



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko
Laboratorij za razsvetljavo in fatometrijo

Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti

Grega Bizjak

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25,
1000 Ljubljana, Slovenia

1 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*

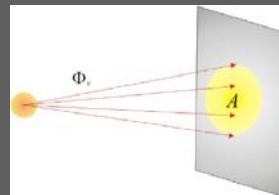


Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko
Laboratorij za razsvetljavo in fatometrijo

Meritev osvetljenosti

Osnovna meritev v notranji in zunanji razsvetljavi s katero potrdimo pravilnost projekta in izvedbe razsvetljave.

Osvetljenost (**illuminance**) je količina svetlobnega toka (moči oz. energije), ki pade na izbrano ploskev.



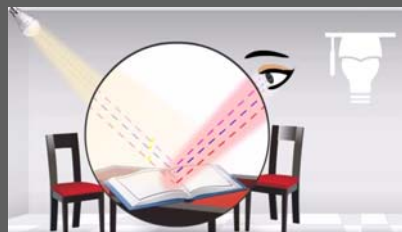
$$E = \frac{\Phi_v}{A}$$

2 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Meritev osvetljenosti

Za vid je sicer pomembna svetlost (**luminance**) in ne osvetljenost. Ampak ker je svetlost bistveno težje izračunati in izmeriti (odvisna je od odsevnosti površine, ki jo opazujemo) standardi in predpisi v večini primerov podajajo osvetljenosti.



3 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Meritev osvetljenosti

Osvetljenost merimo z merilnikom osvetljenosti ali luks-metrom.



4 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Kalibracija merilnika

Če želimo, da bo naša meritev res točna, je potrebno luks-meter ustrezno kalibrirati.



5 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Kalibracija merilnika

Tu pa nastopi problem! V fotometriji se po standardu vsi merilniki kalibrirajo z standardnim virom A (črno sevalo), ki ga v praksi ponazorimo z žarnico.



6 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Kalibracija merilnika

Potem pa merimo vse kaj drugega kot osvetljenost z žarnico.



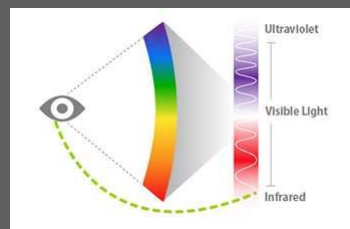
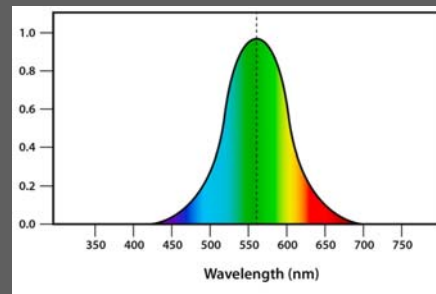
7 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Kalibracija merilnika

In v čem je problem?

Človeške oči ne vidijo vseh valovnih dolžin enako „močno“. Luks-meter naj bi kazal to kar vidimo, torej mora imeti enako spektralno občutljivost.

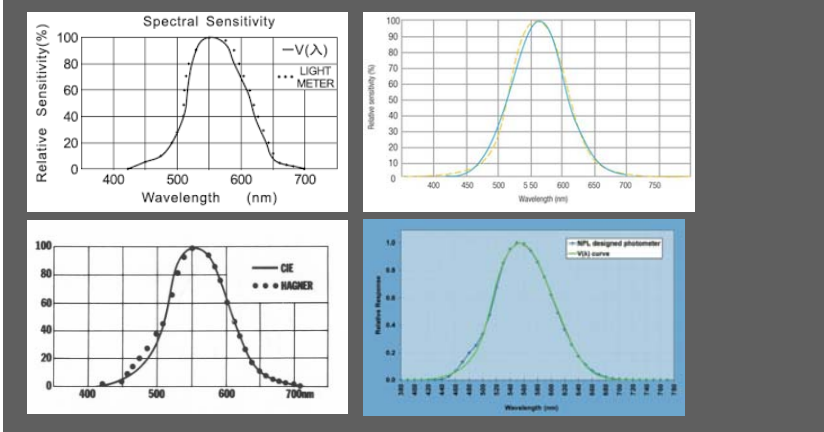


8 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Kalibracija merilnika

Pa je nima!

