

Oddělení fyzikálních praktik při Kabinetu výuky obecné fyziky MFF UK

## Praktikum .....

Úloha č. ....

Název: .....

Pracoval: ..... stud.sk.: ..... dne: .....

Odevzdal dne: .....

	možný počet bodů	udělený počet bodů
Práce při měření	0 - 5	
Teoretická část	0 - 1	
Výsledky měření	0 - 8	
Diskuse výsledků	0 - 4	
Závěr	0 - 1	
Seznam použité literatury	0 - 1	
<b>Celkem</b>	max. 20	

Posuzoval:.....

dne: .....

## Pracovní úkol

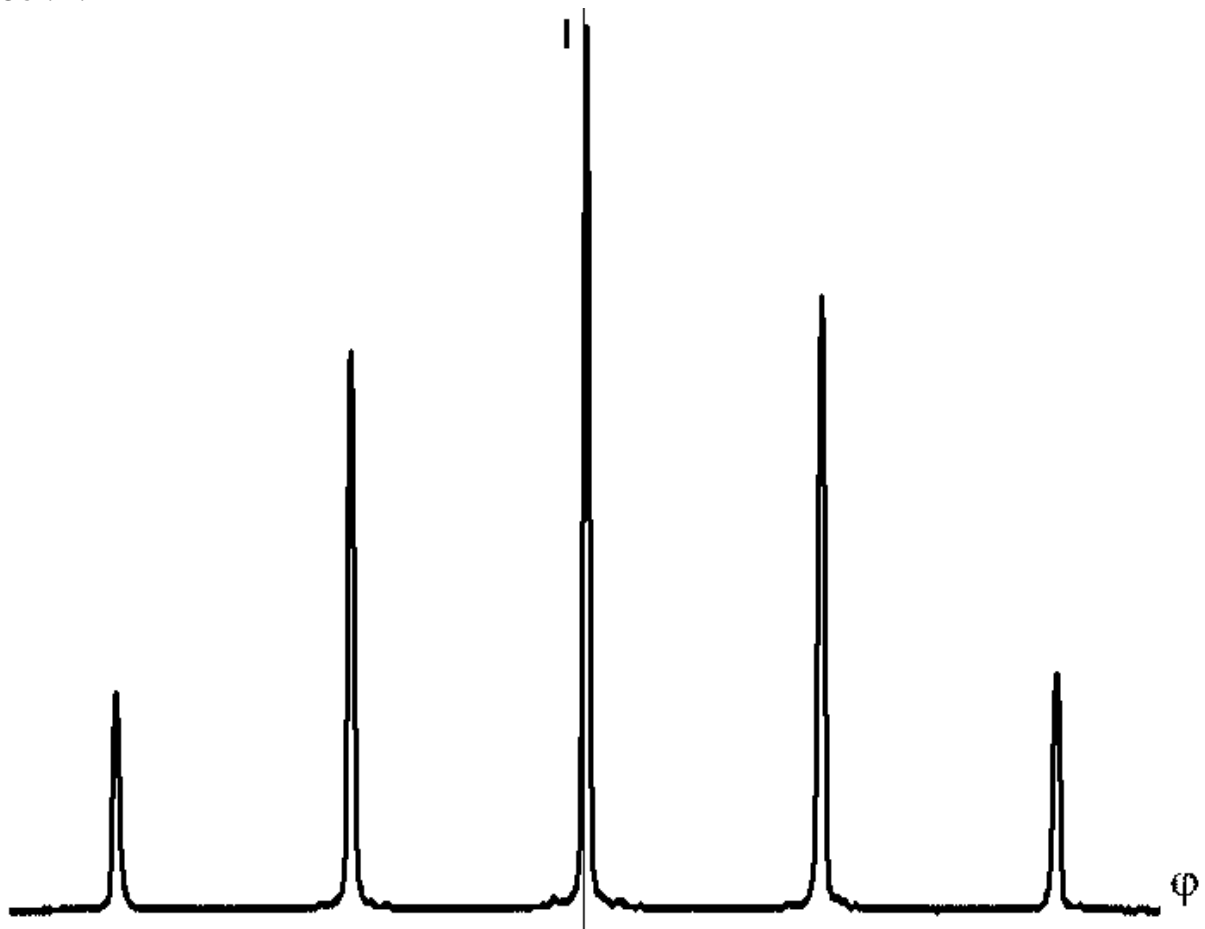
1. Pomocí aparatury proměřte ohybové obrazce na mřížce, štěrbinách a dvojštěrbinách. (Po dohodě s vyučujícím vyberte 2 štěrbinu a 2 dvojštěrbinu)
2. Okalibrujte mikroskopový okulár, odhadněte chybu kalibrace. Proměřte mřížkovou konstantu použité mřížky a pomocí ohybového obrazce stanovte vlnovou délku laseru, porovnejte s tabelovanou hodnotou. Proměřte mikroskopem geometrické parametry štěrbin a dvojštěrbin, odhadněte chyby.
3. Pomocí ohybového obrazce dvojštěrbin a štěrbin a tabelované hodnoty vlnové délky laseru stanovte šířky štěrbin i jejich vzdálenosti u dvojštěrbin. Porovnejte s hodnotami, které jste naměřili mikroskopem.
4. K referátu přiložte grafické průběhy ohybových obrazců.

## Teoretický základ

\*Postup převzat ze [2], metody zpracování z [1].

### Úkol 1 a 3 - měření ohybových obrazců a určování geometrických parametrů

V této úloze se budeme zabývat Fraunhoferovou difrakcí. Tato difrakce je limitou Fresnelovy difrakce, kterou v experimentálních podmínkách konečných rozměrů můžeme získat jedině v nekonečnu. Proto použijeme pro zobrazení ohybových obrazců spojnou čočku a stínítko (či později snímač) umístíme do její ohniskové roviny. Na vodorovnou osu budeme vynášet úhlovou odchylku od původní osy svazku, na svislou potom relativní intenzitu. Pro difrakční mřížku získáme obrazec s průběhem intenzity podobným průběhu vyobrazenému na Obr. 1.



