

Oddělení fyzikálních praktik při Kabinetu výuky obecné fyziky MFF UK

Praktikum 2

Úloha č. 21

Název: Koherentní optický procesor

Pracoval: Jiří Kratochvíl stud.sk.: 11 dne: .2010

Odevzdal dne: 19. 4. 2011

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

Posuzoval: Čížek

dne: 10. 5. 2011

Pracovní úkol:

1. Na optickém stole je sestaven Koherentní optický procesor. Na obr. v „Pokynech měření“ (nebo skripta str. 188) je vyznačeno schematické uspořádání a vyznačeny ohniskové délky čoček, které jsou v úloze k dispozici. Ověřte, zda čočky \check{C}_1 a \check{C}_2 zachovávají rovnoběžnost paprsků. Spočítejte a ověřte rozšíření paprsku použitým teleskopem. Změřte zvětšení obrazu předmětu v rovině P_3 a zvětšení obrazu Fourierova spektra v rovině P_4 .
2. Pozorujte Fourierovský obraz následujících tří předmětů umístěných v rovině P_1 :
 - čtvercového otvoru
 - soustavy rovnoběžných pruhů
 - síťkyProměřte Fourierova spektra těchto předmětů v rovině P_2 nebo P_4 a z naměřených údajů vypočítejte rozměry předmětů, tj. velikost stran čtvercového otvoru, šířku a periodu soustavy rovnoběžných pruhů a periodu a šířku pruhů síťky.
3. Parametry předmětů z úkolu 2 změřte mikroskopem, který je v úloze č. 6, č. 30 nebo č. 14. Porovnejte hodnoty vypočtené z Fourierova spektra s přímým měřením mikroskopem.
4. Po dohodě s vyučujícím vyberte a kvalitativně ověřte některou z vlastností Fourierovy transformace, které jsou uvedeny v odd. 4.10.2 části I skript nebo na www. V rovině P_1 umístěte vybraný předmět. Do roviny P_2 vkládejte různé filtry a zkoumejte jejich vliv na geometrický obraz v rovině P_3 . Pozorované jevy vysvětlete.

1 Teoretická část

1.1 Statistické zpracování

Chyby nepřímého měření sčítány metodou přenosu chyb dle vzorce

$$\sigma = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 (\sigma_i)^2} \quad (s1)$$

σ - výsledná chyba měření, f - fyzikální vztah, x_i - jednotlivé veličiny ze vztahu f ,
 σ_i - chyby jednotlivých veličin ze vztahu f

Chyba statistická a chyba měřidla sečtena vzorcem

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_m^2 + \sigma_s^2)} \quad (s2)$$

σ - výsledná chyba měření, σ_m - chyba měřidla, σ_s - statistická chyba

Chyba aritmetického průměru počítána dle vztahu

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - x)^2}{n}} \quad (s3)$$

σ - výsledná chyba měření, x_i - hodnota jednotlivých měření, x - průměrná hodnota,
 n - počet měření

Regrese v počítána v programu gnuplot, asymptotická chyba sečtena ve čtverci s chybou měření.

Statistické zpracování čerpáno z [1]. Zbytek teorie z [2]

1.2 Zvětšení galileova teleskopu

Pokud máme soustavu čoček, jejichž ohniska se překrývají, pak máme pro zvětšení Z vztah

$$Z = \frac{-f_2}{f_1} \quad (1)$$

kde f_1 je ohnisko čočky, kterou paprsek projde jako první f_2 ohnisko druhé čočky.

1.3 Teorie fourierovy transformace

Dvourozměrnou fourierovu transformaci komplexní funkce g nazveme funkcí

$$\mathcal{F}\{g\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp(-i2\pi(xf_x + yf_y)) dx dy.$$

Vlastnosti fourierovy transformace:

1. Podobnostní teorém

$$\mathcal{F}\{g(\alpha x, \beta y)\} = \frac{1}{|\alpha\beta|} G\left(\frac{f_x}{\alpha}, \frac{f_y}{\beta}\right)$$

2. Posunovací teorém

$$\mathcal{F}\{g(x - \alpha, y - \beta)\} = G(f_x, f_y) \exp[-i2\pi(f_x\alpha + f_y\beta)]$$

3. Dvojitá fourierova transformace

$$\mathcal{F}\mathcal{F}\{g(x, y)\} = g(-x, -y).$$

4. Transformace konvoluce

$$\mathcal{F}\{g(x, y) * h(x, y)\} = G(f_x, f_y)H(f_x, f_y)$$

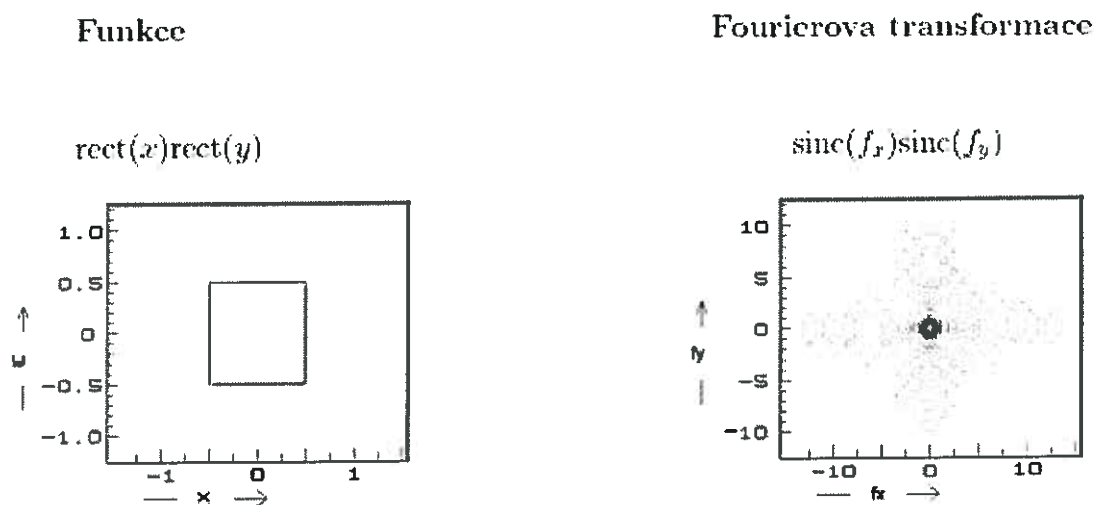
1.4 Furierovy transformace optických prvků

Princip fourierovy transformace je, že obraz rozložíme do monochromatických vln, které se zobrazí pomocí čočky do bodů ve vzdálenosti $x = \lambda f v$ od optické osy ve fourierově rovině, kde f je ohnisková vzdálenost čočky \check{C} a v je prostorová frekvence.

