>Obrázek 21: Záznam pro kombinaci světel MarLux v rozsahu 22-32 °C s rouškou</i>	37
<i>Obrázek 22: Záznam pro malé světlo Hanaulux v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou</i>	38

<i>Obrázek 23: Záznam pro malé světlo Hanaulux v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou</i>	38
<i>Obrázek 24: Záznam pro malé světlo Hanaulux v rozsahu 22-37 °C s rouškou</i>	38
<i>Obrázek 25: Záznam pro malé světlo Hanaulux v rozsahu 22-32 °C s rouškou</i>	38
<i>Obrázek 26: Záznam pro velké světlo Hanaulux v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou</i>	38
<i>Obrázek 27: Záznam pro velké světlo Hanaulux v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou</i>	38
<i>Obrázek 28: Záznam pro velké světlo Hanaulux v rozsahu 22-37 °C s rouškou.....</i>	39
<i>Obrázek 29: Záznam pro velké světlo Hanaulux v rozsahu 22-32 °C s rouškou.....</i>	39
<i>Obrázek 30: Záznam pro kombinaci světel Hanaulux v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou</i>	39
<i>Obrázek 31: Záznam pro kombinaci světel Hanaulux v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou</i>	39
<i>Obrázek 32: Záznam pro kombinaci světel Hanaulux v rozsahu 22-37 °C s rouškou ...</i>	39
<i>Obrázek 33: Záznam pro kombinaci světel Hanaulux v rozsahu 22-32 °C s rouškou ...</i>	39
<i>Obrázek 34: Záznam pro malé světlo Maquet v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou</i>	40
<i>Obrázek 35: Záznam pro malé světlo Maquet v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou</i>	40
<i>Obrázek 36: Záznam pro malé světlo Maquet v rozsahu 22-37 °C s rouškou</i>	40
<i>Obrázek 37: Záznam pro malé světlo Maquet v rozsahu 22-32 °C s rouškou.....</i>	40
<i>Obrázek 38: Záznam pro velké světlo Maquet v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou</i>	41
<i>Obrázek 39: Záznam pro velké světlo Maquet v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou</i>	41
<i>Obrázek 40: Záznam pro velké světlo Maquet v rozsahu 22-37 °C s rouškou</i>	41
<i>Obrázek 41: Záznam pro velké světlo Maquet v rozsahu 22-32 °C s rouškou</i>	41
<i>Obrázek 42: Záznam pro kombinaci světel Maquet v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou</i>	41
<i>Obrázek 43: Záznam pro kombinaci světel Maquet v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou</i>	41
<i>Obrázek 44: Záznam pro kombinaci světel Maquet v rozsahu 22-37 °C s rouškou.....</i>	42

<i>Obrázek 45: Záznam pro kombinaci světel Maquet v rozsahu 22-32 °C s rouškou.....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 46: Záznam pro malé světlo TruLight v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou.....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 47: Záznam pro malé světlo TruLight v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou.....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 48: Záznam pro malé světlo TruLight v rozsahu 22-37 °C s rouškou</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 49: Záznam pro malé světlo TruLight v rozsahu 22-32 °C s rouškou</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 50: Záznam pro velké světlo TruLight v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 51: Záznam pro velké světlo TruLight v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 52: Záznam pro velké světlo TruLight v rozsahu 22-37 °C s rouškou</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 53: Záznam pro velké světlo TruLight v rozsahu 22-32 °C s rouškou.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 54: Záznam pro kombinaci světel TruLigt v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 55: Záznam pro kombinaci světel TruLight v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 56: Záznam pro kombinaci světel TruLight v rozsahu 22-37 °C s rouškou.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 57: Záznam pro kombinaci světel TruLight v rozsahu 22-32 °C s rouškou.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 58: Záznam pro malé světlo Steris Xled v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou.....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 59: Záznam pro malé světlo Steris Xled v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou.....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 60: Záznam pro malé světlo Steris Xled v rozsahu 22-37 °C s rouškou</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 61: Záznam pro malé světlo Steris Xled v rozsahu 22-32 °C s rouškou</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 62: Záznam pro velké světlo Steris Xled v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou.....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 63: Záznam pro velké světlo Steris Xled v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou.....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 64: Záznam pro velké světlo Steris Xled v rozsahu 22-37 °C s rouškou.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 65: Záznam pro velké světlo Steris Xled v rozsahu 22-32 °C s rouškou.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 66: Záznam pro kombinaci světel Steris Xled v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek).....</i>	<i>46</i>

<i>Obrázek 67: Záznam pro kombinaci světel Steris Xled v rozsahu 22-32 °C s upravenou podožkou (autorský obrázek)</i>	46
<i>Obrázek 68: Záznam pro kombinaci světel Steris Xled v rozsahu 22-37 °C s rouškou (autorský obrázek)</i>	46
<i>Obrázek 69: Záznam pro kombinaci světel Steris Xled v rozsahu 22-32 °C s rouškou..</i>	46
<i>Obrázek 70: Záznam pro světlo Mach LED v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou</i>	47
<i>Obrázek 71: Záznam pro světlo Mach LED v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou</i>	47
<i>Obrázek 72: Záznam pro světlo Mach LED v rozsahu 22-37 °C s rouškou.....</i>	47
<i>Obrázek 73: Záznam pro světlo Mach LED v rozsahu 22-32 °C s rouškou.....</i>	47
<i>Obrázek 74: Záznam pro kombinaci světel Mach LED v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou</i>	48
<i>Obrázek 75: Záznam pro kombinaci světel Mach LED v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou</i>	48
<i>Obrázek 76: Záznam pro kombinaci světel Mach LED v rozsahu 22-37 °C s rouškou .</i>	48
<i>Obrázek 77: Záznam pro kombinaci světel Mach LED v rozsahu 22-32 °C s rouškou .</i>	48
<i>Obrázek 78: Malé světlo MarLux při vypnuté vzduchové ventilaci.....</i>	49
<i>Obrázek 79: Malé světlo MarLux při sepnuté vzduchové ventilaci.....</i>	49
<i>Obrázek 80: Velké světlo MarLux při vypnuté vzduchové ventilaci</i>	49
<i>Obrázek 81: Velké světlo MarLux při sepnuté vzduchové ventilaci</i>	49
<i>Obrázek 82: Kombinace světel MarLux při vypnuté vzduchové ventilaci</i>	49
<i>Obrázek 83: Kombinace světel MarLux při sepnuté vzduchové ventilaci</i>	49

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Hodnoty parametrů nastavované na termovizní kameře.....</i>	26
<i>Tabulka 2: Hodnoty parametrů pro termovizní kameru FLIR E6 [9].....</i>	27
<i>Tabulka 3: Parametry pro operační světla MarLux [12].....</i>	32
<i>Tabulka 4: Parametry pro operační světla Hanalux [13].....</i>	32
<i>Tabulka 5: Parametry pro operační světla Maquet Volista [14].....</i>	33
<i>Tabulka 6: Parametry pro operační světla Trumpf TruLight [15].....</i>	33
<i>Tabulka 7: Parametry pro operační světla Steris Xled [16].....</i>	34
<i>Tabulka 8: Parametry pro operační světla Mach LED [17].....</i>	34
<i>Tabulka 9: Hodnoty teploty naměřené referenčním měřidlem pro svítidla MarLux35</i>	
<i>Tabulka 10: Hodnoty teploty naměřené referenčním měřidlem pro svítidla Hanaulux.....</i>	37
<i>Tabulka 11: Hodnoty teploty naměřené referenčním měřidlem pro svítidla Maquet</i> <i>.....</i>	40
<i>Tabulka 12: Hodnoty teploty naměřené referenčním měřidlem pro svítidla TruLight</i> <i>.....</i>	42
<i>Tabulka 13: Hodnoty teploty naměřené referenčním měřidlem pro svítidla Steris Xled.....</i>	44
<i>Tabulka 14: Hodnoty teploty naměřené referenčním měřidlem pro svítidla Mach LED.....</i>	47
<i>Tabulka 15: Fotografie halogenového svítidla MarLux při sepnuté a vypnuté vzduchové ventilaci.....</i>	49
<i>Tabulka 16: Teploty naměřené pro svítidlo Marlux.....</i>	50
<i>Tabulka 17: Naměřené hodnoty pro svítidlo Hanaulux.....</i>	50
<i>Tabulka 18: Naměřené hodnoty pro svítidlo Maquet Volista.....</i>	50
<i>Tabulka 19: Naměřené hodnoty pro svítidlo Trumpf TruLight.....</i>	51
<i>Tabulka 20: Naměřené hodnoty pro svítidlo Steris Xled.....</i>	51
<i>Tabulka 21: Naměřené hodnoty pro svítidlo Mach LED.....</i>	51
<i>Tabulka 22: Tabulka nejistot měření pro Halogenová a LED svítidla.....</i>	52

Seznam symbolů a zkratk

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
E	W/m^2	Hustota zářivého toku
Φ	W	Světelný tok
S	m^2	Měřená plocha
ε	-	Emisivita
E_0	W/m^2	Hustota zářivého toku černého tělesa
σ	$W/(m^2K^4)$	Stefan – Boltzmannova konstanta
T	K	Termodynamická teplota
$E_{0\lambda}$	W/m^2	Spektrální hustota zářivého toku černého tělesa
c	m/s	Rychlost světla
h	Js	Planckova konstanta
λ_{max}	nm	Vlnová délka při maximální spektrální hustotě
b	mK	Wienova konstanta
I'	lx	Intenzita průchodu záření
I	lx	Intenzita průchodu záření při tloušťce vrstvy 0
α	-	Absorpční koeficient
δ	m	Tloušťka vrstvy

Seznam zkratk

Zkratka	Význam
NTC senzor	Negative temperature coefficient senzor – teplotní senzor, jehož odpor klesá se vzrůstající teplotou
FN Motol	Fakultní nemocnice v Motole
LED dioda	Light-Emitting diode – dioda vyzařující světlo
tzv.	Takzvaný
FPA	Focal plane arrays – ohnisková pole
CCD	Charge-couple device – světločivný snímací čip
ČR	Česká republika

1 Úvod

Analýza tepelného záření je téma velmi aktuální a vhodné pro obor, který studuji. Spojuje v sobě technickou část, zastoupenou hlavně měřením termovizní kamerou, principy pyrometrie a různými technickými parametry operačních lamp, a část medicínskou jako je ohřev pacienta a fakt, že se jedná o přeměňování vybavení zdravotnického zařízení.

Tato práce se zabývá způsobem, jak změřit tepelné záření operačních svítidel a porovnáváním tohoto záření u různých typů operačních světel za různých podmínek. Tyto technické parametry operačních svítidel jsou důležité především proto, aby pacient nebyl při operaci nadměrně zahříván.

Pro měření tepelného záření se využívá bezdotykové měření teploty, pyrometrie, které je realizováno pomocí termovizní kamery. Protože naměřené hodnoty povrchové teploty mohou být ovlivněny velkým množstvím fyzikálních vlastností jak samotného měřeného povrchu, tak okolního prostředí, je vhodné využít i referenční měřidlo, snímající teplotu přímo z měřeného povrchu. Konkrétně bylo využito termovizní kamery FLIR E6, referenčního kontaktního měřidla, NTC senzoru připojeného k multimetru Uni-T UT56 a operačních svítidel na operačních sálech FN Motol. Porovnání bylo zaměřeno na čtyři typy svítidel s LED diodami a dva typy halogenových svítidel.

1.1 Přehled současného stavu

Bezdotykové měření se v posledních letech rychle rozvíjí a je využíváno ve stále více odvětvích. Především v technickém a strojírenském sektoru se často využívá například při kontrole součástek. Je to velmi výhodný způsob měření teploty, protože nehrozí ovlivnění měřeného objektu měřicím přístrojem a naopak.

Nicméně měření tepelného záření operačních svítidel tak, jak je prováděno v průběhu této praxe se běžně neprovádí a nenašla jsem ani žádné záznamy, že by někdy prováděno bylo a není ani součástí pravidelných bezpečnostních technických kontrol. Hodnoty ohřevu pacienta operačními svítilkami taktéž nejsou uvedeny v normách ČSN EN 60601-2-41, ČSN EN 60598-2-25, ČSN EN 12464-1, které se zabývají technickými parametry operačních svítidel a pravidly jejich kontroly. Byla provedena měření, která se týkala ohřevů chirurgů na operačních sálech, kde byla jako jeden ze zdrojů tepla uvedena operační svítilka [1], nicméně měření týkající se pouze světel neprobíhala.

Obecně je známo, že operační svítilka pacienta ohřívají, ale doposud nikdo neměřil o kolik a jakým způsobem. Měření mnou provedená jsou převážně na experimentální

úrovni, protože pro měření byly využity speciálně upravované podložky, které se za běžného provozu u pacientů nepoužívají. Pro simulované reálné prostředí výsledky mohou být zkresleny vlastnostmi měřeného povrchu.

1.2 Cíle práce

Cílem této práce je naměřit hodnoty tepelného záření dvou druhů světel nacházejících se na operačních sálech FN Motol. Jedná se o starší typ světel, světla halogenová, a o světla s LED diodami na zrekonstruovaných sálech. Obě hodnoty je nutné porovnat a zjistit, jakým způsobem se změní a jsou-li ovlivněny působením vzduchové ventilace užívané na operačních sálech. Abychom mohli tyto údaje získat, je nutné vytvořit metodiku měření v experimentálním prostředí. Dalším cílem je nasimulovat reálné prostředí a zjistit, o kolik stupňů je operační pole v průběhu operace zahříváno.

2 Teoretická část práce

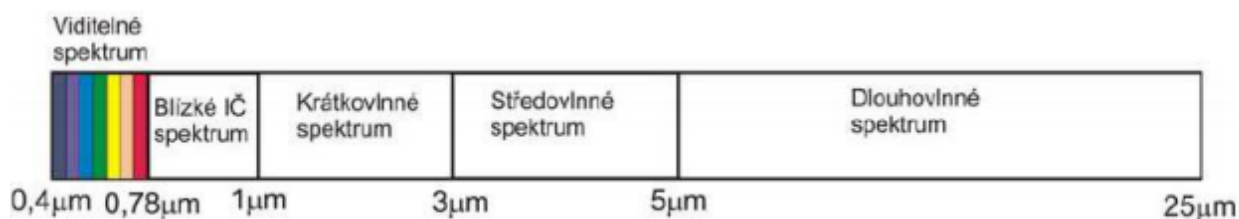
V této práci se zabývám získáním dat pomocí termovizní kamery, která měří teplotu daného povrchu. Aby tato data i jejich vyhodnocení byla průkazná, je nutné seznámit se nejprve s problematikou několika sfér, které se tohoto tématu dotýkají. Na základě těchto znalostí je potom možné práci strukturovat a stanovit vhodné metody jejího vypracování. Právě tato témata jsou zpracována v následujících odstavcích.

