

# Elektrické světlo KEE/ESV

Lenka Raková

## 2. přednáška

2015/2016

1

## Obsah

- Základní světelně technické veličiny
- Světelné vlastnosti látek

2. přednáška KEE/ESV

23. února 2016

2

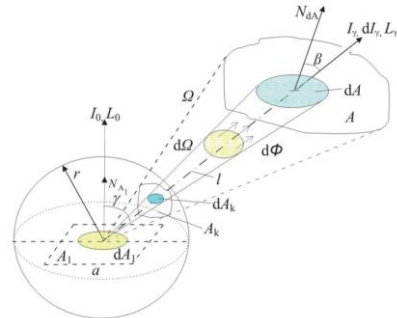
## ZÁKLADNÍ SVĚTELNĚ TECHNICKÉ VELIČINY

Radiometrické veličiny		Fotometrické veličiny	
název	jednotka	název	jednotka
zářivý tok $\Phi_e$	W	světelný tok $\Phi$	lumen (lm)
zářivost $I_e$	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	svítivost $I$	kandela (cd)
zář, plošná zářivost (jas) $L_e$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	jas $L$	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$
intenzita vyzářování $M_e$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	světlení (intenzita světlení)	$\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$
intenzita ozáření $E_e$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	osvětlení (intenzita osvětlení)	lux (lx)
expozice (dávka ozáření)	$\text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$	expozice (osvit)	$\text{lx} \cdot \text{s}$

3

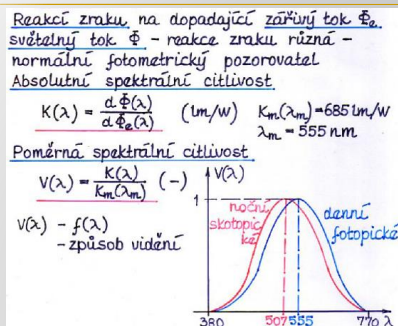
## Světelně technické veličiny

- ❖ Zář
- ❖ Svět
- ❖ Pros
- ❖ Svít
- ❖ Osv
- ❖ Jas
- ❖ Svět
- ❖ Ekv
- ❖ Mě



4

## Reakce oka a spektrální citlivost



1. přednáška KEE/ESV

23. února 2016

5

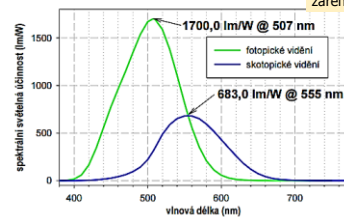
## Světelný tok (lm)

= vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit zrakový počitek či vjem  
 = reakce zraku na dopadající zářivý tok  
 (to, co zaznamená oko)

Zářivý tok = energie  
 přenesená za jednotku času

$$\Phi(\lambda) = K_\Phi(\lambda) \Phi_e(\lambda)$$

Světelný účinek monochromatického  
 záření - absolutní spektrální citlivost



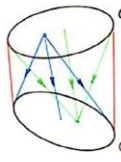
Největší spektrální světelná  
 citlivost  $K_m$  je **683 lm/W** pro  
 monochromatické světelné  
 záření o vlnové délce **555 nm**.

6

## Geometrie paprsků

### Geometrie paprsků

Zdroj záření - objem, rozměry - zanedb.  
rozměry - vzdálenosti osvětlované plochy -  
bodový zdroj světla - 5x menší než vzdálenost  
přímkový zdroj osvětlované plochy  
plošný zdroj



$dS_1$  Předp.: prostředí  $dS_1-dS_2$   
nepohlcuje - nerozptyluje sv.  
Rozbíhavý svazek paprsků  
Sbíhavý - - -  
Fyzikální svazek paprsků -  
soubor rozbíhavých  
(sbíhavých) svazků - přenos  
energie  
 $dS_2$

