



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Lydia Ceháková

**Vývoj experimentálních stanovišť pro novou koncepci
tématu Optika v Interaktivní fyzikální laboratoři II**

Katedra didaktiky fyziky

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Marie Snětinová, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Učitelství fyziky pro SŠ v kombinaci se studiem učitelství
matematiky pro SŠ

Praha 2022

Ráda bych na tomto místě poděkovala těm, kteří mě v průběhu tvorby práce podporovali, inspirovali a poskytovali cenné rady. V první řadě velký dík patří vedoucí práce Marii Snětinové, která byla ochotná kdykoli poskytnout radu, přicházela s nápady, které byly inspirací pro neustálé zdokonalování a vylepšování částí práce. Spolupráce s ní si velmi vážím. Dále bych chtěla poděkovat Petru Kácovskému, který se jednak s potěšením podělil o své zkušenosti s fyzikálními pokusy a pomohl tak při tvorbě a navrhování experimentů pro jednotlivá stanoviště, jednak připomínkoval připravené pracovní listy z pozice odborníka a lektora. Velký dík patří také Tomáši Kopřivovi - četné rozhovory o vývoji našich prací, o přístupech k uspořádání stanovišť, o našich zkušenostech z testování, o úspěších i nezdarech byly nejen užitečné a mnohdy vedly k vylepšení práce, ale také podporovaly dobrou náladu a odhodlání v práci pokračovat. Děkuji také Stanislavu Gottwaldovi za nesmírnou ochotu a absolutní nasazení se svými žáky testovat pracovní listy. Konečně bych ráda poděkovala rodičům, sestře Markétě a Martinu Krylovi za podporu, pochopení a trpělivost. Děkuji.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 28. 4. 2022

podpis

Název práce: Vývoj experimentálních stanovišť pro novou koncepci tématu
Optika v Interaktivní fyzikální laboratoři II

Autor: Lydia Ceháková

Katedra: Katedra didaktiky fyziky

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Marie Snětinová, Ph.D., Katedra didaktiky fyziky

Abstrakt: V rámci této práce byl vytvořen tematický celek Optika II – kvantitativně pro potřeby Interaktivní fyzikální laboratoře MFF UK v Praze. Tematický celek je složen z pěti stanovišť: Měření indexu lomu, Malusův zákon, Difrakce světla na optické mřížce, Polarizace světla, Youngův experiment. Jejich náplní jsou převážně kvantitativní fyzikální experimenty z vlnové i paprskové optiky, které byly vytipované z českých zdrojů. Pro každé stanoviště byl vytvořen a otestován pracovní list, který vede práci žáků na stanovišti. Stanoviště jsou v práci podrobně rozebrána a okomentována, včetně častých žakovských chyb. Zpracována jsou také autorská řešení pracovních listů a metodické poznámky ke stanovištím pro lektory laboratoře. Součástí práce je rovněž shrnutí základní fyzikální teorie, se kterou se žáci na stanovištích setkají.

Klíčová slova: optika, měření, fyzikální experimenty, laboratorní práce, střední škola

Title: Development of experimental sets for a new conception of Optics in the
Interactive Physics Laboratory II

Author: Lydia Ceháková

Department: Department of Physics Education

Supervisor: RNDr. Marie Snětinová, PhD., Department of Physics Education

Abstract: In this thesis, a new experimental set for the Interactive Physical Laboratory (IPL), operated by the Faculty of Mathematics and Physics, Charles University, was designed. This experimental set consists of five units named: Measurement of Refractive Index, Malus's Law, Diffraction of Light on Grating, Polarization of Light, Young's Experiment. Most of the units consist of quantitative physics experiments in wave and geometrical optics, inspired by experiments appearing in Czech resources. For each unit, corresponding worksheets were prepared and tested. The worksheets are supposed to guide the students as they go through the experiments and related tasks. Each unit is described in the thesis including typical mistakes students tend to make and methodology for lecturers of the laboratory. The author's solution is included in attachments. A part of the thesis is also dedicated to the introduction of the necessary physics theory that could be used as a study material for visitors of the laboratory.

Keywords: experiments in physics, labs, measurement, optics, secondary school

Obsah

1	Úvod.....	3
2	Interaktivní fyzikální laboratoř a experimenty.....	5
2.1	Co je IFL?	5
2.1.1	Program pro SŠ a jiné aktivity	5
2.2	Inspirace pro experimenty využitě v nové Optice.....	7
2.2.1	Tematický celek Optika	8
2.2.2	Sbírka fyzikálních pokusů.....	8
2.2.3	Souhrnný sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky.....	9
2.2.4	Kuchařka – Jednoduché experimenty do hodin chemie, fyziky a biologie....	10
2.3	Zdroje další inspirace pro experimentování.....	10
3	Optika II - kvantitativně.....	13
3.1	Souvislost s kurikulem.....	13
3.2	Vývoj stanovišť.....	14
3.2.1	Testování z blízka	15
4	Difrakce na optické mřížce	18
4.1	Představení stanoviště.....	18
4.2	Úkoly na stanovišti	19
4.2.1	Úkol 1: Měření vlnové délky laseru.....	19
4.2.2	Úkol 2: Měření mřížkové konstanty CD.....	21
4.3	Proměny stanoviště	21
5	Malusův zákon.....	23
5.1	Představení stanoviště.....	23
5.2	Úkoly na stanovišti	24
5.2.1	Úkol 1: Zkoumání polarizačních filtrů.....	24
5.2.2	Úkol 2: Intenzita světla při průchodu jedním filtrem.....	25
5.2.3	Úkol 3: Proměření Malusova zákona.....	26
5.2.4	Úkol 4: Zpracování naměřených hodnot.....	26
5.3	Proměny stanoviště	27
6	Polarizace světla.....	32
6.1	Představení stanoviště.....	32
6.2	Úkoly na stanovišti	33
6.2.1	Úkol 1: Co je polarizace?.....	33
6.3	Proměny stanoviště	36

7	Měření indexu lomu	40
7.1	Představení stanoviště	41
7.2	Úkoly na stanovišti	41
7.2.1	Úkol 1: Měření vzdálenosti v různých prostředích	41
7.2.2	Úkol 2: Jak funguje dálkoměr?	42
7.2.3	Úkol 3: Určování indexu lomu.....	42
7.3	Proměny stanoviště	43
8	Youngův experiment.....	45
8.1	Představení stanoviště	46
8.2	Úkoly na stanovišti	46
8.2.1	Úkol 1: Co je interference?	46
8.2.2	Úkol 2: Youngův experiment ve skutečnosti	47
8.2.3	Úkol 3: Hledání zákonitostí interferenčního obrazce.....	49
8.2.4	Úkol 4: Matematický popis interferenčního obrazce	50
8.2.5	Bonusový úkol 5: Tvorba interferenčního obrazce	50
8.3	Proměny stanoviště	51
9	Teoretické souvislosti	53
9.1	Vlnová optika.....	54
9.2	Index lomu	55
9.3	Interference vlnění	58
9.4	Difrakce světla	63
9.5	Polarizace.....	66
10	Závěr	73
	Seznam použité literatury	75
	Převzaté obrázky	77
	Seznam obrázků	78
	Seznam tabulek.....	80
	Seznam použitých zkratk	81
	Přílohy.....	82
	Příloha A	82
	Příloha B	100

1 Úvod

Ve fyzice má zásadní roli experiment, neboť ten říká, jak se svět kolem nás skutečně chová. Dobře vymyšlený experiment umožňuje systematicky zkoumat určitý jev, získat číselná data, ze kterých je možné sestavit obecnější teorii. A je to opět experiment, který je rozhodujícím faktorem při přijímání a uznávání nových teorií. Má-li být experiment průkazný, je potřeba dbát na jeho správné provedení, na zaznamenání podmínek měření, započítání odchylek a chyb atd., zkrátka celkové určení přesnosti naměřené hodnoty či pozorování.

Na tom, aby experiment měl své místo i ve výuce fyziky a žáci středních škol měli možnost se s experimenty setkat, se svou činností podílí také Interaktivní fyzikální laboratoř (dále IFL). Téma této práce úzce souvisí s programem IFL, která mj. nabízí žákům středních škol programy zaměřené na experimentování v rámci určitého fyzikálního tématu (tzv. experimentálními celky). Jedním z experimentálních celků je *Optika*.

Během posledních 4 let, kdy byla v IFL *Optika* nabízena, se ukázalo, že se náplň celku málo shoduje s potřebami a zájmem středoškolských učitelů, kteří laboratoř se svými žáky navštěvují. Celek nepokrýval dostatečné množství oblastí optiky a optických experimentů, proto bylo navrženo jeho přepracování a doplnění, kterým se zabývá právě tato práce. V důsledku došlo k rozdělení *Optiky* na dva samostatné tematické celky. Tím se vyřešily problémy s nedostatečnou nabídkou úloh resp. témat pro středoškolské učitele. Zároveň bylo možné přehodnotit začleněné experimenty a některé obměnit či nahradit novými, které by se více shodovaly s požadavky středoškolských učitelů.

Cíle práce

Hlavním cílem této práce je vytvořit tematický celek pro IFL zaměřený na experimenty z optiky, které budou převážně kvantitativní, tj. jejich součástí bude proměňování a analýza závislostí, stanovení konkrétních hodnot veličin měřením atd. Součástí tvorby je výběr experimentů vhodných pro potřeby IFL, navržení pěti experimentálních stanovišť. Dále pro tato stanoviště sestavit pracovní listy, které provedou žáky experimentováním tak, aby jejich práce byla maximálně samostatná.

Nedílnou součástí vývoje experimentálních stanovišť je ověření jejich kvality v praxi. Dalším cílem práce je proto otestování vytvořených materiálů v prostředí

laboratoře se žáky za podmínek blízkých těm, ve kterých by měl být nový tematický celek používán. Na základě testování následně stanoviště upravit a v ideálním případě všechna upravená stanoviště znovu otestovat tak, aby vytvořený experimentální celek byl spolehlivě připraven pro běžné použití v IFL.

Kromě tvorby samotných stanovišť a materiálů pro žáky je cílem práce poskytnout návody, rady a postřehy také lektorům IFL formou zpracování metodických poznámek k jednotlivým stanovištím, stejně tak připojit vzorové řešení pracovních listů.

Konečně součástí práce, která není nutně obsažena v tvorbě experimentálního celku pro IFL, je poskytnout čtenáři krátké shrnutí fyzikální teorie, která by pokrývala část fyziky objevující se na stanovištích experimentálního celku. Obtížnost této teoretické části je koncipována na úrovni středoškolské fyziky a jejího mírného rozšíření.

Struktura práce

Struktura práce sleduje uvedené cíle. První část se tak věnuje představení IFL a programu pro žáky středních škol. Současně představuje zdroje inspirace pro experimenty, které je možné využít jednak pro tvorbu stanovišť v IFL, ale také v jiných oblastech. Dotýká se také tématu videoexperimentů.

Druhá část práce představuje samotný vývoj stanovišť a jejich testování. Dále se věnuje podobě a postupným úpravám každého z vytvořených stanovišť, úkolů pracovních listů. Současně uvádí postřehy a poznámky k práci žáků či provedení samotných experimentů jako užitečné informace pro lektory IFL.

Třetí, poslední část práce obsahuje teoretický text, který doplňuje fyzikální kontext stanovišť a vysvětluje podrobněji fyzikální jevy, se kterými se žáci na stanovištích mohou setkat.

Pracovní listy a jejich řešení jsou součástí přílohy práce.

2 Interaktivní fyzikální laboratoř a experimenty

2.1 Co je IFL?

Interaktivní fyzikální laboratoř, neboli IFL, je „*místo, kde si středoškolští studenti se svými učiteli mohou vyzkoušet připravené fyzikální experimenty,*“ jak uvádí Machalická (2017, str. 9). V podání Šabatky (2016, str. 43) je hlavní motivací laboratoře „*dát studentům možnost si samostatně vyzkoušet experimenty a pozorovat jevy, o nichž se ve škole učí, ale které jsou např. příliš náročné na vybavení.*“

Samotná laboratoř se na svých webových stránkách¹ prezentuje následovně: „*IFL je místo, kde dáváme studentům středních škol možnost, aby u nás uchopili fyziku skutečně do vlastních rukou. Nenabízíme show, naším cílem je ale umožnit studentům, aby svým vlastním experimentováním, svou vlastní aktivitou hlouběji pronikali do fyzikálních témat, se kterými se ve své školní výuce setkali či setkají.*“

Těmto myšlenkám a motivacím IFL odpovídá i dnes. Laboratoř svou činností spadá pod Katedru didaktiky fyziky MFF UK a umístěna je v objektu Těžkých laboratoří areálu MFF UK v Troji. O samotném zřízení a cílech laboratoře podrobněji hovoří Šabatka (2016) nebo Kácovský a Snětinová (2019).

2.1.1 Program pro SŠ a jiné aktivity

Hlavní činností IFL jsou programy pro žáky středních škol. Návštěvu laboratoře si v konkrétní den a čas školy rezervují začátkem pololetí pomocí rezervační tabulky na webových stránkách laboratoře. V rámci rezervace si volí jeden z tematických celků, které laboratoř nabízí. Tematických celků je v současné době deset:

1. Elektrostatika
2. Mechanické kmitání a mechanika tuhého tělesa
3. Kvantování v mikrosvětě
4. Magnetické pole solenoidu
5. Rotující soustavy
6. Optika – kvalitativní pojetí²
7. Optika – kvantitativní pojetí³

¹ <https://www.mff.cuni.cz/cs/kdf/akce-pro-zaky-zs-a-ss/interaktivni-fyzikalni-laborator>

² Nově nabízené téma, bylo připraveno v rámci diplomové práce Bc. Tomáše Kopřivy.

8. Termodynamika 1 – kvantitativní pojetí
9. Termodynamika 2 – kvalitativní pojetí
10. Mechanika – vrhy

Jak probíhá návštěva

Samotná návštěva IFL trvá cca 120 minut a je nastavena pro maximální počet 16 žáků, kteří pracují ve skupinách typicky po 3-4 členech. Kromě vyučujícího, který třídu do laboratoře doprovází, jsou žákům k dispozici dva lektori⁴, kteří s experimenty pomáhají, rozebírají s žáky fyzikální podstatu experimentů, pomáhají interpretovat výsledky měření a také dohlíží na hladký průběh celé návštěvy.

V rámci tématu (jednoho z deseti uvedených výše) je připraveno několik stanovišť. Každé se věnuje nějakému experimentu a zaměřuje se na konkrétní menší oblast zvoleného tématu. Na jednom stanovišti může skupina provádět i více experimentů, všechny se ale zaměřují na danou fyzikální problematiku. Typicky skupina stráví na stanovišti 20-30 minut, za jednu návštěvu tak žáci absolvují stanovišť více.⁵

Aby žáci mohli na stanovišti pracovat co nejvíce samostatně, mají k dispozici pracovní list, který je celým stanovištěm provází. Teprve v případě, že žáci nenašli na své otázky odpovědi ani s pracovním listem či je třeba zkontrolovat zapojení aparatury nebo diskutovat nápady, zasahuje lektor.

Struktura pracovního listu

Experimentování v jednotlivých tematických celcích využívá různé metody, např. *BYOD (Bring Your Own Device* – žáci při experimentování využívají vlastních zařízení, jako jsou mobilní telefony, tablety atp.), *POE (Predict - observe - explain* – žáci provedou nejprve odhad, následně experiment, porovnají jej s odhadem a snaží se pozorování správně vysvětlit) či *Physics with Flavor* (Žáci na základě experimentálního měření sestaví závislost, následně pomocí této závislosti

³ Nově nabízené téma, bylo připraveno v rámci této diplomové práce.

⁴ V roce 2022 se na realizaci aktivit v IFL podílelo 8 lektorů (včetně autorky této práce), mezi nimi také studenti Mgr. či Ph.D. studia.

⁵ Počet stanovišť, která žáci stihnou absolvovat, samozřejmě záleží na individuální povaze skupiny - tempu, zvědavosti, zkušenostech s podobným přístupem k fyzice, aktuálně dosažených znalostech ve fyzice i matematice atd.

předpovídají, jak dopadne tentýž experiment za daných vstupních podmínek, a experiment provedou.). Bližší představení principů těchto metod a přiblížení experimentů z tematických celků, které je využívají, uvádí Kácovský a Snětinová (2019). Ve většině případů odpovídá způsob práce žáků v IFL řízenému⁶ bádání (Fürstová, 2020), které se odráží také v jednotné struktuře pracovních listů. Začínají krátkým představením potřebné fyzikální teorie (tzv. teoretický úvod). Následují části s úkoly, ve kterých se objevují postupy k provedení experimentu, doplňující otázky, místa pro odhady a výpočty, návodné obrázky atd. Počet úkolů v pracovních listech se liší v závislosti na povaze daného stanoviště. Pracovní list bývá ukončen závěrem či krátkým shrnutím.

Pracovní listy jsou k dispozici pro každou skupinu přímo v laboratoři. Kromě toho jsou zveřejněny na webových stránkách laboratoře, tedy škola je má k dispozici ještě před návštěvou a může tak i podle úloh vybírat téma.

Další aktivity IFL

Kromě pravidelných programů pro středoškoláky se IFL podílí na propagačních akcích MFF UK, jako je Jeden den s fyzikou, Den otevřených dveří, Vědohraní atp. Prostory laboratoře jsou také využívány v rámci výuky budoucích⁷ i stávajících učitelů fyziky.

2.2 Inspirace pro experimenty využitě v nové Optice

Při výběru náplně nového optického tematického celku, tj. volby experimentů a témat jednotlivých stanovišť, byly hlavní inspirací diplomová práce Jany Machalické (2017), která vznikla v souvislosti se zavedením původního tematického celku *Optika* do IFL, a *Sbírka fyzikálních pokusů*⁸. Nápady byly čerpány také z dalších dostupných materiálů zabývajících se experimenty⁹ z optiky. Tyto materiály se zčásti shodují s těmi, které uvádí v rámci rešerše Machalická (2017). Některé využitě zdroje mohou naopak doplnit tento seznam „novějšími“ materiály¹⁰. Kromě

⁶ Přesněji bychom mohli hovořit o potvrzujícím či strukturovaném bádání, jak uvádí Fürstová (2020). Žáci jsou pomocí návodných otázek a postupu provedení experimentu vedeni k nalezení řešení problémů, kterými jsou ověření či nalezení fyzikálního vztahu, zákonitosti atp.

⁷ V laboratoři experimentují studenti učitelství MFF UK především v rámci volitelných předmětů.

⁸ Dostupná z: <http://fyzikalnipokusy.cz/cs>

⁹ Především tedy kvantitativními experimenty, zajímavými měřeními atp.

¹⁰ To znamená vydanými po roce 2017 vzhledem k roku provedení rešerše ve zmíněné práci.

materiálů vztahujících se přímo k tvorbě nového tematického celku jsou uvedeny ještě další elektronické materiály, které se zabývají fyzikálními experimenty.

Cílem této části práce není předat čtenáři podrobnou rešerši nově dostupných zdrojů, ale představit některé z mnoha zdrojů, které se zabývají experimenty a je možné je např. využít ve výuce. Následuje tedy přehled materiálů, které se věnují fyzikálním pokusům z optiky na úrovni střední školy, které sloužily jako inspirace pro nové zpracování tématu Optika pro IFL. Na přehled navazuje krátké představení dalších českých materiálů, kterými se mohou inspirovat učitelé pro své hodiny fyziky (především na střední škole).

2.2.1 Tematický celek Optika

Od roku 2017 nabízí IFL jako jedno z témat *Optiku*. V rámci tohoto celku mohli žáci experimentovat na stanovištích *Zákon odrazu a lomu světla*, *Totální odraz světla*, *Interference a difrakce světla* a *Polarizace světla*. Tematický celek obsahoval celkem 14 různých experimentů (např. stáčení roviny polarizace, fata morgana, fotoelasticimetrie...), některé měly povahu měření závislosti, jiné zkoumání principu. Podrobnosti o jednotlivých experimentech, rady a poznámky k jejich provedení, očekávané žákovské odpovědi a autorská řešení uvádí ve své diplomové práci Jana Machalická (2017), autorka zmíněných úloh.

Do nového pojetí byl použit experiment ze stanoviště *Difrakce a Interference světla*, ve kterém je úkolem určit mřížkovou konstantu CD a DVD disku. Polarizace, která se v novém tematickém celku objevuje také, je pojata odlišným způsobem, inspirací bylo úvodní zkoumání polarizačních filtrů na kvalitativní úrovni.

2.2.2 Sbíрка fyzikálních pokusů

Sbíрка fyzikálních pokusů (zkráceně *Sbíрка*) je projekt Katedry didaktiky fyziky MFF UK, jehož cílem je vytvořit soubor experimentů s návody, technickými radami k jejich provedení, videy atd. tak, aby pomáhaly základoškolským a středoškolským učitelům (a žákům) ve výuce¹¹. Sbíрка je „živá“, tedy jsou stále zpracovávány a přidávány nové pokusy. Ke dni 29. 3. 2022 bylo ve sbírce

¹¹ Především je cílem usnadnit učitelům přípravu a provedení experimentu poskytnutím návodu a vzorového výsledku. V době uzavření českých škol v souvislosti s onemocněním Covid-19 byly experimenty Sbířky také využívány formou promítání v online hodinách. To ostatně ukazuje 2,5× větší počet unikátních přístupů do Sbířky fyzikálních pokusů ve zmíněném období (Koupilová a kol., 2020).

zveřejněno 167 pokusů, přičemž 30 z nich je zařazeno do optiky. Tyto experimenty jsou rozděleny do skupin podle oblasti optiky, kterou se zabývají. Zařazení experimentů do kategorií a jejich povahu uvádí následující tabulka 2-1. Pro tuto práci jsou významné především kvantitativní experimenty, proto jsou v tabulce uvedeny také počty experimentů jednotlivých oblastí zaměřené na získání nějaké číselné hodnoty či proměření konkrétní závislosti.

Oblast optiky	Počet experimentů (z toho kvantitativních)
Elektromagnetické záření	3 (0)
Geometrická optika	4 (1)
Interference a difrakce světla	4 (1)
Obecné poznatky o světle	7 (2)
Polarizace světla	6 (1)
Zobrazování optickými soustavami	6 (0)

Tabulka 2-1: Rozdělení experimentů Sbírký fyzikálních pokusů podle oblastí optiky.

Tři z kvantitativních experimentů této Sbírký z oblastí Obecné poznatky o světle, Polarizace světla a Interference a difrakce světla posloužily jako inspirace k tvorbě nových stanovišť v tematickém celku *Optika II – kvantitativně*, z nichž jeden se objevil také v původním zpracování tematického celku *Optika*. Konkrétně se jedná o experimenty Difrakce monochromatického světla na kompaktním disku, Měření indexu lomu pomocí digitálního dálkoměru a Proměření Malusova zákona, které jsou podrobně popsány, včetně stručné teorie, metodických poznámek a rad k provedení experimentu.

2.2.3 Souhrnný sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky

Sborník¹², který byl již představen v práci Machalické (2017), obsahuje dokumentace vybraných příspěvků z konference Veletrh nápadů učitelů fyziky. Jelikož Veletrh nápadů učitelů fyziky probíhá každý rok, databáze příspěvků neustále roste. Díky možnosti vyhledávání v různých kategoriích (dle ročníků, autorů, témat) lze snadno zjistit, že jen k tématu optika přibylo od roku 2017 celkem 9 nových příspěvků. Lze očekávat, že sborník konference bude i v následujících letech inspirací pro učitele nejen v oblasti optiky.

¹² Dostupný z: <https://vnuf.cz/sbornik/>

Ve sborníku je také zpracována verze experimentu Difrakce světla na CD, a sice v příspěvku Zdeňka Poláka *Pokusy s CD* z roku 2003¹³. V tomto zpracování je mj. uvedena informace o možnosti použití průhledného plastového kotoučku (z většího balení CD) jako mřížky se stejnými vlastnostmi, jako má mřížka CD. Plastový kotouček namísto CD byl následně použitý v experimentu jednoho ze stanovišť nového pojetí *Optiky II – kvantitativně*.

2.2.4 *Kuchařka – Jednoduché experimenty do hodin chemie, fyziky a biologie*

Série publikací, zkráceně *Kuchařky*¹⁴, uvádí návody k experimentům s čidly značky Vernier¹⁵. *Kuchařky* jsou volně dostupné materiály, kromě tištěných publikací lze všechny experimenty nalézt v online verzi *Kuchařky*. U každého experimentu jsou uvedeny potřebné pomůcky (typicky i příslušné čidlo), teorie, příprava experimentu včetně postupu jeho provedení, dále ukázkový výsledek experimentu a poznámka. Ke dni 1. 4. 2022 se v kategorii experimentů Optika a radiace nacházelo 15 experimentů, z toho přímo k tématu optika jich lze zařadit 10. Mezi takto zpracovanými experimenty je také proměření *Blikání žárovky (aneb co lidské oko nevidí, ale počítač ano)*, které souvisí s výběrem zdroje¹⁶ pro experiment na stanovišti *Malusův zákon* nového pojetí *Optiky II – kvantitativně*.

2.3 Zdroje další inspirace pro experimentování

*Experimenty s čidly Vernier*¹⁷

Kromě již uvedené *Kuchařky* vystavuje na svých webových stránkách Vernier několik sad pracovních listů, které vznikly za podpory různých projektů na gymnáziích. Autory takto zpracovaných experimentů jsou typicky vyučující fyziky dané školy. Lze pracovat také s online rozřazením jednotlivých experimentů do kategorií podle organizace studia na dané škole či podle uspořádání látky dle

¹³ Příspěvek je dostupný na: <https://vnuf.cz/sbornik/prispevky/08-18-Polak.html>

¹⁴ Dostupné z: <https://www.vernier.cz/experimenty/kucharka/index.php>

¹⁵ Nabízí se otázka, zda je vhodné zařadit materiál vyžadující práci s drahými čidly. Odpověď zní ano. Je uveden přehled materiálů, které sloužily jako inspirace pro tvorbu experimentů v IFL. Laborať je těmito čidly vybavena a může tak dát žákům možnost s nimi pracovat. Zároveň experimenty mohou sloužit jako inspirace pro práci také s obdobnými čidly, které daná škola vlastní.

¹⁶ O použití zdroje je více pojednáno v části práce věnované přímo stanovišti *Malusův zákon*.

¹⁷ Dostupné v sekci Fyzika na: <https://www.vernier.cz/experimenty/prehled/oblast/video>

vybraných ZŠ a SŠ učebnic. Některé pracovní listy¹⁸ se svou strukturou podobají právě pracovním listům využívaným v IFL. V kategorii Optika vytvořené dle stejnojmenné středoškolské učebnice nakladatelství Prometheus (Lepil, 2015) lze najít např. připravený pracovní list k tématu Difrakce světla, jehož autorem je Mgr. Václav Pazdera.

Experimenty na videu

Vzhledem k událostem období let 2020-2021, které pro školy znamenaly distanční výuku, je na místě věnovat pár slov také videoexperimentům. S nutností vyučovat distančně byli učitelé, kteří chtěli do výuky začleňovat experimenty i nadále, nuceni přejít často k přímému přenosu jejich experimentu pomocí videa a platformy užívané danou školou. V tomto období tak vznikla řada videí s experimenty, jejichž autory jsou učitelé či žáci. Tyto nadále dostupné materiály nejsou ověřené, odborná správnost není garantována. Zmapování a ověření těchto nových příspěvků by jistě stálo za větší pozornost.

Na tomto místě je vhodné zmínit také *oblíbené*¹⁹ Rande s fyzikou. Jedná se o pořad České televize vytvořený ve spolupráci s fyziky MFF UK, který ve třinácti přibližně patnáctiminutových dílech představuje fyziku jako atraktivní vědu. Každý díl je zaměřený na nějaké fyzikální téma, obsahuje mnoho zajímavých experimentů a jejich jednoduché, fyzikálně správné vysvětlení. Díly pořadu jsou dostupné na stránkách České televize²⁰. Díky názornosti experimentů, srozumitelnosti komentáře a časově přívětivému rozsahu příspěvku je možné využívat části pořadu také v hodinách fyziky, ať už jako náhradu experimentu či zajímavost navíc.

ČTedu

V souvislosti s uzavřením škol v letech 2020-2021 vzniklo také vzdělávací vysílání pod Českou televizí. V březnu roku 2020, kdy došlo k prvnímu uzavření škol a distanční výuka se teprve tvořila²¹, zavedla Česká televize pořad UčíTelka pro

¹⁸ Například sada pracovních listů z gymnázia Čajkovského v Olomouci, jejichž autorem je Mgr. Václav Pazdera a kol., dostupné jsou na: <https://www.vernier.cz/experimenty/pazdera/index.php>.

¹⁹ Tato informace není podložena žádným profesionálním výzkumem, pouze osobní zkušeností autorky s několika učiteli fyziky.

²⁰ Na adrese: <https://www.ceskatelevize.cz/porady/10319921345-rande-s-fyzikou/>

²¹ Pro školy to byla zcela nová situace: v rychlosti se tvořil plán, jakým způsobem výuku k žákům dostat (technické vybavení pro žáky, platformy, rozvrh výuky atd.).

žáky v následující formě: V daný čas běželo dvacetiminutové vysílání pro určitý ročník zaměřené na konkrétní předmět základní školy. Ve studiu byl přítomen učitel a skupina přibližně pěti dětí. Učitel u elektronické tabule vykládal a vysvětloval danou látku či dětem představil nějakou aktivitu, kterou si následně vyzkoušely.

V návaznosti na tyto vzdělávací pořady byl spuštěn web ČTedu²², na kterém lze najít mnoho materiálů k výuce, mj. také videa s experimenty do fyziky pro střední školy. Správnost dostupných materiálů je dle informací na webových stránkách garantována účastí zkušených pedagogů při sestavování jejich výběru. Nejedná se o nově tvořené materiály, ale výběr již existujících dostupných pořadů/videí, které jsou sjednoceny na jednom místě. Do budoucna je možné očekávat vývoj tohoto webu, snad i v rozšiřování a doplňování fyzikálně zaměřených experimentů.

Vzdálené experimenty

V návaznosti na využití videí pro zprostředkování experimentů lze uvést jiný způsob, jak distančně provádět měření, a sice pomocí vzdálených experimentů. Tzv. vzdálené laboratoře umožňují provést měření, experiment v reálném čase s aparaturou, která se nenachází u experimentátora – je od něj vzdálena. Zájemce o měření se tak odkudkoli připojí pomocí příslušné internetové stránky k experimentu, který je připraven v laboratoři. Ze svého zařízení pak na dálku ovládá aparaturu, nastavuje parametry měření a získává data.

Provozu a tvorbě vzdálených experimentů v České republice se věnuje např. doc. RNDr. František Lustig, CSc. se vzdálenou laboratoří iSES²³ umístěnou v budově MFF v Praze. Tato vzdálená laboratoř nabízí 16 různých experimentů, mezi nimi také experiment z vlnové optiky: Ohyb elektromagnetického záření.

Dalšími vzdálenými laboratořemi jsou Remote-LAB GymKT²⁴ gymnázia Jaroslava Vrchlického v Klatovech, která nabízí 11 vzdálených experimentů a ke dni 1. 4. 2022 dva nové připravuje²⁵, nebo vzdáleně ovládaná laboratoř²⁶ katedry experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci, která nabízí pět vzdálených experimentů.

²² Dostupné z: <https://edu.ceskatelevize.cz/>

²³ Vzdálená laboratoř na stránkách: <https://www.ises.info/index.php/cs/laboratory>

²⁴ Vzdálená laboratoř na: <http://remote-lab.fyzika.net/o-laboratori.php?lng=cs>

²⁵ Mezi nimi je experiment z oblasti optiky Studium difrakčních jevů.

²⁶ Vzdálená laboratoř dostupná z: <http://www.ictphysics.upol.cz/remotelab/rlab.html>

3 Optika II - kvantitativně

Tematický celek *Optika* byl do IFL zaveden v roce 2017 (Machalická, 2017). Nově byl rozdělen na dva tematické celky, které se věnují kvantitativnímu a kvalitativnímu pojetí²⁷. To se odráží na podobě stanovišť, která jsou v případě kvalitativního pojetí zaměřena typicky více na prozkoumání a pochopení principu nějakého jevu bez nutnosti použití konkrétních vzorců, měření hodnot, výpočtů; zatímco v případě kvantitativního pojetí je kladen důraz na získání číselného odhadu hodnot či hledání, ověřování a odvozování vztahů mezi fyzikálními veličinami. Následující část práce je věnována představení vývoje stanovišť tematického celku *Optika II – kvantitativně*, jehož tvorba je hlavním cílem této diplomové práce.²⁸

3.1 Souvislost s kurikulem

Jak již bylo uvedeno, experimentování a celkově práce v IFL cílí na středoškolské žáky. Témata jednotlivých stanovišť by tak měla sledovat či odrážet to, co se tito žáci učí, a jejich znalosti dále procvičovat, rozvíjet, doplňovat, prohlubovat atd. Přesnou náplň vzdělávání, které se vztahuje k fyzice, nelze pro české střední školy určit jednotně. Konkrétní podobu a náplň výuky si vytváří vyučující v souladu se *Školním vzdělávacím programem*, zkráceně ŠVP. Tento dokument si tvoří školy samy, nelze se tedy při hledání společné úrovně poznatků odkazovat na jeden konkrétní ŠVP. Výchozím dokumentem, který je společný pro všechny školy daného typu²⁹ a určuje minimální úroveň znalostí a dovedností žáků, je pro české školství *Rámcový vzdělávací program*, neboli RVP. Dále je uveden přehled nároků, které RVP³⁰ klade na žáky v oblasti optiky a které jsou splněny v rámci stanovišť celku *Optika II – kvantitativně*. Uvedené *výstupy* jsou požadavky závazné, *učivo* pouze doporučené:

- (*Výstupy*) Porovná šíření různých druhů elektromagnetického vlnění v rozličných prostředích

²⁷ Podobné rozdělení celku lze najít u tématu Termodynamika.

²⁸ Vývoji druhého zmíněného tematického celku se věnuje ve své diplomové práci Bc. Tomáš Kopriva pod vedením RNDr. Petra Kácovského, Ph.D.

²⁹ Tedy pro základní školy, gymnázia, střední odborné vzdělávání atd.

³⁰ V tomto případě se již omezuje na RVP pro gymnázia (2020), neboť většinu návštěvníků IFL tvoří právě žáci gymnázií.

- (*Učivo*) Elektromagnetické záření – elektromagnetická vlna
- (*Učivo*) Vlnové vlastnosti světla – šíření a rychlost světla v různých prostředích; index lomu; interference světla

Současně při práci na stanovištích, ve skupinách žáci rozvíjí mnohé z požadovaných klíčových kompetencí, např. k učení, řešení problémů či komunikativní.

Na tomto místě je vhodné připomenout a zdůraznit, že cílem IFL není plnit minimální požadavky dle RVP, nýbrž umožnit žákům zkoumat fyziku formou zajímavých experimentů a seznámit se s fyzikou tak, jak by v běžných hodinách fyziky nemuseli mít možnost.

3.2 Vývoj stanovišť

Optika II – kvantitativně je inspirována zpracováním původních stanovišť tématu *Optika*, která vyhovovala požadavkům kvantitativního pojetí experimentů. Vychází z existujících pracovních listů, přepracovává je a doplňuje úkoly tak, aby nově koncipovaná stanoviště sledovala konkrétní fyzikální problematiku. K tomu přidává několik zcela nově zpracovaných stanovišť.

Aby bylo možné s novým tematickým celkem pracovat v IFL v souladu s organizací návštěv středoškoláků, kladli jsme na stanoviště (resp. pracovní listy) několik základních podmínek:

- Stanoviště jsou alespoň 4.³¹
- Časová náročnost stanoviště je cca 30 minut.
- Úkoly jednoho stanoviště jsou propojeny jedním fyzikálním jevem.
- Experimenty nejsou běžně prováděné na školách.³²

Kromě těchto základních požadavků se stanoviště navrhovala také s ohledem na možné znalosti žáků získané ve výuce a další kritéria, která vyplývají z cílů IFL.

Návrhy stanovišť byly konzultovány s vedoucí práce. Jelikož současně s vývojem kvantitativních stanovišť probíhal vývoj stanovišť kvalitativních, byly

³¹ Optimální počet stanovišť je 5-6, neboť v takovém případě se mohou skupiny plynule střídat na stanovištích a to i v případě, že je některá ze skupin výrazně pomalejší/rychlejší než ostatní.

³² Do skupiny běžných experimentů se řadí např. téma Zákon odrazu a lomu. Jednoduché a názorné experimenty k tomuto tématu je možné provést s dostupnými pomůckami a je tak možné je zařadit i v běžné výuce fyziky.

následně návrhy stanovišť předloženy k recenzování kolegům, kteří se věnovali kvalitativnímu tematickému celku.

Takto bylo navrženo celkem 5 stanovišť: *Měření indexu lomu*, *Malusův zákon*, *Polarizace světla*, *Difrakce na optické mřížce* a *Youngův experiment*, přičemž poslední dvě uvedená jsou přepracováním a doplněním úloh z původního tematického celku *Optika*. Ostatní stanoviště vznikla nově a byla inspirována především *Sbírkou fyzikálních pokusů* (a dalšími zdroji uvedenými v sekci 2.2).