2.1 Tepelné záření

Tepelné záření je elektromagnetické záření vyzařované každým tělesem s vyšší teplotou, než je absolutní nula. Tepelné záření vzniká přeměnou kinetické energie atomů hmoty na elektromagnetické záření, tedy čím rychleji se atomy pohybují, tím vyšší je teplota tělesa a tím více záření vysílá do okolí. Proto je také teplota jednou z nejčastějších a nejdůležitějších fyzikálních veličin, ze kterých se určuje energie tělesa. Všechny objekty se navzájem ovlivňují vyzařováním elektromagnetického záření. Tento jev se nazývá radiační přenos a pro tuto práci je jedním z klíčových.

Teplo se může šířit třemi způsoby, jsou to vedení, proudění a radiace. Rozdíl mezi nimi je, že k radiaci dochází v prostředí, kde jsou molekuly od sebe mnohem více vzdáleny, než je tomu u zbylých dvou typů šíření. Proto se v této práci budu zabývat radiací, kde médiem pro přenos elektromagnetického záření je vzduch. Nicméně k radiaci může docházet i ve vakuu, to je důvod, proč na zemský povrch může dopadat elektromagnetické záření ze slunce. Tento přenos je založen na principu elektromagnetické emise a absorpce.

Elektromagnetické záření se dělí podle vlnové délky nebo frekvence. Typ elektromagnetického záření, které je vyzařováno tělesem se nazývá charakteristické, vlnová délka závisí na teplotě tělesa. Přenos tepla radiací se pohybuje ve vlnových délkách od 0,78-100 μm , což odpovídá infračervenému světlu. [2] [3]



Obrázek 1: Rozdělení elektromagnetického spektra [4]

Právě k radiaci dochází v průběhu operace, kde samozřejmě kromě světél vyzařují elektromagnetické záření jak ostatní přístroje, tak i osoby nacházející se na operačním sále. Elektromagnetické záření světél je však rozdílné v tom, že zatímco ostatní zářiče vyzařují ve všech směrech stejně, svítidla mají účinný výkon zaměřený do konkrétního prostorového úhlu nad operačním polem. Proto je jejich záření zaměřené na konkrétní místo mnohem silnější, než záření ostatních zářičů.

2.2 Termovize

Termovizi můžeme zjednodušeně definovat jako plošné bezdotykové měření povrchové teploty daného objektu. To se provádí tzv. infračervenou pyrometrií, která závisí na povrchové teplotě těles. Infračervená pyrometrie je popsána několika veličinami:

Energie vyzářená jednotkou plochy za jednotku času je tzv. hustota zářivého toku E (W/m^2) a je dána vztahem [5]:

$$E = \frac{d\Phi}{dS} (W/m^2) \quad (1)$$

Φ – světelný tok (W)

S – měřená plocha (m^2).

Další veličiny, které nám pomáhají definovat termovizi, jsou vlnová délka (nm), emisivita (-) a teplota (K).

Fyzikální zákony

Pro každé elektromagnetické záření platí, že se může odrážet, propouštět a pohlcovat. Vyskytuje se ve dvou formách a to vlnové a korpuskulární. Vlnový charakter odpovídá šíření a pohlcování záření ve vlnách, zatímco korpuskulární šíření a pohlcování v kvantech. Právě tyto jevy jsou popsány následujícími fyzikálními zákony. Tyto jevy je možné jednotně popsat pro těleso s danými vlastnostmi, proto se využívá černého tělesa, které je dokonalým tepelným zářičem, jeho emisivita $\varepsilon = 1$, tudíž dokonale pohlcuje veškeré tepelné záření dopadající na jeho povrch. Takové těleso neexistuje, nicméně jako vzor k porovnání s ostatními (šedými) tělesy je vyhovující. [6] [7]

Stefan – Boltzmannův zákon

„Každé těleso, které má nenulovou absolutní teplotu září, přičemž hustota zářivého toku je úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty.“ [6]

$$E_0 = \sigma \cdot T^4 \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{)} \quad (2)$$

E_0 – hustota zářivého toku černého tělesa ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

σ – Stefan – Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$)

T – termodynamická teplota (K)

Pro jiné těleso než absolutně černé by bylo nutné do vzorce přidat jeho emisivitu. [6]

Planckův vyzařovací zákon

„Záření o frekvenci f může být vyzařováno, nebo pohlcováno jen po kvantech energie o velikosti $e = h \cdot f$.“ [6]

$$E_{0\lambda} = \frac{dE_0}{d\lambda} = c^2 h \cdot \frac{2\pi\lambda^{-5}}{e^{\frac{ch}{\sigma T \lambda}} - 1} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (3)$$

$E_{0\lambda}$ – spektrální hustota zářivého toku černého tělesa (W/m^2)

E_0 – hustota zářivého toku černého tělesa (W/m^2)

c – rychlost světla ($c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$)

h – Planckova konstanta ($h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)

σ – Stefan – Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$)

T – termodynamická teplota (K)

Z tohoto zákona také vyplývá, že se zvyšující se teplotou tělesa se zvyšuje spektrální hustota zářivého toku. [6]

Wienův posunovací zákon

„S rostoucí teplotou zářiče se posouvá maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku ke kratším vlnovým délkám.“ [6]

$$\lambda_{max} \cdot T = b \text{ (mK)} \quad (4)$$

λ_{max} – vlnová délka při maximální spektrální hustotě zářivého toku (nm)

T – termodynamická teplota (K)

b – Wienova konstanta ($b = 2,897 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$)

Tento zákon nám tedy říká, že čím je větší teplota tělesa, tím vyzařuje záření kratších vlnových délek a vyšších frekvencí. [6] [7]

Kirchhoffův zákon

Po dopadu elektromagnetického záření se ono záření rozdělí na tři složky dle vlastností látky, na kterou dopadá.

$$\Phi = \Phi_{\text{prošlý}} + \Phi_{\text{odražený}} + \Phi_{\text{pohlčený}} \quad (5)$$

Φ – zářivý tok (W)

Pokud každý ze zářivých toků ze součtu vydělíme zářivým tokem celkovým, dostaneme tři bezrozměrné veličiny a to reflexi (odraz), transmisi (propustnost) a absorpci (pohltivost), která je pro tuto práci obzvláště důležitá. Poměr této veličiny ku teplotě a vlnové délce nám udává veličinu zvanou emisivita. [7]

Lambert – Beerův zákon

Když záření prochází látkou s určitým koeficientem absorpce a o určité tloušťce, sníží se intenzita tohoto záření. Lambert – Beerův zákon nám udává právě úbytek této intenzity.

$$I' = I \cdot e^{-\alpha\delta} \quad (6)$$

I' – intenzita průchodu záření (lx)

I – intenzita průchodu záření při tloušťce vrstvy 0 (lx)

α – absorpční koeficient (-)

δ – tloušťka vrstvy (m)

Záření, které dopadá na povrch určité látky a není odraženo, ani neprojde, předává jejím atomům kinetickou energii, čímž se zvyšuje celková energie atomu a tedy jeho teplota. Tato energie se ovšem může zpátky změnit ve světelnou a vznikne tak děj zvaný luminiscence. [7]

2.2.1 Termovizní kamery

Pro měření povrchové teploty těles a tepelného záření, které vyzařují, se využívají termovizní kamery. Termovizní kamera je přístroj, který zobrazí rozdělení teplot na povrchu sledované plochy. Každý termovizní systém má tři části:

- 1) modul optiky – zaměřuje záření na infračervený detektor, případně provádí optický rozklad (vodorovný a svislý) obsahuje referenci teploty
- 2) modul detektoru – převádí záření na elektrický signál
- 3) software – převádí analogový signál detektoru na digitální, ten pak na teplotu a vytváří obraz. [4]

Existují dva druhy termovizních kamer ty s opticko-mechanickým rozkladem obrazu (skenovací systém) a kamery s maticovým detektorem, také označované jako FPA.

Princip systémů s opticko-mechanickým rozkladem je založen na principu postupného zavádění vstupní informace. Kamera postupně skenuje celý obrázek pomocí optické soustavy, která se rychle pohybuje buď ve směru řádků, nebo sloupců a přenáší zachycené záření na detektor či celou mozaiku detektorů. Kamery, které pracují na tomto principu, jsou dražší a využívají se především k armádním účelům. [4]

Pro kamery s maticovým detektorem jsou využívány velké matice malých separátních detektorů, ty jsou podobné CCD snímačům používaných v klasických kamerách. Celá snímaná oblast je optikou zaostřena na matici umístěnou v ohniskové rovině optického systému. Každý pixel výsledného termosnímku poté odpovídá jednomu detektoru v matici. Tyto systémy se proto také označují jako systémy se současným zaváděním vstupní informace. Z důvodu nižší výrobní ceny těchto termokamer jsou využívány především v komerční sféře [4]

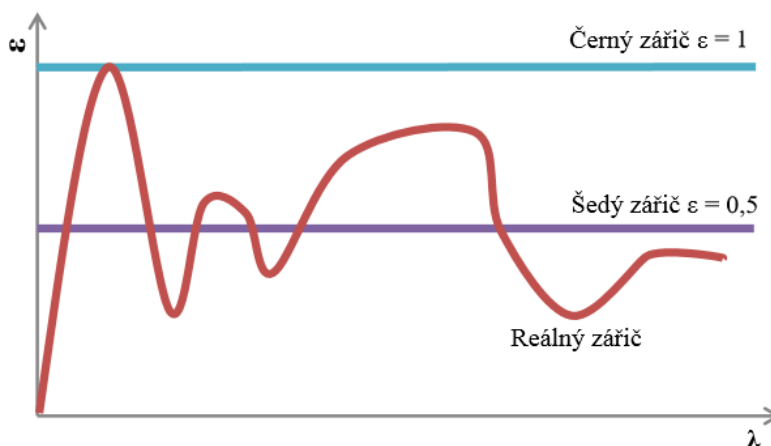
2.2.2 Emisivita

Emisivita je nejdůležitější z termografických veličin, je bezrozměrná a nabývá hodnoty od 0 do 1. Je to vlastnost povrchu měřeného tělesa, která udává jeho odrazivost. Pro černé těleso (dokonale pohlcuje) se emisivita rovná 1. Pro bílé těleso potom 0 a pro těleso šedé se pohybuje v tomto rozmezí. Emisivitu lze spočítat ze vzorce: [8]

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} (-) \quad (7)$$

Kde E (W/m^2) je intenzita vyzařování reálného tělesa a E_0 (W/m^2) je vyzařování černého tělesa. [8]

Stanovit emisivitu u takovýchto těles, selektivních zářičů, může být značný problém, pro určité materiály existují tabelované hodnoty emisivity, ale vzhledem k tomu, že závisí jak na textuře a lesklosti materiálu, tak na jeho vlnové délce, může být její určení poměrně náročné. U lesklých materiálů může i malá změna v hodnotě emisivity, jedná se o řády desetin, způsobit velký rozdíl ve výsledných hodnotách teplot. Závislost emisivity na vlnové délce je znázorněna v následujícím grafu. [8]



Obrázek 2: Graf závislosti emisivity na vlnové délce [6]

Při měření termovizní kamerou je nutné emisivitu nastavit manuálně v nastavení kamery, kde obvykle bývá na výběr z různých hodnot emisivit pro různé materiály.

2.3 Operační svítidla

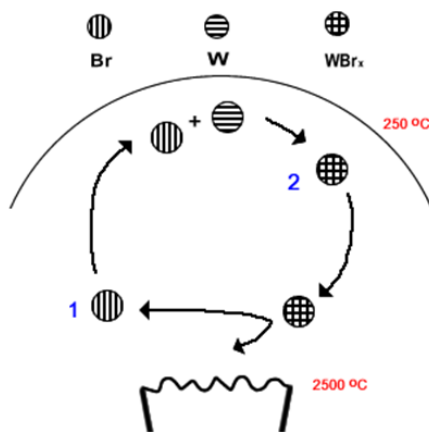
Na operačních sálech ve FN Motol se nachází dva typy operačních svítidel. Starší z nich jsou halogenová, jež byla hojně využívána po celé 20. století, nicméně dnes je značnou rychlostí nahrazeny novějšími typy svítidel, LED svítidly. Ve FN Motol se nachází svítidla od různých výrobců, za halogenová jsou to svítidla MarLux od firmy Gebrüder Martin GmbH (Německo) a svítidla Hanaulux od firmy Heraeus (Německo). LED svítidla potom zajišťují firmy MAQUET (Německo) se svítidly Maquet Volista, Trumpf Medizin Systeme GmbH+Co.KG (Německo) se svítidly Trumpf TruLight, Steris Surgical Technologies SAS (USA) se svítidly Steris Xled a firma Dr. Mach (Německo) se svítidly Mach LED.

