VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

OPTIMALIZACE PARAMETRŮ OPTICKÉ SOUSTAVY DIGITÁLNÍHO HOLOGRAFICKÉHO MIKROSKOPU PRO ODRAŽENÉ SVĚTLO.

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF THE OPTICAL SYSTEM OF REFLECTED-LIGHT DIGITAL HOLOGRAPHIC MICROSCOPE.

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. ZBYNĚK DOSTÁL
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. MARTIN ANTOŠ, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav fyzikálního inženýrství
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Zbyněk Dostál

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Přesná mechanika a optika (2301T010)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Optimalizace parametrů optické soustavy digitálního holografického mikroskopu pro odražené světlo.

v anglickém jazyce:

Optimization of parameters of the optical system of reflected-light digital holographic microscope.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Před konstrukční realizací nové sestavy digitálního holografického mikroskopu pro odražené světlo je třeba detailně ověřit vlastnosti navrhované optické soustavy.

Cíle diplomové práce:

Vyjděte ze stávajícího návrhu optické soustavy, proveďte trasování paprsků a výpočet interferenčního obrazce na výstupu mikroskopu pro plošný nemonochromatický zdroj osvětlení.
Na základě dosažených výsledků případně navrhněte nutnou korekci konstrukčního návrhu mikroskopu.

Seznam odborné literatury:

Chmelík, R., Harna, Z., Parallel-Mode Confocal Microscopy. Optical Engineering, 1999, Vol. 38, No. 10, pp. 1635–1639.

Antošová, I., Harna, Z., Holographic confocal microscope. Optica Applicata, 2003, Vol. 33, No. 4, pp. 605–612, ISSN 0078-5466,

Antošová, I., Holografický mikroskop zobrazující odraženým světlem nízké koherence. Disertační práce. Brno: VUT FSI, 2007.

Born, M., Wolf, E., Principles of Optics, 3. vyd. Pergamon, London, 1965.

Glézl, Š., Kamarád, J., Slimák, I., Přesná mechanika. Alfa, Bratislava, 1992.

Paul R. Yoder, Jr., Mounting Optics in Optical Instruments. SPIE Press, Bellingham, 2002.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Antoš, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 21.11.2008

L.S.

prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc. Ředitel ústavu	doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc. Děkan fakulty

Abstrakt

V diplomové práci se pojednává o konstrukčním návrhu holografického mikroskopu reflexního typu společně s návrhem mechanického uložení všech optických prvků. Práce obsahuje statě pojednávající o výpočtu chodu paprsků optickou soustavou a statě týkající se požadavku na přesnost rektifikačních mechanismů společně s jejich konstrukčním návrhem. V závěru práce je prezentován třírozměrný model modulárně řešeného mikroskopu doplněný o vybrané podsestavy.

Summary

The diploma thesis deals with the construction design of reflective type of holographic microscope together with the proposal for the mechanical imposition of optical elements. Thesis contains parts where the illumination beam tracing through the optical system is calculated and discussed, followed up with the accuracy requirements for rectification mechanisms and their design. The three-dimensional model of modularly solved microscope is presented in conclusion of this thesis together with selected microscope sub-assemblies.

Klíčová slova

Nízkokoherentní světlo, interferometrie, holografický mikroskop, návrh, přesný mechanismus, rektifikace.

Keywords

Low-coherence light, interferometry, holographic microscope, design, the precise mechanism, rectification.

DOSTÁL, Z. *Optimalizace parametrů optické soustavy digitálního holografického mikroskopu pro odražené světlo.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 64 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Antoš, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení Ing. Martina Antoše, Ph.D., a všechny podklady jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Brně 28. května 2009

Děkuji Ing. Martinu Antošovi, Ph.D. za odborné vedení a dobré rady při tvorbě mé diplomové práce.

Obsah

1 Úvod **3**

2 Principy zobrazení řezů vzorkem **4**

3 Cíle práce **6**

4 Popis holografického mikroskopu **7**
4.1 Osvětlovací systém 8
4.2 Jádro holografického mikroskopu 8
4.3 Záznam hologramu CCD kamerou 9

5 Trasování jádra holografického mikroskopu **10**
5.1 Stanovení optimálních parametrů planparalelních děličů 10
5.2 Prostorové členění mikroskopu 12
5.3 Trasování jádra mikroskopu předmětovými paprsky 14
5.3.1 Interakce paprsků s difrakční mřížkou a směrovacím předmětovým zrcátkem 14
5.3.2 Průchod paprsků předmětovým děličem 16
5.3.3 Chod paprsků od předmětového děliče k předmětovému objektivu . 18
5.3.4 Chod paprsků předmětovým objektivem 19
5.3.5 Chod paprsků od předmětového objektivu k předmětovému děliči . 21
5.3.6 Chod paprsků od předmětového děliče do roviny interferenčního obrazce 22
5.3.7 Výpočet poloh optických prvků v předmětové větvi interferometru . 23
5.4 Trasování jádra mikroskopu referenčními paprsky 25
5.4.1 Interakce paprsků s difrakční mřížkou a referenčním zrcátkem . . . 25
5.4.2 Chod paprsků od referenčního děliče k rovině dosedací plochy závitu referenčního objektivu 27
5.4.3 Chod paprsků referenčním objektivem 28
5.4.4 Chod paprsků od roviny dosedací plochy závitu referenčního objektivu k referenčnímu děliči 30
5.4.5 Chod paprsků od referenčního děliče do roviny interferenčního obrazce 31
5.4.6 Výpočet poloh jednotlivých optických prvků v referenční větvi . . . 34
5.5 Výpočet polohy průsečíku mimoosových paprsků 36
5.6 Výsledky analýzy modelu v programu Mathcad 37
5.7 Výsledky analýzy modelu v programu Zemax 39
5.8 Hodnocení vytvořených modelů 44

6 Toleranční analýza **46**

7 Konstrukční návrh **49**
7.1 Pohyby justážních mechanismů 49
7.2 Mechanismus s jedním posuvem a dvěma rotacemi 50

7.3 Mechanismus se dvěma posuvy a dvěma rotacemi 53
7.4 Mechanismus uložení zrcátek, děličů a difrakční mřížky 53
7.5 Tubusový výsuv objektivů 55
7.6 Mechanismus upevnění referenčního zrcátka 55
7.7 Tubus osvětlovače 56
7.8 Modulárně řešený návrh mikroskopu 58

8 Závěr **61**

Reference **62**

Obsah přílohy **64**

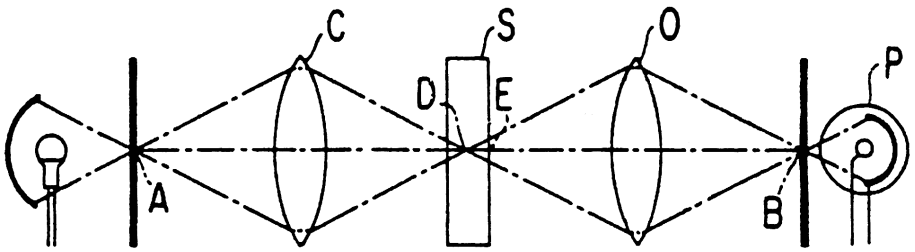
1 Úvod

Reflexní mikroskopy založené na konfokálním a holografickém principu poskytují hloubkově diskriminované zobrazení pozorovaného vzorku. Z principů funkce přístrojů (viz kapitola 2) je pozorovaným vzorkem veden optický řez. Díky jednotlivým optickým řezům pořízeným konfokálním mikroskopem nebo záznamu hologramu řezu pořízeným holografickým mikroskopem lze matematicky zrekonstruovat topografii reflexních ploch vzorku a také zobrazit průsvitné biologické vzorky.

V kapitole 2 se stručně zmíním o principech zobrazení řezů pozorovanými vzorky. Uvedu cíle diplomové práce, viz kapitola 3. Kapitola 4 pojednává o popisu holografického mikroskopu reflexního typu. V kapitole 5 se zabývám numerickým výpočtem již navrženého, ale dosud technicky nerealizovaného holografického mikroskopu reflexního typu ([1], str. 23). Po optimalizaci parametrů optických prvků tvořících soustavu mikroskopu bylo provedeno trasování. V kapitole 6 je stanovena požadovaná přesnost uložení optických prvků. Konstrukční návrh a rozmístění jednotlivých mechanických dílů modulární konstrukce mikroskopu je popsáno v kapitole 7.

2 Principy zobrazení řezů vzorkem

Historicky nejstarším mikroskopem, pomocí kterého lze zobrazovat řezy třírozměrných vzorků je konfokální mikroskop, navržený roku 1957 Marvinem Minským [2]. Princip transmisního konfokálního zobrazení popisuje obrázek 1. Bodový zdroj polychromatic-



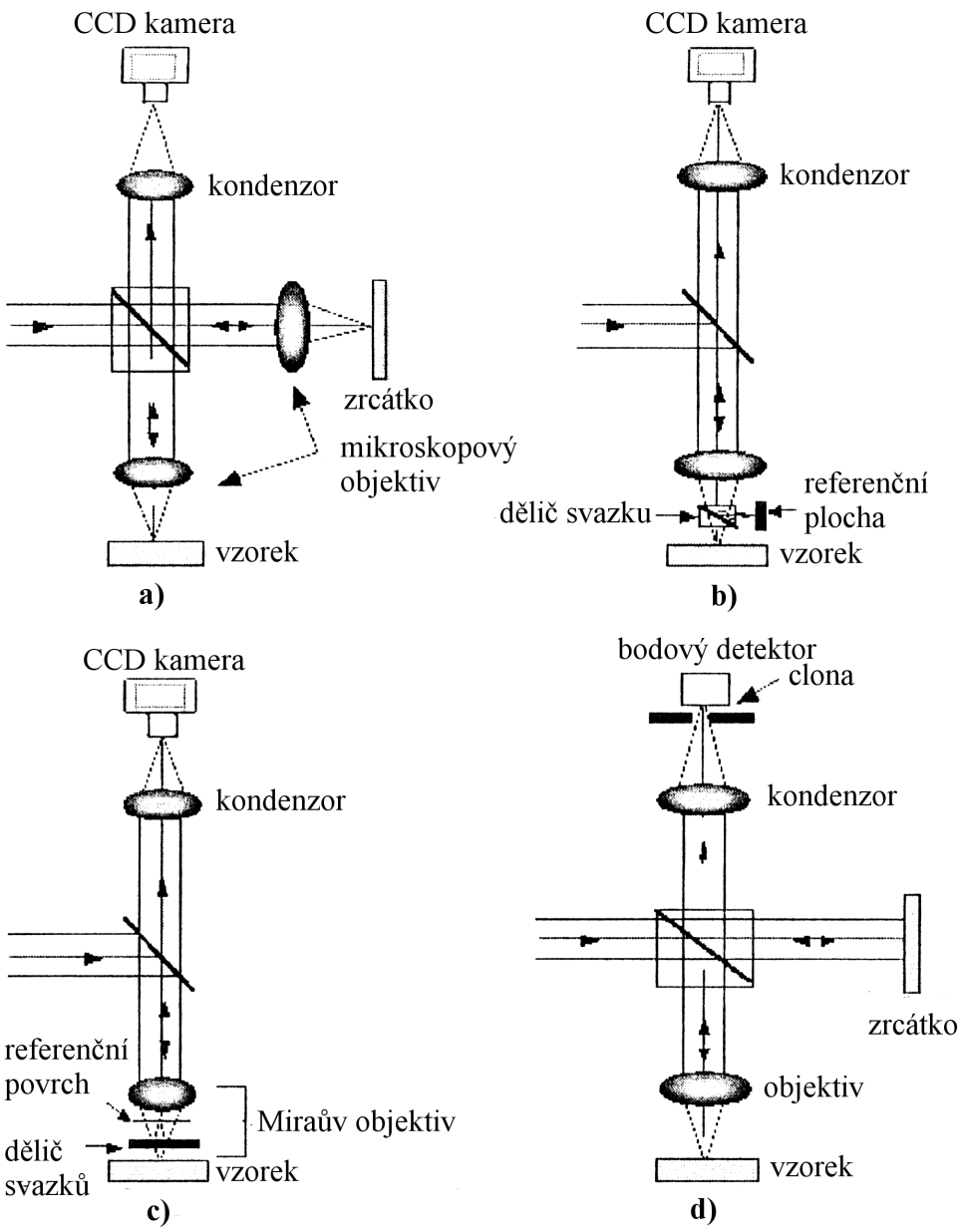
Obrázek 1: Princip transmisního konfokálního zobrazení [2]. A - clonka bodového zdroje, C - kondenzor, S - vzorek, D - bod roviny optického řezu vzorkem, E - bod vzorku mimo rovinu řezu, O - objektiv, B - clonka fotodiody P.

kého světla je tvořen clonkou A, která je osvětlena žárovkou. Rovina clonky je pomocí kondenzoru C zobrazena do roviny vzorku, kterou je veden optický řez. V rovině optického řezu nechť vzniká bodový obraz zdroje D. Pak dochází k zobrazení tohoto bodu pomocí objektivu O na clonku B fotodiody P. To znamená, že fotodioda registruje vysokou hodnotu intenzity dopadajícího světla. Bod E mimo vedenou rovinu řezu vzorkem není osvětlen bodově a je objektivem O zobrazen na clonku B jako světlá ploška. Fotodioda registruje nízkou hodnotu intenzity světla. Budeme-li synchronně pohybovat oběma clonkami, dostaneme postupně obraz celého optického řezu pozorovaným vzorkem.

Vzájemný pohyb clonek lze také řešit pomocí rotujícího Nipkowova kotouče [3] s rozmístěnými clonkami v několika spirálách tak, aby si odpovídaly jednotlivé dvojice clonek. V daném okamžiku je zároveň zobrazeno několik bodů řezu vzorkem. Jedná se o princip vícekanálového konfokálního mikroskopu navrženého roku 1968 Mojmírem Petráněm a Milanem Hadravským. Při rotaci kotouče dochází k zobrazení celého řezu vzorkem. S nástupem rozvoje počítačů bylo možné ze získaných optických řezů při znalosti jejich vzájemné vzdálenosti složit celý model pozorovaného vzorku. Popsaným způsobem lze zobrazit pouze neměnné vzorky.

Moderní možností trojrozměrného zobrazení vzorku je použití holografického mikroskopu. Po matematickém zpracování interferenčního obrazce dostáváme přímo třírozměrné zobrazení pozorovaného objektu. Holografické mikroskopy jsou obecně založeny na principu dvoupaprskové interferometrie. Dělení svazku do větví interferometru je realizováno pomocí dělicích prvků, jako jsou polarizační děliče, planparalelní děliče a difrakční mřížky. Příklady interferometrů jsou uvedeny na obrázku 2 [4]. V současné době jsou vyvíjeny holografické mikroskopy k pozorování dynamicky se měnících vzorků, jako jsou živé buňky a mikroorganismy, založené na výše uvedených principech využívající osvětlení světlem s jednou případně dvěma vlnovými délkami, viz [5] a [6]. Uvedené mikroskopy využívají laserový zdroj světla o velké koherenční délce světla.

Jak bude v práci ukázáno, vzniká kontrastní interferenční obrazec i při použití světla



Obrázek 2: Nejčastěji použité základní typy interferenčních mikroskopů. a) Linnikův interferometr, b) Michelsonův interferometr, c) Miraův interferometr, d) konfokální interferenční princip. Převzato z [4] a upraveno.

s nízkou koherencí, viz část 5.7. Díky dělení osvětlovacího svazku do větví inteferometru difrakční mřížkou vznikají pro každou vlnovou délku emisního spektra zdroje interferenční proužky o stejné šířce. V takovém případě lze mluvit o achromatičnosti mikroskopu. Další velkou výhodou je, že podle typu pozorovaného vzorku lze volit velikostí clony počet konfokálních kanálů a použitím interferenčního filtru rozsah vlnových délek tvořících výsledný interferogram. Při konstrukčním návrhu holografického mikroskopu musí být kladen silný důraz na přesnost usazení všech optickomechanických částí mikroskopu. Případné nepřesnosti se projeví při použití světla s nízkou koherenční délkou.

3 Cíle práce

V diplomové práci popisovaný holografický mikroskop byl navržen Irenou Antošovou ([1], str. 23). Nedošlo však k jeho trasování a mikroskop nebyl technicky realizován. Cílem práce je:

- Vytvořit numerický model chodu paprsků mikroskopem.
- Trasováním paprsků optickou soustavou zjistit charakteristiky holografického mikroskopu a teoreticky ověřit funkčnost mikroskopu.
- Navrhnout vhodnou konstrukci plošného zdroje polychromatického osvětlení.
- Navrhnout polohovací mechanismy k ustavení optických prvků s využitím objemového modeláře a vytvořit konstrukční návrh mikroskopu v digitální formě.

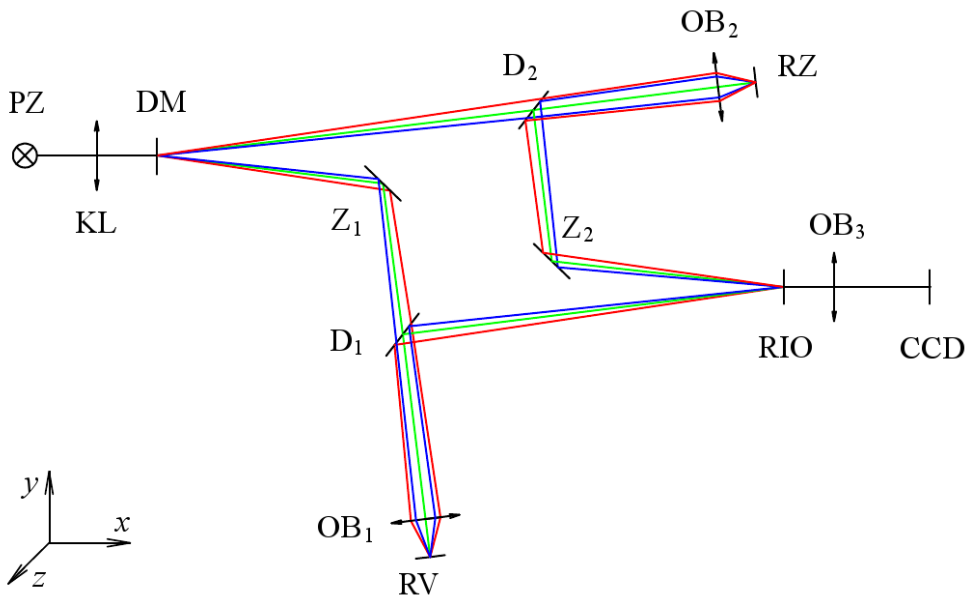
4 Popis holografického mikroskopu

Nejprve obecně popíši sestavu holografického mikroskopu. Následující odstavce se pak budou podrobně věnovat jeho jednotlivým částem a požadovaným vlastnostem. Navrhovaný holografický mikroskop, respektive jeho schéma, je uvedeno na obrázku 3. Z obrázku je patrné, že holografický mikroskop můžeme rozdělit na tři logické části.

- Prvá část mikroskopu zobrazuje plošný zdroj světla PZ přes difrakční mřížku DM do ohniskových rovin obou objektivů OB_1 a OB_2, které plní funkci kondenzorů, viz obrázek 4. Na difrakční mřížce dochází k dělení světelného svazku do difrakčních řádů mřížky, z nichž je vybrán prvý a méně prvý řád. Oba vzniklé svazky jsou transformovány objektivy OB_1 a OB_2 do roviny vzorku RV a do roviny referenčního zrcátka RZ.

- Obě roviny jsou následně shodnými objektivy zobrazeny do roviny interferenčního obrazce RIO, kde dojde k interferenci obou svazků. Svazek odrážející se od referenčního zrcátka RZ budu v dalším textu nazývat svazkem referenčním. Svazek odražený od roviny vzorku RV svazkem předmětovým.Popsaná část optické soustavy bude v následujícím textu nazývána jádrem mikroskopu.

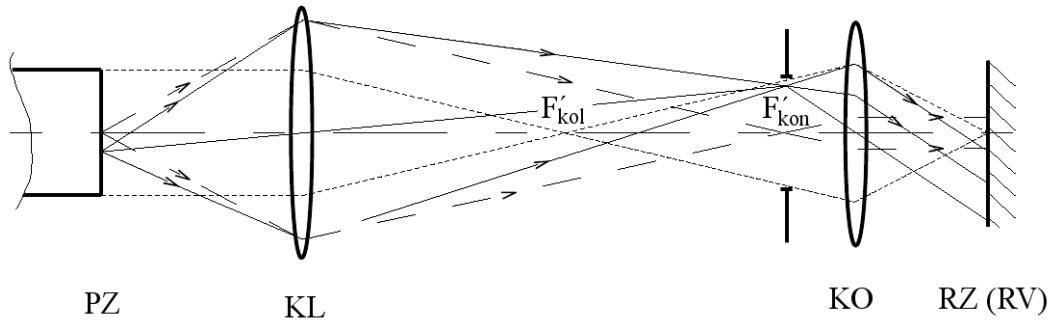
- Získaný intereferenční obrazec je zobrazován objektivem OB_3 na čip CCD kamery. Popišme si postupně jednotlivé části optického systému.



Obrázek 3: Schéma holografického mikroskopu. PZ - plošný zdroj, KL - kolektor, DM - difrakční mřížka, OB_1 - předmětový mikroskopový objektiv, OB_2 - referenční mikroskopový objektiv, OB_3 - mikroskopový objektiv CCD kamery, Z_1 a Z_2 - zrcátka, D_1 a D_2 - planparalelní děliče, RZ - rovina referenčního zrcátka, RV - rovina vzorku, RIO - rovina interferenčního obrazce, CCD - CCD kamera. Převzato z ([1], str. 23).

4.1 Osvětlovací systém

K rovnoměrnému osvětlení roviny vzorku RV mikroskop používá osvětlovací systém Köhlerova typu. Princip osvětlení je znázorněn na obrázku 4. Vlastní osvětlovací soustava



Obrázek 4: Köhlerův osvětlovač ([8], str. 581). PZ - plošný polychromatický zdroj, KL - kolektor, KO - kondenzor, RZ - rovina referenčního zrcátka, RV - rovina vzorku.

se skládá ze dvou objektivů, kolektoru KL a kondenzoru KO, viz obrázek 4. Kolektorem KL jsou zobrazovány body plošného polychromatického zdroje PZ do ohniskové roviny kondenzoru KO. Každý takto vzniklý bod obrazu zdroje můžeme chápat jako zdroj kulové vlny, která je kondenzorem transformována na rovinnou vlnu osvětlující vzorek. Pro správnou funkci osvětlovače je nutné, aby vzniklé „body“ obrazu zdroje v ohniskové rovině kondenzoru byly navzájem nekorelované. Tímto způsobem vzniká konfokální způsob zobrazení, viz [9]. Jak je ukázáno v ([1], str. 19), je nutné dodržet následující vztah numerických apertur obou objektivů:

$$NA_{kol} \geq \frac{NA_{kon}}{Z}, \tag{1}$$

kde NA_{kol} je numerická apertura kolektoru, NA_{kon} je numerická apertura kondenzoru, uvedená výrobcem na objektivu a Z je zvětšení kondenzoru. Vztah 1 tedy říká, že v obrazové rovině kolektoru vznikají body obrazu zdroje, které jsou kondenzorem nerozlišitelné.

4.2 Jádro holografického mikroskopu

Difrakcí na mřížce dochází v příslušných difrakčních řádech k úhlové separaci spektrálních složek polychromatického světla. Ke vhodnému umístění optických prvků tvořících interferometr je nutné vybrat paprsek, který se šíří ve směru optické osy příslušné větve. Požadavky na jádro mikroskopu:

- Mikroskopové objektivy OB_1 a OB_2 zobrazují rovinu difrakční mřížky DM do roviny vzorku RV a referenčního zrcátka RZ.
- Rovina vzorku RV a referenčního zrcátka RZ je zobrazena objektivy OB_1 a OB_2 do roviny interferenčního obrazce mikroskopu RIO.
- Pro vznik kontrastního interferenčního obrazce musí být rozdíl optických drah mezi interferujícími paprsky menší nebo roven koherenční délce použitého světla.

Platí tedy vztah

$$\Delta L \leq L_k, \tag{2}$$

kde ΔL je rozdíl optických drah mezi interferujícími paprsky a L_k je koherenční délka použitého světla. Pro výpočet koherečí délky dle ([7], str. 319) platí

$$L_k = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}, \tag{3}$$

kde λ je vlnová délka světla a $\Delta\lambda$ je spektrální pološířka.

4.3 Záznam hologramu CCD kamerou

Získaný interferenční obrazec je nutné zaznamenávat a ukládat do paměti obslužného počítače. Proto je interferenční obrazec zobrazován na čip CCD kamery pomocí objektivu OB_3 (viz obrázek 3). Pro návrh a konstrukční řešení mikroskopu je nutné vhodně zvolit parametry difrakční mřížky a všech tří objektivů, viz ([1], str. 31). Pro přenos všech prostorových frekvencí interferenčního obrazce do roviny CCD čipu je nutno dodržet vztah mezi prostorovou frekvencí mřížky f_m, zvětšeními m a numerickými aperturami NA shodných objektivů OB_1, OB_2 a také objektivem OB_3 , viz tabulka 1.

Objektiv OB_1 a OB_2		Objektiv OB_3		f_m pro $\lambda = 547$ nm	
m	NA	m	NA	$f_{m_{min}}[\mathrm{mm}^{-1}]$	$f_{m_{max}}[\mathrm{mm}^{-1}]$
10	0,25	4	0,10	69	69
20	0,40	4	0,10	55	73
40	0,65	4	0,10	45	76
60	0,85	4	0,10	39	78
10	0,25	10	0,25	69	205
20	0,40	10	0,25	55	210
40	0,65	10	0,25	45	213
60	0,85	10	0,25	39	215

Tabulka 1: Vztah mezi parametry použitých objektivů a rozsahu prostorových frekvencí difrakční mřížky. Převzato z ([1], str. 31).

5 Trasování jádra holografického mikroskopu

Základem ke zjištění charakteristik popisujících jádro mikroskopu je znalost optických drah předmětového a referenčního svazku. Zabývejme se tedy v následujícím textu chodem vybraných paprsků optickou soustavou.

