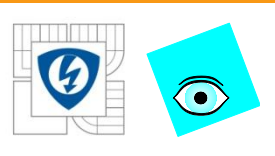


Přesné měření délek pomocí laserové interferometrie

Ing. Ondřej Číp, Ph.D. (ÚPT AV ČR, v.v.i.)
Ing. Zdeněk Buchta, Ph.D. (ÚPT AV ČR, v.v.i.)

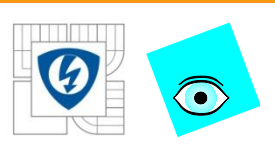
14. října 2011

Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



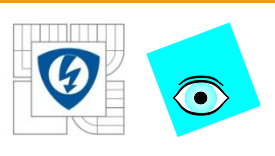
Úvod do problematiky metrologie délky

- Historie a současnost definice jednotky 1 metr
 - Délka patří mezi základní veličiny, které člověk využívá pro svoji orientaci v prostoru a čase
 - Iniciativa výrobců i uživatelů vedla k hledání jednotného systému měření délky, který by následně zajistil vzájemnou slučitelnost (kompatibilitu) výrobků
 - Úkolem bylo zajistit **definici jednotky délky** a dále definovat **způsob měření délky**



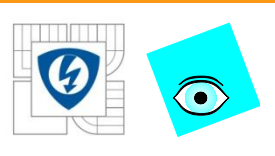
Úvod do problematiky metrologie délky

- Historie a současnost definice jednotky 1 metr
 - Iniciativa se zaměřila na hodnoty vzdáleností, které jsou lidé přirozeně schopni odhadnout podle antropometrických rozměrů svého těla („palec“, „loket“, „sáhu“)
 - Proporce populace se však v čase měnily, vyvstal problém s dlouhodobou reprodukovatelností těchto jednotek proporce se však v čase měnily, vyvstal problém s dlouhodobou reprodukovatelností těchto jednotek



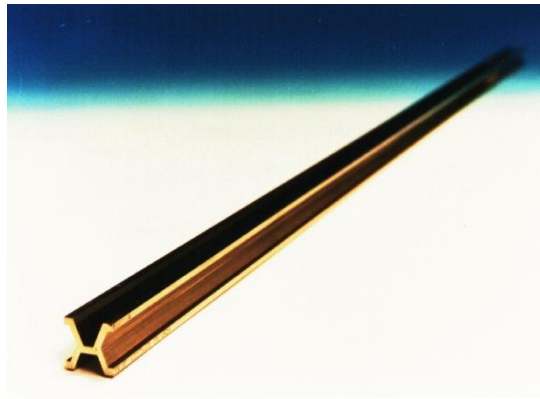
Úvod do problematiky metrologie délky

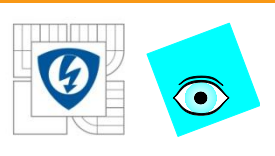
- Historie a současnost definice jednotky 1 metr
 - Jednotka délky byla proto odvozena od rozměrů Země a 1 metr byl definován jako délka jedné desetimilióntiny zemského kvadrantu (poloviny délky poledníku)
 - Zhotovena v roce 1795 provizorní metrová tyč z mosazi, která se tak stala primárním normálem délky



Úvod do problematiky metrologie délky

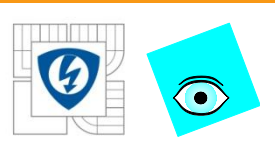
- Historie a současnost definice jednotky 1 metr
 - 20. května 1875 podepsalo celkem 17 zemí „Konvenci metru“
 - Konvence stanovila, že jednotkou délky je 1 metr a jeho délka je definována artefaktem – tyčí ze slitiny platiny a iridia, která je měřena při teplotě tání ledu





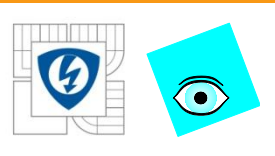
Úvod do problematiky metrologie délky

- Historie a současnost definice jednotky 1 metr
 - V první polovině 20. století došlo k rozvoji nových fyzikálních teorií, popsány jevy absorpce/emise
 - 20. října 1960 jednotka délky odvozena od vlnové délky světla. Jednalo se o 1 650 763,73 násobek vlnové délky kryptonové výbojky ve vakuu
 - Kryptonová výbojka je zdroj monochromatického světla s úzkou spektrální čarou
 - Bylo tak možné odměřovat délku pomocí světla



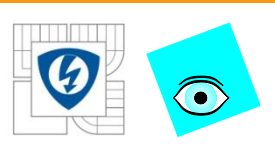
Úvod do problematiky metrologie délky

- Historie a současnost definice jednotky 1 metr
 - S objevem laseru a zejména principu absorpční spektroskopie bylo postupně možné vygenerovat vlnovou délku světla s přesností na 12 řádů
 - 21. října 1983 komise *Conférence Generale des Poids et Mesures* (CGPM) stanovila novou definici:
 - **1 metr je vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu během časového intervalu $1/299\,792\,458$ sekundy (tj. světlo urazí ve vakuu za sekundu přesně 299 792 458 metrů).**



