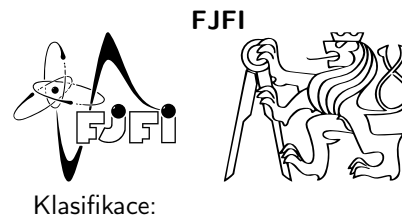


Jméno: **Ondřej Brož** Kolega: Stella Králová  
Kruh: **Úterý 9:30** Číslo skup.: 9  
Měřeno: **8.3.2022** Zpracování: 15h



## 1 Pracovní úkoly

1. DÚ: Vyjádřete  $\sin\theta$  ve vztazích popisujících:

- (a) maximum difrakce na mřížce
- (b) minimum difrakce na štěrbině
- (c) minimum difrakce na kruhovém otvoru

pomocí polohy maxima/minima od středu a uražené dráhy laserového paprsku.

- 2. Změřte průměr tří nejmenších kruhových otvorů užitím Fraunhoferovy difrakce světla a s pomocí měřicího mikroskopu a výsledky srovnejte. Odhadněte chybu měření šířky štěrbin mikroskopem. Pro který průměr kruhového otvoru je přesnější měření interferencí a pro který mikroskopem?
- 3. Změřte 10 různých šířek štěrbin užitím Fraunhoferovy difrakce světla a srovnejte s hodnotou na mikroskopickém šroubu. Pro jaké šířky je výhodnější měření interferencí a pro jaké měřícím šroubem?
- 4. Změřte mřížkovou konstantu optické mřížky a srovnejte s hodnotou na mřížce.
- 5. Sestavte Michelsonův interferometr a změřte vlnovou délku laserového svazku.

## 2 Pomůcky

Železná deska s magnetickými stojánky, He-Ne laser (633 nm, 5 mW), 2 zrcadla na stojánku, optická lavice s jezdcí, 2 spojky (+50, +200), rozptylka (-100), sada kruhových otvorů, nastavitelná štěrbina s mikrometrickým šroubem, stojan na mřížku, optická mřížka, stínítko na zdi, stínítko, držák na stínítko a kruhové otvory, pásmové měřidlo (5 m), pravítko 20 cm a 30 cm, měřicí mikroskop, Abbeho kostka, rovinné zrcadlo s mikrometrickým šroubem, rovinné zrcadlo, provázek.

## 3 Teoretický úvod

### 3.1 Difrakce na mřížce

Difrakční mřížka je optický nástroj s mnoha blízko u sebe umístěnými štěrbinami, na níž dochází k takové difrakci, že úhel, respektive vzdálenost mezi jednotlivými maximy intenzity prošlého záření na stínítku je<sup>[2]</sup>

$$\sin(\vartheta_{max}) = \frac{m\lambda}{d} \Rightarrow d = \frac{m\lambda\sqrt{l^2 + k^2}}{k}, \quad (1)$$

kde  $\vartheta_{max}$  značí úhel mezi jednotlivými maximy,  $k$  vzdálenost mezi nimi,  $l$  vzdálenost stínítka od mřížky,  $\lambda$  vlnovou délku záření,  $m$  o kolikáté maximum se jedná a  $d$  vzdálenost mezi rýhami na destičce, jinak také známé jako mřížková konstanta.

### 3.2 Difrakce na štěrbině

Prochází-li světlo štěrbinou v jinak nepropustném materiálu a vzdálenost zdroje záření od štěrbin je výrazně větší než velikost štěrbin, pak dle Babinetova principu dochází k Fraunhoferově difrakci světla, takové že úhel mezi minimy, respektive jejich vzájemná vzdálenost na stínítku, intenzity prošlého záření je<sup>[2]</sup>

$$\sin(\vartheta_{min}) = \frac{m\lambda}{D} \Rightarrow D = \frac{m\lambda\sqrt{l^2 + k^2}}{k}, \quad (2)$$

kde  $\vartheta_{min}$  značí úhel mezi jednotlivými maximy,  $k$  vzdálenost mezi nimi,  $l$  vzdálenost stínítka od mřížky,  $\lambda$  vlnovou délku záření,  $m$  o kolikáté maximum se jedná a  $D$  je velikost štěrbin.