V programu Zemax jsem vytvořil model celé optické soustavy podle obrázku 3. Rozvrhnul jsem pozice jednotlivých optických prvků tak, aby nedošlo ke kolizi dvou prvků a také aby žádný prvek nezasahoval do jiného světelného svazku, než pro který je určen. Model kompletně popisuje optické dráhy jednotlivých paprsků. Nevýhodou modelu vytvořeného v Zemaxu je fakt, že nelze provést toleranční analýzu. Proto jsem vytvořil a naprogramoval numerickou podobu tohoto mikroskopu v programovém prostředí Mathcadu a následně provedl chybějící toleranční analýzu.

5.1 Stanovení optimálních parametrů planparalelních děličů

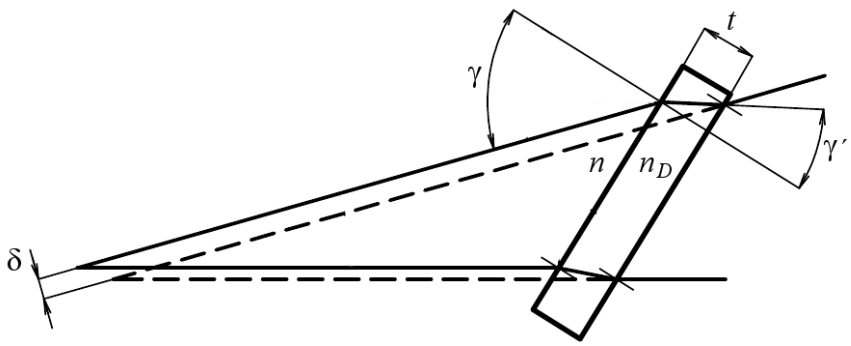
Než-li zde začnu popisovat trasování paprsků optickou soustavou, je nutné se zabývat vlivem tloušťky t obou děličů D_1 a D_2 a vlivem optických aberací objektivů OB_1 a OB_2 na zobrazení osového bodu mřížky do roviny referenčního zrcátka RZ a roviny vzorku RV. Planparalelní desky vnáší do zobrazení vadu vlivem posunu paprsku při lomech na jejich rozhraních. Vzniklý posun δ popisuje obrázek 5 a lze jej spočítat pro obecně natočenou destičku podle vztahu

$$\delta = \frac{t}{\cos\gamma'} \sin(\gamma - \gamma'), \tag{4}$$

kde úhel γ je úhel dopadu paprsku na planparalelní desku. Úhel γ' je úhel lomu na rozhraní vzduch - sklo a lze jej vypočítat ze Snellova zákona vztahem

$$\gamma' = \arcsin\left(\frac{n}{n_D}\sin\gamma\right). \tag{5}$$

V následujících výpočtech byly použity dva identické mikroskopové objektivy se zvětše-

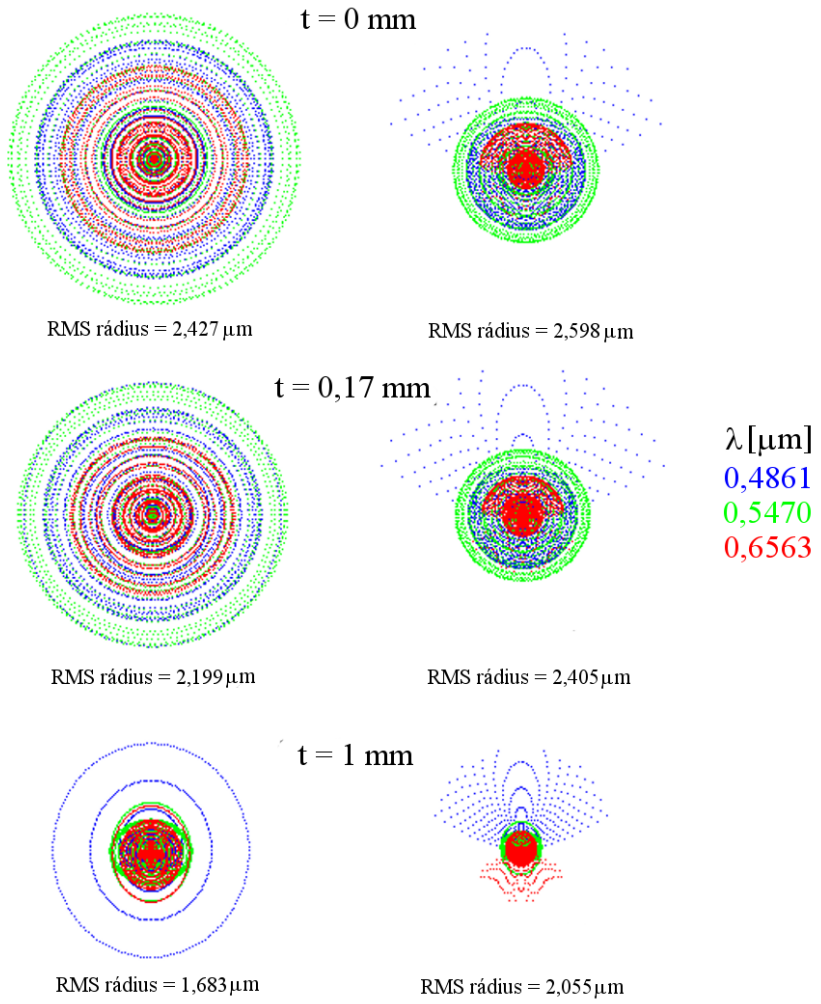


Obrázek 5: Planparalelní deska.

ním 10 a numerickou aperturou $NA = 0{,}25$, které byly vybrány z ([10], str. 147). Výpis parametrů zvoleného objektivu je uveden v tabulce 2.

optická plocha	tloušťka [mm]	rádius [mm]	optické prostředí
rovina dosedací plochy závitu	4,6254	∞	vzduch
1	3,5306	13,08608	sklo N-K5
2	1,1684	-9,37768	sklo N-F2
3	8,6360	-112,24260	vzduch
4	3,3528	11,48334	sklo N-K5
5	0,9652	-6,00710	sklo N-F2
6	7,6623	-21,25218	vzduch
RZ, RV		∞	vzduch

Tabulka 2: Parametry použitého mikroskopového objektivu. Převzato z ([10], str. 147). Druhy použitých skel jsou značeny dle katalogu firmy Schott [11].



Obrázek 6: Spotdiagramy pro tři tloušťky planparalelních děličů a tři vlnové délky.

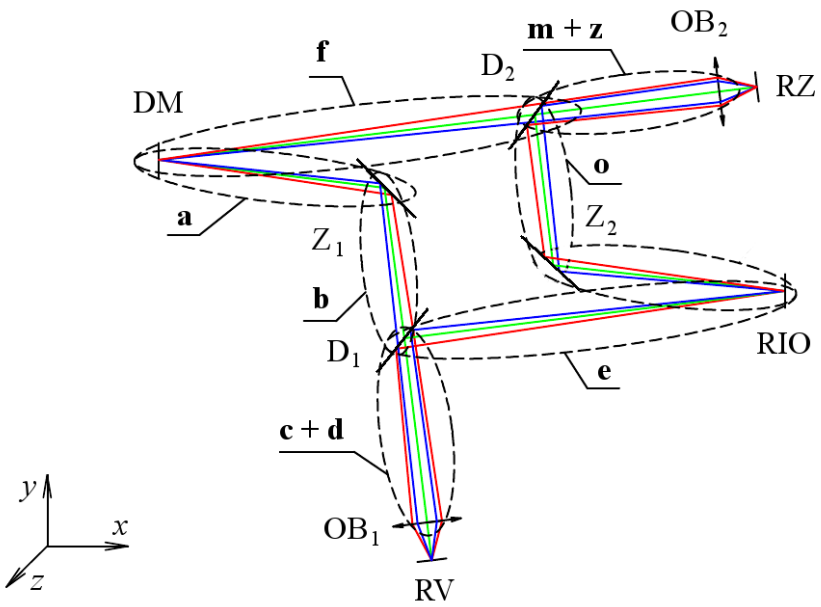
Zabývejme se nyní optimalizací parametrů osvětlovacích částí obou větví interferometru. Výsledná optická aberace je dána kombinací vad děličů D_1 a D_2 a vad objektivů OB_1 a OB_2. Uvažujme, že optická dráha osového paprsku ze středu zobrazované mřížky do středu roviny dosedací plochy závitu mikroskopového objektivu je konstantní a rovna tubusové délce a' zvoleného mikroskopového objektivu. Na obrázku 6 je zobrazeno šest spotdiagramů pro tři zvolené tloušťky děličů. Ze spotdiagramů v levém sloupci si lze udělat představu o výsledných aberacích zvoleného mikroskopového objektivu při zobrazení bodu předmětu vloženého místo difrakční mřížky DM do obrazové roviny, tj. roviny RZ nebo RV. Ze spotdiagramů v pravém sloupci si lze udělat představu o aberacích zvoleného mikroskopového objektivu nahradíme-li předmět osvětlenou difrakční mřížkou. Hledejme nyní takovou tloušťku děličů, pro kterou platí dvě kritéria:

- Výsledný spotdiagram má stejně velký nebo menší RMS rádius (root mean square rádius) než pro případ bez děliče.
- Jednotlivé vybrané vlnové délky jsou ve spotdiagramu rovnoměrně rozloženy.

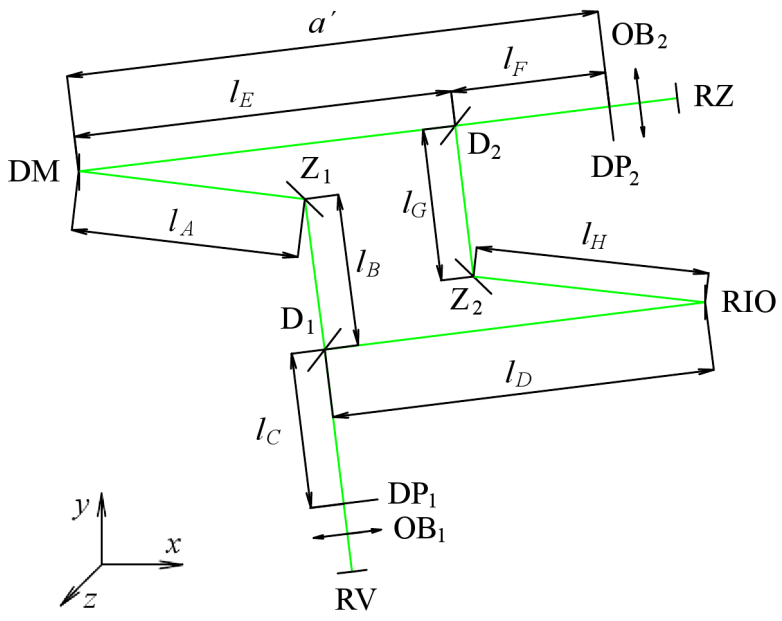
Na základě toho jsem zvolil děliče ze skla N-BK7 ($n_D = 1,5187$ pro $\lambda = 547$ nm) o tloušťce 0,17 mm, odpovídající komerčně dodávaných podložních skel. V dalších výpočtech budu uvažovat i jiné tloušťky děličů k demonstraci vlastností jádra mikroskopu.

5.2 Prostorové členění mikroskopu

K postupnému trasování význačných paprsků jádrem mikroskopu rozdělme jádro mikroskopu na jednotlivé detaily obsahující minimálně dva optické prvky. Dělení je uvedeno v obrázku 7. Jak vyplývá ze zmíněného obrázku tvoří detaily **a, b, c, d** a **e** předmětovou



Obrázek 7: Popisované detaily. DM - difrakční mřížka, OB_1 - předmětový mikroskopový objektiv, OB_2 - referenční mikroskopový objektiv, Z_1 a Z_2 - zrcátka, D_1 a D_2 - planparalelní děliče, RZ - rovina referenčního zrcátka, RV - rovina vzorku, RIO - rovina interferenčního obrazce.



Obrázek 8: Osové úseky mezi optickými prvky. DM - difrakční mřížka, OB_1 - předmětový mikroskopový objektiv, DP_1 - rovina dosedací plochy závitu předmětového mikroskopového objektivu, OB_2 - referenční mikroskopový objektiv, DP_2 - rovina dosedací plochy závitu referenčního mikroskopového objektivu, Z_1 a Z_2 - zrcátka, D_1, D_2 - planparalelní děliče, RZ - rovina referenčního zrcátka, RV - rovina vzorku, RIO - rovina interferenčního obrazce.

větev a detaily **f, m, z** a **o** větev referenční. Stanovme jednotlivé teoretické vzdálenosti mezi jednotlivými optickými prvky. Následující vztahy platí pro děliče s nulovou tloušťkou (viz obrázek 8)

$$a' = l_A + l_B + l_C, \tag{6}$$

$$a' = l_C + l_D, \tag{7}$$

$$a' = l_E + l_F, \tag{8}$$

$$a' = l_F + l_G + l_H, \tag{9}$$

kde a' je tubusová délka mikroskopového objektivu, l_A je vzdálenost od difrakční mřížky DM k zrcátku Z_1, l_B je vzdálenost od zrcátka Z_1 k děliči D_1, l_C je vzdálenost od děliče D_1 k rovině dosedací plochy závitu mikroskopového objektivu DP_1, l_D je vzdálenost od děliče D_1 do roviny interferenčního obrazce RIO, l_E je vzdálenost od difrakční mřížky DM k děliči D_2, l_F je vzdálenost od děliče D_2 k dosadací ploše závitu mikroskopového objektivu DP_2, l_G je vzdálenost od děliče D_2 k zrcátku Z_2 a l_H je vzdálenost od zrcátka Z_2 k rovině interferenčního obrazce RIO, viz obrázek 8.

Pro výpočet trasování paprsků optickou soustavou s děliči o nenulové tloušťce jsou zadány délky l_A, l_B a l_E, viz tabulka 3. Délky l_D, l_G a l_H budou spočteny při trasování paprsků a délky l_C a l_F budou při výpočtu upraveny a nahrazeny délkami c_2 a m_4, viz části 5.3.3 a 5.4.2.

K určení vlastností jádra mikroskopu stačí jádrem trasovat dva význačné paprsky - paprsek dopadající kolmo na difrakční mřížku DM a paprsek dopadající pod nenulovým úhlem na difrakční mřížku DM. Celý výpočet chodu světelného svazku jádrem mikroskopu se zjednoduší na rovinnou úlohu. Výpočet modelu je navržen podobným způsobem jako

délka	velikost [mm]
a'	150
l_A	60
l_B	40
l_E	100

Tabulka 3: Vzdálenosti mezi optickými prvky.

se tvoří návrh v Zemaxu. Každý detail navazuje na ten předešlý - poloha následujícího detailu je závislá na poloze a natočení předešlého detailu a je definována pomocí osové vzdálenosti mezi prvky. Výše popsaným způsobem lze zaručit shodu modelu vytvořeného v Zemaxu s modelem v Mathcadu.

5.3 Trasování jádra mikroskopu předmětovými paprsky

5.3.1 Interakce paprsků s difrakční mřížkou a směrovacím předmětovým zrcátkem

Na difrakční mřížku DM dopadají dva paprsky, viz obrázek 9. Kolmo dopadající paprsek reprezentuje optickou osu. Druhý paprsek je šikmo dopadající. Paprsky difraktované z kolmo dopadajícího paprsku reprezentují osy předmětového a referenčního svazku. Budu je dále nazývat osové paprsky. Další paprsky vycházející ze středu difrakční mřížky jsou vzniklé difrakcí šikmo dopadajícího paprsku a budu je dále nazývat mimoosové paprsky. Z mřížkové rovnice ([7], str. 403) vypočteme úhel difraktovaných paprsků

$$\omega_0 = |\arcsin(q\lambda f_m)|, \tag{10}$$

$$\omega_1 = |\arcsin(q\lambda f_m - \sin\psi)|, \tag{11}$$

kde difrakční řád $q = -1$, f_m je prostorová frekvence mřížky, λ je vlnová délka dopadajícího paprsku a úhel ψ je úhel dopadu šikmého paprsku na difrakční mřížku. V dalším kroku dopočítám úhel dopadu osového paprsku na zrcátko Z_1. Význam symbolů v následujících vztazích je zřejmý z obrázku 9. Odrazná plocha rovinného zrcadla Z_1 je ve jmenovité poloze natočena vůči ose x souřadného systému o $\frac{\pi}{4}$ a pro úhel dopadu α_1 osového paprsku platí

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{4} + \omega_0, \tag{12}$$

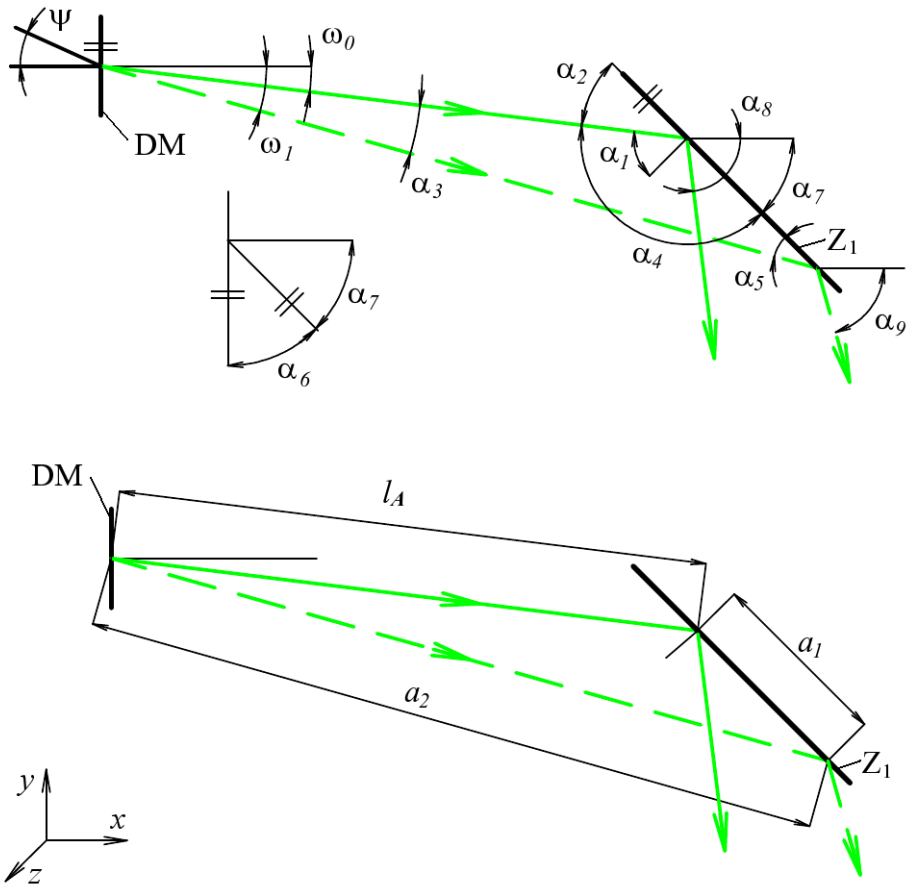
kde ω_0 je úhel difrakce osového paprsku. Určeme úhel α_5 jako doplněk do $\frac{\pi}{2}$ k úhlu dopadu mimoosového paprsku,

$$\alpha_3 = \omega_1 - \omega_0, \tag{13}$$

$$\alpha_4 = \pi - \alpha_2, \tag{14}$$

$$\alpha_5 = \pi - \alpha_4 - \alpha_3, \tag{15}$$

kde ω_1 je úhel difrakce mimoosového paprsku, α_3 je úhel mezi osovým a mimoosovým paprskem, úhel $\alpha_2 = \frac{\pi}{2} - \alpha_1$ a úhel $\alpha_4 = \pi - \alpha_2$.



Obrázek 9: Chod paprsků od difrakční mřížky DM k zrcátku Z_1. Plnou čarou je značen osový paprsek a přerušovanou čarou mimoosový paprsek.

Ze zjištěných úhlů lze dopočítat vzdálenost a_1 mezi místy dopadu na zrcátko Z_1

$$a_1 = l_A \frac{\sin \alpha_3}{\sin \alpha_5} \tag{16}$$

a délku mimoosového paprsku a_2 mezi difrakční mřížkou a zrcátkem Z_1

$$a_2 = l_A \frac{\sin \alpha_4}{\sin \alpha_5}. \tag{17}$$

Oba odražené paprsky se dále šíří vzhledem k ose x pod úhly α_8 a α_9, které jsou dány vztahy

$$\alpha_8 = \alpha_7 + \alpha_2, \tag{18}$$

$$\alpha_9 = \alpha_7 + \alpha_5, \tag{19}$$

kde

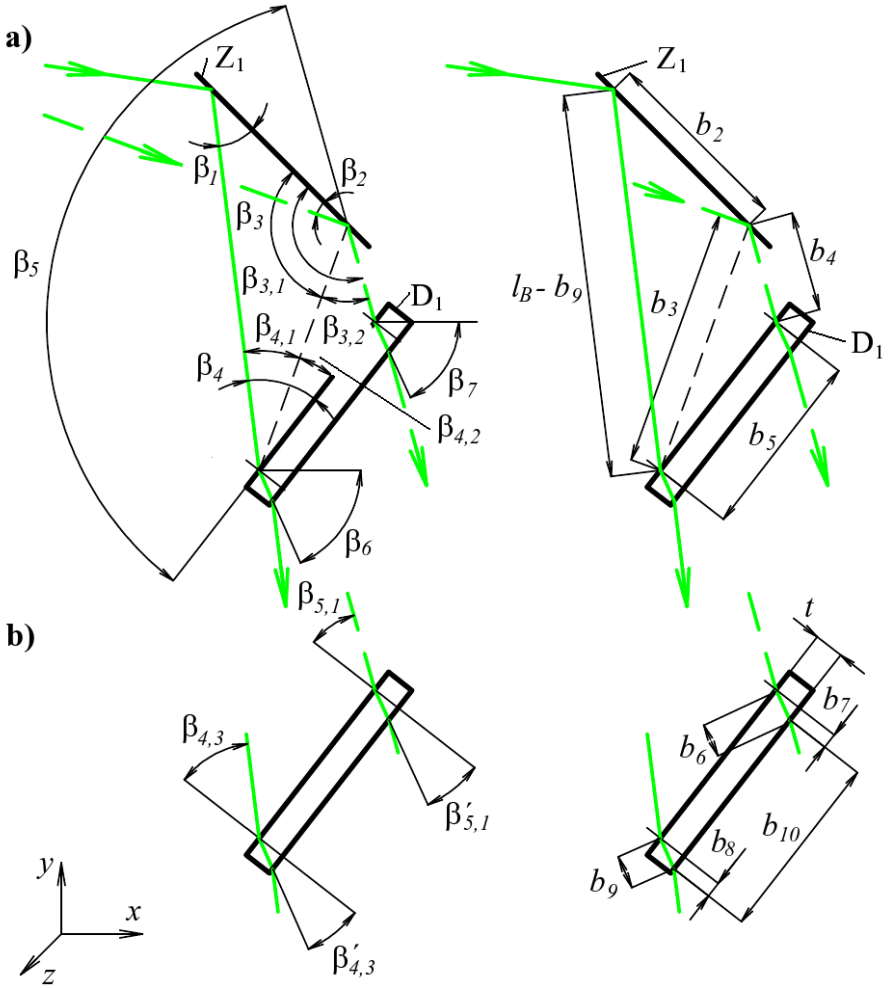
$$\alpha_7 = \frac{\pi}{2} - \alpha_6, \tag{20}$$

$$\alpha_6 = \pi - \alpha_2 - \omega_0. \tag{21}$$

5.3.2 Průchod paprsků předmětovým děličem

Paprsky, dopadající na zrcátko Z_1, jsou odráženy k děliči D_1 a tímto děličem kolmo ke směru šíření posunuty. Tato situace je na obrázku 10. Pro určení vzdálenosti $(l_B - b_9)$ mezi zrcátkem Z_1 a děličem D_1 je nutno nejprve vypočítat geometrickou délku b_9 osového paprsku v děliči D_1. Dělič D_1 je vůči osovému paprsku skloněn o úhel β_4 , který je dán vztahem

$$\beta_4 = \frac{\pi}{4}. \tag{22}$$



Obrázek 10: a) Chod paprsků od zrcátka Z_1 k děliči D_1. b) Šíření paprsků děličem D_1. Plnou čarou je značen osový paprsek a přerušovanou čarou mimoosový paprsek.