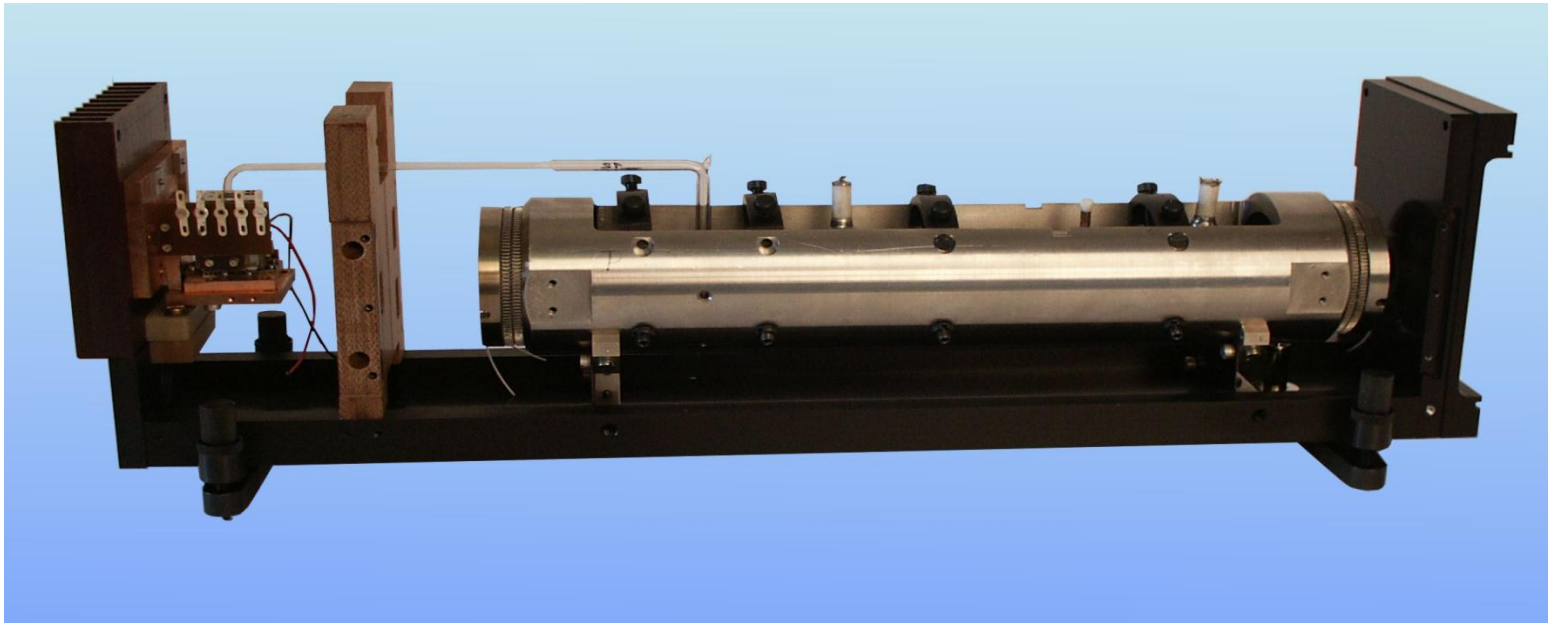
Úvod do problematiky metrologie délky

- Historie a současnost definice jednotky 1 metr
 - Definice díky vztahu mezi délkou, rychlostí světla a časem jinými slovy říká, že pokud máme k dispozici laser s vysoce stabilní vlnovou délkou, určitý násobek těchto vlnových délek vytvoří vzdálenost 1 metr
 - Realizace je popsána v „Mise en Pratique of the Definition of the meter“ publikované pravidelně úřadem BIPM



Úvod do problematiky metrologie délky

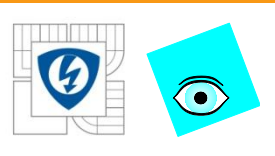
- Historie a současnost definice jednotky 1 metr
 - Mezi nejběžnější státní etalony patří plynový HeNe laser stabilizovaný v parách molekulárního jódu na vlnové délce 633 nm



14.10.2011

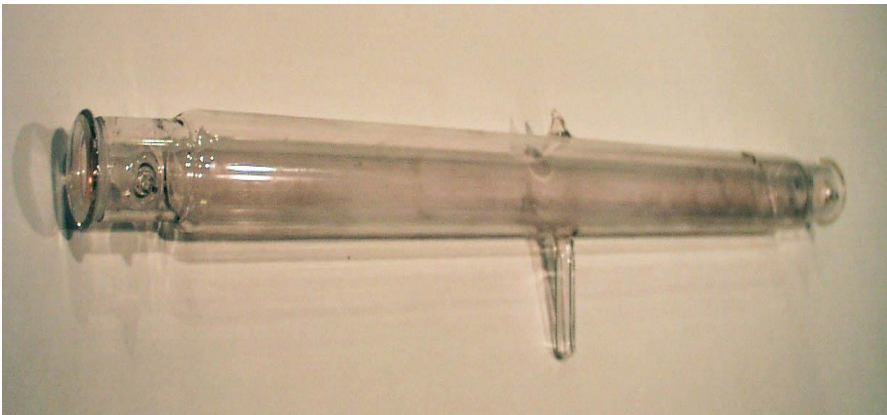
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





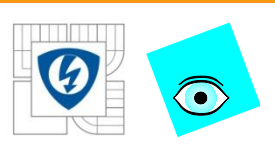
Úvod do problematiky metrologie délky

- Historie a současnost definice jednotky 1 metr
 - Druhým nejběžnějším etalonem bývá Nd:YAG laser, na vlnové délce 532 nm. V současnosti se stabilita tohoto laseru blíží stabilitě atomových hodin pracujících na principu chlazených iontů Cesia, tj. 14tý řád a více



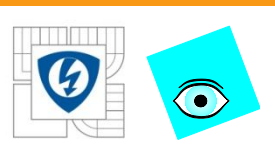
14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



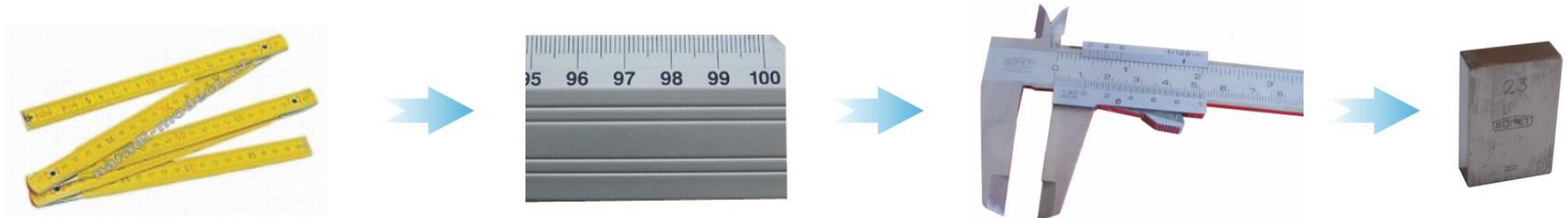
Úvod do problematiky metrologie délky

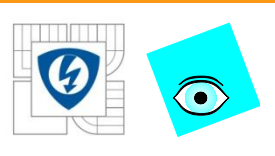
- Metrologická návaznost
 - Díky současné definici jednotky 1 metr existuje přesný systém pro kontrolu délky a rozměrů výrobků, součástí, stavebních útvarů apod.
 - Rozsah a přesnost měřidla by měl vždy odpovídat požadovanému typu zjišťované vzdálenosti
 - Ve stavebnictví používají svinovací metry, ve strojírenství posuvná pravítka, pro jemnou mechaniku a optiku mikrometrické šrouby a číselníkové úchylkoměry, laserové interferometry



