

Fakulteta za elektrotehniko Univerze v Ljubljani
Laboratorij za razsvetljavo in fotometrijo
Izbirni predmet - 10142

Svetlobna tehnika

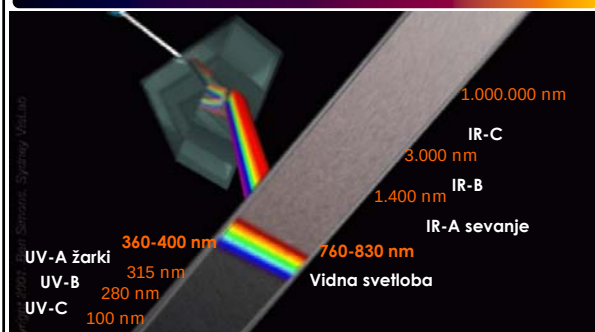
Fotometrija

predavatelj
prof. dr. Grega Bizjak, u.d.i.e.

Mimogrede

Izraz (**fotometer**) je splošen izraz za napravo, ki meri eno ali več svetlobnih veličin. Lahko je to **merilnik** sestavljen iz svetlobno-občutljivega sprejemnika, merilnega pretvornika in kazalnika (merilnik osvetljenosti, merilnik svetlosti). Lahko pa je tudi precej večja **naprava** (naprava za merjenje svetilnosti ali svetlobnega toka).

Področja svetlobe



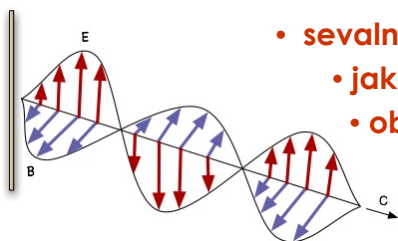
Fizikalno merjenje svetlobe



Veda, ki se v fiziki ukvarja z meritvami elektromagnetnih valovanj, torej tudi svetlobe, se imenuje:
RADIOMETRIJA.

Fizikalno merjenje svetlobe

Radiometrija pozna 4 glavne veličine:



- sevalni tok ali flux,
- jakost sevanja,
- obsevanost in
- sevalnost.

Energija in moč, ki jo oddaja vir



Vir s sevanjem oddaja energijo in moč.
Govorimo o **sevalnem toku ali fluksu (radiant flux)**, ki predstavlja energijo, ki jo vir izseva v enoti časa.

Φ_e **sevalni tok (W)**

Jakost sevanja

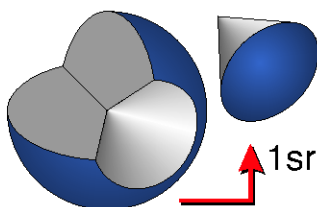


Če vir ne seva energije v vse smeri enakomerno, lahko govorimo o **jakosti sevanja** (radiant intensity). Jakost sevanja je definirana s pomočjo sevalnega toka v enoti prostorskega kota.

I_e jakost sevanja (W/sr)
$$I_e = \frac{\phi_e}{\omega}$$

Prostorski kot

$$\omega = \frac{A}{r^2}$$



Prostorski kot je definiran kot razmerje med površino krogelnega izseka in polmerom krogle.

Enota je steradian (sr).

Podobno je definiran tudi ravninski kot: kot razmerje med krožnim lokom in polmerom kroga. Enota je radian (rd).

