

# Reverzní interferometry pro měření decentricity optických soustav

*V práci je představen princip fungování tzv. reverzních interferometrů, které jsou vhodné např. pro měření decentricity optických prvků a soustav. Po diskuzi interference světla a analytického popisu reverzní interference jsou demonstrovány konstrukce a základní principy vybraných reverzních interferometrů.*

**Klíčová slova:** interference, aberace, reverzní interferometr

## 1. ÚVOD

Interference světla nachází široké uplatnění v řadě oblastí vědy a techniky. Objev laseru významným způsobem rozšířil oblast aplikací interference světla do oblasti průmyslové metrologie a to v důsledku dlouhé koherentní délky laserového záření. Významné místo zaujímá interference světla zejména v optickém průmyslu, kde nám umožňuje provádět ta nejpřesnější měření tvaru vyráběných optických prvků a hodnocení kvality zobrazení optických soustav. Zařízení, na kterých se tato měření provádějí, se nazývají interferometry [1–14]. V současné době existuje velká řada různých typů interferometrů [5] a řada firem se jejich vývojem a výrobou zabývá, viz např. [8, 9].

Velká skupina interferometrů je založena na tzv. dvousvazkové interferenci, kdy dochází k interferenci dvou vlnových polí, z nichž jedno interaguje s měřeným předmětem (signální pole) a druhé pole má známé vlastnosti (referenční pole). Interakcí signálního pole s měřeným předmětem dochází k deformaci vlnoplochy tohoto pole a po jeho interferenci s referenčním polem získáme interferogram, jehož vyhodnocením lze zjistit vybrané informace o vlastnostech měřeného předmětu (např. tvaru měřené optické plochy). Vyhodnocení interferogramu lze provádět řadou způsobů, které jsou uvedeny např. v [5, 6].

Vhodným návrhem optické soustavy interferometru lze však dosáhnout i toho, že interferogram obsahuje jen určité námi požadované informace o vlastnostech měřeného předmětu. V této práci stručně popíšeme jeden speciální typ interferometrů, tzv. reverzních interferometrů, které umožňují přímo detekovat nesymetrickou část vlnoplochy signálního svazku. Toto má velký význam např. při zjišťování decentricity optických prvků a soustav.

## 2. INTERFERENCE SVĚTLA

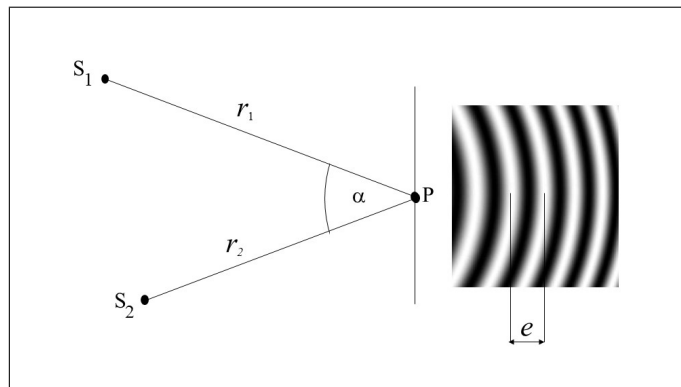
Uvažujme dva koherentní světelné zdroje  $S_1$  a  $S_2$ , z kterých vycházejí dvě sférické, lineárně polarizované vlny, jak je znázorněno na *obr. 1*. Jak je všeobecně známo [1–12], dochází v obecném bodu P, ležícím v rovině detektoru světla, k interferenci těchto vln. Intenzita  $I$  výsledného vlnového pole v bodě P pak bude popsána vztahem

