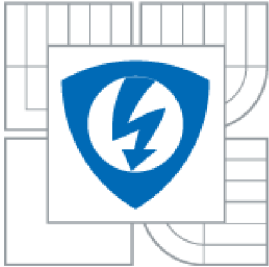




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION**  
DEPARTMENT OF OF RADIO ELECTRONICS

# **STUDIUM ODRAZIVOSTI POVRCHŮ**

STUDY OF SURFACES REFLECTIVITY

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

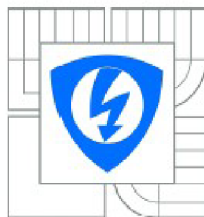
**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**VÍTĚZSLAV KUMPÁN**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**ING. LUCIE DORDOVÁ, PH.D.**

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Elektronika a sdělovací technika

**Student:** Vítězslav Kumpán  
**Ročník:** 3

**ID:** 115213  
**Akademický rok:** 2010/2011

## NÁZEV TÉMATU:

**Studium odrazivosti povrchů**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s pojmy odrazivost a poměrná směrová odrazivost. Prostudujte odrazivé vlastnosti vybraných povrchů v oblasti UV, VIS a IR záření s ohledem na možné použití v indoor optických bezkabelových spojích.

Vytvořte pracovní postup pro určování poměrné směrové odrazivosti různých povrchů. Určete vhodnou úpravu povrchů pro indoor optické bezkabelové spoje. Výsledky zpracujte do podoby technické dokumentace.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] SMITH, F. G., KING, T. A., WILKINS, D. Optics and Photonics. New York: John Wiley, 2007
- [2] SALEH, B. E. A., TEICH, M. C. Fundamentals of Photonics. New York: John Wiley, 1991.
- [3] SALEH, B. E. A., TEICH, M. C. Základy fotoniky 1. Praha: Matfyzpress, 1994.

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 27.5.2011

**Vedoucí práce:** Ing. Lucie Dordová, Ph.D.

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**  
*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce rozebírá problematiku základních vlastností světla a jeho šíření v prostoru. Zabývá se pojmy jako je odrazivost a poměrná odrazivost povrchů. Objasňuje také působení světla různých vlnových délek na člověka. S ohledem na toto působení pak obsahuje měření odrazivosti reálných povrchů, se kterými se můžeme běžně setkat. Tyto hodnoty uvádí ve formě technické dokumentace v příloze. Obsahuje také srovnání jednotlivých materiálů s ohledem na použití v indoor optických bezkabelových spojích.

## **KLČOVÁ SLOVA**

Odrazivost povrchů, poměrná odrazivost povrchů, světelné vlastnosti materiálů, UV, VIS, IR, indoor optické spoje

## **ABSTRACT**

Bachelor thesis analyzes the basic properties of light and its distribution in space. It deals with concepts such as reflective surfaces and the relative reflectance. It also clarifies the effect of light of different wavelengths on the man. In view of this activity includes the measurement of the reflectance of real surfaces with which we commonly encounter. The values given in the form of technical documentation in annex. It also includes a comparison of various materials with respect to the use in indoor cordless optical communications.

## **KEYWORDS**

Surface reflectivity, the relative surface reflectance, photometric properties of materials, UV, VIS, IR, indoor cordless optical communications

KUMPÁN, V. *Studium odrazivosti povrchů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 81 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lucie Dordová, Ph.D.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Studium odrazivosti povrchů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 27. dubna 2011

.....  
podpis autora

# Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu Ing. Lucie Dordové, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 27. dubna 2011

.....  
podpis autora

# Obsah

<b>1 Rozbor současného stavu problematiky</b> .....	13
1.1 Světlo.....	13
1.2 Účinky světla na člověka .....	14
1.2.1 <i>Ultrafialové záření</i> .....	14
1.2.2 <i>Viditelné záření</i> .....	16
1.3 Infračervené záření.....	16
1.4 Monochromatická vlna.....	17
1.5 Komplexní vlnová funkce.....	17
1.6 Helmholtzova rovnice .....	18
1.7 Rovinná vlna.....	18
1.8 Šíření světla.....	19
1.9 Světelný tok.....	20
1.10 Intenzita, výkon, energie.....	20
1.11 Odraz a lom.....	21
1.11.1 <i>Zákon odrazu</i> .....	21
1.11.2 <i>Zákon lomu</i> .....	22
1.12 Úplný odraz.....	22
1.13 Rovinné zrcadlo.....	23
1.14 Odrazivost.....	23
1.15 Rozptylový odraz.....	24
1.16 Poměrná odrazivost.....	26
1.17 Mnohonásobný odraz.....	27
1.18 Pohlcení (prostup) světla.....	28
1.19 Atmosférické prostředí.....	29
1.20 Veličiny charakterizující světelně technické vlastnosti hmot.....	31
1.21 Drsnost povrchu.....	34
1.21.1 <i>Určení profilu drsnosti</i> .....	34
1.21.2 <i>Charakteristiky drsnosti (ČSN EN ISO 4287:1999) [14]</i> .....	35
1.22 Indoor bezkabelové optické spoje.....	35
<b>2 Experimentální část</b> .....	37
2.1 Měření odrazivých vlastností materiálů .....	37
2.2 Pracovní postup:.....	37
2.3 Měření napěťové citlivosti:.....	38

2.4 Měření a zpracování výsledků .....	39
2.5 Porovnání naměřených hodnot.....	43
2.5.1 Porovnání vnitřních omítek různých barev.....	43
2.5.2 Porovnání odrazivých vlastností stejného materiálu pro různé vlnové délky .....	45
2.5.3 Porovnání vlastností průhledných materiálů.....	46
2.5.4 Porovnání materiálu z hlediska drsnosti povrchu.....	48
2.5.5 Porovnání nejčastěji se vyskytujících materiálů v indoor prostředích v porovnání s referenční difúzní plochou.....	51
<b>3 Závěr.....</b>	<b>52</b>
<b>4 Seznam literatury.....</b>	<b>53</b>
<b>5 Seznam zkratk a symbolů.....</b>	<b>55</b>
<b>6 Příloha - technická dokumentace .....</b>	<b>56</b>
6.1 Vnitřní omítka s bílým vápenným nátěre.....	56
6.2 Vnitřní omítka se žlutým nátěrem.....	59
6.3 Vnitřní omítka se zeleným nátěrem.....	61
6.4 Vnitřní omítka s modrým nátěrem.....	63
6.5 Vnitřní omítka s černým nátěrem.....	65
6.6 Hnědý koberec s nízkým vlasem.....	67
6.7 Referenční difúzní plocha.....	69
6.8 Lakované světlé dřevo .....	71
6.9 Sklo tloušťky 1,1 mm.....	73
6.10 Plexisklo tloušťky 20 mm.....	75
6.11 Plech šedé barvy měřícího přístroje agilent.....	77
6.12 Vypnutý LCD monitor .....	80
6.13 Černý plech počítačové skříňe .....	82

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Světelné spektrum, převzato z [5].....	13
Obrázek 2: Biologické účinky UV záření (okamžité a dlouhodobé) , PMLEM - polymorfní světelná erupce (druh alergie na sluneční záření) [12].....	17
Obrázek 3: Odraz a lom.....	21
Obrázek 4: Ilustrace odrazů.....	22
Obrázek 5: Odraz od rovinného zrcadla.....	23
Obrázek 6: Rozptylový odraz.....	24
Obrázek 7: Smíšený odraz.....	24
Obrázek 8: Zrcadlový odraz.....	24
Obrázek 9: Určení úhlu polovičního jasu.....	25
Obrázek 10: Určení dohodnutého činitele jasu.....	26
Obrázek 11: K definici $PSO$ ( $dSc$ - elementární část ozařovaného povrchu $Sc$ , $n$ - normála povrchu v bodu M).....	27
Obrázek 12: Spektrální závislost propustnosti "čisté" a "klidné" atmosféry. Převzato z [9].....	30
Obrázek 13: Možné způsoby šíření informace pomocí optického spoje v indoor prostředích. Převzato z [10].....	36
Obrázek 14: Blokové zapojení měřícího pracoviště.....	38
Obrázek 15: Blokové zapojení měřícího pracoviště pro určení optického výkonu.....	39
Obrázek 16: Pohled ze zhora na měřený přípravek.....	40
Obrázek 17: Přípravek simulující bílou úpravu místností.....	41
Obrázek 18: Závislosti $PSO$ pro obě vlnové délky ( $\lambda = 670$ nm a $\lambda = 808$ nm) materiálu omítky s bílým vápeným nátěrem.....	42
Obrázek 19: Graf $PSO = f(\gamma)$ všech vnitřních omítek pro vlnovou délku 808 nm.....	43
Obrázek 20: Graf $PSO = f(\gamma)$ všech vnitřních omítek pro vlnovou délku 670 nm.....	44
Obrázek 21: Graf $PSO = f(\gamma)$ modré omítky pro různé vlnové délky.....	45
Obrázek 22: Graf $PSO = f(\gamma)$ pro průhledné materiály pro $\lambda = 670$ nm.....	46
Obrázek 23: Graf $PSO = f(\gamma)$ pro průhledné materiály $\lambda = 808$ nm.....	47
Obrázek 24: Graf $PSO = f(\gamma)$ pro plechy různých barev $\lambda = 808$ nm.....	48
Obrázek 25: Graf $PSO = f(\gamma)$ pro materiály hnědé barvy $\lambda = 808$ nm.....	49
Obrázek 26: Graf $PSO = f(\gamma)$ pro materiály černé barvy $\lambda = 808$ nm.....	50
Obrázek 27: Graf $PSO = f(\gamma)$ pro nejpoužívanější materiály v indoor prostředích s porovnáním s referenční difúzní plochou pro $\lambda = 808$ nm.....	51
Obrázek 28: Přípravek simulující bílou úpravu místností.....	57



Obrázek 29: Závislosti <i>PSO</i> pro obě vlnové délky ( $\lambda = 670$ nm a $\lambda = 808$ nm) materiálu omítky s bílým vápěným nátěrem.....	58
Obrázek 30: Materiál omítky ve žluté barvě.....	59
Obrázek 31: Závislosti <i>PSO</i> pro obě vlnové délky ( $\lambda = 670$ nm a $\lambda = 808$ nm) materiálu omítky ve žluté barvě.....	60
Obrázek 32: Materiál omítky v zelené barvě s vyznačeným místem měření .....	61
Obrázek 33: Závislosti <i>PSO</i> pro obě vlnové délky ( $\lambda = 670$ nm a $\lambda = 808$ nm) materiálu omítky v zelené barvě .....	62
Obrázek 34: Přípravek pro vnitřní omítku v modré barvě s vyznačeným místem měření.....	63
Obrázek 35: Závislosti <i>PSO</i> pro obě vlnové délky ( $\lambda = 670$ nm a $\lambda = 808$ nm) materiálu omítky v modré barvě.....	64
Obrázek 36: Přípravek pro měření omítky v černé barvě.....	65
Obrázek 37: Závislosti <i>PSO</i> pro obě vlnové délky ( $\lambda = 670$ nm a $\lambda = 808$ nm) materiálu omítky v černé barvě.....	66
Obrázek 38: Přípravek pro měření koberece s nízkým vlasem hnědé barvy.....	67
Obrázek 39: Závislosti <i>PSO</i> pro obě vlnové délky ( $\lambda = 670$ nm a $\lambda = 808$ nm) materiálu hnědý koberec s krátkým vlasem.....	68
Obrázek 40: Školní přípravek pro měření ideální difúzní plochy.....	69
Obrázek 41: Závislosti <i>PSO</i> pro obě vlnové délky ( $\lambda = 670$ nm a $\lambda = 808$ nm) materiálu dokonalé difúzní plochy.....	70
Obrázek 42: Měřicí přípravek pro měření lakovaného dřeva.....	71
Obrázek 43: Závislosti <i>PSO</i> pro obě vlnové délky ( $\lambda = 670$ nm a $\lambda = 808$ nm) materiálu lakovaného hnědého dřeva.....	72
Obrázek 44: Přípravek na měření skla tloušťky 1,1 mm.....	73
Obrázek 45: Závislosti <i>PSO</i> pro obě vlnové délky ( $\lambda = 670$ nm a $\lambda = 808$ nm) materiálu skla tloušťky 1,1 mm.....	74
Obrázek 46: Přípravek z plexiskla o tloušťce 20 mm.....	75
Obrázek 47: Závislosti <i>PSO</i> pro obě vlnové délky ( $\lambda = 670$ nm a $\lambda = 808$ nm) materiálu plexiskla o tloušťce 20 mm.....	76
Obrázek 48: Místo měření generátoru Agilent.....	77
Obrázek 49: Závislosti <i>PSO</i> pro obě vlnové délky ( $\lambda = 670$ nm a $\lambda = 808$ nm) materiálu šedý plech .....	78
Obrázek 50: Měřený monitor LCD.....	80
Obrázek 51: Závislosti <i>PSO</i> pro obě vlnové délky ( $\lambda = 670$ nm a $\lambda = 808$ nm) u vypnutého monitoru .....	81

Obrázek 52: Měřená počítačová skříň černé barvy s vyznačeným místem měření.....	82
Obrázek 53: Závislosti $PSO$ pro obě vlnové délky ( $\lambda = 670$ nm a $\lambda = 808$ nm) u vypnutého monitoru .....	83

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Přibližné hodnoty činitelů $\rho, \tau, \alpha$ některých materiálů. Převzato z [4].....	32
Tabulka 2: Tabulka činitelů odrazu pro různé povrchy. Převzato z [4].....	33
Tabulka 3: Naměřené hodnoty materiálu pro $\lambda = 670$ nm.....	41
Tabulka 4: Naměřené hodnoty materiálu pro $\lambda = 808$ nm.....	42
Tabulka 5: Naměřené hodnoty materiálu bílá omítka pro $\lambda = 670$ nm.....	57
Tabulka 6: Naměřené hodnoty materiálu bílá omítka pro $\lambda = 808$ nm.....	58
Tabulka 7: Naměřené hodnoty materiálu žlutá omítka pro $\lambda = 670$ nm.....	59
Tabulka 8: Naměřené hodnoty materiálu žlutá omítka pro $\lambda = 808$ nm.....	60
Tabulka 9: Naměřené hodnoty materiálu zelená omítka pro $\lambda = 670$ nm.....	61
Tabulka 10: Naměřené hodnoty materiálu zelená omítka pro $\lambda = 808$ nm.....	62
Tabulka 11: Naměřené hodnoty materiálu modrá omítka pro $\lambda = 670$ nm.....	63
Tabulka 12: Naměřené hodnoty materiálu modrá omítka pro $\lambda = 808$ nm.....	64
Tabulka 13: Naměřené hodnoty materiálu černá omítka pro $\lambda = 670$ nm.....	65
Tabulka 14: Naměřené hodnoty materiálu černá omítka pro $\lambda = 808$ nm.....	66
Tabulka 15: Naměřené hodnoty materiálu hnědý koberec pro $\lambda = 670$ nm.....	67
Tabulka 16: Naměřené hodnoty materiálu hnědý koberec pro $\lambda = 808$ nm.....	68
Tabulka 17: Naměřené hodnoty materiálu referenční difúzní plochy pro $\lambda = 670$ nm.....	69
Tabulka 18: Naměřené hodnoty materiálu referenční difúzní plochy pro $\lambda = 808$ nm.....	70
Tabulka 19: Naměřené hodnoty materiálu světlé dřevo pro $\lambda = 670$ nm.....	71
Tabulka 20: Naměřené hodnoty materiálu světlé dřevo pro $\lambda = 808$ nm.....	72
Tabulka 21: Naměřené hodnoty materiálu sklo tloušťky 1,1 mm pro $\lambda = 670$ nm.....	73
Tabulka 22: Naměřené hodnoty materiálu sklo tloušťky 1,1 mm pro $\lambda = 808$ nm.....	74
Tabulka 23: Naměřené hodnoty materiálu plexisklo tloušťky 20 mm pro $\lambda = 670$ nm.....	75
Tabulka 24: Naměřené hodnoty materiálu plexisklo tloušťky 20 mm pro $\lambda = 808$ nm.....	76
Tabulka 25: Naměřené hodnoty materiálu šedý plech pro $\lambda = 670$ nm.....	77
Tabulka 26: Naměřené hodnoty materiálu šedý plech pro $\lambda = 808$ nm.....	78
Tabulka 27: Naměřené hodnoty vypnutého monitoru pro $\lambda = 670$ nm.....	80
Tabulka 28: Naměřené hodnoty vypnutého monitoru pro $\lambda = 808$ nm.....	80
Tabulka 29: Naměřené hodnoty materiálu černý plech pro $\lambda = 670$ nm.....	82
Tabulka 30: Naměřené hodnoty materiálu černý plech pro $\lambda = 808$ nm.....	82

# Úvod

O využití světla jako nositele informace uvažoval již A.G Bell spolu se svým spolupracovníkem Ch. S. Tainterem v roce 1880. K většímu rozvoji tohoto přenosu informace došlo ale až s rozvojem laseru a luminiscenčních diod. Bezdrátový optický spoj se obecně dělí na ty, které pracují ve vnitřních prostorách budov - indoor a vně budov – outdoor. K přenosu takového signálu se používá především IR spektrum především o vlnových délkách 850 nm, 950 nm, 1300 nm, 1480 nm a 1550 nm.

V indoor prostředích je nutné počítat s různými odrazy od stěn, stropu a různých překážek na optické cestě. Touto částí se zabývá tato bakalářská práce. Především se zaměříme na odrazivé vlastnosti materiálů a veličiny, které se této problematice týkají. Je také nutné počítat s tím, že signál se může šířit v prostředí, kde se může nacházet člověk. Proto je nutné prozkoumat také vliv určitých vlnových délek na člověka a zvolit vhodný kompromis. Také povrchová úprava materiálu – především barva - může člověka ovlivnit a je vhodné s těmito záležitostmi počítat.

V první části své bakalářské práce se zabýváme vlastnostmi světla a rovnicemi, které světelný paprsek popisují. Také rozdělení světla podle jeho působení na člověka. Rozebíráme blíže způsoby, jakými se světlo odráží od materiálů, a jakými veličinami a rovnicemi toto chování můžeme popisovat. Na závěr kapitoly popisujeme indoor bezkabelové optické spoje a parametry, které tento způsob šíření informace ovlivňují.

