

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojní

Energetický ústav

## **MACHŮV - ZEHNDERŮV INTERFEROMETR**

### **Popis zařízení Postupy seřízení**

Číslo dokumentu: VUT-EÚ-QP-002-98

Určeno pro:

Datum vydání: 30. 1. 1998

Autor: Doc. Ing. Milan Pavelek, CSc.

Kontroloval:

Schválil:

Celkový počet stran: 17

Text dokumentu uložen na disketě: VUT-EÚ-QS-002-98

MDT:

Název: **Machův - Zehnderův interferometr**

Autor: Doc. Ing. Milan Pavelek, CSc.

### **Anotace:**

Zpráva obsahuje soubor dokumentů pro popis, seřízení a obsluhu Machova - Zehnderova interferometru určeného k vizualizaci a měření dvojrozměrných a rotačně symetrických nehomogenit v transparentních objektech. Jedná se o unikátní zařízení tohoto typu v České republice s průměrem zorného pole 200 mm a s přesností měření lepší než 1/3 interferenčního řádu v celém zorném poli interferometru. Interferometr slouží k vizualizaci a měření nehomogenit v transparentních tekutinách, které mohou být způsobeny nerovnoměrným rozložením hustoty v tekutině, nebo nerovnoměrným rozložením jednotlivých složek tekutiny ve dvou či vícesložkové směsi. Z rozložení hustot v tekutině lze za předpokladu jisté znalosti sledovaného fyzikálního děje (okrajových podmínek) vyhodnotit rozložení teplot, rozložení tlaků, rozložení rychlostí, rozložení parametrů přestupu tepla na obtékaných površích, rozložení entalpie ve sledovaném prostoru a řadu dalších fyzikálních veličin.

Počet stran: 17

Počet obrázků: 4

Počet tabulek: 2

## 1. Úvod

K dosažení spolehlivých podkladů pro návrh, konstrukci, případně optimální provoz strojů a zařízení je nutno vycházet nejlépe z experimentálního výzkumu zaměřeného nejen na získání kvantitativních výsledků, ale též na objasnění charakteru a podstaty procesu, případně jeho příčin. Z tohoto hlediska jsou k experimentálnímu výzkumu mnohých procesů zvláště vhodné optické vizualizační a měřicí metody, které jsou sice většinou vázány na poměrně složité a nákladné aparatury, avšak oproti jiným metodám mají tři základní přednosti:

- 1) Na rozdíl od metod založených na měření pomocí lokálních čidel, optické vizualizační a měřicí metody zprostředkují obvykle názorný obraz sledovaného pole v celé vyšetřované oblasti současně, což umožňuje lépe sledovat prostorové souvislosti vyšetřovaného děje.
- 2) Zkoumaná oblast není narušena žádným vestavěným čidlem (termočlánkem, tlakovou či kalorimetrickou sondou a pod.), které by mohlo způsobit lokální změny proudových, mechanických nebo tepelných poměrů.
- 3) Svazek světelných paprsků lze považovat za zcela prostý setrvačnosti, což umožňuje postihnout i velmi rychlé nestacionarity.

Mezi optickými vizualizačními a měřicími metodami patří mezi metody nejpřesnější, ale také nejsložitější metody interferometrické, které lze provozovat pomocí různých typů interferometrů.

Na pracovišti odboru termomechaniky a techniky prostředí EÚ FS VUT v Brně (ul. Technická 2) je v optické laboratoři situované v suterénu haly C3 instalován Machův - Zehnderův interferometr firmy LKO Amerang (BRD). Zařízení slouží pro vizualizaci a měření dvojrozměrných a rotačně symetrických nehomogenit v transparentních objektech - tekutinách, které se vyskytují ve strojích a zařízeních z oblasti techniky prostředí, přenosu tepla a termomechaniky. Interferometr je využíván pro řešení grantových projektů, pro výzkumy v rámci doktorandského studia, pro přípravu vizualizačních záznamů k výukovým účelům a pro laboratorní výuku v předmětu "Optické měřicí metody" v oboru technika prostředí.

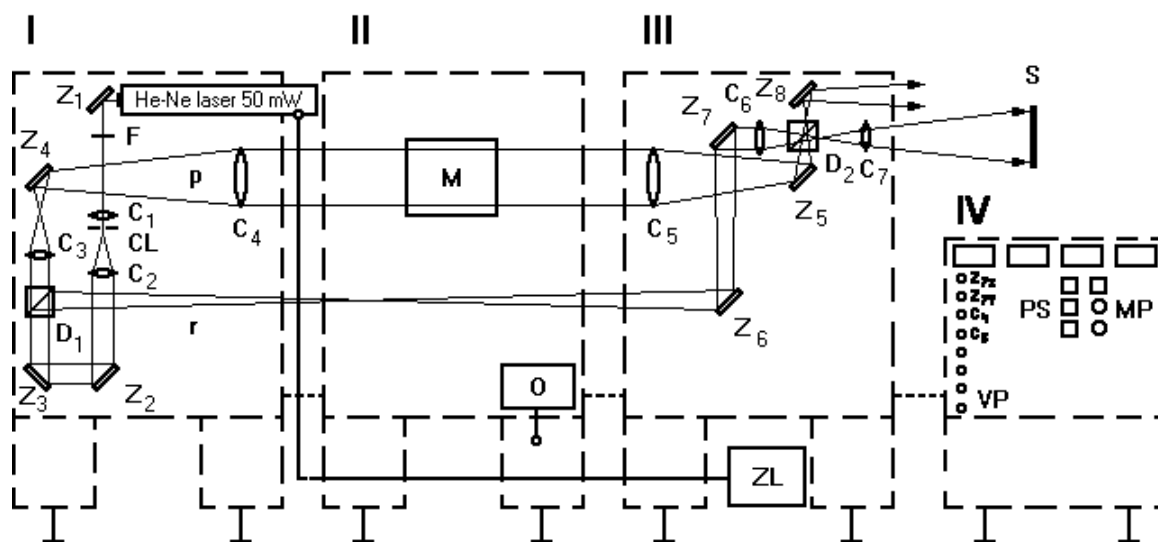
Ze získaných obrazů interferogramů lze přímo kvalitativně posuzovat sledovaný děj v celém zobrazeném prostoru, nebo ze zaznamenaných fotografií či videozáznamů lze provést i kvantitativní vyhodnocení, které však vyžaduje jistou znalost okrajových podmínek vyšetřovaného děje a především rozsáhlé znalosti z oblasti optiky. Zpracování a vyhodnocení interferogramů, s cílem získat různé požadované výstupy, je proto obvykle zcela jedinečnou záležitostí, přičemž každý sledovaný model může vyžadovat jiné seřízení interferometru, jiné postupy při vyhodnocování, a to včetně jiného matematického aparátu pro stanovení rozložení indexu lomu a jiných fyzikálních rovnic pro vyhodnocení dalších žádaných fyzikálních veličin. Na pracovišti se zařízení používá především pro vizualizaci a měření rozložení hustot v tekutině, rozložení teplot, rozložení parametrů přestupu tepla na obtékaných površích, rozložení rychlostí a stanovení entalpie ve sledovaném prostoru.