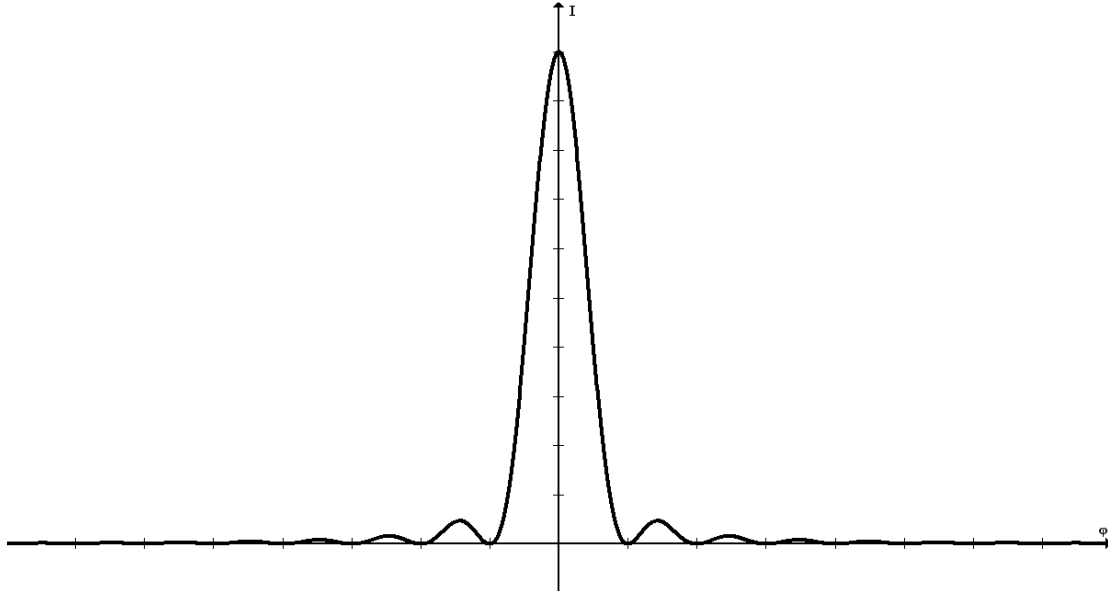
Obr. 1 – Průběh intenzity ohybového obrazce na mřížce

Polohy maxim musí splňovat podmínku danou mřížkovou rovnicí:

- $$\sin \varphi = \frac{k\lambda}{a} \quad (1)$$

Kde  $\varphi$  je úhlová odchylka,  $k$  je řád maxima,  $\lambda$  vlnová délka a  $a$  je mřížková konstanta.

V případě ohybu na štěrbině dostaneme průběh podobný tomu vyobrazenému na Obr. 2.



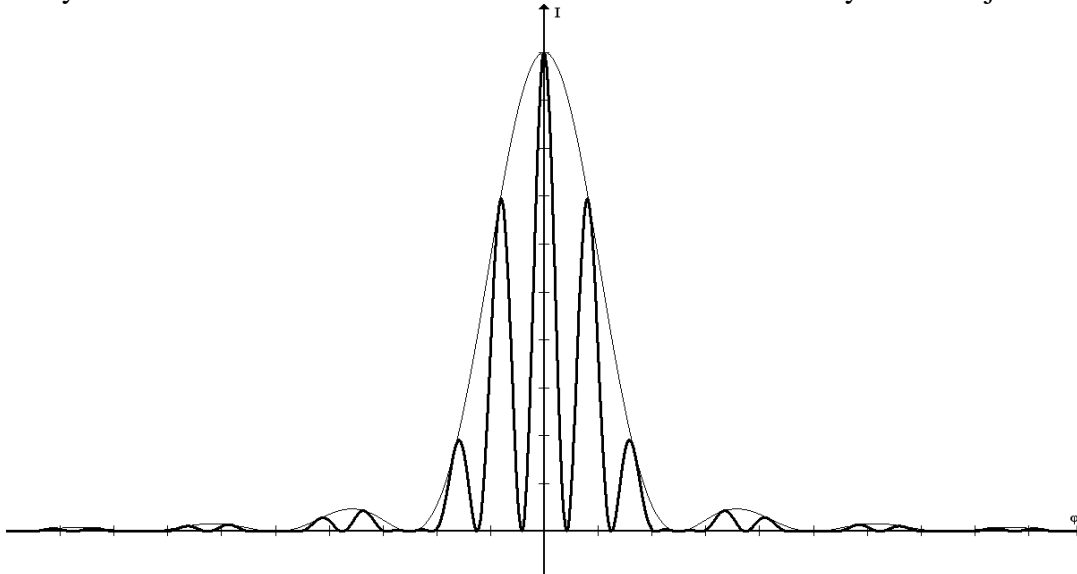
**Obr. 2 – Průběh intenzity ohybového obrazce na štěrbině**

Tento průběh popisuje složitější vztah. Pro polohy minim však můžeme získat podmínku:

- $$\varphi = \frac{k\lambda}{b} \quad (2)$$

Kde  $b$  je šířka štěrbině.

Pro ohyb na dvojštěrbině dostáváme průběh modulovaný předchozím, ovšem obohacený o interferenci dvou svazků. Situaci včetně modulační obálky znázorňuje Obr. 3.



**Obr. 3 – Průběh intenzity ohybového obrazce na dvojštěrbině**

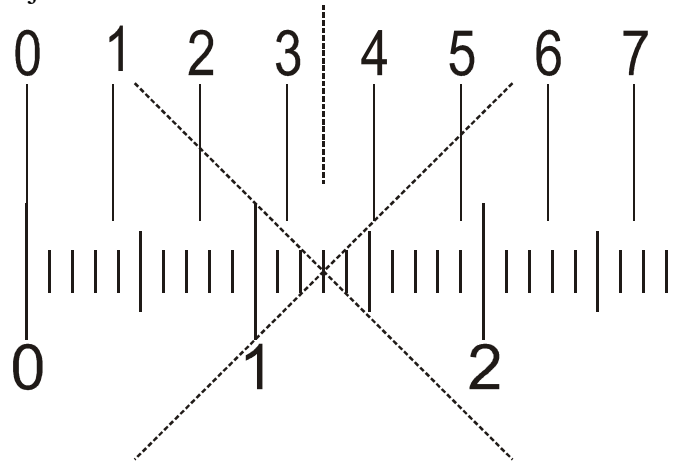
V tomto případě dostáváme ještě podmínku pro polohy vedlejších minim:

$$\bullet \quad \varphi = \frac{(2k+1)\lambda}{2a} \quad (3)$$

Kde  $a$  je vzdálenost mezi středy štěrbin.

### Úkol 2 – Kalibrace mikroskopového okuláru a měření mikroskopem

Kalibraci okuláru provedeme pomocí kalibrační stupnice. Tuto stupnici o známé rozteči dílků umístíme pod mikroskop a překryjeme jeden z jejích dílků s počátkem stupnice okuláru tak, jak ukazuje Obr. 4.