Pomocí Snellova zákona určím úhel lomu osového paprsku $\beta'_{4,3}$

$$\beta'_{4,3} = \arcsin\left[\frac{\sin\beta_{4,3}}{n_D(\lambda)}\right], \tag{23}$$

kde úhel dopadu $\beta_{4,3}$ je doplněk úhlu β_4 do $\frac{\pi}{2}$ a $n(\lambda)$ je index lomu skla děliče D_1. Pak lze délku b_9 spočítat vztahem

$$b_9 = \frac{t}{\sin\beta'_{4,3}}, \tag{24}$$

kde t je tloušťka děliče. Úhel dopadu β_5 mimoosového paprsku na dělič D_1 je dán vztahy

$$
\begin{aligned}
b_3 &= \sqrt{b_2^2 + (l_B - b_9)^2 - 2b_2(l_B - b_9)\cos\beta_1}, && (25)\\
\beta_{4,1} &= \arcsin\left(\frac{b_2}{b_3}\sin\beta_1\right), && (26)\\
\beta_{4,2} &= \beta_4 - \beta_{4,1}, && (27)\\
\beta_3 &= \pi - \beta_2, && (28)\\
\beta_{3,1} &= \pi - \beta_1 - \beta_{4,1}, && (29)\\
\beta_{3,2} &= \beta_3 - \beta_{3,1}, && (30)\\
\beta_5 &= \pi - \beta_{3,2} - \beta_{4,2}, && (31)
\end{aligned}
$$

kde význam symbolů b_3, β_1, b_2, $\beta_{4,1}$, $\beta_{4,2}$, β_3, $\beta_{3,1}$, $\beta_{3,2}$ je patrný z obrázku 10. Úhel $\beta_1 = \alpha_2$ a vzdálenost $b_2 = a_1$. Geometrická dráha mimoosového paprsku b_4 od zrcátka Z_1 k děliči D_1 je dána vztahem

$$b_4 = b_3 \frac{\sin\beta_{4,2}}{\sin\beta_5}. \tag{32}$$

Podobně spočítám vzdálenost b_5 mezi místy dopadu osového a mimoosového paprsku na dělič D_1

$$b_5 = b_3 \frac{\sin\beta_{3,2}}{\sin\beta_5}. \tag{33}$$

Vzdálenost b_{10} je dána průsečíky osového a mimoosového paprsku s plochou děliče D_1. Pro výpočet uvedené vzdálenosti trasuji mimoosový paprsek děličem. Úhel lomu mimoosového paprsku na rozhraní sklo - vzduch děliče D_1 je dán vztahem

$$\beta'_{5,1} = \arcsin\left[\frac{\sin\beta_{5,1}}{n_D(\lambda)}\right], \tag{34}$$

kde úhel dopadu mimoosového paprsku je $\beta_{5,1} = \beta_5 - \frac{\pi}{2}$. Geometrická dráha b_6, kterou paprsek při šíření v děliči D_1 urazí je dána vztahem

$$b_6 = \frac{t}{\sin\beta'_{5,1}}. \tag{35}$$

Pak je vzdálenost b_{10} dána výrazem

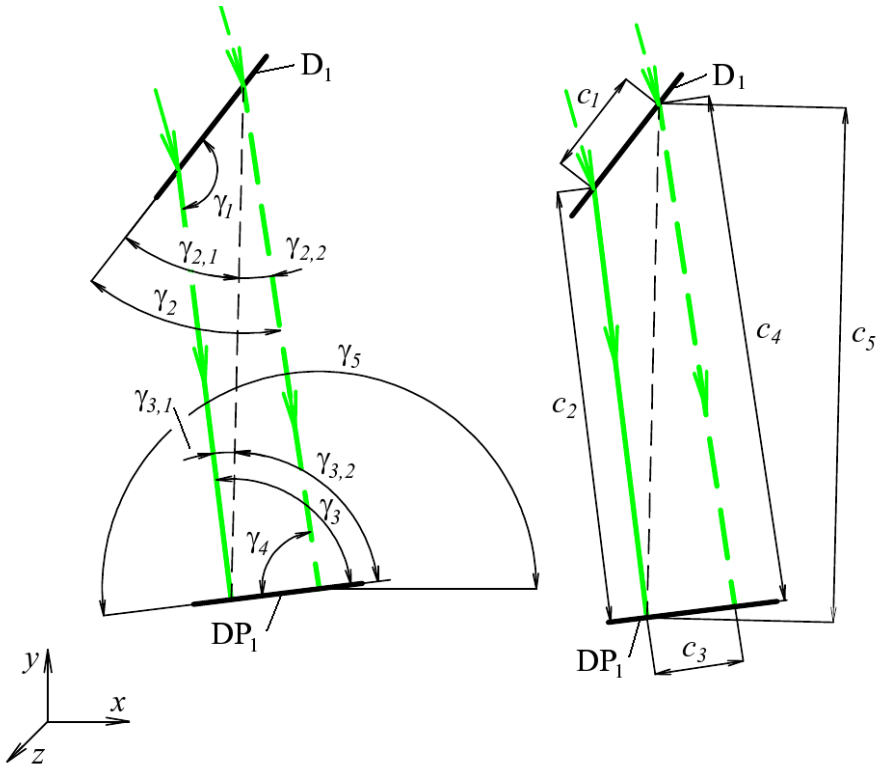
$$b_{10} = b_5 - b_7 + b_8, \tag{36}$$

kde $b_7 = t\,\mathrm{tg}\,\beta'_{4,3}$ a $b_8 = t\,\mathrm{tg}\,\beta'_{5,1}$. Vypočtu úhly paprsků β_6 a β_7, pod kterými se šíří v děliči D_1 vzhledem k ose x

$$
\begin{aligned}
\beta_6 &= \alpha_8 + \beta_4 + \beta'_{4,3} - \frac{\pi}{2}, && (37)\\
\beta_7 &= \alpha_9 - \beta_5 + \beta'_{5,1} + \frac{\pi}{2}. && (38)
\end{aligned}
$$

5.3.3 Chod paprsků od předmětového děliče k předmětovému objektivu

Detail **c** popisuje chod paprsků od děliče D_1 k rovině dosedací plochy závitu objektivu DP_1 (obrázek 11).



Obrázek 11: Chod paprsků od děliče D_1 k rovině dosedací plochy závitu objektivu DP_1. Plnou čarou je značen osový paprsek a přerušovanou čarou mimoosový paprsek.

Jak bylo uvedeno na začátku kapitoly 5, musí být optická dráha osového paprsku od difrakční mřížky DM k rovině dosedací plochy závitu objektivu DP_1 rovna tubusové délce a' mikroskopového objektivu. Pak osová vzdálenost c_2 mezi děličem D_1 a rovinou dosedací plochy závitu objektivu DP_1 je dána vztahem

$$c_2 = a' - l_A - (l_B - b_9) - n(\lambda)b_9. \tag{39}$$

Osový paprsek dopadá kolmo na rovinu v níž leží rovina dosedací plochy závitu objektivu DP_1 a platí $\gamma_3 = \frac{\pi}{2}$. Určím dopadovou výšku c_3 mimoosového paprsku v rovině dosedací plochy závitu objektivu DP_1, jeho délku c_4 a úhel γ_4 mezi mimoosovým paprskem a rovinou dosedací plochy závitu objektivu DP_1 pomocí následujících vztahů

$$c_5 = \sqrt{c_1^2 + c_2^2 - 2c_1c_2\cos\gamma_1}, \tag{40}$$

$$\gamma_{3,1} = \arcsin\left(\frac{c_1}{c_5}\sin\gamma_1\right), \tag{41}$$

$$\gamma_{3,2} = \gamma_3 - \gamma_{3,1}, \tag{42}$$

$$\gamma_2 = \pi - \beta_5, \tag{43}$$

$$\gamma_{2,1} = \pi - \gamma_1 - \gamma_{3,1}, \tag{44}$$

$$\gamma_{2,2} = \gamma_2 - \gamma_{2,1}, \tag{45}$$

$$\gamma_4 = \pi - \gamma_{2,2} - \gamma_{3,2}, \tag{46}$$

kde význam symbolů c_5, c_1, γ_1, $\gamma_{3,1}$, $\gamma_{3,2}$, γ_2, $\gamma_{2,1}$, $\gamma_{2,2}$ je patrný z obrázku 11. Vzdálenost $c_1 = b_{10}$ a úhel $\gamma_1 = \pi - \beta_4$. Geometrická dráha mimoosového paprsku c_4 je dána vztahem

$$c_4 = c_5 \frac{\sin \gamma_{3,2}}{\sin \gamma_4}. \tag{47}$$

Vzdálenost mezi místy dopadu osového a mimoosového paprsku c_3 v rovině dosedací plochy závitu objektivu DP_1 je dána vztahem

$$c_3 = c_5 \frac{\sin \gamma_{2,2}}{\sin \gamma_4}. \tag{48}$$

Rovina dosedací plochy závitu objektivu DP_1 svírá s osou x úhel γ_5

$$\gamma_5 = \pi + \gamma_4 - \alpha_9. \tag{49}$$

5.3.4 Chod paprsků předmětovým objektivem

Šíření mimoosového paprsku objektivem OB_1 je zobrazeno na obrázku 12. Délkové rozměry objektivu a materiál skel je uveden v tabulce 4. Chod mimoosového paprsku z roviny

plocha i	tloušťka l_i [mm]	rádius r_i [mm]	optické prostředí	n_i pro $\lambda = 547$ nm
0	4,6254	∞	vzduch	$n_0 = 1,00000$
1	3,5306	13,08608	sklo N-K5	$n_1 = 1,52454$
2	1,1684	-9,37768	sklo N-F2	$n_2 = 1,62397$
3	8,6360	-112,24260	vzduch	$n_3 = 1,00000$
4	3,3528	11,48334	sklo N-K5	$n_4 = 1,52454$
5	0,9652	-6,00710	sklo N-F2	$n_5 = 1,62397$
6	7,6623	-21,25218	vzduch	$n_6 = 1,00000$
7		∞		

Tabulka 4: Parametry mikroskopového objektivu OB_1. Převzato z ([10], str. 147). Druhy použitých skel jsou značeny dle katalogu firmy Schott [11].

dosedací plochy závitu objektivu DP_1 do roviny vzorku RV popisují při dodržení znaménkové konvence vztahy převzaté z ([12], str. 48)

$$\tau_i = \arcsin\left(\frac{x_i - r_i}{r_i} \sin \sigma_i\right), \tag{50}$$

$$\tau_i' = \arcsin\left(\frac{n_{i-1}}{n_i} \sin \tau_i\right), \tag{51}$$

$$\sigma_i' = \sigma_i + \tau_i - \tau_i', \tag{52}$$

$$x_i' = r_i + \frac{r_i \sin \tau_i'}{\sin \sigma_i'}, \tag{53}$$

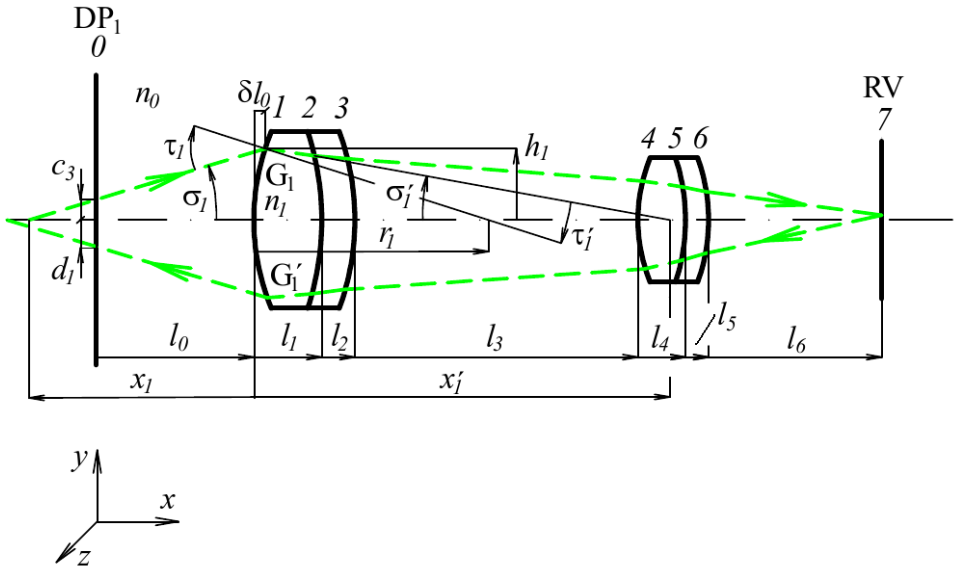
$$h_i = r_i \sin(\sigma_i + \tau_i), \tag{54}$$

$$\delta l_{i-1} = \frac{r_i}{|r_i|}\left(|r_i| - \sqrt{r_i^2 - h_i^2}\right), \tag{55}$$

kde pro plochu $i = 1$ platí

$$\sigma_1 = -(\frac{\pi}{2} - \gamma_4), \tag{56}$$

$$x_1 = \frac{c_3}{\operatorname{tg} \sigma_1} - l_0 \tag{57}$$



Obrázek 12: Chod paprsků objektivem OB_1. Přerušovanou čarou je značen mimoosový paprsek.

a pro plochy $i = 2$ až $i = 6$ platí

$$\sigma_i = \sigma'_{i-1}, \tag{58}$$

$$x_i = x'_{i-1} - l_{i-1}. \tag{59}$$

Pro odraz na rovině vzorku RV ($i = 7$) platí

$$\sigma'_7 = -\sigma'_6, \tag{60}$$

$$x_7 = x'_6 - l_6, \tag{61}$$

$$x'_7 = x_7, \tag{62}$$

$$h_7 = (x'_6 - l'_6)\,\mathrm{tg}\,\sigma_6, \tag{63}$$

$$\delta l_6 = 0. \tag{64}$$

Význam symbolů σ_i, x_i, τ_i, τ'_i, σ'_i, x'_i, h_i a δl_{i-1} je patrný z obrázku 12.

Zpětný chod mimoosového paprsku z roviny vzorku RV k roviny dosedací plochy závitu objektivu DP_1 popisují vztahy

$$\tau_{zi} = \arcsin\left(\frac{x_{zi} - r_{zi}}{r_{zi}} \sin\sigma_{zi}\right), \tag{65}$$

$$\tau'_{zi} = \arcsin\left(\frac{n_i}{n_{i-1}} \sin\tau_{zi}\right), \tag{66}$$

$$\sigma'_{zi} = \sigma_{ti} + \tau_{zi} - \tau'_{zi}, \tag{67}$$

$$x'_{zi} = r_i + \frac{r_i \sin\tau'_{zi}}{\sin\sigma'_{zi}}, \tag{68}$$

$$h_{zi} = r_i \sin(\sigma_{zi} + \tau_{zi}), \tag{69}$$

$$\delta l_{z(i-1)} = \frac{r_i}{|r_i|}\left(|r_i| - \sqrt{r_i^2 - h_{zi}^2}\right), \tag{70}$$

kde pro plochu $i = 6$ platí

$$\sigma_{z6} = \sigma'_7, \tag{71}$$

$$x_{z6} = x_7 + l_6, \tag{72}$$

pro plochy $i = 5$ až $i = 1$ platí

$$\sigma_{zi} = \sigma'_{z(i+1)}, \tag{73}$$
$$x_{zi} = x'_{z(i+1)} + l_i. \tag{74}$$

Význam symbolů σ_{zi}, x_{zi}, τ_{zi}, τ'_{zi}, σ'_{zi}, x'_{zi} a h_{zi} je analogický se symboly popisující chod mimoosového paprsku z roviny dosedací plochy závitu objektivu DP_1 do roviny vzorku RV. Mimoosový paprsek dopadá do roviny dosedací plochy závitu objektivu DP_1 ve výšce

$$d_1 = |x'_1 + l_0| \operatorname{tg} \sigma'_{z1} \tag{75}$$

Souřadnice bodů průsečíků mimoosového paprsku a optických ploch $\mathrm{G_i}\,[X_{\mathrm{G_i}}, Y_{\mathrm{G_i}}]$ a $\mathrm{G'_i}\,[X_{\mathrm{G'_i}}, Y_{\mathrm{G'_i}}]$ jsou

$$\begin{aligned}
&\mathrm{G_0}\ [0,\ c_3]\,,\\
&\mathrm{G_i}\ \left[\sum_{j=0}^{i-1} l_j + \delta l_{i-1},\ h_i\right],\\
&\mathrm{G'_i}\ \left[\sum_{j=0}^{i-1} l_j + \delta l_{z(i-1)},\ h_{zi}\right],\\
&\mathrm{G'_0}\ [0,\ -d_1]\,.
\end{aligned}$$

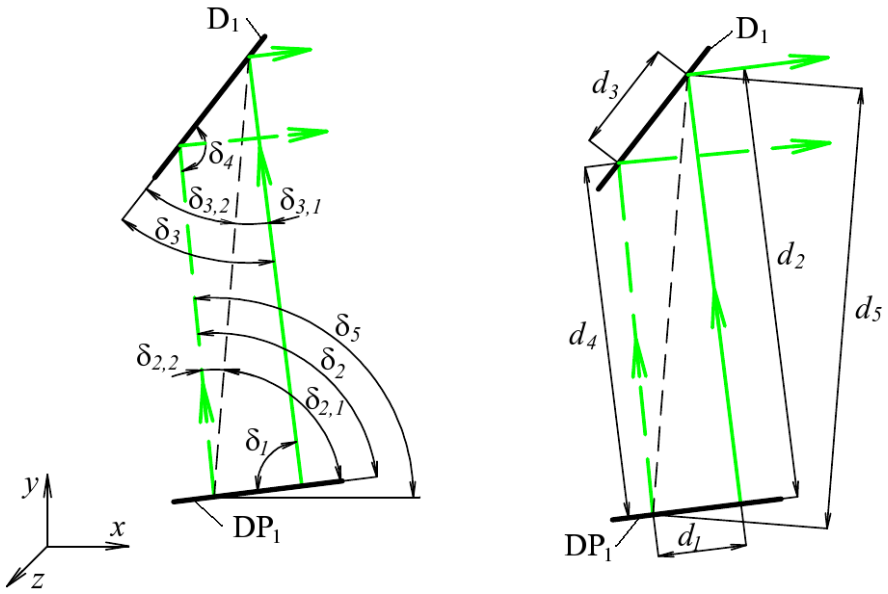
Optická dráha mimoosového paprsku v objektivu OB_1 je dána

$$\begin{aligned}
l_p &= \sum_{j=0}^{i-1} \sqrt{(X_{\mathrm{G_j}} - X_{\mathrm{G_{j+1}}})^2 + (Y_{\mathrm{G_j}} - Y_{\mathrm{G_{j+1}}})^2}\, n_j\\
&+ \sum_{j=0}^{i-1} \sqrt{(X_{\mathrm{G'_j}} - X_{\mathrm{G'_{j+1}}})^2 + (Y_{\mathrm{G'_j}} - Y_{\mathrm{G'_{j+1}}})^2}\, n_j.
\end{aligned} \tag{76}$$

5.3.5 Chod paprsků od předmětového objektivu k předmětovému děliči

Z roviny dosedací plochy závitu objektivu DP_1 se paprsky šíří k děliči D_1, viz obrázek 13. Následujícími vztahy určím vzdálenost d_3 mezi body dopadu osového a mimoosového paprsku na plochu děliče D_1, délku d_4 mimoosového paprsku mezi rovinou dosedací plochy závitu objektivu DP_1 a plochou děliče D_1 a úhel dopadu δ_4 mimoosového paprsku na dělič D_1

$$\delta_2 = \frac{\pi}{2} - |\sigma'_{z1}|, \tag{77}$$
$$\delta_1 = \gamma_3, \tag{78}$$
$$\delta_3 = \beta_4, \tag{79}$$
$$d_2 = c_2, \tag{80}$$
$$d_5 = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 - 2d_1 d_2 \cos \delta_1}, \tag{81}$$
$$\delta_{3,1} = \arcsin\left(\frac{d_1}{d_5} \sin \delta_1\right), \tag{82}$$
$$\delta_{3,2} = \delta_3 - \delta_{3,1}, \tag{83}$$
$$\delta_{2,1} = \pi - \delta_1 - \delta_{3,1}, \tag{84}$$



Obrázek 13: Chod paprsků od roviny dosedací plochy závitu objektivu DP_1 k děliči D_1. Plnou čarou je značen osový paprsek a přerušovanou čarou mimoosový paprsek.

$$\delta_{2,2} = \delta_2 - \delta_{2,1}, \tag{85}$$

$$\delta_4 = \pi - \delta_{2,2} - \delta_{3,2}, \tag{86}$$

$$d_4 = d_5 \frac{\sin \delta_{3,2}}{\sin \delta_4}, \tag{87}$$

$$d_3 = d_5 \frac{\sin \delta_{2,2}}{\sin \delta_4}, \tag{88}$$

kde význam symbolů δ_1, δ_2, δ_3, d_5, $\delta_{3,1}$, $\delta_{2,1}$, $\delta_{2,2}$ je patrný z obrázku 13. Mimoosový paprsek svírá s osou x úhel δ_5 daný vztahem,

$$\delta_5 = \gamma_5 - 2\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_4\right). \tag{89}$$

5.3.6 Chod paprsků od předmětového děliče do roviny interferenčního obrazce

Od odrazné plochy děliče D_1 se oba paprsky šíří do roviny interferenčního obrazce RIO. Tuto skutečnost popisuje obrázek 14. Vypočtu optickou dráhu e_1 osového paprsku, vzdálenost e_2 mezi body dopadu osového a mimoosového paprsku a úhel ε_1 osového paprsku sevřený s osou x a úhel ε_2 mimoosového paprsku sevřený s osou x

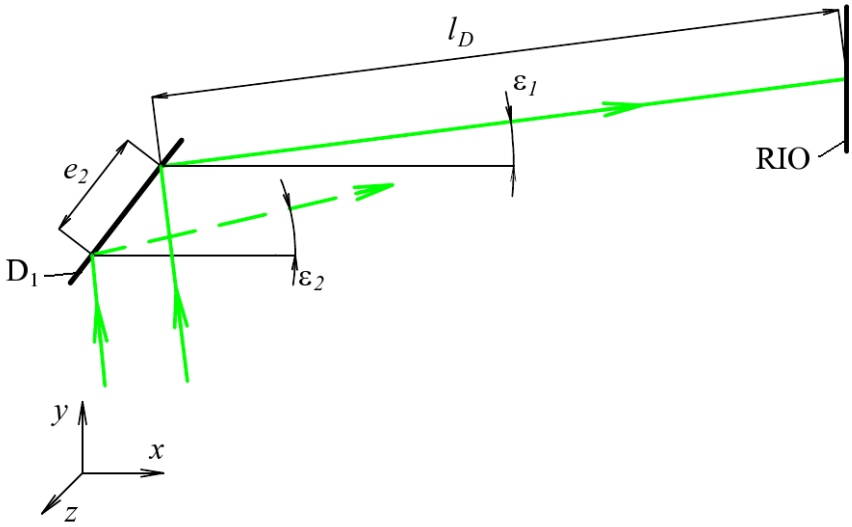
$$e_1 = l_D = a' - d_2, \tag{90}$$

$$e_2 = d_3, \tag{91}$$

$$\varepsilon_1 = \pi - 2\delta_3 - \alpha_8, \tag{92}$$

$$\varepsilon_2 = \delta_5 - 2(\pi - \delta_4). \tag{93}$$

Optická dráha mimoosového paprsku bude vypočtena společně s mimoosovým paprskem přicházejícím z referenční větve interferometru.



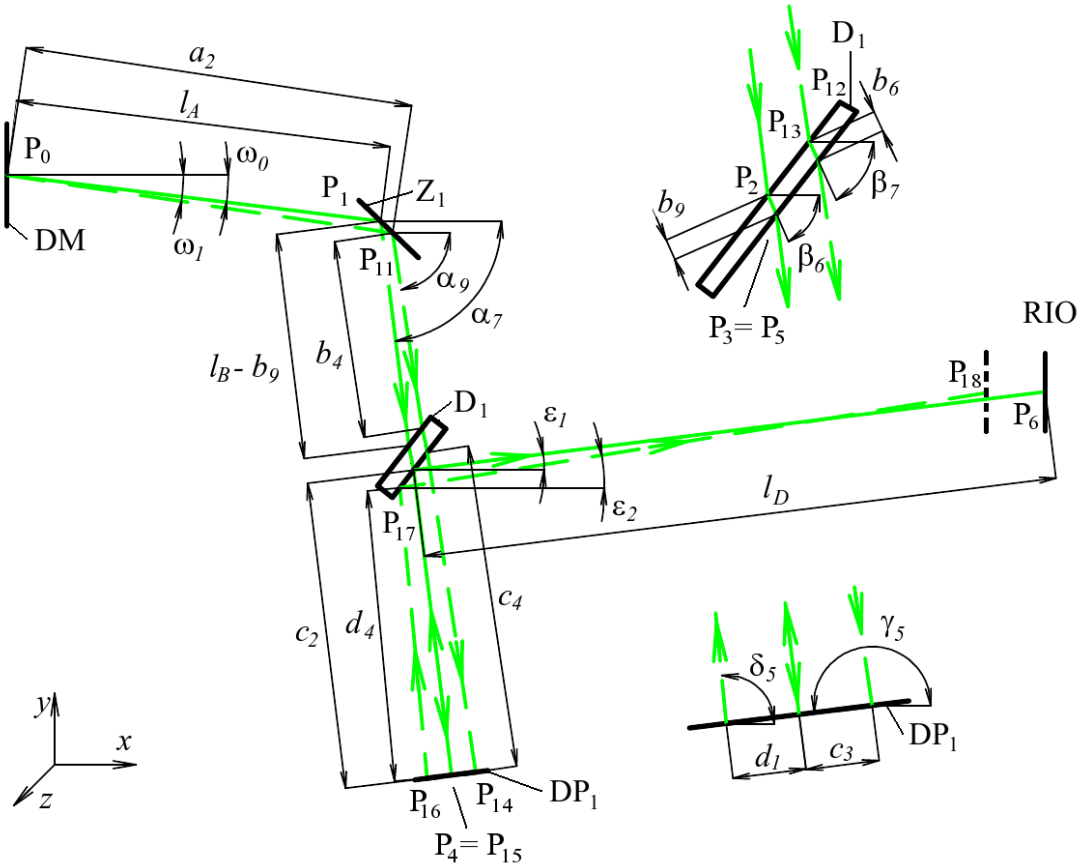
Obrázek 14: Odraz paprsků od děliče D_1 do roviny interferenčního obrazce RIO. Plnou čarou je značen osový paprsek a přerušovanou čarou mimoosový paprsek.

5.3.7 Výpočet poloh optických prvků v předmětové větvi interferometru

V předešlých podkapitolách byly spočteny všechny délky paprsků a jejich orientace vzhledem k souřadnicovému systému. Postupným skládáním průmětů paprsků do os souřadného systému lze sestavit tabulku poloh středů optických prvků a souřadnic průsečíků mimoosového paprsku s optickými prvky, viz tabulka 5 a obrázek 15. Poloha průsečíku P_{18} mimoosového předmětového a referenčního paprsku v blízkosti roviny intereferenčního obrazce RIO bude určena po trasování paprsků referenční větví interferometru v části 5.5, viz obrázek 22.

bod	X_{bodu}	Y_{bodu}
P_0	0	0
P_1	$X_1 = X_0 + l_A \cos(-\omega_0)$	$Y_1 = Y_0 + l_A \sin(-\omega_0)$
P_2	$X_2 = X_1 + (l_B - b_9) \cos(-\alpha_8)$	$Y_2 = Y_1 + (l_B - b_9) \sin(-\alpha_8)$
P_3	$X_3 = X_2 + b_9 \cos(-\beta_6)$	$Y_3 = Y_2 + b_9 \sin(-\beta_6)$
P_4	$X_4 = X_3 + c_2 \cos(-\alpha_8)$	$Y_4 = Y_3 + c_2 \sin(-\alpha_8)$
P_5	$X_5 = X_3$	$Y_5 = Y_3$
P_6	$X_6 = X_5 + l_D \cos \varepsilon_1$	$Y_6 = Y_5 + l_D \sin \varepsilon_1$
P_{11}	$X_{11} = X_0 + a_2 \cos(-\omega_1)$	$Y_{11} = Y_0 + a_2 \sin(-\omega_1)$
P_{12}	$X_{12} = X_{11} + b_4 \cos(-\alpha_9)$	$Y_{12} = Y_{11} + b_4 \sin(-\alpha_9)$
P_{13}	$X_{13} = X_{12} + b_6 \cos(-\beta_7)$	$Y_{13} = Y_{12} + b_6 \sin(-\beta_7)$
P_{14}	$X_{14} = X_{13} + c_4 \cos(-\alpha_9)$	$Y_{14} = Y_{13} + c_4 \sin(-\alpha_9)$
P_{15}	$X_{15} = X_3$	$Y_{15} = Y_3$
P_{16}	$X_{16} = X_{15} + d_1 \cos \gamma_5$	$Y_{16} = Y_{15} + d_1 \sin \gamma_5$
P_{17}	$X_{17} = X_{16} + d_4 \cos \delta_5$	$Y_{17} = Y_{16} + d_4 \sin \delta_5$

Tabulka 5: Výpočet poloh průsečíků paprsků s optickými plochami v předmětové větvi.