Úvod do problematiky metrologie délky

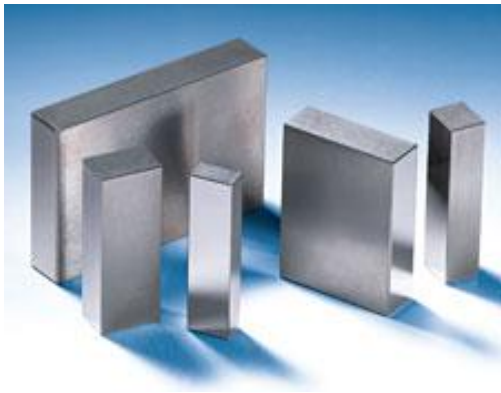
- Metrologická návaznost
 - Pro správnou funkci těchto měřidel je nezbytná kalibrace stupnice
 - Pro kalibraci stupnice určitého měřidla je nutné vždy použít měřidlo přesnější
 - Měřidla jednotlivých tříd přesnosti na sebe navazují

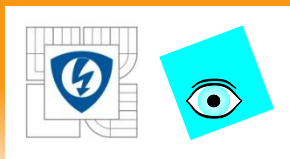




Úvod do problematiky metrologie délky

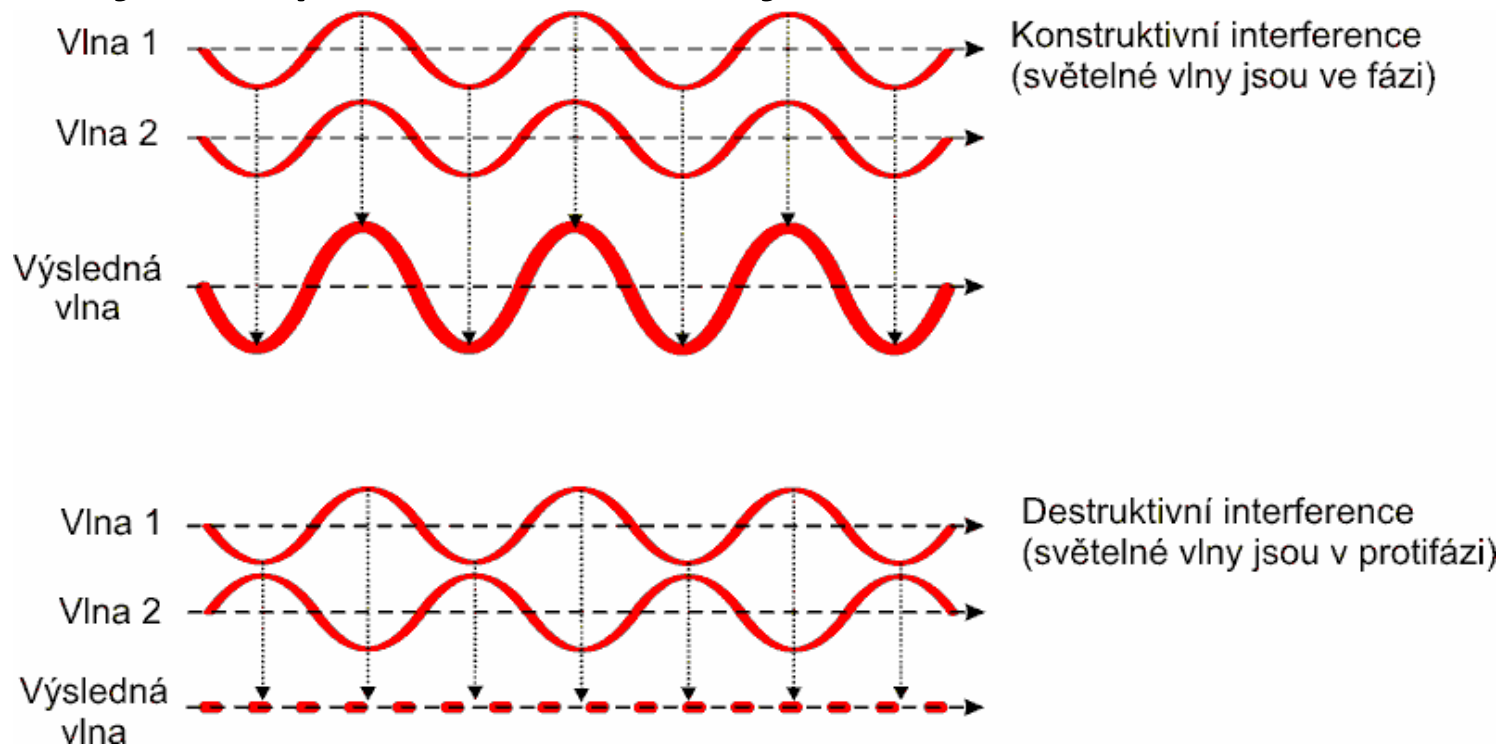
- Metrologická návaznost
 - **Koncové měrky** jsou posledním měřidlem, který reprezentuje mechanický normál délky
 - Koncové měrky mají svoji délku ověřenou kalibrací pomocí optických zařízení, která využívají laserové záření – laserové interferometry