Funkce sinc je rovna: $\text{sinc}(v) = \frac{\sin(\pi v)}{\pi v}$

Obdelník:

Obrázek č.1: Transformace obdelníku



f_x a f_y jsou prostorové frekvence = v . Dosazením $x = \lambda f v$ do funkce $\text{sinc}(f_x)\text{sinc}(f_y)$ dostaneme

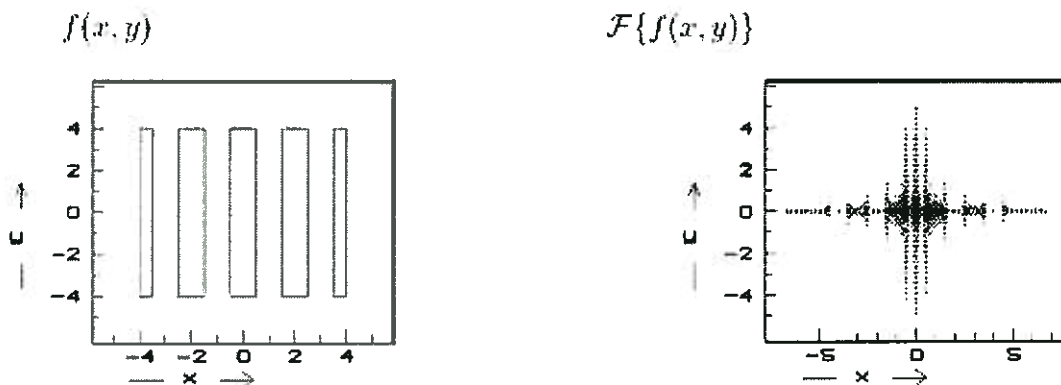
podmínky pro minima obdelníkového otvoru

$$x = \frac{\lambda f}{a} k \quad y = \frac{\lambda f}{b} k \quad (2)$$

kde k je celé číslo. a je x-ová strana (delší strana) čtverce, b je y-ová (kratší strana).

Proužky:

Obrázek č.2: Transformace proužků



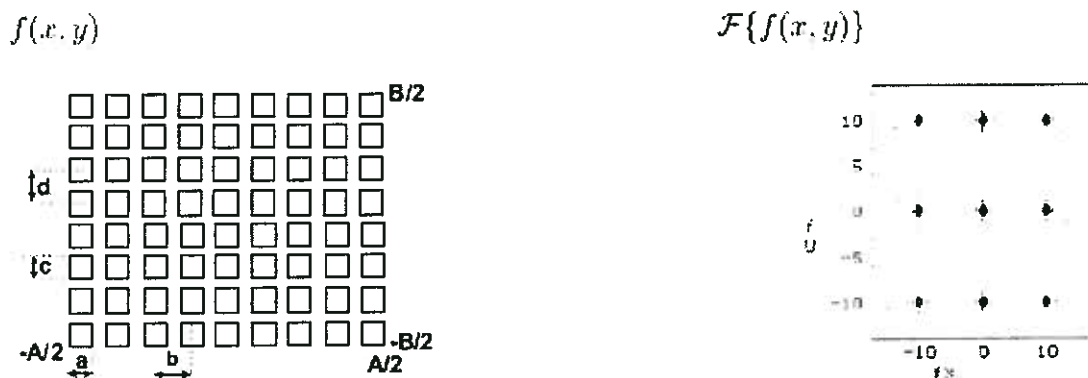
Pro vedlejší minima x_a a hlavní minima x_b rovnoběžných proužků platí

$$x_a = \frac{\lambda f}{a} k \quad x_b = \frac{\lambda f}{b} k \quad (3)$$

a je vzdálenost proužků, b je velikost proužků. Maxima jsou posunuta o polovinu vzdálenosti minim.

Mřížka:

Obrázek č.3: Transformace mřížky



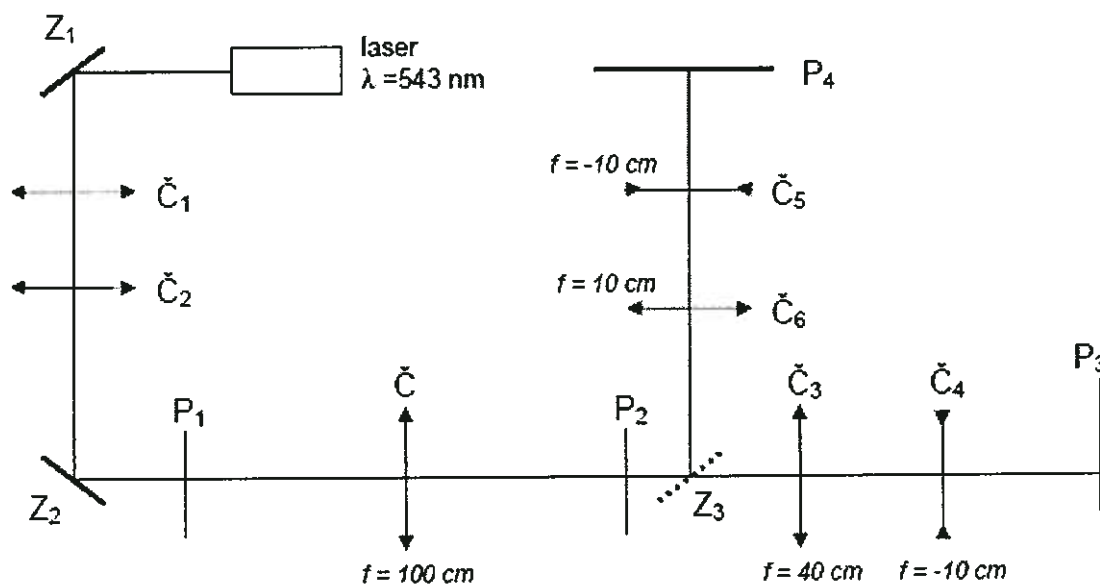
Mřížku dostaneme vynásobením fourierových transformací pro kolmé a vodorovné proužky, pokud tedy vybereme vodorovnou přímku procházející středem fourierova obrazu a body na ní dostaneme stejnou podmínku pro velikosti a , b jako pro proužky. **Obrázek č.3** je jen ilustrační, hodnotu a zdefinujeme jako vzdálenost čtverců mříže, hodnotu b definujeme jako sílu mříže.