2. přednáška KEE/ESV 23. února 2016

7

## Prostorový úhel $\Omega$ (sr)

- umožňuje určit **geometrickou velikost svazku světelných paprsků**

= velikost plochy vyřáté obecnou

kuželovou plochou na povrchu jednotkové koule

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

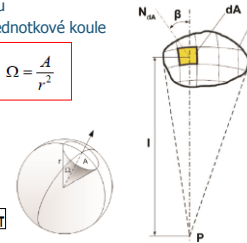
**Obecná kuželová plocha**

$$d\Omega = \frac{dA \cos \beta}{l^2}$$

**Plný prostorový úhel**

= povrch celé koule

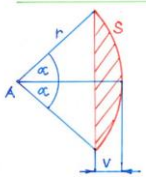
$$\Omega = 4\pi$$



8

## Prostorový úhel $\Omega$ (sr)

$\Omega$  - rotační kuželová plocha



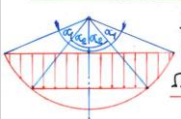
$$S = 2\pi r v$$

$$v = r - r \cos \alpha = r(1 - \cos \alpha)$$

$$\Omega = \frac{S}{r^2} = \frac{2\pi r^2 (1 - \cos \alpha)}{r^2}$$

$$\Omega = 2\pi (1 - \cos \alpha)$$

$\Omega$  - kulový pás



$$\Omega = \Omega_1 - \Omega_2$$

$$\Omega = 2\pi (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)$$

$$\Omega = -4\pi \sin \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \sin \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}$$

2. přednáška KEE/ESV 23. února 2016

## Svítilivost $I$ (cd)

= **prostorová hustota světelného toku**

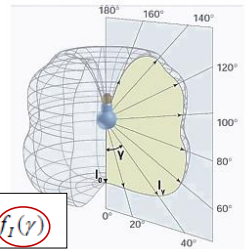
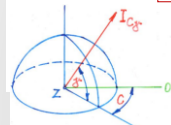
- Charakterizuje rozložení světelného toku zdrojů v prostoru v různých směrech

Je důležité stanovit vždy pokud zdroj svítí do různých směrů nerovnoměrně!

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

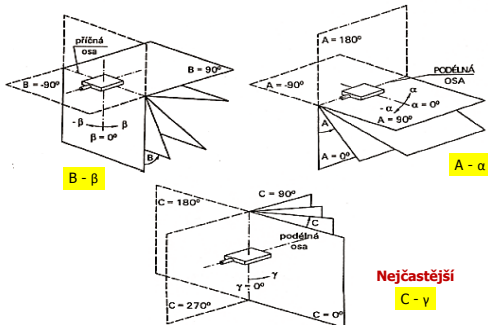
$$I_\gamma = I_0 f_I(\gamma)$$

**Indikatrix** = charakteristická fce  $I$   
matematická fce popisující křivku svítivosti (její tvar)



2. přednáška KEE/ESV 23. února 2016

## Svítilivost $I$ (cd) - křivky svítivosti



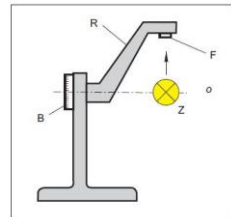
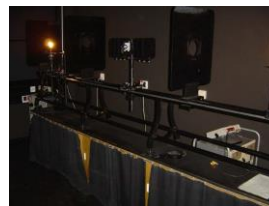
Nejčastější  
C - γ

11

2. přednáška KEE/ESV 23. února 2016

## Svítilivost $I$ (cd) - křivky svítivosti

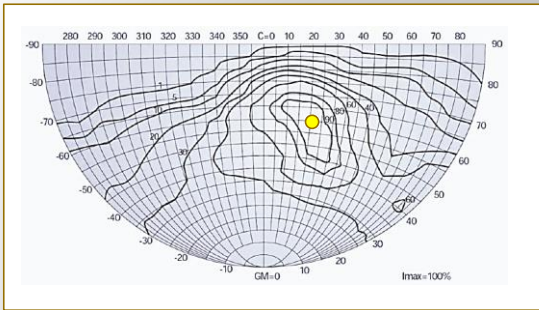
✱ Měření pomocí fotometrické lavice či goniofotometru



