

UNIVERZA V NOVI GORICI
POSLOVNO-TEHNIŠKA FAKULTETA

**NADGRADNJA INTEGRACIJSKE SFERE ZA
NATANČNE FOTOMETRIČNE MERITVE NA
RAZLIČNIH SVETILIH**

MAGISTRSKO DELO

Boštjan Silič

Mentor: prof. dr. Iztok Arčon

Nova Gorica, 2014

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Iztoku Arčonu za dostopnost in pomoč pri pisanju magistrskega dela ter vsem profesorjem Univerze v Novi Gorici, ki so mi podali potrebna znanja za razumevanje te in ostalih tem, s katerimi se srečujem.

Zahvaljujem se tudi ožjim sodelavcem podjetja Intra lighting, d. o. o., ki so mi pomagali pri zbiranju podatkov in vsebinskem popravljanju magistrskega dela. Hvala vsem, ki so mi vsa ta leta pri študiju pomagali, predvsem pa družini, ki mi ga je omogočila.

NASLOV

Nadgradnja integracijske sfere za natančne fotometrične meritve na različnih svetilih

IZVLEČEK

V magistrskem delu smo sprva predstavili teoretične razlage merskih količin svetlobe, ki se jih uporablja za analizo svetlobnih virov. S pomočjo več standardov s področja razsvetljave smo nato opisali standardne postopke in naprave za izvajanje meritev karakteristik svetlobe. Ena od naprav, ki omogoča meritve radiometričnih in fotometričnih količin, je integracijska sfera. V delu smo opisali osnovno konstrukcijo in princip delovanja sfere ter dejavnike, ki privedejo do merskih napak. Te smo na praktičnem primeru odpravili z uporabo standardnih postopkov in rešitev. V ta namen je bilo potrebno na obravnavani sferi izvesti nadgradnjo merilnih postopkov: primerjalno meritev s kalibracijsko žarnico, meritev s pomožno žarnico, korekcijo različne spektralne in prostorske porazdelitve ter natančnejše meritve električnih količin. Poleg tega smo izvedli tudi nadgradnjo merilne opreme: montažo pomožne žarnice, predelavo nosilcev za neusmerjena svetila, novo električno napeljavo ter izdelavo nosilca za usmerjena svetila. Po nadgradnji smo rezultate meritev primerjali z meritvami na fotogoniometru in tako ovrednotili rezultate.

KLJUČNE BESEDE

Integracijska sfera, svetlobni vir, radiometrična in fotometrična meritev, sevalni tok, spektralna porazdelitev energije, svetlobni tok

TITLE

Upgrade of the integrating sphere for precise photometric measurements on various light sources

ABSTRACT

In the master thesis we firstly presented the theoretical explanations of measured quantities that are used to analyze the light output of different light sources. With the help of several standards from the lighting field, we described standard procedures and devices that are used to measure the characteristics of visible light. Integrating sphere is a device, which allows the measurement of radiometric and photometric quantities. We described the basic structure and operating principles of the sphere and also the factors that lead to measuring errors. With the use of standard solutions we upgraded the measuring procedures: comparison measurement with standard lamp, measurement with auxiliary lamp, correction of spectral mismatch and spatial non uniformity and precise measurement of electrical quantities. We also upgraded the measuring equipment: installation of auxiliary lamp, upgrade of lamp holders, improved wiring and construction of a new holder for lamp sources with only forward emission. After the upgrade, we compared the results of sphere measurements with photogoniometer measurements and evaluated them.

KEYWORDS

Integrating sphere, light source, radiometric and photometric measurement, radiant flux, spectral power distribution, luminous flux.

KAZALO

1	Uvod	1
2	Svetlobni viri in standardi v razsvetljavi	2
2.1	Standardi v razsvetljavi.....	2
3	Radiometrične in fotometrične meritve svetlobe	4
3.1	Radiometrija.....	4
3.1.1	Radiospektrometrija	7
3.2	Fotometrija.....	8
3.3	Kolorimetrija.....	11
3.3.1	Koordinate barve	11
3.3.2	Barvna temperatura	13
3.3.3	Barvni videz	14
4	Naprave za izvajanje svetlobnotehničnih meritev	16
4.1	Fotoelektrične celice – osnova vseh fotodetektorjev	16
4.2	Merilnik osvetljenosti	17
4.3	Merilnik svetilnosti	18
4.4	Merilnik svetlosti	20
4.5	Merilnik svetlobnega toka.....	20
4.5.1	Integracijska sfera	21
4.6	Merilnik svetlobnega spektra.....	25
4.7	Dodate zahteve za laboratorije.....	27

5	Fotometrične meritve v integracijski sferi.....	30
5.1	Primerjalna meritev s kalibracijsko žarnico.....	32
5.1.1	Kalibracija	33
5.2	Vzroki za merilne napake in njihova korekcija	33
5.2.1	Absorpcija svetlobe	34
5.2.2	Različna spektralna porazdelitev.....	35
5.2.3	Različna prostorska porazdelitev	36
5.2.4	Absorpcija bližnjega polja.....	37
5.2.5	Temperaturna odvisnost.....	37
5.2.6	Dolžina merjenega svetlobnega vira	38
5.2.7	Ostalo	38
5.3	Geometrija sfere in montaža merjenca	39
6	Nadgradnja integracijske sfere	41
6.1	Integracijska sfera	42
6.2	Stara konfiguracija integracijske sfere.....	43
6.3	Nadgradnja integracijske sfere.....	45
6.3.1	Primerjalna meritev s kalibracijsko žarnico.....	45
6.3.2	Korekcija absorpcije svetlobe	49
6.3.3	Korekcija različne spektralne porazdelitve	52
6.3.4	Korekcija različne prostorske porazdelitve	52
6.3.5	Korekcija absorpcije bližnjega polja.....	52

6.3.6	Korekcija temperaturne odvisnosti	54
6.3.7	Korekcija vpliva dolžine merjenega svetlobnega vira	55
6.3.8	Dodelava sfere za uporabo geometrije 2π	57
6.3.9	Ostale korekcije in nadgradnje.....	60
7	Primerjava meritev in vrednotenje rezultatov	63
8	Zaključek	65
9	Literatura	66
	PRILOGA 1: Nazivni podatki integracijske sfere podjetja Intra lighting, d. o. o.....	68
	PRILOGA 2: Poročilo meritev integracijske sfere za merjenja 1	70
	PRILOGA 3: Poročilo meritev integracijske sfere za merjenja 2.....	71
	PRILOGA 4: Poročilo meritev integracijske sfere za merjenja 3.....	72
	PRILOGA 5: Poročilo meritev integracijske sfere za merjenja 4.....	73
	PRILOGA 6: Navodila za uporabo integracijske sfere Intra lighting, d. o. o.....	74
	PRILOGA 7: Poročilo meritev fotogoniometra za merjenja 1	79
	PRILOGA 8: Poročilo meritev fotogoniometra za merjenja 2.....	80
	PRILOGA 9: Poročilo meritev fotogoniometra za merjenja 3.....	81

KAZALO SLIK

Slika 1: Relacija med vpadnim kotom in obsevanostjo za primer točkastega svetila pri določanju obsevnosti notranje površine krogle.	5
Slika 2: Relacija med obsevanostjo in razdaljo od svetlobnega vira.	6
Slika 3: Graf spektralne porazdelitve svetlobe z različno barvno temperaturo.....	8
Slika 4: Svetlobna funkcija fotopskega (črna) in skotopskega (zelena) vida.....	9
Slika 5: Kotna porazdelitev svetilnosti prikazana v polarnem diagramu.....	10
Slika 6: Relacije med vsemi fiziološkimi količinami in njihovimi enotami.	11
Slika 7: Uravnotežen LMS diagram.....	12
Slika 8: CIE 1931 kromatični diagram.....	12
Slika 9: Funkcije barvnega ujemanja CIE standardnega opazovalca.....	13
Slika 10: Planckov lok v CIE 1931 kromatičnem diagramu.	14
Slika 11: Barvni vzorci za določanje faktorja primerljivosti barve svetlobe.	15
Slika 12: Fotogoniometer tipa C z dvema ogledaloma in dvema senzorjema.	19
Slika 13: Slika digitalnega fotoaparata s širokokotnim objektivom in programska pretvorba v vrednosti svetlosti.	20
Slika 14: Integracijska sfera geometrije 4π	22
Slika 15: Integracijska sfera geometrije 2π	22
Slika 16: Czerny-Turnerjev monokromator.	26
Slika 17: Princip osvetljenosti poljubne točke v integracijski sferi z geometrijo 4π	31
Slika 18: Skupine meritev v integracijski sferi po nivojih.	31
Slika 19: Absorpcija žarkov v integracijski sferi pri geometriji 4π	34

Slika 20: Primer spektralne odzivnosti sfere in korekcije odzivnosti fotometrične glave (IES LM-78-07).....	36
Slika 21: Primer relativnega odziva plašča po celotnem polarnem koordinatnem sistemu prikazan v 3D grafu (IES LM-78-07).	37
Slika 22: Primer napačnega nosilca okova za cevasto fluorescenčno sijalko.....	37
Slika 23: Montaža geometrije 2π z zapolnjenim razmikom.....	39
Slika 24: Montaža geometrije 2π z odprtim razmikom.....	40
Slika 25: Integracijska sfera premera 2 m podjetja Intra lighting, d. o. o.	43
Slika 26: Komponente integracijske sfere pred nadgradnjo.	44
Slika 27: Za testiranja uporabljeni svetlobni viri.	46
Slika 28: Izmerjena spektralna porazdelitev merjencev 1, 2 in 3.	47
Slika 29: Montaža druge fotometrične glave v sferi.	48
Slika 30: Montaža in delovanje pomožne žarnice pri večjem merjencu.....	50
Slika 31: Nadgradnja programske opreme za izračun absorpcijskega faktorja.	51
Slika 32: Odstranitev stranskih okovov cevastih sijalk za meritve točkastih virov...	53
Slika 33: Montaža cevaste sijalke T5 v sferi pred nadgradnjo.....	53
Slika 34: Montaža T5 sijalke v sferi po nadgradnji.	54
Slika 35: AC stabilizator napetosti, visokofrekvenčna standardna predstikalna naprava in kalibracijske sijalke T8 treh dolžin.	55
Slika 36: Izmerjena spektralna porazdelitev merjenca 4.....	56
Slika 37: Motorji različnih LED svetilk.....	57
Slika 38: Potek izdelave dodatnega nosilca za geometrijo 2π	58

Slika 39: Nosilec geometrije 2π z notranje in zunanje strani sfere.	58
Slika 40: Montaža večje svetilke (LED downlight) in manjšega LED motorja (merjenec 3) na nosilec 2π	59
Slika 41: 4-polni priklop za metodo 'External sampling'.	61
Slika 42: Nadgradnja programske opreme za nadzor stabilizacije merjenja.....	61
Slika 43: Montaža merjenca 1 na fotogoniometer.	63
Slika 44: Kotna porazdelitev svetilnosti merjenca 1.....	64

KAZALO TABEL

Tabela 1: Primerjava radiometričnih in fotometričnih količin in enot.....	4
Tabela 2: Največji dovoljeni pogoški za luksmetre.	18
Tabela 3: Zahteve za pripravo svetlobnih virov na meritve.....	28
Tabela 4: Primerjava rezultatov meritev z različnima merilnikoma.	49
Tabela 5: Celotni svetlobni tok merjencev po metodi s pomožno žarnico.	50
Tabela 6: Celotni svetlobni tok merjencev po metodi absorpcijskega faktorja.	52
Tabela 7: Celotni svetlobni tok merjenca 4 po meritvi z uporabo kalibracijske halogenske žarnice in fluorescenčne sijalke.....	56
Tabela 8: Celotni svetlobni tok merjenca 3 po metodi geometrije 2π	60
Tabela 9: Primerjava meritev sfere in fotogoniometra na merjencih 1, 2 in 3.....	64

1 UVOD

Pri razvoju svetilk za notranje in zunanje prostore je bistvenega pomena poznavanje svetlobno-tehničnih lastnosti svetlobnih virov. Karakteristike svetlobe, ki jo svetlobni vir oddaja v prostor, merimo z integracijsko sfero. To je merilni pripomoček sferične oblike z odbojnim notranjim plaščem, na katerem so senzorji, zaslonke in nosilci. Za izračun količine svetlobe, ki jo svetilo seva v prostor, je potrebno poznati gostoto svetlobnega toka na površini. Z integracijsko sfero merimo gostoto izsevanega toka na površini sfere, ki obdaja celotno svetilo, in tako dobimo celotni izsevani svetlobni tok. Za doseganje natančnih rezultatov želimo pri meritvah doseči enakomerno osvetlitev celotne površine notranjega plašča. Teoretično to omogoča le točkast svetlobni vir in popolnoma prazna sfera. Ker v praksi to ni mogoče, prihaja v sferi do izgub svetlobe in posledično do merskih napak. V ta namen institucije za standardizacijo na področju razsvetljave izdajajo standarde in priporočila, kako odpraviti ali ovrednotiti vire merskih napak pri svetlobno-tehničnih meritvah.

V podjetju Intra lighting, d. o. o. uporabljajo integracijsko sfero premera 2 m, opremljeno z merilnikoma svetlobnega toka in spektra izsevane svetlobe. Potencial takšne konfiguracije je zelo velik, vendar je omenjena sfera po nabavi ostala v osnovni konfiguraciji, kar omogoča le primerjalne meritve na manjših neusmerjenih svetilih. Cilj magistrskega dela je povečati natančnost radiometričnih in fotometričnih meritev svetlobnih virov v integracijski sferi. Za dosego tega je potrebna nadgradnja sfere in postopkov merjenja, ki bi omogočili natančnejše ovrednotenje količine absorbirane svetlobe in pravilno montažo merjencev. V ta namen smo na sfero montirali dodatne merilne elemente, izdelali nove nosilce, določili nove postopke merjenja, ovrednotili preostale merilne napake, nadgradili obstoječi informacijski sistem ter izdelali navodila za meritve. Omenjene rešitve smo izvedli na podlagi standardnih postopkov in priporočil. Vsako nadgradnjo in predelavo sfere smo testirali z referenčnimi svetlobnimi viri. Rezultate smo nato ovrednotili in najboljšo rešitev implementirali v obstoječi merilni sistem.

2 SVETLOBNI VIRI IN STANDARDI V RAZSVETLJAVI

Svetloba je elektromagnetno valovanje v območju valovnih dolžin med 380 in 780 nm (frekvenčni pas med 430 in 790 THz), ki jih lahko zaznava človeško oko. Glavni naravni vir svetlobe je sonce, ki pa ne osvetluje vseh točk na Zemlji enakomerno in konstantno. Zaradi tega so ljudje skozi čas razvijali svetila, ki oddajajo umetno svetlobo. Prvi umetni svetlobni vir je bil ogenj, za njim pa primitivne svetilke, ki so kot svetlobni vir uporabljale plamen v različnih oblikah. Leta 1875 Woodward in Evans patentirata prvo električno žarnico in tedaj se začne obdobje razvoja električnih svetlobnih virov, katerih značilnost je, da pretvarjajo električno energijo v toploto in svetlobo. Delimo jih v tri osnovne skupine (Bizjak, 2002):

- žarnice, ki oddajajo svetlobo zaradi žarjenja žarilne nitke (navadna bučkasta žarnica in halogenska žarnica),
- sijalke, ki ustvarjajo svetlobo z razelektritvijo v plinu in s fluorescenco (nizkotlačna, visokotlačna, metalhalogenidna, fluorescenčna, indukcijska, xenonska sijalka),
- LED (light emitting diode) električne komponente, ki ustvarjajo svetlobo ob prevajanju toka skozi polprevodnik (enojni LED čip, več čipov združenih na enotnem vezju imenovani multichip LED ali COB (chip on board)).

Svetlobni vir potrebuje za delovanje element, ki ga pritrdi, zaščiti, usmeri in napaja. To so svetilke. Njihovi glavni sestavni sklopi so svetlobno-tehnični, mehanski in električni elementi. Glede na karakteristike teh elementov se loči svetilke v dve glavni skupini: svetilke za notranje prostore in svetilke za zunanje prostore.

2.1 Standardi v razsvetljavi

Področja izdelave svetilk in svetlobnih virov ter postopki za njihovo merjenje so kompleksni procesi z veliko raznolikostjo aktivnosti, materialov in zahtev. Organizacije za standardizacijo skušajo preko standardov in priporočil odstraniti raznolikosti in s tem poenotiti izdelavo, testne procedure ter podajanje rezultatov. Standard, ki ga izdajo, je torej dogovor o poenotenju določenega področja. Je neobvezen, če se nanj sklicuje določen predpis pa lahko postane tudi obvezen (Bergelj, 2000). Glavne institucije za standardizacijo na področju razsvetljave so:

ISO (International organization for standardization) je največja mednarodna neprofitna organizacija, ki jo sestavlja mreža državnih inštitutov za standardizacijo. V to mrežo je vpletenih 164 držav. ISO izdaja industrijske in komercialne standarde na vseh področjih (ISO, 2014).

IEC (International electrotechnical commission) je mednarodna neprofitna organizacija, vodilna za standardizacijo vseh električnih tehnologij (IEC, 2014).

CIE (International Commission on Illumination) je mednarodna neprofitna organizacija, ki sodeluje z vsemi včlanjenimi državami. Njena glavna naloga je delitev vseh vrst informacij v zvezi s svetlobno tehniko, svetlobnotehničnimi meritvami, barvami in zaznavanjem svetlobe ter drugimi tehnologijami vezanimi na svetlobo (CIE, 2014).

CEN (European comite for standardization) je neprofitna organizacija in največji evropski ponudnik standardov in tehničnih zahtev na vseh ekonomskih področjih (CEN, 2014).

IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) je neprofitno združenje s sedežem v Severni Ameriki. V njem sodelujejo znanstveniki in strokovnjaki s področja razsvetljave. Njihov cilj je, da bi s skupnim znanjem ustvarili smernice, ki bi koristile proizvajalcem in potrošnikom (IES, 2014).

SIST (Slovenski inštitut za standardizacijo) je slovenski nacionalni organ, aktivni član mednarodnih (ISI, IEC) in evropskih (CEN) organizacij za standardizacijo. Pripravlja in sprejema neobvezne standardizacijske dokumente in zastopa interese Slovenije v organizacijah za standardizacijo, katerih član je (SIST, 2014).

3 RADIOMETRIČNE IN FOTOMETRIČNE MERITVE SVETLOBE

Veda, ki se ukvarja z meritvami energije elektromagnetnega valovanja, je radiometrija. Tudi svetloba prenaša energijo, kar se v radiometriji izraža s fizikalnimi enotami. Vsa svetloba pa v človeškem očesu ne povzroča enako močnega dražljaja in zato je potrebno pri meritvah upoštevati tudi človeški vidik. S tem področjem se ukvarja fotometrija, ki fizikalne enote pretvori v fiziološke. Razmerje med njimi je prikazano v Tabeli 1.

Tabela 1: Primerjava radiometričnih in fotometričnih količin in enot.

Radiometrična količina	Fizikalna enota	Fotometrična količina	Fiziološka enota
sevalna energija (Q _e)	joule (J)	svetlobna energija (Q _v)	lumen sekunda (lm s)
sevalni tok (Ø _e)	watt (W)	svetlobni tok (Ø _v)	lumen (lm) = (cd sr)
jakost sevanja (I _e)	watt na steradian (W/sr)	svetilnost (I _v)	candela (cd) = (lm sr)
obsevanost (E _e)	watt na kvadratni meter (W/m ²)	osvetljenost (E _v)	lux (lx) = (lm/m ²)
sevalnost (L _e)	watt na steradian na kvadratni meter (W/sr m ²)	svetlost (L _v)	candela na kvadratni meter (cd/m ²)

3.1 Radiometrija

V radiometriji se energijo na časovno enoto, ki jo prenaša svetloba, poimenuje **sevalni tok (Ø_e)**. Merimo ga s kalorimetrom, ki absorbira sevalno energijo celotnega spektra svetlobe (Q_e). Ta v določenem času (t) dovede merilnemu kalorimetru toploto (Q), ki povzroči sorazmerni dvig notranje energije. Če v prostoru, po katerem potuje svetloba od svetila do detektorja ni absorpcije v snovi, se tako lahko izvede fizikalno meritev izsevane energije (Strnad, 1995). Sevalni tok je definiran v enačbi (1):

$$\varnothing_e = Q/t = Q_e/t$$

(1)

Pogoj za zgoraj omenjeno meritev je, da sevalni tok iz svetila pada pravokotno na ploskev in se ves absorbira v detektorju. Gostota sevalnega toka na enoto površine se imenuje **obsevanost (Ee)** in je definirana v enačbi (2):

$$E_e = \frac{\varnothing_e}{S}$$

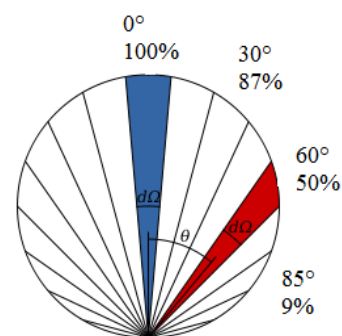
(2)

Če sevalni tok ne pada pravokotno na površino, se obsevanost $E_e(\alpha)$ definira kot razmerje sevalnega toka in ploščine projekcije obsevane ploskve na ravnino, ki je pravokotna na smer žarkov. Za izračun obsevanosti površine je torej potrebno upoštevati vpadni kot α , pod katerim vpadajo svetlobni žarki na površino. Prikazuje jo enačba (3):

$$E_e(\alpha) = E_e \cos \alpha$$

(3)

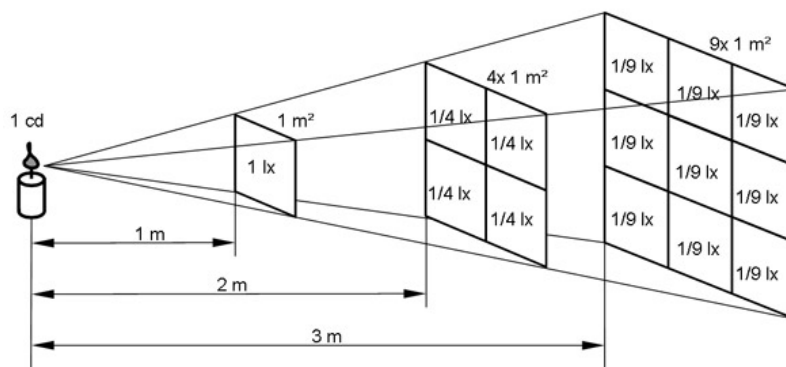
Posledično se z večanjem vpadnega kota manjša obsevanost površine (Slika 1).