Obr. 4 – Kalibrace mikroskopového okuláru pomocí kalibrační stupnice (dole)

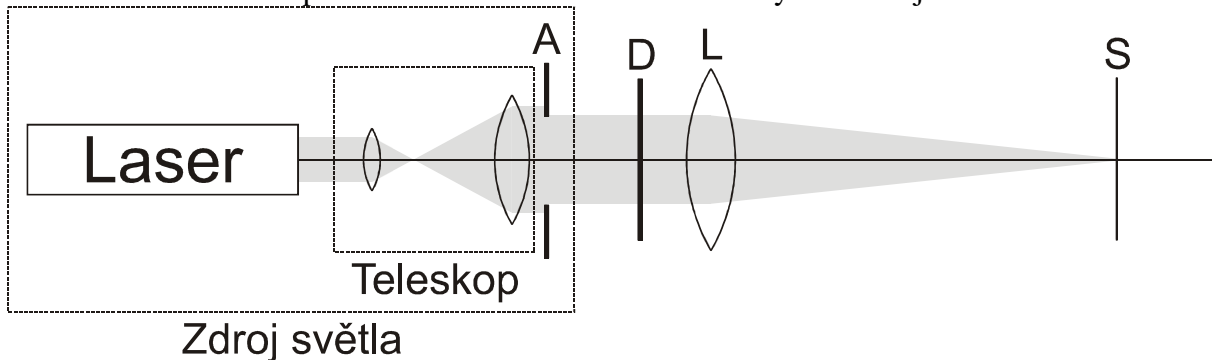
Stupnice okuláru je vybavena nitkovým křížem, který pokaždé zaměříme na jeden z dílků kalibrační stupnice a odečteme hodnotu celých dílků ze stupnice okuláru a z jemného šroubu po straně odečteme setiny dílku. Takto opakujeme měření, dokud nevyčerpáme všechny dílky kalibrační stupnice, které se vejdu do úhlu pohledu. Převod mezi počtem dílků a skutečnou vzdáleností potom určíme z lineární regrese.

Když získáme potřebný převodní vztah, můžeme snadno změřit šířky a vzdálenosti štěrbin či vrypů. V případě vrypů získáme mřížkovou konstantu použité mřížky, kterou můžeme použít za znalosti difrakčních obrazců k určení vlnové délky světla, jímž byla osvětlena. Použijeme upravenou mřížkovou rovnici:

$$\bullet \quad \lambda = \frac{a \sin \varphi}{k} \quad (4)$$

### Měřící zařízení

Měřící zařízení používané v tomto úkolu schématicky znázorňuje Obr. 5.



Obr. 5 – Schéma měřící aparatury

Ve zdroji světla je laser emitující svazek paprsků o jisté divergenci. Tuto divergenci minimalizuje a rozměry paprsku zvětšuje teleskop umístěný před výstupem laseru. Intenzita svazku použitého pro měření této úlohy je regulovatelná pomocí apertury  $A$  umístěné za teleskopem. Dále je před zařízením umístěn prvek  $D$ , na němž dochází k difrakci – v našem případě půjde postupně o mřížku, štěrbinu a dvojštěrbinu. Jelikož zkoumáme Fraunhoferovou difrakci, která vzniká v nekonečnu, umístíme za difrakční prvek ještě spojnu čočku  $L$  o známé ohniskové vzdálenosti. Do této vzdálenosti od ní poté umístíme stínítko  $S$ , na které zaznamenejeme polohy maxim u mřížky, a později snímač, kterým budeme měřit průběh intenzity.

## Pomůcky

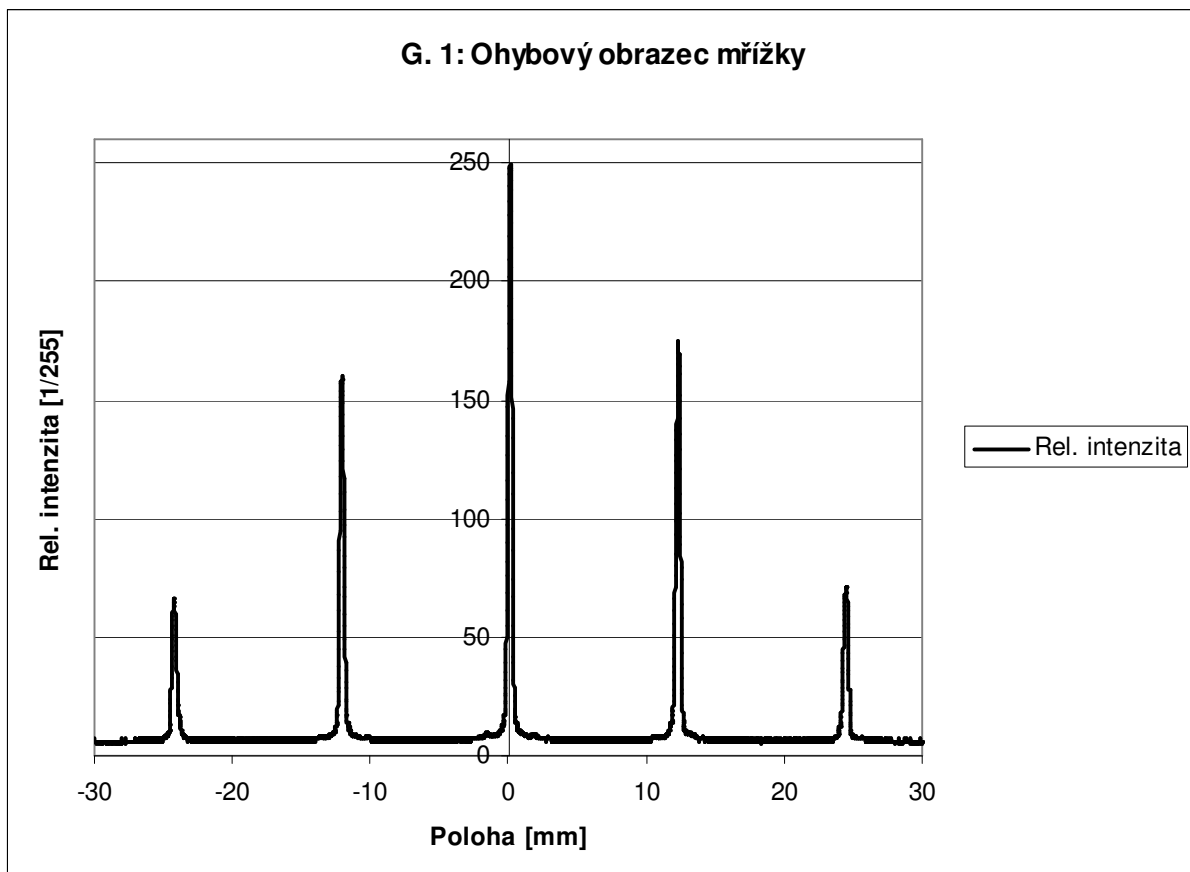
laser, měřící pásmo, optická lavice, snímač připojený k počítači, stínítko, milimetrový papír, mikroskop, lampička, difrakční mřížka, štěrbiny, dvojštěrbiny, kalibrační stupnice