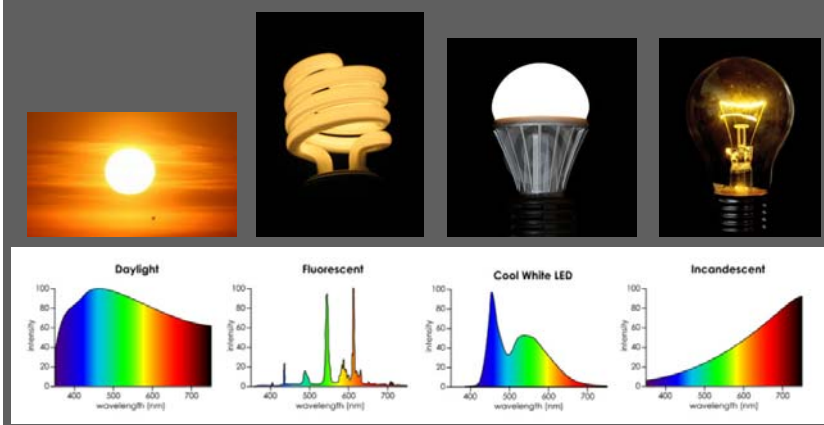


9 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Kalibracija merilnika

Svetlobni viri pa tudi nimajo vsi enakega spektra!



10 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Kalibracija merilnika

Če torej

- z enim luks-metrom merimo različne svetlobne vire (ki vsi zagotavljajo enako osvetljenost)

ali če

- z različnimi luks-metri merimo en svetlobni vir, ki vedno zagotavlja enako osvetljenost,

lahko vseeno v obeh primerih **dobimo različne rezultate**. In to kljub temu, da so vsi luks-metri, ki smo jih uporabili **kalibrirani**.

11 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Spektralna korekcija

Kakovost luks-metra lahko izrazimo s pomočjo splošnega $V(\lambda)$ indeksa neuskklajenosti

$$f'_1 = \frac{\int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} |s_{rel}^*(\lambda) - V(\lambda)| d\lambda}{\int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} V(\lambda) d\lambda}$$

General $V(\lambda)$ mismatch index

12 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Spektralna korekcija

In če poznamo:

- spektralno občutljivost človeškega očesa $V(\lambda)$,
 - spekter standardnega CIE vira A,
 - spektralno občutljivost našega luks-metra in
 - spekter vira, ki je uporabljen za razsvetljavo
- lahko rezultat meritve ustrezno korigiramo s pomočjo korekcijskega faktorja spektralne neuskklajenosti (spectral mismatch correction factor – SMCF) po CIE S023/E:2013 oziroma ISO/CIE 19476:2014.

13 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Spektralna korekcija

Korekcijski faktor spektralne neuskklajenosti

$$F^*(S_Z(\lambda)) = \frac{\int_{360\text{nm}}^{\lambda_{\max}} S_A(\lambda) \cdot s_{rel}(\lambda) d\lambda}{\int_{360\text{nm}}^{\lambda_{\max}} S_A(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \bigg/ \frac{\int_{360\text{nm}}^{\lambda_{\max}} S_Z(\lambda) \cdot s_{rel}(\lambda) d\lambda}{\int_{360\text{nm}}^{\lambda_{\max}} S_Z(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}$$

- $V(\lambda)$ spektralna občutljivost človeškega očesa
 $S_A(\lambda)$ relativna spektralna porazdelitev CIE standardnega vira A
 $S_Z(\lambda)$ relativna spektralna porazdelitev merjenega vira svetlobe Z
 $s_{rel}(\lambda)$ normirana spektralna občutljivosts luks-metra

14 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Spektralna korekcija

Poznati moramo torej:

- $V(\lambda)$ spektralna občutljivost človeškega očesa
- $S_A(\lambda)$ relativna spektralna porazdelitev CIE standardnega vira A
- $S_Z(\lambda)$ relativna spektralna porazdelitev merjenega vira svetlobe Z
- $s_{rel}(\lambda)$ normirana spektralna občutljivost lux-metra

Prva dva podatka dobimo iz ustreznih standardov, druga dva pa sta večji problem. Enega naj bi podal proizvajalec luks-metra, drugega bi morali izmeriti. Ker običajno nimamo ne enega ne drugega, spektralne korekcije ne moremo izvesti.