Slika 1: Relacija med vpadnim kotom in obsevanostjo za primer točkastega svetila pri določanju obsevnosti notranje površine krogle.

Vzemimo svetlobni vir, ki seva enakomerno v vse strani. Če ni absorpcije v snovi, je obsevanost vseh krogelnih izsekov na enaki razdalji okoli točkastega vira enaka. Ker pa se z večanjem razdalje od vira obsevana površina večja sorazmerno s kvadratom

razdalje, je obsevanost na razdalji r obratno sorazmerna kvadratu razdalje (Slika 2). Razmerje med površino krogelnega izseka in kvadratom polmera krogle, v središču katere je točkast vir, imenujemo prostorski kot Ω (enota steradian) (Strnad, 1995).



Slika 2: Relacija med obsevanostjo in razdaljo od svetlobnega vira.

Pojemanje obsevanosti v odvisnosti od razdalje r od točkastega vira je podano z enačbo (4):

$$E_e = \frac{\Phi_e}{S} = \frac{\Phi_e}{4 \pi r^2} \quad (4)$$

Jakost sevanja (I_e) pove, koliko sevalnega toka vir seva v dani smeri v enoto prostorskega kota Ω . Izračuna se jo po enačbi (5):

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (5)$$

Vsota jakosti sevanja v vseh smereh je enaka celotnemu sevalnemu toku. Za vir, ki seva enakomerno v vse strani, to je v celotni prostorski kot 4π , je jakost sevanja podana v enačbi (6):

$$I_e = \frac{\Phi_e}{4 \pi} \quad (6)$$

Zveza med obsevanostjo in jakostjo sevanja se izračuna po enačbi (7):

$$E_e = \frac{I_e}{r^2} \quad (7)$$

Jakost sevanja na ploskovno enoto se imenuje **sevalnost (Le)** in se jo meri v vatih na enoto površine in na enoto prostorskega kota (W/m^2 steradian). Pri opazovanju svetila moramo upoštevati tudi vpadni koto β , pod katerim opazujemo svetilo. Sevalnost pod določenim kotom $Le(\beta)$ je povezana z jakostjo sevanja in je prikazana v enačbi (8):

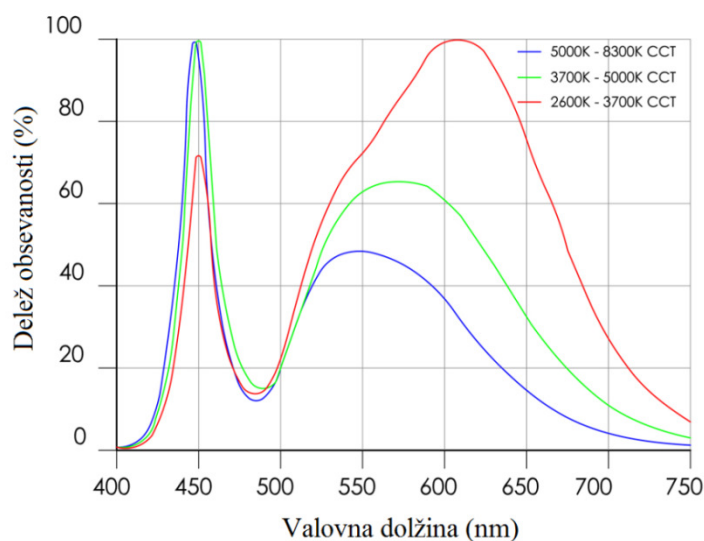
$$Le(\beta) = \frac{I_e}{S \cos\beta} \quad (8)$$

3.1.1 Radiospektrometrija

Radiospektrometrija se ukvarja z meritvami spektralne obsevanosti E_e , to je gostote sevalnega toka \emptyset_e na enoto površine S na ozkih intervalih valovnih dolžin $\Delta\lambda$. Izračuna se jo po enačbi (9)

$$E_e(\lambda) = \frac{\emptyset_e}{S \Delta\lambda} \quad (9)$$

Če za površino vzamemo kroglo, ki objema svetlobni vir, s to metodo dobimo spektralno porazdelitev vse svetlobe, ki jo vir oddaja v prostor $I(\lambda)$. To lahko predstavimo z grafom, ki prikaže obsevanost celotne površine krogle pri določeni valovni dolžini v vidnem spektru. Zaradi enotne skale je obsevanost izražena relativno v deležih glede na celotno obsevanost, ki jo povzroča spekter svetlobe na merjenem intervalu (Slika 3).



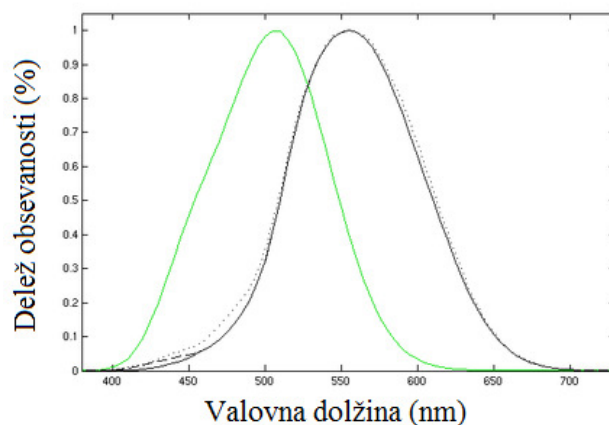
Slika 3: Graf spektralne porazdelitve svetlobe z različno barvno temperaturo.

Z opisanim postopkom merimo emisijske spektre svetlobe, ki jih svetlobni viri sevajo v prostor. Če nas zanimajo odbojnosti ali prepustnosti materialov ali snovi, vanje usmerimo belo svetlobo z znanim spektrom. Nato analiziramo absorpcijski oz. odbojni spekter. Veda, ki se s tem ukvarja, se imenuje fotospektrometrija.

3.2 Fotometrija

Fotometrija se od radiometrije razlikuje v tem, da pri meritvah upošteva tudi človeški vidik. Človeško oko je sestavljeno iz dveh tipov sprejemnikov. S čepnicami gledamo podnevi pri fotopičnem gledanju in z njimi zaznavamo barve. S paličicami gledamo v poltemi pri skotopičnem gledanju in z njimi ločimo le svetlobo od teme (Strnad, 1995).

Relativna občutljivost očesa ali **svetlobna funkcija** $V(\lambda)$ je povprečje odziva množice oseb (standardni opazovalec) na sevalni tok pri različnih valovnih dolžinah (barvah) pri fotopičnem gledanju. Podobno kot spektralna porazdelitev je definirana relativno v deležih in z njo vrednotimo odziv očesa na prejeti sevalni tok (Slika 4). Tako pretvorimo osnovno fizikalno enoto v fiziološko.



Slika 4: Svetlobna funkcija fotopskega (črna) in skotopskega (zelena) vida.

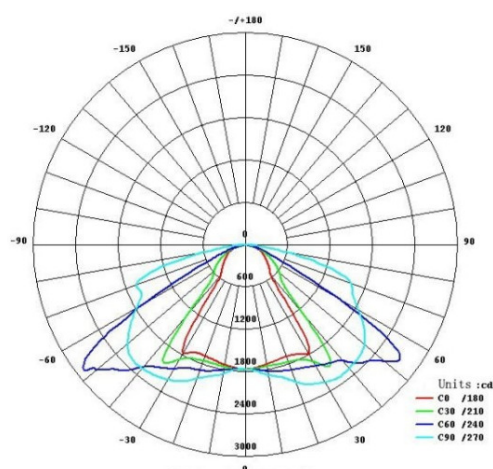
Fiziološka enota za sevalni tok je **svetlobni tok (Φ_v)**, čigar enota je lumen (lm). Cilj uvedbe svetlobnega toka je v tem, da se poenoti zaznano količino svetlobe, ki jo oddaja svetlobni vir. Vrednost podana v lumnih namreč vzbudi v očesu enak občutek ne glede na valovno dolžino svetlobe (Strnad, 1995). Svetlobni tok dobimo tako, da sevalnega pomnožimo z ustrežno vrednostjo svetlobne funkcije pri opazovani valovni dolžini. Izračun je prikazan v enačbi (10):

$$\Phi_v = \int_{380}^{780} \frac{d\Phi_e}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

Svetlobna funkcija ima maksimum 1 pri 555 nm (rumeno zelena barva svetlobe), saj je tam oko najbolj občutljivo. 1 W sevalnega toka ima pri tej valovni dolžini vrednost 683 lm. To je maksimalno fotometrično sevanje in se ga označuje s Km. Ostale vrednosti svetlobne funkcije so prikazane v tabeli standarda CIE 1931. Svetloba izven vidnega spektra ima vrednost svetlobne funkcije 0.

Osvetljenost (E_v) predstavlja tisti delež celotnega izsevanega svetlobnega toka, ki pade na neko ploskev. Enota za osvetljenost je luks (lx) oziroma lumen na enoto površine (lm/m^2). Relacija s svetlobnim tokom je enaka kot med obsevanostjo in sevalnim tokom. Zakonitosti glede vpadnega kota žarkov in oddaljenosti merjene površine od vira so enake kot pri obsevanosti.

Svetilnost I_v je količina, ki pove, koliko svetlobnega toka svetlobni vir izseva v določeno smer. Zanj veljajo enake zakonitosti kot za jakost sevanja. Enota za svetilnost je candela (cd) oziroma lumen na enoto prostorskega kota (lm/steradian). Candelo bi lahko v fiziološkem smislu definirali tudi kot svetilnost, ki jo v izbrani smeri seva vir z močjo 1/638W (1 lm) pri valovni dolžini 555 nm (Bizjak, 2002). Pri svetilkah in svetlobnih virih svetilnost večinoma ni homogena v vseh smereh. Zato se njeno jakost v posamezni smeri prikazuje v kartezijskih ali polarnih diagramih – imenovanih kotna porazdelitev svetilnosti (Slika 5).

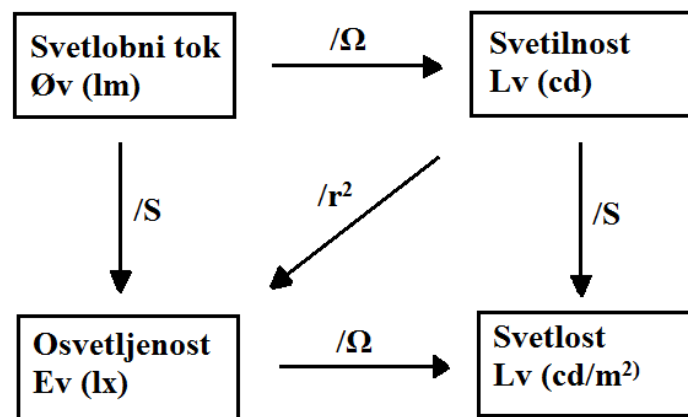


Slika 5: Kotna porazdelitev svetilnosti prikazana v polarnem diagramu.

Osnova teh diagramov so matrike izmerjenih svetilnosti v povezavi s kotom sevanja. To predstavlja glavni vir informacij o tem, kako določena svetilka ali svetlobni vir sveti v prostor.

Svetlost (L_v) je kvantitativen opis občutka svetlosti, ki ga neka površina povzroča v naših očeh. Meri se v candelah na enoto površine (cd/m^2), imenovano tudi nit. Pove nam, koliko svetlobnega toka bo zaznalo oko z gledanjem določene površine pod določenim kotom. Uporablja se za površine, ki oddajajo ali odbijajo svetlobo. Od vseh opisanih količin je ta edina, ki jo lahko ocenimo z očmi.

Kot je razvidno zgoraj so vse fiziološke količine v tesni povezavi s fizikalnimi. Poleg tega pa so med seboj povezane tudi preko površine, razdalje in prostorskega kota. Na Sliki 6 so prikazane relacije med vsemi fotometričnimi količinami in njihovimi fiziološkimi enotami (Bizjak, 2002).



Slika 6: Relacije med vsemi fiziološkimi količinami in njihovimi enotami.

Opisane fotometrične količine služijo podajanju informacij o tem, koliko in v katere smeri določen svetlobni vir ali svetilka sveti. Na področju fotometričnih meritev svetilk pa se te informacije jemlje tudi kot osnovo za nadaljnje računanje parametrov povezanih s projektiranjem kvalitetne razsvetljave (razvijanje optik in leč za usmerjanje svetlobe, konstrukcijske rešitve za omejitvev bleščanja, iskanje najboljših izkoristkov, projektiranje postavitve svetilk, računanje minimalnih in idealnih osvetlitev prostorov in cest ...). Skratka – fotometrične meritve na svetilkah odpirajo zelo široko področje fotometrije, ki pa ni neposredno vezano z meritvami svetlobnih virov v integracijski sferi. Zato bomo opis tega področja izpustili.

3.3 Kolorimetrija

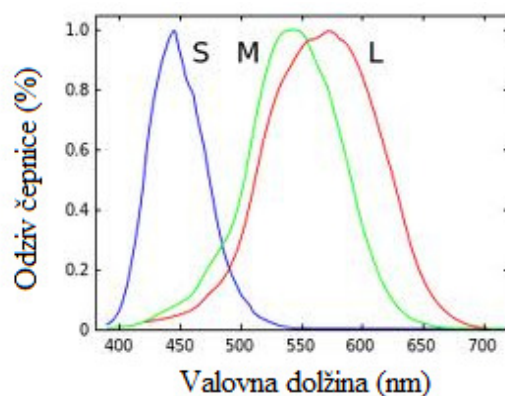
Kolorimetrija opisuje in vrednoti zaznavanje barv človeškega očesa pri fotopičnem gledanju. Oko razbije svetlobo na tri osnovne barve. Na ta način jo zaznava kot seštevke treh barv in tako tudi pošilja signale (elektro impulze) možganom (Wikipedia, 2013). Odzivi čepnic pri različnih valovnih dolžinah:

- kratke (short – S): 420–440 nm, **MODRA BARVA**,
- srednje (medium – M): 530–540 nm, **ZELENA BARVA**,
- dolge (long – L): 560–580 nm, **RDEČA BARVA**.

3.3.1 Koordinate barve

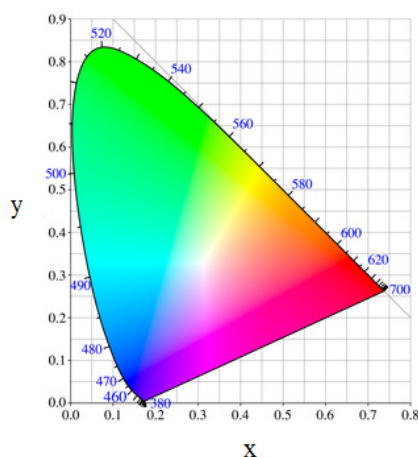
Če posebej vrednotimo odzive vseh treh tipov čepnic, dobimo tri stimulacijske vrednosti. Te se na podlagi imen čepnic označuje z S, M, L. Lahko se jih predstavi v

grafu, ki prikaže razmerja vseh treh osnovnih barv na merjenem vzorcu svetlobe. Tako dobimo LMS diagram (Slika 7), ki je osnovni način za vrednotenje človeškega videnje barv.



Slika 7: Uravnovežen LMS diagram.

Za enolično predstavo barv je mednarodna komisija za razsvetljavo (CIE) uvedla enoten kromatični prostor in opisan diagram v standardu CIE 1931. Kromatični prostor zavzema tri dimenzije X, Y in Z. Dve dajeta podatek o barvi (X, Y), tretja pa o svetlosti (koordinata Z je enaka svetlosti L_v). Kromatičnost je projekcija barve v dve dimenziji z zanemarjanjem svetlosti. Prikaže se jo na kromatičnem diagramu s koordinatama x in y (Slika 8).



Slika 8: CIE 1931 kromatični diagram.

Za pridobitev x in y koordinat izvedemo radiospektrometrično meritev. Iz spektralne porazdelitve svetlobe, po enačbi (11) izračunamo vrednost treh stimulacijskih vrednosti L, M, S , ki so enake dimenzijam X, Y, Z barvnega prostora po CIE 1931:

$$L = \int_{380}^{780} I(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda$$

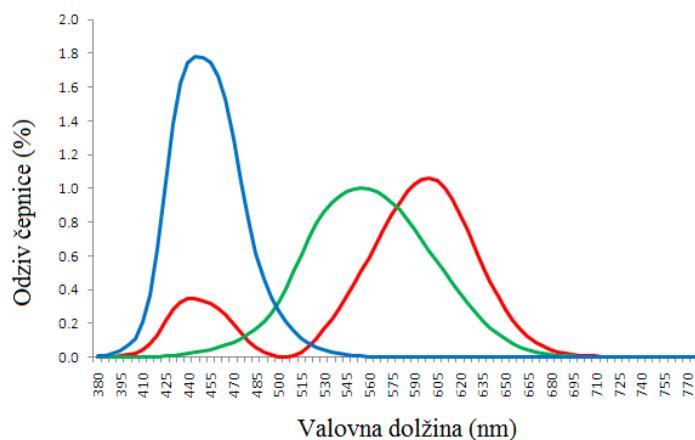
$$M = \int_{380}^{780} I(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda$$

$$S = \int_{380}^{780} I(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda$$

(11)

$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}(\lambda)$... funkcije barvnega ujemanja.

Funkcije barvnega ujemanja CIE določa kot numerični opis odziva množice oseb na videno svetlobo (standardni opazovalec). Standardni opazovalec (ali CIE 1931 2° standard observer) je funkcija, ki opiše kromatični odziv povprečnega človeškega očesa v območju 2° na videno svetlobo (Slika 9).



Slika 9: Funkcije barvnega ujemanja CIE standardnega opazovalca.

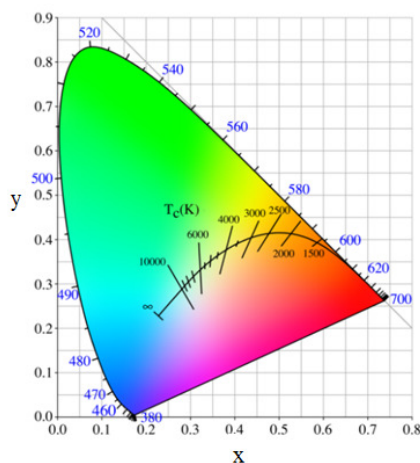
3.3.2 Barvna temperatura

Glede na to kakšen občutek določena barva svetlobe vzbudi, lahko barve ločimo na tople in hladne. Temperaturo barve si lahko predstavljamo kot kovinski predmet, ko seva kot črno telo pri temperaturi T podani v absolutni temperaturni skali (K). Vidna svetloba, ki jo oddaja, je pri nižjih temperaturah temno rdeča, nato pa preko oranžne in rumene prehaja v belo, na koncu pa v modro (Bizjak, 2002).

Pri svetlobnih virih so najpogostejše temperature barv:

- 2700 K: svetloba, ki jo oddaja žarnica z žarilno nitko,
- 3000 K: svetloba, ki jo oddajajo 'tople' sijalke ali LED diode,
- 4000 K: svetloba, ki jo oddajajo 'hladne' sijalke ali LED diode.

Temperatura barve je opisana tudi v CIE kromatičnem diagramu. Nahaja se na Planckovem loku, ki opisuje elektromagnetno sevanje žarilnega črnega telesa v termičnem ravnovesju (Slika 10). Pri vsaki opazovani temperaturi se elektromagnetno sevanje odraža v drugi barvi, kar pomeni druge koordinate x, y.



Slika 10: Planckov lok v CIE 1931 kromatičnem diagramu.

3.3.3 Barvni videz

Površina vsakega predmeta vsebuje pigmente in njihova lastnost je ta, da izpostavljeni svetlobi nekatere barve absorbirajo, druge pa odbijejo v naše oči. Zato je barvni videz predmetov odvisen tudi od spektralne vsebine svetlobe, ki pade nanje (Bizjak, 2002). Faktor primerljivosti barv (color rendering index- CRI) je kvantitativno merilo, kako verodostojno vidimo barve predmetov pod določeno svetlobo v primerjavi z izsevno svetlobo črnega žarilnega telesa pri 5000 K. Izraža se v številkah od 1 do 100, pri čemer višja številka pomeni večjo stopnjo prepoznavanja barve. Poleg žarilnega črnega telesa ima faktor 100 v določenih pogojih tudi sončna svetloba. Za določitev faktorja primerljivosti barve CIE določa 14 barvnih vzorcev (Slika 11).



Slika 11: Barvni vzorci za določanje faktorja primerljivosti barve svetlobe.

Vrednotenje faktorja primerljivosti poteka na dva načina:

- seštevek odstopanj vseh 14 barv je posebni faktor primerljivosti R_i (special rendering index),
- seštevek odstopanj prvih 8 barv je splošni faktor primerljivosti R_a (general rendering index).

4 NAPRAVE ZA IZVAJANJE SVETLOBNOTEHNIČNIH MERITEV

Osnovne fotometrične podatke svetilk in svetlobnih virov dobimo s fotometričnimi meritvami. Te so dokaj specifične in predstavljajo le del svetlobno-tehničnih meritev, ki so v celoti sestavljene iz (SIST EN 13032-1:2004):

- meritve fotometričnih količin (osvetljenost, svetilnost, svetlost),
- meritve geometrijskih količin (koti sevanja, razdalje, dimenzije),
- meritve električnih in okoljskih parametrov (napajalna napetost in tok, delovna moč, temperatura delovanja).

Osnovni element vsake naprave za merjenje fotometričnih količin je fotodetektor. Ostali elementi služijo le pravilnemu pozicioniranju, usmerjanju in pretvarjanju elementov in količin.

4.1 Fotoelektrične celice – osnova vseh fotodetektorjev

Glavna naloga merilnikov svetlobe je, da podobno kot človeške oči pretvorijo svetlobo v merljivo električno količino. Merilnike, ki jih uporabljamo pri radiometričnih meritvah, imenujemo neselektivni merilniki; to so npr. počrnjen termoelement, termobaterija, bolometer. Njihova lastnost je, da so enako občutljivi na energije vseh valovnih dolžin. Merilnike, ki jih uporabljamo pri fotometričnih meritvah, imenujemo selektivni merilniki. Ti so občutljivi samo na vidni spekter svetlobe in se uporabljajo kot osnovni merilni elementi v fotodetektorjih. Lastnosti posameznega tipa fotodetektorja so podane v nadaljevanju (Strnad, 1995).