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi \cos \psi, \quad (1)$$

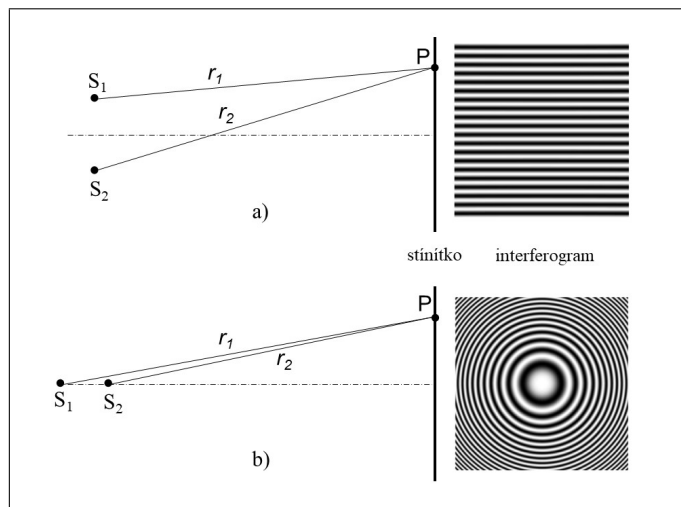
kde  $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(r_1 - r_2)$  je fázový rozdíl mezi oběma vlnami,  $\psi$  je úhel, který mezi sebou svírají vektory intenzity elektrického pole obou vln,  $I_1$  a  $I_2$  jsou intenzity pole v bodě P vln vycházejících z bodů  $S_1$  a  $S_2$ , dále pak

$$r_1 = \overline{S_1 P}, \quad r_2 = \overline{S_2 P}, \quad (2)$$

jsou vzdálenosti bodů  $S_1$  a  $S_2$  od bodu P a  $\lambda$  je vlnová délka světla.



Obr. 1 Interference světla



Obr. 2 Vzhled interferenčního pole – a) zdroje paralelně se stínítkem, b) zdroje kolmo ke stínítku

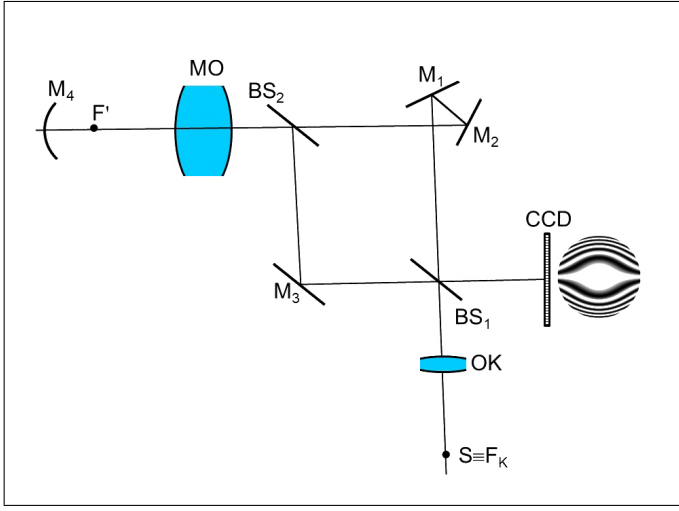
Bod P se nachází v rovině detektoru světla (film, CCD nebo CMOS sensor apod.), kde bude rozložení intenzity světla charakterizováno tzv. interferenčními proužky, jak je patrné z *obr. 1*. Tvar těchto proužků bude záviset na poloze detekční roviny vzhledem k bodům  $S_1$  a  $S_2$ , jak je patrné z *obr. 1*. Vzdálenost  $e$  dvou sousedních tmavých nebo světlých proužků je dána vztahem [1, 4, 10]

$$e = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \approx \frac{\lambda}{\alpha}, \quad (3)$$

kde poslední výraz platí pro malé úhly  $\alpha$ . Na *obr. 2* je ukázán vzhled interferenčního pole v závislosti na poloze zdrojů pole  $S_1$  a  $S_2$  vůči detekční rovině.