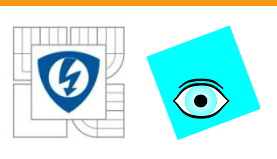




Interference světla a její využití pro měření délek

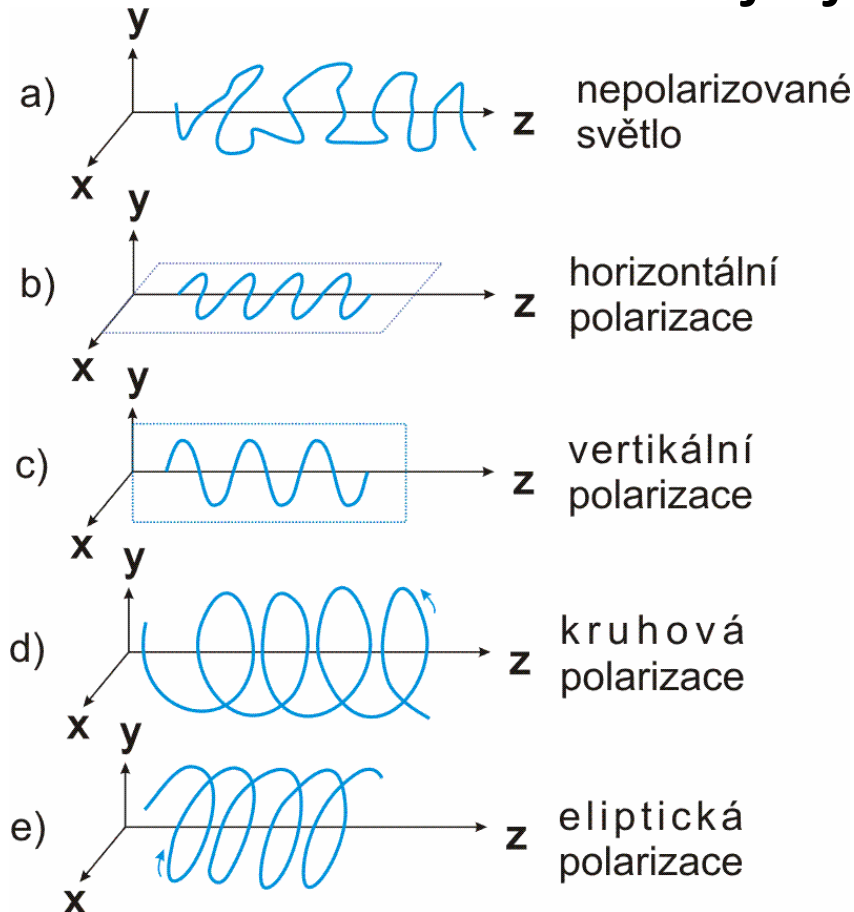
- Interference je superpozice dvou nebo více světelných svazků, které mají stejný směr, stejnou polarizaci, stejnou frekvenci

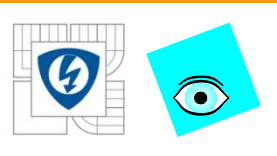




Interference světla a její využití pro měření délek

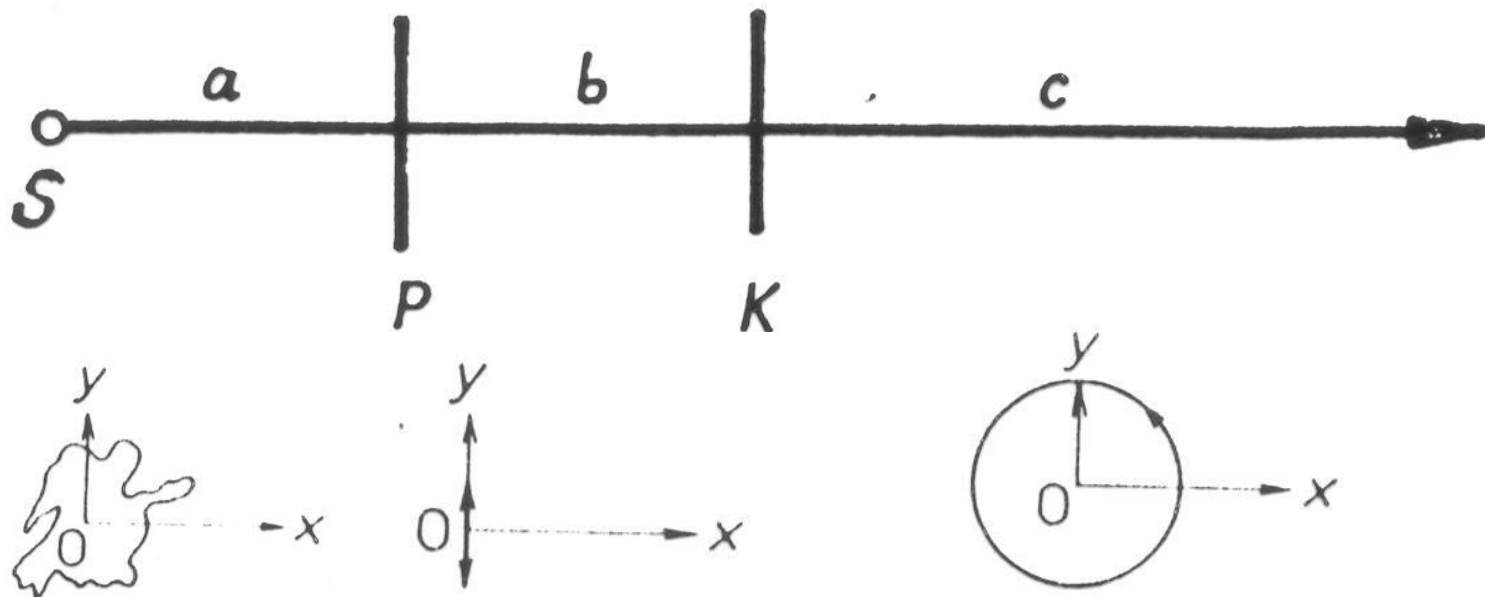
- Velmi důležitou vlastností světla je jeho polarizace

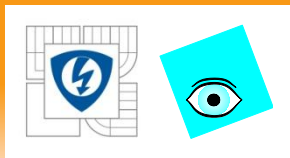




Interference světla a její využití pro měření délek

- Velmi důležitou vlastností světla je jeho polarizace
 - Jak vytvoříme různé polarizace světelné vlny?