Fotocelica je sestavljena iz steklene bučke, v kateri sta katoda in anoda. Vezana je v električni krog z generatorjem konstantne napetosti. Ko fotocelico osvetlimo, začne skozi njo teči tok, ki je sorazmeren svetlobnemu toku.

Fotopomnoževalka je podobna fotocelici, le da ima več elektrod, ki so priključene na visoko napetost, s čimer dosežejo večjo občutljivost.

Fotoupornik vežemo v krog z generatorjem konstantne napetosti. Upor fotoupornika je sorazmeren z absorbiranim svetlobnim tokom.

Fotoelement ali fotovoltaična celica je najbolj uporabljen tip fotodetektorja. Sestavljena je iz dveh elektrod, med katerima je kemijski element (kadmijev sulfid, selen, silicij), ki izpostavljen svetlobi oddaja elektrone. Za delovanje torej ne potrebuje dodatnega napajanja. Slabe lastnosti oz. pomanjkljivosti fotoelementov so:

- dobljena napetost je majhna in nelinearna,
- rezultat je odvisen od vpadnega kota svetlobe,
- spektralna občutljivost ni enaka kot pri človeških očeh, kar pomeni, da se njihov odziv ne ujema s svetlobno funkcijo $V(\lambda)$,
- temperaturna občutljivost.

4.2 Merilnik osvetljenosti

Fotoelement meri svetlobni tok na njegovi površini, torej osvetljenost v luksih. Za merodajne rezultate pa je potrebno odpraviti vse zgoraj omenjene pomanjkljivosti. Merilnik, ki se za to uporablja, je luksmeter in je sestavljen iz fotometrične glave, ojačevalca in prikazovalnika. Glede na to v kolikšni meri odpravijo pomanjkljivosti, se fotometrične glave deli v razrede, ki povejo največje vrednosti posameznih pogreškov. Elementi za manjšanje pogreška luksmetra so (Bizjak, 2002):

- V luksmetru je fotoelement vezan v vezje tako, da skozenj teče tok, ki je linearno odvisen od osvetljenosti. Prikazani rezultat v lx je torej transformacija izmerjenega toka skozi fotoelement.
- Osnovna oblika fotoelementa je ravna ploskev, ki pa ne korigira vpadnega kota svetlobe. Zato imajo fotometrične glave izbočene nastavke, ki zmanjšajo pogrešek zaradi vpadnega kota svetlobe.
- Spektralno občutljivost fotoelementa se približa svetlobni funkciji z uporabo pasovnih filtrov ali spektralnih šablon.
- V odvisnosti od uporabljenega kemijskega elementa so fotometrične glave različno občutljive na temperaturo. Najmanj so občutljive silicijeve (pogrešek cca. 0,1 %/K). Rešitev je v tem, da je vsaka glava umerjena pri referenčni temperaturi (po navadi 25 °C).

Največji dovoljeni pogreški za luksmetre integracijskih sfer in fotogoniometrov so prikazani v Tabeli 2 (CIE 121-1996).

Tabela 2: Največji dovoljeni pogoški za luksmetre.

Karakteristika	Simbol za pogrešek	Maksimalna vrednost
usklajenost s svetlobno funkcijo ($V\lambda$)	F1	2 %
UV odziv	u	0,2 %
IR odziv	r	0,2 %
kosinusni odziv	F2	1,5 %
odvisnost od polarizacije	f8	0,2 %
odzivnost na neenotno osvetlitev	f9	0,2 %
linearnost	f3	0,2 %
nihanje	f5	0,2 %
temperaturna odvisnost	a	0,2 %/K
napaka na prikazovalniku	f4	0,2 %
napaka zaradi intervala	f11	0,1 %

4.3 Merilnik svetilnosti

Za merjenje kotne porazdelitve svetilnosti je potrebno imeti napravo, ki omogoča natančno pozicioniranje in določanje kotov (goniometer), in napravo, ki zajema fotometrično količino (fotodetektor). Tako so nastali fotogoniometri. Te naprave temeljijo na meritvah osvetljenosti v posamezni točki navidezne sfere okoli merjenca. Na podlagi tega se izračuna izsevani svetlobni tok, svetilnost in njeno kotno porazdelitev. Glede na delovanje poznamo tri tipe naprav:

- tip A in tip B: s tema napravama merimo v A in B koordinatnih sistemih. Senzor je fiksni v sredini krožnice, po njenem namišljenem loku pa potuje merjenec, ki ima svetlečo površino usmerjeno v senzor. Ta tip naprav ima veliko pomanjkljivosti, zato se malo uporablja;
- tip C: z njimi merimo v C koordinatnih sistemih. Merjenec je fiksni v sredini krožnice, po njenem loku pa potuje senzor.

Fotogoniometer tipa C

Ta tip je najbolj natančen in tudi edini potrjen s strani CIE za izvajanje meritev svetlobnega toka na SSL produktih (solid state lighting – sodobne svetilke, ki temeljijo na LED tehnologiji). Ker je merjenec fiksni, je svetlobni vir vedno v enaki poziciji delovanja pri isti temperaturi in brez zračnih tokov. S fotometrično glavo, ki je montirana na eni strani vrtljive roke, merimo osvetljenost v posameznih točkah krožnice. Za izvajanje meritev na teh napravah je potrebna merilna razdalja, ki je vsaj 5-kratnik svetleče površine merjenca. Da bi bila naprava čim bolj kompaktna, se pri izvedbi uporablja ogledala. Obstajata dva glavna principa uporabe ogledal (SIST-EN 13032).

Fotogoniometer z enim ogledalom: na vrtljivi roki nasproti prvega senzorja je montirano ogledalo. Njegova naloga je, da odbija žarke v drugi senzor, ki je montiran na določeni razdalji od naprave. S prvim senzorjem se meri svetlobni vir direktno brez uporabe ogledala (manjši viri, metoda bližnjega polja). Drugi meri z uporabo ogledala in s tem dosega veliko merilno razdaljo (večji viri, metoda oddaljenega polja).

Fotogoniometer z dvema ogledaloma: namesto senzorja je na določeni razdalji montirano še eno ogledalo, ki odbija žarke nazaj proti napravi, kjer je montiran drugi senzor (Slika 12). S tem tipom naprave se prav tako meri z metodo bližnjega in oddaljenega polja; prednost je v tem, da je zahteva po prostoru manjša. Fotogoniometer tipa C z dvema ogledaloma bo v nadaljevanju uporabljen za primerjavo in vrednotenje izmerjenih rezultatov v integracijski sferi.

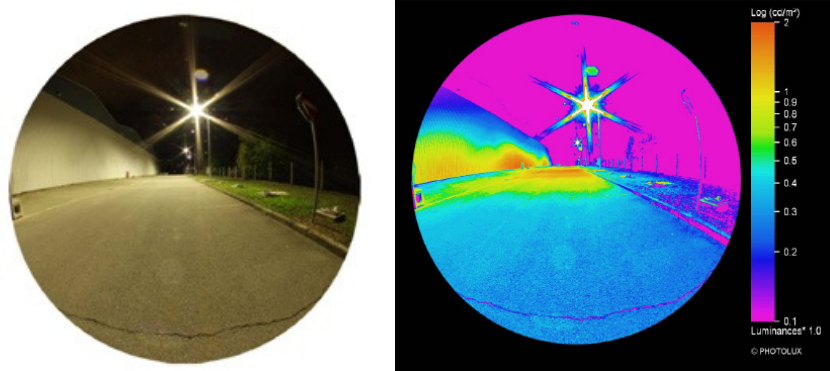


Slika 12: Fotogoniometer tipa C z dvema ogledaloma in dvema senzorjema.

4.4 Merilnik svetlosti

Svetlost se prav tako kot ostale količine meri preko osvetljenosti. Pri teh meritvah se s fotodetektorjem meri povprečno svetlost predmetov v določenem intervalu prostorskega kota (cd/m^2). Merilna priprava je podobna kameri. V notranjosti uporablja sistem optičnih leč, ki omejujejo svetlobni snop na fotodetektor in filtre, ki približajo odčitani svetlobni spekter svetlobni funkciji.

Z razvojem tehnologije na fotografskem področju prihaja vse bolj v ospredje meritev svetlosti s pomočjo digitalnega fotoaparata s širokokotnim objektivom. Bistvo te meritve je v tem, da se sliko programske pretvori v vrednosti svetlosti (Slika 13), ki jih nato razporedimo v CIE mrežo s točno določenim številom elementov. Na ta način dobimo vrednosti svetlosti po celotni fotografiji oz. polju vrednotenja. Takšna meritev je v primerjavi s klasično hitrejša, preglednejša in ima večjo resolucijo. Slaba stran pa je vremenska neodpornost in občutljivost na direktno sončno svetlobo (Kobav, 2004).



Slika 13: Slika digitalnega fotoaparata s širokokotnim objektivom in programska pretvorba v vrednosti svetlosti.

4.5 Merilnik svetlobnega toka

Ker na svetlobni tok ne vpliva porazdelitev svetilnosti, se ga po navadi meri z integracijskimi sferami. Zaradi njihove sferične oblike se s fotodetektorjem ni potrebno pomikati po namišljeni krožnici, ampak je ta fiksen v eni točki. Tako lahko opravimo meritev svetlobnega toka samo z enim odčitkom. Za to isto meritev bi s fotogoniometrom morali prepotovati celoten sferični koordinatni sistem, kar pomeni,

da bi s standardnim merilnim intervalom 1° v vertikalni smeri (γ ravnine) in 15° v horizontalni smeri (C ravnine) morali opraviti 4320 odčitkov.

4.5.1 Integracijska sfera

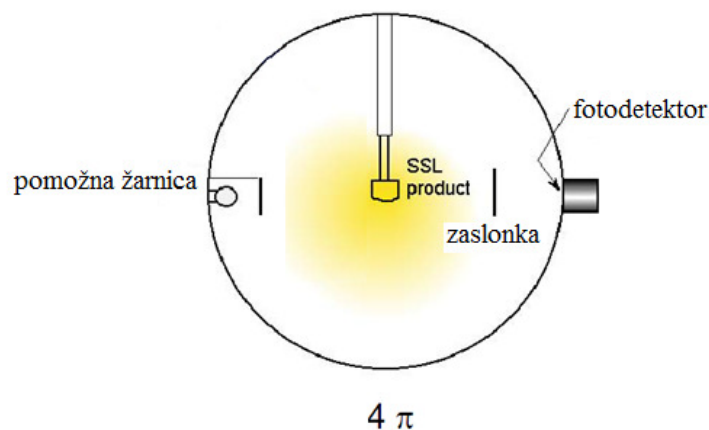
Teorija zbiranja svetlobe v geometrijsko telo in s tem enakomerna notranja osvetlitev je bila predstavljena leta 1892. Implementacijo te teorije v prakso pa je 8 let po tem omogočil R. Ulbricht. V njegovem primeru je bilo uporabljeno geometrijsko telo sfera. Od tedaj je to postal standardni fotometrični pripomoček z imenom integracijska sfera ali fotometrična sfera ali Ulbrichtova sfera (Wikipedia, 2014).

Integracijska sfera je fotometrični instrument, s katerim se meri energije pri različnih valovnih dolžinah. V tem delu se bomo osredotočili le na meritve svetlobnega toka in spektralne porazdelitve vidne svetlobe. Merjenci sfere so po navadi svetlobni viri, z vse večjo uporabo LED pa postajajo merjenci tudi celotne svetilke (SSL produkti), ki jih merimo v določenih časovnih intervalih in jim tako določamo življenjsko dobo in kvaliteto izsevane svetlobe. Standardi, ki podajajo zahteve za te meritve, so IES LM-79, IES LM-80 in ENEC.

Princip delovanja je v tem, da merjenec v notranjosti sfere seva svetlobo, ki vpada na notranji plašč. Svetlobni žarki se v sferi kontinuirano difuzno odbijajo in posledica je popolnoma enakomerna osvetljenost plašča. Z luksmetrom izmerimo osvetljenost ene točke; in ker so vse ostale točke enake, jim lahko pripišemo enako vrednost. Tako dobimo celotni izsevani svetlobni tok merjenca. Namesto luksmetra se lahko za senzor uporablja radiospektrometer, ki izmeri spektralno porazdelitev svetlobe. Glede na to kje je svetlobni vir montiran, ločimo 2 tipa geometrije sfere (IES LM-79):

Geometrije sfere tipa 4π

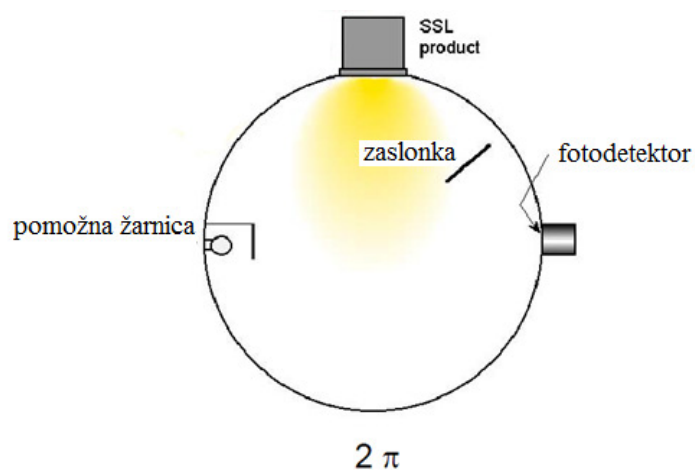
Svetlobni vir je montiran v centru sfere (Slika 14). Ta geometrija je primerna tako za usmerjene svetlobne vire kot za tiste, ki sevajo v vse strani. Slaba stran je, da velikost vira vpliva na meritev, saj vir absorbira določen del svetlobnih žarkov (sence v sferi). S takšno konfiguracijo lahko merimo vire, ki so manjši od 2 % celotne notranje površine sfere ali dolgi manj kot $2/3$ premera sfere.



Slika 14: Integracijska sfera geometrije 4π .

Geometrije sfere tipa 2π

Svetlobni vir je montiran na stran sfere in poravnani z notranjim plaščem (Slika 15). Prednost te geometrije je v tem, da kljub velikemu merjencu ni absorpcije svetlobe v sferi, kar pomeni izničenje te merske napake. Slaba stran pa je, da je meritev primerna le za usmerjene vire. Premer odprtine pri takšni konfiguraciji mora biti manjši od $1/3$ premera sfere.



Slika 15: Integracijska sfera geometrije 2π .

Premer sfere

Za izbiro ustreznega premera sfere je potrebno vedeti, kaj se bo v njej merilo. Bistvene lastnosti merjencev, ki vplivajo na izbiro premera so:

- velikost,

- absorpcijski faktor,
- temperatura,
- razpon svetlobnega toka – odzivnost sfere.

Seveda je bistven faktor tudi cena, ki tako kot odzivnost sfere vodi k izbiri čim manjšega premera. Prvi trije faktorji vodijo k izbiri čim večjega, saj je priporočen premer 10 krat velikost točkastih svetlobnih virov in 2 krat dolžina linearnih svetlobnih virov. V praksi se po navadi uporabljajo sfere med 1 in 3 m premera, saj z njimi pokrijemo zahteve za vse trenutno uporabljene svetlobne vire.

Plašč sfere

Glavni lastnosti plašča sta difuzno odbijanje svetlobnih žarkov in znana odbojnost. Da to dosežemo, se po navadi uporablja prašne barve na osnovi barijevega sulfata. Cilj tega nanosa je, da razbije primarne svetlobne žarke na veliko število sekundarnih, ki se nato še naprej razbijajo. Odbojnost plašča se označuje s faktorjem ρ . Stopnjo odbojnosti plašča pri posameznih valovnih dolžinah se prikazuje s spektralno funkcijo $T_s(\lambda)$, ki pomeni spektralno odzivnost sfere.

Sfere z visoko odbojnostjo (med 95 in 98 %) nudijo boljšo enakomernost osvetljenosti plašča in manjšo napako zaradi usmerjenih svetlobnih virov. Njihova slabost je v tem, da so občutljivejše na absorpcijo merjencev. Zaradi tega je pri teh sferah obvezna uporaba pomožnega svetlobnega vira. Sfere z nižjo odbojnostjo (med 80 in 90 %) so manj občutljive na nalaganje prahu, z njimi pa se lahko meri z uporabo pomožnega svetlobnega vira in brez njega. Slabost je v tem, da imajo manjšo odzivnost.

Notranje zaslonke

Zaslonke služijo preprečevanju direktnega sevanja v senzor. Kot je razvidno na Slikah 13 in 14 so montirane pred fotometrično glavo in pred pomožni svetlobni vir. Skupaj z notranjimi nosilci predstavljajo glavni vzrok za slabo enakomernost osvetljenosti plašča. Zaradi tega morajo biti čim manjše, barvane z enako visoko odbojno barvo, njihova oddaljenost od senzorja pa mora biti med 1/3 in 1/2 premera sfere.

Notranji nosilci in okovi

Ti služijo pritrjevanju zaslonk, senzorjev ter svetlobnih virov. Zgrajeni in barvani morajo biti tako, da imajo čim manjšo absorpcijo svetlobe. Nosilci svetlobnih virov imajo na koncu montiran ustrezen okov za žarnice/sijalke ali hladilnik za LED. Za kalibracijske svetlobne vire so pomembni električni parametri napajanja, zato je predvsem za te okove pomembno, da imajo 4-polni priklop, ki poleg napajanja omogoča tudi merjenje električnih količin na samem okovu in s tem izničenje napake zaradi padca napetosti na električnih vodnikih.

Temperaturni senzorji

Z njimi merimo temperaturo fotodetektorja, plašča in merilnega ambienta v sferi. Zaradi merilne napake mora biti senzor temperature ambienta montiran za zaslonko oz. tako, da čim manj vpliva na meritve.

Fotometrična glava

V integracijski sferi mora biti senzor montiran za zaslonko in poravnan z notranjim plaščem sfere, saj lahko le tako zajame vse žarke, ki se odbijajo od plašča. Glede na to s kakšno metodo oz. kakšnim detektorjem merimo, ločimo dva tipa senzorjev:

- fotometrično glavo: ta se uporablja za zajem svetlobnega toka v sferi. Celoten merilnik je luksmeter in
- optični kabel, ki se uporablja za zajem svetlobnega spektra v sferi. Celoten merilnik je radiospektrometer.

Svetlobni viri v sferi

Pri izvajanju meritev v sferi se v to montira različne svetlobne vire po zaporedju, ki ga predpisuje merilni postopek. Vsak vir mora biti pred meritvijo stabiliziran na ustrezni temperaturi, če je potrebno pa tudi priključen na naprave, ki omogočajo stabilno električno napajanje in posledično izsevan svetlobni tok.

Merjeni svetlobni viri v sferi so lahko: LED in multichip LED diode, linearni LED moduli, SSL produkti, žarnice, fluorescenčne sijalke, metalhalogenidne sijalke.

Kalibracijski svetlobni vir ima to lastnost, da skozi določeno časovno obdobje uporabe ohranja enak svetlobni tok in spekter svetlobe. Pri kalibracijah je priporočljivo uporabljati set treh kalibracijskih virov, saj se tako prepozna posamezne anomalije. Rokovanje, shranjevanje in evidentiranje teh virov mora biti natančno, saj lahko vsaka malenkost vpliva na njihovo delovanje. Po navadi se za kalibracijske vire uporablja halogenske žarnice, ki delujejo pri nižjih barvnih temperaturah, saj jim to zagotovi počasnejše staranje (tipični padec svetlobnega toka je 1 % na 24 ur delovanja). Za kalibracijo fotodetektorja mora imeti žarnica fiksni svetlobni tok (lm). Za kalibracijo radiospektrometra mora imeti fiksni sevalni tok (W) in znano spektralno porazdelitev, ki v praksi pomeni točno določeno barvno temperaturo (po navadi 2856 K). Pri teh virih je pomemben tudi položaj delovanja, zato ta ne sme biti spremenjen od nominalnega. Kot kalibracijske vire se lahko uporablja tudi fluorescenčne ali metalhalogenidne sijalke, vendar imajo te po daljšem obdobju mirovanja manj zanesljivo ponovljivost rezultatov.

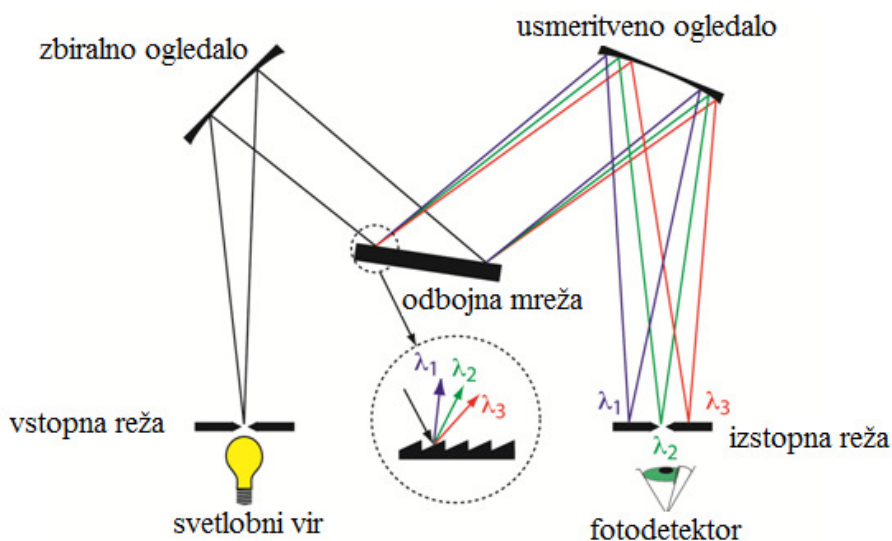
Pomožni svetlobni vir se uporablja za izničenje napake povezane z absorpcijo svetlobe v sferi. Postopek meritve s pomožnim virom zahteva več zaporednih odčitkov različnih konfiguracij in zaradi tega mora biti med celotno uporabo v stabilnem stanju. Po navadi se za pomožne vire uporablja nizko napetostne halogenske žarnice z enakimi karakteristikami kot kalibracijski svetlobni viri.