### 3. REVERZNÍ INTERFEROMETR

Speciálním typem interferometru pro měření kvality optických prvků a soustav je reverzní interferometr. Obecně princip reverzního interferometru spočívá v tom, že vhodným uspořádáním chodu vlnového pole v obou větvích interferometru docílíme toho, že vlnové pole jedné z větví bude reverzně otočeno vzhledem k druhé větvi. Toho je docíleno přidáním jednoho odrazu navíc v jedné větvi. Principiální schéma jednoho typu reverzního interferometru je ukázáno na obr. 3 [7]. Tento interferometr je navržen tak, že měří jen nesymetrické části vlnoplochy, tj. v případě axiálního vlnového pole měří přímo axiální komu, která charakterizuje decentricitu v měřené optické soustavě nebo optického prvku (reverzní interferometr [5]).



Obr. 3 Reverzní interferometr pro měření axiální komy

Funkce zmíněného interferometru je následující. Z bodového zdroje světla S, ležícího v předmětovém ohnisku objektivu kolimátoru OK vychází sférická vlna, která je objektivem OK transformována na rovinnou vlnu. Tato vlna je děličem světla BS<sub>1</sub> rozdělena do dvou vln, z nichž první se odráží od zrcadla M<sub>3</sub> a pak, po odrazu od děliče světla BS<sub>2</sub>, vstupuje do měřeného objektivu MO. Po průchodu tímto objektivem se odráží od sférického zrcadla M<sub>4</sub> a vrací se zpět. Sférické zrcadlo je umístěno tak, že jeho střed křivosti je totožný s obrazovým ohniskem F' měřeného objektivu MO. Druhá vlna prochází děličem BS<sub>1</sub>, odráží se od zrcadel M<sub>1</sub> a M<sub>2</sub> a po průchodu děličem světla BS<sub>2</sub> vstupuje do měřeného objektivu MO. Po průchodu tímto objektivem se odráží od sférického zrcadla M<sub>4</sub> a vrací se zpět. Obě vlny pak spolu interferují a výsledný interferenční pole je detekováno CCD senzorem. Výsledný interferogram je znázorněn vedle CCD senzoru.

Zabývejme se nyní jednoduchým analytickým popisem fáze interferujících polí v reverzním interferometru. Je-li např. deformace vlnoplochy (dráhový rozdíl) v jedné větvi dána např. vztahem

$$W_1 = W_{1y}y + W_{20}(x^2 + y^2) + W_{40}(x^2 + y^2)^2 + W_{31}y(x^2 + y^2) + W_{22}(y^2 - x^2) \quad (4)$$

a v druhé větvi vztahem ( $y \rightarrow -y$ )

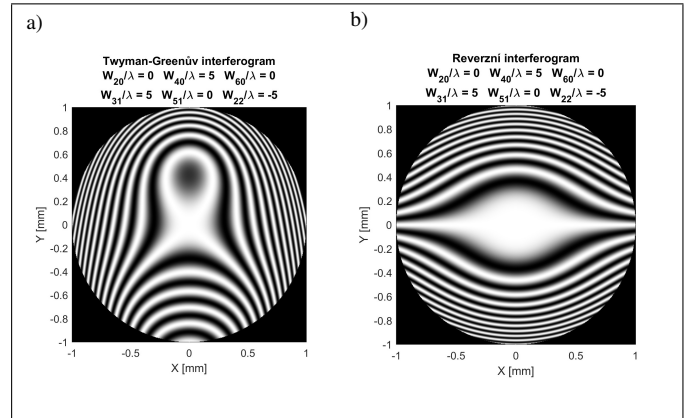
$$W_2 = W_{1y}(-y) + W_{20}(x^2 + y^2) + W_{40}(x^2 + y^2)^2 + W_{31}(-y)(x^2 + y^2) + W_{22}(y^2 - x^2), \quad (5)$$

kde  $W_{1y}$  je koeficient příčné defokusace,  $W_{20}$  je koeficient podélné defokusace,  $W_{40}$  je koeficient sférické aberace 3. řádu,  $W_{31}$  je koeficient komy 3. řádu a  $W_{22}$  je koeficient astigmatismu 3. řádu, pak výsledný rozdíl fází obou vln v rovině detektoru bude