Náčrt konstrukce goniofotometru  
s otočným ramenem R a fotočlánkem F; zkoušené svítidlo (zdroj) Z je pevně umístěno v ose  
o rotace ramene R a ve svíslé rovině otáčení  
fotočlánku F

12

## Svítivost I (cd) – izokandelový diagram

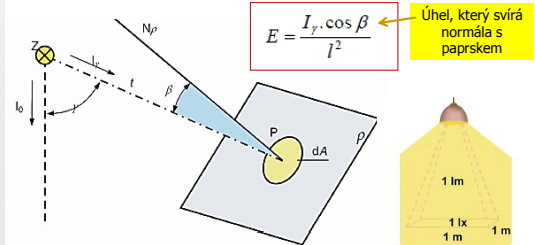


13

## Osvětlenost E (lx)

= plošná hustota **dopadajícího** světelného toku na plošku dA (jak moc mi osvětlí danou plochu = plošná hustota)

- Maximální osvětlenost je ve směru normály tzv. **normálová osvětlenost**



14

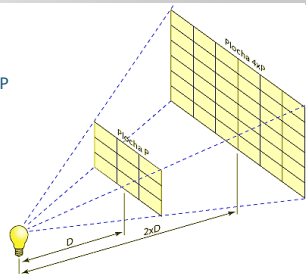
## Osvětlenost E (lx)

### Důležité vlastnosti

#### 1) Zákon čtverce vzdálenosti

= osvětlenost je nepřímo úměrná čtverci vzdálenosti zdroje od bodu P

$$E = \frac{I_{\gamma} \cdot \cos \beta}{l^2}$$



#### 2) Lambertův kosinusový zákon (viz dále v přednášce)

15

## Osvětlenost E (lx) – izoluxní mapa

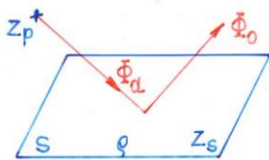


16

## Světlení M (lm/m²)

= plošná hustota světelného toku vyzařovaného plochou dA (to co zdroj vyzařuje)

$$M = \frac{d\Phi_{\gamma}}{dA}$$



17

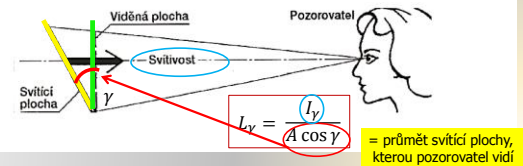
## Jas L (cd/m²)

= měrná svítivost plochy

- Veličina, na kterou bezprostředně reaguje zrakový orgán (reakce na kontrast jasu)

= plošná a prostorová hustota světelného toku přenášeného paprsky

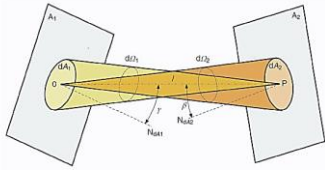
- Vždy záleží na poloze pozorovatele a směru jeho pohledu



18

## Jas svazku světelných paprsků $L_{OP}$ (cd/m<sup>2</sup>)

= plošná a prostorová hustota světelného toku přenášeného paprsky



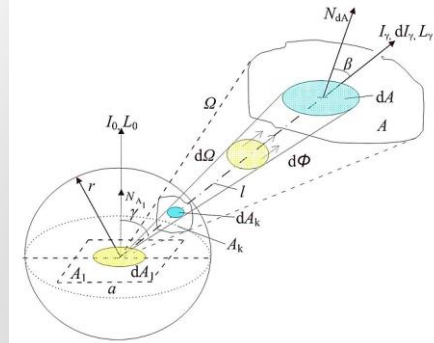
$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot dA_n} = \frac{d^2\Phi}{d^2G}$$