4.6 Merilnik svetlobnega spektra

V sklopu svetlobno-tehničnih meritev se za radiometrične meritve uporablja radiospektrometre, ki merijo spektralno porazdelitev svetlobe, katere graf je prikazan na Sliki 3. Izmerjeni rezultati niso ovrednoteni s svetlobno funkcijo, ampak so surove vrednosti moči elektromagnetnega valovanja pri posamezni valovni dolžini. Z nadaljnjim vrednotenjem preko standardnih formul pridemo do karakteristik svetlobe, kot so: kromatične koordinate, temperatura barve, faktor primerljivosti. Bistveni sestavni elementi radiospektrometra so:

Radiometrična glava je optični kabel, ki v sferi zajema elektromagnetno valovanje in ga prenaša v napravo. Na zunanji strani kabla so montirani difuzor, leča ali drugi filtri, ki določajo, kateri tip elektromagnetnega valovanja bo merjen (UV, vidna svetloba, IR ...).

Monokromator je bistveni sestavni element radiospektrometra. Najpogosteje je uporabljen Czerny-Turnerjev monokromator (Slika 16).



Slika 16: Czerny-Turnerjev monokromator.

Vstopna reža usmeri določen snop svetlobe v zbiralno ogledalo. To zaradi svoje oblike odbije vse med seboj paralelne žarke na uklonsko odbojno mrežo. Ta ima zaradi zobate strukture ostre robove in nagnjene ravne površine. Posledica tega je, da primarni žarki padejo na površine različnih naklonov in oddaljenosti. Na ta način se primarni žarki, ki so sestavljeni iz več valovnih dolžin, razlomijo na sekundarne; tu se svetloba različnih valovnih dolžin ukloni pod drugačnim kotom. Princip delovanja je enak kot pri prepustni uklonski mrežici. Sekundarni žarki se nato odbijejo od usmeritvenega ogledala, ki jih usmeri proti izstopni reži. Skoznjo gre v senzor samo določena valovna dolžina. S premikanjem uklonske odbojne mreže spreminjamo kot žarkov in s tem določamo, katera valovna dolžina (barva) bo padla na režo in naprej na detektor. Kot je razvidno na sliki, vsi žarki, ki ne grejo skozi režo, zadenejo v steno naprave. Zaradi tega je za izničenje merilne napake pomembno, da je notranjost ohišja pobarvana v neodbojni material (Wikipedia, 2014).

Fotodetektor je določen glede na interval valovne dolžine, ki se bo merila. Za vidno svetlobo je minimalni interval med 380 in 780 nm. Fotodetektor, ki se uporablja v ta namen, je po navadi fotoelement.

Sistemi za krmiljenje in obdelavo podatkov služijo na prvotnem nivoju za ojačenje in pretvorbo odčitkov fotodetektorja, nato pa za računanje, normiranje in prikaz po določenih standardih.

4.7 Dodate zahteve za laboratorije

Za izvedbo natančne svetlobno-tehnične meritve je potrebno poleg fotometričnih poznati tudi ostale merilne naprave, postopke in parametre. V nadaljevanju so opisane dodatne zahteve za izvajanje meritev v integracijski sferi po standardu SIST-EN 13032.

Temperatura okolice in zračni tokovi

Temperatura vpliva na odbojnost integracijske sfere in odzivnost fotodetektorja (tipično 0,1 % na °C). Zaradi tega je potrebno, da je celoten sistem postavljen v prostor z nadzorovano temperaturo ($25\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$). Še bolj kot na merilne instrumente temperatura okolice vpliva na svetlobne vire. Zaradi tega so za meritve svetlobnega toka točno določeni temperaturni intervali (Tabela 3). Vsa merjenja temperature se izvaja na višini merjenca, v horizontalni oddaljenosti največ 1,5 m. Pretirani zračni tokovi (večji od 0,2 m/s) v okolici merjenca lahko zmanjšajo temperaturo okolice in zato ne smejo biti prisotni.

Električno napajanje in predstikalne naprave

Tokovni stabilizatorji in transformatorji se večinoma uporabljajo za napajanje LED. Ti morajo omogočati natančno nastavljanje na širokem tokovnem intervalu. Napetostni stabilizatorji se uporabljajo za napajanje predstikalnih naprav (za napajanje sijalk, svetilk ali posebnih LED). Napajalna napetost ne sme pretirano odstopati od nazivne merjenca (Tabela 3). Oba tipa stabilizatorjev morata zagotavljati, da merjenec deluje v območju $\pm 5\%$ od njegove nazivne moči.

Priprava merjencev

Svetlobni viri, ki se merijo v integracijski sferi, so navadne žarnice, sijalke ali LED, ki kot take nimajo posebne vrednosti. Vendar s postopkom umerjanja postanejo testni vzorci ali še več – referenčni svetlobni viri, ki se kasneje uporabljajo za meritve svetilk. Zaradi tega jih je potrebno:

- pred meritvijo ustrezno pripraviti,
- med meritvijo ustrezno uporabljati,
- po meritvi ustrezno hraniti,
- po določenem intervalu ponovno umeriti.

Zaradi vsega vložnega dela predstavljajo takšni svetlobni viri za laboratorij veliko vrednost. Če se uporabljajo kot referenca za nadaljnje meritve svetilk, pa je izjemno pomembno tudi ohranjanje njihovih svetlobno-tehničnih lastnosti.

V Tabeli 3 so prikazane zahteve za pripravo in kasnejšo uporabo najpogostejših tipov svetlobnih virov (SIST-EN 13032).

Tabela 3: Zahteve za pripravo svetlobnih virov na meritve.

Zahteva	Navadna in halogenska žarnica	Fluorescenčna sijalka	Metalhalogenidna sijalka	Visokotlačna natrijeva sijalka	LED dioda
stabilnost napajalne napetosti	$\pm 0,1\%$ za DC , $\pm 0,2\%$ za AC				
ponovljivost svetlobnega toka	$\pm 1\%$ za DC , $\pm 2\%$ za AC				
staranje	1 h ali 1 % življenjske dobe, ki je manjša od 100 ur	100 h z 10 min OFF 8 krat vsakih 24 h	100 h	100 h z 15 min OFF vsakih 6 h	ni potrebno
stabilizacija pred meritvijo	Preverjanje svetlobnega toka se izvaja vsako minuto. Noben odčitek ne sme odstopati več kot 1 % – to se šteje za stabilno stanje.				
hlajenje po meritvi	≥ 10 min	≥ 10 min	≥ 15 min	≥ 10 min	≥ 10 min
obratovalni položaj	vertikalno – okov gor	tubularne in okrogle – horizontalno kompaktno – vertikalno	kot navedeno od proizvajalca	horizontalno	kot navedeno od proizvajalca
temperatura okolice	20 do 27 °C $\pm 3\%$	25 °C $\pm 1\%$	20 do 27 °C $\pm 3\%$	20 do 27 °C $\pm 3\%$	20 do 27 °C $\pm 3\%$

Svetlobni vir se v integracijsko sfero pozicionira glede na svoj fotometrični center. Ta ni enak centru glede na zunanje dimenzije vira, saj upošteva le svetlečo površino; če je vir usmerjen, pa upošteva le ploskev izstopa svetlobe.

5 FOTOMETRIČNE MERITVE V INTEGRACIJSKI SFERI

Na začetku poglavja 4.5.1 smo na enostaven način opisali Ulbrichtovo teorijo enakomerne notranje osvetlitve geometrijskega telesa – sfere. Bistvo te teorije je v tem, da svetlobni vir v sferi seva določen svetlobni tok Φ , ki na poljubi točki plašča sfere povzroča določeno osvetljenost E . Tako je osvetljenost plašča v točki B odvisna od direktnega sevanja svetlobnega vira in od ostalih žarkov, ki se odbijajo po sferi od točk A in C (Slika 17). V skladu z Ulbrichtovo teorijo je enačba (12) za osvetljenost plašča v točki B podana kot:

$$E = E_1 + \left(\frac{\Phi}{4\pi r^2} \right) \left(\frac{\rho}{1 - \rho} \right) \quad (12)$$

E ... skupna osvetljenost točke na plašču sfere (lx)

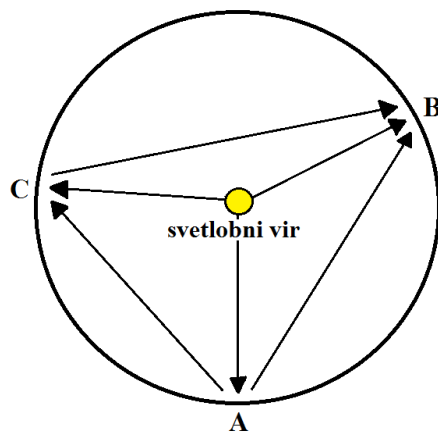
E_1 ... osvetljenost točke na plašču sfere, ki jo povzroča direktno sevanje svetlobnega vira (lx)

Φ ... svetlobni tok merjenja (lm)

r ... premer sfere (m)

ρ ... odbojnost plašča sfere (%)

Med senzor, ki se nahaja v točki B, in svetlobni vir se postavi zaslonko, ki preprečuje direktno sevanje, $E_1 = 0$. Tako vidimo, da sestavlja osvetljenost poljubne točke B samo indirektna komponenta, ki je enaka vsem točkam v sferi. To je enako celotnemu svetlobnemu toku merjenja Φ (CIE 84-1996).



Slika 17: Princip osvetljenosti poljubne točke v integracijski sferi z geometrijo 4π .

Glede na osnovno teorijo delovanja integracijske sfere obstaja več merilnih postopkov, s katerimi se dobi merodajne rezultate. Za lažje razumevanje smo meritve grupirali v skupine, po nivojih pa smo prikazali odvisnosti teh skupin meritev med seboj (Slika 18).

1. NIVO:
meritve glede na
merilnik

fotodetektor ali radiospektrometer

2. NIVO:
meritve glede na postopek

primerjalna meritev
s kalibracijsko žarnico

meritev s pomožno
žarnico

2π

4π

2π

4π

3. NIVO:
meritve glede na
geometrijo in montažo

Slika 18: Skupine meritev v integracijski sferi po nivojih.

Natančnost meritev v sferi se lahko preverja z meritvami fotogoniometra, ki uporablja komponente in metode skladne s standardom. Meritve med seboj ne smejo odstopati za več kot 2 % (SIST-EN 13032).

5.1 Primerjalna meritev s kalibracijsko žarnico

S to metodo se izniči napake zaradi neenakomerne difuznosti plašča sfere in difuzorja na fotometrični glavi ter absorpcije svetlobe zaradi objektov v sferi (nosilci, zaslonke, svetlobni viri). Ta metoda podaja merodajne rezultate samo v primerih, ko kalibracijski in merjen svetlobni vir:

- sta iste velikosti in oblike,
- sta montirana na isti nosilec,
- imata enako spektralno porazdelitev svetlobe,
- imata enako prostorsko porazdelitev svetlobe.

Če se uporablja fotodetektor, se izvede le dva odčitka osvetljenosti plašča s kalibracijskim in merjenim svetlobnim virom. Dobljeno razmerje med odčitki ovrednoti napako. Po enačbi (13) nato dobimo celotni svetlobni tok merjenca (CIE 84-1996):

$$\Phi_x = \Phi_N \frac{E_x}{E_N} \quad (13)$$

Φ_x ... svetlobni tok merjenca (lm)

Φ_N ... svetlobni tok kalibracijske žarnice (lm)

E_x ... osvetljenost notranjega plašča sfere, ki jo povzroča svetlobni tok merjenca (lx)

E_N ... osvetljenost notranjega plašča, ki jo povzroča svetlobni tok kalibracijske žarnice (lx)

Z uporabo radiospektrometra ostajata postopek in cilj meritve enaka – z dvema odčitkoma obsevanosti plašča ovrednoti napako. Meritev poteka na ta način, da s poznavanjem nominalnega sevalnega toka kalibracijske žarnice $\Phi_{e\lambda,N}$ lahko

izračunamo svetlobni tok merjenca Φ_x . Ker tukaj izvedemo tudi pretvorbo iz fizikalne v fiziološko enoto, je potrebno vrednotenje s svetlobno funkcijo. Izračun prikazuje enačba (14):

$$\Phi_x = Km \int_0^{\infty} \left(\Phi_{e\lambda,N} Y_{\lambda,x} / Y_{\lambda,N} \right) V(\lambda) d\lambda$$

(14)

$Y_{\lambda,x}$... obsevanost notranjega plašča sfere, ki jo povzroča sevalni tok merjenega vira na valovni dolžini λ

$Y_{\lambda,N}$... obsevanost notranjega plašča, ki jo povzroča sevalni tok kalibracijskega vira na valovni dolžini λ

5.1.1 Kalibracija

Zaradi zahtevane visoke stabilnosti izhodnega signala imajo kalibracijski svetlobni viri kratko življenjsko dobo. Da bi bil njihov delovni čas čim krajši, se zahtevane podatke za zgornje računske postopke ne meri pri vsaki meritvi, ampak se to opravlja v določenih časovnih intervalih in nato rezultat shrani. Postopek kalibracije:

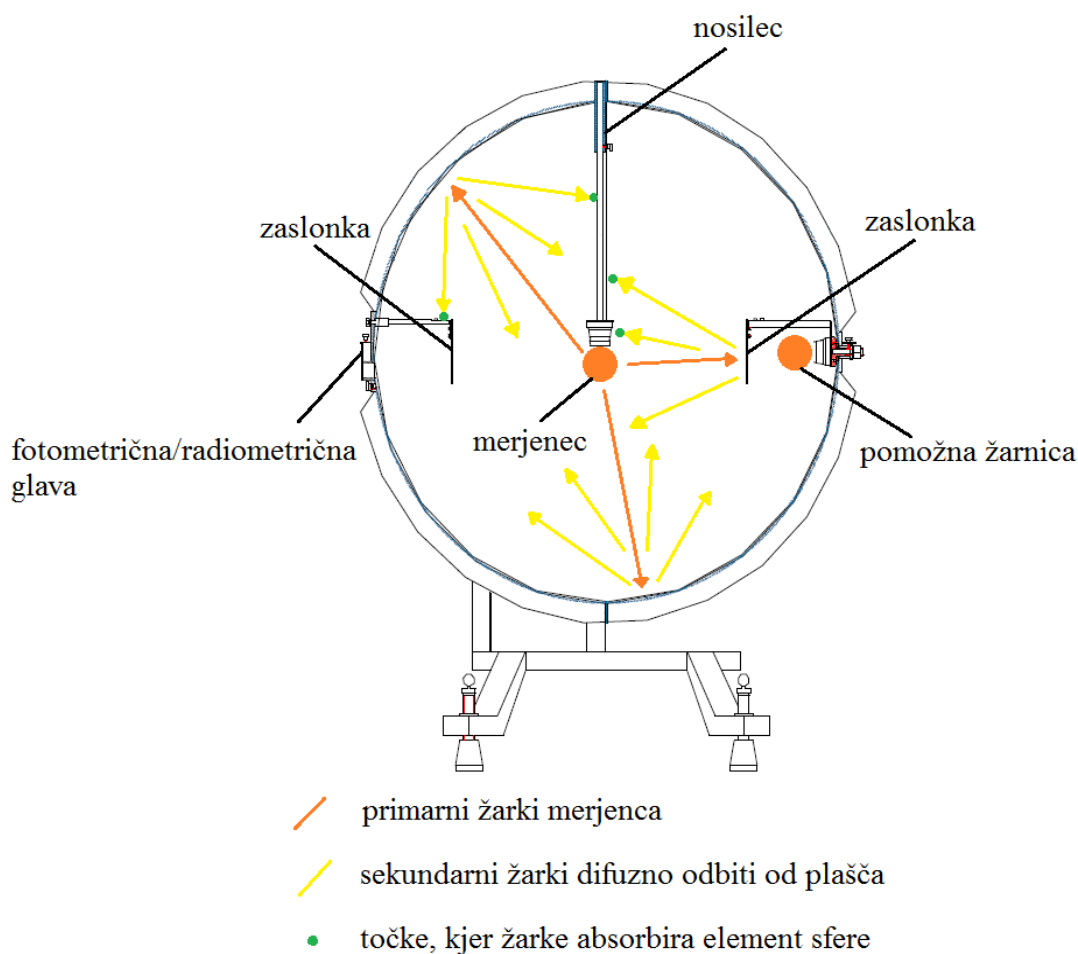
- odčitek senzorja pri zaprti sferi brez svetlobnega vira. S tem se preverja, če v sfero uhaja neželena svetloba;
- montaža kalibracijskega vira s fiksnim svetlobnim tokom. Odčitek fotodetektorja se normira na izsevan Φ_N ;
- montaža kalibracijskega svetlobnega vira s fiksnim sevalnim tokom. Odčitek radiospektrometra se normira na izsevan $\Phi_{e\lambda,N}$.

5.2 Vzroki za merilne napake in njihova korekcija

Vsako odstopanje med kalibracijskim in merjenim svetlobnim virom predstavlja enega od izvorov merilnih napak. V nadaljevanju so po standardu IES LM-78-07 in CIE 84-1996 predstavljeni najpogostejši vzroki in postopki za njihovo odpravo ali ovrednotenje.

5.2.1 Absorpcija svetlobe

Vsak predmet, ki se nahaja v integracijski sferi, absorbira določen delež primarne ali sekundarne svetlobe (Slika 19); posledica tega je merilna napaka zaradi absorpcije. Faktorji, ki na to vplivajo, so: zaslonke, nosilci, svetlobni viri in tudi obraba oz. nečistoča na plašču. Delež te napake večja tudi toplejša barva svetlobe. Za vrednotenje absorpcije svetlobe v sferi se izvaja postopek meritve s pomožno žarnico.



Slika 19: Absorpcija žarkov v integracijski sferi pri geometriji 4π .

Postopek meritve s pomožno žarnico

S to žarnico se osvetljuje samo plašč sfere, zato mora biti montirana na notranji steni, pred njo pa zaslonka, ki preprečuje sevanje v senzor in merjenec (priporočena velikost zaslonke je 5 % premera sfere). Ker je tukaj zahtevanih več odčitkov, se ta postopek navadno izvaja s fotodetektorjem. Naknadno se lahko izvede še meritev z

radiospektrometrom, ki poda še ostale lastnosti svetlobe merjenca. Na te meritve radiospektrometra ne vpliva absorpcija svetlobe, zato pomožna žarnica ni potrebna.

Postopek meritve s pomožno žarnico:

- Kalibracijski svetlobni vir je vključen (montiran na sredini). Pomožna žarnica je izključena (montirana na plašču). Izmerimo osvetljenost E_N .
- Kalibracijski svetlobni vir je izključen (montiran na sredini). Pomožna žarnica je vključena (montirana na plašču). Izmerimo osvetljenost E_{HN} .
- Merjenec je izključen (montiran na sredini). Pomožna žarnica je vključena (montirana na plašču). Izmerimo osvetljenost E_H .
- Merjenec je vključen (montiran na sredini). Pomožna žarnica je izključena (montirana na plašču). Izmerimo vrednost E_x .
- Končna formula za izračun svetlobnega toka merjenca (Φ_x) je prikazana v enačbi (15):

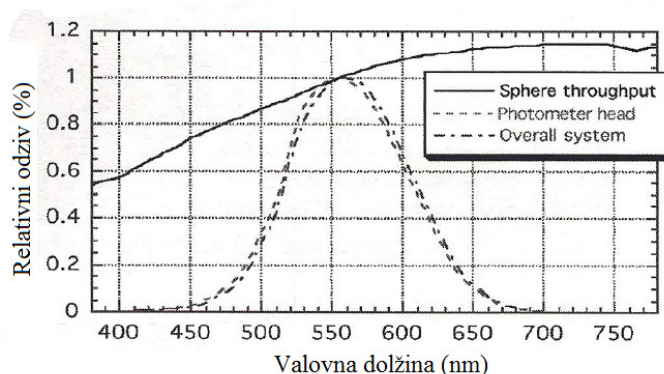
$$\Phi_x = \Phi_N \frac{E_x E_{HN}}{E_N E_H} \quad (15)$$

Med postopkom meritve se ne sme spreminjati nastavitvev ter premikati nosilcev ali zaslonk sfere. Potrebno je vzdrževati tudi predpisano temperaturo okolice meritve (25 °C). Ker mora imeti pomožna žarnica med meritvijo fiksni svetlobni tok, je opisan vrstni red izdelan na tak način, da se meritve z določenim virom izvede zaporedno in s tem skrajša čas stabilizacije in zmanjša obrabo le-tega.

5.2.2 Različna spektralna porazdelitev

Fotometrična glava ima korigirano odzivnost glede na svetlobno funkcijo $V(\lambda)$ in je zato občutljiva na spektralno porazdelitev svetlobe merjencev. Če je ta pri kalibracijskem in merjenem svetlobnem viru različna, se pojavi merilna napaka. Slednjo je mogoče izničiti s korigiranjem spektralne odzivnosti sfere. Korekcija se opravi tako, da se kalibracijsko žarnico z referenčno spektralno obsevanostjo $E_0(\lambda)$ izmeri v sferi z radiospektrometrom in dobi spektralno obsevanost plašča sfere $E_1(\lambda)$. Razmerje teh dveh meritev nam preko formule poda spektralno odzivnost sfere $T_s(\lambda)$.

Na Sliki 20 vidimo, kako se glede na spektralno odzivnost sfere korigira odzivnost fotometrične glave na novo vrednost (krivulja se zamakne tako, da je maksimum ponovno na funkciji $T_s(\lambda)$).

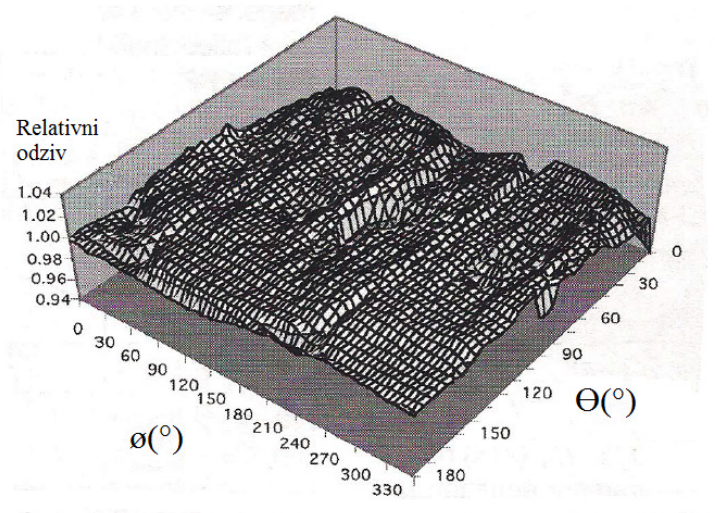


Slika 20: Primer spektralne odzivnosti sfere in korekcije odzivnosti fotometrične glave (IES LM-78-07).