### 3.3 Difrakce na kruhovém otvoru

Prochází-li světlo kruhovým otvorem v jinak nepropustném materiálu a vzdálenost zdroje záření je výrazně větší než poloměr otvoru, pak dle Babinetova principu dochází k Fraunhoferově difrakci světla, takové že úhel, respektive vzdálenost mezi nultým a prvním minimem intenzity na stínítku je:<sup>[2]</sup>

$$\sin(\vartheta_1) = 1,219 \frac{\lambda}{R} \Rightarrow R = \frac{1,219\lambda\sqrt{l^2 + k^2}}{k}, \quad (3)$$

mezi prvním a druhým

$$\sin(\vartheta_2) = 2,233 \frac{\lambda}{R} \Rightarrow R = \frac{2,233\lambda\sqrt{l^2 + k^2}}{k}, \quad (4)$$

mezi druhým a třetím

$$\sin(\vartheta_3) = 3,238 \frac{\lambda}{R} \Rightarrow R = \frac{3,238\lambda\sqrt{l^2 + k^2}}{k} \quad (5)$$

a mezi třetím a čtvrtým<sup>[1]</sup>

$$\sin(\vartheta_4) = 4,241 \frac{\lambda}{R} \Rightarrow R = \frac{4,241\lambda\sqrt{l^2 + k^2}}{k}, \quad (6)$$

kde ve všech těchto vztazích  $\vartheta_1$ , resp.  $\vartheta_2, \vartheta_3, \vartheta_4, \vartheta_5$  značí úhel mezi jednotlivými maximy,  $k$  vzdálenost mezi nimi,  $l$  vzdálenost stínítka od mřížky,  $\lambda$  vlnovou délku záření a  $R$  poloměr otvoru.

### 3.4 Michelsonův interferometr

Michelsonův interferometr je optický nástroj, který pomocí polopropustného zrcadla (tzv. Abbeho kostky) dělí paprsek na dva a jeden z nich zpožďuje, čímž vytváří dva prostorově i časově koherentní paprsky schopné navzájem interferovat. Změnou vzdálenosti posuvného zrcadla v Michelsonově interferometru lze určit vlnovou délku vlnění dle vztahu:

$$\lambda = \frac{\Delta l}{n} = \frac{2\Delta x}{n}, \quad (7)$$

kde  $\Delta x$  značí posunutí zrcadla, a  $n$  počet interferenčních proužků prošlých libovolným pevně zvoleným bodem na stínítku ( $\Delta l$  je tedy změna uražené dráhy paprsku).

## 4 Postup měření

Nejprve umístíme na optickou lavici laser, +50 spojku a +200 spojku, tak aby se jejich ohniska překrývaly. Následně na stůl naproti optické lavici umístíme zrcadlo, tak aby odrazilo paprsek do dalšího zrcadla umístěného na další zrcadlo na stejném stole jako je optická lavice, ze kterého se paprsek odrazí na stínítko na zdi. Tímto prodlužujeme dráhu paprsku což napomáhá Fraunhoferově difrakci.

### 4.1 Difrakce na kruhovém otvoru

Před poslední zrcadlo umístíme držák se sadou kruhových otvorů a za něj rozptylku. Postupně na sadě nastavíme tři nejmenší otvory, vyrovnáme paprsek tak aby otvorem procházel, změříme vzdálenost držáku od stínítka na zdi a následně měříme vzdálenosti jednotlivých minim difrakčního obrazce od sebe.

### 4.2 Difrakce na štěrbině

Na místo držáku se sadou kruhových otvorů umístíme nastavitelnou štěrbinou s mikrometrickým šroubem. Pro deset různých nastavení štěrbinu měříme vzájemné vzdálenosti minim difrakčního obrazce na stínítku na zdi.

### 4.3 Difrakce na mřížce

Odstraníme zrcadlo a před spojky umístíme difrakční mřížku. Změříme vzdálenost mřížky od zdi a následně vzdálenosti maxim difrakčního obrazce zobrazovaného na zdi. Opakujeme pro 3 různé vzdálenosti mřížky od zdi.

