



# Polarizace světla

## Diplomová práce

*Studijní program:* N1701 – Fyzika  
*Studijní obory:* 7504T055 – Učitelství fyziky pro střední školy  
7504T077 – Učitelství informatiky pro střední školy

*Autor práce:* **Bc. Vojtěch Kučera**  
*Vedoucí práce:* prof. Mgr. Jiří Erhart, Ph.D.



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch Kučera**  
Osobní číslo: **P14000695**  
Studijní program: **N1701 Fyzika**  
Studijní obory: **Učitelství fyziky pro střední školy**  
**Učitelství informatiky pro střední školy**  
Název tématu: **Polarizace světla**  
Zadávající katedra: **Katedra fyziky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Polarizace světelné vlny
2. Zdroje polarizovaného světla
3. Změny polarizace světla
4. Příprava návodů a úloh k polarizaci světla v běžném životě
5. Praktická realizace demonstračních experimentů k polarizaci světla na střední škole

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

**LEPIL, Oldřich a Zdeněk KUPKA. Fyzika pro gymnázia: optika. 1. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1993, 167 s. Učebnice pro střední školy (Státní pedagogické nakladatelství). ISBN 8004260926.**

**FUKA, Josef a Bedřich HAVELKA. Optika a atomová fyzika. 1. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961, 845 s., 4 bar. obr. příl. Učebnice pro vysoké školy (Státní pedagogické nakladatelství). I. Optika, kapitola 10 Polarizace světla.**

Vedoucí diplomové práce: **prof. Mgr. Jiří Erhart, Ph.D.**  
Katedra fyziky

Datum zadání diplomové práce: **14. dubna 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **26. dubna 2016**



doc. RNDr. Miroslav Brzezina, CSc.  
děkan

L.S.



prof. Ing. Karel Vokurka, DrSc.  
vedoucí katedry

dne **21/6/15**

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu práce prof. Mgr. Jiřímu Erhartovi, Ph.D. za jeho cenné rady, ochotu a trpělivost během zpracování této práce.

Také bych rád poděkoval své rodině a přátelům za jejich podporu a pomoc po celou dobu tvorby této práce.

## Anotace

Diplomová práce se věnuje tématu polarizace světla. Předkládá základní informace o polarizaci elektromagnetické vlny, seznamuje se změnami polarizovaného i nepolarizovaného světla při průchodu látkou a udává příklady využití polarizovaného světla v technické praxi a běžném životě. V praktické části práce jsou pak realizovány experimenty, které by mohly sloužit při výuce na střední škole, právě při výkladu látky polarizovaného světla.

**Klíčová slova:** polarizace, Brewsterův úhel, index lomu, polarizované světlo, dvojlom

## Abstract

This Diploma thesis is focused on the topic of light polarization. It presents fundamental information on the polarization of electromagnetic wave. Changes of the polarization state for the polarized as well as unpolarized light in interaction with matter are discussed together with examples of using polarized light in everyday life. Experiments related to and demonstrating light polarization were realized in the experimental part of thesis. Presented experiments might be used in Physics lessons at the high school education level.

**Keywords:** polarization, Brewster angle, index of refraction, polarized light, birefringence

## Obsah

Poděkování .....	4
Anotace .....	5
Seznam obrázků .....	9
Seznam tabulek a grafů .....	12
Seznam symbolů .....	13
Seznam zkratek .....	16
Úvod .....	17
1 Polarizace světelné vlny .....	18
1.1 Podstata a vlastnosti polarizovaného světla .....	18
1.2 Fresnelovy rovnice .....	22
1.3 Vznik polarizovaného světla .....	27
1.3.1 Obecné vztahy pro polarizátory .....	27
1.3.2 Polarizace odrazem .....	28
1.3.3 Etienne-Louis Malus a David Brewster .....	30
1.3.4 Polarizace lomem .....	31
1.3.5 Ověření Malusova zákona .....	34
2 Změny roviny polarizace světla .....	37
2.1 Dvojlom .....	37
2.1.1 Jednoosé a dvouosé krystaly .....	38
2.1.2 Polarizace dvojlomem .....	40
2.2 Fotoelasticita .....	41
2.3 Stáčení roviny polarizace – optická aktivita .....	43
2.4 Polarizátory .....	47
2.4.1 Polarizační filtry založené na absorpci .....	48
3 Polarizace světla v běžném životě .....	51
3.1 Polarizační brýle a fotografické filtry .....	51

3.2	LCD .....	54
3.2.1	Twisted nematic (TN) .....	55
3.2.2	TFT.....	56
3.3	3D kino.....	56
4	Zdroje polarizovaného světla .....	59
4.1	Laser.....	59
5	Polarizace světla v učebnicích fyziky na SŠ .....	62
5.1	Zahraniční učebnice .....	63
6	Příprava návodů a úloh k polarizaci světla v běžném životě .....	64
6.1.1	Měření indexu lomu v kapalině pomocí difrakční mřížky .....	64
6.1.2	Měření indexu lomu v kapalině využívající refrakci .....	66
6.1.3	Měření indexu lomu skla s využitím totálního odrazu .....	68
6.2	Neviditelný monitor.....	69
6.3	Sluneční kompas .....	70
7	Praktická realizace demonstračních experimentů k polarizaci světla a měření indexu lomu na střední škole.....	73
7.1	Měření indexu lomu.....	73
7.1.1	Měření indexu lomu v kapalině pomocí difrakční mřížky .....	74
7.1.2	Měření indexu lomu v kapalině využívající refrakci .....	76
7.1.3	Výsledky měření indexu lomu v kapalině.....	78
7.1.4	Měření indexu lomu skla s využitím totálního odrazu.....	81
7.2	Odraz polarizovaného světla pod Brewsterovým úhlem .....	82
7.2.1	Experimentální ověření Brewsterova úhlu .....	83
7.2.2	Porovnání hodnot Brewsterova úhlu získaných výpočtem a experimentálním měřením.....	86
7.3	Model vzniku polarizovaného světla odrazem na rozhraní .....	89
7.3.1	Odraz na dvou navzájem rovnoběžných rovinách.....	90
7.3.2	Odraz na dvou navzájem kolmých rovinách .....	90
7.4	Neviditelný monitor.....	91



7.5 Sluneční kompas .....	93
Závěr .....	96
Literatura .....	97

## Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Znázornění elektromagnetické vlny.....	19
Obrázek 1.2: Výsledná křivka elipticky polarizovaného světla.....	19
Obrázek 1.3: Grafické znázornění rovnice (6) pro různá $\varphi$ .....	20
Obrázek 1.4: Elipticky polarizované světlo .....	21
Obrázek 1.5: Kruhově polarizované světlo.....	21
Obrázek 1.6: Lineárně polarizované světlo .....	22
Obrázek 1.7: Schéma k popisu Fresnelových rovnic .....	22
Obrázek 1.8: Odraz a lom na rozhraní dvou prostředí.....	23
Obrázek 1.9: Koeficienty odrazivosti v závislosti na úhlu dopadu.....	26
Obrázek 1.10: Augustin-Jean Fresnel.....	26
Obrázek 1.11: Uspořádání pokusu k polarizaci odrazem .....	29
Obrázek 1.12: Uspořádání pokusu k polarizaci odrazem .....	29
Obrázek 1.13: Etienne-Louis Malus.....	30
Obrázek 1.14: David Brewster .....	31
Obrázek 1.15: Polarizace lomem (1) .....	31
Obrázek 1.16: Polarizace lomem (2) .....	32
Obrázek 1.17: Polarizace lomem (3) .....	33
Obrázek 1.18: Pomůcka k demonstraci polarizace lomem.....	33
Obrázek 1.19: Schéma experimentu .....	34
Obrázek 1.20: Experiment ověření Malusova zákona .....	35
Obrázek 2.1: Dvojlom .....	37
Obrázek 2.2: Znázornění pozitivního jednoosého krystalu (a), negativního jednoosého krystalu (b) a dvouosého krystalu (c).....	38
Obrázek 2.3: Elementární buňky krystalů kalcitu a aragonitu.....	39
Obrázek 2.4: Uspořádání atomů v krystalu vápence a aragonitu .....	39
Obrázek 2.5: Optické osy v krystalu aragonitu .....	40
Obrázek 2.6: Důkaz polarizace řádného a mimořádného paprsku .....	41
Obrázek 2.7: Znázornění směrů hlavních normálových napětí.....	42
Obrázek 2.8: Izochromaty.....	43
Obrázek 2.9: Schéma stáčení roviny polarizace .....	43
Obrázek 2.10: Skládání dvou kruhově polarizovaných vln .....	44
Obrázek 2.11: Stáčení roviny polarizace .....	45
Obrázek 2.12: K matematickému výkladu rotační polarizace .....	46

Obrázek 2.13: Schéma polarizace s pomocí dichroického materiálu.....	48
Obrázek 2.14: Historická fotografie dvou polarizačních filtrů .....	49
Obrázek 2.15: Edwin H. Land.....	49
Obrázek 3.1: Princip funkce polarizačních brýlí.....	51
Obrázek 3.2: Schéma polarizace slunečních paprsků odrazem na vodní hladině .....	52
Obrázek 3.3: Duha pozorovaná skrz polarizační filtr.....	53
Obrázek 3.4: Efekt polarizačního filtru .....	54
Obrázek 3.5: Schéma TN displeje.....	55
Obrázek 3.6: Schéma TFT displeje.....	56
Obrázek 3.7: Princip 3D projekce založené na polarizaci světla.....	57
Obrázek 3.8: Princip 3D projekce využívající anaglyf .....	58
Obrázek 3.9: Princip 3D projekce využívající <i>shutter glasses</i> .....	58
Obrázek 4.1: Schéma stimulované emise.....	60
Obrázek 4.2: Princip funkce laseru.....	61
Obrázek 6.1: Schéma experimentu měření indexu lomu s využitím difrakční mřížky .....	64
Obrázek 6.2: Lom paprsku na rozhraní vzduchu a vody .....	65
Obrázek 6.3: Schéma pokusu.....	66
Obrázek 6.4: Schéma průchodu paprsku půlkruhovým vzorkem v případě totálního odrazu .....	68
Obrázek 6.5: Schéma LCD displeje .....	70
Obrázek 6.6: Schéma LCD displeje s odstraněným předním polarizátorem .....	70
Obrázek 6.7: Polarizace slunečního světla rozptylem v atmosféře .....	71
Obrázek 6.8: Pozorování lineárně polarizovaného světla skrz štěrbinu ve stínítku .....	72
Obrázek 6.9: Kalibrace slunečního kompasu.....	72
Obrázek 7.1: Nádoba uzpůsobená k realizaci experimentu .....	75
Obrázek 7.2: Sestavený experiment pro měření indexu lomu.....	75
Obrázek 7.3: Kádinka s víkem připravená k měření indexu lomu .....	77
Obrázek 7.4: Měření indexu lomu.....	78
Obrázek 7.5: Sestavení experimentu pro měření indexu lomu skla .....	82
Obrázek 7.6: Sestavení experimentu pro zjišťování Brewsterova úhlu pro různé kapaliny.....	83
Obrázek 7.7: Uchycení válcové čočky rozšiřující laserový paprsek .....	84

Obrázek 7.8: Odraz světla na hladině kapaliny pod Brewsterovým úhlem.	85
Obrázek 7.9: Sestavení experimentu pro určení Brewsterova úhlu pro sklo .....	86
Obrázek 7.10: Model polarizace světla odrazem .....	90
Obrázek 7.11: Model polarizace světla odrazem II .....	91
Obrázek 7.12: Monitor připojený k notebooku .....	92
Obrázek 7.13: Přikládání polarizačního filtru k monitoru a jeho natáčení.	93
Obrázek 7.14: Sluneční kompas .....	94
Obrázek 7.15: Pozorování lineárně polarizovaného světla skrz sluneční kompas .....	94
Obrázek 7.16: Sluneční kompas na denním světle.....	95

## Seznam tabulek a grafů

Tabulka 6.1: Hodnoty studentova součinitele .....	68
Tabulka 7.1: Tabulkové hodnoty indexu lomu vybraných kapalin pro různé vlnové délky světla .....	73
Tabulka 7.2: Vzdálenost nultého a prvního maxima pro různé kapaliny ...	76
Tabulka 7.3: Hodnoty indexu lomu získané měřením metodou difrakce ...	76
Tabulka 7.4: Hodnoty indexu lomu získané měřením metodou refrakce ...	78
Tabulka 7.5: Vypočítané hodnoty Brewsterova úhlu pro vybrané kapaliny	83
Tabulka 7.6: Naměřené hodnoty Brewsterova úhlu pro vybrané kapaliny .	85
Graf 1: Graf závislosti odporu fotorezistoru na úhlu natočení polarizačního filtru .....	36
Graf 2: Graf výsledků měření indexu lomu vody .....	79
Graf 3: Graf výsledků měření indexu lomu lihu .....	79
Graf 4: Graf výsledků měření indexu lomu rostlinného oleje.....	80
Graf 5: Graf výsledků měření indexu lomu glycerinu .....	80
Graf 6: Graf výsledků měření indexu lomu cukerného roztoku .....	81
Graf 7: Hodnoty Brewsterova úhlu na rozhraní vzduchu a vody získané různými metodami.....	87
Graf 8: Hodnoty Brewsterova úhlu na rozhraní vzduchu a lihu získané různými metodami.....	87
Graf 9: Hodnoty Brewsterova úhlu na rozhraní vzduchu a rostlinného oleje získané různými metodami .....	88
Graf 10: Hodnoty Brewsterova úhlu na rozhraní vzduchu a glycerinu získané různými metodami .....	88
Graf 11: Hodnoty Brewsterova úhlu na rozhraní vzduchu a cukerného roztoku získané různými metodami .....	89

## Seznam symbolů

$E, \vec{E}$	intenzita elektrického pole
$B, \vec{B}$	magnetická indukce
$A_1, A_2$	amplituda vlnění
$\omega$	úhlová frekvence
$t$	čas
$\varphi$	fázový rozdíl vlnění
$x, y, z$	osy v kartézské soustavě souřadnic
$E'$	intenzita elektrického pole lomeného paprsku
$E''$	intenzita elektrického pole odraženého paprsku
$E_s$	složka intenzity elektrického pole, ve směru kolmém na rovinu dopadu
$E_p$	složka intenzity elektrického pole, rovnoběžná s rovinou dopadu
$S$	průřez dopadajícího paprsku
$S'$	průřez lomeného paprsku
$v$	rychlost světla
$v'$	rychlost světla v látce
$n_0, n_1$	indexy lomu různých optických prostředí
$E_s$	intenzita elektrického pole kolmé složky
$E''_s$	intenzita elektrického pole kolmé složky odraženého paprsku
$E'_s$	intenzita elektrického pole kolmé složky lomeného paprsku
$E_p$	intenzita elektrického pole rovnoběžné složky
$E''_p$	intenzita elektrického pole rovnoběžné složky odraženého paprsku
$E'_p$	intenzita elektrického pole rovnoběžné složky lomeného paprsku
$\theta_0$	úhel dopadu paprsku na rozhraní
$\theta_1$	úhel lomu paprsku na rozhraní
$r_s$	koeficient odrazu pro kolmou složku světla
$r_p$	koeficient odrazu pro rovnoběžnou složku světla

$t_p$	koeficient propustnosti pro rovnoběžnou složku světla
$t_s$	koeficient propustnosti pro kolmou složku světla
$R$	odrazivost
$T$	propustnost
$R_s$	odrazivost pro kolmou složku světla
$R_p$	odrazivost pro rovnoběžnou složku světla
$T_s$	propustnost pro kolmou složku světla
$T_p$	propustnost pro rovnoběžnou složku světla
$T_{\max}$	maximální propustnost polarizačního filtru pro lineárně polarizované světlo
$T_{\min}$	minimální propustnost polarizačního filtru pro lineárně polarizované světlo
$T_\theta$	propustnost dvou polarizátorů závislá na úhlu jejich natočení
$P$	stupeň polarizace
$I$	intenzita světla
$I_0$	maximální intenzita světla
$I'_p$	intenzita prošlého světla ve směru roviny dopadu
$I'_s$	intenzita prošlého světla ve směru kolmém na rovinu dopadu
$B$	velikost dvojlomu
$n_o$	index lomu řádného paprsku
$n_e$	index lomu mimořádného paprsku
$E_o$	intenzita elektrického pole řádného paprsku
$E_e$	intenzita elektrického pole mimořádného paprsku
$\sigma_1, \sigma_2$	hlavní směry mechanického napětí
$\delta$	dráhový rozdíl mezi dvěma kmity
$\lambda$	vlnová délka
$\alpha$	úhel stočení roviny polarizace
$h$	výška Slunce nad obzorem
$\psi$	deklinace
$\delta$	zeměpisná šířka
$E$	energie fotonu

$h$	Planckova konstanta
$i$	úhel dopadu
$r$	úhel odrazu
$\overline{\delta}(n)$	chyba měření
$x_i$	naměřená hodnota fyzikální veličiny
$\bar{x}$	aritmetický průměr fyzikální veličiny
$t_{P,n}$	studentův součinitel
$\theta_c$	kritický úhel
$\theta_B$	Brewsterův úhel



## Seznam zkratek

LCD liquid crystal display (displej z kapalných krystalů)

GPS global positioning system

TN twisted nematic

TFT thin-film tranzistor

MŠMT ministerstvo školství mládeže a tělovýchovy

## Úvod

Práce nese název polarizace světla, což je velice široký pojem, který se dotýká mnoha témat optiky. Téma polarizace světla jsme si vybrali, protože se jedná o velice zajímavou část optiky a jde o vlastnost světla, která není vždy na první pohled zřejmá. Polarizaci světla se často ve výuce na středních školách nevěnuje takový prostor jako jiným tématům optiky, ačkoli se vlastnosti polarizovaného světla uplatňují v mnoha technických odvětvích. Naší motivací je ukázat a vysvětlit hlavní principy polarizovaného světla a jeho využití v běžném životě.

Na úvod tedy specifikujeme, kterými tématy se tato práce bude zabývat. Na začátku práce nejprve popíšeme princip polarizace světla a jejího vzniku. Jde především o to pochopit, jakými způsoby můžeme polarizovaného světla dosáhnout a jak ho fyzikálně vysvětlit. Dále se také podíváme na to, jak se polarizované světlo chová v interakci s látkou a jak takového chování využít. Přirozeně se pak práce zabývá také tím, kde se s polarizovaným světlem můžeme setkat v běžném životě a praktická část poté realizuje demonstrační experimenty týkající se právě vlastností polarizovaného světla a jeho využití v praxi. Část práce se také zabývá tím, jak s tématem polarizace světla pracují učebnice pro střední školy u nás i v zahraničí.

Hlavním cílem práce je praktická realizace demonstračních experimentů případně návrh laboratorních úloh, které by mohly být realizovány při výuce fyziky na střední škole. Praktické realizaci vždy předchází nejprve fyzikální vysvětlení daného jevu.

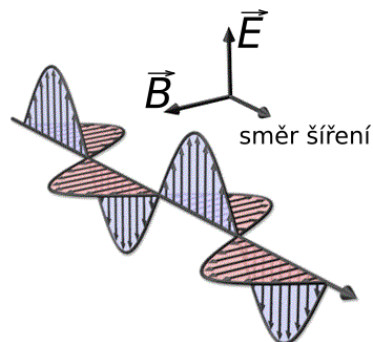
## 1 Polarizace světelné vlny

Polarizace světla byla objevena E. L. Malusem v roce 1808. Později byla popsána teorií elektromagnetického pole. Víme, že světlo má povahu elektromagnetického vlnění. Rádi bychom se však o tomto vlnění, především pak o jeho vlastnostech dozvěděli více. Vlnění můžeme obecně rozdělit na příčné a podélné. Světlo vysílané zdrojem nejeví žádné zjevné vlastnosti, z nichž by bylo možné povahu vlnění určit. Příčné a podélné vlnění však lze rozlišit experimentálně. Takové experimenty mohou využívat odraz, lom, dvojlom, selektivní absorpci nebo rozptyl světla. Světlo podrobené některému z těchto zásahů jeví vlastnosti příčného vlnění. Vektor intenzity elektrického pole koná takové kmity, jejichž směr a fáze se mění zcela nahodile. Pokud nastane jeden z výše zmíněných zásahů, bude koncový bod světelného vektoru (např. intenzita elektrického pole) opisovat neproměnnou křivku. Takové světlo nazýváme světlem polarizovaným. Křivka opisovaná koncovým bodem vektoru elektrické intenzity může mít libovolný tvar. Nejčastěji však rozlišujeme světlo elipticky, kruhově nebo lineárně polarizované. [1]

Z pokusů i z teorie vyplývá, že světlo je příčné elektromagnetické vlnění, které se skládá ze dvou složek. Elektrické, kterou značíme  $E$  a magnetické, kterou značíme  $B$ . Rovina, v níž kmitá vektor intenzity elektrického pole  $\vec{E}$ , se nazývá rovina polarizace. Polarizace se znázorňuje jako elektrická oscilace v čelním pohledu. [2]

### 1.1 Podstata a vlastnosti polarizovaného světla

Na rozdíl od elektromagnetických vln vyvolaných jediným určitým vysílačem, který kmitá v určitém směru, je světlo výslednicí velkého počtu rozruchů oscilátorů kmitajících v různých směrech. Roviny elektrického a magnetického pole mají potom náhodný směr. Nicméně situaci si můžeme zjednodušit tím, že se budeme zabývat pouze vektorem elektrického pole, neboť víme, že  $\vec{E}$  a  $\vec{B}$  jsou navzájem kolmé. [3]



Obrázek 1.1: Znázornění elektromagnetické vlny. Překresleno podle [4]

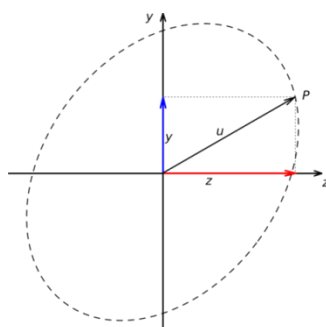
Promítneme-li vektor intenzity elektrického pole do roviny kolmé na směr šíření, bude příslušný průmět ve všech možných směrech. Existují však způsoby, které jsme již naznačili v úvodu této kapitoly, kterými lze srovnat všechny vektory do jediné roviny. V takovém případě hovoříme o lineárně polarizovaném světle. [3]

Předpokládejme nyní, že se určitým směrem (osa  $x$ ) šíří dvě lineárně polarizované světelné vlny, jejichž vektory intenzity elektrického pole leží ve dvou vzájemně kolmých rovinách  $y$  a  $z$ . Obě vlny můžeme popsat rovnicemi:

$$y = A_1 \sin \omega t \quad (1)$$

$$z = A_2 \sin(\omega t - \varphi). \quad (2)$$

Je-li fázový rozdíl  $\varphi$  stálý, pak se obě vlnění spolu skládají. Výsledná okamžitá výchylka je pak rovna vektorovému součtu výchylek ve směru  $y$  a  $z$ . Toto výsledné vlnění tedy není obecně lineárně polarizované, jak můžeme vidět na obrázku 1.2.



Obrázek 1.2: Výsledná křivka elipticky polarizovaného světla. Překresleno z [3]

Bod  $P$  tedy mění svou polohu a obecně opisuje kolem počátečního bodu  $O$  křivku. Tvar této křivky můžeme určit, pokud z rovnic vyloučíme čas. Rovnice poté budou mít tvar:

$$\sin \omega t = \frac{y}{A_1} \quad (3)$$

$$\sin \omega t \cos \varphi - \cos \omega t \sin \varphi = \frac{z}{A_2}. \quad (4)$$

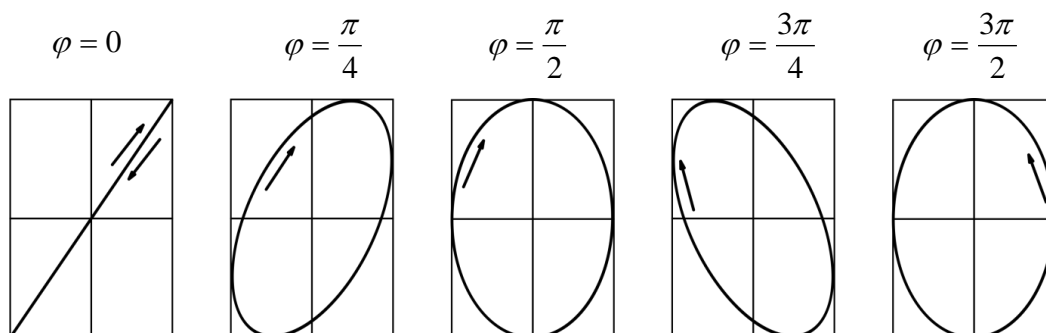
Po dosazení za  $\sin \omega t$  do rovnice (4) dostaneme:

$$\sin \varphi \sqrt{1 - \frac{y^2}{A_1^2}} = \frac{y}{A_1} \cos \varphi - \frac{z}{A_2}, \quad (5)$$

umocněním a úpravou rovnice (5) dostáváme:

$$\frac{y^2}{A_1^2} + \frac{z^2}{A_2^2} - 2 \frac{yz}{A_1 A_2} \cos \varphi = \sin^2 \varphi. \quad (6)$$

Tento vztah je analytickou rovnicí elipsy. Proměnnou, na které závisí tvar křivky je  $\varphi$ . Příklady tvaru křivky pro různé hodnoty  $\varphi$  jsou znázorněny na obrázku 1.3. [3]



Obrázek 1.3: Grafické znázornění rovnice (6) pro různá  $\varphi$ . Překresleno z [3]

Speciální případy nastávají, pokud:

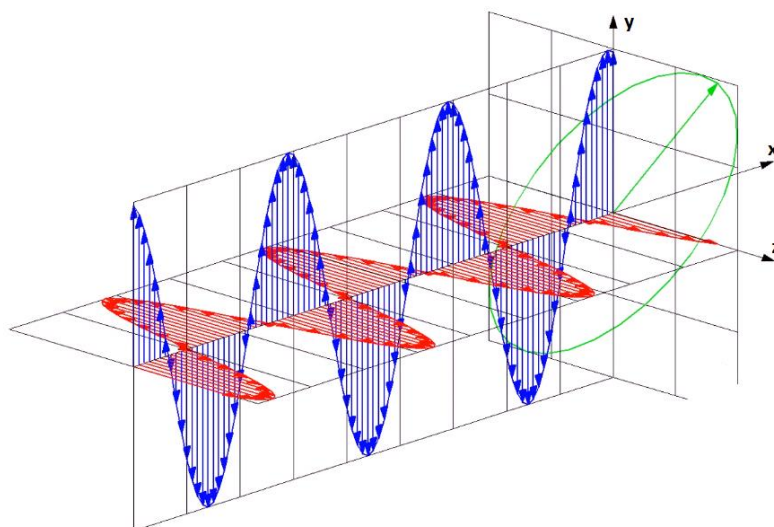
a)  $A_1 = A_2$  a  $\varphi = (2k - 1)\frac{\pi}{2}$ , kde  $k = 1, 2, 3, \dots$

V tomto případě přejde elipsa v kružnici. Takové světlo se pak nazývá kruhově polarizované.

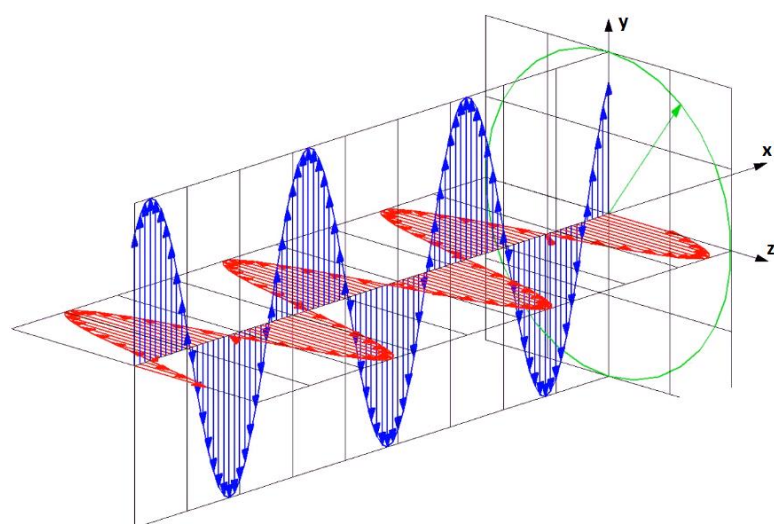
b)  $\varphi = k\pi$ , kde  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

V tomto případě rovnice nabývá tvaru  $\left(\frac{y}{A_1} \pm \frac{z}{A_2}\right)^2 = 0$ . Takové světlo se pak nazývá lineárně polarizované. [3]

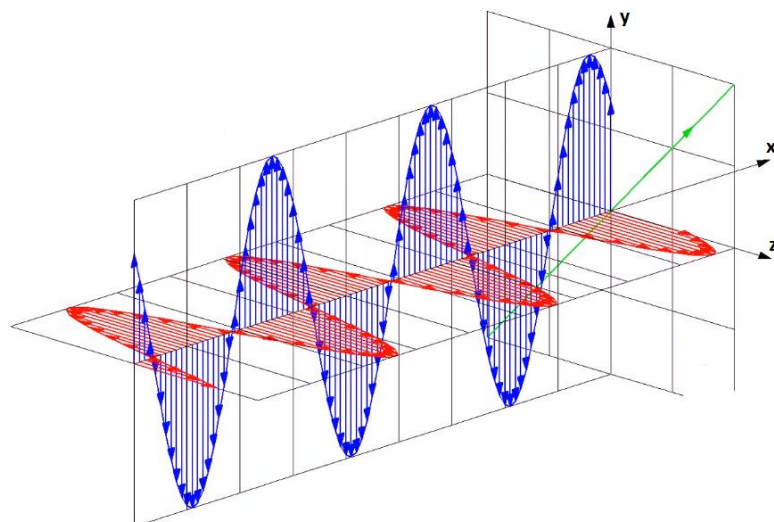
Uvedené tři případy skládání dvou vzájemně kolmých světelných kmitů znázorňují následující obrázky 1.4–1.6.