5.2.3 Različna prostorska porazdelitev

Spektralna odzivnost sfere ni enaka po celotnem plašču, ker ta nima enakega odboja po celotni površini. Odstopanja predstavljajo zaslonke, nosilci, reže za odprtine in umazanija. Razen v območju okova seva kalibracijski vir v vse strani enako. Izrazito usmerjen merjeni vir lahko seva le v ozkem intervalu prostorskega kota in zaradi prej opisanih dejavnikov se zgodi, da odziv sfere ni enak, kot če bi ta vir seval neusmerjeno (izotropno). Tako lahko v sferi premera 2 m z zaslonkami velikosti 30 cm in oddaljenostjo od plašča 50 cm predstavlja ta napaka približno 0,1 % (odbojnost plašča 98 %) do 1 % (odbojnost plašča 80 %).

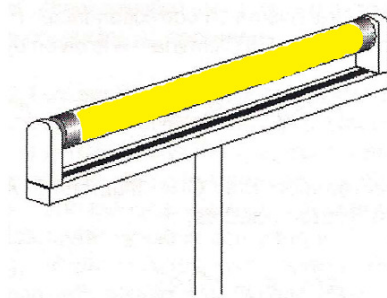
Neenakomernost odziva sfere se izraža s funkcijo $K(\square_1, \varnothing_1)$, imenovano tudi SRDF (spatial responsivity distribution function), ki se meri po polarnih koordinatah (\square, \varnothing). Funkcija predstavlja razmerje odčitkov v referenčni točki s koordinatami (\square, \varnothing) in vsemi ostalimi točkami s koordinatami (\square_1, \varnothing_1). Meritev se izvede tako, da se v center sfere montira zelo ozko usmerjen svetlobni vir, ki se ga nato vrti po horizontalni (\square) in vertikalni (\varnothing) osi. Tako se izmeri odzivnost plašča na vseh točkah sfere (Slika 21).



Slika 21: Primer relativnega odziva plašča po celotnem polarnem koordinatnem sistemu prikazan v 3D grafu (IES LM-78-07).

5.2.4 Absorpcija bližnjega polja

Vsaka element, ki je zelo blizu svetlobnega vira, absorbira velik delež svetlobe, ki ga ni mogoče korigirati niti s postopkom meritve s pomožno žarnico. Po navadi so te komponente okovi ali nosilci okovov (Slika 22).



Slika 22: Primer napačnega nosilca okova za cevasto fluorescenčno sijalko.

Za preprečevanje absorpcije bližnjega polja je pomembno, da so vsi elementi čim bolj oddaljeni od svetlobnih virov, da nimajo lukenj ali udrtin, ki 'ujamejo' svetlobne žarke, ter da so pobarvani z visoko odbojno belo barvo.

5.2.5 Temperaturna odvisnost

Svetlobni viri ne sevajo enake količine sevalnega oz. svetlobnega toka pri vseh temperaturah okolice, kjer delujejo (npr. fluorescenčne sijalke sevajo največji

svetlobni tok pri temperaturi okolice 35 °C). Zaradi natančnosti in ponovljivosti meritev je pomembno vzdrževati temperaturo ambienta, v katerem svetlobni viri delujejo. Pomembno je tudi, da je temperatura ambienta umerjenih svetlobnih virov enaka temperaturi ambienta meritev končnih svetilk. Samo na ta način lahko izračunamo merodajen izkoristek svetilke.

Z višanjem temperature fotometrične glave se spreminjajo lastnosti difuzorja in filtra, ki služita za korekcijo glave. Posledica tega je različna spektralna odzivnost integracijske sfere. Ker je fotometrična glava montirana na plašč sfere, nanjo vplivata tako temperatura v sferi kot tista izven nje. Zaradi tega je pomembno, da je tudi prostor, kjer se nahaja sfera, pravilno temperaturno vzdrževan.

Poleg ambienta v okolici sfere segrevajo plašč tudi svetlobni viri v sferi. Pretirano segrevanje plašča se kaže v zmanjšani odbojnosti ρ . Večja kot je notranja površina sfere glede na merjeni svetlobni vir, večji je delež te napake. Ker pa se ob normalnih pogojih uporabe sfere plašč ne pretirano segreva, so ti deleži minimalni. Največjo nevarnost predstavljajo zunanja grelna telesa, zato je potrebno paziti na njihovo usmerjenost.

5.2.6 Dolžina merjenega svetlobnega vira

V primerih, ko je sfera kalibrirana s točkastim svetlobnim virom, merjeni svetlobni vir pa je linearen (npr. fluorescenčna sijalka T5 ali T8), se pojavi merilna napaka. Ta nastane zato, ker ima dolg linearni vir robne dele svetleče površine bližje plašča sfere. Vsi žarki iz teh delov padejo na plašč pod večjim kotom kot centralni in to se kaže kot večja odbojnost plašča. Ta se povečuje z vpadnim kotom in je pri 45° od pravokotne večja za cca 0,4 %. Če je linearni vir dolg manj kot 2/3 premera sfere, se lahko to napako zanemari.

5.2.7 Ostalo

Merilna napaka lahko nastane zaradi napačnega električnega napajanja svetlobnega vira. Že 0,1 % napake na napajalnem toku žarnice lahko predstavlja 0,6 % napake na izsevanem svetlobnem toku.

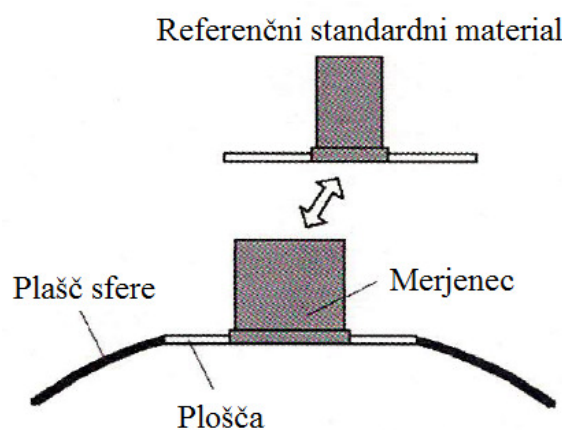
Merilne napake v integracijski sferi lahko predstavljajo tudi močni svetlobni viri. Npr. 1000 W metalhalogenidna sijalka v sferi premera 2 m povzroči na fotometrični glavi osvetljenost okoli 400 klx. Če je to izven merilnega območja merilnika, bo odčitek popačen. Rešitev je v montaži dodatnega filtra pred senzor, ki zmanjša osvetljenost le-tega. Tak filter mora biti prej umerjen in s tem je preverjena njegova stopnja zatemnitve in spektralne ustreznosti.

5.3 Geometrija sfere in montaža merjenca

Pri geometriji 4π je svetlobni vir montiran v center sfere. Pri tem je potrebno paziti, da njegovo delovanje ne vpliva na notranjo temperaturo ter da je njegova površina čim manjša.

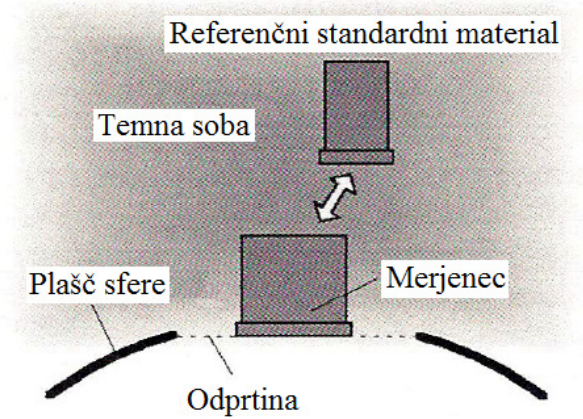
Pri geometriji 2π je usmerjeni svetlobni vir poravnani z notranjim plaščem sfere. V ozadju vira je lahko veliko hladilno telo, saj to ne vpliva na absorpcijo niti na temperaturo v sferi. Ker je odprtina v sferi vedno enaka, velikosti merjenecv pa različne, sta tukaj mogoči dve rešitvi:

- Razmik med merjencem in sfero se zapolni s ploščo, ki je na notranji strani pobarvana z belo barvo podobno plašču sfere. V tem primeru ni važna osvetljenost prostora merjenca (Slika 23).



Slika 23: Montaža geometrije 2π z zaplnotenim razmikom.

- Razmik se pusti odprt, vendar v tem primeru mora biti prostor okoli merjenca temna soba, da prepreči vdor tuje svetlobe v sfero (Slika 24).



Slika 24: Montaža geometrije 2π z odprtim razmikom.

V obeh primerih montaže je potrebno pred meritvijo sfero kalibrirati, med meritvijo pa paziti na zahteve za temperaturo ambienta in montažo merjenca. Ko se sfero znova uporablja v geometriji 4π , je potrebo odprtino zapreti z referenčnim standardnim materialom in sfero kalibrirati.

6 NADGRADNJA INTEGRACIJSKE SFERE

Nadgradnjo integracijske sfere je mogoče izvesti z nakupom oz. izdelavo ustreznih dodatnih komponent ter s poznavanjem osnovnih teoretičnih modelov in računskih metod. Na praktičnem primeru je v nadaljevanju prikazano, kako so postopek nadgradnje izpeljali v podjetju Intra lighting, d. o. o. To je trenutno vodilni proizvajalec svetil v Sloveniji in zaposluje več kot 300 ljudi. Ima proizvodnjo v 3 državah, 5 odvisnih družb, 7 uradnih predstavništev, izdelke pa izvažata v več kot 30 držav sveta. V 4 katalogih je predstavljenih več kot 120 družin svetilk, ki so izdelane po predpisih raznih standardov. Vse te dosežke omogoča tudi vložek v razvojni oddelek, pod katerega spada svetlobno-tehnični laboratorij. Ta laboratorij je konec leta 2010 doživel obsežno prenovo in razširitev v vrednosti preko 500.000 EUR. Prvotni prostor kvadrature cca 30 m² so razširili na 3 enote skupne kvadrature več kot 500 m². Laboratorijske enote so razdeljene glede na sklope meritev, ki se jih opravlja v njih.

Fotometrični laboratorij sestavljata dva prostora: prvi je manjši in služi za pripravo merjencev, drugi pa je dolg 17 in visok 7 m. V njem se nahaja fotogoniometer tipa C proizvajalca Everfine Photo – CO., LTD. Naprava je tipa 'Full-Field Speed Goniophotometer, kar pomeni, da omogoča meritve po celotni namišljeni sferi okoli merjenca ter da ima z dvema ogledaloma merilno razdaljo 30 m. Poleg fotogoniometra je tudi stabilizator napetosti in merilec električne porabe. Tako lahko izvedemo meritve izsevanega svetlobnega toka, kotne porazdelitve svetilnosti ter svetlobnega in električnega izkoristka. Meritve se izvajajo po zahtevah standarda SIST EN 60598-1 in SIST EN 13032-1.

Zunanje testno polje je preizkusna cesta dolžine 40 m in širine 6 m. Ob njej stojijo 3 premični stebri, na katere se montira 1 ali 2 merjenca. Stebri so povezani s kontrolno omarico, kjer so prikazovalniki električne porabe merjencev. Prva naloga tega polja je primerjava starejših in novejših svetilk za cestno razsvetljavo. Druga pa služi kot pripomoček za meritve svetlosti cestne površine. Meritve se izvajajo s fotodetektorjem ali digitalnim fotoaparatom. Z dobljenimi rezultati nato pripravljamo simulacije za pomoč pri projektiranju osvetlitve s cestnimi svetilkami.

Svetlobno-tehnični laboratorij je namenjen izvajanju različnih testov:

- toplotni test: za merjenje temperatur na kritičnih komponentah svetilk,
- trajnostni test: za preverjanje kakovosti komponent in materialov po daljšem obratovalnem času,
- IP (ingress protection) test: za testiranje odpornosti svetilk proti vodi in vlagi,
- udarni test: za preizkušanje udarne trdnosti nanosa barve,
- križni test: za preizkušanje oprijemljivosti barve na podlago,
- test obešalnih sistemov: za preizkušanje nosilnosti,
- vibracijski test: za preizkušanje vijčnih in lepljenih zvez,
- test prebojne trdnosti: za preizkušanje varnosti svetilke ob udarih visoke električne napetosti iz omrežja.

IP test se opravlja po zahtevah standarda IEC 60529, vsi ostali pa po zahtevah standarda SIST EN 60598-1. Poleg priprav za omenjene teste se v tem delu laboratorija nahaja tudi integracijska sfera.

6.1 Integracijska sfera

V prenovo in razširitev svetlobno-tehničnega dela laboratorija je spadal tudi nakup in montaža integracijske sfere s pripadajočo strojno in programsko opremo. Po preteklih pozitivnih izkušnjah je bila izbrana sfera premera 2 m istega proizvajalca kot fotogoniometer (Slika 25). Za merilni instrument je bila izbrana kombinacija fotodetektorja in radiospektrometra. Nazivni podatki integracijske sfere, merilnikov in ostalih instrumentov so navedeni v Prilogi 1.



Slika 25: Integracijska sfera premera 2 m podjetja Intra lighting, d. o. o.

6.2 Stara konfiguracija integracijske sfere

Fotogoniometer je v podjetju začel delovati pred integracijsko sfero. Takrat se je v skladu s standardom SIST EN 13032-1 ustrezno staralo in na njem umerilo najbolj uporabljene svetlobne vire. Prav zato ob montaži integracijske sfere ni bilo zahtev za umerjanja svetlobnih virov. Poleg tega ob zagonu celotnega novega laboratorija ni bilo niti časa niti razpoložljivega osebja, ki bi sfero ustrezno spoznalo in usposobilo. Zaradi tega je ostala v osnovni konfiguraciji dobavitelja brez izdelanih navodil s postopki merjenja. Meritve, ki so se v njej opravljale, so bile le primerjalnega značaja. Edine meritve, ki so v takšni konfiguraciji nudile merodajne rezultate, so bile meritve vertikalnih svetlobnih virov, ki sevajo v vse strani in so enake velikosti kot kalibracijska žarnica (svetleča površina cca 4 cm²).

Glavne komponente in lastnosti v osnovni konfiguraciji integracijske sfere, takšne kot se je uporabljala od nakupa do nadgradnje, so (Slike 26_1, 2, 3, 4, 5, 6):

1. Montaža senzorjev in zaslonk: senzorji so na plašču pravilno nameščeni. Prav tako je tudi zaslonka pred njimi pravilne oblike, dimenzij in oddaljenosti.
2. Montaža merjenca 4π : za manjše merjence je montaža ustrezna.
3. Montaža kalibracijske žarnice: za žarnico, ki deluje v vertikalni poziciji, je montaža ustrezna.

4. Montaža merjenca 2π : sfera ima predvideno odprtino za takšno montažo, vendar je potreben dodaten nosilec.
5. Montaža fluorescenčne cevi: ob takšni montaži ni mogoče izmeriti realnega svetlobnega toka, saj je velika absorpcija svetlobe zaradi žic in neodstranjenega okova.
6. Montaža LED ali SSL produkta: v primerih montaže 4π bi bilo mogoče s pomožno žarnico izvesti korekcijo za manjše hladilnike; za vse večje pa predstavlja takšna montaža preveliko absorpcijo svetlobe.



Slika 26: Komponente integracijske sfere pred nadgradnjo.

Poleg omenjenih pomanjkljivosti pri montaži merjenca sfera ni imela niti nosilca za pomožno žarnico ter razdelanih postopkov in navodil za korekcijo merilnih napak.

6.3 Nadgradnja integracijske sfere

Čeprav so dosedanje meritve v integracijski sferi doprinesle podjetju kar nekaj koristnih informacij, celotni potencial še zdaleč ni bil izkoriščen. Zato smo se odločili, da v sklopu tega dela izpeljemo nadgradnjo.

Glavni cilj je, da bi v sferi lahko opravljali natančne meritve na svetlobnih virih. To bi nam omogočilo:

- ponovno umerjanje starih svetlobnih virov, ker je preteklo že precej delovnih ur in je njihov izsevan svetlobni tok upadel;
- umerjanje novih svetlobnih virov. Trenutno so umerjeni le najbolj pogosto uporabljeni viri, za pokrivanje vseh zahtev pa je potrebno imeti umerjene vse tipe žarnic, sijalk in LED;
- preverjanje verodostojnosti tehnične dokumentacije dobaviteljev svetlobnih virov (zlasti LED);
- periodično merjenje LED in SSL produktov z večjimi hladilnimi telesi in tako določanje življenjske dobe svetilk;
- opravljanje meritev za zunanje interesente.

V prejšnjih poglavjih smo postopke merjenja, vzroke za merilne napake in njihovo korekcijo opisali zaporedno po točkah. Prav tako je tudi dejanska nadgradnja v nadaljevanju opisana na enak način.

6.3.1 Primerjalna meritev s kalibracijsko žarnico

Za testiranja v tem in naslednjem poglavju smo uporabljali pet svetlobnih virov (Slika 27):

- kalibracijsko žarnico: to je visoko stabilna halogenska žarnica z izhodom 1398,4 lm in 2856 K na napajalnem toku 3,977 A;
- pomožno žarnico: to je visoko stabilna halogenska žarnica z izhodom 1387,3 lm in 2856 K na napajalnem toku 3,993 A;

- merjenca 1: to je visoko stabilna halogenska žarnica z izhodom 1394,2 lm in 2856 K na napajalnem toku 3,957 A;
- merjenca 2: to je navadna kompaktna fluorescenčna sijalka 18 W in 2500 K starana v skladu s standardom SIST EN 13032-1;
- merjenca 3: to je COB LED 18,5 W na napajalnem toku 500 mA, 3000 K in Ra93 na aktivnem hladilnem telesu (hladilna rebra + ventilator 12 V DC).

Razvidno je, da smo za merjenca poleg starane sijalke izbrali še žarnico, ki je sicer namenjena kalibracijam. Zaradi njene visoke stabilnosti lahko izničimo merilno napako zaradi nihanja svetlobnega toka vira in tako lažje ugotovimo merodajnost in ponovljivost rezultatov. Tretji merjenec je močnejša LED na večjem hladilniku. Za takšen vir ni primerna primerjala meritev, saj povzroča veliko absorpcijo svetlobe. Ta rezultat bomo uporabili kasneje za primerjavo z meritvijo s pomožno žarnico.

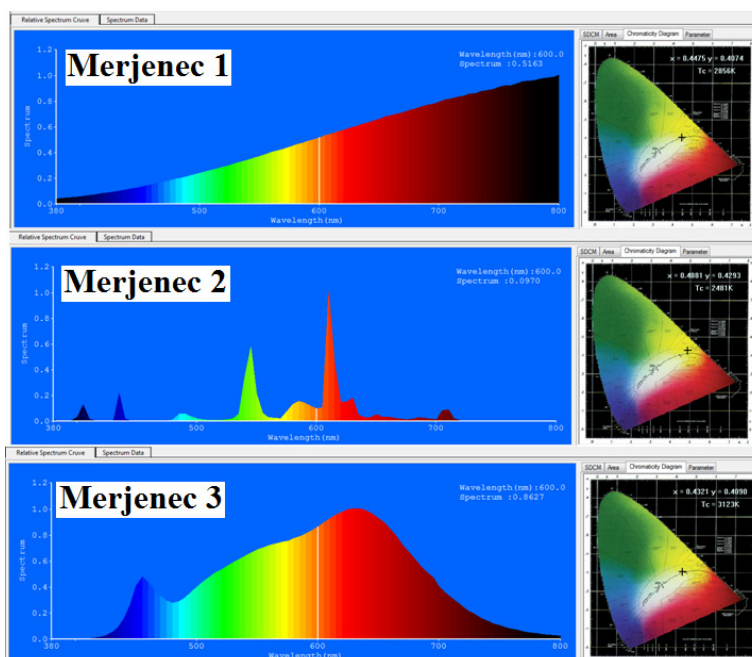


Slika 27: Za testiranja uporabljeni svetlobni viri.

Za opravljanje meritev svetlobnega toka uporablja opisana sfera standardni postopek, ki je patentiran s strani proizvajalca (Spectrometer & Broadband – radiometer/ photometer combined technique, patent No. ZL 200510050854.1). Ta postopek ni popolnoma enak prej opisanim, kljub temu pa je za merjenca velikosti kalibracijske žarnice zelo natančen. Koraka, ki ju je potrebno opraviti za meritev svetlobnega toka merjenca, sta dva in sta opisana v nadaljevanju.

Kalibracija sfere. S tem postopkom program normira odčitek senzorja na izsevan svetlobni tok kalibracijske žarnice ter tako ovrednoti odbojnost plašča in absorpcijo elementov sfere.

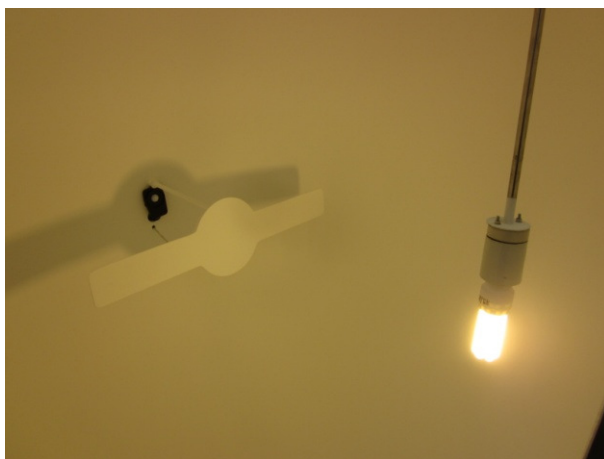
Montaža merjenca in izvedba meritve svetlobnega toka in spektralne porazdelitve. Vedno se izvedeta obe meritvi zaporedoma. Na ta način se odčitek fotodetektorja, ki je že pomnožen s kalibracijskim faktorjem, korigira še z meritvijo radiospektrometra. Tako se odčitek dodatno korigira glede na svetlobno funkcijo in izniči napako zaradi različne spektralne porazdelitve med viri. Če je spekter kalibracijskega in merjenega vira podoben, je korekcija minimalna. Na Sliki 28 so prikazane meritve spektralne porazdelitve vseh treh merjencev. Kljub temu da imajo vsi merjenci temperaturo barve med 2500 in 3000 K, vidimo, da se njihov spekter precej razlikuje. V Prilogah 2, 3 in 4 so celotna poročila meritev integracijske sfere.



Slika 28: Izmerjena spektralna porazdelitev merjencev 1, 2 in 3.

Rezultat opisane meritve je celotni svetlobni tok (Tabela 4), sevalni tok, spektralna porazdelitev svetlobe, parametri barve svetlobe po zahtevah CIE, električni parametri, temperatura senzorja in ambienta merjenca ter podatki namenjeni sledljivosti meritve.