Pozor, používáme u rozměrů předmětů pouze písmena a , b . Je to proto, že vztahy pro maxima a minima jsou pro obdelník, proužky i mřížku stejné. Písmenem a označujeme delší rozměr. daného předmětu. Jednotlivé předměty jsou vždy v textu odděleny.

1.5 Experimentální uspořádání

Zdrojem koherentního záření je He-Ne laser o vlnové délce 543nm. Čočky \check{C}_1 a \check{C}_2 rozšiřují laserový svazek a minimalizují jeho divergenci. P_1 je předmětová rovina, P_2 je obrazová rovina.. Čočka \check{C} provádí fourierovu transformaci mezi obrazovou a předmětovou rovinou. Když nepoužijeme zrcátko Z_3 , pak čočka \check{C}_3 provádí další fourierovu transformaci mezi obrazovou rovinou a rovinou P_3 . Čočka \check{C}_4 se stará o zvětšení obrazu druhé fourierovy transformace.. Obrazovou rovinu při použití zrcátka Z_3 zobrazíme pomocí teleskopu (čočky \check{C}_6 a \check{C}_5) do roviny P_4 .

Obrázek č.4: Experimentální uspořádání



2 Výsledky měření

2.1 Vlastnosti experimentálního uspořádání

Na optickém stole byl optický procesor rozštelován, museli jsme jej tedy kompletně znovu sestavit. Při tom jsme nastavili čočky Č1 a Č2 tak aby zachovávali rovnoběžnost paprsků.

Čočky Č1 s označením KBC 046 a Č2 s označením KPX100 vyrobila firma Newport.

Ohniskové délky čoček jsou dle [3]

Č1: $f_1 = (-25 \pm 1) \text{ mm}$ rozptylka

Č2: $f_2 = (150 \pm 1) \text{ mm}$ spojka

Rozšíření paprsku jsme spočítáme dle vztahu (1) s výsledkem $Z = (6,0 \pm 0,3) \text{ krát}$.

Experimentálně jsme změřili, že svazek, který vystupoval z laseru měl šířku $(2,5 \pm 1) \text{ mm}$ a po výstupu ze soustavy čoček Č1 a Č2 měl šířku $(10 \pm 2) \text{ mm}$, měřili jsme 3x se stejným výsledkem. Chyba měření je takto velká, jelikož se jedná o gausovský svazek a oko není schopno rozlišit kde je pološířka svazku. Rozšíření paprsku bylo $(4 \pm 1,8) \text{ krát}$.

Zvětšení P2 - P4 nejlépe získám z fourierova spektra obdelníkového otvoru. Naměřené hodnoty minim pro rovinu P2 jsou zapsány v *tabulce č.5*. Pro rovinu P4 v *tabulce č.0*. Chyba měření délky v rovině P4 je $\pm 3 \text{ mm}$ jelikož jsme použili k měření pravítko a rovina P4 byla tvořena deskou, která se prohýbala.

Tabulka č.0: Čtverec-P4

k	x[cm]	y[cm]
1	4,1	6,5
2	5,2	7,6
3	6,1	8,7
4	7,1	10,1
5	8,1	11,5

Lineární regrese nám dává vzdálenost mezi minimy $dx = (9,9 \pm 0,2) \text{ mm}$ $dy = (12,5 \pm 0,5) \text{ mm}$

Lineární regrese v rovině P2 viz *tabulka č.5* nám dává $dx = (1,15 \pm 0,02) \text{ mm}$ $dy = (1,30 \pm 0,02) \text{ mm}$

Zvětšení dostanu jako podíl *vzdáleností v rovině P4 : vzdáleností v rovině P2* = Z_{P2P4} . Váženým aritmetickým průměrem ze vzdáleností v rovině x a y dostaneme zvětšení

$$Z_{P2P4} = (8,9 \pm 0,3) \text{ krát}$$

Následující měření byly provedeny 3x se stejným výsledkem. Zvětšení mezi rovinami P2-P3 dostaneme z měření velkého čtverce o stranách $a = (3,00 \pm 0,25) \text{ mm}$, $b = (2,50 \pm 0,25) \text{ mm}$. Na stínítku P3 je provedena dvojnásobná fourierova transformace, tzn. Tvar předmětu bude stejný, změní se pouze rozměry a to na $a = (10,0 \pm 0,5) \text{ mm}$, $b = (8,0 \pm 0,5) \text{ mm}$. Z toho vyplývá, že zvětšení je

$$\underline{Z_{P2P3} = (3,3 \pm 0,3) \text{ krát}}$$

2.2 Parametry předmětů měřené mikroskopem

Obdelník:

Měřili jsme na mikroskopu u úlohy č.6, jelikož jsme tuto úlohu měřili dříve, použijeme kalibraci mikroskopu z této úlohy, kterou jsme prováděli metodou postupných měření. Kalibrace je, že 1 mm je roven $(6,11 \pm 0,02) \text{ dílkům}$ na mikroskopu. Měření je provedeno ve [4].

Měření čtvercového otvoru mikroskopem je zaznamenáno v *tabulce č.1*. Vzhledem k vroubkovanému okraji čtverce uvádím chybu měření $\pm 0,05 \text{ dílku}$ což odpovídá chybě $\pm 0,009 \text{ mm}$.

Tabulka č.1: Čtverec-mikroskop

b[dílků]	b[mm]	a[dílků]	a[mm]
2,6	0,38	2,3	0,43
2,66	0,39	2,36	0,44
2,64	0,39	2,37	0,43

Aritmetickým průměrem dostaneme velikost stran

$$\underline{a = (0,43 \pm 0,01) \text{ mm}}$$

$$\underline{b = (0,38 \pm 0,01) \text{ mm}}$$

Proužky:

Měření vzdálenosti středů rovnoběžných pruhů jsme měřili metodou postupných měření. Tloušťku proužků jsme měřili přímým měřením.

Tabulka č.2: Postupné měření vzdálenosti proužků a

n[počet]	d[dílků]	n[počet]	d[dílků]
0	0	7	4,28
1	0,6	8	4,9
2	1,15	9	5,5
3	1,77	10	6,1
4	2,4	11	6,73
5	3	12	7,36
6	3,6	13	7,92

Z lineární regrese nám vyšlo že proužky jsou vzdáleny o $a = (0,615 \pm 0,003) \text{ dílku}$. Šířku proužků jsme měřili jen 3x kvůli malému rozlišení mikroskopu se stejným výsledkem. Vzhledem k vroubkovanému povrchu je chyba $\pm 0,05 \text{ dílku}$. Tloušťka proužků je $b = (0,11 \pm 0,05) \text{ dílku}$.