Homogenní prostředí – nepohlcuje ani nerozptyluje světlo

$$\Rightarrow \frac{dI_\gamma}{dA_1 \cdot \cos \gamma}$$

19

## Světelně technické veličiny – znázornění



20

## Rozlišovací schopnost

= schopnost rozeznat, že z určitých částí zorného pole vycházejí rozdílné světelné podněty

Pro **rozlišení pozorovaných předmětů** v zorném poli jsou nutné:

- **Dostatečné rozdílné jasy**
- Rozdílné barvy
- Vhodné stíny – 3D

21

## SVĚTELNÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ

22

## Světelné vlastnosti materiálů

### Optické vlastnosti materiálů

- důležité zejména při návrhu a konstrukci svítidel
  - možnosti usměrnění světelného toku
  - rozptyl světelného toku
  - omezení jasů v určitých směrech

Podmínka zachování co nejvyšší účinnosti!

### Odrazné vlastnosti povrchů (ploch) vnitřního prostoru

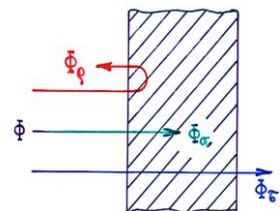
- odrazné vlastnosti povrchů stropů, stěn a ostatních povrchů mají vliv na:
  - kvantitativní a kvalitativní ukazatele vnitřního osvětlení
  - hospodárnost osvětlovacího zařízení

## Složky světelného toku

- Světelný tok dopadající na povrch materiálu (látky) se v obecném případě rozdělí na tři části:

- Tok – odražený –  $\Phi_\rho$
- pohlcený –  $\Phi_\alpha$
- propuštěný –  $\Phi_\tau$

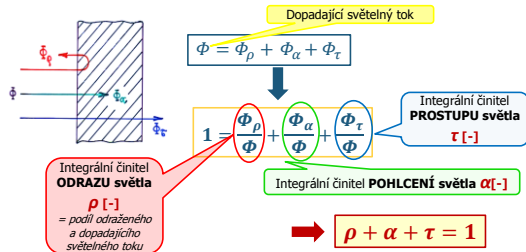
$$\Phi = \Phi_\rho + \Phi_\alpha + \Phi_\tau$$



24

## Integrální činitelé

- Světelnotechnické vlastnosti látek jsou z hlediska záření různých vlnových délek souhrnně (integrálně) charakterizovány tzv. **INTEGRÁLNÍMI ČINITELI**, které určují rozdělení světelného toku na jednotlivé části (pohlcenou, odraženou a propuštěnou část).



3. přednáška KEE/ESV

23. února 2016

25

## Integrální činitelé

- Činitelé nezávisí pouze na vlastnostech látky, ale i na vlnové délce dopadajícího záření, proto je nutno udávat i jejich spektrální hodnoty tzv. **spektrální činitele**

$$\rho(\lambda) + \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$$

♦ Přibližné hodnoty integrálních činitelů:

materiál	činitel (%)		
	odrazu $\rho$	prostupu $\tau$	pohlcení $\alpha$
sklo čiré (tloušťka 2 až 4 mm)	6 - 8	90 - 92	2 - 4
sklo matované leptané (tl. 2 až 3 mm)	6 - 11	75 - 91	3 - 19
sklo opálové bílé (tl. 2 až 3 mm)	29 - 52	36 - 66	3 - 10
sklo opalizované (tl. 2 až 3 mm)	13 - 28	59 - 84	3 - 13
mramor bílý lesklý (tl. 7,3 až 10 mm)	30 - 71	3 - 8	24 - 65
hedvábí bílé	28 - 38	61 - 71	asi 1
silon bílý	asi 55	asi 17	asi 28
silon šedý průhledný	asi 8	asi 79	asi 13