## Výsledky měření

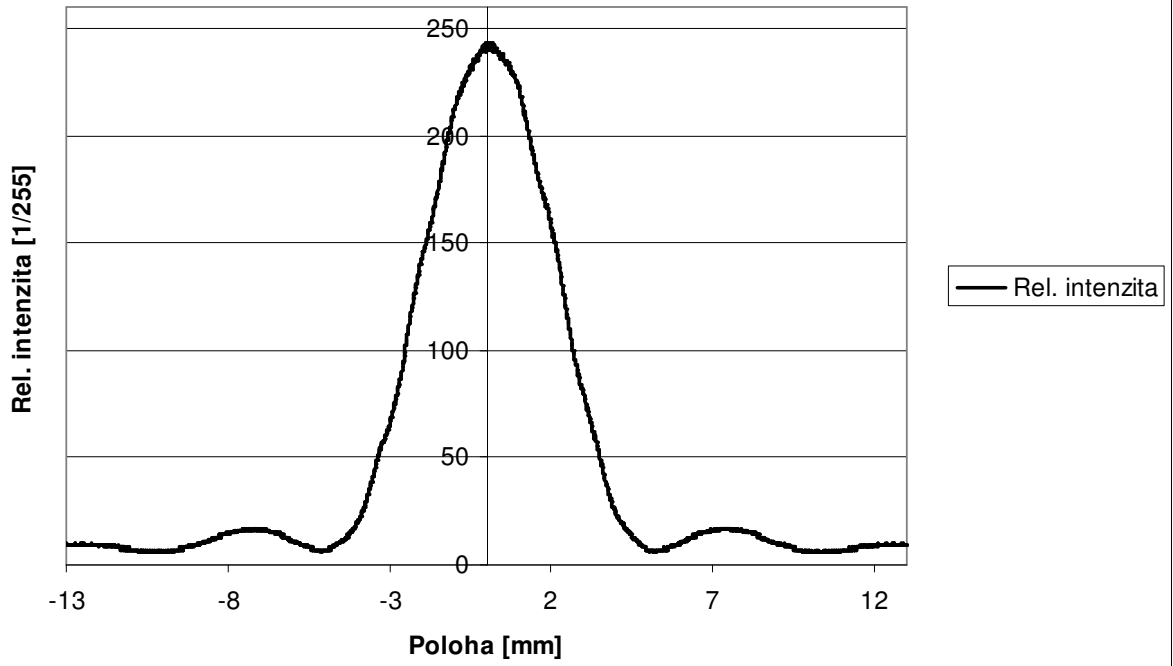
\*Uváděné chyby jsou mezního charakteru, tedy pravděpodobnost odpovídá  $P \approx 0,997$ .

### Úkol 1 - měření ohybových obrazců

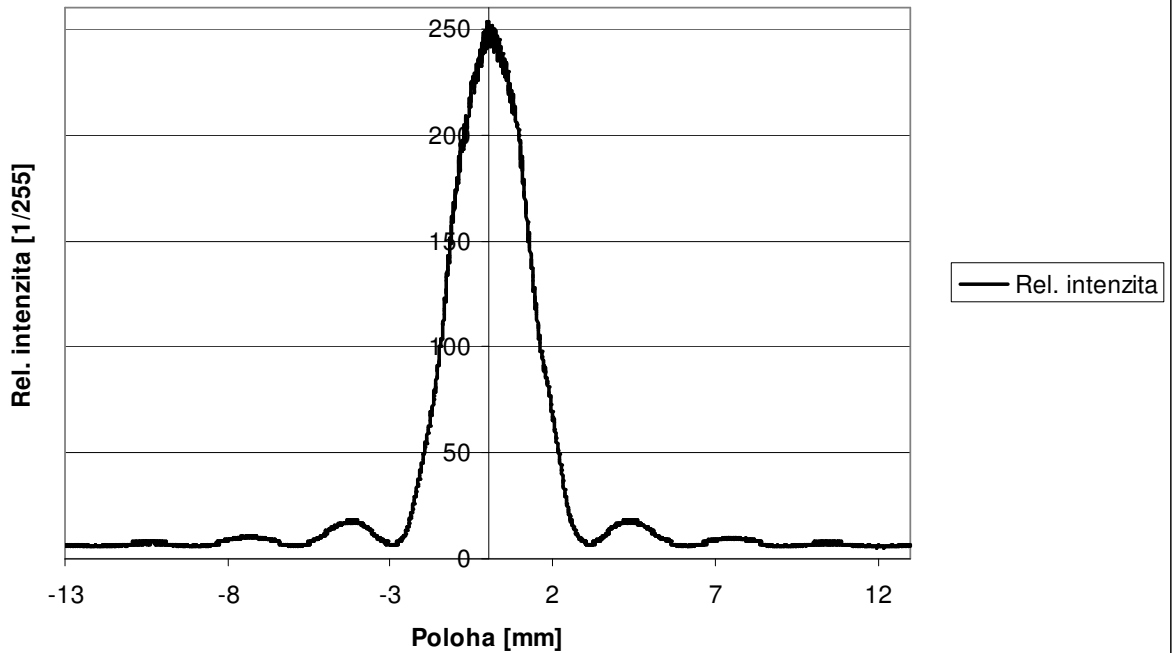
Naměřené průběhy intenzit ohybových obrazců na jednotlivých prvcích ukazují grafy G. 1 – G. 8. Zvoleny byly štěrbiny A, B, C a dvojštěrbiny B, C. Pro dvojštěrbiny byly obrazce proměřeny při dvou různých intenzitách – nejprve tak, aby nedocházelo k oříznutí, poté tak, aby byl zřetelný průběh vedlejších minim a maxim i ve vyšším řádu.