Hodnoty přepočtené v milimetrech jsou

$$\underline{a = (0,101 \pm 0,001) \text{ mm}}$$

$$\underline{b = (0,02 \pm 0,01) \text{ mm}}$$

Mřížka:

Vzdálenost proužků mříže jsme měřili metodou postupných měření. Tloušťku proužků v mříži jsme měřili přímo.

Tabulka č.3: Postupné měření vzdálenosti čtverců mříže a

n[počet]	d[dílků]
0	0
1	0,67
2	1,32
3	1,98
4	2,72
5	3,4
6	4,1
7	4,75
8	5,47
9	6,12
10	6,87

Z lineární regrese vyjde $a = (0,687 \pm 0,003)$ dílků

Tloušťku čar mříže jsme měřili pětkrát viz *tabulka č.4*.

Tabulka č.4: parametr b

b[mm]	0,26	0,24	0,29	0,28	0,26
-------	------	------	------	------	------

Aritmetický průměr nám dává hodnotu $b = (0,27 \pm 0,02)$ dílků.

Hodnoty přepočtené v milimetrech jsou

$$\underline{a = (0,112 \pm 0,001)mm}$$

$$\underline{b = (0,044 \pm 0,04)mm}$$

2.3 Parametry předmětů vypočítané z fourierova spektra

Fourierovy spektra jsme měřili jak v rovině P_2 tak v P_4 . Přesnější měření je v rovině P_2 (jelikož se dostaneme v rovině P_2 do vyšších difrakčních řádů spektra, v rovině P_4 sice můžeme změřit přesněji difrakční spektrum nižších řádů, ale tyto řády jsou rozmazané), proto použijeme měření v rovině P_4 jen jako kontrolu a spočítáme z něj zvětšení mezi rovinami P_2 a P_4 .

Obdelník:

Měřili jsme vzdálenost minim intesity světla fourierova spektra metodou postupných měření pomocí mikrometrického šroubu v rovině P_2 . Měřili jsme pouze polovinu svislé a polovinu vodorovné větve prostředního kříže a to kvůli nedostatečné délce šroubu. Chyba měření pomocí šroubu je $\pm 0,25mm$, kvůli přesnosti měření minimálních intesit. Výsledky měření Fourierova spektra jsou zapsány v *tabulce č.5*.

Tabulka č.5: Fourier obdelníka

k	x[mm]	y[mm]	k	x[mm]	y[mm]
1	20,95	20,95	9	10,35	10,35
2	19,7	19,7	10	9,2	9,2
3	18,4	18,4	11	8,1	8,1
4	17	17	12	6,95	6,95
5	15,6	15,6	13	5,6	5,6
6	14,2	14,2	14	4,2	4,2
7	12,85	12,85	15	2,25	2,25
8	11,7	11,7	16	1,25	1,25

Lineární regresí dle vztahu (2) získáme velikosti stran čtverce. Dosadíme $f = (100 \pm 1) \text{ cm}$, $\lambda = (543 \pm 1) \text{ nm}$

$$\underline{a = (0,47 \pm 0,01) \text{ mm}}$$

$$\underline{b = (0,42 \pm 0,01) \text{ mm}}$$

Čáry:

Vzhledem k délce mikrometrického šroubu jsme museli fourierův obraz čar viz *obrázek č.2* měřit nadvakrát, uděláme také 2x regresi a vezmeme vážený aritmetický průměr pro další počítání. Hodnoty jsou zapsány v *tabulce č.6*.

Tabulka č.6: Fourier čar

k	x[mm]	k	x[mm]
-4	4,7	0	5,25
-3	9,5	1	11,4
-2	14,15	2	16,45
-1	19,85	3	20,75
0	25	4	25

Z lineární regrese dle vztahu (3) nám vyšel koeficient pro $a = (0,108 \pm 0,004) \text{ mm}$

Jelikož jsme neviděli minimum obávkové funkce kvůli malé intenzitě světla, můžeme předpokládat, že toto minimum by bylo o řád nižší, než minimum 4. řádu. Jako x_b ve vzorci (3) vezmeme $(25,33 \pm 0,25) \text{ mm}$, což nám dává podmínku pro velikost proužků $b < (0,0214 \pm 0,0002) \text{ mm}$. tj.

$$\underline{a = (0,108 \pm 0,004) \text{ mm}}$$

$$\underline{b < (0,0214 \pm 0,0002) \text{ mm.}}$$

Mřížka:

Mřížka byla nepřesně vyrobena, jelikož, když jsme mřížku posunuli dostali jsme nepatrně jiný obraz, to samé pokud jsme ji otočili. Deformace při posunutí i otočení byla v podobné míře, proto nerozlišujeme mezi vertikálním nebo horizontálním postavením mřížky. Naměřili jsme fourierovo spektrum, které je zapsáno s příslušnými řády do *tabulky č.7*.

Tabulka č.7: Fourier mřížky

k	x[mm]	x[mm]	x[mm]
0	25	25	23,05
1	17	17	18,8
3	7	7,25	8,8
5	1,9	1,5	0

Koeficienty lineární regrese nám vyšly $(4,7 \pm 0,1)$ $(4,6 \pm 0,7)$ $(4,5 \pm 0,7)$. Vážený aritmetický průměr z těchto třech výsledků regrese je $(4,7 \pm 0,3)$. Dosazením do (3) dostaneme vzdálenost pruhů v mřížce $a = (0,115 \pm 0,008) \text{ mm}$

Tloušťku mřížky b získáme z minim (řád 2 a 4), jako x_b dosadíme hodnotu $9,4 \text{ mm}$. Dostaneme výsledek $b = (0,57 \pm 0,20) \text{ mm}$. Chyba je takto velká, jelikož nabylo možno přesně určit minima intenzity fourierova spektra.

$$\underline{a = (0,115 \pm 0,008) \text{ mm}}$$

$$\underline{b = (0,57 \pm 0,20) \text{ mm}}$$

2.4 Ověření vlastností fourierovy transformace

Následující vlastnosti fourierovy transformace jsou matematicky popsány v odstavci 1.3.

Tygr v kleci:

Vysvobodili jsme tygra z klece. Klec je soustava svislých proužků, její fourierova transformace jsou tečky (funkce sinc) ležící na vodorovné přímce. Fourier tygra je jakési mračno. Pokud zakryjeme ve fourierově obrazu vodorovné tečky proužkem papíru odfiltrujeme tím prostorové frekvence mříže. Pokud provedeme zpětnou fourierovu transformaci, neuvidíme mříž, tygr je vysvobozen.