Da bi preverili natančnost tega postopka meritve, smo izvedli še meritev z drugim merilnikom, to je z luksmetrom Lutron LX-1102, ki ima fotometrično glavo že korigirano na svetlobno funkcijo. Glavo smo montirali v isto točko, kjer je montirana serijska fotometrična glava (Slika 29). Tako smo dobili vrednost osvetljenosti plašča brez upoštevanja kateregakoli korekcijskega faktorja. Ker je fotometrična glava nekoliko večja in temnejša od standardne, rezultat ni popolnoma enak, vendar to ni ključno, saj pri tem preverjamo le postopek meritve.



Slika 29: Montaža druge fotometrične glave v sferi.

Iz izmerjenih vrednosti smo izračunali celotni svetlobni tok vira ter ga primerjali z vrednostmi iz standardnega postopka sfere (Tabela 4). Dobljene vrednosti so minimalno odstopale in to dokazuje pravilnost in natančnost obeh postopkov.

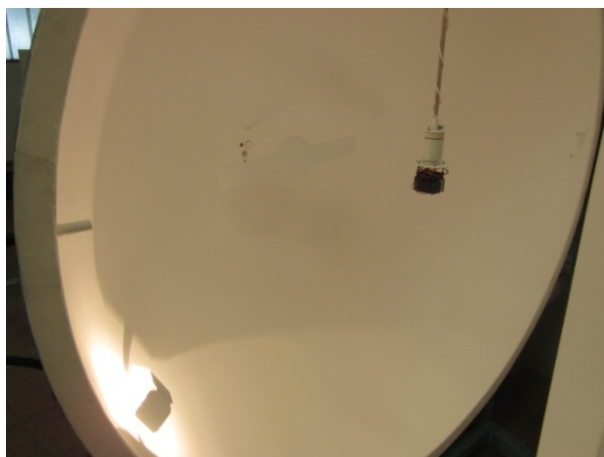
Tabela 4: Primerjava rezultatov meritev z različnima merilnikoma.

	Standardna meritev sfere	Primerjalna meritev s kalibracijsko žarnico in z drugim fotodetektorjem
\varnothing_n nominal		1398,4 lm
E_n		1106 lx
E_x _merjenec 1		1102 lx
E_x _merjenec 2		919 lx
E_x _merjenec 3		1452 lx
\varnothing_x merjenec 1	1394,7 lm	1393,3 lm
\varnothing_x merjenec 2	1164,2 lm	1161,9 lm
\varnothing_x merjenec 3	1837,3 lm	1835,8 lm

6.3.2 Korekcija absorpcije svetlobe

Za vse merjene svetlobne vire, ki so večji od kalibracijskega, je potrebno izvesti meritev s pomožno žarnico. V našem primeru sta to merjenec 2 in 3, vseeno pa smo izvedli to meritev tudi za merjenca 1, da vidimo, če je izmerjen rezultat enak prejšnjim.

Sprva je bilo potrebno na plašč integracijske sfere montirati pomožno žarnico s pripadajočim nosilcem in zaslonko. Ta žarnica je enaka kalibracijski in tako za delovanje potrebuje točno določen napajalni tok, ki se ga zagotovi z DC stabilizatorjem (Slika 30).



Slika 30: Montaža in delovanje pomožne žarnice pri večjem merjencu.

Po postopku, opisanem v poglavju 5.2.1., smo pridobili vrednosti E_n in E_{nn} (te so enake za vse merjence) ter še vrednosti E_h in E_x (za vsak merjenec posebej). Nato smo izračunali celotni svetlobni tok. Vse potrebne meritve za ta postopek smo opravljali po standardnem postopku sfere (dobljene vrednosti so v lm namesto lx); ker je tukaj važno le razmerje odčitkov, so dobljeni rezultati vseeno merodajni (Tabela 5).

Tabela 5: Celotni svetlobni tok merjencev po metodi s pomožno žarnico.

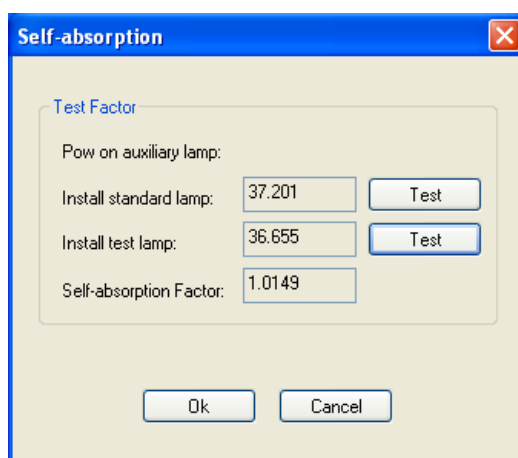
		Merjenec 1	Merjenec 2	Merjenec 3
\varnothing_n nominal	1398,4 lm			
E_n	1398,7 lm			
E_{nn}	1259,3 lm			
E_h		1259,3 lm	1257,6 lm	1235,7 lm
E_x		1394,7 lm	1162,4 lm	1837,3 lm
Izračunan svetlobni tok		1394,4 lm	1165,5 lm	1872 lm

Glede na rezultate, dobljene s standardno meritvijo sfere, vidimo, da je pri merjencu 1 odstopanje zanemarljivo, merjenec 2 je imel samo svetlečo površino nekoliko večjo od kalibracijske žarnice in je zato tukaj odstopanje majhno (0,1 %); merjenec 3

pa je imel v ozadju hladilno telo, ki absorbira precej svetlobe, in je zato odstopanje večje (2 %).

Izpeljan postopek je bil dolgotrajen, saj se je za vse meritve izvedlo kombinacijo meritve fotodetektorja in radiospektrometra. Ker je za vrednotenje absorpcije svetlobe dovolj le odčitek fotodetektorja, smo od proizvajalca sfere zahtevali nadgradnjo programske opreme, ki bi meritev pohitrila. Nadgradnja je potekala po naslednjih korakih:

- Vrednost E_n je v programu že zabeležena od postopka kalibracije.
- Odčitke osvetljenosti za vrednosti E_{hn} in E_h opravimo v posebej prirejenem delu programa (Slika 31).
- Glede na te vrednosti program izračuna absorpcijski faktor.
- Opravimo standardno meritev merjenca in dobimo spektralno porazdelitev svetlobe ter odčitek E_x . Ta se popravi z absorpcijskim faktorjem in tako dobimo realni svetlobni tok merjenca.



Slika 31: Nadgradnja programske opreme za izračun absorpcijskega faktorja.

V Tabeli 6 so prikazani preračunani absorpcijski faktorji. Če jih pomnožimo z rezultati standardne meritve iz Tabele 4, vidimo, da so dobljeni rezultati enaki izračunanim svetlobnim tokom po metodi pomožne žarnice iz Tabele 5.

Tabela 6: Celotni svetlobni tok merjenecv po metodi absorpcijskega faktorja.

	Merjenec 1	Merjenec 2	Merjenec 3
Absorpcijski faktor	1	1,0008	1,0184
Izračunan svetlobni tok	1394,7 lm	1165,2 lm	1871,2 lm

6.3.3 Korekcija različne spektralne porazdelitve

Postopek korekcije različne spektralne porazdelitve svetlobe med kalibracijskim in merjenim virom ni potreben. Tako pri standardni meritvi kot pri meritvi s pomožno žarnico se za končni odčitek merjenca (E_x) opravi kombinacijo meritve fotodetektorja in radiospektrometra. Na ta način se odčitek korigira in tako izniči napako, ki bi nastala zaradi različne spektralne porazdelitve.

6.3.4 Korekcija različne prostorske porazdelitve

Ta postopek zahteva zelo majhen, stabilen in usmerjen vir, poleg tega pa je tudi zelo zamuden. Omenili smo že, da so napake zaradi tega odstopanja majhne. V opisani sferi se večinoma izvaja meritve na 'golih' svetlobnih virih (sijalke, žarnice ali LED brez optike). Ti viri so dokaj izotropni, kar pomeni, da imajo precej podobno prostorsko porazdelitev svetlobe kot kalibracijska žarnica. Merjenci, ki bodo imeli pred svetlobnim virom optiko za usmerjanje svetlobe (SSL produkti), bodo zaradi hladilnega telesa montirani v geometriji 2π . To pomeni, da njihov snop svetlobe ne bo seval v dno sfere, kjer je odboj najslabši, ampak v steno in zato bo tudi v teh primerih napaka majhna. Zaradi vseh naštetih ugotovitev smo se odločili, da ta korekcija ni potrebna.

6.3.5 Korekcija absorpcije bližnjega polja

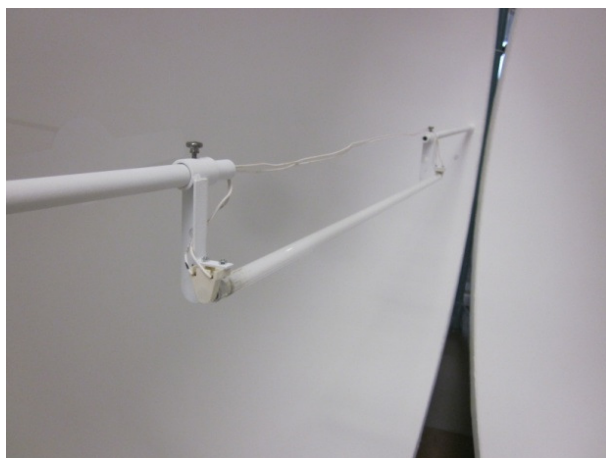
Vse točkaste svetlobne vire sestavljata nosilni element ter svetleča površina. Ta nikoli ne seva svetlobe za okov, kar pomeni, da nosilci okova ne absorbirajo primarnih žarkov. Kot je razvidno na Slikah 27_2, 3, 6 montaža takšnih svetlobnih virov v obravnavani sferi ne predstavlja težav.

Problem predstavljajo cevaste fluorescenčne sijalke T5 in T8, saj imajo nosilni element na obeh koncih cevi. Za meritve teh virov je prva težava sfere ta, da do sedaj ni bilo mogoče odstraniti okova za točkaste vire, ta pa je delal nepotrebne sence (Slika 27_5). To se je dodelalo in okov je sedaj snemljiv. Enako težavo so predstavljali stranski okovi za cevaste sijalke. Na Sliki 32 je razvidno stanje pred dodelavo in po njej.



Slika 32: Odstranitev stranskih okovov cevastih sijalk za meritve točkastih virov.

Druga težava pa je, da smo cevaste sijalke napajali z navadnimi predstikalnimi napravami (npr. elektronske dušilke), ki imajo zaradi padca napetosti na električnih vodnikih omejeno dolžino žice na izhodu. Kljub temu da sfera omogoča pritrjevanje iz obeh strani in tako izničenje absorpcije bližnjega polja, smo zaradi omejene dolžine žic te speljevali kar mimo sijalk (Slika 33).



Slika 33: Montaža cevastе sijalke T5 v sferi pred nadgradnjo.

Žice so bile drobne in bele, kljub temu pa so absorbirale določen del svetlobe, ki ga ni mogoče korigirati. Nadgradnja temelji na tem, da se bo v bodoče za meritve cevastih sijalk poleg posebne kalibracije opisane v nadaljevanju namestilo na sfero napeljavo z debelejšimi žicami, ki zagotavljajo manjši padec napetosti. Žice bodo zaradi tega lahko daljše in to bo omogočilo vhod v sfero iz obeh strani (Slika 34).



Slika 34: Montaža T5 sijalke v sferi po nadgradnji.

6.3.6 Korekcija temperaturne odvisnosti

V sferi sta montirana dva temperaturna senzorja. Prvi je poleg detektorjev za zaslonko (Slika 27_1). Ta je od plašča oddaljen 15 cm in meri temperaturo ambienta v sferi (v poročilu oznaka: Enviornment TMP). Drugi senzor se nahaja v fotometrični glavi in meri temperaturo le-te (v poročilu oznaka: TMP PMT). Temperatura ambienta v okolici sfere se vzdržuje z dvema hladilno-grelnima klimatskima napravama, po potrebi pa še s prenosnim grelcem. Vsi viri segrevanja ali hlajenja so montirani proč od sfere in niso usmerjeni vanjo. Na ta način temperatura plašča sfere ne niha.

Za večjo sledljivost temperature ambienta okolice sfere smo v bližino (oddaljenost 30 do 50 cm) montirali dve dodatni sondi, ki bosta priklopljeni na natančen prenosni termometer Fluke 54II. Tako bomo lahko še dodatno kontrolirali okoljske pogoje delovanja merjenca (če bo uporabljena geometrija 2π) in merilnih aparatov.

6.3.7 Korekcija vpliva dolžine merjenega svetlobnega vira

Ta korekcija je potrebna le v primerih, ko je svetlobni vir daljši od $2/3$ premera sfere (v obravnavani sferi znaša to 1,33 m). Za izvedbo dodelave smo uporabili kalibracijsko cevasto sijalko YZ36RR T8 36W s fiksnim izsevanim svetlobnim tokom $\Phi_n = 2693,1$ lm in visoko frekvenčno standardno predstikalno napravo YF2401, s katero smo kalibracijsko sijalko napajali na predpisanih parametrih, to je pri frekvenci 25 kHz in toku 397 mA (Slika 35). S to kalibracijsko sijalko smo lahko kalibrirali integracijsko sfero in tako poleg ostalih ovrednotili še napako zaradi prevelikega vpadnega kota žarkov na plašč.



Slika 35: AC stabilizator napetosti, visokofrekvenčna standardna predstikalna naprava in kalibracijske sijalke T8 treh dolžin.

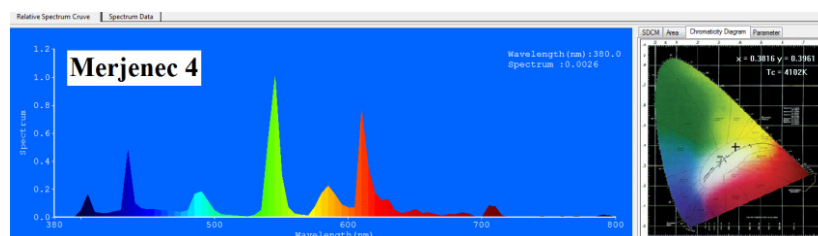
Za merjenca 4 smo izbrali starano sijalko OSRAM FQ 54 W/840 HO CONSTANT dolžine 1,5 m, ki smo jo montirali, kot je prikazano na Sliki 34. Posebnost te sijalke je, da poleg ostalih plinov vsebuje še amalgam, ki ji poveča stabilnost svetlobnega toka (manjši vpliv na kasnejšo primerjavo rezultatov). Sijalko smo napajali z navadno predstikalno napravo OSRAM QT_i 1 x 28/54, to pa smo napajali preko AC stabilizatorja napetosti. Na merjencu 4 smo izvedli meritev s pomožno žarnico v kombinaciji navadne (halogenske) ter posebne (fluo T8) kalibracijske sijalke. Rezultati so prikazani v Tabeli 7.

Tabela 7: Celotni svetlobni tok merjenca 4 po meritvi z uporabo kalibracijske halogenske žarnice in fluorescenčne sijalke.

Merjenec 4		
	kalibracijska žarnica halogen	kalibracijska žarnica fluo T8
Izmerjen svetlobni tok	4891	4920,6
Absorpcijski faktor	1,0058	0,9995
Izračunan svetlobni tok	4919,4 lm	4918,1 lm

Pri uporabi cevaste kalibracijske sijalke fluo T8 je absorpcija svetlobe merjenega vira glede na to sijalko zanemarljiva. Zaradi tega se lahko ob uporabi kalibracijskih cevastih sijalk, ki so podobne dolžine kot merjenec, izključi uporabo pomožne žarnice.

Pri uporabi navadne kalibracijske žarnice je absorpcija svetlobe merjenca nekoliko večja. To se korigira z uporabo pomožne žarnice. Napaka, ki še ostane (večji izmerjen svetlobni tok), pa se pojavi zaradi različnega vpadnega kota žarkov na plašč. Spektralna porazdelitev svetlobe merjenca je pri obeh izvedbah meritve enaka (Slika 36). Ta je pričakovano podobna porazdelitvi merjenca 2, saj gre tudi tukaj za fluorescenčno sijalko, le da je namesto spiralne oblike cevasta. Celotno poročilo meritve je v Prilogi 5.



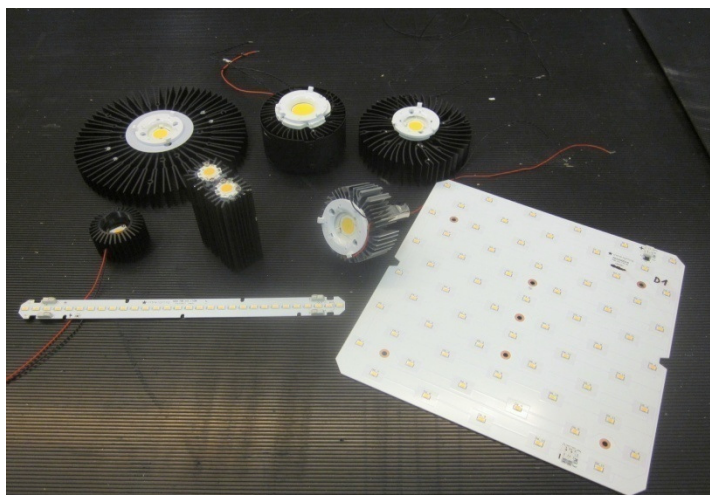
Slika 36: Izmerjena spektralna porazdelitev merjenca 4.

Vsaka izvedba meritve z fluo T8 kalibracijsko sijalko zahteva predelavo sfere in izvedbo nove kalibracije. To je časovno zamudno in glede na to, da je razlika le 0,025 % (ta se pojavi že zaradi nihanja izsevanega svetlobnega toka merjenca), smo

se odločili, da bomo za meritve cevastih sijalk uporabljali postopek z navadno kalibracijsko ter pomožno žarnico.

6.3.8 Dodelava sfere za uporabo geometrije 2π

Pri obravnavani sferi smo se odločili za izdelavo nosilca geometrije 2π , ki uporablja prvi tip montaže merjenca – razmik med merjencem in plaščem se zapolni z belo ploščo. Cilj je, da se bo lahko v sferi poleg svetlobnih virov merilo tudi karakteristike celotnih LED svetilk (SSL produktov) ter 'motorje' takšnih svetilk – to so sklopi: LED ali COB LED, pritrdilnega telesa (holderji) in hladilnega telesa (aktivnega ali pasivnega hladilnika) (Slika 37).



Slika 37: Motorji različnih LED svetilk.

Izvedba

Kot je razvidno na Sliki 27_4 ima sfera že pripravljeno odprtino, na kateri je mogoče standardni pokrov zamenjati z dodatnim nosilcem. Tega smo izdelali iz pločevine in lasersko izrezanega jekla. Sestavne dele smo nato zvarili skupaj, konstrukcijo ojačili ter ji pritrdili navojna vretena in nosilce, s katerimi se bo ustrezno pritrdilo zaslonke in merjence (Slika 38).



Slika 38: Potek izdelave dodatnega nosilca za geometrijo 2π .

Notranjost nosilca smo pobarvali z belo prašno barvo, ki ima podobne karakteristike kot barva plašča sfere (odbojnost cca 80 %). Zunanja stran za meritve ni pomembna in smo jo pobarvali z navadno sintetično barvo (Slika 39).



Slika 39: Nosilec geometrije 2π z notranje in zunanje strani sfere.

Osnovna odprtina ima premer 200 mm, kar omogoča montažo Intrine največje usmerjene svetilke (LED downlight). Z dodatnimi nastavki pa se jo lahko zmanjša in tako montira tudi manjše merjence (Slika 40).



Slika 40: Montaža večje svetilke (LED downlight) in manjšega LED motorja (merjenec 3) na nosilec 2π .

Za primerjavo rezultatov te metode z navadno meritvijo geometrije 4π smo na nosilec montirali edini usmerjeni vir, to je merjenec 3. Za merodajne rezultate je bilo potrebno obravnavani konfiguraciji sfere poiskati pravilno kombinacijo kalibracije in postopka meritve. Po več poskusih in vrednotenjih smo ugotovili, kaj vpliva na natančnost meritev in določili pravi postopek, ki poteka po naslednjih korakih:

- montaža nosilca na sfero in zaprtje odprtine,
- izvedba kalibracije sfere. Na ta način se izniči napako zaradi različne odbojnosti notranjega dela nosilca glede na plašč sfere,
- montaža merjenca in izvedba meritve s pomožno žarnico za določitev absorpcijskega faktorja,
- meritev merjenca,
- ovrednotenje rezultata z absorpcijskim faktorjem.

Tudi pri meritvah geometrije 2π je potrebno rezultat vrednotiti z absorpcijskim faktorjem. Prvi vzrok je, da se kalibracijo opravlja v 4π geometriji in zato uporablja nosilec okova, ki ga pri montaži 2π ni. Zato je absorpcija svetlobe med kalibracijo večja. Drugi vzrok pa je ta, da se glede na velikost merjenca zmanjša površina plašča in s tem odbojnost.

V Tabeli 8 so rezultati meritve merjenca 3. Razvidno je, da po vrednotenju rezultata s pomožno žarnico dobimo enak svetlobni tok kot pri meritvi 4π s pomožno žarnico, ki je prikazana v Tabelah 5 in 6. Ostale izmerjene in preračunane vrednosti (temperatura barve, barvni videz ...) so popolnoma enake meritvi geometrije 4π .

Tabela 8: Celotni svetlobni tok merjenca 3 po metodi geometrije 2π .

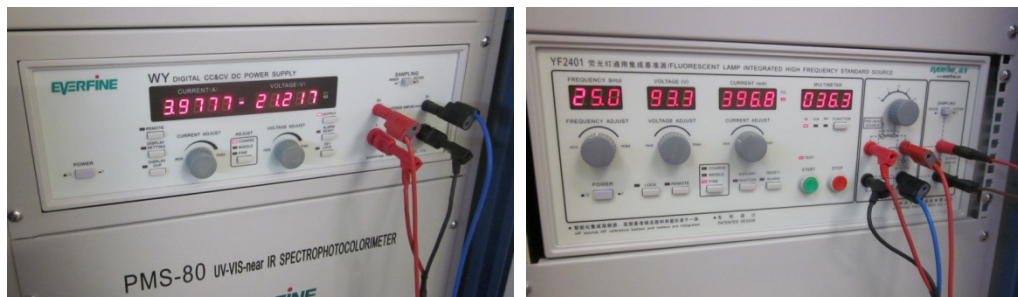
	Merjenec 3
Absorpcijski faktor	0,99054
Izračunan svetlobni tok	1873,8 lm

V nasprotju s pričakovanji se meritev geometrije 2π ni izkazala za hitrejšo od 4π (ostaja potreba po pomožni žarnici). Vsekakor pa je njena prednost v tem, da omogoča meritve večjih 'motorjev' ali celo končnih svetilk, ki jih drugače v sfero ne bi bilo mogoče montirati oz. bi montaža povzročila ogromno absorpcijo svetlobe in segrevanje sfere.