Druhá část mé práce je zaměřena na způsoby měření poměrné směrové odrazivosti a na samotné měření. Výsledky získané z těchto měření jsou poté graficky zpracovány a porovnány s ohledem na jejich použití na konci druhé části mé práce.

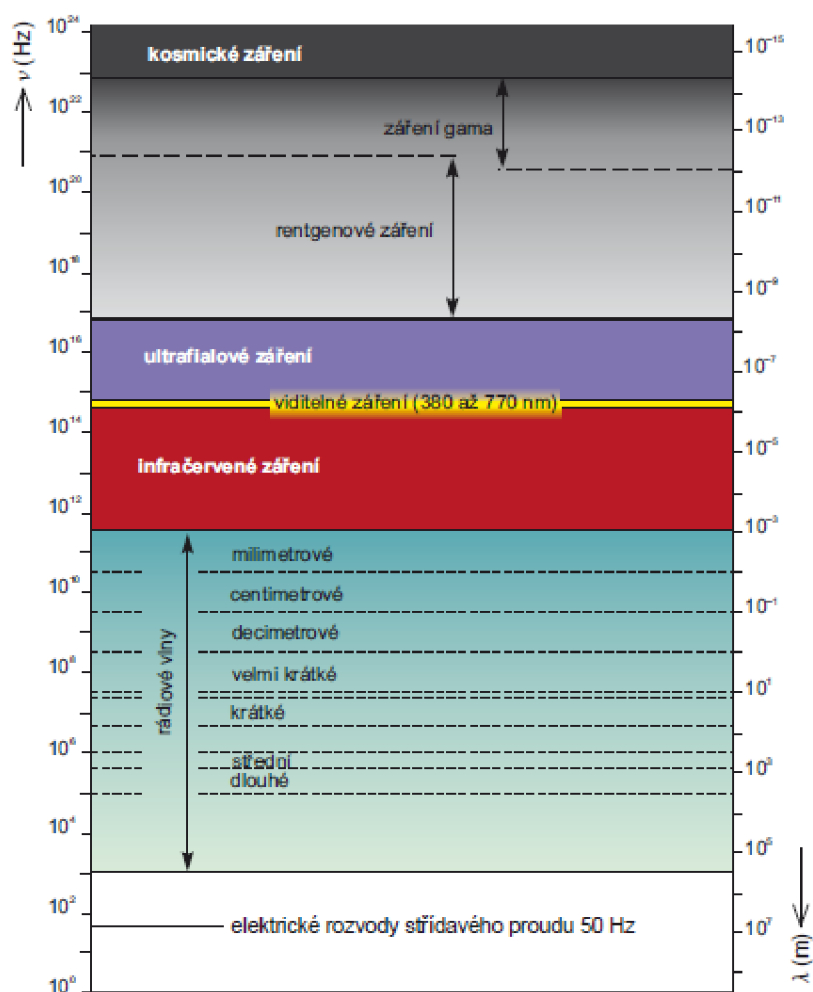
Třetí část mé práce tvoří technická dokumentace k měřeným materiál a povrchům, kde jsou zaznamenány a shrnuty všechny naměřené hodnoty i s rovnicemi, které daný materiál popisují.

# 1 Rozbor současného stavu problematiky

## 1.1 Světlo

Světlo je elektromagnetické vlnění popsané stejnými teoretickými principy, kterými se řídí všechny druhy elektromagnetického vlnění. Elektromagnetické záření se šíří ve tvaru dvou navzájem spjatých vektorových vln, vlny elektrického pole a vlny magnetického pole. [1]

Světlo se šíří v prostředí ve formě vln. Ve vakuu se světelné vlny pohybují konstantní rychlostí  $c_0 = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Oblast optických vlnových délek je tvořena třemi pásy – ultrafialovým (10 nm až 390 nm), viditelným (390 až 760 nm) a infračerveným (760 až 1 mm). Odpovídající oblastí optických frekvencí jsou  $3 \cdot 10^{11} \text{ Hz}$  do  $3 \cdot 10^{16} \text{ Hz}$ . [1]



Obrázek 1: Světelné spektrum, převzato z [5]

Optické prostředí je charakterizováno veličinou index lomu  $n$ , která dosahuje hodnot menších než jedna  $n \geq 1$ . Index lomu je poměr rychlosti světla ve vakuu  $c_0$  k rychlosti světla v prostředí  $c$ . Potřebný čas, aby světlo překonalo vzdálenost  $d$ , se rovná

$$\frac{d}{c} = \frac{nd}{c_0} \quad (1)$$

Je tedy úměrné součinu  $nd$ , známému jako délka optické dráhy. [1]

V prostředí s indexem lomu  $n$  postupují světelné vlny rychlostí menší než je rychlost světla. [1]

$$c = \frac{c_0}{n} \quad (2)$$

Matematicky můžeme popsat optickou vlnu reálnou funkcí polohy  $\mathbf{r} = (x, y, z)$  a času  $t$ . Tato reálná funkce se označuje  $u(\mathbf{r}, t)$  a nazývá se vlnová funkce. Vyhovuje vlnové rovnici:

$$\nabla^2 u - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

kde je Laplaceův operátor :

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (4)$$

Každá funkce vyhovující vlnové rovnici popisuje možnou optickou vlnu. Protože vlnová rovnice je lineární, platí princip superpozice, tj. představují-li  $u_1(\mathbf{r}, t)$  a  $u_2(\mathbf{r}, t)$  optické vlny, pak [1]

$$u(\mathbf{r}, t) = u_1(\mathbf{r}, t) + u_2(\mathbf{r}, t) \quad (5)$$

## 1.2 Účinky světla na člověka

### 1.2.1 Ultrafialové záření

Spektrum ultrafialového záření leží přibližně mezi vlnovými délkami 400 nm a 1 nm. Podle doporučení International commission on illumination tento rozsah vlnových délek rozdělujeme na 3 druhy UV záření, a to na UV-A v rozmezí 315 nm až 400 nm, UV-B v rozsahu 280 nm až 315 nm, a UV-C v rozsahu 100 až 280 nm. [4]

Největším zdrojem ultrafialového záření všech vlnových délek je Slunce. V jaké intenzitě toto UV záření dopadá na povrch Země, závisí na různých faktorech, jako například na ročním období, denní době, geografické šířce nebo nadmořské výšce – s každým tisícem

metrů nad úrovní moře vzrůstá množství přibližně o 15%. Umělým zdrojem UV záření je především elektrický oblouk, plasmový hořák a xenonové a rtuťové výbojky. [13]

Ultrafialové záření obecně zrychluje látkovou výměnu v lidském těle a zvyšuje účinnost dýchání a krevní tlak. Při častém vystavení lidské kůže působení UV záření může docházet k rychlejšímu stárnutí kůže a ke vzniku degenerativních kožních projevů. [13]

### **UV – C**

Do této kategorie patří UV záření, které má vlnovou délku menší než 280 nm. Ze všech druhů ultrafialového záření jsou tyto vlnové délky nejškodlivější pro lidský organismus. Z velké části je pohlcováno ozonovou vrstvou a na zemský povrch jej dopadá pouze malá část. Jeho působení je pro živé organismy negativní. Nejvýznamnější vlastnost této vlnové délky je schopnost ničit bakterie, viry, plísňe, kvasinky a jiné organismy. Princip působení spočívá hlavně ve fotochemických změnách nukleových kyselin, proteinů, enzymů a dalších důležitých biomakromolekul. Maximálních germicidních účinků (schopnost ničit živé organismy) dosahuje UV záření při vlnové délce 265 nm. [13]

Záření UV-C mimo germicidních účinků podporuje tvorbu vitamínu D v pokožce – antirachistický účinek (působí proti křivici rachitidě ). Tento vitamín zlepšuje schopnost lidského těla ukládat vápník do kostí. Také způsobuje rozšíření krevních kapilár, které způsobuje zčervenání kůže – tzv. erytém. Při velmi nízkých vlnových délkách UV-C není zrudnutí kůže následováno pigmentací pokožky a tudíž je pro člověka nebezpečné. Těchto vlastností UV záření se využívá především ve zdravotnictví ke sterilizaci . [13]

### **UV-B**

Tento interval vlnových délek se pohybuje v rozmezí 280 nm - 315 nm. Stejně jako u předchozího UV-C, větší část tohoto záření pohlcuje atmosféra. Přesto jej ale dostatečná část projde ozonovou vrstvou a působí na zdraví člověka. Ze všech UV pásem je nejdůležitější. Pro toto pásmo má UV záření maximální antirachistický účinek, a to na vlnové délce 283 nm a erytemální účinek na vlnové délce 297 nm. V tomto pásmu má erytém zesilující pigmentující účinek a zhnědnutí kůže způsobené UV-B má trvalejší charakter. Příliš intenzivní ozáření může způsobit zánět nebo puchýře na kůži. Tato reakce je u člověka velmi individuální a závisí na citlivosti kůže. Větší množství UV-B může mít za následek rakovinu kůže. V rozumné míře se UV-B používá v kombinaci s infračerveným zářením k terapii, jedná se o tzv. horské slunce. [13]

### **UV-A**

Oblast UV- A se nachází mezi vlnovými délkami 315 až 380 nm. Tuto část ultrafialového záření atmosféra planety Země téměř nezachycuje. Z celkového UV záření , které dopadá na povrch, tvoří UV-A 90-99%. Na těchto vlnových délkách dochází k největším účinkům na člověka z hlediska pigmentace a fotochemických účinků, a to na vlnových délkách 340nm a 360 nm. [13]

Pigmentace lidské kůže je způsobena fotooxidací melaninu v pigmentových buňkách a pro tyto vlnové délky se většinou obejde bez erytému. Pigment je pro lidské tělo prospěšný, protože brání průchodu UV záření do hlubších vrstev kůže. Umělým zdrojem UV- A a částečně i UV-B jsou zářiče v soláriích. [13]

### 1.2.2 Viditelné záření

Vlnové délky světla, které dokáže vnímat lidské oko, se nachází v rozmezí 380 až 780 nm. Vytváří viditelné barevné spektrum a tyto vlnové délky představují cca 48% energie slunečního záření. Viditelné světlo umožňuje fotosyntézu rostlin a ovlivňuje důležité životní funkce většiny organismů. Střídání světla a tmy ovlivňuje fyziologické pochody v lidském těle. Pomocí měření bylo zjištěno, že některé barvy stimulují enzymy v lidském těle na účinnost až 5 krát vyšší, než je obvyklé. Naopak jiné barvy některé enzymy vyřadí z činnosti . [13]

Lidskou psychiku a duševní pohodu také ovlivňují barvy a intenzita světla. Vyšší intenzita osvětlení navozuje pocit radosti a optimismu. Také pozitivně ovlivňuje výkonost. Nízká úroveň osvětlení působí opačným způsobem. Dlouhodobě slabá úroveň světla může navozovat stavy úzkosti, deprese a urychluje nástup únavy. [13]

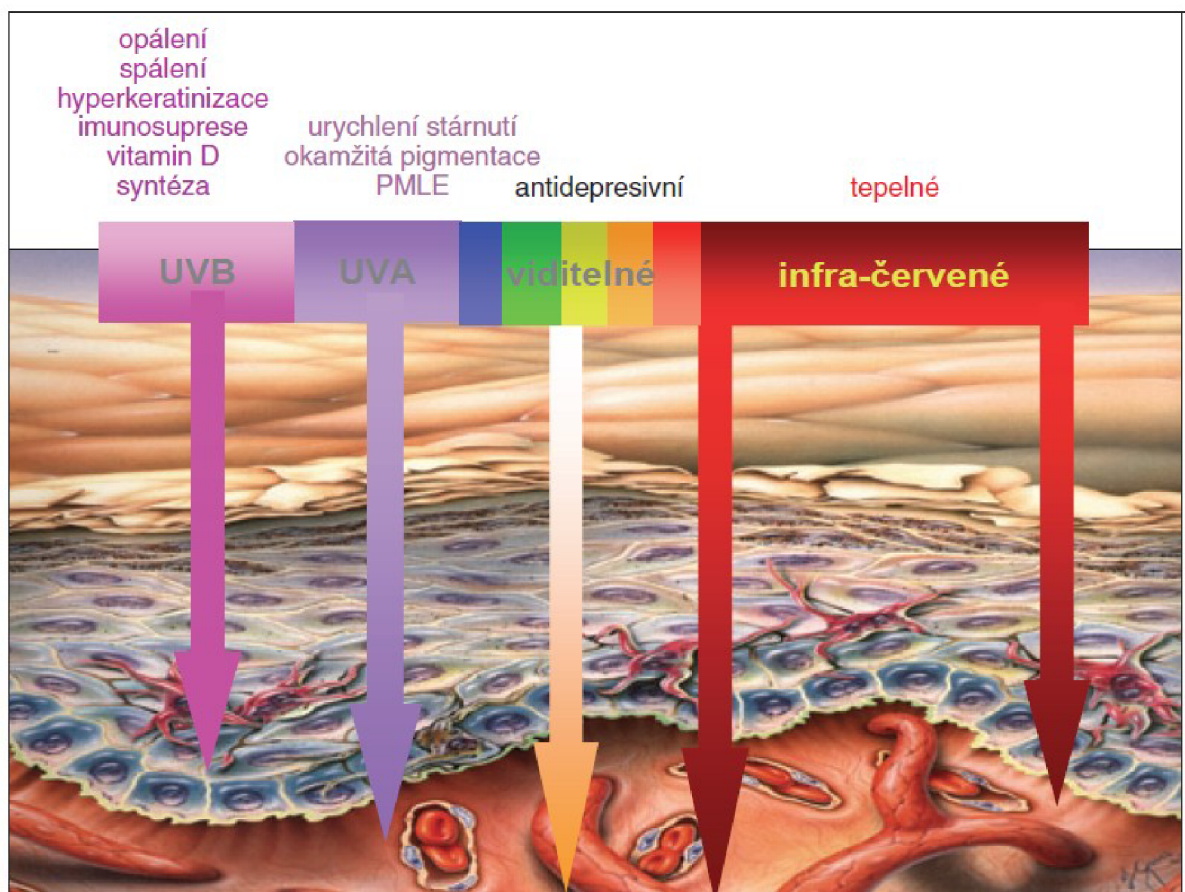
Fialové a modré světlo má dostatečnou energii k vyvolání některých fotochemických reakcí na kůži. Po přílišném vystavení účinkům těchto vlnových délek může dojít k poškození kůže, které je podobné svými následky jako u působení UV záření. [13]

### 1.3 Infračervené záření

Pojmem infračervené záření (IR) označujeme poměrně velkou část elektromagnetického vlnového spektra od vlnové délky 1 mm až po 760 nm . Navazuje na milimetrové elektromagnetické vlny a na opačném konci dosahuje až k oblasti červeného viditelného spektra. Dělení do pásem s odlišnými vlastnostmi je podobné, jako u UV záření. Blízké infračervené záření IR-A má vlnovou délku od 760 nm do 1,4  $\mu\text{m}$ , IR-B se nachází mezi vlnovými délkami 1,4  $\mu\text{m}$  až 3  $\mu\text{m}$ , IR-C pak označujeme vlny delší než 3  $\mu\text{m}$  a kratší než 1 mm. [13]

Největším zdrojem IR záření je Slunce. Infračervené záření ale produkují ve velké míře všechna rozžhavená tělesa. Do této skupiny počítáme i umělé zdroje světla. Infračervené světlo má především tepelné účinky. Pásmo IR-A má podobné účinky jako viditelné světelné spektrum a také ze všech tří druhů IR záření nejlépe prostupuje látkou. Voda tuto vlnovou délku příliš neabsorbuje, tudíž prostupuje hluboko do lidského podkoží. Oproti tomu záření IR-B a IR-C je vodou velmi dobře pohlcováno a dále než do kůže se nedostane. Nejvýznamnější účinek IR-A záření je rozšíření kapilár a vznik tepelnému erytému. Jednorázové vystavení vysoké intenzitě IR záření může způsobit popáleniny. Před těmito účinky IR záření se organismus brání úhybnou reakcí. [13]





Obrázek 2: Biologické účinky UV záření (okamžité a dlouhodobé), PMLEM - polymorfni světelná erupce (druh alergie na sluneční záření) [12]

#### 1.4 Monochromatická vlna

Monochromatická vlna je vyjádřena vlnovou funkcí s časovou harmonickou závislostí,

$$u(\mathbf{r}, t) = a(\mathbf{r}) \exp[2\pi f t + \varphi(\mathbf{r})] \quad (6)$$

kde  $a(\mathbf{r})$  označuje amplitudu a  $\varphi(\mathbf{r})$  fázi vlny. Amplituda i fáze jsou obecně závislé na poloze, ale vlnová funkce je harmonickou funkcí času s frekvencí  $f$  v každém místě. Frekvence optických vln leží v oblasti  $3 \cdot 10^{11}$  až  $6 \cdot 10^{16}$  Hz. [1]

#### 1.5 Komplexní vlnová funkce

Reálnou vlnovou funkcí  $u(\mathbf{r}, t)$  ve vzorci (6) je výhodné vyjádřit pomocí komplexní funkce

$$U(\mathbf{r}, t) = a(\mathbf{r}) \exp[j\varphi(\mathbf{r})] \exp[j2\pi vt] \quad (7)$$

tak, že [1]

$$u(\mathbf{r}, t) = \Re U(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2} [U(\mathbf{r}, t) + U^*(\mathbf{r}, t)] \quad (8)$$

Funkce  $U(\mathbf{r}, t)$  známá jako komplexní vlnová funkce popisuje úplně vlnu, vlnová funkce  $u(\mathbf{r}, t)$  je prostě její reálná část. Vlnová funkce a komplexní vlnová funkce musí vyhovovat vlnové rovnici:

$$\nabla^2 U - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0 \quad (9)$$

Obě dvě funkce splňují stejné okrajové podmínky. [1]

## 1.6 Helmholtzova rovnice

Dosazením  $U(\mathbf{r}, t) = U(\mathbf{r}) \exp(j2\pi vt)$  do vlnové rovnice dostaneme diferenciální rovnici,

$$(\nabla^2 + k^2) U(\mathbf{r}) = 0 \quad (10)$$

která se nazývá Helmholtzova rovnice, kde

$$k = \frac{2\pi\nu}{c} = \frac{\omega}{c} \quad (11)$$

je vlnové číslo. [1]