2.3.1 Halogenová svítidla

Princip halogenových žárovek je velmi podobný jako princip běžných žárovek. Rozdíl mezi oběma žárovkami je v tom, že u halogenových žárovek je prostor mezi wolframovým vláknem a skleněnou baňkou vyplněn směsí s příměsí halových prvků jako jsou jód, brom a xenon. [5]

Halogenové žárovky se na operačních sálech využívaly mnohem častěji než žárovky normální z důvodu halových jevů. To znamená, že u normálních žárovek se wolframové vlákno vlivem tepla odpařuje a usazuje se na vnitřní straně baňky, časem se vlákno zeslabí a propálí, také dochází k zastínění světla usazeným wolframem. Tento jev u halogenových žárovek nenastává, tam se wolfram odpařuje a uvnitř baňky reaguje s halovými prvky. Sloučenina wolframu a plynů je pomocí sil způsobených tepelným polem přitahována zpět k vláknu, kde se wolfram usazuje – vlákno se obnovuje. Z toho jasně vyplývá, že halogenové žárovky mají mnohem delší životnost a i intenzita osvětlení je lepší. [5]

Z principu žárovky vyplývá, že wolframové vlákno se při průchodu elektrického proudu zahřívá a až 95% dodané energie se přemění na teplo, tím se její měrný výkon snižuje. Dnešní halogenové žárovky jsou vybaveny selektivním filtrem. Jedná se o tzv. IRC technologii, kde se část infračerveného (tepelného) záření odráží zpět do žárovky, čímž se měrný výkon žárovky zvyšuje až o 25%. [5]



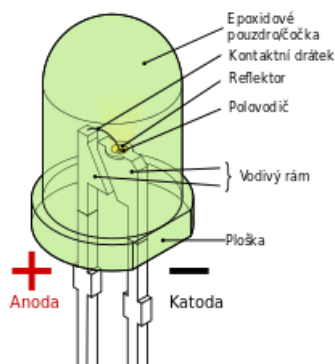
Obrázek 3: Princip IRC technologie [18]

2.3.2 LED svítidla

Tato svítidla v dnešní době nahrazují v nemocnicích halogenová. Dochází k tomu především díky dlouhé životnosti a vysoké účinnosti, jedná se až o desetinásobek měrného výkonu halogenových žárovek. LED svítidla jsou složena z LED diod,

polovodičových elektronických součástek, jejichž princip je naprosto odlišný od principu žárovek. Světlo vyzařované LED diodami je generováno elektrickým proudem procházejícím přes PN přechod, který vyzařuje velmi úzké světelné spektrum (paprsek je prakticky monochromatický). [5]

Pro operační svítidla je velmi důležitá barva světla, která je určena veličinou zvanou chromatičnost (K), u nejnovějších typů světel je nastavitelná. Při operacích se této vlastnosti využívá, aby vynikla struktura povrchu orgánů a byla snadno identifikovatelná. Každý orgán má strukturu mírně odlišnou a pomocí změny chromatičnosti barvy lépe vyniknou různé povrchy. Nejlépe nám tuto skutečnost zajistí odstíny bílé barvy světla, kterých lze dosáhnout dvěma způsoby: mísením monochromatických LED anebo pomocí konvertoru vlnových délek. První způsob funguje na principu spojení monochromatických světelných paprsků o různých vlnových délkách (například spojíme-li tři paprsky, můžeme dostat RGB zdroj), čím více paprsků o různých vlnových délkách spojíme, tím se zvýší kvalita barevného podání výsledného bílého světla. Druhý způsob využívá absorpce části primárně vyzářeného světla o kratší vlnové délce (většinou modrá) kolektorovým materiálem a jeho opětovného vyzáření jako paprsku o delší vlnové délce. Nejpoužívanější konvertory jsou na bázi fosforu. [5]



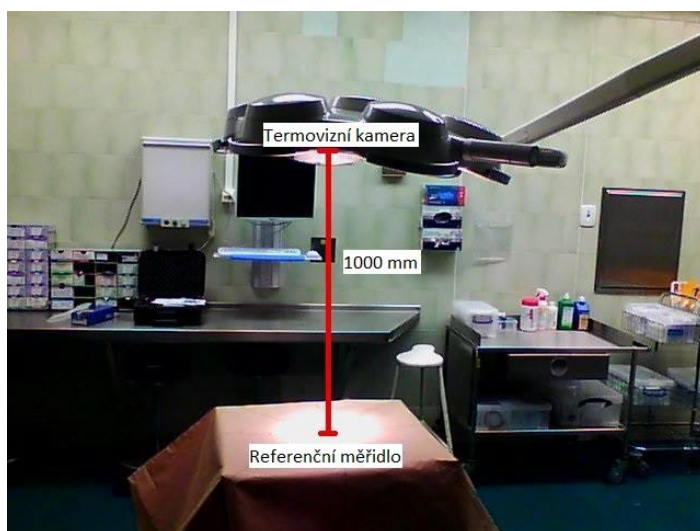
Obrázek 4: Schéma LED diody [19]

3 Metody

Tato část práce se zabývá metodikou postupu při získávání naměřených dat a jejich zpracováním. Než bylo vůbec možné začít s měřeními, bylo nutné se seznámit s teorií z předchozích odstavců a také vytvořit měřicí protokol se všemi náležitostmi, zvolit vhodné měřidlo a referenční měřidlo, aby především v části měření, kde simulujeme reálné prostředí, byly naměřeny průkazné hodnoty.

Měření probíhala celkově na šesti operačních svítidlech, z nichž dvě byla halogenová a čtyři využívala LED technologie. Tato světla jsme proměřovali na šesti operačních sálech v dospělé části FN Motol.

Nejprve bylo zvoleno umístění měřidel jako na obrázku 5, kde je patrné rozložení operačního svítidla, odkládacího stolku sloužícího jako stojan pro speciálně upravenou podložku a jejich vzdálenost, je zde také naznačeno umístění jak hlavního, tak referenčního měřidla.



Obrázek 5: Rozložení měřicí soustavy na operačním sále v průběhu měření (autorský obrázek)

3.1 Termovizní kamera

Jako vhodné měřidlo pro měření tepelného záření operačních svítidel byla zvolena termovizní kamera FLIR E6 od výrobce FLIR (Oregon), která je založena na principu maticových detektorů.



Obrázek 6: Termovizní kamera FLIR E6 [9]

Aby bylo měření průkazné a hodnoty naměřené termovizní kamerou odpovídaly reálným hodnotám, je nutné na termovizní kameře před začátkem měření provést nastavení několika parametrů. Co se týče měření v této práci, byly nastavovány tyto parametry: Vzdálenost kamery od povrchu, emisivita zaměřovaného povrchu, okolní teplota a dále nastavení ovlivňující vzhled obrázku, tedy barevná škála a zaměření na tzv. Hot spot, tedy na nejteplejší místo, nacházející se v užším záběru kamery.

Tabulka 1: Hodnoty parametrů nastavované na termovizní kameře

Parametr	Hodnota
Vzdálenost od povrchu	1 m
Emisivita	0,97
Okolní teplota	21 - 22 °C

Emisivita byla zvolena dle emisivity speciálně upravené podložky. U parametru okolní teplota je uvedeno rozmezí teplot, to je z důvodu rozdílných teplot na operačním sále. Konkrétní teplota pro určité svítidlo je vždy uvedena v měřicím protokolu pro dané měření.

Tabulka 2: Hodnoty parametrů pro termovizní kameru FLIR E6 [9]

Parametr	Hodnota
Optika	45° × 34°
Počet barevných palet	3
Typ (výrobce)	Flir E6
Min. teplotní rozsah	-20 °C
Rozměr, šířka	95 mm
Rozlišení displeje	320 x 240 px
Základní přesnost (±)	2 %
Teplotní citlivost	60
Hmotnost	575 g
Frekvence opakování obrazu	9 Hz
Rozlišení senzoru	160 x 120 px
Max. teplotní rozsah	250 °C
Rozměr, výška	140 mm
Ostření	Pevné zaostření
Základní přesnost měření (±)	2 °C
Počet pamětí	500
Minimální zaostřovací vzdálenost	50 cm

Referenční měřidlo

Hodnoty naměřené termovizní kamerou pro podložku s danou emisivitou podléhají pouze nepřesnostem měřidla a jsou tudíž průkazné v intervalu, který udává výrobce. Komplikovanější situace nastává u simulace reálného prostředí, kdy emisivitu sterilní krycí roušky neznáme, a tudíž je nutné dodat referenční měřidlo, které ověří správnost měření. Protože termovizní kamery využívají bezkontaktní měření, byl zvolen kontaktní způsob snímání teploty.

Pro tyto účely byl využit NTC senzor připojený konektorem na multimetr schopný převést změnu napětí na teplotní stupnici. Konkrétně se jednalo o přístroj UT 56 od výrobce Uni-T (Čína).



Obrázek 7: Multimetr UT56 [10]

Senzor NTC, připojený k multimetru, byl umístěn doprostřed kruhu tvořeného dopadajícím světelným kuželem. Zde byl upevněn a přibližně po pěti minutách, když došlo k ustálení hodnoty měřené teploty na displeji, byla hodnota odečtena a zaznamenána do měřicího protokolu.

3.2 Měřicí podložka

Důležitou součástí měření byla podložka umístěná na odkládací stolek. Ten je sám o sobě vyroben z kovu, což znamená, že je lesklý a jeho odrazivost je velmi vysoká, tato skutečnost by mohla ovlivnit měření v řádu několika jednotek, v extrémním případě až desítky, stupňů Celsia, což by zkreslovalo výsledky práce. Protože termovizní měření je z velké míry ovlivňováno emisivitou měřeného povrchu, bylo nutné zvolit vhodný materiál, který bude splňovat kritéria o známé emisivitě.

3.2.1 Podložka s danou emisivitou

Pro experimentální prostředí byl jako podložka zvolen speciálně upravený papír pokrytý bílým sprejem Therma Spray 500 s danou emisivitou 0,97. Tato skutečnost zajistila, že při správném nastavení termovizní kamery nebude měření zkreslováno odrazivostí materiálu.



Obrázek 8: Therma Spray 500 využitý k úpravě povrchu [11]

Therma Spray 500 obsahuje bílou nevodivou barvu, odolnou proti otěru, která vydrží teploty do 500°C. Z toho vyplývá, že je často užívána ve strojírenství například pro kontrolu součástek a dalších místech, kde se vyskytují vysoce zahřáté, lesklé a vodivé materiály, u kterých je třeba bezkontaktně měřit teplotu.

3.2.2 Sterilní krycí rouška

Pro simulaci reálného prostředí byla využita sterilní krycí rouška, která zakrývá pacienta v průběhu operace. Rouška je modrá, stejně jako označení veškerého sterilního prostoru na operačním sále, a tudíž odráží elektromagnetické záření o vlnové délce 480 – 510 nm. Tato skutečnost znamená, že se rouška bude zahřívat méně, než kdyby odrážela elektromagnetické záření, které se ve spektru blíží infračervenému. Na druhé straně se zahřívá více, než je tomu v případě bílých podložek.

Pro správnost měření by bylo potřeba určit emisivitu sterilní krycí roušky. Existuje několik způsobů, jak zjistit emisivitu neznámého materiálu. Nejprve je to zahřátí daného vzorku na známou teplotu a následně měnit hodnotu emisivity na termovizní kameře, dokud se nebude shodovat s teplotou, na kterou jsme objekt nahřáli. Tento způsob jsme při měření v této práci nepoužili, neboť by byl komplikovaný na provedení. [4]

Další metodou je upravit materiál speciálním nátěrem s danou emisivitou, čehož bylo využito při experimentálním měření, ovšem v případě simulace reálného prostředí se toho využít nedá, neboť není žádoucí měnit vlastnosti materiálu. [4]

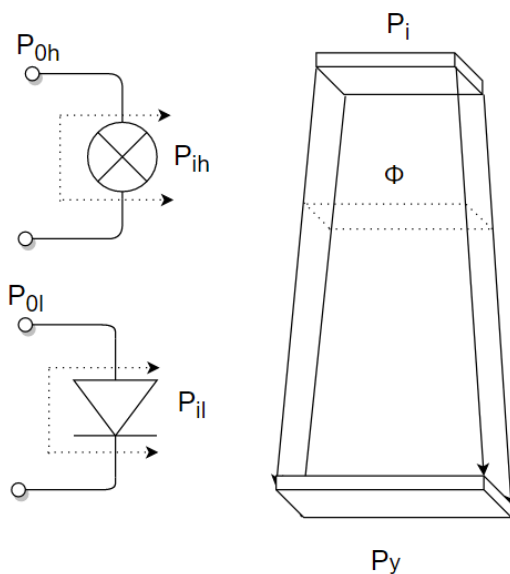
Posledním z nejčastějších způsobů určování emisivity u neznámé látky je kombinace bezkontaktního měření s měřením kontaktním. Právě tato metoda byla zvolena při řešení této práce. Jde tedy o to, že se na kameře snažíme dosáhnout stejné teploty, která byla naměřena kontaktním teploměrem, pomocí změn hodnot emisivity. [4]

3.3 Měřená operační svítidla

Ve FN Motol bylo dohromady naměřeno šest operačních svítidel, od šesti výrobců, kteří zajišťují technické vybavení v tomto odvětví. Jejich krátký popis a shrnutí základních parametrů jsou obsahem následujících odstavců.

Pro každé ze světél bylo pořízeno osm fotografií. Čtyři fotografie byly pořízeny pro speciálně upravený povrch therma sprejem a čtyři pro povrch potažený sterilní krycí rouškou. Protože se teploty na fotografiích značně liší, byly zvoleny i dva tepelné rozsahy a to 22-32 °C a 22-37°C. Pro každý povrch i každý z rozsahů byly pořízeny dvě fotografie a to barevná a černobílá. Z každé pořízené fotografie (příklady uvedeny ve vypracování) bylo možné odečíst hodnotu maximální teploty a z nich určit konečný ohřev.

Ohřev ovlivňuje především výkon operačních svítidel a jejich účinnost.



Obrázek 9: Přenos výkonu při provozu světel

Rozdíl v obou typech svítidel je v tom, že výkony P_{0h} se pohybují nejčastěji kolem 140 W, ale jejich účinnost je jen kolem 5% [5], zatímco u LED diod se nejvyšší hodnoty P_{0l} pohybují kolem 85 W a jejich účinnost je kolem 30% [5]. Vidíme tedy, že zatímco výkon P_0 byl u halogenových žárovek vyšší než u LED diod, už výkon P_i je vyšší u LED diod přibližně o 10 W, ostatní výkon se ztratí v podobě tepla už v oblasti zářiče, čímž se teplota podložky ovlivní jen minimálně. Důležitou součástí ohřevu podložky je vyzářený výkon v prostorovém úhlu Φ , který rozhoduje, jak moc se podložka bude ohřívat. Pro výpočet výkonu P_y využijeme vztahu:

$$\frac{\Phi}{4\pi} \cdot P_i = P_y \quad (8)$$

3.3.1 MarLux

Světla MarLux od firmy Gebrüder Martin GmbH (Německo) jsou druhými nejstaršími světly, které se ve FN Motol stále nacházejí a nejstarší z nich pocházejí z roku 1991. Nevyskytují se však na superseptických a aseptických operačních sálech, jen na zákrovových sálkách. Jsou to světla využívající halogenových žárovek a spadají tedy do kategorie mnou proměřovaných halogenových svítidel.

