



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

INTEGREERIVA SFÄÄRI LABORATOORNE KASUTUS

LABORATORY APPLICATION OF INTEGRATING SPHERE

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Elar Haviko

Üliõpilaskood: 121134MAHB

Juhendaja: Toivo Varjas, doktorant-nooremteadur

Tallinn, 2019

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 2019

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

“.....” 2019

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”2019

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Elar Haviko

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Integreeriva sfääri laboratoorne kasutus

Kuupäev: 23.05.2019

37 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): doktorant-nooremteadur Toivo Varjas

Sisu kirjeldus:

Bakalaureusetöö eesmärgiks oli koguda infot ja dokumenteerida integreeriva sfääri tööpõhimõtte, vana nimetusega „Ulbrichti kuuli“ restaureerimine ning sooritada võrdlusmõõtmised ülikooli valgustehnika labori integreeriva keraga, mille mõõtemääramatus on teada. Mõõdetud tulemuste järgi hinnata restaureerimisel saavutatud mõõtemääramatust ning luua kasutusjuhend restaureeritud sfääri kasutamiseks õppetöös.

Märksõnad: Integreeriv sfäär, valgusallikad, valgustehnika labor, restaureerimine, bakalaureusetöö

ABSTRACT

Author: Elar Haviko

Type of the work: Bachelor Thesis

Title: Laboratory application of integrating sphere

Date: 23.05.2019

*37 pages (the number of thesis pages
including appendices)*

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Early Stage Researcher Toivo Varjas

Abstract:

The aim of the bachelor thesis was to collect information and document the working principle of integrating sphere, old name "Ulbricht sphere", to restore it and to make comparative measurements with the integrating sphere from the university's lighting technology laboratory, whose uncertainty is known. According to the measured results, the measurement uncertainty achieved during the restoration will be estimated and a user manual for the use of the restored sphere in teaching will be created.

Keywords: integrating sphere, light sources, lighting technology laboratory, restoration, bachelor thesis

SISUKORD

LÖPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT.....	4
EESSÕNA.....	7
Lühendite ja tähiste loetelu	8
SISSEJUHATUS	9
1. VALGUSTUSALASED MÕISTED.....	10
1.1 Valgustustihedus.....	10
1.2 Ruuminurk.....	11
1.3 Valgusvoog.....	11
1.4 Valgusviljakus.....	12
1.5 Värvsüsteemtemperatuur	12
1.6 Värviedastusüldindeks	12
2. ARTHUR PFEIFFER INTEGREERIVA SFÄÄRI TAASTAMINE	13
2.1 Esialgse seisundi hindamine	13
2.2 Töökorra taastamisel seatud eesmärgid.....	16
2.3 Töökorra taastamiseks tehtud sammud	16
2.3.1 Värvide eemaldamine ja detailide puhastamine	16
2.3.2 Sfääri pinna silumine	17
2.3.3 Sfääri uus värv	17
2.3.4 Muud detailid	18
2.4 Töökorras mõõteriist	18
3. MÕÕTMISTELE ESITATAVAD NÕUDED.....	20
3.1 Integreeriv sfäär.....	20
3.1.1 Sfääris paiknevate esemete mõju	20
3.1.2 Sfääri värv.....	21
3.1.3 Lambi ja ekraani asend.....	21
3.1.4 Mõõtmiste sooritamine	21
3.2 Luksmeetrid	21
4. MÕÕTMISED.....	23
4.1 Mõõtmistel kasutatavate valgusallikate kirjeldused	23
4.1.1 Leedlamp.....	23
4.1.2 Hõõglamp	24

4.1.3	Integreeritud kompaktluminofoorlamp	24
4.2	Mõõtmistulemused	25
5.	ARTHUR PFEIFFER INTEGRERIVA SFÄÄRI KORREKTSIOONITEGUR	27
5.1	Korreksioonitegur Arthur Pfeiffer integreeriva sfääri jaoks	27
5.1.1	Korreksioonitegurid leedlampidele luksmeetrit kasutades	27
5.1.2	Korreksioonitegurid hõõglampidele luksmeetrit kasutades	28
5.1.3	Korreksioonitegurid luminofoorlampidele luksmeetrit kasutades	28
5.2	Korreksiooniteguri aritmeetiline keskmine ja standardhälve	29
5.2.1	Korreksiooniteguri aritmeetiline keskmine ja standardhälve leedlampidele luksmeetrit kasutades	29
5.2.2	Korreksiooniteguri aritmeetiline keskmine ja standardhälve hõõglampidele luksmeetrit kasutades	30
5.2.3	Korreksiooniteguri aritmeetiline keskmine ja standardhälve luminofoorlampidele luksmeetrit kasutades	31
5.3	Variatsioonikordaja	31
5.3.1	Variatsioonikordaja leedlampidele luksmeetrit kasutades	32
5.3.2	Variatsioonikordaja hõõglampidele luksmeetrit kasutades	32
5.3.3	Variatsioonikordaja leedlampidele luksmeetrit kasutades	32
5.4	Mõõtemääramatus	32
5.4.1	Mõõtemääramatus leedlampidele luksmeetrit kasutades	33
5.4.2	Mõõtemääramatus hõõglampidele luksmeetrit kasutades	33
5.4.3	Mõõtemääramatus luminofoorlampidele luksmeetrit kasutades	34
	KOKKUVÕTE	35
	SUMMARY	36
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	37

EESSÕNA

Käesoleva bakalaureusetöö teema pakuti välja Tallinna Tehnikaülikooli doktorant-nooremteaduri Toivo Varjase poolt, kes on ka töö juhendaja. Töö praktiline osa, milleks oli integreeriva õõneskera restaureerimine ning katsete tegemine, sooritati Tallinna Tehnikaülikooli valgustehnika laboris. Vajalik info leiti erinevatest raamatutest ning veebiallikatest, paljud vajalikud materjalid andis töö juhendaja.

Bakalaureusetöö eesmärgiks oli restaureerida integreeriv sfäär, mis pika aja jooksul oli muutunud kasutamiskõlbmatuks. Selleks oli vaja õppida tundma integreeriva sfäär tööpõhimõtteid ning leida vastavalt võimalustele parimad vahendid töökorra taastamiseks. Peale restaureerimistööd sooritati katsed kalibreeritud mõõteriista ning restaureeritud mõõteriistaga ja hinnati saavutatud täpsust. Lisaks koostati juhend mõõteriista kasutamiseks. Mõõteriista kasutusele võtuks hinnati mõõtemääramatust ning õppetöös rakendamiseks töötati välja kasutusjuhend.

Täna juhendajat Toivo Varjast põneva teema välja pakkumise ning abivalmi juhendamise eest.