Připravená stanoviště byla testována žáky střední školy. Na základě jejich zpětné vazby a postřehů lektorů z průběhu testování byla stanoviště upravena. Finální podoba stanovišť byla opět recenzována vedoucí práce a kolegy, kteří se věnovali kvalitativnímu tematickému celku. Pracovní listy vytvořené k uvedeným stanovištím v rámci této práce jsou obsahem Příloha A, jejich autorská řešení lze nahlédnout v Příloha B.

3.2.1 Testování z blízka

Pilotování stanovišť probíhalo v období září - říjen 2021 a následně v březnu 2022 za laskavé účasti žáků gymnázia Špitálská. V prvním uvedeném období byly testovány úlohy *Měření indexu lomu*, *Malusův zákon*, *Polarizace světla* a *Difrakce na optické mřížce*, ve druhém pak *Youngův experiment* a upravená podoba stanovišť *Měření indexu lomu* a *Polarizace světla*. Složení testovaných stanovišť se pro jednotlivé termíny lišilo: Jednak docházelo k postupné úpravě stanovišť, některá bylo nutné testovat opakovaně, některá vznikla až po prvním testování a do testovaného souboru tak byla přidána později. Zároveň testování probíhalo společně s několika stanovišti tematického celku *Optika I – kvalitativní pojetí*, která procházela po každém testování podobným procesem úprav. Kombinace úloh obou celků se mohla termín od termínu lišit. Testovaná stanoviště byla volena tak, aby daná skupina žáků měla k dispozici vždy alespoň 5 stanovišť a formát jejich práce se co nejvíce podobal běžné návštěvě žáků v IFL. Podrobnosti testování uvádí tabulka na následující straně:

Termín testování	Ročník	Počet žáků	Předchozí zkušenost s IFL	Probrané téma optika
15.9.2021	V.	30	NE	NE
29.9.2021	3.	12	NE	NE
6.10.2021	4.	27	ANO	ANO
2.3.2021	VIII.	19	ANO	ANO

Tabulka 3-1: Parametry skupin, které testovaly stanoviště v prvním období testování.

Stanoviště	Počet žáků	Konečná časová náročnost stanoviště (minuty)
Měření indexu lomu	23	45
Difrakce na optické mřížce	20	40
Malusův zákon	15	35
Polarizace světla	18	25

Tabulka 3-2: Podrobnosti testování jednotlivých stanovišť v prvním období testování.

Stanoviště	Počet žáků	Konečná časová náročnost stanoviště (minuty)
Měření indexu lomu	10	40
Youngův experiment	12	35
Polarizace světla	12	25

Tabulka 3-3: Podrobnosti testování jednotlivých stanovišť v druhém období testování.

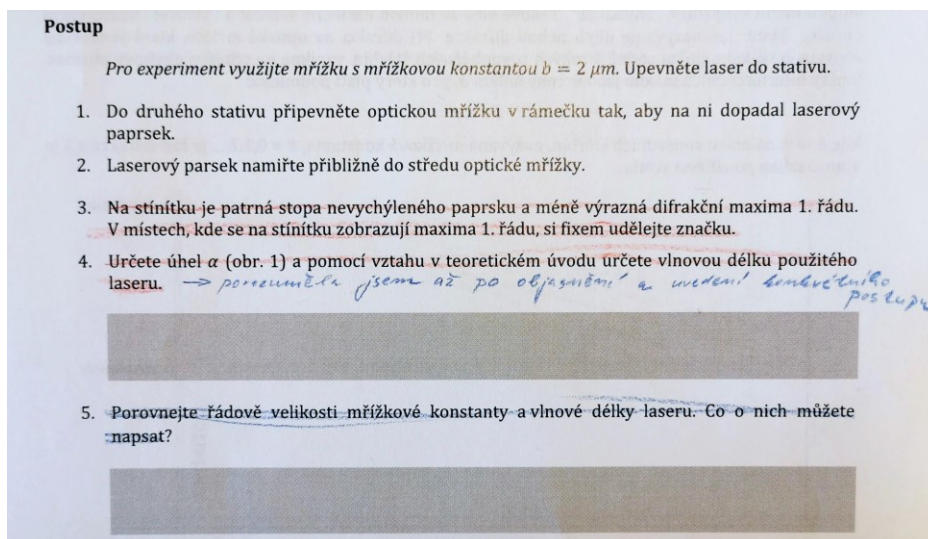
I přes snahu zajistit žákům podobný průběh návštěvy jako ten, který je popsán v části 2.1.1 této práce, bylo nutné žákům představit testování, a návštěva tak proběhla s následujícími rozdíly:

- 1) Žáci věděli, že se jedná o testování stanovišť. V úvodním přivítání v IFL byli na stav stanovišť upozorněni a také byli požádáni, aby si více všímali problematických, nesrozumitelných částí pracovních listů, povahy úkolů na stanovištích atp.
- 2) Součástí návštěvy bylo poskytnutí zpětné vazby nad časový rámeček 120 minut.

Pracovní listy na jednotlivých stanovištích vyplňovali žáci ve skupinkách tak, jak by pracovali v laboratoři obvykle. V průběhu návštěvy byla jejich práce na stanovišti pozorována lektorem. Z rozhovoru žáků při práci či dotazů pro lektora

vyplývalo několik závěrů, které ovlivnily další podobu stanoviště. Postřehy z pozorování tvořily důležitou část zpětné vazby.

Na závěr své práce byli žáci požádáni o vyplnění anonymní zpětné vazby. Každý žák dostal tytéž (nevyplněné) pracovní listy, se kterými pracoval, vyplňoval zpětnou vazbu sám za sebe (nikoli ve skupině) a vyjadřoval se ke všem stanovištím, která navštívil. Pomocí barevného kódování žáci vyznačovali části pracovních listů, které jim připadaly velmi složité, nesrozumitelné, nepochopitelné (červeně) a které pro ně byly náročné, obtížně formulované, ale pochopitelné (modře).³³ Do pracovního listu bylo možné napsat doplňující, upřesňující komentář. Ukázka jedné barevné zpětné vazby je na obrázku 2-1. Zpětné vazbě bylo věnováno po každé testované skupině maximálně 20 minut.³⁴



Obrázek 2-1: Ukázka zpětné vazby s barevným kódováním a komentářem.

Před odchodem skupiny byla pořízena elektronická kopie vyplněných pracovních listů, originály zůstávaly žákům či vyučujícím podle pravidel běžné návštěvy IFL. Na základě „barevné“ zpětné vazby, řešení pracovních listů a pozorování skupin během práce v laboratoři byla stanoviště upravena, a to mezi jednotlivými termíny testování. Výsledky testování vedly také k rozdělení jednoho stanoviště na dvě.³⁵ V následujících kapitolách jsou podrobněji představena jednotlivá stanoviště, včetně komentáře k jejich vývoji.

³³ Neoznačené části pak byly z hlediska porozumění a obtížnosti v pořádku.

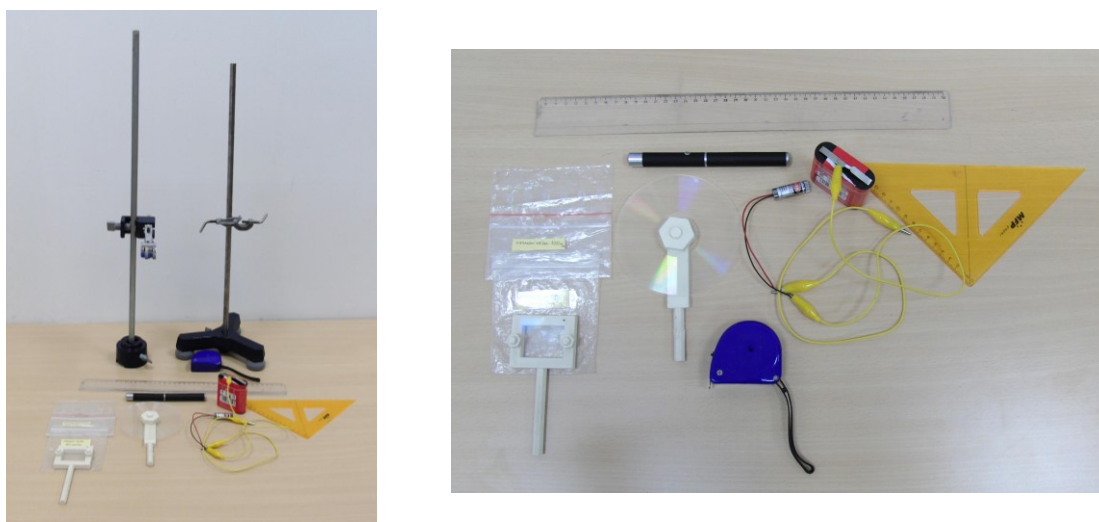
³⁴ V naprosté většině případů žáci odevzdali zpětnou vazbu do 15 minut.

³⁵ To nastalo v případě *Malusova zákona*, jak je uvedeno podrobněji v části 5.3.

4 Difrakce na optické mřížce

Difrakce světla se objevuje již v původním tematickém celku *Optika* a je součástí stanoviště *Interference a difrakce světla*. Nově vzniklé stanoviště vychází z úkolu Difrakce na optické mřížce, ve kterém bylo cílem určit mřížkovou konstantu CD a DVD. Tento úkol byl zařazen i do nového pojetí stanoviště, včetně krátkého kvalitativního seznámení s difrakcí. Ke změnám došlo především v provedení experimentu a v jeho rozsahu (viz níže). Zároveň byl přidán jeden nový úkol.

Na tomto stanovišti trávili žáci cca 40 minut, což je delší doba než odpovídá požadavkům kladeným na stanoviště. Vzhledem k ucelenosti stanoviště, dobré návaznosti úkolů a významu úkolů pro porozumění tématu, bylo po dohodě s vedoucí práce zařazeno i přes větší časovou náročnost.



Obrázek. 4-1: Podoba stanoviště *Difrakce na optické mřížce*

4.1 Představení stanoviště

Cílem aktivit stanoviště *Difrakce na optické mřížce* je, aby žáci:

- Seznámili se s difrakcí světla na optické mřížce a popsali její princip.
- Dokázali popsat difrakční obrazec a uvedli parametry, na kterých závisí.
- Získali kvantitativní představu o velikosti mřížkové konstanty a vlnové délce monochromatického světla.
- Využili měření k určení mřížkové konstanty mřížky a vlnové délky světla laseru.

- Tvořili a ověřovali hypotézy, propojovali svá experimentální pozorování s teorií.

Stanoviště je složeno z teoretického úvodu, dvou úkolů a závěru. Teoretický úvod stručně představuje difrakci jako fyzikální jev a uvádí mřížkovou rovnici, základní vztah pro celé stanoviště. Závěr se věnuje krátkému shrnutí výsledků (včetně číselných hodnot) a poznatků celého stanoviště.

4.2 Úkoly na stanovišti

4.2.1 Úkol 1: Měření vlnové délky laseru

Pomůcky: zelené laserové ukazovátko ($\lambda_1 = 532 \text{ nm}$, výkon 5 mW), červený laserový modul ($\lambda_2 = 650 \text{ nm}$, výkon 5 mW), optické mřížky ($b_1 = 2 \text{ }\mu\text{m}$, $b_2 = 1 \text{ }\mu\text{m}$), držák na optickou mřížku, stativ na uchycení laserového ukazovátku/modulu, stativ na uchycení držáku mřížky, pravítko, pásově měřidlo.

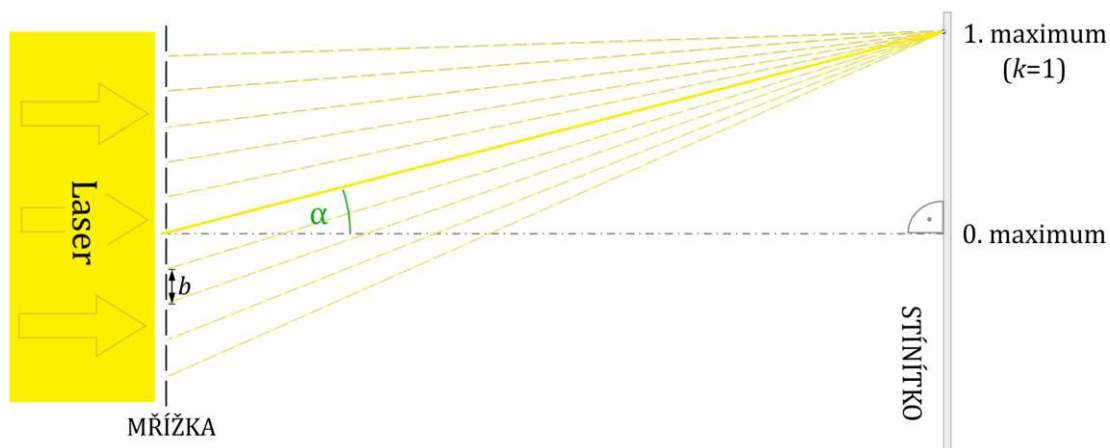
Průběh: Žáci vytvoří pomocí laserového modulu na stínítku³⁶ difrakční obrazec, o kterém se dočetli v teoretickém úvodu, a kvalitativně jej zkoumají. Jejich úkolem je nejprve zakreslit vytvořený obrazec do obrázku z teoretického úvodu. Následně na základě teoretických znalostí odhadují a experimentálně ověřují, jak se změní difrakční obrazec v závislosti na vlnové délce dopadajícího světla, mřížkové konstantě a vzdálenosti mřížky od stínítka. S touto vlastní experimentální zkušeností s difrakcí se žáci vrací k mřížkové rovnici v teoretickém úvodu a analyzují jednotlivé veličiny v ní vystupující. To provádí přiřazením parametrů, které měnili při zkoumání difrakčního obrazce, k veličinám z mřížkové rovnice.

V samotném pracovním listu je tato úloha formulována následujícím způsobem: „Kterou z veličin b , α , λ (viz teoretický úvod) jste „měnili“ v jednotlivých možnostech úlohy 2?“. Slovo *měnili* je v uvozovkách uvedeno z toho důvodu, že v průběhu experimentování žáci sice pozorovali změnu obrazce při změně některého z parametrů, ovšem při změně vzdálenosti mřížky od stínítka se úhel α ze zadání úlohy nezměnil. Došlo ke změně délek stran pravoúhlého trojúhelníku, ovšem jejich poměr se zachoval (původní a nový trojúhelník jsou podobné).

Navazuje již kvantitativní experiment, pomocí něhož mají žáci určit vlnovou délku laseru. Žáci si sestaví aparaturu dle návodu, posvítí červeným laserem skrz

³⁶ Jako stínítko slouží v laboratoři tabule, na kterou je možné křídou či fixem vyznačovat polohu maxim.

difrakční mřížku a vytvoří difrakční obrazec na stínítku. Jejich úkolem je určit úhel odchylení paprsku od původního směru šíření, v obrázku 4-2 označený α . Sami musí vymyslet, jaké reálné vzdálenosti potřebují změřit, aby určili požadovaný úhel a dokázali z teoretického vztahu vypočítat vlnovou délku použitého laseru. Jako nápověda jim slouží názorný obrázek 4-2.



Obrázek 4-2: Schéma difrakce světla na optické mřížce

Jelikož žáci v experimentu pracují pouze s prvními maximy v difrakčním obrazci, získají hodnotu vlnové délky ihned dosazením známých hodnot (včetně úhlu α) do mřížkové rovnice: $b \sin \alpha = k\lambda$,

kde b je vzdálenost štěrbin mřížky (mřížková konstanta), $k = 1 \dots$ řád maxima a λ vlnová délka použitého světla.

V závěru prvního úkolu žáci zhodnotí přesnost jejich vypočtené hodnoty, dále si rozmyslí, jakých se mohli dopustit nepřesností a řádově porovnájí vlnovou délku světla laseru s velikostí mřížkové konstanty.

Poznámky: Určování nepřesnosti měření, zamýšlení se nad možnými chybami, odhady a porovnání velikostí veličin atp. jsou úlohy na stanovištích naprosto zásadní a neodmyslitelně patří k celkovému pojetí práce v Interaktivní fyzikální laboratoři. Práce s chybou a odhadování správnosti provedeného měření je součástí života experimentátora, které se žáci návštěvou laboratoře mohou, alespoň na základní úrovni, přiblížit.

4.2.2 Úkol 2: Měření mřížkové konstanty CD

Pomůcky: červený laserový modul ($\lambda_2 = 650 \text{ nm}$, výkon 5 mW), optická mřížka (průhledný CD disk)³⁷, držák na CD, stativ na uchycení laserového ukazovátka/modulu, stativ na uchycení držáku CD, pravítko, pásově měřidlo.

Průběh: Druhým úkolem na stanovišti je určení mřížkové konstanty CD z experimentálních dat. Žáci pracují s průhledným diskem, který slouží jako difrakční mřížka. Nastavení experimentu je obdobné jako v prvním úkolu tohoto stanoviště, tedy žáci vytvoří na stínítku difrakční obrazec, sami určí a změří vzdálenosti, které pro výpočet potřebují. Vlnová délka světla laseru je známá. Úpravou mřížkové rovnice získávají hodnotu mřížkové konstanty v závislosti na známých hodnotách. V závěru úkolu určí z mřížkové konstanty CD počet drážek, které připadají na jeden milimetr, a vypočtenou hodnotu srovnají s údajem, který o výrobku uvádí výrobce, diskutují chyby a odchylky měření.

V závěrech stanoviště jsou shrnuty základní poznatky o parametrech difrakčního obrazce a hodnoty určované mřížkové konstanty.

Poznámky: U tohoto úkolu postupují žáci značně rychleji než u předchozího. Jelikož nastavení a provedení experimentu je obdobné, žáci již vědí, jaké vzdálenosti potřebují změřit. Obtížnější je pak správná úprava a vhodné dosazení do mřížkové rovnice, obzvlášť pro nižší ročníky střední školy, které ještě nezopakovaly potřebnou matematiku.

Se žáky je dobré diskutovat, jakou hodnotu vlnové délky laseru je vhodné použít při výpočtu v případě, že chtějí dosáhnout co největší přesnosti. Do dalších výpočtů obvykle použijí vypočtenou vlnovou délku. V případě, že se hodnota výrazně odlišuje od předpokládané vlnové délky, doporučí se žákům dále pracovat s hodnotou 650 nm, která je uvedena na laserovém modulu.

4.3 Proměny stanoviště

V první verzi vycházelo stanoviště z původní podoby úkolu Difrakce na optické mřížce, pouze s vnořeným experimentálním určením vlnové délky světla laseru mezi kvalitativní zkoumáním a určování mřížkové konstanty CD a DVD. Provedení experimentů pro vlnovou délku laseru a mřížkovou konstantu se lišilo, neboť v prvním případě byla použita průhledná mřížka, tudíž obraz vznikl po

³⁷ Jedná se o polotovar CD. Průhledný disk se používá jako podložka proti poškrábání ve velkých baleních CD, má ovšem strukturu vrypů stejnou jako CD.

průchodu světla na stínítku za mřížkou, zatímco v případě druhém se světlo na povrchu CD odrazilo a difrakční obrazec byl pozorován na stínítku před mřížkou. Podrobné uspořádání experimentu uvádí Machalická (2017, str. 23-24).

Testování odhalilo několik slabin. V první řadě byla zcela odstraněna část měření s DVD, která byla již od začátku koncipována jako bonusový úkol pro rychlé skupiny. Experiment výrazně zvyšoval časovou náročnost stanoviště a přitom nepřinášel mnoho nového³⁸. Zároveň bylo vyzkoušeno, že některé plastové průhledné disky se skutečně svou vrypovou strukturou podobají CD, a lze je tak použít místo CD.³⁹ Použití průhledného materiálu umožnilo zjednodušit měření, které se navíc svým nastavením podobá měření z předchozího úkolu stanoviště – určování vlnové délky světla laseru. Zároveň se není potřeba zabývat vlivem odrazu světla na měření. Přesto je vhodné s žáky diskutovat, jak by se situace zkomplikovala použitím CD a proč se používá náhradou průhledný disk. Je na místě upozornit na to, že ne všechny tyto podložky mají požadované vlastnosti. Byly testovány celkem 4 druhy podložek (různé stáří, značka, model atp.) a pouze u jedné z nich byla potvrzena požadovaná drážková struktura.

Předmětem úpravy byl také text teoretického úvodu, kde bylo nutné přejít k jazyku a formulacím bližším středoškolským žákům. Velká pozornost byla věnována představení pojmů řád maxima a minima interference, jejichž pochopení se u žáků jevílo jako problematické. V tomto případě došlo výjimečně k prodloužení textu, dle zpětné vazby ovšem nebyla překročena mez, která by již žáky od čtení textu odrazovala a demotivovala je.

Úvodní úloha, ve které mají žáci zakreslit vytvořený difrakční obrazec do schematického obrázku v pracovním listu, byla přidána na základě častého výskytu žakovské misinterpretace obrázku v průběhu testování. Obrázek použitý v první testované verzi stanoviště je přejatý z původního úkolu Machalické (2017) a byl pouze ilustrativní (obrázek 4-3). Ze zpětné vazby a konzultací v průběhu testování vyplynulo, že

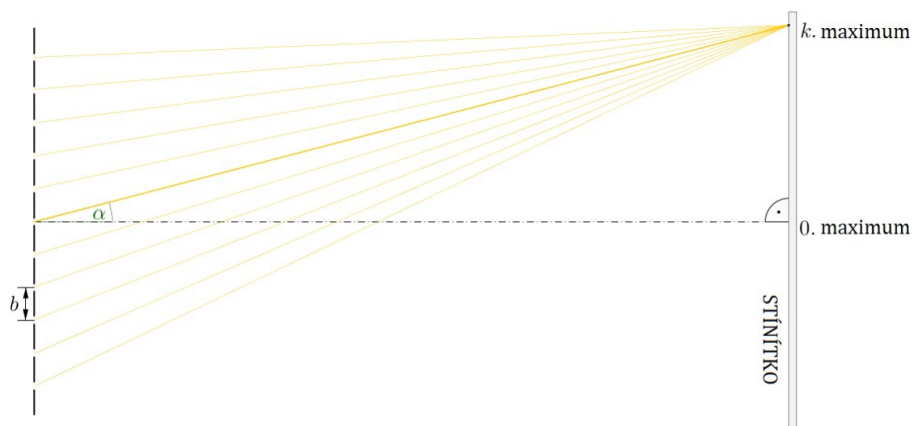
- žáci nerozumí pojmu k -té maximum/minimum

³⁸ Hlavním přínosem experimentu bylo určení mřížkové konstanty DVD a možnost porovnání její velikosti s CD.

³⁹ V případě DVD se nepodařilo dohledat ani ověřit, zda se u průhledných disků také jedná o polotovary s obdobnou vrypovou strukturou. Případná odlišnost měření pro CD a DVD také přispěla k výslednému rozhodnutí vyjmout úkol s DVD ze stanoviště.

- zdroj světla umisťují do 1. maxima, odkud se paprsky dále rozbíhavě šíří směrem „doleva“.

V pojetí úkolu byly proto provedeny následující změny: Samotný obrázek 4-3 byl upraven do podoby obrázku 4-2. Doplněny byly popisky zdroje světla, difrakční mřížky, ale také označení k -tého maxima (konkrétně jako 1. maximum). A jak již bylo řečeno, byla přidána konceptuálně jednoduchá úloha přímo zaměřená na orientaci v obrázku.



Obrázek 4-3: Původní podoba schématu v pracovním listu
Difrakce na optické mřížce. Převzato z: Machalická (2017)

5 Malusův zákon

Zcela novým stanovištěm je *Malusův zákon*. Inspirací k němu byl stejnojmenný experiment ze *Sbírky fyzikálních pokusů*. Žáci se nejprve seznámí s polarizačními filtry, které dále využívají k prozkoumání závislosti intenzity lineárně polarizovaného světla na úhlu natočení filtru vzhledem k rovině polarizace dopadajícího světla. Kromě samotného prověření Malusova zákona čeká žáky také úkol, ve kterém zkoumají vliv polarizačního filtru na intenzitu jím prošlého světla za předpokladu, že na filtr dopadá nepolarizované světlo.

Stanoviště se řadí mezi časově optimálně náročné. Skupiny žáků trávily nad úkoly ve finální podobě cca 30 - 35 minut.

5.1 Představení stanoviště

Cílem aktivit na stanovišti *Malusův zákon* je, aby žáci:

- Pomocí polarizačního filtru dokázali rozlišit polarizované a nepolarizované světlo.

- Změřili pomocí vhodné aparatury intenzitu světla před a po průchodu jedním polarizačním filtrem.
- Proměřili závislost intenzity polarizovaného světla na úhlu otočení roviny polarizace a ověřili tak známou teoretickou závislost (Malusův zákon).
- Dokázali svá měření graficky znázornit a dále analyzovat (např. srovnáním s proloženou křivkou teoretické závislosti v grafu).

Stanoviště je tvořeno krátkým teoretickým úvodem, čtyřmi úkoly a závěrem. Teoretický úvod velice stručně představuje polarizaci⁴⁰ jako jev vysvětlitelný pomocí vlnové podstaty světla. Žákovu pozornost se snaží vést směrem k rozdílům mezi polarizovaným a nepolarizovaným světlem, využití polarizačních filtrů. Potřebná teorie jako např. Malusův zákon, proměna intenzity světla, je prokládána celým pracovním listem. Tak se žák může zaměřit vždy na konkrétní fyzikální jev či princip. Žák na stanovišti zkoumá především intenzitu světla v souvislosti s polarizací, podrobnosti k pochopení principu polarizace a přesnější funkce polarizačního filtru jsou součástí stanoviště *Polarizace světla*, které se v průběhu vývoje stanovišť od tématu *Malusův zákon* oddělilo⁴¹.

Závěr stanoviště je věnován shrnutí získaných poznatků o vlastnostech polarizovaného světla a vlivu polarizačních filtrů na jeho intenzitu.

5.2 Úkoly na stanovišti

5.2.1 Úkol 1: Zkoumání polarizačních filtrů

Pomůcky: polarizační filtry, notebook či mobilní telefon

Průběh: Žáci se seznámí s polarizačními filtry a s jejich pomocí zkoumají, kde a jak ve svém okolí mohou pozorovat polarizované světlo. Hlavním cílem tohoto úkolu je nechat žáky pracovat s pomůckou, se kterou se ve škole nemuseli setkat, poskytnout jim dostatek času na její prozkoumání (skládání a otáčení filtrů) tak, aby v navazujících úkolech věděli, s čím pracují a co mohou v dalších experimentech očekávat za změny.

Poznámky: V úkolu žáci pracují s předměty označenými jako „běžné“. Do této kategorie předmětů spadají všechny předměty, které nejsou zdrojem

⁴⁰ Nevěnuje se příliš podrobně ani vlnové povaze světla, jako je tomu u *Polarizace světla*.

⁴¹ Podrobněji k tomuto vývoji v části práce 5.3 a 6.

polarizovaného světla. Jiným než běžným předmětem je tak pro žáky displej jejich mobilního telefonu či obrazovka notebooku. Během testování úkolu nebyl ze strany žáků zaznamenán problém s porozuměním tomuto označení.

5.2.2 Úkol 2: Intenzita světla při průchodu jedním filtrem

Pomůcky: Zdroj světla (žárovka), rámeček na polarizační filtr (vytisknuto 3D tiskem), polarizační filtr, luxmetr (směrový, Vernier LS-BTA), notebook s Vernier softwarem⁴², optická lavice se stojany, zdroj stejnosměrného napětí pro napájení zdroje světla.

Průběh: Poté, co se žáci kvalitativně seznámí s polarizačními filtry, následuje úloha zaměřená na zkoumání intenzity světla prošlého filtrem. Nejprve žáci proměřují pomocí luxmetru případ, kdy na jeden polarizační filtr dopadá nepolarizované světlo. Dle postupu v pracovním listu určí intenzitu zdroje světla bez polarizačního filtru s umístěným rámečkem, následně přidají polarizační filtr do rámečku a měření provedou také pro několik různých natočení filtru v rámečku. Na základě naměřených hodnot formulují žáci závěr, a sice přibližný vztah pro chování intenzity nepolarizovaného světla po průchodu polarizačním filtrem a její závislost na úhlu otočení polarizačního filtru.

Poznámky: Při měření intenzity zdroje světla bez polarizačního filtru je důležité umístit prázdný rámeček mezi čidlo a zdroj světla, neboť ovlivňuje množství světla dopadajícího ze zdroje do čidla. Do rámečku je následně zasazen polarizační filtr a měřena hodnota intenzity prošlého světla, která při takto nastaveném měření vychází přibližně poloviční.

Do měření se promítá vliv odrazů světla od stěn místnosti, nedokonalé umístění polarizačního filtru v rámečku⁴³, světelný šum (denní světlo). Měření intenzity tak kolísá kolem teoretické poloviční hodnoty intenzity naměřené bez rámečku. Žáci tyto odchylky obvykle považují za významné a dochází k závěru, že intenzita nepolarizovaného světla při průchodu jedním polarizačním filtrem závisí na úhlu natočení filtru. Zde je na místě, aby zasáhl lektor a s vyhodnocením měření,

⁴² Žáci pracují v programu LoggerPro.

⁴³ A to především pro úhel natočení 45°, 135° atp. od původního umístění filtru, neboť filtr zcela nevyplní oblast rámečku a část světla dopadá do čidla přímo ze zdroje, aniž by prošla filtrem. Pro účely experimentu je tato přesnost dostačující, neboť změna intenzity na polovinu je pozorovatelná.

interpretací výsledků pomohl. To znamená, aby proběhla diskuze na téma nepřesností měření, velikosti odchylek od střední hodnoty měření atp.

5.2.3 Úkol 3: Proměření Malusova zákona

Pomůcky: Zdroj světla (žárovka), stejnosměrný zdroj napětí, rámeček na polarizační filtr, otočný polarizační filtr, luxmetr (směrový, Vernier LS-BTA), notebook, optická lavice se stojany.

Průběh: Úvodem třetího úkolu je představena matematická podoba Malusova zákona, tj. závislost intenzity prošlého světla na úhlu natočení polarizačních filtrů, ve tvaru $I = I_0 \cos^2 \alpha$, kde I_0 je intenzita světla dopadajícího na filtr a α úhel vzájemného natočení filtrů. Na základě této matematické představy a zkušenosti s polarizačními filtry z prvního úkolu žáci odhadnou podobu závislosti intenzity polarizovaného světla na úhlu natočení polarizačních filtrů a graficky ji znázorní. Svůj odhad pak ověří proměřením závislosti. Přitom pracují s aparaturou, ve které mezi zdroj světla a luxmetr umístí jeden statický polarizační filtr v rámečku a do těsné blízkosti druhý polarizační filtr s otočnou rovinou polarizace. Měření se provádí od nulové odchylky rovin polarizace filtrů a probíhá do 180° s krokem 10° . Výstupem měření je graf, který lze porovnat s odhadovanými průběhy závislosti.

Poznámky: Odhady, které žáci dělají v první úloze, odráží také část jejich matematické zdatnosti. U skupin, které byly z nižších ročníků středních škol, byl odhad podobný funkci sinus či kosinus, tedy hodnoty intenzity světla byly kladné i záporné. Také se v odhadech lišila perioda zakreslené funkce, která byla dvojnásobná vzhledem ke správné hodnotě.⁴⁴

5.2.4 Úkol 4: Zpracování naměřených hodnot

Pomůcky: Notebook s Vernier softwarem, naměřená data.

Průběh: Posledním úkolem stanoviště před celkovým závěrečným shrnutím je rozbor naměřených dat. Žáci porovnají svůj odhad s měřením, všímají si významných hodnot v grafu, které mohou indikovat nepřesnosti měření. Přímou se věnují rozdílům hodnot intenzity pro úhel natočení filtrů rovný 90° v případě naměřené závislosti a v případě teoretické předpovědi, kterou dává Malusův zákon. Dále naměřenými hodnotami v grafu proloží teoretickou závislost, která odpovídá

⁴⁴ To může do jisté míry souviset se snahou napodobit průběh známé goniometrické funkce ve své základní podobě.

předpisu $I = I_0 \cos^2 \alpha + D$. Předpis takto proloženého grafu intenzity porovnávají s Malusovým zákonem a zamýšlí se nad fyzikálním významem konstanty D , který následně konzultují s lektorem. Poslední úlohou je navrhnout zlepšení experimentu tak, aby byla hodnota právě této konstanty D co nejmenší.

Poznámky: V tomto úkolu se žáci zamýšlí nad příčinami různých nepřesností v měření. Porovnání Malusova zákona, jakožto teoretické předpovědi, s reálně naměřenými hodnotami žákům umožňuje si lépe uvědomit rozdíly mezi „jednoduchou“ školní teorií a jejím reálným využitím⁴⁵. Odhalení rozdílu mezi teoretickou závislostí a křivkou aproximující jejich měření, byť pomocí kontroly jedné hodnoty, je tak pro žáky důležitým a netriviálním úkolem. Velikost konstanty D odpovídá světelnému šumu v místnosti⁴⁶.

Poslední úkol také přináší propojení matematiky, konkrétně transformace grafů funkcí a jejich předpisy, a fyziky. Úkol tak představuje žákům jednu z typických metod zpracování dat, kdy je porovnávají s určitou očekávanou závislostí či prokládají vhodnou funkcí.

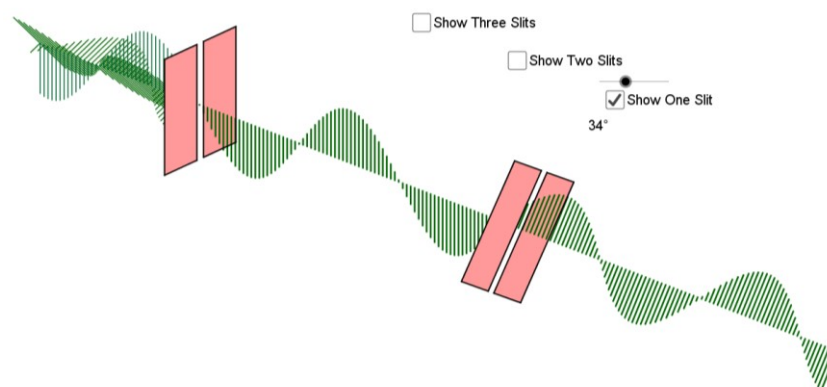
5.3 Proměny stanoviště

První testovaná verze tohoto stanoviště měla odlišnou podobu. Z výše uvedených úkolů zahrnovalo stanoviště část věnující se kvalitativnímu zkoumání polarizačních filtrů (viz 5.2.1), proměření Malusova zákona a následnou analýzu naměřené závislosti. Těm předcházela teoretický úvod, ve kterém se žáci seznamovali s vlnovou povahou světla a podrobněji zkoumali princip polarizace pomocí interaktivního apletu, viz obrázek 5-1. Úkolem žáků bylo hledat analogie mezi teorií a modelem v apletu, a to ihned v návaznosti na představenou část odborného textu.

⁴⁵ Fyzikální zákony, se kterými se žáci setkávají ve škole, sice popisují okolní svět, ale často pracují s určitým zanedbáním. Jedním příkladem za všechny může být určení doby volného pádu t míče o hmotnosti m z dané výšky h . Ve školních výpočtech bývá zanedbaný odpor vzduchu. Porovnání experimentální hodnoty a teoretické hodnoty, která je určena pouze pomocí vztahu pro dobu volného pádu $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$, ukazuje, že pro reálný svět je započítání odporu vzduchu důležité. K těmto „školním“ zanedbáním dochází mj. z důvodu zjednodušení situace, kterou se snažíme pochopit. Nejprve je dobré pochopit jednoduchý princip, který je možné následně doplňovat a „komplikovat“.

⁴⁶ Měření neprobíhá v optické kóji, ale v hlavním prostoru laboratoře, neboť do optické kóje je umístěno stanoviště *Interference*, jehož měření vyžaduje speciální světelné podmínky více než stanoviště *Malusova zákona*.

Celá teorie byla v původní verzi uvedena na začátku pracovního listu v teoretickém úvodu⁴⁷, pouze byla proložena několika úlohami.



Obrázek 5-1: Podoba apletu z první verze stanoviště *Malusův zákon*

Část, která se věnuje intenzitě světla procházejícího jedním polarizačním filtrem (příčměž dopadá světlo nepolarizované), byla pouze bonusová a byla určena skupinám, které by na stanovišti pracovaly velmi rychle. Jelikož se tak žáci nejprve setkali s Malusovým zákonem, byl úkol vystavěn odlišně. Žáci spíše testovali, zda Malusův zákon platí také pro dopadající nepolarizované světlo, zatímco v konečné podobě úkolu hledají vztah bez možnosti srovnání s jinou závislostí.

Testování stanoviště ukázalo, že je časově velmi náročné, žáci stráví poměrně dlouhou dobu u apletu samotného, přičemž potřebují pomoc lektora k vyplnění úkolů, zorientování se v celé situaci. Naopak zbytek stanoviště zvládají poměrně snadno bez větších komplikací⁴⁸ či asistence lektora. Ve zpětných vazbách byla část s apletem reflektována červenou barvou, což odpovídalo zkušenosti lektorů. Téma polarizace bylo pro žáky podané příliš rychle, nesrozumitelně. Navíc se k teoretickému úvodu vraceli na výzvu lektora ve chvíli, kdy měli provádět odhad průběhu grafu intenzity podle Malusova zákona, neboť jej v množství informací v úvodu přehlédli⁴⁹.