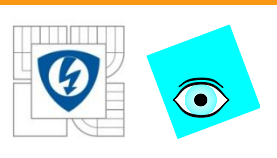




Interference světla a její využití pro měření délek

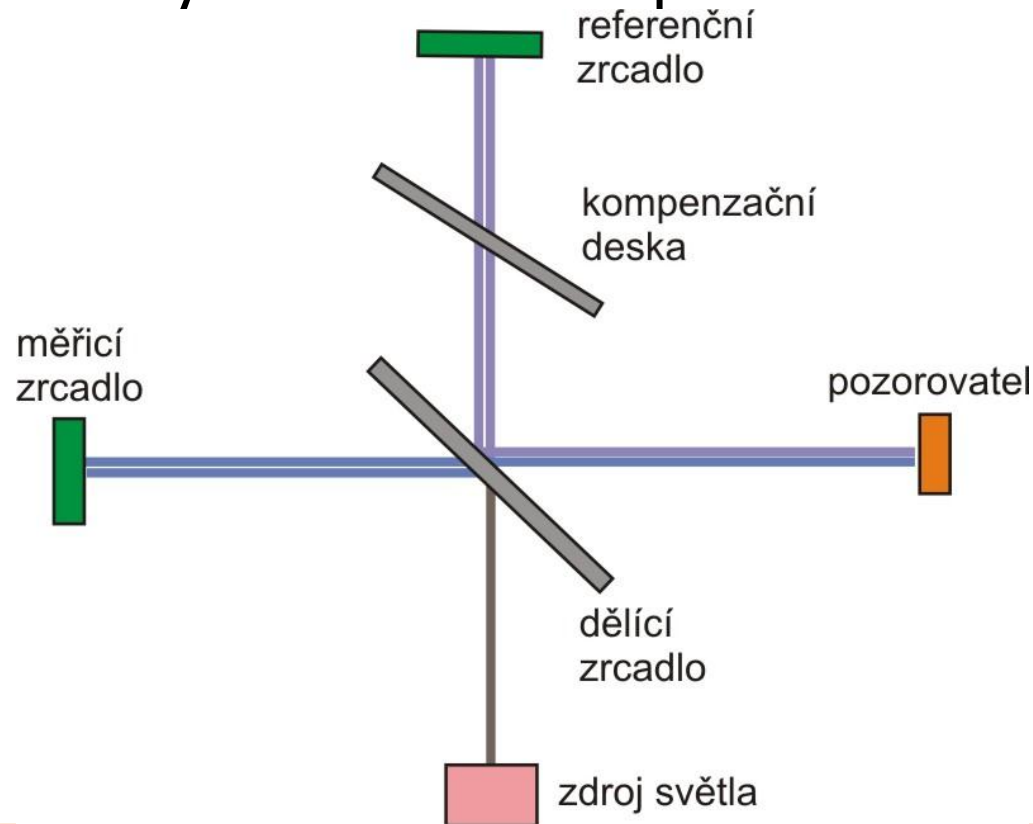
- Interferometry

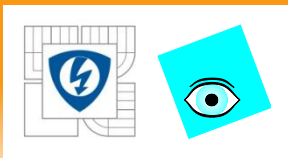
- Jsou optické přístroje, které využívají interferenci světla k zjišťování vzdáleností, tvarů neznámých předmětů, rovinnosti ploch, přímočarosti vedení, atd.
- Z hlediska počtu interferujících vln rozeznáváme interferometru využívající:
 - interferenci dvousvazkovou
 - interferenci mnohosvazkovou



Interference světla a její využití pro měření délek

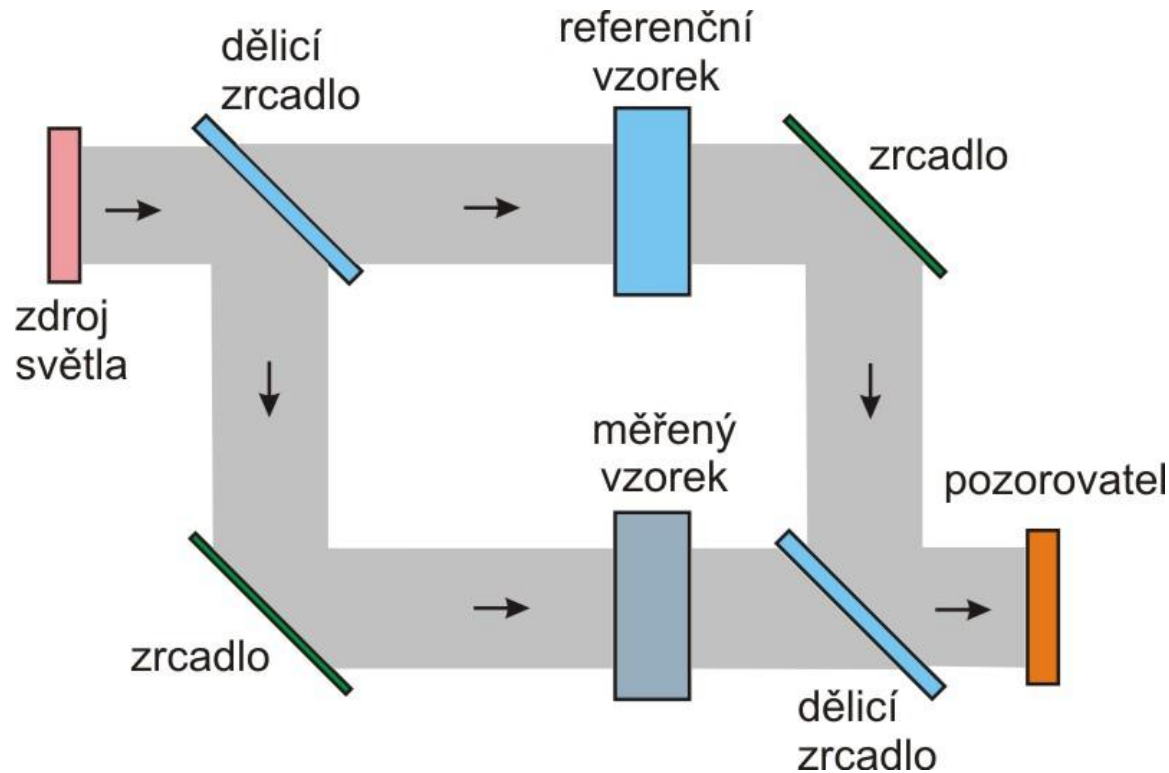
- Michelsonův interferometr
 - Dvousvazkový interferometr pro měření vzdáleností