Integreeriv sfäär, valgusallikad, valgustehnika labor, bakalaureusetöö

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

a	sfääri sisepinna mittepeegelduvate alade pindala suhe sfääri kogu sisepindalasse
A_{sphere}	sfääri sisepindala, m ²
CRI	värviedastusindeks (ingl k <i>Color Rendering Index</i>)
E_{total}	valgustustihedus, lx
k	kattetegur
K	korrektsioonitegur
n	mõõtetulemuste hulk
P	aktiivvõimsus, W
r	sfääri raadius, m
R_a	värviedastusüldindeks
s_n	standardhälve
u_C	mõõtemääramatus
$U_{\bar{x}_n}$	laiendmääramatus
V	variatsioonikordaja
x_i	juhuslikud mõõtetulemused
\bar{x}_n	mõõtetulemuste aritmeetiline keskmine
ϕ	valgusvoog, lm
ρ	peegeldustegur
η	valgusviljakus, lm/W
ω	ruuminurk, sr

SISSEJUHATUS

Bakalaureusetöö teema on Tallinna Tehnikaülikooli poolt pakutud ning lähtub vajadusest teha vana kasutamiskõlbmatu mööteriist taas töökorda. Restaureeritav mööteriist on valgusvoofotomeetriline kera ehk integreeriv sfäär, millega saab mõõta valgusallikate valgusvoogu, kaasaegse spektroradiomeetri rakendamisel ka värviedastusindeksit, valguse lainepikkust, värvsustemperaatuuri jne.

Bakalaureusetöö eesmärgiks oli koguda infot ja dokumenteerida integreeriva sfääri tööpõhimõtte, vana nimetusega „Ulbrichti kuuli“ restaureerimine ning sooritada võrdlusmõõtmised ülikooli labori integreeriva keraga, mille mõõtemääramatus on teada. Mõõdetud tulemuste järgi hinnata restaureerimisel saavutatud mõõtemääramatust ning luua kasutusjuhend restaureeritud sfääri kasutamiseks õppetöös.

Käesoleva töö autor uuris kättesaadavat kirjandust integreeriva sfääri kohta ning lõputöö üheks osaks on koondatud materjal ja juhismaterjal integreeriva keraga töötamiseks. Informatsiooni saadi nii erialastest õpikutest, veebiallikatest, standarditest kui sõnastikust. Teine osa tööst oli praktiline ning selle käigus on tehtud rohkem kui 100 tundi tööd, et taastada vana integreeriv sfäär töökorda. Töökorra hindamiseks on sooritatud kuue erineva valgusallikaga mõõtmised ning teostatud võrdlused kalibreeritud integreeriva sfääri mõõtetulemustega.

Kõik püstitatud eesmärgid said bakalaureuse töö tegemisel täidetud. Autor õppis tundma integreeriva sfääri tööpõhimõtteid ning teostas vana integreeriva sfääri restaureerimise võimalikult originaali lähedaselt ning saavutades mõõtemääramatuse, millega mööteriist on kasutatav ka nõudlikes õppetöö projektides.

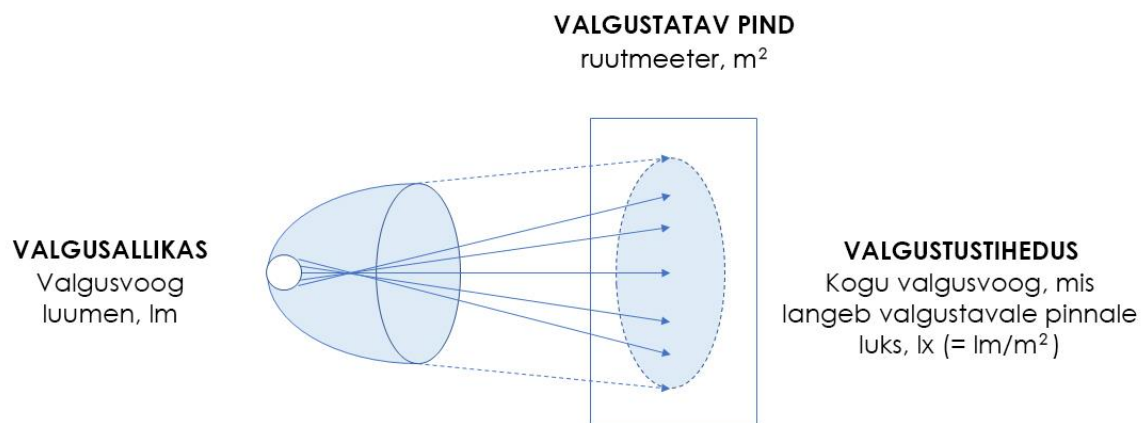
1. VALGUSTUSALASED MÕISTED

Käesolevas peatükis tuuakse välja olulisemaid mõisted, mida integreeriva sfääriga töötamisel peab teadma. See informatsioon on aluseks järgmistele bakalaureusetöö osadele.

Lampide peamised tunnussuurused on valgusvoog, valgusviljakus, värvsustemperatuur ja värviedastusindeks.

1.1 Valgustustihedus

Valgustustihedus on antud punkti sisaldavale pinnaelemendile langeva valgusvoo ja selle elemendi pindala jagatis. Valgustustiheduse tähis on E ja ühik luks, lx. [1] Üks luks on defineeritud kui valgusvoog üks lumen ühe ruutmeetri suurusel pinnal. [2]



Joonis 1.1 Valgustustihedust selgitav joonis terminite ja ühikutega [3]

Valgustustihedus on arvutatav valgusvoo olemasolu korral valemiga 1.3. [4]

$$E_{total} = \frac{\phi}{A_{sphere}} \cdot \frac{\rho}{[1 - \rho(1 - a)]} = \frac{\phi}{A_{sphere}} \cdot K \quad (1.1)$$

kus E_{total} – valgustustihedus, lx

ϕ – valgusvoog, lm,

A_{sphere} – sfääri sisepindala, m²,

ρ – peegeldustegur,

a – sfääri sisepinna mittepeegelduvate alade pindala suhe sfääri kogu sisepindalasse,

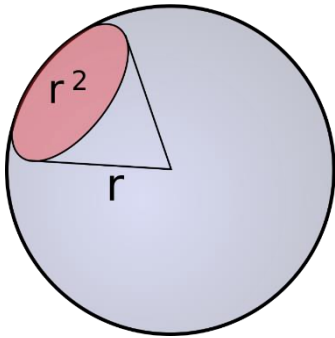
K – korrigeerimisitegur.

$$K = \frac{\rho}{[1 - \rho(1 - a)]} \quad (1.2)$$

$$a = \frac{\text{sisepinna mittepeegelduvate alade pindala summa}}{A_{\text{sphere}}} \quad (1.3)$$

1.2 Ruuminurk

Ruuminurga tähis on ω ja ühik steradiaan, sr. [5] Üks steradiaan on defineeritud kui ruuminurk tipuga kera keskpunktis, mis eraldab kera pinnal kera raadiuse ruuduga võrdse ala. [6]



Joonis 1.2 Ruuminurka selgitav joonis. [6]

1.3 Valgusvoog

Valgusvoog on suurus, mis iseloomustab valgusallika väljastatavat kogu valgushulka nähtavas spektris. Valgusvoo tähis on Φ ja ühik lumen, lm. Üks lumen on defineeritud kui valguallikast väljastatud valgusvoog, mis kiirgab valgustugevusega üks kandela ja on suunatud ruuminurka üks steradiaan. [5] [1]

Valgusvoog on valgustustiheduse olemasolu korral arvutatav valemist 1.1 teisendatud valemiga 1.4.

$$\phi = \frac{E_{\text{total}} \times A_{\text{sphere}}}{K} \quad (1.4)$$

1.4 Valgusviljakus

Valgusviljakus on valgusallika valgusvoo Φ ja selle tekitamiseks tarbitava võimsuse P jagatis. SI-süsteemi mõõtühik on lumen vati kohta lm/W. [5]

$$\eta = \frac{\Phi}{P} \quad (1.5)$$

kus η – valgusviljakus, lm/W,
 P – aktiivvõimsus, W.