Při asistenci na stanovišti se ovšem také ukázalo, že bližší představení polarizace a práce s modelem jsou pro žáky přínosné, neboť se pak lépe orientují ve zbývajících úkolech na stanovišti a ve společném shrnutí v závěru jejich návštěvy v

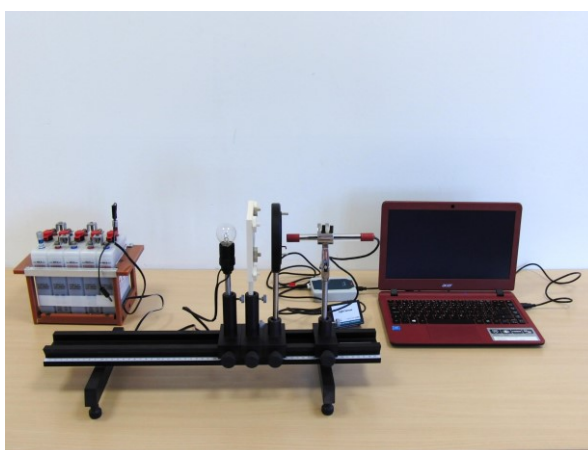
⁴⁷ Tedy i představení Malusova zákona, ke kterému ve finální verzi žáci dojdou až u třetího úkolu.

⁴⁸ Až na technické nedostatky původního složení aparatury, ke kterému bude ještě uvedeno pár slov.

⁴⁹ Lze také uvažovat, že si informaci nepamatovali či ji nepřčetli vůbec. Každopádně v množství informací, které se žáci dozvěděli v úvodním textu, do značné míry zanikla.

laboratoři dokázali princip polarizace vysvětlit správně. Z toho důvodu došlo k rozdělení stanoviště: podrobnější představení polarizace pomocí apletu bylo rozpracováno do stanoviště *Polarizace světla* a stanoviště *Malusův zákon* zůstalo méně teoretické, zato bylo přidáno další měření (původně jen bonusový úkol).

Nové stanoviště *Malusův zákon* prošlo také několika úpravami na základě dalšího testování. První testování odhalilo mj. významný technický nedostatek, a sice použití nevhodného zdroje napětí pro napájení světelného zdroje. K proměření intenzity světla je nutný zdroj světla, jehož intenzita se při běžném provozu nemění vůbec či zanedbatelně kolísá⁵⁰. Jelikož samotný luxmetr měří s určitou vzorkovací frekvencí, může být do měření vnesena chyba již při měření intenzity zdroje samotného, bez přidání polarizačního filtru. Interaktivní fyzikální laboratoř disponuje vhodně upravenou žárovkou, která může být napájena zdrojem stejnosměrného napětí (6V), byla proto pro experiment použita. Jako zdroj byl použit akumulátor (viz obrázek 5-2).



Obrázek 5-2: Příprava stanoviště *Malusův zákon* s použitím akumulátoru.

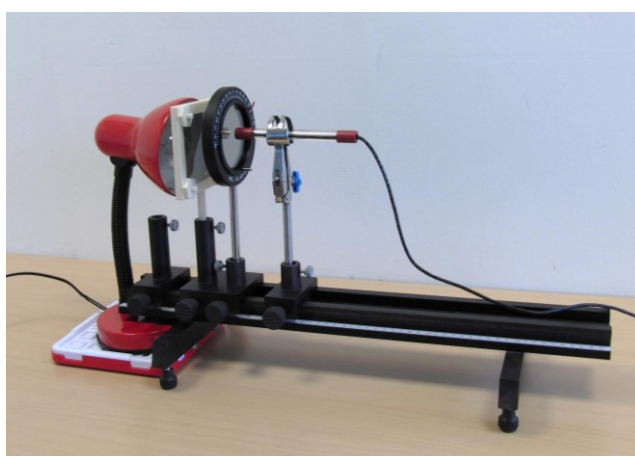
Přestože byla celá úloha několikrát proměřena před žákovským testováním bez komplikací, během prvního měření žáků se na naměřených datech značně projevilo vybíjení akumulátoru. Vlivem úbytku napětí na akumulátoru klesala v průběhu několikaminutového měření intenzita samotného světelného zdroje. V kombinaci s polarizačními filtry se hodnota měřené intenzity světla dostala na hranici citlivosti luxmetru, tudíž měření nebylo pro další zkoumání použitelné.⁵¹

⁵⁰ Z toho důvodu můžeme vyloučit zařízení napájená z běžné elektrické sítě.

⁵¹ Pro žáky byla interpretace naměřených hodnot naopak velice přínosná. Přestože nezískali data potřebná pro ověření Malusova zákona, získali mnoho zajímavých zkušeností s analýzou měření, které nevychází dle fyzikových představ, a s odhalováním možných problémů.

Akumulátor byl tak v aparatuře experimentu nahrazen zdrojem stejnosměrného napětí⁵², u kterého nedocházelo k poklesu napětí v průběhu měření.

Jelikož při sestavování experimentu byl rozebírán i problém rychlého vybíjení akumulátoru, byla vyzkoušena také alternativa s proměnlivým světelným zdrojem, žárovkou v klasické stolní lampě napájené z elektrické sítě (230 V)⁵³. Uspořádání experimentu ukazuje obrázek 5-3. Měření bylo nastavené tak, aby luxmetr zaznamenával intenzitu po určité době (konkrétně 10 s) a do grafu vynesl průměrnou hodnotu. Proměření Malusova zákona dle postupu z úkolu 3 finální podoby stanoviště dávalo vyhovující výsledky (viz obrázek 5-4).



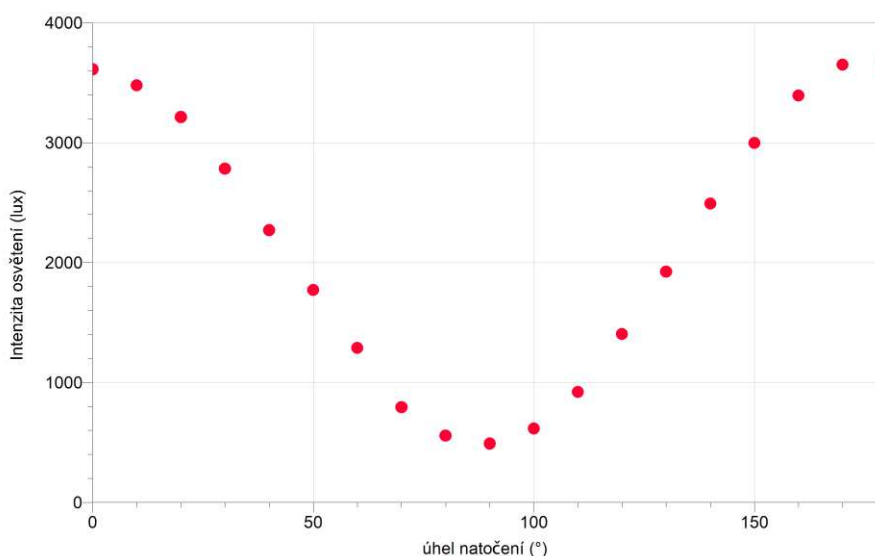
Obrázek 5-3: Uspořádání experimentu proměření Malusova zákona se stolní lampou.

Toto nastavení experimentu prodloužilo celkovou dobu měření. Světlo ze stolní lampy také nebylo zcela vhodné pro měření úkolu 2 a 4 z finální podoby stanoviště, neboť bylo více ovlivněno množstvím odrážejícího se světla, stejně jako světlem procházejícím mimo polarizační filtr. Z toho důvodu byl pro experiment použit zdroj světla s nekolísající intenzitou.

⁵² Přesněji se jednalo o regulátor střídavého napětí, ze kterého bylo možné odebírat nekolísající usměrněné napětí 6V.

⁵³ Měření, které ukazuje proměnlivost intenzity, je provedeno a popsáno např. v *Kuchařce jednoduchých experimentů* vydávanou firmou Vernier, dostupné z:

<https://www.vernier.cz/experimenty/kucharka/index.php?o=fyz-optika&s=vse&sw=vse>

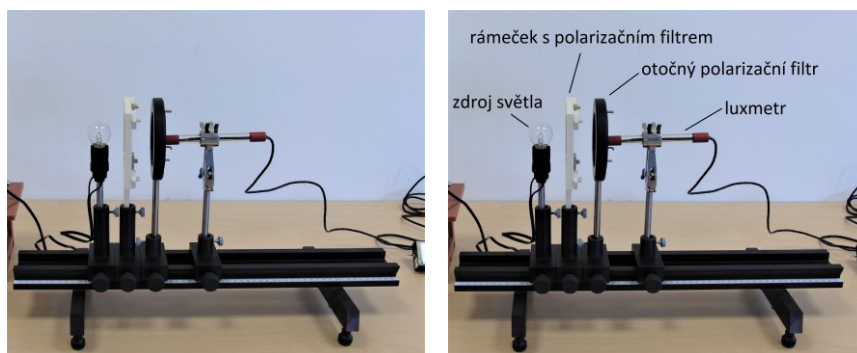


Obrázek 5-4: Naměřený průběh závislosti intenzity světla žárovky stolní lampy po průchodu polarizačními filtry na úhlu vzájemného natočení filtrů (roviny polarizace).

Kromě technické úpravy experimentu došlo ke zjednodušení teoretického textu a také k jeho rozdělení do celého stanoviště. Zpětná vazba ukázala, že takto pojatá teorie je pro žáky značně srozumitelnější, na znění Malusova zákona nemusel upozorňovat lektor a práce žáků na stanovišti byla více samostatná.

Na základě zkušeností lektorů z průběhu testování byly upraveny a doplněny ilustrační fotografie k experimentům. Žáci několikrát sestavili aparaturu chybně, nepoužili statický polarizační filtr, neboť se domnívali, že otočný filtr obsahuje již oba požadované filtry⁵⁴. Z toho důvodu byla v postupu pracovního listu zvýrazněna informace o přesném nastavení aparatury experimentu. Zároveň byly do obrázku přidány popisky jednotlivých částí aparatury (viz obrázek 5-5). Pro lepší orientaci v nastavení experimentu byly přidány fotografie umístění a otáčení filtru také v úkolu 2.

⁵⁴ Otočný filtr je součástí optické sady, jejíž prvky jsou ve srovnání s plastovým rámečkem z 3D tisku masivní. Domnění žáků, že pomůcka v sobě obsahuje jeden pevně zabudovaný filtr a jeden otočný, je tak vcelku pochopitelné.



Obrázek 5-5: Ilustrační fotografie aparatury pro ověření Malusova zákona (vlevo), Ilustrační fotografie doplněná o popisky částí aparatury (vpravo).

6 Polarizace světla

Jak již bylo uvedeno, stanoviště *Polarizace světla* vzniklo oddělením a doplněním z původní podoby stanoviště *Malusův zákon*. Jedná se tak o zcela nové stanoviště, a zároveň o jediné stanoviště tematického celku, které pracuje s interaktivním apletem. Ten je dostupný na adrese <https://www.geogebra.org/m/tkecrrwb>. V rámci úkolů tohoto stanoviště se žáci podrobněji seznámí s vlnovou povahou světla, polarizovaným a nepolarizovaným světlem a polarizačními filtry. Představu, kterou si vytváří pomocí modelu v apletu, doplňují zkušenostmi z práce s reálnými polarizačními filtry. Povahou činností a úkolů se stanoviště řadí více ke kvalitativně zaměřeným⁵⁵.

Na stanovišti žáci stráví 20-30 minut, což jej činí nejkratším stanovištěm tematického celku.

6.1 Představení stanoviště

Cílem aktivit na stanovišti *Polarizace světla* je, aby žáci:

- Dokázali popsat světlo jako elektromagnetické vlnění.
- Dokázali se zorientovat v interaktivním prostředí (např. apletu) a aktivně jej využívat pro modelování určitých situací.
- Tvořili vlastní hypotézy a v praxi je ověřovali jednoduchými experimenty.
- Dokázali vysvětlit, co je polarizované světlo, polarizace, k čemu slouží a jak funguje polarizační filtr.

⁵⁵ Číselnou hodnotu musí žáci určit na celém stanovišti pouze jednu a to velmi jednoduchým výpočtem.

Stanoviště *Polarizace* světla se liší uspořádáním úkolů od zbylých čtyř stanovišť tematického celku. Teoretický úvod obsahuje pouze základní informaci o duální povaze světla doplněnou obrázkem elektromagnetické vlny. Dále následuje jediný úkol stanoviště, který ovšem vhodně kombinuje výkladové resp. teoretické části s praktickými úkoly, které mají žáci provádět v apletu či vyzkoušet s polarizačními filtry. V závěru žáci opět shrnou své poznatky a pozorování o polarizovaném světle, navíc se zamýšlí nad problematickou otázkou.

6.2 Úkoly na stanovišti

6.2.1 Úkol 1: Co je polarizace?

Pomůcky: Notebook s interaktivním apiletem⁵⁶, polarizační filtry.

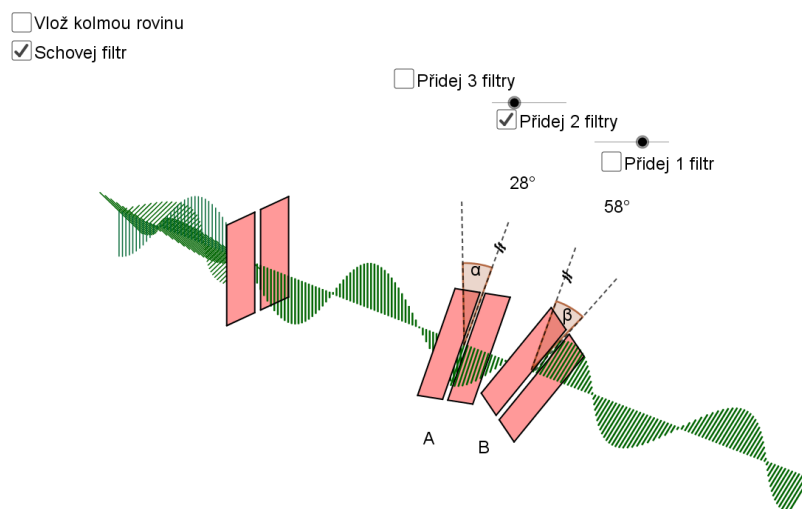
Průběh: Dle pokynů v pracovním listu si žáci spustí apilet a krátce se seznámí s jeho ovládáním⁵⁷. Dále je uvedena část teorie věnující se vektoru elektrické intenzity jako jedné ze dvou složek elektromagnetického záření, kterým je světlo. Žáci mají za úkol blíže analyzovat prostředí apiletu tím, že přiřadí jednotlivé zobrazené prvky apiletu pojmům z uvedené teorie. Třetí úloha je již věnována nepolarizovanému a polarizovanému světle, kdy je úkolem žáků příslušné typy světla najít v apiletu a vyznačit je v obrázku. Následuje série úloh zaměřených na zkoumání roviny polarizace a intenzity světla prošlého filtrem. Žáci si nejprve vytvoří vlastní odhad toho, co se stane při natočení jednoho z filtrů v apiletu. Následně provedou změny pomocí apiletu a dále s polarizačními filtry v praxi. Další úlohy vedou žáky k prozkoumání speciálních případů, kdy polarizační filtry propouští maximum a minimum světla. Jejich úkolem je specifikovat, pro jaký úhel natočení (polohu filtru v apiletu) k dané situaci dojde. Každou situaci, kterou vymodelují v apiletu, si následně zkouší i ve skutečnosti.

Poslední tři úlohy pracovního listu jsou věnovány případům, kdy na filtr dopadá již lineárně polarizované světlo. Jedná se tedy o případy, které lze popisovat Malusovým zákonem. Ten je kvalitativně představen v krátkém odstavci teorie, která je doplněna snímkem z apiletu, viz obrázek 6-1. Žáci vychází z informací na tomto obrázku a jejich úkolem je určit velikost úhlu β , na kterém závisí intenzita světla

⁵⁶ Aplet je dostupný také online na adrese: <https://www.geogebra.org/m/tkeccrrwb>.

⁵⁷ V případě potíží je žákům k dispozici lektor, který může ukázat, jak pohybovat s posuvníky a jak spustit animaci v apiletu.

v oblasti za filtrem B. Dále žáci odhadují, jak se bude intenzita světla v této oblasti měnit, pokud se bude úhel β zvětšovat. Svě odhady kontrolují modelováním v apletu a ve skutečnosti s polarizačními filtry.



Obrázek 6-1: Snímek z apletu k úloze pracovního listu *Polarizace světla*

Závěr stanoviště shrnuje poznatky o způsobu pozorování polarizovaného světla a principu funkce polarizačního filtru. Kromě toho se mají žáci zamyslet nad pravdivostí obecného tvrzení: „*S rostoucím úhlem vzájemného natočení dopadajícího vlnění a polarizačního filtru klesá intenzita polarizovaného světla, které prošlo filtrem.*“

Poznámky: Použitý aplet je vytvořen v prostředí aplikace GeoGebra. Jedná se o upravenou verzi apletu, který je volně dostupný⁵⁸ v online knihovně materiálů zmíněné aplikace a jehož autory jsou Tom Munoz-Britton a Tom Walsh. Pár slov k výběru vhodného apletu pro toto stanoviště bude ještě uvedeno později v práci.

Jako u každého modelu, i zde je potřeba pracovat s jeho nedokonalostmi a nepřesnostmi tak, aby žákům pomohl vytvořit představu dostatečně přesnou a fungující, ale nevytvářel miskoncepce. V rámci stanoviště není na nedokonalosti apletu cíleně upozorňováno⁵⁹, neboť by se žákům s apiletem obtížněji zacházelo a tvorba určité představy by pro žáky byla komplikovanější. V souladu se snahou nejprve vysvětlit složitý jev v určité základní, jednoduché úrovni a teprve pak k němu přidávat hlubší, složitější detaily byla ponechána otázka nedokonalostí apletu na závěr stanoviště, kdy lektor se žáky formou diskuze shrne, co se na stanovišti

⁵⁸ Odkaz na online verzi původního apletu: www.geogebra.org/m/yphvwdda

⁵⁹ Vyjma jedné, kterou je podoba polarizačního filtru.

dozvěděli a při té příležitosti se s nimi pozastaví nad některými nepřesnostmi modelu v apletu. Je možné uvést či připomenout:

- Nepolarizované světlo by bylo lépe představeno jediným vektorem (v apletu zelenou úsečkou), který v čase nahodile mění svou velikost i směr. Aplet se nepolarizované světlo snaží modelovat jako „chaos“. Ve skutečnosti jsou zobrazeny tři vektory, které kmitají každý v jedné rovině, přičemž tyto roviny jsou vůči sobě skloněny o neměnný úhel. Amplituda vlnění, které kmitající vektory vytváří, je pro všechny tyto tři skupiny stejná.
- Kolmý průmět vektoru do roviny, ve které je umístěný první polarizační filtr, by měl být jeden, který se v čase mění. Současné znázornění odpovídá modelu nepolarizovaného světla tak, jak je v apletu.
- Polarizační filtr není štěrbinu, ale opticky anizotropní materiál.
- Celý děj probíhá prostorově. Aplet neumožňuje natočení situace z různých stran, v prostoru.

V úvodu stanoviště je uvedeno, že pro zkoumání polarizace se dále uvažuje pouze vektor elektrické intenzity. Někteří žáci docházeli k závěru, že při průchodu světla polarizačním filtrem dojde k pohlcení celého vektoru magnetické indukce a navíc ještě všech složek elektrické intenzity, vyjma té, kterou polarizační filtr propustí. V průběhu práce či v závěrečné diskusi s lektorem je potřeba se žáky zopakovat, že část magnetické indukce pouze není v apletu zobrazena a po průchodu světla polarizačním filtrem je ve vlně stále obsažena. Vektor magnetické indukce je tak v každý moment kolmý k vektoru elektrické intenzity, po polarizaci pouze kmitá, obdobně jako elektrická intenzita, v jedné rovině.

Jedinou nepřesností, na kterou přímo upozorňuje pracovní list, je způsob vyobrazení polarizačních filtrů. Ty jsou v apletu znázorněny podobně jako štěrbinu. Takové zobrazení dobře znázorňuje, jak je právě natočená rovina polarizace. Bohužel to může zanechat v žácích dojem, že polarizační filtr je cosi jako štěrbinu.⁶⁰ Tomu se pracovní list snaží předejít jednak tím, že žáci pracují se skutečnými polarizačními filtry, které na první pohled jako štěrbinu nevypadají, jednak uvedením

⁶⁰ Tuto interpretaci lze očekávat, neboť se žáci s podobným konceptem setkají na jiných stanovištích např.: difrakční mřížka, dvojštěrbina.

upozornění, že se nejedná o štěrbinu, v momentě, kdy s filtry v apletu pracují poprvé. Zpětná vazba a prezentace stanovišť žáky ukázaly, že tendence k tvoření této miskoncepce žáci spíše nemají.

S omezenými možnostmi, které nám pro zkoumání dává model, také souvisí poslední úloha celého stanoviště. Následující znění lze najít také v Příloha A jako poslední otázku pracovního listu *Polarizace světla*:

Je možné na základě práce s apletem učinit tento obecný závěr:

„S rostoucím úhlem vzájemného natočení dopadajícího vlnění a polarizačního filtru klesá intenzita polarizovaného světla, které prošlo filtrem.“?

Žáci často odpovídali na otázku pozitivně, tedy že uvedené tvrzení o poklesu intenzity při rostoucím úhlu vzájemného natočení polarizační roviny filtrů platí. Úloha cílí na schopnost žáků vytvořit na základě dílčích poznatků obecný závěr, tj. indukci. Při tvorbě takového závěru ale musí vycházet skutečně pouze z poznatků, které jsou známé, na které žáci sami přišli, které souhlasí s jejich zkušeností⁶¹. Žáci své odpovědi zdůvodňovali využitím ukázky situace v apletu či se skutečnými polarizačními filtry. V obou případech se zastavili u úhlu vzájemného natočení filtrů 90°. Úkol po nich žádá odpověď na obecný problém, je tedy potřeba se zamyslet nad možným dalším vývojem děje, zda by nemohl být periodický či je důvod, proč by zkoumání mělo u hodnoty 90° končit. Žáci, kteří dospěli k chybnému závěru, ovšem po krátké diskuzi s lektorem správné řešení uznali a pochopili.

6.3 Proměny stanoviště

Část úloh pracujících s apletem byla součástí původního stanoviště *Malusův zákon*, jak už ostatně bylo uvedeno. Konkrétně šlo o čtyři úlohy reagující na teorii. První úloha odkazovala pouze na prozkoumání funkcí apletu. Druhá úloha se již zabývala pojmenováním a určením prvků apletu dle teorie, včetně rozpoznání nepolarizovaného světla. Dále se rovnou přešlo k vlastnostem intenzity světla po průchodu různě natočenými filtry a Malusovu zákonu. Z barevné zpětné vazby těchto úloh jasně⁶² vyplynulo, že takto postavená práce s apletem je pro žáky příliš obtížná.

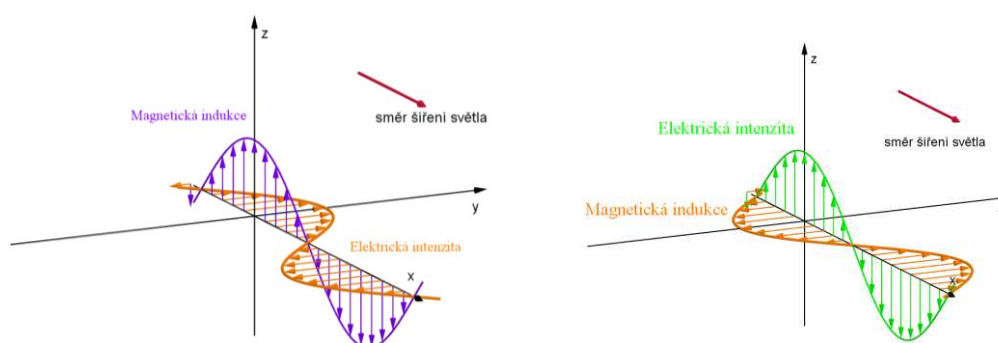
⁶¹ Souhlas s vlastní zkušeností či dokonce selským rozumem nemusí být ve fyzice vždy spolehlivou cestou. Ve světě „našich“ rozměrů s těmito intuitivními představami pracovat ještě lze, v oblastech mikrosvěta, kde vládou principy a postuláty kvantové fyziky, selský rozum a „naše“ zkušenost selhává.

⁶² Nebo lépe červeně, jak lze říci podle pravidel barevné zpětné vazby.

Otázky byly formulované nesrozumitelně, uvedená teorie pracovala s pro žáky neznámými pojmy, které, přestože byly vysvětlené, zůstávaly nepochopené.

Při vzniku samostatného stanoviště se tedy s těmito informacemi pracovalo. Teorie byla přeformulována a rozdělena na kratší části tak, aby žáci v úkolu vždy reagovali přímo na získaný poznatek a teprve po propojení tohoto střípku teorie s modelem či praxí postoupili k dalšímu poznatku.

Na začátek pracovního listu byl připojen obrázek elektromagnetické vlny (obrázek 6-2), aby si žáci mohli lépe představit dvě k sobě kolmé vlny, kmitající vektory atp. Po prvním testování stanoviště byl tento obrázek barevně přepracován, aby elektrická intenzita byla znázorněna touž barvou a měla obdobnou polohu jako v apletu. Z práce žáků, pozorování lektorů i zpětné vazby posledního testování bylo patrné, že takto upravený obrázek žákům pomáhal v porozumění víc než jeho předchozí varianta.

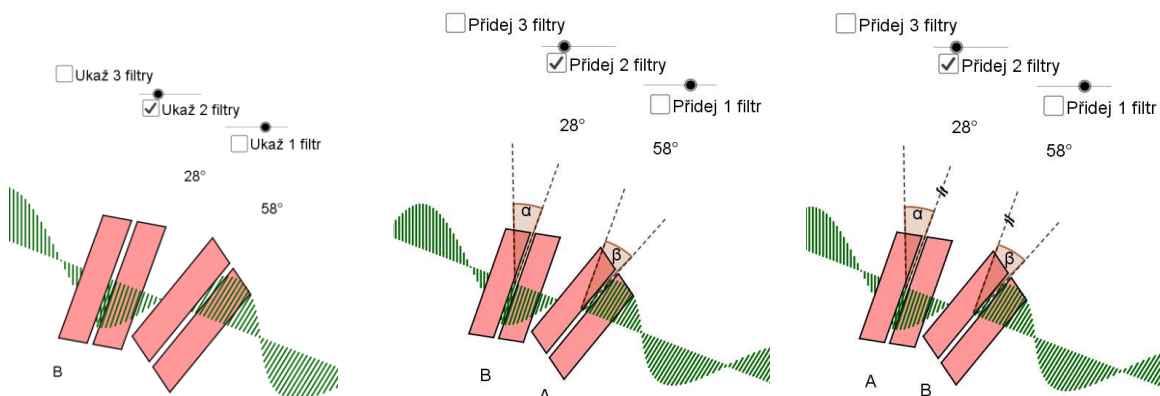


Obrázek 6-2: Elektromagnetická vlna – první (vlevo) a finální verze (vpravo)

Z pozorování a postřehů lektorů vyplynulo také dřívější využití polarizačních filtrů pro ověřování odhadů. Během testování se ukázalo, že žáci zcela intuitivně využívají polarizační filtry již v první úloze, ve které s nimi pracují v apletu. Podle rozvržení stanoviště měli k reálným polarizačním filtrům přejít o dvě úlohy později. Pokyn pro ověřování hypotéz a kontroly principů zjištěných v apletu pomocí polarizačních filtrů tak byl zařazen ihned k úloze, ve které se žáci zabývají polarizačními filtry poprvé.

Podle výsledků testování byla také upravována úloha pracovního listu, ve které žáci pracují s číselnou hodnotou, úhlem β . Úloha, v níž žáci vycházeli ze situace z části zadané obrázkem (viz obrázek 6-3 vlevo), měla velkou chybovost. Jako výsledek se totiž objevovala hodnota přímo uvedená v obrázku. U první verze úlohy nebylo použito označení úhlů, což žákům působilo potíže, během práce jim asistoval lektor. Ve zpětné vazbě se úloha objevovala označená červeně. Žáci

nedokázali určit, zda číselný údaj u filtru B z obrázku 6-3 (vpravo) odpovídá přímo hodnotě úhlu β nebo je počítán pro odchýlení od svislého směru, v jakém se šíří světlo dopadající na filtr A (z téhož obrázku). Obrázek byl proto upraven, jeho vývoj zachycuje obrázek 6-3. Dále bylo upraveno znění zadání úlohy, kromě odkazů na konkrétně označené úhly byla přidána informace kurzívou, upřesňující způsob měření velikosti úhlu natočení filtru.



Obrázek 6-3: Vývoj ilustrace k úloze 7 stanoviště *Polarizace světla* – první verze (vlevo), úprava po prvním testování (uprostřed), finální úprava po druhém testování (vpravo).

Současně s úpravami úloh byl pro potřeby stanoviště přizpůsobován také aplet *Polarization* od T. Munoz-Brittona a T. Walshe:

- Byl přeložen z anglického do českého jazyka.⁶³
- Do apletu byla přidána možnost pomocí zaškrťovacího pole skrýt první z filtrů⁶⁴ a zobrazit kolmou rovinu s průměty vektorů elektrické intenzity nepolarizovaného světla.
- Rozložení prvků apletu bylo přizpůsobeno potřebám stanoviště tak, aby se žáci v prostředí snáze orientovali.

Nedostatky apletu, které jsou uvedeny dříve v této kapitole, se nepodařilo odstranit, přestože jim byla věnována nemalá snaha i čas ze strany autorky i vedoucí práce. Úprava či vytvoření lepšího apletu pro potřeby stanoviště je jistě možnou cestou dalšího vývoje, doplnění a zdokonalení jeho současné podoby.

⁶³ Zajímavé je, že nikdo z žáků na anglickou verzi apletu neupozornil jako na problematickou. Ve zpětných vazbách se v této souvislosti neobjevily žádné komentáře.

⁶⁴ Procházející vlna symbolizující nepolarizované světlo stále končila v oblasti, kde se skrytý filtr nacházel, a dále pokračovala jako polarizovaná. Tento nedostatek se v apletu nepodařilo odstranit.

Výběr apletu

Aplet použitý pro modelování polarizace byl vybrán z dostupných možností a posouzen jako nejvhodnější pro účely a potřeby stanoviště. Výběr dostupných apletů není velký, všechny jsou navíc pouze v anglickém jazyce. Vhodný interaktivní model lineární polarizace světla v českém jazyce se najít nepodařilo. Následuje stručné představení apletů, které byly k tématu polarizace nalezeny v rámci rešerše.

- 1) *Polarization* v prostředí aplikace GeoGebra – originál apletu, který byl použit pro stanoviště *Polarizace světla*, zobrazuje nepolarizované i polarizované světlo, umožňuje zobrazit postupně až tři polarizační filtry, kterými lze otáčet. Aplet dokáže zobrazit proměnlivou intenzitu světla po průchodu více filtry, a to včetně změny sklonu a amplitudy prošlého vlnění.
- 2) *Polarization of Light*⁶⁵ - aplet dostupný online, nepolarizované bílé světlo zobrazuje jako velmi rychle rotující trojici vln (červenou, zelenou a modrou). Znázorňuje dva polarizační filtry, které lze otáčet v mezích 0° - 360°. Aplet dokáže zobrazit změnu amplitudy vlny prošlé filtrem. Změna roviny, ve které vlna kmitá po průchodu filtrem, není dostatečně názorná. Vlnění prošlé filtrem je znázorněno zdvojenou vlnou, jejíž význam se nepodařilo interpretovat.
- 3) *Polarization of Light (3-D Version)*⁶⁶ – aplet v anglickém jazyce dostupný online, velmi se podobá předchozímu uvedenému pojetí. Jsou v něm dostupné stejné funkce a prvky jako v případě apletu *Polarization of Light* s tím rozdílem, že zde je možné tahem myši měnit postavení zobrazené situace v prostoru. Lze si tak prohlédnout situaci „ze všech stran“ a určit, zda došlo ke změně sklonu prošlé vlny či jak se situace jeví z různých pohledů.
- 4) *Polarization of an Optical Wave through Polarizers and Wave Plates*⁶⁷ - simulace vytvořená v prostředí WolframDemonstrationProject umožňuje zobrazit polarizaci vstupující lineární, pravo či levotočivé vlny pro případy

⁶⁵Dostupný na adrese:

<https://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/polarizedlight/filters/index.html>

⁶⁶Dostupný z: <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/java/polarizedlight/3dpolarized/>

⁶⁷Dostupné z:

<https://demonstrations.wolfram.com/PolarizationOfAnOpticalWaveThroughPolarizersAndWavePlates>

nejen lineární polarizace, ale i kruhové a eliptické. Ovšem pouze pro průchod jedním filtrem, který je možné otáčet v mezích 0° - 360° . Není znázorněno nepolarizované světlo. Je možné spustit časový vývoj, obraz je ale sekaný.⁶⁸

Dále byly objeveny dva applety vytvořené v prostředí Java. Jelikož tato aplikace již není podporována, s applety se více nepracovalo.

Pro účely stanoviště byly vyhledávány takové applety, které zobrazují světlo jako vlnu (modelují kmitající vektory). Pro polarizaci podle Malusova zákona bylo nalezeno mnoho dalších appletů, které simulují měření intenzity (umožňují umístit různé množství filtrů mezi zdroj světla a senzor, natáčet filtry a odečítat hodnotu intenzity na modelovaném displeji čidla) ovšem světlo zobrazují jako světelný paprsek, např.: *Polarization of light: Malus' law*⁶⁹. Do této skupiny appletů se také řadí simulovaná laboratoř *PolarizationLab*⁷⁰, která poskytuje obdobné nástroje ke zkoumání polarizace, jak bylo právě popsáno, navíc ovšem na stránkách uvádí teorii a úkoly, které lze pomocí simulované laboratoře plnit. Formou se tak blíží pracovnímu listu.

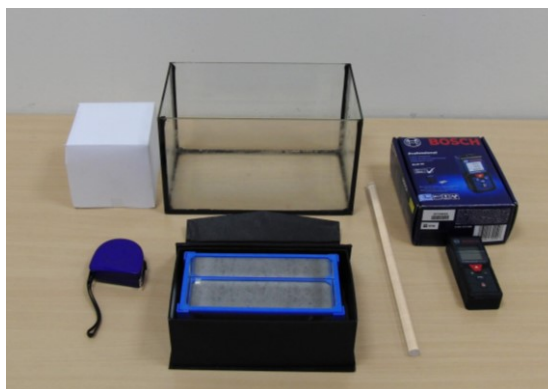
7 Měření indexu lomu

Nově zařazené stanoviště *Měření indexu lomu* je inspirované experimentem *Sbírkou fyzikálních pokusů*. Na stanovišti se žáci nejprve seznámí s digitálním dálkoměrem, kterým měří vzdálenosti. Porovnáním vzdáleností naměřených digitálním dálkoměrem a pásovým měřidlem určí způsob, jakým dálkoměr měří vzdálenost. Z podrobnějšího rozboru principu měření žáci vyvodí vztah pro určení indexu lomu pomocí měření vzdáleností dálkoměrem. Vztah využijí k experimentálnímu určení indexu lomu vody, vzduchu, skla a plastu. Získané hodnoty porovnávají s tabulkovými a zamýšlí se nad vlivy, které v rámci určování indexu lomu zanedbali. Na stanovišti stráví žáci 35 - 40 minut.

⁶⁸ Procesy, které probíhají při spuštění simulace, jsou náročné na výkon počítače. Mezi změnou v nastavení situace a jejím projevem je velká časová prodleva.

⁶⁹ Autorem simulace je Josué Botella Aguado, Grupo de Innovación Docente en Óptica indopTIC. Dostupné z: <https://www.uv.es/indoptic/applets/Malus/index.html>

⁷⁰ Dostupné z: <http://labman.phys.utk.edu/phys222core/Labs/Lab%206.html>



Obrázek 7-1: Připravené stanoviště *Měření indexu lomu*

7.1 Představení stanoviště

Cílem aktivit stanoviště *Měření indexu lomu* je, aby žáci:

- Dokázali pomocí digitálního dálkoměru správně změřit vzdálenost.
- Dokázali ze způsobu měření a naměřených hodnot odhadnout princip fungování zařízení.
- Propojili prakticky získané poznatky s teoretickými a použili základní fyzikální principy k odvození či vysvětlení nových poznatků.
- Využili dostupné zdroje informací k ověření vlastních závěrů.

Stanoviště je uvedeno krátkou teorií věnovanou šíření světla v různých prostředích. Věnuje se rozdílu rychlosti světla v různých prostředích a představuje veličinu index lomu jako poměr rychlostí světla ve vakuu a zkoumaném prostředí. Po teoretickém úvodu následují tři úkoly zakončené závěrečným shrnutím.

7.2 Úkoly na stanovišti

7.2.1 Úkol 1: Měření vzdálenosti v různých prostředích

Pomůcky: digitální dálkoměr, pásové měřidlo, skleněné akvárium s vodou, stínítko (překážka), různé předměty, jejichž vzdálenost lze měřit.

Průběh: Žáci se nejprve seznámí s používáním digitálního dálkoměru. Proměřují několik rozměrů a vzdáleností, které zapisují do připravené tabulky. Při tom provádí měření jedné vzdálenosti opakovaně: pomocí pásového měřidla, pomocí dálkoměru v pozici, kdy je jeho přední hrana zarovnána s hranou měřeného předmětu, a pomocí dálkoměru v pozici, kdy je jeho zadní hrana zarovnána s hranou měřeného objektu. Jedno měření provádí skrze akvárium s vodou. Z rozdílu hodnot měření pásovým měřidlem a dálkoměrem (v různých pozicích) žáci určují, odkud

měří dálkoměr vzdálenost a jaká je délka přístroje. Dále se žáci zamýšlí nad příčinou větší odchylky jednoho z měření. Dostanou se k poznatku, že správnost měření dálkoměrem závisí na umístění dálkoměru a na prostředí, skrz které dálkoměr měří.