Obsevanost

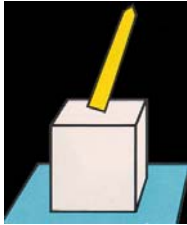


Obsevanost (irradiance) je merilo za količino sevalnega toka, ki pada na neko ploskev oziroma ploskovno gostoto sevalnega toka.

$$E_e = \frac{\phi_e}{A}$$

E_e obsevanost (W/m²)

Sevalnost

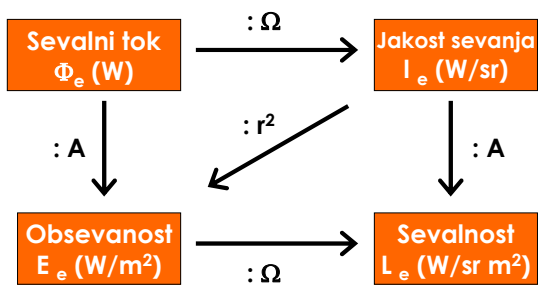


S sevalnostjo (radiance) označimo jakost sevanja določene ploskve pod določenim kotom.

$$L_e = \frac{I_e}{A \cdot \cos \theta}$$

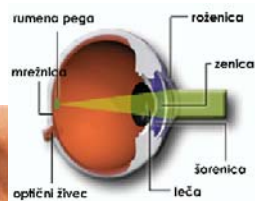
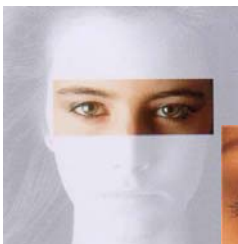
L_e sevalnost (W/sr m²)

Medsebojna povezanost veličin



Človeško oko - organ vida

Človeško oko je organ s katerim zaznavamo svetlobo.

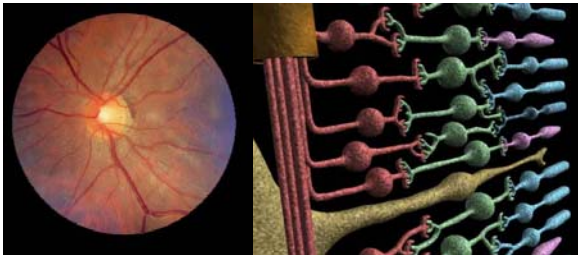


Fotometrija



Ko moramo svetlobo meriti tako “kot jo vidimo” npr. v razsvetljavi, moramo uporabiti **fotometrijo** in ne **radiometrije**.

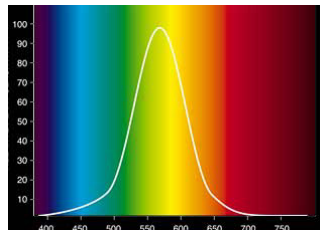
Fotoreceptorji v očesu



Fotoreceptorji v očesu vpadlo svetlobo pretvorijo v impulze, ki jih živci vodijo v možgane.

Za oči niso vsi “Watti” enaki

“Wattom” v svetlobni tehniki pravimo “Lumni”, povezava pa je določena s spektralno občutljivostjo očesa:



1W pri 400 nm je 0,000 lm
1W pri 500 nm je 220,609 lm
1W pri 600 nm je 430,973 lm
1W pri 700 nm je 2,732 lm
1W pri 800 nm je 0,000 lm

1W pri 555 nm je 683,000 lm

Fotometrične enote

Na podlagi fizikalnih enot so bile določene fotometrične enote:

- Sevalni tok $\Rightarrow$ Svetlobni tok
- Jakost sevanja $\Rightarrow$ Svetilnost
- Obsevanost $\Rightarrow$ Osvetljenost
 - Sevalnost $\Rightarrow$ Svetlost

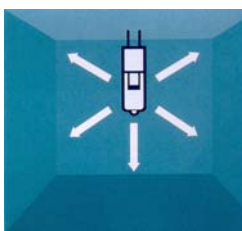
Svetlobni tok



Svetlobni tok (**Luminous flux**) je merilo za količino energije, ki jo vir seva v prostor. Je ekvivalent moči v "Wattih" vendar z upoštevanjem občutljivosti oči na svetlobo posameznih valovnih dolžin.