## 2. Popis Machova - Zehnderova interferometru

Schéma zařízení Machova - Zehnderova interferometru je uvedeno na obr. 2-1. Fotografie tohoto zařízení umístěného v optické laboratoři odboru termomechaniky EÚ FS VUT v suterénu haly C3 je na obr. 2-2. Interferometr se skládá:

- z optické sestavy interferometru vybavené servopohonem pro seřízení optických prvků, viz moduly I až IV v obr. 2-1,
- z vhodného typu laseru jako zdroje koherentního záření schopného interference (viz hlavičce laseru He-Ne v modulu I a zdroj laseru ZL v modulu III), a to včetně příslušenství, ke kterému patří měřič výkonu laserového záření a ochranné brýle.

Z hlediska bezpečnosti práce musí být toto zařízení obsahující laser instalováno v laboratoři označené na dveřích příslušnou cedulkou upozorňující na přítomnost laseru.



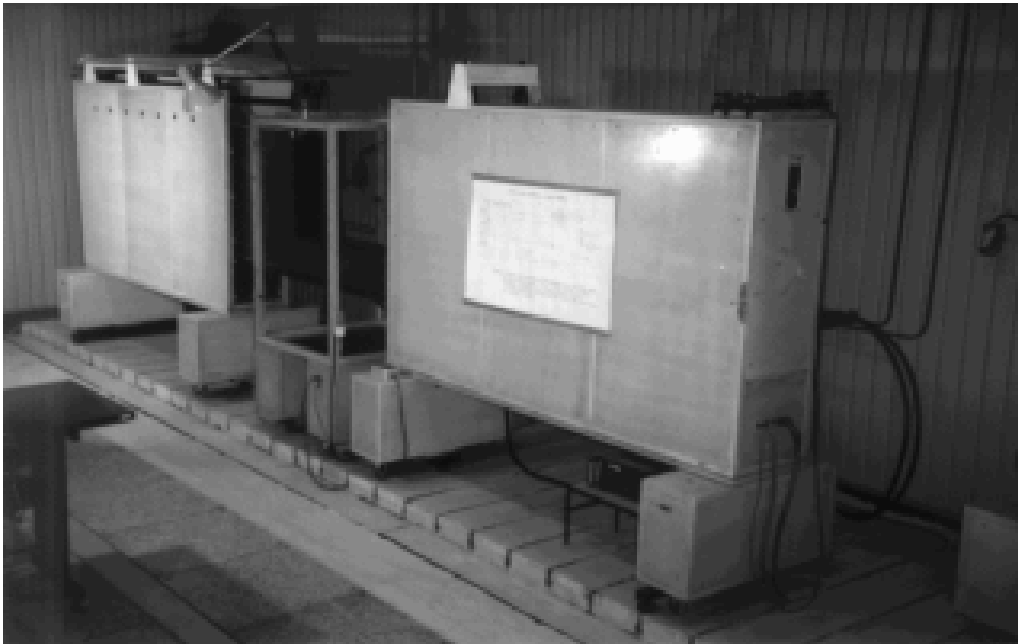
Obr. 2-1 Schéma Machova - Zehnderova interferometru

I - zdrojový modul, II - měřicí modul, III - zobrazovací modul, IV - ovládací modul, "He-Ne Laser 50 mW" - hlavičce laseru, ZL - zdroj laseru, Z - zrcadla, F - filtr, C - čočky, CL - clona, D - děliče, S - stínítko, M - měřicí prostor, O - ovladač ustavení modulů, p - předmětový svazek, r - referenční svazek, VP - volba prvku pro posuv či natočení, PS - přepínač směru posuvu či natočení, MP - motor posuvu či natočení

## 2.1 Popis optické sestavy interferometru

Celé optické zařízení interferometru je rozděleno do dvou samostatných kovových skříní (moduly I a III). V každé skříní je na závěsech z gumových lan uložen kovový rám, na němž jsou upevněny jednotlivé optické elementy. Mezi oběma skříněmi je umístěn upevňovací rám (měřicí modul II), který slouží k upevnění zkoumaných modelů. Pro ovládání některých prvků interferometru pomocí servopohonů slouží modul IV. Zařízení je 2,2 m vysoké, jeho půdorys je 7 x 1 m (plus plocha nutná k obsluze a k instalaci proměřovaných zařízení či modelů) a musí být umístěno v klidném a čistém prostředí bez otřesů, bez prachu, bez par kyselin, alkálií, halogenů rtuti, organických rozpouštědel apod.

Zdrojem koherentního světla je zde laser, který však není dodáván spolu s interferometrem. V instalovaném zařízení je použit He-Ne laser LA 1001, popsany podrobněji v kap. 2.2. Výstupní svazek rovnoběžných paprsků z laseru (využitý průměr ~ 1 mm) se odráží zrcadlem Z<sub>1</sub>, prochází filtrem F a čočkou C<sub>1</sub> je soustředěn do otvoru clony CL. Touto clonou je svazek paprsků zbaven interferenčních jevů vzniklých na stěnách laseru a na elementech Z<sub>1</sub>, F a C<sub>1</sub>. Čočkou C<sub>2</sub> je vytvořen opět svazek mírně se sbíhajících paprsků, jehož průměr je těsně za



Obr. 2-2 Fotografie Machova - Zehnderova interferometru

čočkou  $C_2$  proti původnímu svazku vycházejícímu z laseru desetinásobně větší ( $\sim \varnothing 10 \text{ mm}$ ). Po obrácení směru svazku zrcadly  $Z_2$  a  $Z_3$  je svazek rozdělen děličem  $D_1$  na dva dílčí svazky. Měřicí nebo také předmětový svazek  $p$  prochází objektivem  $C_3$ , zrcadlem  $Z_4$  je obrácen do horizontálního směru a čočkou  $C_4$  je vytvořen svazek rovnoběžných paprsků o průměru 200 mm. Po průchodu měřicím prostorem  $M$  je svazek opět soustředěn čočkou  $C_5$  a přes zrcadlo  $Z_5$  dopadá na dělicí hranol  $D_2$ . Referenční svazek  $r$  (mírně se sbíhající paprsků) odražený děličem  $D_1$  prochází do druhé skříně mimo měřenou oblast a po odražení zrcadly  $Z_6$  a  $Z_7$  je soustředěn objektivem  $C_6$  na dělicí hranol  $D_2$ . Děličem  $D_2$  odražená část měřicího svazku a prošlá část referenčního svazku je čočkou  $C_7$  promítnuta do roviny stínítka  $S$  (nebo do fotoaparátu či kamery). Druhá část obou svazků je zrcadlem  $Z_8$  odražena do horizontálního směru a slouží ke sledování interferenčního obrazu na případně jiném stínítku, a to v případě, je-li svazek procházející čočkou  $C_7$  zacloněn fotoaparátem, kamerou či jiným zařízením pro záznam interferogramů.

Všechna zrcadla (s výjimkou  $Z_2$  a  $Z_3$ ) a dělicí hranoly jsou uloženy v kardanových závěsech, přičemž naklání zrcadla  $Z_7$  a děliče  $D_1$  je motorické a ostatní závěsy se nastavují ručně. Čočky  $C_1$ ,  $C_2$  a objektiv  $C_3$  jsou uloženy v centrovatelných objímkách, čočkami  $C_1$  a  $C_2$  lze ručně axiálně posouvat a čočky  $C_4$  a  $C_5$  jsou vybaveny motorickým axiálním posuvem. Všechny motorické pohony jsou řízeny z ovládacího panelu modulu IV.