Obrázek 1.4: Elipticky polarizované světlo. Překresleno podle [5]



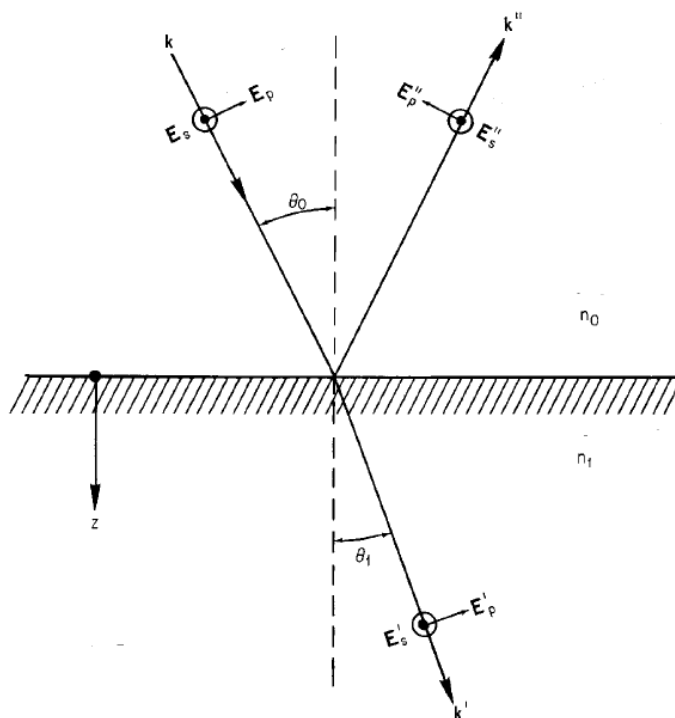
Obrázek 1.5: Kruhově polarizované světlo. Překresleno podle [6]



Obrázek 1.6: Lineárně polarizované světlo. Překresleno podle [7]

## 1.2 Fresnelovy rovnice

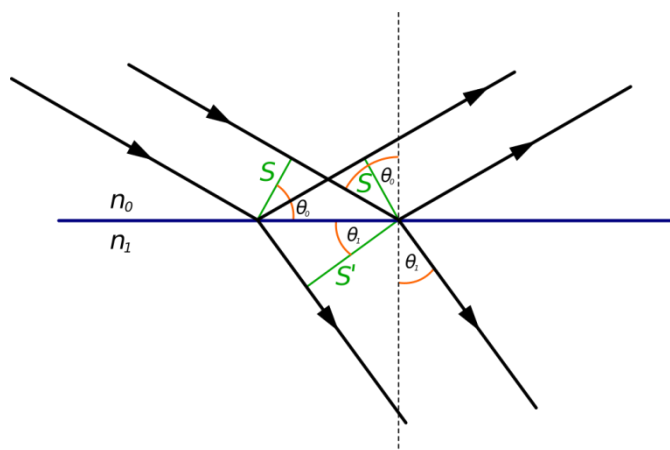
Jeden ze způsobů jak dosáhnout lineárně polarizovaného světla je nechat nepolarizované světlo odrazit od jiného povrchu pod určitým úhlem. Nejprve si však odvodíme obecné vztahy platné pro odraz a lom na rozhraní dvou prostředí. Fresnelovy rovnice vyjadřují, jak bude vypadat odražené a prošlé světlo po dopadu pod úhlem na optické rozhraní. Pro vyjádření těchto rovnic nám může posloužit znázornění (Obrázek 1.7). [1] [3]



Obrázek 1.7: Schéma k popisu Fresnelových rovnic [1]

Kmity intenzity elektrického pole  $E$  v různých směrech se dějí nahodile, proto můžeme světlo rozdělit na dvě složky se stejnou energií. Složka polarizace, kterou budeme značit indexem  $s$  (*senkrecht*) je rovina kmitů intenzity elektrického pole, která je kolmá na rovinu papíru. Druhá složka  $p$  (*parallel*) kmitá v rovině papíru. Směry jednotlivých složek jsou dohodnuty konvencí tak, jak jsou vyznačeny na obrázku pomocí teček a šipek. (Směry  $E$  pro odražený paprsek jsou však závislé na indexech lomu obou materiálů. Pokud je  $n_1 > n_0$ ,  $E''_s$  bude mít opačný směr, což zapříčiní změnu fáze odraženého paprsku o  $180^\circ$  pro složku  $s$ .) Obecně můžeme vztah mezi dopadající, odraženou a lomenou složkou světla ilustrovat na obrázku 1.8 a popsat následujícím vzorcem: [1] [3]

$$E^2 S \frac{1}{v} = E'^2 S \frac{1}{v} + E''^2 S' \frac{1}{v'} . \quad (7)$$



Obrázek 1.8: Odraz a lom na rozhraní dvou prostředí. Překresleno podle [3]

Tento vztah popisuje zákon zachování energie dopadajícího, lomeného a odraženého světla, kde tok energie plochou kolmou na směr šíření světla je přímo úměrný čtverci amplitudy intenzity elektrického pole, velikosti plochy a nepřímo úměrný rychlosti šíření světla v látce. Tento vzorec můžeme

pomocí vztahů  $\frac{S}{S'} = \frac{\cos\theta_0}{\cos\theta_1}$  a  $\frac{v'}{v} = \frac{n_0}{n_1}$  přepsat na tvar [3]:

$$E^2 = E'^2 + E''^2 \frac{n_1 \cos\theta_1}{n_0 \cos\theta_0} \quad (8)$$

a pomocí Snellova zákona lomu upravit na:



$$E^2 = E''^2 + E'^2 \frac{\sin \theta_0 \cos \theta_1}{\sin \theta_1 \cos \theta_0}. \quad (9)$$

Pokud se vrátíme k myšlence, že kmity intenzity elektrického pole se dějí ve všech směrech nahodile a můžeme tedy kmity rozdělit do dvou složek, můžeme pro obě složky psát [3]:

$$(E_s^2 - E_s''^2) \sin \theta_1 \cos \theta_0 = E_s'^2 \sin \theta_0 \cos \theta_1, \quad (10)$$

$$(E_p^2 - E_p''^2) \sin \theta_1 \cos \theta_0 = E_p'^2 \sin \theta_0 \cos \theta_1. \quad (11)$$

Z Maxwellových rovnic plynou hraniční podmínky pro průchod rozhraním, a sice na rozhraní obou prostředí musí platit spojitost tečných složek  $\vec{E}$ , neboli součet intenzity elektrického pole světla dopadajícího a odraženého je roven intenzitě elektrického pole světla lomeného. V případě složky  $s$  tedy musí platit [3]:

$$E_s + E_s'' = E_s' \quad (12)$$

a v případě složky  $p$ :

$$E_p \cos \theta_0 - E_p'' \cos \theta_0 = E_p' \cos \theta_1. \quad (13)$$

Pomocí rovnic (12) (13) upravíme (10) (11) na tvar:

$$(E_s - E_s'') \sin \theta_1 \cos \theta_0 = E_s' \sin \theta_0 \cos \theta_1, \quad (14)$$

$$(E_p + E_p'') \sin \theta_1 = E_p' \sin \theta_0. \quad (15)$$

Poměr intenzity elektrického pole světla odraženého a dopadajícího pak vypadá:

$$r_s = \frac{E_s''}{E_s} = \frac{-\sin(\theta_0 - \theta_1)}{\sin(\theta_0 + \theta_1)}, \quad (16)$$

$$r_p = \frac{E_p''}{E_p} = \frac{\tan(\theta_0 - \theta_1)}{\tan(\theta_0 + \theta_1)}. \quad (17)$$

$r_s$  a  $r_p$  můžeme nazvat koeficienty odrazu. Stejně tak můžeme zavést koeficienty průchodu jako:

$$t_s = \frac{E'_s}{E_s} = \frac{2 \sin \theta_1 \cos \theta_0}{\sin(\theta_0 + \theta_1)}, \quad (18)$$

$$t_p = \frac{E'_p}{E_p} = \frac{2 \sin \theta_1 \cos \theta_0}{\sin(\theta_0 + \theta_1) \cos(\theta_0 - \theta_1)}. \quad (19)$$

Tyto vztahy se nazývají Fresnelovy rovnice. Je v nich v podstatě obsažena úplná teorie odrazu, lomu a polarizace pro průhledná prostředí. [3]

Pokud chceme vyjádřit intenzitu světla, stačí výše uvedené vztahy umocnit na druhou. Poté mluvíme o odrazivosti  $R$  a propustnosti  $T$  rozhraní. Tyto veličiny můžeme vyjádřit jako:

$$R_s = \frac{I''_s}{I_s}, \quad (20)$$

$$T_s = \frac{I'_s}{I_s}, \quad (21)$$

$$R_p = \frac{I''_p}{I_p}, \quad (22)$$

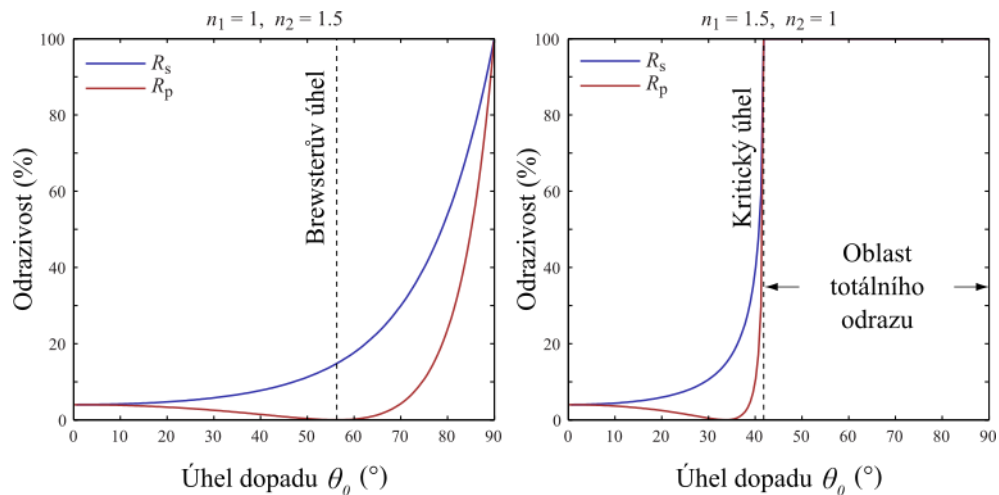
$$T_p = \frac{I'_p}{I_p}. \quad (23)$$

Jak už jsme zmínili výše, u nepolarizovaného světla kmitá vektor  $E$  ve všech směrech. Celkovou odrazivost a propustnost proto můžeme vyjádřit [3]:

$$R = \frac{1}{2}(R_s + R_p), \quad (24)$$

$$T = \frac{1}{2}(T_s + T_p). \quad (25)$$

Odrazivost si můžeme vyjádřit i graficky právě v závislosti na úhlu dopadu.



Obrázek 1.9: Koeficienty odrazivosti v závislosti na úhlu dopadu. Překresleno podle [8]

Na obrázku 1.9 vidíme vyjádření odrazivosti na rozhraní vzduchu a skla. Vidíme, že koeficient odrazivosti je pro malé úhly dopadu velmi nízký. To je logické, neboť většina světla prochází do druhého prostředí. Z obrázku jsou také patrné dva speciální případy. Vlevo můžeme vidět situaci, kdy odrazivost složky  $R_p$  klesá, až se dostane na nulu. Odražené světlo obsahuje tedy pouze složku  $R_s$  a úhlu, pro který tato situace nastává, říkáme Brewsterův úhel. Vpravo můžeme vidět situaci, kdy od určitého úhlu je odrazivost rovna 100 %, neboli všechno světlo dopadající na rozhraní se odráží a žádná jeho část neprochází skrz. Taková situace je nám velmi dobře známá a označujeme ji jako totální odraz.



Obrázek 1.10: Augustin-Jean Fresnel [10]

**Augustin-Jean Fresnel** byl francouzský fyzik žijící v letech 1788–1827, který působil převážně na poli vlnové optiky. Na začátku 19. století byla ve vědecké veřejnosti prosazovaná Newtonova představa částicové povahy světla. V roce 1802 však přišel Young s pokusem interference světla na dvojštěrbině. Nezávisle na Youngovi provedl podobné experimenty také Fresnel. Pro základ svého matematického popisu difrakce použil Huygensův princip. Fresnel také spolu s dalším Francouzem L. Aragem studoval interferenci polarizovaného světla

a v roce 1817 poprvé získal kruhově polarizované světlo. Tento objev jej vedl k závěru, že světlo má povahu příčného vlnění a ne podélného jak se do té doby předpokládalo. Od roku 1819 pracoval společně s L. Aragem na

zdokonalení francouzských majáků. Z této práce vzešla slavná Fresnelova čočka, která nahrazovala do té doby používaná zrcadla. [9]

### 1.3 Vznik polarizovaného světla

Způsobů, jak získat polarizované světlo, je celá řada. Některé z nich jsme již naznačili v úvodu práce. V následující kapitole se zaměříme především na vznik polarizovaného světla odrazem a lomem na rozhraní.

#### 1.3.1 Obecné vztahy pro polarizátory

Polarizátorem budeme nazývat optický prvek, který po vložení do cesty světelnému paprsku způsobí vibrace elektrického vektoru primárně v jedné rovině. Pokud polarizátor umístíme do cesty lineárně polarizovanému paprsku světla, a budeme s ním otáčet kolem osy rovnoběžné s paprskem, bude se propustnost ( $T$ ) měnit podle následujícího zákona [1]

$$T = (T_{\max} - T_{\min}) \cos^2 \theta + T_{\min}. \quad (26)$$

kde  $\theta$  je úhel mezi rovinou maximální transmitance a rovinou kmitů  $\vec{E}$ .  $T_{\max}$  je maximální propustnost filtru pro lineárně polarizované světlo a  $T_{\min}$  je minimální propustnost filtru pro lineárně polarizované světlo (v případě ideálního filtru a úplně lineárně polarizovaného světla by byla rovna nule). Pokud polarizátor vložíme do svazku nepolarizovaného světla, bude závislost vypadat následovně [1]

$$T = \frac{1}{2}(T_{\max} + T_{\min}), \quad (27)$$

z čehož vyplývá, že ideálním polarizátorem projde polovina dopadajícího nepolarizovaného světla.

Pokud vezmeme dva stejné polarizátory, umístíme je za sebe a necháme jimi procházet nepolarizované světlo, výsledná propustnost bude rovna:

$$T = \frac{1}{2}(T_{\max}^2 + T_{\min}^2) \quad (28)$$

v případě, že směry, ve kterých propouští nejvíce světla, jsou rovnoběžné a

$$T = T_{\max} T_{\min} \quad (29)$$

v případě, že směry ve kterých propouští nejvíce světla, jsou navzájem kolmé. Odtud je také patrné, že pro dva zkřížené ideální polarizátory, které mají minimální propustnost nulovou, platí, že celková propustnost je také nulová. Pokud jsou oba polarizátory vzájemně natočeny o obecný úhel  $\theta$  platí

$$T_{\theta} = \frac{1}{2}(T_{\max}^2 + T_{\min}^2)\cos^2 \theta + T_{\max}T_{\min}\sin^2 \theta. \quad (30)$$

Vlastnosti polarizátoru obvykle popisujeme veličinou, která se nazývá stupeň polarizace, a značíme ji  $P$ : [1]

$$P = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}}. \quad (31)$$

### 1.3.2 Polarizace odrazem

Pokud se vrátíme zpět k Fresnelovým vzorcům a pozorně se na ně podíváme, zjistíme, že při odrazu pod určitým úhlem se můžou výrazněji projevit kmity v určitém směru.

Z rovnic (16)–(19) na stranách 24 a 25 je patrné, že je to možné jen pro odražené kmity rovnoběžné s rovinou dopadu, neboť jedině zde je možné dosáhnout ve jmenovateli nekonečné hodnoty, pokud  $\theta_0 + \theta_1 = \frac{\pi}{2}$ . [3]

Abychom zjistili  $\theta_1$ , tedy úhel lomu pro toto uspořádání, musíme použít Snellův zákon, kam dosadíme  $\theta_1$  z rovnice výše a dostáváme

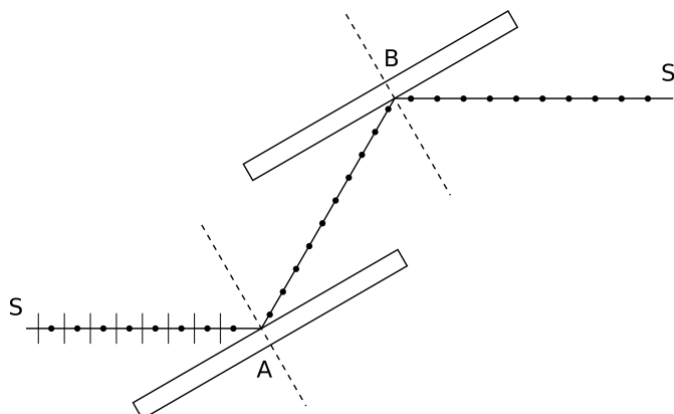
$$\frac{n_0}{n_1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_0\right)}{\sin \theta_0}, \quad (32)$$

což můžeme upravit na

$$\tan \theta_0 = \frac{n_1}{n_0}. \quad (33)$$

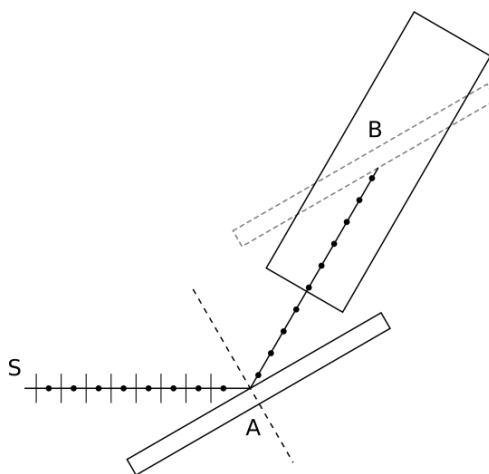
Tuto rovnici nazýváme Brewsterovým zákonem podle D. Brewstera, který tento zákon experimentálně ověřil. Tento experiment si vzápětí přiblížíme. [3]

Polarizované světlo nerozlišíme pouhým okem. Budeme tedy potřebovat dvě plochy, od kterých se bude světlo odrážet. Jedna plocha poslouží jako polarizátor, druhá jako analyzátor. Schéma pokusu můžeme vidět na obrázku 1.11.



Obrázek 1.11: Uspořádání pokusu k polarizaci odrazem. Překresleno podle [3]

Nechť paprsek  $S$  dopadá na dvě skleněné desky, které jsou navzájem rovnoběžné. Při určitém úhlu dopadu se světlo odrazí od obou zrcadel a my můžeme pozorovat odražený paprsek  $S'$ . Jestliže však otočíme zrcadlo o  $90^\circ$  kolem spojnice bodů dopadu (Obrázek 1.12), aby úhel dopadu byl stále týž, odraz na druhém zrcadle nenastane. Z toho můžeme usuzovat, že odražený paprsek kmitá v určité rovině. Intenzita světla odraženého od druhé desky se při jejím otáčení mění. My říkáme, že světlo, které se takto chová, je polarizováno. Jak moc bude světlo polarizováno, záleží na úhlu dopadu. Úplná polarizace nastane pro tzv. Brewsterův úhel. [3]



Obrázek 1.12: Uspořádání pokusu k polarizaci odrazem. Překresleno podle [3]

Polarizované světlo nejsme schopni pouhým okem rozlišit od nepolarizovaného. Polarizaci zjistíme až druhým odrazem. Takto získané světlo je světlo polarizované a jeho kmity se dějí v rovině kolmé k rovině dopadu. Otáčíme-li druhou deskou, mění se intenzita světla od maxima postupně až k nule. Rádi bychom hodnotu intenzity odraženého světla nějak vyjádřili v závislosti na úhlu, jaký spolu obě zrcadla svírají. Tuto závislost vyjadřuje Malusův zákon:

$$I = I_0 \cos^2 \varphi. \quad (34)$$

kde  $I_0$  je intenzita dopadajícího světla a  $\varphi$  je úhel vzájemného natočení rovin polarizace. Je-li  $\varphi=90^\circ$  je  $I=0$ . Při otočení roviny o  $360^\circ$  projde intenzita odraženého světla dvěma maximy a dvěma minimy. [3]

### 1.3.3 Etienne-Louis Malus a David Brewster

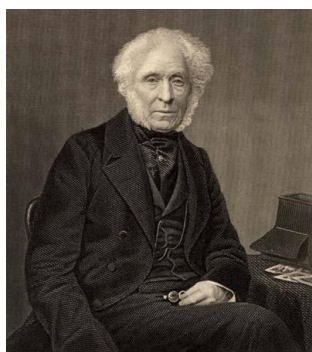
V předchozí kapitole byla zmíněna jména dvou významných fyziků, kteří výrazně přispěli k rozvoji optiky a zkoumání polarizovaného světla.



Obrázek 1.13: Etienne-Louis Malus [12]

**Etienne-Louis Malus** (1775–1812) byl francouzský fyzik, který objevil, že světlo se při odrazu částečně polarizuje. Jeho výzkum vedl k lepšímu pochopení šíření světla. V roce 1809 publikoval zprávu o svém objevu polarizace odrazem a o rok později teorii dvojlomu světla v krystalech. Malus se také snažil objasnit vztah mezi polarizací, úhlem dopadu a indexem lomu materiálu, od kterého se světlo odráží.

Správný vztah se mu podařilo odvodit pro vodu. Se sklem byl však již neúspěšný kvůli špatné kvalitě tehdejších materiálů (*V roce 1815 pak provedl experimenty s kvalitnějšími materiály David Brewster a na základě těchto experimentů formuloval vztah, který dnes známe jako Brewsterův zákon.*). Nejznámější je Malus díky zákonu, který udává výslednou intenzitu polarizovaného světla po průchodu polarizátorem. [11]



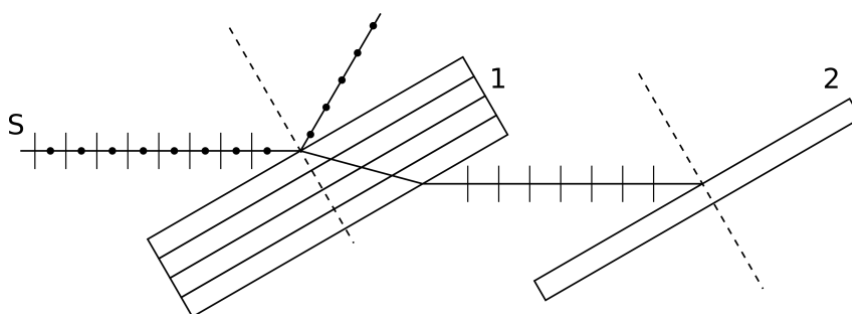
Obrázek 1.14: David Brewster [14]

**David Brewster** (1781–1868) byl skotský fyzik, který se proslavil díky svému výzkumu v optice, především pak polarizaci světla. Brewster odhalil jednoduchý matematický vztah mezi úhlem dopadu paprsku světla na rozhraní a indexem lomu rozhraní. Kromě polarizace světla se zabýval také odrazem na kovových površích a absorpcí světla. V roce 1816 vynalezl kaleidoskop a v roce 1840 vylepšil stereoskop. Brewster se také významně zasazoval o to, aby se v majácích používaly lehčí a

plošší Fresnelovy čočky. [13]

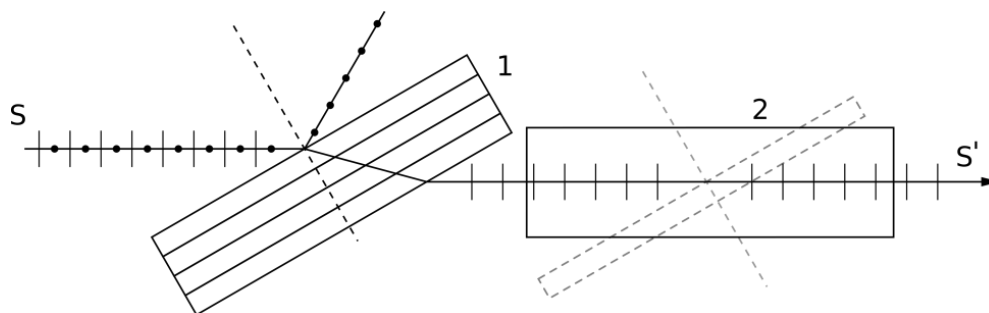
### 1.3.4 Polarizace lomem

Pokus, kterým si dokážeme, že i při lámání světla na rozhraní dvou optických prostředích vzniká polarizované světlo je podobný jako v předcházejícím případě při polarizaci odrazem. Jako polarizátor však namísto jediné destičky budeme potřebovat vícero transparentních skleněných destiček o indexu lomu  $n$ . Na tyto destičky necháme dopadat světlo pod určitým úhlem. Po průchodu světla destičkami dopadá světlo na další skleněnou destičku, která je rovnoběžná se sadou destiček. Pokud roviny dopadu splývají, je intenzita odraženého světla menší (v případě ideální polarizace nulová), než když druhou destičku otočíme tak, aby roviny dopadu byly vzájemně kolmé (Obrázek 1.16). Můžeme tedy usuzovat, že světlo, které prošlo sadou destiček je polarizováno.[3]



Obrázek 1.15: Polarizace lomem (1). Překresleno podle [3]





Obrázek 1.16: Polarizace lomem (2). Překresleno podle [3]

Další pokusy ukazují, že míra polarizace závisí na počtu destiček. Z Fresnelových rovnic víme, že platí:

$$t_s = \frac{2 \sin \theta_1 \cos \theta_0}{\sin(\theta_0 + \theta_1)}, \quad (35)$$

$$t_p = \frac{2 \sin \theta_1 \cos \theta_0}{\sin(\theta_0 + \theta_1) \cos(\theta_0 - \theta_1)}, \quad (36)$$

$$\frac{t_p}{t_s} = \frac{1}{\cos^2(\theta_0 - \theta_1)}. \quad (37)$$

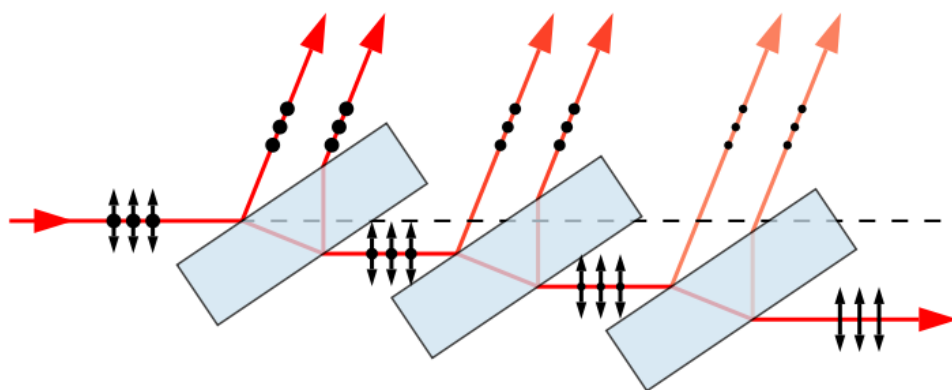
Polarizační účinek se zvýší vyšším počtem lomů, a to tak, že poměr  $t_p/t_s$  se zvětší. Pro  $m$  destiček pak bude platit [3]

$$\left( \frac{t_p}{t_s} \right)_m = \frac{1}{\cos^{2m}(\theta_0 - \theta_1)}. \quad (38)$$

Už víme, že ke kvantitativnímu vyjádření polarizace používáme stupeň polarizace  $P$ . V tomto případě můžeme stupeň polarizace definovat jako:

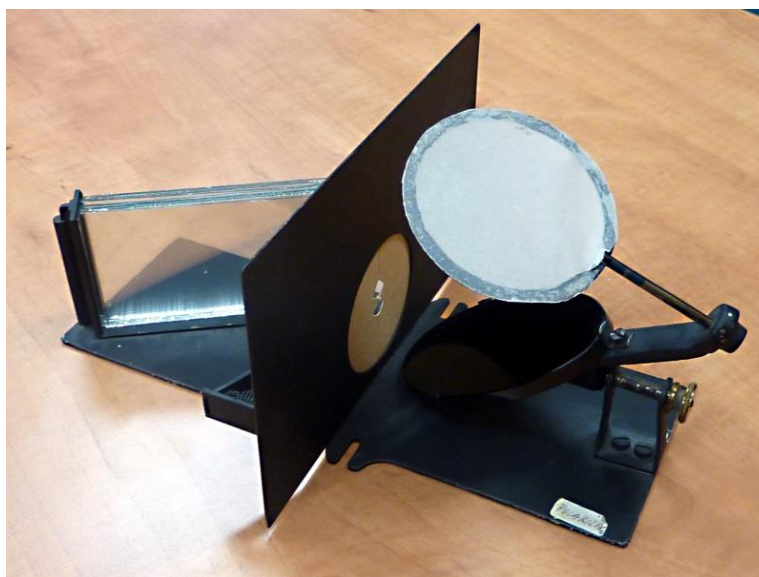
$$P = \frac{I'_p - I'_s}{I'_p + I'_s}. \quad (39)$$

Stupeň polarizace vypočítaný tímto způsobem je ve skutečnosti menší. Nutno totiž uvážit, že část světla kmitající kolmo k rovině dopadu se odráží od povrchu destičky a na předcházející destičce se opět odrazí. Při tomto odrazu jistá část světla vždy projde skrz a tím se obohacuje složka světla kmitající v rovině dopadu a tím se snižuje stupeň polarizace. [3]



Obrázek 1.17: Polarizace lomem (3). Překresleno podle [15]

K demonstraci pokusu znázorněném na obrázcích 1.15 a 1.16 slouží historická pomůcka na následující fotografii.