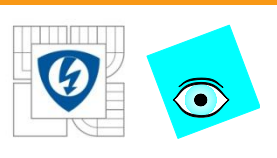




Interference světla a její využití pro měření délek

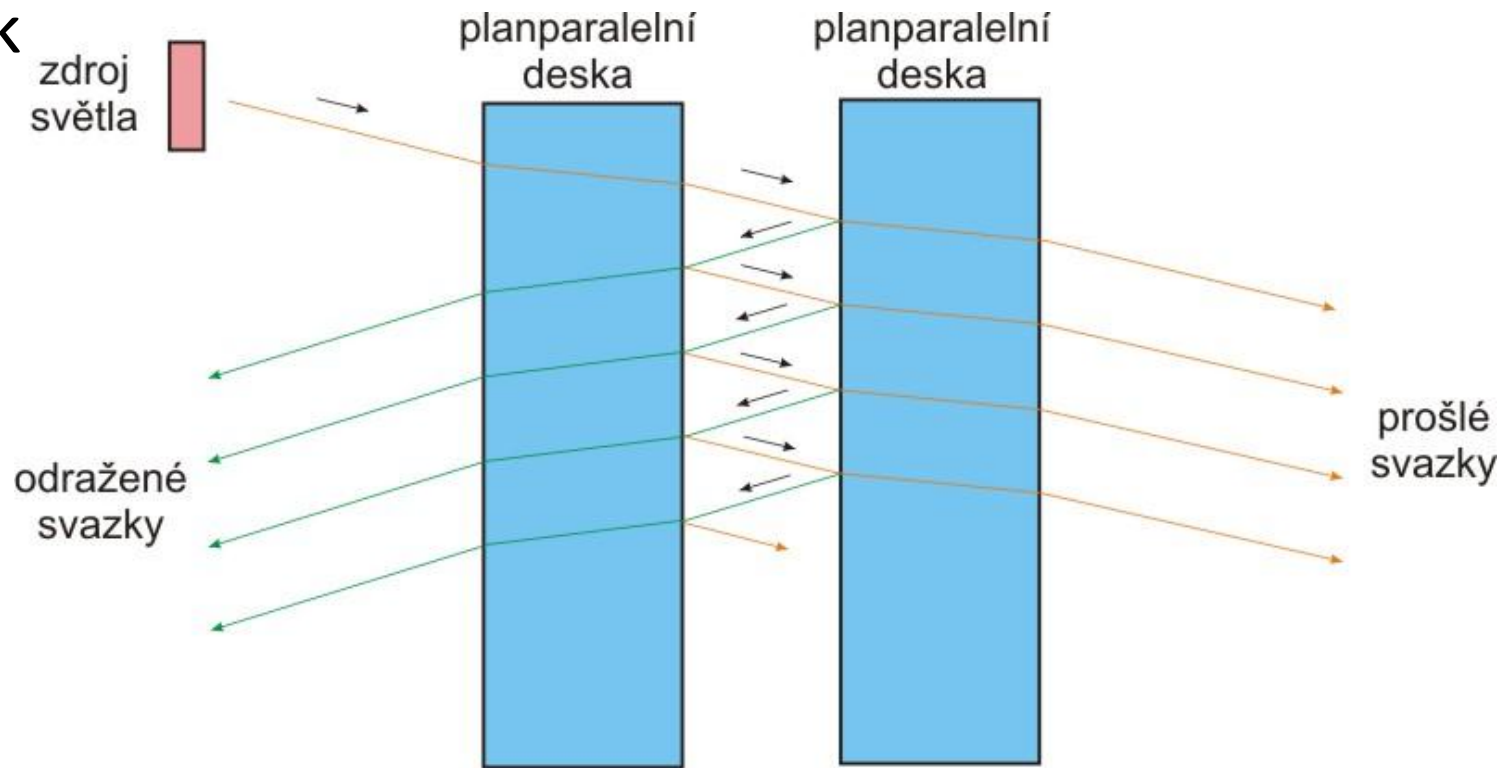
- Machův-Zehnderův interferometr
 - Dvousvazkový interferometr pro měření vzorků

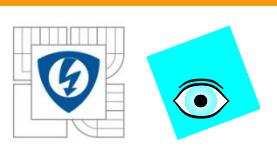




Interference světla a její využití pro měření délek

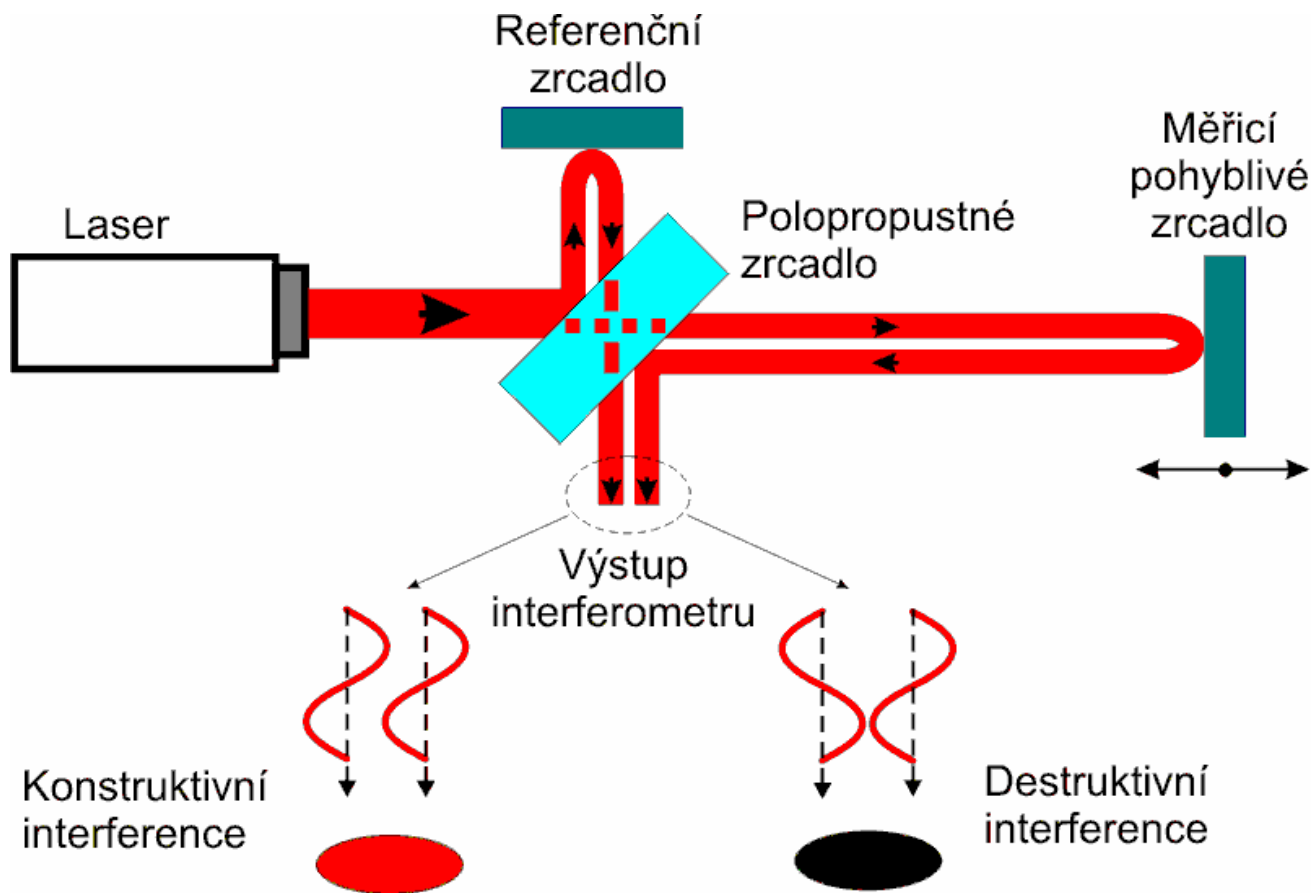
- Fabryův-Perotův interferometr
 - mnohosvazkový interferometr pro selekci vlnových délek