Valget valgust andvate lampide korral on selle näitaja teoreetiline ülempiir ligikaudu 250 lm/W. [7]

1.5 Värvsustemperaatur

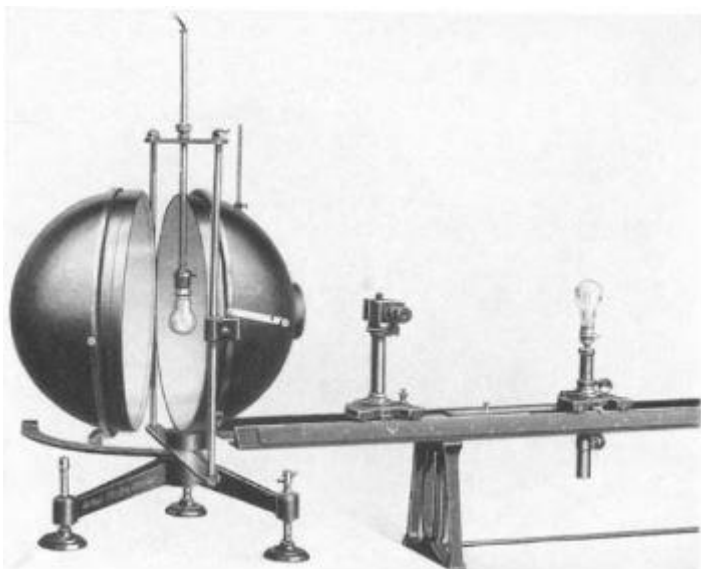
Värvsustemperaatur on mustkiirguri temperatuur, mille puhul tema kiirguse värvsus langeb kokku vaadeldava kiirguse värvsusega. Ühik kelvin, K. [1] Värvsustemperaatur on nähtava valguse omadus, millel on olulised rakendused valgustuses, fotograafias, videograafias, kirjastamises, tootmises, astrofüüsikas ja muudes valdkonnades. [5]

1.6 Värviedastusüldindeks

Värviedastuse hindamine teostatakse põhimõttel, mille kohaselt hinnatakse värvsuse muutuse suurust katsetatava valgusallika ja etalonvalgusallika poolt kiiratud testvärvil. [5] Värviedastusüldindeks R_a näitab esimese 8 testvärvi keskmist. Kokku on praegu kasutusel 14 sellist testvärvi näidist, mis on määratletud standardis DIN 6169 ja CIE 13.2. Paljudel juhtudel arvutatakse ka täiendav CRI 15, mis hiljem lisati. [8] Etalonvalgusallikas peaks olema sama või peaaegu sama värvsusega, mis katsetatav valgusallikas. Kui valgusallika värvsustemperaatur on 5000K või suurem, peaks etaloniks olema päevavalgus. Kui värvsustemperaatur on alla 5000K, on etaloniks mustkiirgur. Kui valgustuse tase on madal (<200 luksi), peetakse värvi, mis on kiiratud valgusallika poolt, mille värvsustemperaatur on alla 3200K, tõeliseks värviks. Kui tase on üle 1000 luksi, on eelistatud valgusallikas, mille värvsustemperaatur on üle 5000K. [5]

2. ARTHUR PFEIFFER INTEGREERIVA SFÄÄRI TAASTAMINE

Järgnevalt on dokumenteeritud 0,5m diameetriga sfääri algne olukord, tehtud restaureerimise tegevused ning saadud tulemus. Fotomeetriline sfäär on pärit umbes eelmise sajandi kolmekümnendatest ning oli aja jooksul üsna kahjustada saanud. Joonisel 2.1 on näha pilt samast sfäärist, mis on pärit 1938. aastal ilmunud valgustehnika käsiraamatust.

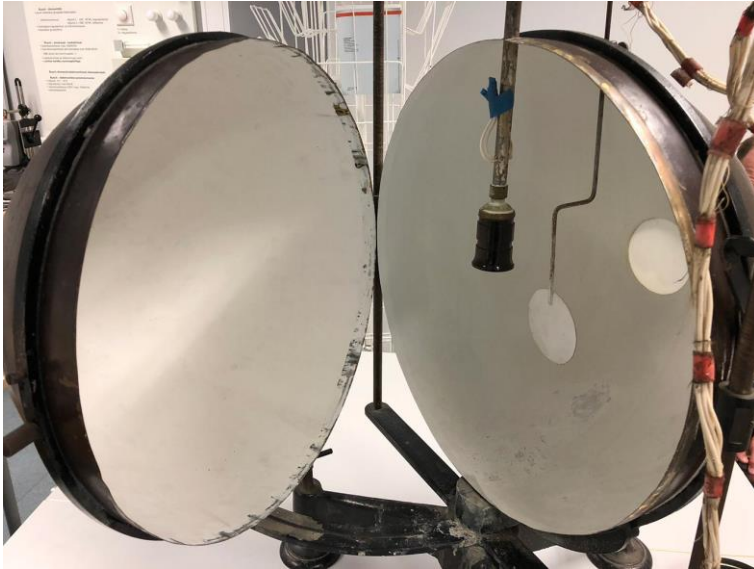


Joonis 2.1 Arthur Pfeifferi integreeriv sfäär [9]

2.1 Esialgse seisundi hindamine

Integreeriva sfääri seisund oli laboratoorsete mõõtmiste tegemiseks kasutamiskõlbmatu. Sfääri sisepinna värv oli ebaühtlane ja koorunud, sees paiknevate esemete värv oli peaaegu täielikult eemaldunud ja valgusallika hoidmiseks mõeldud E27 sokkel oli musta värvi, nagu on näha joonisel 2.2. Sfääri välispinna värv oli koorunud ja kahjustada saanud, nagu on näha joonisel 2.3, ning kuju oli deformeerunud, esines palju suuremaid ja väiksemaid mõlke, nagu on näha joonisel 2.4. Raami kõik detailid olid esteetilise välimuse aja jooksul kaotanud, nagu on näha joonisel 2.5. Kaabelduse isolatsioon oli kahjustada saanud ja rabadaks muutunud.

Õõneskera tuli täielikult demonteerida ja kõik detailid taastada. Tänapäevaste mõõteseadmete rakendamiseks tuli valmistada adapterid, millega saaks neid paigaldada mõõteavasse.



Joonis 2.2 Sfääri sisepind enne taastamist



Joonis 2.3 Sfääri välispind enne taastamist



Joonis 2.4 Sfääri kuju deformatsioon



Joonis 2.5 Raam ja jalus enne taastamist

2.2 Töökorra taastamisel seatud eesmärgid

Mööteriista taastamisel võimalikult originaali lähedasele kujule võeti eesmärk saavutada mõõtemääramatuse, millega mööteriist on kasutatav ka nõudlikes õppetöö projektides. Järgnevates peatükkides on esitatud mõõtmistulemusi mõjutavad tegurid ja olulisemad eesmärgid saavutamaks võimalikult ühtlane ning valgust peegeldav täismatt valge sisepind. Eesmärgiks seati kaasaegsete mööteriistade integreerimine sfääri külge ning võimaluste loomine võrdlusmõõtmiste läbiviimiseks teiste sarnaste valgusvoo mööterakendustega.