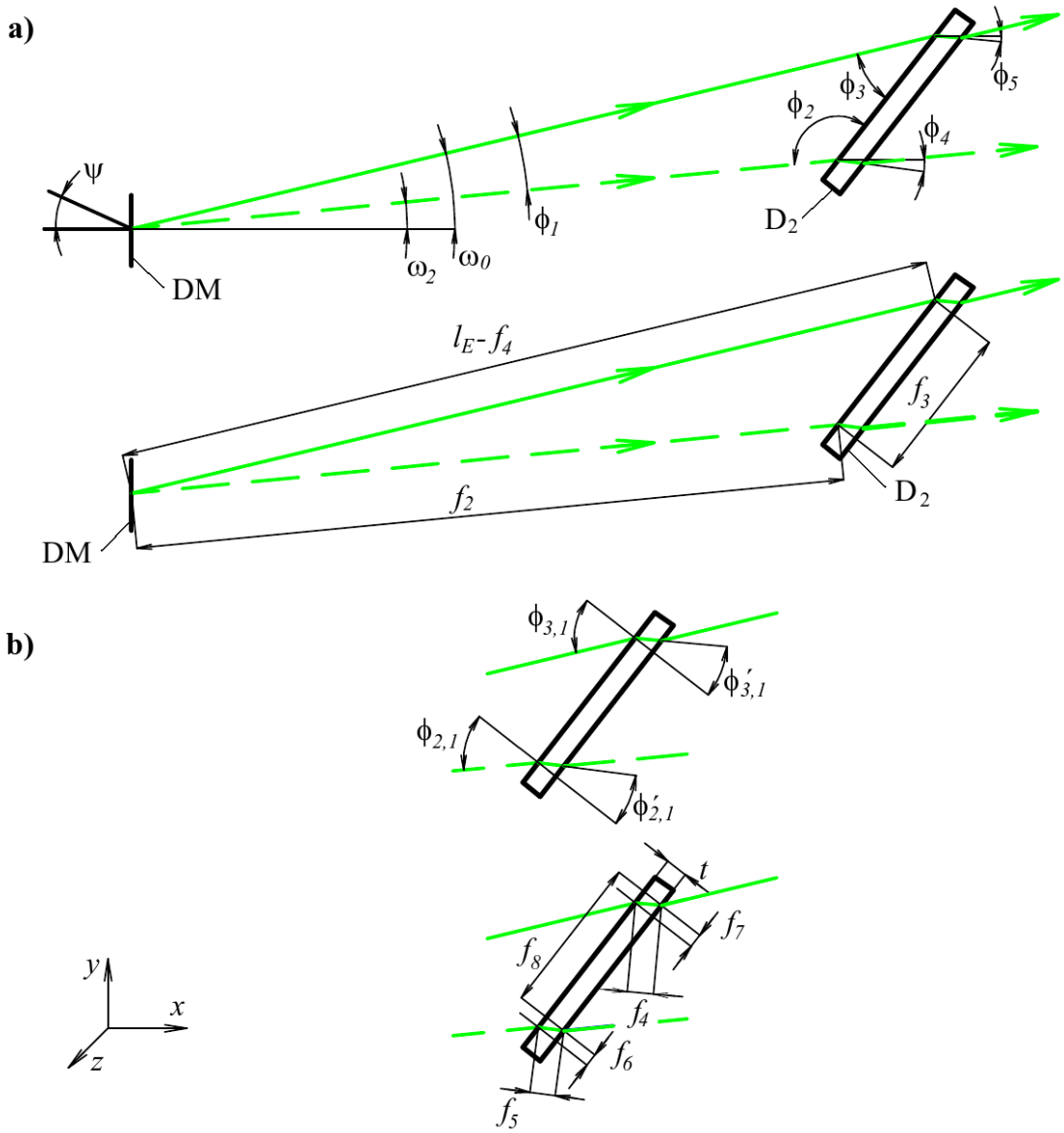


Obrázek 15: Výpočet poloh průsečíků paprsků s optickými plochami v předmětové větvi. Plnou čarou je značen osový paprsek a přerušovanou čarou mimoosový paprsek.

5.4 Trasování jádra mikroskopu referenčními paprsky

5.4.1 Interakce paprsků s difrakční mřížkou a referenčním zrcátkem

Stejně jako u detailu **a** dopadají na difrakční mřížku DM dva význačné paprsky. Pak se ve směru jednotlivých difrakčních řádů šíří osový a mimoosový paprsek. Pro trasování referenční větve nás zajímá prvý difrakční řád, viz obrázek 16. Podobně jako u detailu **b**



Obrázek 16: a) Chod paprsků od difrakční mřížky DM k děliči D_2. b) Šíření paprsků děličem D_2. Plnou čarou je značen osový paprsek a přerušovanou čarou mimoosový paprsek.

vypočítám veškeré zakótované parametry. Určím délky geometrických drah význačných paprsků a vzdálenosti mezi místy dopadu na lámavé plochy. Velikost úhlu ω_2 difraktovaného mimoosového paprsku spočtu podle vztahu

$$\omega_2 = |\arcsin(q\lambda f_m - \sin\psi)|, \tag{94}$$

kde difrakční řád $q = 1$, f_m je prostorová frekvence mřížky, λ je vlnová délka dopadajícího paprsku a úhel ψ_1 je úhel dopadu paprsku na difrakční mřížku.

Dělič D_2 je natočen vůči osovému paprsku o úhel ϕ_3,

$$\phi_3 = \frac{\pi}{4}. \tag{95}$$

Pro neznámé parametry šíření paprsků od difrakční mřížky DM k ploše děliče D_2 platí vztahy

$$\begin{aligned}
\phi_1 &= \omega_0 - \omega_2, && (96)\\
\phi_2 &= \pi - \phi_3 - \phi_1, && (97)\\
\phi_{3,1} &= \frac{\pi}{2} - \phi_3, && (98)\\
\phi'_{3,1} &= \arcsin\left[\frac{\phi_{3,1}}{n_D(\lambda)}\right], && (99)\\
f_4 &= \frac{t}{\cos\phi'_{3,1}}, && (100)\\
f_1 &= l_E - f_4, && (101)\\
f_2 &= f_1\frac{\sin\phi_3}{\sin\phi_2}, && (102)\\
f_3 &= f_1\frac{\sin\phi_1}{\sin\phi_2}, && (103)
\end{aligned}$$

kde úhel ω_0 je úhel difrakce osového paprsku, úhel ω_2 je úhel difrakce mimoosového paprsku, úhel $\phi_{3,1}$ je doplněk úhlu ϕ_3 do $\frac{\pi}{2}$, t je tloušťka děliče D_2 a úhel $\phi'_{3,1}$ je úhel lomu mimoosového paprsku na rozhraní sklo - vzduch. Význam symbolů ϕ_1, ϕ_2, f_4, f_1, f_2, f_3 je patrný z obrázku 16a. Šíření mimoosového paprsku v děliči D_2 popisují vztahy

$$\begin{aligned}
\phi_{2,1} &= \phi_2 - \frac{\pi}{2}, && (104)\\
\phi'_{2,1} &= \arcsin\left[\frac{\phi_{2,1}}{n_D(\lambda)}\right], && (105)\\
f_5 &= \frac{t}{\cos\phi'_{2,1}}, && (106)\\
f_6 &= t\,\mathrm{tg}\,\phi'_{2,1}, && (107)\\
f_7 &= t\,\mathrm{tg}\,\phi'_{3,1}, && (108)\\
f_8 &= f_3 - f_6 + f_7, && (109)
\end{aligned}$$

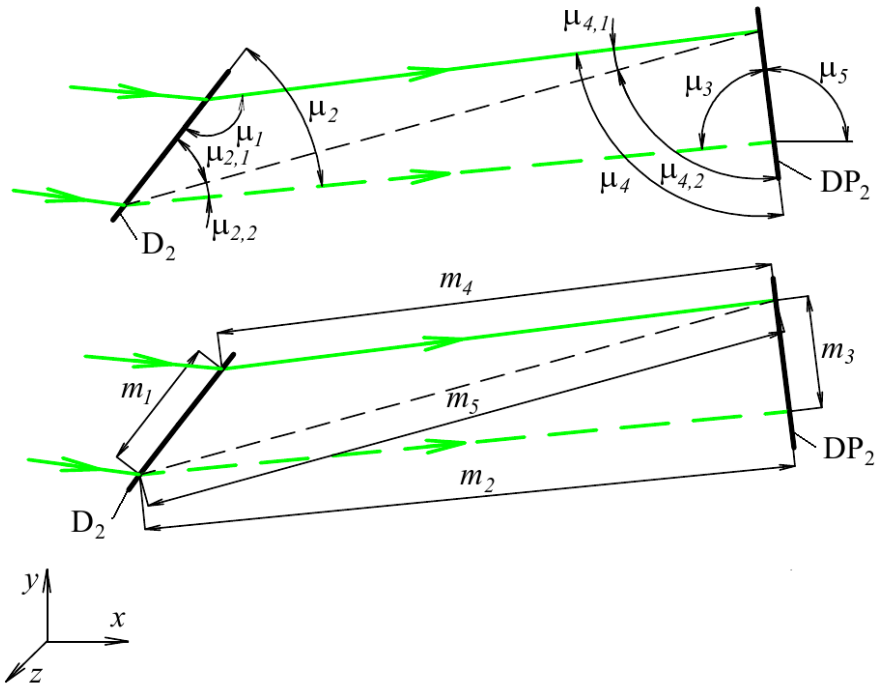
kde význam symbolů $\phi_{2,1}$, $\phi'_{2,1}$, f_5, f_6, f_7, f_8 je patrný z obrázku 16b. Paprsky se po průchodu děličem D_2 šíří pod úhly ϕ_4 a ϕ_5

$$\begin{aligned}
\phi_4 &= \phi_{2,1} - \phi'_{2,1} - \omega_2, && (110)\\
\phi_5 &= \phi_{3,1} - \phi'_{3,1} - \omega_0. && (111)
\end{aligned}$$

5.4.2 Chod paprsků od referenčního děliče k rovině dosedací plochy závitu referenčního objektivu

Chod paprsků je uveden na obrázku 17. Osový paprsek dopadá do roviny dosedací plochy závitu objektivu pod úhlem μ_4, kde

$$\mu_4 = \frac{\pi}{2}. \tag{112}$$



Obrázek 17: Chod paprsku od děliče D_2 k rovině dosedací plochy závitu objektivu DP_2. Plnou čarou je značen osový paprsek a přerušovanou čarou mimoosový paprsek.

Spočtěme všechny zakótované úhlové a délkové parametry z obrázku 17. Chod paprsků od děliče D_2 k rovině dosedací plochy závitu objektivu popisují následující vztahy

$$\mu_1 = \phi_{3,1} + \frac{\pi}{2}, \tag{113}$$

$$\mu_2 = \frac{\pi}{2} - \phi_{2,1}, \tag{114}$$

$$m_4 = z_1 = a' - (l_E - f_4) - n_D(\lambda) f_4, \tag{115}$$

$$m_1 = f_8, \tag{116}$$

$$m_5 = \sqrt{m_1^2 + m_4^2 - 2 m_1 m_4 \cos\gamma_1}, \tag{117}$$

$$\mu_{2,1} = \arcsin\left(\frac{m_4}{m_5}\sin\mu_1\right), \tag{118}$$

$$\mu_{2,2} = \mu_2 - \mu_{2,1}, \tag{119}$$

$$\mu_{4,1} = \pi - \mu_1 - \mu_{2,1}, \tag{120}$$

$$\mu_{4,2} = \mu_4 - \mu_{4,1}, \tag{121}$$

$$\mu_3 = \pi - \mu_{2,2} - \mu_{4,2}, \tag{122}$$

$$m_2 = m_5 \frac{\sin \mu_{4,2}}{\sin \mu_3}, \tag{123}$$

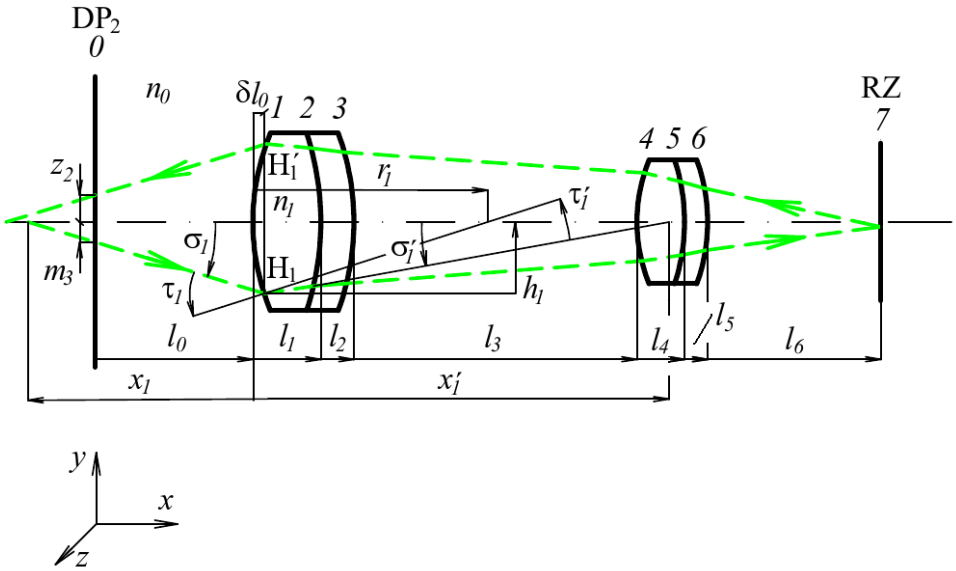
$$m_3 = m_5 \frac{\sin \mu_{2,2}}{\sin \mu_3}, \tag{124}$$

$$\mu_5 = \pi - (\mu_3 - \omega_{1,2}), \tag{125}$$

kde význam symbolů μ_1, μ_2, m_4, m_5, $\mu_{2,1}$, $\mu_{2,2}$, $\mu_{4,1}$, $\mu_{4,2}$, μ_3, m_2, m_3, μ_5 je patrný z obrázku 17.

5.4.3 Chod paprsků referenčním objektivem

Šíření mimoosového paprsku objektivem OB_2 je zobrazeno na obrázku 18. Délkové rozměry objektivu a materiál skel je shodný s objektivem OB_1 a byl uveden v tabulce 4. Chod mimoosového paprsku z roviny dosedací plochy závitu objektivu DP_2 do roviny



Obrázek 18: Chod paprsků objektivem OB_2. Přerušovanou čarou je značen mimoosový paprsek.

referenčního zrcátka RZ popisují vztahy uvedené už v části 5.3.4

$$\tau_i = \arcsin\left(\frac{x_i - r_i}{r_i} \sin \sigma_i\right), \tag{126}$$

$$\tau_i' = \arcsin\left(\frac{n_{i-1}}{n_i} \sin \tau_i\right), \tag{127}$$

$$\sigma_i' = \sigma_i + \tau_i - \tau_i', \tag{128}$$

$$x_i' = r_i + \frac{r_i \sin \tau_i'}{\sin \sigma_i'}, \tag{129}$$

$$h_i = r_i \sin(\sigma_i + \tau_i), \tag{130}$$

$$\delta l_{i-1} = \frac{r_i}{|r_i|}\left(|r_i| - \sqrt{r_i^2 - h_i^2}\right), \tag{131}$$

kde pro plochu $i = 1$ platí

$$\sigma_1 = (\frac{\pi}{2} - \mu_3), \tag{132}$$

$$x_1 = \frac{m_3}{\operatorname{tg} \sigma_1} - l_0 \tag{133}$$

a pro plochy $i = 2$ až $i = 6$ platí

$$\sigma_i = \sigma'_{i-1}, \tag{134}$$
$$x_i = x'_{i-1} - l_{i-1}. \tag{135}$$

Pro odraz na rovině referenčního zrcátka RZ ($i = 7$) platí

$$\sigma'_7 = -\sigma'_6, \tag{136}$$
$$x_7 = x'_6 - l_6, \tag{137}$$
$$x'_7 = x_7, \tag{138}$$
$$h_7 = (x'_6 - l'_6)\,\mathrm{tg}\,\sigma_6, \tag{139}$$
$$\delta l_6 = 0. \tag{140}$$

Význam symbolů σ_i, x_i, τ_i, τ'_i, σ'_i, x'_i, h_i a δl_{i-1} je zřejmý z obrázku 18.

Zpětný chod mimoosového paprsku z roviny referenčního zrcátka RZ k rovině dosedací plochy závitu objektivu DP_2 popisují vztahy také uvedené v části 5.3.4

$$\tau_{zi} = \arcsin\left(\frac{x_{zi} - r_{zi}}{r_{zi}}\sin\sigma_{zi}\right), \tag{141}$$
$$\tau'_{zi} = \arcsin\left(\frac{n_i}{n_{i-1}}\sin\tau_{zi}\right), \tag{142}$$
$$\sigma'_{zi} = \sigma_{ti} + \tau_{zi} - \tau'_{zi}, \tag{143}$$
$$x'_{zi} = r_i + \frac{r_i \sin\tau'_{zi}}{\sin\sigma'_{zi}}, \tag{144}$$
$$h_{zi} = r_i \sin(\sigma_{zi} + \tau_{zi}), \tag{145}$$
$$\delta l_{z(i-1)} = \frac{r_i}{|r_i|}\left(|r_i| - \sqrt{r_i^2 - h_{zi}^2}\right), \tag{146}$$

kde pro plochu $i = 6$ platí

$$\sigma_{z6} = \sigma'_7, \tag{147}$$
$$x_{z6} = x_7 + l_6, \tag{148}$$

pro plochy $i = 5$ až $i = 1$ platí

$$\sigma_{zi} = \sigma'_{z(i+1)}, \tag{149}$$
$$x_{zi} = x'_{z(i+1)} + l_i. \tag{150}$$

Význam symbolů σ_{zi}, x_{zi}, τ_{zi}, τ'_{zi}, σ'_{zi}, x'_{zi} a h_{zi} je analogický se symboly popisující chod mimoosového paprsku z roviny dosedací plochy závitu objektivu DP_2 do roviny referenčního zrcátka RZ. Mimoosový paprsek dopadá do roviny dosedací plochy závitu objektivu DP_2 ve výšce

$$z_2 = |x'_1 + l_0|\,\mathrm{tg}\,\sigma'_{z1} \tag{151}$$

Souřadnice bodů průsečíků mimoosového paprsku a optických ploch $\mathrm{H_i}\,[X_{\mathrm{H_i}}, Y_{\mathrm{H_i}}]$ a $\mathrm{H'_i}\,[X_{\mathrm{H'_i}}, Y_{\mathrm{H'_i}}]$ jsou

$$\mathrm{H}_0\ [0, -m_3],$$

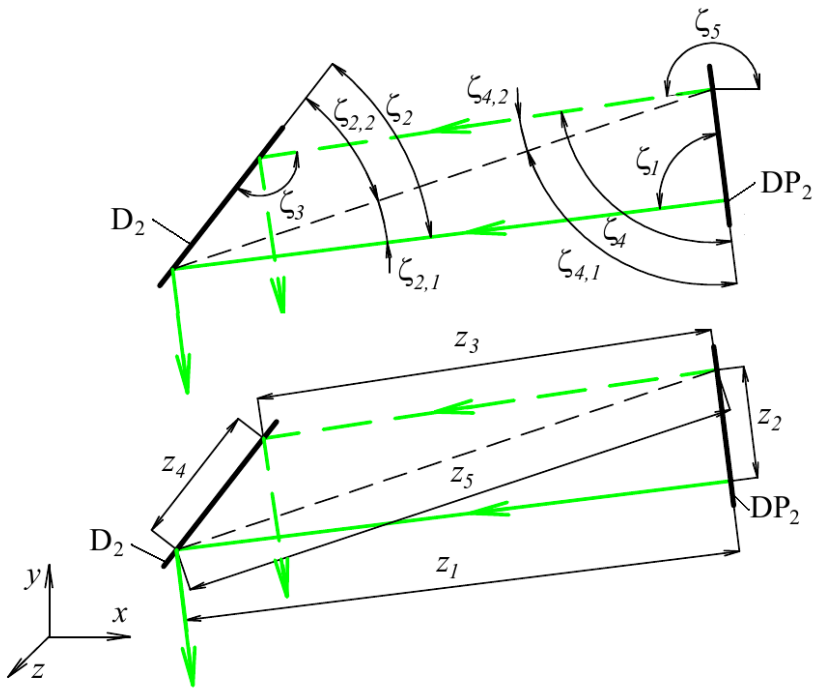
$$
\begin{aligned}
&\mathrm{H_i}\left[\sum_{j=0}^{i-1} l_j + \delta l_{i-1},\, h_i\right],\\
&\mathrm{H'_i}\left[\sum_{j=0}^{i-1} l_j + \delta l_{z(i-1)},\, h_{zi}\right],\\
&\mathrm{H'_0}\,[0,\, z_2]\,.
\end{aligned}
$$

Optické dráha mimoosového paprsku v objektivu $\mathrm{OB_2}$ je dána

$$
\begin{aligned}
l_r &= \sum_{j=0}^{i-1}\sqrt{(X_{\mathrm{H_j}} - X_{\mathrm{H_{j+1}}})^2 + (Y_{\mathrm{H_j}} - Y_{\mathrm{H_{j+1}}})^2}\, n_j\\
&+ \sum_{j=0}^{i-1}\sqrt{(X_{\mathrm{H'_j}} - X_{\mathrm{H'_{j+1}}})^2 + (Y_{\mathrm{H'_j}} - Y_{\mathrm{H'_{j+1}}})^2}\, n_j. \qquad (152)
\end{aligned}
$$

5.4.4 Chod paprsků od roviny dosedací plochy závitu referenčního objektivu k referenčnímu děliči

Od roviny dosedací plochou závitu objektivu $\mathrm{DP_2}$ se paprsky šíří k děliči $\mathrm{D_2}$. Chod paprsků je uveden na obrázku 19. Pro úhel ζ_4 mimoosového paprsku vystupujícího z roviny



Obrázek 19: Chod paprsků od roviny dosedací plochy závitu objektivu $\mathrm{DP_2}$ k děliči $\mathrm{D_1}$. Plnou čarou je značen osový paprsek a přerušovanou čarou mimoosový paprsek.

dosedací plochou závitu objektivu $\mathrm{DP_2}$ platí

$$\zeta_4 = \frac{\pi}{2} - |\sigma'_{z1}|, \qquad (153)$$

Od roviny dosedací plochy závitu objektivu $\mathrm{DP_2}$ se paprsky šíří k ploše děliče $\mathrm{D_2}$, viz obrázek 19. Pak výpočet chodu paprsků popisují níže uvedené vztahy

$$\zeta_1 = \gamma_4, \qquad (154)$$

$$\zeta_2 = \pi - \mu_1, \tag{155}$$
$$z_5 = \sqrt{z_1^2 + z_2^2 - 2z_1 z_2 \cos\zeta_1}, \tag{156}$$
$$\zeta_{2,1} = \arcsin\left(\frac{z_2}{z_5}\sin\zeta_1\right), \tag{157}$$
$$\zeta_{2,2} = \zeta_2 - \zeta_{2,1}, \tag{158}$$
$$\zeta_{4,1} = \pi - \zeta_1 - \zeta_{2,1}, \tag{159}$$
$$\zeta_{4,2} = \zeta_4 - \zeta_{4,1}, \tag{160}$$
$$\zeta_3 = \pi - \zeta_{2,2} - \zeta_{4,2}, \tag{161}$$
$$z_3 = z_5\frac{\sin\zeta_{2,2}}{\sin\zeta_3}, \tag{162}$$
$$z_4 = z_5\frac{\sin\zeta_{4,2}}{\sin\zeta_3}, \tag{163}$$
$$\zeta_5 = \pi - (\zeta_4 - \mu_5), \tag{164}$$

kde význam symbolů ζ_1, ζ_2, z_5, $\zeta_{2,1}$, $\zeta_{2,2}$, $\zeta_{4,1}$, $\zeta_{4,2}$, ζ_3, z_4, ζ_5 je patrný z obrázku 19.

5.4.5 Chod paprsků od referenčního děliče do roviny interferenčního obrazce

Aby byla splněna podmínka vzniku kontrastního interferenčního obrazce stanovená v části 4.2, je nutné vypočítat polohu a natočení zrcátka Z_2. Na obrázku 20 je zobrazen chod paprsků od plochy děliče D_2 přes zrcátko Z_2 do roviny vzniku interferenčního obrazce RIO. K určení polohy zrcátka Z_2 je nutné znát polohu plochy děliče D_2 (bod P_{22}) a polohu interferenčního obrazce RIO (bod P_6). Bod P_6 je vypočten v tabulce 5. Určeme nyní polohu odrazné plochy zrcátka Z_2. Podobně jako u předmětové větve je poloha jednotlivých optických rozhraní spočtena z geometrických délek paprsků a jejich natočení vůči ose x. Jednotlivé význačné polohy jsou uvedeny v tabulce 6.

bod	X_{bodu}	Y_{bodu}
0	0	0
P_{21}	$X_{21} = X_0 + (l_E - f_4)\cos\omega_0$	$Y_{21} = Y_0 + (l_E - f_4)\sin\omega_0$
P_{22}	$X_{22} = X_{21} + f_4\cos(-\phi_5)$	$Y_{22} = Y_{21} + f_4\sin(-\phi_5)$

Tabulka 6: Výpočet poloh průsečíků optických ploch děliče D_2 a mimoosového paprsku v referenční větvi.