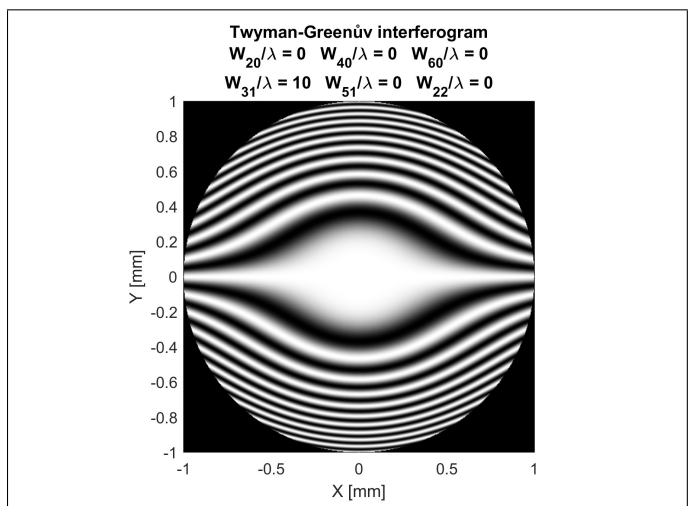
$$\begin{aligned} \varphi &= \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) (W_1 - W_2) \\ &= \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) 2 [W_{31}y(x^2 + y^2) + W_{1y}y]. \end{aligned} \quad (6)$$

Jak je z tohoto vztahu patrné, reverzní interferometr detekuje jen nesymetrickou část deformace vlnoplochy, tj. v našem případě detekuje přítomnost komy, což je např. pro zjišťování decentricity čoček (optických soustav) rozhodující. Na obr. 4a je zobrazen interferogram v klasickém Twymanově-Greenově interferometru a na obr. 4b interferogram téhož pole v reverzním interferometru. Na obr. 5 je znázorněn interferogram v klasickém Twymanově-Greenově interferometru, majícího dvojnásobnou velikost komy. Jak je z obr. 4b a obr. 5 patrné, jsou oba interferogramy totožné, jak plyne ze vztahu (6).

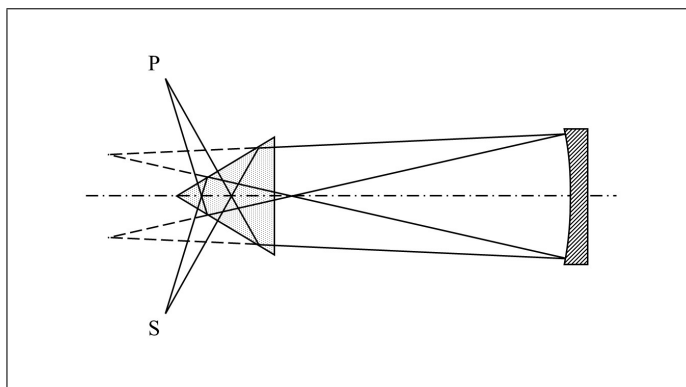
Existuje ještě několik možných realizací reverzních interferometrů, jejichž optické schéma je uvedeno např. v literatuře [5, 13, 14]. Jmenujme zástupce reverzních interferometrů složených z jednoduchých dělicích hranolů [5]: jsou to reverzní interferometry Köstersův, Gatesův a Saundersův, jejichž principiální schéma je ukázáno na obr. 6 – obr. 8.