2.3 Töökorra taastamiseks tehtud sammud

Järgnevalt on lühidalt kirjeldatud mööteriista töökorda saamiseks tehtud toiminguid. Taastamine oli võrdlemisi ajamahukas, algas 2018. aasta maikuus ja valmis sai 2018. aasta novembris.

2.3.1 Värvide eemaldamine ja detailide puhastamine

Kõige ajakulukam töö oli vana värvi eemaldamine. Värv oli vaja eemaldada vaskse kera seest ja väljaspoolt ning raami detailidelt. Värvide eemaldamiseks kasutasin tugevat värvi- ja lakieemaldit Henkel Nitromors ning efektiivseimaks abivahendiks osutusid vanad plastikkaardid, sest need on piisavalt pehmed ja painduvad, et mitte kahjustada sfääri vasest pinda.



Joonis 2.6 Värv eemaldatud kera välispinnalt

2.3.2 Sfääri pinna silumine

Juba töö algaasis (vt joonis 2.4) sai hinnatud, et sfääri pind on oluliselt kahjustunud ning ebaühtlane ning vajas taastamist. Sfääri pind sai ettevaatlikult trügitud eriotstarbeliste kummist ja plastikust haamritega. Selleks, et sfääri vasest pinda mitte liiga palju deformeerida ja vigastada jäid pinnale mõned väiksemad deformatsioonid, mis oluliselt ei määra mõõtmistulemusi.

2.3.3 Sfääri uus värv

Sfääri kõige olulisem mõõtmisi mõjutav tegur on sisepinna värv, mis peab olema võimalikult valgust peegeldav. Ideaalis kasutatakse selleks spetsiaalset täismatt valget värvi, aga see on oluliselt kallim, kui lahendus, mille kasuks otsustasime. Kera sise- ja välispinna värvimise usaldasime värvitöökajale. Värvide valikul saime kaasarääkida ning otsustada, et sisepind kaeti täismatt valge värviga ning välispind algsele originaaltoonile sarnase värviga. Osaliselt säilinud kuldne tootjafirma originaaltekst kera välispinnal kopeeriti ning taastati juhendaja poolt.

2.3.4 Muud detailid

Uue värvkatte said ka kõik raami detailid ning sfääri sees paiknev ekraan ning soklit hoidev toru. Soklina on nüüd kasutusel valge portselanist E27 sokkel. Lisavõimalusena on rakendatav mõõtmise ka E14 sokliga valgusallikatele, kasutades eriotstarbelist adapterit E27 soklilt E14 soklile.

Kõikidelt värvimata pindadelt sai eemaldatud rooste ja poleeritud.

2.4 Töökorras mõõteriist

Järgnevatel piltidel on näha integreeriva sfääri seisund pärast restaureerimist.



Joonis 2.7 Sfääri välisilme pärast taastamist esiküljelt ja koos valgustiheduse mõõteadapteriga tagaküljelt.



Joonis 2.8 Taastatud sfääri sisepind, varjuk ja konsoolil E27 soklikinnitus pärast taastamist.

3. MÕÕTMISTELE ESITATAVAD NÕUDED

Valgustite fotomeetrilised põhiandmed saadakse otseste fotomeetriliste mõõtmiste teel. Usaldusväärsete andmete saamiseks on kõigi andmete kogumisetappide käigus vajalik teatud täpsustase. [10]

3.1 Integreeriv sfäär

Integreerivas sfääris võrreldakse mõõdetava lambi valgusvoogu taatellambi valgusvooga. Kuna teoreetilisi nõudeid saab praktikas ainult ligikaudselt realiseerida, tekib mõõtevigu. Mõõtemääramatus suureneb mõõdetava lambi ja taatellambi alljärgnevate erinevuste suurenemisel:

- 1) mõõtmed
- 2) kiirguse spektraaljaotus
- 3) valgusvoo jaotus
- 4) valguse neeldumine
- 5) tarbitav võimsus

Integreeriva sfääri koosseisus kasutame luksmeetrit. Luksmeetri omadused peavad vastama tabelis 3 esitatud nõuetele, arvestamata kalibreerimismääramatust. [10]

3.1.1 Sfääris paiknevate esemete mõju

Kõik integreerimissfääris paiknevad esemed (nt ekraan, konsool ja soklid) mõjutavad otseselt mõõtmisi ja peavad seega olema võimalikult väikesed. Mõõtetulemusi mõjutab ka lambi korpus ning sfääris tekkiva valguse neeldumine lambi korpusesse.

Erinevate pindade mõjud tuleb jäädvustada ja lisalambi abil sooritatavate mõõtmiste teel selgitada välja parandustegur nende mõjuda arvestamiseks. Nimetatud lisalamp on tavaliselt paigaldatud sfääris pinna lähedale fotomeeteri vastu. [10]

3.1.2 Sfääri värv

Sfääri värv peegeldusviis peab olema kogu sfääri pinnal hajus, spektraalselt aselektiivne ja homogeenne. Sfääri värv ei tohi olla helendav ega fluorestseeriv ja selle peegeldustegur on vahemikus 0,75 kuni 0,85 või parimal juhul kõrgem. [10]

3.1.3 Lambi ja ekraani asend

Lamp seatakse sfääri keskmesse. Ekraan seatakse selliselt, et vältida lambi valgusest tingitud fotomeeterpea otsest valgustamist. Ekraani kaugus fotomeeterpeast peab olema umbes 1/6 sfääri läbimõõdust. [10]

3.1.4 Mõõtmiste sooritamine

Mõõdetava lambi valgusvoo võrdlemisel ligikaudu samasuguste mõõtmitega taatellambi valgusvooga ei tohi teha mingeid muudatusi ekraani ja fotomeeterpea asendis. Lambi neelduvusest tingitud mõõtehälbeid võib korrigeerida lisalambi abil tehtavate lisamõõtmiste abil. [10]

3.2 Luksmeetrid

Laborites koos integreeriva sfääriga kasutatavad luksmeetrid peavad vastama tabelis 3.1 esitatud nõuetele. Antud väärtused peab sätestama tootja. [10]

Omadus	Tähis ¹⁾	Maksimaalne väärtus
Kalibreerimismääramatus	U_{cal} ²⁾	1%
Viga $V(\lambda)$ -mittevastavusest	f_1'	1,5%
Viga ultraviolettkiirguse toimest	u	0,2%
Viga infrapunakiirguse toimest	r	0,2%
Koosinusviga	f_2 ³⁾	1,5%
Lineaarsusviga	f_3	0,2%
Näidikuviga	f_4	0,2%
Väsimusviga	f_5	0,1%

Viga temperatuuri toimest	f_6 ⁴⁾	0,2%
Valguse modulatsioonist tingitud viga	f_7 ⁵⁾	0,1%
	$f_7(f_u)$ ⁶⁾	5%
	$f_7(f_0)$ ⁷⁾	5%
Viga valgustuse ebaühtlusest	f_9	15%
Viga mõõtepiirkonna muutmisel	f_{11}	0,1%
Koondviga	f_{total}	4%
Koondvea arvutamine	$f_{total} = U_{cal} + f_1' + u + r + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 + f_7 + f_{11}$	
<p>¹⁾ Tumendatud väljadel esitatud suurusid kasutatakse koondvea arvutamiseks.</p> <p>²⁾ U_{cal} on laiendatud mõõtemääramatus, mida kasutatakse fotomeetri kalibreerimiseks ning milleks on kombineeritult ülekandemääramatus ja standardalgusallika määramatus, mille usaldustase on ligikaudu 95 % ($k = 2$).</p> <p>³⁾ Seda viga ei pea arvestama risti langeva valguse mõõtmisel. Sel juhul kasutatakse koondvea arvutamiseks väärtust $f_2 = 0$ ja maksimaalset koondviga vähendatakse väärtuseni 3 %.</p> <p>⁴⁾ Temperatuuril $T = 25$ °C ja temperatuurierinevusel $\Delta = 2$ °C.</p> <p>⁵⁾ Mõõdetud sagedusel 100 Hz. Lühikese töötsükliga pulseerivate valgusallikate mõõtmisel peab fotomeetri liigkoormuskaitse olema piisav.</p> <p>⁶⁾ Piirsagedus $f_u = 40$ Hz</p> <p>⁷⁾ Piirsagedus $f_0 = 10^5$ Hz</p>		

Tabel 3.1 Integreeriva sfääriga kasutatava luksmeetri nõuded.