Spočtěme vzdálenost o_3 mezi body P_6 a P_{22},

$$o_3 = \sqrt{o_4^2 + o_5^2}, \tag{165}$$

kde o_4 je rozdíl souřadnic bodů P_6 a P_{22}, ve směru osy x a o_5 je rozdíl souřadnic bodů P_6 a P_{22}, ve směru osy y. Z ortogonality souřadného systému plyne, že úhel $\Omega_3 = \frac{\pi}{2}$. Zbývající úhly v trojúhelníku daného stranami o_3, o_4, o_5 jsou

$$\Omega_{4,1} = \operatorname{arctg}\frac{o_4}{o_5}, \tag{166}$$
$$\Omega_{2,1} = \pi - \Omega_3 - \Omega_{4,1}. \tag{167}$$

Úhel mezi paprskem odraženým od děliče D_2 a osou x je

$$\Omega_2 = \pi - 2\phi_3 - \omega_0. \tag{168}$$

Spočtěme délky osových paprsků o_1 a o_2. Řešme následující soustavu rovnic

$$\begin{aligned} o_1 + o_2 &= a' - z_1, & (169)\\ o_2 &= \sqrt{o_1^2 + o_3^2 - 2o_1 o_3 \cos\Omega_{2,2}}, & (170) \end{aligned}$$

kde úhel $\Omega_{2,2} = \Omega_2 - \Omega_{2,1}$. Délka $l_G = o_1$ a délka $l_H = o_2$. Dále úhly popisující chod osového paprsku jsou

$$\begin{aligned} \Omega_{4,2} &= \arcsin\left(\frac{o_1 \sin\Omega_{2,2}}{o_2}\right), & (171)\\ \Omega_4 &= \Omega_{4,1} + \Omega_{4,2}, & (172)\\ \Omega_1 &= \pi - \Omega_{4,2} + \Omega_{2,2}, & (173)\\ \Omega_9 &= \frac{\pi - \Omega_1}{2}, & (174) \end{aligned}$$

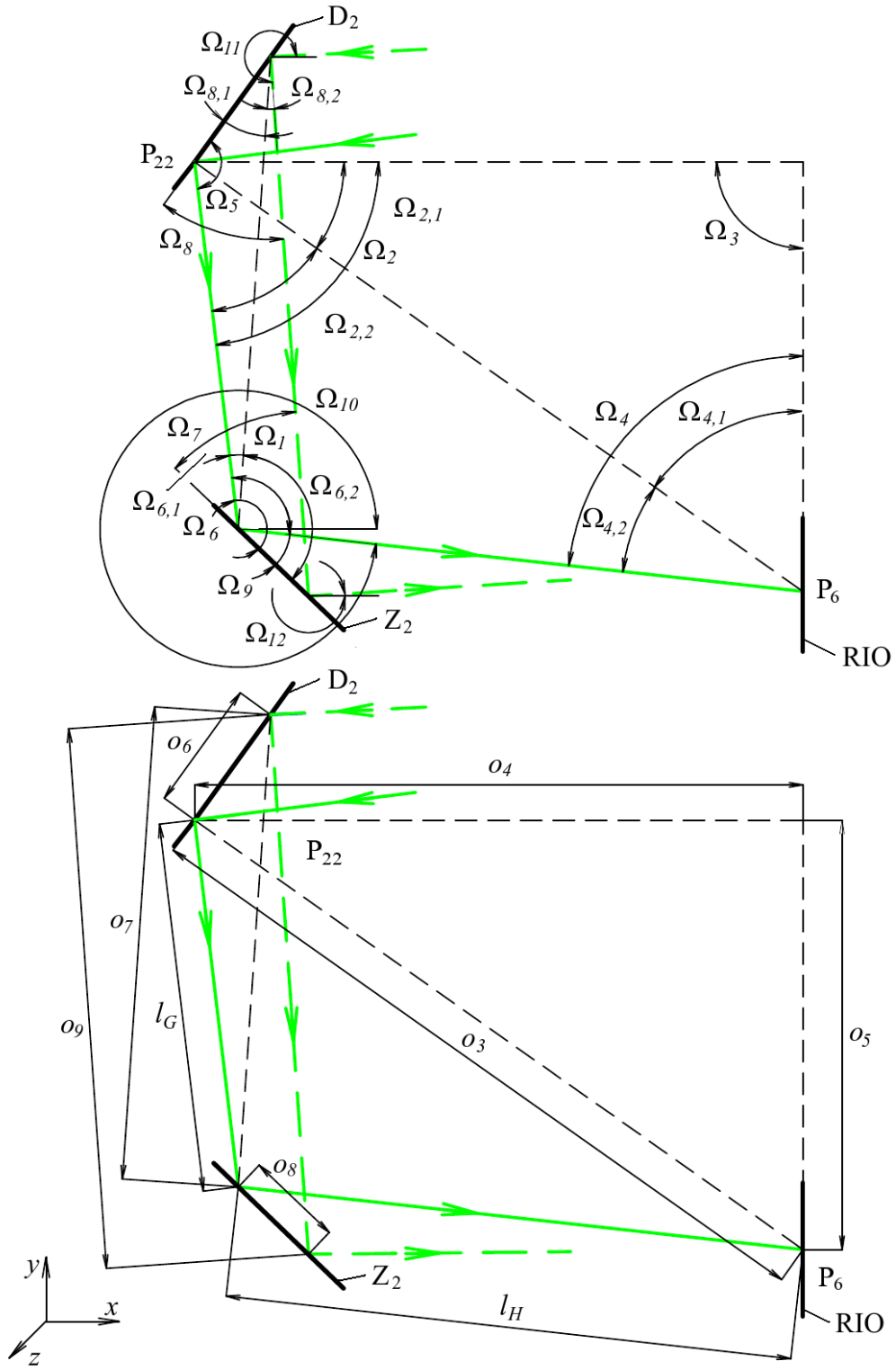
kde význam symbolů $\Omega_{4,2}$, Ω_4, Ω_1, Ω_9 je patrný z obrázku 20. Podobně jako v předešlých detailech vypočteme chod mimoosového paprsku. Chod paprsků odražených od odrazné roviny děliče D_2 na zrcátko Z_2 popisují následující vztahy

$$\begin{aligned} \Omega_5 &= \pi - \phi_3, & (175)\\ \Omega_6 &= \Omega_1 + \Omega_9, & (176)\\ \Omega_8 &= \pi - \nu_3, & (177)\\ o_6 &= z_4, & (178)\\ o_7 &= \sqrt{o_1^2 + o_6^2 - 2o_1 o_6 \cos\Omega_5}, & (179)\\ \Omega_{8,1} &= \arcsin\left(\frac{o_1}{o_7}\sin\Omega_5\right), & (180)\\ \Omega_{8,2} &= \Omega_8 - \Omega_{8,1}, & (181)\\ \Omega_{6,1} &= \pi - \Omega_5 - \Omega_{8,1}, & (182)\\ \Omega_{6,2} &= \Omega_6 - \Omega_{6,1}, & (183)\\ \Omega_7 &= \pi - \Omega_{6,2} - \Omega_{8,2}, & (184)\\ o_8 &= o_7\frac{\sin\Omega_{8,2}}{\sin\Omega_7}, & (185)\\ o_9 &= o_7\frac{\sin\Omega_{6,2}}{\sin\Omega_7}, & (186) \end{aligned}$$

kde význam symbolů Ω_5, Ω_6, Ω_8, o_6, o_7, $\Omega_{8,1}$, $\Omega_{8,2}$, $\Omega_{6,1}$, $\Omega_{6,2}$, Ω_7, o_8, o_9 je patrný z obrázku 20. Oba paprsky se od zrcátka Z_2 šíří do roviny interferenčního obrazce RIO. Následující vztahy popisují úhly odražených paprsků vzhledem k ose x při šíření paprsků od odrazné plochy děliče D_2 do roviny interferenčního obrazce RIO

$$\begin{aligned} \Omega_{10} &= 2\pi + 2\Omega_9 - \Omega_2, & (187)\\ \Omega_{11} &= \zeta_5 + 2\Omega_8, & (188)\\ \Omega_{12} &= \Omega_{11} + 2\Omega_7, & (189) \end{aligned}$$

kde význam symbolů Ω_{10}, Ω_{11}, Ω_{12} je patrný z obrázku 20.



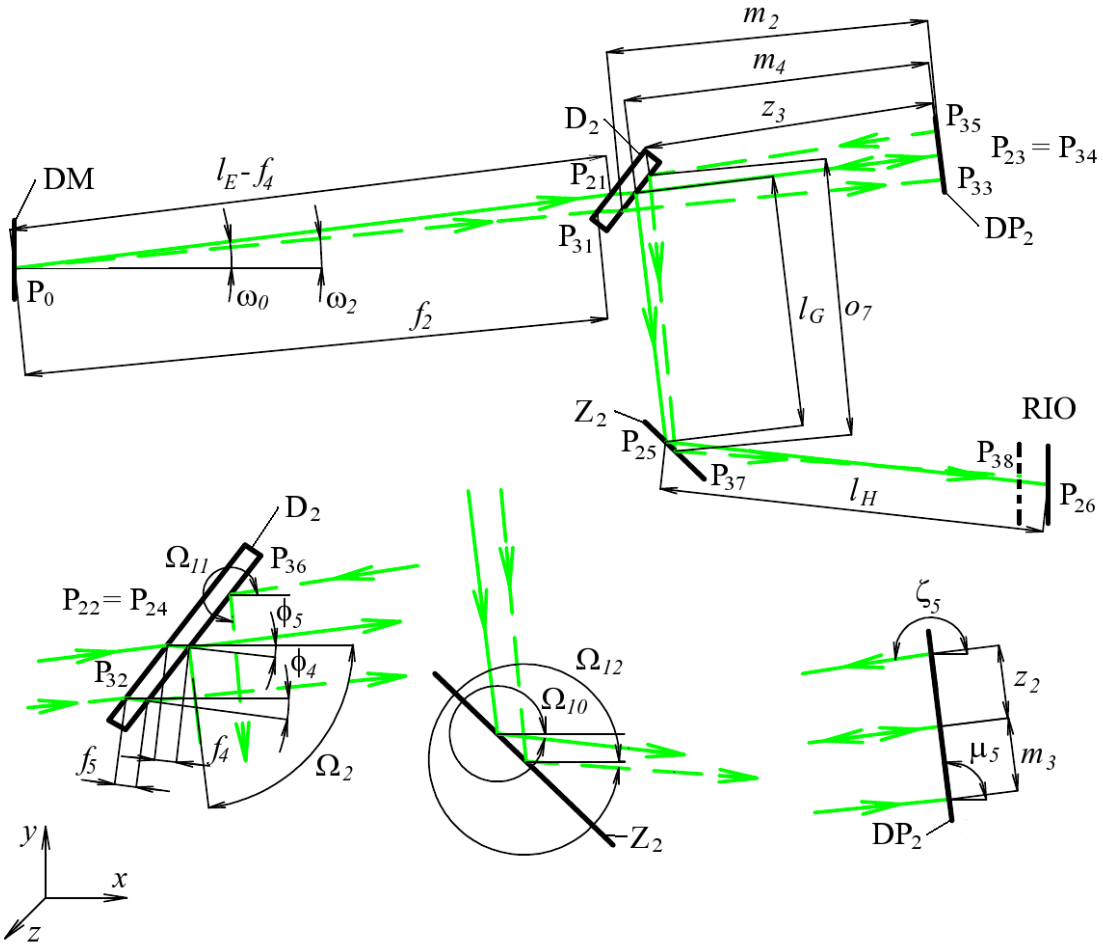
Obrázek 20: Chod paprsků od děliče D_2 k zrcátku Z_2 a rovině interferenčního obrazce RIO. Plnou čarou je značen osový paprsek a přerušovanou čarou mimoosový paprsek.

5.4.6 Výpočet poloh jednotlivých optických prvků v referenční větvi

V části 5.4.4 byla v tabulce 6 uvedena poloha průsečíků osového paprsku s děličem D_2. Doplňme tabulku 6 o polohy středů zbývajících optických prvků a bodů průsečíků mimoosového paprsku s referenčními optickými prvky, viz tabulka 7 a obrázek 21.

bod	X_{bodu}	Y_{bodu}
P_0	0	0
P_{21}	$X_{21} = X_0 + (l_E - f_4)\cos\omega_0$	$Y_{21} = Y_0 + (l_E - f_4)\sin\omega_0$
P_{22}	$X_{22} = X_{21} + f_4\cos(-\phi_5)$	$Y_{22} = Y_{21} + f_4\sin(-\phi_5)$
P_{23}	$X_{23} = X_{22} + m_4\cos\omega_0$	$Y_{23} = Y_{22} + m_4\sin\omega_0$
P_{24}	$X_{24} = X_{22}$	$Y_{24} = Y_{22}$
P_{25}	$X_{25} = X_{23} + l_G\cos(-\Omega_2)$	$Y_{25} = Y_{23} + l_G\sin(-\Omega_2)$
P_{26}	$X_{26} = X_{25} + l_H\cos\Omega_{10}$	$Y_{26} = Y_{25} + l_H\sin\Omega_{10}$
P_{31}	$X_{31} = X_0 + f_2\cos\omega_2$	$Y_{31} = Y_0 + f_2\sin\omega_2$
P_{32}	$X_{32} = X_{31} + f_5\cos(-\phi_4)$	$Y_{32} = Y_{31} + f_5\sin(-\phi_4)$
P_{33}	$X_{33} = X_{32} + m_2\cos\omega_{1,2}$	$Y_{33} = Y_{32} + m_2\sin\omega_{1,2}$
P_{34}	$X_{34} = X_{23}$	$Y_{34} = Y_{33}$
P_{35}	$X_{35} = X_{34} + z_2\cos\mu_5$	$Y_{35} = Y_3 + z_2\sin\mu_5$
P_{36}	$X_{36} = X_{35} + z_3\cos\zeta_5$	$Y_{36} = Y_{35} + z_3\sin\zeta_5$
P_{37}	$X_{37} = X_{36} + o_9\cos\Omega_{11}$	$Y_{37} = Y_{36} + o_9\sin\Omega_{11}$

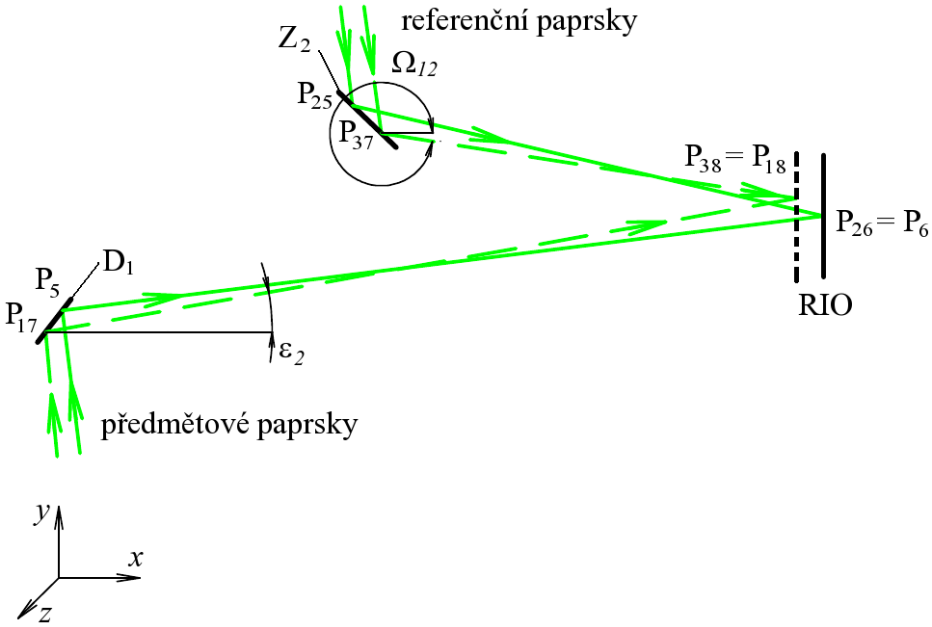
Tabulka 7: Výpočet poloh průsečíků paprsků s optickými plochami v referenční větvi.



Obrázek 21: Výpočet poloh průsečíků paprsků s optickými plochami v referenční větvi. Plnou čarou je značen osový paprsek a přerušovanou čarou mimoosový paprsek.

5.5 Výpočet polohy průsečíku mimoosových paprsků

Mimoosové paprsky se protínají blízko výstupní roviny interferenčního obrazce RIO, viz obrázek 22. Jak vyplývá z obrázku 22, vychází mimoosový paprsek předmětové větve z bodu P_{17} pod úhlem ε_2. Mimoosový paprsek referenční větve vychází z bodu P_{37} pod úhlem Ω_{12}. Pro oba paprsky vypočítám jejich jednotkové vektory $\overrightarrow{i_p}$ a $\overrightarrow{i_r}$.



Obrázek 22: Výpočet polohy průsečíku mimoosového předmětového a referenčního paprsku. Plnou čarou je značen osový paprsek a přerušovanou čarou mimoosový paprsek.

$$\overrightarrow{i_p} = (\cos\varepsilon_2, \sin\varepsilon_2), \tag{190}$$

$$\overrightarrow{i_r} = (\cos\Omega_{12}, \sin\Omega_{12}). \tag{191}$$

Pro souřadnice průsečíku mimoosového referenčního a predmětového paprsku platí následující soustava rovnic

$$X_{18} = X_{38} = X_{17} + t\, i_{px} = X_{37} + u\, i_{rx}, \tag{192}$$

$$Y_{18} = Y_{38} = Y_{17} + t\, i_{ry} = Y_{37} + u\, i_{ry}. \tag{193}$$

Po nalezení neznámých parametrů t a u získáme souřadnice bodu P_{38}. K výpočtu rozdílu optických drah mimoosových paprsků platí

$$\Delta L = L_r - L_p, \tag{194}$$

kde délky L_r a L_p jsou délky mimoosových paprsků,

$$L_r = f_2 + f_5 n_D(\lambda) + m_2 + l_r + z_3 + o_9 + \sqrt{(X_{18} - X_{37})^2 + (Y_{18} - Y_{37})^2}, \tag{195}$$

$$L_p = a_2 + b_4 + b_6 n_D(\lambda) + c_4 + l_p + d_4 + \sqrt{(X_{18} - X_{17})^2 + (Y_{18} - Y_{17})^2}. \tag{196}$$

Výsledky trasování mimoosového paprsku jsou uvedeny v grafech na obrázcích 39 a 40 v kapitole 6.

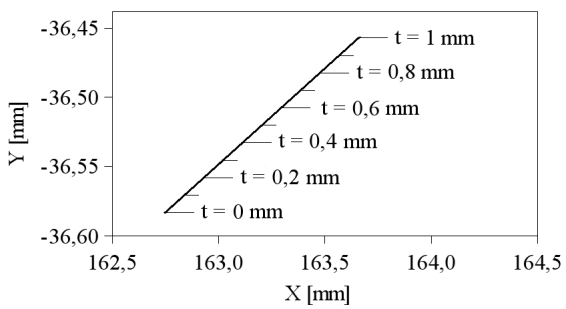
5.6 Výsledky analýzy modelu v programu Mathcad

Popsaný postup trasování v Mathcadu je výhodný, protože po změně jakéhokoliv vstupního parametru se okamžitě celý model přepočítá a je vždy zaručen nulový rozdíl optických drah osových paprsků. Vstupními parametry jsou prostorová frekvence mřížky f_m, tubusová délka a' objektivů OB_1 a OB_2, vlnová délka osového paprsku λ_2, délkové parametry l_A, l_B, l_E, tloušťka t, materiál a index lomu n_D děličů D_1 a D_2. Volba vstupních parametrů je uvedena v tabulce 8 s ohledem na použité mikroskopové objektivy OB_1 a OB_2, viz tabulka 1. Výpočet uvedených grafů je proveden pomocí nadstavbového programu

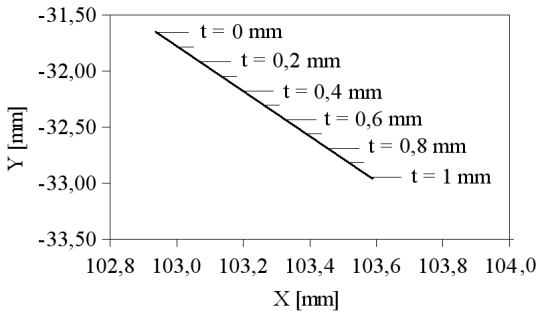
parametr	hodnota
prostorová frekvence f_m difrakční mřížky DM	150 mm^{-1}
tubusová délka a' objektivů OB_1 a OB_2	150 mm
vlnová délka λ_2	547 nm
délka l_A	60 mm
délka l_B	40 mm
délka l_E	100 mm
tloušťka t děličů D_1 a D_2	0...1 mm
materiál děličů D_1 a D_2	N-BK7
index lomu n_D děličů D_1 a D_2	1,5187

Tabulka 8: Volba vstupních parametrů.

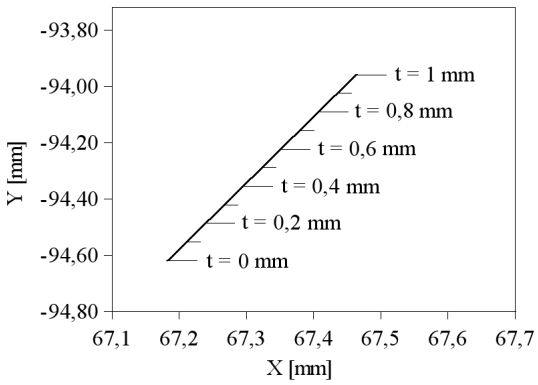
Mathcadu, programem MathConnex, dovolujícího postupné změny vstupních parametrů a automatické generování požadovaných výstupních hodnot. Na obrázku 23 je uveden graf vyjadřující závislost polohy středu interferenčního obrazce RIO v závislosti na tloušťkách děličů t. Na obrázku 24 je uveden graf vyjadřující závislost polohy zrcátka Z_2 v závislosti na tloušťkách děličů t. Podobně lze generovat graf závislosti polohy roviny dosedací plochy závitu objektivu DP_1, viz obrázek 25, a polohy roviny dosedací plochy závitu objektivu DP_2, viz obrázek 26, na změně tloušťky děličů t. V tabulce 9 jsou uvedeny polohy optických prvků pro zvolenou tloušťku děličů $t = 0,17$ mm.



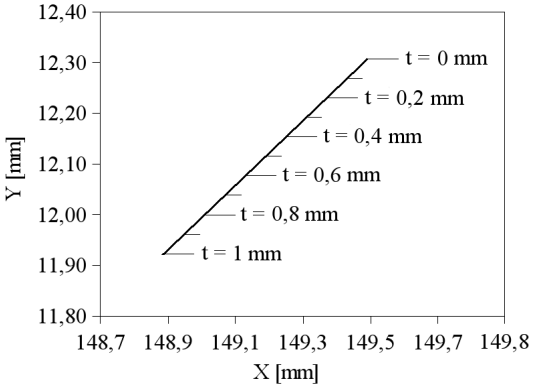
Obrázek 23: Poloha středu interferenčního obrazce RIO v závislosti na tloušťce děličů t.



Obrázek 24: Výpočet polohy zrcátka Z_2 v závislosti na tloušťce děličů t.



Obrázek 25: Výpočet polohy roviny dosedací plochy závitu objektivu OB_1 v závislosti na tloušťce děličů t.



Obrázek 26: Výpočet polohy roviny dosedací plochy závitu objektivu OB_2 v závislosti na tloušťce děličů t.

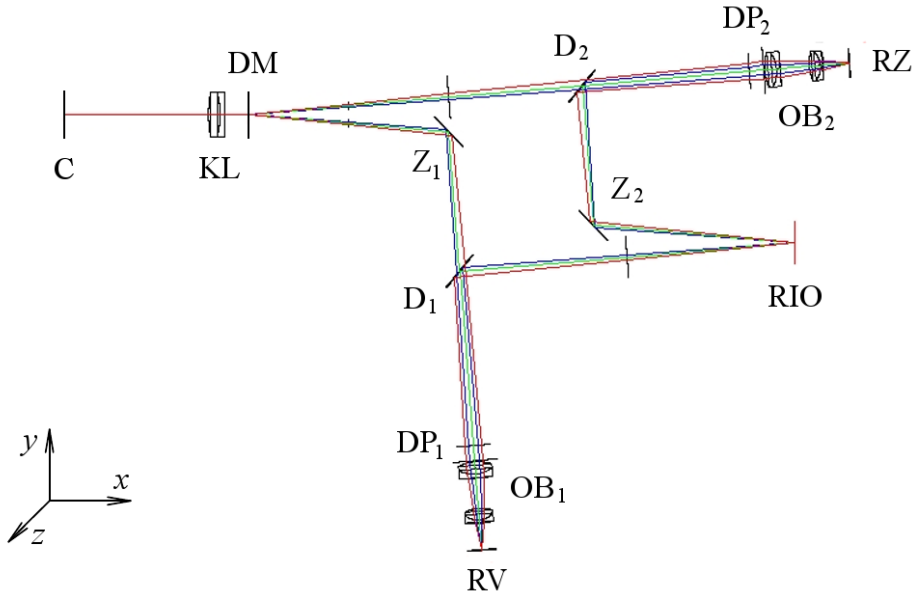
souřadnice	X [mm]	Y [mm]	natočení vůči ose x [°]
difrakční mřížka DM	0,0000	0,0000	90,00
zrcátko Z_1	59,7977	-4,9230	226,15
dělič D_1	63,0639	-44,5966	142,06
objektiv OB_1	67,2301	-94,5072	97,07
dělič D_2	99,5702	8,1973	142,06
objektiv OB_2	149,3913	12,2419	187,07
zrcátko Z_2	103,0540	-31,8812	46,15
rovina interferenčního obrazce RIO	162,8974	-36,5617	90,00

Tabulka 9: Polohy středů optických prvků.

5.7 Výsledky analýzy modelu v programu Zemax

V následující části jsou uvedeny výsledky trasování modelu mikroskopu vytvořeného v Zemaxu. Určím parametry osvětlovací soustavy, uvedu důsledky vlivu optických aberací na chod paprsků mikroskopem, ověřím achromatičnost jádra mikroskopu a určím minimální rozměry difrakční mřížky DM, zrcátek Z_1 a Z_2 a děličů D_1 a D_2.