## 1.7 Rovinná vlna

Rovinná vlna má komplexní amplitudu

$$U(\mathbf{r}) = A \exp(-j \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) = A \exp[-j(k_x x + k_y y + k_z z)] \quad (12)$$

kde  $A$  je komplexní konstanta zvaná komplexní obálka a vektor  $\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)$  se nazývá vlnový vektor. Aby funkce (12) splňovala Helmholtzovu rovnici (10), musí být

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2 \quad (13)$$

takže velikost vlnového vektoru  $\mathbf{k}$  je vlnové číslo  $k$ . [1]

Protože pro fázi platí  $\arg\{U(\mathbf{r})\} = \arg\{A\} - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}$ , splňují vlnoplochy vztah

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} = k_x x + k_y y + k_z z = 2\pi q + \arg A \quad (14)$$

kde ( $q =$  celé číslo). Je to rovnice popisující rovnoběžné roviny kolmé k vlnovému vektoru  $\mathbf{k}$ . Tyto roviny jsou od sebe vzdálené  $\lambda = 2\pi/k$ , takže

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (15)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka. Rovinná vlna má všude v prostoru konstantní intenzitu  $I(\mathbf{r}) = |A|^2$ , takže přenáší nekonečně veliký výkon. Tato vlna je idealizací, protože existuje ve všech bodech prostoru a ve všech časech (všude a vždy). [1]

Položíme-li osu  $z$  do směru vlnového vektoru  $\mathbf{k}$ , pak  $U(\mathbf{r}) = A \exp(-jkz)$  a odpovídající vlnová funkce

$$u(\mathbf{r}, t) = A \cos[2\pi ft - kz + \arg A] = A \cos[2\pi \nu(t - z/c) + \arg A] \quad (16)$$

Vlnová funkce je tedy periodická v čase s periodou  $1/f$  a periodická v prostoru s periodou  $2\pi/k$ , která se rovná vlnové délce  $\lambda$ . Fáze komplexní vlnové funkce  $\arg\{U(\mathbf{r}, t)\} = 2\pi\nu(t - z/c) + \arg\{A\}$  se v prostoru a čase mění jako funkce proměnné  $t - z/c$ , můžeme  $c$  označit jako fázovou rychlost vlny. [1]

V prostředí s indexem lomu  $n$  je fázová rychlost  $c = c_0/n$  a vlnová délka  $\lambda = c/\nu = c_0/nf$ , takže  $\lambda = \lambda_0/n$ , kde  $\lambda_0 = c_0/f$  je vlnová délka ve vakuu. V reálném prostředí pro stejnou frekvenci  $f$  je vlnová délka v tomto prostředí vzhledem k vlnové délce ve vakuu  $n$ -krát menší. Vlnové číslo  $k = 2\pi/\lambda$  vzhledem k vlnové délce ve vakuu ( $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ ) úměrně s  $n$  roste. [1]

Monochromatická vlna, která se šíří prostředími s různými indexy lomu, má ve všech prostředích stejnou frekvenci, ale její rychlost, vlnová délka a vlnové číslo se mění v závislosti na indexu lomu  $n$ . [1]

$$c = \frac{c_0}{n}, \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{n}, \quad k = nk_0 \quad (17)$$

## 1.8 Šíření světla

Optické paprsky šířící se mezi dvěma body A a B sledují takovou dráhu, aby doba chodu paprsků (nebo délka optické dráhy) mezi dvěma body dosahovala extrémních hodnot vzhledem k sousedním drahám. Pod pojmem extrémní rozumíme nulovou rychlost změny. Extrémním případem může být minimum nebo maximum. Pro světelné paprsky předpokládáme ovšem minimum a v tomto případě se světelné paprsky šíří podél dráhy s nejmenší dobou šíření. Někdy může minimální doba příslušet více než jedné dráze, světelné paprsky pak současně sledují všechny tyto dráhy. [1]

V homogenním prostředí s indexem lomu  $n$ , který je v celém prostředí konstantní, je konstantní i rychlost světla. Dráha s minimálním časem požadovaná Fermatovým principem je totožná s dráhou s minimální vzdáleností. Vzdálenost mezi dvěma body spojíme nejkratším způsobem pomocí přímky, tudíž můžeme říct, že v homogenním prostředí se světelné paprsky šíří přímočaře. [1]

## 1.9 Světelný tok

Světelně technická veličina odpovídající zářivému toku a vyjadřující schopnost zářivého toku způsobit zrakový vjem. Jednotkou světelného toku je 1 lumen (lm). Světelný tok  $\Phi$  monochromatického záření vlnové délky  $\lambda$ , jehož zářivý tok je  $\Phi_e$  se určí ze vztahu [4] :

$$\phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda) = K_{m,V}(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda) = 683 \cdot V(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda) \quad (18)$$

Veličina  $K(\lambda)$  je světelná účinnost monochromatického záření rovná poměru světelného toku a jemu odpovídajícího zářivého toku. Maximum  $K_m$  veličiny  $K(\lambda)$  bylo stanoveno poměrně přesnými měřeními a výpočty pro normálního fotometrického pozorovatele při fotopickém (denním) vidění a záření základní vlnové délky  $\lambda = \lambda_m = 555,155$  nm a činní  $K_m = 683$  lm.W<sub>-1</sub>. [4]

Poměrná světelná účinnost  $V(\lambda)$  monochromatického záření je definovaná vztahem [4]:

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} = \frac{K(\lambda)}{683} \quad (19)$$

Světelný tok  $\Phi$  záření z různých monochromatických záření, jehož zářivý tok  $\Phi_e$  je dán průměrem  $\Phi_e(\lambda)$ , se zjistí z rovnice

$$\phi = 683 \int_0^\infty \left( \frac{d \cdot \phi_e(\lambda)}{d \lambda} \right)_\lambda \cdot V(\lambda) \cdot d \lambda \quad (20)$$

kde

$$\left( \frac{d \cdot \phi_e(\lambda)}{d \lambda} \right)_\lambda \quad (21)$$

je spektrální hustota zářivého toku v bodě  $\lambda$ . [4]

## 1.10 Intenzita, výkon, energie

Optická intenzita  $I(\mathbf{r}, t)$  definovaná jako optický výkon na jednotku plochy (jednotky W.m<sup>-2</sup>) je úměrná střední hodnotě mocniny vlnové funkce.

$$I(\mathbf{r}, t) = 2[u^2(\mathbf{r}, t)] \quad (22)$$

Operace násobení označuje středování přes časový interval, který je mnohem delší než je doba periody optické vlny, ale mnohem kratší, než všechny další uvažované časy (jako je například trvání světelného impulzu). Perioda optické vlny je mimořádně krátká; např.  $2 \times 10^{-15}$  s = 2 fs pro světlo o vlnové délce 600 nm. [1]

Optický výkon  $P(t)$  [Watt] dopadající na plochu  $A$  kolmo ke směru šíření světla je roven intenzitě integrované přes plochu  $A$ . [1]

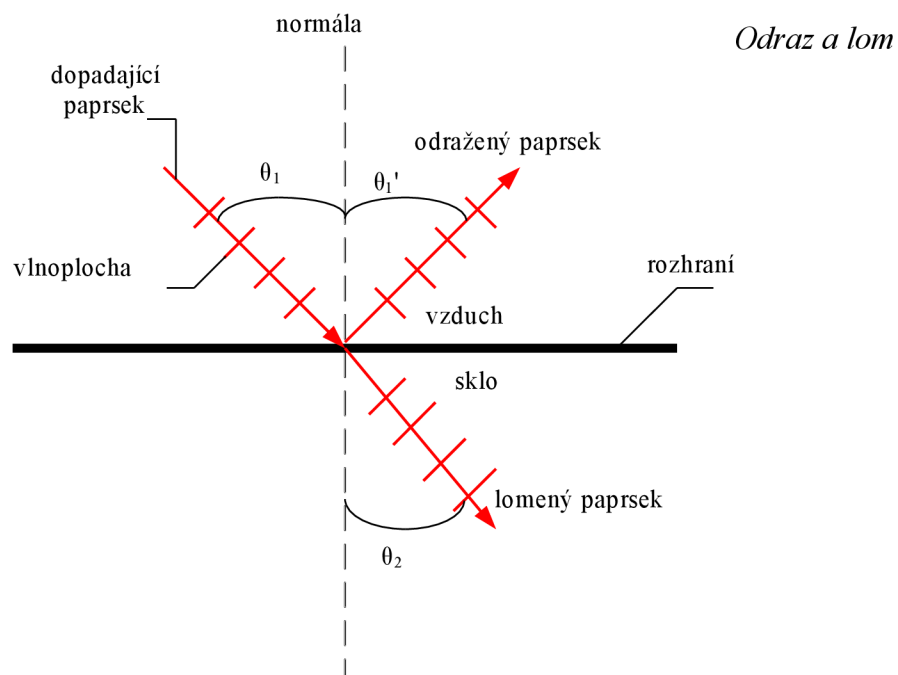
$$P(t) = \int_A I(\mathbf{r}, t) dA \quad (23)$$

Optická energie (v Joulech), která dopadne za daný časový interval, je časový integrál optického výkonu přes uvažovaný časový interval. [1]

## 1.11 Odraz a lom

Světelná vlna se při šíření prostředím rozptyluje s rostoucí vzdáleností od zdroje. I přesto můžeme její dráhu aproximovat jako přímku. Pokud světlo prochází skrz povrch, který rozděluje dvě prostředí, dochází k lomu světelného paprsku. Pokud směr dopadajícího svazku není kolmý k povrchu, ale dopadá pod úhlem  $\theta$ , vede lom na rozhraní ke změně směru šíření světla. Světlo tedy při lomu mění svůj směr. [2]

Obrázek 3:



Na Obrázku 3 jsou paprsky světla reprezentovány paprskem dopadajícím, odraženým a lomeným. Každý z těchto paprsků má určitý směr vzhledem ke směru normály, tj. kolmice k povrchu v místě dopadu paprsku. Na obrázku je úhel dopadu  $\theta_1$ , úhel dorazu  $\theta_1'$  a úhel lomu. Všechny se měří směrem k normále. [2]

### 1.11.1 Zákon odrazu

Odražený paprsek leží v rovině dopadu a úhel dopadu se rovná úhlu odrazu. Tuto situaci znázorňuje obrázek 3. [2]

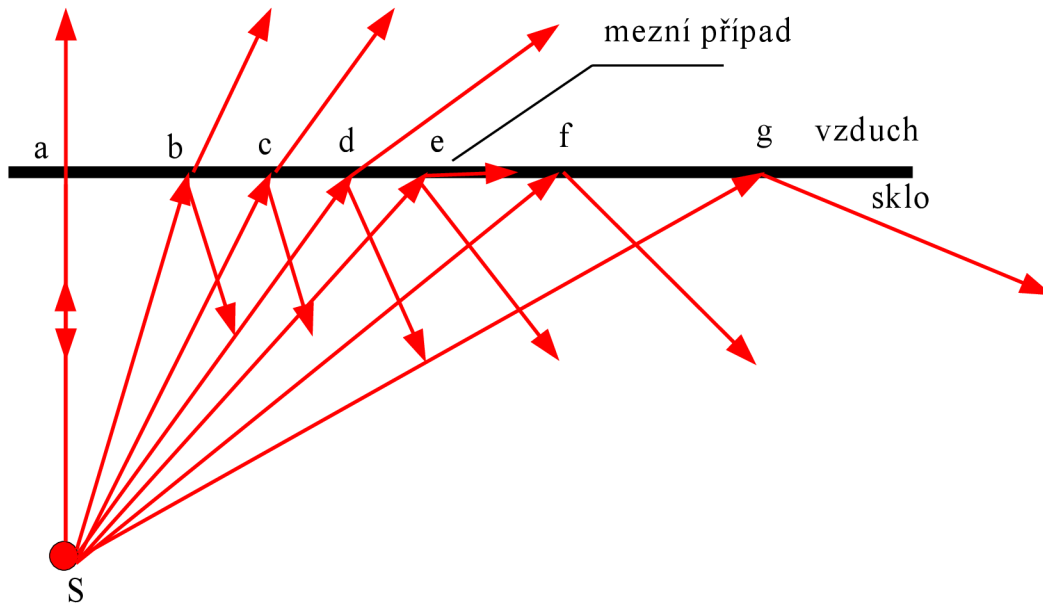
$$\theta_1' = \theta_1 \quad (24)$$

### 1.11.2 Zákon lomu

Lomený paprsek leží v rovině dopadu a úhel lomu je spojen s úhlem dopadu vztahem:

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1 \quad (25)$$

### 1.12 Úplný odraz



Obrázek 4: Ilustrace odrazů

Obrázek 4 ukazuje paprsky monochromatického světla z bodového zdroje S uvnitř skla, které dopadají na rozhraní mezi vzduchem. Paprsek a, který je kolmý k rozhraní, se na rozhraní částečně odrazí, částečně projde, aniž by změnil svůj směr. [2]

Pro paprsky od b do e, které mají postupně větší úhly dopadu, nastává také odraz na rozhraní. Když roste úhel dopadu, roste i úhel lomu. Pro paprsek e je tento úhel roven  $90^\circ$ , to znamená, že se lomený paprsek šíří těsně podél povrchu. Úhel dopadu, který vede k této situaci, nazýváme mezní úhel dopadu  $\theta_m$ . Pro úhly větší, než je tento úhel, jako jsou na obrázku 4 paprsky f a g, nedojde k průchodu paprsku materiálem a všechno světlo se odrazí zpět. [2]

Abychom našli  $\theta_m$ , použijeme vzorce 25 a po úpravě:

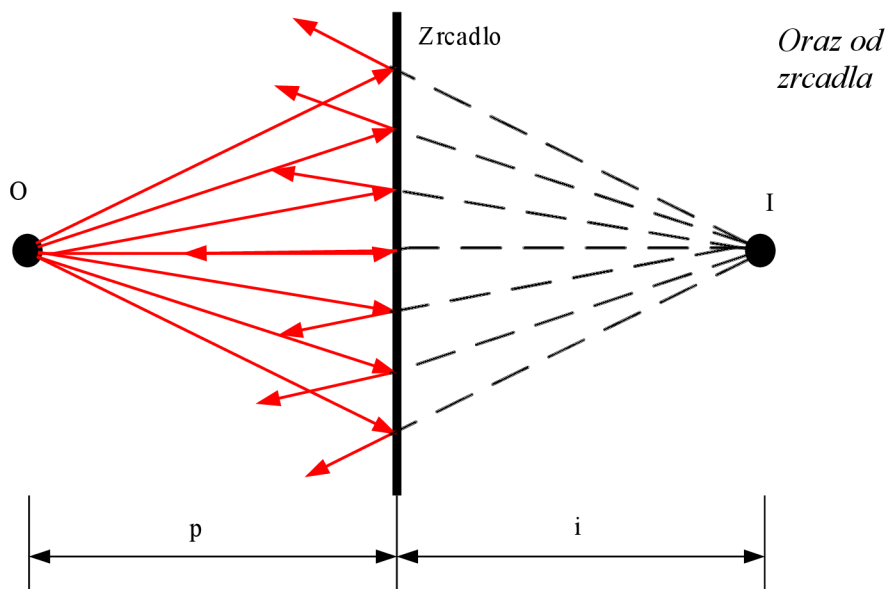
$$\theta_m = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (26)$$

Protože sinus nemůže být větší než jedna, nemůže  $n_2$  být v této rovnici větší než  $n_1$ . To znamená, že úplný odraz nemůže nastat, když je zdroj světla v prostředí s nižším indexem lomu. Kdyby zdroj S v obrázku 4 byl ve vzduchu, všechny paprsky dopadající na rozhraní vzduch - sklo (včetně f a g) by se na rozhraní odrazily i lomily. [2]

### 1.13 Rovinné zrcadlo

Zrcadlo je povrch, který odrazí úzký svazek světelných paprsků do jediného směru. Jiné povrchy jej rozptylují do více směrů, nebo pohlcují světelné paprsky. Leštěný povrch kovu působí jako zrcadlo stejně jako jiné lesklé materiály, naopak betonová stěna, která je matná a drsná, jako zrcadlo nemůže působit. Na obrázku 5 je bodový zdroj světla O, který leží ve vzdálenosti  $p$  před ideálním zrcadlem. Světlo dopadající na zrcadlo je znázorněno červenými paprsky, které se šíří z bodového zdroje O. Odraz světla znázorňují paprsky šířící se směrem od rovinného zrcadla. Představíme-li si, že odražené paprsky prodloužíme dozadu (za zrcadlo), zjistíme, že prodloužené paprsky se protínají v bodě ležícím ve vzdálenosti  $i$  za zrcadlem a setkávají se v imaginárním bodě I, který je ve stejné vzdálenosti od zrcadla, jako bodový zdroj O. [2]

Obrázek 5:  
rovinného



Odražený paprsek leží v rovině dopadu; úhel odrazu se rovná úhlu dopadu. [1]

### 1.14 Odrazivost

Odrazivost se značí  $\rho$  a pohybuje se v rozmezí hodnot 0 až 1. Rovnice odrazivosti je

$$\rho = \frac{\Phi_0}{\Phi} \quad (27)$$

tato veličina je bezrozměrná. Proměnná  $\Phi_0$  je odražený světelný tok a  $\Phi$  je světelný tok

dopadající na plochu, od které se odráží. Nejjednodušším odrazem světla je zrcadlový odraz. [2]

### 1.15 Rozptylový odraz

Povrch, který se vyznačuje rozptylovým odrazem, se řídí tzv. Lambertovým zákonem a je matný. Lambertův zákon se vyjadřuje

$$I_{\gamma} = I_0 \cdot \cos(\gamma) \quad (28)$$

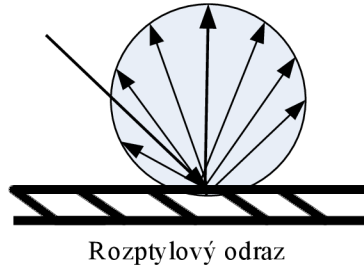
kde  $I_0$  je svítivost ve směru normály na odraznou plochu. To znamená, že hodnota svítivosti rovinného plošného zdroje klesá s kosinem odklonu  $\gamma$  od kolmice k ploše zdroje. Zářiče, které září podle Lambertova zákona se nazývají kosinové. [8]

Praxe potvrzuje, že pro různé povrchy je třeba znát kromě hodnoty činitele odrazu i to, jak se světlo po odrazu vrací zpět do prostředí, ze kterého přichází. [7]