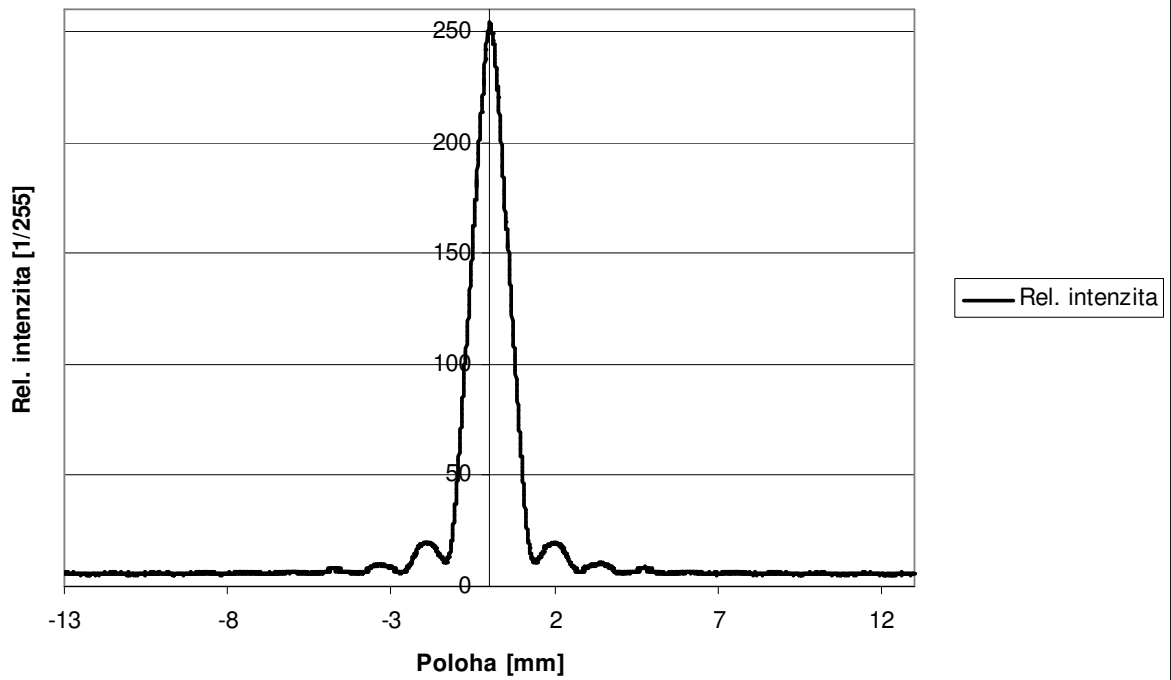
G. 2: Ohybový obrazec štěrby A



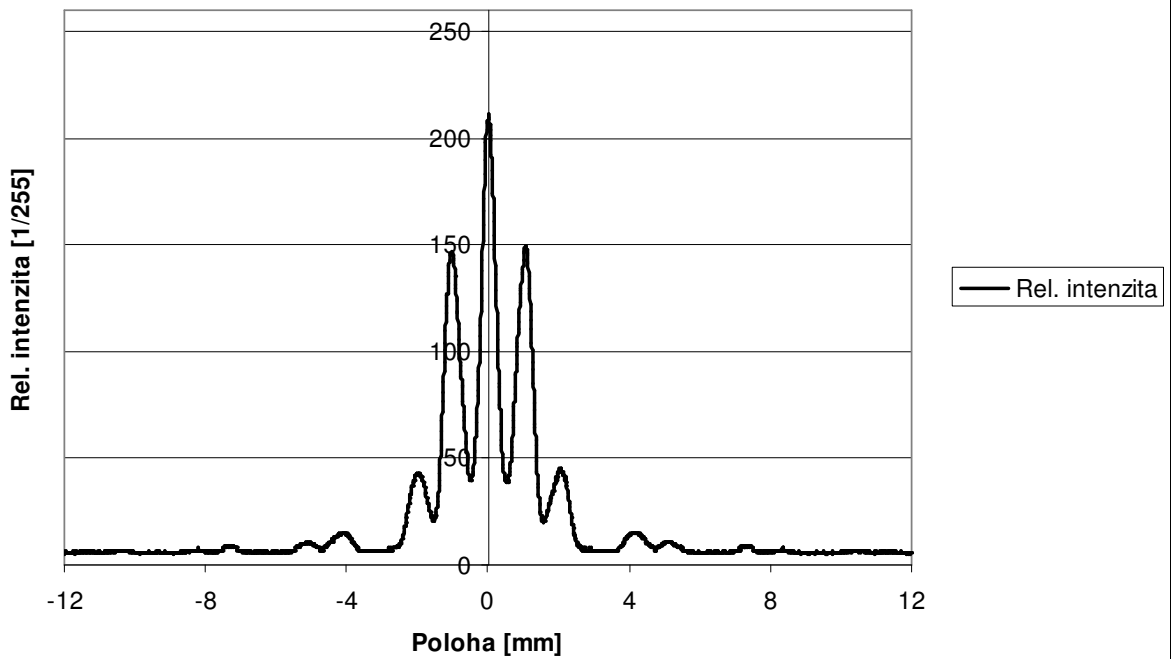
G. 3: Ohybový obrazec štěrby B