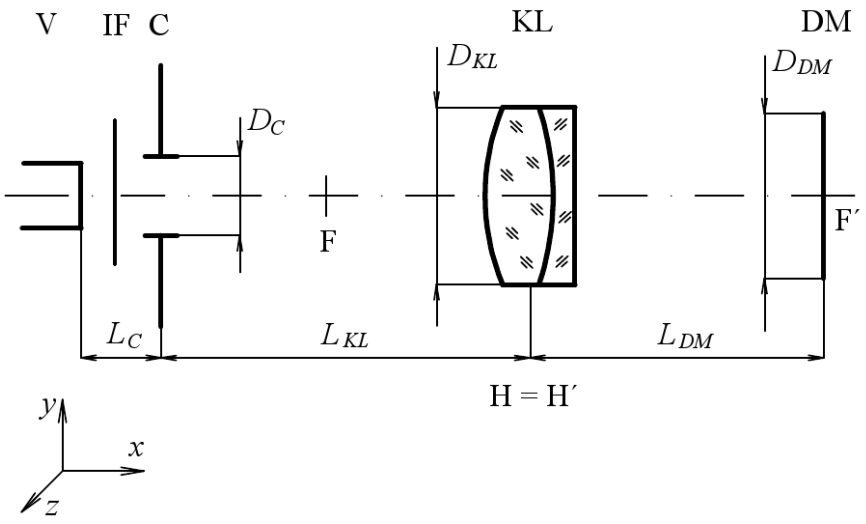
Model vytvořený v programu Zemax jsem upravil díky znalosti osových vzdáleností mezi optickými prvky zjištěnými z modelu v Mathcadu. Poloha a natočení optických prvků v Zemaxu je optimalizována také pro vlnovou délku λ_2. Do modelu jsem vložil kolektor osvětlovače (ohnisková vzdálenost $f' = 50$ mm, zvětšení $Z = 3,9$), plošný zdroj PZ tvořený vícemodovým optickým vláknem a clonou, viz obrázek 27. Poloha vícemodového optického vlákna, clony a kolektoru vůči difrakční mřížce je zobrazena na obrázku 28 a číselné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 10. Mezi clonu a konec vícemodového optického vlákna je vložen interferenční filtr IF. Vzdálenost L_C je tedy volena s ohledem na návrh mechanického posuvu pro výměnu interferenčních filtrů. Použité optické prvky jsou upřesněny v části 7.7 společně s konstrukčním návrhem tubusu osvětlovače.



Obrázek 27: Pohled na model mikroskopu vytvořený v Zemaxu. C - clona plošného zdroje, KL - kolektor, DM - difrakční mřížka, DP_1 - rovina dosedací plochy závitu předmětového mikroskopového objektivu, DP_2 - rovina dosedací plochy závitu referenčního mikroskopového objektivu, OB_1 - předmětový mikroskopový objektiv, OB_2 - referenční mikroskopový objektiv, Z_1 a Z_2 - zrcátka, D_1 a D_2 - planparalelní děliče, RZ - rovina referenčního zrcátka, RV - rovina vzorku, RIO - rovina interferenčního obrazce.

parametr	hodnota délky [mm]
L_C	55,0
L_{KL}	65,9
L_{DM}	50,0

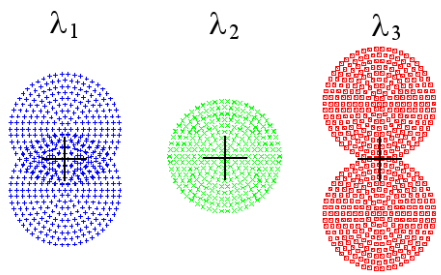
Tabulka 10: Tabulka délkových parametrů osvětlovací soustavy difrakční mřížky DM.



Obrázek 28: Schéma osvětlovací soustavy difrakční mřížky DM. V - výstupní plocha optického vlákna, IF - interferenční filtr, C - clona plošného zdroje, KL - kolektor, DM - difrakční mřížka, L_C - vzdálenost clony a konce optického vlákna, D_C - průměr clony, L_{KL} - vzdálenost clony a kolektoru KL, D_{KL} - průměr kolektoru, L_{DM} - vzdálenost kolektoru a difrakční mřížky, D_{DM} - průměr difrakční mřížky.

Sestavu mikroskopu jsem také trasoval paprsky o vlnových délkách $\lambda_1 = 486,1$ nm (Fraunhoferova čára F) a $\lambda_3 = 656,3$ nm (Fraunhoferova čára C), simulující spektrální rozsah polychromatického zdroje světla.

Z trasování vyplývá, že pro vlnovou délku λ_2 kolektor osvětlovače zobrazuje clonu plošného zdroje do středu ohniskové roviny mikroskopových objektivů OB_1 a OB_2 . Zmenšováním průměru apertury clony plošného zdroje D_C se snižuje počet konfokálních kanálů a rozsah vlnových délek, které přispívají k tvorbě interferenčního obrazce. Tím pádem se snižuje osové rozlišení mikroskopu. Aby platilo, že světlo vlnové délky přispívá k tvorbě interferenčního obrazce musí se překrývat obrazy clony zdroje v ohniskových rovinách mikroskopových objektivů OB_1 a OB_2, viz obrázek 29. V tabulce 11 jsou uvedeny vypočtené průměry apertury clony D_C pro zvolený rozsah interferujících vlnových délek. V tabulce 11 jsou také uvedeny koherenční délky L_k pro spektrální pološířky interferenčních filtrů vypočtené ze vztahu (3).



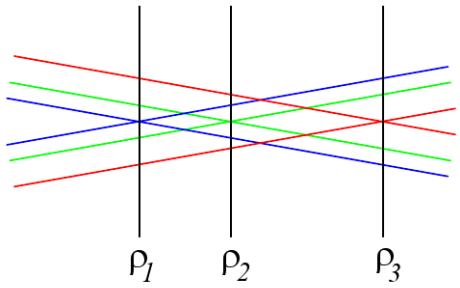
Obrázek 29: Překrývající se obrazy clony plošného zdroje C v ohniskových rovinách mikroskopových objektivů OB_1 a OB_2.

V části 5.1 jsem se podrobně zabýval vlivem optických aberací reálných optických prvků na zobrazení bodu mřížky DM do roviny vzorku RV a referenčního zrcátka RZ.

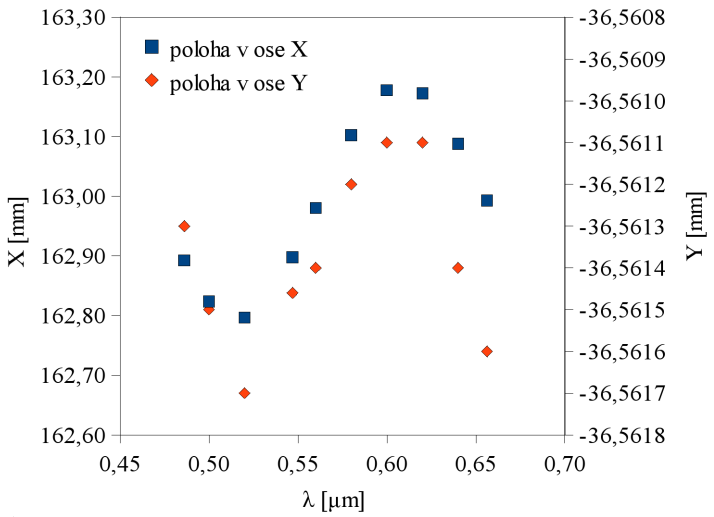
interferující vlnové délky [nm], spektrální pološířky interferenčních filtrů [nm]	průměr clony D_C [mm]	L_k [μm]
547 ± 20	0,3	14,9
547 ± 40	0,6	7,5
547 ± 60	0,9	5,0
547 ± 80	1,2	3,7
547 ± 100	1,5	3,0

Tabulka 11: Tabulka průměrů clony D_C a koherenčních délek L_k.

Důsledkem vlivu aberací je, že paprsky vycházející ze středu difrakční mřížky DM se neprotínají v jednom bodě roviny vzorku VZ (referenčního zrcátka RZ). Paprsky se v rovinách vzorku VZ a referenčního zrcátka RZ odrážejí a prochází objektivy OB_1 a OB_2 do roviny interferenčního obrazce RIO. Vlnovým délkám λ_1, λ_2 a λ_3 jsou jednoznačně přiřazeny roviny interference ρ_1, ρ_2 a ρ_3 dané průsečíkem interferujících osových paprsků, viz obrázky 30 a 31.



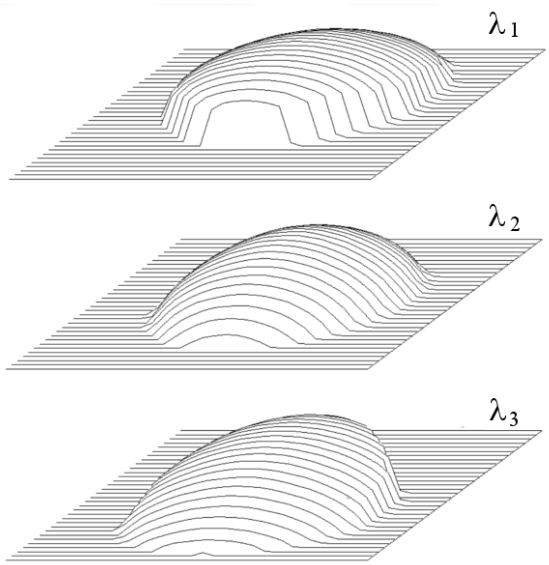
Obrázek 30: Náhled na rovinu interference.



Obrázek 31: Graf polohy průsečíku osových paprsků o vlnových délkách λ.

V rovině interferenčního obrazce RIO se sbíhají vlny jednotlivých vlnových délek. Položme výstupní plochu optického vlákna V do vzdálenosti L_C od clony a zvolme průměr

clony $D_C = 1,6$ mm. Pak paprsky do vlnové délky λ_3 ještě přispívají ke tvorbě interferenčního obrazce. Na obrázku 32 jsou zobrazeny vlnoplochy vlnových délek λ_1, λ_2 a λ_3.



Obrázek 32: Vlnoplochy v rovině interference.

Jak vyplývá z ([1], str. 26), je nosná frekvence interferenčních proužků f dána pouze frekvencí čar difrakční mřížky f_m,

$$f = 2f_m. \tag{197}$$

Ověřme, zda tento vztah platí i pro navržený mikroskop, a zda je návrh mikroskopu achromatický. Spočtěme šířku proužku pro rozsah vlnových délek λ_1 až λ_3. Vlnoplochu můžeme požadovat v blízkosti optické osy za rovinnou. Rovinnou vlnu předmětové větve popisuje vztah

$$u_p(\overrightarrow{r}, t) = A_p exp\left[-i(\omega_p t - \overrightarrow{k_p}\overrightarrow{r})\right], \tag{198}$$

kde A_p je amplituda předmětové vlny, ω_p je úhlová frekvence kmitů, $\overrightarrow{k_p}$ je vlnový vektor a $\overrightarrow{r}$ je polohový vektor. Referenční větví šířící se vlna je popsána vztahem

$$u_r(\overrightarrow{r}, t) = A_r exp\left[-i(\omega_r t - \overrightarrow{k_r}\overrightarrow{r})\right]. \tag{199}$$

Rozdělení intenzity v rovině interferenčního obrazce je podle ([7], str. 259) dáno vztahem

$$I = I_p + I_r + 2\sqrt{I_p I_r}\cos\Delta\phi, \tag{200}$$

kde intenzity I_p a I_r jsou rovny $I_p = A_p^2$, $I_r = A_r^2$ a $\Delta\phi$ je rozdíl fáze. Pro rozdíl fáze platí

$$\Delta\phi = \overrightarrow{\kappa}\overrightarrow{r} = 2\pi s, \tag{201}$$

kde $\overrightarrow{\kappa} = \overrightarrow{k_p} - \overrightarrow{k_r}$ a $s = 0, 1, 2, 3 \ldots$ je řád interference. Pak vzdálenost interferenčního proužku ve směru vektoru $\overrightarrow{\kappa}$ je r_s,

$$r_s = \frac{2\pi s}{|\overrightarrow{\kappa}|}, \tag{202}$$

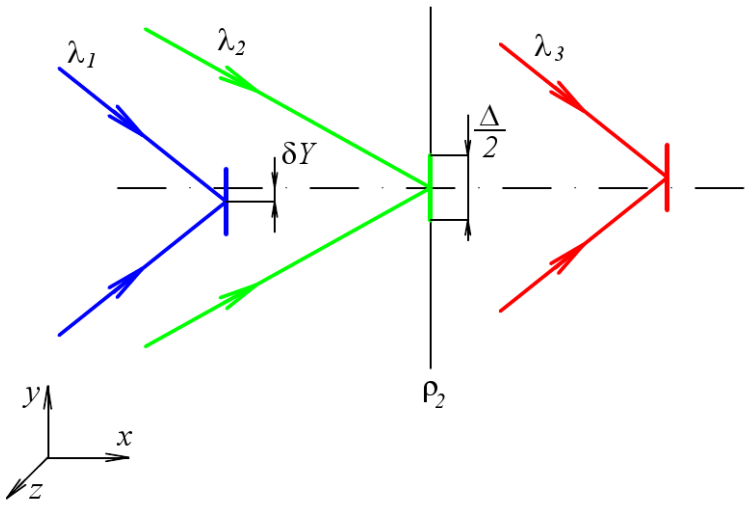
kde $|\vec{\kappa}|$ lze pro shodné velikosti $\vec{k_r}$ a $\vec{k_p}$ určit vztahem

$$|\vec{\kappa}| = |\vec{k_p} - \vec{k_r}| = 2|\vec{k}|\sin\frac{\theta}{2} = \frac{4\pi\sin\frac{\theta}{2}}{\lambda}, \tag{203}$$

kde θ je úhel sevřený vlnovými vektory obou větví a $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Pak šířku proužku Δ lze vypočítat jako diferenci vzdáleností dvou proužků

$$\Delta = [\Delta r_s]_{\Delta s=1} = \frac{\lambda}{2\sin\frac{\theta}{2}}. \tag{204}$$

V tabulce 12 je uvedena šířka proužků vypočtená z trasování pro vybrané vlnové délky



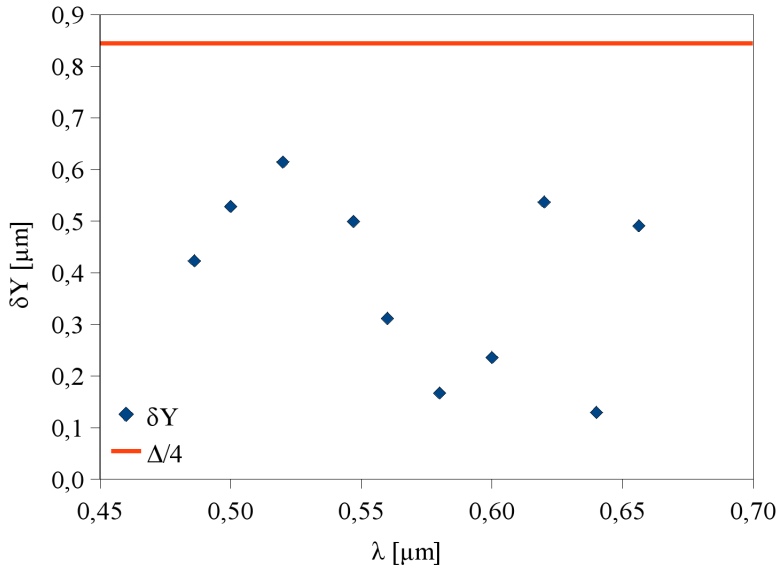
Obrázek 33: Poloha proužků nultého řádu.

spektra. Šířky interferenčních proužků jsou pro zjišťované vlnové délky shodné a platí rovnice (197). K popisu výsledného interferenčního obrazce předpokládejme průmět proužků všech vlnových délek do roviny ρ. V grafu na obrázku 34 jsou zobrazeny odchylky polohy δY proužku nultého řádu, viz obrázek 33, v závislosti na vlnové délce světla. V grafu je také vyznačena mez odchýlení středu proužku nultého řádu pro kontrast interferenční struktury $V = 0,707$, což odpovídá posunu proužků o $\frac{\Delta}{4}$. Pro zjišťované vlnové délky tedy platí, že vzniklé dílčí interferenční obrazce přispívají k tvorbě jednoho kontrastního interferenčního obrazce. Mohu tedy prohlásit, že mikroskop je podle předpokladu achromatický.

λ [μm]	0,486	0,500	0,520	0,547	0,560	0,580	0,600	0,620	0,640	0,656
Δ [μm]	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4

Tabulka 12: Šířka interferenčních proužků.

Pro konstrukční ztvárnění reflexního mikroskopu je třeba z trasování určit minimální velikosti apertur optických prvků, viz tabulka 13.



Obrázek 34: Graf odchylky středu nultého interferenčního proužku.

optický prvek	parametr
kolektor KL $f' = 50$ mm	$\phi D_{KL} = 12,5$ mm
difrakční mřížka DM	$\phi D_{DM} = 3$ mm
zrcátko Z_1	$\phi D_{Z_1} = 9$ mm
dělič D_1	$\phi D_{D_1} = 15$ mm, $t = 0,17$ mm
dělič D_2	$\phi D_{D_2} = 15$ mm, $t = 0,17$ mm
zrcátko Z_2	$\phi D_{Z_2} = 9$ mm

Tabulka 13: Tabulka rozměrů optických prvků.

5.8 Hodnocení vytvořených modelů

Model v Mathcadu byl tvořen, tak aby byl ve shodě s používaným postupem výpočtu chodu paprsku v Zemaxovém modelu. Cílem bylo pomocí obou modelů popsat chování optického systému. V tabulce 14 jsou uvedeny jejich výhody a nevýhody. Důležité hodnoty a grafy jsem generoval vždy ve vhodném modelu. Výsledky trasování paprsků oběma modely byly rozdílné z důvodu rozdílné přesnosti vstupních parametrů, zejména indexů lomu skel, používaných v obou modelech. Odlišnost modelů je zřejmá z obrázků 40 a 39 v části 14. Z tohoto důvodu nemohly být mimoosové paprsky výpočtené v Mathcadu použity pro výpočetní analýzu. Bylo použito pouze trasování osového paprsku v modelu Mathcad a na jeho základě byly stanoveny jmenovité polohy a natočení optických prvků včetně jejich tolerancí.

Model v Mathcadu	
Výhoda	Po změně vstupních parametrů, jako jsou tubusové délky a' mikroskopových objektivů OB_1 a OB_2, frekvence f_m mřížky DM, tloušťka t a materiál děličů D_1 a D_2, se provede kompletní výpočet zbylých parametrů celého modelu.
Výhoda	Možnost naprogramování závislostí polohy a natočení zrcátek Z_1, Z_2 , děličů D_1, D_2 a polohy roviny interferenčního obrazce RIO na vstupních veličinách – toleranční analýza (viz kapitola 6).
Nevýhoda	Nižší přesnost chodu mimoosového paprsku optickou soustavou.
Model v Zemaxu	
Výhoda	Reálný pohled na celou optickou soustavu.
Výhoda	Možnost výpočtu optické dráhy pro paprsek s libovolnou prostorovou orientací.
Nevýhoda	Chybí možnost toleranční analýzy.

Tabulka 14: Výhody a nevýhody obou modelů.

6 Toleranční analýza

K vhodnému návrhu mechanismů je zapotřebí určit s jakou přesností musí být nastaveny polohy optických prvků. V textu této kapitoly bude provedena toleranční analýza navrženého mikroskopu a stanoveny požadavky na přesnost mechanismů.

Jelikož pracuji s osovým paprskem bude při výpočtu použit model z Mathcadu. Jak je uvedeno u výpočtu modelu, je zaručena shodnost optických drah osového paprsku natočením a posunem zrcátka Z_2. Zabývejme se tím kam zrcátko Z_2 v interferometru umístit, a jak jej natočit vzhledem k ose x v závislosti na změnách natočení zrcátka Z_1 a děličů D_1 a D_2.

Úpravou vybraných rovnic (12), (22), (95) modelu získáme následující vztahy popisující natočení zrcátka Z_1 a děličů D_1 a D_2, (12),

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{4} + \omega_0 + \Delta\alpha_1, \tag{205}$$

kde $\Delta\alpha_1$ je změna natočení zrcátka Z_1, (22),

$$\beta_4 = \frac{\pi}{4} + \Delta\beta_4, \tag{206}$$

kde $\Delta\beta_4$ je změna natočení děliče D_1, (95),

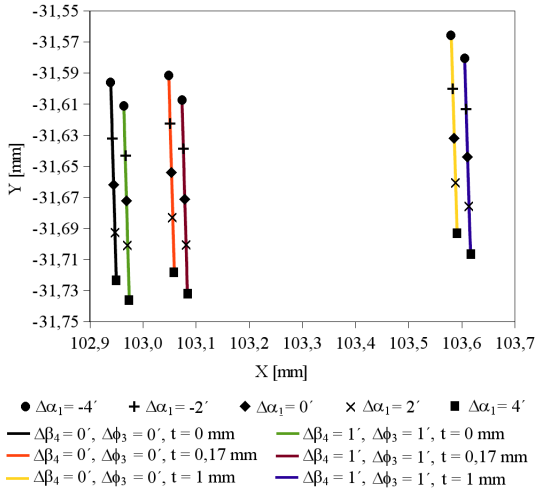
$$\varphi_3 = \frac{\pi}{4} + \Delta\varphi_3, \tag{207}$$

kde $\Delta\varphi_3$ je změna natočení děliče D_2.

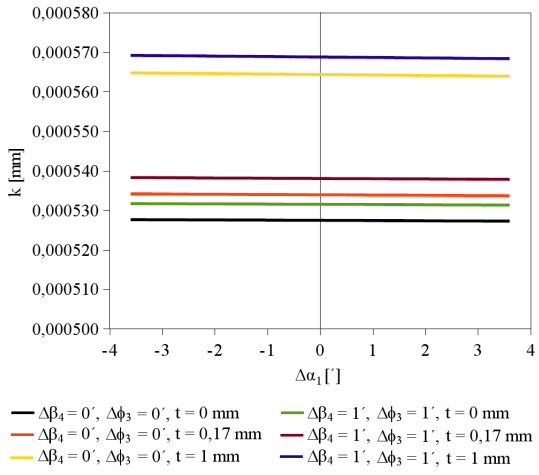
K vhodnému návrhu rektifikačních mechanismů je nutné znát krok minimálního posunu mechanismu zrcátka Z_2 v závislosti na natočení zrcátka Z_1 a děličů D_1 a D_2. Jako minimální natočení zvolme jednu úhlovou vteřinu. Pro různá nastavení úhlů α_1, β_4, φ_3 a pro různou tloušťku t děličů D_1 a D_2 je vypočtena závislost změny polohy zrcátka Z_2, viz obrázek 35. Graf je tvořen přímkami o stejném sklonu. Grafy na obrázku 36 popisují průběh minimálního kroku posunu rektifikačního mechanismu zrcátka Z_2. Minimální krok mechanismu je v ose x o průměrné velikosti $k = 0,5$ μm. Kromě kroku v posuvu mechanismu je nutné určit i krok v natočení zrcátka Z_2 pro stejná nastavení úhlů α_1, β_4, φ_3 a pro stejnou tloušťku t děličů D_1 a D_2 jako v grafu na obrázku 35. Na obrázku 37 je graf závislosti natočení zrcátka Z_2. Jednotlivé přímky grafu se téměř překrývají. Rozdíl jejich polohy je vidět z grafu pro určení kroku v natočení děliče D_2, viz obrázek 38. Minimální krok natočení je průměrně $\kappa = 0{,}5'$. Pro vypočtené kroky je nutné zkonstruovat mechanismy justovatelné s požadovanou přesností - krokem.

Zabývejme se nyní vlivem odchylky kolmosti optické osy kolektoru KL od roviny difrakční mřížky DM. Pro tloušťku $t = 0,17$ mm děličů D_1 a D_2 byla v Zemaxovém modelu spočtena odchylka polohy ΔY středu roviny interferenčního obrazce RIO (obrázek 39) a rozdíl optických drah osových paprsků ΔL (obrázek 40). Z grafu na obrázku 40 vyplývá, že podmínka vzniku interference, tj. rozdíl mezi optickými drahami osových paprsků je menší než koherenční délka L_k světla, je splněna i pro šikmo ustavený kolektor KL osvětlovače.

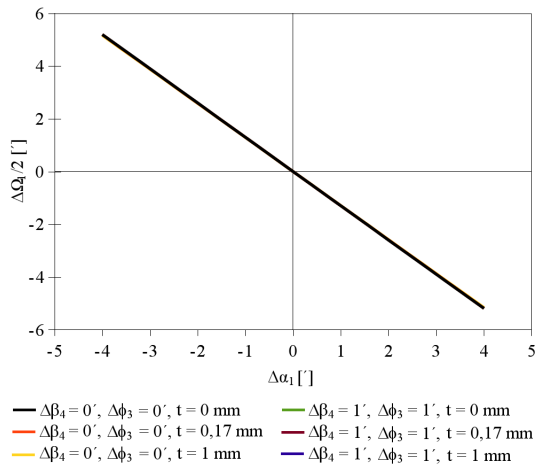
V analýze jsem určil kroky v posuvu a natočení rektifikačního mechanismu zrcátka Z_2. Z grafu na obrázku 35 lze také určit minimální velikost pohybu posuvu rektifikačního mechanismu zrcátka Z_2. Dosažené výsledky analýzy jsou uvedeny v tabulce 15.



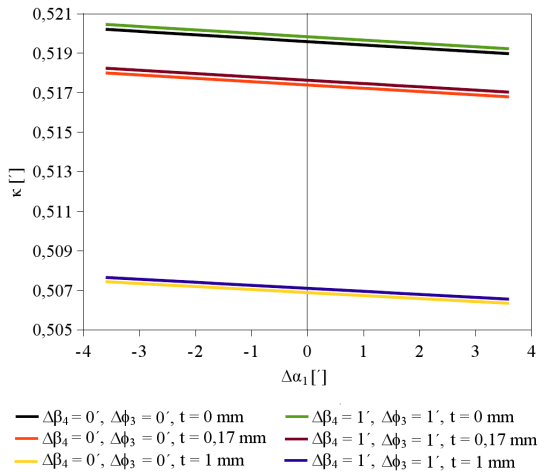
Obrázek 35: Graf polohy zrcátka Z_2 v závislosti na změně natočení zrcátka Z_2 při různých tloušťkách t děličů D_1 a D_2.



Obrázek 36: Krok v posuvu zrcátka Z_2 v závislosti na změně natočení zrcátka Z_2 při různých tloušťkách t děličů D_1 a D_2 .