Poznámky: Někteří žáci se snažili změřit příliš malé vzdálenosti a setkali se s chybovým hlášením dálkoměru. Lektor s nimi může rozebrat omezený rozsah dálkoměru, který je 15 cm – 40 m.

7.2.2 Úkol 2: Jak funguje dálkoměr?

Pomůcky: -

Průběh: Ve druhém úkolu se žáci zamýšlí nad principem, jakým dálkoměr měří vzdálenost, vychází při tom ze závěrů předchozího úkolu. Své nápady zapisují do pracovního listu a následně je konzultují s lektorem. V další úloze společně rozeberou, jak z měření dálkoměru určit index lomu nějakého prostředí. Tato část probíhá formou řízené diskuze, kdy lektor pokládá návodné otázky⁷¹, které žáky postupně dovedou k propojení naměřených vzdáleností a rozdílných rychlostí světla v různých prostředích a možným určením indexu lomu. Žáci tyto společné úvahy využijí v poslední úloze druhého úkolu, ve které vyjádří index lomu pomocí měřitelných vzdáleností.

Poznámky: Princip, jakým dálkoměr měří vzdálenost, žáci popisovali většinou bez problémů. Při rozboru určování indexu lomu se v případě problémů s porozuměním osvědčilo ujasnit si se žáky, jakých hodnot může index lomu nabývat a jak to souvisí s poměrem rychlostí, které jej definují. V některých případech žákům pomohlo matematické odvození vztahu.

7.2.3 Úkol 3: Určování indexu lomu

Pomůcky: digitální dálkoměr, pásové měřidlo, akvárium s vodou, plastová tyčka, skleněný hranol, stínítko (překážka), matematicko-fyzikální tabulky.

Průběh: Žáci dle uvedeného postupu změří nejprve skutečný rozměr skleněného hranolu, dále tutéž vzdálenost změří „skrz sklo“ dálkoměrem. Ověří, že v případě měření dálkoměrem je hodnota zatížena pouze chybou danou prostředím, nikoli ještě umístěním dálkoměru. Hodnoty zapisují do připravené tabulky. Dále využijí vztahu pro určení indexu lomu, který odvodili v předchozím úkolu, dosadí získané hodnoty a určí index lomu skla. Pomocí matematicko-fyzikálních tabulek

⁷¹ Množství, otevřenost atd. otázek se liší v závislosti na aktivitě a znalostech skupiny.

určí teoretickou hodnotu indexu lomu pro sklo a hodnoty indexu lomu porovnají. Stejným postupem získají index lomu dalších prostředí, kterými jsou voda, plast a vzduch. V poslední úloze se žáci zamýšlí nad nepřesnostmi, které ovlivnily jejich měření.

Poznámky: Žáci mohou teoretické hodnoty vyhledávat také na internetu. Pro sklo a plast jsou uváděny hodnoty v určitém rozmezí. Výsledné hodnoty indexu lomu se dařilo určit s chybou do 9%. Žákovské měření lze označit za velmi nepřesné, pokud je hodnota určovaného indexu lomu blízká 2 či větší. Pokud hodnota indexu lomu vychází menší než 1, měli by si chybu uvědomit žáci sami.

Při výběru materiálů pro proměrování bylo vyzkoušeno také hasivo Novec 1230, pro který byl naměřen index lomu 1,26⁷². Jelikož se hodnota indexu lomu pohybuje na podobných hodnotách jako pro vodu⁷³, nebyl Novec do měřených prostředí na stanovišti zařazen.

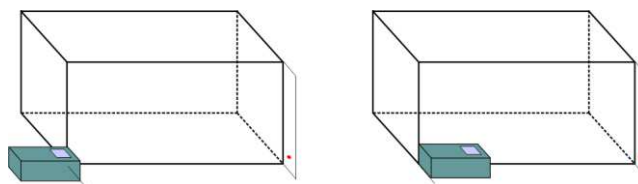
7.3 Proměny stanoviště

První testovaná verze stanoviště měla delší první úkol. V tabulce, do které měli žáci zapisovat naměřené hodnoty pro různé způsoby umístění dálkoměru, byly vynechány některé řádky. Žáci je měli vyplnit měřením dalších libovolných vzdáleností. Testování ukázalo, že žáci do volných polí nic nezapisují. V některých zpětných vazbách byly dokonce uvedeny komentáře zmiňující příliš mnoho předmětů k proměření. Z toho důvodu byla postupně tabulka omezena na menší počet předmětů a v konečné podobě se jako nejlepší ukázala varianta, která neumožňovala žákům přidávat další předměty a obsahovala pouze nejnutnější měření pro tvorbu závěrů v následujících úkolech.

Součástí úkolu byly také nákresy (obrázek 7-2), které ukazovaly dvě různá umístění dálkoměru při měření. Tyto nákresy byly nahrazeny fotografiemi a výraznějšími popisky, neboť v průběhu práce žáci tyto instrukce opakovaně přehlíželi.

⁷² Tabulková hodnota je větší, $n_{novec} = 1,36$. Měření proběhlo v akváriu, vzdálenost $l_d = 0,323$ m.

⁷³ Čas věnovaný přípravě a provedení experimentu (manipulace s kapalinou) nepřinese dostatečně „zajímavý“ výsledek.



Obrázek 7-2: Původní ilustrace umístění dálkoměru ve dvou různých pozicích.

Největší proměnou na stanovišti prošel úkol 2. Pro první dva termíny testování byl součástí úkolu doplňovací text (viz obrázek 7-3), který měl žáky navést na odvození vztahu pro index lomu samostatně, bez pomoci lektora. Během testování byla u tohoto úkolu nutná asistence lektora, který žákům s doplněním textu pomohl. Práce se skutečnou vzdáleností a vzdáleností, kterou dálkoměr změří, a tím, co si dálkoměr „myslí“, že měří, to vše za současného propojení vzdáleností s rychlostmi a dříve měřenými veličinami bylo pro žáky příliš náročné. Také ve zpětné vazbě se tato část pracovního listu opakovaně objevovala červeně vyznačena. Problémy s úlohou přetrvaly i poté, co byl text přeformulován a zkrácen. Proto byla úloha změněna a doplňovací text byl nahrazen přímo diskuzí s lektorem, který by byl na stanovišti přítomný i dříve. Potřeba konzultace s lektorem pro splnění důležité části stanoviště se samozřejmě projeví v míře samostatnosti, kterou žáci pro splnění stanoviště potřebují. Dopad na samostatnost práce žáků na stanovišti, která je o něco menší než při použití doplňovacího textu, je kompenzován zkrácením doby, kterou žáci úkolem tráví, a to přibližně o 5 minut. Asistence lektora zároveň přispěla k lepšímu porozumění principu měření indexu lomu ze strany žáků, jak vyplynulo ze zpětné vazby testování upravené verze stanoviště.

V souladu s komentáři žáků a lektorů, kteří se k podobě stanoviště vyjadřovali, byly upraveny otázky závěrů tak, aby nedocházelo k jejich duplikaci s úlohami uvedenými dříve v pracovním listu.

V průběhu testování došlo také k několika drobným změnám v teoretickém úvodu a formulacích úkolů tak, aby lépe navazovaly na uvedené velké změny v jiných částech pracovního listu.

Nyní se blíže podíváme na měření z předchozího úkolu, kdy bylo použito akvárium s vodou. Naměřené hodnoty, nyní už po opravě vzhledem k umístění dálkoměru při měření, jsou tedy:

Objekt	l'_d [m] (bez opravy)	l_d [m] (po opravě)	l_m [m]
Akvárium s vodou			

Při měření délky akvária uplyne od vyslání do přijetí paprsku doba t . Za tuto dobu dorazí paprsek na konec akvária, odrazí se a vrátí zpět do čidla dálkoměru. Urazí tedy [] délky akvária. Proto dále budeme pracovat s poloviční dobou $t/2$.

Paprsek, který se pohybuje ve vzduchu rovnoměrně rychlostí c , urazí za dobu $t/2$ dráhu $l_1 = []$. Ať už měříme v jakémkoli prostředí, dálkoměr je sestaven tak, že si vždy „myslí“, že měření probíhá ve vzduchu. Pokud tedy měříme v jiném prostředí než ve vzduchu, odpovídá tato hodnota na dálkoměru hodnotě l_d , nebo hodnotě l_m z tabulky výše? []

Jestliže se paprsek pohybuje jiným prostředím (např. vodou) rychlostí v , urazí ve skutečnosti za tento čas dráhu $l_2 = []$. Tato dráha odpovídá hodnotě [] z tabulky výše.

Rychlost šíření světla ve vodě je **větší/menší** než ve vzduchu. Proto bude naměřená dráha l_1 **větší/menší** než dráha l_2 .

Z těchto poznatků dokážeme vyjádřit rychlost světla ve vzduchu $c = []$ a rychlost světla ve vodě $v = []$. Dosadíme za tyto rychlosti do definičního vztahu pro index lomu $n = \frac{c}{v}$ a upravíme jej tak, abychom získali index lomu vyjádřený pomocí veličin měřitelných dálkoměrem (tj. pomocí vzdáleností):

$n = []$

Obrázek 7-3: Doplňovací text k odvození indexu lomu z původní verze stanoviště.

8 Youngův experiment

Stanoviště věnované interferenci světla a dvojtěrbínovému experimentu nazvané *Youngův experiment* je inspirován stejnojmenným úkolem na stanovišti Interference a difrakce světla původního tematického celku *Optika*. Youngův experiment je tam proveden na dvojtěrbíně vyrobené z tuh do mikrotužky.

V novém pojetí se stanoviště nejprve věnuje seznámení s interferencí vlnění za využití proužků moaré⁷⁴. Žáci provedou Youngův dvojtěrbínový experiment⁷⁵ a ověří vlnovou povahu světla. Následně na základě vlastního bádání a pozorování odvodí vztah pro vzdálenost sousedních maxim interferenčního obrazce. V případě

⁷⁴ Moaré je známý fyzikální jev, více o něm si lze přečíst např. zde: https://en.wikipedia.org/wiki/Moir%C3%A9_pattern. Proužky moaré je označení pro pomůcku, která se skládá ze dvou průhledných fólií (či papíru a folie) potištěných soustřednými kružnicemi, která se využívá právě pro demonstraci skládání vlnění.

⁷⁵ Naproti Youngovu experimentu v původním celku *Optika* jsou použity profesionálně vyrobené dvojtěrbiny, dodávané jako součást optických sad.

rychlého postupu na stanovišti mohou vytvořit konkrétní interferenční obrazec na základě jimi odvozeného vztahu a známé vzdálenosti sousedních maxim.

Stanoviště lze zařadit mezi časově optimální, podobně jako v případě *Malusova zákona* potřebují žáci na jeho splnění přibližně 35 minut.

8.1 Představení stanoviště

Cílem aktivit stanoviště *Youngův experiment* je, aby žáci:

- Dokázali vysvětlit, co je to a jak vzniká interference vlnění.
- Vysvětlili souvislost mezi interferencí vln na vodní hladině a interferenčním obrazcem na stínítku při průchodu světla dvojštěrbinou.
- Navrhli a provedli jednoduché ověřovací kvalitativní experimenty.
- Provedli měření podle postupu a uvědomili si chyby, kterými je měření zatíženo.
- Nalezli souvislosti mezi měřením či pozorováním a matematickým popisem.
- Předpověděli výsledek experimentu pro zadané vstupní hodnoty při využití jimi dříve odvozené závislosti.⁷⁶

Stanoviště se skládá z teoretického úvodu, čtyř úkolů, závěru shrnujícího poznatky o interferenci a pátého bonusového úkolu. V teoretickém úvodu je představena interference vlnění, jsou uvedeny podmínky vzniku interferenčního obrazce a vysvětleny pojmy interferenční maximum a minimum. Přiblížení interference světla se věnuje již první úkol.

8.2 Úkoly na stanovišti

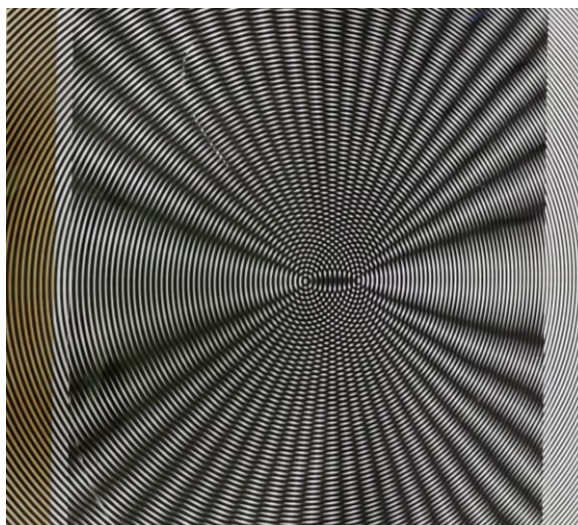
8.2.1 Úkol 1: Co je interference?

Pomůcky: Papír a folie se soustřednými kružnicemi (proužky moaré)

Průběh: V prvním úkolu se žáci seznamují se skládáním vlnění s využitím proužků moaré. Nejprve pracují s jedním listem potištěným soustřednými kružnicemi a představou modelu vlnění vodní hladiny. Úkolem žáků je lokalizovat zdroje vlnění a v analogii s vodní hladinou určit, co představují černé a bílé kružnice na listu. Následně překryjí list folií se stejným vzorem a popisují, co pozorují při pohybu folií.

⁷⁶ Tento bod se týká pouze bonusového úkolu.

Pro určité nastavení vzdálenosti zdrojů vlnění zakreslí do obrázku situaci, kterou by pozorovali při umístění stínítka do určité vzdálenosti od zdrojů (viz obrázek 8-1).



Obrázek 8-1: Interference vlnění modelovaná pomocí proužků moaré

Poznámky: Proužky moaré jsou pro žáky zajímavou pomůckou. Osvědčilo se nechat žákům dostatek času na „hraní“. Zároveň je možné, že některým žákům nebude příjemné se na vznikající struktury dívat. Z pozice lektora je s tím třeba při sledování práce na stanovišti počítat.

Nalezení zdroje ve středu soustředných kružnic nečinilo žákům potíže. Černé a bílé kružnice často přiřazovali maximálním výchylkám vln⁷⁷, tedy pro kladnou amplitudu např. černou a pro zápornou amplitudu bílou kružnici. Tato analogie je funkční, pro další práci s interferencí světla je ovšem vhodnější přiřadit kružnicím význam podobný intenzitě světla. To znamená, že jedna barva představuje maximální výchylky bez ohledu na kladnou/zápornou hodnotu a druhá barva místa, kde je výchylka (vůči klidné hladině) nulová.

8.2.2 Úkol 2: Youngův experiment ve skutečnosti

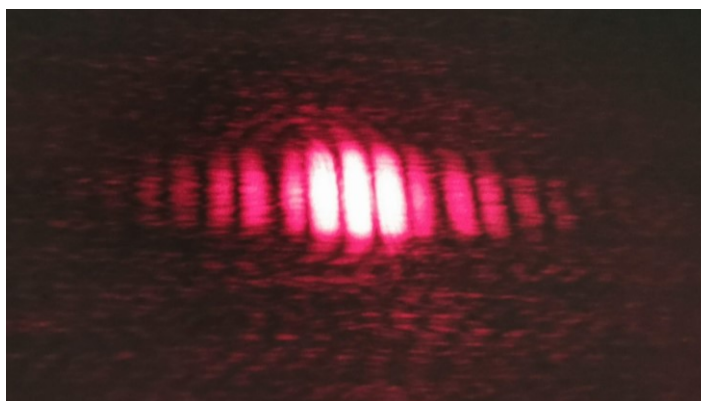
Pomůcky: Laserový modul ($\lambda = 650 \text{ nm}$, $P = 5 \text{ mW}$), plochá baterie 4,5 V, dvojšterbina, držák na dvojšterbinu, svěrák na laserový modul, stojany, vodiče, stínítko, proužky moaré.

⁷⁷ Výchylka vůči klidné hladině



Obrázek 8-2: Nastavení aparatury pro Youngův experiment

Průběh: Poté, co se žáci seznámili s principem interference mechanického vlnění a vznikem interferenčního obrazce, přechází k interferenci světla. Podle postupu v pracovním listu a obrázku nastaví aparaturu (obrázek 8-2) a posvítí laserem skrz dvojštěrbinu, tj. provedou Youngův experiment. Na stínítku⁷⁸ se tak vytvoří interferenční obrazec⁷⁹ (obrázek 8-3), jehož vznik žáci vysvětlují pomocí poznatků z předchozího úkolu.



Obrázek 8-3: Interferenční obrazec, který se zobrazí na stínítku při posvícení laserovým modulem skrz dvojštěrbinu ($\lambda = 650 \text{ nm}$, $d = 150 \text{ }\mu\text{m}$, $l = 30 \text{ cm}$).

Poznámky: Aby byl interferenční obrazec dobře viditelný, měli by žáci provádět experimentování v temném prostředí. Pro tyto účely je v IFL určena právě optická kóje, do které je tento experiment umístěn.

⁷⁸ V tomto případě je stínítkem bílá zeď v optické kóji.

⁷⁹ V temné místnosti je při takto provedeném experimentu pozorovatelných 9-13 světlých proužků.

8.2.3 Úkol 3: Hledání zákonitostí interferenčního obrazce

Pomůcky: Laserový modul ($\lambda = 650 \text{ nm}$, $P = 5 \text{ mW}$), laserové ukazovátko ($\lambda = 532 \text{ nm}$, $P = 5 \text{ mW}$), plochá baterie 4,5 V, dvojštěrbiny (vzdálenosti středů: 105 μm , 150 μm , 203 μm), pásové měřidlo, pravítko, držák na dvojštěrbinu, svěrák na laserový modul, stojany, vodiče, stínítko.

Průběh: Nyní je úkolem žáků zjistit, na čem závisí vzdálenost sousedních světlých proužků interferenčního obrazce neboli interferenčních maxim. V pracovním listu je uvedena tabulka čtyř parametrů, u nichž mají žáci rozhodnout, jak na nich vzdálenost sousedních maxim závisí. Tyto parametry jsou: vzdálenost štěrbin, vzdálenost dvojštěrbiny od stínítka, vzdálenost laseru od dvojštěrbiny, vlnová délka světla laseru. Žáci provádí jednoduché kvalitativní experimenty, při kterých mění vždy jeden z parametrů a zjišťují, jak se změna projeví na vzdálenosti sousedních maxim. Pokud je změna dostatečně viditelná, udělají závěr na základě pozorování, v opačném případě si mohou pomoci měřením. Pro každý z parametrů určují, co se při jeho zvětšení stane se vzdáleností sousedních maxim, zda se zvětší, zmenší či nijak nezmění.

Následně podrobněji proměří závislost vzdálenosti sousedních maxim na vzdálenosti štěrbin od stínítka. Postupují s krokem 25 cm a naměřené hodnoty vyplňují do připravené tabulky. V závěru úkolu se zamyslí nad chybami, kterými je jejich měření zatíženo.

Poznámky: Někteří žáci měřili místo vzdálenosti sousedních maxim šířku temného proužku. Hodnoty pak vycházely velice malé (desetiny milimetru), navíc se nejednalo o požadovanou vzdálenost. Ta musí být určena jako vzdálenost středů světlých proužků.⁸⁰ Pokud žáci neměří správným způsobem, je na místě s nimi rozebrat, jakých nepřesností se v měření dopouští a zda měřením šířky temného proužku měří skutečně vzdálenost dvou světlých.

V případě, že měří dle pokynů správně, vychází z hodnot přímá úměrnost. Krok 25 cm byl při sestavování měření volen proto, že pro dostupné dvojštěrbiny se mění vzdálenost sousedních maxim přibližně o 1 mm. Pokud žáci postupují s krokem 30 cm, získají velmi podobná data kvůli přesnosti použitého měřidla.

⁸⁰ Přesnější hodnoty lze dosáhnout při měření vzdálenosti odpovídajících si hran světlých proužků. Také je možné změřit více proužků najednou a určit průměrnou vzdálenost dvou sousedních.

8.2.4 Úkol 4: Matematický popis interferenčního obrazce

Pomůcky: Naměřená data.

Průběh: V posledním úkolu stanoviště si žáci připomenou jednoduché matematické závislosti, konkrétně princip a předpis funkcí přímé a nepřímé úměrnosti. Na základě údajů z tabulky předchozího úkolu a popsanych principů matematických závislostí se žáci pokusí sestavit teoretický vztah pro vzdálenost sousedních maxim. K dispozici mají informaci, že veškeré závislosti jsou právě přímé a nepřímé úměrnosti. Takto žáci dojdou k sestavení vztahu $y = \frac{\lambda \cdot l}{d}$, kde y je vzdálenost sousedních maxim, λ vlnová délka použitého světla, l je vzdálenost štěrbin od stínítka a d vzdálenost středů štěrbin dvojštěrbiny.

Poznámky: Poslední část úkolu může být pro některé žáky velice náročná. Nejasnosti v určování rozdílu⁸¹ mezi přímou a nepřímou úměrností se objevovaly i u žáků vyšších ročníků gymnázia. Náročnost úlohy spočívá také v tom, že se žáci s podobným zadáním často setkají poprvé. Uvědomit si souvislost mezi pozorovanou změnou fyzikální veličiny⁸² a matematickým vyjádřením funkce je obtížné a vyžaduje to již určitou dávku porozumění oběma oborům.

8.2.5 Bonusový úkol 5: Tvorba interferenčního obrazce

Pomůcky: Laserový modul ($\lambda = 650 \text{ nm}$, $P = 5 \text{ mW}$), plochá baterie 4,5 V, dvojštěrbina, pásové měřidlo, pravítko, držák na dvojštěrbinu, svěrák na laserový modul, stojany, vodiče, stínítka.

Průběh: Pokud je skupina žáků rychlá a stanoviště ji zaujme, může pomocí vztahu odvozeného v úkolu 4 předpovědět nastavení experimentu pro zobrazení konkrétního interferenčního obrazce. Přesněji zobrazit na stínítku interferenční obrazec, jehož maxima jsou od sebe vzdálena 5 mm. Žáci si zvolí dvojštěrbinu a zdroj světla, znají tak parametry dvojštěrbiny a vlnovou délku. Dosazením do odvozeného vztahu dopočítají vzdálenost od stínítka, do které musí dvojštěrbinu umístit. Nastavení experimentu zaznamenají do pracovního listu. Následně experiment provedou a ověří si tak správnost předpovědi.⁸³

⁸¹ Problémy se vyskytovaly především při vymýšlení obecného předpisu ve tvaru $y = kx$ nebo $y = \frac{k}{x}$.

⁸² Při současné změně parametru

⁸³ Při zahrnutí bonusového úkolu do struktury bádání na stanovišti je možné jej zařadit do skupiny stanovišť podle designu *Physics with Flavor*, podobně jako experiment *Sjezd po skluzavce – vrh vodorovný* tematického celku *Vrhy* (Kácovský & Snětinová, 2019).

Poznámky: Časová náročnost bonusu je přibližně 5 minut. Žáci z odvozeného vztahu určovali vzdálenost štěrbin od stínítka v centimetrech s přesností na dvě desetinná místa. Lektor s nimi může dále debatovat, zda je taková přesnost potřeba a zda jí můžeme při nastavování experimentu vůbec dosáhnout.

8.3 Proměny stanoviště

Část tématu byla původně zpracována i v rámci návrhu kvalitativního stanoviště *Vlnová optika* Bc. Tomáše Kopřivy. Aby nedocházelo k duplikaci experimentů a fyzikálních témat v připravovaných tematických celcích, bylo po dohodě stanoviště zařazeno pouze do kvantitativního tematického celku a původní kvalitativní návrh nebyl použit. V tomto kvalitativním pojetí žáci pracovali s apletem⁸⁴, který přibližoval interferenci vlnění a to v případě vodní hladiny i světla. Jak se ukázalo již u první verze stanoviště *Malusův zákon* (viz 5.3), přechod žáků od apletu k měření a naopak není při práci efektivní. Zároveň část apletu znázorňující interferenci světla, nebyla v určitých pojetích jednoznačná. Po domluvě s vedoucí práce proto nebyl aplet použit a žáci se s interferencí vlnění seznamovali za použití proužků moaré.

Původní představa stanoviště *Youngův experiment* byla zaměřena více na otevřené bádání (Fürstová, 2020), žáci měli samostatně vymýšlet parametry, na kterých bude vzdálenost sousedních maxim interferenčního obrazce záviset, samostatně navrhovat experimenty, kterými tuto závislost ověří/vyvrátí. Takto koncipované stanoviště se nepodařilo vytvořit kvůli časovému omezení práce na jednom stanovišti. Zároveň by žáci opakovali podobná, přestože jednoduchá, měření několikrát, což by mohlo vést ke ztrátě zájmu měření provádět.

Pozorování lektorů během testování přineslo drobnou změnu v tabulce parametrů, u kterých žáci zkoumají, jak na nich záleží vzdálenosti sousedních maxim interferenčního obrazce. Změna vzdálenosti dvojštěrbiny od stínítka byla v testované verzi zařazena jako poslední⁸⁵ v tabulce. Ukázalo se, že žáci pak provádí pozorování/měření s velmi malým interferenčním obrazcem a formulování závěru je pro ně v některých případech obtížné, neboť změny v obrazci jsou malé. Závislost

⁸⁴ Vytvořeným v rámci *PhET Interactive Simulations, University of Colorado Boulder*, dostupný z: https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_cs.html

⁸⁵ Předcházely parametry: vzdálenost štěrbin, vzdálenost laseru od dvojštěrbiny a vlnová délka.

vzdálenosti sousedních maxim na vzdálenosti dvojštěrbiny od stínítka proto byla zařazena v tabulce výš.

Při zkoumání závislosti vzdálenosti sousedních interferenčních maxim na různých parametrech docházeli někteří žáci k právě opačným výsledkům pozorování, než bylo očekáváno. Z diskuze lektora se žáky vyplynulo, že žáci jevu rozumí dobře, došlo pouze k nepozornosti ve čtení údajů v záhlaví tabulky, do které zapisovali své závěry z pozorování. Dle komentářů ve zpětné vazbě bylo proto v záhlaví tabulky barevně zvýrazněno slovo „zvětší“, aby neuniklo pozornosti žáků.

Poslední úpravou vycházející z pozorování práce žáků lektory v průběhu testování bylo přidání přesné počáteční hodnoty (25 cm) do tabulky pro měření závislosti vzdálenosti sousedních maxim na vzdálenosti dvojštěrbiny od stínítka. Tak žáci při měření uvidí přímo závislost odpovídající popisu „kolikrát víc jedné, tolikrát víc druhé“.

9 Teoretické souvislosti

Součástí každého pracovního listu, se kterým se žáci v IFL setkávají, je tzv. teoretický úvod. Ten slouží ke stručnému uvedení tématu v teoretických souvislostech, lze v něm připomenout základní poznatky týkající se fyziky na daném stanovišti, ale také konkrétní vztahy, se kterými žáci v úkolech pracují, mají je ověřovat. Pokud se žáci na stanovišti věnují problematice, která přesahuje běžné znalosti SŠ, jsou nové poznatky přiblíženy právě v teoretickém úvodu.

Nahlédnutím do pracovních listů různých tematických celků a porovnáním teoretických částí lze zjistit, že se jedná o poměrně stručné texty, které se snaží vystihnout podstatu věci na středoškolské úrovni, bez fyzikálních nepřesností. Navíc jsou formulované pokud možno středoškolsky, tj. jazykem, který je středoškolákům blízký⁸⁶. Na tuto podobu teoretického úvodu má vliv několik faktorů.

- a) V první řadě je třeba připomenout jeden z hlavních cílů IFL, kterým není číst odborné texty, ale nechat žáky experimentovat, pracovat s pomůckami, bádát. Tento cíl by měly odrážet i pracovní listy svou strukturou.
- b) Návštěva laboratoře je časově omezena na 120 minut. Časové omezení samo o sobě udává určitou hranici rozsahu a hloubky uvedené teorie.
- c) Pokud je žákům předložen dlouhý text, obsahující množství jim neznámých vztahů a pojmů, značná část z nich takový text přeskočí a věnuje se další části úkolu. Přínos příliš rozsáhlého teoretického úvodu je tak minimální, neboť si jej žáci spíše nepřečtou.

Mezi žáky se přesto občas objeví někdo, kdo by ocenil podrobnější fyzikální či matematické vysvětlení, které přesahuje základní látku potřebnou k porozumění danému stanovišti. Z toho důvodu je součástí této práce podrobněji zpracovaný teoretický text pokrývající tematicky experimentální celek *Optika II – kvantitativně*. Cílem následující části práce je podat středoškolskému čtenáři podrobnější vysvětlení fyzikálních principů, se kterými se může setkat na stanovišti, a zároveň zachovat text srozumitelný, čtivý a samozřejmě fyzikálně správný.

V textu se předpokládá základní znalost některých jevů, se kterými se žáci měli možnost setkat v rámci hodin fyziky na střední škole. Mezi tyto poznatky patří

⁸⁶ Což obvykle nebývá jazyk odborných fyzikálních textů.

především znalost mechanického vlnění, jeho vlastností a základních jevů, ke kterým u vlnění dochází. Dále se předpokládá, že se žáci setkali s popisem elektrického a magnetického pole, stejně tak s principy geometrické optiky.

Jelikož se teorie přímo týká jevů, které jsou experimentálně zkoumány na stanovištích a experimenty jsou popsány v rámci pracovních listů (viz Příloha A), objevují se v textu odkazy na úkoly pracovních listů Příloha A, které popisují experiment k danému teoretickému tématu. Podoba odkazu je následující:

Úkol 1 – PL: Youngův experiment.

9.1 Vlnová optika

Než se pustíme do samotné teorie, uveďme několik doplňujících informací ke zdrojům, ze kterých tento text vychází. Jelikož rozebíráme jevy a teorie na úrovni středoškolské fyziky, jako výchozí zdroj jsme zvolili učebnici *Fyzika – Optika* od O. Lepila (2015). Část věnovaná vlnové optice se v popsaných jevech shoduje s jevy, kterým se věnujeme dále. Mnoho zajímavých a doplňujících informací uvádí v rámci rozšiřujícího učiva na CD. Na tuto učebnici se budeme často odkazovat. Podrobněji se fyzikálními jevy zabývají *Fyzika* (Halliday, 2000) a *Feynmanovy přednášky z fyziky* (Feynman, 2000). Fyzikální souvislosti jsou v obou publikacích vyloženy velmi srozumitelnou a čtivou formou. Matematika v obou těchto publikacích neodpovídá střední škole, po stránce kvalitativního vysvětlení fyzikální podstaty problému jsou ovšem ideální. Poslední častěji využívaný zdroj je vysokoškolská učebnice *Optiky* od P. Malého (2008). Tu bychom doporučili skutečným znalcům, pro které je pokročilá matematika denním chlebem.

Obrázky, kterými je teorie doplněna, jsou povětšinou autorské. Některé jsou převzaty z výše uvedených zdrojů. Cílem všech použitých obrázků je pomoci čtenáři pochopit rozebíranou problematiku.

V učebnicích⁸⁷ se dočteme, že světlo je elektromagnetické vlnění. Slovo *elektromagnetické* značí, že světlo je možné popisovat pomocí veličin elektrického a magnetického pole. Připomeňme, že pro elektrické pole je charakteristickou veličinou elektrická intenzita, která se značí \vec{E} , pro magnetické pole je to magnetická indukce, která se značí \vec{B} . *Vlnění* pak odkazuje na způsob, jakým se světlo šíří, a sice

⁸⁷ Např.: Lepil (2015), Halliday (2000), Malý (2008).

jej bude možné popisovat podobným způsobem jako šíření vlny v mechanice např. na vodní hladině.

Poznámka: Šipka u značky veličiny znamená, že se jedná o tzv. vektorovou veličinu. To znamená, že kromě velikosti a měřicí jednotky je pro určení veličiny důležitý také její směr. Mezi vektorové veličiny řadíme např. sílu, rychlost, hybnost. Veličiny, u kterých nezáleží na směru, označujeme jako skalární a patří mezi ně např. hmotnost, obsah, hustota.

Je-li světlo určitou formou vlnění, je možné toto vlnění popsat pomocí frekvence, vlnové délky nebo rychlosti, kterou se šíří. Světlo vlnových délek 390 nm – 760 nm, kterým odpovídají frekvence $7,7 \cdot 10^{14}$ Hz – $3,9 \cdot 10^{14}$ Hz, nazýváme viditelné světlo, protože při dopadu do oka vyvolá zrakový vjem. Přechod mezi vlnovou délkou a frekvencí světla můžeme jednoduše udělat pomocí vztahu $f = \frac{c}{\lambda}$, kde f je frekvence vlnění, λ vlnová délka a c rychlost světla ve vakuu.

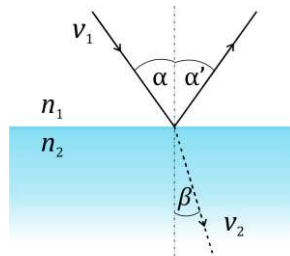
Ve vlnové optice (a nejen zde) považujeme rychlost světla za konečnou, pro vakuum je velikost rychlosti světla: $c \doteq 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$. Na tomto místě si všimněme uvedení podmínky týkající se prostředí, ve kterém rychlost světla zkoumáme. Zdá se, že rychlost světla i z pohledu vlnění se bude měnit v závislosti na prostředí, kterým se šíří. Z geometrické optiky připomeňme, že podíl rychlostí světla v různých optických prostředích charakterizuje veličina index lomu.

Úkol 1, 2 – PL: Měření indexu lomu

9.2 Index lomu

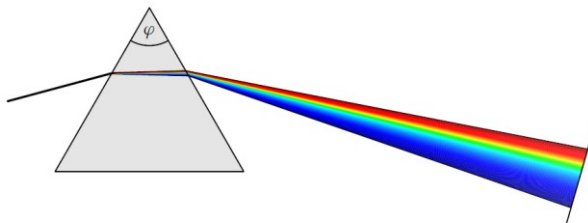
Uvažujme situaci na obrázku 9-1: na skleněný hranol dopadá ze vzduchu světelný paprsek. Pozorujeme, že na rozhraní prostředí dochází k odrazu paprsku (podle zákona odrazu), ale také vidíme lomený paprsek, který pokračuje v novém prostředí dále. Úhel dopadu α , úhel lomu β a rychlosti šíření světla v prvním (vzduch) a druhém (sklo) prostředí po řadě v_1 a v_2 jsou svázány vztahem $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$. Podíl rychlostí $\frac{v_1}{v_2}$, kterými se šíří světlo ve dvou různých prostředích, nazýváme index lomu, značíme jej n . Pokud je prvním prostředím vakuum, ve kterém se světlo šíří rychlostí c , hovoříme o absolutním indexu lomu: $n = \frac{c}{v}$. Protože rychlost světla je

největší právě ve vakuu⁸⁸, pro absolutní index lomu ostatních prostředí dostáváme $n > 1$. Hodnota indexu lomu tak udává, kolikrát pomaleji se šíří světlo v daném prostředí než ve vakuu. Ve vzduchu je rychlost světla málo odlišná od rychlosti šíření světla ve vakuu, často je tedy uváděna hodnota indexu lomu vzduchu $n = 1$.



Obrázek 9-1: Schéma k zavedení indexu lomu.

Uvedli jsme, že frekvenci světla můžeme vyjádřit pomocí rychlosti světla, kterou se světlo šíří v nějakém prostředí, a jeho vlnové délky. Podívejme se na situaci z druhé strany: rychlost světla v daném prostředí se bude měnit v závislosti na frekvenci resp. vlnové délce vlnění, které jím prochází. V důsledku toho bude také index lomu záviset na frekvenci světla. To nás vede k dalším jevům, které pozorujeme např. při průchodu bílého světla skleněným hranolem⁸⁹. Na obrázku 9-2 dopadá bílé světlo na skleněný hranol. Lomem dochází k rozkladu na jednotlivé barvy spektra, každá barva odpovídá jiné frekvenci vlnění. To ale také znamená, že různé barvy se v prostředí pohybují různými rychlostmi a budou se lámat pod různými úhly. Indexy lomu prostředí se tak pro jednotlivé barvy liší. Jak jsme již naznačili, index lomu tak skutečně závisí na barvě tj. frekvenci vlnění. Pro studium těchto jevů je možné využít rozšiřující text středoškolské učebnice fyziky O. Lepila (2015).



Obrázek 9-2: Rozklad bílého světla na skleněném hranolu. Převzato z: Lepil (2015)

⁸⁸ Velikost rychlosti světla ve vakuu je konečná s hodnotou $c = 299\,792\,458 \frac{m}{s}$. V běžných středoškolských výpočtech obvykle pracujeme se zaokrouhlenou hodnotou $c \doteq 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$.

⁸⁹ Jedná se samozřejmě o rozklad bílého světla na jednotlivé barevné složky, který nazýváme disperze.