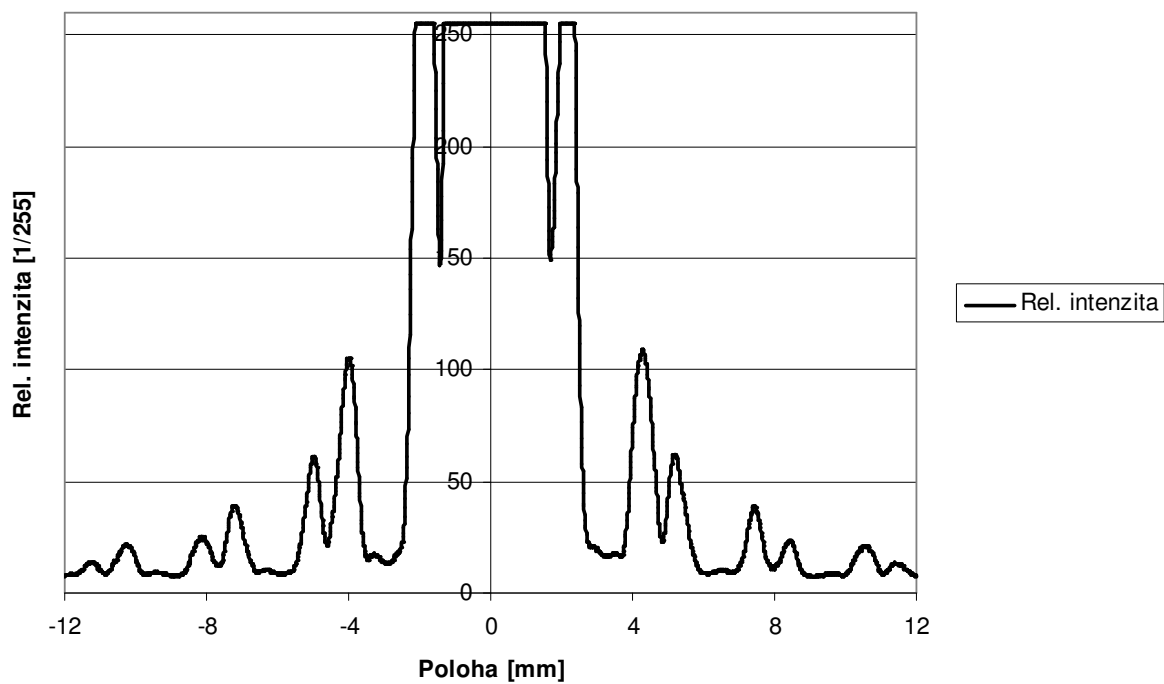
**G. 4: Ohybový obrazec štěrbin C**



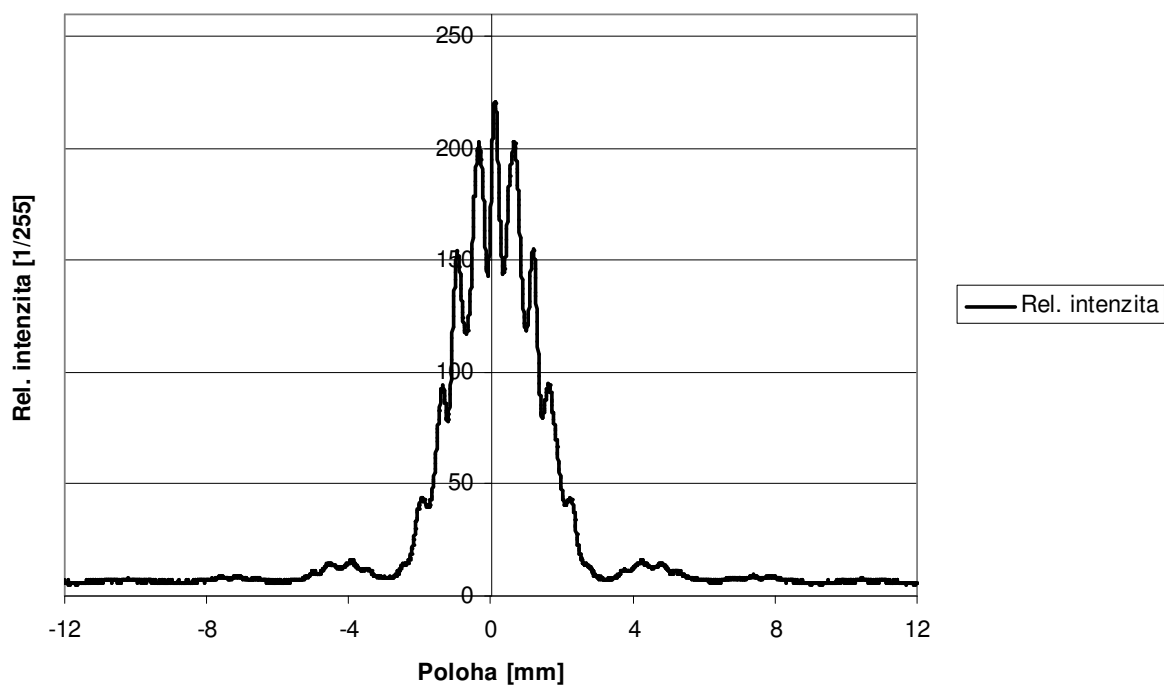
**G. 5: Ohybový obrazec dvojštěrbiny B**