Obrázek 1.18: Pomůcka k demonstraci polarizace lomem

Paprsek světla prochází skrz sadu skleněných destiček a dopadá na černou skleněnou plošku, kde se odráží. Černou ploškou můžeme pomocí šroubu otáčet kolem osy rovnoběžné s dopadajícím paprskem, čímž měníme natočení roviny dopadu. Na stínítku pak pozorujeme rozdíl jasu dopadajícího paprsku v závislosti natočení roviny polarizace světelného paprsku k rovině dopadu.

### 1.3.5 Ověření Malusova zákona

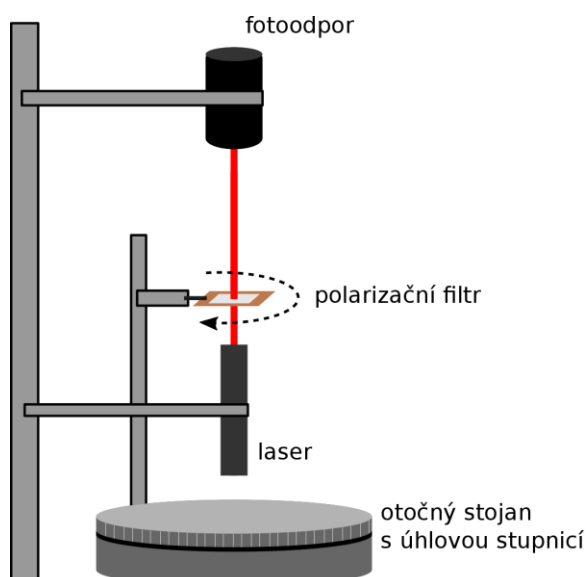
V kapitole 1.3.2 jsme zmínili Malusův zákon a vysvětlili ho na příkladu, kdy se světlo odráží od dvou zrcadel pod Brewsterovým úhlem, a v závislosti na úhlu natočení obou zrcadel se mění intenzita odraženého světla od druhého zrcadla. Takový experiment můžeme provést různými způsoby. V zásadě však vždy potřebujeme polarizátor a analyzátor a zároveň mít možnost měnit úhel, který svírají jejich roviny polarizace.

Jako součást této práce jsme se rozhodli ověřit platnost Malusova zákona pomocí námi sestaveného experimentu.

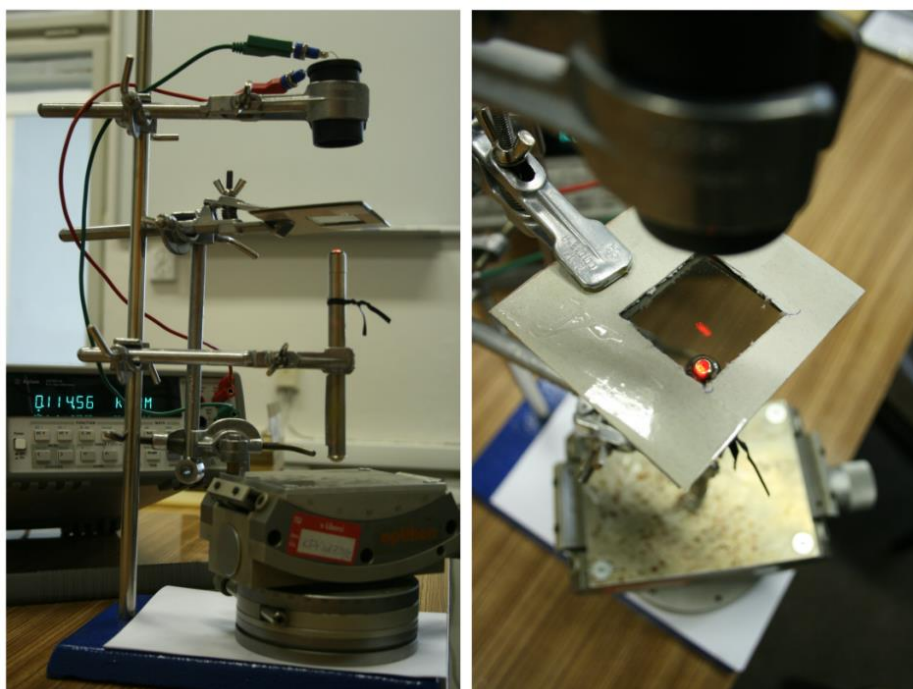
Použitá aparatura:

- laserové ukazovátko
- polarizační filtr
- fotorezistor
- otočný stojan s úhlovou stupnicí
- stojany

Sestavení experimentu můžete vidět na schématu a obrázku níže.



Obrázek 1.19: Schéma experimentu



Obrázek 1.20: Experiment ověření Malusova zákona

Na první pohled si můžeme všimnout, že chybí polarizátor. Laserové ukazovátka, které jsme použili je však zdrojem částečně polarizovaného světla, což nám pro potřeby tohoto experimentu stačilo. Částečně polarizované světlo z ukazovátka tedy prochází lineárním polarizačním filtrem a dopadá na plochu fotorezistoru citlivou na světlo. Fotorezistor jsme schovali do černé trubičky, abychom co nejvíce odstínili okolní světlo. Laser i fotoodpor jsou připevněné napevno. Polarizační filtr je připevněn k otočnému stojanu tak, aby jím bylo možné otáčet kolem osy rovnoběžné s paprskem světla. Při otáčení filtru se tedy mění úhel, který svírá rovina polarizace zdroje světla a rovina ve které polarizační filtr propouští světlo. Uspořádání experimentu umožňovalo otáčet filtrem maximálně o  $315^\circ$ .

Měření probíhalo následovně: Otočili jsme polarizační filtr do krajní polohy a poznamenali si hodnotu odporu, kterou ukazoval multimetr. Otáčeli jsme polarizačním filtrem s krokem  $5^\circ$  a poznamenávali jsme si hodnoty na multimetru. V místech, kde byly velké skoky ve změně odporu, jsme krok měření zjemnili na  $1^\circ$ . To jsme opakovali až do druhé krajní polohy otáčení polarizačního filtru. Výsledky jsme zanesli do grafu 1.



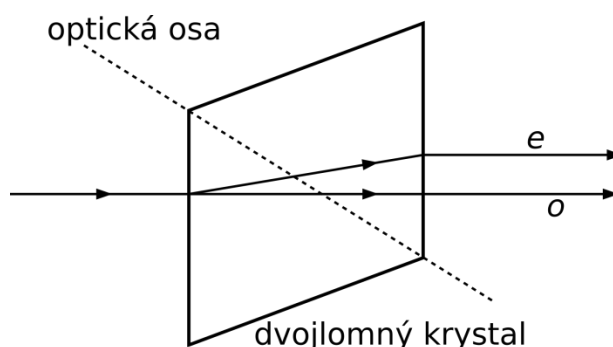
Graf 1: Graf závislosti odporu fotorezistoru na úhlu natočení polarizačního filtru

Na grafu můžeme vidět dvě maxima a dvě minima. Na první pohled je však patrné, že graf nemá tvar sinusoidy, jak bychom předpokládali. To je dáno logaritmickou závislostí odporu fotorezistoru na dopadajícím osvětlení. Pokud do grafu vložíme funkci  $\cos^2(11+\varphi)$  kde  $\varphi$  je úhel natočení polarizátoru uvidíme, že naměřené hodnoty se periodicky opakují stejně jako funkce kosinus. Maxima závislosti odporu na úhlu natočení polarizátoru nalezneme pro úhly  $79^\circ$  a  $259^\circ$  což je přesně rozdíl  $180^\circ$  čili jedné periody funkce  $\cos^2 x$ . Mezi těmito maximy nalezneme minimum mezi úhly  $165^\circ$  a  $170^\circ$  čili přesně v polovině intervalu mezi maximy ( $169^\circ$ ). S těmito extrémy korespondují i extrémy funkce  $\cos^2(11+\varphi)$ .

## 2 Změny roviny polarizace světla

### 2.1 Dvojlom

Krystaly můžeme obecně rozdělit na opticky izotropní a opticky anizotropní. Světlo vstupující do izotropní látky se láme v určitém úhlu a prochází látkou konstantní rychlostí. Na druhou stranu anizotropní krystaly mají různé osy v závislosti na své krystalografické struktuře a interagují se světlem v závislosti na orientaci krystalové mřížky a směru dopadajícího světla. Pokud světlo dopadá na krystal ve směru optické osy, chová se krystal jako opticky izotropní. Pokud ale světlo vstupuje do krystalu pod úhlem vzhledem k optické ose, láme se do dvou různých paprsků, které jsou navíc různě lineárně polarizovány a mají rozdílnou rychlost. Polarizace obou paprsků svírají navzájem pravý úhel. Tomuto jevu říkáme **dvojlom**. Na obrázku 2.1 můžete vidět schéma tohoto jevu. [16]



Obrázek 2.1: Dvojlom. Překresleno podle [3]

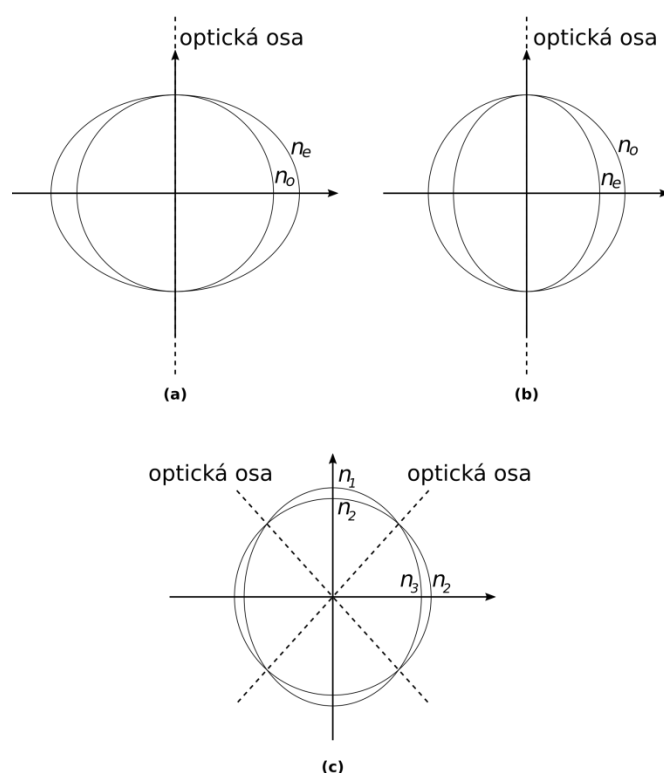
Paprsek, který prochází krystalem stejnou rychlostí nezávisle na směru průchodu, se nazývá řádný (*ordinary* – *o*). Druhý paprsek, jehož rychlost závisí na směru průchodu vzhledem k optické ose, nazýváme mimořádný (*extraordinary* – *e*). Absolutní hodnota rozdílu mezi jednotlivými indexy lomu udává velikost dvojlomu. [16]

$$B = |n_o - n_e| \quad (40)$$

Veličina  $n_o$  nezávisí na směru šíření,  $n_e$  závisí na směru šíření. Obvykle se tedy určuje pro směr kolmý na optickou osu krystalu.

### 2.1.1 Jednoosé a dvouosé krystaly

Jak už bylo řečeno, existují krystaly, které mají právě jeden směr, ve kterém nenastává dvojlom, a tento směr nazýváme jejich optickou osou. Takové krystaly nazýváme jednoosé. Existují ale i krystaly dvouosé, které, jak již název napovídá, mají optické osy dvě. Tento rozdíl si můžeme ilustrovat na tvaru vlnoploch. V izotropním prostředí se vlnění šíří stejně rychle všemi směry. Vlnoplocha má tedy tvar koule. Totéž platí i pro řádný paprsek v anizotropním prostředí. Mimořádný paprsek se však nešíří ve všech směrech stejnou rychlostí a proto má jeho vlnoplocha tvar elipsoidu.

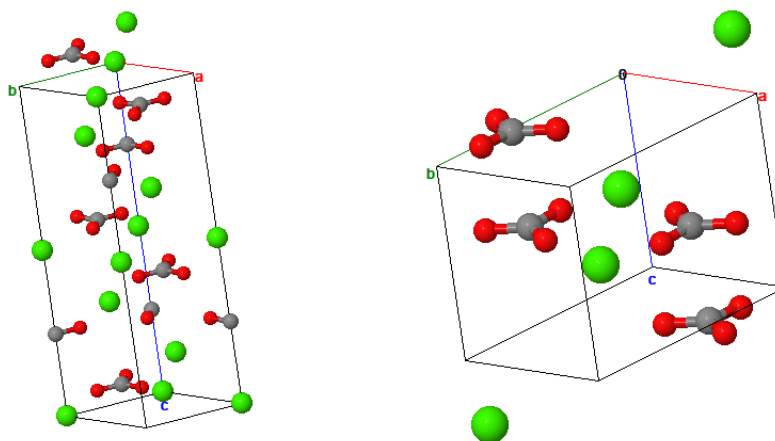


Obrázek 2.2: Znázornění pozitivního jednoosého krystalu (a), negativního jednoosého krystalu (b) a dvouosého krystalu (c). Překresleno podle [1]

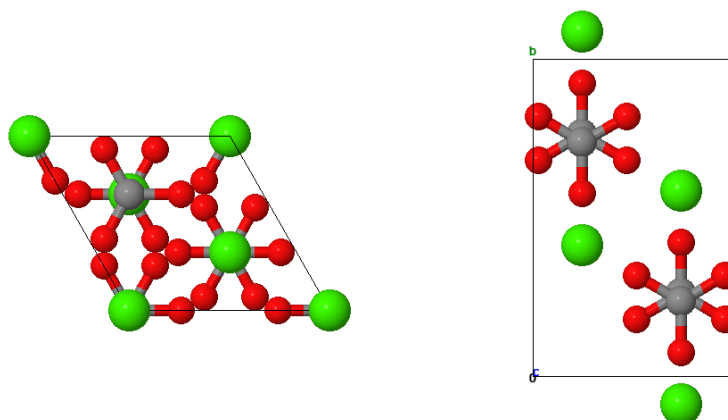
K opticky izotropním látkám patří například sklo, kapaliny a krystaly krychlové soustavy. Krystaly soustavy čtverečné, šesterečné a trigonální jsou jednoosé a krystaly soustavy kosočtverečné, jednoklonné a trojklonné jsou dvouosé. [3]

Optické vlastnosti látek jsou způsobeny uspořádáním jejich krystalických mřížek. Ilustrovat si to můžeme na příkladu dvou běžných látek kalcitu a aragonitu. Obě dvě látky mají stejné chemické složení  $\text{CaCO}_3$  (uhličitan vápenatý). Atomy kalcitu jsou uspořádány tak, že atom uhlíku a atomy

kyslíku leží v jedné rovině, atom vápníku je pak ve vrcholu pomyslného jehlanu. Jedná se o krystal jednoosý a optická osa prochází vrcholem jehlanu. Atomy aragonitu jsou uspořádány podobně jako atomy kalcitu s tím rozdílem, že atom vápníku leží mimo vrchol jehlanu a jedná se o krystal dvouosý. [17]



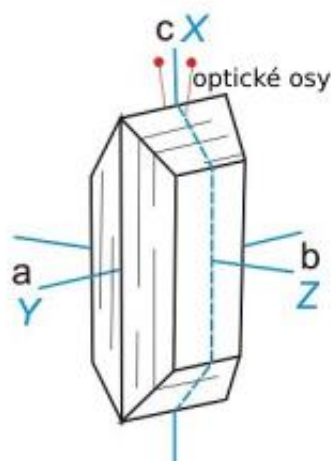
Obrázek 2.3: Elementární buňky krystalů kalcitu a aragonitu [18]



Obrázek 2.4: Uspořádání atomů v krystalu vápence a aragonitu. Mřížkový vektor  $\mathbf{c}$  je kolmý na rovinu papíru. Vektory  $\mathbf{a}$  a  $\mathbf{b}$  leží v rovině papíru. [19]

V případě kalcitu prochází optická osa ve směru mřížkového vektoru  $\mathbf{c}$ . Krystal aragonitu patří do soustavy kosočtverečné. U krystalů této soustavy splývají osy optického elipsoidu ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) s mřížkovými vektory  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$ . Optické osy pak leží v rovině  $XZ$ . V případě aragonitu pak osy optického elipsoidu odpovídají mřížkovým vektorům následovně  $X=c$ ,  $Y=a$ ,  $Z=b$ . Optické osy svírají s osou  $X$  úhel přibližně  $9^\circ$  ( $2V = 18^\circ$ ). [20] [19]





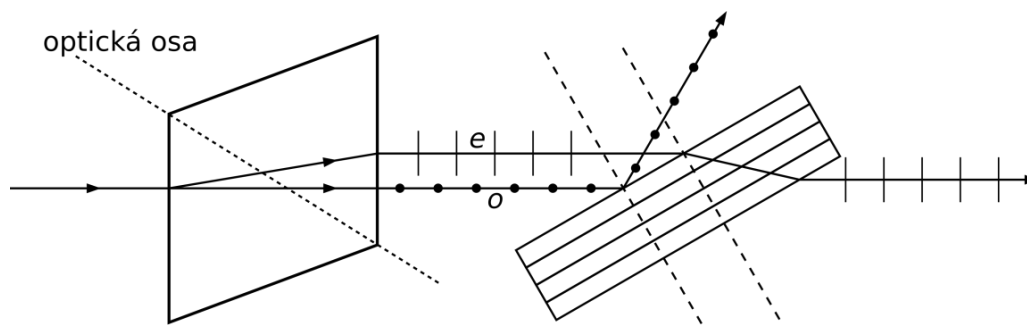
Obrázek 2.5: Optické osy v krystalu aragonitu [21]

V praxi mají největší význam krystaly jednoosé. Dalším typickým jednoosým krystalem je dusičnan sodný (chilský ledek), který má chemický vzorec  $\text{NaNO}_3$  a jeho atomy jsou uspořádány stejně jako krystaly kalcitu. [3]

### 2.1.2 Polarizace dvojlomem

Do podrobnějšího popisu krystalů zabíhat nemusíme. Podíváme se raději podrobněji na možnost polarizaci světla v důsledku dvojlomu. Jak už bylo řečeno, roviny polarizace řádného a mimořádného paprsku jsou navzájem kolmé. Vektor intenzity elektrického pole řádného paprsku kmitá ve směru kolmém na rovinu dopadu (také na optickou osu), kdežto vektor intenzity elektrického pole paprsku mimořádného kmitá rovnoběžně s rovinou dopadu (ale ne nutně rovnoběžně s optickou osou). To si můžeme demonstrovat na jednoduchém pokusu využívajícím odrazu pod Brewsterovým úhlem na sadě skleněných destiček.

Necháme paprsek světla dopadat kolmo na stěnu dvojlomného krystalu. Řádný paprsek se neláme a prochází skrz krystal. Otáčením krystalu kolem řádného paprsku lze dosáhnout toho, že optická osa bude ležet v rovině papíru. Paprsek se láme na řádný a mimořádný paprsek. Paprsek mimořádný se vychyluje směrem vzhůru a oba paprsky dopadají na sadu destiček pod Brewsterovým úhlem. Zatímco řádný paprsek se odráží podle zákona odrazu, mimořádný paprsek prochází destičkami. Z toho můžeme usuzovat, že rovina polarizace řádného paprsku je kolmá k rovině dopadu, kdežto rovina polarizace mimořádného paprsku je rovnoběžná s rovinou dopadu. [3]



Obrázek 2.6: Důkaz polarizace řádného a mimořádného paprsku. Překresleno podle [3]

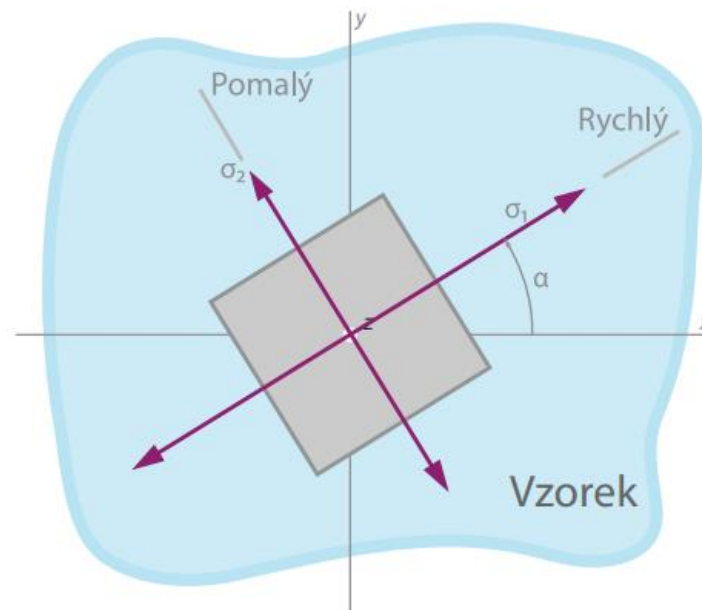
Doposud jsme se zabývali tím, jak se chová při průchodu dvojlomným krystalem přirozené světlo. Co když ale do krystalu vstoupí světlo, které již lineárně polarizované je? Budeme tedy uvažovat lineárně polarizované světlo, jehož směr polarizace svírá s rovinou hlavního řezu úhel  $\varphi$ . Hlavní řez je rovina, určená dopadajícím paprskem a optickou osou (Na našem obrázku tak splývá s rovinou papíru). Dopadající světlo se rozdělí na dvě složky. Vektor elektrické intenzity světla mimořádného paprsku bude rovnoběžný s rovinou hlavního řezu, vektor elektrické intenzity světla řádného paprsku bude kolmý na rovinu hlavního řezu. Pro paprsek řádný tedy platí  $E_o = E \sin \varphi$  a pro mimořádný  $E_e = E \cos \varphi$ . Intenzity obou paprsků pak dostáváme umocněním předchozích vztahů na druhou, z čehož plyne, že jsou také závislé na úhlu  $\varphi$ . Je-li tedy  $\varphi=0$  pak nevzniká paprsek řádný, ale pouze mimořádný o maximální intenzitě  $I$ . Podobně pak, pokud je  $\varphi = \frac{\pi}{2}$  vystupuje pouze paprsek řádný o maximální intenzitě  $I$ . [3]

## 2.2 Fotoelasticita

Spousta opticky izotropních materiálů za běžných podmínek se může stát opticky anizotropní, pokud na ně působí nějaká síla a v materiálu vzniká mechanické napětí. Takové chování se nazývá dočasný dvojlom. Napětí nemusí v materiálu vznikat pouze po dobu působení síly. K dočasnému dvojlomu může docházet vlivem i tzv. zbytkového napětí, které vzniká při výrobním procesu. [22] [23]

Jak už bylo řečeno v kapitole 2.1, materiálu, který vykazuje dvojlom, náleží dva různé indexy lomu. V případě dvojlomu způsobenému mechanickým napětím v izotropní látce odpovídají tyto indexy lomu směrům  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  což jsou hlavní směry mechanického napětí. Rozdíl těchto mechanických napětí

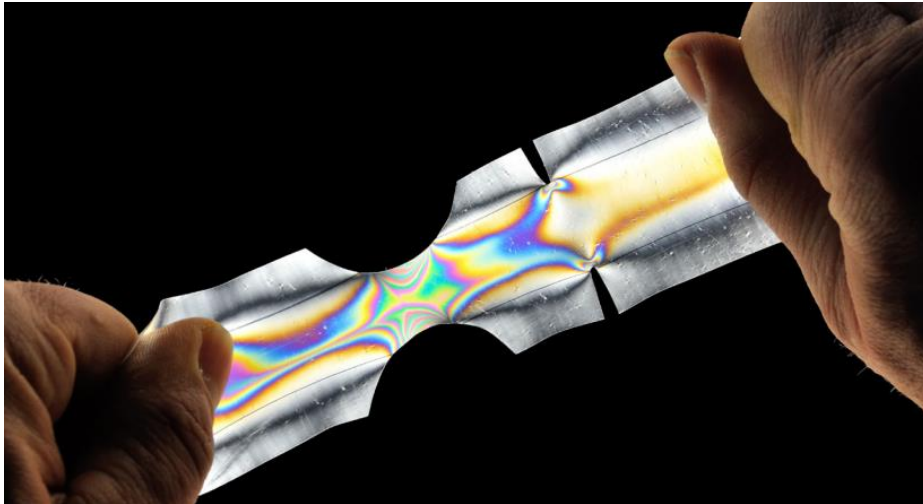
je pak přímo úměrný velikosti fázovému posunu, který vzniká mezi rychlejší a pomalejší světelnou vlnou. [23]



Obrázek 2.7: Znázornění směrů hlavních normálových napětí [23]

Napětí v materiálu nejčastěji vyšetřujeme tak, že zkoumaný vzorek umístíme mezi dva zkřížené polarizační filtry (polarizátor a analyzátor). Neexistuje-li ve vzorku mechanické napětí, tedy nedochází-li k dvojlomu, pozorujeme pouze tmavé pole. Existuje-li ve vzorku napětí, pozorujeme tzv. *izokliny* a *izochromaty*. Izokliny jsou tmavé oblasti představující konstantní směry hlavních napětí, které jsou rovnoběžné se směry os polarizátoru a analyzátoru. Na základě izoklin tak můžeme stanovit směry hlavních napětí. Isochromaty jsou oblasti se stejným barevným odstínem. Představují místa s konstantním rozdílem napětí ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ). Pro lepší znázornění izochromat se používají čtvrtvlnové destičky, které se vloží mezi vzorek a polarizátor a mezi vzorek a analyzátor. Takto se nezobrazí izokliny a nenaruší se tak obrazce izochromat. [23]

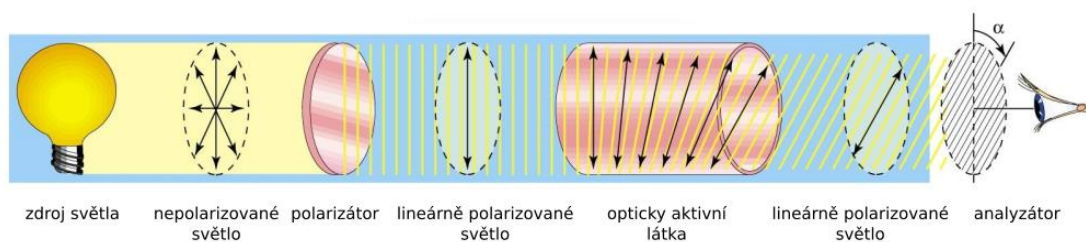
Na obrázku 2.8 můžeme vidět izochromaty v okolí dvojitého kruhových výřezů a drobných trhlin. Platí-li, že pro jednotlivé odstíny barev je rozdíl hlavních napětí konstantní, je patrné, že v okolí trhlin dochází ke značně vyšší koncentraci napětí. Všimněte si, že všechny kontury jsou „namačkány“ na značně menším prostoru než v okolí kruhových výřezů. [23]



Obrázek 2.8: Izochromaty [23]

### 2.3 Stáčení roviny polarizace – optická aktivita

Další způsob jakým mohou látky interagovat se světelnou vlnou a měnit vlastnosti polarizovaného světla, je stáčení roviny polarizace. Takový jev pozorujeme u některých krystalů, kapalin nebo roztoků. Schéma tohoto jevu můžete vidět na následujícím obrázku 2.9.



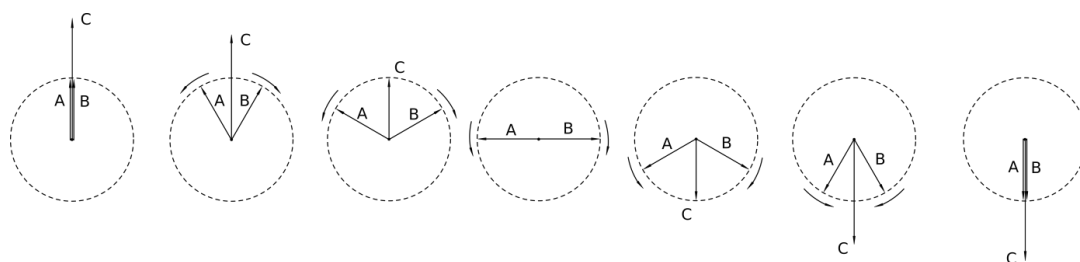
Obrázek 2.9: Schéma stáčení roviny polarizace. Upraveno podle [24]

Jak už víme, intenzita světla, které prochází dvěma polarizačními filtry, se mění podle Malusova zákona. Pokud jsou filtry rovnoběžné, intenzita světla je maximální. Pokud jsou filtry zkřížené (kolmé), intenzita světla je nulová. Pokud však mezi polarizátory vložíme například vhodně vybroušený krystal, situace se změní. I při zkřížených polarizačních filtrech část světla prochází skrz. To si můžeme vysvětlit tím, že rovina polarizace se po průchodu krystalem otočila oproti své původní poloze o jistý úhel (tak jak vidíme na schématu). Pootočením analyzátoru doprava nebo doleva můžeme opět dosáhnout nulové intenzity procházejícího světla.