Pro ovládání optických prvků motorickými posuvy je nutné propojit všechny moduly interferometru pomocí kabelů pro nízkonapěťové napájení servopohonů a pro přenos řídicích signálů, přičemž ovládací modul musí být připojen k síti 220 V, 50 Hz. *Postup při motorickém ovládní optických prvků* je následující:

- 1) Pomocí tlačítek VP na panelu modulu IV (viz obr. 2-1) je třeba zvolit prvek pro posuv či natočení (u prvků v kardanových závěsech je nutné rozlišit i natočení kolem horizontální či vertikální osy).
- 2) Pomocí přepínače PS je nutné zvolit žádaný směr posuvu či natočení optického prvku (stav tohoto přepínače je indikován kontrolkou).

3) Pomocí potenciometru motoru posuvu MP je třeba řídit rychlost posuvu či natočení optického prvku.

Poznámka:

- Po ukončení žádaného posuvu je nutné vrátit potenciometr posuvu motoru MP do původní nulové polohy, jinak bude posuv či natočení pokračovat až do krajní možné polohy (většinou zajištěné koncovými vypínači) a zařízení lze tímto způsobem zcela rozladit.

Obě skříně interferometru a rám k upevnění modelu stojí na výsuvných nohách, které lze motoricky posouvat ve vertikálním a horizontálním směru, čímž dochází současně k posuvu skříně či rámu. *Posuv rámu či skříně interferometru* lze provádět následovně:

- 1) Příslušný modul (skříně či rám) je třeba zvlášť připojit k elektrické síti (220 V, 50 Hz).
- 2) Pomocí ovladače ustavení modulů O (viz obr. 2-1), který je možné připojit vždy k žádanému modulu lze provádět potřebné ustavení modulu.

Poznámka:

- Na ovladači O je 8 popsaných tlačítek pro řízení servopohonů k ovládání uvedených horizontálních a vertikálních posuvů výsuvných noh aktivního modulu. Jednotlivá tlačítka jsou popsaná přímo na ovladači a posuv je aktivní jen po dobu držení jednoho z tlačítek.

S interferometrem jsou dodány průzory vyrobené z vysoce kvalitního skla, které umožňují provádět vizualizaci a měření s dvojrozměrnými transparentními objekty vyžadujícími oddělení měřicího prostoru M od okolí. Umístěním průzorů do měřicího prostoru se interferenční obraz značně zhorší, a proto je nutné v případě použití průzorů (které se instalují obvykle vždy jako součást měřeného modelu) interferometr znovu seřídit, abychom kompenzovali klínovitost a křivost průzorů.

### ***Typické parametry Machova - Zehnderova interferometru***

Po seřízení interferometru podrobně popsaného v kap. 3.1 má toto zařízení následující parametry:

- 1) Odchyšky průběhů interferenčních proužků od ideálního pole jsou menší než 0,15 rozteče proužků, s výjimkou okrajů zorného pole, kde činí tato hodnota až 0,3 rozteče. Uvedené odchyšky  $\pm 0,15$  a  $\pm 0,3$  lze označit také jako chyby interferenčního řádu, kde interferenční řád představuje počet proužků od referenční oblasti (při seřízení interferometru na konečnou šířku interferenčních proužků), nebo relativní amplitudu zakřivení proužků vůči referenční osnově proužků (při seřízení interferometru na konečnou šířku interferenčních proužků).
- 2) Interferometr má v důsledku vhodného uspořádání prvků a v důsledku vhodného seřízení podstatně potlačenou podkladovou interferenci, která obvykle vzniká částečnými odrazy na povrchu čoček a děličů, ohybem světla na okrajích čoček omezujících zorného pole, ohybem světla na kazech optických elementů a ohybem světla na prachových částicích.
- 3) Osvětlení celého zorného pole interferometru je relativně rovnoměrné. Zlepšení by bylo možno docílit za cenu menšího využití výkonu laseru, a to výměnou čočky  $C_2$  za jinou čočku s větší ohniskovou vzdáleností, nebo použitím laseru s větším průřezem světelného svazku.
- 4) Krátkodobá stabilita seřízení interferometru (v období  $\sim 14$  dnů) je relativně dobrá a závisí především na teplotním režimu v místnosti. Při dodržení přibližně stálé teploty v rozmezí

$\pm 1$  K, změny interferenčního obrazu, vzniklé během tohoto období, je možno téměř zcela kompenzovat natočením zrcadla  $Z_7$  (obr. 2-1). Při změnách teploty až o 5 K a po návratu k původní teplotě jsou již změny patrnější a jejich odstranění lze provést natočením děliče  $D_1$ . Provoz interferometru při změněné teplotě o 2 až 5 K vyžaduje kromě toho ještě opravu pole axiálním posuvem čočky  $C_5$ . V obou posledně zmíněných případech je již výsledné pole poněkud méně kvalitní. Z uvedených důvodů je žádoucí, aby byla v interferometrické laboratoři zajištěna konstantní teplota prostředí.

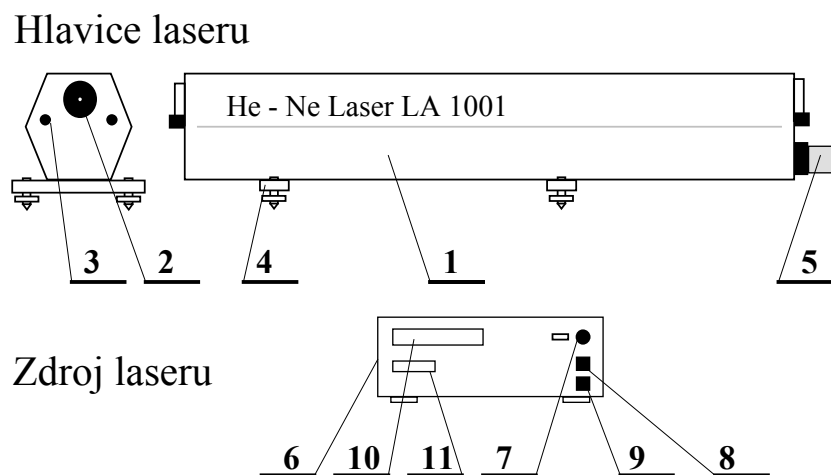
- 5) Rovněž dlouhodobá stabilita zařízení ovlivněná především tečením gumových závěsů (ověřeno po 120 dnech, a to při kolísání teploty v rozsahu  $\approx 6$  K), je zcela vyhovující. Po kompenzaci vzniklých změn seřizením zrcadla  $Z_7$ , děliče  $D_1$  a čočky  $C_5$  lze dosáhnout prakticky obdobnou interferenci v zorném poli, jako byla interference po původním kompletním seřizení celého interferometru, dle kap.3.1.
- 6) Interferometr je relativně odolný vůči vibracím okolního prostředí o frekvencích větších než 3 Hz. V reálném prostředí s běžným laboratorním provozem, kde se vyskytují vibrace podlahy o různých frekvencích a amplitudách, však nelze na daném zařízení obvykle pracovat. Z uvedených důvodů je nutné interferometr instalovat nejlépe na rostlou zem, či do přízemí budov a do větší vzdálenosti od těžkých strojů a rušných prostor, aby amplituda rozkmitu interferenčních proužků činila maximálně 0,1 až 0,2 rozteče proužku. Takové vibrace pak umožňují pozorování interference (případně i měření) stacionárních, nebo relativně pomalých nestacionárních dějů.