3. přednáška KEE/ESV

23. února 2016

26

## Odraz světla

♦ **Materiály odrážející světlo se rozlišují dle:**

- Rozložení odraženého světelného toku do různých směrů v prostoru
- Velikosti činitele odrazu světla -  $\rho \in (0; 1)$

**Dokonale odrazný povrch**

**Absolutně černé těleso** = materiál pohlcující veškeré záření, které na něj dopadne

• **Způsoby odrazu světla**

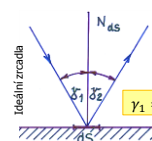
- Ideální zrcadlový odraz
- Rovnoměrně rozptýlný (difúzní) odraz
- Smišený odraz
- Mnohonásobný

3. přednáška KEE/ESV

23. února 2016

27

## Odraz světla – ideálně zrcadlový a rovnoměrně rozptýlný

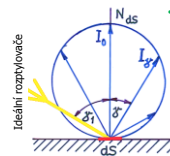


• **Ideálně zrcadlový odraz**

= úhel odrazu se rovná úhlu dopadu, tj. dopadající a odražený paprsek svírá s normálou odrážející plochy **stejný úhel** a **leží s normálou v jedné rovině**

• jas L plochy dS je pouze ve směru odraženého světelného paprsku

• v praxi – **dokonale a přesně vyleštěné kovové plochy** (technologicky a ekonomicky náročné)



• **Rovnoměrně rozptýlný (difúzní) odraz**

• světlo, které se odrazí od elementu plochy dS se rozdělí do celého poloprostoru (matné, mdlé či drsné povrchy)

• fotometrickou plochou svítivosti je kulová plocha

• svítivost I odraženého světla je maximální ve směru normály plošky dS

• jas L elementu uvažované plochy je ve všech směrech stejný

## Kontrast jasů C (-)

- ✱ Viditelnost předmětů je dána rozdílem jasu pozorovaného předmětu  $L_a$  a jasu jeho okolí  $L_b$ .

**Namáhavá zraková činnost**

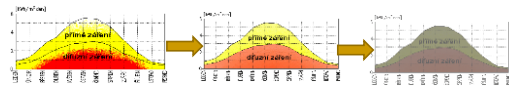
důležité zajistit **dostatečný kontrast** mezi pozorovaným detailem a blízkým pozadím

Činitel odrazu světla kritického detailu

Činitel odrazu světla bezprostředního okolí

$$C = \frac{L_a - L_b}{L_b} = \frac{\rho_a - \rho_b}{\rho_b} \quad (-)$$

**Snížení kontrastu**



2. přednáška KEE/ESV

23. února 2016

29

## Kontrast jasů C (-)

**Rozlišitelnost**

- Velmi dobrá** .....  $C \geq 0,8$  ..... velký kontrast jasů
- Dobrá** .....  $C \in (0,5 - 0,8)$  ..... střední kontrast jasů
- Špatná** .....  $C < 0,5$  ..... malý kontrast jasů

→ Se vzrůstajícím **C** roste pravděpodobnost zpozorování **KD**

Činitel odrazu světla kritického detailu

Činitel odrazu světla bezprostředního okolí

$$C = \frac{L_a - L_b}{L_b} = \frac{\rho_a - \rho_b}{\rho_b} \quad (-)$$

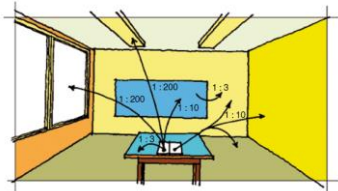
2. přednáška KEE/ESV

23. února 2016

30

## Kontrast jasu C (-)

- Při změně pohledového pole nesmí být narušena adaptace zraku
- Velké rozdíly jasů** → zvýšená adaptační činnost  
→ únava, pocit světelného diskomfortu