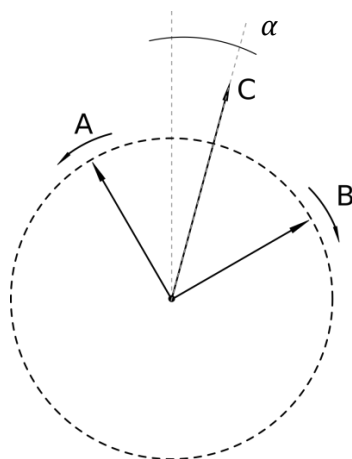
Tímto jevem se zabýval francouzský fyzik J. B. Biot, a na základě svých experimentů vyslovil následující zákony platné pro stáčení roviny polarizace:

1. Úhel stočení  $\alpha$  kmitové roviny je přímo úměrný tloušťce  $d$  destičky.
2. Pro stejnou tloušťku destičky je stočení způsobené pravotočivou destičkou stejné jako stočení způsobené destičkou levotočivou z téže látky.
3. Více destiček postavených za sebou způsobí stočení kmitové roviny rovné algebraickému součtu stočení způsobených jednotlivými destičkami.
4. Stočení kmitové roviny je přibližně nepřímo úměrné čtverci vlnové délky použitého světla. [3]

Příčinu stáčení roviny polarizace si můžeme vysvětlit následovně. Lineárně polarizované světlo můžeme brát jako výslednici dvou kruhově polarizovaných vln, jejichž vektory se otáčejí v opačných směrech. Jelikož je rychlost otáčení obou vektorů stejná, vzniká lineárně polarizované světlo, které kmitá stále ve stejné rovině (Obrázek 2.10). Při průchodu látkou však každá kruhově polarizovaná složka může postupovat s jinou rychlostí a při výstupu z látky zjistíme, že se jedna složka otočila o větší úhel než druhá. Výslednicí obou složek polarizace tak bude opět lineárně polarizované světlo. Rovina polarizace však nyní svírá úhel  $\alpha$  s rovinou dopadající vlny (Obrázek 2.11). [3]



Obrázek 2.10: Skládání dvou kruhově polarizovaných vln. Překresleno podle [3]



Obrázek 2.11: Stáčení roviny polarizace. Překresleno podle [3]

Látky, u kterých tento jev nastává, nazýváme opticky aktivní. Ty, které stáčeji rovinu polarizace doprava, se nazývají pravotočivé a ty, které stáčeji doleva, levotočivé. Příčinou optické aktivity je nesymetrie uspořádání molekul látky. [3]

Matematicky si můžeme situaci výše popsat následovně: lineárně polarizované světlo kmitá ve směru osy  $x$  a je popsáno vztahem [3]:

$$x = A \sin \omega t . \quad (41)$$

Tento kmit nahradíme dvěma kmity téhož směru a poloviční amplitudy:

$$x_1 = \frac{1}{2} A \sin \omega t , \quad (42)$$

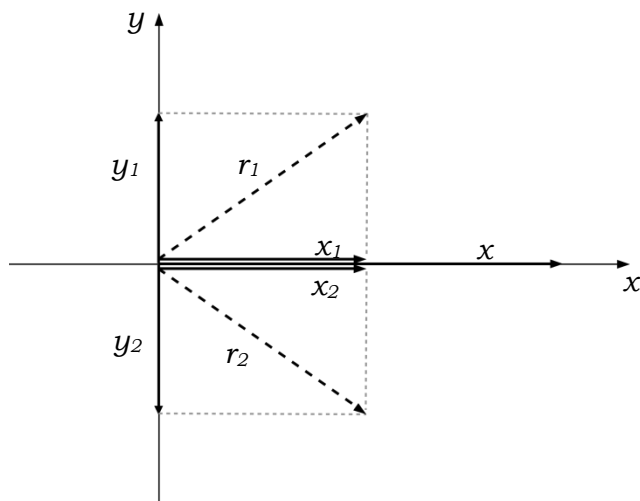
$$x_2 = \frac{1}{2} A \sin \omega t . \quad (43)$$

K těmto kmitům připojíme ve směru osy  $y$  dva jiné kmity téže frekvence a amplitudy, avšak opačné fáze:

$$y_1 = \frac{1}{2} A \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) = -\frac{1}{2} A \cos \omega t , \quad (44)$$

$$y_2 = \frac{1}{2} A \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \frac{1}{2} A \cos \omega t . \quad (45)$$

Znázornění všech kmitů můžete vidět na následujícím obrázku 2.12.



Obrázek 2.12: K matematickému výkladu rotační polarizace. Překresleno podle [3]

Složením vektorů  $x_1$  a  $y_1$  vznikne vektor  $r_1$  a složením vektorů  $x_2$  a  $y_2$  vektor  $r_2$ . Tyto dva vektory rotují proti sobě a znázorňují nám dvě kruhově polarizované vlny.

Po průchodu látkou se pak složky kmitů změni následovně:

$$x'_1 = \frac{1}{2} A \sin \omega t, \quad y'_1 = -\frac{1}{2} A \cos \omega t, \quad (46)$$

$$x'_2 = \frac{1}{2} A \sin(\omega t - \varphi), \quad y'_2 = \frac{1}{2} A \cos(\omega t - \varphi), \quad (47)$$

$$\text{kde } \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta. \quad (48)$$

$\lambda$  je pak vlnová délka světla a  $\delta$  je dráhový rozdíl mezi oběma kmity po průchodu látkou, který můžeme vyjádřit takto:

$$\delta = (n_2 - n_1)d, \quad (49)$$

kde  $n_1, n_2$  jsou indexy lomu a  $d$  je tloušťka látky.

Výsledný složený kmit poté bude mít tvar:

$$x' = x'_1 + x'_2 = \frac{1}{2} A [\sin \omega t + \sin(\omega t - \varphi)] = A \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left( \omega t - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (50)$$

$$y' = y'_1 + y'_2 = \frac{1}{2} A [\cos \omega t + \cos(\omega t - \varphi)] = A \sin \frac{\varphi}{2} \sin \left( \omega t - \frac{\varphi}{2} \right). \quad (51)$$

Z poměru těchto dvou složek dostaneme úhel  $\alpha$ , o který se rovina polarizace stočila.

$$\frac{y'}{x'} = \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \quad (52)$$

$$\alpha = \frac{\varphi}{2} = \frac{\pi}{\lambda} d(n_2 - n_1) \quad (53)$$

Z posledního vzorce nám tedy vychází, že úhel stočení roviny polarizace závisí přímo úměrně na dráze, které světlo vykoná v krystalu a nepřímo úměrně na jeho vlnové délce. Stočení může nastat buď doleva, nebo doprava, podle velikosti indexů lomu. [3]

## 2.4 Polarizátory

V této kapitole se budeme věnovat optickým prvkům, které se v praxi používají k získání lineárně polarizovaného světla. Těmto prvkům říkáme polarizátory. Polarizátory můžeme rozdělit do skupin podle toho, jaký princip vzniku polarizovaného světla využívají. Způsoby vzniku polarizovaného světla jsme již vyložili dříve v této práci. Nejčastěji tedy rozlišujeme polarizátory využívající:

- a) odraz
- b) absorpci
- c) dvojlom

Polarizátory založené na odrazu propouštějí požadovanou polarizaci a zbytek odrážejí. Tyto optické prvky mohou využívat buď takzvané drátěné mřížky, odrazu pod Brewsterovým úhlem nebo interferenci. [25]

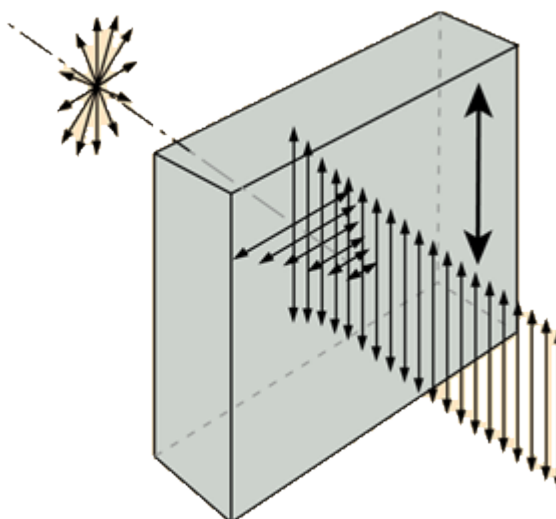
Polarizátory založené na absorpci propouštějí požadovanou polarizaci a zbytek světla pohltí, což je způsobeno anizotropií materiálu. Nejčastěji se používají orientované molekuly polymerů. Absorpční polarizátory mají široké spektrum použití například v mikroskopii nebo zobrazovacích soustavách. Často jsou také jedinou volbou, pokud potřebujeme polarizátorem opatřit velkou plochu, kterou prochází světlo. Právě na polarizaci absorpcí jsou založené polarizační filtry, které se používají k výrobě filtrů k fotoaparátům, slunečním brýlím, LCD monitorům nebo jako demonstrační pomůcky. [25]



Polarizátory založené na principu dvojlomu jsou velmi drahé a používají se díky svým vlastnostem především v laserové optice. [25]

#### 2.4.1 Polarizační filtry založené na absorpci

Jak už jsme naznačili výše, polarizační filtry založené na principu absorpce jsou nejčastěji používanými polarizátory v běžném životě, a proto se jim budeme věnovat trochu podrobněji. Je zde celá řada materiálů, které absorbují světlo, jehož vektor intenzity elektrického pole kmitá v určité rovině. Jak tedy světlo prostupuje materiálem, stává se více a více polarizované. Takový materiál nazýváme *dichroický*. Existuje několik přírodních materiálů s touto vlastností, a pak také průmyslově vyráběné materiály, někdy souhrnně označované jako polaroidy. [26]



Obrázek 2.13: Schéma polarizace s pomocí dichroického materiálu [27]

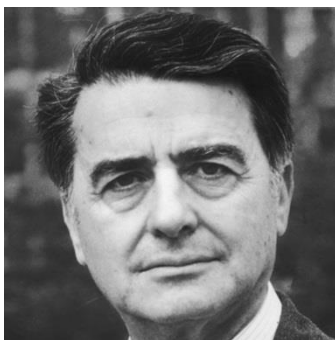
Mezi přírodní dichroické látky patří turmalín. Krystal turmalínu má unikátní optickou osu, a kterýkoli vektor intenzity elektrického pole, který je kolmý na tuto osu, je silně pohlcován. Výhodou turmalínu je to, že jde poměrně snadno připravit v laboratorních podmínkách. [26]

Polaroid je oficiální název firmy Polaroid Corporation pro jejich synteticky vyráběnou látku používanou jako polarizační filtr. Tento název se vžil do povědomí široké veřejnosti a je často používán jako obecné označení pro všechny typy polarizačních filtrů.



Obrázek 2.14: Historická fotografie dvou polarizačních filtrů. Jedním z mužů na fotografii je pravděpodobně zakladatel Polaroid Corporation Edwin H. Land [28].

Slovem polaroid se nejčastěji označuje polyvinylalkohol potažený vrstvou jódu. Vrstva polyvinylalkoholu se zahřeje a roztáhne se v určitém směru. To způsobí uspořádání dlouhých molekul polymeru do daného směru. Následně se vše ponoří do jódu a atomy jódu se připoutají k řetězcům polymeru. Atomy jódu disponují elektrony, které se mohou pohybovat ve směru uspořádaných řetězců polymeru, nikoli však kolmo k nim. Dopadající světelná vlna, jejíž vektor intenzity elektrického pole kmitá ve směru uspořádaných molekul polymeru, je absorbována právě v důsledku disipativního pohybu elektronů atomů jódu. Část světla s intenzitou elektrického pole kmitající kolmo ke směru uspořádání molekul polymeru pak projde skrz látku, jelikož elektrony atomů jódu se v tomto směru nemohou pohybovat a absorbovat energii dopadajícího světla. [26]



Obrázek 2.15: Edwin H. Land [30]

**Edwin H. Land** (7. května 1909 – 1. března 1991) byl americký vědec, vynálezce a zakladatel firmy Polaroid. V mládí studoval chemii a fyziku na Harvardově univerzitě ale velice brzy ze školy odešel, a věnoval se v New Yorku soukromým experimentům. Výsledkem této snahy bylo zhotovení prvního polarizačního filtru, který si v roce 1929 nechal patentovat. Materiál tohoto prvního filtru (tzv. *J-sheet*) se skládal z mikroskopických krystalů látky zvané herapatit, které byly vloženy mezi dvě vrstvy plastického materiálu (Tento materiál byl v roce 1938 nahrazen takzvaným *H-sheet* filtrem, což byl polyvinylalkohol

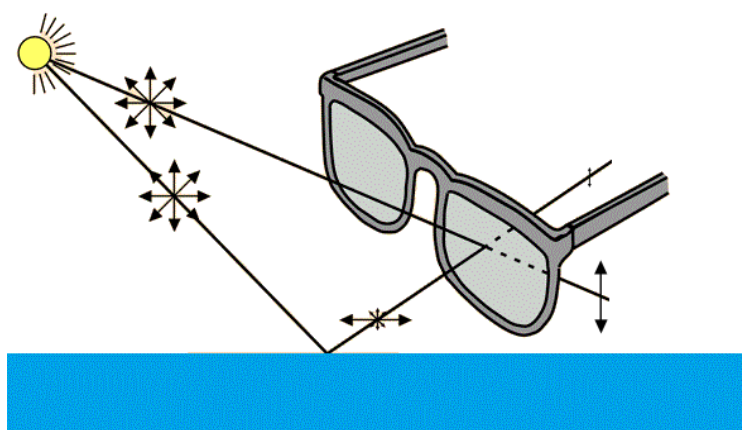
potažený vrstvou jódu (popsaný v předchozí kapitole)). Po tomto objevu se vrátil na Harvard a se svým profesorem založil Land-Wheelrightovy laboratoře, kde pokračoval ve výzkumu polarizace světla a polarizačních filtrů. V roce 1937 přejmenovali firmu na Polaroid Corporation a dál se zabývali především výrobou polarizačních filtrů a jejich aplikací. V roce 1947 přišel Land s prvním instantním fotoaparátem se samovyvolávacím filmem, který zajistil společnosti celosvětovou popularitu. [29] [30] [31]

## 3 Polarizace světla v běžném životě

### 3.1 Polarizační brýle a fotografické filtry

Jak už víme, světlo odrážející se od určitých povrchů může být buď částečně, nebo úplně lineárně polarizované kolmo na rovinu dopadu v závislosti na úhlu dopadu světla. To samozřejmě platí i pro světlo sluneční. Sluneční světlo má velikou intenzitu a běžně se člověk snaží přímému pohledu do Slunce vyhýbat. Ale právě odrážející se sluneční světlo od lesklých povrchů jako například voda, sklo, mokrá silnice může být pro člověka velice nepříjemné až nebezpečné. Z našich znalostí polarizace odrazem a polarizačních filtrů můžeme lehce odvodit, že právě správně natočený polarizační filtr dokáže tyto nepříjemné odrazy částečně eliminovat. V praxi se proto vyrábějí tzv. polarizační brýle, které jsou opatřeny vrstvou polarizační fólie.

Většina polarizačních brýlí je vyrobena tak, že světlo procházející brýlemi je lineárně polarizované ve vertikálním směru. Nejčastěji totiž chceme redukovat nepříjemné sluneční odrazy od vodní hladiny, mokré vozovky, nebo sněhu. K odrazu tak dochází na povrchu rovnoběžném se zemským povrchem a tudíž i odražené světlo je lineárně polarizováno rovnoběžně k zemskému horizontu. Polarizační brýle nasazené na obličej pak právě tuto část polarizace světla pohltí. Tento mechanismus si můžeme demonstrovat na schématu níže.

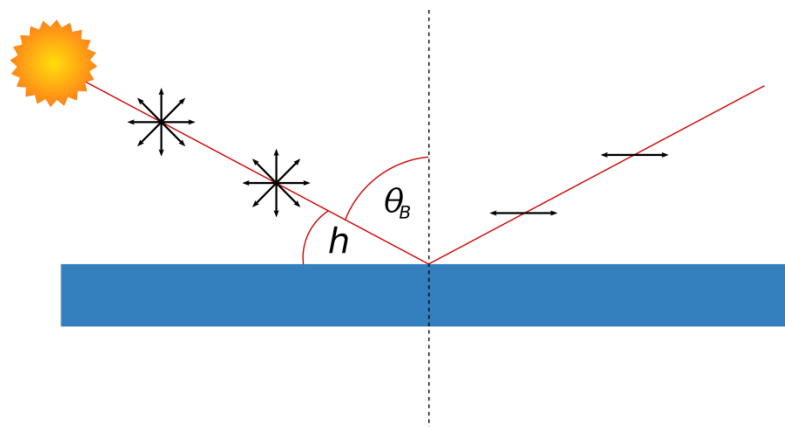


Obrázek 3.1: Princip funkce polarizačních brýlí. Upraveno podle [27]

Jak už jsme psali výše, nejčastěji jsou polarizační brýle používány k redukci odlesků od vodní hladiny nebo mokré vozovky. Jsou tedy často

využívány rybáři případně vyznavači vodních sportů nebo profesionálními řidiči. Spekulativní je přínos polarizovaných skel během lyžování. Na jednu stranu brýle redukuje odlesky slunečního záření. Na druhou stranu se však mohou stávat méně zřetelnými různé terénní nerovnosti. Problémy mohou polarizovaná skla působit také při čtení LCD displejů (palubní desky některých automobilů, lodí, GPS navigace, mobilní telefony). Při pohledu na displej pod určitým úhlem může display ztmavnout nebo úplně zmizet a není tak možné z něj číst. [32]

Pro zajímavost můžeme výpočtem zjistit den, kdy se Slunce nachází tak vysoko nad obzorem, že se od vodní hladiny odráží přesně pod Brewsterovým úhlem. Uvažujme tedy dokonale klidnou vodní hladinu. Zanedbáme-li zakřivení Země, bude nás zajímat výška Slunce nad obzorem v průběhu roku. Ta se běžně udává pomocí úhlu. Pokud tento úhel odečteme od  $90^\circ$  dostaneme úhel, pod kterým Slunce dopadá na vodní hladinu.



Obrázek 3.2: Schéma polarizace slunečních paprsků odrazem na vodní hladině

Výšku Slunce nad obzorem ovlivňuje sklon zemské osy a obíhání Země kolem Slunce. Pozice Slunce se také často vyjadřuje pomocí deklinace, což je úhel, který svírá sluneční paprsek směřující do středu Země s rovinou rovníku. Tento úhel se mění od  $-23,5^\circ$  (zimní slunovrat) do  $23,5^\circ$  (letní slunovrat). Výška Slunce nad obzorem tedy závisí právě na deklinaci  $\delta$  a zeměpisné šířce  $\psi$ .

$$h = 90^\circ - \psi + \delta \quad (54)$$

Ze vzorce je zřejmé, že deklinace je tedy rovna rozdílu úhlu, pod kterým dopadají sluneční paprsky na vodní hladinu, a zeměpisné šířky:

$$\delta = \psi - \theta . \quad (55)$$

Pokud bychom tedy uvažovali zeměpisnou šířku  $50^\circ$  a Brewsterův úhel pro rozhraní vzduchu a vody přibližně  $53,06^\circ$ , hledáme deklinaci rovnou  $-3,06^\circ$ .

Různé zdroje (například [33]) pak udávají tabulkovou hodnotu deklinace. Pokud se podíváme na tyto tabulky. Zjistíme, že 13. března je deklinace rovna  $-3,1^\circ$  a 2. října rovna  $-3,3^\circ$ . V tyto dny tedy ve chvíli kdy je Slunce nejvýše nad obzorem dopadají sluneční paprsky na vodní hladinu pod Brewsterovým úhlem. Mezi 13. březnem a 2. říjnem pak vždy během dne nastane chvíle, kdy Slunce vystoupí dostatečně vysoko nad obzor, aby jeho paprsky dopadaly na Zemi pod Brewsterovým úhlem. [33]

Další přírodní úkaz, kde můžeme snadno zkoumat polarizované světlo skrz polarizační brýle je duha. Duha vzniká lomem slunečních paprsků v kapičkách deště. Paprsky se v kapičce odráží pod úhlem, který je blízký Brewsterovu úhlu. Světlo duhy je tedy částečně lineárně polarizováno v tečném směru a při vhodném natočení polarizačními brýlemi neprochází. [34]



Obrázek 3.3: Duha pozorovaná skrz polarizační filtr [35]

Ke stejnému účelu jako polarizační brýle se používají polarizační filtry pro fotoaparáty. Nejedná se ale jen o odrazy od skla nebo na vodní hladině. Světlo se ve větší či menší míře odráží od všech povrchů a odražené bílé světlo způsobuje, že vidíme barvy méně saturované. Podaří-li se toto světlo odfiltrovat, barvy se stanou sytějšími. Nejčastěji se polarizační filtr při fotografování používá k odstranění oparu a ke ztmavení modré oblohy.

K polarizaci světla dochází také při rozptylu světla způsobeném částicemi, které se volně vznášejí ve vzduchu. Čím více částic se ve vzduchu vznáší a čím tlustší vrstvou vzduchu světlo musí projít, k tím většímu rozptylu světla dochází. Naopak ve velkých nadmořských výškách, kde světlo prochází tenčí vrstvou atmosféry, nebo je-li vlhkost vzduchu velmi malá, obloha je hodně tmavá. Polarizační filtr pak pomáhá odstranit právě toto rozptýlené polarizační světlo a snímky se opět projasní a stanou se více kontrastními. [36]



Obrázek 3.4: Efekt polarizačního filtru. Vlevo fotografie bez použití filtru. Vpravo fotografie s filtrem. [37]

Ačkoli výhody, které jsou popsány výše, poskytují filtry lineární, prakticky všechny moderní polarizační filtry pro fotoaparáty jsou označeny jako cirkulární. Je to z toho důvodu, že kromě lineárního filtru obsahují ještě vrstvu, která se nejčastěji chová jako čtvrtvlnová destička a která převádí lineárně polarizované světlo na kruhově polarizované. Moderní fotoaparáty vybavené autofokusem a expozimetry mají totiž problémy s lineárně polarizovaným světlem. Světlo uvnitř fotoaparátu prochází několika optickými prvky, a pokud by do této soustavy vcházelo lineárně polarizované světlo, pak by právě autofokus nebo expozimetr nefungovaly přesně, jak mají. [36]

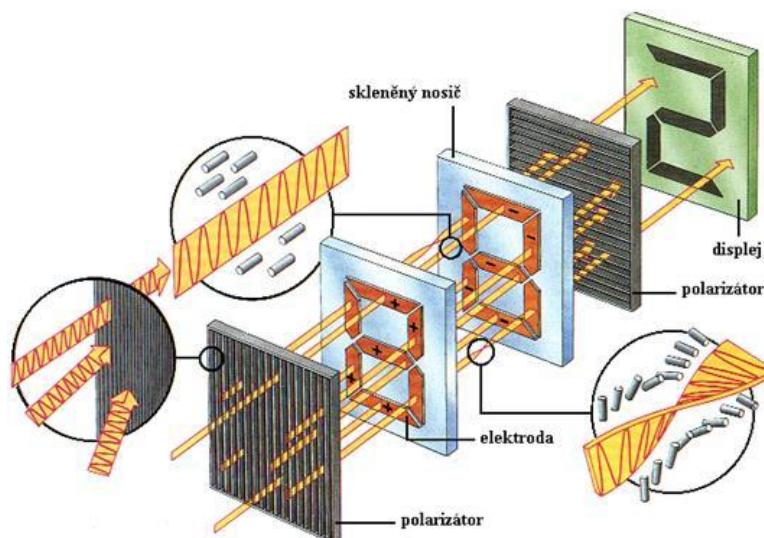
### 3.2 LCD

LCD je zkratkou pro *Liquid crystal display* neboli v češtině displej z kapalných krystalů. Kapalné krystaly jsou organické látky, které vytvářejí přechod mezi pevnými látkami a kapalinami. Jsou kapalné, ale jejich molekuly jsou pravidelně uspořádány podobně jako v pevných látkách (krystalová struktura). Hlavní význam kapalných krystalů spočívá v tom, že

vnějším působením fyzikálních sil můžeme ovlivnit jejich vnitřní uspořádání a tím i jejich vlastnosti. [38]

### 3.2.1 Twisted nematic (TN)

Jedním z nejjednodušších LCD displejů je sedmi (nebo více) úsekový displej využívající nematkové kapalně krystaly. Jsou to displeje, které známe například z kalkulaček nebo digitálních hodin. Kapalně krystal je umístěn mezi dvěma skleněnými destičkami, na jejichž povrchu je nanášena rýhovaná vrstva oxidu křemičitého. Rýhování na obou deskách jsou navzájem kolmá. Kapalně krystaly v těsné blízkosti desek se tak orientují do směru rýh. Vlivem mezimolekulárních vazeb krystalů se pak vrstva krystalů stočí do tvaru jakési šroubovice. Na vnějších stranách skleněných destiček jsou průhledné elektrody (jejich počet se liší v závislosti na typu displeje). Tyto elektrody se nabíjí v závislosti na signálu z logických obvodů podle toho, co se má zobrazit na displeji. Na vnějších stranách obou skleněných destiček jsou pak umístěny polarizační filtry, které jsou vzájemně pootočené o  $90^\circ$ . [39]



Obrázek 3.5: Schéma TN displeje [40]

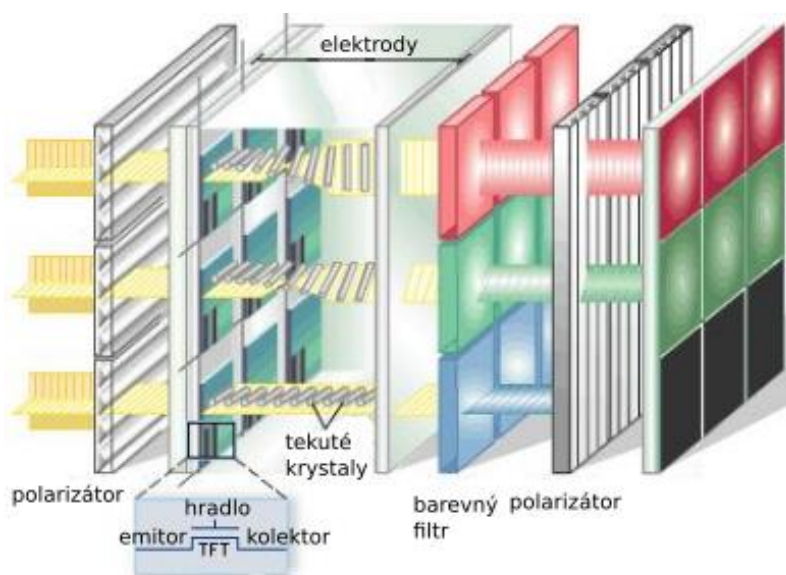
Kapalně krystaly můžeme považovat za opticky aktivní látku, neboť ovlivňují rovinu polarizace světla, která jimi prochází. První polarizátor dovolí průchod pouze té části světla, která kmitá v jediném směru (daném polarizátorem). Spirálovité molekuly tekutého krystalu otáčejí úhel polarizovaného světla o  $90^\circ$  a světlo pak prochází druhým polarizátorem na displeji. Jestliže na určitou elektrodu přivedeme elektrické napětí, orientují



se molekuly krystalu ve směru intenzity elektrického pole. Rovina polarizace světla se tedy v tomto místě nemění a světlo tak nemůže projít druhým polarizátorem a displej zůstává tmavý. [39]

### 3.2.2 TFT

Displeje, které slouží k zobrazování obrazů s vysokým rozlišením (počítače, mobilní telefony) se skládají z velkého množství drobných pixelů. Takové displeje pracují s technologií TFT (*thin-film transistor*). V tomto uspořádání připadá na každý pixel několik tranzistorů. Hodnoty napětí, které jsou přiváděny na jednotlivé tranzistory, mohou být regulovány a tím pádem můžeme regulovat i natočení tekutých krystalů. To znamená, že můžeme regulovat množství světla, které prochází celou soustavou. Součástí displeje může být také barevná maska, která rozděluje každý pixel do tří subpixelů, které mají červenou, zelenou nebo modrou barvu. Kombinací intenzit těchto tří základních barev lze dosáhnout miliónů dalších. [41]



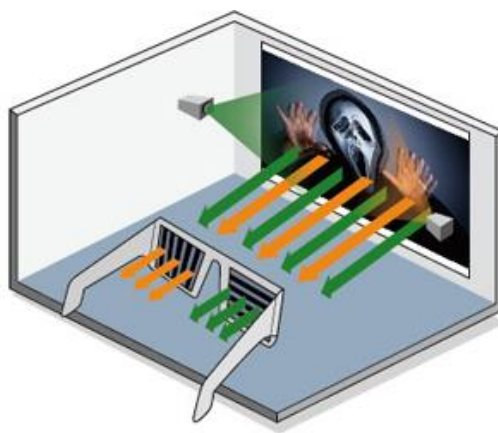
Obrázek 3.6: Schéma TFT displeje. Upraveno podle [42]

### 3.3 3D kino

Princip prostorového vidění je založen na skutečnosti, že člověk má dvě oči navzájem od sebe vzdálené. Okolní předměty tedy vidí každé oko pod mírně odlišným zorným úhlem a před mírně odlišným pozadím. Můžeme říci, že každé oko vidí jiný obraz. Tyto dva odlišné obrazy je pak lidský mozek schopen vyhodnotit a vnímat různou vzdálenost předmětů navzájem. Říkáme, že jsme schopni vidět prostorově. [43]

Stejného principu je využito při natáčení 3D filmů. Klasické filmy jsou natáčeny na kamery s jedním objektivem. Na záznamové zařízení tak dopadá jeden obraz (stejně jako když zavřeme oko a mozek dostává pouze jeden obraz z otevřeného oka). 3D kamery disponují dvěma objektivy, které jsou umístěny přibližně stejně daleko od sebe jako lidské oči. Filmovou scénu tak zaznamenávají ze dvou odlišných úhlů. Na základě toho je pak možné vnímat při sledování takto natočených filmů prostorový efekt. [44]

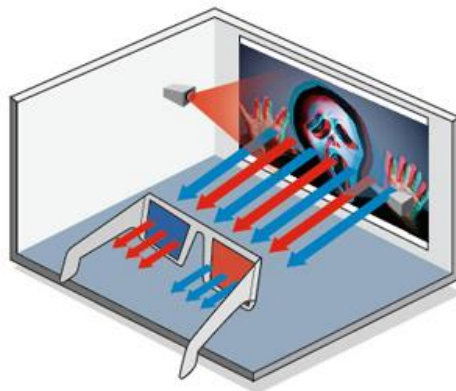
Při sledování takto natočeného filmu je pak nutné, aby levé oko vnímalo pouze obraz natočený levým objektivem a pravé oko vnímalo pouze obraz natočený pravým objektivem. Technologií jak toho docílit je více. V současnosti nejpoužívanější technologie využívá právě polarizaci světla. Při projekci v kině se film promítá dvěma promítacími stroji, z nichž každý má na objektivu polarizační filtr, jejichž polarizační roviny jsou navzájem kolmé. Diváci pak sledují plátno přes speciální brýle opatřené taktéž polarizačními filtry s různou orientací. Tím je zajištěno, že každým sklem brýlí projde odpovídající obraz. Každé oko tedy vnímá obraz pouze z jednoho promítacího stroje. [44]



Obrázek 3.7: Princip 3D projekce založené na polarizaci světla [45]

Starší stereoskopická technika se nazývá anaglyf. Namísto polarizace je však levý a pravý obraz oddělen barevně. Anaglyf je tvořen barvami, které jsou vzájemně doplňkové. Nejčastěji je používána kombinace červené a azurové. Anaglyf vznikne tak, že se obrázek pro levé oko (červený filtr) převede do azurovobílé škály a obrázek pro pravé oko (azurový filtr) do červenobílé škály. Tyto dva obrázky se pak zobrazí přes sebe. V místech, kde se červená a azurová barva setká, vznikne černá barva, nebo

odpovídající odstín šedé. Pozorovatel pak vidí každým okem černobílý obraz tvořený doplňkovou barvou k filtru brýlí a ze dvou dílčích obrazů si v mozku vytvoří prostorový vjem. Největším problémem anaglyfu je nerealistické zobrazení barev, což je také pravděpodobně důvod, proč se v dnešní době v 3D kinematografii nepoužívá. [46]



Obrázek 3.8: Princip 3D projekce využívající anaglyf [45]

Nejnovější a technologicky nejnáročnější technologie pro sledování 3D obrazu využívá tzv. *shutter glasses* (volně přeloženo jako závěrkové brýle). Obrazy pro levé a pravé oko jsou na obrazovce přepínány s vysokou frekvencí a synchronně s obrazem se zatmavují jednotlivé čočky brýlí. Obraz tak pozorujeme vždy zlomek sekundy pouze levým okem a poté zlomek sekundy pouze pravým okem. Zatmavování jednotlivých čoček a střídání obrazů se děje tak rychle, že obraz vnímáme jako bychom ho pozorovali oběma očima současně. Nevýhodou této technologie jsou drahé elektronické brýle, které musejí být synchronizovány s obrazem. Z tohoto důvodu není tato technologie vhodná pro použití v kinech. Nicméně se prosadila pro domácí použití spolu se speciálními televizory. [47] [48]



Obrázek 3.9: Princip 3D projekce využívající *shutter glasses* [45]

## 4 Zdroje polarizovaného světla

V této kapitole bychom rádi stručně vysvětlili princip laseru. Laserové ukazovátko je často používaná pomůcka při demonstračních pokusech paprskové optiky. Díky svým vlastnostem je však laser vhodný i k demonstraci polarizace světla.