Uvedené parametry jsou při pečlivém seřizení dle kap. 3.1 výrazně lepší než udává výrobce, jelikož byly po dodání interferometru provedeny speciální mechanické úpravy a optické úpravy zařízení, a to z části přímo dodavatelem a z části pracovníky našeho pracoviště. Úpravami se trojnásobně zlepšily odchylky průběhů interferenčních proužků, byly potlačeny pulzace obrazů a podkladová interference snižující kvalitu interferenčních záznamů. Značně zlepšená stabilita seřizení interferometru umožňuje při dodržení teploty okolí v rozsahu  $\approx 2$  K uskutečnit sérii měření v období 14 dnů bez patrného zhoršení základního interferenčního pole. Jsou-li však v okolí laboratoře vibrace, je nutné zařízení seřizovat častěji. Interferometrická měření lze provádět pouze v laboratoři bez vibrací okolního prostředí.

Jelikož byla při uvádění zařízení do chodu zjištěna závislost stability seřizení interferometru na změnách teploty, bylo by žádoucí zajistit v optické laboratoři konstantní teplotu prostředí. Současně by bylo vhodné vytvořit v místnosti čisté prostředí, a to pomocí mírného přetlaku filtrovaného vzduchu, čímž by se omezilo poměrně rychlé zanášení optických ploch interferometru.

## 2.2 Popis He-Ne laseru

Laser (obr. 2.2-1) se skládá z hlavice laseru 1 (viz také He-Ne laser 50 mW v modul I na obr. 2-1) a ze zdroje laseru 6 (viz také ZL v modulu III na obr. 2-1). Obě části jsou propojeny vysokonapěťovým kabelem 5, pro napětí 6 kV. Hlavice laseru je umístěna na výškově stavitelných nohách 4. Na čelní z zadní straně hlavice laseru jsou vždy dva šrouby 3 (zajištěné proti náhodnému pootočení krytem) pro možnost doladění rezonátoru laseru na maximální či optimální výkon. Měření výkonu se provádí nasazením čidla měřiče výkonu laserového záření PU 411 na clonu 2, kterou vystupuje světelný svazek na čelní straně hlavice laseru.



Obr. 2.2-1 Schéma laseru

1 - hlavice laseru, 2 - čelní clona, 3 - šrouby pro ladění rezonátoru, 4 - nohy laseru, 5 - vysokonapěťový kabel, 6 - zdroj laseru, 7 - klíček pro zapnutí žhavení, 8 - tlačítko VN, 9 - tlačítko START, 10 - měřidlo anodového proudu, 11 - počítadlo provozních hodin

Tab. 2.2-1 Parametry laseru

Typ:	Laser LA 1001 (zdroj LA 111)
Výrobce:	Metra Blansko
Činnost laseru:	Zaručena na základním příčném kmitovém modu TEM <sub>00</sub>
Vlnová délka:	632,8 nm
Výstupní výkon zaručený:	50 mW
Výstupní výkon charakteristický:	60 mW
Kmitočtová vzdálenost podélných modů:	70 MHz
Průměr výstupního svazku:	1,7 mm ± 0,3 mm
Rozbíhavost svazku:	0,5 rad
Životnost trubice:	Min. 2000 h
Napájecí napětí:	220 V stříd. ± 10 %, 50 Hz ± 2 %
Hmotnost:	Hlavice laseru 50 kg Zdroj laseru 14 kg
Rozměry:	Hlavice laseru 2285 x 165 x 200 mm Zdroj laseru 335 x 385 147 mm
Délka propojovacího kabelu:	5 m
Stupeň polarizace:	10 <sup>-3</sup>
Orientace roviny kmitů vektoru intenzity elektrického pole:	± 5°
Teplota pracovního prostředí:	+15 až +40°C
Relativní vlhkost vzduchu:	45 až 75%
Tlak pracovního prostředí:	80 až 105 kPa
Další požadavky na prostředí:	Laser nelze provozovat v prostředí s obsahem par kyselin, alkálií, halogenů rtuti, organických rozpouštědel a v prašném prostředí. Laser nesnáší hrubé otřesy a pády.

Tab. 2.2-2 Parametry příslušenství laseru

<b><i>Měřič výkonu laserového záření</i></b>	
Typ:	PU 411
Výrobce:	METRA Blansko
Rozsah:	0 až 50 mW, 0 až 100 mW
<b><i>Ochranné brýle</i></b>	
Typ:	B-V 29/Conex

Zdroj laseru 6 má na čelní straně klíček 7 (tlačítko ~ s kontrolkou) pro spuštění žhavení laseru, tlačítko 8 (VN) pro zapnutí vysokého napětí laseru, tlačítko 9 (START) pro start laseru, měřidlo anodového proudu trubice laseru 10 a počítadlo provozních hodin 11. Na zadní straně zdroje laseru 6 je kromě přípojky pro vysokonapěťový kabel 5 také přípojka pro připojení k síti 220 V, 50 Hz, pouzdro pro pojistku 250V/T2A a šroubek potenciometru pro doladění anodového proudu  $I_a$ . Parametry laseru jsou podrobněji uvedeny v tab. 2.2-1, parametry příslušenství laseru (měřiče výkonu laserového záření a ochranných brýlí) jsou v tab. 2.2-2.

### **3. Seřízení a obsluha Machova - Zehnderova interferometru**

Jedním z nejsložitějších úkonů při práci s interferometrem je seřízení interferometru, které je nutné provádět vždy po přemístění zařízení, nebo některé úkony i po narušení polohy modulu interferometru či změně polohy některého z optických prvků. Při práci s interferometrem je třeba dbát předpisů pro bezpečnost práce s elektrickými zařízeními a předpisů pro bezpečnost práce s lasery.

#### **3.1 Seřízení a údržba optické sestavy interferometru**

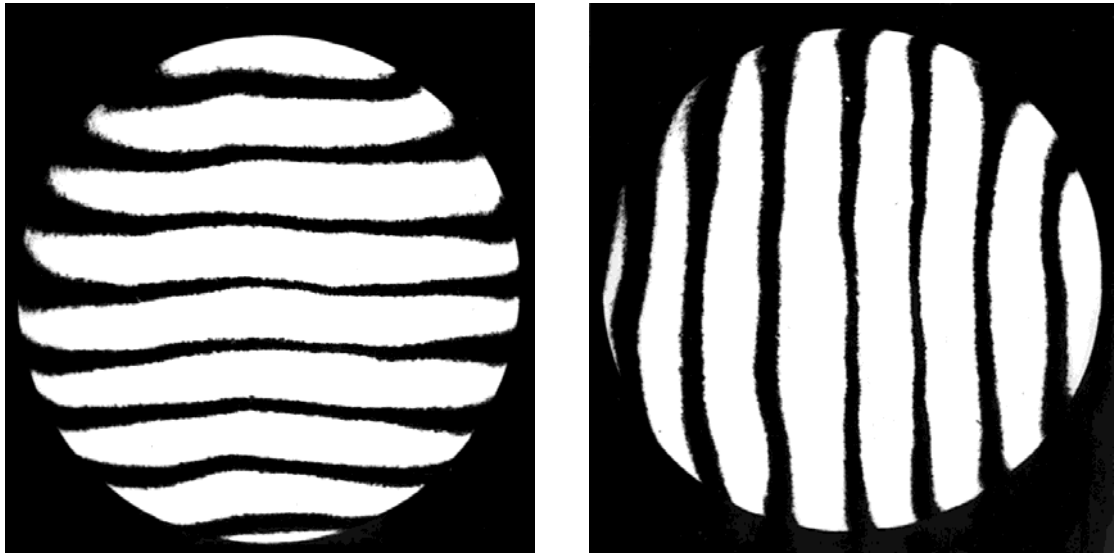
##### ***Úplné seřízení interferometru***