4. MÕÕTMISED

Mõõtmisi teostasid kümne valgusallikaga taastatud Arthur Pfeiffer integreeriva sfääri ja võrdlevad mõõtmised on tehtud kalibreeritud Gigahertz-Optik integreeriva sfääriga ning rakendades mõõtmisteks sarnaseid kaasaegseid mõõteriistu.

4.1 Mõõtmistel kasutatavate valgusallikate kirjeldused

Kümnest valgusallikast neli on leedlambid, neli hõõglambid ja kaks integreeritud kompaktluminofoorlampid.

4.1.1 Leedlamp

Leedid on pooljuhtkiirgurid, kus valgus on loodud pooljuhtmaterjali sees. Kui kindlast pooljuhtmaterjalist lasta läbi elektrivoolu, siis see kiirgab valgust. Valgust kiirgavaid pooljuht dioode nimetatakse lühendiga LED, mis on tulnud ingliskeelsest nimetusest *light-emitting diode*. Kuni üheksakümnendate keskpaigani oli leedi valgustugevus väike ja madala kasuteguriga. Neid kasutati vaid väikesteks indikaatorlampideks (näiteks elektriseadmetes). Tänapäeval on leedide efektiivsus võrreldav gaaslahenduslampidega. Tänapäevase Ühe leedi valgusvoog võib olla suurem kui 75W-l hõõglambil. Nende leedide eristamiseks indikaatorlampidest, viidatakse neile kui suure heleduse või suure võimsusega leedidele. Kõrgema heledusega leedide edasiarendused lubavad tõenäoliselt valgusviljakust veidi rohkem kui 200lm/W (valge valguse leedide puhul). See on ligikaudu kaks korda suurem kui siiani efektiivsuselt kõige tõhusamatel valge valgusega gaaslahenduslampidel. [11]



Joonis 4.1 Tavaline leedlamp E27 sokliga.

4.1.2 Hõõglamp

Hõõglambi tööpõhimõte on äärmiselt lihtne. Elektivool lastakse läbi suhteliselt kõrge takistusega õhukese traadi, et seda soojendada hõõgumiseni. Traadina kasutatakse enamasti volframit. Hõõglambi traat kuumutatakse tavaliselt temperatuurini 2700-2800 kelvinit, kus hõõglamp kiirgab sooja valget valgust. Traat asub klaaskolbis, mis on kas vaakumis või sisaldab inertset gaasi, milleks on enamasti argooni ja lämmastiku segu. Hõõglambid saavutavad oma täieliku valgusvoo koheselt pärast sisselülitamist. [11]

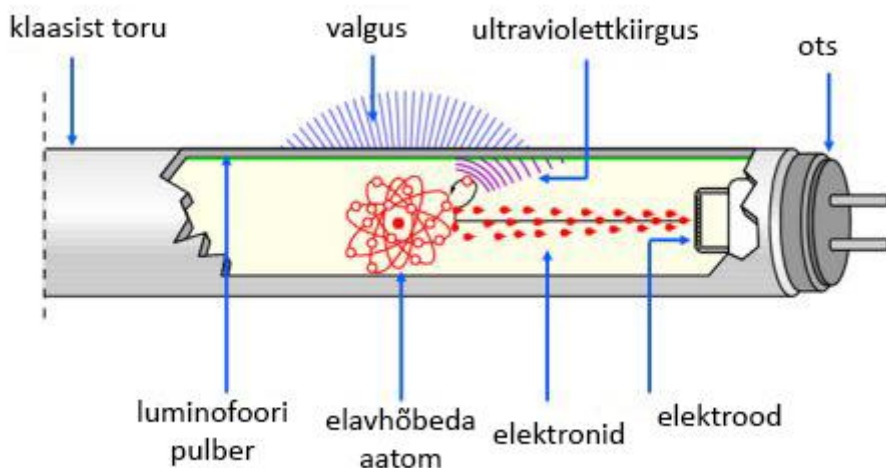


Joonis 4.2 Hõõglambi põhikomponendid [11]

4.1.3 Integreeritud kompaktluminofoorlamp

Luminofoorlambi toru on täidetud inertse gaasi ja väikese koguse elavhõbedaga. Toru igas otsas on elektrood. Selleks, et hõlbustada luminofoorlampide süttimist, eelsoojendatakse elektroodid kõrgepinge impulsiga enne süütamist. Kui lamp on sisse lülitatud, hakkavad elektroodid elektrone eraldama ja läbi nende elektronide kokkupõrke gaasi aatomitega algab ionisatsiooniprotsess. Inertne gaas soojendatakse üles ja elavhõbe aurustub toru sees täielikult, et saada elavhõbeda aururõhk umbes 0,8 Pa. Eraldatud elektronid põrkavad kokku ja ergastavad elavhõbeda aatomeid, mille tulemusena tekib ultraviolettkiirgus ja väike kogus sinist nähtavat valgust. Luminofoorlambi