## 4.4 Michelsonův interferometr

Laser sundáme z optické lavice, umístíme na stůl a před něj umístíme Abbeho kostku, tak aby paprsek a rovina tvořená Abbeho kostkou svíraly úhel  $45^\circ$ . Do cesty obou paprsků opouštějících Abbeho kostku umístíme zrcadla, přičemž jedno z nich je nastavitelné pomocí mikrometrického šroubu, pokud možno kolmo na paprsek. Do cesty finálního paprsku vytvořeného superpozicí paprsků odražených ze zrcadel umístíme rozptylku a upřesňujeme dokud na stínítku na zdi nepozorujeme interferenční obrazec. Na stínítku zvolíme libovolný pevný bod, zrcadlo se šroubem posuneme o určitou vzdálenost a pozorujeme kolik minim interferenčního obrazce přejde přes námi zvolený pevný bod.

## 5 Naměřené hodnoty a vypracování

### 5.1 Domácí příprava

Domácí příprava je zobrazená na Obr. 1.

### 5.2 Difrakce na mřížce

Hodnoty naměřených vzdáleností mřížky od zdi  $l$ , vzdáleností jednotlivých maxim od sebe  $k_1$  a  $k_2$  a hodnot mřížkové konstanty  $d_1$  a  $d_2$  pro tyto konkrétní hodnoty získané ze vztahu (1) jsou zobrazeny v Tab. 1. Jejich průměrem získáme experimentální hodnotu mřížkové konstanty  $d_{exp} = (1,7186 \pm 0,0007)\mu\text{m}$ . Na mřížce byla vypsána četnost vrypů  $n = 600$  vrypů/mm, dávající nám teoretickou hodnotu  $d_{teo} = 1,6\bar{6}$ .

### 5.3 Difrakce na kruhovém otvoru

Hodnoty vzdáleností jednotlivých minim od sebe  $k_1, k_2, k_3$  a  $k_4$  na stínítku na zdi vzdálené  $l = (2,58 \pm 0,02)$  m a poloměry otvorů  $r_t$  naměřené mikroskopem jsou zobrazeny v Tab. 2. Poloměry otvorů  $R_1, R_2$  a  $R_3$  získané z těchto hodnot pomocí vztahů (3), (4), (5) a (6) společně s jejich průměry  $r_{exp}$ , které jsou našimi výslednými experimentálními hodnotami jsou vypsány v Tab. 3.

### 5.4 Difrakce na štěrbině

Hodnoty vzdáleností jednotlivých minim od sebe  $k_1, k_2, k_3$  a  $k_4$  na stínítku na zdi vzdálené  $l = (2,58 \pm 0,02)$  m a velikosti štěrbin  $d_s$  získaných z mikrometrického šroubu na nastavitelné štěrbině jsou zobrazené v Tab. 4. Velikosti štěrbin  $D_1, D_2, D_3$  a  $D_4$  získané z těchto hodnot pomocí vztahu (2) a jejich průměry  $D_{exp}$ , které jsou našimi výslednými experimentálními hodnotami jsou vypsány v Tab. 5.

### 5.5 Michelsonův interferometr

Po vytvoření interferenčního obrazce a posunutí zrcadla o  $(5 \pm 0,5) \mu\text{m}$  přešlo přes námi zvolený bod 6 interferenčních minim. Po dosažení těchto hodnot do vztahu (7) získáváme experimentální vlnovou délku laseru  $\lambda_{exp} = (1600 \pm 200) \text{ nm}$ . Teoretická hodnota vypsána na samotném laseru je  $\lambda_{teo} = 633 \text{ nm}$ .

## 6 Diskuse

Veškerá měření byla ovlivněna nestabilitou laseru, zrcadel, rozptylky i měřených optických nástrojů. Jakékoliv silnější vibrace (například student procházející kolem či projíždějící tramvaj) výrazně zkomplikovaly měření a případně i rozladily měřící soustavu.

### 6.1 Difrakce na mřížce

Experimentální hodnota se zásadně neliší od teoretické hodnoty a s přihlédnutím na výše zmíněnou nestabilitu celé soustavy může být považována za validní.

## 6.2 Difrakce na štěrbině

Při měření vzdáleností difrakčních minim pro štěrbinu nastavenou mikrometrickým šroubem jako  $250\text{ }\mu\text{m}$  se nám nepodařilo pozorovat čtvrté minimum.