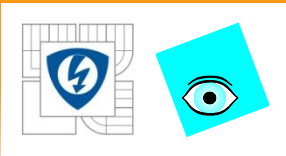




Interference světla a její využití pro měření délek

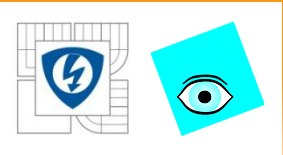
- Laserové interferometry pro měření délek





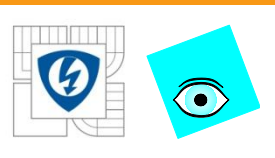
Interference světla a její využití pro měření délek - závěr

- Michelsonův interferometr dosahuje rozlišení v řádu pikometrů (princip neurčitosti)
- Machův-Zehnderův lze použít na měření rozdílných délek referenčního a testovaného vzorku
- Fabryův-Perotův se využívá jako velmi přesná frekvenční reference, spektrální analyzátor s vysokým rozlišením



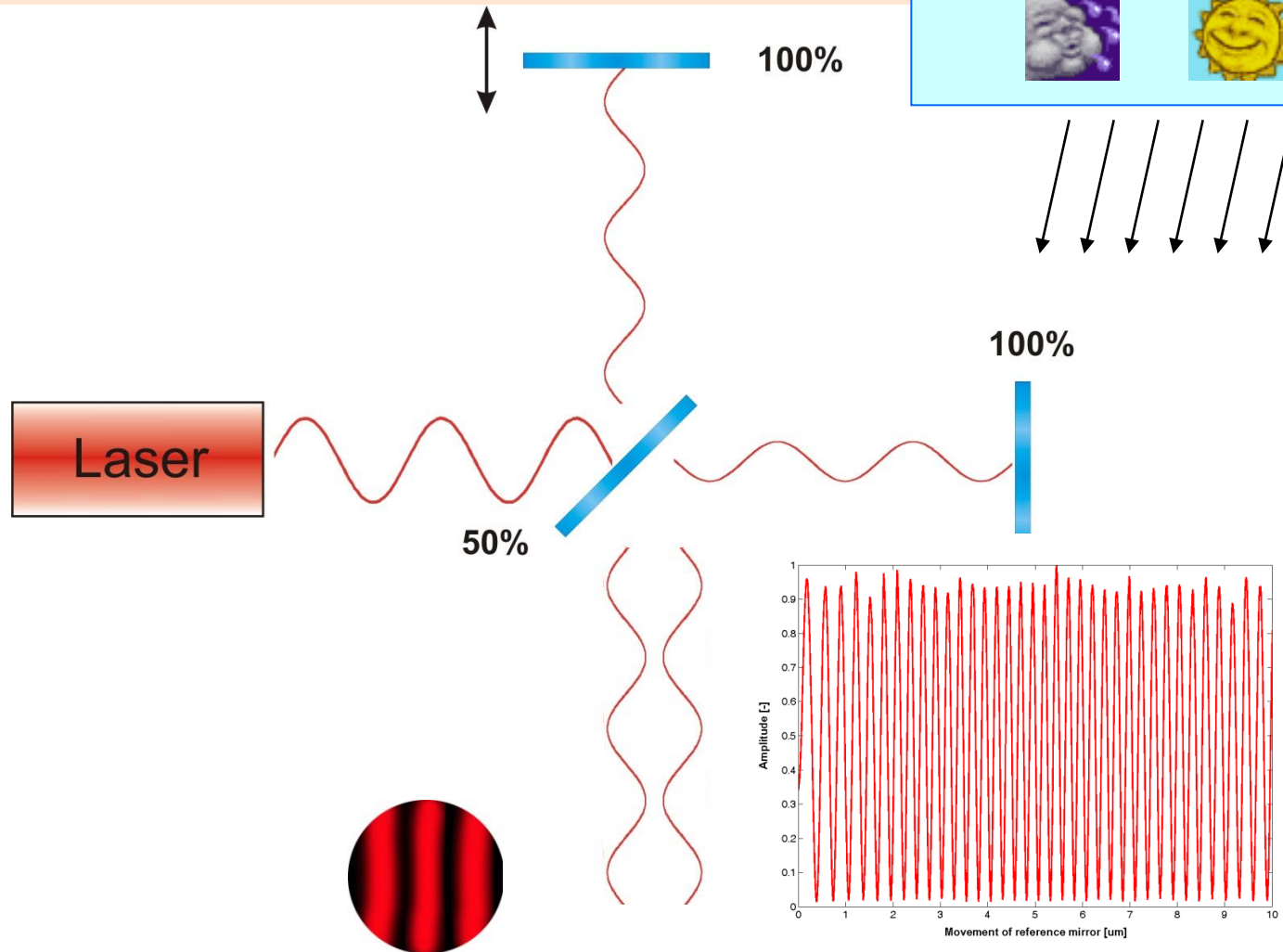
Vliv prostředí na interferenční měření, metody kompenzace nežádoucích vlivů

Zdeněk Buchta



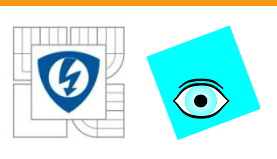
Laserový interferometr

Parametry prostředí, ve kterém je interferometrické měření prováděno



14.10.2011

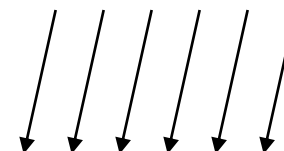
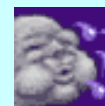
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Index lomu vzduchu