6.3.9 Ostale korekcije in nadgradnje

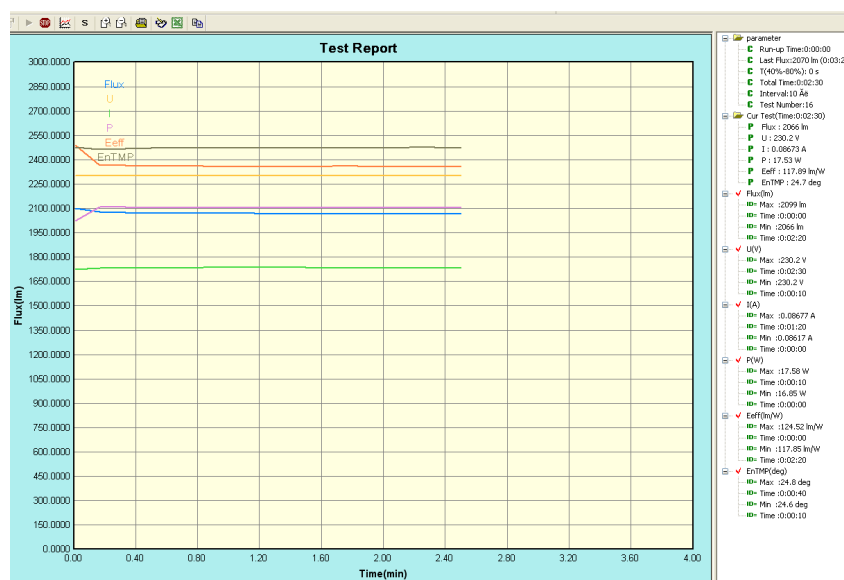
Ostali postopki, ki se izvajajo pred in med meritvami, so bili že prej v skladu z zahtevami iz Tabele 3 in ne potrebujejo dodelav. Napajanje z izmenično oz. enosmerno napetostjo se izvaja s posebnimi namenskimi napravami (stabilizatorji) in je prav tako znotraj predpisanih intervalov. Problem predstavlja padec napetosti na električnih vodnikih. Pri napajanju z AC stabilizatorjem ni težav, saj so navadno napetosti višje in je zaradi tega padec manjši. To pomeni, da je izmerjena napetost na izhodu stabilizatorja enaka tisti na vhodu merjenca. V primeru napajanja z DC stabilizatorjem ali visoko frekvenčno standardno predstikalno napravo so napetosti po navadi nižje in posledično je padec višji. To pomeni, da je izmerjena napetost na izhodu stabilizatorja višja od tiste na vhodu merjenca (okov ali drugega napajalnega elementa). Zaradi tega je potrebno, da imajo stabilizatorji 4-polni priklop, na katerega se poleg napajalnih vodnikov priklopi še dva merilna. Ta merita napetost na okovu. Pri dejanskem preizkusu z DC stabilizatorjem, LED in vodnikom dolžine 3 m in presekom $2 \times 0,75 \text{ mm}^2$ se je izkazalo, da je pri fiksnem napajalnem toku 350 mA razlika v napetostih 0,07 % – to pa lahko pomeni 0,5% odstopanja izsevanega svetlobnega toka.

Na Sliki 41 je prikazan priklop dodatnih merilnih vodnikov na DC stabilizator in visoko frekvenčno standardno predstikalno napravo. Metoda se v angleščini imenuje 'External sampling'.



Slika 41: 4-polni priklop za metodo 'External sampling'.

Za lažje sledenje obnašanja merjenca med stabilizacijo smo v sklopu nadgradnje programske opreme od proizvajalca sfere zahtevali še nadgradnjo za kontrolo stabilizacije merjenca (wait steady mode). Tako je mogoče nadzirati izsevan svetlobni tok in električne parametre merjenca v nastavljenih časovnih intervalih (Slika 42). Na ta način se lahko nadzira stabilizacijske čase, obenem pa je mogoče izmerjene podatke tudi izvoziti in tako zabeležiti stabilizacijski proces merjenca pred posamezno meritvijo.



Slika 42: Nadgradnja programske opreme za nadzor stabilizacije merjenca.

Za interno uporabo podjetja Intra lighting, d. o. o. sem izdelal tudi navodila, kako pripravljati in uporabljati sfero za posamezne tipe meritev na svetlobnih virih. Navodila so v Prilogi 6.

7 PRIMERJAVA MERITEV IN VREDNOTENJE REZULTATOV

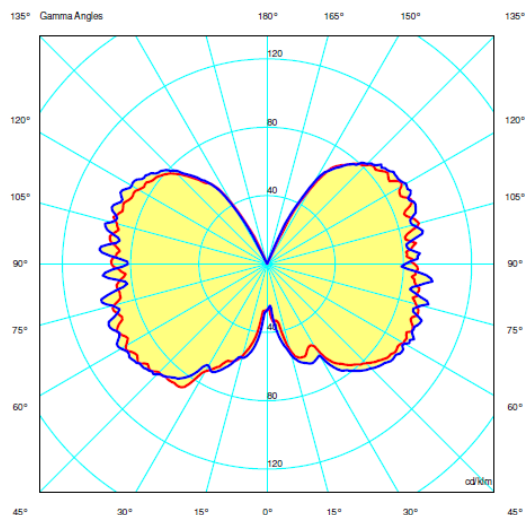
Rezultati meritev integracijske sfere morajo biti merodajni in ponovljivi, saj je le tako mogoče z njimi izvajati primerjave in vrednotenja izdelkov. Poleg samostojnih meritev se sfera uporablja tudi za umerjanje svetlobnih virov. Ti podatki kasneje služijo kot osnova za izračun optičnega izkoristka svetilk merjenih na fotogoniometru.

Za vrednotenje odstopanja meritev obeh naprav smo na merjencih 1, 2 in 3 poleg že prej opisanih meritev v sferi izvedli še meritve na fotogoniometru (Slika 43).



Slika 43: Montaža merjenca 1 na fotogoniometer.

Ker merjenca 1 in 2 sevata svetlobo tudi nad horizontalno osjo, smo morali standardni nosilec fotogoniometra, ki je zaprt z vrhnje strani in omogoča montažo svetilk do dimenzij 1200 x 600 mm, zamenjati z manjšim. Na ta način smo lahko zajeli vse žarke, ki jih vir oddaja v prostor (Slika 44).



Slika 44: Kotna porazdelitev svetilnosti merjenca 1.

Rezultati meritev svetlobnega toka na fotogoniometru in v integracijski sferi so podani v Tabeli 9. Na dnu tabele je delež odstopanja v %.

Tabela 9: Primerjava meritev sfere in fotogoniometra na merjenjih 1, 2 in 3.

	Merjenec 1	Merjenec 2	Merjenec 3
Meritev v sferi 4π s pomožno žarnico	1394,7	1165,2	1871,2
Meritev na fotogoniometru	1381,1	1142,9	1850,7
Delež odstopanja	0,97 %	1,91 %	1,10 %

V tabeli vidimo, da je odstopanje znotraj predpisanih mej. S tem lahko potrdimo izvajanje meritev v kombinaciji integracijske sfere in fotogoniometra. Glede na to, da so izmerjene vrednosti merjenca 1 pri obeh napravah enake nominalnim, lahko smatramo, da so meritve in postopki teh dveh naprav merodajni.

Z meritvami fotogoniometra smo poleg celotnega izsevanega svetlobnega toka merjencev dobili tudi kotno porazdelitev svetilnosti in iz nje druge izračunane parametre, ki služijo predvsem pri načrtovanju razsvetljave s svetilkami. Osnutki poročil meritev fotogoniometra so v Prilogah 7, 8 in 9.

8 ZAKLJUČEK

V podjetju Intra lighting, d. o. o. se je pred nadgradnjo integracijsko sfero lahko uporabljalo samo za meritve majhnih neusmerjenih svetil. Za vse ostale merjence so bile meritve le primerjalnega značaja, saj so bile napake meritev velike. V sklopu nadgradnje, ki je opisana v tem magistrskem delu, smo integracijski sferi dodali nosilce geometrije 2π za usmerjena svetila, popravili nosilce 4π za cevaste sijalke, posodobili električne vodnike in izdelali priklope za natančnejše meritve električnih količin. Poleg fizičnih predelav na sferi smo izvedli tudi nadgradnjo merilnih postopkov, s katerimi se ovrednoti absorpcija in izguba svetlobe v sferi zaradi senc in obrabe materialov. V ta namen smo uvedli postopek primerjalne meritve s kalibracijsko žarnico, vrednotenje absorbirane svetlobe s pomožno žarnico in meritev v kombinaciji s kalibracijsko cevasto sijalko. Da bi bili merilni postopki in konfiguracija sfere pri vsaki meritvi ustrezni, smo izdelali tudi kratka navodila. Vse te nadgradnje omogočajo izvedbo natančnih meritev za lastne potrebe in tudi za zunanje interesente.

Ključ do uspešnega izvajanja radiometričnih, fotometričnih in tudi vseh ostalih meritev so torej natančno poznavanje teoretičnega znanja iz standardov, pravilna implementacija ter vrednotenje testnih meritev. S takšno metodologijo smo izvedli tudi nadgradnjo integracijske sfere, ki je postala pomemben merilni instrument v podjetju. Sedaj lahko z njo razvojni laboratorij omogoči skrajšanje razvojnih časov in večanje kvalitete izdelkov ter tako zagotovi podjetju prednost pred konkurenco.

9 LITERATURA

Vzorec magistrskega dela z navodili (2009). Interno gradivo. Nova Gorica:

Poslovno-tehniška fakulteta, Univerza v Novi Gorici.

Simpson, R. (2003). Lighting control, technology and applications. Oxford: Focal Press

Strnad, J. (1995). Fizika 2. del, elektrika, optika. 5. natis. Ljubljana: Inštitut za matematiko, fiziko in mehaniko.

Bergelj, F. (2000). Osnove meritev. Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko.

Slovensko društvo za razsvetljavo (1998). Svetlobno tehniški slovar, slovar Slovenskih izrazov. Ljubljana: Slovensko društvo za razsvetljavo / SDR.

Bizjak, G. (2002). Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija. Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, laboratorij za razsvetljavo in fotometrijo.

Kobav, M. (2004). Uporaba digitalnega fotoaparata s širokokotnim objektivom v funkciji merilnika porazdelitve svetlosti. Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, laboratorij za razsvetljavo in fotometrijo.

Orgulan, A. (2005). Razsvetljava. Maribor: Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko.

SISTEN60598-1:2009. Svetilke – 1. del: Splošne zahteve in preskusi. Ljubljana: Slovenski inštitut za standardizacijo.

SISTEN 13032-1:2004. Svetloba in razsvetljava – Merjenje in podajanje fotometričnih podatkov svetlobnih virov in svetilk. Ljubljana: Slovenski inštitut za standardizacijo.

CIE 84-1996. The measurement of luminous flux. Dunaj: CIE - International Commission on Illumination.

CIE 121-1996. The photometry and goniophotometry of luminaires. Dunaj: CIE - International Commission on Illumination.

IESNA LM-58. Guide to spectroradiometric measurements. New York: IESNA - Illuminating Engineering Society of North America.

IESNA LM-78-07. Approved method for total luminous flux measurement of lamps using an integrating sphere photometer. New York: IESNA - Illuminating Engineering Society of North America.

IES LM-79-80. Electrical and photometric measurements of solid-state lighting products. New York: IES - Illuminating Engineering Society.

IES LM-80-08. Measuring lumen maintenance of LED light sources. New York: IES - Illuminating Engineering Society.

Everfine ver 4.06(2009). Integrating sphere user's manual. Hangzhou: Everfine photo-e-info co.

Everfine ver 3.0 (2009). PMS-50/80 UV-VIS-near IR spectrophotometer user's manual. Hangzhou: Everfine photo-e-info co.

Interno gradivo podjetja Intra lighting d.o.o. Pridobljeno 22. 3. 2014 s svetovnega spleta: <http://www.intra.si/index.aspx>

Colorimetry. Pridobljeno 24. 3. 2014 s svetovnega spleta: <http://en.wikipedia.org/wiki/Colorimetry>

CIE 1931 color space. Pridobljeno 24. 3. 2014 s svetovnega spleta: http://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space#Tristimulus_values

LMS color space. Pridobljeno 24. 3. 2014 s svetovnega spleta: http://en.wikipedia.org/wiki/LMS_color_space

Delovanje Czerny-Turnerjevega monokromatorja. Pridobljeno 25. 3. 2014 s svetovnega spleta: <http://www.yourepeat.com/watch/?v=1pIjSuK23RM>

PRILOGA 1: NAZIVNI PODATKI INTEGRACIJSKE SFERE PODJETJA INTRA LIGHTING, D. O. O.

Nazivni podatki integracijske sfere:

- premer: 2 m,
- material konstrukcije: hladno vlečena pločevina,
- material plašča: SPECTRON R80 (BaSO_4), $\rho \approx 80\%$, skladen s CIE84,
- možnost montaže merjenca: vertikalno, horizontalno,
- merilno območje: 100 ~ 199.990 lm.

Nazivni podatki radiospektrometra

- Možnosti meritev: spektralna porazdelitev $I_{(\lambda)}$, koordinate kromatičnega diagrama(x, y), temperatura barve (Tc), faktor primerljivosti barve (Ra 1-8 in Ra 1-14), prevladujoča in povprečna valovna dolžina.
- Merilno območje valovne dolžine: 200 ~800 nm.
 - natančnost: 0,2 nm,
 - ponovljivost: 0,1 nm,
 - interval zajemanja podatkov: 0,1, 1, 5 nm.
- Merilno območje temperature barve: 1000 ~ 100.000 K.
 - natančnost:0,1 %.
- Merilno območje faktorja primerljivosti barve: 0 ~ 100.
 - natančnost: 0,3 %,
 - linearnost: 0,3 %.

Nazivni podatki fotoelementa

- Možnosti meritev: osvetljenost, svetlobni tok, svetlobna učinkovitost.
- Merilno območje (z ustrezno sfero): 0,01 ~ 100.000 lm.
 - natančnost: 0,5 %,
 - odzivnost na razpršeno svetlobo: 0,005 %
- Dodatna temperaturna senzorja:
 - meritve ambienta v sferi,
 - meritve delovne temperature fotometrične glave.

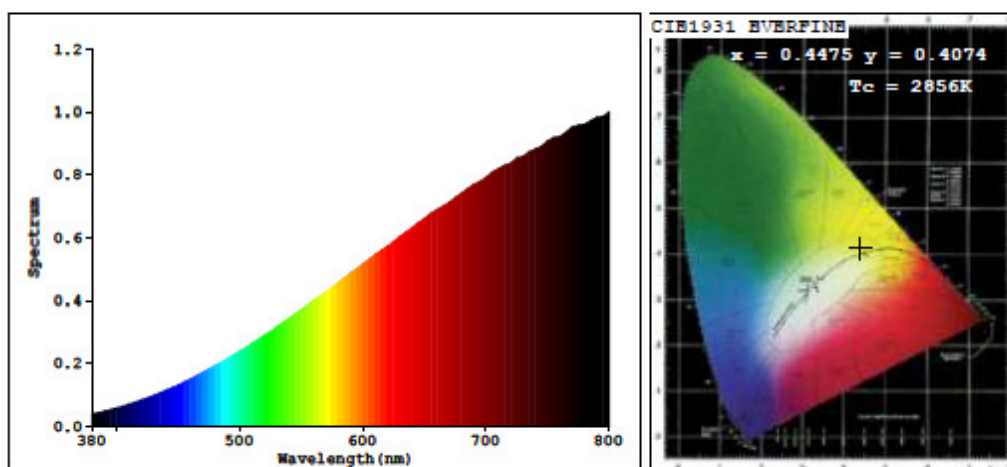
Ostali instrumenti pri sferi:

- stabilizator izmenične (AC) napetosti,
- stabilizator enosmerne (DC) napetosti,
- digitalni merilnik električnih veličin (napajalna napetost, napajalni tok, delovna moč, navidezna moč),
- prenosni dvokanalni termometer,
- računalnik z ustrežno programsko opremo.

PRILOGA 2: POROČILO MERITVE INTEGRACIJSKE SFERE ZA MERJENCA 1



Light Source Test Report



Color Parameters:

Chromaticity Coordinate: $x=0.4475$ ($dx=0.0037$) $y=0.4074$ ($dy=0.0080$)
Chromaticity Coordinate: $u'=0.2560$ $v'=0.5243$ ($duv=-2.44e-05$)
 $T_c=2856K$ Dominant WL: $L_d=583.5nm$ Purity= 56.6% Centroid WL: $682.0nm$
Ratio: $R=27.0\%$ $G=70.1\%$ $B=2.8\%$ Peak WL: $L_p=800.0nm$ HWL: $205.7nm$
Render Index: $R_a=100.0$
 $R_1=100$ $R_2=100$ $R_3=100$ $R_4=100$ $R_5=100$ $R_6=100$ $R_7=100$
 $R_8=100$ $R_9=100$ $R_{10}=100$ $R_{11}=100$ $R_{12}=100$ $R_{13}=100$ $R_{14}=100$ $R_{15}=100$

Photo Parameters:

Flux: $1394.7 lm$ $F_e=9.9861 W$ Efficacy: $15.49 lm/W$
WHITE: ANSI_2700K

Electrical Parameters:

Lamp : $U=22.75V$ $I=3.957A$ $P=90.03W$ $PF=1.000$

Instrument Status:

Scan Range: $380.0nm-800.0nm$ Interval: $5.0nm[0]$ $I_p=28320$ ($G=5, D=53$)
REF: 38398 ($R=4$) $\lambda=0.003\%$ PMT: 26.1 centigrade [25.3]

napajanje: DC napajalec

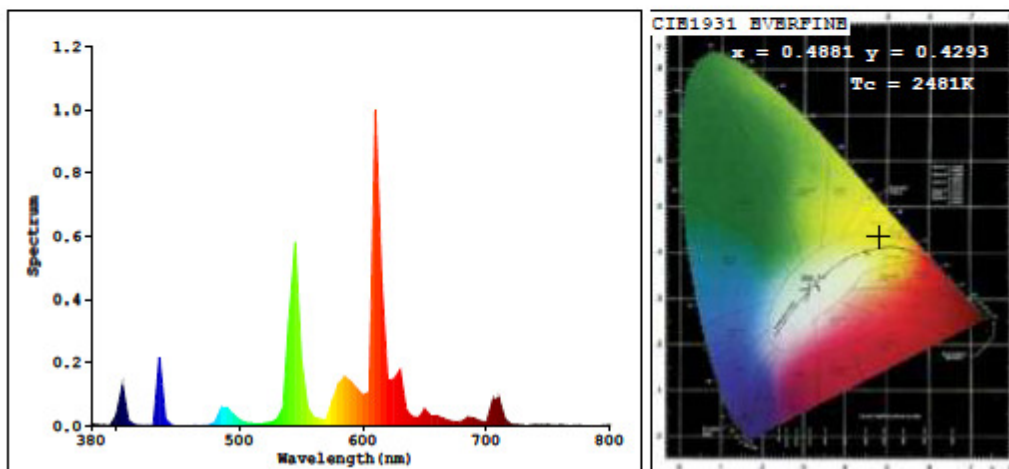
Product Type: merjenec 1
Number: 1
Temperature: $25.0 deg$
Test Operator: IntraLighting
Software: V2.00.121

Manufacturer: INTRA LIGHTING
Test Department: INTRA LIGHTING
Humidity: 65.0%
Test Date: 2014-04-10 19:49:09
Instrument: PMS-80_V1 (SN:1012028)

PRILOGA 3: POROČILO MERITVE INTEGRACIJSKE SFERE ZA MERJENCA 2



Light Source Test Report



Color Parameters:

Chromaticity Coordinate: $x=0.4881$ ($dx=0.0037$) $y=0.4293$ ($dy=0.0080$)
 Chromaticity Coordinate: $u'=0.2721$ $v'=0.5385$ ($duv=4.80e-03$)
Tc=2481K Dominant WL:Ld=584.0nm Purity=75.4% Centroid WL:600.0nm
Ratio:R=35.1% G=63.6% B=1.3% Peak WL:Lp=610.0nm HWL:7.4nm
 Render Index:Ra=80.8
 R1 =97 R2 =94 R3 =56 R4 =90 R5 =86 R6 =84 R7 =86
 R8 =54 R9 =-28 R10=52 R11=82 R12=41 R13=97 R14=69 R15=85

Photo Parameters:

Flux: 1164.2 lm Fe: 3.1911 W Efficacy:60.95 lm/W
 WHITE:OUT

Electrical Parameters:

Luminaire: U=230.0V I=0.1330A P=19.10W PF=0.6230

Instrument Status:

Scan Range:380.0nm-800.0nm Interval:5.0nm[0] Ip=30844 (G=4,D=53)
 REF=31944 (R=4) %=-0.022% PMT: 26.0 centigrade [25.3]

napajanje: AC napajalec

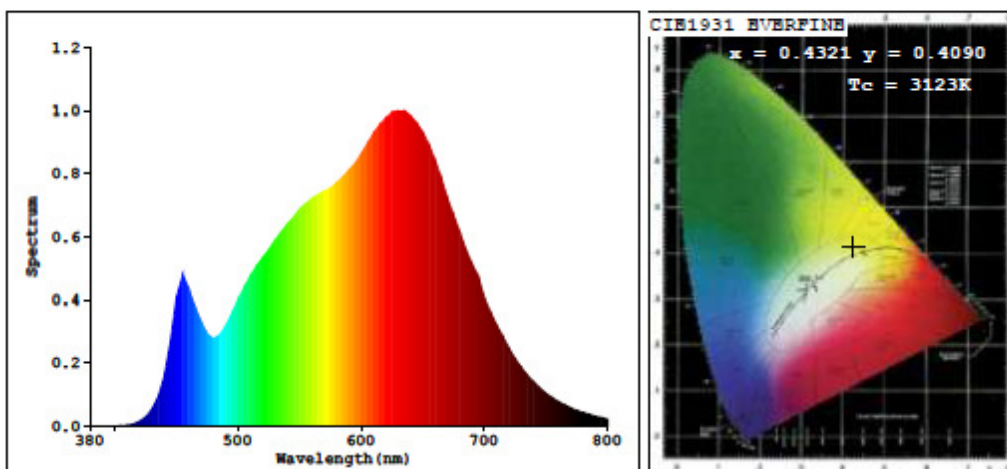
Product Type:merjenec 2
 Number:2
 Temperature:25.0 deg
 Test Operator:Intralighting
 Software:V2.00.121