Φ lumen (lm)

Svetlobni tok



Svetlobni tok dobimo iz izsevane moči preko formule:

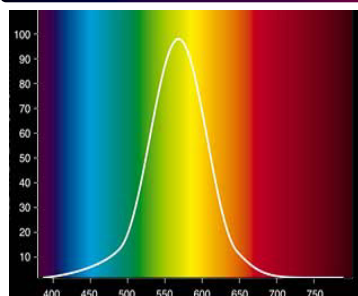
$$\Phi = K_m \cdot \int_0^\infty \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

Kjer je K_m enak 683 lm/W in predstavlja svetlobni tok (v lm) pri 1W izsevane moči z valovno dolžino 555 nm.

Φ lumen (lm)

1 W svetlobe z 555 nm podnevi pomeni 683 lm
1W svetlobe z 507 nm ponoči pomeni 1700 lm

Svetlobni tok



$V(\lambda)$

Funkcija $V(\lambda)$ predstavlja občutljivost človeških oči na različne valovne dolžine in je določena za standardnega opazovalca (CIE), torej je statistično povprečje.

Svetlobni tok



Nekaj karakterističnih vrednosti:

- Navadna žarnica 100W
1300 lm
- Fluorescenčna svetilka 58 W
5200 lm
- Visokotlačna natrijeva sijalka 100W
10.000 lm
- Nizkotlačna natrijeva sijalka 90W
13.500 lm

Φ lumen (lm)

Svetilnost

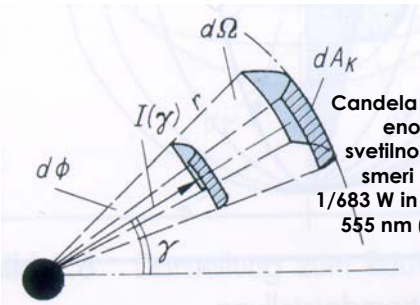


Svetilnost (**Luminous intensity**) je merilo za svetlobni tok v določeni smeri. Vsota svetilnosti v vseh smereh je enaka svetlobnemu toku.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

I candela (cd)

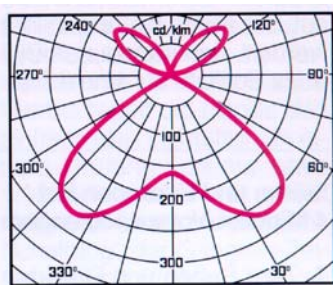
Svetilnost



$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

Candela (cd) je osnovna enota SI in je enaka svetilnosti, ki jo v izbrani smeri seva vir z močjo 1/683 W in valovno dolžino 555 nm (poenostavljena definicija).

Svetilnost



Svetilnost je odvisna od izbrane smeri, zato jo podajamo v polarnih diagramih.

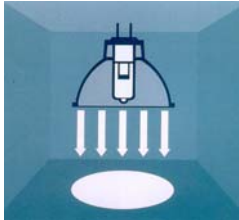
Svetilnost



Nekaj karakterističnih vrednosti:

- Sveča
0,6 do 1,0 cd
- Navadna žarnica 100W
110 cd
- Natrijeva visokotlačna sijalka 70W
500 cd
- Sonce (zunaj atmosfere)
 $3 \cdot 10^{27}$ cd

Osvetljenost



E lux (lx)

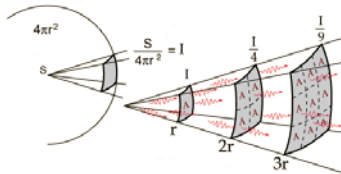
Osvetljenost (Illuminance) je merilo za količino svetlobnega toka, ki pada na neko ploskev.