15 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Spektralna korekcija

Kako veliko je lahko odstopanje med pravo in izmerjeno vrednostjo, če spektralne korekcije ne naredimo?

- Teoretična raziskava s pomočjo podatkov o 10 različnih luks-metrih in 75 različnih svetlobnih virih
- Praktična raziskava s pomočjo 3 različnih luks-metrov (razred B in C) in 6 različnih virov (LED in kompaktne fluorescenčne sijalke).

16 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Teoretična raziskava

Uporabljeni podatki:

- spektralna občutljivost 10 različnih luks-metrov (razredi L, A, B, C), pridobljena od proizvajalcev inštrumentov;
- spektralna porazdelitev svetlobe 75 različnih svetlobnih virov, izmerjena v laboratoriju.

Vseh 75 različnih svetlobnih virov je bilo upoštevanih tudi kot svetlobni viri za izvedbo kalibracije inštrumentov.

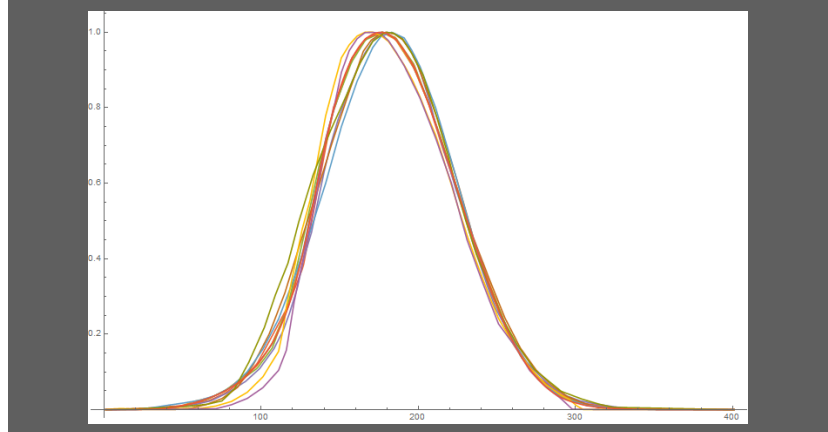
Izračun $10 \times 75 \times 75 = 56.250$ različnih Korekcijskih faktorjev spektralne neuskklajenosti za upoštevane luks-metre, upoštevane kalibracijske svetlobne vire ter upoštevane merjene vire svetlobe.

17 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Teoretična raziskava

Spektralne občutljivosti uporabljenih lux-metrov:



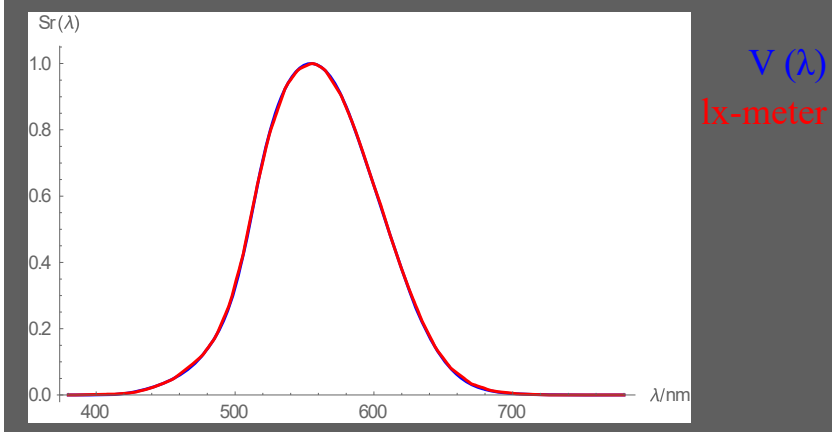
18 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrarstvo
Laboratorij za razsvetljavo in fotometrijo

Teoretična raziskava

Najboljši lux-meter (razred L) v primerjavi z $V(\lambda)$:



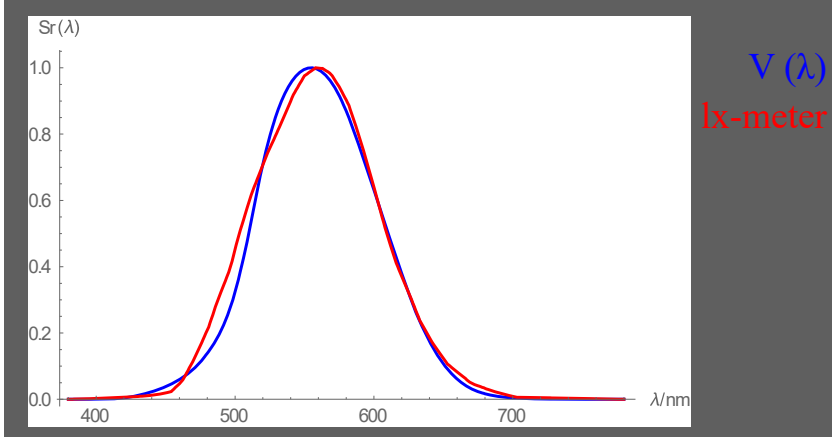
19 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrarstvo
Laboratorij za razsvetljavo in fotometrijo

Teoretična raziskava

Najslabši lux-meter (razred C) v primerjavi z $V(\lambda)$:



20 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Teoretična raziskava

Upoštevani svetlobni viri:

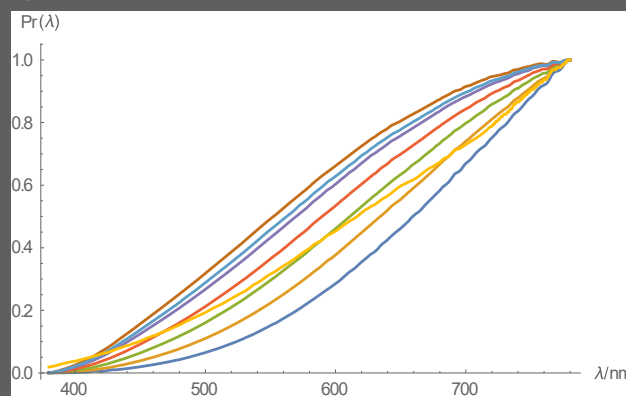
- standardni CIE svetlobni vir A;
- halogenska žarnica pri 8 različnih barvnih temperaturah dobljenih z različno napajalno napetostjo;
- 9 monokromatskih LED z karakterističnimi valovnimi dolžinami porazdeljenimi preko celotnega vidnega dela spektra;
- 9 karakterističnih teoretičnih svetil dobljenih z mešanjem spektrov monokromatskih LED;
- 3 toplo bele in 3 hladno bele LED;
- 19 svetilk z različnimi (kombinacijami) belih LED;
- 12 kompaktnih in linearnih fluorescenčnih sijalk;
- 9 visokotlačnih sijalk ter
- mesec in sonce (D65 svetilo).