Rozšíření: Protože světlo je elektromagnetické vlnění, je podle teorie, která toto vlnění zkoumá⁹⁰, možné vyjádřit rychlost světla v konkrétním prostředí vztahem $v^2 = \frac{1}{\varepsilon\mu}$, tj. v závislosti na jeho permitivitě ε a permeabilitě μ . Veličiny permitivity ε a permeability μ udávají vliv daného prostředí na výsledné elektrické resp. magnetické pole. Můžeme upravit také definiční vztah pro index lomu daného prostředí do tvaru závislosti na elektrických a magnetických vlastnostech zkoumaného prostředí. Naznačíme odvození pro druhou mocninu indexu lomu:

$$n^2 = \frac{c^2}{v^2} = \frac{\frac{1}{\varepsilon_0\mu_0}}{\frac{1}{\varepsilon\mu}} = \frac{\frac{1}{\varepsilon_0\mu_0}}{\frac{1}{\varepsilon_0\varepsilon_r\mu_0\mu_r}} = \varepsilon_r\mu_r,$$

kde ε_r je relativní permitivita a μ_r relativní permeabilita zkoumaného prostředí, ε_0, μ_0 zde značí hodnoty pro vakuum. Relativní permitivita/permeabilita je bezrozměrná látková konstanta, která vyjadřuje, kolikrát je permitivita/permeabilita daného prostředí větší⁹¹ než hodnota pro vakuum. Podívejme se, jaký index lomu by v takovém případě měla voda (vodivé, nemagnetické prostředí), pro kterou $\varepsilon_r = 80$, $\mu_r = 1$. Podle uvedeného vztahu dostáváme: $n = \sqrt{80 \cdot 1} \doteq 8,9$. Index lomu vody zavedený v rámci geometrické optiky je ale hodnota blízká 1 (konkrétně 1,33 pro vodu). Je zřejmé, že zavedení indexu lomu pomocí ε_r, μ_r bude složitější problém, ostatně pro některá prostředí může index lomu nabývat dokonce komplexních hodnot. Tyto závěry vychází z řešení tzv. vlnové rovnice, řešené např. v knize Optika (Malý, 2008).

Vraťme se nyní zpět k popisu světla jako vlnění. Již víme, že světlo můžeme popisovat pomocí vlnové délky λ či frekvence f – tyto veličiny udávají barvu světla, kterou vidíme. Zdroj světla jedné konkrétní frekvence nazveme monochromatický. Tedy červený laser, který vysílá vlnění o frekvenci $f = 4,6 \cdot 10^{14}$ Hz, je monochromatický. Přestože se nabízí výklad slova monochromatický jako jednobarevný, je nutné upozornit na nedokonalost lidského oka, které i kombinací několika blízkých frekvencí může vyhodnotit jako jeden odstín barvy.

⁹⁰ Zde se odkazujeme na Maxwellovu teorii elektromagnetického pole.

⁹¹ Relativní permeabilita prostředí může být také menší než ta pro vakuum.

9.3 Interference vlnění

Tvrdíme, že světlo je druh vlnění. Můžeme se o tom nějak přesvědčit? Samozřejmě. Aby byl ale důkaz dostatečně přesvědčivý, vraťme se k několika poznatkům o vlnění, které již známe. Máme zkušenosti s mechanickým vlněním, tzn. vlněním vodní hladiny či zvukem. Když rozkmitáme v jednom místě vodní hladinu, šíří se z tohoto místa do všech směrů vlny, to je zřejmé. Přidáme-li ale do blízkosti zdroje vlnění druhý zdroj, začnou se vlnění z těchto dvou zdrojů vzájemně ovlivňovat. V místě, kde se vlny ze dvou zdrojů setkají, dojde k jejich složení. Skládání vlnění neboli interference znamená sčítání okamžitých výchylek vlnění v daném místě. Vlnění můžeme skládat, kdykoli máme více zdrojů. Pokud chceme interferenci pozorovat pouhým okem, je potřeba splnit další podmínky, které zajistí zesílení efektu, a sice pro všechna uvažovaná vlnění platí, že:

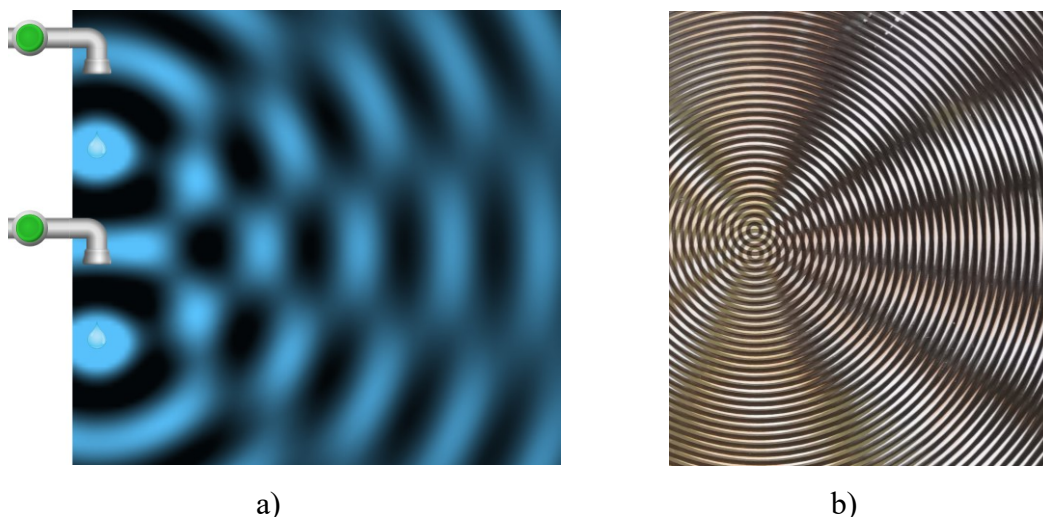
- mají stejnou vlnovou délku (resp. frekvenci)
- v bodě, kde vlnění skládáme, je mezi nimi fázový posuv.

Poznámka: „*Dráhový rozdíl si lze představit tak, že na hladinu rybníka dopadnou ve stejný časový okamžik do různých bodů dva kameny. Vzdálenost bodů dopadu kamenů je dráhový rozdíl vln.*

Fázový rozdíl je obecnější a může vzniknout stejně jako dráhový. Je ale ještě jiná možnost - dva kameny dopadnou do stejného místa na hladině vody, ale v různý čas - mezi dopady bude určitý časový interval.“ (Reichl, 2006).

Vlnění, která splňují podmínky pro vznik interference, se nazývají koherentní: „*Koherentní jsou vlnění stejné frekvence, jejichž vzájemný fázový rozdíl v uvažovaném bodě prostoru se s časem nemění.“ (Lepil, 2015, str. 67)*

V případě, že skládáme koherentní vlnění, pozorujeme na vodní hladině obrazec, který se podobá následujícímu obrázku 9-3:



Obrázek 9-3: a) Skládání dvou vlnění na vodní hladině: modrá – amplituda, černá – uzel, b) Skládání dvou vlnění pomocí dvou folií se soustřednými kruhy: bílá – amplituda, černá – uzel.

První část obrázku 9-3a) znázorňuje popsanou situaci na snímku z apletu⁹². Koherentní zdroje vlnění jsou kohoutky s vodou, které se stejnou frekvencí ve stejný čas kapají kapky na hladinu vody. Dráhový rozdíl vzniká díky vzájemně různému umístění kohoutků v prostoru. Na hladině vody je možné pozorovat světlé a tmavé oblasti. Druhý obrázek 9-3b) byl vytvořený pomocí překrytí dvou totožných folií se soustřednými bílými a černými kruhy, jejichž středy jsou vůči sobě posunuty. Složením vlnění vznikl tzv. interferenční obrazec, který má podobu střídajících se světlých a tmavých oblastí (amplitudy a uzly vln). Oblastem s největší velikostí výchylky vlnění říkáme interferenční maxima, oblastem s nejmenší velikostí výchylky (nulovou výchylkou) říkáme interferenční minima.

Úkol 1 – PL: Youngův experiment.

Zdůrazněme ještě, v čem je právě skládání vlnění tak zajímavé, když skládat můžeme např. i vektory síly. Intenzita vlnění⁹³, která se značí I , je veličina, kterou dokážeme zachytit okem, uchem či jinými detektory (podle typu vlnění). Zaměříme se právě na intenzitu vlnění, která chceme skládat v daném místě, a zaznamenáme velikost intenzity I_1 pro první vlnění, obdobně intenzitu I_2 pro druhé vlnění v tomtéž

⁹² Aplet PhET™ Interactive Simulations od University of Colorado Boulder je dostupný na: https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_cs.html.

⁹³ V případě mechanického vlnění to může být intenzita zvuku, v případě elektromagnetického intenzita světla.

místě. Když ale v daném místě tato vlnění složíme, pro intenzitu výsledného vlnění $I_{celková}$ vždy neplatí, že $I_{celková} = I_1 + I_2$ (jak bychom možná čekali). Ve skutečnosti v některých místech, kde dochází ke skládání vlnění, zaznamenáme intenzitu výrazně větší než součet intenzity dílčích vlnění či naopak menší. Někdy je dokonce v místě, kde mají obě skládaná vlnění nenulovou intenzitu, intenzita složeného vlnění nulová.

Rozšíření: Lze odvodit, že intenzita složené vlny, označme ji opět jako $I_{celková}$, má tvar $I_{celková} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$, kde I_1 je opět intenzita prvního vlnění, I_2 intenzita druhého vlnění a δ fázový rozdíl těchto dvou vlnění, který jsme potřebovali zajistit jako jednu z podmínek viditelné interference. Podíváme-li se na jednotlivé části vztahu, vidíme, že celková intenzita je dána součtem intenzity I_1 prvního vlnění v daném místě, intenzity I_2 druhého vlnění v daném místě a členu, který můžeme považovat za korekci. Příčinou přítomnosti tohoto korekčního členu je právě interference. Korekce vyjadřuje právě onen rozdíl mezi výslednou intenzitou získanou pouhým součtem intenzit dvou vlnění a pozorovaným jevem ve skutečnosti.

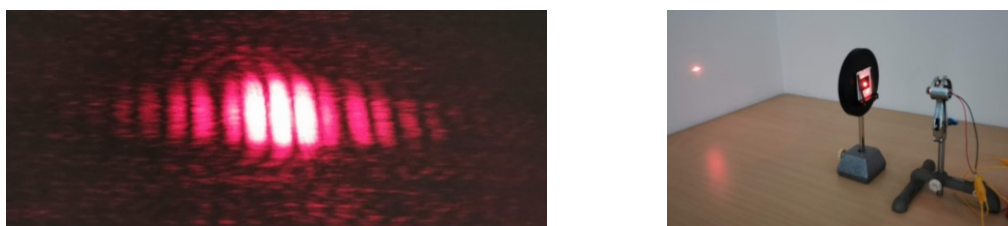
V rámci teorie elektromagnetického vlnění je možné poznatky předchozího odstavce také podpořit matematicky. Odvození existuje více, některá z nich uvádí s komentářem Richard Feynman v prvním díle knihy Feynmanovy přednášky z fyziky (Feynman, 2000). Pokud by měl čtenář zájem pomocí matematického odvození nalézt odpověď na otázku *Jak najít výsledný předpis popisující složení dvou elektromagnetických vlnění?*, případně jej propojit se vztahem pro intenzitu výsledné vlny, odkážeme jej na zmíněný text Feynmana (2000).⁹⁴

Podobně jako mechanické vlnění můžeme skládat elektromagnetické vlnění. V místě, kde se dvě vlny potkají, sečteme okamžité výchylky jejich elektrických i magnetických složek. Pokud vezmeme dva zdroje světla a zajistíme podmínky koherence (jak je zajistit si řekneme později), pozorujeme na stínítku interferenční

⁹⁴ Pro porozumění je nutná znalost trigonometrie nebo práce v oboru komplexních čísel. V případě hlubšího zájmu je samozřejmě možné využít např. vysokoškolskou učebnici Optika od Petra Malého (2008), kde je celá problematika podrobně rozebrána. Úroveň obtížnosti, hlavně po matematické stránce, již ale výrazně přesahuje tu středoškolskou.

obrazec, který může vzniknout jedině, má-li světlo charakter vlnění, tj. chová se jako vlna. Úkol 2 – PL: Youngův experiment.

„Protože výsledná modulace světelné intenzity je přímým důsledkem vlnové povahy světla, považovala se v historii vždy existence interference za přímý důkaz vlnové povahy světla.“ (Malý, 2008 str. 72). Interferenční obrazec, podaří-li se nám najít vhodné podmínky pro jeho vznik, bude tvořen sérií světlých a tmavých oblastí na stínítku, které postavíme do cesty zdrojům koherentního světla (viz obrázek 9-4).



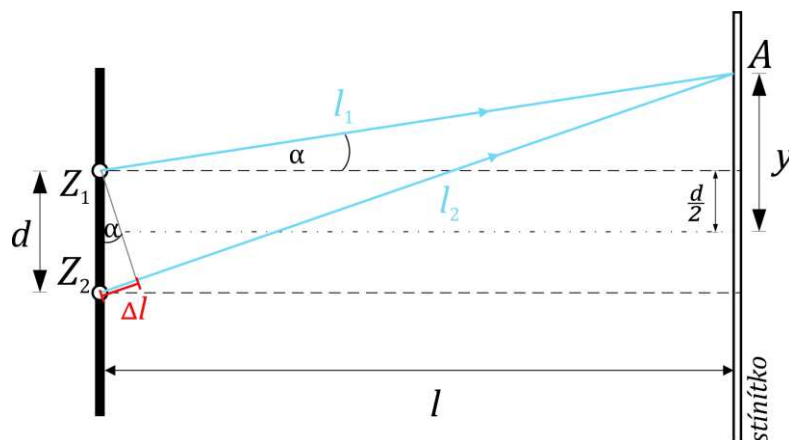
Obrázek 9-4: Interferenční obrazec (vlevo), nastavení experimentu pro pozorování interference na dvojštěrbině (vpravo) Úkol 2 – PL: Youngův experiment

Za jakých podmínek tedy dokážeme interferenci světla pozorovat? Stejně jako v případě mechanického vlnění musí být splněny podmínky koherence vlnění, která spolu mají interferovat. Potřebujeme tedy dva zdroje světla stejné frekvence. K tomu můžeme využít např. jeden zdroj světla (např. laser), jehož svazek rozdělíme pomocí dvojice štěrbin na dva.⁹⁵ Z každé štěrbině se tak stane zdroj světla – máme splněnou podmínku dvou vlnění stejné vlnové délky resp. frekvence. Fázový posuv vlnění je v takovém případě zajištěn dráhovým rozdílem Δl , jehož vznik je zachycen na schematickém obrázku 9-5. Vlnění, která se začala šířit ze zdrojů (štěrbin) Z_1 a Z_2 ve stejný čas, dorazí do libovolně zvoleného bodu A po drahách l_1 a l_2 . Vzdálenost l_2 , kterou urazí vlnění ze zdroje Z_2 , je jistě větší, než vzdálenost l_1 . Rozdíl těchto vzdáleností je právě dráhový rozdíl Δl , můžeme tedy psát $\Delta l = l_2 - l_1$. Aby se vlnění v daném místě složila s maximální výslednou intenzitou, tj. došlo ke konstruktivní interferenci, musí být ve fázi. Dráhový rozdíl musí být celočíselným násobkem vlnové délky světla: $\Delta l = k\lambda$, kde λ je vlnová délka světla zdroje a $k = 0, 1, 2, \dots$ Nulovou intenzitu dostaneme v místech, kde se vlnění potkají

⁹⁵ Nabízí se také možnost použít dva zdroje světla a vhodně je „sladit“. V takovém případě by záleželo na typu zdroje světla, neboť dobu, po kterou je možné fázový posuv udržet, se liší v závislosti na způsobu generování světla zdrojem. Mezi vhodné zdroje řadíme např. lasery. (Lepil, 2015)

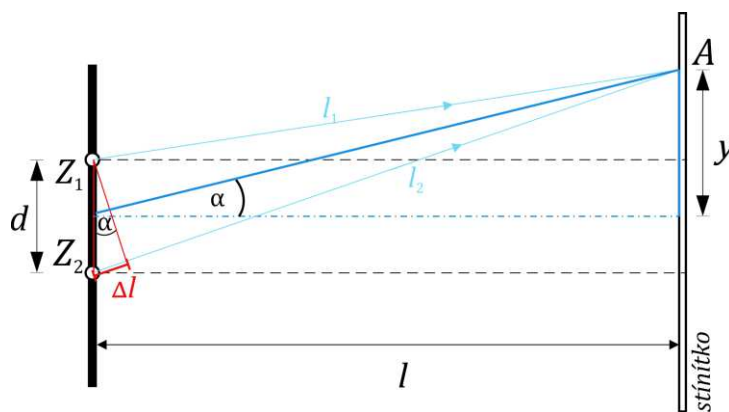
v protifázi, nastane tzv. destruktivní interference: $\Delta l = (2k - 1) \frac{\lambda}{2}$, kde $k = 1, 2, \dots$

Úkol 3 – PL: Youngův experiment.



Obrázek 9-5: Schéma průběhu interferenčního experimentu

V případě, že je vzdálenost d zdrojů světla Z_1 a Z_2 velmi malá vůči vzdálenosti l zdrojů od stínítka, můžeme považovat dráhy l_1 a l_2 za rovnoběžné. Za tohoto předpokladu můžeme z geometrie situace určit vztah pro vzdálenost k -tého interferenčního maxima (světlého proužku), které ve schématu představuje bod A, od nultého⁹⁶, označme ji y .



Obrázek 9-6: Schéma k odvození vztahu pro interferenční maximum

Z podobnosti pravoúhlých trojúhelníků (modrého a červeného) naznačených v obrázku 9-6 dostáváme: $\Delta l = d \sin \alpha$ a $\sin \alpha = \frac{y}{\sqrt{y^2 + l^2}}$. Spojením těchto vztahů a využitím podmínky pro vznik interferenčních maxim dostaneme: $d \frac{y}{\sqrt{y^2 + l^2}} = k\lambda$. Dále předpokládáme, že vzdálenost dvojštěrbiny od stínítka je mnohem větší než

⁹⁶ Připomeňme, že jako nulté maximum označujeme místo, kam dopadá světlo ze zdroje beze změny svého směru, v případě konstruktivní interference je nulté maximum nejvýraznější.

vzdálenost interferenčních proužků. Tuto podmínku můžeme zapsat $y \ll l$. Podle předpokladu tedy můžeme zanedbat y^2 ve jmenovateli zlomku, neboť hodnota l^2 se téměř nezmění po přičtení malé hodnoty y^2 . Po úpravě dostaneme vztah pro vzdálenost interferenčních maxim: $y = k\lambda \frac{l}{d}$. Obdobným způsobem lze získat vztah pro vzdálenost k -tého a nultého interferenčního minima.

Úkol 4, 5 – PL: Youngův experiment.

Interference vlnění nastává také na tenkých vrstvách (např. mýdlová bublina), kde dochází k fázovému posunu vlnění vlivem změny prostředí, kterým se šíří (závislost na indexu lomu prostředí). Dráhový rozdíl vlnění je v takových případech vytvořen odrazem vlnění na površích tenké vrstvy. Důsledkem jsou např. duhové obrazce na mýdlových bublinách či olejových skvrnách. V případě, že dojde k několikanásobnému opakování odrazu a složení vlnění, hovoříme o mnohosvazkové interferenci. K interferenci dochází také na struktuře šupin křídel některých druhů motýlů. Jejich křídla se pak kovově či duhově lesknou (Halliday, 2000).

9.4 Difrakce světla

Dalším zajímavým jevem, který lze vysvětlit pomocí vlnové povahy světla, je ohyb světla neboli difrakce. Přesněji se jedná o pronikání světla do oblasti geometrického stínu. Ohyb světla pozorujeme jako sérii světlých a tmavých oblastí v okolí hrany překážky, jak ukazuje např. obrázek 9-7. Tyto světlé a tmavé oblasti jsou důsledkem interference difraktovaného světla.⁹⁷

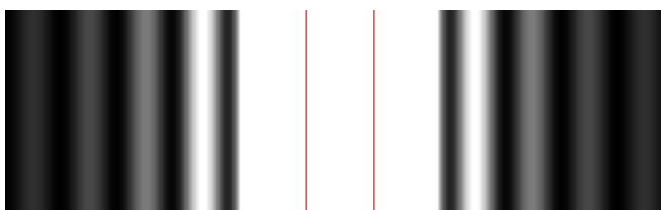


Obrázek 9-7: Difrakce světla na hraně. Převzato z: Lepil (2015)

⁹⁷ Rozdíl mezi difrakcí a interferencí spočívá zjednodušeně řečeno v množství interagujících zdrojů. Jestliže skládáme vlnění ze dvou tří zdrojů, mluvíme o interferenci, pokud je přítomno zdrojů mnoho, např. optická mřížka, hovoříme o difrakci (Feynman, 2000).

S ohybem vlnění jsme se setkali již u zvuku: zvuk slyšíme i „za rohem“, za rozměrnou překážkou. K ohybu zvuku dochází běžně. Jak je to ale s ohybem světla? **Úkol 1 – PL: Difrakce na optické mřížce.** Stíny těles kolem nás obvykle pozorujeme ostré či tvarem odpovídající osvětlenému předmětu, nemají na své hranici proužky či podobné útvary. Důvodem různě častého pozorování difrakce světla a např. zvuku kolem nás je různá vlnová délka zvuku a světla. K difrakci dochází pouze na hranách překážek, jejichž rozměr je srovnatelný s vlnovou délkou dopadajícího vlnění. Zvuk, který slyší lidé, má vlnovou délku řádově mezi několika centimetry a desítkami metrů. Jedná se o délky srovnatelné s rozměry běžných objektů⁹⁸, které tak mohou být pro zvuk vhodnými překážkami k ohybu. Vlnová délka viditelného světla je mnohem menší, řádově stovky nanometrů. Pro srovnání tloušťka lidského vlasu je 0,1 mm, překážka vhodná pro difrakci světla musí být ještě tisíckrát menší⁹⁹.

K difrakci světla dochází proto např. na tenkých štěrbinách. Když necháme procházet světlo tenkou štěrbinou, můžeme na stínítku pozorovat obrazec, zachycený na obrázku 9-8. Opět se skládá z několika světlých a tmavých proužků, které vznikají v důsledku interference vlnění šířícího se z různých bodů štěrbin. V obrázku je také vyznačena původní šířka štěrbin. Z obrázku je zřejmé, že světlo se šíří i za hranici štěrbin, tedy do oblasti jejího geometrického stínu. Zároveň je zachycen výrazně jasnější proužek uprostřed obrazce (nulté maximum). Ten je způsoben tím, že vlnění, která se šíří ze všech bodů štěrbin, urazí do středu obrazce přibližně stejnou vzdálenost, a proto se skládají ve fázi (Halliday, 2000).

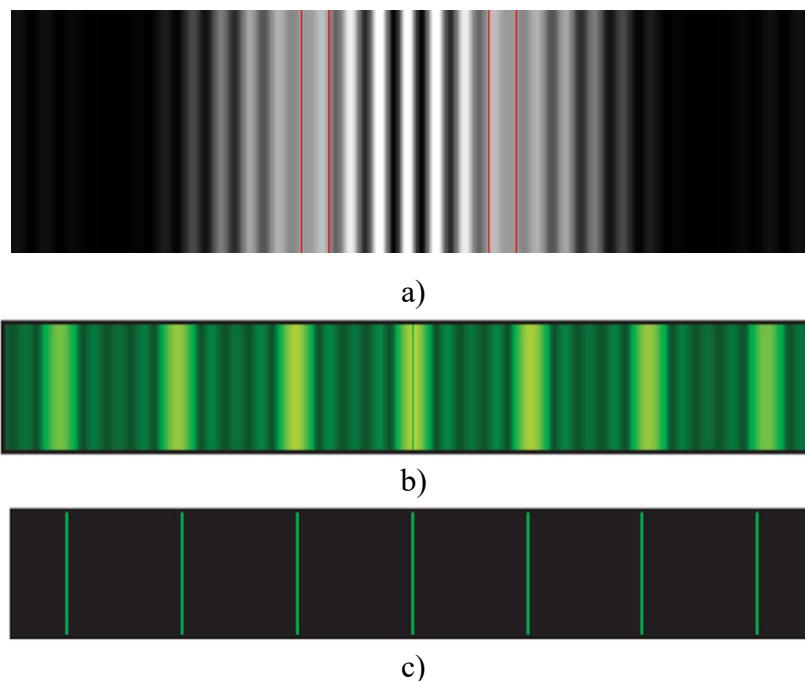


Obrázek 9-8: Difrakce světla na jedné štěrbině. Šířka štěrbin je naznačena červenými čarami. Převzato z: Lepil (2015)

⁹⁸ Běžnými objekty máme na mysli předměty rozměrů, se kterými jsou lidé zvyklí pracovat – šířka ulice, dveře,...

⁹⁹ Abychom se dostali na požadovaný rozměr, museli bychom přibližně desetkrát rozpůlit průměr vlasu. V praxi můžeme difrakční jevy pozorovat již u překážek, jejichž rozměr je srovnatelný s vlasem (za vhodných podmínek).

Nás bude dále zajímat především difrakční obrazec, který vznikne při průchodu světla optickou mřížkou, tj. velkým množstvím štěrbin uspořádaných v prostoru. Obrazce, které vznikají postupným zvyšováním počtu štěrbin, zachycuje obrázek 9-9. Máme-li dvě štěrbin (obrázek 9-9a)), dochází oproti případu s jednou štěrbinou navíc k interferenci světla ze dvou zdrojů, jako jsme ji popsali v části 9.3. Tyto dva efekty se skládají a na stínítku je tak možné pozorovat několik světlých proužků s velkou intenzitou, tzv. hlavní interferenční maxima, a několik méně jasných světlých proužků, tzv. vedlejší interferenční maxima. S rostoucím počtem štěrbin (obrázek 9-9b)) klesá intenzita vedlejších interferenčních maxim. Pro optickou mřížku jsou pozorovatelná již jen hlavní maxima, jak ukazuje obrázek 9-9c). Úkol 1, 2 – PL: Difrakce světla na optické mřížce.



Obrázek 9-9: a) Difrakce světla na dvou štěrbinách (šířka štěrbin vyznačena barevně). b) Difrakční obrazec zeleného monochromatického světla na sérii několika štěrbin. c) Obrazec difrakce zeleného světla na optické mřížce.

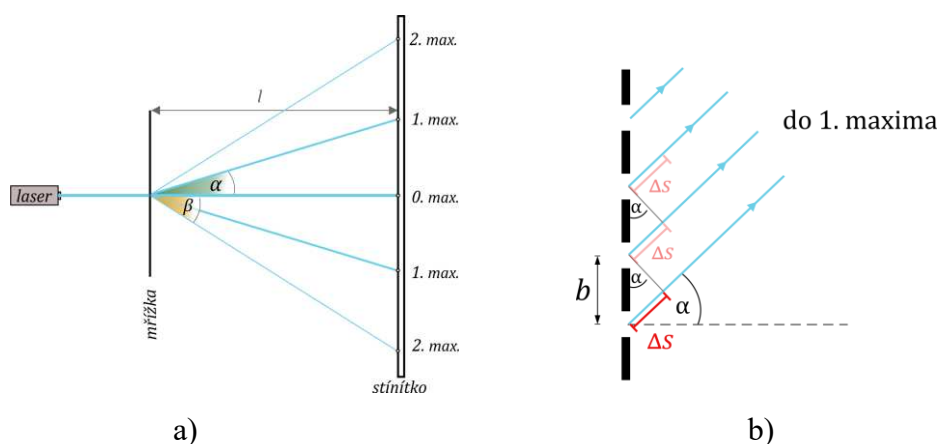
Převzato z: Lepil (2015)

Popis rozložení maxim difrakčního obrazce provádíme pomocí tzv. mřížkové rovnice, která má tvar $b \sin \alpha = k\lambda$, kde b označuje vzdálenost štěrbin mřížky – nazýváme ji mřížková konstanta, λ je vlnová délka použitého světla, k nabývá hodnot $1, 2, \dots$, nazývá se řád maxima a označuje pořadí světlého proužku (interferenčního maxima) od toho nultého (typicky ve středu vzniklého difrakčního obrazce). Úhel α slouží k určení pozice daného maxima na stínítku, jak zachycuje

obrázek 9-10a). Odvození rovnice lze udělat podobným geometrickým rozbořem situace jako v případě interference, opět za předpokladu, že mřížka a stínítko (resp. místo, ve kterém vzniká na stínítku interferenční maximum) jsou tak daleko od sebe, že můžeme považovat směry šíření paprsků za rovnoběžné. Dráhový rozdíl Δs vyjádříme pomocí podmínky pro pozorovatelnou interferenci, kdy se vlnění potkají ve fázi, tj. $\Delta s = k\lambda$, a zároveň pomocí úhlu α a mřížkové konstanty b z pravouhlého trojúhelníku (viz obrázek 9-10b)): $\Delta s = b \sin \alpha$.

Úkol 2 – PL: Difrakce na optické mřížce

Rozšíření: Jevy, které pozorujeme a popisujeme na velmi vzdáleném stínítku (v nekonečnu), se zabývá tzv. Fraunhoferova difrakce. Pokud bychom tento předpoklad porušili, difrakční obrazce by se jevíly jinak. Vztahy pro jejich popis jsou pak složitější a spadají pod tzv. Fresnelovu difrakci. Více o Fraunhoferově a Fresnelově difrakci uvádí např. Halliday (2000).



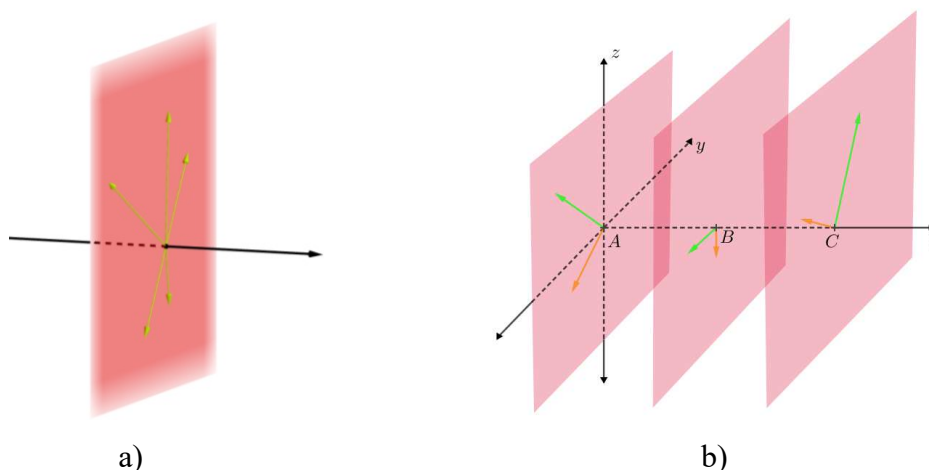
Obrázek 9-10: a) Schéma průchodu světla difrakční mřížkou s vyznačeným úhlem α jednoznačně určujícím polohu 1. maxima a úhlem β pro 2. maximum. b) Přiblížení situace na jednotlivých štěrbinách mřížky (černě) s mřížkovou konstantou b . Paprsky jsou přibližně rovnoběžné a směřují do jednoho velmi vzdáleného bodu (1. max.). Červeně je vyznačen dráhový rozdíl mezi každými dvěma sousedními paprsky ($\Delta s = b \sin \alpha$).

9.5 Polarizace

Zatím jsme se zabývali jevy, které jsme dokázali vysvětlit na základě vlastností vlnění. Nepotřebovali jsme vědět, jak přesně se mění vektor elektrické

intenzity \vec{E} . Jak se tedy chová vektor \vec{E} , který je složkou elektromagnetického vlnění? Úkol 1 – PL: Polarizace světla.

Elektromagnetické vlnění je příčné. To znamená, že vektory \vec{E} a \vec{B} (magnetické indukce) kmitají kolmo ke směru šíření vlny. Pro vektor \vec{B} navíc platí, že je v každý moment kolmý k vektoru \vec{E} . Geometrické místo všech kolmých přímek (směrů) k dané přímce (směru), které prochází daným bodem, tvoří v prostoru rovinu kolmou k přímce, která obsahuje daný bod (viz obrázek 9-11a)). Vektor \vec{E} tedy leží v daný okamžik v rovině kolmé na směr šíření světla, obecně ale může v této rovině mířit libovolným směrem.¹⁰⁰ Pokud by se světlo šířilo ve směru černého vektoru na obrázku 9-11a), elektrickou intenzitu v daný moment by mohl představovat kterýkoli ze zelených vektorů (vždy ale pouze jeden).



Obrázek 9-11: a) Zobrazení kolmé roviny (červeně) na daný směr (černý vektor). Zeleně jsou znázorněny některé vektory, které jsou kolmé k danému směru a leží v rovině (s daným počátkem). b) Znárodnění kartézské soustavy souřadnic s osami x , y , z (černě) a vektorů \vec{E} (zeleně) a \vec{B} (oranžově).

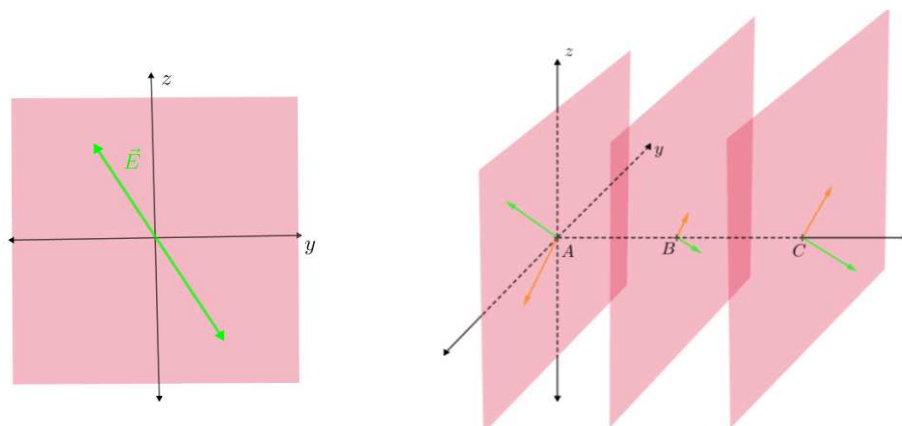
Když budeme elektromagnetické vlnění znázorňovat, využijeme kartézskou soustavu souřadnic s osami x , y , z . Směr šíření světla bude ve směru osy x . Na obrázku 9-11b) je zachyceno několik zobrazení vektorů \vec{E} (zeleně) a \vec{B} (oranžově).

¹⁰⁰ Pokud navíc přidáme podmínku, že vektory \vec{E} , \vec{B} a vektor udávající směr šíření světla společně tvoří tzv. pravotočivou bázi, je směr vektoru magnetické indukce v daném bodě jednoznačně určen.

Tyto vektory vždy leží v jedné rovině (kolmé ke směru šíření vlnění) a jsou k sobě vzájemně kolmé.¹⁰¹

Pokud bychom se na osu x z obrázku 9-11b) dívali jako na plynutí času v jednom bodě prostoru, okamžitou polohu vektorů \vec{E} např. v časech A , B , C by nic nespojovalo. Směr i velikost vektoru by byla náhodná. Pokud bychom ale obdobný obrázek vytvořili např. pro světlo z displeje mobilního telefonu, zjistili bychom, že vektor \vec{E} , zaznamenaný v různých časech v jednom místě, mění svou velikost, ale zůstává v jedné přímce (viz obrázek 9-12).

Jev, při kterém se vektor elektrické intenzity¹⁰² mění určitým pravidelným způsobem, se nazývá *polarizace*. V případě, že vektor \vec{E} kmitá stále v jednom směru, je světlo *lineárně polarizované*. Světlo, jehož směr \vec{E} se mění nahodile, se nazývá *nepolarizované*. (Lepil, 2015)



Obrázek 9-12: Schematické zachycení kmitání vektoru \vec{E} (zeleně) lineárně polarizovaného světla. Průmět vektoru \vec{E} do roviny yz , osa x vystupuje z papíru směrem k nám (vlevo). Kmitání vektoru \vec{E} (zeleně) v jednom místě v různých časech (A , B , C). Oranžově je vyznačený vektor \vec{B} (vpravo).

Rozšíření: Kromě lineárně polarizovaného světla existuje ještě kruhová a eliptická polarizace, při které se směr kmitání vektoru \vec{E} mění, ovšem pravidelně.

Pozastavme se ještě u náhodnosti směrů elektrické intenzity nepolarizovaného světla. Jak se dokáže nějaká veličina v přírodě měnit „nekonečně často“, mohli

¹⁰¹ Pravotočivost systému můžeme jednoduše ověřit pomocí pravé ruky: vztyčený palec ukazuje směr šíření vlnění, prsty ukazují směr od zelené šipky k oranžové (sklápíme vektor elektrické intenzity do vektoru magnetické indukce).

¹⁰² A tím pádem také vektor magnetické indukce

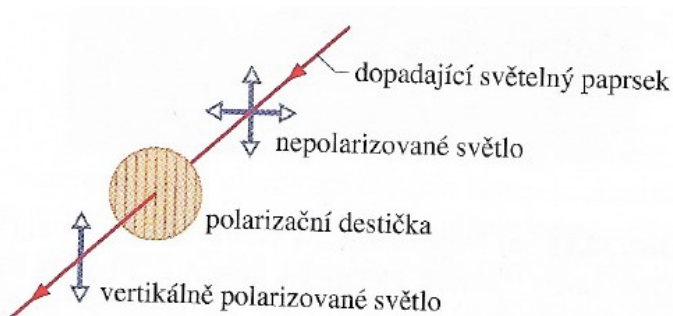
bychom říci nekonečně rychle? Ve skutečnosti je světlo vyzařené zdrojem nepolarizovaného světla také polarizované, ovšem kmitání v pravidelném směru není dokonale ustálené, tedy zdroj chvíli vyzařuje světlo polarizované v jednom směru, za chvíli zas v jiném. Změna směru elektrické intenzity souvisí se způsobem vyzařování světla v daném zdroji. Svou podstatu má na úrovni procesů vyzařování v atomu, které trvají 10^{-8} s (Feynman, 2000).