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

1. osnovni zakon "svetlobe"

Zakon " $1/r^2$ " ali fotometrični zakon oddaljenosti

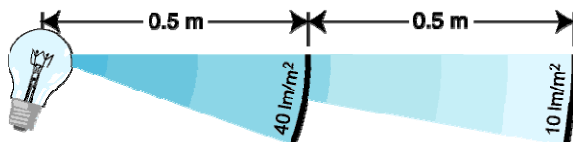
Energija, ki jo seva vir, je konstantna, ker pa površina z razdaljo od vira narašča z kvadratom razdalje, gostota energije na površino pada z kvadratom razdalje od vira. Gostota energije je torej obratno sorazmerna kvadratu razdalje od vira.



$$E = \frac{I}{r^2}$$

1. osnovni zakon "svetlobe"

Zakon " $1/r^2$ " ali fotometrični zakon oddaljenosti

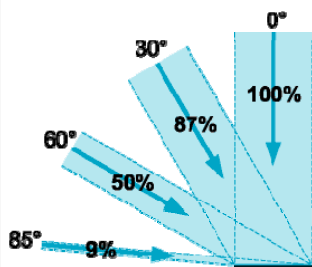


Velja samo za točkaste vire (razdalja > 5 velikost)

2. osnovni zakon "svetlobe"

"Kosinusni" zakon

Energija, ki pade na ploskev, ki ni pravokotna na smer sevanja je enaka energiji, ki bi končala na pravokotni ploskvi pomnoženi z kosinusom kota nagnjenosti:

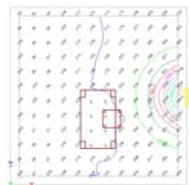


$$E = E_0 \cdot \cos \theta$$

Osvetljenost

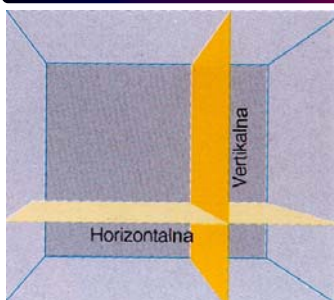


Osvetljenost je veličina, ki jo največkrat računamo ali merimo.



Tudi predpisi, ki obravnavajo razsvetljavo, podajajo potrebne osvetljenosti v prostorih.

Osvetljenost



Poznamo več vrst osvetljenosti:

- horizontalno,
- vertikalno,
- prostorsko,
- cilindrično,
- vektorsko,
- ...

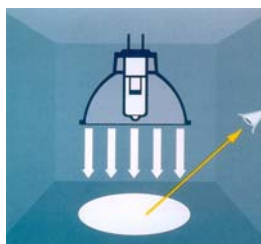
Osvetljenost



Nekaj karakterističnih vrednosti:

- Travnik ob jasnem poletnem dnevu ob 12:00: 100.000 lx
- Travnik v senci drevesa 10.000 lx
- Namizna površina v pisarni 500 lx
- Žarnica moči 100W na razdalji 1m 110 lx
- Cesta razsvetljena s cestno razsvetljavo: 3 lx
- Travnik v mesečini 0,05 lx

Svetlost



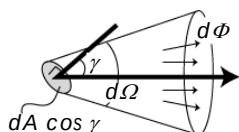
L (cd/m²)

Svetlost (**luminance**) je merilo za občutek, ki ga neka površina povzroča v naših očeh (temno - svetlo). Je edina svetlobno tehnična veličina, ki jo lahko ocenimo z očmi.

Svetlost

Svetlost je definirana s sledečo enačbo:

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA \cdot \cos\gamma \cdot d\Omega}$$



Pri tem je $d\Phi$ del svetlobnega toka v prostorskem kotu $d\Omega$. dA je del površine tega snopa, ki vsebuje izbrano točko in γ kot med normalo te ploskve in smerjo snopa.

Svetlost

Enačba se da preoblikovati v:

$$L = \frac{dI}{dA \cdot \cos \gamma}$$

kadar je opazovana
točka del ploskve, ki sveti
s podano svetilnostjo;

$$L = \frac{dE}{\cos \gamma \cdot d\Omega}$$

kadar je opazovana
točka del ploskve, ki je
osvetljena.