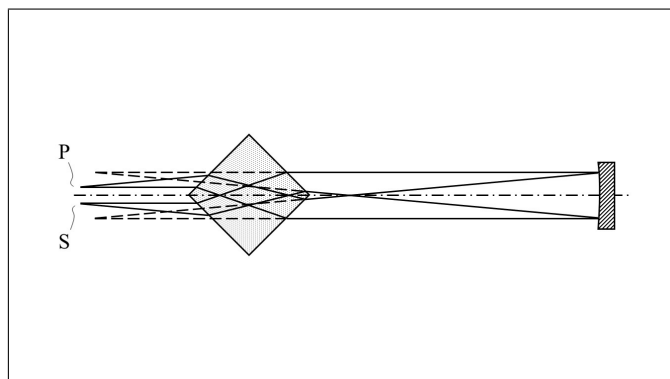
Obr. 4 Porovnání a) Twymanova-Greenova a b) reverzního interferogramu



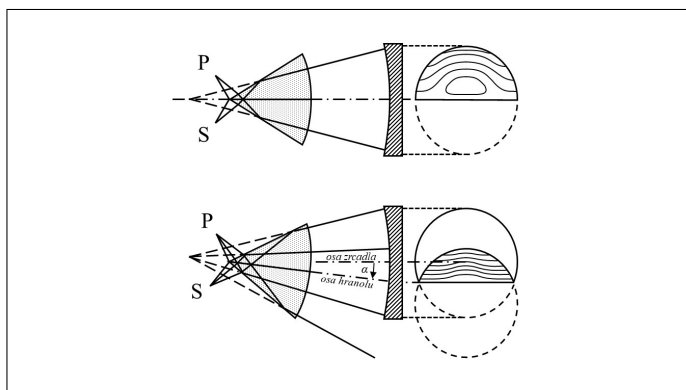
Obr. 5 Twymanův-Greenův interferogram s  $W_{31}/\lambda = 10$



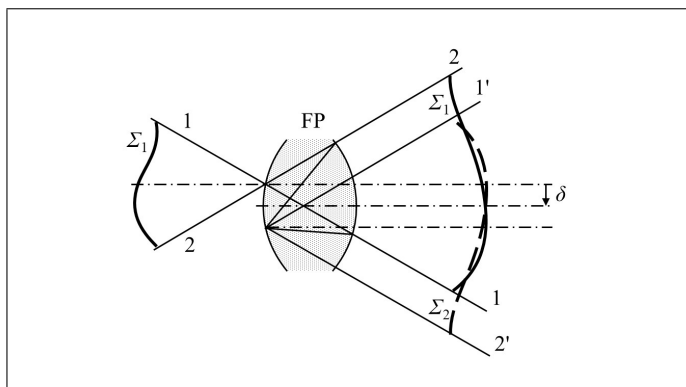
Obr. 6 Köstersův reverzní interferometr [5] (S – zdroj, P – pozorovatel)



Obr. 7 Gatesův reverzní interferometr [5] (S – zdroj, P – pozorovatel)



Obr. 8 Saundersův reverzní interferometr [5] (S – zdroj, P – pozorovatel)



Obr. 9 Fabryův-Perotův interferometr [5]

Köstersův reverzní interferometr je založen na poznatku, že interference může být docílena kombinací (spojením) libovolných dvou podobných hranolů, jestliže vrcholové úhly hranolů u společné stěny jsou přesně polovinou vrcholového úhlu, který je proti této společné stěně. Základní složkou Köstersova reverzního interferometru (obr. 6) jsou dva hranoly s vrcholovými úhly  $30^\circ - 60^\circ - 90^\circ$ . Vlnoplocha vycházející ze zdroje S se odráží od stěny hranolu, odráží se na testovaném předmětu (zrcadle), vrací se zpět do hranolu a po odrazu na protější stěně, než kde docházelo k odrazu při vstupu, pokračuje do místa pozorovatele P. Uvnitř hranolu vzniká interferenční pole dvou reverzně obrácených vln.

Gatesův reverzní interferometr se skládá ze dvou hranolů  $45^\circ - 90^\circ - 45^\circ$  (resp. populárního děliče svazků – dělicí kostky). Princip průchodu vlnoplochy vycházející ze zdroje S skrze hranoly, odraz na testovaném předmětu a průchod zpět k pozorovateli P je naznačen na obr. 7. Oproti jiným konstrukcím má tato mírnou nevýhodu v malé apertuře pozorovaného pole.