Tabulka 3: Parametry pro operační světla MarLux [12]

Parametr	Velké světlo	Malé světlo
Intenzita středového osvětlení ve vzdálenosti 1m	130 000 lx	85 000 lx
Spotřebovaný výkon	150 W	120 W
Průměr světelného pole pro osvětlenost 10%	16-26 cm	16-26 cm
Barva světla	4200 K	4200 K
Energetické osvětlení	456 W/m ²	298 W/m ²
Minimální životnost	600-1000 h	600-1000 h

3.3.2 Hanaulux

Nejstarší stále využívaná světla ve FN Motol jsou světla Hanaulux od firmy Heraeus (Německo), byla na sály této nemocnice nainstalována v lednu roku 1991. Stejně jako první uváděná patří do kategorie halogenových svítidel se speciálně upravenými žárovkami.

Tabulka 4: Parametry pro operační světla Hanaulux [13]

Parametr	Velké světlo	Malé světlo
Intenzita středového osvětlení ve vzdálenosti 1m	130 000 lx	90 000 lx
Světelná účinnost	250 lm/W	250 lm/W
Průměr světelného pole pro osvětlenost 10%	16 cm	20-32 cm
Barva světla	4300 K	4300 K
Energetické osvětlení	481 W/m ²	360 W/m ²
Minimální životnost	600-1200 h	600-1200 h

3.3.3 Maquet Volista

Světla Maquet Volista od firmy MAQUET (Německo) jsou nejrozšířenějšími světly v dospělé části FN Motol. Jedná se o světla s LED diodami, jde tedy o novější typ světél, která postupně nahrazují světla halogenová.

Tabulka 5: Parametry pro operační světla Maquet Volista [14]

Parametr	Velké světlo	Malé světlo
Intenzita středového osvětlení ve vzdálenosti 1m	160 000 lx	120 000 lx
Spotřebovaný výkon	90 W	60 W
Průměr světelného pole pro osvětlenost 10%	20-25 cm	20-25 cm
Barva světla	3900-5100 K	3900-5100 K
Energetické osvětlení	<500 W/m ²	<500 W/m ²
Minimální životnost	60 000 h	60 000 h

3.3.4 Trumpf TruLight

Další z řady proměřovaných světél jsou světla Trumpf TruLight od firmy Trumpf MEDizin Systeme GmbH+Co.KG (Německo). Tato světla se taktéž řadí mezi světla využívající systém LED diod.

Tabulka 6: Parametry pro operační světla Trumpf TruLight [15]

Parametr	Velké světlo	Malé světlo
Intenzita středového osvětlení ve vzdálenosti 1m	160 000 lx	160 000 lx
Spotřebovaný výkon	145 W	90 W
Průměr světelného pole pro osvětlenost 10%	20-30 cm	20-30 cm
Barva světla	3500-5000 K	3500-5000 K
Energetické osvětlení	481 W/m ²	360 W/m ²
Minimální životnost	30 000 h	30 000 h

3.3.5 Steris Xled

Tato světla s LED diodami jsou zajišťována firmou Steris Surgical Technologies SAS (USA). Jako jediná ze všech světél v dospělé části FN Motol nepochází z Německa, nicméně distributor dodávající světla do ČR a dalších Evropských zemí je Německá firma Bbraun.

Tabulka 7: Parametry pro operační světla Steris Xled [16]

Parametr	Velké světlo	Malé světlo
Intenzita středového osvětlení ve vzdálenosti 1m	160 000 lx	90 000 lx
Spotřebovaný výkon	Max 85 W	Max 85 W
Průměr světelného pole pro osvětlenost 50%	15 cm	10 cm
Barva světla	4400 K	4400 K
Minimální životnost	40 000 h	40 000 h

3.3.6 Mach LED

Posledními zmíněnými světly jsou světla Mach LED od firmy Dr. Mach (Německo). Zajímavostí u těchto světél je, že na rozdíl od všech zbylých se na operačním sále nenachází jedno velké a jedno menší světlo, nýbrž dvě světla shodné velikosti. Z tohoto důvodu jsou v tabulce i v dalších měřeních uváděny hodnoty jen pro jedno světlo.

Tabulka 8: Parametry pro operační světla Mach LED [17]

Parametr	Světlo
Intenzita středového osvětlení ve vzdálenosti 1m	140 000 lx
Světelná účinnost	285 lm/W
Průměr světelného pole pro osvětlenost 10%	14 cm
Spotřebovaný výkon	55 W
Barva světla	4500 K
Energetické osvětlení	499 W/m ²
Minimální životnost	50 000 h

4 Výsledky

U každého ze svítidel byl zvlášť měřen velký a malý satelit světla a kombinace obou satelitů. Ke každému ze svítidel bylo pořízeno osm fotografií. Protože účel černobílých fotografií byl hlavně získání většího počtu hodnot pro statistické zhodnocení, nejsou v práci obsaženy, neboť jejich výpovědní hodnota není rozhodující.

4.1 Halogenová svítidla

MarLux

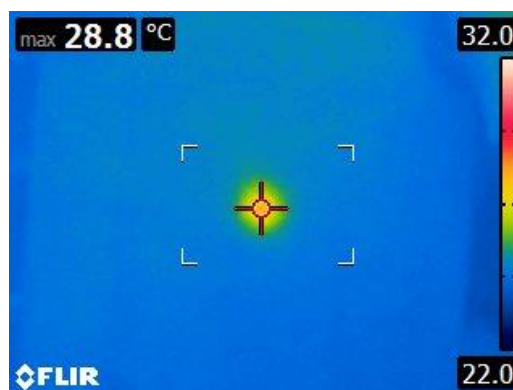
Tabulka 9: Hodnoty teploty naměřené referenčním měřidlem pro svítidla MarLux

Podmínky	Teplota naměřená referenčním měřidlem (°C)
Malé světlo – upravená podložka	29
Malé světlo – rouška	35
Velké světlo – upravená podložka	29
Velké světlo – rouška	34
Kombinace světél – upravená podložka	34
Kombinace světél – rouška	42

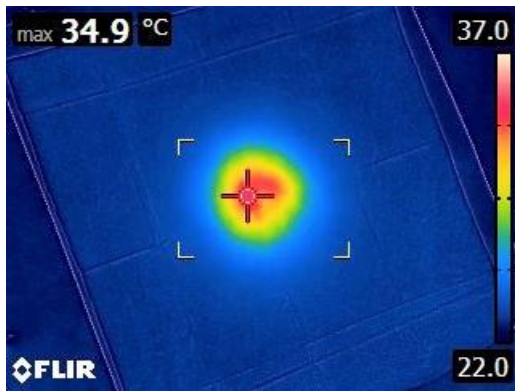
Malé světlo



Obrázek 10: Záznam pro malé světlo MarLux v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 11: Záznam pro malé světlo MarLux v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)

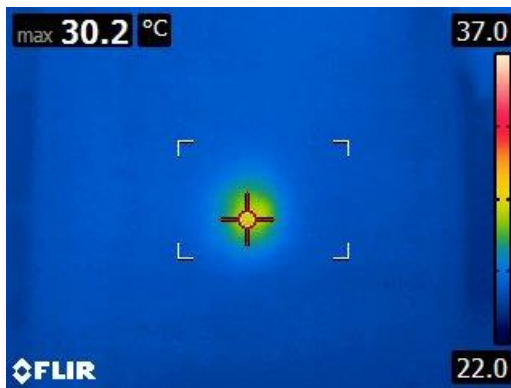


Obrázek 12: Záznam pro malé světlo MarLux v rozsahu 22-37 °C s rouškou (autorský obrázek)

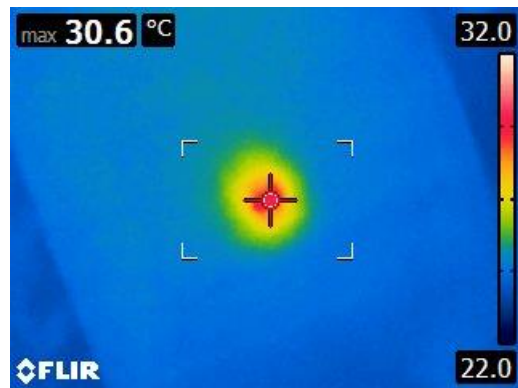


Obrázek 13: Záznam pro malé světlo MarLux v rozsahu 22-32 °C s rouškou (autorský obrázek)

Velké světlo



Obrázek 14: Záznam pro velké světlo MarLux v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 15: Záznam pro velké světlo MarLux v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)

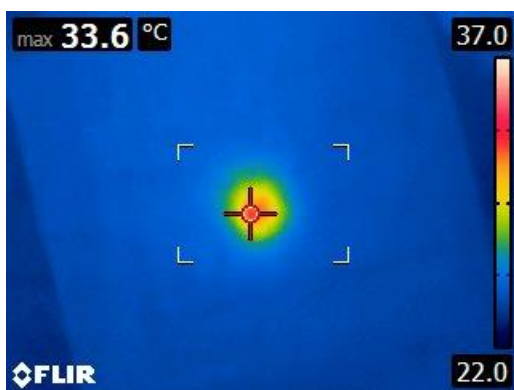


Obrázek 16: Záznam pro velké světlo MarLux v rozsahu 22-37 °C s rouškou (autorský obrázek)

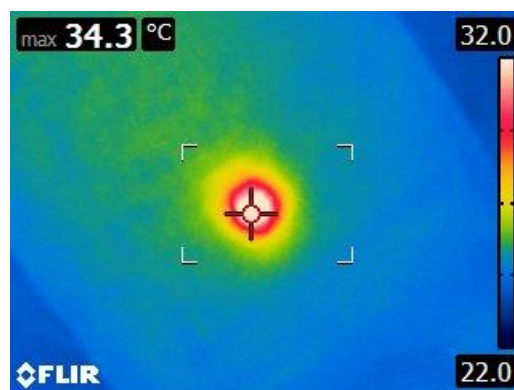


Obrázek 17: Záznam pro velké světlo MarLux v rozsahu 22-32 °C s rouškou (autorský obrázek)

Kombinace světél



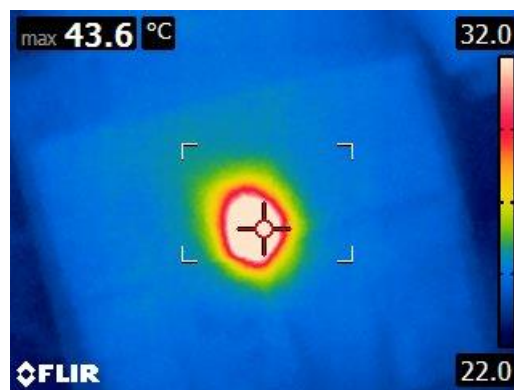
Obrázek 18: Záznam pro kombinaci světél MarLux v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 19: Záznam pro kombinaci světél MarLux v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 20: Záznam pro kombinaci světél MarLux v rozsahu 22-37 °C s rouškou (autorský obrázek)



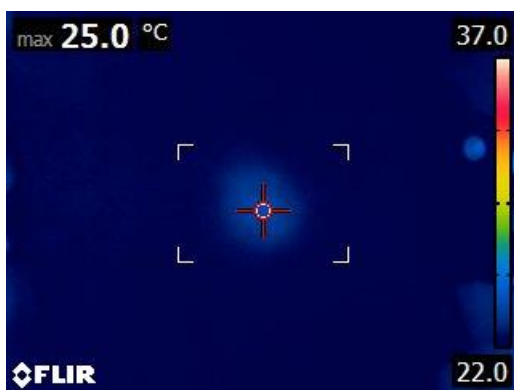
Obrázek 21: Záznam pro kombinaci světél MarLux v rozsahu 22-32 °C s rouškou (autorský obrázek)

Hanaulux

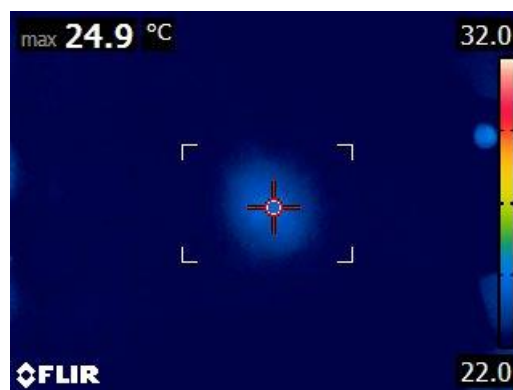
Tabulka 10: Hodnoty teploty naměřené referenčním měřidlem pro svítidla Hanaulux

Podmínky	Teplota naměřená referenčním měřidlem (°C)
Malé světlo – upravená podložka	29
Malé světlo – rouška	35
Velké světlo – upravená podložka	29
Velké světlo – rouška	34
Kombinace světél – upravená podložka	34
Kombinace světél – rouška	42

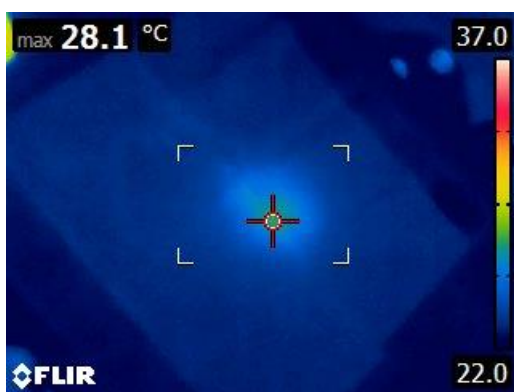
Malé světlo



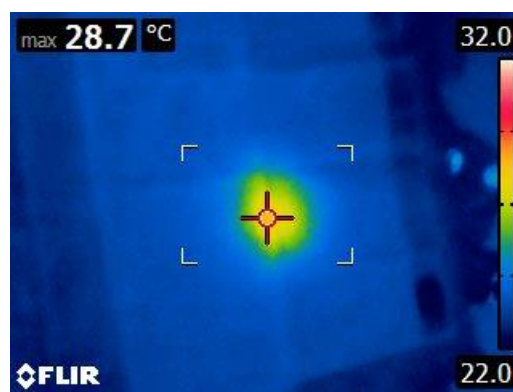
Obrázek 22: Záznam pro malé světlo Hanaulux v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 23: Záznam pro malé světlo Hanaulux v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 24: Záznam pro malé světlo Hanaulux v rozsahu 22-37 °C s rouškou (autorský obrázek)