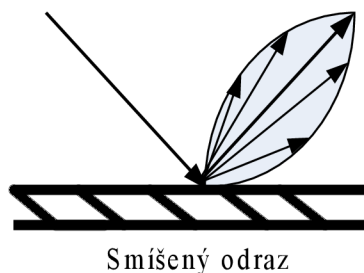
Nejjednodušším případem odrazu světla ve shodě se zákonem odrazu je zrcadlový odraz (viz kapitola Rovinné zrcadlo). Jas zrcadlového povrchu je určen vztahem :

$$L = \rho L_z \quad (29)$$

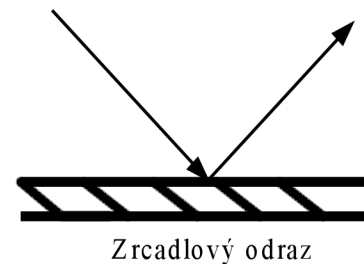
kde  $\rho$  je činitel odrazu a  $L_z$  je jas světelného zdroje. [7]



Obrázek 6: Rozptylový odraz



Obrázek 7: Smíšený odraz



Obrázek 8: Zrcadlový odraz



Odraz světla do různých směrů, při kterém nevzniká zrcadlový odraz, nazýváme rozptylovým odrazem. Povrch, který se vyznačuje rozptylovým odrazem, je matný (difúzní). [7]

Jas plochy rozptylujícího odrazu vyjadřuje vztah :

$$L = \frac{\rho E}{\pi} \quad (30)$$

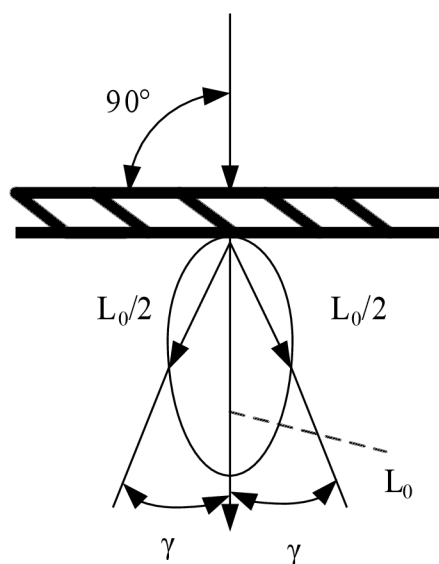
kde  $E$  je intenzita osvětlení plochy rozptylujícího odrazu. [7]

Při většině povrchů vzniká smíšený odraz. Smíšeným odrazem nazýváme současný zrcadlový i rozptylový odraz. To znamená, že při smíšeném odrazu můžeme činitel odrazu rozdělit na činitel zrcadlového odrazu  $\rho_z$  a činitel rozptylového odrazu  $\rho_r$ . Potom

$$\rho = \rho_z + \rho_r \quad (31)$$

Povrch, který se vyznačuje smíšeným odrazem, je polo matný. [7]

Těleso, které mění rozložení světelného toku především rozptylem, nazýváme difuzér. Představu o tom, jak se chová difuzér, získáme nejlépe pomocnou plochou rozptylu. Plocha rozptylu tvoří koncové body orientovaných úseček, vycházejících z elementu povrchu anebo objemu difuzéru, které znázorňují poměrnou svítivost anebo poměrný jas elementu v uvažovaném směru. Na popis vlastností difuzéru se používají především úhel polovičního jasu a nebo dohodnutý činitel rozptylu. [7]



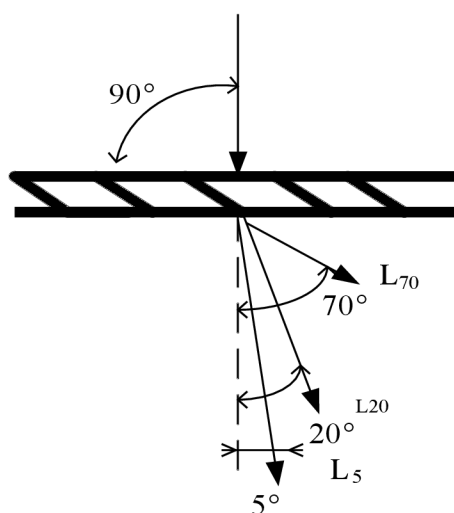
Určení úhlu polovičního jasu

Obrázek 9: Určení úhlu polovičního jasu

Úhel polovičního jasu plochy rozptylujícího odrazu je úhel  $\gamma$ . Úhel  $\gamma$  svírá normála plochy se směrem, ve kterém je jas poloviční v porovnání s jasem ve směru normály za předpokladu, že plocha je osvětlená kolmo. [7]

Dohodnutý činitel rozptylu je podíl aritmetického průměru hodnot jasu naměřených mezi úhly  $20^\circ$ ,  $70^\circ$  a jasu pod úhlem  $5^\circ$  do normály, a to při kolmém dopadu světla. V tom případě platí [7]

$$\sigma = \frac{L_{20} + L_{70}}{2L_5} \quad (32)$$



Určení  
dohodnutého  
činitele rozptylu

Obrázek 10: Určení dohodnutého činitele jasu

Hodnotu 1 má dohodnutý činitel rozptylu pro rovnoměrný difuzér. Přitom rovnoměrným difuzérem nazýváme difuzér, jehož jas je ve všech směrech stejný, a to při kterémkoliv směru dopadu světla (řídíme se předpoklady Lambertova zákona). [7]

## 1.16 Poměrná odrazivost

Reflexní a difúzní účinky optických povrchů (povrchů ozářených optickou vlnou) lze měřit tzv. poměrnou směrovou odrazivostí povrchů (*PSO*). [6]

Optické záření, které se odráží a je rozptýlováno optickou plochou, obsahuje složku reflexní a difúzní. Přesné rozložení reflexní a difúzní složky závisí na materiálu povrchu, tvaru a povrchové úpravě plochy. Další činitele, které odrazivé a rozptylové složky ovlivňují, jsou směr dopadajícího záření, stav polarizace a časová a prostorová koherence. [6]

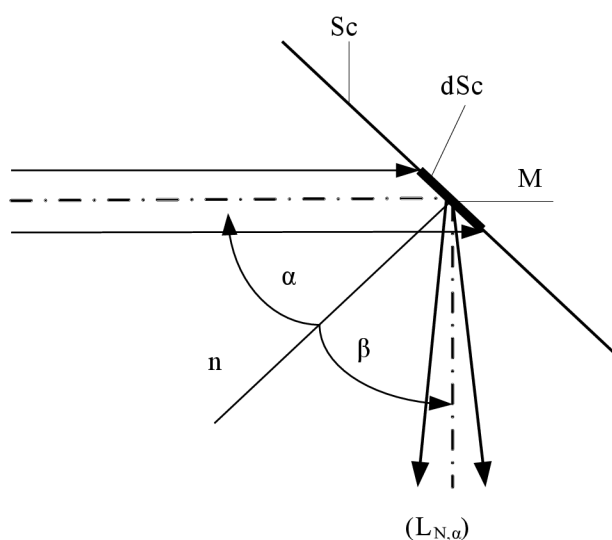
*PSO* určitého místa povrchu (bod M) je definována jako zář reálného povrchu bodu M dělená zář ideální difúzní plochy (s jednotkovou odrazivostí), která je ozařována stejnou intenzitou ozáření jako reálný povrch bodu M. Vzhledem k charakteru ideální difúzní plochy

je pak možno  $PSO$  vyjádřit následujícím způsobem

$$PSO_{M, \alpha}(\beta) = \frac{\pi L_m \alpha(\beta)}{I_i \cos(\alpha)} \quad (33)$$

kde  $L_{M, \alpha}(\beta)$  je zář reálné plochy v bodu M, dopadá-li na něj záření intenzity  $I_i$  pod úhlem  $\alpha$ ;  $\beta$  je úhel mezi normálou ozařované plochy a směrem, ve kterém se záření přijímá. Situace objasňující vztah (33) je znázorněna na obrázku 11. Pro jednoduchost předpokládáme, že úhly  $\alpha$  a  $\beta$  leží v jedné rovině a směrová reflexně-difúzní charakteristika je osově symetrická vůči normále povrchu v bodu M. [6]

$PSO$  je lokální veličinou, charakterizující směrové odrazivě-rozptylové vlastnosti elementární části optické plochy. [6]



Obrázek 11: K definici  $PSO$  ( $dSc$  - elementární část ozařovaného povrchu  $Sc$ ,  $n$  - normála povrchu v bodu  $M$ )

### 1.17 Mnohonásobný odraz

Duté plochy se vyznačují mnohonásobným odrazem. Tento fakt musíme brát v potaz zejména při difuzérech nebo osvětlování místností. [7]

Ze zákona zachování energie vyplývá, že světelný tok  $\Phi'$ , který dopadá ze zdroje na plochu A, se v ustáleném stavu (který se vytvoří za zlomek sekundy) rovná součtu pohlceného dutou plochou a toku vycházejícího otvorem do prostoru

$$\Phi = \Phi(1 - \rho) + \Phi \rho(1 - u_{AA}) \quad (34)$$

kde  $\Phi_A$  je světelný tok, který v ustáleném stavu dopadá na odrážející plochu A,  $\rho$  je činitel odrazu plochy A a  $u_{AA}$  je činitel využití plochy A proti ploše A. [7]

Světelný tok vycházející z dutiny A do prostoru je úměrný činiteli využití světelné plochy A proti ploše výstupního otvoru a. Přitom platí

$$u_{Aa} = 1 - u_{AA} \quad (35)$$

Příslušný činitel využití pro rozptylový odraz můžeme určit z rovnosti

$$MA_{Aa} = Ma \quad (36)$$

kde  $M$  je svítivost odrážející plochy A plochy výstupního otvoru a. [7]

$$u_{Aa} = \frac{a}{A} \quad (37)$$

Poznamenáváme, že podíl světelného toku  $\Phi_A$ , který v ustáleném stavu dopadá na odrážející plochu, a toku  $\Phi'$ , který dopadá zvenku ze zdroje na plochu A, nazýváme činitelem mnohonásobného odrazu. Potom platí:

$$\gamma = \frac{\Phi_A}{\Phi'} = \frac{1}{1 - \rho u_{AA}} = \frac{1}{1 - \rho(1 - u_{Aa})} \quad (38)$$

Na základě tohoto vztahu činitel mnohonásobného odrazu závisí na tvaru odrážející plochy a činiteli odrazu  $\rho$ . [7]

U rovinné plochy, stejně jako u vypouklých ploch je  $\gamma = 1$ . V těchto případech  $u_{Aa} = 1$ . U dutých ploch  $u_{Aa} < 0$  proto  $\gamma > 1$ . Při uzavřené ploše

$$\gamma = \frac{1}{1 - \rho} \quad (39)$$

nebo v případě  $u_{Aa} = 0$ . [7]

## 1.18 Pohlcení (prostup) světla

Pohlcení (prostup) světelného toku při vlnové délce  $\lambda$  a při kolmém průchodu světelných paprsků v pohlcujícím a mírně rozptylujícím prostředí vyjadřuje Bouguerův-Lambertův-Beerův zákon. Jde o vztah :

$$-d\Phi_\lambda = \alpha\Phi_\lambda dl \quad (40)$$

kde  $d\Phi_\lambda$  je elementární pohlcení světelného toku ve vrstvě prostředí hloubky  $dl$ ,

$\alpha$  - exponenciální součinitel pohlcení s přirozeným základem

$\Phi_\lambda$  - světelný tok, který dopadá na vrstvu prostředí

$dl$  - elementární hloubka vrstvy prostředí. [7]

Záporné znaménko souvisí s tím, že elementární pohlcení světelného toku  $d\Phi_\lambda$  značí oslabení předcházejícího toku ve vrstvě prostředí. [7]

Integrováním předcházejícího vztahu a úpravou dostaneme

$$\tau_\lambda = \frac{(\Phi_\lambda)_\tau}{\Phi_\lambda} = e^{-al} \quad (41)$$

kde  $(\Phi_\lambda)_\tau$  je světelný tok který prochází vrstvou prostředí,  $l$  je pak hloubka vrstvy prostředí. [7].

Z předchozího vztahu vyplývá, že při kolmo průchozím svazku světelných paprsků v pohlcujícím a mírně rozptylujícím prostředí hloubky  $l = 1/a$  nastane oslabení procházejícího světelného toku ve vrstvě prostředí 2,718 – krát, tedy [7]:

$$\tau_\lambda = \frac{1}{e} \quad (42)$$

Předchozí vztah můžeme dále upravit na tvar

$$\tau_\lambda = 10^{-al} \quad (43)$$

kde  $a$  je exponenciální součinitel pohlcení s dekadickým základem. [7]

## 1.19 Atmosférické prostředí

Pod pojmem optický bezkabelový spoj si představíme plně duplexní spoj, který se šíří v atmosférickém prostředí a k přenosu informace využívá optickou nosnou vlnu. Optická vlna obsahuje jeden nebo několik kanálů, jejichž výkon se soustředí do úzkého svazku. Pro nejjednodušší případ modulace takového signálu se využívá digitální intenzivní modulace. Optické bezkabelové spoje jak spoje provozované v uzavřených místnostech, tak spoje realizované v ovzduší (troposféře) nebo v kosmickém prostoru. [3]

Atmosférické přenosové prostředí velkou měrou ovlivňuje kvalitu přenosu a dosah signálu. Toto prostředí je obecně nestálé a nestejněměrné (předpokládá se, že je také dielektrickým, lineárním, nedisperzivním, izotropním) a jeho vliv na kvalitativní a kvantitativní parametry přenosového kanálu mají náhodný charakter. [3]

Pro popis vlivu atmosférického přenosového prostředí na optický bezkabelový spoj využíváme koeficient zeslabení  $\alpha$  a index lomu prostředí  $n$ . Obě veličiny závisí na jejich poloze v prostoru a času. Dalším faktorem, který je ovlivňuje, je vlnová délka vysílaného signálu. Statický charakter koeficientu zeslabení je vyjádřen variací  $\delta_\alpha^2$  a střední hodnotou  $\bar{\alpha}$ . Statický charakter indexu lomu se vyjadřuje strukturním parametrem indexu lomu  $C_n^2$  a střední hodnotou  $\bar{n}$ . [3]

$$\alpha = \alpha(\vec{r}, r, \lambda); \bar{\alpha}; \sigma_\alpha^2 \quad (44)$$

$$n=n(\vec{r}, r, \lambda); \bar{n}; C_{\alpha}^2 \quad (45)$$

Pro ohodnocení zeslabení v atmosférickém přenosovém prostředí vycházíme z Bouguerova zákona:

$$dI(\lambda)=-\alpha(\lambda)I(\lambda)dz \quad (46)$$

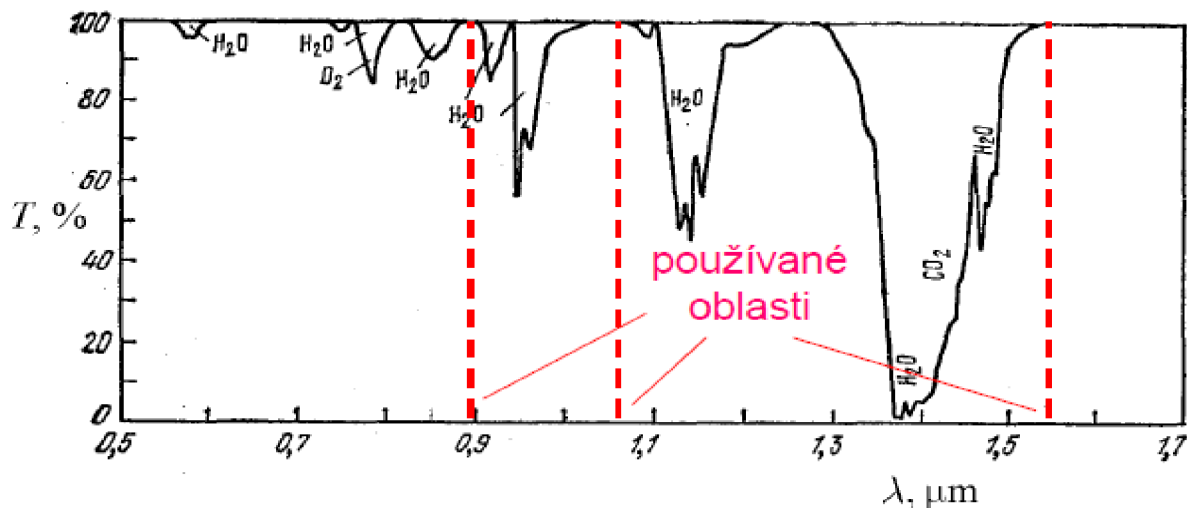
kde  $dI(\lambda)$  je zeslabení optické intezity na spektrální složce  $\lambda$  při průchodu záření vrstvou atmosféry o tloušťce  $dz$ .  $\alpha(\lambda)$  je koeficient zeslabení v  $[m^{-1}]$ . Integrací se dostaneme

$$I_2(\lambda)=I_1 \exp[-\alpha(\lambda)\Delta z] \quad (47)$$

kde  $I_1$  je optická intenzita na začátku vrstvy a  $I_2$  je optická intenzita na konci vrstvy tloušťky  $\Delta z$ . Předpokladem je stálá hodnota zeslabení na celé vrstvě  $\Delta z$ . Spektrální propustnost  $T_{\lambda}(\lambda)$  se definuje vztahem:

$$T_{\lambda}(\lambda)=\frac{I_2(\lambda)}{I_1(\lambda)} \quad (48)$$

Na obrázku 12 je uvedena spektrální závislost propustnosti "čisté" a "klidné" atmosféry. Optické bezkabelové spoje nejčastěji vysílají na vlnových délkách 850 nm a 1550 nm. [3]



Obrázek 12: Spektrální závislost propustnosti "čisté" a "klidné" atmosféry. Převzato z [9]

## 1.20 Veličiny charakterizující světelně technické vlastnosti hmot

Optické vlastnosti materiálů jsou důležité zejména pro návrh a konstrukci částí různých zařízení, které vyzařují světlo libovolných vlnových délek. Vlastnosti materiálů využíváme s ohledem na možnosti usměrnění světelného toku, jeho rozptylu a popřípadě omezení jasu v určitých směrech. Při těchto úpravách se snažíme o zachování co nejvyšší účinnosti. Odraznosti stěn a stropu mají podstatný vliv na kvantitativní a kvalitativní úroveň světelného záření. [4]