Výše zmíněné typy interferometrů mají dva společné nedostatky – virtuální poloha zdroje není totožná s obrazem zdroje a rovinné plochy jsou také zdrojem dodatečných aberací. Tyto nedostatky zmírňuje Saundersův reverzní interferometr, jehož hranol je naznačen na obr. 8. Opět se jedná o složení dvou hranolů v základu podobných jako v případě Köstersova interferometru, ovšem s jednou sférickou stranou.

Dalším příkladem může být např. reverzní sférický konfokální Fabryův-Perotův interferometr [13, 14], jehož základní součásti jsou schematicky ukázány na obr. 9. Vlnoplocha  $\Sigma_1$  jednak prochází skrze člen FP, ale také dochází k vnitřní reflexi a vzniku reverzní vlny  $\Sigma_2$ , která s vlnoplochou  $\Sigma_1$  interferuje. Podrobné užití tohoto optického členu nalezne čtenář např. v [14].

#### 4. ZÁVĚR

V práci byl stručně a přehledně představen princip fungování specifického typu interferometrů – tzv. reverzních interferometrů. Tato zařízení jsou vhodná např. pro měření decentricity optických prvků a soustav. Nejprve byla stručně diskutována interference světla, následně ukázán analytický popis reverzní interference. Aplikace tohoto optického jevu byla demonstrována na konstrukci vybraných reverzních interferometrů.

**Práce byla vypracována za podpory projektu SGS21/092/OH-K1/2T/11 Českého vysokého učení technického v Praze.**

#### REFERENCE

- [1] A. Mikš. *Aplikovaná optika*. Vydavatelství ČVUT, 2009.
- [2] M. Born and E. Wolf. *Principles of Optics*. Pergamon Press, 1964.
- [3] B. Fuka, J. Havelka. *Optika*. SPN, 1961.
- [4] M. Francon. *Optical Interferometry*. Academic Press, 1966.
- [5] D. Malacara. *Optical Shop Testing*. John Wiley & Sons, 1992.
- [6] A. Mikš. Interferometrické metody vyhodnocování sférických ploch v optice. *Jemná mechanika a optika*, 46(1):29–35, 2001.
- [7] H. H. Hopkins and H. J. Tiziani. A theoretical and experimental study of lens centring errors and their influence on optical image quality. *Brit. J. Appl. Phys.*, 17:33–54, 1966.
- [8] Zygo. <https://zygo.com/>, May 2022.

- [9] Trioptics. <https://trioptics.com/>, May 2022.
- [10] A. N. Zakharyevsky. *Interferometry (v ruštině)*. Obranný průmysl, 1952.
- [11] P. Hariharan. *Basic Interferometry*. Academic Press, 2007.
- [12] W. H. Steel. *Interferometry*. Cambridge, 1967.
- [13] M. Rafalowski. Testing the coma of decentration with a confocal fabry-perot interferometer. *Appl. Opt.*, 27:3046–3050, 1988.
- [14] M. Rafalowski. Precise testing of asymmetric wavefronts with an inverting interferometer. *Appl. Opt.*, 29:1477–1481, 1990.

prof. RNDr. Antonín Mikš, CSc., ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra fyziky, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 – Dejvice, tel: +420 224 354 948, e-mail: miks@fsv.cvut.cz

Ing. Petr Pokorný, Ph.D., ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra fyziky, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 – Dejvice, tel: +420 224 357 906, e-mail: petr.pokorny@fsv.cvut.cz

***Jedná se o vědecký článek***

**Reverse interferometers for measuring the decentricity of optical systems** (A. Mikš, P. Pokorný) ..... XX

The paper presents the principle of operation of the so-called reverse interferometers, which are suitable for measuring the decentricity of optical elements and systems. After a discussion of light interference and an analytical description of reverse interference, the design and basic principles of selected reverse interferometers are demonstrated.

**Keywords:** interference, aberrations, reverse interferometer