„Mění-li se polarizace rychleji, než jsme schopni ji detekovat, nazýváme světlo nepolarizovaným, neboť všechny jevy polarizace se v průměru ruší...Jak je však vidět z definice, je světlo nepolarizované jen tehdy, když my nejsme schopni zjistit, zda polarizované je nebo ne.“ (Feynman, 2000, str. 439)

Světlo můžeme polarizovat několika způsoby: odrazem, lomem, dvojlomem či absorpcí. V dalším textu rozebereme pouze polarizaci absorpcí. Ostatní způsoby představuje např. Lepil (2015).

Při polarizaci světla absorpcí (pohlcováním) necháváme procházet světlo folií či destičkou z materiálu, který je opticky anizotropní, tj. má v různých místech, různých směrech jiné optické vlastnosti. Polarizační filtry či polaroidy, jak se absorpční folie označují, obsahují molekuly podlouhlého tvaru uspořádané technologickým procesem v jednom směru. Když polaroidem prochází světlo, jedna složka elektrické intenzity materiálem prochází, zatímco složka elektrické intenzity kolmá na tento směr je molekulami pohlcena (Halliday, 2000).

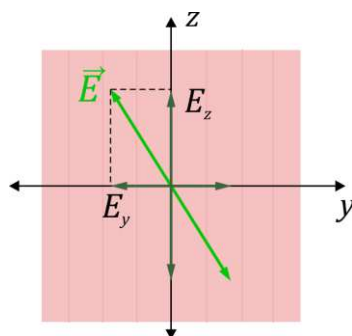
Lidské oko nedokáže rozlišit polarizované a nepolarizované světlo. Pokud jej chceme zkoumat, potřebujeme jej nějak „zviditelnit“. Pro naše pozorování nebude důležitá vnitřní struktura materiálu polaroidu, využijeme ale toho, že světlo je po průchodu filtrem lineárně polarizované a vektor elektrické intenzity kmitá pouze v jednom směru, který udává polaroid. Budeme mluvit o stejné rovině polarizace světla a polaroidu. Průchod světla polarizačním filtrem schematicky znázorňuje obrázek 9-13. Úkol 1 – PL: Polarizace světla Úkol 1 – PL: Malusův zákon



Obrázek 9-13: Průchod nepolarizovaného světla polarizačním filtrem (polarizační destička). Rovina polarizace filtru je naznačena svislými čarami. Převzato z: Halliday (2000)

Necháme nepolarizované světlo, např. ze žárovky, přímé sluneční světlo, procházet polarizačním filtrem. Zaměříme se na intenzitu osvětlení I udávanou v luxech. Intenzita osvětlení je fotometrická veličina, která udává množství světla, které dopadne na určitou plochu za určitou dobu.¹⁰³ Pro intenzitu světla I po průchodu filtrem platí vztah: $I = \frac{1}{2} I_0$, kde I_0 je intenzita dopadajícího nepolarizovaného světla. Úkol 2 – PL: Malusův zákon.

Rozšíření: Kde se tato závislost vzala, můžeme vysvětlit pomocí chování vektoru elektrické intenzity při průchodu filtrem. Mějme daný směr šíření světla opět ve směru osy x . Pokud sledujeme kmitání vektoru \vec{E} v rovině yz v daném místě v různých časech, můžeme libovolný vektor rozložit na složky ve směru osy y a z , jak to ukazuje obrázek 9-14.



Obrázek 9-14: Rozklad vektoru \vec{E} do složek ve směru osy y a z

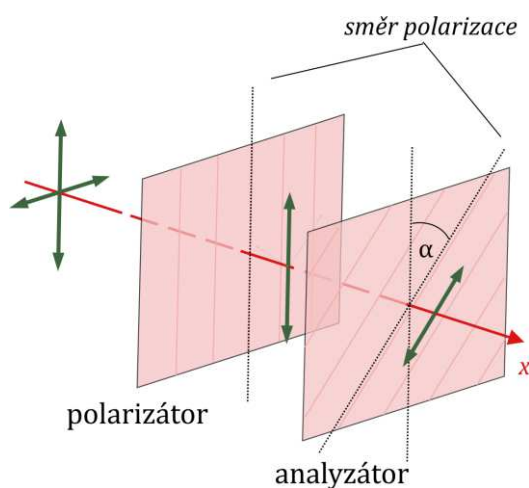
Protože osy y a z jsou na sebe kolmé, budou na sebe vždy kolmé také složky rozloženého vektoru \vec{E} do těchto směrů. Velikost složek budeme označovat E_y a E_z .

¹⁰³ Neměli bychom ji zaměňovat s elektrickou intenzitou, která udává mohutnost elektrického pole.

Každý vektor \vec{E} tedy dokážeme reprezentovat dvěma k sobě kolnými složkami. Pro velikost celkové elektrické intenzity E platí podle Pythagorovy věty:

$E = \sqrt{E_y^2 + E_z^2}$. Polarizační filtr jeden směr elektrické intenzity propustí a směr k ní kolmý pohltí. Pro intenzitu ve složkách to znamená: Polarizační filtr propouští např. intenzitu ve směru osy z , nutně musí pohltit složku E_y , neboť je k ní kolmá. V případě nepolarizovaného světla (vektor se náhodně mění) jsou příspěvky složek E_y a E_z stejně velké. Pohlcením složky E_y se tudíž velikost elektrické intenzity E zmenší na polovinu. Intenzitu osvětlení dostaneme jako druhou mocninu elektrické intenzity. Z těchto poznatků již pro intenzitu osvětlení plyne: $I_0 = E^2 = E_y^2 + E_z^2$, kde pro nepolarizované světlo můžeme psát $E_z^2 = E_y^2$. Pro intenzitu po průchodu filtrem platí: $I = E^2 = E_z^2$. Tedy $\frac{I}{I_0} = \frac{E_z^2}{2E_z^2} = \frac{1}{2}$, což odpovídá vztahu, který jsme uvedli dříve.

Abychom mohli pouhým okem pozorovat lineárně polarizované světlo, potřebujeme soustavu dvou filtrů. Jedním filtrem vytvoříme z nepolarizovaného světla polarizované – takovému filtru říkáme polarizátor. Druhým filtrem můžeme analyzovat, zkoumat polarizované světlo – filtru říkáme analyzátor. Uspořádání filtrů je na obrázku 9-15. **Úkol 1 – PL: Polarizace světla.**



Obrázek 9-15: Uspořádání polarizátoru a analyzátoru. Vektor elektrické intenzity (zeleně) znázorňuje postupný průchod světla filtry. Světlo se šíří ve směru osy x .

Pokud pozorujeme polarizované světlo skrz analyzátor, dochází k zajímavému jevu: Intenzita světla, které projde filtrem, se mění v závislosti na natočení analyzátoru. Když se shodují roviny polarizace polarizátoru a analyzátoru, je

intenzita prošlého světla maximální. Pokud začneme rovinu polarizace analyzátoru otáčet ve směru hodinových ručiček, intenzita klesá až do vzájemného natočení filtrů o úhel 90° . Od této hodnoty intenzita světla opět roste, dokud odchylka rovin polarizace není nulová. Označme α úhel natočení rovin polarizace polarizátoru a analyzátoru (viz obrázek 9-15). Jestliže intenzita světla před průchodem analyzátozem byla I_0 , můžeme pro intenzitu světla po průchodu analyzátozem psát: $I = I_0 \cos^2 \alpha$. Tento vztah se nazývá *Malusův zákon*. Použitím vhodné kombinace rovin polarizace polarizátoru a analyzátoru můžeme dosáhnout také stavu, kdy neprojde žádné světlo. To nastane právě v okamžiku, kdy jsou k sobě roviny polarizace polarizátoru a analyzátoru kolmé (hovoříme o zkrížených polarizátorech).

Úkol 1 – PL: Polarizace světla. Úkol 3, 4 – PL: Malusův zákon.

Přestože polarizované světlo nevidíme, jeho vlastností využíváme v mnoha oblastech. Polarizační filtry u fotoaparátů umožňují odstranit ze snímků nežádoucí odlesky z lesklých ploch, mraků, vodní hladiny atp. Polarizační filtry jsou z obdobného důvodu součástí některých slunečních či lyžařských brýlí, najdeme je také v obrazovkách notebooků či mobilních telefonů. Roli polarizovaného světla v LCD televizích podrobněji vysvětluje např. Lepil (2015) v rozšiřujícím učivu na CD (kapitola R3). Polarizaci využívá také polarimetrie, která zkoumá opticky aktivní látky, jež umí stáčet rovinu polarizace světla, které jimi prochází. Mezi opticky aktivní látky patří např. roztok cukru. Fotoelasticimetrie je obor, který využívá polarizované světlo ke zviditelnění namáhaných části materiálů, které stáčí rovinu polarizace se změnou mechanického napětí.

10 Závěr

Výsledkem této práce je nový tematický celek *Optika II – kvantitativní pojetí*, který se skládá z pěti stanovišť s experimenty převážně z oblasti vlnové optiky. Čtyři z těchto stanovišť jsou tvořena kvantitativními experimenty, páté cílí spíše na hlubší kvalitativní pochopení problematiky. Každé z těchto stanovišť bylo alespoň jednou otestováno a na základě zpětné vazby žáků a pozorování lektorů upraveno, u většiny stanovišť proběhl tento proces testování ↔ úprava několikrát. Pracovní listy ve své finální podobě byly koncem března 2022 vystaveny na webových stránkách IFL a nový tematický celek se tak oficiálně připojil k dalším školám nabízeným tématům.

Současně byl zveřejněn a nabídnut k rezervaci také druhý vyvíjený tematický celek *Optika I – kvalitativní pojetí*, jehož tvorbě se ve své diplomové práci věnoval Bc. Tomáš Kopřiva. Jelikož vývoj obou nových optických celků probíhal současně, testování vytvořených stanovišť *Optiky I a II* probíhalo společně, a protože se také jedná o fyzikálně blízká témata, je možné, že v některých částech se práce „překrývají“. Především se jedná o podrobnosti k systému testování stanovišť, informace o IFL či průběhu návštěvy v laboratoři, případně přiblížení některých teoretických oblastí. Tento překryv informací je nevyhnutelný, neboť se týká oblastí, které jsou nutnou součástí práce jako samostatné jednotky. I přesto, že se některé části prací mohou podobat vzhledem k okolnostem jejich vzniku, byly práce vytvořeny nezávisle na sobě a jsou zásluhou čistě svého autora.

Začátkem dubna (6. 4. 2022) proběhla řádná (neověřovací) dvouhodinová návštěva žáků v IFL se současným výběrem tématu *Optika II – kvantitativní pojetí*. Experimentální celek tak absolvovalo 11 žáků gymnázia, pracovali ve čtyřech skupinách. Žádná skupina nestihla projít všechna nabízená stanoviště, skupinám se podařilo kompletně dokončit 2-3 stanoviště. V průběhu práce nedošlo k významným obtížím, vytvořený celek lze tedy považovat za funkční.

Přestože se nepodařilo dodržet doporučenou dobu 30 minut, kterou žáci stráví při návštěvě na jednom stanovišti, vytvořená stanoviště dokáží žáky zaujmout i po delší časový interval. Dlouhodobější sledování zájmu žáků a učitelů může poskytnout důvody pro další zásah do struktury stanovišť. Velký prostor pro zlepšení je ovšem na stanovišti *Polarizace světla*. Své místo mezi stanovišti jistě má, a sice při současné návštěvě dalších stanovišť, např. *Malusův zákon*, žákům umožňuje lepší porozumění, ale problematický je aplet. Pro dlouhodobé využívání v IFL by bylo

vhodné zajistit aplet bez současných nedostatků (popsaných dříve v práci). Aby model nedostatky neměl vůbec, zajistit nelze, ovšem výroba apletu, který bude úpravou toho současného, dle jistých požadavků by mohla být vhodným řešením.

Teoretický text, vytvořený v rámci práce, by bylo možné v některých oblastech doplnit např. dalšími ilustracemi (fotoelasticimetrie, reálná pozorování jevů, názorné skládání vlnění atp.) či některými souvislostmi, a po grafické úpravě přidat k pracovním listům na webové stránky IFL. Text by se lépe dostal k žákům a splnil tak svůj účel – poskytnout zájemcům hlubší teoretický základ k fyzikálním problémům, se kterými se setkávají na stanovištích. Zda by o tyto texty byl ze strany žáků větší zájem, je otázkou dalšího možného zkoumání. Pro IFL by se tak otevřela nová cesta, kdy by bylo možné podobné texty postupně vytvořit i k dalším experimentálním celkům.

Prostor pro další práci je také v oblasti výzkumu způsobu a strategií žáků při experimentování na stanovišti. Tento výzkum byl původně nepovinnou součástí této práce, vzhledem k nepříznivým okolnostem (spíše na straně autorky než obecně nepříznivé situaci) nebyl uskutečněn. Výzkum, týkající se práce žáků při experimentování na nově vytvořených stanovištích, je jistě vhodným navázáním na tuto práci.

Svět se neustále vyvíjí a mění, technologický pokrok je velmi rychlý, a tak není od věci zmínit také to, že současná podoba *Optiky II – kvantitativní pojetí* není věčná. Aby dokázala zaujímat další a další žáky, musí držet krok s novými dostupnými experimenty, pomůckami. V jedné z úloh se využívá CD jako příklad optické mřížky, se kterou se žáci mohou setkat. V současné době ale již CD nelze považovat za běžně používanou technologii. Aby experimentování v rámci tohoto optického tematického celku odpovídalo cílům IFL i nadále, je potřeba udržovat experimenty „živé“ a aktuální tak, aby žáci mohli nejen v laboratoři zažívat intenzivní pocit, že fyzika je všude kolem nich, oni se s ní setkávají a mohou ji pochopit.

Seznam použité literatury

- Česká televize. (2021). *ČTedu* [cit. 18. 4. 2022]. <https://edu.ceskatelevize.cz/>
- Česká televize. (2012). *Rande s fyzikou* [cit. 1. 4. 2022].
<https://www.ceskatelevize.cz/porady/10319921345-rande-s-fyzikou/>
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (2000). *Feynmanovy přednášky z fyziky s řešenými příklady*. Fragment. ISBN 80-720-0405-0
- Fürstová, T. (2020). *Různé badatelské výuky ve fyzikálních experimentech* [Diplomová práce]. Univerzita Karlova, Matematicko-fyzikální fakulta.
- Halliday, D., Walker J., & Resnick, R. (2000). *Fyzika: Část 4: Elektromagnetické vlny - Optika - Relativita*. Vutium. ISBN 80-214-1868-0.
- Interaktivní fyzikální laboratoř. (n.d.). *Interaktivní fyzikální laboratoř na MFF UK* [cit. 18. 4. 2022]. <https://www.mff.cuni.cz/cs/kdf/akce-pro-zaky-zs-ass/interaktivni-fyzikalni-laborator>
- iSES. (n.d.). *Vzdálené experimenty* [cit. 27. 3. 2022].
<https://www.ises.info/index.php/cs/laboratory>
- Koupilová, Z. (2020). Sbíрка řešených úloh a Sbíрка fyzikálních pokusů. In P. Kácovský & V. Koudelková (Eds.), *Veletrh nápadů učitelů fyziky 25* (s. 204-210). MatfyzPress. ISBN 978-80-7378-432-4. Dostupné také z:
vnuf.cz/2020/sbornik_VNUF_2020.pdf
- Koupilová, Z., Dvořák, L., Kácovský, P. (Eds.). (2022) *Veletrh nápadů učitelů fyziky: Souhrnný sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky* [cit. 1. 4. 2022].
<http://vnuf.cz/sbornik/>
- Lepil, O. (2015). *Fyzika pro gymnázia: Optika* (5. vydání). Prometheus. ISBN 978-80-7196-444-5.
- Machalická, J. (2017). *Experimentální sady z optiky pro Interaktivní fyzikální laboratoř* [Diplomová práce]. Univerzita Karlova. Matematicko-fyzikální fakulta.
- Malý, P. (2008). *Optika*. Karolinum. ISBN 978-80-246-1342-0

- MŠMT. (2020). *Rámcový vzdělávací program pro gymnázia* [cit. 27. 3. 2022]. https://www.edu.cz/wpcontent/uploads/2021/09/001_RVP_GYM_uplne_zneni.pdf
- Pazdera, V. (2013). *Fyzikální experimenty se systémem Vernier* [cit. 1. 4. 2022]. <https://www.vernier.cz/experimenty/pazdera/index.php>.
- Polák, Z. (2003). Pokusy s CD. In M. Šerý (Ed.), *Veletrh nápadů učitelů fyziky 8* (s. 164-169). Jihočeská univerzita. ISBN 80-7040-647-X. Dostupné také z: [https://vnuf.cz/sbornik/rocniky/Ceske_Budejovice-2003_\(8\).html](https://vnuf.cz/sbornik/rocniky/Ceske_Budejovice-2003_(8).html)
- Reichl, J., Všetická, M. (2006). *Encyklopedie fyziky: Interference vlnění* [cit. 18. 4. 2022]. <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/167-interference-vlneni>
- Remote-Lab GymKT. (n.d.). *Vzdálená internetová laboratoř* [cit. 1. 4. 2022]. <http://remote-lab.fyzika.net/o-laboratori.php?lng=cs>
- Sbírka fyzikálních pokusů. (n.d.). *Sbírka fyzikálních pokusů* [cit. 27. 3. 2022]. <http://fyzikalnipokusy.cz/cs>
- Snětinová, M., & Kácovský, P. (2019). Interactive physics laboratory: A place for hands-on experimenting. *AIP Conference Proceedings 2152*, 030031. <https://doi.org/10.1063/1.5124775>
- Šabatka, Z. (2016) *Experimenty pro interaktivní fyzikální laboratoř: pokusy a teorie* [Disertační práce]. Univerzita Karlova. Matematicko-fyzikální fakulta.
- Vernier. (2022) *Kuchařka: Jednoduché experimenty do hodin chemie, fyziky a biologie* [cit. 18. 4. 2022]. <https://www.vernier.cz/experimenty/kucharka/index.php>
- Walsh, T., Munoz-Britton, T. *Polarization* [online] [cit. 27. 3. 2022]. www.geogebra.org/m/yphvwwda
- Wikipedie: Otevřená encyklopedie. (8. 08. 2021). *Moaré*. [cit. 1. 4. 2022]. <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Moar%C3%A9&oldid=20332842>

Převzaté obrázky

Obrázek 4-3: Obrázek 3.14: Difrakce světla na optické mřížce In: Experimentální sady z optiky pro Interaktivní fyzikální laboratoř. Diplomová práce. Praha: Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova, 2017, s. 25.

Obrázek 9-2: R1-5 Ohybový obrazec světla procházejícího štěrbinou (barevně je vyznačena skutečná šířka štěrbin). In: R1 Základní pojmy. Fyzika pro gymnázia. 5., přepracované vydání. Praha: Prometheus, 2015, s. 6. ISBN 9788071964445.

Obrázek 9-8: R3-8 Ohybový obrazec světla procházejícího štěrbinou (barevně je vyznačena skutečná šířka štěrbin). In: R3 Vlnová optika. Fyzika pro gymnázia. 5., přepracované vydání. Praha: Prometheus, 2015, s. 40. ISBN 9788071964445.

Obrázek 9-9a): R3-15 Ohybový obrazec světla procházejícího dvěma štěrbinami. Tamtéž (str. 44)

Obrázek 9-9b),c): R3-17 Ohyb monofrekvenčního světla na rostoucím počtu štěrbin (a–c). Tamtéž (str. 45)

Obrázek 9-7: 3-6 Ohyb světla na hraně. In: Fyzika pro gymnázia. 5., přepracované vydání. Praha: Prometheus, 2015, s. 73. ISBN 9788071964445.

Obrázek 9-13: 34-12 Nepolarizované světlo se polarizuje, když prochází polarizační destičkou. Směr polarizace je pak rovnoběžný se směrem polarizace destičky, která je zde naznačena svislými čarami na destičce. In: Fyzika: Část 4: Elektromagnetické vlny - Optika - Relativita. Brno: VUTIUM, 2000, s. 900. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.

Seznam obrázků

Obrázek 2-1: Ukázka zpětné vazby s barevným kódováním a komentářem.

Obrázek 4-1: Podoba stanoviště *Difrakce na optické mřížce*

Obrázek 4-2: Schéma difrakce světla na optické mřížce

Obrázek 4-3: Původní podoba schématu v pracovním listu *Difrakce na optické mřížce*. Převzato z: Machalická (2017)

Obrázek 5-1: Podoba apletu z první verze stanoviště *Malusův zákon*

Obrázek 5-2: Příprava stanoviště *Malusův zákon* s použitím akumulátoru.

Obrázek 5-3: Uspořádání experimentu proměření Malusova zákona se stolní lampou.

Obrázek 5-4: Naměřený průběh závislosti intenzity světla žárovky stolní lampy po průchodu polarizačními filtry na úhlu vzájemného natočení filtrů (roviny polarizace).

Obrázek 6-1: Snímek z apletu k úloze pracovního listu *Polarizace světla*

Obrázek 6-2: Elektromagnetická vlna – první (vlevo) a finální verze (vpravo)

Obrázek 6-3: Vývoj ilustrace k úloze 7 stanoviště *Polarizace světla* – první verze (vlevo), úprava po prvním testování (uprostřed), finální úprava po druhém testování (vpravo).

Obrázek 7-1: Připravené stanoviště *Měření indexu lomu*

Obrázek 7-2: Původní ilustrace umístění dálkoměru ve dvou různých pozicích.

Obrázek 7-3: Doplnovací text k odvození indexu lomu z původní verze stanoviště.

Obrázek 8-1: Interference vlnění modelovaná pomocí proužků moaré

Obrázek 8-2: Nastavení aparatury pro Youngův experiment

Obrázek 8-3: Interferenční obrazec, který se zobrazí na stínítku při posvícení laserovým modulem skrz dvojštěrbinu ($\lambda = 650 \text{ nm}$, $d = 150 \text{ }\mu\text{m}$, $l = 30 \text{ cm}$).

Obrázek 9-1: Schéma k zavedení indexu lomu.

Obrázek 9-2: Rozklad bílého světla na skleněném hranolu. Převzato z: Lepil (2015)

Obrázek 9-3: a) Skládání dvou vlnění na vodní hladině: modrá – amplituda, černá – uzel, b) Skládání dvou vlnění pomocí dvou folií se soustřednými kruhy: bílá – amplituda, černá – uzel.

Obrázek 9-4: Interferenční obrazec (vlevo), nastavení experimentu pro pozorování interference na dvojštěrbině (vpravo).

Obrázek 9-5: Schéma průběhu interferenčního experimentu

Obrázek 9-6: Schéma k odvození vztahu pro interferenční maximum

Obrázek 9-7: Difrakce světla na hraně. Převzato z: Lepil (2015)

Obrázek 9-8: Difrakce světla na jedné štěrbíně. Šířka štěrbiny je naznačena červenými čarami. Převzato z: Lepil (2015)

Obrázek 9-9: a) Difrakce světla na dvou štěrbínách (šířka štěrbín vyznačena barevně). b) Difrakční obrazec zeleného monochromatického světla na sérii několika štěrbín. c) Obrazec difrakce zeleného světla na optické mřížce. Převzato z: Lepil (2015)

Obrázek 9-10: a) Schéma průchodu světla difrakční mřížkou s vyznačeným úhlem α jednoznačně určujícím polohu 1. maxima a úhlem β pro 2. maximum. b) Přiblížení situace na jednotlivých štěrbínách mřížky (černě) s mřížkovou konstantou b . Paprsky jsou přibližně rovnoběžné a směřují do jednoho velmi vzdáleného bodu (1. max.). Červeně je vyznačen dráhový rozdíl mezi každými dvěma sousedními paprsky ($\Delta s = b \sin \alpha$)

Obrázek 9-11: a) Zobrazení kolmé roviny (červeně) na daný směr (černý vektor). Zeleně jsou znázorněny některé vektory, které jsou kolmé k danému směru a leží v rovině (s daným počátkem). b) Znázornění kartézské soustavy souřadnic s osami x , y , z (černě) a vektorů \vec{E} (zeleně) a \vec{B} (oranžově).

Obrázek 9-12: Schematické zachycení kmitání vektoru \vec{E} (zeleně) lineárně polarizovaného světla. Průmět vektoru \vec{E} do roviny yz , osa x vystupuje z papíru směrem k nám (vlevo). Kmitání vektoru \vec{E} (zeleně) v jednom místě v různých časech (A , B , C). Oranžově je vyznačený vektor \vec{B} (vpravo).

Obrázek 9-13: Průchod nepolarizovaného světla polarizačním filtrem (polarizační destička). Rovina polarizace filtru je naznačena svislými čarami. Převzato z: Halliday (2000)

Obrázek 9-14: Rozklad vektoru \vec{E} do složek ve směru osy y a z

Obrázek 9-15: Uspořádání polarizátoru a analyzátoru. Vektor elektrické intenzity (zeleně) znázorňuje postupný průchod světla filtry. Světlo se šíří ve směru osy x .

Seznam tabulek

Tabulka 3-1: Parametry skupin, které testovaly stanoviště v prvním období testování.

Tabulka 3-2: Podrobnosti testování jednotlivých stanovišť v prvním období testování.

Tabulka 3-3: Podrobnosti testování jednotlivých stanovišť v druhém období testování.

Seznam použitých zkratk

IFL – Interaktivní fyzikální laboratoř

iSES – Internetové Školní Experimentální Studio

MFF UK – Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy

PL – pracovní list(y)

RVP – Rámcový vzdělávací program

SŠ – Střední škola, středoškolský

ŠVP – Školní vzdělávací program

UP – Univerzita Palackého (v Olomouci)

VNUF – Veletrh nápadů učitelů fyziky

ZŠ – Základní škola, základníškolský

Přílohy

Příloha A

Příloha A obsahuje 5 pracovních listů k vytvořeným stanovištím tematického celku *Optika II – kvantitativní pojetí* v podobě, v jaké s nimi pracují žáci v IFL. Pracovní listy nesou jména stanovišť, tj. *Měření indexu lomu*, *Malusův zákon*, *Difrakce na optické mřížce*, *Youngův experiment*, *Polarizace světla*. Všechny pracovní listy jsou dostupné také na webových stránkách IFL v sekci Experimentální celky.

V rámci pracovního listu *Polarizace světla* je uvedena instrukce ke spuštění apletu současně s popisem jeho umístění na zařízení používaném v IFL. Pro kontext této práce budiž informace o umístění apletu ztotožněna s následujícím odkazem: <https://www.geogebra.org/m/tkecrrwb>.



MĚŘENÍ INDEXU LOMU

- Sledujte pokyny v tomto materiálu, pokud jsou pro vás nesrozumitelné, nebojte se nás zeptat.
- Vaše dílčí i finální závěry zaznamenávejte přímo do textu či připravených grafů.
- Chcete-li, můžete si například pomocí mobilu průběh experimentu vyfotit, natočit apod.

Cíl a idea měření

Na tomto stanovišti je vaším úkolem určit index lomu různých prostředí pomocí digitálního dálkoměru.

Teoretický úvod

Rychlost světla se liší v závislosti na prostředí, kterým se šíří. Ve vakuu má světlo nejvyšší možnou rychlost, a to je $c \doteq 3 \cdot 10^8$ m/s. Pokud se šíří jiným prostředím (jako je voda, sklo, líh, atd.), jeho rychlost je menší. K popisu této skutečnosti využíváme veličinu zvanou **index lomu**. Index lomu n je poměr rychlostí světla ve dvou různých prostředích. Pro tzv. absolutní index lomu platí

$$n = \frac{c}{v},$$

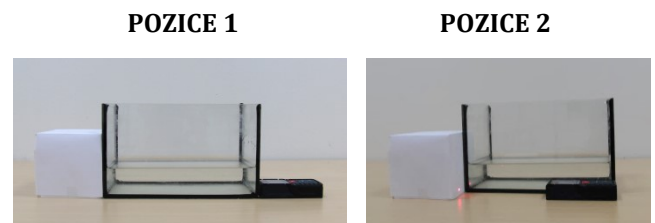
kde c je vždy rychlost světla ve vakuu, v je rychlost světla ve zkoumaném prostředí.

Pozn.: Rychlost šíření světla ve vzduchu lze považovat za málo odlišnou od té ve vakuu, dále budeme pracovat s rychlostí světla ve vzduchu rovnou c .

Úkol 1: Měření vzdálenosti v různých prostředích

Postup

1. Změřte pomocí digitálního dálkoměru několik vzdáleností l_d . Dálkoměr při měření umístěte do různých pozic (viz obrázek 1). Některá měření proved'te v jiných prostředích než je vzduch (např. voda).
2. Měřenou vzdálenost vždy ověřte pomocí pásového měřidla (vzdálenost l_m).
3. Získané hodnoty zapisujte do tabulky.



Obr. 1: Způsoby přiložení dálkoměru

Objekt	l_d [m] (pozice 1)	l_d [m] (pozice 2)	l_m [m]
Lavice			
Prázdné akvárium			
Akvárium s vodou (skrz stěny a vodu)		X	





4. Zamyslete se, odkud dálkoměr měří vzdálenost. Dokážete z naměřených hodnot určit délku dálkoměru?

5. Zkuste vysvětlit odlišnosti v naměřených hodnotách l_d a l_m , které nejsou způsobeny umístěním dálkoměru. Ve kterém měření došlo k výraznější odchylce? Čím se toto měření odlišuje?

Úkol 2: Jak funguje dálkoměr?

1. Navrhněte způsob, jakým dálkoměr měří vzdálenost. Využijte poznatky z předchozího úkolu.

2. Přivolejte si lektora a nápady s ním konzultujte.
3. Nyní se společně s lektorem zamyslete nad tím, jak můžete pomocí měření vzdálenosti dálkoměrem určit index lomu průhledného prostředí.
4. Pomocí definičního vztahu pro index lomu se jej pokuste vyjádřit pomocí měřitelných vzdáleností l_d , l_m . Využijte vztah z teoretického úvodu a poznatky z konzultace s lektorem.

$n =$





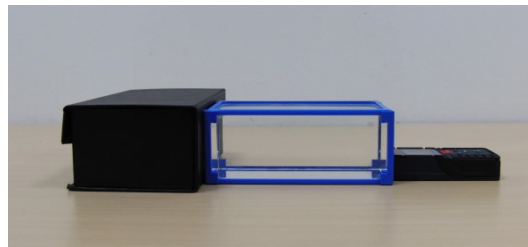
Úkol 3: Určování indexu lomu

Připravte experiment dle obrázku. **Dbejte na přesné umístění dálkoměru!**

Naměřené hodnoty zapisujte do připravené tabulky.

Postup

1. Změřte pomocí pásového měřidla délku skleněného hranolu.
2. Odečtěte z dálkoměru hodnotu l_d , kterou ukáže při měření skleněného hranolu. Proveďte korekci hodnoty vzhledem k umístění dálkoměru.
3. Na základě vztahu odvozeného v úkolu 2 určete index lomu skla.
4. Měření opakujte pro další připravená prostředí (plastová tyč, voda v akváriu).
5. Porovnejte získané hodnoty s tabulkovými.



Obr. 2: Uspořádání experimentu

Prostředí	l_m [m]	l_d [m]	n	$n_{tabulky}$
sklo				
voda				
plast				
vzduch				

Rozmyslete, co všechno ovlivnilo přesnost získaných hodnot indexu lomu.

Závěry

V prostředích jako je voda, líh, sklo, ... naměří dálkoměr *větší/menší* hodnotu než je reálná vzdálenost. Je to proto, že v těchto prostředích se světlo šíří *rychleji/pomaleji* než ve vzduchu. Index lomu těchto prostředí je vždy *větší/menší* než 1.

Index lomu vyjadřuje, kolikrát je rychlost světla v daném prostředí než ve .

Stručně popište, v čem spočívalo určování indexu lomu pomocí dálkoměru.





MALUSŮV ZÁKON

- Sledujte pokyny v tomto materiálu, pokud jsou pro vás nesrozumitelné, nebojte se nás zeptat.
- Vaše dílčí i finální závěry zaznamenávejte přímo do textu či připravených grafů.
- Chcete-li, můžete si například pomocí mobilu průběh experimentu vyfotit, natočit apod.

Cíl a idea měření

Na tomto stanovišti se seznámíte s polarizací světla, proměříte intenzitu světla prošlého polarizačním filtrem a budete ověřovat platnost Malusova zákona.

Teoretický úvod

Když se díváme na světlo jako na vlnění, můžeme popsat jev zvaný polarizace. Polarizace světla souvisí se způsobem (nahodilostí) kmitání složek vlnění – jedna z nich se nazývá elektrická intenzita.

Z přirozeného, nepolarizovaného světla vytvoříme polarizované, když jej necháme procházet např. lineárním polarizačním filtrem.

Úkol 1: Zkoumání polarizačních filtrů

1. Prohlédněte si různé polarizační filtry. Dívejte se skrz filtr nejprve na různé předměty ve vašem okolí (židle, deska stolu, spolužáci,...) a následně na monitor či displej telefonu. Filtr různě otáčejte. Stručně popište, jak se vaše pozorování liší pro displej (monitor) a další předměty (např. deska stolu).

2. Nyní skládejte filtry i přes sebe a otáčejte jimi. Sledujte především běžné předměty (**NE** monitor atp.) a zapište svá pozorování.

3. Pokud složíme více filtrů za sebe a díváme se na různé předměty, pozorujeme podobný jev, jako když se díváme na pouze s filtrem. Světlo z je tedy polarizované/nepolarizované.

Úkol 2: Intenzita světla při průchodu jedním filtrem

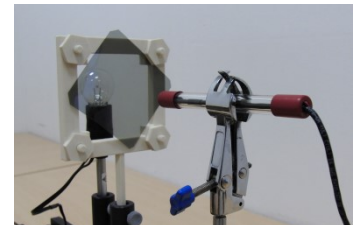
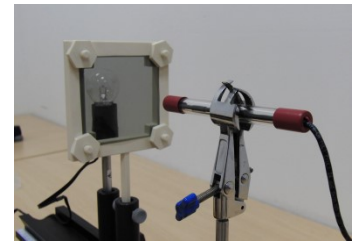
Lineární polarizační filtr dokáže ovlivnit intenzitu světla I , které jím projde. To proto, že propouští pouze tu složku elektrické intenzity, která kmitá ve stejném směru, jako je směr určený filtrem.

Odhadněte, co se stane s intenzitou **nepolarizovaného** světla, když projde jedním polarizačním filtrem. Svůj odhad napište.



Postup

1. Prohlédněte si aparaturu a otevřete soubor *Mereni_intenzity_svetla.cmbl*, který naleznete na ploše ve složce *Optika II*.
2. Umístěte mezi zdroj a luxmetr **prázdný** rámeček a spusťte měření tlačítkem . Do tabulky si poznamenejte hodnotu intenzity světla ze zdroje (bez filtru).
3. Do rámečku nasad'te polarizační filtr. Snažte se zachovat původní vzdálenosti mezi žárovkou, rámečkem a luxmetrem. Zaznamenejte hodnotu intenzity prošlého světla do tabulky.
4. Následně filtr vyjměte z rámečku, otočte přibližně o 45° vzhledem k předchozí poloze filtru (viz obr. 1), zasad'te zpět do rámečku a umístěte před zdroj. Proveďte měření a zapište hodnotu.
5. Proměřte intenzitu světla s krokem otočení filtru 45° od 0° do 180°. Získané hodnoty zapisujte do tabulky.



Obr. 1: Nastavení polarizačního filtru v rámečku

α [°]	Bez filtru	0°	45°	90°	135°	180°
I [lx]						

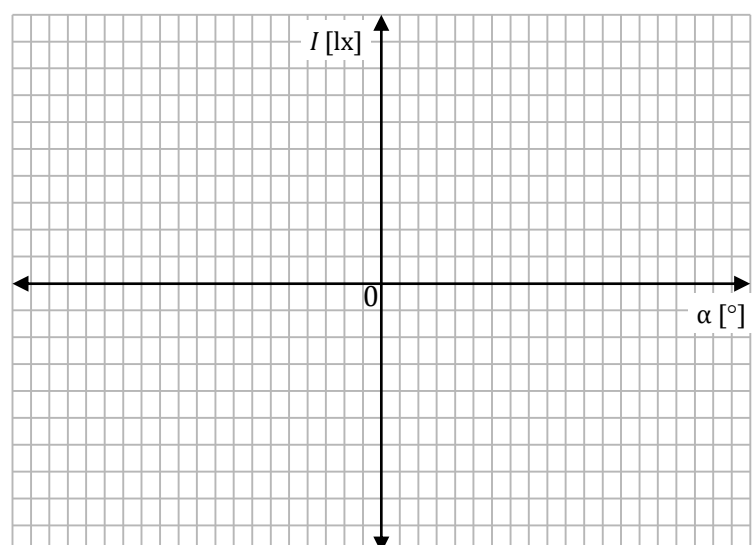
6. Na základě naměřených hodnot zkuste formulovat závěry: Jak se změní intenzita nepolarizovaného světla, které prochází polarizačním filtrem? Závisejí na úhlu otočení filtru?