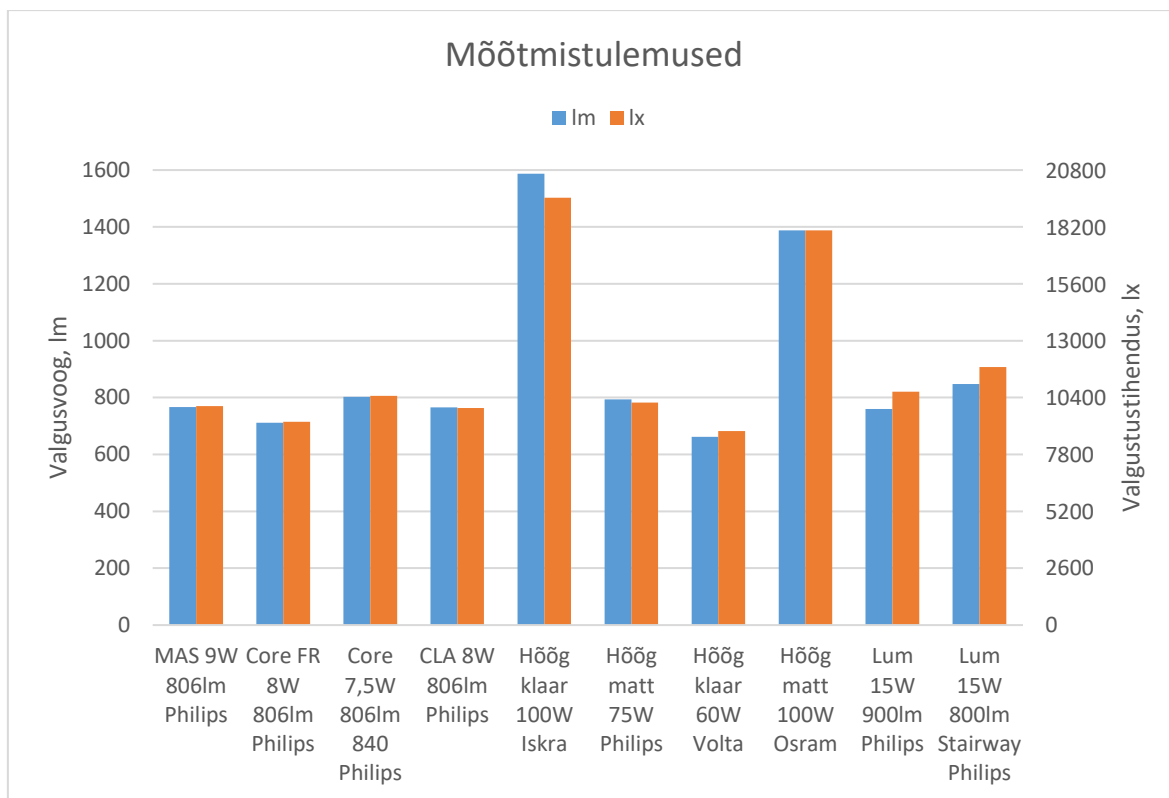
toru sisemus on kaetud luminofoori pulbriga. Ultraviolettkiirus muundub luminofoorikihi läbimisel nähtavaks valguseks. Luminofoorlamp vajab töötamiseks liiteseadet. Katsetes kasutusel oleva integreeritud kompaktluminofoorlampil on liiteseade paigutatud sokli ja korpuse sisse. [11]



Joonis 4.3 luminofoorlampi põhikomponendid [11]

4.2 Mõõtmistulemused

Taastatud Arthur Pfeiffer integreerival sfääril diameetriga 0,5m on anduriks luksmeeter ja mõõtetulemuseks valgustustihedus. Kalibreeritud Gigahertz-Optik integreerival sfääril diameetriga 1m on anduriks spektroradiomeeter BTS256-LED ja mõõtetulemuseks valgusvoog. Leedlampidel ja luminofoorlampidel lasime soojeneda 10 minutit ning hõõglampidel 5 minutit. Joonisel 4.2 on kõrvuti pandud Gigahertz-Optik integreeriva sfääriga mõõdetud tulemused lumenites ja Arthur Pfeiffer integreeriva sfääriga mõõdetud tulemused luksides. Jooniselt tuleneb valgusvoo ja valgustustiheduste vaheline korrelatsioon.



Joonis 4.4 Valgustustiheduse mõõdetud väärtused võrdluses valgusvoo mõõdetud väärtustega

5. ARTHUR PFEIFFER INTEGREERIVA SFÄÄRI

KORREKTSIOONITEGUR

Ideaalse integreeriva sfääri korrektsioonitegur sõltub ainult sisepinna peegeldustegurist. Reaalses integreerivas sfääris ei ole kogu sisepind ühtemoodi peegelduv. Uuritava sfääri pinnal on 3 ava: mõõteseadme, ekraani ja valgusallika hoidja jaoks. Nende avade peegeldus pole ülejäänud sisepinnaga sama. Seetõttu kasutatakse modifitseeritud korrektsioonitegurit, kus arvestatakse sisse avade pindala kogu sisepindala suhtes. [4]

Arvutatav peegeldusteguri olemasolu korral valemiga 1.2.

$$K = \frac{\rho}{[1 - \rho(1 - a)]}$$

5.1 Korrektsioonitegur Arthur Pfeiffer integreeriva sfääri jaoks

Mõõtmiste tulemusena leiti taastatud integreeriva sfääriga mõõdetud valgustihedus ja kalibreeritud integreeriva sfääriga mõõdetud valgusvoog, siis sai arvutatud korrektsioonitegur valemiga 5.2, mis on tuletatud valemist 1.1, ja peegeldustegurit leidma ei pea. Taastatud integreeriva sfääri jaoks puudub sisepinna peegeldustegur, seetõttu leitakse korrektsioonitegur ilma peegeldustegurita. Korrektsiooniteguri arvutamisel kasutatakse sama valgusallikaga saadud mõõtetulemusi taastatud integreerivas sfääris ja kalibreeritud integreerivas sfääris. Eeldame, et taastatud integreerivas sfääris mõõdetuna peaks valgusallikas andma välja sama valgusvoo, mis kalibreeritud integreerivas sfääris.

$$K = \frac{E_{total} \times A_{sphere}}{\Phi} \quad (5.2)$$

Sfääri raadiusega r sisepinna pindala on leitav valemiga 5.3. [12]

$$A_{sphere} = 4\pi r^2 = 4\pi(0,25)^2 = 0,785398163 \text{ m}^2 \quad (5.3)$$

kus r – sfääri raadius, m.

$$A_{sphere} = 4\pi(0,25)^2 = 0,785398163 \text{ m}^2$$

5.1.1 Korrektsioonitegurid leedlampidele luksmeetrit kasutades

Mõõtmisi teostasin 4 leedlampiga ja igast lambist on kasutusel 2 mõõtetulemust.

E_{total}	ϕ_0	$K = \frac{E_{total} \times A_{sphere}}{\Phi_0}$
10260	782,0	10,30
9870	745,0	10,40
11100	838,4	10,39
9990	769,2	10,20
10040	767,0	10,28
9330	711,8	10,29
10520	802,1	10,30
9960	765,5	10,21

Tabel 5.1 Korrektsioonitegurite arvutus leedlampidele.

5.1.2 Korrektsioonitegurid hõõglampidele luksmeetrit kasutades

Mõõtmisi teostasin 4 hõõglambiga ja igast lambist on kasutusel 2 mõõtetulemust.

E_{total}	ϕ_0	$K = \frac{E_{total} \times A_{sphere}}{\Phi_0}$
19940	1575,1	9,94
10070	794,7	9,95
8630	660,5	10,26
18080	1351,4	10,50
19600	1587,0	9,86
10200	793,7	10,09
8900	662,0	10,55
18100	1387,4	10,24

Tabel 5.2 Korrektsioonitegurite arvutus hõõglampidele.

5.1.3 Korrektsioonitegurid luminifoorlampidele luksmeetrit kasutades

Mõõtmisi teostasin 2 luminifoorlampiga ja igast lambist on kasutusel 2 mõõtetulemust.

E_{total}	ϕ_0	$K = \frac{E_{total} \times A_{sphere}}{\Phi_0}$
10850	800,0	10,65
11770	759,4	10,12
10700	913,0	11,06
11840	847,8	10,96

Tabel 5.3 Korrektsiooniteguri arvutus luminofoorlampidele.

5.2 Korrektsiooniteguri aritmeetiline keskmine ja standardhälve

Et mõõtmisi on alati lõplik hulk, siis tegelikult me ei saa kunagi teada tõelist mõõdetava suuruse väärtust ja me peame alati piirduma ligikaudse statistilise hinnanguga \bar{x}_n , mis on mõõtetulemuste aritmeetiline keskmine ja leiame valemist 5.4. See statistiline hinnang võetakse mõõdetava suuruse parimaks hinnanguks. [13]

$$\bar{x}_n = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5.4)$$

kus \bar{x}_n – mõõtetulemuste aritmeetiline keskmine,
 x_i – juhuslikud mõõtetulemused,
 n – mõõtetulemuste hulk.