Filtrace trojúhelníku:

Fourierova transformace trojúhelníku je šesticípá hvězda. Pokud zakryjeme střed hvězdy nezobrazí se střed trojúhelníku ale pouze jeho strany. To je dáno tím, že nízké prostorové frekvence aproximují dobře velké plochy.

Pokud zakryjeme proužkem papíru dva cípy hvězdy, tak aby papírek procházel středem hvězdy, zmizí navíc při zpětné transformaci jedna strana trojúhelníka. Pokud zakryjeme všechny cípy hvězdy trojúhelníku a necháme střed, zaoblí se hrany. To je dáno tím, že vysoké prostorové frekvence aproximují ostré hrany.

Transformace konvoluce

Do roviny P1 dáme současně trojúhelník a svislé pruhy tím jsme objekty vynásobili. Ve fourierově rovině byly vidět nakopírované hvězdy vždy tam, kde bylo maximum funkce sinc (generované pruhy), zde proběhla operace konvoluce. Poté jsme odfiltrovali vodorovným proužkem papíru funkci sinc a tím i středy hvězd. Při zpětné fourierově transformaci se nám objevily nakopírované trojúhelníčky za sebou bez středů.

Podobnostní teorém

Toto jsme ověřili na velkém a malém obdelníkovém otvoru. Když jsme vzali větší čtverec ve fourierově spektru jsme měli hustější čáry, když jsme vzali menší čtverec, čáry byly řidší.

Posunovací teorém

Posunuli jsme předmět v rovině P1 a v rovině P3 se předmět posunul na opačnou stranu.

Dvojitá fourierova transformace

Předmět se zobrazoval vertikálně i horizontálně převrácený na stínítku P3 vůči P1.

3. Diskuse

3.1 Parametry optické soustavy

Zvětšení paprsku galileovým teleskopem nám vyšlo experimentálně $Z_p = (4 \pm 1,8)$ krát a teoreticky $Z_p = (6,0 \pm 0,3)$ krát. Tyto hodnoty se v rámci chyb shodují. Při praktickém měření jsme změřili větší hodnotu paprsku vycházejícího z laseru, protože nás tento paprsek oslňoval a tím vypadal širší.

3.2 Rozměry předmětů

Obdelník:

Na mikroskopu jsme naměřili velikosti stran $a = (0,43 \pm 0,01)mm$, $b = (0,38 \pm 0,01)mm$ což nesouhlasí s hodnotami spočítanými dle fourierova spektra $a = (0,47 \pm 0,01)mm$, $b = (0,42 \pm 0,01)mm$

Proužky:

Mikroskopem jsme změřili periodu proužků $a = (0,101 \pm 0,001)mm$ a jejich šířku $b = (0,02 \pm 0,01) mm$. Z Fourierova spektra máme $a = (0,108 \pm 0,004)mm$, $b < (0,0214 \pm 0,0002)mm$. Perioda nesouhlasí, ale podmínka pro šíři proužků se zdá být správná. Skutečně poslední pozorované maximum Fourierova spektra proužků bylo následováno minimem obávkové funkce.

Mříž:

Mikroskopem jsme změřili rozměry mříže a to periodu mřížové struktury $a = (0,112 \pm 0,001)mm$ a šíři této struktury $b = (0,044 \pm 0,04)mm$. Tyto hodnoty odpovídají hodnotám z Fourierova spektra a to $a = (0,115 \pm 0,008)mm$, $b = (0,57 \pm 0,20)mm$

Mikroskopem měřené veličiny jsou zhruba o 10% menší až na poslední měření, toto naznačuje, že jsme někde udělali systematickou chybu. Nejvíce pravděpodobné je, že jsme měli nepřesně seštelovanou optickou aparaturu. Bohužel na kalibraci optického procesoru pro přesné měření nebyl čas.

4. Závěr

Ověřili jsme, že čočky Č1 a Č2 zachovávají rovnoběžnost paprsků tím, že jsme sestavili optický procesor.

Spočítali jsme rozšíření paprsků po průchodu čočkami Č1 a Č2 s výsledkem $Z_P = (6,0 \pm 0,3)krát$, což jsme věřili experimentálně s výsledkem $Z_P = (4 \pm 1,8)krát$. Změřili jsme zvětšení obrazu předmětu v rovině P₃ $Z_{P_2P_3} = (3,3 \pm 0,3)krát$ a zvětšení obrazu Fourierova spektra v rovině P₄ $Z_{P_2P_4} = (8,9 \pm 0,3)krát$

Pozorovali jsme Fourierovský obraz čtvercového otvoru, soustavy rovnoběžných pruhů a sítě. Proměřili jsme Fourierova spektra těchto předmětů v rovině P₂ a z naměřených údajů jsme vypočítali rozměry předmětů. Spočítali jsme velikost stran čtvercového otvoru $a = (0,47 \pm 0,01)mm$ $b = (0,42 \pm 0,01)mm$, odhadli jsme šířku $b < (0,0214 \pm 0,0002)mm$ a spočítali periodu $a = (0,108 \pm 0,004)mm$ soustavy rovnoběžných pruhů a spočítali jsme periodu $a = (0,115 \pm 0,008)mm$ a šířku $b = (0,57 \pm 0,20)mm$ pruhů sítě.

Parametry předmětů jsme změřili mikroskopem. Změřili jsme velikost stran čtvercového otvoru $a = (0,38 \pm 0,01)mm$ $b = (0,43 \pm 0,01)mm$, šířku $b = (0,02 \pm 0,01)mm$ a periodu $a = (0,101 \pm 0,001)mm$ soustavy rovnoběžných pruhů a změřili jsme periodu $a = (0,112 \pm 0,001)mm$ a šířku pruhů $b = (0,044 \pm 0,04)mm$ sítě.

Porovnali jsme hodnoty vypočtené z Fourierova spektra s přímým měřením mikroskopem v diskuzi odstavce 3.2.

Ověřili jsme vlastnosti Fourierovy transformace, které jsou napsány v odstavci 1.3.