Světelný tok  $\Phi$ , který dopadá na uvažovaný materiál, se dělí na tři části, a to na část  $\Phi_\rho$ , která se odrazí, na část  $\Phi_\tau$  která materiálem projde a na část  $\Phi_\alpha$  kterou látka pohltí. Potom tedy platí [4]:

$$\Phi = \Phi_\rho + \Phi_\tau + \Phi_\alpha \quad (49)$$

Světelně technické vlastnosti látek charakterizují tři integrální činitele odpovídající zmíněnému rozdělení světelného toku. Jsou to integrální činitel odrazu  $\rho = \Phi_\rho/\Phi$ , integrální činitel prostupu  $\tau = \Phi_\tau/\Phi$  a integrální činitel pohlcení  $\alpha = \Phi_\alpha/\Phi$ . Pro činitele  $\rho$ ,  $\tau$ ,  $\alpha$  platí souvislost

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \quad (50)$$

Pro neprůsvitné materiály pak platí  $\rho + \alpha = 1$  a pro materiály pohlcující veškeré záření na ně dopadlé (černé těleso)  $\alpha = 1$ . [4]

O prostředí, kterým se šíří světelné paprsky od zdrojů světla na osvětlované plochy, se při praktických výpočtech obvykle předpokládá, že je nepohlcující ( $\tau = 1$ ) a nerozptylující. Tento předpoklad je většinou splněn jak ve vnitřních, tak i ve venkovních prostorech. Činitele odrazu, prostupu a pohlcení nezávisí pouze na vlastnostech látky samotné, ale i na vlnové délce dopadajícího záření. Proto se kromě integrálních hodnot definují i jejich spektrální hodnoty  $\rho(\lambda)$ ,  $\tau(\lambda)$ ,  $\alpha(\lambda)$ . Dopadá-li na sledovanou látku složený zářivý tok  $\Phi_e(\lambda)$ , pak pro integrální činitel odrazu  $\rho$  látky platí výraz [4]:

$$\rho = \frac{\int_0^\infty \left( \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_\lambda V(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^\infty \left( \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_\lambda V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (51)$$

Ve jmenovateli rovnice (51) je výraz pro světelný tok  $\Phi$  odpovídající zářivému toku

materiál	činitel		
	odraz $\rho$ [%]	prostupnost $\tau$ [%]	pohlcení $\alpha$ [%]
sklo čiré (tloušťka 2 až 4mm)	6 – 8	90 – 92	2 – 4
sklo matové leptané (tl. 2-3 mm)	6 – 11	75 – 91	3 – 19
sklo opálované bílé (tl. 2-3 mm)	29 – 52	36 - 66	3 – 10
sklo opalizované (tl. 2-3 mm)	13 – 28	59 – 84	3 – 13
mramor bílý lesklý (tl. 7,3 -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

*Tabulka 1: Přibližné hodnoty činitelů  $\rho, \tau, \alpha$  některých materiálů. Převzato z [4]*  
 $\Phi_e(\lambda)$ . Pro integrální činitele  $\alpha$  a  $\tau$  platí podobné vztahy. Příklady hodnot integrálních činitelů  $\rho, \tau, \alpha$  jsou uvedeny v tabulce 1. [4]



Hodnoty činitelů odrazu některých materiálů a povrchů jsou uvedeny v tabulce 2:

materiál, povrch		činitel odrazu	
		ρ [%]	
hliník plátovaný		80 – 87	
hliník leštěný		60 – 72	
matný hliníkový povrch		55 – 60	
stříbro leštěné		85 – 94	
platina leštěná		62	
zlato leštěné		70	
nikl leštěný		53 – 63	
chrom leštěný		60 – 70	
leštěný povrch nerez oceli		55 – 60	
bílý smalt		85 – 90	
žula		asi 44	
cihly žluté		asi 35	
cihly červené		asi 25	
sádra		asi 80	
malta velmi jasná		asi 50	
omítky ušlechtilé jasné		asi 40	
malta tmavá		asi 25	
dřevo javorové, surové, přírodně voskované		40 – 50	
dřevo dubové, surové, přírodně voskované		30 – 49	
dřevo ořeškové		10 – 20	
dřevo mahagonové		15 – 20	
dřevo mořené tmané		10 – 30	
malba (zeď)	bílá		76 – 88
	žlutá	světlá	66 – 88
		tmavá	47 – 67
	hnědá	světlá	30 – 48
		tmavá	14 – 31
	červená	světlá	39 – 65
		tmavá	17 – 39
	zelená	světlá	36 – 69
		tmavá	11 – 35
	modrá	světlá	24 – 56
		tmavá	5 – 25
	růžová		35 – 61
	šedá	světlá	35 – 67
tmavá		15 – 35	
černá		2 – 4	

Tabulka 2: Tabulka činitelů odrazu pro různé povrchy. Převzato z [4]

## 1.21 Drsnost povrchu

Tuhé látky jsou od okolí odděleny svým povrchem a zaujímají za určitých fyzikálních podmínek přesně daný objem. Pod pojmem povrchu v geometrickém smyslu rozumíme rozhraní dvou látek různých fází (tuhé, kapalné či plynné). [14]

Uvažujeme-li o povrchu nějakého předmětu, musíme při hodnocení skutečné plochy přihlížet nejen k vnějším rozměrům a k hrubému geometrickému tvaru, nýbrž také k hrubé členitosti i k její mikroskopické nerovnosti. Ideální povrch, který si můžeme představit jako rovinnou plochu, se blíží pouze hladina kapaliny v klidu. U látek tuhých mají všechny povrchy patrné odchylky od ideální geometrické plochy, ať již byly vytvořeny jakýmkoliv způsobem technologického zpracování. [14]

Co do rozměrů mohou být odchylky makroskopické, které lze pozorovat pouhým okem, nebo mikroskopické, které jsou v řádu tisícín milimetru a jež se dají zjistit speciálními metodami a dostatečně citlivými přístroji. [14]

S hlediska systematiky a rozlišení jejich vzniku rozdělujeme nepravidelnosti povrchu na drsnost, vlnitost a mimořádné nerovnosti. [14]

Mimořádné nerovnosti čili makroskopické nerovnosti jsou nahodilé odchylky od ideální geometrické plochy. Délku makroskopické nerovnosti označujeme  $L_{\text{makro}}$ , výšku  $h_{\text{makro}}$ . [14]

Pod pojmem vlnivost povrchu rozumíme nepravidelnost povrchu, která se v řezu jeví zhruba jako vlnovka. Délku vlny označujeme  $L_p$  a výšku vlny  $h_p$ . [14]

Drsností povrchu rozumíme rozměrově nepatrné odchylky od ideální geometrické plochy. Délku vlny označujeme  $L_d$ , výšku  $h_d$ . [14]

### 1.21.1 Určení profilu drsnosti

Skutečný profil povrchu definujeme jako profil vzniklý jako průsečnice skutečného povrchu (povrchu omezující těleso a oddělující ho od okolního prostředí) a dané roviny. [14]

Zaznamenaný profil povrchu je nasnímán a zpracován jako skutečný profil povrchu změřený měřicím hrotem. Přitom bude naměřená hodnota vlivem poloměru  $r_{ip}$  měřicího hrotu, popř. vlivem patky měřicího hrotu pro měření drsnosti povrchu ovlivňována principem snímání. Nedokonalosti povrchu podle ČSN EN ISO 8785 nesmí být zahrnuty do měření. [14]

Nefiltrovaný (primární) profil drsnosti je profil získaný průsečnicí povrchu s normálovou rovinou do nominálního povrchu. To je vyobrazení skutečného profilu (profilu skutečného povrchu) získaného typem měřicího (snímacího) hrotu měřicího přístroje drsnosti povrchu. [14]

### 1.21.2 Charakteristiky drsnosti (ČSN EN ISO 4287:1999) [14]

$Ra$  – Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu: Aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic  $Z(x)$  v rozsahu základní délky.

$Rmr(c)$  – Materiálový poměr profilu (nosný podíl): Poměr (%) délky materiálu elementů profilu  $Ml(c)$  na dané úrovni  $c$ , k vyhodnocované délce.

$RSm$  – Průměrná šířka prvků profilu: Aritmetický průměr šířek  $Xs$  prvků profilu v rozsahu základní délky, nebo-li určuje šířky prvků profilu v rozsahu základní délky. Jedná se o charakteristiku drsnosti v podélném směru povrchu.

$Rt$  – Celková výška profilu drsnosti: Součet výšky  $Zp$  nejvyššího výstupku profilu a hloubky  $Zv$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky  $ln$ .

$Rzi$  – Aritmetická hloubka profilu: Aritmetický průměr nejvyšších výšek profilu v jednotlivých základních délkách z vyhodnocované délky, standardně obsahující 5 základních délek.

$RzImax$  – Maximální prohlubeň profilu drsnosti: Největších pět  $Rzi$  - hodnot z pěti základních délek  $lri$  uvnitř vyhodnocované délky  $ln$ .

$Rz$  – Největší výška profilu: Součet výšky  $Zp$  nejvyššího výstupku profilu a hloubky  $Zv$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky.

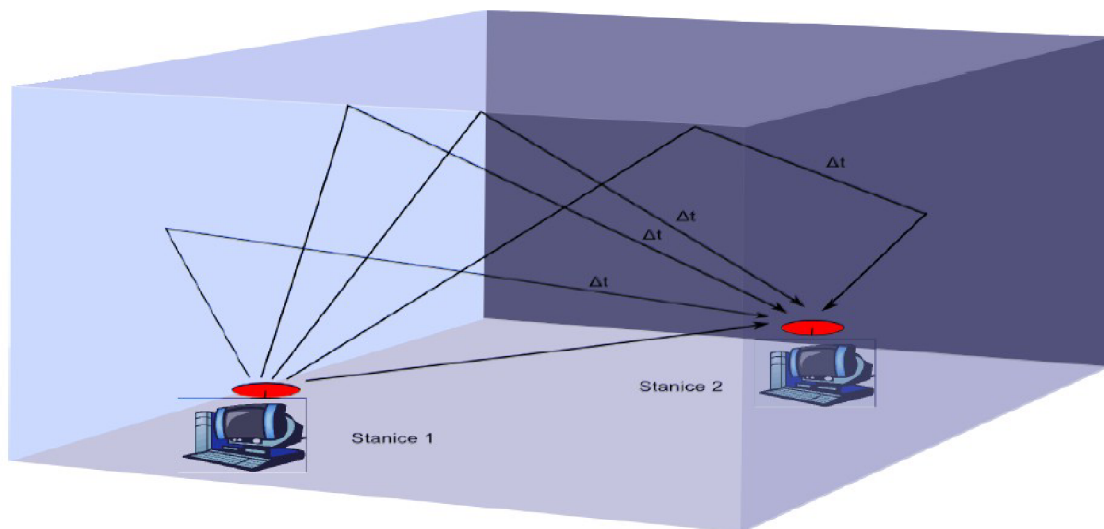
Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu  $Ra$  je mírou drsnosti povrchu  $Ra$  vztaženou přes průměrné hodnoty vztažené k celému profilu.

## 1.22 Indoor bezkabelové optické spoje

Pokud chceme použít bezdrátové technologie WLAN je nutné rozdělit budovu na menší celky - buňky a navázání v rámci jedné buňky nebo spojení mezi jednotlivými buňkami. Existují způsoby, pomocí kterých je možné realizovat spojení mezi dvěma body, a to buď rádiovým přenosem, nebo optickým signálem. V dnešní době pouze tyto dva způsoby přenosu mají schopnost umožnit vysokorychlostní přenos v indoor bezdrátových sítích mezi jednotlivými zařízeními. Každá z těchto dvou technologií má své specifické vlastnosti, které ovlivňují její použití. [10]

U bezdrátových přenosů realizovaných infračerveným zářením vzniká několik problémů a omezení, se kterými musíme počítat. Mezi ně patří velikost vysílaného výkonu, úroveň rušení okolními světelnými zdroji a interferenční rušení ISI v místnosti. Při přenosu optického signálu se využívá jak širokopásmová, tak úzkopásmová modulace. [10]

Důležitou vlastností optických přijímačů je jeho geometrický rozměr. Existují dva základní druhy optických zdrojů signálu a to laserové diody LD a luminiscenční diody LED. Optický signál se může dostat od vysílače k přijímači dvěma způsoby – při přímé viditelnosti mluvíme o směrovém spoji a při nepřímé viditelnosti a použití odrazu povrchů se využívá všesměrový (difúzní) zdroj. Ve vnitřních bezkabelových optických spojih je nejvhodnější využít LED diody, které se také častěji využívají. Laserové diody LD s velkým výkonem nejsou příliš vhodné. Pokud přesto použijeme LD diody, musíme zajistit bezpečnost obsluhy, aby nedošlo k poškození sítnice oka. LED diody jsou z tohoto pohledu mnohem bezpečnější než LD. LED diody jsou také proti LD diodám levnější, ale jejich hlavní nevýhodou při použití v optických spojih je malá rychlost spínání při vysílání. [10]



Obrázek 13: Možné způsoby šíření informace pomocí optického spoje v indoor prostředích.  
Převzato z [10]

## 2 Experimentální část

### 2.1 Měření odrazivých vlastností materiálů

Při měření odrazivých vlastností budeme vycházet z našich teoretických poznatků. Veličina, která bude pro nás charakterizovat odrazivé vlastnosti materiálů bude poměrná směrová odrazivost –  $PSO$ . Pokud je osa dopadajícího svazku a odraženého svazku velmi blízká nebo stejná, můžeme pak psát pro poměrnou směrovou odrazivost :

$$PSO(\gamma) = \pi \frac{L(\gamma)}{E_0(\gamma)} \quad (52)$$

kde  $\gamma$  je úhel mezi normálou plochy a dopadajícím (odraženým) laserovým paprskem,  $L(\gamma)$  je pak zář ploch, se kterou pracujeme a  $E_0(\gamma)$  je intenzita ozáření námi zpracované plochy. [15]

Výše uvedený vztah ale není příliš vhodný pro měření v laboratorních podmínkách, kde obvykle známe pouze výkon laseru a vzdálenost laseru od měřené plochy. Po úpravách proto můžeme psát tento vztah :

$$PSO(\gamma) = \frac{4P_p(\gamma)L_{VP}^2}{P_L d_{FD}^2 \cos \gamma} \quad (53)$$

kde  $P_L$  je výkon laseru,  $L_{VP}$  je vzdálenost přijímače od měřené plochy a  $d_{FD}$  je aktivně osvětlená plocha,  $P_p$  je výkon, který přijímáme na optickém přijímači. Přijatý výkon na přijímači určíme ze vztahu :

$$P_p = \frac{U_{det}}{S_u} \quad (54)$$

kde  $S_u$  je jedním ze základních parametrů optického přijímače a je to napěťová citlivost. Pro vlnovou délku  $\lambda = 670$  nm známe  $S_u = 4,5 \text{ MV}_{\text{RMS}} \cdot \text{W}^{-1}$  vztažená ke střední frekvenci optického přijímače cca  $f = 1,026$  kHz.  $U_{det}$  je pak napětí změřené na výstupu přijímače. [15]

### 2.2 Pracovní postup:

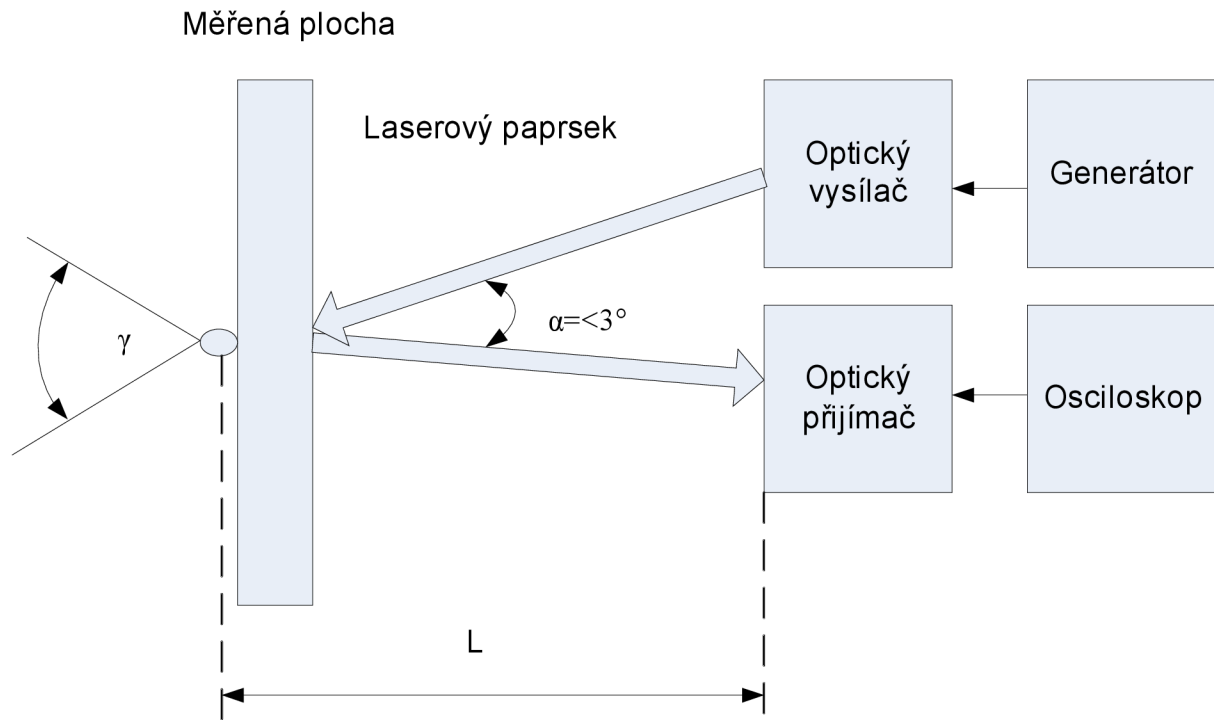
Cílem měření je určit poměrnou směrovou odrazivost pro materiály, které se nejvíce vyskytují ve vnitřních prostředích, které jsou přizpůsobeny pro obývání člověkem. Nejčastější materiály, které se takto vyskytují jsou:

- omítky a povrchové nátěry zdí různých barev
- dřevo (nábytek a obložení)
- sklo čiré a matné (výplně oken, dveří a skříní)
- plastové povrchy různých barev (větší elektronika – počítače, televize, monitory)

Pro tyto materiály budeme postupně určovat poměrnou směrovou odrazivost. Použijeme přímo reálné materiály, které se vyskytují v laboratoři a tak se jejich povrchovou úpravou přiblížíme nejvíce reálným prostorám. Pro každý materiál bude definován jeho složením, barvou a povrchovou úpravou. Takto definovaný povrch pak v měřeném místě (popřípadě více místech) osvítíme laserovým paprskem a změříme velikost místa osvitu, vzdálenost laseru, úhel  $\gamma$  a přijatý výkon. Z těchto hodnot pak určíme podle vztahu (52)

poměrnou směrovou odrazivost materiálu v daném bodě. Toto budeme opakovat pro všechny materiály a na závěr srovnáme naměřené výsledky.