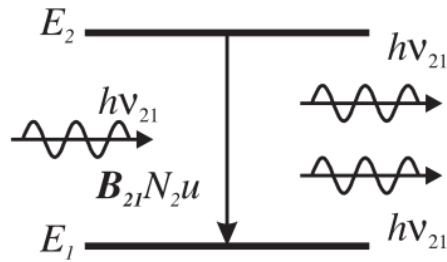
### 4.1 Laser

Mezi základní prvky laseru patří aktivní prostředí, které se nachází v optickém rezonátoru. Aktivní prostředí můžeme chápat jako soubor kvantových soustav, které byly buzením vyvedeny ze stavu termodynamické rovnováhy. Kvantová soustava má nějaký základní stav, což je stav s nejnižší možnou energií. Kvantová soustava může přejít do stavu excitovaného, což je stav, kdy má soustava vyšší energii. Přechodu mezi energetickými stavy soustavy se říká excitace. Aby kvantová soustava přešla z jednoho stavu do druhého, musí přijmout nebo odevzdat přesné množství energie. Nositelem energie v kvantové teorii jsou fotony. Energie jednoho fotonu je  $E = h \cdot \nu$ . [49]

Při interakci kvantové soustavy s elektromagnetickým polem (fotony) mohou nastat tři základní procesy:

- absorpce fotonu kvantovou soustavou
- spontánní emise fotonu kvantovou soustavou
- stimulovaná emise fotonu kvantovou soustavou

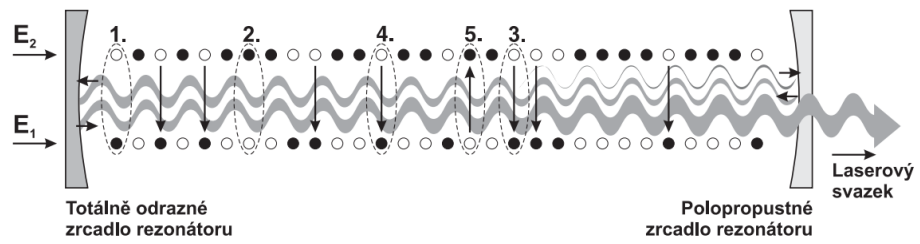
Z hlediska laseru pro nás bude zajímavá právě stimulovaná emise. Stimulovaná emise nastává při interakci excitovaného kvantového systému s fotonem, jehož energie odpovídá energetickému rozdílu mezi excitovaným a některým níže položeným stavem. Při tomto přechodu mezi stavem s vyšší energií do stavu s nižší energií se uvolňuje foton. Výsledkem stimulované emise jsou tedy dva fotony. Jeden, který emisi vyvolal a druhý, který při emisi vzniknul. Oba tyto fotony mají nejen stejnou energii ale i všechny další vlastnosti, jako například právě **polarizaci**. [50]



Obrázek 4.1: Schéma stimulované emise [50]

Základními elementy laseru jsou laserově aktivní prostředí, buzení, rezonátor. O aktivním prostředí již byla řeč v úvodním odstavci kapitoly a může mít povahu plynu, polovodiče, kapaliny a pevné amorfni látky. Buzení zajišťuje energii pro excitaci aktivního prostředí a zajišťuje tak vznik inverze populace hladin. Díky inverzi populace hladin je stimulovaná emise pravděpodobnější než absorpce fotonu. Buzení závisí na použitém aktivním prostředí (Může jít o optické záření, elektrický výboj, elektronový svazek, chemickou reakci.). Rezonátor se pak skládá z minimálně dvou zrcadel. Tato zrcadla zajišťují akumulaci energie a interakci mezi zářením (fotony) a aktivním prostředím. Aktivní prostředí většinou ve tvaru kvádrů nebo válců umístíme do rezonátoru tak, aby jeho osa splývala s optickou osou rezonátoru. Podél této osy se šíří záření, které je aktivním prostředím zesilováno, na zrcadlech rezonátoru se odráží a znovu vstupuje do aktivního prostředí. Jedno zrcadlo rezonátoru je pak polopropustné, a záření, které jím prochází je výstup laseru. [49] [50]

Princip aktivního prostředí je pak následující. Buzení udržuje v aktivním prostředí dostatek kvantových soustav v excitovaném stavu (inverzní populace). Poté, co některá kvantová soustava přejde náhodně spontánní emisí na nižší hladinu, uvolní se foton, který může stimulovat další kvantové soustavy. Část fotonů, které se pohybují v aktivním prostředí, může být opět absorbována. Pokud však bude v aktivním prostředí inverze populace hladin, bude s větší pravděpodobností docházet ke stimulované emisi a záření se bude zesilovat. Rezonátor pak zajišťuje selektivní kladnou zpětnou vazbu systému. To znamená, že jen rezonující fotony se budou zesilovat. [50]



Obrázek 4.2: Princip funkce laseru. (1.) základní stav, (2.) excitovaný stav, (3., 4.) spontánní případně stimulovaná emise, (5.) absorpce [50]

## 5 Polarizace světla v učebnicích fyziky na SŠ

Součástí této práce je i stručná analýza učebnic pro střední školy a víceletá gymnázia zaměřená právě na část optiky, která se týká polarizace světla. V českém prostředí příliš na výběr nemáme. Doložku MŠMT splňují pouze učebnice nakladatelství Prometheus. Jde o několikadílnou sérii učebnic *Fyzika pro gymnázia* a o dva díly knihy *Fyzika pro střední školy*. Série učebnic *Fyzika pro gymnázia* obsahuje samostatný díl zaměřený na optiku *Fyzika pro gymnázia – optika* [2]. Optika je také součástí učebnice *Fyzika pro střední školy II.* [51]

Hlavním autorem učebnice *Fyzika pro gymnázia – optika* je Oldřich Lepil a v roce 2015 vyšlo již páté přepracované vydání této knihy. Učebnice je rozdělena do čtyř hlavních kapitol: *Základní pojmy*, *Zobrazování optickými soustavami*, *Vlnová optika*, *Elektromagnetické záření a jeho energie*. Následují ještě kapitoly obsahující teoretická a laboratorní cvičení. Polarizaci světla se věnují podkapitoly *Polarizace světla* a *Praktické využití polarizovaného světla*, které jsou součástí kapitoly *Vlnová optika*. [2]

Polarizace světla je v učebnici vysvětlena pomocí směru kmitání vektoru intenzity elektrického pole. Následuje krátký přehled možností vzniku polarizovaného světla odrazem, lomem, dvojlomem a absorpcí za pomoci polarizačních filtrů. Zde jsou zmíněny pojmy jako Brewsterův úhel, dvojlom, řádný a mimořádný paprsek, polarizátor a analyzátor. Žáci se také dozvědí, že lomem se světlo polarizuje pouze částečně, a lepší polarizace se dosáhne vícenásobným lomem na soustavě skleněných destiček. Vše se točí okolo polarizace lineární. [2]

V podkapitole *Praktické využití polarizovaného světla* se žáci seznámí s pojmy polarimetrie a optická aktivita látek. Obrázek polarimetru by dle mého mohl být názornější a skutečně zobrazovat schéma natočení roviny polarizace a ne pouze schéma samotného přístroje. Dále je zde naznačen princip fotoelasticimetrie. Zde mi chyběl pojem dočasný dvojlom a propojení právě s odstavcem o polarizaci světla dvojlomem. Poměrně podrobný je pak popis funkce LCD displeje. Namísto schématu, které by celý popis doplnilo, je zde však uvedena pouze velká fotografie LCD displeje (vidíme vlastně pouze jeho pouzdro). Myslím, že můžeme předpokládat, že každý

gymnazista v dnešní době se již s LCD displejem setkal, a není proto potřebné ho poučovat, jak takové zařízení vypadá. Jako poslední využití polarizovaného světla je zde uveden princip snímače optického záznamu na kompaktním disku. [2]

## 5.1 Zahraniční učebnice

Na webu *American institute of Physics* můžeme nalézt článek z roku 2014 [52], který mapuje používané učebnice fyziky na středních školách ve Spojených státech amerických. Nejrozšířenějšími učebnicemi jsou knihy *Physics principles and problems* (McGraw-Hill. 2005), *Holt Physics* (Serway, Faughn. 2006) a *Conceptual Physics* (Hewitt. 2009). Součástí výzkumu bylo také hodnocení učebnic samotnými učiteli. Kromě výše zmíněných knih hodnotili učitelé také velice dobře učebnici *Physics: Principles with applications*, která se však v době výzkumu používala pouze na 7 % středních škol (základní kurz fyziky). [52]

I v zahraničních učebnicích se polarizaci světla nedostává tolik prostoru jako ostatním odvětvím optiky. V učebnici *Physics principles and problems* začíná kapitola o polarizaci nejprve polarizací světla absorpcí. Princip polarizačního filtru je zde vysvětlen na stejném pokusu jako v učebnici nakladatelství Prometheus. Následuje odstavec věnovaný polarizaci odrazem. Zde je na rozdíl od české učebnice zmíněn význam a princip polarizačních brýlí a polarizačních filtrů pro fotoaparáty. Dále je zde uveden Malusův zákon. Zajímavé je, že polarizace je umístěna do části základních vlastností světla. Kapitoly zabývající se paprskovou optikou, optickým zobrazováním, difrakcí a interferencí následují až po polarizaci světla na rozdíl od české učebnice. [53]

V učebnici *Holt Physics* předchází výklad paprskové optiky a zrcadel kapitolu polarizace podobně jako v české učebnici. Jako první způsob polarizace světla je tu opět uvedena polarizace absorpcí. Následuje výklad polarizace odrazem, kde se kniha také zmiňuje o polarizaci rozptylem v Zemské atmosféře. Opět se učebnice nezmiňuje o polarizaci lomem a na rozdíl od učebnice *Physics principles and problems* zde není uveden ani vztah pro Malusův zákon. [54]

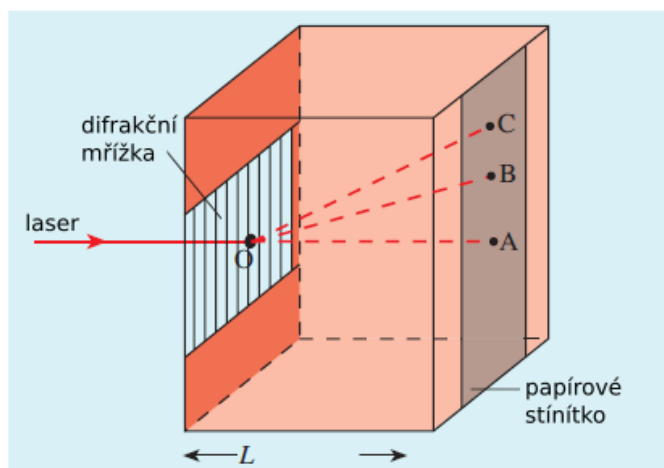


## 6 Příprava návodů a úloh k polarizaci světla v běžném životě

V této kapitole předkládáme fyzikální vysvětlení experimentů, které jsme v rámci této práce realizovali. K správnému provedení experimentů je důležité znát nejenom pracovní postup, ale také fyzikální zákony a principy, které se za pozorovanými jevy skrývají.

### 6.1.1 Měření indexu lomu v kapalině pomocí difrakční mřížky

Jako jednu z metod pro měření indexu lomu kapalin jsme zvolili metodu popsanou v článku [55]. Tato metoda je založena na rozdílném úhlu lomu na stěně nádoby v případě, kdy je nádoba prázdná a kdy je v nádobě kapalina. Schéma experimentu můžete vidět na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1: Schéma experimentu měření indexu lomu s využitím difrakční mřížky.  
Upraveno podle [55]

Na jednu stranu hranaté nádoby se umístí difrakční mřížka a na druhou stranu stínítko. Na difrakční mřížku necháme kolmo dopadat laserový paprsek. Ten se na difrakční mřížce ohýbá a postupuje dále skrz nádobu, až dopadne na stínítko. Bod A je nulté maximum, bod C je první maximum v situaci, kdy v nádobě není kapalina a bod B je první maximum v situaci, kdy je v nádobě nalita kapalina a paprsek světla se šíří právě touto kapalinou.

Za předpokladu, že index lomu vzduchu je roven 1, vyjádříme index lomu kapaliny jako

$$n = \frac{\sin i}{\sin r}, \quad (56)$$

kde  $i$  je úhel pod kterým dopadá na povrch kapaliny paprsek prvního řádu a  $r$  je úhel, pod kterým se paprsek láme při vstupu do kapaliny (skleněnou nádobu při tomto popisu zanedbáváme).



Obrázek 6.2: Lom paprsku na rozhraní vzduchu a vody. Upraveno podle [55]

Pomocí obrázku snadno převedeme vzorec pro výpočet indexu lomu na tvar

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{AC}{OC} = \frac{AC}{AB} \cdot \frac{OB}{OC} = \frac{AC}{AB} \cdot \frac{\sqrt{(AB)^2 + (OA)^2}}{\sqrt{(AC)^2 + (OA)^2}}. \quad (57)$$

Ze vzorce je patrné, že pro zjištění indexu lomu nám stačí znát pouze šířku nádoby (vzdálenost  $OA$ ) a vzdálenost nultého a prvního maxima v případě, že je v nádobě kapalina ( $AB$ ) a v případě, že je nádoba prázdná ( $AC$ ).

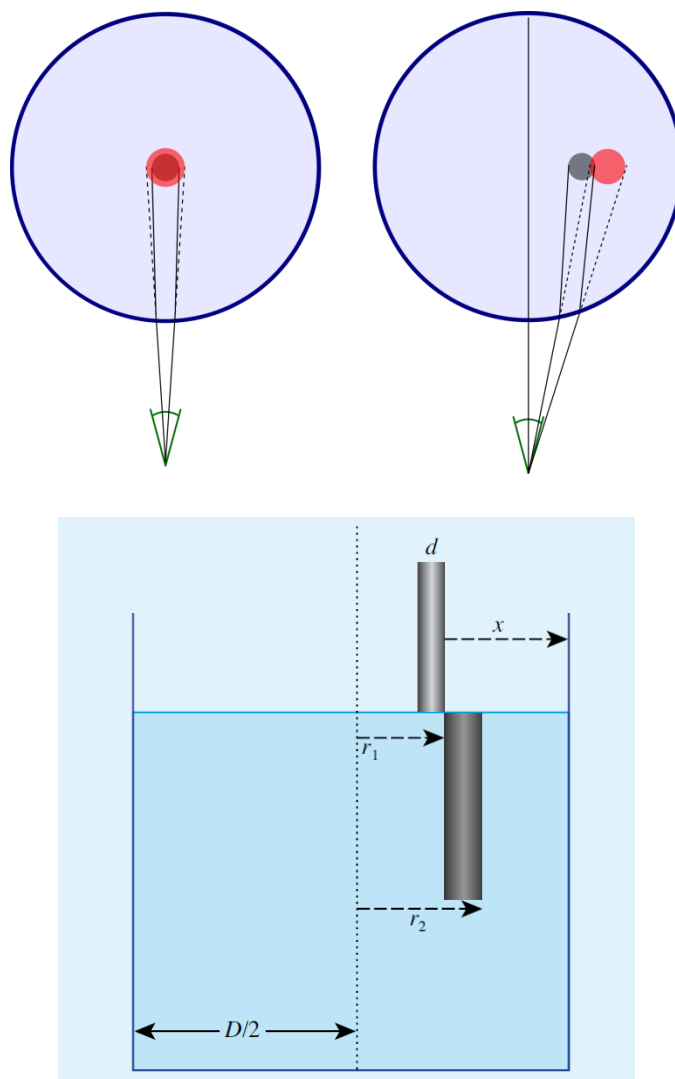
Chybu měření určíme podle zákona hromadění chyb, neboli jako chybu nepřímého měření fyzikální veličiny. V našem případě počítáme fyzikální veličinu index lomu z naměřených veličin, s kterými souvisí podle funkčního vztahu uvedeného výše. Výsledná chyba měření indexu lomu bude rovna:

$$\bar{\delta}(n) = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial OA}\right)^2 \bar{\delta}^2(OA) + \left(\frac{\partial n}{\partial AB}\right)^2 \bar{\delta}^2(AB) + \left(\frac{\partial n}{\partial AC}\right)^2 \bar{\delta}^2(AC)}, \quad (58)$$

kde  $\bar{\delta}(OA)$ ,  $\bar{\delta}(AB)$ ,  $\bar{\delta}(AC)$  jsou chyby měření jednotlivých dílčích veličin. V našem případě jsou to chyby měřidla, které určíme jako polovinu nejmenšího dílku měřidla ( $0,5 \text{ mm}$ ). [56]

### 6.1.2 Měření indexu lomu v kapalině využívající refrakci

Jako druhý způsob měření indexu lomu kapalin jsme zvolili metodu popsanou v článku [57]. Tato metoda využívá refrakci světla na rozhraní dvou prostředí s různými indexy lomu. Schéma pokusu je znázorněno na obrázku 6.3.



Obrázek 6.3: Schéma pokusu [57]

Při tomto pokusu se do nádoby s kruhovým průřezem o průměru  $D$  ponoří tyč o průměru  $d$ . Nádoba se naplní tekutinou tak, aby část tyče byla ponořená. Umístíme-li tyč přesně doprostřed nádoby, pozorujeme, že obraz tyče pod hladinou má větší průměr než skutečný průměr tyče. Pokud navíc začneme posouvat tyč směrem od středu ke kraji nádoby, pozorujeme, jak se obraz tyče pod hladinou odděluje od tyče nad hladinou. Nás bude

zajímat situace, kdy se obraz úplně oddělí od tyče tak, jak je to znázorněno na obrázku 6.3. Při výpočtu indexu lomu pak budeme vycházet z úvahy, že

$$n \cdot d = d' = r_2 - r_1 \quad (59)$$

a zároveň

$$r_2 = n \cdot r_1. \quad (60)$$

Za  $r_1$  potom dosadíme ze schématu

$$r_1 = \frac{D}{2} - x. \quad (61)$$

Z těchto vztahů pak vyjádříme index lomu jednoduše jako

$$n = \frac{\frac{D}{2} - x}{\frac{D}{2} - x - d}. \quad (62)$$

Chybu měření určíme podle zákona hromadění chyb, neboli jako chybu nepřímého měření fyzikální veličiny. V našem případě počítáme fyzikální veličinu index lomu z naměřených veličin, s kterými souvisí podle funkčního vztahu uvedeného výše. Výsledná chyba měření indexu lomu bude rovna:

$$\bar{\delta}(n) = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial \frac{D}{2}}\right)^2 \cdot \bar{\delta}^2\left(\frac{D}{2}\right) + \left(\frac{\partial n}{\partial x}\right)^2 \cdot \bar{\delta}^2(x) + \left(\frac{\partial n}{\partial d}\right)^2 \cdot \bar{\delta}^2(d)}, \quad (63)$$

kde  $\bar{\delta}\left(\frac{D}{2}\right)$ ,  $\bar{\delta}(x)$ ,  $\bar{\delta}(d)$  jsou chyby měření jednotlivých dílčích veličin.

V našem případě jsou  $\bar{\delta}\left(\frac{D}{2}\right)$  a  $\bar{\delta}(d)$  chyby měřidla, které určíme jako

polovinu nejmenšího dílku měřidla ( $0,5 \text{ mm}$ ).  $\bar{\delta}(x)$  je chyba měření vzdálenosti  $x$ , kterou určíme jako součin směrodatné odchylky aritmetického průměru a studentova součinitele. Směrodatnou odchylku aritmetického průměru určíme podle vzorce:

$$\bar{\delta}(x) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (64)$$

[56]

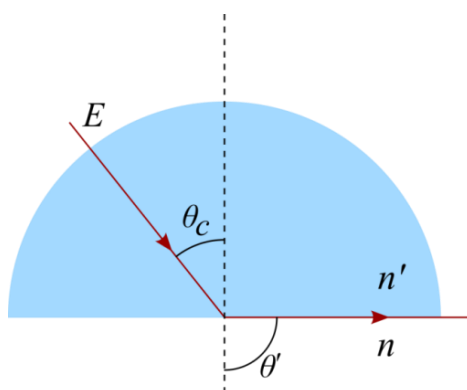
Hodnotu studentova součinitele volíme pro  $P = 95 \%$ . Hodnota závisí na počtu opakování měření.

Tabulka 6.1: Hodnoty studentova součinitele [56]

Počet měření $n$	Hodnota parametru $t_{P,n}$ pro $P = 95 \%$
2	12,71
3	4,3
4	3,18
5	2,78
6	2,57
7	2,45
8	2,37
9	2,31
10	2,26

### 6.1.3 Měření indexu lomu skla s využitím totálního odrazu

K měření indexu lomu pevné látky jsme vybrali vzorek skla půlkruhového tvaru a tloušťky přibližně jeden centimetr. S ohledem na tvar zkoumaného vzorku jsme jako způsob určení indexu lomu zvolili metodu popsanou v článku [58]. Jde o jednoduchou metodu využívající totálního odrazu na rozhraní dvou optických prostředí. Schéma pokusu je na obrázku 6.4.



Obrázek 6.4: Schéma průchodu paprsku půlkruhovým vzorkem v případě totálního odrazu

Paprsek  $E$  necháme dopadat kolmo na kruhovou plochu vzorku. Paprsek vstupuje do látky, aniž by se lámal. Paprsek dopadá na spodní stranu vzorku pod úhlem  $\theta$ , láme se a opouští vzorek pod úhlem  $\theta'$ . Pokud je  $n' > n$  láme se paprsek od kolmice. Pokud nastane situace, kterou vidíme na schématu, tedy že paprsek dopadá na rozhraní pod určitým úhlem  $\theta_c$ , je úhel lomu roven  $90^\circ$ . Těto situaci říkáme totální odraz a úhlu  $\theta_c$  říkáme kritický úhel. Tohoto jevu můžeme snadno využít k určení indexu lomu. Ze Snellova zákona totiž platí:

$$n' \cdot \sin \theta_c = n \cdot \sin \theta'. \quad (65)$$

V případě, že prostředí, do kterého se paprsek láme je vzduch, můžeme uvažovat index lomu vzduchu  $n=1$ . Zároveň platí, že sinus devadesáti stupňů je taktéž roven jedné. Pro index lomu opticky hustšího prostředí dostaneme jednoduchý vztah

$$n' = \frac{1}{\sin \theta_c}. \quad (66)$$

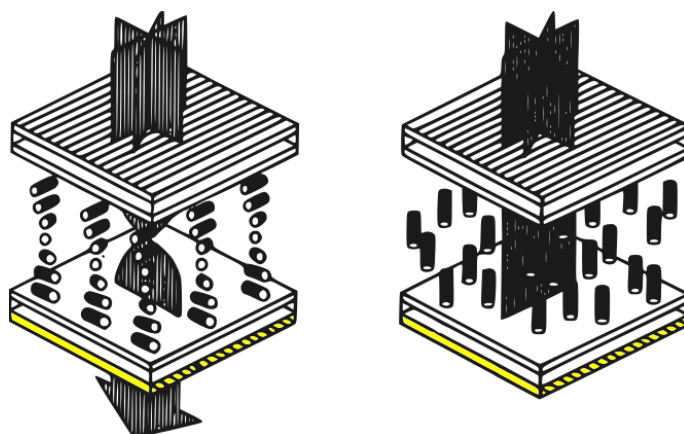
Chybu určíme jako chybu nepřímého měření

$$\bar{\delta}(n') = \sqrt{\left( \frac{\partial n'}{\partial \theta_c} \cdot \bar{\delta}(\theta_c) \right)^2} = \left| \frac{\partial n'}{\partial \theta_c} \cdot \bar{\delta}(\theta_c) \right|, \quad (67)$$

kde  $\bar{\delta}(\theta_c)$  je chyba měření kritického úhlu, kterou určíme jako součin studentova součinitele a směrodatné odchylky aritmetického průměru podobně, jako v kapitole 6.1.2.

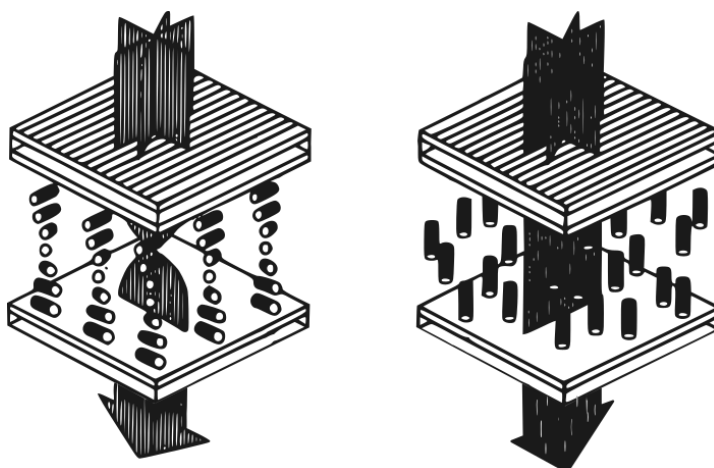
## 6.2 Neviditelný monitor

Neviditelný monitor je demonstrační pomůcka, která má pomoci vysvětlit úlohu polarizačních filtrů v LCD monitorech a zároveň demonstrovat využití polarizovaného světla v těchto zařízeních. Princip spočívá v odstranění předního polarizačního filtru monitoru. Jak už bylo popsáno v kapitole 3.2.2, přední polarizační filtr slouží v zásadě k tomu, aby zabránil průchodu té části světla, u které nebyla vlivem natočení kapalných krystalů změněna rovina polarizace, kterou světlo získalo při průchodu prvním filtrem. Normálně tedy funguje LCD display podobně jako na obrázku 6.5.



Obrázek 6.5: Schéma LCD displeje. Vlevo světlo prochází skrz. Vpravo světlo pohltí polarizační filtr. Upraveno z [59]

Žlutě je zvýrazněna vrstva polarizačního filtru. Z obrázku vpravo je patrné, že procházející světlo má rovinu polarizace kolmou k polarizačnímu filtru a tudíž žádná část světla neprochází skrz. Na dalším obrázku 6.6 můžeme vidět, co se stane, pokud vrstvu polarizačního filtru odstraníme.