21 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Teoretična raziskava

Spektralna porazdelitev svetlobe uporabljenih virov – halogenske žarnice

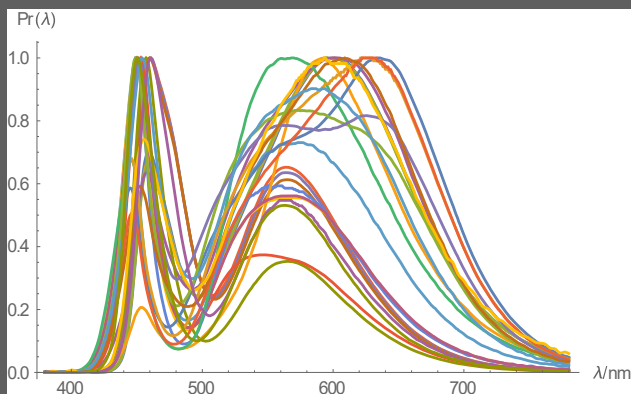


22 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Teoretična raziskava

Spektralna porazdelitev svetlobe uporabljenih virov – bele LED

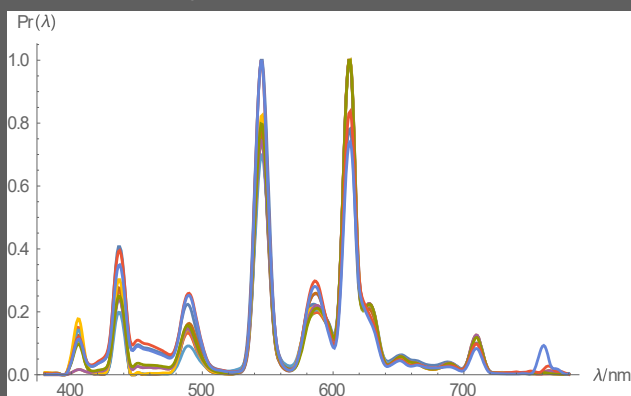


23 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Teoretična raziskava

Spektralna porazdelitev svetlobe uporabljenih virov – fluorescenčne sijalke

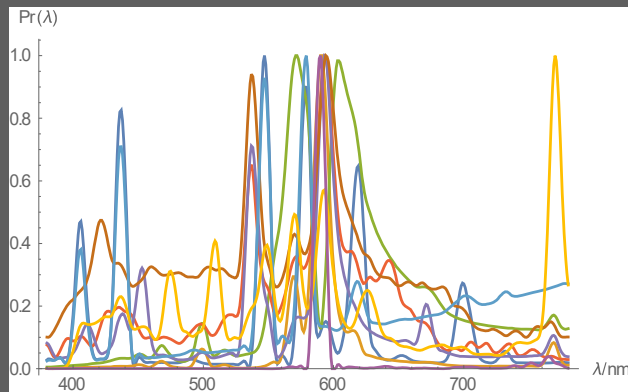


24 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Teoretična raziskava

Spektralna porazdelitev svetlobe uporabljenih virov – visokotlačne sijalke

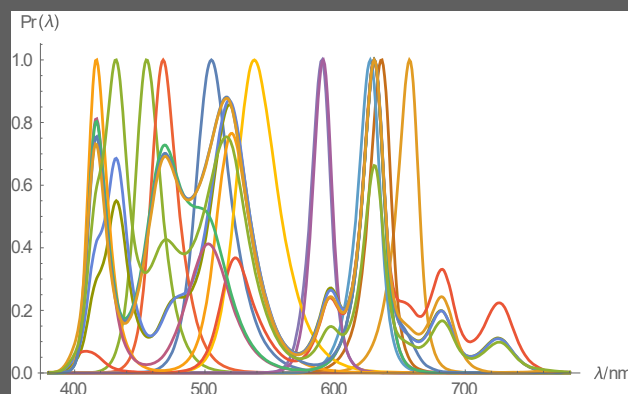


25 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Teoretična raziskava

Spektralna porazdelitev svetlobe uporabljenih virov – monokromatske LED

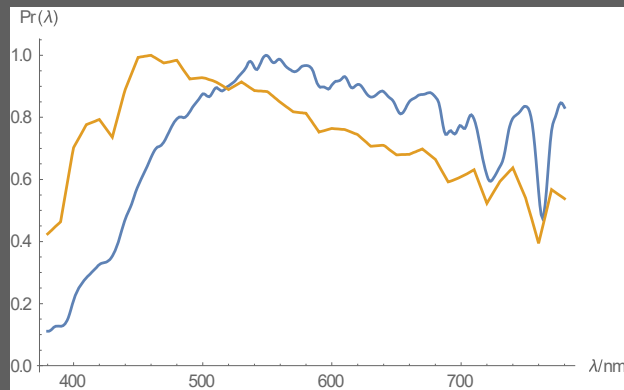


26 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Teoretična raziskava

Spektralna porazdelitev svetlobe uporabljenih virov – naravni svetlobni viri



27 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Izračunani SMCF

Podatki o luks-metrih:

Luks-meter	Št. 1	Št. 2	Št. 3	Št. 4	Št. 5
GMI (%)	0,92	0,96	1,81	1,99	4,73
SMCF _{min}	0,970	0,979	0,967	0,944	0,904
SMCF _{max}	1,007	1,007	1,023	1,047	1,164
SMCF _{avg}	1,000	1,000	1,004	1,005	1,015
Σdif	0,244	0,252	0,443	0,569	1,545
Σdif ²	0,002	0,002	0,005	0,009	0,089

28 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Izračunani SMCF

Podatki o luks-metrih:

Luks-meter	Št. 6	Št. 7	Št. 8	Št. 9	Št. 10
GMI (%)	5,95	6,26	7,55	7,82	8,47
SMCF _{min}	0,867	0,910	0,910	0,939	0,807
SMCF _{max}	1,132	1,091	1,910	2,833	1,063
SMCF _{avg}	1,011	1,003	1,018	1,036	1,011
Σdif	1,507	1,189	2,315	3,718	1,972
Σdif ²	0,067	0,051	1,041	4,282	0,108