Juhusliku suuruse x_i standardhälve on vastavalt valemile 5.5. [13]

$$s_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2}{n - 1}} \quad (5.5)$$

kus s_n – standardhälve.

5.2.1 Korrektsiooniteguri aritmeetiline keskmine ja standardhälve leedlampidele luksmeetrit kasutades

Korrektsioonitegurite aritmeetiline keskmine leitakse valemist 5.4.

$$\bar{x}_n = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = 10,30$$

x_i	$x_i - \bar{x}_n$	$(x_i - \bar{x}_n)^2$
10,30	0,00	0,00
10,40	0,10	0,01
10,39	0,10	0,01
10,20	-0,10	0,01
10,28	-0,02	0,00
10,29	-0,01	0,00
10,30	0,00	0,00
10,21	-0,08	0,01

Tabel 5.4 Leedlampide korrektsioonitegurid ja arvutused.

Juhusliku suuruse x_i standardhälve leitakse valemist 5.5. [13]

$$s_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2}{n - 1}} = 0,073$$

5.2.2 Korrektsiooniteguri aritmeetiline keskmine ja standardhälve hõõglampidele luksmeetrit kasutades

Korrektsioonitegurite aritmeetiline keskmine leitakse valemist 5.4.

$$\bar{x}_n = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = 10,17$$

x_i	$x_i - \bar{x}_n$	$(x_i - \bar{x}_n)^2$
9,94	-0,24	0,06
9,95	-0,23	0,05
10,26	0,08	0,01
10,50	0,33	0,11
9,86	-0,31	0,10
10,09	-0,09	0,01
10,55	0,38	0,14
10,24	0,07	0,00

Tabel 5.5 Hõõglampide korrektsioonitegurid ja arvutused.

Juhusliku suuruse x_i standardhälve leitakse valemist 5.5. [13]

$$s_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2}{n-1}} = 0,26$$

5.2.3 Korrektsiooniteguri aritmeetiline keskmine ja standardhälve luminofoorlampidele luksmeetrit kasutades

Korrektsioonitegurite aritmeetiline keskmine leitakse valemist 5.4.

$$\bar{x}_n = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = 10,70$$

x_i	$x_i - \bar{x}_n$	$(x_i - \bar{x}_n)^2$
10,65	-0,05	0,00
10,12	-0,58	0,33
11,06	0,36	0,13
10,96	0,27	0,07

Tabel 5.6 Luminofoorlampide korrektsioonitegurid ja arvutused.

Juhusliku suuruse x_i standardhälve leitakse valemist 5.5. [13]

$$s_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2}{n-1}} = 0,42$$

5.3 Variatsioonikordaja

Variatsioonikordaja on standardhälbe ja keskväärtuse suhe. Tähis V . Variatsioonikordaja esitatakse tavaliselt protsentides. Kasutatakse siis, kui andmeid ei saa võrrelda nende erineva dimensiooni tõttu. [14]

$$V = \frac{s_n}{\bar{x}_n} \tag{5.6}$$

kus V – variatsioonikordaja.

5.3.1 Variatsioonikordaja leedlampidele luksmeetrit kasutades

Leitakse valemist 5.6 variatsioonikordaja leedlampide korrektsioonitegurile.

$$V = \frac{s_n}{\bar{x}_n} = \frac{0,073}{10,30} = 0,0071 \times 100\% = 0,71\%$$

5.3.2 Variatsioonikordaja hõõglampidele luksmeetrit kasutades

Leitakse valemist 5.6 variatsioonikordaja hõõglampide korrektsioonitegurile.

$$V = \frac{s_n}{\bar{x}_n} = \frac{0,26}{10,17} = 0,0256 \times 100\% = 2,56\%$$

5.3.3 Variatsioonikordaja leedlampidele luksmeetrit kasutades

Leitakse valemist 5.6 variatsioonikordaja luminofoorlampide korrektsioonitegurile.

$$V = \frac{s_n}{\bar{x}_n} = \frac{0,42}{10,70} = 0,0396 \times 100\% = 3,96\%$$

5.4 Mõõtemääramatus

Korrektsiooniteguri määramatus võrdub antud juhul standardhälbega, mis leiti valemiga 5.5. [13] Määramatusena kasutatakse valemist 5.6 arvatud variatsioonikordajat, kuna on vajadus hinnata erinevate dimensioonidega väärtuste hindamiseks.

$$u_c = s_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2}{n - 1}}$$

kus u_c – mõõtemääramatus.

$$V = \frac{s_n}{\bar{x}_n} = \frac{u_c}{\bar{x}_n}$$

Laiendmääramatus leitakse valemist 5.7.

$$U_{\bar{x}_n} = k \times u_c \tag{5.7}$$

kus $U_{\bar{x}_n}$ – laiendmääramatus,
 k – kattetegur,

Kuna meil on vaja saada protsendilise väärtusega laiendmääramatus, siis pannakse valemisse 5.7 ka variatsioonikordaja.

$$U_{\bar{x}_n} = k \times V \quad (5.8)$$

Antud juhul on meil katteteguriks k Studenti tegur $t_{v,\beta}$, mille väärtused leiab tabelist 5.6. [15]

v	β				
	0,5	0,68	0,95	0,975	0,9973
1	1,00	1,8	12,27	12,7	235,8
2	0,82	1,3	4,3	4,3	19,2
3	0,77	1,2	3,2	3,2	9,2
4	0,74	1,1	2,8	2,8	6,6
5	0,73	1,1	2,6	2,6	5,5
6	0,72	1,1	2,5	2,4	4,9
7	0,71	1,1	2,4	2,4	4,5
8	0,71	1,1	2,3	2,3	4,3
9	0,70	1,1	2,3	2,3	4,1
10	0,70	1,1	2,2	2,2	4,0
20	0,69	1,0	2,1	2,1	3,4
∞	0,67	1,0	2,0	2,0	3,0

Tabel 5.7 Indeks $v = n - 1$ on vabadusastmete arv ja β on usaldatavus.

5.4.1 Mõõtemääramatus leedlampidele luksmeetrit kasutades

Leitakse valemist 5.8 laiendmääramatus leedlampide korrektsioonitegurile. Vabadusaste on 7 ja soovitakse usaldatavust 0,95.

$$U_{\bar{x}_n} = k \times V = 2,4 \times 0,71\% = 1,70\%$$

5.4.2 Mõõtemääramatus hõõglampidele luksmeetrit kasutades

Leitakse valemist 5.8 laiendmääramatus hõõglampide korrektsioonitegurile. Vabadusaste on 7 ja soovitakse usaldatavust 0,95.

$$U_{\bar{x}_n} = k \times V = 2,4 \times 2,56\% = 6,14\%$$

5.4.3 Mõõtemääramatus luminofoorlampidele luksmeetrit kasutades

Leitakse valemist 5.8 laiendmääramatus luminofoorlampide korrektsioonitegurile. Vabadustaste on 3 ja soovitakse usaldatavust 0,95.

$$U_{\bar{x}_n} = k \times V = 3,4 \times 3,96\% = 13,46\%$$

KOKKUVÕTE

Lõputöö raames restaureeriti aastatega kasutuks muutunud mõõteriist, mis on praeguseks juba õppetöös kasutusele võetud. Selliste kasutusvõimalustega kaasaegse mõõteriista kallidusest tulenevalt ei ole seni õppetöös taolisi valgusmõõtmisi Tallinna Tehnikaülikoolis teostatud. Seetõttu panustab kõnealuse lõputöö projekti lõpetamine valgustehnika hariduse edendamisse.