G. 6: Ohybový obrazec dvojštěrbiny B (vyšší intenzita)

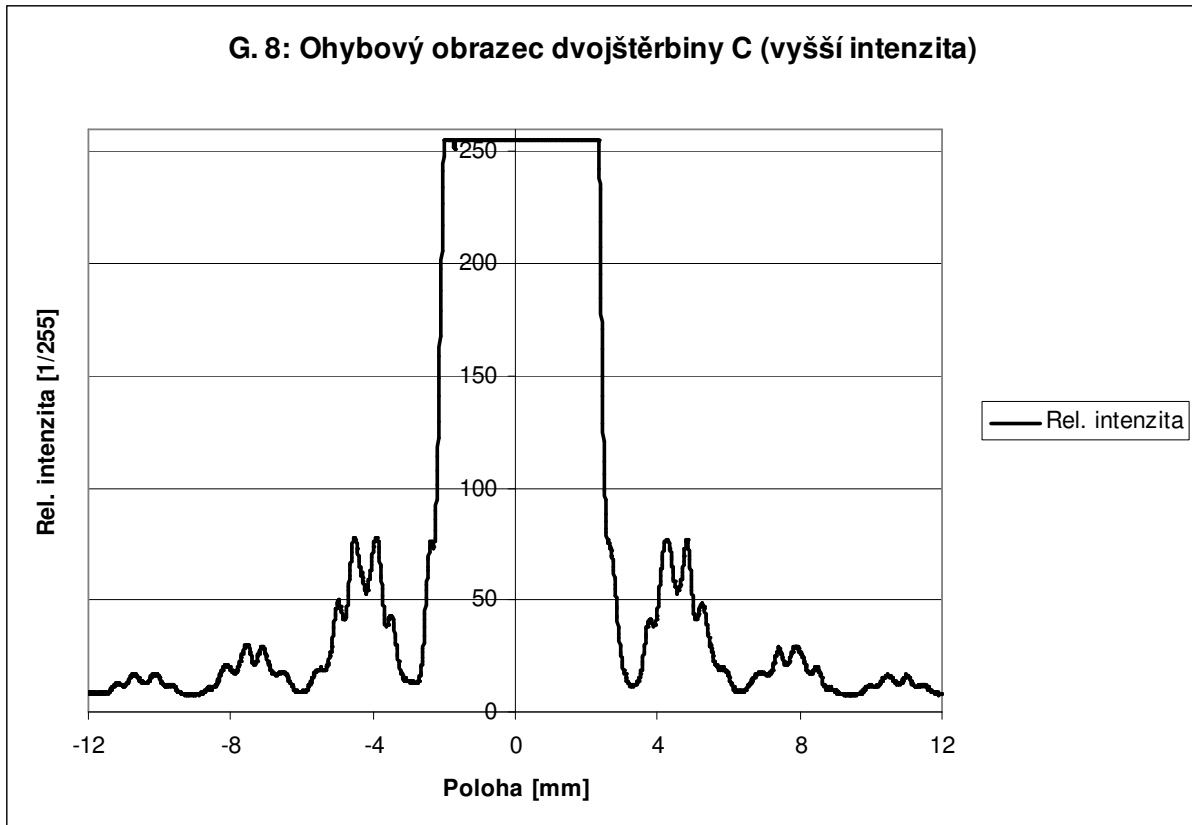


G. 7: Ohybový obrazec dvojštěrbiny C





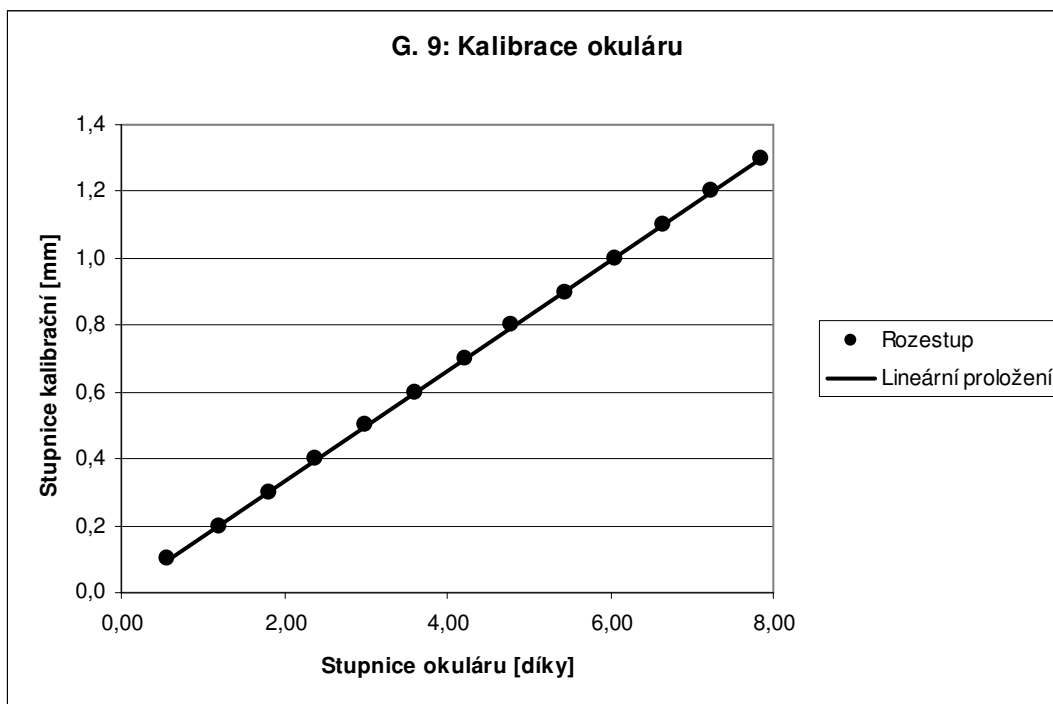
G. 8: Ohybový obrazec dvojštěrbiny C (vyšší intenzita)



Úkol 2 – Kalibrace mikroskopového okuláru a měření mikroskopem

Kalibrace okuláru byla provedena postupem uvedeným v Teoretickém úvodu pomocí kalibrační stupnice s velikostí nejmenšího dílku 0,1 mm. Naměřené hodnoty ukazuje Tab. 1 a graficky je zachycuje G. 9.  $s_o$  zastupuje stupnici okuláru,  $s_k$  stupnici kalibrační.

<b>Tab. 1 – Naměřené hodnoty (kalibrace okuláru)</b>	
$s_o$ [dílky]	$s_k$ [mm]
7,86	1,3
7,25	1,2
6,65	1,1
6,07	1,0
5,45	0,9
4,79	0,8
4,21	0,7
3,61	0,6
2,99	0,5
2,39	0,4
1,81	0,3
1,20	0,2
0,56	0,1



Z naměřených hodnot byl metodou lineární regrese určen převodní koeficient mezi stupnicí okuláru a reálnými rozměry. Chybu jsem odhadl na pětinu nejmenšího dílku kalibrační stupnice s přihlédnutím k nezanedbatelným rozměrům samotných značek dílků.

$$\circ c = (0,165 \pm 0,008) \text{mm} \cdot \text{dílek}^{-1}$$

Měření mřížkové konstanty bylo provedeno po kalibraci mikroskopového okuláru. Naměřené hodnoty ukazuje Tab. 2.

<b>Tab. 2 – Naměřené hodnoty (mřížková konstanta)</b>	
$a$ [dílky]	
	0,32
	0,34
	0,32
	0,33
	0,35
	0,36
	0,32
	0,33
	0,33
	0,35

Z těchto naměřených hodnot a převodního koeficientu byla určena mřížková konstanta použité mřížky jako:

$$\circ a = (55 \pm 4) \mu\text{m}$$

Z vypočtené konstanty a grafu G. 1 poté byla určena vlnová délka použitého laseru jako:

$$\circ \lambda = (670 \pm 50) \text{nm}$$

Porovnání výsledné hodnoty s udanou v Diskuzi.

Změřené rozměry použitých štěrbin a dvojštěrbín ukazují Tab. 3 – Tab. 7. Hodnoty  $L$  reprezentují polohu levého okraje štěrbin, hodnoty  $P$  pak polohu pravého okraje štěrbin. V případě dvojštěrbín platí předešlé analogicky, pro levou štěrbinu s indexem 1, pro pravou s indexem 2. Pod tabulkou jsou vždy uvedeny zjištěné hodnoty parametrů.  $b_i$  značí šířku štěrbin  $i$ ,  $a_i$  značí vzdálenost mezi středy štěrbin u dvojštěrbiny  $i$ .