5. Seznam použité literatury

- [1] Brož, J. a kol., *Základy fyzikálních měření I*, SPN, Praha 1983
- [2] R. Bakule, J. Šternberk, *Fyzikální praktikum III*, mff uk
- [3] www.newport.com
- [4] Jiří Kratochvíl, *Fyzikální praktikum III úloha č.6*, Praha 2011

Przewidywanie

P_4

• 4,2 • 4,5 •

P_3



4,70

9,50

14,75

19,85

25,0

SM

5,25

11,30

16,45

20,75

25,0

~~29,75~~

czy oddzieleny, jeżeli będzie
wzrost 4,70 w oddzieleny
poziomy

$$20,78 = \frac{1,8}{a}$$

$$5,03 \pm 0,15 = \frac{1,8}{a}$$

$$\frac{10 \pm 2}{2,5 \pm 1}$$

$$\frac{a}{b} = \frac{1}{a} \frac{10}{2,5} + \frac{1}{b} \frac{1}{2,5}$$

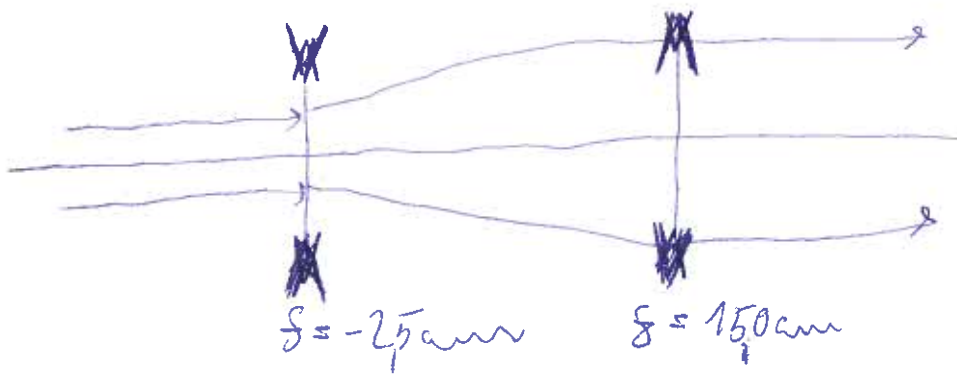
$$(0,8)^2 + (1,6)^2$$

$$\sqrt{0,64 + 2,56} = \sqrt{3,2} = 1,71$$

SVA BSK

2,8 ± 2mm → 1cm ± 2mm

—
Numer



$$\left(\frac{150}{25}, 1 \right)$$

Answer (b)

0	0
1	60
2	1,15
3	1,77
4	2,40
5	3,00
6	3,60
7	4,28
8	4,90
9	5,50
10	6,10
11	6,73
12	7,38
13	7,92

Size of hole
 $a = 0,03 \text{ mm}$
 $b = 0,1 \text{ mm}$

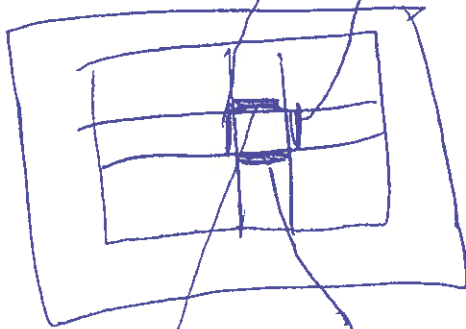
$a = 0,615 \pm 0,002$

(a) $\pm 0,02$

4,85	4,96
4,51	4,62
5,13	5,24

$\pm 0,02$
 ?

Dimension



2,75	2,80	2,85
5,35	5,46	5,49
2,85	3,10	3,18
5,68	5,93	6,00

3,07	6,26
3,07	6,26
3,07	6,29

$\pm 0,05$

5,70	8,00
5,72	8,08
5,72	8,09

Remar

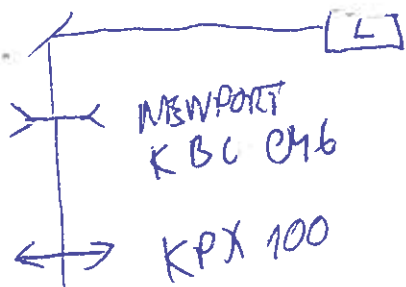
UNITA 2



0	0
1	0,67
2	1,32
3	1,98
4	2,72
5	3,40
6	4,10
7	4,75
8	5,47
9	6,12
10	6,87

0,46	0,72
0,73	0,57
0,53	0,62
0,06	0,33
0,78	1,03

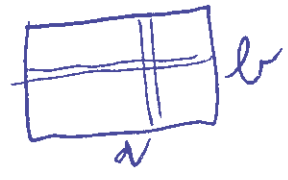
PANORAMA
 DIVERSA F. Δ Δ



PRISOMET
~~PRISOMET~~
 [25 ; 3] mm
 P₃ : ± 0,25 mm

ST/M/KO
 [0,8 ; 1] mm
 ± 0,05 mm 3/33
 3/2

PRISOMET	MIN (C)	MAX	MIN (C)
22,67	21,45	22,67	20,95
20,75	20,10	20,75	19,70
19,45	18,85	19,45	18,40
18,00	17,40	18,00	17,00
16,80	16,15	16,80	15,60
15,60	14,70	15,60	14,20
14,30	13,75	14,30	12,85
	12,45		11,70
	11,30		10,35
	10,15		9,20
	9,07		8,20
	8,00		6,95
	7,07		5,60
	5,95		4,20
	5,05		2,80
	3,80		2,70
	2,70		1,25
	1,85		