Úkol 3: Proměření Malusova zákona

V předchozím úkolu dopadalo na polarizační filtr nepolarizované světlo. Nyní do experimentu **přidáme ještě jeden filtr** a budeme sledovat intenzitu světla za ním.

V případě, že filtrem prochází již lineárně polarizované světlo, popisuje jeho intenzitu I za polarizačním filtrem tzv. Malusův zákon: $I = I_0 \cos^2 \alpha$, kde I_0 je intenzita světla před průchodem filtrem a α je úhel vzájemného natočení filtrů.

1. Odhadněte a zakreslete, jak bude vypadat graf závislosti intenzity prošlého světla na úhlu natočení polarizačního filtru α .





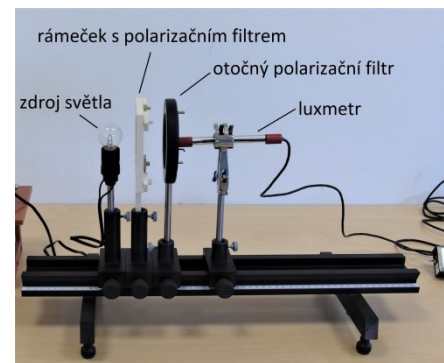
Inspirujte se matematickou podobou Malusova zákona.

Svůj odhad konzultujte s lektorem.

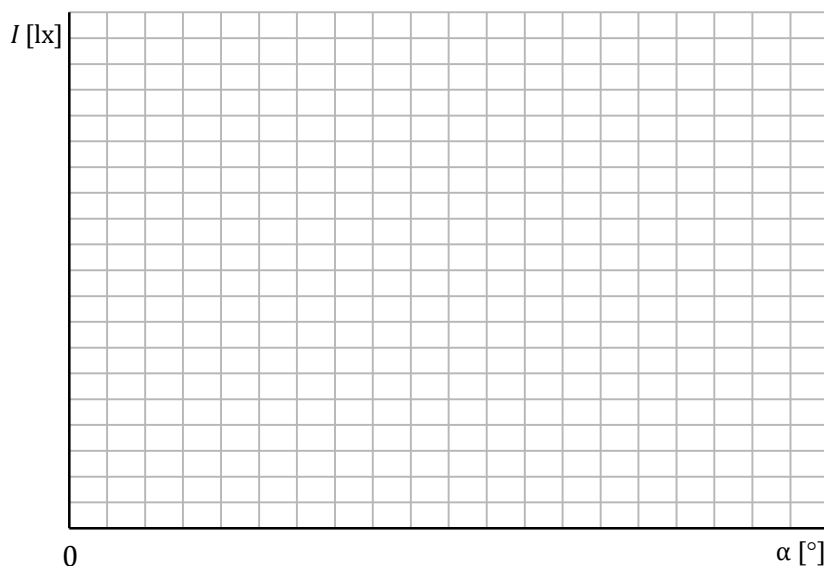


Postup

1. Upravte aparaturu podle obrázku 2. Polarizační filtry nastavte co nejbližší k sobě.
2. Otočný filtr nastavte tak, aby intenzita světla po průchodu oběma filtry byla maximální, tj. oba filtry propouštěly stejný „směr kmitání“.
3. Otevřete soubor *Malusuv_zakon.cmbi*, který naleznete na ploše ve složce *Optika II*. Spusťte měření tlačítkem . Když nyní stisknete modré kolečko , čidlo odečte intenzitu a program se zeptá, jakému aktuálnímu úhlu otočného polarizačního filtru tato intenzita odpovídá. Zadejte tedy 0° . Bod se zanesse do grafu.
4. Nyní otáčejte pohyblivým filtrem (s krokem 10°) a pro každou polohu přidejte měření do grafu. Měření proveďte v rozsahu pootočení od 0° do 180° .
5. Do grafu níže načrtněte, jak dopadlo vaše měření. Nevynášejte přesné hodnoty, důležitý je tvar grafu.




Obr. 2: Aparatura pro měření Malusova zákona



Úkol 4: Zpracování naměřených hodnot

1. Podívejte se znovu na svůj odhad z úkolu 1. Odpovídá vámi naměřená závislost vašemu odhadu? V čem se liší?
-
2. Jakou hodnotu by podle Malusova zákona měla mít intenzita prošlého světla při natočení filtru o úhel $\alpha = 90^\circ$? Jakou hodnotu jste naměřili?
-



3. Vámi získaný graf proložte pomocí ikony  teoretickou závislostí s předpisem $I = I_0 \cos^2 \alpha + D$. V seznamu funkcí ji najdete jako „kosinus na druhou“, dále stiskněte *Aproximovat* a *OK*.
4. Z předpisu funkce proložené závislosti nebo odečtem intenzity pro vhodný úhel α určete hodnotu konstanty $D =$.
5. Jaký fyzikální význam má tato konstanta? Dokážete ji změřit pomocí aparatury? Nápady konzultujte s lektorem.

6. Jak bychom mohli zmenšit či odstranit vliv této konstanty na měření?

Závěry

Přirozené světlo je/není polarizované. Lidské oko dokáže/nedokáže polarizované světlo poznat. Lineárně polarizované světlo dokážeme odhalit pomocí .

Intenzita nepolarizovaného světla po průchodu lineárním polarizačním filtrem poklesne/vzroste, a to přibližně .

Intenzita světla prošlého polarizačním filtrem závisí na intenzitě dopadajícího světla a na . Tuto závislost přesně popisuje zákon, který platí pouze pro polarizované/nepolarizované dopadající světlo.

Pro jaké úhly vzájemného natočení filtru byla intenzita prošlého světla největší? A pro jaké nejmenší?



DIFRAKCE NA OPTICKÉ MŘÍŽCE

- Sledujte pokyny v tomto materiálu, pokud jsou pro vás nesrozumitelné, nebojte se nás zeptat.
- Vaše dílčí i finální závěry zaznamenávejte přímo do textu či připravených grafů.
- Chcete-li, můžete si například pomocí mobilu průběh experimentu vyfotit, natočit apod.

Cíl a idea měření

Na tomto stanovišti je vaším úkolem určit vlnovou délku laseru a mřížkovou konstantu CD.

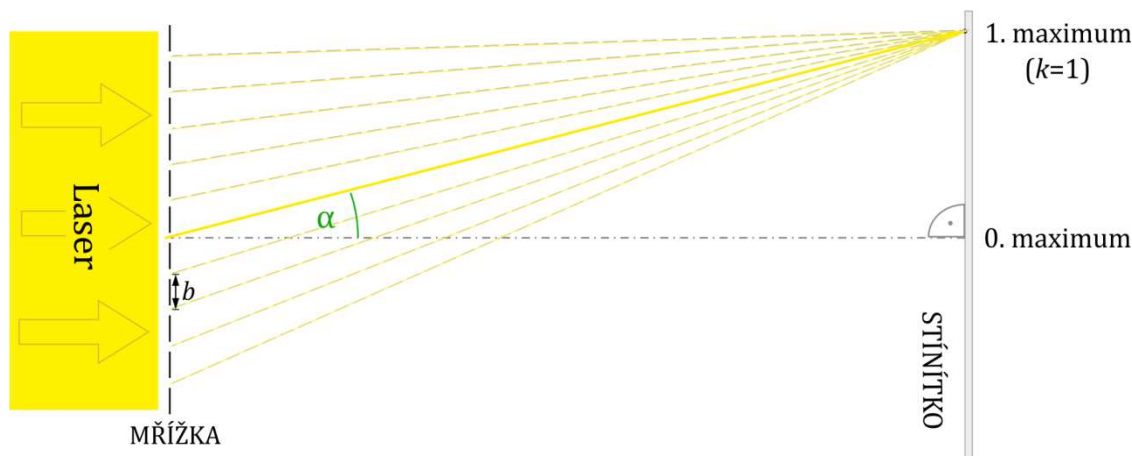
Teoretický úvod

Když prochází světlo štěrbinou srovnatelných rozměrů jako je jeho vlnová délka, může měnit směr svého šíření, „ohýbat se“. Na okraji štěrbin se následně vlny skládají (interferují) a my na stínítku pozorujeme tzv. interferenční obrazec. Popsaný jev nazýváme ohyb neboli difrakce.

K difrakci dochází také na optické mřížce, tj. soustavě velkého počtu stejně širokých rovnoběžných štěrbin (obrázek 1). Na stínítku vznikne několik světlých a tmavých oblastí – tzv. difrakční obrazec. Světlym oblastem říkáme maxima, tmavým minima. Polohu maxim v difrakčním obrazci určuje úhel α (viz obrázek 1), pro který platí podmínka:

$$b \sin \alpha = k\lambda,$$

kde b je vzdálenost sousedních štěrbin mřížky, nazývá se mřížková konstanta, $k = 0,1,2,\dots$ je řád difrakce neboli pořadí světlých proužků od nevychýleného paprsku a λ je vlnová délka použitého světla.



Obr. 1: Difrakce na mřížce

Úkol 1: Měření vlnové délky laseru

Pozor, v následujících úkolech budete pracovat s laserem. Nikdy jím na nikoho nemiřte a dávejte pozor, kam se paprsek odráží.

1. Posviťte **červeným** laserem skrz optickou mřížku na tabuli. Do obrázku 1 zakreslete, co pozorujete.
2. Rozmyslete a následně vyzkoušejte: Co očekáváte, že se stane při



a) použití mřížky s menšími vzdálenostmi štěrbin

b) použití zeleného laseru

c) zmenšení vzdálenosti mřížky od stínítka

3. Kterou z veličin b , α , λ (viz teoretický úvod) jste „měnili“ v jednotlivých možnostech úlohy 2? Přiřaďte: a) b) c)

Postup

1. Pro experiment využijte mřížku s mřížkovou konstantou $b = 2 \mu\text{m}$. Upevněte červený laser do stativu.
2. Do druhého stativu připevněte optickou mřížku v rámečku tak, aby na ni dopadal laserový paprsek.
3. Laserový paprsek namířte přibližně do středu optické mřížky. Jako stínítko použijte tabuli.
4. Na stínítku je patrná stopa paprsku, který prošel beze změny směru (tj. 0. maximum), a maxima 1. a 2. řádu. V místech, kde se na stínítku stopy zobrazují, si fixem/křídou udělejte značky.
5. Určete velikost úhlu α : Změřte vzdálenosti potřebné k jeho vypočtení (využijte obrázek 1).

6. Určete vlnovou délku použitého laseru pomocí vztahu z teoretického úvodu. Při výpočtu dbejte na dosazování správných jednotek!

7. Porovnejte svůj výsledek s údajem uvedeným na laseru. Napište, jakých nepřesností jste se při určování vlnové délky dopustili.

8. Porovnejte řádově velikost mřížkové konstanty a vlnové délky laseru. Jak moc se liší?





Úkol 2: Měření mřížkové konstanty CD

Postup

1. Do speciálního držáku umístíte průhledné CD a připevníte držák do stativu.
2. Laserový parsek namíříte přibližně do středu plné plochy disku (ne do otvoru v jeho středu).
3. Na stínítku je patrná stopa paprsku, který prošel beze změny směru, a dále maxima 1. řádu. V místech, kde se na stínítku stopy zobrazují, si fixem/křídou udělejte značky.
4. Určete velikost úhlu α (stejně jako v předchozím úkolu). Dále pomocí vztahu z teoretického úvodu a výsledků předchozího úkolu určete mřížkovou konstantu CD.

Výpočet mřížkové konstanty

5. Určete, kolik drážek (štěrbín) připadá na 1 mm.

6. Výrobci CD uvádějí hodnotu mřížkové konstanty $b = 1600$ nm. Porovnejte ji s vypočtenou hodnotou a uveďte, co mělo vliv na přesnost vašeho měření.

Závěry

K difrakci neboli světla dochází, když světlo prochází překážkou značně menších/srovnatelných/značně větších rozměrů jako/než je jeho vlnová délka.

Podoba interferenčního obrazce, který se vytvoří na stínítku, závisí například na:

Záznam na CD má podobu mikroskopických prohlubní různé délky (tzv. pitů), které nesou příslušnou informaci. Pity jsou v drážkách stejné šířky, které na zrcadlovém povrchu vytváří optickou mřížku. „Průhledné CD“, které slouží jako ochrana disku před poškrábáním, má na sobě již také drážky, které se svými vlastnostmi shodují s drážkami na CD. Díky průhlednosti materiálu však nedochází k difrakci odrazem, nýbrž průchodem.

Mřížková konstanta CD je přibližně . Na 1 mm tedy připadá zhruba drážek.





YOUNGŮV EXPERIMENT

- Sledujte pokyny v tomto materiálu, pokud jsou pro vás nesrozumitelné, nebojte se nás zeptat.
- Vaše dílčí i finální závěry zaznamenávejte přímo do textu či připravených grafů.
- Chcete-li, můžete si například pomocí mobilu průběh experimentu vyfotit, natočit apod.

Cíl a idea měření

Na tomto stanovišti se seznámíte s principem interference vlnění a provedete Youngův experiment, který ukazuje vlnovou povahu světla.

Teoretický úvod

Abychom vysvětlili výsledek Youngova experimentu, musíme se nejdřív seznámit s vlnovou povahou světla a jevem zvaným interference vlnění.

Interference vlnění je jev, při kterém se vlnění přicházející do jednoho bodu z různých zdrojů v tomto bodě navzájem skládají. K pozorovatelné interferenci dochází, pokud jde o vlnění stejné frekvence, jejichž vzájemný fázový rozdíl je v uvažovaném bodě prostoru konstantní. Výsledkem je zesílení vlnění v místech, kde se setkávají vlny se stejnou fází (maxima), a zeslabení vlnění v místech, kde se setkávají vlny s opačnou fází (minima).

Úkol 1: Co je interference?

Pozor, v následujících úkolech budete pracovat s laserem. Nikdy jím na nikoho nemiřte a dávejte pozor, kam se paprsek odráží.

Nejprve se podíváme na to, jak funguje interference vlnění na vodní hladině.

1. Na pracovní ploše najdete papír s černými soustřednými kružnicemi – tzv. *proužky moaré*, které nám poslouží jako model vlnění vodní hladiny zastavené v čase.

- a. Kde se na papíru nachází zdroj vlnění?

- b. Co představují bílé a černé soustředné kruhy (z pohledu vodní hladiny)?

2. Nyní přidáme druhý zdroj vlnění. Přiložte na papír folii s proužky moaré tak, aby se černé kruhy obou vrstev právě překrývaly. Pohybuje horní folii tak, aby se zdroje vlnění vzdalovaly, a popište, co pozorujete.





3. Pomocí proužků moaré vymodelujte složení vln ze dvou zdrojů přibližně podle obrázku a zakreslete do něj, co se zobrazí na stínítku (opět přibližně).

stínítko

+

zdroj 1

+

zdroj 2

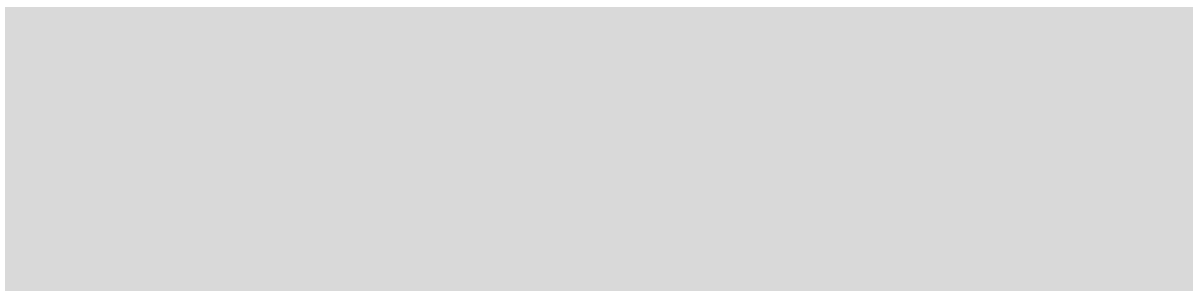
Úkol 2: Youngův experiment ve skutečnosti

V úkolu 1 jste se seznámili s principem skládání vlnění. Také světlo se může chovat jako vlna, tj. stejným způsobem jako proužky moaré. Nyní provedete Youngův experiment a ověříte tak vlnovou povahu světla.

1. Prohlédněte si aparaturu a zkontrolujte, že její uspořádání odpovídá obrázku.
2. Na dvojštěrbinu připevněnou ve stojanu posviťte upevněným laserovým modulem tak, aby stopa paprsku dopadala na příčku mezi štěrbinami (paprsek zamiřte na prostřední dvojštěrbinu na destičce).



3. Vysvětlete, co a proč pozorujete na zdi (stínítku). **Obrázek 1: Příprava experimentu** (Můžete situaci nakreslit či využít proužky moaré.)



Úkol 3: Hledání zákonitostí interferenčního obrazce

Právě jste provedli experiment, který ukazuje vlnovou povahu světla, též známý jako Youngův experiment. Interferenční obrazec, který jste zachytili na stínítku, může mít různý „tvar“ (vzdálenost sousedních světlých proužků resp. maxim). Nyní bude vaším úkolem přijít na to, co všechno „tvar“ interferenčního obrazce ovlivňuje, na čem závisí.

Postup

1. V tabulce na následující straně jsou parametry, které by mohly mít vliv na vzdálenost dvou sousedních světlých proužků, tedy na tvar interferenčního obrazce.





Měňte vždy jeden z parametrů a pozorujte, jak závisí vzdálenost sousedních maxim na daném parametru. Informace o šterbinách najdete na samostatném listu na stanovišti.

2. Své poznatky shrňte do polí pravé části tabulky s parametry.

Parametry, které ovlivňují interferenci	Označení parametru	Když se zvětší hodnota parametru, vzdálenost maxim y se ZVĚTŠÍ/ZMENŠÍ/NEZMĚNÍ
Vzdálenost šterbin	d	
Vzdálenost šterbiny od stínítka	l	
Vzdálenost laseru od dvojšterbiny	s	
Vlnová délka laseru	λ	

3. Proměřte závislost vzdálenosti sousedních maxim y na vzdálenosti šterbiny od stínítka. Vzdálenost l měňte s krokem 25 cm. Vzdálenost y odpovídá vzdálenosti středů světlých proužků, nikoli šířce tmavého proužku. Měření zapište do tabulky:

l [cm]	25				
y [mm]					

4. Co všechno má vliv na přesnost resp. správnost vašeho měření?

Úkol 4: Matematický popis interferenčního obrazce

1. Na základě měření v úkolu 3 si rozmyslete znění následující věty:

Když se parametr l zvětšil krát, vzdálenost sousedních maxim y se zvětšila/zmenšila krát.

2. Závislost veličin, kterou můžeme popsat slovy „kolikrát víc jedné, tolikrát víc druhé“ nazýváme přímá úměrnost a matematicky ji zapíšeme $y =$.

Pro nepřímou úměrnost naopak platí „kolikrát víc jedné, tolikrát méně druhé“: $y =$.

Nyní zkusíte odvodit teoretický vztah pro předpovídání vzdálenosti sousedních maxim y . Dále můžete předpokládat, že závislosti na parametrech jsou pouze přímé a nepřímé úměrnosti.

3. Na základě závěrů z tabulky se pokuste sestavit teoretický vztah pro určení vzdálenosti y sousedních maxim (světlých proužků). Výsledek diskutujte s lektorem.

$y =$





Závěry

Vlastními slovy vysvětlete, co se děje při interferenci vlnění.

Vzdálenost sousedních maxim interferenčního obrazce ovlivňuje:

Bonusový úkol 5: Tvorba interferenčního obrazce

1. Když znáte vzorec, zkuste s jeho využitím vytvořit na stínítku obrazec, pro který bude $y = 5 \text{ mm}$.
2. Zapište, jaké bylo nastavení experimentu, pomocí kterého jste vytvořili zadaný interferenční obrazec:





POLARIZACE SVĚTLA

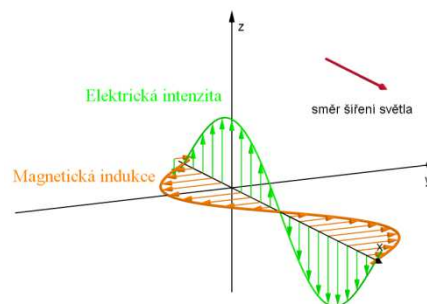
- Sledujte pokyny v tomto materiálu, pokud jsou pro vás nesrozumitelné, nebojte se nás zeptat.
- Vaše dílčí i finální závěry zaznamenávejte přímo do textu či připravených grafů.
- Chcete-li, můžete si například pomocí mobilu průběh experimentu vyfotit, natočit apod.

Cíl a idea stanoviště

Na tomto stanovišti se pomocí apletu seznámíte s polarizací světla.

Teoretický úvod

Světlo má ve fyzice tzv. duální charakter. To znamená, že se na něj můžeme dívat jako na proud částic – fotonů, ale také jako na typ vlnění, kterým se budeme nyní zabývat. Toto vlnění má dvě složky: elektrickou a magnetickou, proto jej nazýváme elektromagnetické.



Obr. 1: Elektromagnetické vlnění

Úkol 1: Co je to polarizace?

Poznámka: Vše, co budete dělat v apletu, si můžete vyzkoušet i se skutečnými polarizačními filtry.

1. Otevřete si aplet *Polarizace*, který najdete na ploše ve složce *Optika II*, a vyzkoušejte si jeho ovládání. V levém dolním rohu je možné aplet spustit tlačítkem „play“.

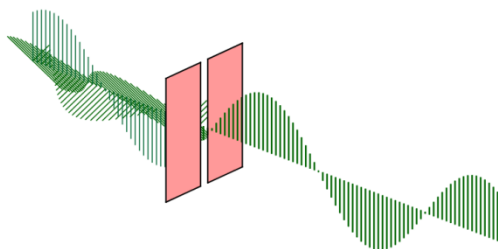
Pokud se na světlo díváme jako na elektromagnetické vlnění, můžeme jej popsat pomocí vektorových veličin elektrické intenzity a magnetické indukce. Dále nás bude zajímat pouze elektrická složka, proto se magnetickou indukcí nebudeme blíže zabývat. Vektor elektrické intenzity \vec{E} kmitá vždy kolmo ke směru šíření světla (viz obrázek 1).

2. Co v apletu představuje jedna zelená čára? Co celá „pruhovaná vlna“?



Představme si, že do svazku světla vložíme rovinu kolmou ke směru šíření světla. Pokud má vektor intenzity v dané rovině nahodilý směr i velikost, tj. kmitá nahodile, nazveme světlo nepolarizované.

3. Zaškrtněte pole „Vlož kolmou rovinu“ a zobrazte tak směry kmitání vektoru. Kde je v apletu znázorněné nepolarizované světlo? Zakroužkujte v obrázku 2.



Obr. 2: (NE)polarizované světlo

Nepolarizované světlo lze změnit na polarizované např. pomocí polarizačního filtru.

Polarizační filtr pohltí složky intenzity, které kmitají v jiných směrech, než je směr daný filtrem. Světlo, které projde tímto filtrem, je pak lineárně polarizované (tj. kmitá pouze ve směru určeném filtrem).

POZOR! Polarizační filtr není štěrbinu, aplet jej tak pouze modeluje. Filtr je typicky z materiálu se speciálními optickými vlastnostmi.





4. Zaškrtněte pole „Přidej 1 filtr“, v apletu tak uvidíte celkem 2 filtry. Zároveň zkontrolujte, že máte označené pole „Ukaž filtr“.

a) Označte v obrázku 2, kde můžeme pozorovat lineárně polarizované světlo. Odpověď barevně či jinak odlište od úlohy 3.

b) Určete konkrétní směr kmitání vektorů intenzity, které propouští **první** filtr v apletu.

c) Odhadněte: Co všechno se změní, když změníte úhel natočení druhého znázorněného filtru?

d) Porovnejte váš odhad se změnami v apletu po otočení filtrem a s pozorováním se skutečnými filtry.

e) Které změny, jež se udály v apletu, lze pozorovat se skutečnými filtry? Jak se změny projeví?

5. Pomocí apletu najdi takové natočení filtrů, které nepropouští žádné světlo.

Jaký byl úhel vzájemného natočení filtrů?

6. Vezměte si skutečné polarizační filtry a najděte polohu, kterou jste popsali v předchozí úloze. Jak jste postupovali?

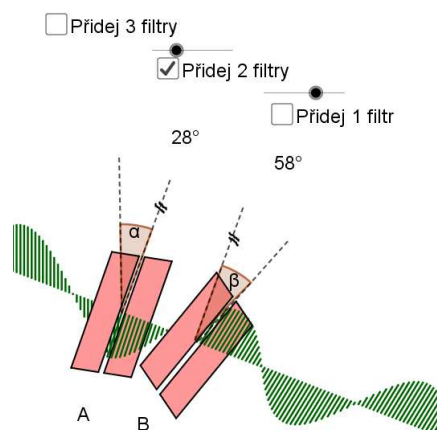
Když filtrem prochází již polarizované světlo, jeho výsledná intenzita závisí na úhlu vzájemného natočení polarizačního filtru a vlnění, které dopadá na daný filtr.

Intenzita světla v oblasti mezi filtrem A a B z obrázku 3 proto bude záviset na úhlu α o velikosti 28° .

7. Nastala situace na obrázku 3. Určete velikost úhlu β , na kterém závisí intenzita světla po průchodu filtrem B. Uvedené číselné hodnoty velikosti úhlu odpovídají vždy natočení filtru od svislého směru.

$\beta =$

8. Odhadněte, co se bude dít s intenzitou světla po průchodu filtrem B, jestliže budeme zvětšovat úhel natočení (do 90°) pouze tohoto filtru.



Obr. 3: Vzájemně natočené filtry

9. Předchozí úlohu zkontrolujte pomocí apletu. Následně totéž vyzkoušejte se skutečnými polarizačními filtry.





Závěry

Polarizované světlo dokážeme odhalit pomocí .

Popište, jak funguje polarizační filtr

Je možné na základě práce s apletem učinit tento obecný závěr:

„S rostoucím úhlem vzájemného natočení dopadajícího vlnění a polarizačního filtru klesá intenzita polarizovaného světla, které prošlo filtrem.“?

Zkus svou odpověď také zdůvodnit.



Příloha B

Příloha B obsahuje autorská řešení k pěti vytvořeným pracovním listům stanovišť tematického celku *Optika II – kvantitativní pojetí*. Řešení neobsahuje metodické poznámky pro lektory, pouze uvádí výsledky úloh v pracovních listech tak, jak by je správně řešili žáci. V některých případech je uvedeno více možných variant odpovědí.



MĚŘENÍ INDEXU LOMU

- Sledujte pokyny v tomto materiálu, pokud jsou pro vás nesrozumitelné, nebojte se nás zeptat.
- Vaše dílčí i finální závěry zaznamenávejte přímo do textu či připravených grafů.
- Chcete-li, můžete si například pomocí mobilu průběh experimentu vyfotit, natočit apod.

Cíl a idea měření

Na tomto stanovišti je vaším úkolem určit index lomu různých prostředí pomocí digitálního dálkoměru.

Teoretický úvod

Rychlost světla se liší v závislosti na prostředí, kterým se šíří. Ve vakuu má světlo nejvyšší možnou rychlost, a to je $c \doteq 3 \cdot 10^8$ m/s. Pokud se šíří jiným prostředím (jako je voda, sklo, líh, atd.), jeho rychlost je menší. K popisu této skutečnosti využíváme veličinu zvanou **index lomu**. Index lomu n je poměr rychlostí světla ve dvou různých prostředích. Pro tzv. absolutní index lomu platí

$$n = \frac{c}{v},$$

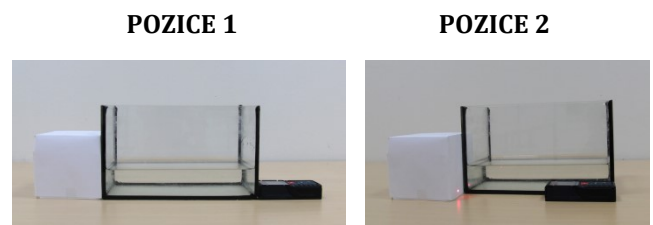
kde c je vždy rychlost světla ve vakuu, v je rychlost světla ve zkoumaném prostředí.

Pozn.: Rychlost šíření světla ve vzduchu lze považovat za málo odlišnou od té ve vakuu, dále budeme pracovat s rychlostí světla ve vzduchu rovnou c .

Úkol 1: Měření vzdálenosti v různých prostředích

Postup

1. Změřte pomocí digitálního dálkoměru několik vzdáleností l_d . Dálkoměr při měření umístěte do různých pozic (viz obrázek 1). Některá měření proveďte v jiných prostředích než je vzduch (např. voda).
2. Měřenou vzdálenost vždy ověřte pomocí pásového měřidla (vzdálenost l_m).
3. Získané hodnoty zapisujte do tabulky.



Obr. 1: Způsoby přiložení dálkoměru

Objekt	l_d [m] (pozice 1)	l_d [m] (pozice 2)	l_m [m]
Lavice	0,785	0,680	0,68
Prázdné akvárium	0,357	0,252	0,25
Akvárium s vodou (skrz stěny a vodu)	0,443	X	0,25





4. Zamyslete se, odkud dálkoměr měří vzdálenost. Dokážete z naměřených hodnot určit délku dálkoměru?

Dálkoměr měří vzdálenost od svého zadního konce, správné hodnoty dostaneme pro umístění v pozici 2. Délka dálkoměru je rozdíl mezi měřeními v pozici 1 a 2 tj. $0,105 \text{ m} = 10,5 \text{ cm}$

5. Zkuste vysvětlit odlišnosti v naměřených hodnotách l_d a l_m , které nejsou způsobeny umístěním dálkoměru. Ve kterém měření došlo k výraznější odchylce? Čím se toto měření odlišuje?

Pro hodnoty opravené vzhledem ke způsobu přiložení dálkoměru se velké odchylky objevovaly, pokud jsme měřili skrz jiné prostředí, než je vzduch (voda, sklo atp.)

Úkol 2: Jak funguje dálkoměr?

1. Navrhněte způsob, jakým dálkoměr měří vzdálenost. Využijte poznatky z předchozího úkolu.

Digitální dálkoměr vyšle při měření vzdálenosti laserový paprsek, který se odrazí od překážky ve vzdálenosti konce měřeného předmětu a dopadne do čidla dálkoměru. Z doby, kterou dálkoměr změří mezi vysláním a příjmem paprsku, a známé rychlosti světla ve vzduchu dopočítá údaj vzdálenosti: $l = \frac{c \cdot t}{2}$, kde c je rychlost světla ve vzduchu a t doba změřená dálkoměrem (za ni urazí světlo dvojnásobek měřené vzdálenosti – tam a zpět). Na závěr ještě přičte hodnotu své délky, neboť čidlo je umístěno na předním okraji dálkoměru.

2. Přivolejte si lektora a nápady s ním konzultujte.
3. Nyní se společně s lektorem zamyslete nad tím, jak můžete pomocí měření vzdálenosti dálkoměrem určit index lomu průhledného prostředí.

Dálkoměr má pevně nastavenou hodnotu rychlosti světla, se kterou provádí výpočet. Protože je sestaven pro měření vzdáleností ve vzduchu, odpovídá tato hodnota rychlosti světla ve vzduchu c . Pokud tedy dálkoměrem měříme skrz jiné prostředí, dálkoměr to nepozná a pracuje stále s hodnotou rychlosti c . Rychlost světla v jiných prostředích, např. ve vodě, je ale menší než ve vzduchu. Za dobu, kterou dálkoměr naměří, tak světlo ve skutečnosti urazí kratší dráhu ($l_m = v \cdot \frac{t}{2}$), než kterou této době přiřadí dálkoměr ($l_d = c \cdot \frac{t}{2}$). Jelikož index lomu je veličina, která určuje, kolikrát pomaleji se šíří světlo v nějakém prostředí než ve vzduchu, je možné z chybného údaje dálkoměru a skutečné velikosti měřeného předmětu určit poměr zmíněných rychlostí a tím také index lomu příslušného prostředí.

4. Pomocí definičního vztahu pro index lomu se jej pokuste vyjádřit pomocí měřitelných vzdáleností l_d , l_m . Využijte vztah z teoretického úvodu a poznatky z konzultace s lektorem.

$n = \frac{c}{v} = \frac{\frac{l_d}{t}}{\frac{l_m}{t}} = \frac{l_d}{l_m}$, kde t je polovina času, který změří dálkoměr (tj. doba od vyslání po odraz paprsku na překážce)





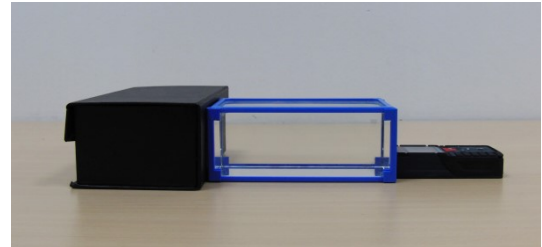
Úkol 3: Určování indexu lomu

Připravte experiment dle obrázku. **Dbejte na přesné umístění dálkoměru!**

Naměřené hodnoty zapisujte do připravené tabulky.

Postup

1. Změřte pomocí pásového měřidla délku skleněného hranolu.
2. Odečtěte z dálkoměru hodnotu l_d , kterou ukáže při měření skleněného hranolu. Proveďte korekci hodnoty vzhledem k umístění dálkoměru.
3. Na základě vztahu odvozeného v úkolu 2 určete index lomu skla.
4. Měření opakujte pro další připravená prostředí (plastová tyč, voda v akváriu).
5. Porovnejte získané hodnoty s tabulkovými.



Obr. 2: Uspořádání experimentu

Prostředí	l_m [m]	l_d [m]	n	n_{tabulky}
sklo	0,17	0,255	1,54	1,5-1,9
voda	0,25	0,343	1,33	1,33
plast	0,30	0,474	1,58	1,5-1,74
vzduch	0,25	0,257	1,03	1

Rozmyslete, co všechno ovlivnilo přesnost získaných hodnot indexu lomu.

Tloušťka stěn akvária a přechod světelného paprsku skrz různá prostředí, nepřesnost v umístění dálkoměru (kolmá vzdálenost), chyba měření samotného dálkoměru, počítali jsme s přibližnou hodnotou indexu lomu vzduchu, ...

Závěry

V prostředích jako je voda, líh, sklo, ... naměří dálkoměr **větší/menší** hodnotu než je reálná vzdálenost. Je to proto, že v těchto prostředích se světlo šíří **rychleji/pomaleji** než ve vzduchu. Index lomu těchto prostředí je vždy **větší/menší** než 1.

Index lomu vyjadřuje, kolikrát **menší** je rychlost světla v daném prostředí než ve **vzduchu**.

Stručně popište, v čem spočívalo určování indexu lomu pomocí dálkoměru.

Digitální dálkoměr měří čas, za který urazí paprsek požadovanou dráhu. Z tohoto času pomocí známé rychlosti světla ve vzduchu určí vzdálenost. Když měří v jiném prostředí než ve vzduchu, měří chybně. Z této chybné hodnoty a ze skutečné hodnoty měřené vzdálenosti můžeme určit poměr rychlostí, kterými se šíří světlo ve vzduchu a v daném prostředí, tj. index lomu.





MALUSŮV ZÁKON

- Sledujte pokyny v tomto materiálu, pokud jsou pro vás nesrozumitelné, nebojte se nás zeptat.
- Vaše dílčí i finální závěry zaznamenávejte přímo do textu či připravených grafů.
- Chcete-li, můžete si například pomocí mobilu průběh experimentu vyfotit, natočit apod.

Cíl a idea měření

Na tomto stanovišti se seznámíte s polarizací světla, proměříte intenzitu světla prošlého polarizačním filtrem a budete ověřovat platnost Malusova zákona.

Teoretický úvod

Když se díváme na světlo jako na vlnění, můžeme popsat jev zvaný polarizace. Polarizace světla souvisí se způsobem (nahodilostí) kmitání složek vlnění – jedna z nich se nazývá elektrická intenzita.

Z přirozeného, nepolarizovaného světla vytvoříme polarizované, když jej necháme procházet např. lineárním polarizačním filtrem.

Úkol 1: Zkoumání polarizačních filtrů

1. Prohlédněte si různé polarizační filtry. Dívejte se skrz filtr nejprve na různé předměty ve vašem okolí (židle, deska stolu, spolužáci,...) a následně na monitor či displej telefonu. Filtr různě otáčejte. Stručně popište, jak se vaše pozorování liší pro displej (monitor) a další předměty (např. deska stolu).

Displej a monitor se při otáčení filtru zatmívají (zčernají), ostatní předměty se výrazně nemění. Na některých lesklých plochách mizí odlesky.

2. Nyní skládejte filtry i přes sebe a otáčejte jimi. Sledujte především běžné předměty (**NE** monitor atp.) a zapište svá pozorování.

Při sledování běžných předmětů přes dva filtry a při jejich natáčení pozorujeme totéž jako v předchozím případě pro displej a monitor. Při určitém natočení skrz filtry nepozorujeme nic.

3. Pokud složíme více filtrů za sebe a díváme se na různé předměty, pozorujeme podobný jev, jako když se díváme na **monitor/displej** pouze s **jedním** filtrem. Světlo z **monitoru, displeje** je tedy **polarizované/nepolarizované**.

Úkol 2: Intenzita světla při průchodu jedním filtrem

Lineární polarizační filtr dokáže ovlivnit intenzitu světla I , které jím projde. To proto, že propouští pouze tu složku elektrické intenzity, která kmitá ve stejném směru, jako je směr určený filtrem.

Odhadněte, co se stane s intenzitou **nepolarizovaného** světla, když projde jedním polarizačním filtrem. Svůj odhad napište.