Experimentálně získané hodnoty se výrazně (ovšem nikoliv řádově) liší od hodnot zobrazených na mikrometrickém šroubu. Vzhledem k tomu, že velikost štěrbin byla nepochybně zvětšována po alespoň přibližně podobných dílech (čili nehledě na přesnost mikrometrického šroubu) a hodnoty naměřené nejen že nerostou po podobných dílech, ale v některých případech dokonce klesají, dá se předpokládat že hodnoty z mikrometrického šroubu mají výrazně vyšší informační hodnotu a jsou nejspíše blíže pravé velikosti štěrbin.

Hlavní faktor, který k tomuto přispěl bude nejspíš výše zmíněná nestabilita celé soustavy, která byla u tohoto úkolu pozorována ještě častěji než u ostatních, hlavně z důvodu vratkosti nastavitelné štěrbin, kterou bylo často nutné mírně posunout aby paprsek opět procházel štěrbinou. Zároveň pozorovaná difrakční minima měly nenulovou tloušťku (kterou vy výpočtech předpokládáme), která převyšuje chybu měřicího zařízení, ale je bohužel těžko odhadnutelná.

## 6.3 Difrakce na kruhovém otvoru

Podobně jako u měření difrakce na štěrbině jsou výsledky získané měřením difrakcí rozdílné od těch získaných mikroskopem, ovšem s výrazně menším faktorem. Měření bylo stále ovlivněno nestabilitou soustavy a nenulovou velikostí minim, tudíž výsledky získané mikroskopem jsou rozhodně přesvědčivější. Nicméně na rozdíl od měření velikosti štěrbin není informační hodnota tak nízká a za stabilnějšího a hlavně klidnějšího provedení by mohla potenciálně přinést i výsledky přesnější než měření mikroskopem.

## 6.4 Michelsonův interferometr

Vzhledem k nerovnostem povrchu, nestabilitě laseru a nedostatku jistého ujištění se o kolmosti zrcadel na paprsek je samotná konstrukce interferometru zpochybnitelná. Nicméně interferenční obrazec pozorován byl. Interferenční minima ale byla tak blízko sobě, že jejich pozorování bylo přinejmenším obtížné a získaný kvantitativní výsledek nelze brát s přílišnou jistotou. Není proto divu, že změřená hodnota vlnové délky paprsku byla téměř trojnásobkem hodnoty uváděné na laseru.

## 7 Závěr

Seznámili jsme se a ozkoušeli jsme si realizaci difrakce a interference. Změřili jsme mřížkovou konstantu difrakční mřížky jako  $d = (1,7186 \pm 0,0007)\mu\text{m}$ . Porovnali jsme výsledky měření velikosti kruhových otvorů pomocí difrakce a pomocí mikroskopu a porovnali výsledky měření velikosti štěrbin pomocí mikrometrického šroubu a pomocí difrakce. Nakonec jsme pomocí Michelsonova interferometru určili vlnovou délku laseru jako  $\lambda = (1600 \pm 200)\text{ nm}$ .

## Literatura

1. Bessel function Zeros - Wolfram Mathworld [13.3.2022]  
<https://mathworld.wolfram.com/BesselFunctionZeros.html>
2. Návod k úloze 10 Fyzikální praktikum 2 [13.3.2022]  
[https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/435630/mod\\_resource/content/8/10\\_interference\\_170218.pdf](https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/435630/mod_resource/content/8/10_interference_170218.pdf)

## Přílohy

$l\text{ }(\pm 0,5)\text{ [mm]}$	$k_1\text{ }(\pm 0,5)\text{ [mm]}$	$k_2\text{ }(\pm 0,5)\text{ [mm]}$	$d_1\text{ }[\mu\text{m}]$	$d_2\text{ }[\mu\text{m}]$
639	259	434	$1,685 \pm 0,003$	$1,722 \pm 0,007$
368	151	244	$1,667 \pm 0,005$	$1,731 \pm 0,005$
210	87	148	$1,698 \pm 0,009$	$1,698 \pm 0,009$

Tab. 1: Tabulka zobrazující vzdálenosti mřížky od zdi  $l$ , vzdálenosti maxim od sebe  $k_1$  a  $k_2$  a hodnoty mřížkové konstanty  $d_1$  a  $d_2$  pro jednotlivé hodnoty získané vztahem (1) v úkolu 4.