$L$ [dílky]	$P$ [dílky]
2,45	3,21
2,98	3,75
2,22	3,01
2,10	2,87
2,97	3,74

○  $b_A = (127 \pm 7) \mu m$

$L$ [dílky]	$P$ [dílky]
1,60	2,92
1,62	2,90
1,34	2,63
1,72	3,00
1,65	2,95

○  $b_B = (213 \pm 11) \mu m$

$L$ [dílky]	$P$ [dílky]
2,24	5,06
5,03	7,85
3,11	5,96
2,43	5,28
1,92	4,74

○  $b_C = (467 \pm 23) \mu m$

$L_1$ [dílky]	$P_1$ [dílky]	$L_2$ [dílky]	$P_2$ [dílky]
0,79	2,09	4,48	5,71
0,66	2,00	4,33	5,61
0,74	2,02	4,37	5,63
0,39	1,70	4,09	5,34
0,69	1,99	4,34	5,58

○  $b_{B1} = (215 \pm 12) \mu m$

○  $b_{B2} = (206 \pm 11) \mu m$

○  $a_B = (600 \pm 33) \mu m$

**Tab. 7 – Naměřené hodnoty (dvojštěrbina C)**

$L_1$ [dílky]	$P_1$ [dílky]	$L_2$ [dílky]	$P_2$ [dílky]
-0,29	0,94	7,01	8,34
-0,23	1,01	7,13	8,37
-0,49	0,82	6,87	8,20
-0,26	0,98	7,08	8,31
-0,23	1,00	7,14	8,41

- $b_{C1} = (206 \pm 12) \mu m$
- $b_{C2} = (211 \pm 13) \mu m$
- $a_C = (1214 \pm 72) \mu m$

### Úkol 3 – určování geometrických parametrů

Z grafů G. 2 – G. 8 a potřebných vztahů z Teoretického úvodu byly určeny hodnoty geometrických parametrů štěrbin. Udaná hodnota vlnové délky použitého laseru je:

- $\lambda = 632,8 \text{ nm}$
- $b_A = (123,5 \pm 0,9) \mu m$
- $b_B = (210,6 \pm 1,7) \mu m$
- $b_C = (469 \pm 8) \mu m$
- $b_{B1,2} = (201,9 \pm 1,5) \mu m$
- $a_B = (609 \pm 9) \mu m$
- $b_{C1,2} = (204,7 \pm 1,3) \mu m$
- $a_C = (1220 \pm 100) \mu m$

### Diskuze výsledků

#### Určení vlnové délky laseru

V rámci chyby se podařilo naměřit hodnotu shodnou s hodnotou udávanou. Největším původcem chyby tohoto měření byla kalibrace okuláru mikroskopu, který se díky nezanedbatelným rozměrům dílků kalibrační stupnice podařilo nakalibrovat se zhruba pětiprocentní chybou. Jistou roli hrála také nehomogenita hustoty vrypů mřížky.

#### Porovnání změřených a určených hodnot geometrických parametrů

V případě štěrbin se nám povedlo dosáhnout výborné shody naměřených rozměrů s rozměry určenými pomocí odečtů z průběhů difrakčních obrazců. Původci chyb v tomto případě byly nedokonalé hrany štěrbin, na nichž ulpěly částice prachu a mastnota. K určení jejich rozměrů mikroskopem byl použit vypočtený převodní koeficient, takže jeho chyba se přenesla i na tato měření.

Při určování parametrů z naměřených průběhů hrála roli skutečnost, že odečítaná poloha extrému nebyla zcela ostrá. Posunutí středu obrazce vůči středu dráhy snímače jsme kompenzovali odečtem polohy extrému z obou stran od osy a počítáním s aritmetickým průměrem hodnot.

V případě dvojštěrbín jsme opět dosáhli souladu naměřených a určených hodnot v rámci chyby. Co se však týče šířek štěrbin, vyšly měřením systematicky o málo vyšší. Tento jev přisuzuji skutečnosti, že při měření mikroskopem jsem uvažoval jako šířku štěrbinou celou světlost, nehledě na znečištění.

## Závěr

Proměřili jsme ohybové obrazce mřížky, tří štěrbin a dvou dvojštěrbin. Průběhy ukazují grafy G. 1 – G. 8.

Okalibrovali jsme okulár mikroskopu. Výsledný převodní koeficient je:

$$\circ \quad c = (0,165 \pm 0,008) \text{ mm} \cdot \text{dílek}^{-1}$$

Naměřené hodnoty kalibrace ukazuje Tab. 1, kalibrační křivku zachycuje graf G. 9.

Proměřili jsme mřížkovou konstantu použité mřížky s výsledkem:

$$\circ \quad a = (55 \pm 4) \mu\text{m}$$

Pomocí naměřené mřížkové konstanty a G. 1 jsme určili vlnovou délku laseru s výsledkem:

$$\circ \quad \lambda = (670 \pm 50) \text{ nm}$$

Porovnali jsme výsledek s udanou hodnotou. Více v Diskuzi.

Proměřili jsme geometrické parametry použitých prvků s výsledky:

- $\circ \quad b_A = (127 \pm 7) \mu\text{m}$
- $\circ \quad b_B = (213 \pm 11) \mu\text{m}$
- $\circ \quad b_C = (467 \pm 23) \mu\text{m}$
- $\circ \quad b_{B1} = (215 \pm 12) \mu\text{m}$
- $\circ \quad b_{B2} = (206 \pm 11) \mu\text{m}$
- $\circ \quad a_B = (600 \pm 33) \mu\text{m}$
- $\circ \quad b_{C1} = (206 \pm 12) \mu\text{m}$
- $\circ \quad b_{C2} = (211 \pm 13) \mu\text{m}$
- $\circ \quad a_C = (1214 \pm 72) \mu\text{m}$

Určili jsme geometrické parametry použitých prvků z naměřených průběhů s výsledky:

- $\circ \quad b_A = (123,5 \pm 0,9) \mu\text{m}$
- $\circ \quad b_B = (210,6 \pm 1,7) \mu\text{m}$
- $\circ \quad b_C = (469 \pm 8) \mu\text{m}$
- $\circ \quad b_{B1,2} = (201,9 \pm 1,5) \mu\text{m}$
- $\circ \quad a_B = (609 \pm 9) \mu\text{m}$
- $\circ \quad b_{C1,2} = (204,7 \pm 1,3) \mu\text{m}$
- $\circ \quad a_C = (1220 \pm 100) \mu\text{m}$

Určené hodnoty byly porovnány s naměřenými v Diskuzi.

## Použitá literatura

- [1] J.Englich, Zpracování výsledků fyzikálních měření, Praha, 2000
- [2] Studijní materiály Praktika III., úloha 6,  
[http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/u\\_306.htm](http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/u_306.htm)