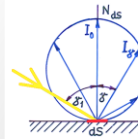
Doporučené podíly jasů v zorném poli

2. přednáška KEE/ESV

23. února 2016

31

## Odraz světla – rovnoměrně rozptýlný – Lambertovy zářiče



- Jas svazku rozbíhajících se paprsků**

$$L_{\gamma} = \frac{dI_{\gamma}}{dA \cos \gamma} \text{ [cd.m}^{-2}\text{]}$$

Svítivost **I** je **maximální** ve směru **normály** plošky dS

- svítivost **I** v ostatních směrech se určí z **Lambertova kosinového zákona**

- Lambertův kosinový zákon**

$$I_{\gamma} = I_0 \cos \gamma = I_0 f_{\gamma}(\gamma) \text{ [cd]}$$

Indikatrix svítivosti

- Jas pod úhlem γ**

$$L_{\gamma} = \frac{I_{\gamma}}{A \cos \gamma} = \frac{I_0 \cos \gamma}{A \cos \gamma} = L_0 \text{ [cd.m}^{-2}\text{]}$$

Jas dokonale rozptýlně odrazějící plochy nezávisí na úhlu dopadu světelných paprsků.



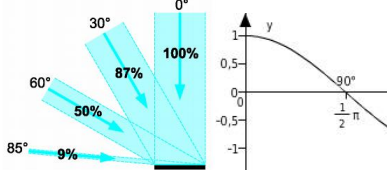
Dokonale rozptýlně svítící plochy se s ohledem na uvedené vlastnosti nazývají **Lambertovy zářiče**

32

## Lambertův kosinový zákon

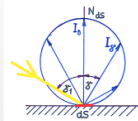
= zářivost izotropního rovinného plošného zdroje v každém jeho bodě **klesá s kosinem odklonu** od kolmice k ploše zdroje

$$I_{\gamma} = I_0 \cos \gamma = I_0 f_{\gamma}(\gamma) \text{ [cd]}$$



33

## Odraz světla – rovnoměrně rozptýlný – Lambertovy zářiče



- Světlení M – vyjádřené dvěma způsoby**

$$M = \frac{\Phi}{A} = \pi \cdot L \text{ [lm.m}^{-2}\text{]}$$

$$M = \frac{\rho \cdot \Phi}{A} = \rho \cdot E \text{ [lm.m}^{-2}\text{]}$$

$$L = \frac{\rho}{\pi} E \text{ [cd.m}^{-2}\text{]}$$

- Ekvivalentní prostorový úhel** ideálního rozptylovače je **Ωe = π**

### Příklad

Jaká je hodnota jasu desky dubového stolu ( $\rho = 0,3$ ) a bílých tkaninových závěsů ( $\rho = 0,65$ ) pokud je velikost osvětlenosti E 220 lx?

$$L_{\text{dub}} = \frac{\rho}{\pi} E = \frac{0,3}{\pi} 220 = 21 \text{ cd.m}^{-2}$$

$$L_{\text{závěs}} = \frac{0,65}{\pi} 220 = 46 \text{ cd.m}^{-2}$$

3. přednáška KEE/ESV

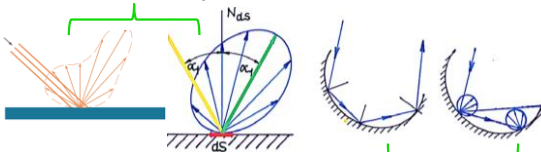
23. února 2016

34

## Odraz světla – smíšený a mnohonásobný

- Smíšený odraz**

- Většina skutečných povrchů
- Současně se uplatňuje **zrcadlový a difúzní odraz světla**
- Činitel smíšeného odrazu je dán součtem činitele zrcadlového a difúzního odrazu



- Mnohonásobný odraz**

- Při **světelně technických výpočtech** se co nejvíce využívají ideálně rozptýlné plochy (**Lambertovy zářiče**) – zjednodušení