Restaureerimisega alustati 2018 maikuus ning tulemus saadi sama aasta lõpuks. Saavutatud tulemus on kvaliteetne, kuna see sarnaneb mõõteriista esialgsetele mõõtmetele ja välimusele. Võimalus vahetada andureid laiendab võimalusi integreeriva sfääri kasutamisel. Mõõteriistale leitud mõõtemääramatused luksmeetri kasutamisel on leedlampide korral 1,70%, hõõglampide korral 6,14% ja luminofoorlampide korral 13,46% võrdluses kalibreeritud integreeriva sfääriga.

Lõputöö kirjutamisel oli oluline osa mõõtetulemuste põhjal restaureeritud sfääri korrektsiooniteguri leidmine tulemuste teisendamiseks. Suurimaks probleemiks arvutuste teostamisel osutus uue sisemise värvikihi peegeldusteguri mitte teadmine ning seega tuli materjalidest lähtudes leida uus viis korrektsiooniteguri kättesaamiseks, et luksmeetriga saadud valgustustihedust oleks võimalik teisendada valgusvooks. Korrektsiooniteguri leidmiseks kasutati kalibreeritud integreeriva sfääri mõõtetulemusi, millele peaksid vastama restaureeritud integreeriva sfääri mõõtetulemused.

Lõputöö autor on saavutatud tulemusega rahul - hinnates teostatud töö kvaliteeti on saavutatud tulemus sobilik õppetöös rakendamiseks, et Tallinna Tehnikaülikooli tudengid saaksid omandada praktilisi teadmisi integreeriva sfääriga teostavatest mõõtmistest. Samuti on autori teadmised valgustehnikast ja integreerivast sfäärist töö kirjutamise käigus oluliselt laienenud.

SUMMARY

The aim of this bachelor's thesis was the restoration of a measuring instrument that had become unusable during the course of time. Given restored instrument has now been taken into use for educational purposes. These kinds of photometric measurement techniques have not been used by students before in TalTech due to the expensiveness of such a modern measuring instrument. Finishing this project has therefore played an important role in promoting lighting technology education.

The restoration process was started in May 2018 and was finished by the end of the year. The attained result is high quality because its accuracy of shape and colour resemblances the one of the initial instrument's and the possibility to change sensors broadens the integrating sphere's field of use. The uncertainty of measurement for the restored integrating sphere with lux meter compared to calibrated integrating sphere is 1,70% for LED bulbs, 6,14% for incandescent light bulbs and 13,46% for fluorescent lamps.

A key part to complete the project was calculating the sphere multiplier of the restored integrating sphere for conversion of the measured results. The biggest obstacle to achieving the accurate calculations was not knowing the reflectance of the new inner layer of coating. To calculate the sphere multiplier for conversion of illuminance measured with lux meter to luminous flux, a new approach was needed based on the materials. The measurements from calibrated integrating sphere were used to calculate the sphere multiplier, because the measurements should match those from restored integrating sphere.

The author of this thesis is satisfied with the results – it can be said that based on the quality of the work, the restored integrating sphere is suitable for students to use in laboratory application. TalTech students can now acquire practical knowledge of light measurements with integrating sphere. In addition to that, writing this thesis has broadened the author's knowledge about lighting technology and integrating spheres.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] E. Risthein, Valgustehnika sõnastik, Tallinn: Valgus, 1982.
- [2] J. Whetzel, „How Do I Measure Lux Lighting?“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://sciencing.com/do-measure-lux-lighting-6903072.html>. [Kasutatud 20 05 2019].
- [3] „Illuminance“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Illuminance>. [Kasutatud 26 12 2018].
- [4] „Real integrating spheres“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.gigahertz-optik.de/en-us/basics-light-measurement/integrating-spheres-theory-and-applications/real-is/>. [Kasutatud 02 01 2019].
- [5] A. K. R. Choudhury, Principles of Colour Appearance and Measurement, Volume 1 - Object Appearance, Colour Perception and Instrumental Measurement, Elsevier, 2014.
- [6] I. Peil ja K. Tarkpea, „Kelvin, amper, kandela ja mool,“ %1 Füüsikalise looduskäsitluse alused, Tallinn, Maurus Kirjastus, 2014.
- [7] E. Risthein, „ELEKTRILISTE VALGUSALLIKATE KESKKONNASÄÄSTLIKUST VALIKUST,“ 2009. [Võrgumaterjal]. Available: https://energiatalgud.ee/img_auth.php/9/9f/Risthein,_E._Elektriliste_valgusallikate_keskkonnas%C3%A4%C3%A4stlikust_valikust._2009.pdf. [Kasutatud 17 05 2019].
- [8] „Colorimetry“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.gigahertz-optik.de/en-us/basics-light-measurement/light-color/colorimetry/>. [Kasutatud 20 05 2019].
- [9] E. Alberts, W. Arndt, A. Beckmann, E. Besser, F. Born, A. Dresler, W. Dziobek, H. Ewest, W. Ganz, W. Hagemann, E. Hiepe, G. Jaeckel, R. Kell, H. Korte, F. Krautschneider, H. Krefft, J. Kurth, K. Lackner, K. Larché, G. Laue, E. Lax, H. Lossagk, H. Lux, G. Meyer, A. Pahl ja W. Petzold, Handbuch der Lichttechnik: Erster Teil, Berlin: Springer-Verlag, 1938, pp. 320-321.
- [10] EVS-EN 13032-1:2004+A1:2012 Valgus ja valgustus. Lampide ja valgustite fotomeetriliste andmete mõõtmise ja esitamise. Osa 1: Mõõtmise ja failiformaat, Brussels: European Committee for Standardization, 2012.
- [11] „Lighting Hardware“, [Võrgumaterjal]. Available: http://images.philips.com/is/content/PhilipsConsumer/PDFDownloads/Global/ODLI20160609_001-UPD-en_AA-Lighting-Hardware-17122012.pdf. [Kasutatud 03 01 2019].
- [12] „Sphere“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sphere>. [Kasutatud 02 01 2019].
- [13] „E-kursuse "Mõõtmised ja mõõtemääramused (LOFY.01.004)" materjalid,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/18059/Mootmised_mootemaaramused_materjalid.pdf. [Kasutatud 02 01 2019].
- [14] „L 6.2.4 Arvkarakteristikud,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://vara.ee-koolikott.ee/taxonomy/term/5119>. [Kasutatud 03 01 2019].
- [15] „FÜÜSIKALISTE SUURUSTE MÕÕTMINE. MÕÕTMISVEAD, MÕÕTEHÄLBED JA MÕÕTEMÄÄRAMATUS FÜÜSIKA PRAKTIKUMIDES,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.ttu.ee/public/m/Marek_Vilipuu/FI_doks/FUUSIKALISTE_SUURUSTE_MOOTMINE_MOOTMISVEAD_MOOTEHALBED_J.pdf. [Kasutatud 20 05 2019].