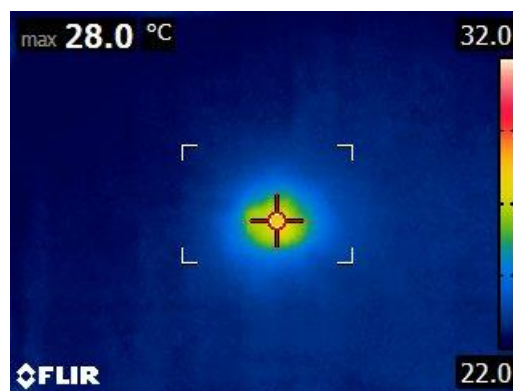


Obrázek 25: Záznam pro malé světlo Hanaulux v rozsahu 22-32 °C s rouškou (autorský obrázek)

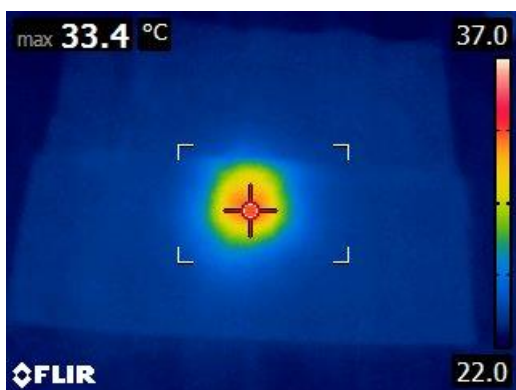
Velké světlo



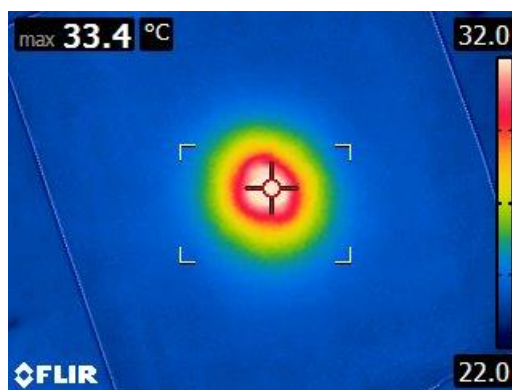
Obrázek 26: Záznam pro velké světlo Hanaulux v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 27: Záznam pro velké světlo Hanaulux v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)

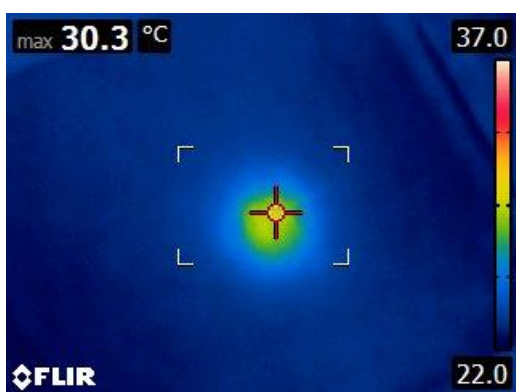


Obrázek 28: Záznam pro velké světlo Hanaulux v rozsahu 22-37 °C s rouškou (autorský obrázek)

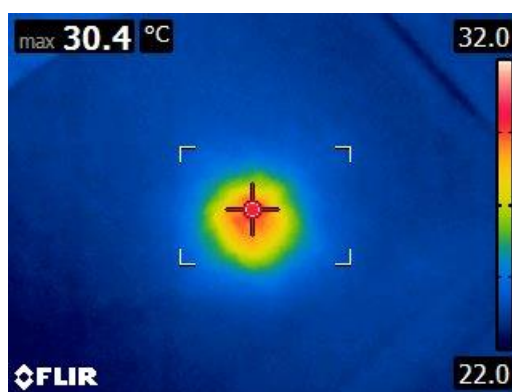


Obrázek 29: Záznam pro velké světlo Hanaulux v rozsahu 22-32 °C s rouškou (autorský obrázek)

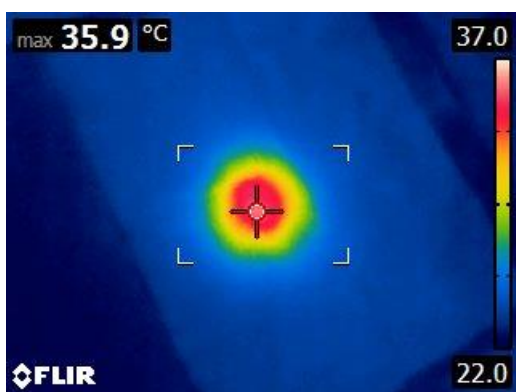
Kombinace světél



Obrázek 30: Záznam pro kombinaci světél Hanaulux v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 31: Záznam pro kombinaci světél Hanaulux v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 32: Záznam pro kombinaci světél Hanaulux v rozsahu 22-37 °C s rouškou (autorský obrázek)



Obrázek 33: Záznam pro kombinaci světél Hanaulux v rozsahu 22-32 °C s rouškou (autorský obrázek)

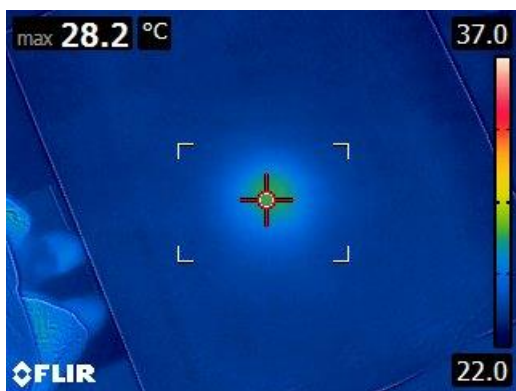
4.2 LED svítidla

Maquet Volista

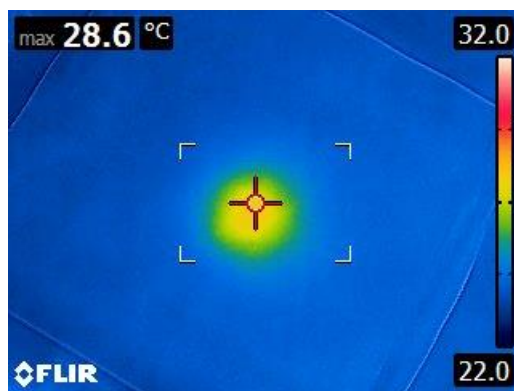
Tabulka 11: Hodnoty teploty naměřené referenčním měřidlem pro svítidla Maquet

Podmínky	Teplota naměřená referenčním měřidlem (°C)
Malé světlo – upravená podložka	28
Malé světlo – rouška	31
Velké světlo – upravená podložka	29
Velké světlo – rouška	35
Kombinace světél – upravená podložka	32
Kombinace světél – rouška	44

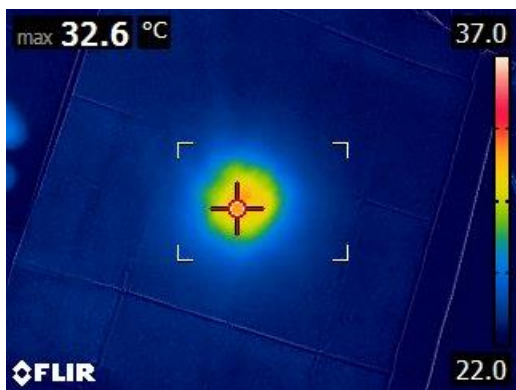
Malé světlo



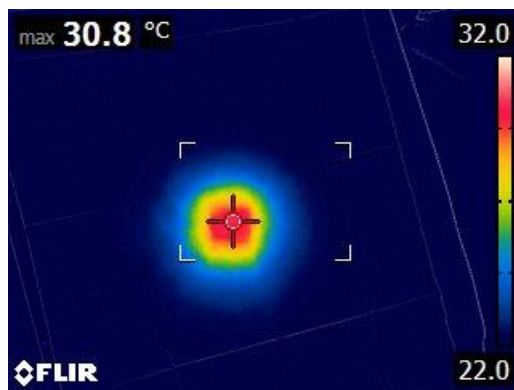
Obrázek 34: Záznam pro malé světlo Maquet v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 35: Záznam pro malé světlo Maquet v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)

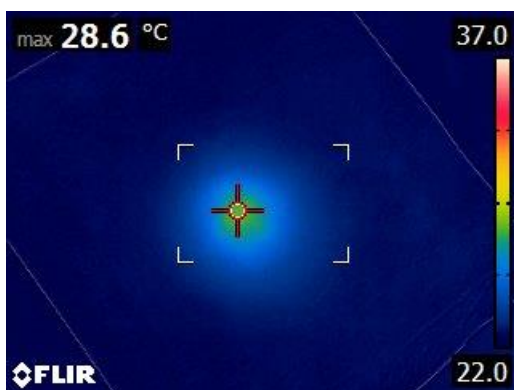


Obrázek 36: Záznam pro malé světlo Maquet v rozsahu 22-37 °C s rouškou (autorský obrázek)

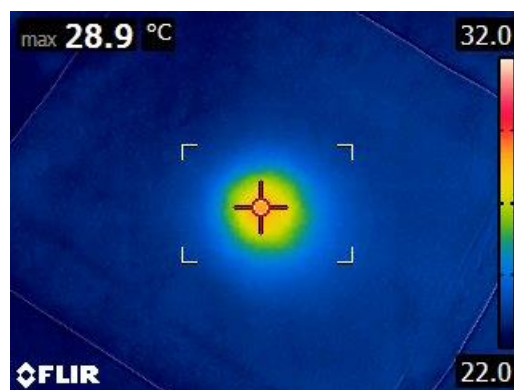


Obrázek 37: Záznam pro malé světlo Maquet v rozsahu 22-32 °C s rouškou (autorský obrázek)

Velké světlo



Obrázek 38: Záznam pro velké světlo Maquet v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 39: Záznam pro velké světlo Maquet v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)

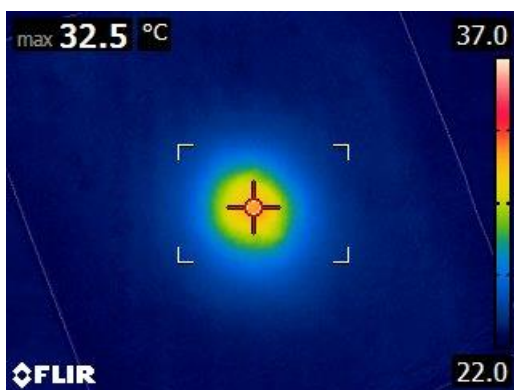


Obrázek 40: Záznam pro velké světlo Maquet v rozsahu 22-37 °C s rouškou (autorský obrázek)

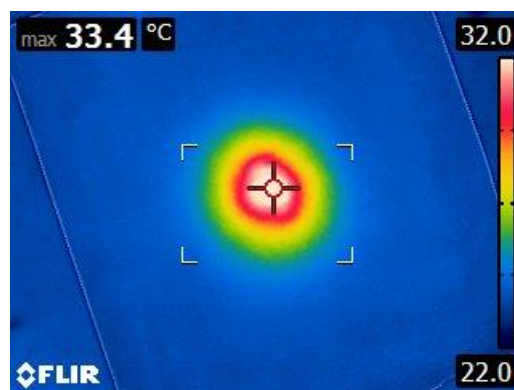


Obrázek 41: Záznam pro velké světlo Maquet v rozsahu 22-32 °C s rouškou (autorský obrázek)

Kombinace světél



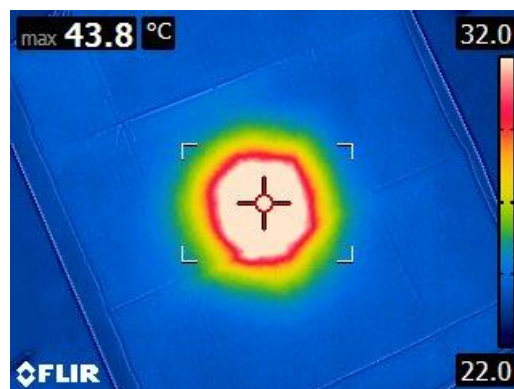
Obrázek 42: Záznam pro kombinaci světél Maquet v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 43: Záznam pro kombinaci světél Maquet v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 44: Záznam pro kombinaci světel Maquet v rozsahu 22-37 °C s rouškou (autorský obrázek)



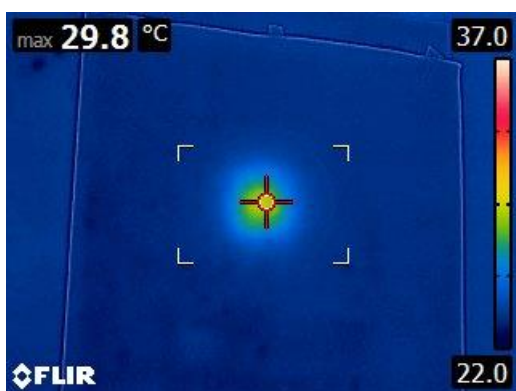
Obrázek 45: Záznam pro kombinaci světel Maquet v rozsahu 22-32 °C s rouškou (autorský obrázek)

Trumpf TruLight

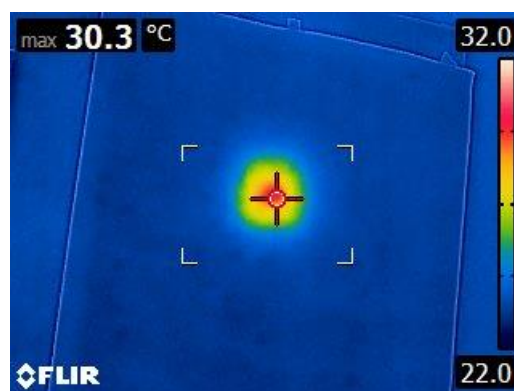
Tabulka 12: Hodnoty teploty naměřené referenčním měřidlem pro svítidla TruLight

Podmínky	Teplota naměřená referenčním měřidlem (°C)
Malé světlo – upravená podložka	30
Malé světlo – rouška	39
Velké světlo – upravená podložka	31
Velké světlo – rouška	39
Kombinace světel – upravená podložka	36
Kombinace světel – rouška	50