V následujícím textu je uveden návod pro seřízení optické sestavy interferometru po jeho úplném rozladění, přičemž některé kroky tohoto postupu je nutné provádět po výměně zkoumaného objektu, nebo i mezi jednotlivými měřeními. Postupy pro použití motorického posuvu optických prvků a motorického posuvu při ustavování modulů interferometru jsou popsány v kap. 2.1.

- 1) Skříně interferometru (moduly I a III) odkrytovat, postavit do vhodné polohy (viz obr. 2-1) vzhledem ke zkoumanému objektu umístěném v modulu II a rámy zavěšené ve skříních na pryžových lanech propojit spojovacími duralovými plechy. Moduly interferometru propojit pomocí kabelů pro nízkonapěťové napájení servopohonů a pro přenos řídicích signálů.
- 2) Seřídít závěsy rámu tak, aby byly pokud možno rovnoměrně zatížené a aby byly ve správné poloze vzhledem k průzorům ve skříních. Po tomto seřízení je vhodné nechat závěsy ustálit asi 14 dní.

- 3) Zapnout laser včetně interferometru (viz kap. 3.3). Vyjmout čočky  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  a clonu CL (označení dle obr.1).
- 4) Nastavením noh laseru svazek paprsků seřídít do středu zrcadla  $Z_1$ .
- 5) Natočením zrcadla  $Z_1$  a úpravou upevnění zrcadel  $Z_2$  a  $Z_3$  seřídít svazek paprsků do středu zrcadel  $Z_2$ ,  $Z_3$  a  $Z_4$ .
- 6) Dělič  $D_1$  nastavit soustředně s procházejícím svazkem paprsků.
- 7) Objímku filtru F nastavit přibližně souose se svazkem paprsků a natočením filtru F (pomocí přípravku ve tvaru trubky opatřené na čele dvěma zoubky) nastavit maximální intenzitu svazku odraženého děličem  $D_1$ , a to pomocí měřiče výkonu laserového záření vloženého mezi dělič  $D_1$  a zrcadlo  $Z_6$ .
- 8) Vložit objektiv  $C_3$  a nastavit jej souose s dopadajícím svazkem paprsků. (Natočením a podložením držáku objektivu  $C_3$  nastavit objímku objektivu  $C_3$  kolmo k ose svazku, pak objektiv  $C_3$  maximálně zaclonit a pomocí tří justážních šroubů jej nastavit do osy svazku.)
- 9) Natočením zrcadla  $Z_4$  nastavit svazek paprsků do středu čočky  $C_4$ . (Do objímky čočky  $C_4$  umístit vložku, v níž je centrální otvor  $\phi$  4 mm a 4 otvory  $\phi$  2 mm u okraje objímky. Svazek paprsků nastavit souměrně k centrálnímu otvoru ve vložce.)
- 10) Natočením čočky  $C_4$  nastavit ji kolmo k dopadajícímu svazku paprsků (Nastavení provést na základě pozorování odrazu od čočky  $C_4$  na stínítku vloženém do prostoru mezi zrcadlem  $Z_4$  a čočkou  $C_4$ .)
- 11) Čočku  $C_5$  nastavit souose s dopadajícím svazkem paprsků. (Do objímky čočky  $C_5$  umístit vložku stejného provedení jako v bodě 9), posunutím čočky  $C_5$  nastavit střed vložky do osy dopadajícího svazku a pak pootočením čočky  $C_5$  nastavit odražený svazek od čočky  $C_5$  do středu vložky čočky  $C_4$ .)
- 12) Posuvem nohy skříně pod zrcadlem  $Z_5$  nastavit  $Z_5$  tak, aby svazek paprsků dopadal do jeho středu. Zkontrolovat seřízení čočky  $C_5$  dle bodu 11), případně opakovat postup dle bodů 11) a 12).
- 13) Natočením děliče  $D_1$  nastavit referenční svazek do středu zrcadla  $Z_6$ . (Po větším pootočení děliče  $D_1$  je nutno zkontrolovat polohu svazku vzhledem k objektivu  $C_3$ , případně opakovat postup od bodu 8).)
- 14) Vložit čočku  $C_2$  a nastavit ji souose s dopadajícím svazkem paprsků. (Natočením a podložením držáku nastavit vrchní plochu objímky čočky  $C_2$  kolmo k ose svazku a pomocí vložky čočky  $C_2$  se soustředěnými kruhy a s centrálním otvorem  $\phi$  1 mm, vložené do objímky čočky  $C_2$ , nastavit čočku  $C_2$  třemi justážními šrouby do osy dopadajícího svazku.)
- 15) Vložit čočku  $C_1$  a nastavit ji přesně souose s dopadajícím svazkem paprsků. (Natočením, resp. podložením držáku objímky nastavit vrchní plochu objímky čočky  $C_1$  kolmo k dopadajícímu svazku a posunutím objímky pomocí tří justážních šroubů nastavit čočku  $C_1$  do osy svazku. Souosost zkontrolovat srovnáním obrazu na vložce čočky  $C_2$  s původním obrazem před vložením čočky  $C_1$ .)
- 16) Zkontrolovat souosost svazku s objektivem  $C_3$  a totéž po vyjmutí vložky čočky  $C_2$ . Pokud není dosaženo souososti, nutno vyjmout čočky  $C_1$  a  $C_2$  a postup popsany v bodech 8) až 16) opakovat.