29 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Izračunani SMCF

Podatki o luks-metrih:

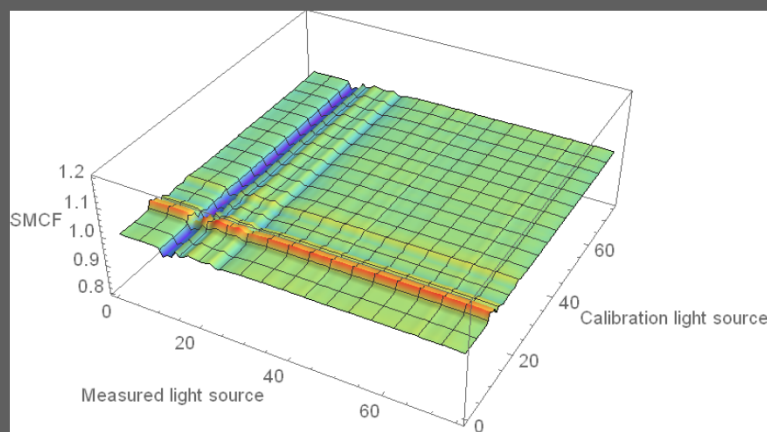
GMI (%)... splošni $V(\lambda)$ indeks neuskklajenosti
SMCF_{min}... najmanjša vrednost korekcijskega faktorja spektralne neuskklajenosti
SMCF_{max}... največja vrednost korekcijskega faktorja spektralne neuskklajenosti
SMCF_{avg}... povprečna vrednost korekcijskega faktorja spektralne neuskklajenosti
Σdif... vsota absolutnih vrednosti razlik med vsemi SMCF in vrednostjo 1
Σdif²... vsota kvadratov absolutnih vrednosti razlik med vsemi SMCF in vrednostjo 1

30 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Izračunani SMCF

Najboljši luks-meter; vsi izračunani SMCF

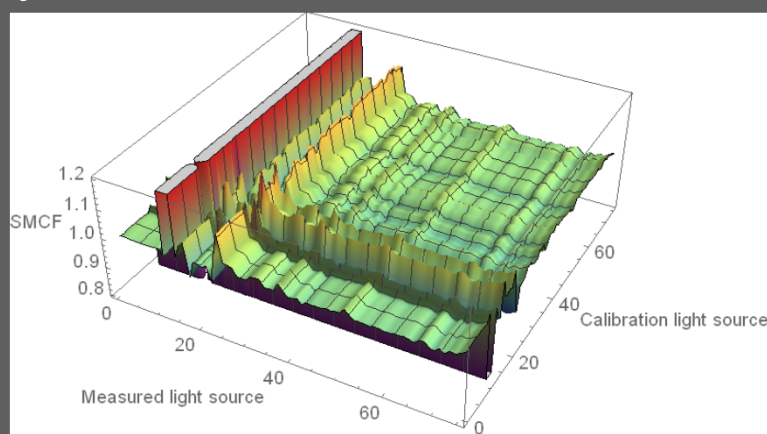


31 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Teoretična raziskava

Najslabši luks-meter; vsi izračunani SMCF



32 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Teoretična raziskava

Nekaj zaključkov teoretične raziskave:

- Izračunani SMCF so lahko precej različni od 1 tako pri dobrih kot slabih lux-metrih. Upoštevanje SMCF, če je možno, je dobra praksa.
- Pri kalibraciji z žarnico so SMCF v večini primerov med 0,95 in 1,05.
- Če za kalibracijo uporabimo vir, ki je bližje merjenemu, lahko SMCF spravimo med 0,96 in 1,02.
- Na splošno bi bil najboljši vir za kalibracije bela LED z barvno temperaturo 4000 K.

33 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Praktična raziskava

Glede na to, da je teoretičen pristop pokazal, da so odstopanja med pravimi in izmerjenimi vrednostmi zelo velika, smo se odločili preizkusiti tudi, kako velika odstopanja dobimo v praktičnih (realnih) primerih:

- 3 različni luks-metri (B-, C- razred);
- kalibracija z navadno žarnico;
- 6 različnih svetlobnih virov: 3 CFL in 3 LED (toplo bela, nevtralna, hladno bela).