~~PRISOMET~~

$$\frac{\sin(\theta)}{\theta}$$

$$-1,15 \pm 0,02$$

$$x_e = \frac{\lambda f}{a}$$

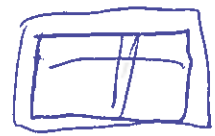
$$\frac{\lambda f}{a} = 1,15 \pm 0,02$$

$$-1,130 \pm 0,02$$

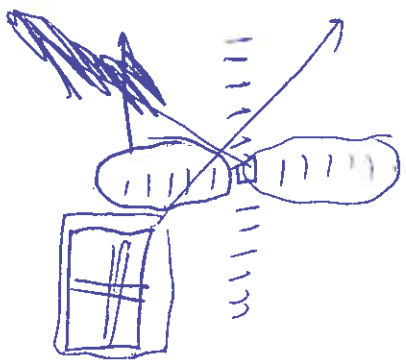
$$\frac{\lambda f}{a} = 1,30 \pm 0,02$$

OTVOR (VEDENANS)
 VEDENANS
 PRISOMET

OTVOR (VEDENANS)
 VEDENANS
 PRISOMET

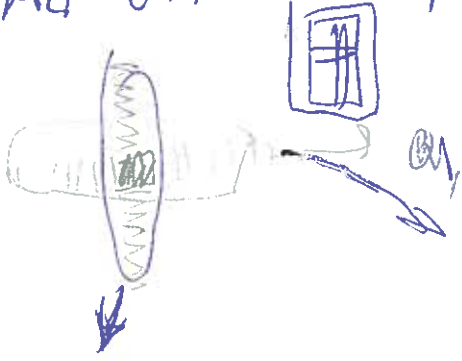


± 0,25



5000 u°
 22.4. 2011
 Nemes

MAUP OTYBŘEC P₄



- 0,0
- 1,0
- 2,2
- 4,1
- 5,2
- 6,7
- 7,1
- 8,1

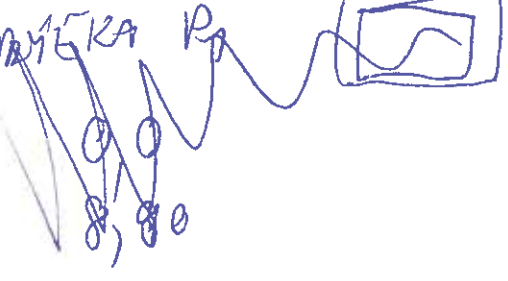
MINIMA

$$1,25 \pm 0,05$$

$$0,99 \pm 0,02$$

- 0
- 1,1
- 2,2
- 3,2
- 4,2
- X
- 6,5
- 7,6
- 8,7
- 10,7
- 11,8

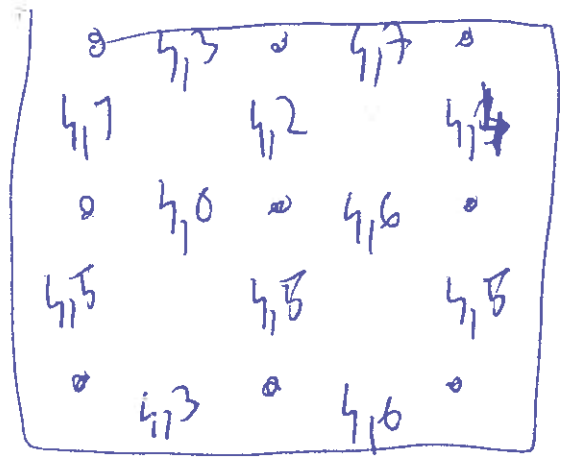
⇒



MAUP P₄

MAXIMA

$$\begin{aligned} z &= 8,61 \\ z &= 9,61 \end{aligned} \Rightarrow \underline{9,11}$$

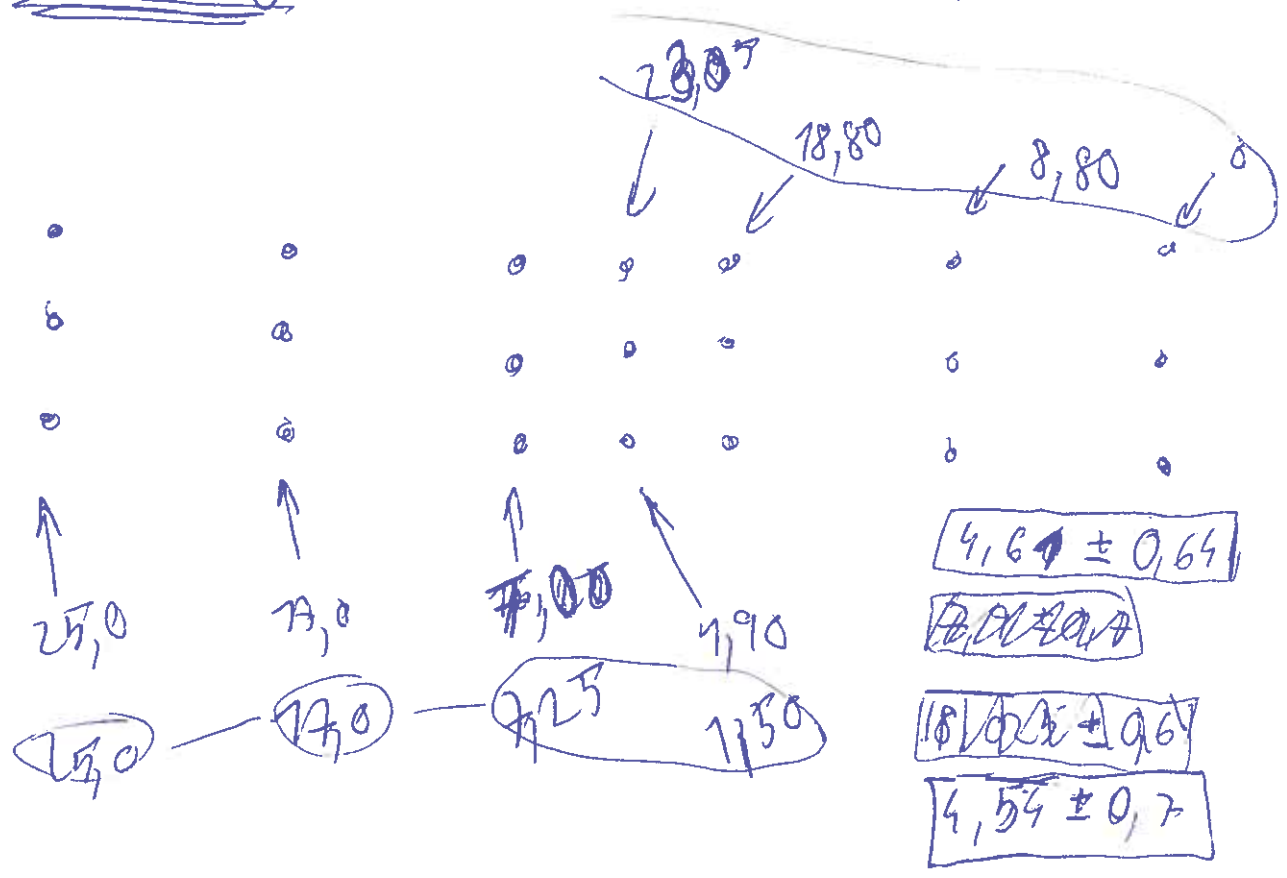


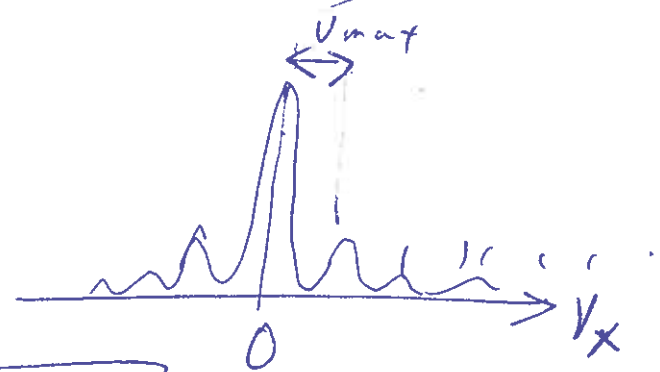
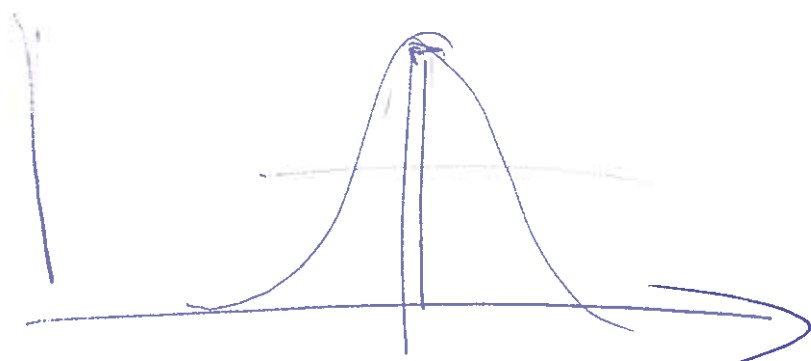
MAUP P₃