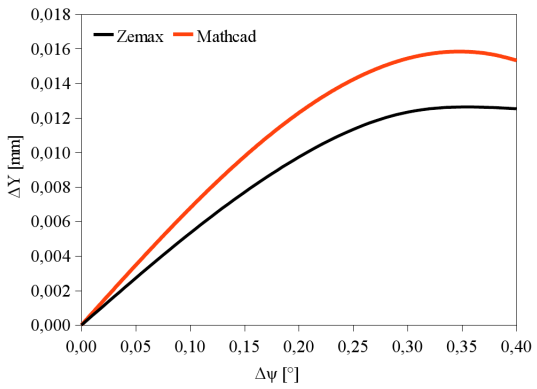
Obrázek 37: Graf natočení zrcátka Z_2 v závislosti na změně natočení zrcátka Z_2 při různých tloušťkách t děličů D_1 a D_2.



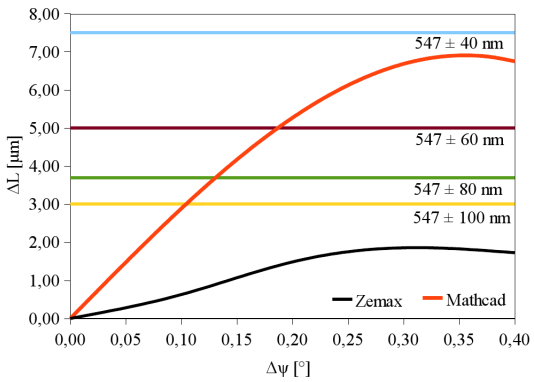
Obrázek 38: Krok v natočení zrcátka Z_2 v závislosti na změně natočení zrcátka Z_2 při různých tloušťkách t děličů D_1 a D_2.

pohyb	minimální rozsah pohybu	krok pohybu
posuv	$\pm 0,1$ mm	$0,5$ μm
rotace	$\pm 4,5'$	$0,5'$

Tabulka 15: Požadované parametry pohybu rektifikačního mechanismu zrcátka Z_2.



Obrázek 39: Změna polohy průsečíku mezi osovými paprsky v závislosti na odchylce kolmosti optické osy kolektoru KL od roviny difrakční mřížky DM. Porovnání výsledků trasování mimoosového paprsku ve vytvořených modelech.



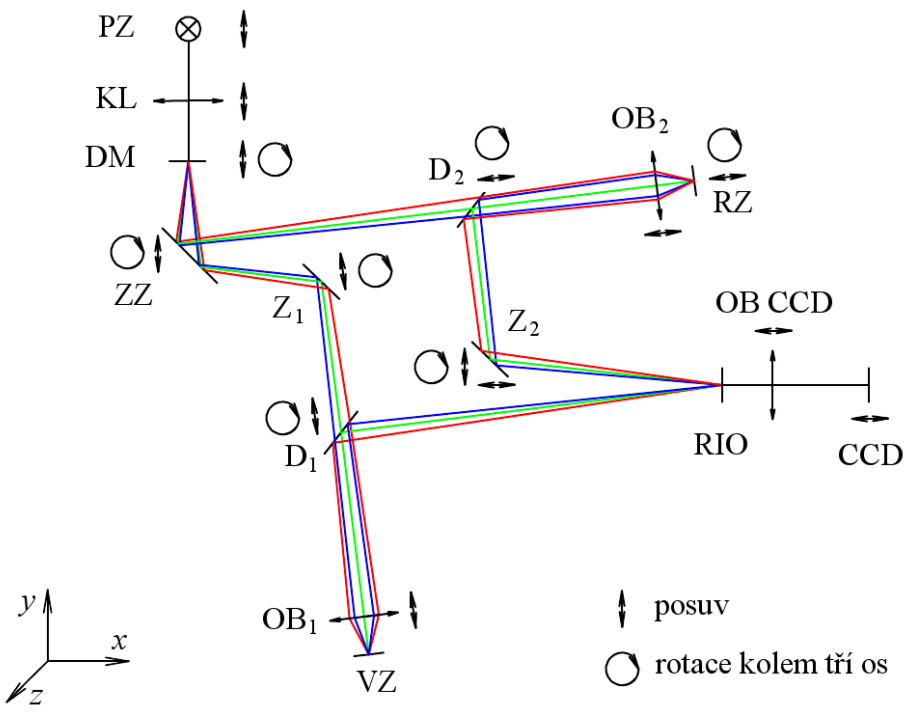
Obrázek 40: Optický drahový rozdíl mezi osovými paprsky v závislosti na odchylce kolmosti optické osy kolektoru KL od roviny difrakční mřížky DM. V grafu jsou zobrazeny velikosti koherenčních délek z tabulky 11. Porovnání výsledků trasování mimoosového paprsku ve vytvořených modelech.

7 Konstrukční návrh

Ze získaných teoretických výsledků jsou známy jmenovité polohy a požadovaná přesnost ustavení jednotlivých optických prvků.

Před vlastním návrhem je nutné si uvědomit, že každý díl mikroskopu je vyroben s určitou přesností. Proto, aby bylo možné mikroskop plně seřídit a zároveň eliminovat nepřesnosti výroby, je zapotřebí justovat každý optický prvek. Justovací pohyby zaručují přesné umístění optických prvků. Při návrhu mikroskopu uvažujme tři optické osy, pro které platí, že jejich prostorová orientace je neměnná. Jsou to osy obou mikroskopových objektivů OB_1, OB_2 a osa kolektoru osvětlovače KL. Mezi ně je nutno vložit zrcátka Z_1, Z_2 a děliče D_1 a D_2 do teoreticky stanovených pozic a také je vhodně úhlově orientovat.

Při návrhu konstrukce mikroskopu jsem dodatečně provedl úpravu jádra mikroskopu viz obrázek 41. Osvětlovací soustavu difrakční mřížky DM jsem otočil kolem osy z o 90°. Do mikroskopu bylo tedy dodáno ještě jedno zrcátko. V dalším textu jej budeme nazývat zalamovacím zrcátkem ZZ. Úpravou se zlepšilo prostorové řešení mikroskopu.



Obrázek 41: Upravené schéma reflexního holografického mikroskopu s vyznačenými pohyby rektifikačních mechanismů.

7.1 Pohyby justážních mechanismů

Stanovme pohyby všech optických prvků, viz obrázek 41. Osový paprsek po průchodu kolektorem KL dopadá kolmo na difrakční mřížku DM. Mřížku je nutné ustavit kolmo na osový paprsek do obrazového ohniska kolektoru KL. Osový paprsek šířící se v prvém a méně prvém difrakčním řádu se odráží od zalamovacího zrcátka ZZ, které je nutné natáčet kolem osy z a posouvat ve směru osy y, viz obrázek 3. Předmětový osový paprsek je směrován zrcátkem Z_1 skrz dělič D_1 do objektivu OB_1. Zrcátko Z_1 je nutno otáčet

kolem osy z a zároveň posouvat ve směru osy předmětového odraženého paprsku. Pohybem zrcátka Z_1 ve směru odraženého osového paprsku dochází k posunutí odraženého paprsku kolmo na směr pohybu mechanismu, viz obrázek 41. Posuvem zrcátka Z_1 ztotožníme optickou osu objektivu OB_1 s osovým předmětovým paprskem. Aby byla dodržena tubusová délka mikroskopového objektivu a' od difrakční mřížky DM k rovině dosedací plochy závitu objektivu DP_1, je nutné ve směru předmětového odraženého osového paprsku objektiv OB_1 vysouvat. Posuvem a natočením děliče D_1 je zaručeno nasměrování osového předmětového paprsku do roviny interferenčního obrazce RIO. Podobně výsuvem objektivu OB_2 lze ustavit tubusouvou délku a' mezi difrakční mřížkou DM a rovinou dosedací plochy závitu objektivu DP_2. Posuvem děliče D_2 ve směru referenčního osvětlovacího osového paprsku je zaručena stejná vzdálenost mezi děličem D_2 a rovinou dosedací plochy závitu objektivu DP_2, jako je vzdálenost mezi děličem D_1 a rovinou dosedací plochy závitu objektivu DP_1. Nepřesnosti v ustavení difrakční mřížky DM, zrcátek Z_1, Z_2 a děličů D_1, D_2 je kompenzováno křížovým posunem a natáčením zrcátka Z_2 , tak aby byl optický drahový rozdíl mezi oběma osovými paprsky roven nule a průsečík paprsků byl v rovině interferenčního obrazce RIO. Kromě popsaných rotací kolem osy z se mřížka DM, zrcátka ZZ, Z_1, Z_2 a dělice D_1 a D_2 naklápí i kolem os x a y. Pro odraznou plochu referenčního zrcátka RZ platí, že musí být ustavena kolmo k osovému referenčnímu paprsku do předmětové roviny objektivu OB_2. Pohyby optických prvků jsou shrnuty v tabulce 16.

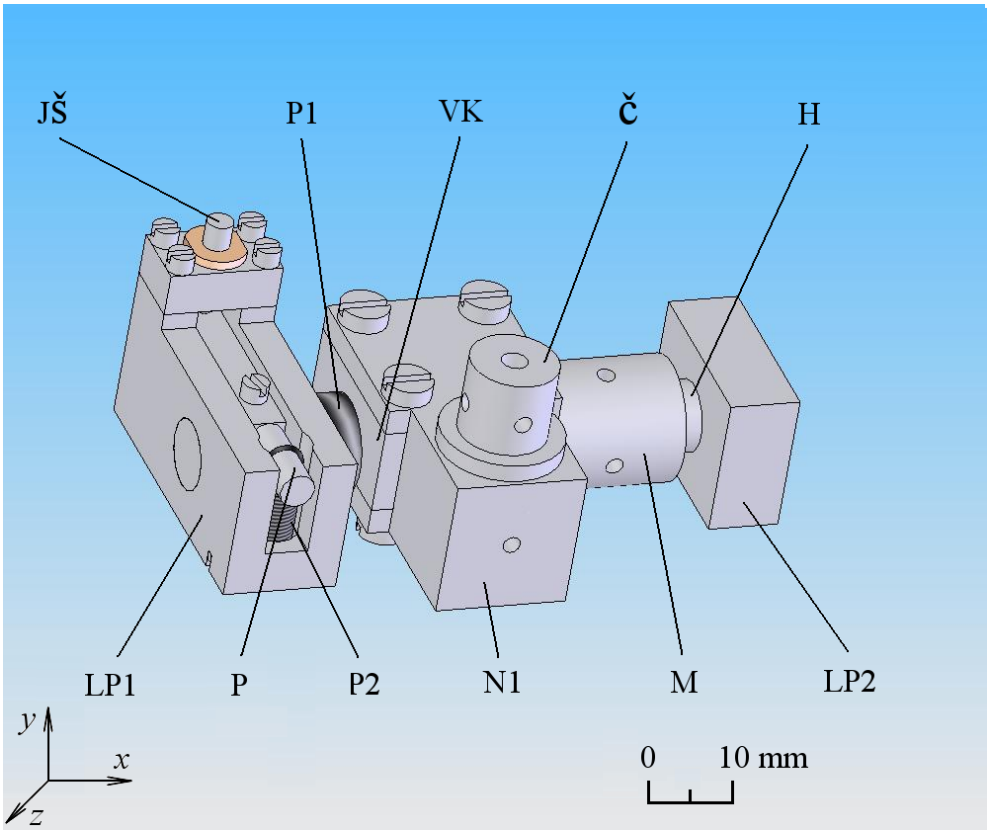
optický prvek	pohyb
mřížka DM, zrcátko ZZ, Z_1 a děliče D_1 a D_2	posuv v jedné ose, rotace kolem tří os
zrcátko Z_2	posuv ve dvou osách, rotace kolem tří os
objektivy OB_1 a OB_2	posuv ve směru optické osy
referenční zrcátko RZ	posuv v optické ose objektivu OB_2, rotace kolem tří os

Tabulka 16: Tabulka pohybů optických prvků.

7.2 Mechanismus s jedním posuvem a dvěma rotacemi

Vlastní navržený mechanismus je uveden na obrázku 42 a bude použit pro justáž difrakční mřížky DM, zrcátek ZZ, Z_1 a děličů D_1 a D_2. Jádrem posuvu je přímé kluzné vedení ([13], str. 227) a ([14], str. 73), viz obrázek 44. Natočením vedené kostky VK na hřídelce H je zabráněn tvarovým stykem. Hřídelka H je na svých koncích kluzně uložena ložiskových pouzdrech LP1 a LP2. Posuv vedené kostky VK je realizován vzájemným působením tlačné pružiny P1 proti matici M M10x0,25. Otáčením matice M je pružina P1 stlačena a vedená kostka VK s nosičem čepu N se pohybuje ve směru osy hřídelky H. Na vnitřní válcové ploše matice M a na povrchu hřídelky H je vytvořen závit M10 se stoupáním $p = 0,25$. Určeme nyní požadováné natočení matice $\Delta\varphi$ pro vypočtený krok k,

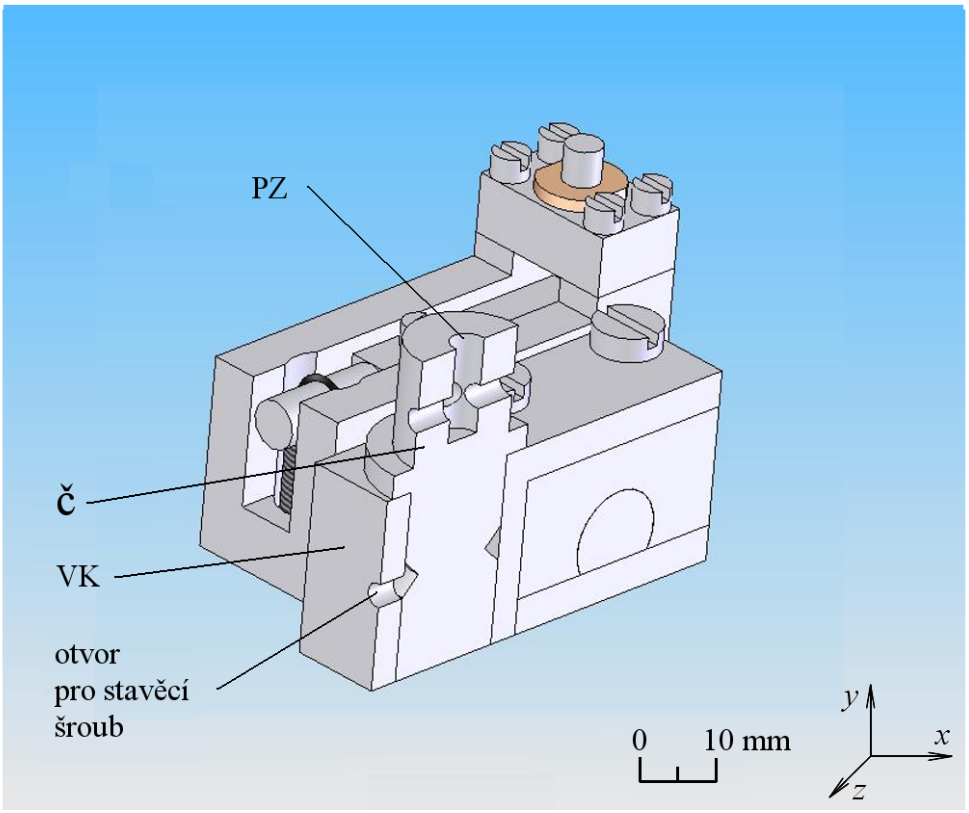
$$\Delta\varphi = \frac{k}{p} \cdot 360\,[^\circ]. \tag{208}$$



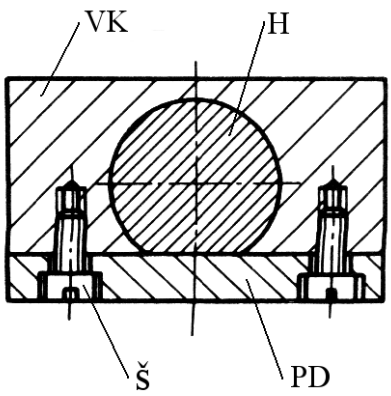
Obrázek 42: Mechanismus posuvu s dvěmi rotacemi. JŠ - justážní šroub, P1 - tlačná pružina, VK - vedená kostka, Č - čep, H - hřídelka, LP1 - ložiskové pouzdro, P - páčka, P2 - tažná pružina, N1 - nosič čepu, M - matice, LP2 - ložiskové pouzdro.

Pro stoupání závitu $p = 0{,}25$ mm a kroku $k = 0{,}5$ μm odpovídá $\Delta\varphi = 0,\ 72°$. Požadované natočení matice je reálně uskutečnitelné. Pro docílení požadovaného natočení z důvodu nedostatku volného zástavbového prostoru jsou do matice M po obvodu vytvořeny otvory, do kterých bude při justáži vložena tenká tyčinka.

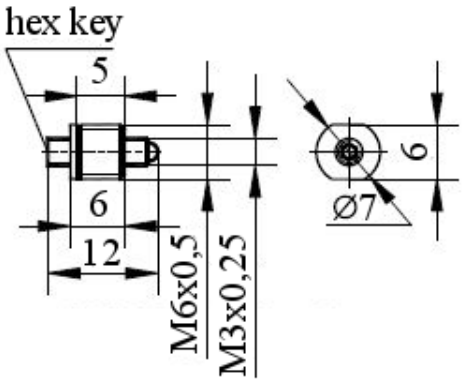
V nosiči N1 je kluzně uložen otočný čep Č o průměru 10 mm, viz obrázek 42. Na válcové ploše čepu Č jsou opět vytvořeny otvory pro justáž pomocí tyčinky. Čep Č je po ustavení optického prvku zajištěn v požadovaném natočení pomocí stavěcího šroubu, dotaženého do drážky čepu Č ve tvaru V, viz obrázek 43. Nastavení naklopení optického prvku, případně kolmosti otočného čepu Č k základně mechanismu je zaručeno pákovým mechanismem v ložiskovém pouzdru LP1. Na jedné straně páčky P je napnuta tažná pružina P2. Proti jejímu účinku působí na druhé straně páčky P justážní šroub JŠ M3x0,25, vyráběný firmou Standa Ltd. [15], kód výrobku 9SH137MF, viz obrázek 45. Otáčením justážního šroubu JŠ lze následně nastavit optický prvek.



Obrázek 43: Řez mechanismem posuvu s dvěmi rotacemi. VK - vedená kostka, Č - čep, PZ - přípojný závit M3x0,5 .



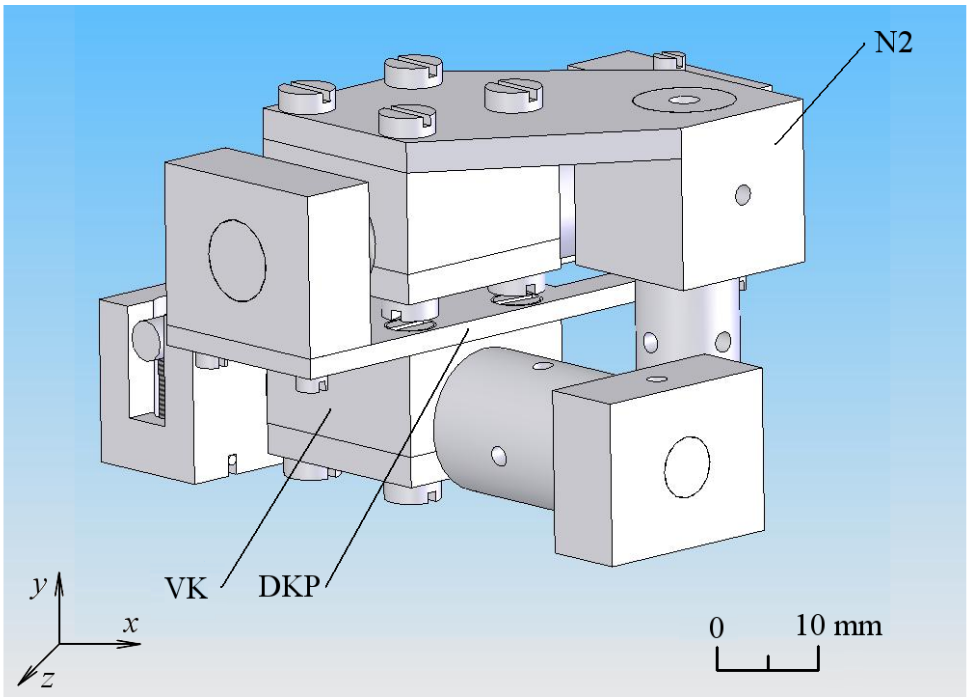
Obrázek 44: Princip použitého přímého vedení ([13], str. 227). VK - vedená kostka, H - hřídelka, Š - šroub, PD - příložná destička.



Obrázek 45: Justážní šroub JŠ M3x0,25 9SH137MF. Převzato z [15].

7.3 Mechanismus se dvěma posuvy a dvěma rotacemi

Mechanismus se dvěma posuvy a dvěma rotacemi je odvozen z navrženého mechanismu s jedním posunem a dvěma rotacemi, který bude použit pro zrcátko Z_2. Návrh mechanismu je na obrázku 46. Na vedenou kostku VK prvého mechanismu upevněna deska křížového

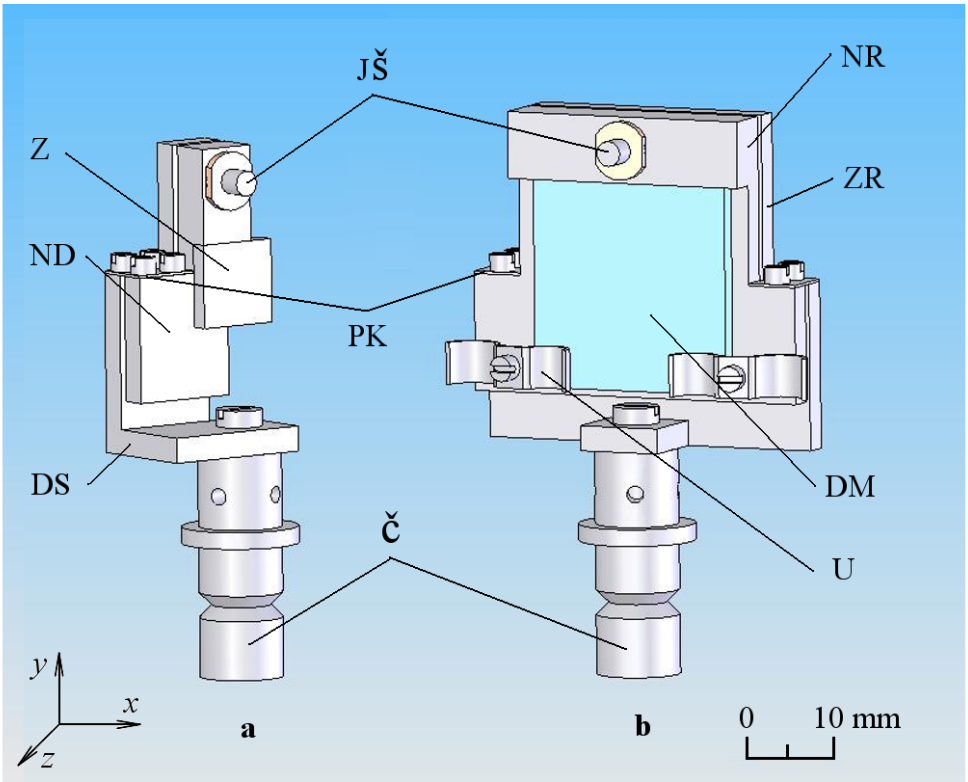


Obrázek 46: Mechanismus křížového posuvu s dvěmi rotacemi. VK - vedená kostka, N2 - nosič čepu, DKP - deska křížového posuvu.

posuvu DKP. Na desku je pak upevněn druhý mechanismus, vybavený upraveným nosičem čepu N2. Montáží dvou shodných mechanismů jsou zaručeny stejné vlastnosti posuvů v obou směrech zároveň. Do nosiče čepu N2 je vložen a stavěcím šroubem zajištěn otočný čep podobně jako v obrázku 43. Také tento mechanismus je vybaven pákovým mechanismem pro nastevení kolmosti otočného čepu k základně mechanismu.

7.4 Mechanismus uložení zrcátek, děličů a difrakční mřížky

Mechanismy jsou určeny pro naklápění difrakční mřížky DM zrcátek ZZ, Z_1, Z_2 a děličů D_1, D_2. Mechanismy naklápění prvků jsou uvedeny na obrázku 47. Na obrázku 47a je mechanismus naklápění zrcátek ZZ, Z_1, Z_2. Na nosnou desku ND je přilepeno zrcátko Z. Jako zrcátka Z_1 a Z_2 jsem vybral rovinné zrcátko o rozměrech 10 mm x 10 mm a tloušťce 2 mm od firmy Edmund Optics [16] (kód výrobku NT49-189) s ohledem na tabulku 13. Jako zalamovací zrcátko ZZ volím rovinné zrcátko o obdélníkových rozměrech 16 mm x 23 mm a tloušťce 5 mm od firmy Edmund Optics [16] (kód výrobku NT43-506). Nosná deska ND je pomocí tenkého kovového pružného kloubu PK spojena s deskou sloupku DS. Mezi deskou sloupku DS a nosnou deskou ND je v dolní části mechanismu do zahloubení v nosné desce a desce sloupku vložena tlačná pružina. Proti jejímu účinku působí na druhé straně justážní šroub JŠ M3x0,25. Podobně je řešeno i naklápění obou děličů D_1, D_2 a difrakční mřížky DM, viz obrázek 47b. Difrakční mřížka DM je upevněna pomocí úpinek U na nosný

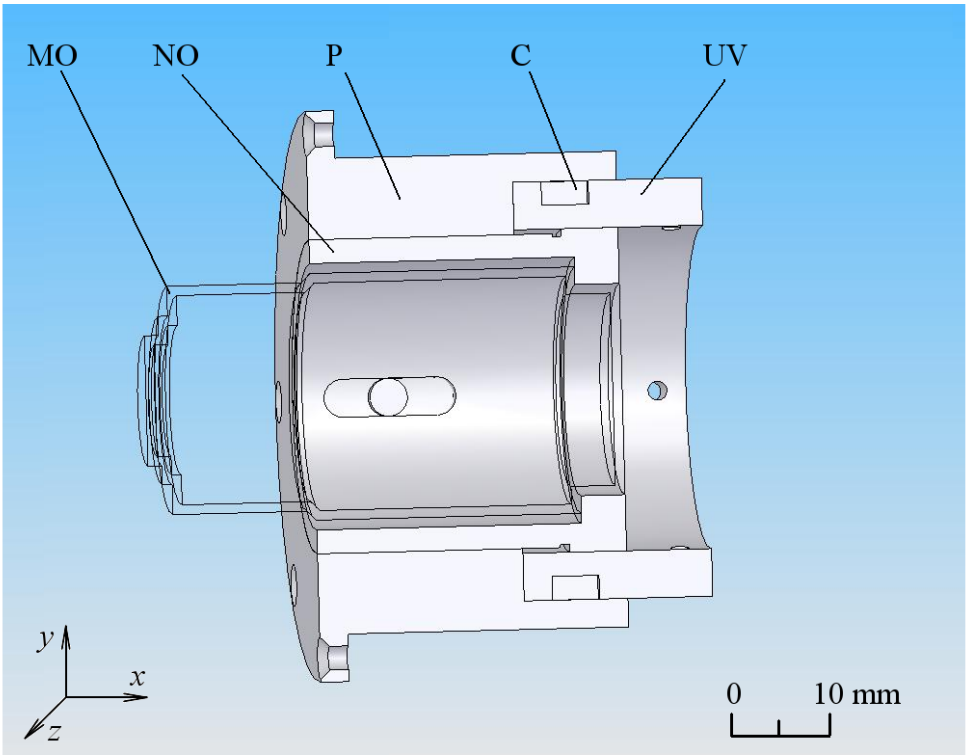


Obrázek 47: Upevnění optických prvků. a - uložení zrcátka, b - uložení difrakční mřížky, JŠ - justážní šroub, PK - planžeta, Z - zrcátko, ND - nosná deska, Č - otočný čep, NR - nosný rámeček, ZR - základna rámečku, U - úpinka, DM - difrakční mřížka.

rámeček NR. Základna rámečku ZR a nosný rámeček NR je spojen kovovými pružnými klouby PK. Do zahloubení v dolní části nosného rámečku a základny rámečku je vložena tlačná pružina. Proti jejímu účinku působí justážní šroub JŠ M3x0,25.