34 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Praktična raziskava

Vsi trije luks-metri so bili kalibrirani s pomočjo CIE standardnega svetila A (halogenska žarnica) in luks-metra razreda L.

Rezultati kalibracije so bili uporabljeni za korekcijo rezultatov meritev.

Vse meritve so bile izvedene v laboratorijskem okolju na fotometrični klopi.

3 kompaktne fluorescenčne sijalke s 2760 K, 3860 K in 6080 K in

3 LED sijalke s 2598 K, 3840 K in 6065 K.

35 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Praktična raziskava

Kalibracija luks-metrov

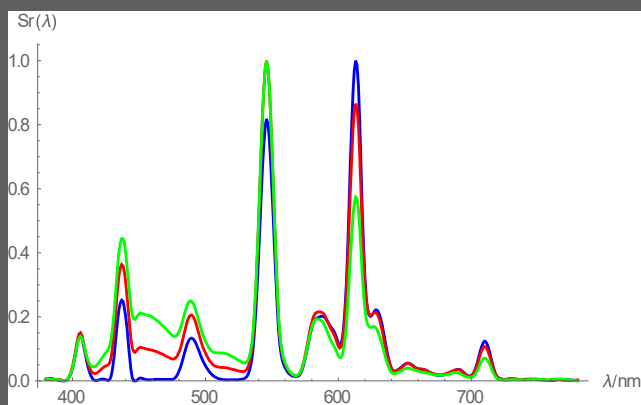
Luks meter	Lx1	Lx2	Lx3
Kalibrirana vrednost (lx)	100,0	100,0	100,0
Odčitek (lx)	98,0	97,0	97,3
Korekcijski faktor (-)	1,020	1,031	1,028

36 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Praktična raziskava

Spektralne porazdelitve svetlobe CFL sijalk

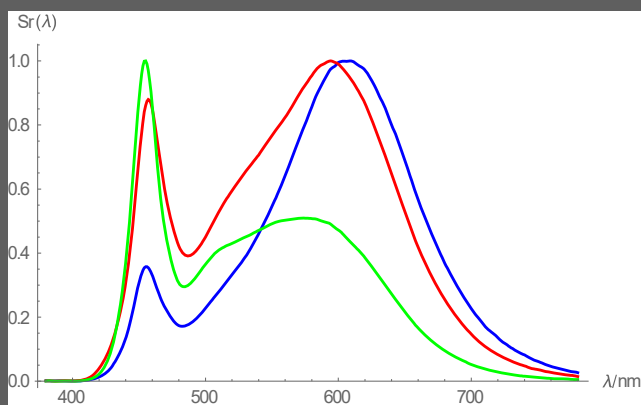


37 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Praktična raziskava

Spektralne porazdelitve svetlobe LED sijalk



38 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Praktična raziskava

Procedura:

- svetlobni vir je bil postavljen na optično klop, vklopljen in stabiliziran;
- s pomočjo referenčnega luks-metra (razred L) smo na optični klopi poiskali razdaljo od vira, kjer je bila osvetljenost točno 100 lx;
- testiran luks-meter smo postavili na optično klop na prej določeno razdaljo in odčitali vrednost, ki jo je kazal.

39 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Praktična raziskava

Procedura:

Na podlagi kazanja luks-metrov smo izračunali ustrezen korekcijski faktor spektralne neuskklajenosti.

$$SMCF = \frac{E_{reference}}{E_{test}}$$

40 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Praktična raziskava

Izračunani SMCF za luks meter Lx1:

Svetlobni vir	CFL	CFL	CFL	LED	LED	LED
CCT (K)	2760	3860	6080	2598	3840	6065
Kal. vrednost (lx)	100,6	100,3	100,2	100,4	100,5	100,1
Odčitek (lx)	94,2	95,2	96,6	93,0	95,2	96,0
Korekcijski f. (-)	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020
Korigiran od. (lx)	96,1	97,1	98,5	94,9	97,1	97,9
SMCF	1,047	1,033	1,017	1,058	1,035	1,022

41 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Praktična raziskava

Izračunani SMCF za luks meter Lx2:

Svetlobni vir	CFL	CFL	CFL	LED	LED	LED
CCT (K)	2760	3860	6080	2598	3840	6065
Kal. vrednost (lx)	100,6	100,3	100,2	100,4	100,5	100,1
Odčitek (lx)	83,0	92,2	104,0	84,1	95,9	104,9
Korekcijski f. (-)	1,031	1,031	1,031	1,031	1,031	1,031
Korigiran od. (lx)	85,6	95,1	107,2	86,7	98,9	108,2
SMCF	1,176	1,055	0,943	1,158	1,016	0,926

42 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Praktična raziskava

Izračunani SMCF za luks meter Lx3:

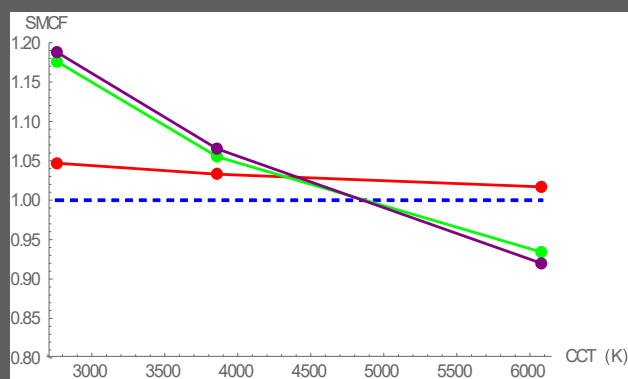
Svetlobni vir	CFL	CFL	CFL	LED	LED	LED
CCT (K)	2760	3860	6080	2598	3840	6065
Kal. vrednost (lx)	100,6	100,3	100,2	100,4	100,5	100,1
Odčitek (lx)	82,4	91,6	105,9	83,3	96,8	100,6
Korekcijski f. (-)	1,028	1,028	1,028	10,28	1,028	1,028
Korigiran od. (lx)	84,7	94,2	108,9	85,6	99,5	103,4
SMCF	1,188	1,065	0,920	1,172	1,010	0,968

43 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Praktična raziskava

Izračunani SMCF za CFL sijalke:

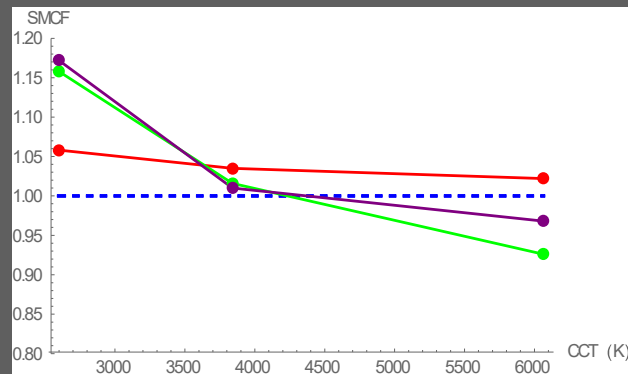


44 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Praktična raziskava

Izračunani SMCF za LED sijalke:



45 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Zaključki

Luks-meter mora vsekakor biti kalibriran.

Če želimo res točne meritve (laboratoriji) je spektralna korekcija nujna.

V praksi gre tudi brez, vendar se je treba zavedati, da so razlike lahko tudi več kot 10 %.

Točnost meritve bo tem manjša, čim bolj bo spekter merjenega vira drugačen od spektra žarnice.

Včasih si lahko pomagamo s posebno kalibracijo s svetlobnim virom, ki ima enak ali zelo podoben spekter kot merjeni vir.

46 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Zaključki

Conclusions:

- za meritve razsvetljave, kjer se uporabljajo fluorescenčne ali LED sijalke le priporočljivo uporabljati luks-meter vsaj razreda B;
- pri uporabi luks-metra razreda C lahko pričakujemo odstopanja med pravo in izmerjeno vrednostjo do 20 %;
- kalibracija luks-metra z drugačnim svetlobnim virom (in ne CIE svetilo A) zmanjša merilno negotovost, še posebej če je spekter kalibracijskega vira blizu spektra merjenega vira – CIE zato razvija svetilo L(ED).

47 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*



Zaključki

Hvala lepa za vašo
pozornost!

48 Bizjak: *Vpliv svetlobnega vira na točnost meritev osvetljenosti*