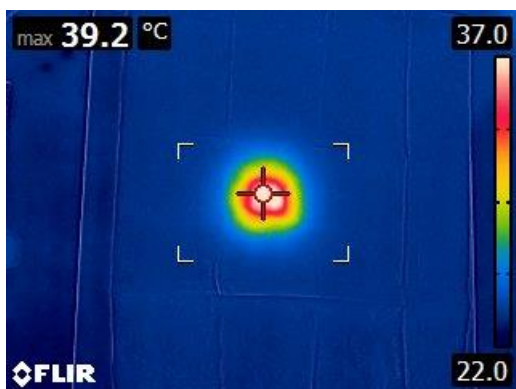
Malé světlo



Obrázek 46: Záznam pro malé světlo TruLight v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 47: Záznam pro malé světlo TruLight v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)

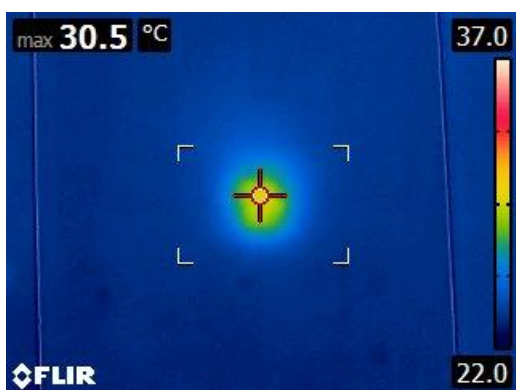


Obrázek 48: Záznam pro malé světlo TruLight v rozsahu 22-37 °C s rouškou (autorský obrázek)

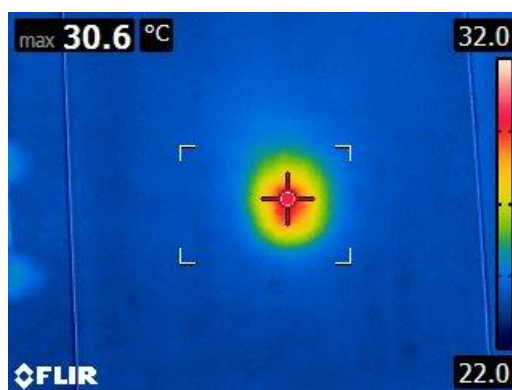


Obrázek 49: Záznam pro malé světlo TruLight v rozsahu 22-32 °C s rouškou (autorský obrázek)

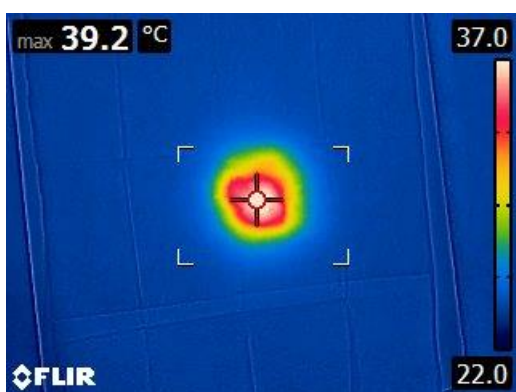
Velké světlo



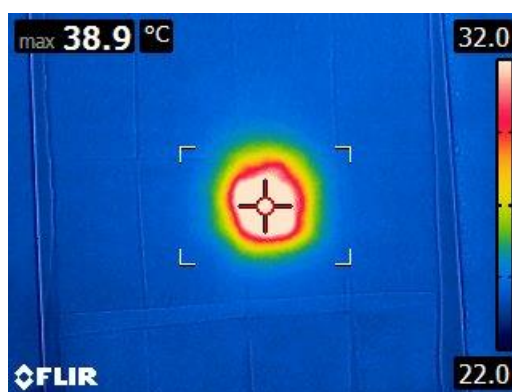
Obrázek 50: Záznam pro velké světlo TruLight v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 51: Záznam pro velké světlo TruLight v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)

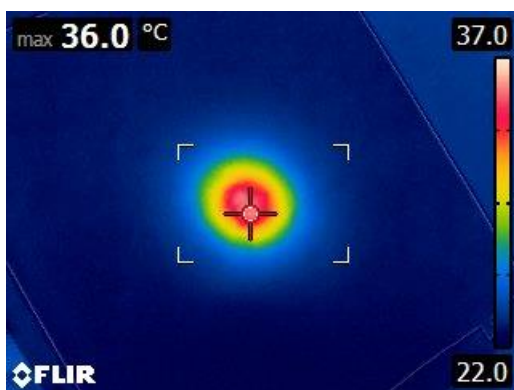


Obrázek 52: Záznam pro velké světlo TruLight v rozsahu 22-37 °C s rouškou (autorský obrázek)



Obrázek 53: Záznam pro velké světlo TruLight v rozsahu 22-32 °C s rouškou (autorský obrázek)

Kombinace světél



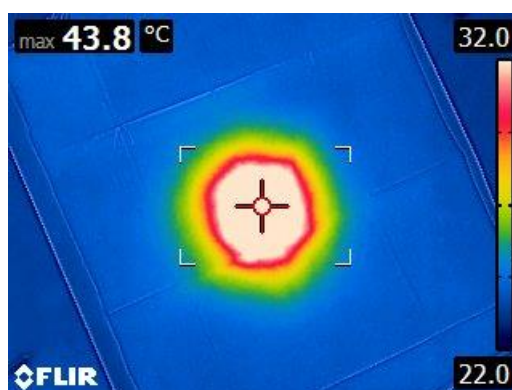
Obrázek 54: Záznam pro kombinaci světél TruLight v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 55: Záznam pro kombinaci světél TruLight v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 56: Záznam pro kombinaci světél TruLight v rozsahu 22-37 °C s rouškou (autorský obrázek)



Obrázek 57: Záznam pro kombinaci světél TruLight v rozsahu 22-32 °C s rouškou (autorský obrázek)

Steris Xled

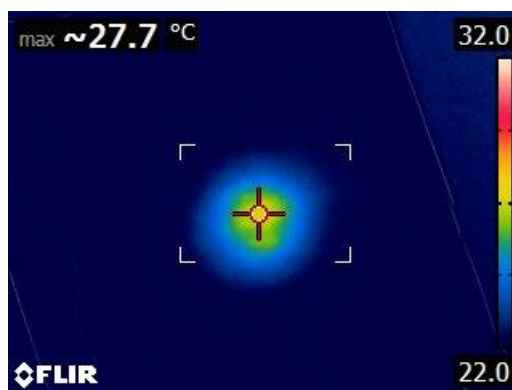
Tabulka 13: Hodnoty teploty naměřené referenčním měřidlem pro svítidla Steris Xled

Podmínky	Teplota naměřená referenčním měřidlem (°C)
Malé světlo – upravená podložka	28
Malé světlo – rouška	35
Velké světlo – upravená podložka	30
Velké světlo – rouška	39
Kombinace světél – upravená podložka	34
Kombinace světél – rouška	48

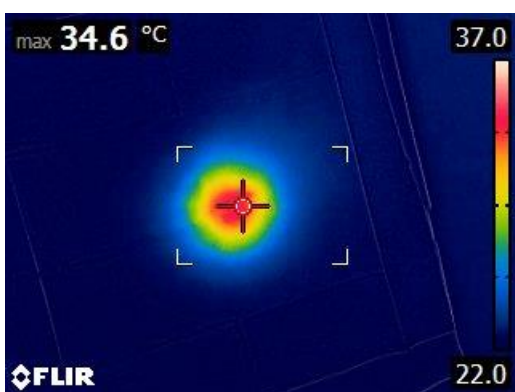
Malé světlo



Obrázek 58: Záznam pro malé světlo Steris Xled v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 59: Záznam pro malé světlo Steris Xled v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)

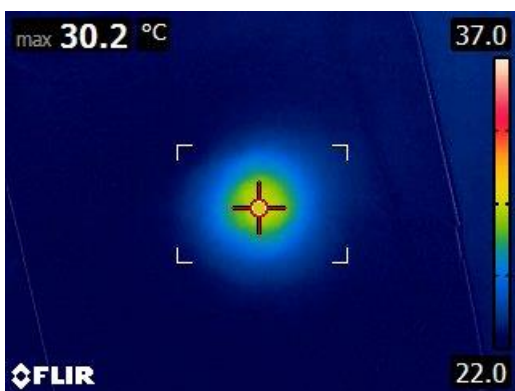


Obrázek 60: Záznam pro malé světlo Steris Xled v rozsahu 22-37 °C s rouškou (autorský obrázek)



Obrázek 61: Záznam pro malé světlo Steris Xled v rozsahu 22-32 °C s rouškou (autorský obrázek)

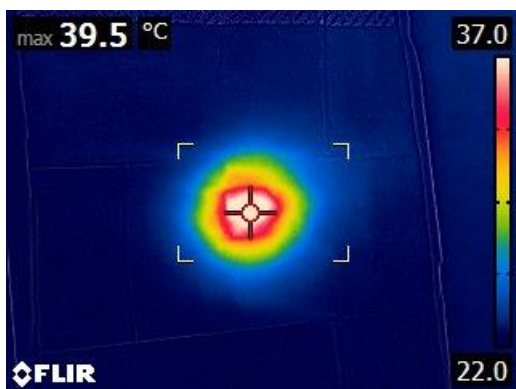
Velké světlo



Obrázek 62: Záznam pro velké světlo Steris Xled v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 63: Záznam pro velké světlo Steris Xled v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)

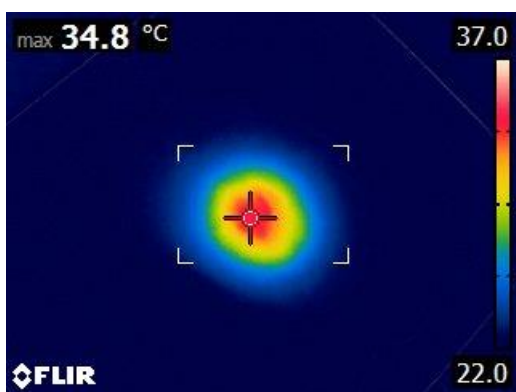


Obrázek 64: Záznam pro velké světlo Steris Xled v rozsahu 22-37 °C s rouškou (autorský obrázek)

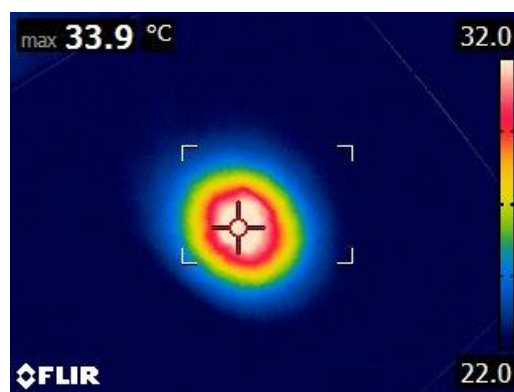


Obrázek 65: Záznam pro velké světlo Steris Xled v rozsahu 22-32 °C s rouškou (autorský obrázek)

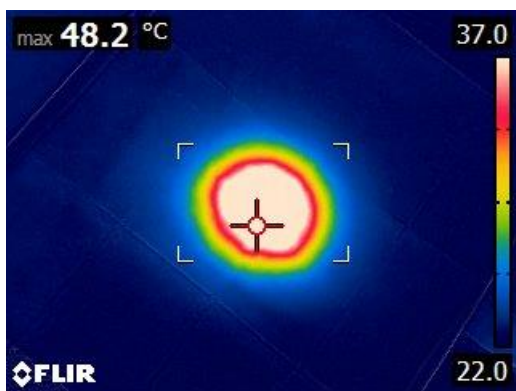
Kombinace světél



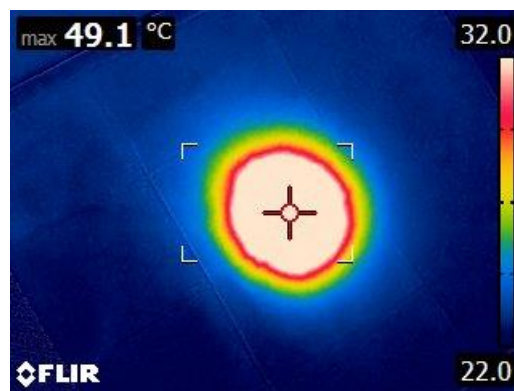
Obrázek 66: Záznam pro kombinaci světél Steris Xled v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 67: Záznam pro kombinaci světél Steris Xled v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 68: Záznam pro kombinaci světél Steris Xled v rozsahu 22-37 °C s rouškou (autorský obrázek)



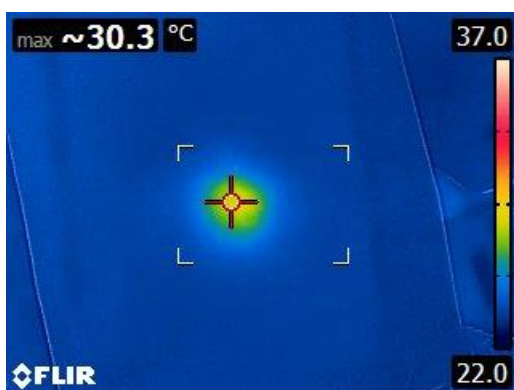
Obrázek 69: Záznam pro kombinaci světél Steris Xled v rozsahu 22-32 °C s rouškou (autorský obrázek)

Mach LED

Tabulka 14: Hodnoty teploty naměřené referenčním měřidlem pro svítidla Mach LED

Podmínky	Teplota naměřená referenčním měřidlem (°C)
Jedno světlo – upravená podložka	30
Jedno světlo – rouška	37
Kombinace světel – upravená podložka	34
Kombinace světel – rouška	48

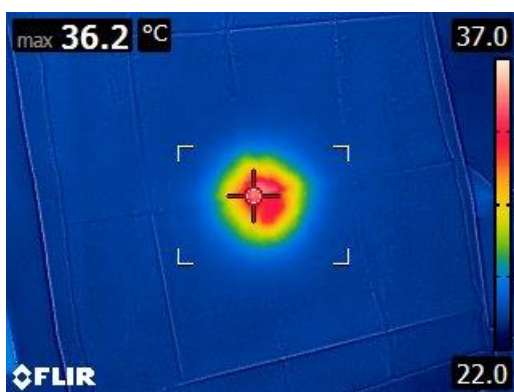
Světlo (jedna velikost)



Obrázek 70: Záznam pro světlo Mach LED v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 71: Záznam pro světlo Mach LED v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)