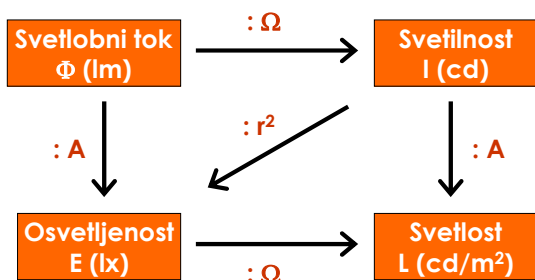
Svetlost

Nekaj karakterističnih vrednosti:

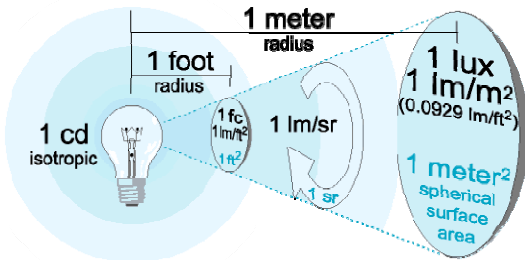


- Sonce
1.600.000 kcd/m²
- Navadna žarnica (prozoren balon)
15.000 kcd/m²
- Fluorescenčna sijalka
10 kcd/m²
- Sveča
8 kcd/m²
- Luna
2,5 kcd/m²
- Stena sobe osvetljena z
električno razsvetljavo: 0,04 kcd/m²

Medsebojna povezanost fotometričnih veličin



Medsebojna povezanost fotometričnih veličin



Kaj, kako in s čim merimo



- SI sistem enot definira enoto za svetilnost I (cd)
- Veličino predstavimo z normalo.
- Merilnike se umerja tako, da jih primerjamo z normalo enote.

Candela

Definicija candele



Fotometrične normale - candela



Prve normale za **candelo** so bile sveče. Ime **candela** namreč izvira iz besede candle (sveča).

Fotometrične normale - candela



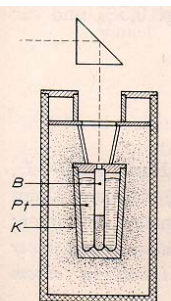
Ker je svečo težko vsakič narediti enako, so se kasneje odločili za "petrolejko" imenovano **Hefnerjeva svetilka** (Hefner-Alteneck 1884).

Fotometrične normale - candela



Naslednji korak so bile električne žarnice. Ker pa tudi te niso bile popolnoma zanesljive, so se odločili za normalo, temelječo na sevanju črnega telesa.

Fotometrične normale - candela



Leta 1933 so se dogovorili, da bo nova normala temeljila na svetlobnem sevanju črnega telesa pri temperaturi strjevanja platine (2045 K).

B ... črno telo (Thorijev oksid)

Pt ... platina

K ... tališna posoda (Th. oksid)

Fotometrične normale - candela



Danes se take normale, temelječe na viru sevanja (črnem telesu) le redko še uporabljajo. Uveljavile so se normale, temelječe na merilniku. Kot merilni element se lahko uporablja silicijeva fotodioda in pa kriogenski radiometer.

Fotometrične normale - Lumen



Večina normal za svetlobni tok je danes izvedenih kot posebne žarnice ali fluorescentne cevi. Pri slednjih je potrebno uporabljati ustrezno umerjeno predstikalno napravo

Fotometrične normale - lux

Posebne normale za osvetljenost ni.
Uporabljajo se ustrezno umerjeni
precizijski merilniki osvetljenosti
(lux-metri)



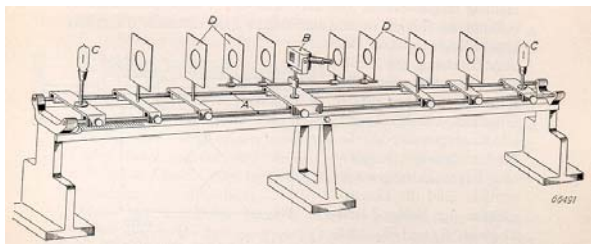
Fotometrične normale - cd/m^2



Normala za svetlost je
narejena iz krogle v kateri je
posebna žarnica. En del
plašča krogle je
nadomeščen s posebno, za
svetlobo ustrezno prepustno,
snovjo. Definirana svetlost je
nanaša na sredinski del
tega "okenca"