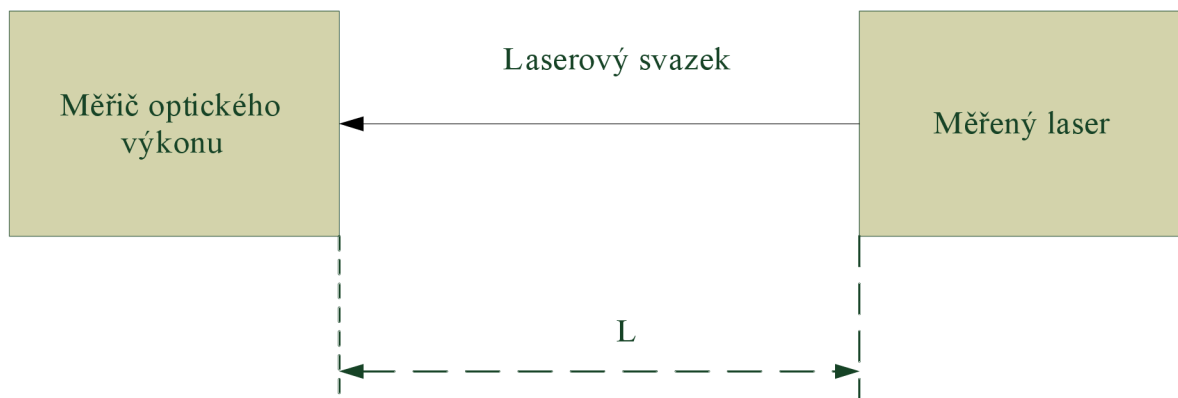
Z naměřených výsledků určíme, který z materiálů je nejvhodnější pro vnitřní bezkabelový optický spoj a který parametr materiálů nejvíc ovlivňuje jeho světelné vlastnosti (barva, povrchová úprava, drsnost).



Obrázek 14: Blokové zapojení měřícího pracoviště

### 2.3 Měření napěťové citlivosti:

Napěťový přijímač, který jsme využívali pro naše měření má různou napěťovou citlivost pro různé vlnové délky. Pro hodnotu laseru 670 nm jsme tuto hodnotu znali, a to na hodnotě  $4,5 \text{ MV}_{\text{rms}}/\text{W}^{-1}$ . Pro ostatní vlnové délky jsme tuto hodnotu neznali. Hodnotu napěťové citlivosti zjistíme poměrně jednoduše. Nejprve změříme výkon námi měřeného laseru, pomocí měřiče optického výkonu, který umístíme do vzdálenosti  $L$  od laseru:



Obrázek 15: Blokové zapojení měřícího pracoviště pro určení optického výkonu

Do stejné vzdálenosti  $L$  poté umístíme plochu, o které známe  $PSO$ . My jsme použili bílou difúzní plochu se známou hodnotou poměrné směrové odrazivosti  $PSO = 0,87$ . Poté bílou plochu osvítime laserem, u kterého chceme určit napěťovou citlivost. Pro jednodušší a přesnější měření volíme úhel natočení  $\gamma = 0^\circ$ . Zapojení měřícího pracoviště je stejné jako na obrázku 14. Snažíme se dodržet stejnou vzdálenost  $L$ , v jaké jsme měřili optický výkon. Zjistíme úroveň napětí na optickém přijímači, kterou odečteme na osciloskopu. Hodnotu napěťové citlivosti zjistíme ze vzorce :

$$S_u = \frac{U_{det}}{P_p} \quad (55)$$

kde přijatý výkon  $P_p$  určíme ze znalosti vyslaného výkonu  $P_L$  a známe hodnoty  $PSO$  difúzní plochy:

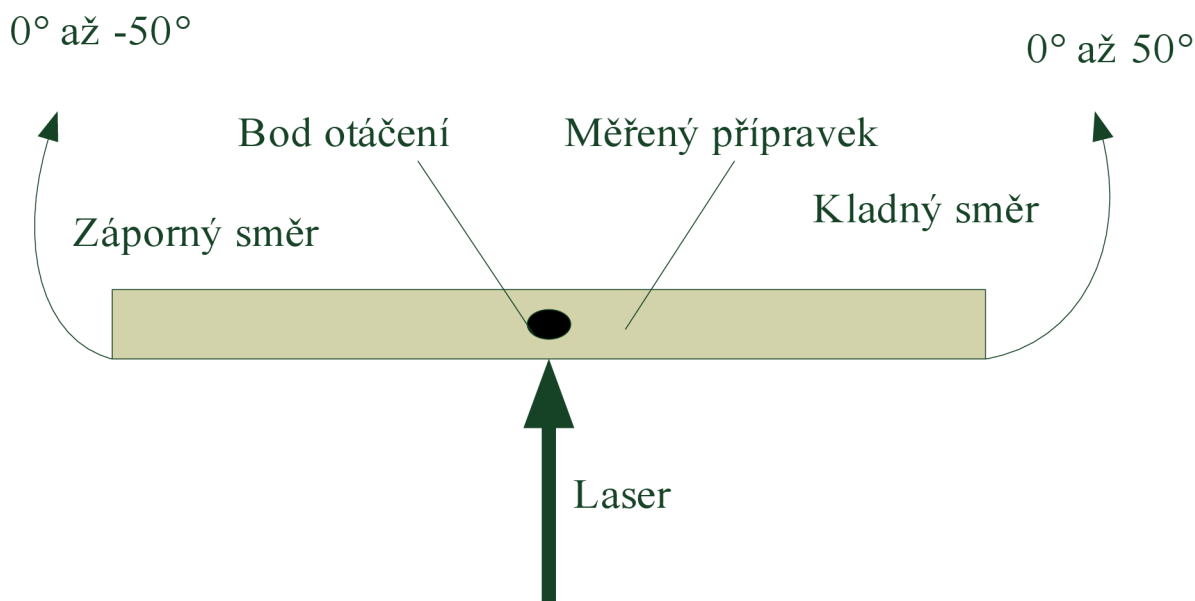
$$\frac{PSO(\gamma)P_L d_{FD}^2 \cos \gamma}{4L^2} = P_p(\gamma) \quad (56)$$

Pro frekvenci 1,025 kHz a vlnovou délku 808 nm jsme určili hodnotu napěťové citlivosti  $S_u$  na velikosti 3,2 MV<sub>rms</sub>/W<sup>-1</sup>. Stejným způsobem můžeme určit hodnotu napěťové citlivosti pro jakoukoliv vlnovou délku.

## 2.4 Měření a zpracování výsledků

K měření odrazivých vlastností materiálů jsme využívali tyto měřící přístroje a pomůcky:

- polovodičový laser Kapa ( $P_L=3$  mW,  $\lambda=670$  nm,  $f_{mod}=1,026$  kHz,  $U=1$  V)
- polovodičový laser ( $P_L=7$  mW,  $\lambda=808$  nm,  $f_{mod}=1,025$  kHz,  $U=1$  V)
- stojany na upevnění optického vysílače, přijímače a přijímaných ploch
- osciloskop Tektronix TDS 380
- generátor Agilent 33220A, DC zdroj AUL 310
- optický přijímač ( $d_{FD}=3$  mm)



Obrázek 16: Pohled ze zhora na měřený přípravek

Při měření jsme vždy dodržovali stejné označení pro oba možné směry natáčení. Způsob značení natáčení je ilustrován na obrázku :

Naměřená data jsme zpracovali do tabulek a grafů. Spolu s fotkami měřených přípravků a rovnicemi regrese jsme všechny naměřené hodnoty shrnuly do podoby technické dokumentace. Jako ukázkový příklad použijeme přípravek, který simuluje vlastnosti vnitřní omítky s bílým nátěrem. Grafy jsou zpracovány do závislosti  $PSO = f(\gamma)$ .

V tabulkách jsme použili značení jednotlivých sloupců, kde jsou jednotlivé sloupce značeny zleva jako:

- $\gamma$  – úhel natočení měřeného materiálu ve stupních
- $L$  - vzdálenost měřeného materiálu od optického vysílače
- $S_u$  – napěťová citlivost optického přijímače
- $U_{det}$  – změřené napětí na osciloskopu
- $P_p$  - přijatý výkon na optickém přijímači
- $P_L$  - výkon optického vysílače (laseru)
- $d_{fd}$  - průměr optiky optického přijímače
- $PSO$  - poměrná směrová odrazivost

Protože není možné měřit některé reálné materiály pro různé úhly, jako je například stěna místnosti, museli jsme vytvořit přípravky, které budou tyto materiály simulovat. Jedná se především o zdi různých barev a úpravu zdi v jazykových učebnách pomocí koberce. Pro měření ostatních materiálů jsme využili menších předmětů, které jsme pomocí pravítka a úhloněru natáčeli do požadovaných úhlů. Způsob výroby a získání jednotlivých přípravků je uveden v příloze v části technická dokumentace.



## Vnitřní omítka s bílým vápenným nátěrem



Obrázek 17: Přípravek simulující bílou úpravu místností

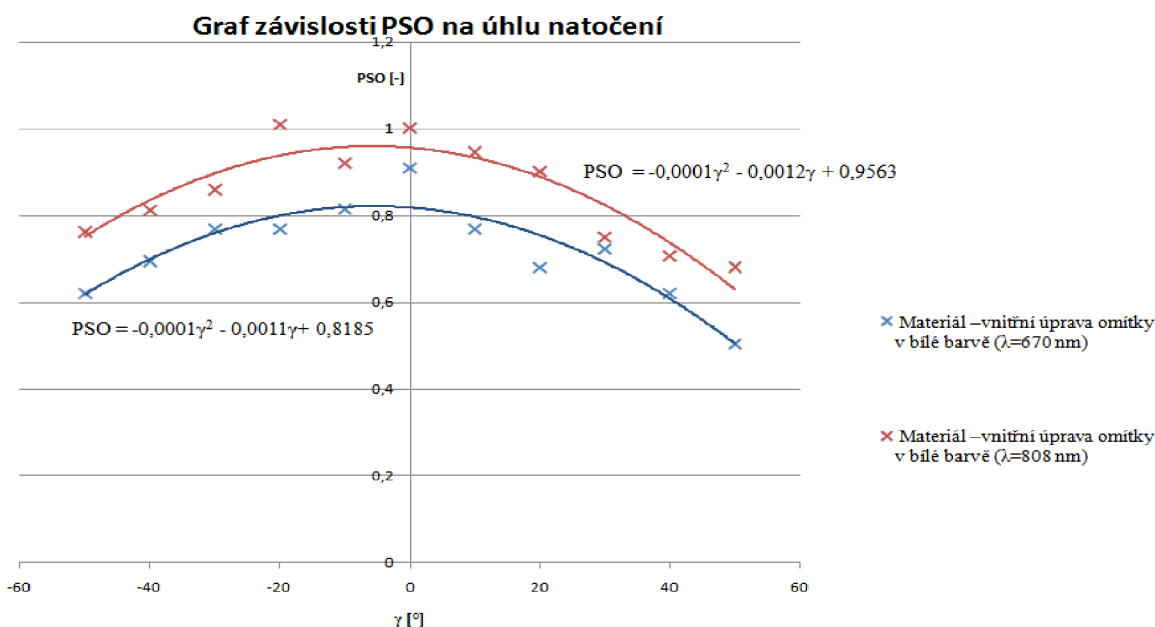
Nejčastější úpravou stěn je pokrytí bílou nástěnnou malbou. Tento přípravek se velmi blíží reálným vnitřním prostorům. Na hrubé straně sololitové desky je nanášena vrstva vnitřní šedé omítky a vyhlazena stejnou technikou, jako reálná omítka. Na tuto vrstvu jsme nanесли bílou vápennou barvu. Pro snadnou manipulaci a měření má přípravek rozměry 100x100 mm.

Materiál – vnitřní úprava omítky v bílé barvě ( $\lambda=670$ nm)								
$\gamma$	L	$S_u$	$U_{det}$	$P_p$	$P_L$	$d_{fd}$	PSO	Poznámka
[°]	[m]	[ $V_{RMS} \cdot W^{-1}$ ]	[V]	[W]	[W]	[m]	[-]	
-50°	1,19	4,50E+006	0,0133	2,96E-009	3,00E-003	3,00E-003	0,620	f=1,026 kHz
-40°	1,19	4,50E+006	0,0149	3,31E-009	3,00E-003	3,00E-003	0,695	
-30°	1,19	4,50E+006	0,0165	3,67E-009	3,00E-003	3,00E-003	0,769	
-20°	1,19	4,50E+006	0,0165	3,67E-009	3,00E-003	3,00E-003	0,769	
-10°	1,19	4,50E+006	0,0175	3,89E-009	3,00E-003	3,00E-003	0,816	
0°	1,19	4,50E+006	0,0195	4,33E-009	3,00E-003	3,00E-003	0,909	
10°	1,19	4,50E+006	0,0165	3,67E-009	3,00E-003	3,00E-003	0,769	
20°	1,19	4,50E+006	0,0146	3,24E-009	3,00E-003	3,00E-003	0,681	
30°	1,19	4,50E+006	0,0155	3,44E-009	3,00E-003	3,00E-003	0,723	
40°	1,19	4,50E+006	0,0133	2,96E-009	3,00E-003	3,00E-003	0,620	
50°	1,19	4,50E+006	0,0108	2,40E-009	3,00E-003	3,00E-003	0,504	

Tabulka 3: Naměřené hodnoty materiálu pro  $\lambda = 670$  nm

Materiál –vnitřní úprava omítky v bílé barvě (λ=808 nm)								
γ	L	Su	U <sub>det</sub>	P <sub>p</sub>	P <sub>L</sub>	d <sub>fd</sub>	PSO	Poznámka
[°]	[m]	[V <sub>RMS</sub> ·W <sup>-1</sup> ]	[V]	[W]	[W]	[m]	[-]	
-50°	1,19	3,43E+006	0,0291	8,48E-009	7,00E-003	3,00E-003	0,763	f=1,025 kHz
-40°	1,19	3,43E+006	0,0310	9,04E-009	7,00E-003	3,00E-003	0,813	
-30°	1,19	3,43E+006	0,0328	9,56E-009	7,00E-003	3,00E-003	0,860	
-20°	1,19	3,43E+006	0,0385	1,12E-008	7,00E-003	3,00E-003	1,009	
-10°	1,19	3,43E+006	0,0351	1,02E-008	7,00E-003	3,00E-003	0,920	
0°	1,19	3,43E+006	0,0382	1,11E-008	7,00E-003	3,00E-003	1,001	
10°	1,19	3,43E+006	0,0361	1,05E-008	7,00E-003	3,00E-003	0,946	
20°	1,19	3,43E+006	0,0344	1,00E-008	7,00E-003	3,00E-003	0,902	
30°	1,19	3,43E+006	0,0286	8,34E-009	7,00E-003	3,00E-003	0,750	
40°	1,19	3,43E+006	0,0270	7,87E-009	7,00E-003	3,00E-003	0,708	
50°	1,19	3,43E+006	0,0260	7,58E-009	7,00E-003	3,00E-003	0,682	

Tabulka 4: Naměřené hodnoty materiálu pro λ = 808 nm



Obrázek 18: Závislosti PSO pro obě vlnové délky (λ = 670 nm a λ = 808 nm) materiálu omítky s bílým vápenným nátěrem

Materiál omítky s vnitřním vápenným nátěrem můžeme charakterizovat rovnicemi pro výpočet poměrné směrové odrazivosti, které jsme získali při aproximaci naměřených hodnot:

$$PSO = -0,0001\gamma^2 - 0,0012\gamma + 0,9563 \quad \text{pro } \lambda = 808 \text{ nm}$$

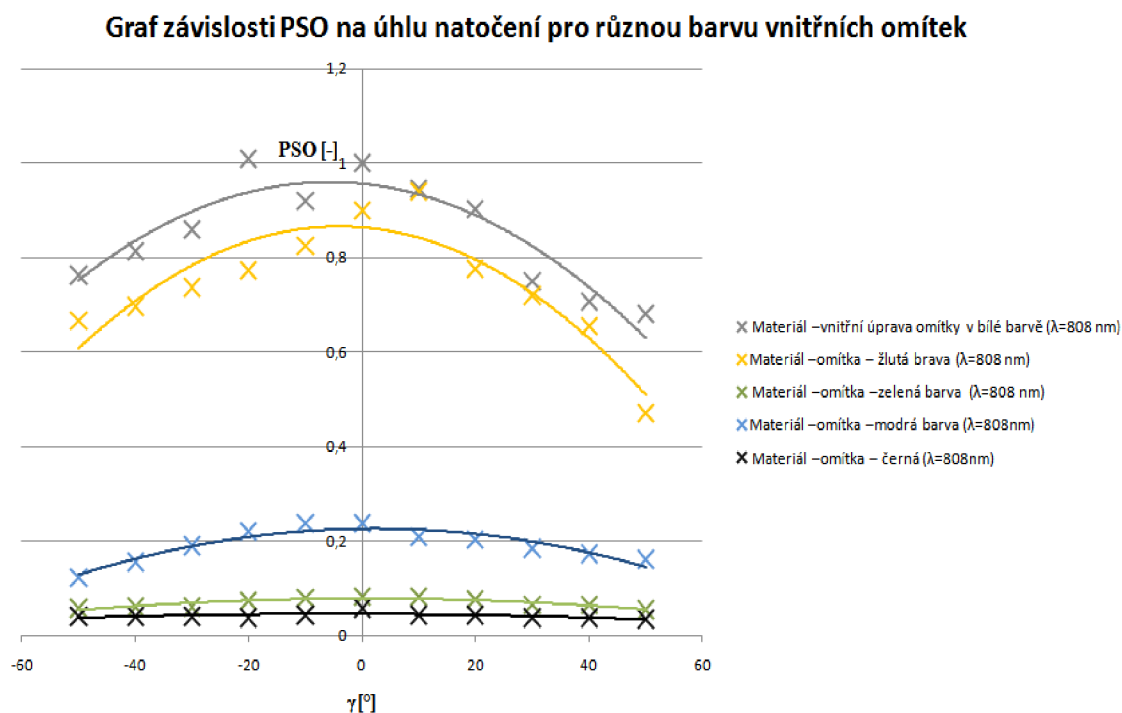
$$PSO = -0,0001\gamma^2 - 0,0011\gamma + 0,8185 \quad \text{pro } \lambda = 670 \text{ nm}$$

Další naměřené průběhy pro ostatní materiály jsou uvedeny v této práci a zpracovány do podoby technické dokumentace.