$r_t (\pm 0,25) [\mu\text{m}]$	$k_1 (\pm 0,5) [\text{mm}]$	$k_2 (\pm 0,5) [\text{mm}]$	$k_3 (\pm 0,5) [\text{mm}]$	$k_4 (\pm 0,5) [\text{mm}]$
255	9,0	19,0	28,5	37,0
505	2,0	8,0	16,0	23,0
900	2,0	5,0	11,0	28,0

Tab. 2: Tabulka zobrazující velikosti poloměru kruhových otvorů  $r_t$  získané mikroskopem a vzdálenosti minim od sebe zobrazených na stínítku na zdi  $k_1, k_2, k_3$  a  $k_4$  v úkolu 2.

$R_1 [\mu\text{m}]$	$R_2 [\mu\text{m}]$	$R_3 [\mu\text{m}]$	$R_4 [\mu\text{m}]$	$R_{exp} [\mu\text{m}]$
$221 \pm 2$	$189 \pm 2$	$186 \pm 2$	$187 \pm 2$	$193 \pm 8$
$1140 \pm 10$	$456 \pm 4$	$331 \pm 3$	$304 \pm 3$	$410 \pm 20$
$1140 \pm 10$	$729 \pm 7$	$481 \pm 5$	$247 \pm 2$	$620 \pm 30$

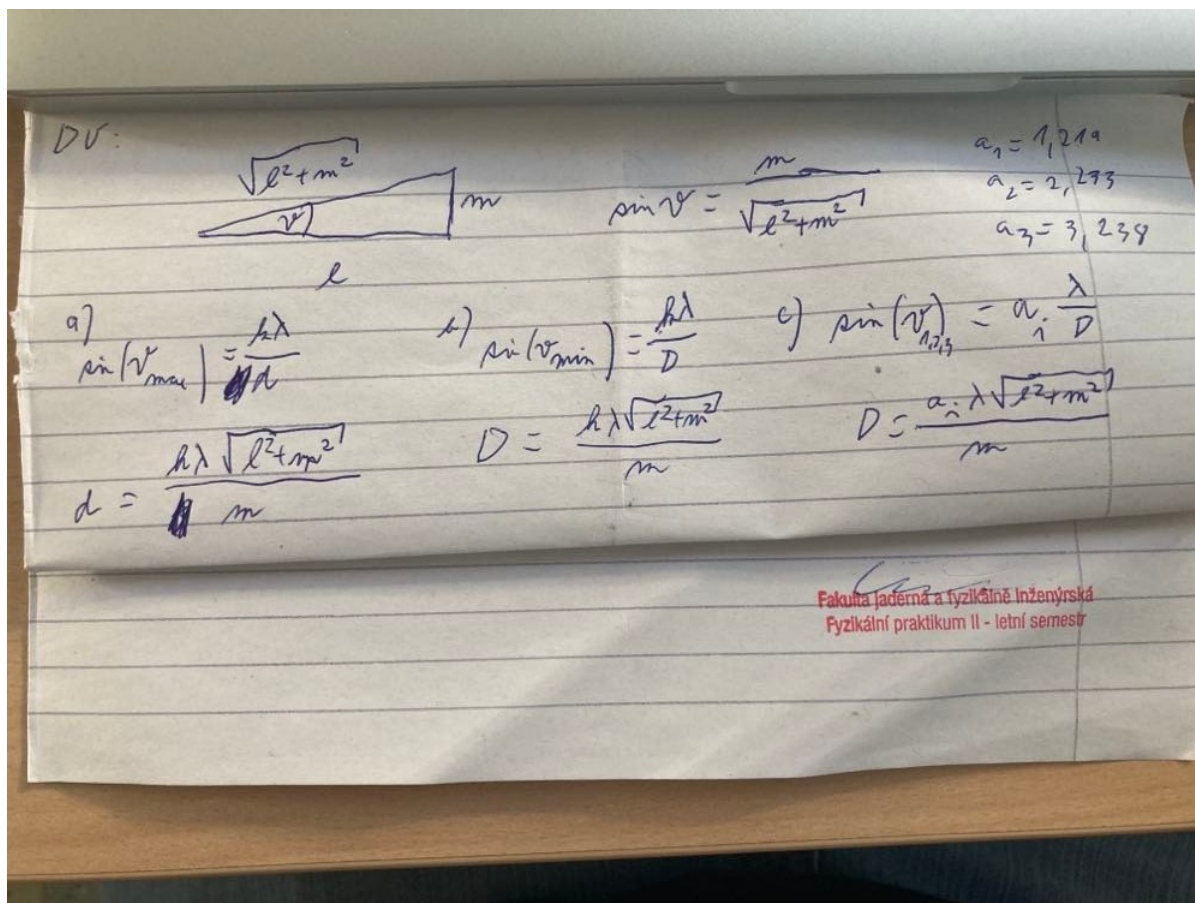
Tab. 3: Tabulka zobrazující velikosti poloměrů kruhových otvorů  $R_1, R_2, R_3$  a  $R_4$  určených ze vzdáleností minim  $k_1, k_2, k_3$  a  $k_4$  v Tab. 2 použitých ve vztazích (3), (4), (5) a (6) a jejich průměr  $R_{exp}$  v úkolu 2.