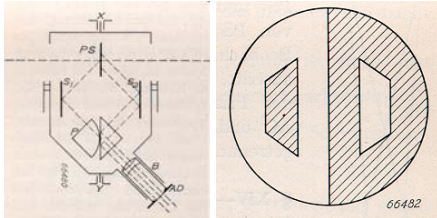
S čim merimo (smo merili) svetlobo

Včasih so se fotometrične meritve izvajale na
fotometrični klopi...

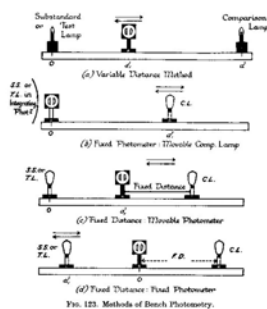


S čim merimo (smo merili) svetlobo

... pri čemer so bile za "fotometer"
uporabljene oči
merilca.



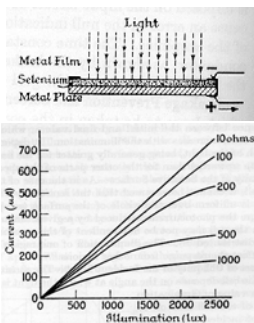
Na primer: meritev svetilnosti



Meritev svetilnosti neznanega
vira se lahko izvede s
pomočjo fotometrične klopi,
vira z znano svetilnostjo in
fotometra:
Neznana svetilnost se izračuna
na podlagi fotometričnega
zakona oddaljenosti
("1/r²" zakona) iz:

$$I_x = \frac{I_n}{r_n^2} \cdot r_x^2$$

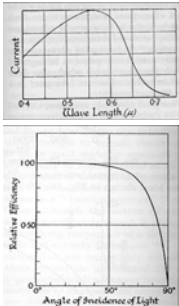
Fotoelement



Danes za merjenje
svetlobe uporabljamo
foto-napetostne
celice, ki svetlobo
pretvarjajo v
električno energijo.

Če je kratko sklenjena
je tok proporcionalen
osvetljenosti.

Fotoelement

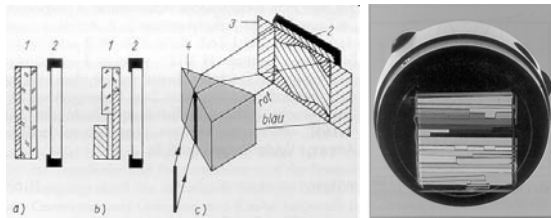


Dve glavni pomankljivosti fotoelementa sta:

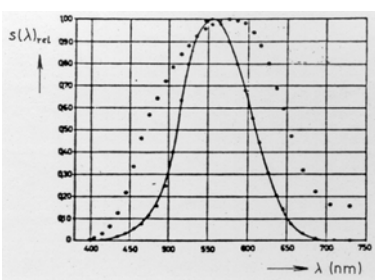
- njegova spektralna občutljivost je drugačna od spektralne občutljivosti človeških oči;
- kotna odvisnost ne gre po kosinusnem zakonu.

Fotoelement - spektralna občutljivost

Za prilagoditev spektralni občutljivosti očesa lahko uporabimo: polni filter, pasovni filter ali spektralno šablono.