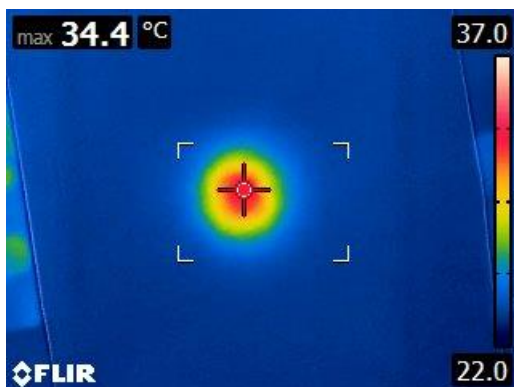


Obrázek 72: Záznam pro světlo Mach LED v rozsahu 22-37 °C s rouškou (autorský obrázek)



Obrázek 73: Záznam pro světlo Mach LED v rozsahu 22-32 °C s rouškou (autorský obrázek)

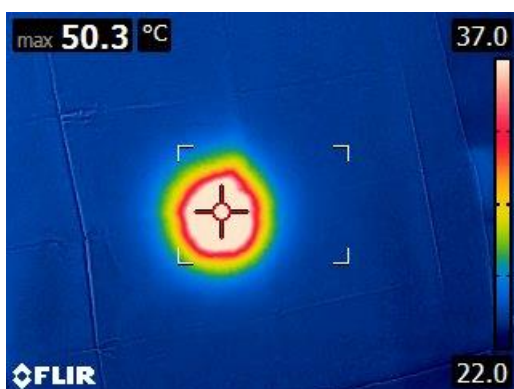
Kombinace světél



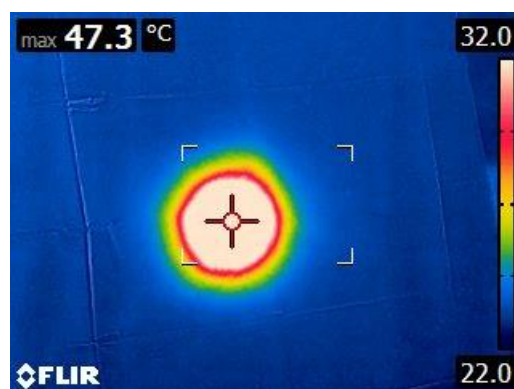
Obrázek 74: Záznam pro kombinaci světél Mach LED v rozsahu 22-37 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 75: Záznam pro kombinaci světél Mach LED v rozsahu 22-32 °C s upravenou podložkou (autorský obrázek)



Obrázek 76: Záznam pro kombinaci světél Mach LED v rozsahu 22-37 °C s rouškou (autorský obrázek)



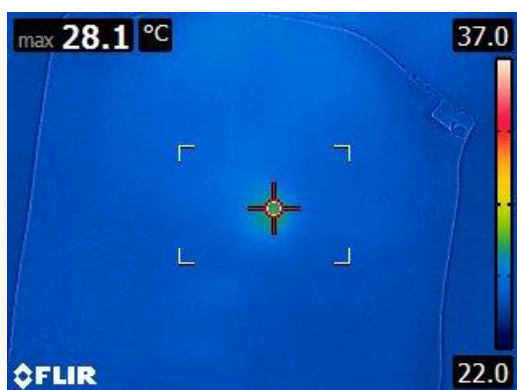
Obrázek 77: Záznam pro kombinaci světél Mach LED v rozsahu 22-32 °C s rouškou (autorský obrázek)

4.3 Vliv vzduchové ventilace

Měření světél za těchto podmínek je neobvyklým jevem, neboť všechny operace na superseptických a aseptických operačních sálech jsou prováděny vždy za spuštěné vzduchotechniky. Ta je na sálech umístěna přímo nad operačním stolem, aby odváděla z operačního pole nebezpečné aerosoly a další nečistoty. Dalším jejím úkolem je udržovat na operačním sále stálou teplotu (obvykle 21-22 °C).

Jediná místa, kde jsme se setkali s vypnutou vzduchovou ventilací, byly zákrokové sálky a jeden sál v dětské části nemocnice, kde bylo možné vzduchovou ventilaci vypnout. Z naměřených výsledků vyplývá, že vzduchová ventilace nemá žádný vliv na ohřev operačními lampami.

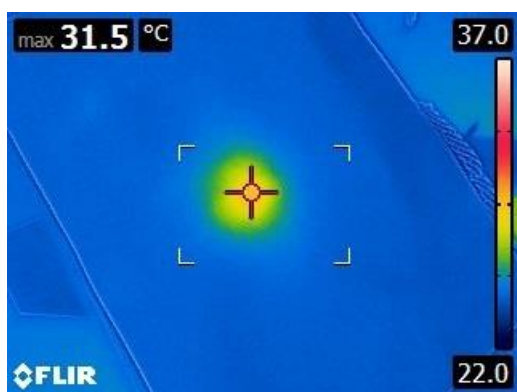
Tabulka 15: Fotografie halogenového svítidla MarLux při sepnuté a vypnuté vzduchové ventilaci.



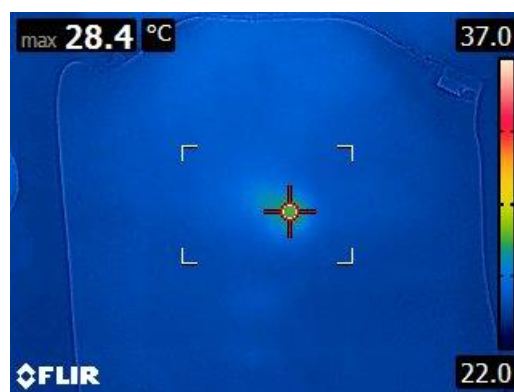
Obrázek 78: Malé světlo MarLux při vypnuté vzduchové ventilaci (autorský obrázek)



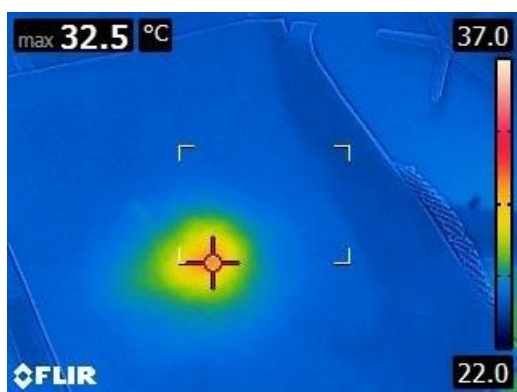
Obrázek 79: Malé světlo MarLux při sepnuté vzduchové ventilaci (autorský obrázek)



Obrázek 80: Velké světlo MarLux při vypnuté vzduchové ventilaci (autorský obrázek)



Obrázek 81: Velké světlo MarLux při sepnuté vzduchové ventilaci (autorský obrázek)



Obrázek 82: Kombinace světel MarLux při vypnuté vzduchové ventilaci (autorský obrázek)



Obrázek 83: Kombinace světel MarLux při sepnuté vzduchové ventilaci (autorský obrázek)

Se spuštěnou vzduchovou ventilací byla na operačním sále naměřena teplota 22 °C a s vypnutou ventilací 25 °C. Z fotek je patrné, že se teplota zvedla v prvním případě o 0,6 °C ve druhém o 1,1 °C a ve třetím o 2,9 °C. Nicméně teplota na sále vzrostla

o 3 °C, což je více, než všechny rozdílové hodnoty. Tedy teplota se zvedne, ale maximálně o Δt , která nastala z důvodu vypnutí vzduchové ventilace na celém operačním sále.

4.4 Statistické zhodnocení výsledků

Průměry teplot pro jednotlivá svítidla

Následující tabulky poskytují srovnání průměrů teplot naměřených termovizní kamerou a teplot naměřených na referenčním měřidle. Tyto hodnoty byly důležité při stanovování neznámé emisivity sterilní krycí roušky a při ověřování správnosti hodnot z termovizní kamery.

Tabulka 16: Teploty naměřené pro svítidlo Marlux

Typ světla	Průměr maximálních teplot z osmi snímků (°C)	Teploty naměřené referenčním měřidlem (°C)
Malé s upravenou podložkou	28,7	29
Malé s rouškou	34,9	35
Velké s upravenou podložkou	30,4	30
Velké s rouškou	38,7	39
Kombinace s upravenou podložkou	33,9	34
Kombinace s rouškou	44,1	44

Tabulka 17: Naměřené hodnoty pro svítidlo Hanaulux

Typ světla	Průměr maximálních teplot z osmi snímků (°C)	Teploty naměřené referenčním měřidlem (°C)
Malé s upravenou podložkou	25,0	25
Malé s rouškou	28,5	28
Velké s upravenou podložkou	27,7	28
Velké s rouškou	33,3	33
Kombinace s upravenou podložkou	30,3	30
Kombinace s rouškou	37,5	36

Tabulka 18: Naměřené hodnoty pro svítidlo Maquet Volista

Typ světla	Průměr maximálních teplot z osmi snímků (°C)	Teploty naměřené referenčním měřidlem (°C)
Malé s upravenou podložkou	28,4	28
Malé s rouškou	31,6	31
Velké s upravenou podložkou	28,8	29
Velké s rouškou	34,7	35
Kombinace s upravenou podložkou	33,0	32
Kombinace s rouškou	43,4	44

Tabulka 19: Naměřené hodnoty pro svítidlo Trumpf TruLight

Typ světla	Průměr maximálních teplot z osmi snímků (°C)	Teploty naměřené referenčním měřidlem (°C)
Malé s upravenou podložkou	30,1	30
Malé s rouškou	39,3	39
Velké s upravenou podložkou	30,6	31
Velké s rouškou	39,1	39
Kombinace s upravenou podložkou	35,9	36
Kombinace s rouškou	49,1	50

Tabulka 20: Naměřené hodnoty pro svítidlo Steris Xled

Typ světla	Průměr maximálních teplot z osmi snímků (°C)	Teploty naměřené referenčním měřidlem (°C)
Malé s upravenou podložkou	27,7	28
Malé s rouškou	34,9	35
Velké s upravenou podložkou	30,2	30
Velké s rouškou	39,6	39
Kombinace s upravenou podložkou	34,1	34
Kombinace s rouškou	48,3	48

Tabulka 21: Naměřené hodnoty pro svítidlo Mach LED

Typ světla	Průměr maximálních teplot z osmi snímků (°C)	Teploty naměřené referenčním měřidlem (°C)
Světlo s upravenou podložkou	30,4	30
Světlo s rouškou	36,5	37
Kombinace s upravenou podložkou	34,3	34
Kombinace s rouškou	48,9	48

V následujících tabulkách jsou zpracována naměřená data dle statistických pravidel, abychom mohli určit přesnost měření, bylo nutné spočítat nejistoty typu A, B a C. Nejistota typu B je nejistota měření ovlivněná měřicí přístrojem. V případě termovizní kamery jde o ± 2 °C nebo ± 2 % podle toho, která z hodnot je vyšší. Pro tento případ měření tedy počítáme, že hodnota nejistoty typu B je ± 2 °C.

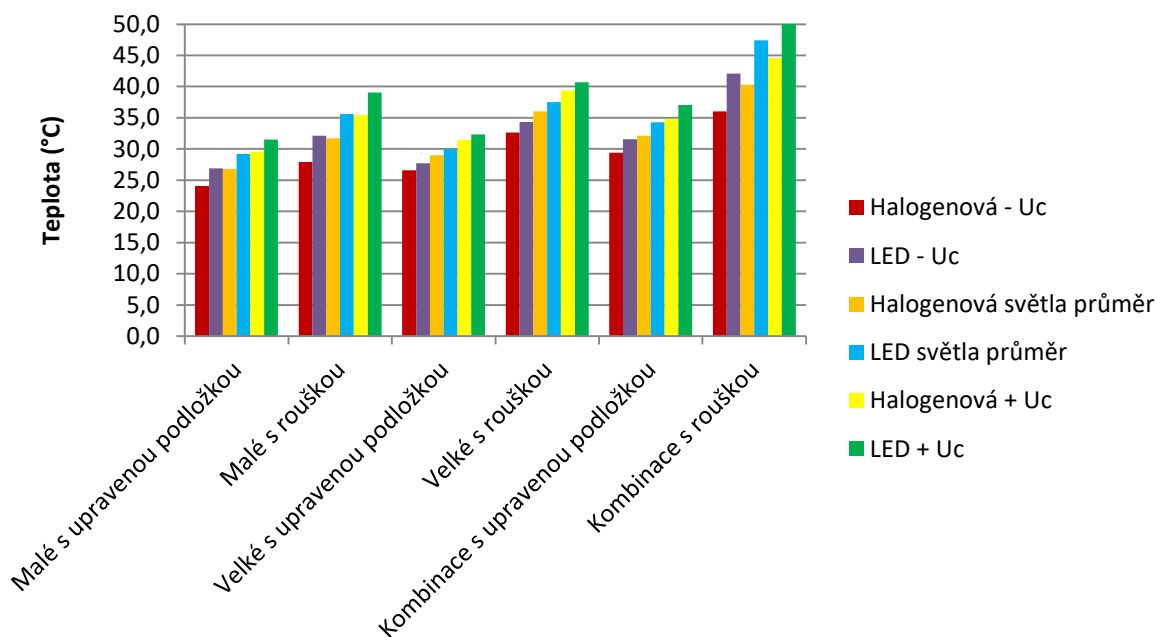
Nejistotu typu A vypočítáme jako směrodatnou odchylku, tedy podle vzorce:

$$U_A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \quad (9)$$

Nejistota typu C je potom vektorový součet obou předchozích nejistot.

Tabulka 22: Tabulka nejistot měření pro Halogenová a LED svítidla

Světla	\bar{x}	\bar{x}	U_A	U_A	U_B	U_C	U_C
	Halogenová (°C)	LED (°C)	Halogenová (°C)	LED (°C)		Halogenová (°C)	LED (°C)
Malé s upravenou podložkou	26,8	29,2	1,9	1,2	2	2,8	2,3
Malé s rouškou	31,7	35,6	3,2	2,8	2	3,8	3,5
Velké s upravenou podložkou	29	30	1,4	1,1	2	2,4	2,3
Velké s rouškou	36	37,5	2,7	2,5	2	3,4	3,2
Kombinace s upravenou podložkou	32,1	34,3	1,8	1,9	2	2,7	2,8
Kombinace s rouškou	40,3	47,4	3,8	4,9	2	4,3	5,3



Graf 1: Porovnání výsledných hodnot teploty pro různá světla a různé podmínky měření

5 Diskuse

Hlavním závěrem této práce je, že LED diodová svítidla ohřívají operační pole více, než starší svítidla halogenová. U obou typů svítidel ovšem dochází k ohřevu, který by neměl být zanedbáván, neboť v krajních případech se jednalo až o dvě až tři desítky stupňů oproti okolní teplotě sálu, což jsou hodnoty značně vysoké. K takto vysokému ohřevu nicméně docházelo při měření se sterilní operační rouškou, což je látka s neznámou emisivitou, proto výsledky mohou být zkreslené. Za průkazné můžeme považovat výsledky, které byly naměřeny na speciálně upravené podložce, kde se teplota ohřevu dostala přibližně na teplotu lidského těla, což by nemělo představovat problém pro tkáň, nicméně to značně zvyšuje riziko vzniku infekce.