7.5 Tubusový výsuv objektivů

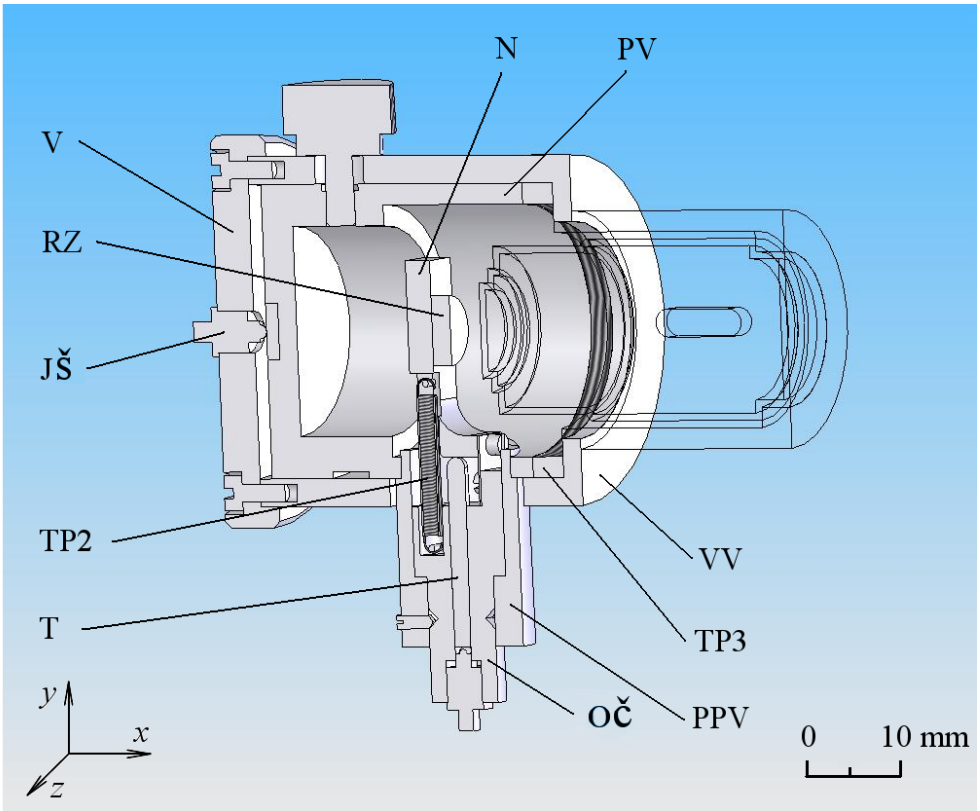
Schéma výsuvu je uvedeno na obrázku 48. Mikroskopový objektiv MO je zašroubován do nosiče objektivu NO. Nosič objektivu NO je veden šroubem v ustavovacím válci UV. Ustavovací válec UV se volně otáčí v přírubě P díky tvarovému styku prstenců C, pevně zajištěných v přírubě P. Do příruby P je zašroubován stavěcí šroub jehož osazení se pohybuje v drážce nosiče objektivu NO. Otáčením ustavovacího válce UV dochází k výsuvu objektivu MO. Po obvodu ustavovacího válce jsou vyvrtány otvory pro justážní tyčinku.



Obrázek 48: Tubusový výsuv objektivu. MO - mikroskopový objektiv, NO - nosič objektivu, UV - ustavovací válec, C - prstenec.

7.6 Mechanismus upevnění referenčního zrcátka

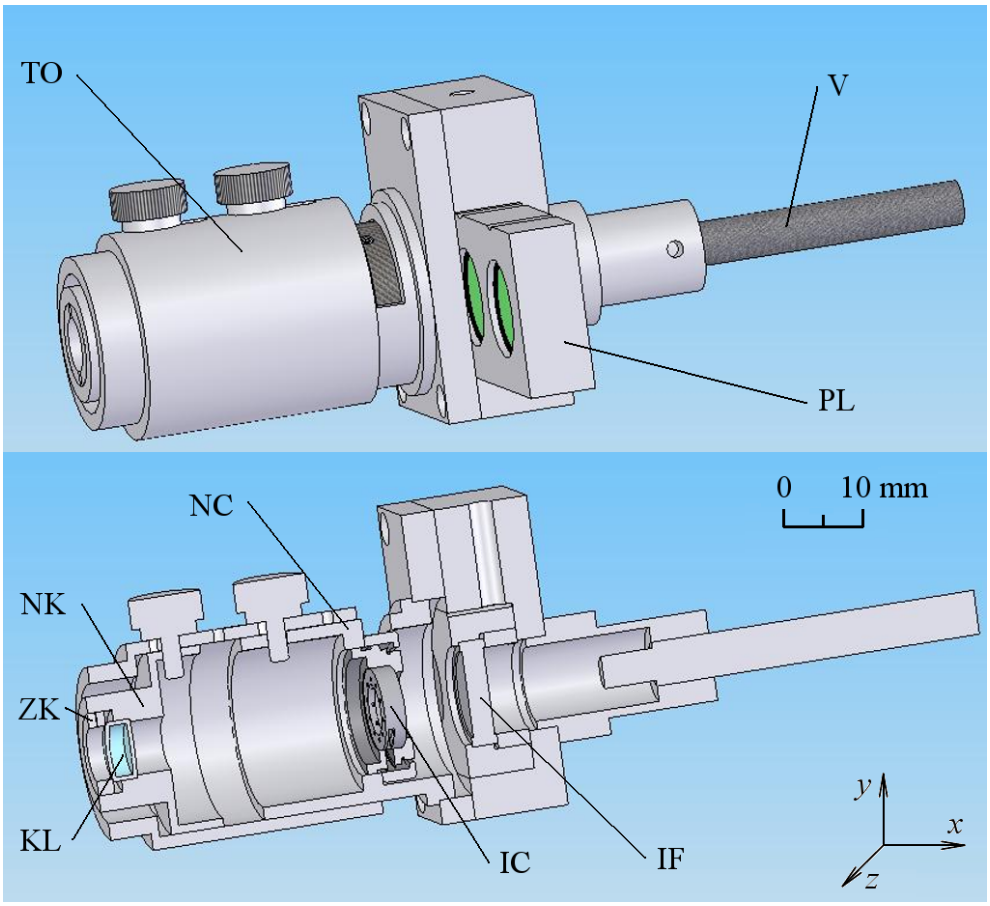
Pro správnou funkci mikroskopu je nutné ustavit referenční zrcátko RZ kolmo k ose referenčního svazku. Referenční zrcátko ZR je voleno o průměru 5 mm a tloušťce 2 mm (kód výrobku NT49-186) z katalogu firmy Edmund Optics [16] a je nalepeno na nosiči N, viz obrázek 49. Celý nosič se může otáčet okolo osy otočného čepu OČ. Otočný čep OČ je uložen v přírubě posuvného válce PPV. Posuvný válec PV se může otáčet kolem své osy společně s nosičem N a referenčním zrcátkem RZ. Mezi čelem vnějšího válce VV a čelem posuvného válce PV je vložena tlačná pružina TP3. Mezi víčkem V a druhým čelem posuvného válce PV je umístěn justážní šroub JŠ M3x0,25. Otáčením justážního šroubu JŠ M3x0,25 se posuvný válec PV s nosičem N a zrcátkem RZ posouvá ve směru osy referenčního svazku. Naklápění zrcátka RZ je tvořeno otočným čepem OČ, pružným kloubem a vlastním nosičem zrcátka N. Nosič N je vychylován do krajní polohy tažnou pružinkou TP2. Proti síle pružinky TP2 působí přes tyčinku T vedenou osou otočného čepu justážní šroub JŠ M3x0,25.



Obrázek 49: Mechanismus ustavení referenčního zrcátka. OČ - otočný čep, RZ - referenční zrcátko, N - nosič, PV - posuvný válec, VV - vnější válec, PT3 - tlačná pružina, JŠ - justážní šroub, T - tyčinka.

7.7 Tubus osvětlovače

Popisovaný modul je uveden na obrázku 50. Světelný svazek je do mikroskopu přiváděn pomocí vícemodového optického vlákna V od firmy Edmund Optics [16] (kód výrobku NT39-367). Z vlákna V vychází divergentní svazek světla. Spektrální šířka dále použitého světla je upravována interferečními filtry IF. Podle aplikace mikroskopu jsou použité filtry IF usazeny v posuvné liště PL. Poloha interferenčního filtru IF je zajištěna kuličkou, postupně zapadající do drážek lišty PL. Rozměry lišty PL, respektive otvory pro interferenční filtry IF jsou voleny podle vyráběných filtrů firmy Thorlabs [17]. Každý filtr IF je v liště zajištěn závitovým kroužkem. Filtrovaný svazek je prostorově omezen irisovou clonou IC od firmy Thorlabs [17] (kód výrobku SM1D12SZ) s rozsahem průměrů apertury 0 mm až 12 mm. Nosič clony NC je suvně uložen a pomocí šroubu zajištěn v tubusu osvětlovače. V druhém konci tubusu je suvně uložen nosič kolektoru NK. Kolektor KL je tvořen tmeleným achromatickým dubletem od firmy Edmund Optics [16] (kód výrobku NT32-317) a je uložen pomocí závitového kroužku ZK do objímky.

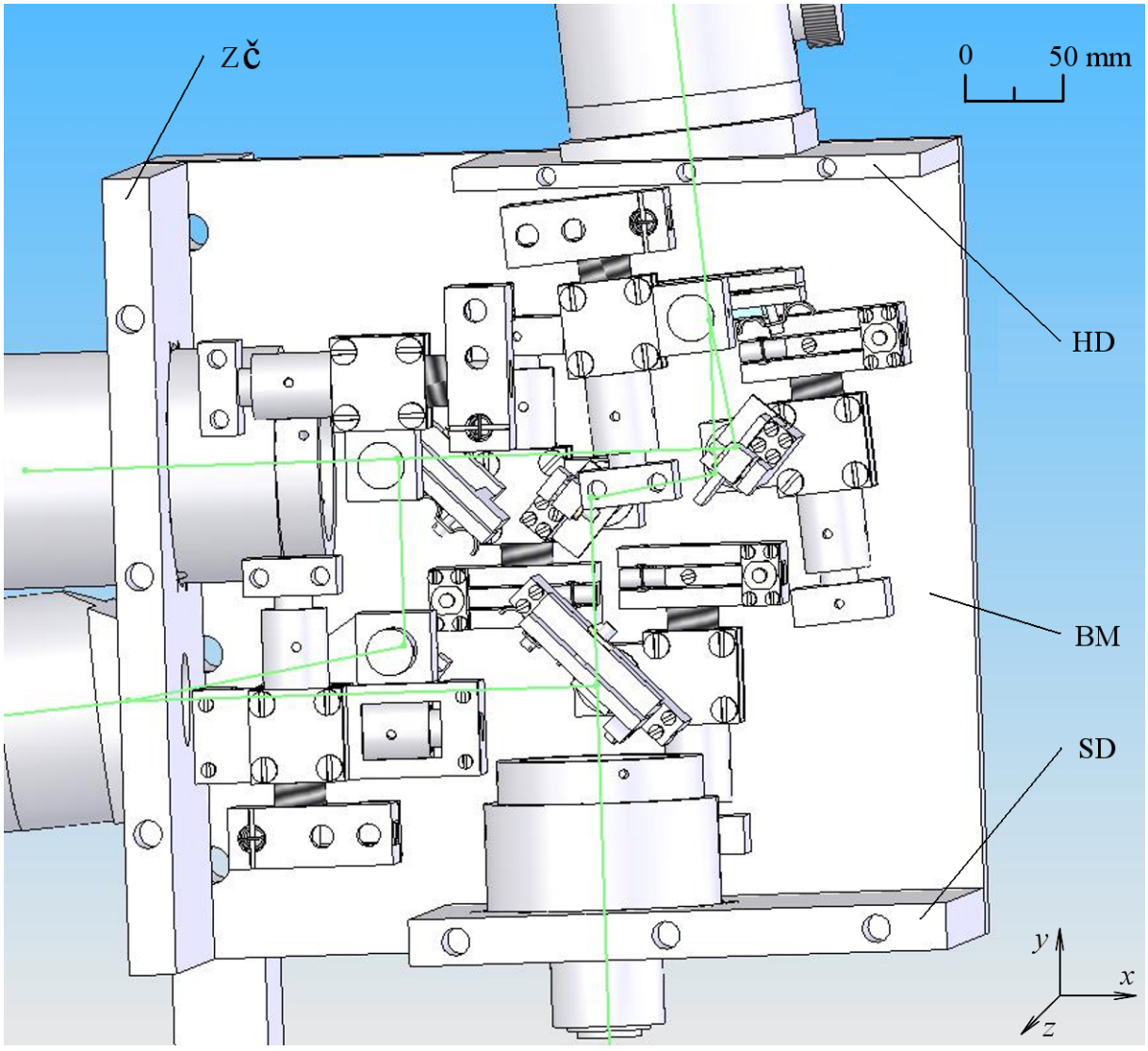


Obrázek 50: Tubus osvětlení se zdrojem světla. KL - kolektor, NK - nosič kolektoru, NC - nosič irisovy clony, V - vícemodové optické vlákno, PL - posuvná lišta, IF - interferenční filtr, IC - irisova clona, TO - tubus osvětlovače, ZK - závitový kroužek.

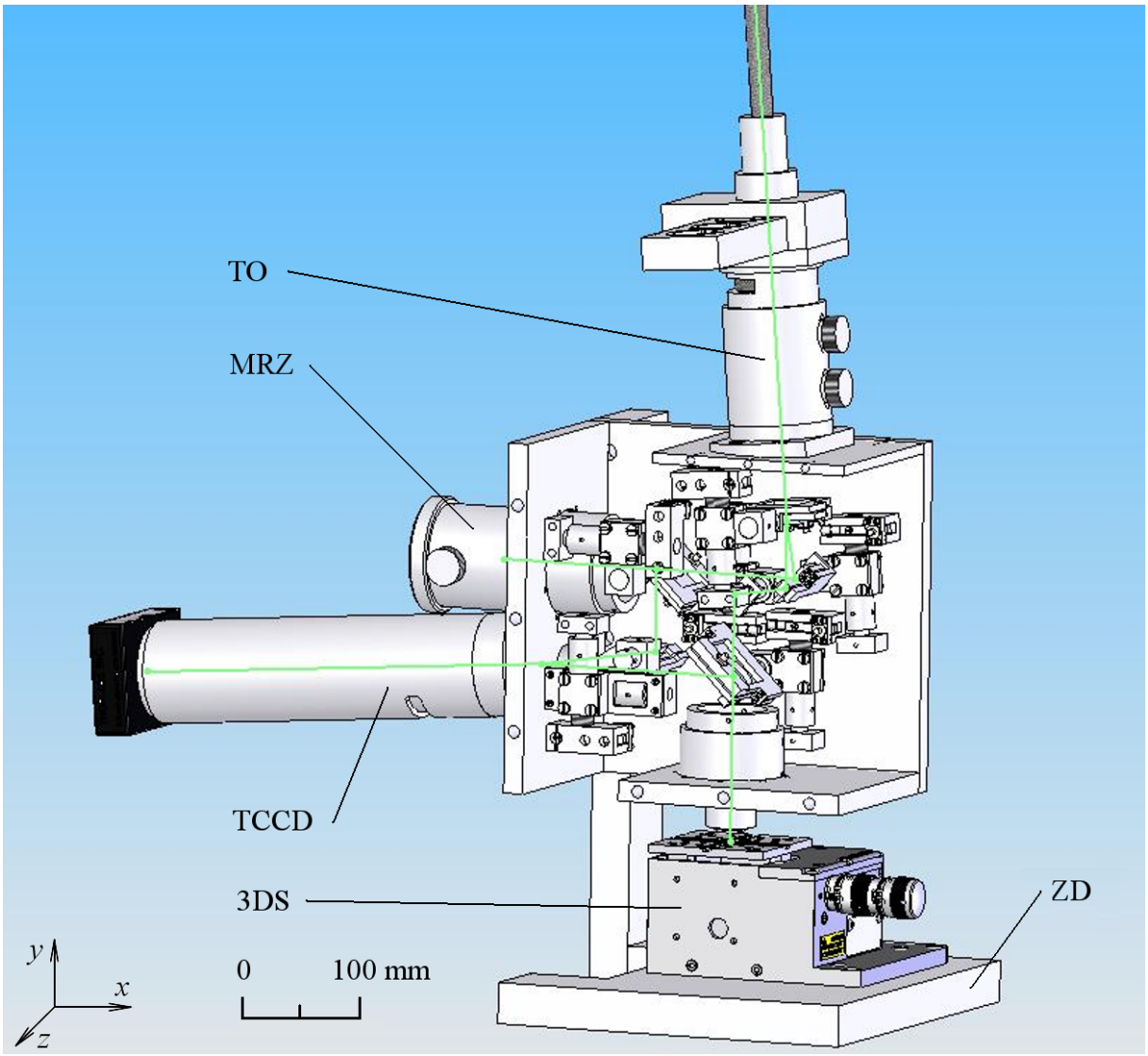
7.8 Modulárně řešený návrh mikroskopu

Z navržených rektifikačních mechanismů je složen celý mikroskop, viz obrázky 51 a 52. Mechanismy s posuvy pro děliče, zrcátka a difrakční mřížku jsou umístěny na bočnicích mikroskopu. K zadnímu čelu ZČ mikroskopu je přišroubován výsuv mikroskopového objektivu OB_2. Na závit M30x1 nosiče objektivu je našroubován mechanismus referenčního zrcátka MRZ. Na zadním čele ZČ je též tubus s CCD kamerou od firmy Thorlabs [17] (kód výrobku DC310) a s mikroskopovým objektivem OB_3, uloženým ve výsuvu. Na spodní desce SD je v tubusovém výsuvu uložen mikroskopový objektiv OB_1. K horní desce HD mikroskopu je přišrobovaný tubus osvětlovače TO s koncem optického vlákna V, clonou IC a nosičem kolektoru NK. Všechny rektifikační mechanismy musí být z venčí mikroskopu justovatelné. Proto byl u mechanismů volen způsob rektifikace pomocí tenké tyčinky. Díly, do nichž přijde vsunout justovací tyčinka musí být přístupné pomocí dostatečně velkých servisních otvorů. Servisní otvory jsou po provedené justáži zaslepeny plechovými víčky.

Sestavený mikroskop je umístěn na desce základny pomocí dvou tuhých noh. Na základní desce ZD je umístěn komerčně vyráběný 3D polohovací stolek 3DS s manuálním i piezo ovládáním pro umístění pozorovaného vzorku od firmy Thorlabs [17] (kód výrobku MAX312).



Obrázek 51: Náhled na jádro mikroskopu. ZČ - zadní čelo, HD - horní deska, BM - bočnice mikroskopu, SD - spodní deska.



Obrázek 52: Celkový pohled na mikroskop. TO - tubus osvětlovače, MRZ - mechanismus referenčního zrcátka, TCCD - tubus CCD kamery, ZD - základní deska, 3DS - 3D polohovací stolek.

8 Závěr

Předkládaná diplomová práce popisuje návrh konstrukce holografického mikroskopu reflexního typu dle zadaného optického schématu. Trasováním paprsků optickou soustavou jsem určil polohy a natočení použitých optických prvků pro libovolné tloušťky planparalelních děličů a polohu výstupního interferenčního obrazce. Z trasování paprsků různých vlnových délek mikroskopem jsem ověřil achromatičnost jádra mikroskopu a určil šířku interferenčních proužků. Toleranční analýzou vytvořeného numerického modelu jsem získal informace o přesnosti a rozsazích pohybu rektifikačních mechanismů, na základě kterých jsem vytvořil konstrukční návrhy mechanického uložení všech optických prvků.

Optickou soustavu jádra mikroskopu jsem modeloval ve výpočetních programech Mathcad a Zemax. Na základě rozměrové analýzy jádra mikroskopu jsem určil polohy a natočení optických prvků. Dále byla ověřena achromatičnost mikroskopu na základě výpočtu rozdílu optických drah interferujících paprsků pro vybranou pološířku spektra polychromatického zdroje. Toleranční analýzou modelu vytvořeného v programu Mathcad jsem získal informace o požadované přesnosti rektifikačních mechanismů, které jsem navrhnul s maximálním důrazem na využití celého zástavbového prostoru mikroskopu. Do vytvořených rektifikačních mechanismů jsem uložil optické prvky a vytvořil návrh modulárně řešeného mikroskopu.

Své snažení jsem směřoval k vytvoření třírozměrného modelu celého reflexního holografického mikroskopu, jehož uplatnění má být v moderní medicíně, biologii, metrologii a materiálových vědách. Díky modularitě navrženého holografického mikroskopu lze mikroskop upravovat a doplňovat o další moduly. Zejména v biologických aplikacích může vzniknout požadavek na fluorescenční osvětlení pozorovaných vzorků.

Reference

[1] Antošová, I., Holografický mikroskop zobrazující odraženým světlem nízké koherence. [Disertační práce], Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007, 95 s.

[2] Inoué, S., Foundations of Confocal Scanned Imaging in Light microscopy. *Handbook of Biological Confocal Microscopy*, 2.vyd. (ed. Pawley J. B.) Plenum, NY 1995, pp. 1-15.

[3] Petráň, M., Hadravský, M., Egger, M. D., Galambos, R., Tandem-Scanning Reflected-Light Microscope. *Journal of the Optical Society of America*, 1968, Vol. 58, No. 5, pp. 661-664.

[4] Sheppard, C. J. R., Roy, M., Low-Coherence Interference Microscopy. *Optical Imaging and Microscopy*, (ed. Tökök P., Kao F. J.) Springer, Berlin, Heidelberg 2003, pp. 257-273.

[5] J. Kühn, T. Colomb, F. Montfort, F. Charrière, Y. Emery, E. Cuche, P. Marquet, and C. Depeursinge, Real-time dual-wavelength digital holographic microscopy with a single hologram acquisition. *Opt. Express*, 2007, Vol. 15, No. 12, pp. 7231-7242.

[6] P. Marquet, B. Rappaz, P. J. Magistretti, E. Cuche, Y. Emery, T. Colomb and C. Depeursinge, Digital holographic microscopy: a noninvasive contrast imaging technique allowing quantitative visualization of living cells with subwavelength axial accuracy. *Applied Optics*, 2005, Vol. 30, No. 5, pp. 468-470.

[7] Born, M., Wolf, E., *Principles of Optics - Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Difraction of Light*, sixth edition, Cambridge university press, Cambridge 1998.

[8] Kamarád, J., Otáhal, J., Podzimek, J., Šulc, V., *Základní kvalifikační učebnice přesná mechanika a optika.*, Práce, Praha 1974.

[9] Chmelík, R., Three-dimensional scalar imaging in hight-aperture low-coherence interference and holographic microscopes. *Journal of Modern Optics*, 2006, Vol. 53, No. 18, pp. 2673-2689.

[10] Laikin, M., *Lens design.*, fourth edition, CRC Press, Marina Del Rey 2006, California, USA.

[11] *Optical Glass Pocket Catalog 2007.*, SCHOTT AG, 2007, 50 s.

[12] Havelka, B., *Geomatrická optika I. díl*, prvé vydání, Nakladatelství Československé akademie věd, Praha 1955.

[13] Glézl, Š., Kamarád, J., Slimák, I., *Přesná mechanika.*, Alfa, Bratislava 1992.

[14] Harna, Z., *Přesná mechanika.*, VUT, Brno 1996.

[15] Standa Ltd., *Opto-Mechanical Products* [online]. 2008 [cit. 10.05. 2009] ⟨http://www.standa.lt/products/catalog/fine_adjustment?item=178&prod=fine_hex_adjustment_screws⟩.

[16] Edmund Optics GmbH, online catalog [online]. 2009 [cit. 10.05. 2009] ⟨http://www.edmundoptics.com/onlinecatalog/browse.cfm⟩

[17] Thorlabs Ltd., *online catalog* [online]. 2009 [cit. 10.05. 2009] ⟨http://www.thorlabs.com/Navigation.cfm⟩.

Obsah přílohy

Přiložené CD obsahuje text této práce v digitální podobě, model vytvořený v programu Mathcad 7 Professional, model vytvořený v programu ZEMAX-XE (verze 9.0) a třírozměrnou sestavu reflexního mikroskopu vytvořenou v programu SolidWorks 2006 SP4.1.