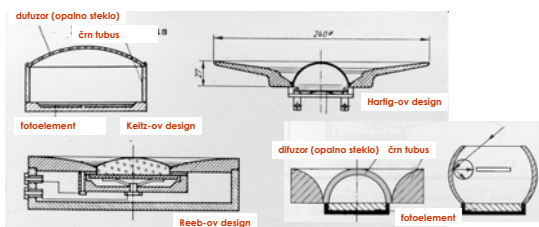
Fotoelement - spektralna občutljivost



Največji pogrešek se pri merilnikih osvetljenosti pojavi ravno zaradi neprilagojenosti na $V(\lambda)$

Fotoelement – cosinusna korekcija

Tudi kotno občutljivost se da ustrezno popraviti (močno steklo, šablone ..), tako da ustreza "kosinusnem zakonu".



Fotoelement - temperaturna odvisnost

Fotoelementi so temperaturno odvisni:

$$f_6 = \frac{M(\vartheta)}{M(\vartheta_0)} - 1$$

$$\alpha = \frac{\Delta Y}{Y(\vartheta_0)} \cdot \frac{1}{\Delta \vartheta} \cdot 100$$

- kadmijev-sulfid: 5%/K,
- selen: 0,5%/K,
- silicij: 0,1%/K.

Referenčna temperatura pri umerjanju fotoelementov je 25°C. Da se izognemo pogreškom so fotoelementi lahko termostatzirani - zaprti v ohišje s konstantno temperaturo (običajno 30 °C).

Pogrešek lux-metra

Pogrešek lux-metra se izraža kot celotni pogrešek, ki pa je sestavljen iz večih pogreškov.



Največje vrednosti celotnega pogreška so:

- razred C: $f_{\text{cel}} = 20\%$
- razred B: $f_{\text{cel}} = 10\%$
- razred A: $f_{\text{cel}} = 5\%$
- razred L: $f_{\text{cel}} = 3\%$

Pogrešek lux-metra

Celoten pogrešek je sestavljen iz:

- f_1 : pogrešek prilagoditve krivulji $V(\lambda)$
- f_2 : pogrešek smerne odvisnosti
- f_3 : pogrešek linearnosti
- f_4 : pogrešek kazalnika
- f_5 : pogrešek utrujanja
- f_6 : pogrešek temperaturne odvisnosti
- f_7 : pogrešek časovno spremenljive svetlobe

Pogrešek lux-metra

Celoten pogrešek je sestavljen iz:

- f_8 : pogrešek polarizacije
- f_9 : pogrešek neenakomerne osvetlitve
- f_{11} : pogrešek preklapljanja merilnih področij
- občutljivost v UV področju
- občutljivost v IR področju
-

Pogrešek lux-metra

Standardi poleg največje dovoljene vrednosti celotnega pogreška za posamezen razred inštrumenta navajajo tudi največje dovoljene vrednosti posameznih pogreškov!

- f_1 : C: 9%, B: 6%, A: 3%, L: 1,5%
- f_3 : C: 5%, B: 2%, A: 1%, L: 0,2%

Fotometrične glave



Danes so na voljo različne vrste fotoelementov (fotometričnih glav, merilnih celic). Ločimo jih po velikosti merilne površine, korekciji glede na spektralno občutljivost oči, korekciji glede na smer vpada svetlobe (kosinusna korekcija), temperaturni stabiliziranosti in razredu točnosti.

Merilnik osvetljenosti



Za merjenje osvetljenosti uporabljamo **lux-meter**. Sestavljen je iz merilne glave (fotocelice) in dela za prikaz izmerjene vrednosti.

Merilnik osvetljenosti



Laboratorijski lux-meter omogoča uporabo različnim merilnih glav .

Meritev ostalih fotometričnih veličin

Za meritev ostalih fotometričnih veličin:

- svetilnost,
- svetlobni tok in
- svetlost

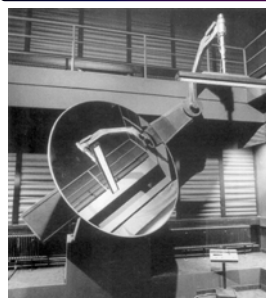
Uporabljamo merilne naprave, ki prav tako temeljijo na fotoelementu (torej meritvi osvetljenosti) ter na fizikalnih povezavah med veličinami.