$d_s (\pm 5) [\mu\text{m}]$	$k_1 (\pm 0,5) [\text{mm}]$	$k_2 (\pm 0,5) [\text{mm}]$	$k_3 (\pm 0,5) [\text{mm}]$	$k_4 (\pm 0,5) [\text{mm}]$
250	24,5	48,5	76,0	-
350	13,5	30,5	47,5	65,5
400	16,5	37,0	58,0	77,5
450	7,5	20,5	34,0	45,5
500	12,5	29,5	47,5	66,5
550	8,0	19,5	31,5	43,5
600	8,0	22,5	34,5	60,5
650	7,0	14,5	24,0	34,0
750	5,5	19,0	35,5	43,0
850	5,0	14,0	23,0	32,0

Tab. 4: Tabulka zobrazující hodnoty nastavené na mikrometrickém šroubu připevněném k nastavitelné štěrbině  $d_s$  a vzdálenosti minim zobrazených na stínítku na zdi od sebe  $k_1, k_2, k_3$  a  $k_4$  v úkolu 3.

$D_1 [\mu\text{m}]$	$D_2 [\mu\text{m}]$	$D_3 [\mu\text{m}]$	$D_4 [\mu\text{m}]$	$D_{exp} [\mu\text{m}]$
$66,6 \pm 0,6$	$67,4 \pm 0,7$	$64,5 \pm 0,6$	-	$66 \pm 2$
$121 \pm 1$	$107 \pm 1$	$103 \pm 1$	$100 \pm 1$	$107 \pm 4$
$99 \pm 1$	$88,3 \pm 0,9$	$84,5 \pm 0,8$	$84,3 \pm 0,8$	$88 \pm 3$
$218 \pm 2$	$159 \pm 2$	$144 \pm 1$	$144 \pm 1$	$158 \pm 6$
$131 \pm 1$	$111 \pm 1$	$103 \pm 1$	$98 \pm 1$	$108 \pm 4$
$204 \pm 2$	$168 \pm 2$	$156 \pm 2$	$150 \pm 1$	$165 \pm 7$
$204 \pm 2$	$145 \pm 2$	$142 \pm 1$	$108 \pm 1$	$136 \pm 6$
$233 \pm 2$	$225 \pm 2$	$204 \pm 2$	$192 \pm 2$	$211 \pm 8$
$297 \pm 3$	$172 \pm 2$	$138 \pm 1$	$152 \pm 1$	$163 \pm 7$
$327 \pm 3$	$233 \pm 2$	$213 \pm 2$	$204 \pm 2$	$230 \pm 9$

Tab. 5: Tabulka zobrazující velikost štěrbin  $D_1, D_2, D_3$  a  $D_4$  získané ze vzdáleností minim  $k_1, k_2, k_3$  a  $k_4$  v Tab. 4 dosazených do vztahu (2) a jejich průměr  $d_{exp}$  v úkolu 3.



Obr. 1: Odvození vztahů v domácí přípravě.