Obrázek 6.6: Schéma LCD displeje s odstraněným předním polarizátorem. Upraveno z [59]

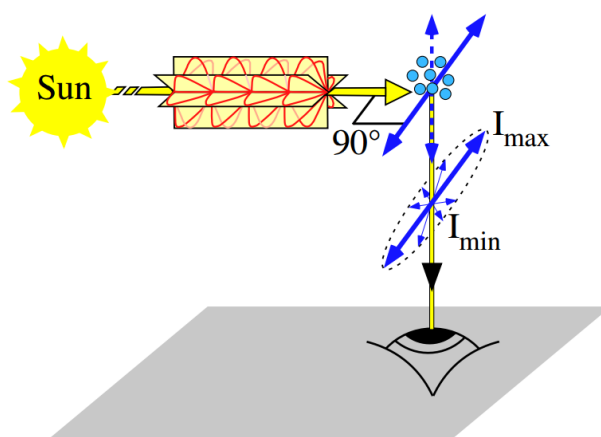
Z obrázku je zřejmé, že světlo prochází skrz ať je jeho rovina polarizace jakákoli. Natočení krystalů tak nemá na výsledný obraz vliv. Respektive displej funguje úplně stejně, jako kdybychom polarizační filtr neodstranili. Jelikož ale lidské oko nedokáže rozlišit světlo s různou polarizací, vnímáme všechny pixely displeje jako jasně zářící.

### 6.3 Sluneční kompas

Je známo, že Vikingové byli výborní mořeplavci, kteří se plavili především ve vodách Norského moře a severního Atlantiku. V dobách Vikingů ještě

nebyl v Evropě znám magnetický kompas a tak museli Vikingové používat k navigaci jiné metody jako například polohu Slunce nebo hvězd. V článku *The sunstone and polarised skylight: ancient Viking navigational tools?* je uvedeno, že jeden ze způsobů, který mohl pomáhat Vikingům při orientaci na moři mohl být takzvaný sluneční kompas. [60]

V zeměpisných šířkách kolem severního polárního kruhu dochází k tomu, že soumrak může trvat celé hodiny. V takových případech, kdy je Slunce schované těsně pod horizontem, se Vikingové nemohli orientovat ani podle polohy Slunce ani podle hvězd. V takových chvílích však sluneční paprsky procházejí atmosférou téměř rovnoběžně s povrchem Země a sluneční světlo se v atmosféře rozptyluje. Dnes už víme, že takto rozptýlené sluneční světlo směřující k povrchu Země je lineárně polarizované ve směru kolmém na směr, z kterého paprsky přicházejí. [60]

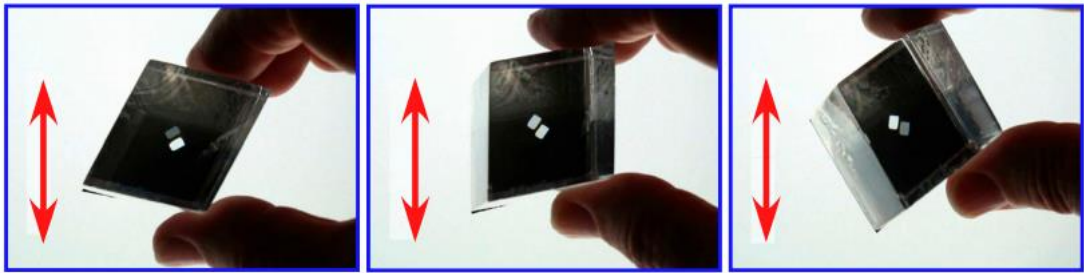


Obrázek 6.7: Polarizace slunečního světla rozptylem v atmosféře [60]

Nejdůležitější součástí Vikingského slunečního kompasu je kus islandského vápence. Islandský vápenec je jednoosý dvojlomný krystal. Optické vlastnosti takovýchto krystalů jsme popsali v kapitole 2.1. Islandský vápenec mohl Vikingům sloužit jako jakýsi analyzátor lineárně polarizovaného světla rozptýleného v atmosféře. V již zmíněném článku je navrhnutá možná podoba kompasu. Pokud se díváme skrz krystal na malý otvor ve stínítku, vidíme díky dvojlomu otvory dva. Světlo procházející otvorem do krystalu se rozdělí na paprsek řádný a mimořádný přičemž oba paprsky jsou lineárně polarizované a roviny polarizace těchto paprsků jsou navzájem kolmé. Pokud bychom takto pozorovali lineárně polarizované světlo a přitom otáčeli krystalem, viděli bychom, jak se intenzity

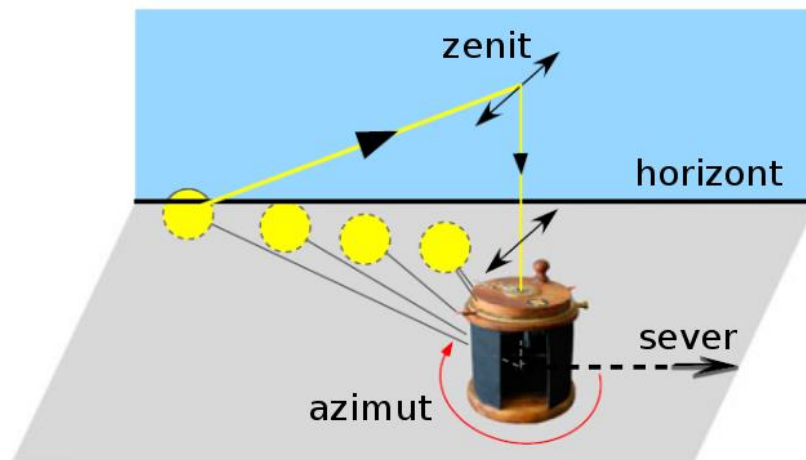


jednotlivých obrazů mění v závislosti na natočení krystalu. Jinými slovy krystal by fungoval jako analyzátor lineárně polarizovaného světla. [60]



Obrázek 6.8: Pozorování lineárně polarizovaného světla skrz štěrbinu ve stínítku [60]

Poté už stačí pouze provést kalibraci za soumraku, kdy je Slunce ještě viditelné na horizontu. Podíváme se skrz krystal kolmo vzhůru, natočíme ho tak, aby intenzity řádného a mimořádného paprsku byly stejné a označíme směr, odkud přicházejí sluneční paprsky. Ukazatel polohy Slunce by měl svírat s optickou osou krystalu úhel  $45^\circ$ . Touto kalibrací odstraníme drobné nepřesnosti dané nedokonalou orientací stěn krystalu.



Obrázek 6.9: Kalibrace slunečního kompasu. Překresleno podle [60]

Pokud otáčíme krystal kolem dokola, pozorujeme shodu intenzit řádného a mimořádného paprsku celkem čtyřikrát ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ). Natočení kompasu o  $0^\circ$  určuje skutečnou polohu Slunce. Pokud otáčíme krystal po směru hodinových ručiček, intenzita mimořádného paprsku roste. V poloze  $90^\circ$  a  $270^\circ$  naopak při otáčení po směru hodinových ručiček roste intenzita řádného paprsku. Polohu  $180^\circ$  a  $0^\circ$  můžeme rozlišit podle rozdílu jasu oblohy případně dalších přírodních jevů. [60]

## 7 Praktická realizace demonstračních experimentů k polarizaci světla a měření indexu lomu na střední škole

V této kapitole detailně popíšeme provedení experimentů k demonstraci polarizace světla, které by mohly být zařazeny do výuky fyziky na střední škole.

### 7.1 Měření indexu lomu

Abychom mohli určit Brewsterův úhel pro konkrétní materiál, musíme znát jeho index lomu. Ten můžeme zjistit v tabulkách nebo si ho sami změřit. Ve své práci jsem se rozhodl měřit index lomu a následně Brewsterův úhel několika kapalin a skla. Při volbě látek jsme vycházeli z dostupnosti kapalin a také jsme se snažili, aby rozdíly indexu lomu jednotlivých kapalin byly co možná největší. Proto jsme použili následující kapaliny:

- voda
- líh
- rostlinný olej
- glycerin
- vodní roztok cukru (40 %)

Index lomu poměrně výrazně závisí na vlnové délce světla. Pro měření indexu lomu s pomocí difrakční mřížky jsme použili laserové ukazovátko o vlnové délce 650 nm. Naproti tomu metoda měření indexu lomu za pomoci refrakce v nádobě stanovuje index lomu pro okolní, v našem případě denní, světlo. Index lomu v rámci viditelného spektra se v závislosti na vlnové délce a materiálu může lišit i o několik setin. [61]

Tabulka 7.1: Tabulkové hodnoty indexu lomu vybraných kapalin pro různé vlnové délky světla [61]

látka	Index lomu	
	$\lambda = 500 \text{ nm}$	$\lambda = 650 \text{ nm}$
voda	1,335	1,331
líh (ethanol)	1,365	1,359
glycerin	1,4758	1,4701

Index lomu rostlinného oleje se v závislosti na jeho typu a konkrétním výrobcí může pohybovat nejčastěji v rozmezí 1,46–1,475. Index lomu 40% roztoku glukózy je podle [62] 1,3986.

Cukerný roztok si připravíme podle jednoduchého vzorce

$$\text{procenta hmotnosti} = \frac{\text{hmotnost látky}}{\text{celková hmotnost roztoku}} \times 100, \quad (68)$$

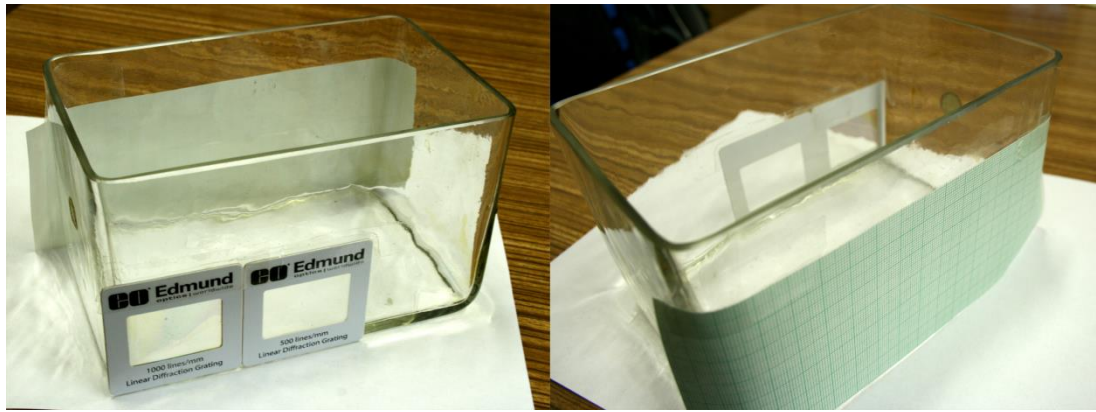
kde hmotnost látky je v našem případě hmotnost cukru, a celková hmotnost roztoku je tedy součet hmotnosti cukru a hmotnosti vody. Množství roztoku odhadneme podle potřeby konkrétního experimentu. Na vahách zvážíme zvlášť cukr a vodu a poté obě látky smícháme v kádince. Vodu jsme nejprve převařili, aby se cukr rychleji rozpouštěl.

### 7.1.1 Měření indexu lomu v kapalině pomocí difrakční mřížky

Pro první měření indexu lomu kapaliny jsme zvolili metodu popsanou v článku [55]. Jedná se o jednoduché měření využívající difrakční mřížku a základní znalosti paprskové optiky. Tuto metodu jsme zvolili kvůli dostupnosti pomůcek a jednoduché realizaci. Pomůcky potřebné k měření:

- skleněná nádoba
- difrakční mřížka (500 a 1000 vrypů na mm)
- laserové ukazovátko
- stojan na uchycení ukazovátko
- milimetrový papír

Skleněná nádoba musí mít alespoň dvě stěny navzájem rovnoběžné, ideálně několik centimetrů od sebe. Nádoba musí být dostatečně velká, aby paprsek, který se ohýbá na difrakční mřížce, dopadnul na zadní stěnu nádoby a mohli jsme odečíst vzdálenost nultého a prvního maxima. V našem případě jsme zvolili nádobu se dnem ve tvaru obdélníku o rozměrech 10,185 × 15,4 × 9,8 cm. Na jednu z delších stěn nádoby jsme vedle sebe přilepili difrakční mřížky. Na protilehlou stěnu jsme přilepili milimetrový papír, který sloužil jako stínítko a zároveň usnadňoval odečítání vzdálenosti nultého a prvního maxima.



Obrázek 7.1: Nádoba uzpůsobená k realizaci experimentu. Vlevo vidíme difrakční mřížky. Vpravo vidíme stínítko z milimetrového papíru.

Laserové ukazovátko jsme uchytili do stojanu. Důležité je, aby paprsek laseru dopadal opravdu kolmo k povrchu difrakční mřížky. Tento fakt jsme pravděpodobně nevzali v potaz při prvním měření, jehož výsledky nebyly příliš přesné. Uchycení laseru můžete vidět na obrázku 7.2.



Obrázek 7.2: Sestavený experiment pro měření indexu lomu

Samotné měření probíhalo tak, že jsme nejdříve nastavili laser do takové polohy, aby paprsek dopadal kolmo na difrakční mřížku. Nechali jsme dopadat laserový paprsek na difrakční mřížku s 500 vrypy na milimetr, následně jsme z milimetrového papíru odečetli vzdálenost nultého a prvního maxima pro prázdnou nádobu a poté posunuli nádobu a nechali paprsek dopadat na difrakční mřížku s 1000 vrypy na milimetr a opět odečetli

vzdálenost nultého a prvního maxima. Poté jsme nalili do nádoby kapalinu a opět odečetli vzdálenost nultého a prvního maxima pro obě dvě difrakční mřížky. Poté jsme kapalinu z nádoby vylili, nádobu vyčistili a postup opakovali pro další kapalinu. Výsledky měření můžete vidět v tabulce 7.2.

Tabulka 7.2: Vzdálenost nultého a prvního maxima pro různé kapaliny

látka	Vzdálenost 0. a 1. maxima pro různé difrakční mřížky [cm]	
	500 vrypů/mm	1000 vrypů/mm
vzduch	3,4	8,4
voda	2,5	5,7
líh	2,5	5,6
rostlinný olej	2,3	5,1
glycerin	2,3	5,1
cukerný roztok	2,4	5,4

Podle vzorce (57) pak spočítáme index lomu pro jednotlivé kapaliny. Výsledky můžeme vidět v tabulce níže.

Tabulka 7.3: Hodnoty indexu lomu získané měřením metodou difrakce

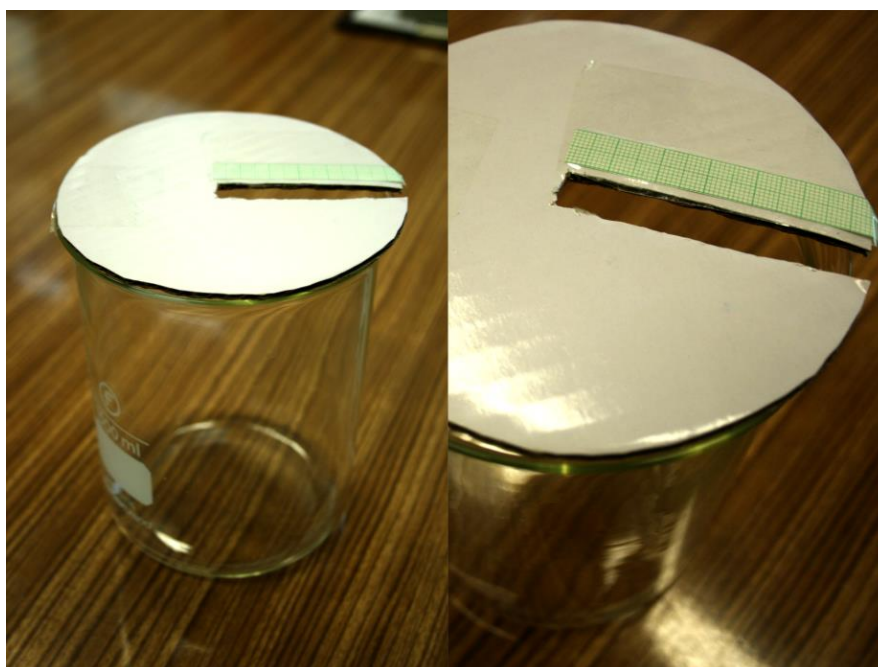
látka	Měření s mřížkou s 500 vropy/milimetr		Měření s mřížkou s 1000 vropy/milimetr	
	index lomu	odchylka	index lomu	odchylka
voda	1,33	0,03	1,30	0,01
líh	1,33	0,03	1,32	0,01
rostlinný olej	1,44	0,04	1,42	0,01
glycerin	1,44	0,04	1,42	0,01
cukerný roztok	1,38	0,03	1,36	0,01

### 7.1.2 Měření indexu lomu v kapalině využívající refrakci

Druhou metodou měření indexu lomu je opět velice jednoduchá metoda vyžadující minimum pomůcek a pouze základní znalosti paprskové optiky a Snellova zákona lomu. K provedení měření byly použity následující pomůcky:

- kádinka s kruhovým průměrem
- karton k vyrobení víka
- milimetrový papír
- stojan
- dvě rovné tyče různého průměru

Z kartonu vyrobíme víko kádinky. Ve víku uděláme otvor, do kterého budeme moci umístit tyč tak, abychom mohli s tyčí pohybovat od středu kádinky směrem k jejímu okraji. Podél otvoru ve víku umístíme měřidlo, kterým bude v našem případě milimetrový papír. Kádinku s víkem, které jsem použil ke svému měření, můžete vidět na obrázku 7.3.



Obrázek 7.3: Kádinka s víkem připravená k měření indexu lomu

Víko na jedné straně přichytíme páskou ke kádince, abychom ho mohli snadno vyklopit a nalít do kádinky kapalinu. Tyč uchytneme do stojanu, tak abychom s ní mohli snadno pohybovat ve svislém směru a tak jí nořit do kapaliny. Při samotném měření je pak tyč pevně uchycena ve stojanu, a posouváme celou kádinku. Pozorujeme tyč v kádince i její obraz pod hladinou. Nádobou posouváme tak, aby se tyč posouvala směrem od středu nádoby k jejímu okraji. Ve chvíli kdy pravý okraj tyče nad hladinou splývá s levým okrajem obrazu tyče pod hladinou (Obrázek 7.4), odečteme vzdálenost  $x$ .



Obrázek 7.4: Měření indexu lomu. Vlevo situace kdy je tyč uprostřed nádoby. Vpravo situace kdy posouváme tyč směrem k okraji nádoby a obraz tyče pod hladinou se zcela oddělí od tyče nad hladinou.

Před samotným měřením jsme nejprve změřili průměr kádinky a průměr obou tyčí. Průměr kádinky byl aritmetickým průměrem stanoven na  $D = (10,515 \pm 0,003) \text{ cm}$ . Průměr první tyče byl roven  $d = (0,60 \pm 0,03) \text{ cm}$ . Průměr druhé tyče byl roven  $d' = (0,80 \pm 0,03) \text{ cm}$ . Poté jsme změřili pětkrát vzdálenost  $x$  pro každou tyč, výsledky zprůměrovali a spočítali směrodatnou odchylku. Hodnoty  $D/2$ ,  $x$  a  $d$  jsme dosadili do vzorce a spočítali index lomu pro jednotlivé kapaliny. Výsledky měření jsou v tabulce.

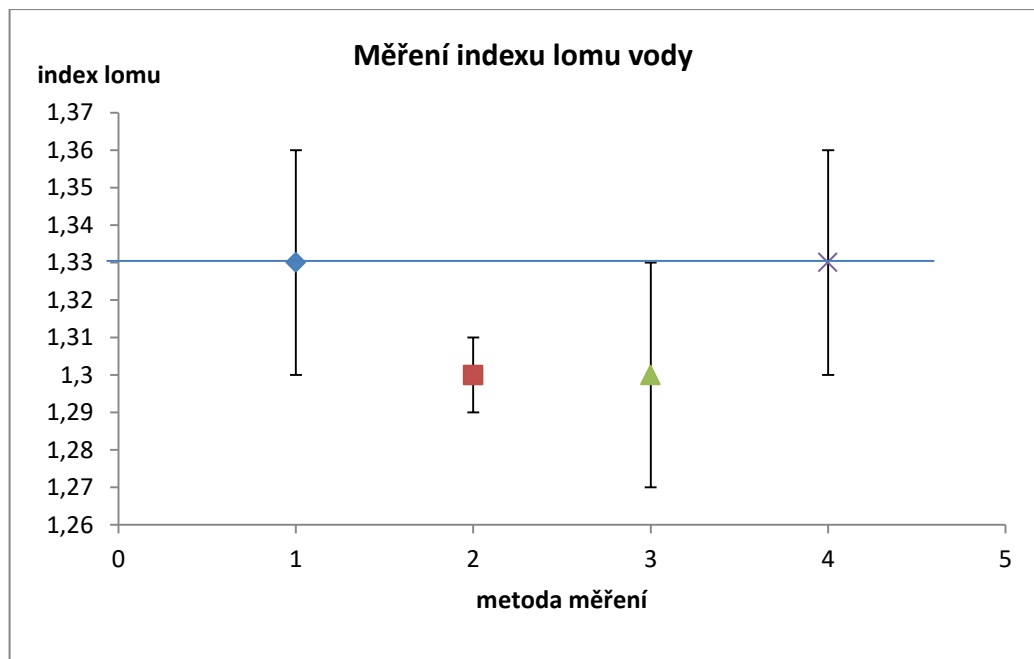
Tabulka 7.4: Hodnoty indexu lomu získané měřením metodou refrakce

látka	Měření s tyčí $d = 0,6 \text{ cm}$		Měření s tyčí $d = 0,8 \text{ cm}$	
	index lomu	odchylka	index lomu	odchylka
voda	1,30	0,03	1,33	0,03
líh	1,35	0,04	1,34	0,02
rostlinný olej	1,5	0,1	1,39	0,04
glycerin	1,44	0,06	1,46	0,03
cukerný roztok	1,36	0,03	1,38	0,07

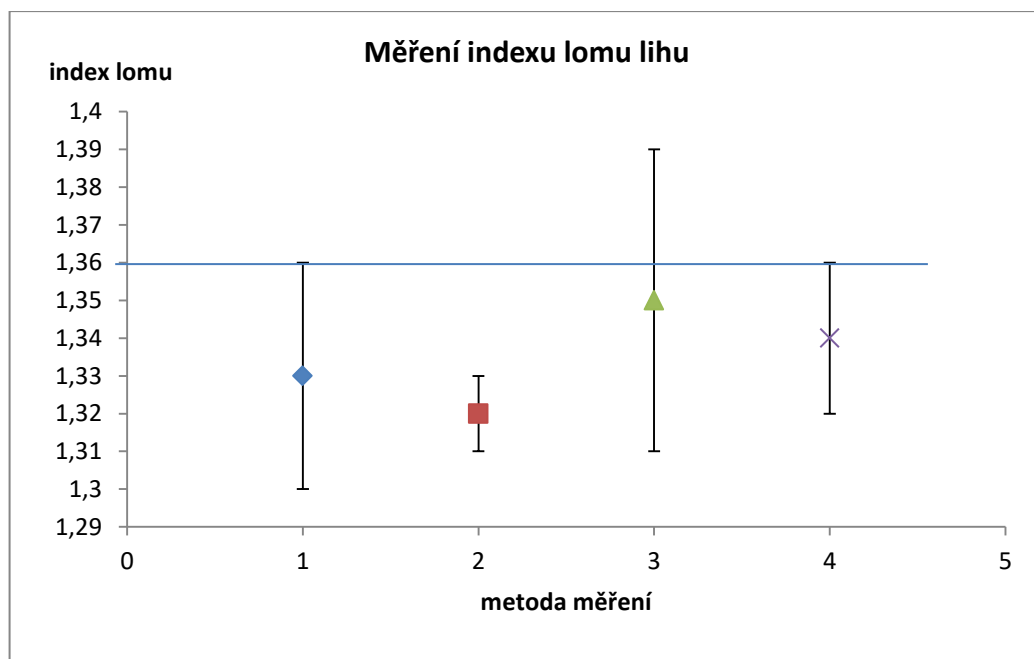
### 7.1.3 Výsledky měření indexu lomu v kapalině

Výsledky měření indexu lomu kapalin jsme zanesli do společného grafu pro všechna výše popsaná měření vždy pro každou kapalinu zvlášť. Vodorovnou čarou je v grafu vyznačena tabulková hodnota indexu lomu kapaliny. Na vodorovné ose jsou vynesena jednotlivá měření. Číslem 1 je označeno měření difrakční mřížkou s 500 vrypy na milimetr, číslem 2 měření difrakční mřížkou s 1000 vrypy na milimetr, číslem 3 měření refrakcí

s použitím tyče průměru 0,6 cm a číslem 4 měření refrakcí s použitím tyče průměru 0,8 cm. Na svislé ose je pak hodnota indexu lomu.

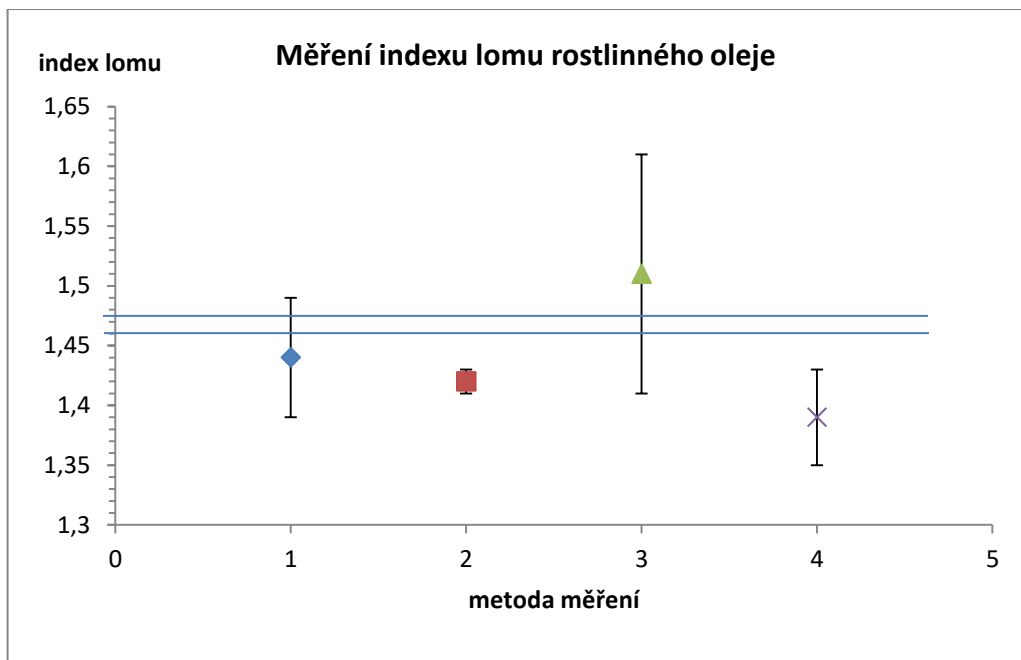


Graf 2: Graf výsledků měření indexu lomu vody

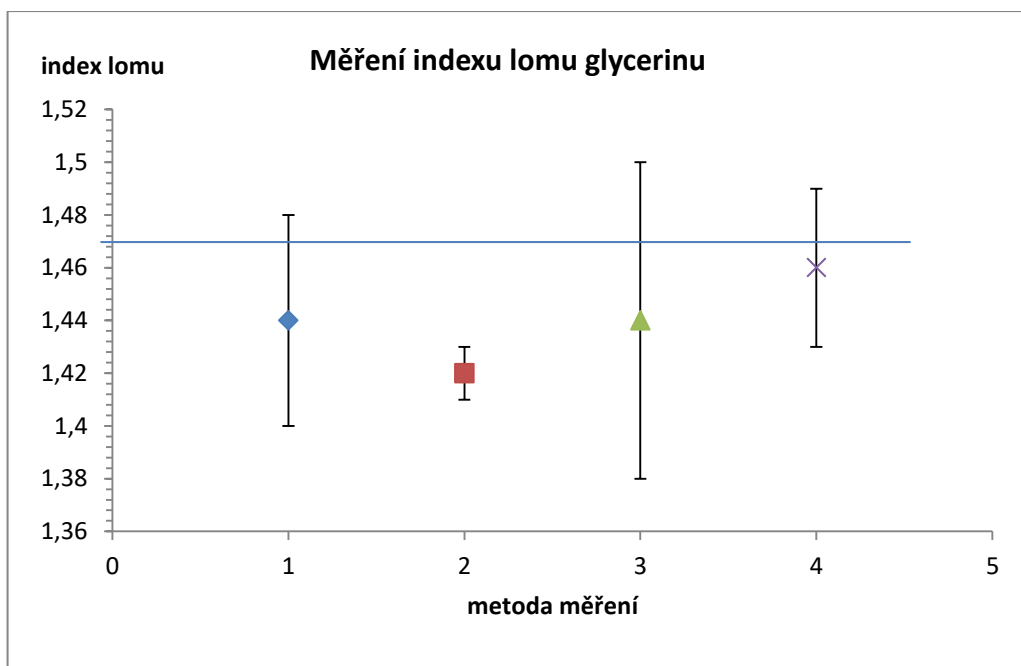


Graf 3: Graf výsledků měření indexu lomu lihu

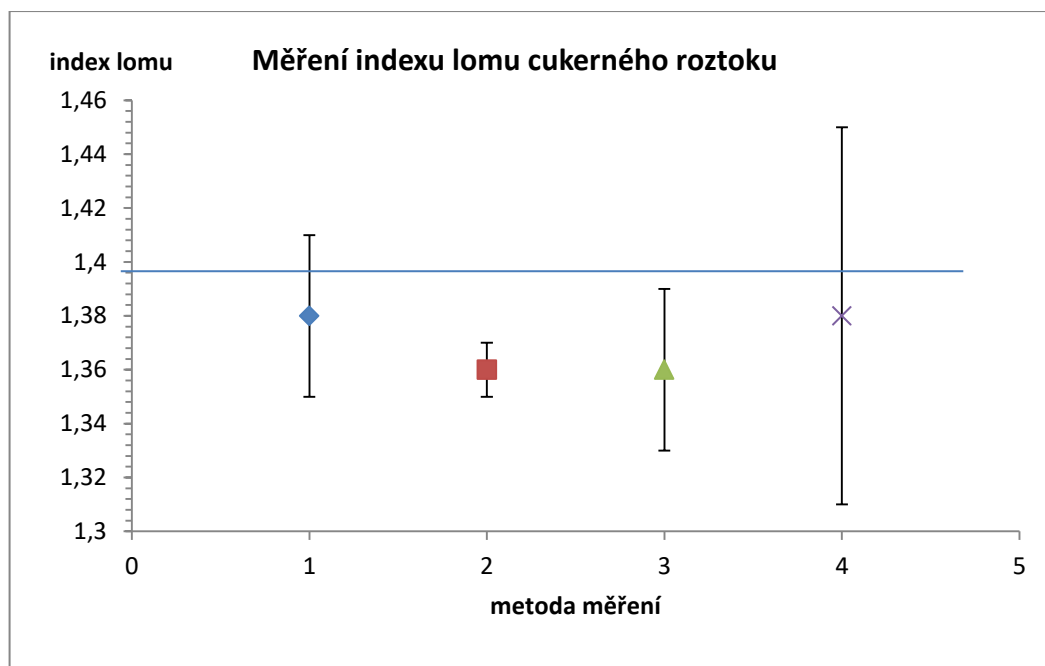




Graf 4: Graf výsledků měření indexu lomu rostlinného oleje



Graf 5: Graf výsledků měření indexu lomu glycerinu

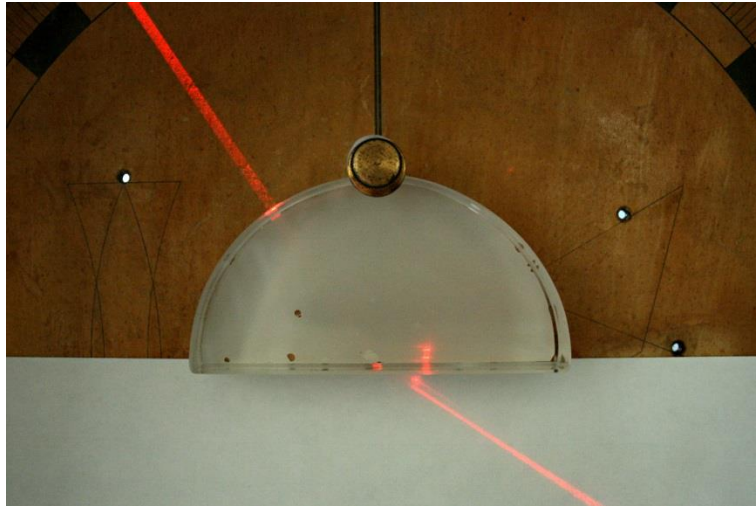


Graf 6: Graf výsledků měření indexu lomu cukerného roztoku

Pokud bychom chtěli nějakým způsobem interpretovat grafy výsledků měření (Graf 2–6), všimli bychom si, že většina naměřených hodnot indexů lomu vychází menší než je tabulková hodnota pro danou kapalinu. Nepřesnost měření může být zapříčiněna poměrně velkou citlivostí metod. Všechny metody jsou závislé na odečítání hodnot z milimetrového papíru a rozdíl 1 mm při odečítání může znamenat změnu několika setin v indexu lomu.