Meritev svetilnosti

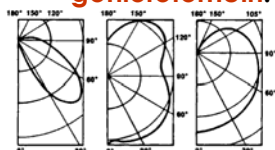
Svetilnost neznanega vira merimo na fotometrični klopi, merimo osvetljenost in razdaljo iz česar lahko izračunamo svetilnost.



Meritev kotne porazdelitve svetilnosti



Kotna porazdelitev **svetilnosti** se meri s posebnimi merilnimi napravami - **goniofotometri**.

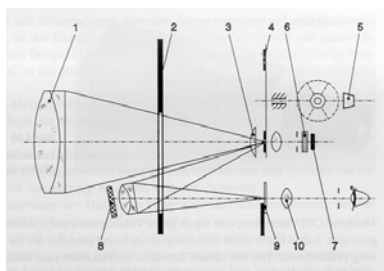


Merilnik svetlosti



Tudi **svetlost** se danes meri preko meritve osvetljenosti. Uporablja se posebne, kameri podobne, merilnike ki z optičnim sistemom leč omejijo svetlobni snop, ki pade na merilno fotocelico.

Merilnik svetlosti



- 1..objektiv
- 2..zaslonka
- 3..leča merilnega polja
- 4..zaslonka merilnega polja
- 5..nastavitev zaslonke
- 6..V(λ) filter
- 7..fotoelement
- 8..zrcalni sistem
- 9..notranji prikazovalnik
- 10..okular

Merilnik svetlosti

Z merilnikom merimo povprečno svetlost predmetov, ki se nahajajo znotraj določenega prostorskega kota.



Merilni koti se podajajo v stopinjah projekcije prostorskega kota na vertikalno ali horizontalno ravnino.

Običajno se uporabljajo merilni koti: 3°, 1°, 20' in 6'

Merilnik svetlobnega toka



Za merjenje svetlobnega toka uporabljamo fotometrične ali integracijske krogle. Merjeni vir zapremo v kroglo, katere notranje stene imajo znano odbojnost.

Merilnik svetlobnega toka



Svetlobni tok je možno izračunati tudi iz izmerjene kotne porazdelitve svetilnosti okoli vira oziroma iz izmerjene osvetljenosti na površini (namišljene) krogle okoli svetlobnega vira.

$$\Phi = 2\pi r^2 \int E(\gamma) \sin \gamma \, d\gamma \, \Omega_0$$

Kaj danes merimo?

Meritve osvetljenosti:

- meritve osvetljenosti notranjih prostorov
- meritve osvetljenosti delovnega mesta
 - meritve osvetljenosti zunanjih površin
- meritve osvetljenosti z varnostno razsvetljavo

Kaj danes merimo?

Meritve svetlobnega toka:

- meritve svetlobnega toka svetlobnih virov (proizvajalci virov)
- meritve svetlobnega toka svetilk (proizvajalci svetilk)

Kaj danes merimo?

Meritve svetilnosti:

- meritve svetilnosti virov (proizvajalci virov)
- meritve kotne porazdelitve svetilnosti virov (proizvajalci virov)
- meritve kotne porazdelitve svetilnosti svetilk (proizvajalci svetilk)

Kaj danes merimo?

Meritve svetlosti:

- meritve svetlosti prometnih površin
- meritve svetlosti površin v notranjih prostorih (bleščanje)
- meritve svetlosti osvetljenih zunanjih površin (uredba o svetlobnem onesnaženju nočnega neba)

Za konec

- Fotometrične veličine so določene s pomočjo spektralne občutljivosti očesa.
- Poznamo 4 glavne fotometrične veličine: svetlobni tok, svetilnost, osvetljenost in svetlost.
- Meritev fotometričnih veličin temelji na uporabi foto-celice, ki pa mora biti ustrezno prilagojena spektralni občutljivosti človeškega očesa.

... in še:

Vprašanja?