- 17) Částečně zaclonit objektiv  $C_3$  a zkontrolovat dodržení souososti dle bodů 9) až 13). Není-li dosaženo souososti, nutno postup popsany v bodech 9) až 16) opakovat.
- 18) Vložit clonu CL a nastavit maximální průměr a maximální intenzitu výstupního svazku. (Povyšroubovat objímku čočky  $C_1$  pomocí přípravku - trubka opatřená na čele dvěma zoubky, mikrometrickými šrouby nastavit otvor clony CL do osy svazku, postupně zašroubovávat objímku čočky  $C_1$  a poopravovat nastavení clony CL. Při nastavování pozorovat obraz na stínítku před čočkou  $C_2$  a nakonec zkontrolovat jeho průmět na vložce čočky  $C_4$ , která má být svazkem paprsků celá co nejrovnoměrněji osvětlena.)
- 19) Provést kontrolu dle bodu 17), případně opakovat postup od bodu 8). Vložky u čoček  $C_4$  a  $C_5$  vyjmout.
- 20) Natočením zrcadla  $Z_6$  nastavit referenční svazek r do středu zrcadla  $Z_7$ .
- 21) Natočením zrcadla  $Z_7$  nastavit referenční svazek r do středu objektivu  $C_6$  (pozorováním obrazu na cloně v objektivu  $C_6$ ).
- 22) Objektiv  $C_6$  nastavit přibližně souose s dopadajícím svazkem paprsků. (Mezi zrcadla  $Z_6$  a  $Z_7$  vložit clonu s otvorem  $\phi$  1 mm, a to do osy dopadajícího svazku. Pootočením, případně podložením držáku objektivu  $C_6$  nastavit přední plochu objímky objektivu  $C_6$  přibližně kolmo k dopadajícímu svazku.)
- 23) Natočením zrcadla  $Z_5$  a děliče  $D_2$  docílit souosost měřicího a referenčního svazku vystupujícího z děliče  $D_2$ . (Zrcadlem  $Z_5$  nastavit ohnisko měřicího svazku co nejblíže k ohnisku referenčního svazku, a to na základě pozorování obou svazků na stínítku vloženém za dělič  $D_2$ . Děličem  $D_2$  nastavit rovnoběžnost obou svazků pomocí pozorování obrazu na stínítku za čočkou  $C_7$ . Tento postup opakovat až do dosažení souososti obou svazků.)
- 24) Nastavit stejnou intenzitu měřicího a referenčního svazku. (Clonou u objektivu  $C_6$  omezit obraz referenčního svazku na stínítku za čočkou  $C_7$  na stejný průměr, jako má měřicí svazek. Axiálním posuvem čočky  $C_2$  nastavit jejich stejnou intenzitu pomocí měřiče výkonu laserového záření umístěného za děličem  $D_2$ . Přitom nutno zajistit, aby ohnisko referenčního svazku leželo mezi děličem  $D_1$  a objektivem  $C_6$ .)
- 25) Nastavit rovnoběžnost svazku paprsků vystupujícího z čočky  $C_4$ , případně i jeho vodorovnou polohu. (Objímku čočky  $C_5$  pootočít kolem vertikální osy o  $90^\circ$ , zrcadlo  $Z_5$  demontovat a do objímky čočky  $C_4$  vsadit vložku čočky  $C_4$ . Axiálním posuvem čočky  $C_4$  docílit rovnoběžnost svazku na základě pozorování průmětu otvorů  $\phi$  2 mm ve vložce čočky  $C_4$  na stínítku umístěném v dostatečné vzdálenosti od čočky  $C_4$ . Seřízení svazku do požadovaného směru, například do vodorovné polohy, je nutno provést posuvem noh skříní. Po tomto seřízení je třeba opakovat postup od bodu 11).
- 26) Čočku  $C_5$  a zrcadlo  $Z_5$  vrátit do původní polohy a opakovat postup seřizování dle bodů 11), 12) a 23).
- 27) Axiálním posuvem čočky  $C_5$  a pootočením zrcadla  $Z_7$  nastavit interferenční obraz přibližně na nekonečnou šířku interferenčních proužků nebo na konečnou šířku interferenčních proužků v referenční oblasti zorného pole (s malým počtem proužků), viz obr. 3.1-1. Při seřizování interferometru obvykle nebývají v měřicím prostoru nehomogenity, a pak představuje referenční oblast celé zorné pole interferometru.
- 28) Zkontrolovat seřízení intenzity měřicího a referenčního svazku dle bodu 24). V případě, že intenzita obou svazků není stejná, opakovat postup dle bodů 24) až 28).



a) horizontální osnova proužků

b) vertikální osnova proužků

Obr. 3.1-1 Zorné pole o průměru 200 mm při seřízení interferometru na konečnou šířku interferenčních proužků

- 29) Čočku  $C_7$  umístit přibližně souose s procházejícím svazkem paprsků. Umístění lze měnit pomocí šroubů pro uchycení čočky v objímce nebo podložením celého držáku objímky čočky.
- 30) Seřídít optimální interferenční obraz. (Povyšroubovat objektiv  $C_6$ . Natočením čoček  $C_4$  a  $C_5$  nastavit interferenční proužky pokud možno do tvaru soustředných kruhů se středem v ose zorného pole. Zašroubovat objektiv  $C_6$  a poopravit interferenční obraz axiálním posuvem čočky  $C_5$  a natočením zrcadla  $Z_7$ .)
- 31) Přišroubovat boční kryty skříně interferometru. Posuvem noh druhé skříně opravit vzájemné seřízení obou jednotek. (Do objímek čoček  $C_4$  a  $C_5$  umístit vložky čoček  $C_4$  a  $C_5$ . Posuvem nohy pod čočkou  $C_5$  nastavit průmět centrálního otvoru ve vložce čočky  $C_4$  do otvoru ve vložce čočky  $C_5$ . Vložky čoček  $C_4$  a  $C_5$  vyjmout. Posuvem nohy pod zrcadlem  $Z_5$  nastavit optimální interferenční obraz. Tento postup podle potřeby opakovat.)
- 32) Nastavit optimální interferenční pole axiálním posuvem čočky  $C_5$ , natočením čočky  $C_5$  a natočením zrcadla  $Z_7$ .
- 33) Vyžaduje-li měření dvojrozměrných objektů použití průzorů do měřicího prostoru, je nutné upevnit měřený model s paralelně zabudovanými průzory (nejlépe s možností dojustování vzájemné polohy obou průzorů) na rám měřicího modulu IV a posuvem noh modulu IV ustavit průzory kolmo na směr šíření paprsků měřicího, nebo-li předmětového svazku. Klínovitost a křivost skleněných desek průzorů eliminovat pomocí zrcadla  $Z_7$  a čočky  $C_4$ .

Poznámka:

- Při měřeních na modelech bez průzorů je nutné upevnit měřený model na rám měřicího modulu IV a posuvem noh modulu IV jej ustavit do požadované polohy vůči předmětovému svazku (např. sledováním stínu modelu na stínítku S při zacloněném referenčním svazku, nebo sledováním odlesků od ploch modelu, které by měly být paralelně se svazkem a pod.)

- Při měřeních přirozené konvekce je nutné seřídít polohu měřeného modelu i vůči gravitačnímu poli.
- 34) Zaostřit obraz modelu (obvykle na střed transparentního objektu, nebo na počátek či konec objektu ve směru šíření paprsků) do roviny stínítka S (do roviny fotoaparátu či kamery). Zaostření se provede vložením malé svítící žárovky do požadované roviny zaostření v oblasti modelu M a při zacloněném referenčním svazku r se posouvá stínítka S (fotoaparát či kamera) až je vlákno žárovky zaostřené. Je-li měřítko zobrazení nevhodné, lze instalovat model M do jiné vzdálenosti od čočky  $C_5$ , nebo vyměnit čočku  $C_7$  za jinou čočku s jinou ohniskovou vzdáleností, nebo vložit mezi čočku  $C_7$  a stínítka S (fotoaparát či kameru) další vhodnou čočku.

Byl-li interferometr delší dobu mimo provoz, je vhodné seřídít jej postupem podle bodů 18), 31), 32), 34), případně předem seřídít závěsy rámu. Nerovnoměrný jas v zorném poli měřicího svazku je vhodné odstranit natočením zrcadla  $Z_1$ . Nerovnoměrný jas v oblasti referenčního svazku lze odstranit natočením děliče  $D_1$ . Pokud takto nastavené interferenční pole není vyhovující, je nutno celý postup seřízení interferometru opakovat.