#### 7.1.4 Měření indexu lomu skla s využitím totálního odrazu

Jak už jsme popsali v kapitole 6.1.3, tuto metodu jsme zvolili kvůli příhodnému tvaru skleněného vzorku, který jsme měli k dispozici. Využili jsme pomůcky, kterou jsme následně použili i pro samotné měření Brewsterova úhlu. Skleněný půlkruh jsme přichytili šroubem k desce úhломěru tak, aby rovná strana byla zarovnaná s vodorovnou osou desky. Paprsek laseru jsme nastavili tak, aby procházel středem desky. Při změně úhlu paprsku tak paprsek stále dopadal na zakřivenou plochu skleněného vzorku kolmo. Na obrázku můžeme vidět, jak paprsek vstupuje do vzorku a na jeho rovné straně se láme a vychází z něho ven.



Obrázek 7.5: Sestavení experimentu pro měření indexu lomu skla

Postupně zvětšujeme úhel dopadu a pozorujeme paprsek, který opouští vzorek skla. Ve chvíli, kdy lomený paprsek splyne s rozhraním, tedy nastane totální odraz, odečteme na stupnici hodnotu úhlu dopadu. Tento postup jsme opakovali desetkrát a z naměřených hodnot určili průměrnou hodnotu indexu lomu. Aritmetický průměr kritického úhlu a jeho směrodatná odchylka vyšel:

$$\bar{\theta}_c = (42,0 \pm 0,3)^\circ. \quad (69)$$

Výsledná hodnota indexu lomu je poté rovna

$$n = (1,5 \pm 0,1). \quad (70)$$

## 7.2 Odraz polarizovaného světla pod Brewsterovým úhlem

Cílem tohoto pokusu je experimentálně ověřit hodnotu Brewsterova úhlu pro různé kapaliny a porovnat tuto hodnotu s hodnotou, kterou získáme dosazením indexu lomu kapalin do Brewsterova zákona. Brewsterův zákon jsme si odvodili v kapitole 1.3.2. Pro připomenutí zde uvedeme pouze jeho konečnou podobu, kterou budeme potřebovat pro tuto část práce.

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_1}{n_0}\right). \quad (71)$$

Za  $n_0$  budeme uvažovat index lomu vzduchu, který bude roven jedné. Za  $n_1$  budeme uvažovat index lomu dané kapaliny. Ten budeme brát jednak jako tabulkovou hodnotu a také použijeme výsledky z měření v kapitolách 7.1.1

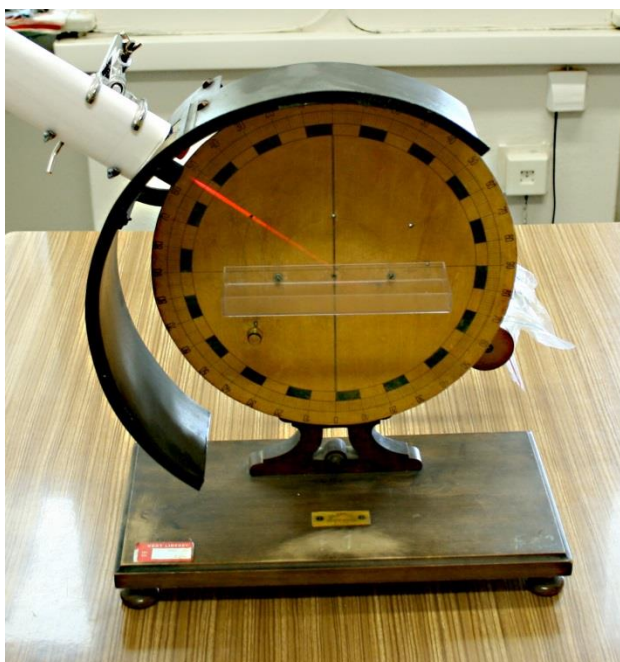
a 7.1.2. Pokud tedy tyto hodnoty indexu lomu dosadíme do Brewsterova zákona, dostaneme následující hodnoty Brewsterova úhlu.

Tabulka 7.5: Vypočítané hodnoty Brewsterova úhlu pro vybrané kapaliny

látka	Brewsterův úhel [°]			
	Měření s difrakční mřížkou		Měření využívající refrakci	
	500 vrypů	1000 vrypů	Tyč č. 1	Tyč č. 2
voda	53,03	52,49	52,5	53,08
líh	53,03	52,87	53,38	53,2
rostlinný olej	55,18	54,87	56,48	54,32
glycerin	55,18	54,87	55,14	55,5
cukerný roztok	54,08	53,64	53,71	54,1

### 7.2.1 Experimentální ověření Brewsterova úhlu

K experimentálnímu ověření Brewsterova úhlu pro jednotlivé kapaliny byl použit následující jednoduchý přístroj nazývaný také Hartlova deska.

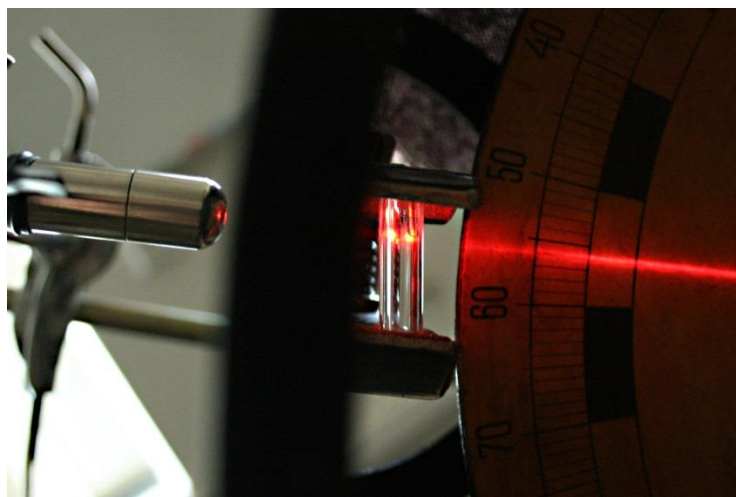


Obrázek 7.6: Sestavení experimentu pro zjišťování Brewsterova úhlu pro různé kapaliny

Základem byl přístroj určený k demonstraci zákona odrazu a zákona lomu. Skládá se z kruhové desky, která má po obvodu vyznačenou stupnici úhloměru. Středem desky prochází osa, ke které je připevněno, a kolem které se otáčí stínítko se štěrbinou, která slouží jako zdroj světla dopadající

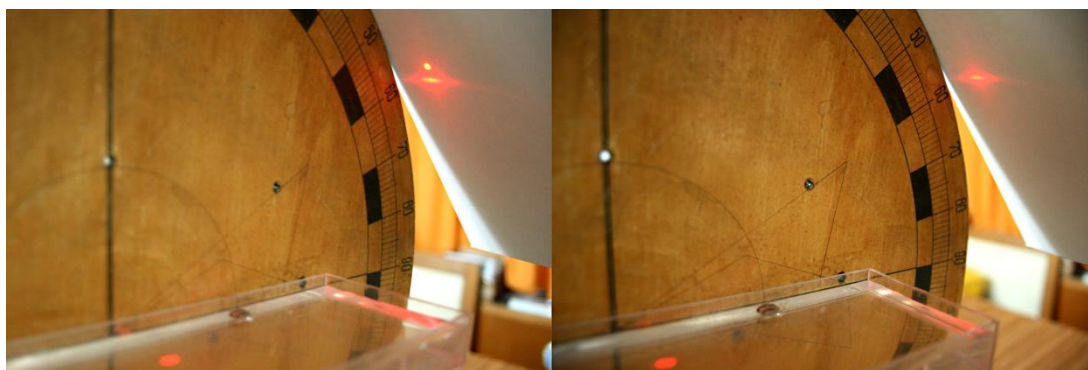
na desku úhlooměru. Ke stínítku jsme pomocí laboratorních držáků připevnili zdroj světla tak, aby jeho paprsek směřoval do středu kola úhlooměru. Tím bylo zajištěno, že jsme mohli jednoduše měnit úhel dopadu laserového paprsku. Uprostřed desky úhlooměru byla šrouby uchycena plastová vanička, která sloužila jako nádoba pro kapalinu. Do vaničky se nalévalo takové množství kapaliny, aby její hladina splývala s vodorovnou osou desky.

Jako zdroj světla jsme nejprve zvolili laserovou vodováhu z důvodu, aby byla stopa paprsku vidět na kole úhlooměru a bylo možné snadno odečítat úhel dopadu. Z důvodu slabé intenzity světla laserové vodováhy jsme však museli použít laserové ukazovátka. Rozšíření paprsku ukazovátka pak zajistila úzká skleněná trubička, která posloužila jako válcová čočka.



Obrázek 7.7: Uchycení válcové čočky rozšiřující laserový paprsek

Světlo z laserového ukazovátka dopadá na hladinu kapaliny, odráží se a na stínítku pozorujeme odraz paprsku. Pokud je paprsek polarizován ve směru kolmém na rovinu dopadu a dopadá na rozhraní pod Brewsterovým úhlem, odražený paprsek zcela vymizí. V našem experimentu bylo tedy nutné ještě zajistit, aby byl paprsek polarizovaný. Toho jsme dosáhli vložením polarizačního filtru těsně před laserové ukazovátka. Při měření jsme pak postupovali tak, že jsme nechali paprsek dopadat na hladinu kapaliny, a pozorovali jsme odraz na stínítku. Měnili jsme úhel dopadu paprsku a ve chvíli kdy stopa paprsku na stínítku zmizela, jsme odečetli hodnotu úhlu dopadu (Brewsterova úhlu).



Obrázek 7.8: Odraz světla na hladině kapaliny pod Brewsterovým úhlem. Vlevo situace, kdy na hladinu dopadá paprsek polarizovaný kolmo na rovinu dopadu, odráží se a na stínítku pozorujeme jasný bod. Vpravo situace, kdy na hladinu dopadá paprsek polarizovaný v rovině dopadu, paprsek se neodráží a na stínítku nic nepozorujeme. (Rozostřený bod na stínítku je odraz od spodní strany nádoby na kapalinu.)

Pro každou kapalinu jsme předcházející postup opakovali desetkrát a z naměřených hodnot jsme spočítali hodnotu Brewsterova úhlu.

Tabulka 7.6: Naměřené hodnoty Brewsterova úhlu pro vybrané kapaliny

látka	Brewsterův úhel [°]	Odchylka [°]
voda	52,7	0,5
líh	53,4	0,4
rostlinný olej	54,9	0,3
glycerin	55,1	0,3
cukerný roztok	53,9	0,3

Měření Brewsterova úhlu pro sklo probíhalo podobně jako pro kapaliny. Místo vaničky s kapalinou jsme na desku připevnili půlkruhový vzorek skla tak, aby jeho rovná strana byla zarovnaná s vodorovnou osou desky úhломěru. Nechali jsme na vzorek dopadat paprsek laseru a pozorovali jsme odražené světlo.



Obrázek 7.9: Sestavení experimentu pro určení Brewsterova úhlu pro sklo

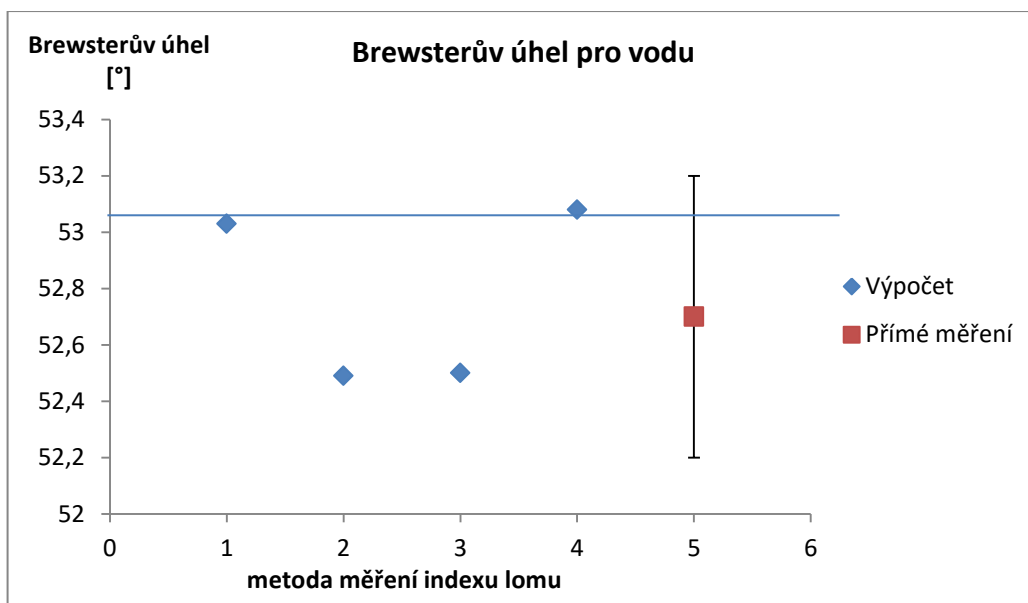
Před laserové ukazovátko jsme opět vložili polarizační filtr. Postupně měníme úhel dopadu paprsku a pozorujeme stopu odraženého paprsku na stínítku. Ve chvíli kdy se stopa ztratí, odečteme na desce úhloměru úhel dopadu, který se rovná Brewsterovu úhlu. Hodnota Brewsterova úhlu byla stanovena na

$$\theta_B = (56,0 \pm 0,4)^\circ. \quad (72)$$

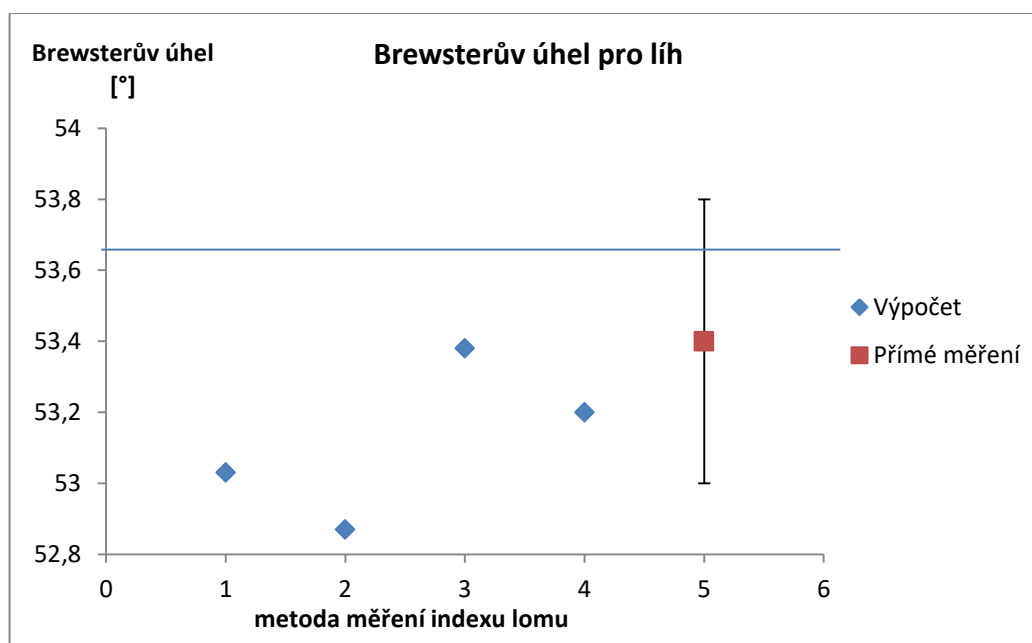
### 7.2.2 Porovnání hodnot Brewsterova úhlu získaných výpočtem a experimentálním měřením

V grafech 7–11 můžeme vidět srovnání hodnot Brewsterova úhlu pro jednotlivé kapaliny získaných různými metodami. Modrými body jsou označeny hodnoty Brewsterova úhlu, které jsme získali výpočtem z indexu lomu jednotlivých kapalin. Každá hodnota odpovídá jednomu, námi provedenému měření indexu lomu různou metodou, podobně, jako je to znázorněno na grafech v kapitole 7.1.3. Chyby hodnot Brewsterova úhlu získaného výpočtem byly natolik malé, že nemělo smysl zobrazovat v grafu chybové úsečky. Červený bod pak znázorňuje hodnotu Brewsterova úhlu, kterou jsme zjišťovali experimentálně přímým měření metodou popsanou v kapitole 7.2.1. Vodorovná čára v grafu označuje hodnotu Brewsterova úhlu získanou dosazením tabulkové hodnoty indexu lomu dané kapaliny do vzorce:

$$\theta_B = \arctan(n). \quad (73)$$

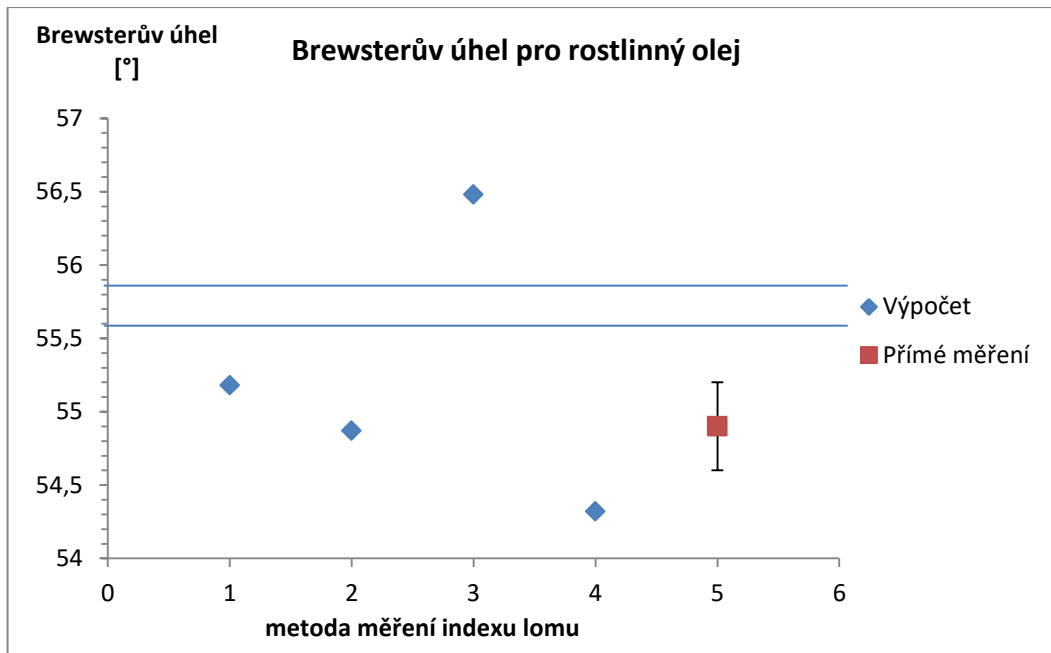


Graf 7: Hodnoty Brewsterova úhlu na rozhraní vzduchu a vody získané různými metodami

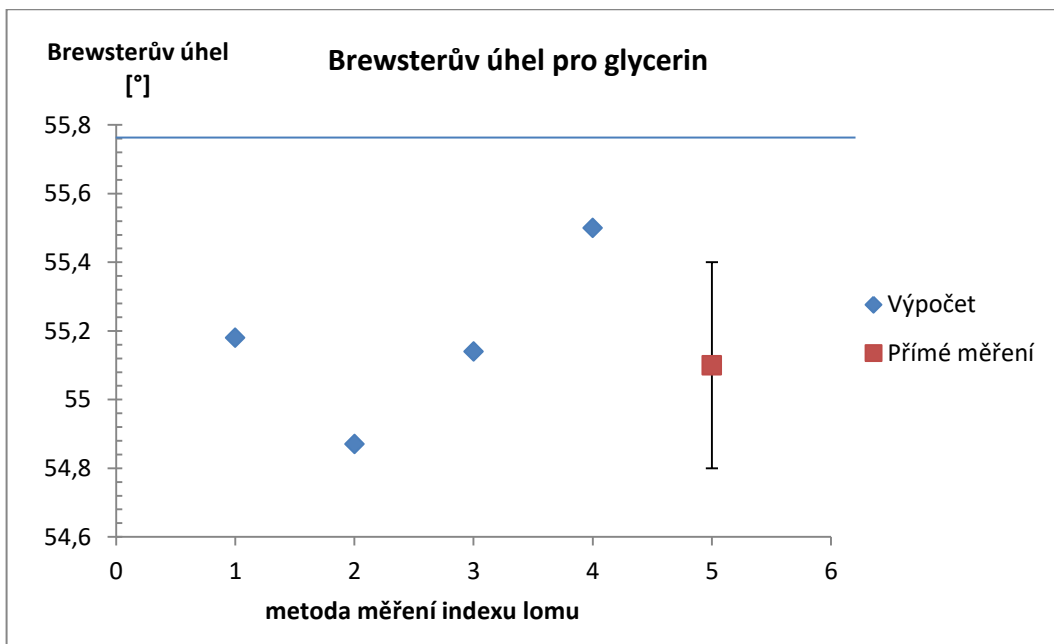


Graf 8: Hodnoty Brewsterova úhlu na rozhraní vzduchu a lihu získané různými metodami

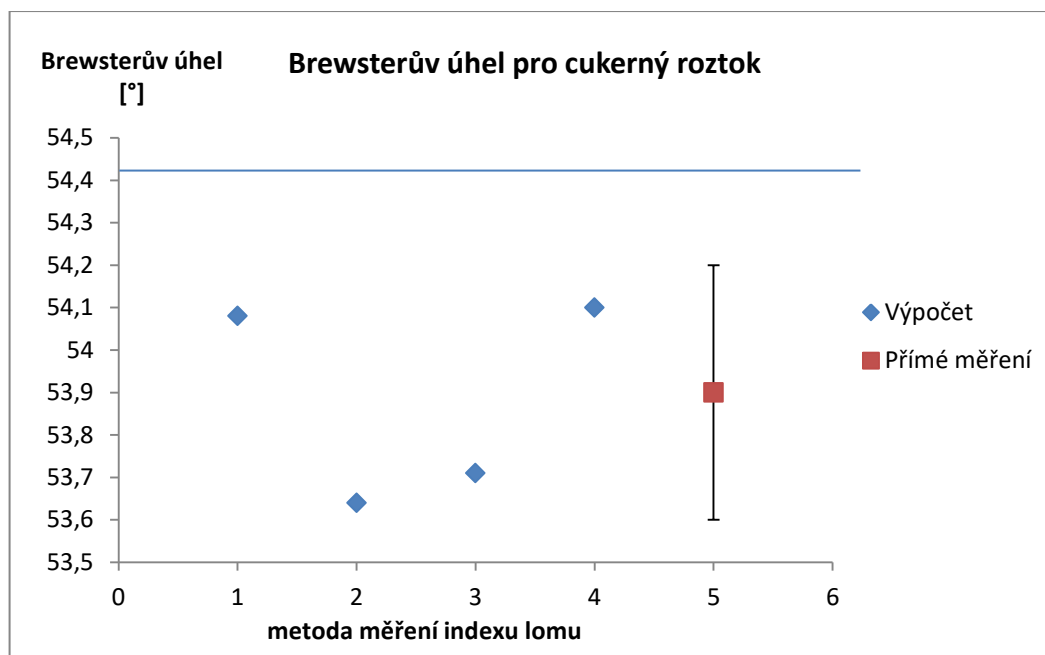




Graf 9: Hodnoty Brewsterova úhlu na rozhraní vzduchu a rostlinného oleje získané různými metodami



Graf 10: Hodnoty Brewsterova úhlu na rozhraní vzduchu a glycerinu získané různými metodami



Graf 11: Hodnoty Brewsterova úhlu na rozhraní vzduchu a cukerného roztoku získané různými metodami

V kapitole 7.1.3 jsme poukazovali na to, že námi naměřené hodnoty indexu lomu všech kapalin jsou ve většině případů nižší než tabulkové hodnoty. Tomu odpovídají i hodnoty Brewsterova úhlu, které jsme získali výpočtem podle vzorce (73). Zajímavé je, že hodnoty Brewsterova úhlu získané experimentálně přímým měřením se často velice blíží hodnotám získaným výpočtem, podle námi změřených hodnot indexu lomu kapalin, spíše než hodnotám získaným výpočtem podle tabulkových hodnot indexu lomu kapalin.

Co se týká skla, Brewsterův úhel vypočítaný pomocí indexu lomu, který jsme zjistili metodou popsanou v kapitole 7.1.4 je roven

$$\theta_B = 56,23^\circ, \quad (74)$$

což je hodnota, která spadá do intervalu, který byl určen experimentálně, a sice

$$\theta_B = (56,0 \pm 0,4)^\circ. \quad (75)$$

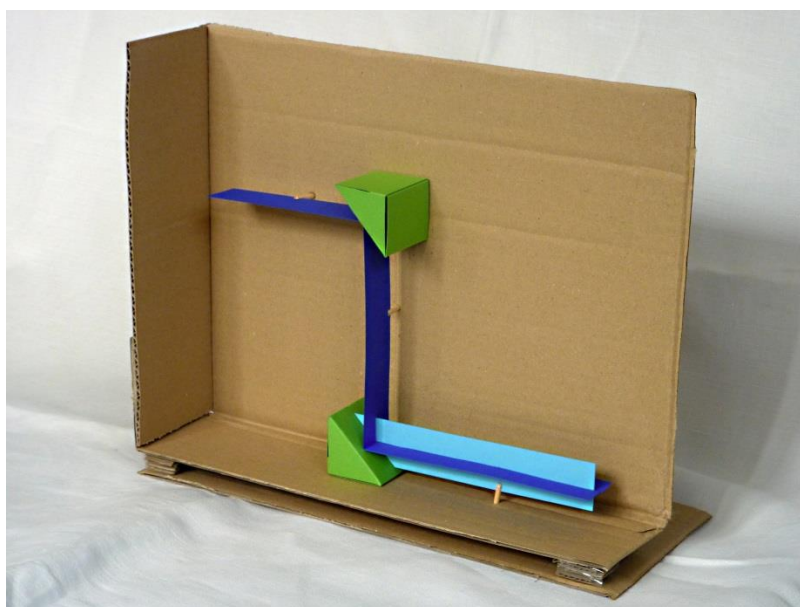
### 7.3 Model vzniku polarizovaného světla odrazem na rozhraní

Vznik lineárně polarizovaného světla odrazem nemusí být vždy zřejmý, pokud se snažíme tento jev ilustrovat například schématem na papíře.

Stejně tak dopad lineárně polarizovaného světla na rozhraní pod Brewsterovým úhlem, a odraz takového paprsku, v závislosti na orientaci roviny polarizace a roviny dopadu. Z tohoto důvodu jsme se rozhodli popsat a realizovat výrobu pomůcky, která tento jev demonstruje.