MAXIMA

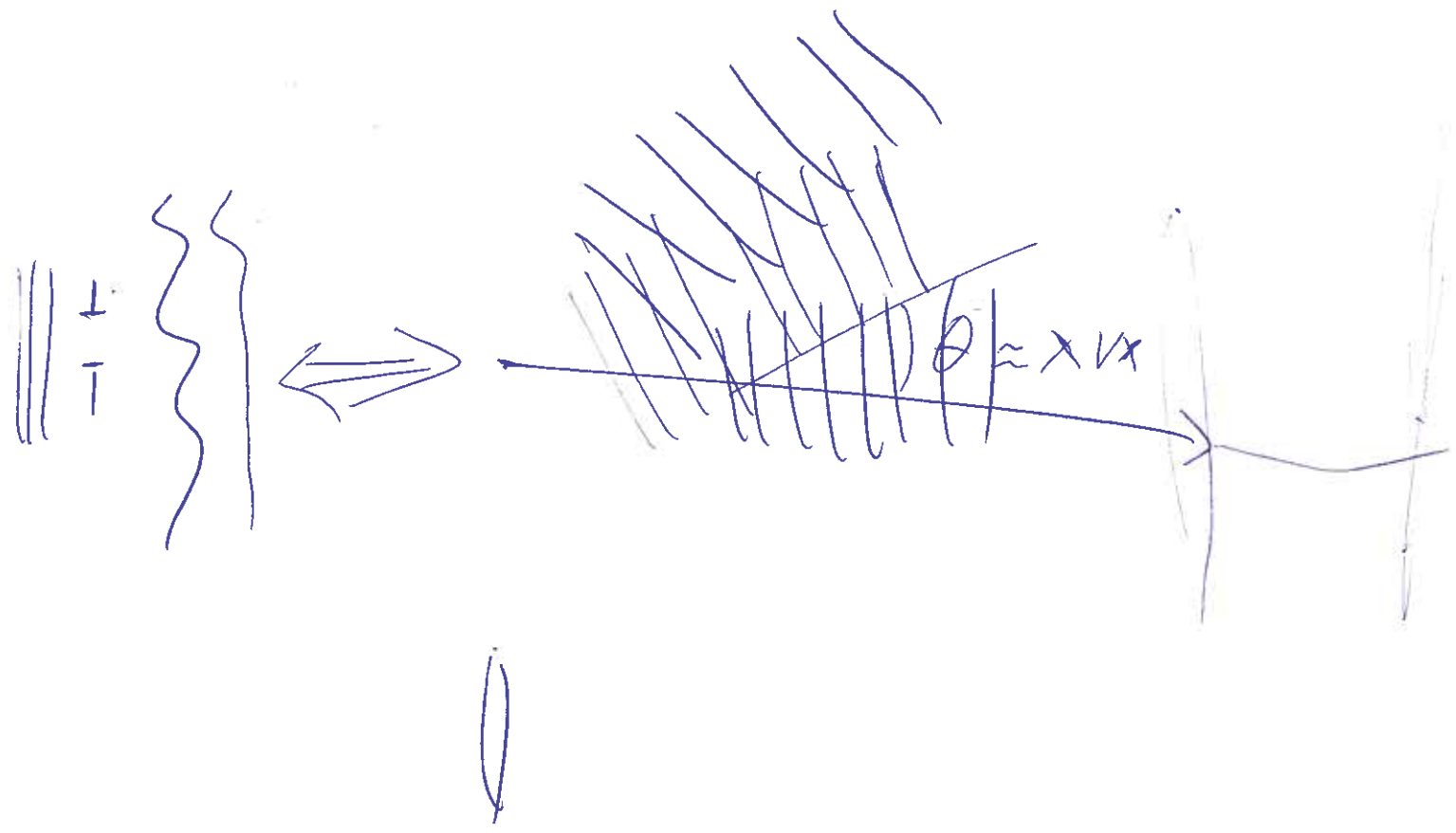
$$a = 4,662 \pm 0,095$$

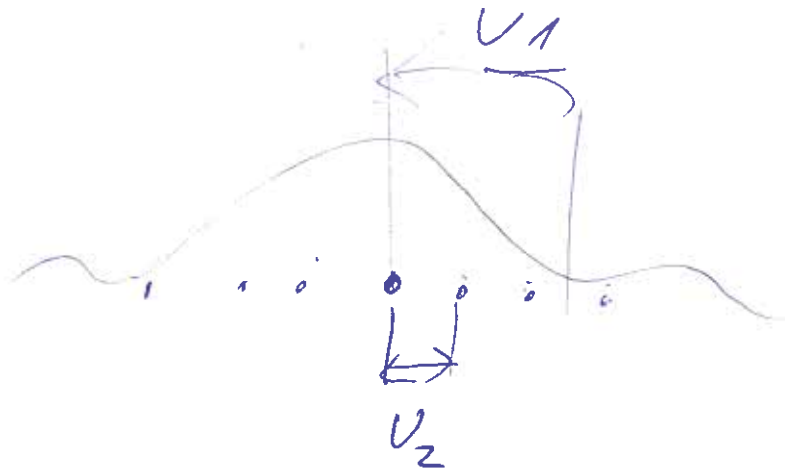
~~4,662 ± 0,095~~





$$\square \quad a = \frac{\lambda \beta}{v_{max}}$$





$$\sin x = g \cdot \lambda$$

$$b = \frac{\lambda f}{U_2}$$

$$a = \frac{\lambda f}{U_1}$$

$$U_1 \geq 1 \text{ cm} \Rightarrow a \leq \dots$$

$$R(\tau) = f * g \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g(\tau - t) dt$$