Manufacturer:INTRA LIGHTING
 Test Department:INTRA LIGHTING
 Humidity:65.0%
 Test Date:2014-04-10 20:22:15
 Instrument:PMS-80_V1 (SN:1012028)

PRILOGA 4: POROČILO MERITVE INTEGRACIJSKE SFERE ZA MERJENCA 3



Light Source Test Report



Color Parameters:

Chromaticity Coordinate: $x=0.4321$ ($dx=0.0037$) $y=0.4090$ ($dy=0.0080$)
Chromaticity Coordinate: $u'=0.2454$ $v'=0.5226$ ($duv=2.67e-03$)
 $T_c=3123K$ Dominant WL: $L_d=591.4nm$ Purity= 52.5% Centroid WL: $604.0nm$
Ratio: $R=25.1\%$ $G=72.1\%$ $B=2.8\%$ Peak WL: $L_p=635.0nm$ HWL: $178.0nm$
Render Index: $R_a=95.4$
 $R1 =96$ $R2 =97$ $R3 =96$ $R4 =95$ $R5 =94$ $R6 =96$ $R7 =97$
 $R8 =92$ $R9 =79$ $R10=91$ $R11=96$ $R12=78$ $R13=96$ $R14=97$ $R15=94$

Photo Parameters:

Flux: $1837.3 lm$ $F_e: 6.6356 W$ Efficacy: $81.01 lm/W$
WHITE: ANSI_3000K

Electrical Parameters:

Luminaire: $U=230.0V$ $I=0.1080A$ $P=22.66W$ $PF=0.9090$

Instrument Status:

Scan Range: $380.0nm-800.0nm$ Interval: $5.0nm[0]$ $I_p=41834 (G=5, D=53)$
REF: $50288 (R=4)$ $\lambda=-0.008\%$ PMT: 25.9 centigrade [25.8]

napajanje: DC driver

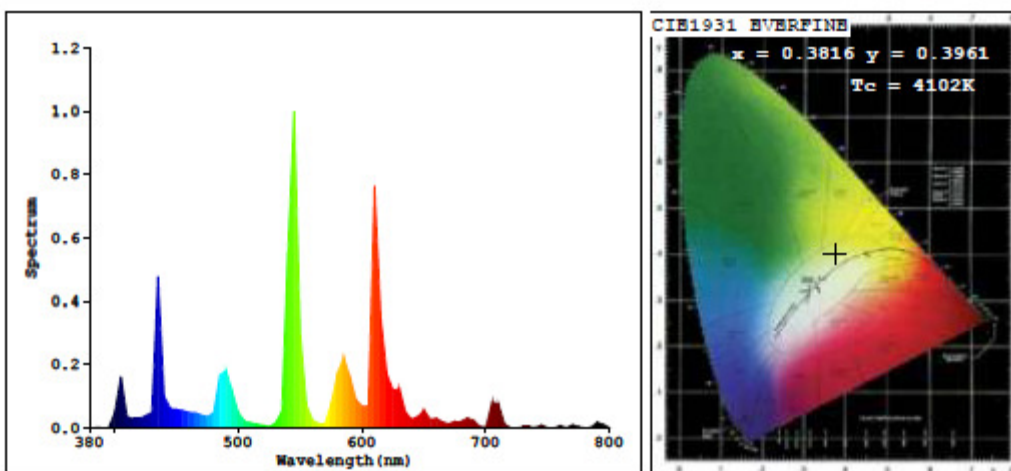
Product Type: merjenec 3
Number: 3
Temperature: $25.0 deg$
Test Operator: IntraLighting
Software: V2.00.121

Manufacturer: INTRA LIGHTING
Test Department: INTRA LIGHTING
Humidity: 65.0%
Test Date: 2014-04-10 20:58:57
Instrument: PMS-80_V1 (SN:1012028)

PRILOGA 5: POROČILO MERITVE INTEGRACIJSKE SFERE ZA MERJENCA 4



Light Source Test Report



Color Parameters:

Chromaticity Coordinate: $x=0.3816$ ($dx=0.0056$) $y=0.3961$ ($dy=0.0221$)
 Chromaticity Coordinate: $u'=0.2184$ $v'=0.5100$ ($duv=8.46e-03$)
Tc=4102K Dominant WL:Ld=574.9nm Purity=33.4% Centroid WL:548.0nm
 Ratio:R=22.2% G=74.0% B=3.8% Peak WL:Lp=545.0nm HWL:9.1nm
 Render Index:Ra=76.0
 R1 =89 R2 =86 R3 =48 R4 =83 R5 =78 R6 =68 R7 =85
 R8 =71 R9 =1 R10=33 R11=65 R12=40 R13=90 R14=66 R15=88

Photo Parameters:

Flux: 4691.0 lm Fe: 14.094 W Efficacy:82.88 lm/W
 WHITE:OUT

Electrical Parameters:

Luminaire: U=230.0V I=0.2590A P=59.01W PF=0.9890

Instrument Status:

Scan Range:380.0nm-800.0nm Interval:5.0nm[0] Ip=31784 (G=3,D=427)
 REF=12989 (R=3) %=-0.893% PMT: 23.8 centigrade [39.1]

napajanje: dušilka OSRAM QTi

Product Type:merjenec 4
 Number:4
 Temperature:25.0 deg
 Test Operator:Intralighting
 Software:V2.00.121

Manufacturer:INTRA LIGHTING
 Test Department:INTRA LIGHTING
 Humidity:65.0%
 Test Date:2014-04-29 10:06:00
 Instrument:PMS-80_V1 (SN:1012028)

PRILOGA 6: NAVODILA ZA UPORABO INTEGRACIJSKE SFERE INTRA LIGHTING, D. O. O.



Intra lighting d.o.o., Miren 137b, SI - 5291 Miren, Slovenija

Miren, 21.5.2014

Navodila za uporabo integracijske sfere Intra lighting d.o.o.

1 Splošno

Princip delovanja integracijske sfere je v tem, da v notranjosti sfere merjenec seva energijo, ki vpada na notranji plašč. Svetlobni žarki se v sferi kontinuirano difuzno odbijajo od notranjega plašča in posledica tega je ta, da je celoten plašč sfere popolnoma enakomerno osvetljen. S senzorjem se meri v točki, katera je enako osvetljena kot vse ostale toče v sferi. Če je senzor merilnik osvetljenosti dobimo celotni svetlobni tok merjenca (lm). Namesto merilnika osvetljenosti se lahko za senzor uporablja radiospektrometer, ki izmeri spektralno porazdelitev svetlobe. Iz te se nato izračuna osvetljenost v točki, poleg tega pa lahko iz spektra razberemo tudi ostale karakteristike svetlobe (CCT, CRI).

Glede na to, kje je montiran svetlobni vir ločimo 2 tipa geometrije sfere:

4π

Svetlobni vir je montiran v centru sfere. Ta geometrija je primerna za usmerjene svetlobne vire in za tiste, ki sevajo v vse strani. Slaba stran je ta, da velikost vira vpliva na meritev saj absorbira določen del svetlobnih žarkov (sence v sferi). S takšno konfiguracijo lahko merimo vire, ki so manjši od 2% celotne površine sfere ali dolgi manj kot 2/3 premera sfere.

2π

Svetlobni vir je montiran na stran sfere, poravnan z notranjim plaščem (Slika 15). Prednost te geometrije je v tem, da kljub velikemu merjencu ni absorpcije svetlobe v sferi, kar pomeni izničenje napake. Slaba stran pa je ta, da je meritev primerna le za usmerjene vire. Premer odprtine pri takšni konfiguraciji mora biti manjši od 1/3 premera sfere.

Meritve v integracijski sferi prikažejo 2-3% višji svetlobni tok kot fotogoniometer. Glede na vrednotenja so rezultati sfere bolj natančni.

Razmnoževanje dokumenta, razen v celoti, ni dovoljeno / This report shall not be reproduced except in full

2 Osnovna meritev 4π

Za opravljanje meritev svetlobnega toka uporablja opisana sfera standardni postopek, ki je patentiran s strani proizvajalca (patent No. ZL 200510050854.1). Ta postopek je za merjenje velikosti kalibracijske žarnice (svetleča površina cca 4cm^2) natančen in daje enake rezultate kot primerjalna meritev s kalibracijsko žarnico (po CIE 84-1996).

Potek meritve:

- Kalibracija sfere. Sfera ima montiran standardni pokrov. Okov je na višini zaslonke. Montira se kalibracijsko žarnico in zapre sfero. Izvede se "photo calibration":
 - Vnos nominalne vrednosti v program in odčitek ZERO z izključenim virom
 - Vklon vira na predpisane parametre in čakanje da se stabilizira (cca 15min)
 - Odčitek fotodetektorja z vključenim virom
 - Vnos nominalne vrednosti v program in odčitek radiospektrometra

S tem postopkom program normira odčitek senzorja na izsevan svetlobni tok kalibracijske žarnice ter tako ovrednoti odbojnost plašča in absorpcijo elementov sfere. Kalibracije ni potrebno opraviti pred vsako meritvijo saj se v krajših časovnih intervalih lastnosti plašča in drugih elementov ne spreminjajo.

- Montaža merjenca in izvedba meritve svetlobnega toka in spektralne porazdelitve (samodejna meritev s fotodetektorjem in radiospektrometrom).

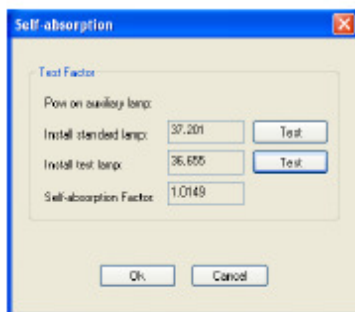
Vedno se izvedeta obe meritvi zaporedoma. Na ta način se odčitek fotodetektorja, ki je že pomnožen s kalibracijskim faktorjem korigira še z meritvijo radiospektrometra. Tako se odčitek dodatno korigira glede na svetlobno funkcijo in izniči napako zaradi različne spektralne porazdelitve med viri.

3 Meritev s pomožno žarnico 4π

Za vse merjene svetlobne vire, ki so večji od kalibracijskega je potrebno izvesti meritev s pomožno žarnico. Tako se ovrednoti žarke, ki jih absorbira merjeni svetlobni vir v sferi.

Potek meritve:

- Izvedba osnovne meritve 4π
- Izklop merjenca in vklop pomožne žarnice na predpisane parametre
- Vklop okna za izračun absorpcijskega faktorja



Ko se pomožna žarnica stabilizira (cca 15 min)

- Montiran merjenec: Test "install standard lamp"
- Montirana kalibracijska žarnica: Test "install test lamp"

Dobimo absorpcijski faktor. V že opravljeni meritvi se sv. tok ne pomnoži s tem faktorjem. Pomnoži se v vseh naslednjih meritvah. Ker obstaja nevarnost, da bi ostal vnesen napačen faktor in s tem popačen rezultat je pravilo, da se faktor zabeleži v beležnico in shrani v mapo meritve. V programu sfere naj bo faktor vedno nastavljen na 1!!!

Izmerjeni sv. tok pomnožimo z absorpcijskim faktorjem (ker z njim nadomestimo absorbirane žarke je vrednost nad 1). Ostali parametri ostanejo nespremenjeni.

4 Meritev 2π

Na sfero montiramo nastavek 2π



Potek meritve:

- Luknjo zapremo z rondelco in opravimo kalibracijo 4π kot v točki 2 (na ta način se kalibrira različna odbojnost plašča).
- Dvignemo do vrha okov 4π . Na nastavek montiramo merjenec (celotno svetilko ali LED motor) ter izvedemo standardno meritev.
- Izvedemo meritev s pomožno žarnico:
 - Vključimo okna za izračun absorpcijskega faktorja
 - Ko se pomožna žarnica stabilizira (cca 15 min)
 - Montiran merjenec: Test "install test lamp"
 - Merjenec umaknemo in luknjo zapremo z rondelco
 - Montirana kalibracijska žarnica: Test "install standard lamp"
 - Dobimo absorpcijski faktor.
V tem primeru je absorpcijski faktor pod 1 saj med meritvijo merjenca v sferi ni bilo nosilca, ki je bil med kalibracijo.
 - Izmerjen sv. tok pomnožimo z absorpcijskim faktorjem.

5 Meritev linearnih sijalk

Meritev je mogoče izvesti s kalibracijo sfere s kalibracijskimi T8 sijalkami, katere se napaja z " YF2401 standard ballast" napravo. V tem primeru meritev s pomožno žarnico ni potrebna. Vendar ta meritev je zamudna in manj natančna zaradi nihanja sv. toka.

Zato se linearne sijalke meri po metodi s pomožno žarnico 4π iz poglavja 3. Montira se jih horizontalno v sfero, napaja pa s standardno dušilko (kabli morajo biti čim krajši).

PRILOGA 7: POROČILO MERITVE FOTOGONIOMETRA ZA MERJENCA

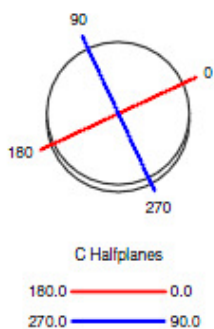
1



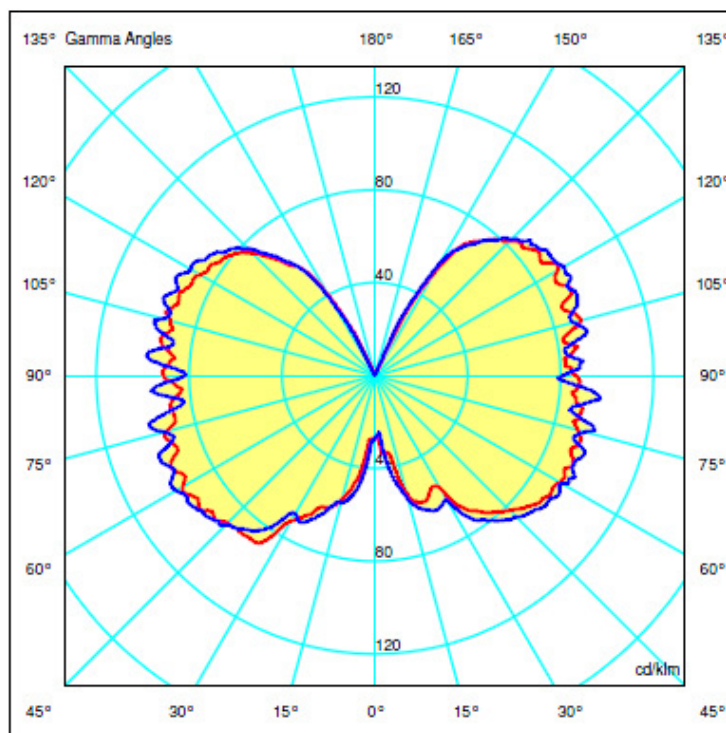
Luminaire		Measurem.		Lamp	
Code	01	Code	ILAB2014/01	Code	kalibracijska žarnica sfere
Name	Merjenec 1	Name	Merjenec 1	Number	1
Line	Eulumdat	Date	11-04-2014	Position	
Efficiency	100.00%	Coordinate system	CG	Total Flux	1381.10 lm
Maximum value	106.30 cd/kim	Position	C-240.00 G-66.00	Asymmetrical	
Round Luminaire	Diam.	20 mm	Height	80 mm	
Round Luminous Area	Diam.	20 mm	Height	0 mm	
Horizontal Luminous Area	0.000314 m ²		Emitting area on Plane 180°	0.000000 m ²	
Emitting area on Plane 0°	0.000000 m ²		Emitting area on Plane 270°	0.000000 m ²	
Emitting area on Plane 90°	0.000000 m ²		Glare area at 76°	0.000076 m ²	
Symmetry Type	Asymmetrical		Maximum Gamma Angle	180	
Measurement Distance	0.00		Measurement Flux	1381.10 lm	
Operator	Intralighting		Source voltage		
Temperature	25.00 °C		Source current		
Humidity	60.00 %		Photocell		
Notes					

Luminaire Lamps						
Line	Code	Name	Flux [lm]	Pow. [W]	Qty	
Eulumdat	kalibracijska žarnica sfere	kalibracijska žarnica sfere - 90.00 W	1381.10	90.00	1	
C.I.E.	19 46 74 54 100	D DIN 5040				
F UTE	0.54 J + 0.46 T	B NBN				
		C11				
		BZ 9				

Diam-20mm



ULOR 46.49 %
 DLOR 53.51 %
 RN 46.49 %



PRILOGA 8: POROČILO MERITVE FOTOGONIOMETRA ZA MERJENCA

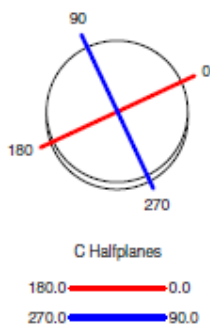
2



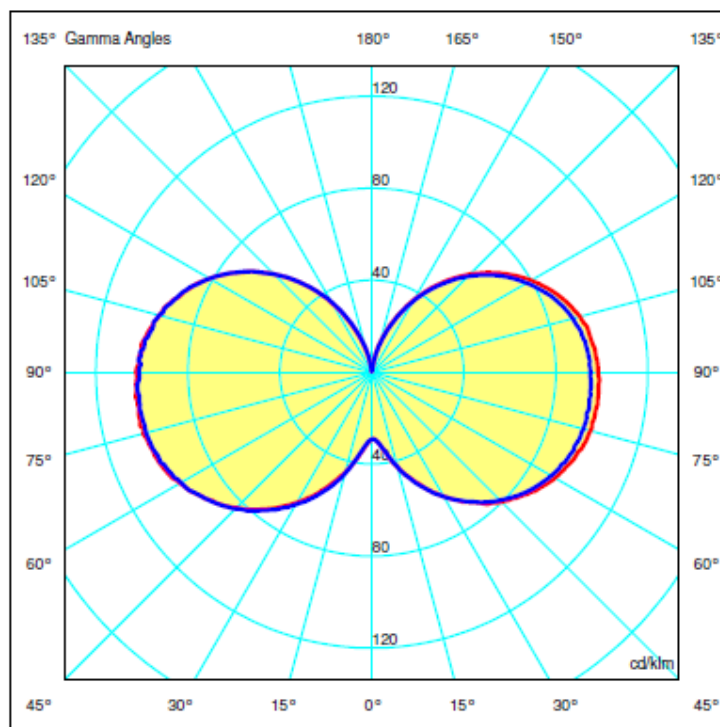
Luminaire		Measurem.		Lamp	
Code	02	Code	ILAB2014/02	Code	compact fluo 18w
Name	Merjenec 2	Name	Merjenec 2	Number	1
Line	Eulumdat	Date	11-04-2014	Position	
Efficiency	100.00%	Coordinate system	CG	Total Flux	1142.90 lm
Maximum value	107.30 cd/km	Position	C-195.00 G-82.00	Asymmetrical	
Round Luminaire		Diam.	40 mm	Height	100 mm
Round Luminous Area		Diam.	40 mm	Height	0 mm
Horizontal Luminous Area				Emitting area on Plane 180°	0.000000 m2
Emitting area on Plane 0°	0.001257 m2			Emitting area on Plane 270°	0.000000 m2
Emitting area on Plane 90°	0.000000 m2			Glare area at 75°	0.000304 m2
Symmetry Type	Asymmetrical			Maximum Gamma Angle	180
Measurement Distance	0.00			Measurement Flux	1142.90 lm
Operator	Intralighting			Source voltage	
Temperature	25.00 °C			Source current	
Humidity	60.00 %			Photocell	
Notes					

Luminaire Lamps						
Line	Code	Name	Flux [lm]	Pow. [W]	Qty	
Eulumdat	compact fluo 18w	compact fluo 18w - 19.10 W	1142.90	19.10	1	
C.I.E.	17 43 71 55 100	D DIN 5040				C11
F UTE	0.55 J + 0.45 T	B NBN				BZ 9

Diam=40mm



ULOR 45.34 %
DLOR 54.66 %
RN 45.34 %



PRILOGA 9: POROČILO MERITVE FOTOGONIOMETRA ZA MERJENCA

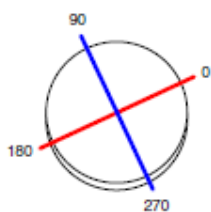
3



Luminaire		Measurem.		Lamp	
Code	03	Code	ILAB2014/03	Code	CXA 2530 500mA
Name	Merjenec 3	Name	Merjenec 3	Number	1
Line	Eulundat	Date	11-04-2014	Position	
Efficiency	100.00%	Coordinate system	CG	Total Flux	1850.70 lm
Maximum value	354.20 cd/klm	Position	C-240.00 G-2.00	Asymmetrical	
Round Luminaire	Diam.	120 mm	Height	140 mm	
Round Luminous Area	Diam.	40 mm	Height	0 mm	
Horizontal Luminous Area	0.001257 m2	Emitting area on Plane 180°	0.000000 m2	Emitting area on Plane 270°	0.000000 m2
Emitting area on Plane 0°	0.000000 m2	Glare area at 76°	0.000304 m2		
Emitting area on Plane 90°	0.000000 m2				
Symmetry Type	Asymmetrical	Maximum Gamma Angle	180		
Measurement Distance	0.00	Measurement Flux	1850.70 lm		
Operator	Intralighting	Source voltage			
Temperature	25.00 °C	Source current			
Humidity	60.00 %	Photocell			
Notes					

Luminaire Lamps						
Line	Code	Name	Flux [lm]	Pow. [W]	Q.ty	
Eulundat	CXA 2530 500mA	CXA 2530 500mA - 22.70 W	1850.70	22.70	1	
C.I.E.	48 80 96 100 100	D DIN 5040				A30
F UTE	1.00 E	B NBN				BZ 4

Diam-120mm



C Halfplanes

180.0 — 0.0
270.0 — 90.0

ULOR 0.34 %
DLOR 99.66 %
RN 0.34 %