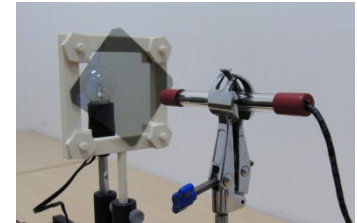
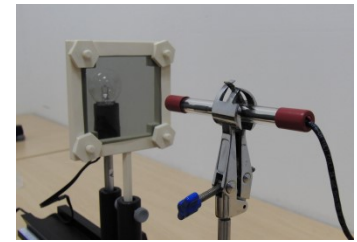
Zmenší se. (Bude poloviční)





Postup

1. Prohlédněte si aparaturu a otevřete soubor *Mereni_intenzity_svetla.cmb*, který naleznete na ploše ve složce *Optika II*.
2. Umístěte mezi zdroj a luxmetr **prázdný** rámeček a spusťte měření tlačítkem . Do tabulky si poznamenejte hodnotu intenzity světla ze zdroje (bez filtru).
3. Do rámečku nasad'te polarizační filtr. Snažte se zachovat původní vzdálenosti mezi žárovkou, rámečkem a luxmetrem. Zaznamenejte hodnotu intenzity prošlého světla do tabulky.
4. Následně filtr vyjměte z rámečku, otočte přibližně o 45° vzhledem k předchozí poloze filtru (viz obr. 1), zasad'te zpět do rámečku a umístěte před zdroj. Proveďte měření a zapište hodnotu.
5. Proměřte intenzitu světla s krokem otočení filtru 45° od 0° do 180°. Získané hodnoty zapisujte do tabulky.



Obr. 1: Nastavení polarizačního filtru v rámečku

α [°]	Bez filtru	0°	45°	90°	135°	180°
I [lx]	388	200	186	184	190	194

6. Na základě naměřených hodnot zkuste formulovat závěry: Jak se změní intenzita nepolarizovaného světla, které prochází polarizačním filtrem? Závisejí na úhlu otočení filtru?

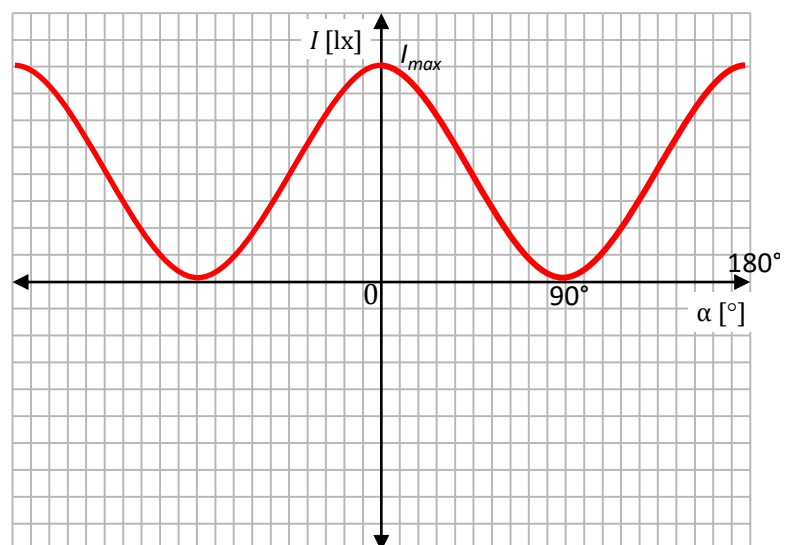
Intenzita nepolarizovaného světla se po průchodu polarizačním filtrem zmenší přibližně na poloviční hodnotu. Na úhlu natočení filtru nezávisí.

Úkol 3: Proměření Malusova zákona

V předchozím úkolu dopadalo na polarizační filtr nepolarizované světlo. Nyní do experimentu **přidáme ještě jeden filtr** a budeme sledovat intenzitu světla za ním.

V případě, že filtrem prochází již lineárně polarizované světlo, popisuje jeho intenzitu I za polarizačním filtrem tzv. Malusův zákon: $I = I_0 \cos^2 \alpha$, kde I_0 je intenzita světla před průchodem filtrem a α je úhel vzájemného natočení filtrů.

1. Odhadněte a zakreslete, jak bude vypadat graf závislosti intenzity prošlého světla na úhlu natočení polarizačního filtru α .



Inspirujte se matematickou podobou Malusova zákona.

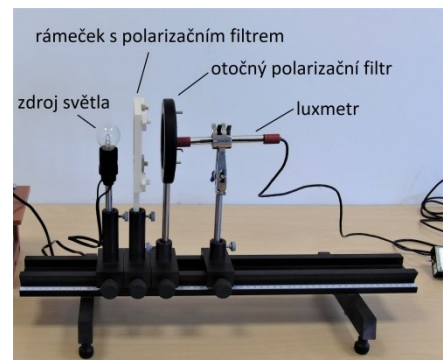
Svůj odhad konzultujte s lektorem.





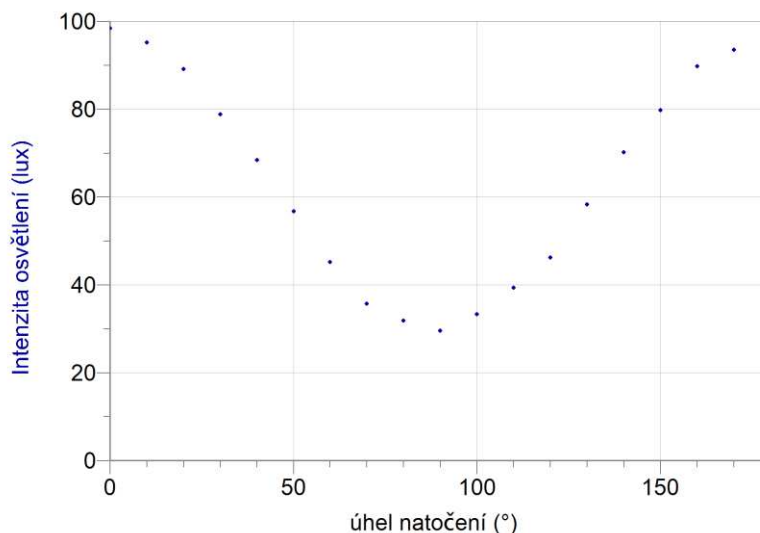
Postup

1. Upravte aparaturu podle obrázku 2. Polarizační filtry nastavte co nejlíže k sobě.
2. Otočný filtr nastavte tak, aby intenzita světla po průchodu oběma filtry byla maximální, tj. oba filtry propouštěly stejný „směr kmitání“.
3. Otevřete soubor *Malusuv_zakon.cmb1*, který naleznete na ploše ve složce *Optika II*. Spusťte měření tlačítkem . Když nyní stisknete modré kolečko , čidlo odečte intenzitu a program se zeptá, jakému aktuálnímu úhlu otočného polarizačního filtru tato intenzita odpovídá. Zadejte tedy 0° . Bod se zaneše do grafu.



Obr. 2: Aparatura pro měření Malusova zákona

4. Nyní otáčejte pohyblivým filtrem (s krokem 10°) a pro každou polohu přidejte měření do grafu. Měření proveďte v rozsahu pootočení od 0° do 180° .
5. Do grafu níže načrtněte, jak dopadlo vaše měření. Nevynášejte přesné hodnoty, důležitý je tvar grafu.



Úkol 4: Zpracování naměřených hodnot

1. Podívejte se znovu na svůj odhad z úkolu 1. Odpovídá vámi naměřená závislost vašemu odhadu? V čem se liší?

SHODA: Hodnota v 0° a 180° je maximální a v 90° minimální. Tvar odpovídá harmonické funkci. Všechny hodnoty jsou kladné.


NESHODA: Závislost neklesá v minimu až na nulu.

2. Jakou hodnotu by podle Malusova zákona měla mít intenzita prošlého světla při natočení filtru o úhel $\alpha = 90^\circ$? Jakou hodnotu jste naměřili?

Měla by být 0 lx, naměřili jsme 30 lx.





3. Vámi získaný graf proložte pomocí ikony  teoretickou závislostí s předpisem $I = I_0 \cos^2 \alpha + D$. V seznamu funkcí ji najdete jako „kosinus na druhou“, dále stiskněte *Aproximovat* a *OK*.
4. Z předpisu funkce proložené závislosti nebo odečtem intenzity pro vhodný úhel α určete hodnotu konstanty $D = 29,63$.
5. Jaký fyzikální význam má tato konstanta? Dokážete ji změřit pomocí aparatury? Nápady konzultujte s lektorem.

Hodnota přibližně 30 lx představuje světelný šum na pozadí. Jedná se o hodnotu intenzity, kterou luxmetr zachytí, aniž by byl zapnutý námi zkoumaný zdroj. Pro malé hodnoty intenzity narážíme ale také na hranice čidla, které i při úplném zatemnění naměří nenulovou hodnotu.

6. Jak bychom mohli zmenšit či odstranit vliv této konstanty na měření?

Tento šum by bylo možné zmenšit zatemněním místnosti či přesunutím aparatury do tmy (provádět experiment v krabici). Zároveň by bylo možné využít bodový zdroj tak, aby mohl luxmetr měřit pouze v jednom směru, nedocházelo k odrazu světla od okolních předmětů. Možnost by také byla zvolit jiný luxmetr, nebo na začátku měření kalibrovat luxmetr.

Závěry

Přirozené světlo je/**není** polarizované. Lidské oko ~~dokáže~~/**nedokáže** polarizované světlo poznat. Lineární polarizované světlo dokážeme odhalit pomocí **polarizačního filtru**.

Intenzita nepolarizovaného světla po průchodu lineárním polarizačním filtrem **poklesne**/~~vzroste~~, a to přibližně **dvakrát**.

Intenzita světla prošlého polarizačním filtrem závisí na intenzitě dopadajícího světla a na **úhlu natočení polarizačního filtru**. Tuto závislost přesně popisuje **Malusův** zákon, který platí pouze pro **polarizované/nepolarizované** dopadající světlo.

Pro jaké úhly vzájemného natočení filtrů byla intenzita prošlého světla největší? A pro jaké nejmenší?

Největší byla pro úhel 0° a 180° . Nejmenší, ovšem nikoli nulová, byla intenzita při úhlu 90° .



DIFRAKCE NA OPTICKÉ MŘÍŽCE

- Sledujte pokyny v tomto materiálu, pokud jsou pro vás nesrozumitelné, nebojte se nás zeptat.
- Vaše dílčí i finální závěry zaznamenávejte přímo do textu či připravených grafů.
- Chcete-li, můžete si například pomoci mobilu průběh experimentu vyfotit, natočit apod.

Cíl a idea měření

Na tomto stanovišti je vaším úkolem určit vlnovou délku laseru a mřížkovou konstantu CD.

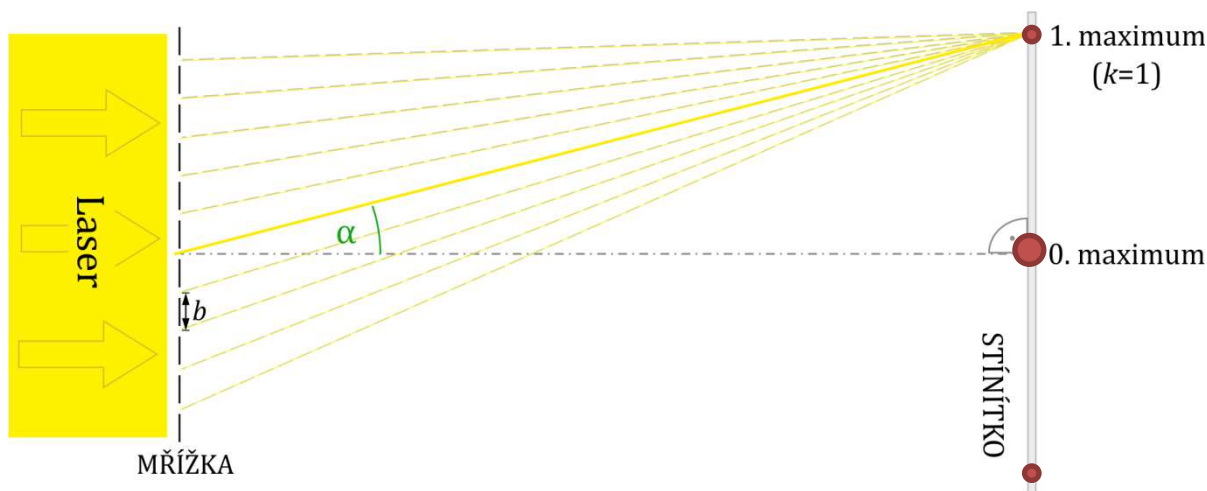
Teoretický úvod

Když prochází světlo štěrbinou srovnatelných rozměrů jako je jeho vlnová délka, může měnit směr svého šíření, „ohýbat se“. Na okraji štěrbin se následně vlny skládají (interferují) a my na stínítku pozorujeme tzv. interferenční obrazec. Popsaný jev nazýváme ohyb neboli difrakce.

K difrakci dochází také na optické mřížce, tj. soustavě velkého počtu stejně širokých rovnoběžných štěrbin (obrázek 1). Na stínítku vznikne několik světlých a tmavých oblastí – tzv. difrakční obrazec. Světlym oblastem říkáme maxima, tmavým minima. Polohu maxim v difrakčním obrazci určuje úhel α (viz obrázek 1), pro který platí podmínka:

$$b \sin \alpha = k\lambda,$$

kde b je vzdálenost sousedních štěrbin mřížky, nazývá se mřížková konstanta, $k = 0,1,2,\dots$ je řád difrakce neboli pořadí světlých proužků od nevychýleného paprsku a λ je vlnová délka použitého světla.



Obr. 1: Difrakce na mřížce

Úkol 1: Měření vlnové délky laseru

Pozor, v následujících úkolech budete pracovat s laserem. Nikdy jím na nikoho nemiřte a dávejte pozor, kam se paprsek odráží.

1. Posviťte **červeným** laserem skrz optickou mřížku na tabuli. Do obrázku 1 zakreslete, co pozorujete.
2. Rozmyslete a následně vyzkoušejte: Co očekáváte, že se stane při



a) použití mřížky s menšími vzdálenostmi šterbin

Zvětší se vzdálenosti mezi světlými pruhy (při větším počtu vrypů jsou tmavé pruhy širší).

b) použití zeleného laseru

U červeného laseru jsou světlé pruhy vzdálenější než u zeleného laseru ($\lambda_{\text{červený}} = 650 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{zelený}} = 532 \text{ nm}$). Resp. tmavé pruhy jsou širší.

c) zmenšení vzdálenosti mřížky od stínítka

Vzdálenosti mezi světlými pruhy budou menší (užší tmavé pruhy), zachytíme více pruhů.

3. Kterou z veličin b , α , λ (viz teoretický úvod) jste „měnili“ v jednotlivých možnostech úlohy 2? Přiřaďte: a) **b** b) **λ** c) **α**

Postup

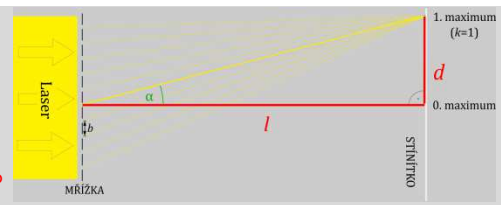
1. Pro experiment využijte mřížku s mřížkovou konstantou $b = 2 \mu\text{m}$. Upevněte červený laser do stativu.
2. Do druhého stativu připevněte optickou mřížku v rámečku tak, aby na ni dopadal laserový paprsek.
3. Laserový paprsek namířte přibližně do středu optické mřížky. Jako stínítko použijte tabuli.
4. Na stínítku je patrná stopa paprsku, který prošel beze změny směru (tj. 0. maximum), a maxima 1. a 2. řádu. V místech, kde se na stínítku stopy zobrazují, si fixem/křídou udělejte značky.
5. Určete velikost úhlu α : Změřte vzdálenosti potřebné k jeho vypočtení (využijte obrázek 1).

Vzdálenost mřížky od stínítka... $l = 30 \text{ cm}$,

vzdálenost nultého a 1. maxima... $d = 10 \text{ cm}$,

$\alpha = ?$

$$\text{tg } \alpha = \frac{d}{l}, \text{ tg } \alpha = \frac{10}{30} = \frac{1}{3} \quad \rightarrow \quad \alpha = \text{arctg } \frac{1}{3} \doteq 18,5^\circ$$



6. Určete vlnovou délku použitého laseru pomocí vztahu z teoretického úvodu. Při výpočtu dbejte na dosazování správných jednotek!

$l = 30 \text{ cm}$, $d = 10 \text{ cm}$, $\alpha = 18,5^\circ$, $k = 1$, $b = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}$,

$\lambda = b \cdot \sin \alpha$, $\lambda = 635 \text{ nm}$. Ve skutečnosti dle údajů 650 nm .

7. Porovnejte svůj výsledek s údajem uvedeným na laseru. Napište, jakých nepřesností jste se při určování vlnové délky dopustili.

Měření vzdálenosti mřížka-stínítko je nepřesné (chyba měřidla, odečtení kolmé vzdálenosti, přesnost nastavení vzdálenosti). Výpočet se zaokrouhlenými hodnotami (úhel).

8. Porovnejte řádově velikost mřížkové konstanty a vlnové délky laseru. Jak moc se liší?

$$b = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$\lambda \doteq 0,65 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Mají srovnatelný rozměr.





Úkol 2: Měření mřížkové konstanty CD

Postup

1. Do speciálního držáku umístíte průhledné CD a připevníte držák do stativu.
2. Laserový parsek namíříte přibližně do středu plné plochy disku (ne do otvoru v jeho středu).
3. Na stínítku je patrná stopa paprsku, který prošel beze změny směru, a dále maxima 1. řádu. V místech, kde se na stínítku stopy zobrazují, si fixem/křídou udělejte značky.
4. Určete velikost úhlu α (stejně jako v předchozím úkolu). Dále pomocí vztahu z teoretického úvodu a výsledků předchozího úkolu určete mřížkovou konstantu CD.

Výpočet mřížkové konstanty

$$l = 19,7 \text{ cm}, d = 36,8 \text{ cm}, k = 1,$$

$$\lambda = 635 \cdot 10^{-9} \text{ m}, \quad b = \frac{k \cdot \lambda}{\sin \alpha}, \quad b = \frac{1 \cdot 635 \cdot 10^{-9}}{\sin(\arctg \frac{36,8}{19,7})} \text{ m} \doteq 720 \cdot 10^{-9} \text{ m}.$$

*Lze také: $\lambda = 650 \cdot 10^{-9} \text{ m}$, pak $b \doteq 737 \cdot 10^{-9} \text{ m}$.

5. Určete, kolik drážek (štěrbín) připadá na 1 mm.

$$\frac{1}{720 \cdot 10^{-6}} \doteq 1388 \text{ drážek na mm}$$

6. Výrobci CD uvádějí hodnotu mřížkové konstanty $b = 1600 \text{ nm}$. Porovnejte ji s vypočtenou hodnotou a uveďte, co mělo vliv na přesnost vašeho měření.

Měření vzdálenosti mřížka-stínítko je nepřesné (chyba měřidla, odečtení kolmé vzdálenosti, přesnost nastavení vzdálenosti). Výpočet se zaokrouhlenými hodnotami (úhel). Měření vzdálenosti 0. - 1. maximum: nepřesné vyznačení polohy křídou/fixem, měření vzdálenosti (přesnost odečtu hodnot - značka samotná má několik milimetrů, přímá vzdálenost)

Závěry

K difrakci neboli **ohybu** světla dochází, když světlo prochází překážkou **značně menších/srovnatelných/značně větších** rozměrů **jako/než** je jeho vlnová délka.

Podoba interferenčního obrazce, který se vytvoří na stínítku, závisí například na:

Vzdálenosti stínítka od mřížky, barvě použitého světla laseru, mřížkové konstantě.

Záznam na CD má podobu mikroskopických prohlubní různé délky (tzv. pitů), které nesou příslušnou informaci. Pity jsou v drážkách stejné šířky, které na zrcadlovém povrchu vytváří optickou mřížku. „Průhledné CD“, které slouží jako ochrana disku před poškrábáním, má na sobě již také drážky, které se svými vlastnostmi shodují s drážkami na CD. Díky průhlednosti materiálu však nedochází k difrakci odrazem, nýbrž průchodem.

Mřížková konstanta CD je přibližně **720 nm**. Na 1 mm tedy připadá zhruba **1390** drážek.





YOUNGŮV EXPERIMENT

- Sledujte pokyny v tomto materiálu, pokud jsou pro vás nesrozumitelné, nebojte se nás zeptat.
- Vaše dílčí i finální závěry zaznamenávejte přímo do textu či připravených grafů.
- Chcete-li, můžete si například pomocí mobilu průběh experimentu vyfotit, natočit apod.

Cíl a idea měření

Na tomto stanovišti se seznámíte s principem interference vlnění a provedete Youngův experiment, který ukazuje vlnovou povahu světla.

Teoretický úvod

Abychom vysvětlili výsledek Youngova experimentu, musíme se nejdřív seznámit s vlnovou povahou světla a jevem zvaným interference vlnění.

Interference vlnění je jev, při kterém se vlnění přicházející do jednoho bodu z různých zdrojů v tomto bodě navzájem skládají. K pozorovatelné interferenci dochází, pokud jde o vlnění stejné frekvence, jejichž vzájemný fázový rozdíl je v uvažovaném bodě prostoru konstantní. Výsledkem je zesílení vlnění v místech, kde se setkávají vlny se stejnou fází (maxima), a zeslabení vlnění v místech, kde se setkávají vlny s opačnou fází (minima).

Úkol 1: Co je interference?

Pozor, v následujících úkolech budete pracovat s laserem. Nikdy jím na nikoho nemiřte a dávejte pozor, kam se paprsek odráží.

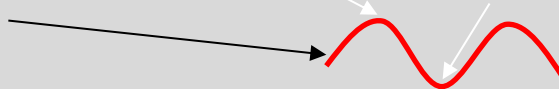
Nejprve se podíváme na to, jak funguje interference vlnění na vodní hladině.

1. Na pracovní ploše najdete papír s černými soustřednými kružnicemi – tzv. proužky moaré, které nám poslouží jako model vlnění vodní hladiny zastavené v čase.
 - a. Kde se na papíru nachází zdroj vlnění?

Ve středu soustředných kruhů

- b. Co představují bílé a černé soustředné kruhy (z pohledu vodní hladiny)?

Světlá místa označují maximální výchylku vlnění (ať už „kladnou“ nebo „zápornou“), černá označují nulovou amplitudu.



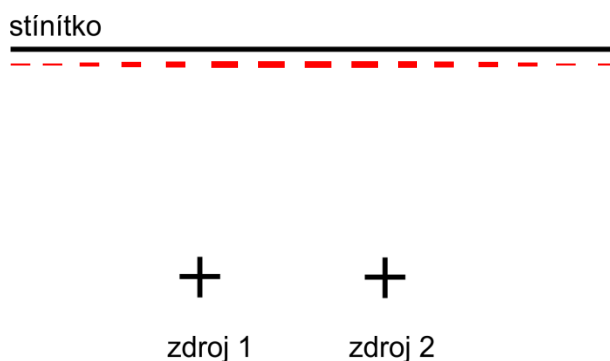
**Také lze: Světla místa maximální kladná výchylka („vrchol“), tmavá místa maximální záporná výchylka („sedlo“)*

2. Nyní přidáme druhý zdroj vlnění. Přiložte na papír folii s proužky moaré tak, aby se černé kruhy obou vrstev právě překrývaly. Pohybuje horní folii tak, aby se zdroje vlnění vzdalovaly, a popište, co pozorujete.

Objevují se tmavé a světlé proužky, čím větší je vzdálenost mezi zdroji vlnění, tím více (a užších) proužků pozorujeme. Pro velmi vzdálené zdroje jev zaniká.



3. Pomocí proužků moaré vymodelujte složení vln ze dvou zdrojů přibližně podle obrázku a zakreslete do něj, co se zobrazí na stínítku (opět přibližně).



Úkol 2: Youngův experiment ve skutečnosti

V úkolu 1 jste se seznámili s principem skládání vlnění. Také světlo se může chovat jako vlna, tj. stejným způsobem jako proužky moaré. Nyní provedete Youngův experiment a ověříte tak vlnovou povahu světla.

1. Prohlédněte si aparaturu a zkontrolujte, že její uspořádání odpovídá obrázku.
2. Na dvojštěrbinu připevněnou ve stojanu posviťte upevněným laserovým modulem tak, aby stopa paprsku dopadala na příčku mezi štěrbinami (paprsek zamiřte na prostřední dvojštěrbinu na destičce).



3. Vysvětlíte, co a proč pozorujete na zdi (stínítku). **Obrázek 1: Příprava experimentu** (Můžete situaci nakreslit či využít proužky moaré.)

Na stínítku pozorujeme stejný obrazec jako v případě skládání vln dvou málo vzdálených zdrojů vlnění (ve vodním modelu). To pozorujeme proto, že světlo se chová jako vlna. Když paprsek laseru prochází skrz dvojštěrbinu, každá štěrbinu se stane zdrojem vlnění. Vlnění šířící se z těchto dvou zdrojů se následně skládá přesně jako proužky moaré v předchozím úkolu.

Úkol 3: Hledání zákonitostí interferenčního obrazce

Právě jste provedli experiment, který ukazuje vlnovou povahu světla, též známý jako Youngův experiment. Interferenční obrazec, který jste zachytili na stínítku, může mít různý „tvar“ (vzdálenost sousedních světlých proužků resp. maxim). Nyní bude vaším úkolem přijít na to, co všechno „tvar“ interferenčního obrazce ovlivňuje, na čem závisí.

Postup

1. V tabulce na následující straně jsou parametry, které by mohly mít vliv na vzdálenost dvou sousedních světlých proužků, tedy na tvar interferenčního obrazce.



Měňte vždy jeden z parametrů a pozorujte, jak závisí vzdálenost sousedních maxim na daném parametru. Informace o šterbinách najdete na samostatném listu na stanovišti.

2. Své poznatky shrňte do polí pravé části tabulky s parametry.

Parametry, které ovlivňují interferenci	Označení parametru	Když se zvětší hodnota parametru, vzdálenost maxim y se ZVĚTŠÍ/ZMENŠÍ/NEZMĚNÍ
Vzdálenost šterbin	d	zmenší
Vzdálenost šterbiny od stínítka	l	zvětší
Vzdálenost laseru od dvojšterbiny	s	nezmění
Vlnová délka laseru	λ	zvětší

3. Proměřte závislost vzdálenosti sousedních maxim **y** na vzdálenosti šterbiny od stínítka. Vzdálenost **l** měňte s krokem 25 cm. Vzdálenost **y** odpovídá vzdálenosti středů světlých proužků, nikoli šířce tmavého proužku. Měření запиšte do tabulky:

l [cm]	25	50	75	100	125
y [mm]	1	2	3	4	5

4. Co všechno má vliv na přesnost resp. správnost vašeho měření?

Určení vzdálenosti stínítka–šterbina (šterbina je umístěna ve stojanu, zároveň měříme napojovaným metrem, umístění počátku měřidla u stínítka), určení hranice (a tím i šířky) světlého proužku, měření na hranici přesnosti měřidla (hodnoty jednotek mm na pravítku). Zajištění kolmých vzdáleností při umístění laseru, šterbiny a stínítka.

Úkol 4: Matematický popis interferenčního obrazce

1. Na základě měření v úkolu 3 si rozmyslete znění následující věty:

Když se parametr **l** zvětšil **2** krát, vzdálenost sousedních maxim **y** se **zvětšila/zmenšila** **2** krát.

2. Závislost veličin, kterou můžeme popsat slovy „kolikrát víc jedné, tolikrát víc druhé“ nazýváme přímá úměrnost a matematicky ji zapíšeme $y = k \cdot x$.

Pro nepřímou úměrnost naopak platí „kolikrát víc jedné, tolikrát méně druhé“: $y = \frac{k}{x}$.

Nyní zkusíte odvodit teoretický vztah pro předpovídání vzdálenosti sousedních maxim **y**. Dále můžete předpokládat, že závislosti na parametrech jsou pouze přímé a nepřímé úměrnosti.

3. Na základě závěrů z tabulky se pokuste sestavit teoretický vztah pro určení vzdálenosti **y** sousedních maxim (světlých proužků). Výsledek diskutujte s lektorem.

$$y = \frac{\lambda \cdot l}{d}$$





Závěry

Vlastními slovy vysvětlete, co se děje při interferenci vlnění.

Při interferenci vlnění dochází ke skládání vlnění stejné frekvence dvou blízkých zdrojů a vznikají místa s maximální a nulovou intenzitou, která se pravidelně střídají. Tomuto obrazci střídajících se maxim (světlych proužků) a minim (tmavých proužků) říkáme interferenční obrazec.

Vzdálenost sousedních maxim interferenčního obrazce ovlivňuje:

Vzdálenost štěrbin, vzdálenost štěrbin od stínítka a vlnová délka světla laseru.

Bonusový úkol 5: Tvorba interferenčního obrazce

1. Když znáte vzorec, zkuste s jeho využitím vytvořit na stínítku obrazec, pro který bude $y = 5 \text{ mm}$.
2. Zapište, jaké bylo nastavení experimentu, pomocí kterého jste vytvořili zadaný interferenční obrazec:

$$\lambda = 650 \text{ nm}, d = 150 \mu\text{m}, y = 5 \text{ mm}$$

$$\text{Teoretická hodnota: } l = \frac{y \cdot d}{\lambda}, l = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 15 \cdot 10^{-5}}{6,5 \cdot 10^{-7}} \text{ m} = 1,154 \text{ m.}$$



POLARIZACE SVĚTLA

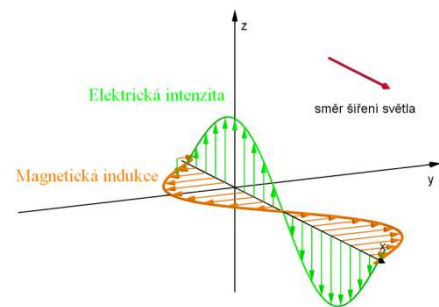
- Sledujte pokyny v tomto materiálu, pokud jsou pro vás nesrozumitelné, nebojte se nás zeptat.
- Vaše dílčí i finální závěry zaznamenávejte přímo do textu či připravených grafů.
- Chcete-li, můžete si například pomocí mobilu průběh experimentu vyfotit, natočit apod.

Cíl a idea stanoviště

Na tomto stanovišti se pomocí apletu seznámíte s polarizací světla.

Teoretický úvod

Světlo má ve fyzice tzv. duální charakter. To znamená, že se na něj můžeme dívat jako na proud částic – fotonů, ale také jako na typ vlnění, kterým se budeme nyní zabývat. Toto vlnění má dvě složky: elektrickou a magnetickou, proto jej nazýváme elektromagnetické.



Obr. 1: Elektromagnetické vlnění

Úkol 1: Co je to polarizace?

Poznámka: Vše, co budete dělat v apletu, si můžete vyzkoušet i se skutečnými polarizačními filtry.

1. Otevřete si aplet Polarizace, který najdete na ploše ve složce Optika II, a vyzkoušejte si jeho ovládání. V levém dolním rohu je možné aplet spustit tlačítkem „play“.

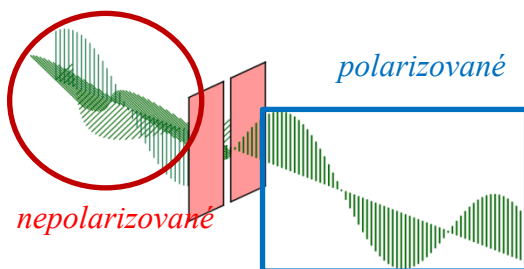
Pokud se na světlo díváme jako na elektromagnetické vlnění, můžeme jej popsat pomocí vektorových veličin elektrické intenzity a magnetické indukce. Dále nás bude zajímat pouze elektrická složka, proto se magnetickou indukci nebudeme blíže zabývat. Vektor elektrické intenzity \vec{E} kmitá vždy kolmo ke směru šíření světla (viz obrázek 1).

2. Co v apletu představuje jedna zelená čára? Co celá „pruhovaná vlna“?

*Zelená čára představuje okamžitou podobu vektoru elektrické intenzity v daném místě a čase.
Pruhovaná vlna tudíž představuje elektrickou intenzitu.*

Představme si, že do svazku světla vložíme rovinu kolmou ke směru šíření světla. Pokud má vektor intenzity v dané rovině nahodilý směr i velikost, tj. kmitá nahodile, nazveme světlo nepolarizované.

3. Zaškrtněte pole „Vlož kolmou rovinu“ a zobrazte tak směry kmitání vektoru.
Kde je v apletu znázorněné nepolarizované světlo? Zakroužkujte v obrázku 2.



Obr. 2: (NE)polarizované světlo

Nepolarizované světlo lze změnit na polarizované např. pomocí polarizačního filtru.

Polarizační filtr pohltí složky intenzity, které kmitají v jiných směrech, než je směr daný filtrem. Světlo, které projde tímto filtrem, je pak lineárně polarizované (tj. kmitá pouze ve směru určeném filtrem).

POZOR! Polarizační filtr není štěrbinu, aplet jej tak pouze modeluje. Filtr je typicky z materiálu se speciálními optickými vlastnostmi.





4. Zaškrtněte pole „Přidej 1 filtr“, v apletu tak uvidíte celkem 2 filtry. Zároveň zkontrolujte, že máte označené pole „Ukaž filtr“.

a) Označte v obrázku 2, kde můžeme pozorovat lineárně polarizované světlo. Odpověď barevně či jinak odlište od úlohy 3.

b) Určete konkrétní směr kmitání vektorů intenzity, které propouští **první** filtr v apletu.

Filtr propouští pouze ty vektory, které kmitají svisle.

c) Odhadněte: Co všechno se změní, když změníte úhel natočení druhého znázorněného filtru?

Intenzita světla, úhel kmitání vektoru elektrické intenzity prošlého světla

d) Porovnejte váš odhad se změnami v apletu po otočení filtrem a s pozorováním se skutečnými filtry.

e) Které změny, jež se udály v apletu, lze pozorovat se skutečnými filtry? Jak se změny projeví?

Pokles intenzity světla – když se díváme skrz vzájemně natočení filtry, obraz je temnější.

5. Pomocí apletu najdi takové natočení filtrů, které nepropouští žádné světlo.

Jaký byl úhel vzájemného natočení filtrů?

90°, filtry k sobě byly kolmé

6. Vezměte si skutečné polarizační filtry a najděte polohu, kterou jste popsali v předchozí úloze. Jak jste postupovali?

Hledali jsme pozici, ve které bude oblast za oběma filtry nejtemnější. Vhodnou pozici jsme našli, když jsou filtry černé a nemůžeme skrz ně nic pozorovat.

Když filtrem prochází již polarizované světlo, jeho výsledná intenzita závisí na úhlu vzájemného natočení polarizačního filtru a vlnění, které dopadá na daný filtr.

Intenzita světla v oblasti mezi filtrem A a B z obrázku 3 proto bude záviset na úhlu α o velikosti 28° .

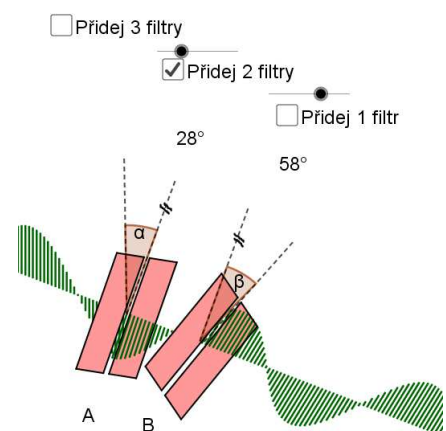
7. Nastala situace na obrázku 3. Určete velikost úhlu β , na kterém závisí intenzita světla po průchodu filtrem B. Uvedené číselné hodnoty velikosti úhlu odpovídají vždy natočení filtru od svislého směru.

$\beta = 58^\circ - 28^\circ = 30^\circ$

8. Odhadněte, co se bude dít s intenzitou světla po průchodu filtrem B, jestliže budeme zvětšovat úhel natočení (do 90°) pouze tohoto filtru.

Intenzita prošlého světla bude klesat.

9. Předchozí úlohu zkontrolujte pomocí apletu. Následně totéž vyzkoušejte se skutečnými polarizačními filtry.



Obr. 3: Vzájemně natočené filtry





Závěry

Polarizované světlo dokážeme odhalit pomocí **polarizačních filtrů**.

Popište, jak funguje polarizační filtr

Filtr je anizotropní prostředí, které pohltí některé složky elektrické intenzity – vektory, které kmitají v jiných směrech, než ten daný filtrem.

Je možné na základě práce s apletem učinit tento obecný závěr:

„S rostoucím úhlem vzájemného natočení dopadajícího vlnění a polarizačního filtru klesá intenzita polarizovaného světla, které prošlo filtrem.“?

Zkus svou odpověď také zdůvodnit.

Intenzita klesá do 90° vzájemného natočení dopadajícího vlnění a polarizačního filtru, od této hodnoty do 180° opět roste, dále do 270° klesá atd. Závislost intenzity prošlého světla na úhlu natočení je tedy periodická. Uvedený obecný závěr tedy neplatí.

Aplet samotný nám umožňuje modelovat pouze situace pro otočení filtru o 90° vůči svislému směru, o průběhu intenzity pro další úhly natočení se tedy z apletu víc nedozvíme.