### 7.3.1 Odraz na dvou navzájem rovnoběžných rovinách

Při návrhu první pomůcky jsme vycházeli z pokusu popsaném v kapitole 1.3.2. Paprsek nepolarizovaného světla necháme dopadat na dvě desky, kde jedna slouží jako polarizátor a druhá jako analyzátor. V případě, že jsou roviny dopadu rovnoběžné, odráží se paprsek od obou desek, přičemž na první desce dojde k lineární polarizaci paprsku v rovině kolmé s rovinou dopadu. Demonstrační pomůcku můžete vidět na obrázku níže.



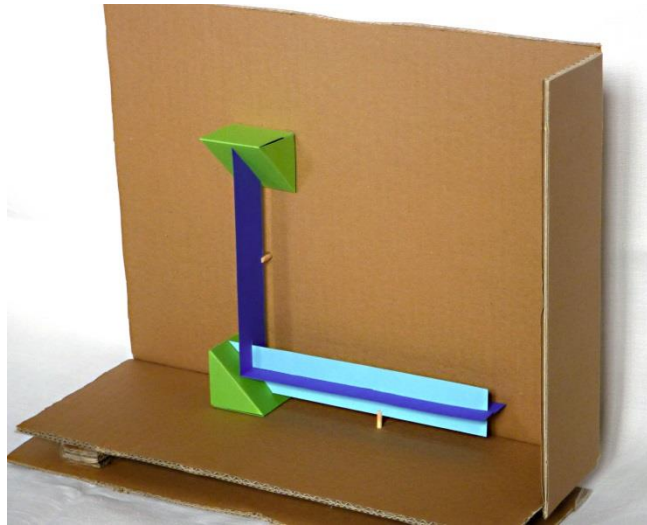
Obrázek 7.10: Model polarizace světla odrazem

Základem pomůcky jsou dva klíny, které znázorňují odrazné plochy a roviny, které znázorňují dopadající paprsek světla a zároveň rovinu kmitů vektoru intenzity elektrického pole.

### 7.3.2 Odraz na dvou navzájem kolmých rovinách

Druhá varianta předchozí pomůcky je upravená tak, že paprsek světla dopadá na dvě desky, jejichž roviny dopadu jsou navzájem kolmé. Při prvním odrazu paprsku tedy dochází k jeho polarizaci. Když ale paprsek dopadá na druhou desku, je jeho vektor elektrické intenzity polarizován

v rovině dopadu. Z tohoto důvodu pak nepozorujeme odražený paprsek. Demonstrační pomůcku můžeme vidět na obrázku níže.



Obrázek 7.11: Model polarizace světla odrazem II

#### 7.4 Neviditelný monitor

V této kapitole představíme výrobu pomůcky, kterou jsme nazvali neviditelný monitor. Jedná se o efektní demonstrační pomůcku, která přispívá k pochopení problematiky polarizace světla a polarizačních filtrů. Zároveň tato pomůcka demonstruje, kde se s polarizovaným světlem každodenně setkáváme. K výrobě této pomůcky budeme potřebovat:

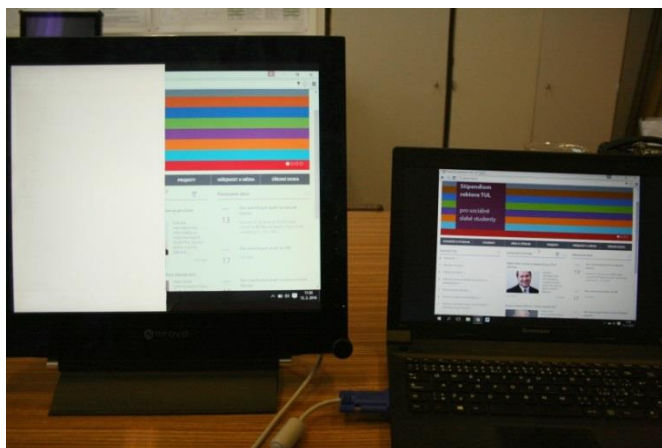
- starý LCD monitor
- ostrý nůž
- nářadí

Základní součástí experimentu je LCD monitor. Posloužit nám může například jakýkoli starý, funkční monitor k počítači.

Postup výroby pomůcky je následující: Nejprve musíme rozmontovat kryt monitoru a odstranit přední sklo. Zde velmi záleží na konkrétním typu monitoru, jakou má konstrukci a jak je přední strana monitoru chráněna. V našem případě byl monitor opatřen velmi robustním krytem, který se skládal ze dvou hlavních částí. Zadní část, která chránila monitor, a kde byla umístěna elektronika a vstupy pro konektory. Přední část se skládala z kovového rámu a tlustého skla, které chránilo samotný monitor.

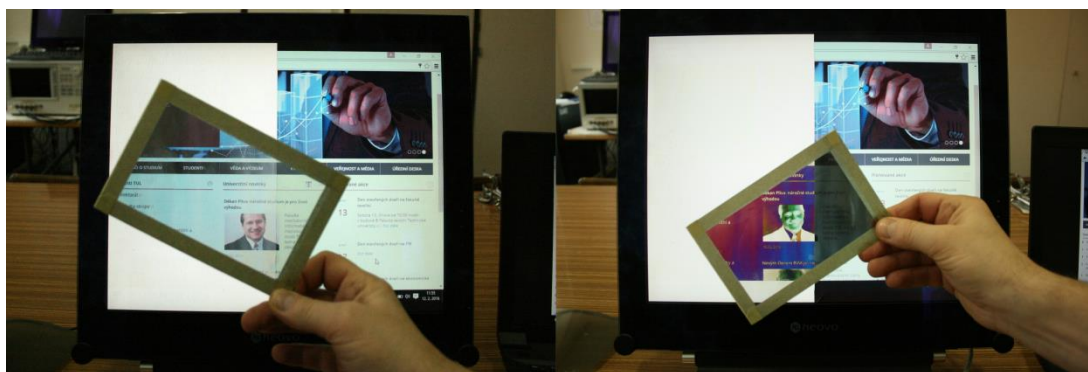
Po odmontování předního krytu se dostaneme k vrstvě polarizačního filtru. Pokud bychom měli pochybnosti, zda jde o polarizační filtr, můžeme zkusit nožem odříznout malý kousek filtru v rohu monitoru. Tento kousek přiložíme k jinému polarizačnímu filtru a natáčením zjistíme, zda jde skutečně o polarizační filtr. Poté můžeme pomocí nože opatrně odřezávat filtr. V našem případě jsem se rozhodl pro lepší demonstrační účely odstranit pouze polovinu filtru a na druhé polovině monitoru filtr nechat. Nožem nařízneme filtr po obvodu monitoru a opatrně sloupáváme. Nemusíme se bát, že bychom monitor poškodili. Pod vrstvou polarizačního filtru je většinou další skleněná vrstva. Opět záleží na konkrétním monitoru, jak snadno se nám podaří filtr odstranit, případně zda po sloupnutí filtru zůstanou na monitoru zbytky lepidla.

V dalším kroku již stačí opět smontovat monitor a jeho kryt. Funkčnost monitoru si ověříme jeho zapojením. Po zapojení monitoru bychom v místě, kde jsme odstranili polarizační filtr, měli pozorovat bílou obrazovku.



Obrázek 7.12: Monitor připojený k notebooku. Z levé poloviny monitoru byl odstraněn polarizační filtr

Vliv polarizačního filtru na výsledný obraz si můžeme demonstrovat polarizačním filtrem, který přikládáme k monitoru. Polarizační filtr můžeme různě natáčet a pozorovat, jak se mění obraz.



Obrázek 7.13: Přikládání polarizačního filtru k monitoru a jeho natáčení

Na obrázku vlevo můžeme vidět, že barvy monitoru po přiložení filtru jsou stejné jako na pravé straně monitoru. Můžeme tedy usoudit, že polarizační filtr v monitoru i filtr přiložený mají stejnou orientaci. Na obrázku vpravo vidíme, že obraz po přiložení filtru vypadá jako negativ. To je způsobeno tím, že přiložený filtr je oproti filtru v monitoru natočený přibližně o  $90^\circ$ . Přiložený filtr tak propouští polarizované světlo, které filtr v monitoru zachytí. Jinými slovy pixely, které by měly být osvětlené, jsou nyní tmavé a pixely, které by měly zůstat tmavé, nyní světlo prochází a tím pádem je vidíme jako světlé.

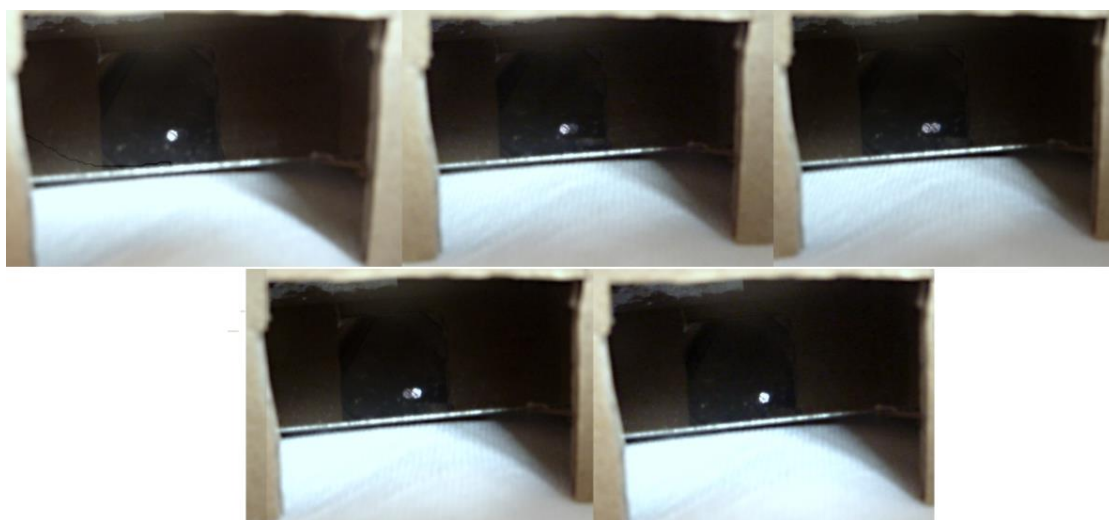
## 7.5 Sluneční kompas

Jednoduchý sluneční kompas, tak jak je popsán v kapitole 6.5 si můžeme vyrobit i my sami nebo žáci ve škole. Inspiraci pro naši demonstrační pomůcku jsme čerpali opět v článku [60]. Jednoduchý sluneční kompas se skládá z pouzdra, na jehož vrchní straně je odnímatelné víko s malým otvorem, kterým prochází sluneční světlo. Pod tímto víkem je prostor, kam se umísťuje krystal islandského vápence. Ideální by bylo připevnit krystal do kompasu pevně tak, aby jeho poloha byla stálá. Ve spodní straně pouzdra je zrcátko, které je natočené pod úhlem přibližně  $45^\circ$  a otvor, kterým pozorujeme odraz krystalu v zrcátku. V zrcátku pozorujeme světlo procházející otvorem v horní části kompasu, které prochází krystalem. Díky dvojlomu pak pozorujeme dva obrazy úzkého otvoru.



Obrázek 7.14: Sluneční kompas

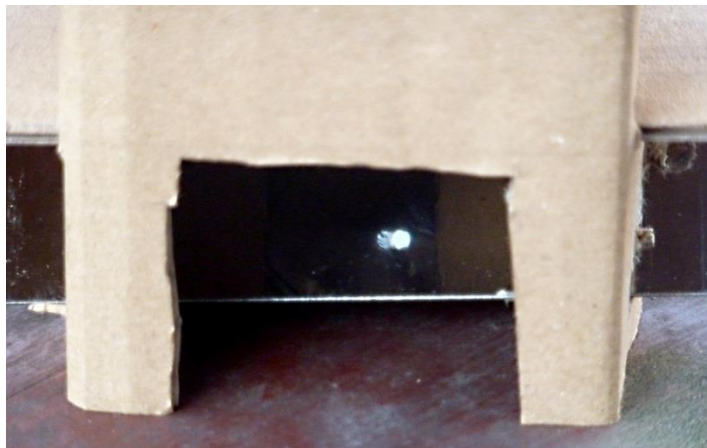
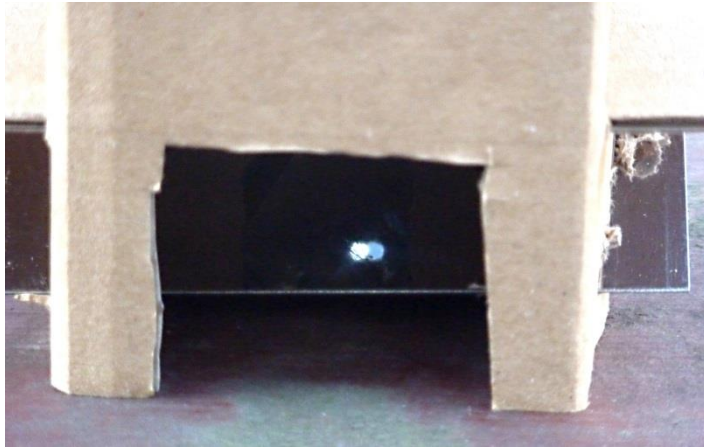
Polarizované sluneční světlo pak můžeme simulovat například světlem z mobilního telefonu a pozorovat následující obraz:



Obrázek 7.15: Pozorování lineárně polarizovaného světla skrz sluneční kompas

Na obrázku 7.15 je patrné jak se jas obou obrazů (řádný a mimořádný paprsek) způsobených dvojlomem mění v závislosti na rovině polarizace světla. (Na levém horním obrázku vidíme nejjasněji levou tečku, vpravo nahore mají obě tečky přibližně stejný jas a vpravo dole je nejjasnější pravá tečka.)

Následující fotografie jsou pak pořízeny za jasného podvečera těsně po západu Slunce.



Obrázek 7.16: Sluneční kompas na denním světle



## Závěr

Hlavním cílem této práce bylo podat přehled problematiky polarizace světla pro úroveň SŠ, zpracovat návrhy a realizovat demonstrační experimenty vztahující se k polarizaci světla.

Úvodní část práce se zaměřuje na popsání základních fyzikálních principů polarizace elektromagnetické vlny, vznik polarizovaného světla, změny polarizovaného i nepolarizovaného světla při průchodu látkou (dvojlom, fotoelasticita, stáčení roviny polarizace a polarizační filtry) a použití polarizace světla v technické praxi a běžném životě (polarizační brýle, filtry pro fotoaparáty, různé druhy LCD monitorů a 3D projekce).

V práci je nakonec popsáno celkem osm experimentů nebo demonstračních pomůcek, které přímo ilustrují jev polarizace světla nebo slouží k získání vlastnosti určité látky (index lomu). Šlo o experimenty k určení indexu lomu kapaliny pomocí dvou různých metod, měření indexu lomu skla s využitím totálního odrazu a následné experimentální určení Brewsterova úhlu pro různé kapaliny a sklo. Pomůcka nazvaná neviditelný monitor přibližuje konstrukci LCD monitorů a demonstruje význam polarizačních filtrů v těchto typech displejů. Jednoduchý prototyp slunečního kompasu využívá dvojlomu světla v islandském vápenci a ukazuje chování polarizovaného světla při průchodu tímto krystalem a využití tohoto fenoménu pro určení polohy Slunce. Trojrozměrný model vzniku polarizace světla odrazem pak názorně ukazuje, v jaké rovině kmitá vektor intenzity elektrického pole po odrazu pod Brewsterovým úhlem.

Velká část praktické části práce je věnována právě měření indexu lomu a následnému měření Brewsterova úhlu pro vybrané kapaliny (voda, líh, glycerin, rostlinný olej, 40% roztok cukru) a sklo. Tyto jednoduché experimenty by mohly být základem pro zpracování laboratorního měření, které by mohlo být realizováno ve výuce na střední škole, což však nebylo cílem této práce.

## Literatura

[1] BASS, Michael., aj. Handbook of Optics, Volume 1. 1st Edition. McGraw-Hill, Inc., 1995. ISBN: 0-07-047740-7.

[2] LEPIL, Oldřich. Fyzika pro gymnázia: optika. 3., přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2002. ISBN 978-80-7196-237-3.

[3] FUKA, Josef a HAVELKA Bedřich. Optika a atomová fyzika. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961. Učebnice pro vysoké školy (Státní pedagogické nakladatelství).

[4] Faraday Cage. *The National High Magnetic Field Laboratory* [online]. Naposledy upraveno 7. listopadu 2014. [cit. 1. 10. 2016]. Obrázek ve formátu GIF. Dostupné z:

<https://nationalmaglab.org/about/around-the-lab/what-the/faraday-cage>

[5] Left Hand Elliptical Polarization (LHEP) Animation of Electromagnetic Wave. *Youtube* [online]. 12. 3. 2016. [cit. 1. 10. 2016]. Dostupné z:

<https://www.youtube.com/watch?v=KZz25bmTWXo>

[6] Right Hand Circular Polarization (RHCP) Animation. *Youtube* [online]. 12. 3. 2010. [cit. 1. 10. 2016]. Dostupné z:

<https://www.youtube.com/watch?v=jY9hnDzA6Ps>

[7] Linear polarization animation. *Youtube* [online]. 12. 3. 2010. [cit. 1. 10. 2016]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=oDwqUgDFe94>

[8] Fresnel equations. *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. [cit. 1. 10. 2016]. Obrázek ve formátu svg. Dostupný pod licencí Creative Commons na www: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fresnel\\_reflection.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fresnel_reflection.svg)

[9] Augustin-Jean Fresnel. *Encyclopedia Britannica* [online]. [cit. 1. 10. 2016]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/biography/Augustin-Jean-Fresnel>

[10] Augustin-Jean Fresnel. *Encyclopedia Britannica* [online]. [cit. 1. 10. 2016]. Obrázek ve formátu jpg. Dostupné z:

<https://www.britannica.com/biography/Augustin-Jean-Fresnel>

- [11] Étienne-Louis Malus. *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. [cit. 28. 10. 2016]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/%C3%89tienne-Louis\\_Malus](https://en.wikipedia.org/wiki/%C3%89tienne-Louis_Malus)
- [12] Étienne-Louis Malus. *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. [cit. 28. 10. 2016]. Obrázek ve formátu jpg. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/%C3%89tienne-Louis\\_Malus](https://en.wikipedia.org/wiki/%C3%89tienne-Louis_Malus)
- [13] Sir David Brewster. *Encyclopedia Britannica* [online]. [cit. 1. 10. 2016]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/biography/David-Brewster>
- [14] Sir David Brewster. *Encyclopedia Britannica* [online]. [cit. 1. 10. 2016]. Obrázek ve formátu jpg. Dostupné z: <https://www.britannica.com/biography/David-Brewster>
- [15] MELLISH, Bob. [commons.wikimedia.org/wiki/File:Brewster-polarizer.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brewster-polarizer.svg) [online]. 21. 4. 2006. [cit. 1. 10. 2016]. Dostupný pod licencií Creative Commons na www: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brewster-polarizer.svg>
- [16] Light and color – optical birefringence. *Olympus microscopy resource center* [online]. © 2012 Olympus America Inc. [cit. 30. 9. 2016]. Dostupné z: <http://www.olympusmicro.com/primer/lightandcolor/birefringence.html>
- [17] MALÝ, Petr. *Optika*. Praha: Karolinum, 2008. ISBN 978-80-246-1342-0.
- [18] Calcite. *mindat.org* [online]. Copyright © mindat.org and the Hudson Institute of Mineralogy 1993-2016. [cit. 1. 10. 2016]. Dostupné z: <http://www.mindat.org/min-859.html>
- [19] Aragonite. *mindat.org* [online]. Copyright © mindat.org and the Hudson Institute of Mineralogy 1993-2016. [cit. 1. 10. 2016]. Dostupné z: <http://www.mindat.org/min-307.html#>
- [20] *Biaxial minerals*. University of Washington [online]. © 2016 University of Washington. [cit. 1. 10. 2016]. Dostupné z: <http://courses.washington.edu/ess439/Lab%204%20lecture%20slides.pdf>

- [21] Aragonite (CaCO<sub>3</sub>). *Imperial College Rock Library* [online]. © Copyright 2013 Imperial College London. [cit. 1. 10. 2016]. Obrázek ve formátu jpg. Dostupné z: [https://www.imperial.ac.uk/earthscienceandengineering/rocklibrary/view\\_minrecord.php?mID=116&showimages=1](https://www.imperial.ac.uk/earthscienceandengineering/rocklibrary/view_minrecord.php?mID=116&showimages=1)
- [22] WANG, Wei-Chih. Photoelasticity. In: <http://depts.washington.edu/> [online]. [cit. 30. 9. 2016]. Dostupné z: <http://depts.washington.edu/mictech/optics/me557/photoelasticity.pdf>
- [23] KREPL, Ondřej. KLUSÁK, Jan. Polarizované světlo a fotoelasticita [online]. Ústav fyziky materiálů AV ČR, v. v. i. Dostupné z: <http://docplayer.cz/11093192-Polarizovane-svetlo-a-fotoelasticita.html>
- [24] Optical activity. *Kshitij education india* [online]. © 2011-2016 Kshitij Education India Private Limited. [cit. 1. 10. 2016]. Obrázek ve formátu jpg. Dostupné z: <http://www.kshitij-iitjee.com/Optical-Activity>
- [25] Polarizer Selection Guide. *Edmund Optics* [online]. Copyright 2016, Edmund Optics Inc. [cit. 30. 9. 2016]. Dostupné z: <http://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/optics/polarizer-selection-guide/>
- [26] NAVE, Carl. Polarization by Absorption: Dichroism. *Hyperphysics* [online]. [cit. 15. 11. 2016]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/polabs.html>
- [27] Polarization by absorption. *HyperPhysics* [online]. [cit. 1. 10. 2016]. Obrázek ve formátu gif. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/polabs.html>
- [28] History. *Polaroid* [online]. [cit. 1. 10. 2016]. Obrázek ve formátu jpg. Dostupný z: <http://www.polaroid.com/history>
- [29] Edwin H. Land. *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. [cit. 28. 10. 2016]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Edwin\\_H.\\_Land](https://en.wikipedia.org/wiki/Edwin_H._Land)
- [30] Edwin Land Biography. *biography.com* [online]. [cit. 9. 11. 2016]. Dostupné z: <http://www.biography.com/people/edwin-land-9372429>

- [31] Polaroid (polarizer). *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. [cit. 28. 10. 2016]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Polaroid\\_\(polarizer\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Polaroid_(polarizer))
- [32] TICHÝ, Pavel. Polarizační sluneční brýle. *bryle.cz* [online]. [cit. 13. 11. 2016]. Dostupné z: <http://www.bryle.cz/slunecni-bryle/polarizace/polarizovane-slunecni-bryle.html>
- [33] Survival – Declination Table. *Astro Navigation Demystified* [online]. [cit. 9. 11. 2016]. Dostupné z: <https://astronavigationdemystified.com/survival-declination-table/>
- [34] HAUßMANN, Alexander. Rainbows in nature: recent advances in observation and theory. *European Journal of Physics*. 2016. Volume 37. Number 6. Číslo článku 063001 (30 stran).
- [35] Rainbow and Secondary Rainbow in polarizing filter (with protractor scale). *Youtube* [online]. 25. 12. 2012. [cit. 16. 11. 2016]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Efszf7tc5JU>
- [36] Polarizační filtry: Lineární, nebo cirkulární? *Paladix foto-on-line* [online]. [cit. 30. 9. 2016]. Dostupné z: <http://www.paladix.cz/clanky/polarizacni-filtry-linearni-nebo-cirkularni.html>
- [37] Camera polarizing filters. *Cambridge in colour* [online]. Copyright © 2016 Cambridge in Colour. [cit. 1. 10. 2016]. Obrázek ve formátu jpg. Dostupné z: <http://cdn.cambridgeincolour.com/tutorials/polarizing-filters.htm>
- [38] Kapalné krystaly. *Encyklopedie fyziky* [online]. Copyright © 2006 - 2016, Encyklopedie podléhá licenci CC, Jaroslav Reichl, Martin Všeticka. [cit. 1. 10. 2016]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/646-kapalne-krystaly>
- [39] Displej z kapalných krystalů (LCD). *Encyklopedie fyziky* [online]. Copyright © 2006 - 2016, Encyklopedie podléhá licenci CC, Jaroslav Reichl, Martin Všeticka. [cit. 1. 10. 2016]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/523-displej-z-kapalnych-krystalu-lcd>

- [40] Displej z kapalných krystalů (LCD). *Encyklopedie fyziky* [online]. Copyright © 2006 - 2016, Encyklopedie podléhá licenci CC, Jaroslav Reichl, Martin Všetická. [cit. 1. 10. 2016]. Obrázek ve formátu jpg. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/523-displej-z-kapalnych-krystalu-lcd>
- [41] DUNMUR, David. WALTON, Harry. Liquid crystal display (LCD). *Encyclopedia Britannica* [online]. [cit. 1. 10. 2016]. Dostupné z: <http://www.britannica.com/technology/liquid-crystal-display>
- [42] Thin-film transistor. *Encyclopedia Britannica* [online]. ©2016 Encyclopædia Britannica, Inc. [cit. 1. 10. 2016]. Obrázek ve formátu jpg. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/thin-film-transistor>
- [43] Princip trojrozměrného vidění. *Encyklopedie fyziky* [online]. Copyright © 2006 - 2016, Encyklopedie podléhá licenci CC, Jaroslav Reichl, Martin Všetická. [cit. 16. 11. 2016]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1536-princip-trojrozmerneho-videni>
- [44] 3D kina. *Encyklopedie fyziky* [online]. Copyright © 2006 - 2016, Encyklopedie podléhá licenci CC, Jaroslav Reichl, Martin Všetická. [cit. 16. 11. 2016]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/469-3d-kina>
- [45] How Does 3D Work. *3D Action Video Inc.* [online]. [cit. 1. 10. 2016]. Obrázek ve formátu jpg. Dostupné z: [https://equinoxhousingsentertainment.com/How\\_Does\\_3D\\_Work.html](https://equinoxhousingsentertainment.com/How_Does_3D_Work.html)
- [46] Anaglyf. *Stereograf.eu* [online]. [cit. 1. 10. 2016]. Dostupné z: <http://stereofotograf.eu/navody/anaglyf/>
- [47] 3D Glasses: How Many Kinds are There? *Snapily Pro* [online]. 20. 12. 2012, Copyright © 2016 Snapily.com. [cit. 1. 10. 2016]. Dostupné z: <http://www.snapily.com/blog/3d-glasses-varieties-and-history/>
- [48] 3D film. *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. 29. 9. 2016. [cit. 1. 10. 2016]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_film](https://en.wikipedia.org/wiki/3D_film)

- [49] VRBOVÁ, Miroslava, JELÍNKOVÁ, Helena, GAVRILOV, Petr. *Úvod do laserové techniky*. Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01108-9.
- [50] ŠULC, Jan. *Úvod do laserové techniky*. Přednášky ULT [online]. Katedra fyzikální elektroniky, České vysoké učení technické v Praze, 2012. [cit. 1. 10. 2016]. Dostupné z: [http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/ult\\_sl\\_06.pdf](http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/ult_sl_06.pdf)
- [51] Schvalovací doložky učebnic. *Ministerstvo školství mládeže a tělovýchovy* [online]. [cit. 16. 11. 2016]. Dostupné z: <http://www.msmt.cz/vzdelavani/skolstvi-v-cr/schvalovaci-dolozky-ucebnic-2013>
- [52] TESFAYE, Casey Langer, WHITE, Susan. High School Physics Textbooks. *American institute of Physics* [online]. červenec 2014. [cit. 16. 11. 2016]. Dostupné z: <https://www.aip.org/sites/default/files/statistics/highschool/hs-textbooks-13.2.pdf>
- [53] McGraw-Hill. *Physics principles and problems*. 2005. ISBN 0-07-845813-7
- [54] SERWAY, Raymond, FAUGHN, Jerry. *Holt physics*. 2006. ISBN 0-03-073548-3
- [55] SINGH, Shyam. Diffraction method measures refractive indices of liquids. *Physics Education*. 2004. Volume 39, Number 3. str. 235
- [56] BURIANOVÁ, Lidmila. ČMELÍK, Milan, MACHONSKÝ, Lubor. PANOŠ, Stanislav. *Úvod do fyzikálních měření*. Vyd. 3. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. ISBN 978-80-7372-819-9.
- [57] GLUCK, Paul. A simple method to measure the refractive index of a liquid. *Physics Education*. 2011. Volume 46, Number 3. str. 253–254
- [58] PHELPS, F. M. JACOBSON, B. S. Measuring the index of refraction. *The Physics Teacher*. 1980. Volume 18. Issue 3. str. 216–217.
- [59] Vše co potřebujete vědět o LCD. *Jablíčkář* [online]. [cit. 1. 10. 2016]. Obrázek ve formátu jpg. Dostupné z: <http://jablickar.cz/vse-co-potrebuji-vedet-o-lcd/>

[60] ROPARS, Guy, LAKSHMINARAYANAN, Vasudevan, FLOCH, Albert Le. *The sunstone and polarised skylight: ancient Viking navigational tools?* Contemporary Physics, Vol. 55 , Iss. 4,2014. str. 32–317

[61] *Refractiveindex.INFO, Refractive index database* [online]. RefractiveIndex.INFO website: © 2008-2016 Mikhail Polyanskiy. [cit. 1. 10. 2016]. Dostupné z:

<http://refractiveindex.info/?shelf=organic&book=glycerol&page=Rheims>

[62] DAVID R. LIDE (ed.). *CRC handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data*. 84th ed. Boca Raton [u.a.]: CRC Press, 2003. ISBN 9780849304842.