### ***Údržba interferometru***

Kromě seřízení interferometru je nutné skříně zařízení, ale především aktivní plochy optických prvků občas očistit. Nečistoty a prachové částice na optických prvcích způsobují v koherentním světle parazitní interference ve sledovaném obraze. Prostor uvnitř skříně lze vysát pomocí vysavače a případně otřít vlhkým hadrem. Čištění aktivních ploch zrcadel a čoček se provádí velmi opatrně pomocí vaty a éteru, aby nedošlo k nenávratnému poškrábání optických vrstev nanesených přímo na těchto plochách. Na poškozených optických prvcích dochází obvykle ke vzniku výraznější parazitní interference, a proto se čištění musí provádět jen výjimečně.

## **3.2 Seřízení a údržba laseru**

### ***Seřízení laseru***

Po zapnutí laseru (viz kap. 3.3) lze provádět seřízení výkonu laseru LA 1001, a to pomocí ovládacích prvků 3 (viz obr. 2.2-1) na předním a zadním čele hlavice laseru. Pro měření vyžadujeme obvykle maximální výkon laseru, ale také někdy jen optimální vyzařovaný výkon (např. při snímání interference CCD kamerou s relativně velkou citlivostí). Nastavování výkonu lze provádět vizuálně nebo pomocí měřidla výkonu laserového záření. Měření výkonu se provádí nasazením čidla měřiče výkonu laserového záření PU 411 na clonu 2 (viz obr. 2.2-1), kterou vystupuje světelný svazek na čelní straně hlavice laseru. Při seřizování výkonu laseru je vhodné vždy poznačit si původní polohu ovládacích prvků 3 (viz obr. 2.2-1). Pokud laser přestane generovat svazek koherentního záření a nepodaří se jej oživit ani vrácením ovládacích prvků do původní polohy, je třeba zajistit odborné seřízení či opravu.

### ***Údržba laseru***

Laser a především hlavici laseru je nutné udržovat v čistotě, a to nejlépe jejich umístěním v bezprašném prostředí. Pokud dojde k zaprášení částí laseru, lze opatrně setřít prach

pouze z povrchů jeho krytů, a to při odpojení zdroje proudu od elektrické sítě (po odpojení síťové šňůry). Nedoporučuje se odstraňovat kryty zařízení, zvláště pak kryt hlavičky laseru. Čištění prachu uvnitř hlavičky laseru a především z čelních ploch trubice laseru, obvykle zcela zničí tuto trubici a je nutné ji pak vyměnit (cena trubice tvoří obvykle 50 až 80 % ceny laseru jako celku).

### 3.3 Obsluha interferometru a laseru při měřeních

Obsluha Machova - Zehnderova interferometru při vlastních měřeních spočívá především v zapnutí či vypnutí laseru, v zapnutí a vypnutí motorického ovládní interferometru a v seřizování a doladování interferometru dle potřeb měření na konečnou a nekonečnou šířku interferenčních proužků. Při měřeních s Machovým - Zehnderovým interferometrem je třeba dbát předpisů pro bezpečnost práce s elektrickými zařízeními a bezpečnost práce s lasery.

#### *Zapnutí laseru před měřením*

- 1) Zkontroluje se připojení VN kabelu 5 ke hlavičce laseru 1 a ke zdroji laseru 6, viz obr. 2.2-1. Tlačítko ~ (klíček pro zapnutí žhavení 7) a tlačítko VN 8 musí být v poloze vypnuto. Pak se zkontroluje připojení síťové šňůry zdroje laseru 6.
- 2) Stiskne se tlačítko ~ (klíček 7) pro zapnutí žhavení laserové trubice, čímž se rozsvítí kontrolka vedle tlačítka. V případě, že se kontrolka nerozsvítí, je třeba zjistit přítomnost síťového napětí v síťové zásuvce, případně vyměnit pojistku P01-250V/T2A na zadní straně zdroje laseru.
- 3) Po 2 minutách se stiskne tlačítko VN 8. Nedojde-li k nastartování laseru, je třeba krátce stisknout tlačítko START 9 (někdy i opakovaně po přestávkách). Správný chod laseru je možné zjistit:
  - a) sledováním zorného pole interferometru (není to často informace postačující),
  - b) pohledem na hlavičce laseru, kde by měly zářit obě části trubice laseru (pozoruje se po celé délce hlavičky laseru skrz horní kryt),
  - c) sledováním anodového proudu trubice laseru  $I_a$  na měřidle 10, a to na čelním panelu zdroje laseru.
- 4) Zkontroluje se anodový proud trubice  $I_a$  na měřidle 10 na čelním panelu zdroje laseru 6, kde by měla být hodnota asi  $I_a = 31$  mA. Není-li tato hodnota nastavena, lze ji doladit šroubkem potenciometru pro doladování anodového proudu  $I_a$  umístěným na zadní straně zdroje laseru 6.

Poznámky:

- Pokud není zorné pole vůbec či dostatečně intenzivně osvětlené a body 3b), 3c) jsou splněné, je třeba seřídít laser dle kap. 3.2.
- Přílišné používání tlačítka START 9, nebo práce s vyššími hodnotami anodového proudu trubice laseru  $I_a$  se **snižuje životnost trubice laseru**.
- Pokud ponecháme žhavení laseru výrazně déle než 2 minuty a krok 3) provedeme později, nebo pracujeme-li dlouhodobě jen s jednou polovinou trubice laseru, může dojít až k **poškození laseru**.

### ***Vypnutí laseru po měření***

- 1) Vypne se tlačítko VN 8 na čelním panelu zdroje laseru 6, viz obr. 2.2-1.
- 2) Vypne se tlačítko ~ (klíček 7) na čelním panelu zdroje laseru 6.

Poznámka:

- Laser není vhodné opakovaně spouštět a vypínat, jelikož se tím podstatně **snižuje životnost trubice laseru**.

### ***Zapnutí motorického ovládání interferometru před měřením***

- 1) Zkontroluje se propojení všech modulů interferometru (viz obr. 2-1) pomocí kabelů pro nízkonapětové napájení servopohonů a pro přenos řídicích signálů.
- 2) Připojí se ovládací modul IV (viz obr. 2-1) k síti 220 V, 50 Hz, a to zasunutím síťové šňůry do rozvaděče na stěně laboratoře a zapnutím rozvaděče. Po připojení interferometru svítí alespoň jedna kontrolka na ovládacím panelu modulu IV.
- 3) Pro ovládání posuvů noh příslušného modulu interferometru (při vlastních měřeních jde převážně o modul II pro uchycení modelu, viz obr. 2-1) se připojí tento modul k síti 220 V, 50 Hz, a to zasunutím síťové šňůry do rozvaděče na stěně laboratoře a zapnutím rozvaděče. Pak je třeba k tomuto modulu připojit i ovladač O (viz obr. 2-1).