## 2.5 Porovnání naměřených hodnot

### 2.5.1 Porovnání vnitřních omítek různých barev

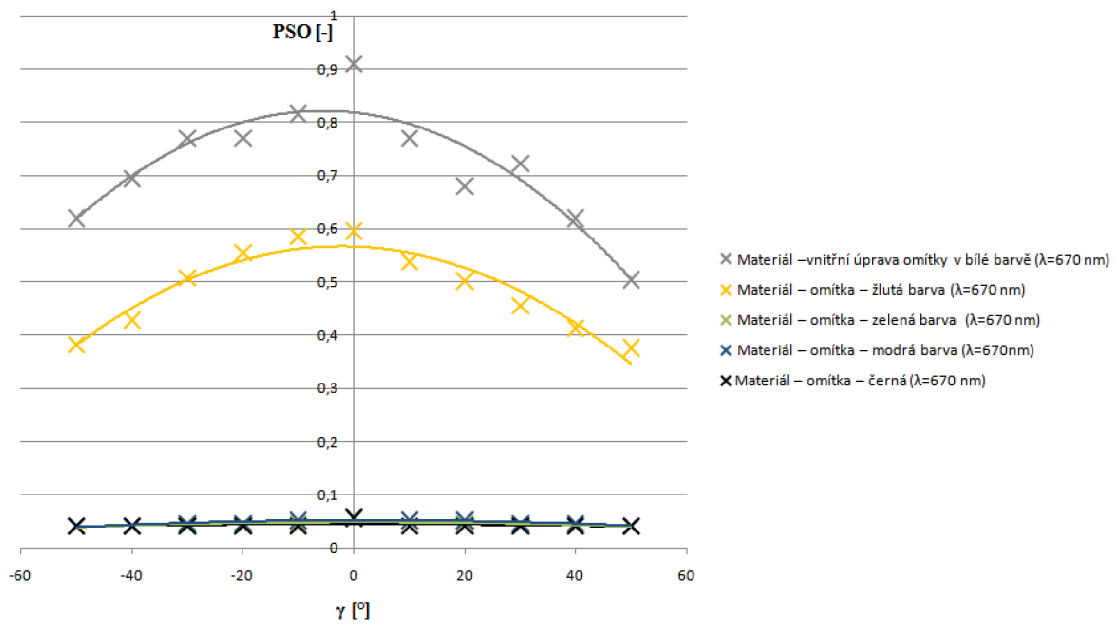
Naměřené hodnoty jsme zpracovali do společných grafů podle toho, které společné parametry chceme porovnávat a jejichž změnu chceme pozorovat. Začneme od barvy materiálu. K tomuto účelu se nejlépe hodí výsledky naměřené na pěti různě barevných omítkách pro vnitřní prostory.



Obrázek 19: Graf  $PSO = f(\gamma)$  všech vnitřních omítek pro vlnovou délku 808 nm

Na obrázku 19 je dobře vidět, jak barva materiálu při stejné drsnosti ovlivňuje poměrnou směrovou odrazivost. Nejvyšší poměrnou směrovou odrazivost má omítka bílé barvy, o něco hůře je na tom tmavě žlutá barva. Čím větší poměrná směrová odrazivost, tím vhodnější je použít tento materiál v indoor optických spojích. Záleží také na odstínu barvy. Čím tmavší odstín barvy, tím více se jeho odrazivé vlastnosti blíží černé barvě. V našem případě je to velmi tmavá zelená barva. I přesto jsou její odrazivé vlastnosti pro  $\lambda=808$  nm lepší než odrazivé vlastnosti černé barvy.

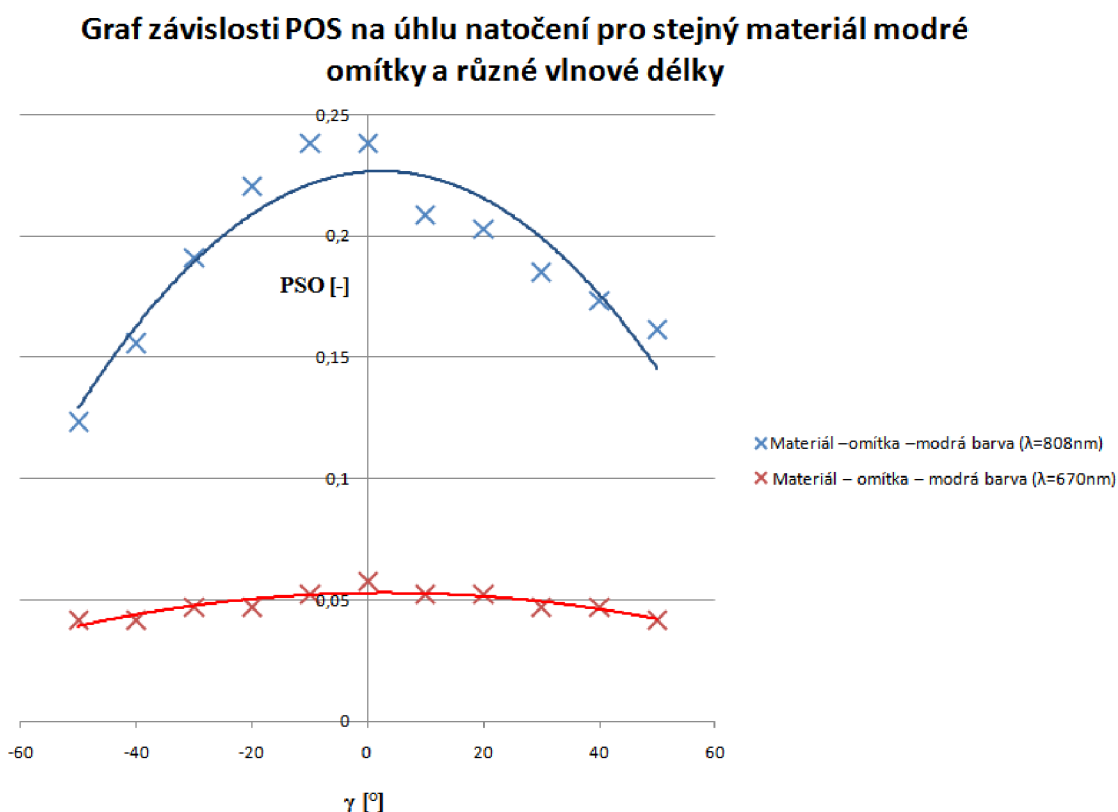
**Graf závislosti PSO na úhlu natočení pro různou barvu vnitřních omítek**



Obrázek 20: Graf  $PSO = f(\gamma)$  všech vnitřních omítek pro vlnovou délku 670 nm

Na obrázku 20 můžeme vidět graf naměřených hodnot pro stejné materiály, ale nižší vlnovou délku, pouze  $\lambda=670$  nm. Pro tuto vlnovou délku se tmavé materiály už příliš neodlišují. Tmavě modrá, tmavě zelená a černá omítka jsou ve svých naměřených hodnotách téměř totožné. Z tohoto měření můžeme říct, že čím vyšší vlnová délka, tím vyšší je poměrná odrazivost tmavých barevných odstínů.

## 2.5.2 Porovnání odrazivých vlastností stejného materiálu pro různé vlnové délky

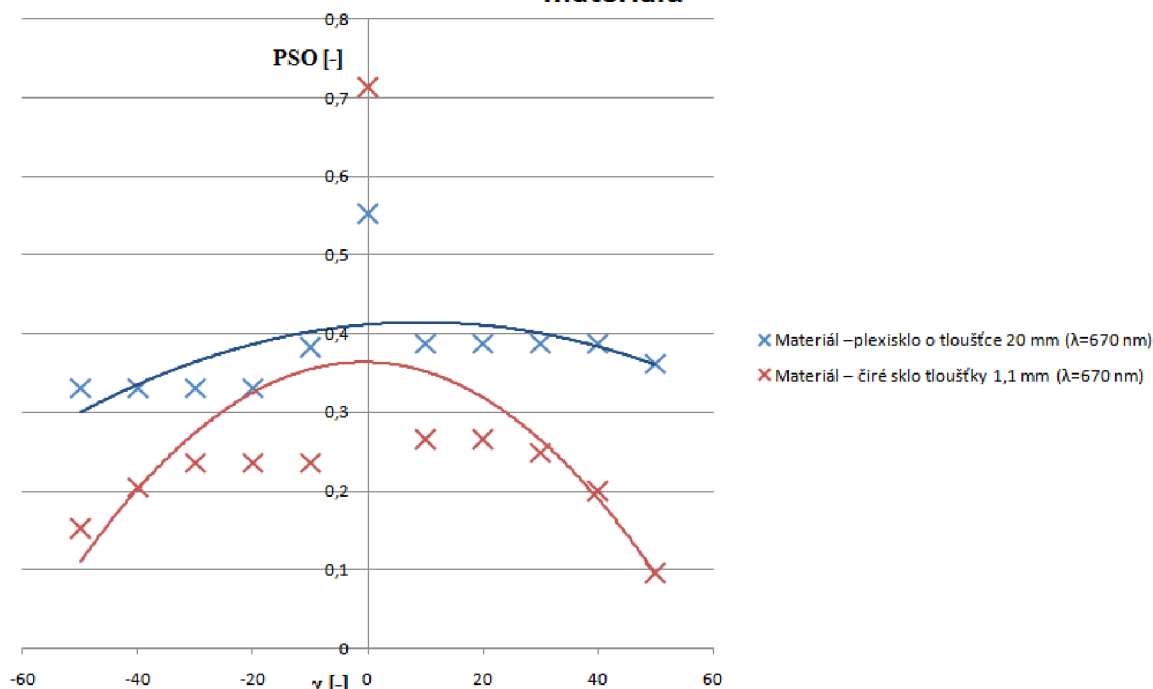


Obrázek 21: Graf  $PSO = f(\gamma)$  modré omítky pro různé vlnové délky

Poměrná směrová odrazivost pro stejný materiál s rostoucí vlnovou délkou roste. Toto srovnání můžeme vidět na obrázku 21, kde je v grafu vynesena závislost  $PSO$  na úhlu natočení pro modrou vnitřní omítku pro obě vlnové délky. Z tohoto grafu je jasně vidět, jak se změní  $PSO$  z vlnovou délkou. Obdobně se chovají i ostatní naměřené materiály. Grafy závislosti  $PSO$  na úhlu natočení jsou uvedeny v poslední části této práce v technické dokumentaci.

### 2.5.3 Porovnání vlastností průhledných materiálů

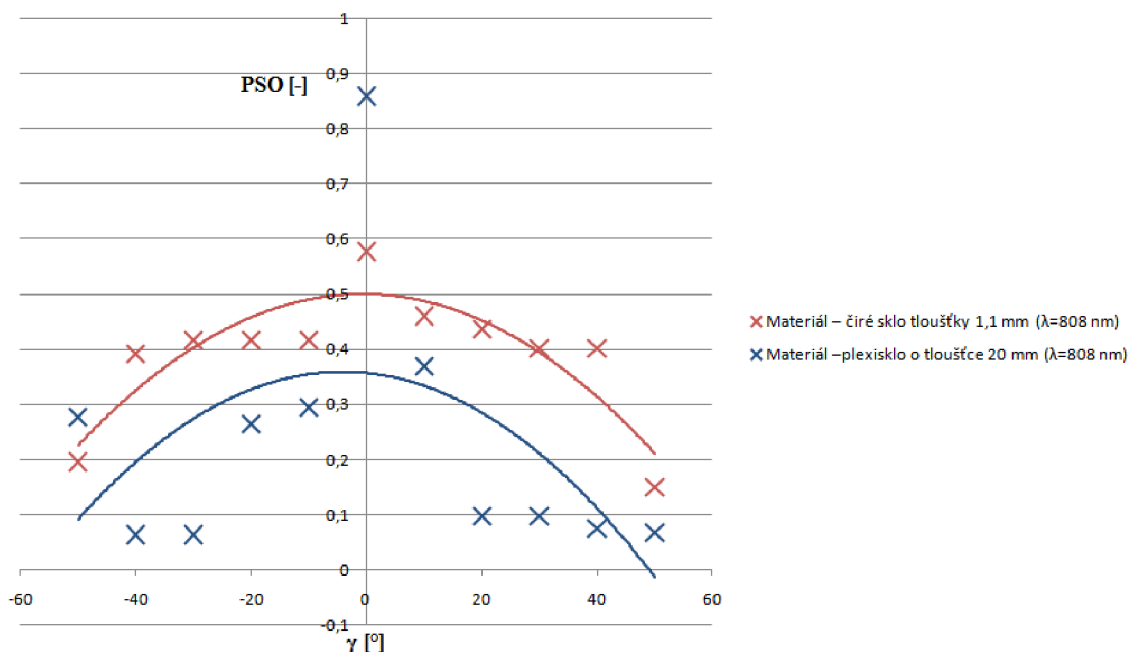
Graf závislosti PSO na úhlu natočení pro různé druhy průhledných materiálů



Obrázek 22: Graf  $PSO = f(\gamma)$  pro průhledné materiály pro  $\lambda = 670 \text{ nm}$

U neprůhledných materiálů jsme vypočetovali vlastnost, kdy  $PSO$  roste spolu s vlnovou délkou. U průhledných materiálů tato vlastnost vždy neplatí. Pro tenké sklo tloušťky 1,1 mm  $PSO$  roste s vlnovou délkou, ale pro plexisklo tloušťky 20 mm  $PSO$  s vlnovou délkou klesá. Hodnota  $PSO$  pro úhel natočení  $\gamma = 0^\circ$  je sice vyšší pro větší vlnovou délku, ale ostatní hodnoty jsou mnohem nižší. Materiál plexisklo tloušťky 20 mm se pro větší vlnovou délku chová více jako zrcadlo. Pro nižší vlnovou délku čiré sklo více odráží a méně rozptyluje. Naměřené hodnoty můžeme vidět na obrázku 22 a obrázku 23.

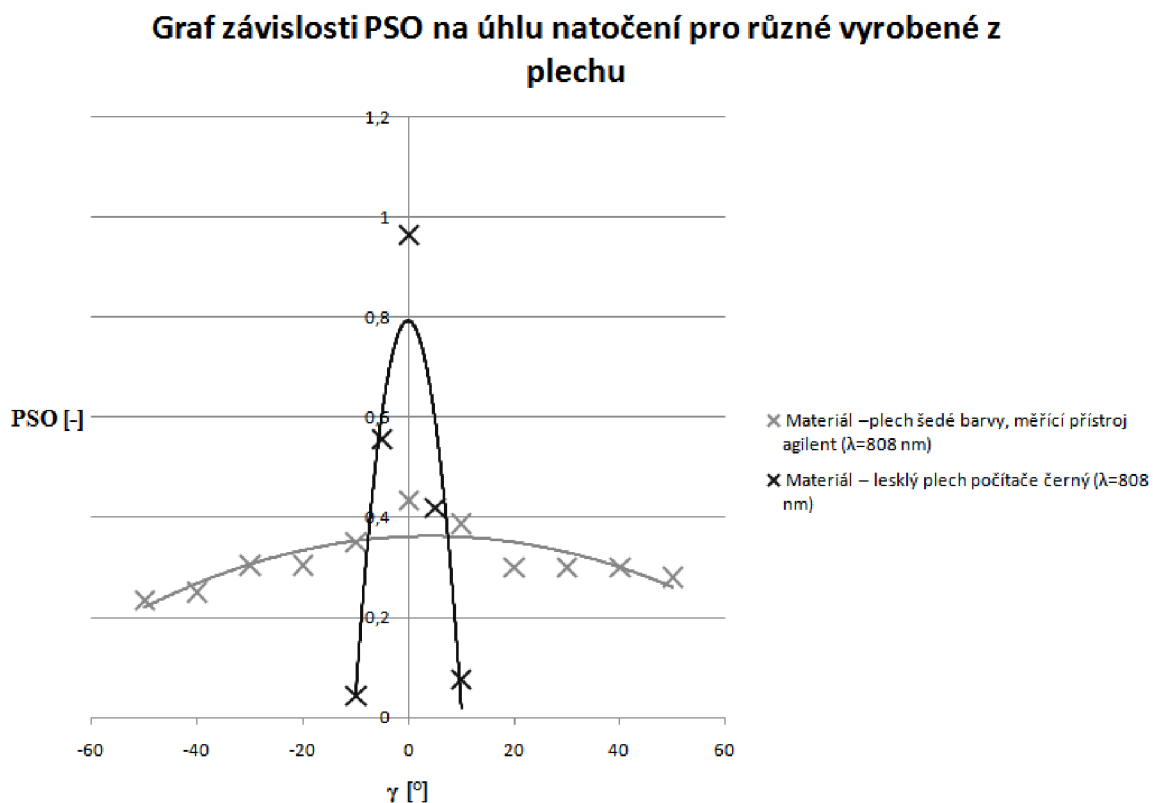
### Graf závislosti PSO na úhlu natočení pro různé druhy průhledných materiálů



Obrázek 23: Graf  $PSO = f(\gamma)$  pro průhledné materiály  $\lambda = 808$  nm

Na obrázku 23 můžeme vidět výsledky pro materiály sklo a plexisklo na vlnové délce 808 nm. Oproti obrázku 22, kde má čiré sklo obecně menší PSO, pro tuto vlnovou délku má čiré sklo PSO větší než plexisklo. Špičková hodnota pro  $\gamma = 0^\circ$  je naopak vyšší u plexiskla, které pro tuto vlnovou délku více odráží a méně rozptyluje.