Pro stanovení emisivity neznámé látky jsem zvolila metodu, kdy se na termovizní kameře snažím dosáhnout stejné hodnoty teploty, jako je na referenčním měřidle, pomocí změn hodnot emisivity v nastavení kamery. V tomto případě ovšem byly změny v teplotě tak zanedbatelné (přibližně $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ na $\Delta\varepsilon = 0,5$), že nebylo takovou změnu možné ani zachytit na referenčním měřidle, které ukazuje jen v celých stupních. Proto jsem emisivitu nechala stejnou jako v případě speciálně upravené podložky. To, že se změna emisivity nějak výrazně neprojevila na teplotě, přisuzuji poměrně nízkým měřeným teplotám, vzhledem k rozsahu termovizní kamery, a malé odrazivosti měřeného materiálu, neboť sterilní krycí roušky se vyrábí z textilie.

Při měření na operačních sálech s vypnutou vzduchovou ventilací jsem se snažila prokázat, zda má změna okolní teploty vliv na ohřev operačního pole. Z měření je jasné, že se žádná souvislost mezi sepnutím vzduchové ventilace a zvýšením ohřevu nepotvrdila. Hodnoty naměřené při vypnuté vzduchové ventilaci jsou sice vyšší, ale v žádném z měřených případů nepřevyšují hodnotu změny teploty na celém operačním sále. Z toho vyvozují, že vzduchová ventilace nemá vliv na ohřev operačního pole operačními svítidly.

6 Závěr

Operační světla ohřívají operační pole různě v závislosti na jejich typu, velikosti a podložce pokrývající měřený povrch. Nejméně ohřívají malá halogenová světla se speciálně upravenou podložkou a to o $26,0 \pm 2,8$ °C, dále jsou to velká světla halogenová se speciálně upravenou podložkou, která ohřívají operační pole o $29,0 \pm 2,4$ °C. Následují je malá světla s LED diodami se speciálně upravenou podložkou, která ohřívají o $29,2 \pm 2,3$ °C, potom velká světla s LED diodami se speciálně upravenou podložkou s ohřevem $30 \pm 2,3$ °C. Následují malá halogenová svítidla s rouškou, ohřev o $31,7 \pm 3,8$ °C a dále kombinace halogenových světel s upravenou podložkou ohřívá o $32,1 \pm 2,7$ °C. O něco více ohřívá operační pole kombinace svítidel s LED diodami a to o $34,3 \pm 2,8$ °C a ještě o stupeň více, tedy o $35,6 \pm 3,5$ °C jsou to malá svítidla s LED diodami s rouškou. Poslední svítidla, která operační pole zahřívají méně, než na teplotu lidského těla, jsou velká halogenová svítidla s rouškou, která ohřívají o $36,0 \pm 3,4$ °C. Na vysoké teploty tedy ohřívají operační pole velká světla s LED diodami a rouškou, o $37,5 \pm 3,4$ °C, Kombinace halogenových světel svítící na roušku, o $40,3 \pm 4,3$ °C a nejvíce potom kombinace světel s LED diodami svítící na roušku, která ohřívá pole o $47,4 \pm 5,3$ °C. Prokázali jsme tedy, že více operační pole ohřívají svítidla využívající systém LED diod a dochází k tomu z důvodu vyšší účinnosti LED diod. K vyššímu ohřevu dochází u měření se simulovaným reálným prostředím a to kvůli barvě podložky. Také bylo dokázáno, že vzduchová ventilace nemá na ohřev operačního pole operačními svítidly žádný vliv.

Seznam použité literatury

- [1] Thermal comfort during surgical operations. WYON, D.P., O.M. LIDWELL a R.E.O. WILLIAMS. *Thermal comfort during surgical operations*. Londýn, 1968, s. 229-248.
- [2] REICHL, Jan a Martin VŠETIČKA. *Multimediální encyklopedie fyziky* [online]. Praha, 2006 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [3] HOWELL, John R., Robert SIEGEL a M. Pinar. MENGÜÇ. *Thermal radiation heat transfer*. 5th ed. /. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN 9781439805336.
- [4] LÍBAL, Bc. Jan. *Využití termovizní kamery pro měření teploty elektrických strojů*. Brno, 2009. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Hana Kuchyňková.
- [5] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 9788001049419.
- [6] PAVELEK, CSC., Doc. Ing. Milan, Doc. Ing. Eva JANOTKOVÁ, CSC. a Ing. Josef ŠTĚTINA. *Vizualizační a optické měřicí metody* [online]. 2. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2007 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/>
- [7] MATUŠŮ, Bc. Jakub. *Testování odolnosti materiálových sendvičů proti sálavému teplu*. Zlín, 2013. Diplomová. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Petr Smolka, Ph.D.
- [8] REJŽEK, Bc. Jan. *Využití termovizní techniky při výstupní kontrole napájecích zdrojů*. Brno, 2013. Diplomová. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Aleš Pozler, Ph.D.
- [9] *FLIR systems* [online]. b.r. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://www.flir.eu/home/>
- [10] TEM electronic components. *Transfer Multisort Elektronik* [online]. Lodz, b.r. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: http://www.tme.eu/html/EN/uni-t-multimeters/ramka_11260_EN_pelny.html

- [11] Therma Spray 500. *TMVSS Termovize* [online]. b.r. [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <http://www.tmvss.cz/vyrobci/tmv-ss/thermaspray>
- [12] *KLS MArtin operating lamps: návod k použití* [online]. Německo, b.r. [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: http://www.klsmartin.com/fileadmin/Inhalte/Downloads_GA/OP-Leuchten_Telemedizin_DVEs/ga_marLux_21_en_04.pdf
- [13] *HANALUX operating instructions: návod k použití* [online]. Německo, b.r. [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: http://www.frankshospitalworkshop.com/equipment/documents/light/user_manuals/Heraeus_Hanaulux_Blue_90,100,130_-_Bedienungsanleitung.pdf
- [14] *StandOP VOLISTA: Návod k použití*. Francie: MAQUET Getinge group, 2016.
- [15] ILED - Trumpf Medizin Systeme: Návod k použití. *MedicalExpo* [online]. b.r. [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <http://pdf.medicaexpo.com/pdf/trumpf-medizin-systeme/iled/70378-69204.html#search-en-led-examination-lamp>
- [16] XLED surgical lightning system. *Steris* [online]. b.r. [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: http://www.steris-st.fr/en-GB/iso_album/steris_plaquette_xled_uk0313.pdf
- [17] *Mach LED: data sheet*. Dr.MACH. 2016. 59000557 / A08.
- [18] Halogenová žárovka. In: *Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy* [online]. b.r. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://web.natur.cuni.cz/~kudch/main/halogeny/HALOGENY/HALOGENY/brom/vyznam/zarovka1.html>
- [19] Vnitřní struktura LED. In: *Wikipedie* [online]. 2014 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/LED#/media/File:LED,_5mm,_green_\(cz\).svg](https://cs.wikipedia.org/wiki/LED#/media/File:LED,_5mm,_green_(cz).svg)

Příloha A

- Příloha č. 1: Měřicí protokol pro svítidlo MarLux (Gebrüder Martin GmbH)
- Příloha č. 2: Měřicí protokol pro svítidlo Hanaulux (Heraeus)
- Příloha č. 3: Měřicí protokol pro svítidlo Maquet Volista (MAQUET)
- Příloha č. 4: Měřicí protokol pro svítidlo Trumpf TruLight (Trumpf Medizin Systeme GmbH+Co.KG)
- Příloha č. 5: Měřicí protokol pro svítidlo Steris Xled (Steris Surgical Technologies SAS)
- Příloha č. 6: Měřicí protokol pro svítidlo Mach LED (Dr. Mach)

Příloha B

Obsah přiloženého CD:

- Bakalářská práce.pdf
- Zadání diplomové práce.pdf
- Abstrakt.pdf
- Abstract.pdf
- Klíčová slova.pdf
- Key words.pdf



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta biomedicínského inženýrství

Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva

Měřicí protokol

pro analýzu tepelného záření operačních svítidel ve FN Motol

Datum měření: 29.3.2017

Typ svítidla: Halogen

Název svítidla: Martin MarLux

Operační sál: COS 1. Chirurgie sál č. B3

Teplota na operačním sále (°C): 21,5

Klimatizace: ANO

Nastavení termovizní kamery:

Emisivita: 0,97

Vzdálenost od měřeného povrchu: 1 m

Okolní teplota (°C): 22

Malé světlo

Průměr ohniska: 10 cm

Referenční měřidlo bez roušky (°C): 29

Referenční měřidlo s rouškou (°C): 35

Velké světlo

Průměr ohniska: 11 cm

Referenční měřidlo bez roušky (°C): 30

Referenční měřidlo s rouškou (°C): 39

Kombinace světél

Průměr ohniska: 11 cm

Referenční měřidlo bez roušky (°C): 34

Referenční měřidlo s rouškou (°C): 44



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta biomedicínského inženýrství

Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva

Měřicí protokol

pro analýzu tepelného záření operačních svítidel ve FN Motol

Datum měření: 29.3.2017

Typ svítidla: Halogenové

Název svítidla: Hanaulux

Operační sál: COS 1. Chirurgie sál č. B3

Teplota na operačním sále (°C): 21,5

Klimatizace: ANO

Nastavení termovizní kamery:

Emisivita: 0,97

Vzdálenost od měřeného povrchu: 1 m

Okolní teplota (°C): 22

Malé světlo

Průměr ohniska: 14 cm

Referenční měřidlo bez roušky (°C): 25

Referenční měřidlo s rouškou (°C): 28

Velké světlo

Průměr ohniska: 14,5 cm

Referenční měřidlo bez roušky (°C): 28

Referenční měřidlo s rouškou (°C): 33

Kombinace světél

Průměr ohniska: 14,5 cm

Referenční měřidlo bez roušky (°C): 30

Referenční měřidlo s rouškou (°C): 36



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta biomedicínského inženýrství

Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva

Měřicí protokol

pro analýzu tepelného záření operačních svítidel ve FN Motol

Datum měření 7.3.2017

Typ svítidla LED

Název svítidla Maquet Volista

Operační sál COS 1. Chirurgie sál č. B5

Teplota na operačním sále (°C): 21,5

Klimatizace: ANO

Nastavení termovizní kamery:

Emisivita: 0,97

Vzdálenost od měřeného povrchu: 1 m

Okolní teplota (°C): 22

Malé světlo

Průměr ohniska: 14,5 cm

Referenční měřidlo bez roušky (°C): 28

Referenční měřidlo s rouškou (°C): 31

Velké světlo

Průměr ohniska: 15 cm

Referenční měřidlo bez roušky (°C): 29

Referenční měřidlo s rouškou (°C): 35

Kombinace světél

Průměr ohniska: 15 cm

Referenční měřidlo bez roušky (°C): 32

Referenční měřidlo s rouškou (°C): 44



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta biomedicínského inženýrství
Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva

Měřicí protokol

pro analýzu tepelného záření operačních svítidel ve FN Motol

Datum měření: 3.3.2017

Typ svítidla: LED

Název svítidla: TRUMPF (TruLight 5300)

Operační sál: COS 1. Ortopedie sál č. D1

Teplota na operačním sále (°C): 21

Klimatizace: ANO

Nastavení termovizní kamery:

Emisivita: 0,97

Vzdálenost od měřeného povrchu: 1 m

Okolní teplota (°C): 21

Malé světlo

Průměr ohniska: 12,5 cm

Referenční měřidlo bez roušky (°C): 30

Referenční měřidlo s rouškou (°C): 39

Velké světlo

Průměr ohniska: 13 cm

Referenční měřidlo bez roušky (°C): 31

Referenční měřidlo s rouškou (°C): 39

Kombinace světél

Průměr ohniska: 13 cm

Referenční měřidlo bez roušky (°C): 36

Referenční měřidlo s rouškou (°C): 50



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta biomedicínského inženýrství

Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva

Měřicí protokol

pro analýzu tepelného záření operačních svítidel ve FN Motol

Datum měření: 7.3.2017

Typ svítidla: LED

Název svítidla: Steris Xled

Operační sál: COS 1. Chirurgie sál č. B3

Teplota na operačním sále (°C): 21,5

Klimatizace: ANO

Nastavení termovizní kamery:

Emisivita: 0,97

Vzdálenost od měřeného povrchu: 1 m

Okolní teplota (°C): 22

Malé světlo

Průměr ohniska: 13,5 cm

Referenční měřidlo bez roušky (°C): 28

Referenční měřidlo s rouškou (°C): 35

Velké světlo

Průměr ohniska: 14,5 cm

Referenční měřidlo bez roušky (°C): 30

Referenční měřidlo s rouškou (°C): 39

Kombinace světél

Průměr ohniska: 14,5 cm

Referenční měřidlo bez roušky (°C): 34

Referenční měřidlo s rouškou (°C): 48



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta biomedicínského inženýrství

Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva

Měřicí protokol

pro analýzu tepelného záření operačních svítidel ve FN Motol

Datum měření 7.3.2017

Typ svítidla LED

Název svítidla Mach LED

Operační sál COS 1. Chirurgie B4

Teplota na operačním sále (°C): 21,5

Klimatizace: ANO

Nastavení termovizní kamery:

Emisivita: 0,97

Vzdálenost od měřeného povrchu: 1 m

Okolní teplota (°C): 22

Světlo

Průměr ohniska: 15 cm

Referenční měřidlo bez roušky (°C): 30

Referenční měřidlo s rouškou (°C): 37

Kombinace světel

Průměr ohniska: 16 cm

Referenční měřidlo bez roušky (°C): 34

Referenční měřidlo s rouškou (°C): 48