### ***Vypnutí motorického ovládání interferometru po měření***

- 1) Vypne se rozvaděč na stěně laboratoře se zapojenou síťovou šňůrou od modulu interferometru IV (viz obr. 2-1) a odpojí se síťová šňůra od rozvaděče, čímž zhasnou všechny kontrolky na panelu modulu IV.
- 2) Vypne se rozvaděč na stěně laboratoře se zapojenou síťovou šňůrou od modulu interferometru s ovládanými nohami (při měřeních jde převážně o modul II pro uchycení modelu, viz obr. 2-1) a odpojí se síťová šňůra od rozvaděče.

### ***Seřizování a doladování interferometru na konečnou a nekonečnou šířku proužků***

Dle typu zkoumaného modelu, dle zvoleného způsobu vyhodnocování interferogramů a dle požadovaných výstupů z interferometrických měření je možné zvolit způsob interferometrické vizualizace a měření při seřizení interferometru na konečnou či nekonečnou šířku interferenčních proužků v referenční oblasti zorného pole (v místě, kde je zkoumaný transparentní objekt opticky homogenní). Interferometr lze seřídit na libovolně hustou osnovu horizontálních, vertikálních či obecně šikmých proužků a také na nekonečnou šířku proužků (provede roztažením libovolného jednoho proužku přes celé zorné pole interferometru). Příklad seřizení interferometru na konečnou šířku horizontálních či vertikálních interferenčních proužků je uveden na obr. 3.1-1. Jsou-li v měřicím prostoru nehomogenity, dojde při seřizení interferometru na konečnou šířku proužků k jejich zakřivení a při seřizení interferometru na nekonečnou šířku proužků dojde v důsledku nehomogenit ke vzniku interferenčních proužků. Interferenční řád se pak stanovuje jako počet proužků od referenční oblasti (při seřizení interferometru na nekonečnou šířku interferenčních proužků), nebo relativní amplituda zakřivení proužků

vůči referenční osnově proužků (při seřízení interferometru na konečnou šířku interferenčních proužků).

Při vlastní vizualizaci nebo měření je obvykle nutné mezi jednotlivými měřeními (záběry) často doladovat požadované seřízení interferometru na konečnou či nekonečnou šířku proužků. Rozladování může být způsobeno případnými vibracemi zkoumaného modelu, zařízením pro udržování chodu modelu, zařízením pro udržování okrajových podmínek na modelu, vniknutím teplejšího vzduchu z modelu do skříně interferometru, nebo také neopatrností obsluhy interferometru.

Seřízení a doladění základní osnovy interferenčních proužků v referenční oblasti nebo seřízení a doladění interferometru na nekonečnou šířku proužků se provádí motorickým pootočením zrcadla  $Z_7$  z panelu ovládacího modulu interferometru IV (viz obr. 2-1), a to buď kolem vertikální osy, nebo nezávisle kolem horizontální osy. Je-li při seřizování na konečnou šířku proužků osnova proužků zakřivena, nebo vzniká-li při seřizování na nekonečnou šířku proužků kruhový proužek, je třeba doladit zařízení axiálním posuvem čočky  $C_5$  (také pomocí motorického posuvu z panelu ovládacího modulu interferometru IV). Způsob zacházení s motorickými posuvy optických prvků je popsán v kap. 2.1.

### 3.4 Testování Machova - Zehnderova interferometru

Kvalita vizualizace a přesnost určení interferenčního řádu pomocí Machova - Zehnderova interferometru závisí pouze:

- 1) na přesnosti stanovení vlnové délky světla použitého laseru,
- 2) na čistotě optických prvků (malé nečistoty ovlivňují pouze kvalitu interferogramů),
- 3) na homogenitě čoček a kvalitě provedení optických prvků.

Tyto parametry je možné sledovat před každou vizualizací a před každým měřením a zajistit tak vysokou kvalitu interferogramů.

*Vlnová délka světla* je pevně dána konstrukcí laseru, a to s relativní přesností lepší než desetina promile, která vysoce převyšuje případné chyby dalších vlivů. Laser vyzařuje pouze na základním příčném modu  $TEM_{00}$  s vlnovou délkou 632,8 nm, případný vznik vyšších příčných modů s nepatrně jinou vlnovou délkou se projeví vznikem vedlejších stop při pozorování vyzařovaného laserového svazku na stínítku. Z uvedených důvodů není nutné testovat vlnovou délku laserového světla, ale je vhodné sledovat, zda laser pracuje na základním příčném modu  $TEM_{00}$  a případně jej doladit snížením výkonu laseru otáčením ovládacích prvků 3 (viz obr. 2.2-1) na předním a zadním čele hlavice laseru 1. Při seřizování základního příčného modu  $TEM_{00}$  je vhodné vždy poznačit si původní polohu ovládacích prvků 3.

*Čistotu optických prvků* lze hodnotit dle parazitní interference vznikající v zorném poli interferometru. Je-li v optické sestavě nežádoucí prachové zrníčko vyskytující se mimo zaostřenou rovinu, nebo i lokální vada čočky (v daném zařízení se nevyskytuje), bylo by možné v obraze interferogramu (viz obr. 3.1-1) sledovat parazitní interferenci ve tvaru soustředných kružnic kolem místa, kde se vyskytuje prachové zrníčko. Nežádoucí prachové zrníčko lze před každým měřením odstranit a takto daný vliv eliminovat. Někdy se však projevuje v interferenčním poli (viz obr. 3.1-1) výraznější zrnitost, způsobená mnohonásobnou interferencí na souvislých prachových vrstvách na optických prvcích (velmi vzdálených od zaostřené roviny),

kteřá nemá vliv na přesnost měření, ale pouze na kvalitu obrazů interferogramů a lze ji odstranit celkovým vyčištěním optických prvků (viz kap. 3.1 - údržba interferometru).

*Nehomogenity čoček a nekvalitní provedení optických prvků* způsobují největší chyby při vizualizaci a přesnosti určování interferenčního řádu. I když daný Machův - Zehnderův interferometr patří mezi velmi přesná zařízení tohoto druhu, lze po pečlivém seřízení aparatury dle postupu popsaného v kapitole 3.1 získat interferenční pole, kde absolutní chyba určení interferenčního řádu je  $\pm 0,15$ , a to prakticky v celém zorném poli interferometru s výjimkou okrajů, kde tato chyba má hodnotu až  $\pm 0,3$ . Uvedenou chybu je třeba minimalizovat pomocí pečlivého seřízení interferometru před každým novým měřením, přičemž lze snadno (viz obr. 3.1-1) zmapovat konkrétní stav rozložení dané chyby při daném seřízení interferometru, a to záznamem interferogramu bez nehomogenit v měřicím prostoru a proměření interferogramu např. pomocí měřítka. Výsledky následných měření s proměřovanými nehomogenitami v měřicím prostoru je pak vhodné příslušně korigovat. Z uvedeného plyne, že i nehomogenity čoček a nekvalitní provedení optických prvků je problém relativně lehce zvládnutelný a lze jej eliminovat.

Testování Machova - Zehnderova interferometru je součástí jakéhokoliv měření na tomto zařízení. Pro odbornou a pečlivou obsluhu se znalostí optiky je testování reálné a zvládnutelné i s běžnými měřicími prostředky (např. milimetrové měřítko). Testování interferometru nelze provádět na externích pracovištích, a to vzhledem k rozměrům zařízení, vzhledem k závislosti zařízení na seřízení apod., a tudíž není možné a také nutné je provádět v institucích pro normalizaci a měření.