3. přednáška KEE/ESV

23. února 2016

35

materiál, povrch	p (%)
hliník plátovaný	75 - 90
hliník leštěný	60 - 72
hliník matný	55 - 60
stříbro leštěné	85 - 94
platina leštěná	62
zlaté leštěné	70
nikl leštěný	53 - 63
chrom leštěný	60 - 70
ocel nerez leštěná	55 - 60
smalt bílý	85 - 90
žula	asi 44
cihly žluté	asi 35
cihly červené	asi 25
sádra	asi 80
malta velmi jemná	asi 50
omítky ušlechtilé, jasné	asi 40
malta tmavá	asi 25
bílý	asi 80
středně modrý	60 - 70
papír světle žlutý	35 - 45
světle zelený	
namodralý světlý	

materiál, povrch	p (%)
javorové surové, přírodní	40 - 50
dubové voskované	30 - 49
ořechové	10 - 20
mahagonové	15 - 20
mořené tmavé	10 - 30
bílá	76 - 88
žlutá	66 - 80
tmavá	47 - 67
hnědá	30 - 48
tmavá	14 - 31
červená	39 - 63
tmavá	17 - 39
zelená	36 - 69
tmavá	11 - 35
modrá	24 - 56
světlá	5 - 25
růžová	35 - 61
světlá	35 - 67
šedá	15 - 35
tmavá	2 - 4
černá	

Činitel odrazu

36



## Prostup světla

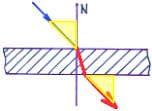
❖ Světelný tok, který projde vrstvou látky je charakterizován

- Způsobem jakým vystupuje do prostoru
- Velikosti činitele prostupu světla -  $\tau \in (0; 1)$

**Dokonale propustné látky**  
(vzduch, voda, sklo)

### • Přímý prostup

- Čiré či dokonale průhledné látky
- Úhel dopadajícího a vycházejícího paprsku je shodný
- Vycházející paprsek je pouze rovnoběžně posunut

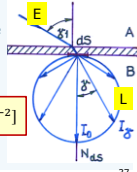


3. přednáška KEE/ESV

### • Rovnoměrně rozptýlný prostup

- Procházející paprsek je **rovnoměrně rozptýlen v prostředí B** do celého poloprostoru
- Jako rovnoměrně rozptýlný odraz

$$L = \frac{\tau}{\pi} E \quad [\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}]$$



23. února 2016

37

2. přednáška KEE/ESV 23. února 2016

## Příště

## VLASTNOSTI MATERIÁLŮ (DOKONČENÍ) FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY VÝROBY SVĚTLA A ZÁKLADNÍ PARAMETRY SVĚTELNÝCH ZDROJŮ

38

2. přednáška KEE/ESV 23. února 2016

## Pár základních příkladů na procvičení

- ✘ Rovinná plocha  $S = 1,5 \text{ m}^2$  má ve směru  $\alpha = 45^\circ$  od normály svítivost  $I_a = 210 \text{ cd}$ . Jaký je jas plochy za předpokladu rovnoměrného rozptýlu po ploše?
- ✘ Plocha o rozměrech  $1,8 \times 3 \text{ m}$  s odrazností  $\rho = 0,6$  (rovnoměrně rozptýlný odraz) je osvětlována tokem  $\Phi = 3500 \text{ lm}$ . Jaká je její osvětlenost, svícení, jas a svítivost ve směru kolmém?
- ✘ Určete jas trávníku v parku při osvětlení  $E = 50 \text{ klx}$ , je-li odraznost trávníku  $\rho = 0,14$ .
- ✘ Průměr kruhové desky je  $200 \text{ mm}$ . Jak daleko na její ose musí být zdroj světla, jehož svítivost je  $I = 130 \text{ cd}$ , dopadá-li na desku světelný tok  $\Phi = 15 \text{ lm}$ ?

39