## 2.5.4 Porovnání materiálu z hlediska drsnosti povrchu

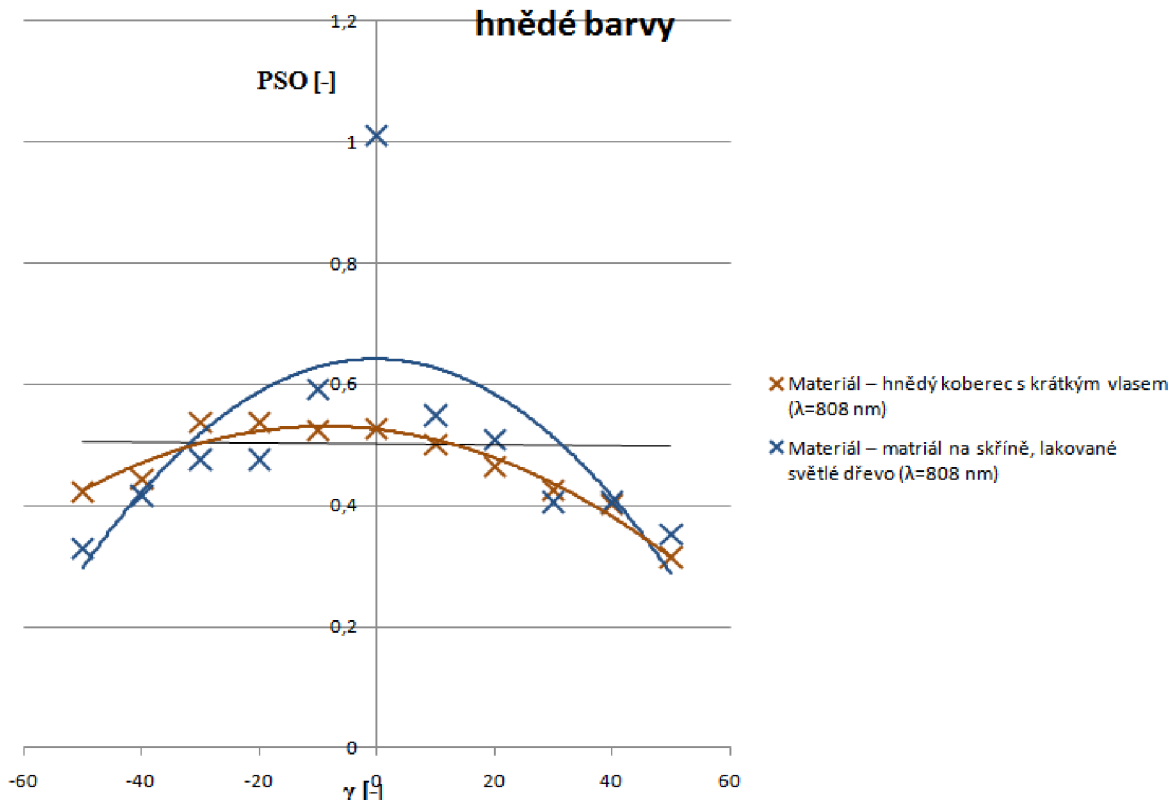


Obrázek 24: Graf  $PSO = f(\gamma)$  pro plechy různých barev  $\lambda = 808$  nm

Stejně materiály neovlivňuje pouze barva, ale také drsnost povrchu a jeho lesk. To můžeme vidět na obrázku 24 u dvou typů plechu. I když je šedý plech světlejší než černý, je drsnější a má mnohem menší  $PSO$  než černý plech pro úhel natočení  $-10^\circ$  až  $10^\circ$ . Černý plech je naopak lesklý a velmi hladký a pro úhel natočení  $0^\circ$  má velmi vysokou poměrnou směrovou odrazivost. Ta se s mírnou změnou úhlu natočení rychle mění a nad úhly  $-10^\circ$  a  $10^\circ$  se hodnota  $PSO$  nachází pod 5% maximální hodnoty, tudíž ji neuvažujeme.



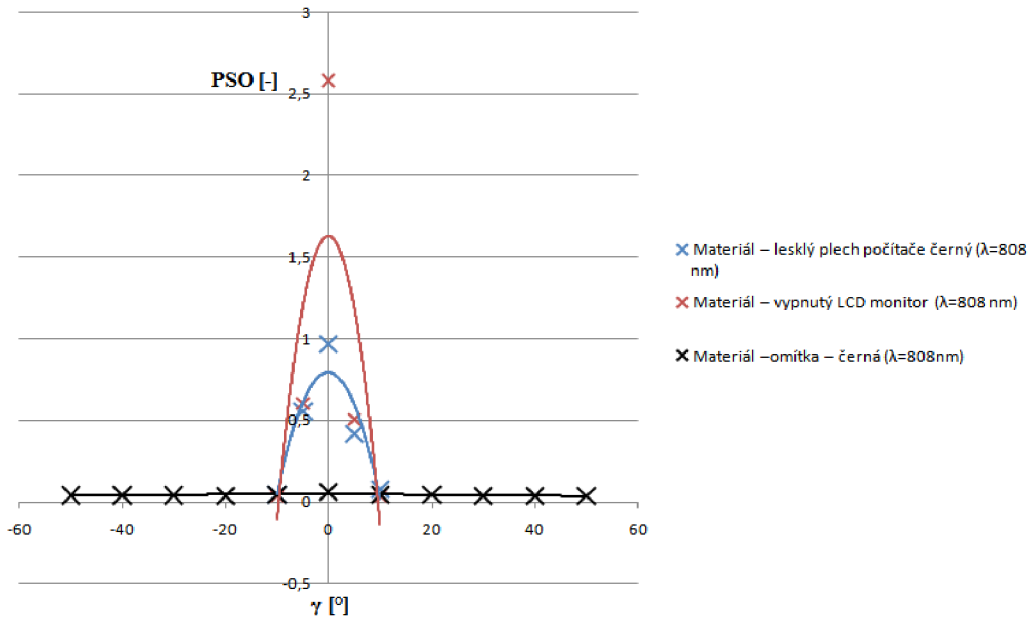
### Graf závislosti PSO na úhlu natočení pro různé materiály hnědé barvy



Obrázek 25: Graf  $PSO = f(\gamma)$  pro materiály hnědé barvy  $\lambda = 808 \text{ nm}$

Na obrázku 25 je graf závislosti  $PSO = f(\gamma)$  pro materiály hnědé barvy. Oba materiály jsou si barevně velmi blízké, ale koberec má vysokou drsnost povrchu, zatímco lakované dřevo je hladké. Hladký materiál má mírně větší  $PSO$ , ale nejvíce drsnost povrchu ovlivňuje závislost velikosti  $PSO$  na úhlu natočení. Pro drsnější povrch je velikost  $PSO$  mnohem konstantnější s měnícím se úhlem  $\gamma$ .

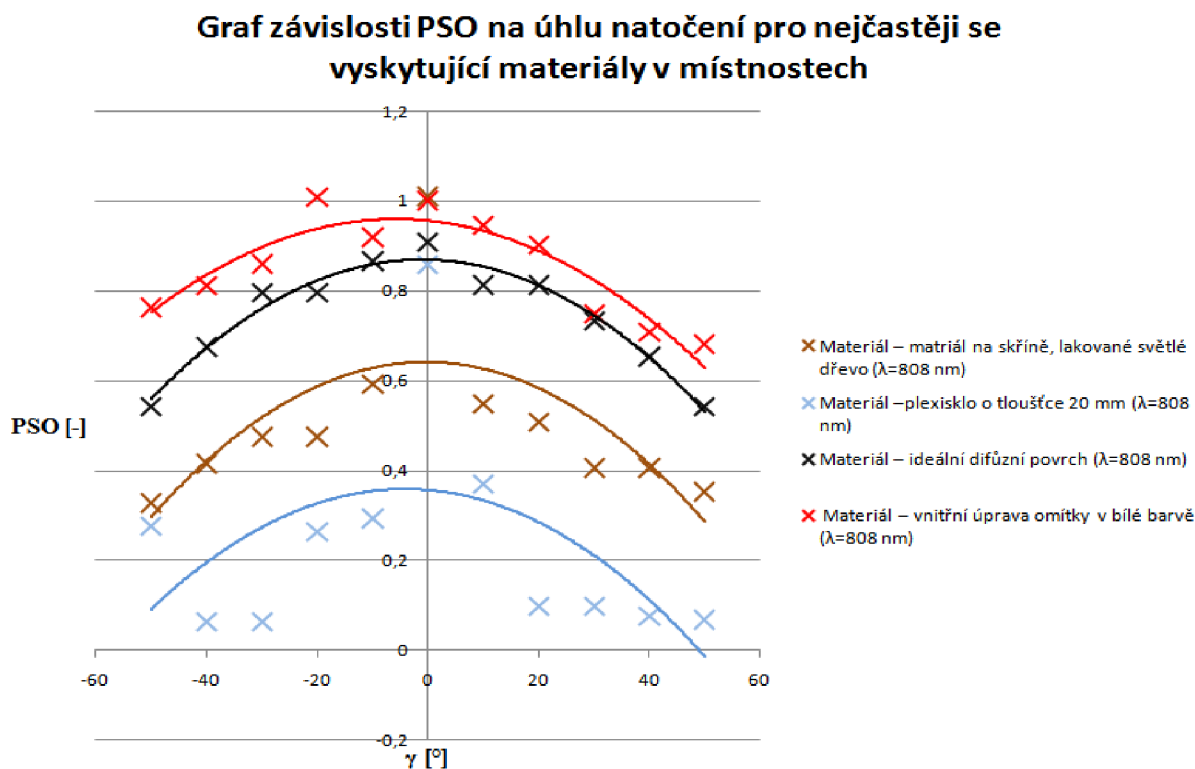
### Graf závislosti PSO na úhlu natočení pro různé materiály černé barvy



Obrázek 26: Graf  $PSO = f(\gamma)$  pro materiály černé barvy  $\lambda = 808 \text{ nm}$

Ještě lépe můžeme drsnost porovnat na obrázku 26, kde jsou v grafu vyneseny závislosti pro tři černé materiály – černý plech, černou omítku a vypnutý monitor. Vypnutý monitor se nejvíce blíží zrcadlu, protože pro nulový úhel natočení má  $PSO$  větší než 1. Zatímco černá omítka je drsná oproti černému plechu - má velmi malé  $PSO$ , pro plech je  $PSO$  závislé i na malé změně úhlu natočení. Hodnoty  $PSO$  při úhlech natočení větších než  $-10^\circ$  a  $10^\circ$  jsou menší než 5% maximální hodnoty a proto je zanedbáváme. Obdobné výsledky vycházejí pro vlnovou délku 670 nm. Grafy pro jednotlivé materiály jsou uvedeny v příloze.

## 2.5.5 Porovnání nejčastěji se vyskytujících materiálů v indoor prostředích v porovnání s referenční difúzní plochou



Obrázek 27: Graf  $PSO = f(\gamma)$  pro nejpoužívanější materiály v indoor prostředích s porovnáním s referenční difúzní plochou pro  $\lambda = 808$  nm

Na obrázku 27 jsou pak shrnuty nejčastěji se vyskytující materiály ve vnitřních prostředích. Plexisklem o tloušťce 20 mm simulujeme možné chování okenních tabulek. V grafu je také vynesena závislost pro referenční difúzní plochu, ke které můžeme námi naměřené hodnoty srovnat. Další naměřené hodnoty pro nižší vlnovou délku jsou uvedeny v části technické dokumentace. Tyto hodnoty zde neuvádíme, protože průběhy pro tyto materiály jsou obdobné, pouze posunuty o asi  $PSO = 0,2$  dolů.

### 3 Závěr

V bakalářské práci jsme se zabývali studiem odrazivosti povrchů. Na začátku experimentální části jsme vytvořili pracovní postup pro určení poměrné směrové odrazivosti různých reálných materiálů. Pro změření vlastností materiálů jsme využívali reálné povrchy z laboratoře PA – 637, jako je dřevěná deska skříně, plech sloužící jako kryt PC, LCD monitoru a kryty měřicího přístroje. Některé materiály jsme nemohli reálně proměřit – jako například okno nebo zeď. Z tohoto důvodu jsme použili přípravky, které vlastnosti těchto materiálů co nejvěrněji napodobují – přípravky na měření vnitřních omítek, skleněná tabulka a tabulka z plexiskla.

Všechny námi měřené materiály jsme zpracovali do podoby technické dokumentace, která je uvedena v příloze.

Pro úpravu stěn vnitřních prostorů, ve kterých chceme použít na šíření informace optický vysílač jsme jako nejvhodnější určili omítku bílé barvy, která má velmi dobré odrazivé vlastnosti. Nábytek a vnitřní vybavení, které vyplňuje největší část prostoru je vhodné volit světlé barvy – přírodní lakované světlé dřevo je pro tento účel velmi vhodné. Skleněnou výplň oken je nejvhodnější volit co nejtenčí, abychom dosáhli vysoké poměrné směrové odrazivosti pro větší rozsah úhlu dopadu optického paprsku.

Nejvhodnější je použít optický vysílač na vyšších vlnových délkách, kdy dosahuje *PSO* větších hodnot. Nejvhodnější je volit vysílače v rozsahu IR-A mezi 760 nm až 1400 nm, kdy při menším výkonu, než při použití viditelného spektra, snáze přeneseme vysílaný signál pomocí odrazů. Při menších výkonech v rozsahu této vlnové délky také nezpůsobíme zranění osobám v místnosti.

## 4 Seznam literatury

- [1] SALEH, Bahaa; TEICH, Malvin. *Základy fotoniky : SVAZEK 1*. Praha : MATFYZPRESS, 1994. 226 s.
- [2] JHALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. *Fyzika : Elektromagnetické vlny - Optika-Relativita*. 1. vydání. Brno : VUTIUM, 2000. 213 s.
- [3] WILFERD, Otakar. *Optoelektronika : Přednášky*. první. Brno : VUTBR, 2002. 121 s.
- [4] HABEL, Jiří. *Osvětlování*. Vyd. 1. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 1991. 328s.
- [5] HABEL, Jiří. Základy světelné techniky. *Světlo : časopis pro světelnou techniku a osvětlování* [online]. 2008, 04, [cit. 2011-05-24]. Dostupný z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=37589](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37589)>
- [6] WILFERT, O., PROKEŠ, A. *Měření efektivní odrazné plochy v pásmu 850 nm*. Radioelektronika 95, 2 díl., Brno., VUT v Brně, 2003
- [7] HORŇÁK, Pavol. *Světelná technika* 1. vydání. Bratislava: Vydavatelství ALFA, 1989. ISBN 80-05-00122-3
- [8] KRUPKA, F., KALIVODA L.. *Fyzika* 2. vydání. Praha: Vydavatelství SNTL, 1989.
- [9] WILFERT, O; HENIGER, H; KOLKA, Z. Satelitní a mobilní optické spoje. In *Satelitní a mobilní optické spoje* [online]. Praha : UREL FEKT VUT v Brně, 2007 [cit. 2010-12-16]. Dostupné z WWW: <[http://www.urel.feec.vutbr.cz/web\\_pages/projekty/clanky/Satelitni\\_opticke\\_spoje.pdf](http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_pages/projekty/clanky/Satelitni_opticke_spoje.pdf)>
- [10] HRBÁČKOVÁ, Petra Optický spoj pro vnitřní bezkabelovou síť: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2010. 83 s.
- [11] Návody k laboratorním úlohám : Energetická bilance optické bezkabelové linky. In *Fotonika a optické komunikace*. Brno : UREL FEKT VUT v Brně, 2010. s. 3.

[12]JIRÁSKOVÁ, Milena ; JIRÁSEK, Lubor. Lidský organismus a záření. *Světlo : časopis pro světelnou techniku a osvětlování* [online]. 2007, 04, [cit. 2011-05-24]. Dostupný z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=36024](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36024)>.

[13] MÍŠEK, Petr. *NEJNOVĚJŠÍ POZNATKY O SPECIFICKÝCH ÚČINCÍCH RŮZNÝCH DRUHŮ ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ NA ŽIVÉ ORGANISMY* [online]. Brno : MUNI, 2007. 44 s. Bakalářská práce. MUNI. Dostupné z WWW: <[is.muni.cz/th/63714/prif\\_b/Bakalarska\\_prace.doc](http://is.muni.cz/th/63714/prif_b/Bakalarska_prace.doc)>.

[14]Měření drsnosti povrchu. *Mitutoyo* [online]. 2008, 01, [cit. 2011-05-24]. Dostupný z WWW: <[http://www.mitutoyo-czech.cz/cz/pdf/poster\\_drsnosti\\_ra\\_cze\\_a3.pdf](http://www.mitutoyo-czech.cz/cz/pdf/poster_drsnosti_ra_cze_a3.pdf)>.

[15]DORDOVÁ, L., WILFERT, O. Měření odrazivých vlastností povrchů. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2010.

## 5 Seznam zkratek a symbolů

$c_0$  - rychlost světla ve vakuu

$c$  - rychlost světla v prostředí

$d$  - vzdálenost

$n$  - index lomu prostředí

$\theta_n$  - úhel šíření světla

$t$  - čas

$u(\mathbf{r}, t)$  - reálná funkce monochromatického vlny

$U(\mathbf{r}, t)$  - komplexní funkce monochromatické vlny

$\mathbf{k}$  - vlnový vektor

$\pi$  - Rudolfovo číslo

$v$  - rychlost

$f$  - frekvence

$k$  - vlnové číslo

$\omega$  - úhlová rychlost

$\lambda$  - vlnová délka

$\Phi$  - světelný tok

$\Phi_e$  - zářivý tok

$K(\lambda)$  - světelná účinnost

$I(\mathbf{r}, t)$  - optická intenzita

$P(t)$  - optický výkon

$\rho$  - odrazivost

$PSO$  - poměrná směrová odrazivost

$L$  - jas

$\sigma$  - dohodnutý činitel rozptylu

$\gamma$  - úhel polovičního jasu

$M$  - svítivost odrážející plochy

$dl$  - elementární hloubka prostředí

$\tau$  - činitel pohlcení

$\alpha(\lambda)$  - je koeficient zeslabení

$T_\lambda(\lambda)$  - spektrální propustnost

$L$  - vzdálenost měřeného materiálu od optického vysílače

$S_u$  - napěťová citlivost optického přijímače

$U_{det}$  – detekované napětí na osciloskopu

$P_p$  - přijatý výkon na optickém přijímači

$P_L$  - výkon optického vysílače (laseru)

$d_{fd}$  - průměr optiky optického přijímače

IR – infračervené záření

UV – ultrafialové záření

$r_{ip}$  - poloměr