Vakuum

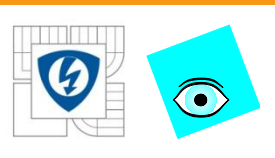
Vzduch



$$\lambda_{\text{vakuum}} > \lambda_{\text{vzduch}}$$

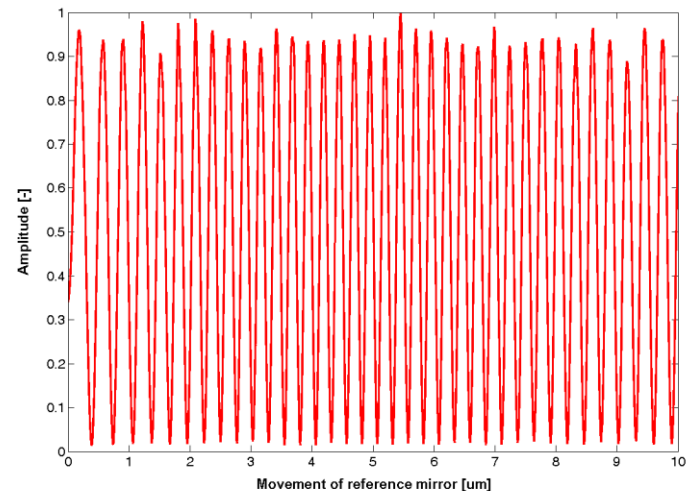
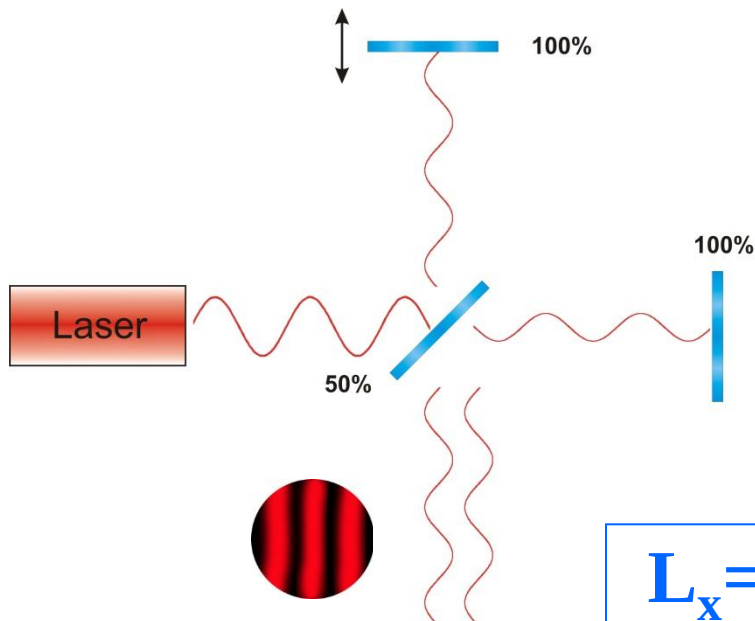
$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$n = \frac{\lambda_{\text{vakuum}}}{\lambda_{\text{vzduch}}}$$



Laserový interferometr

- optické zařízení pro měření vzdáleností, zpravidla relativních
- měřící rozsah až stovky metrů
- rozlišení – subnanometrová oblast (size of atoms)
- **Typické aplikační oblasti: přesné strojírenství (3D polohování), mikroelektronika (litografie), AFM mikroskopie (profilometrie nanokompozitních materiálů), atd.**



$$L_x = \lambda_0 / 2 \cdot (N + \varphi)$$

Laserový interferometr

Faktory limitující přesnost a rozlišení interferometrických měření:

Stabilita optické frekvence laseru

Teplotní stabilita použitých mechanických a optických komponent

Parametry prostředí, ve kterém je Interferometrické měření prováděno



LASER

DISPLAY & CONTROL

Poměr signál / šum detekčního řetězce

BEAMSPLITTER

PHOTO DETECTOR

MIRROR

REFERENCE ARM

MEASURING ARM
(axis of distance measurement)

MIRROR ON CARRIAGE

Hlavní limitující faktor přesnosti měření, probíhajícího v atmosféře, je měnící se index lomu:

$$L_x = \lambda_0 / (2 \cdot n) \cdot (N + \varphi)$$



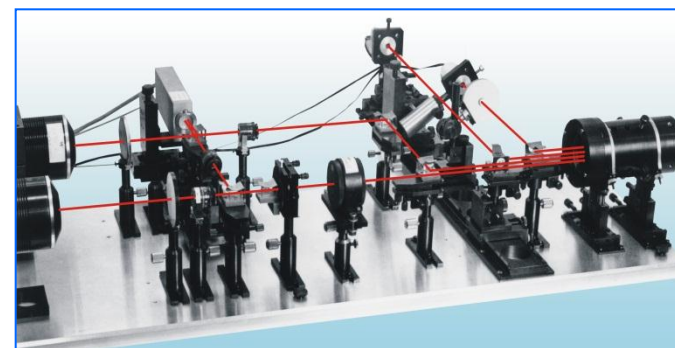
Jak měřit index lomu vzduchu?

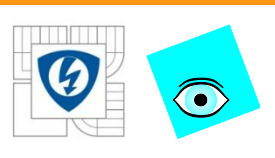
A) Nepřímá metoda založená na empirickém vzorci (Edlen). Dosahuje se přesnosti měření až $1 \cdot 10^{-7}$ ($1 \cdot 10^{-8}$).



Index lomu vzduchu : n

B) Přímá metoda založená na měření speciálním typem laserového interferometru, označovaném refraktometr. Dosahuje se přesnosti měření až $1 \cdot 10^{-9}$.





Jak měřit index lomu vzduchu?

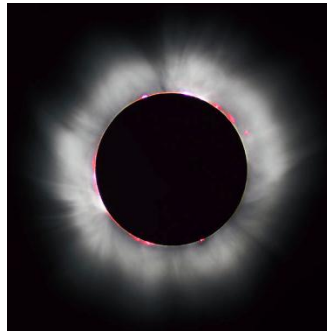
A) Nepřímá metoda založená na empirickém vzorci (Edlén).

**Prof. Bengt Edlén
(1906 – 1993)**

**Švédský fyzik a astronom,
specialista
na spektroskopii**

Záhada sluneční korony

- **coronium**
- **vícenásobně ionizované železo**



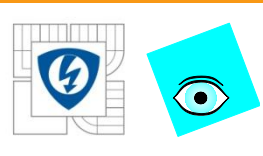
Index lomu vzduchu : n



14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Edlénova rovnice

Měřené veličiny:

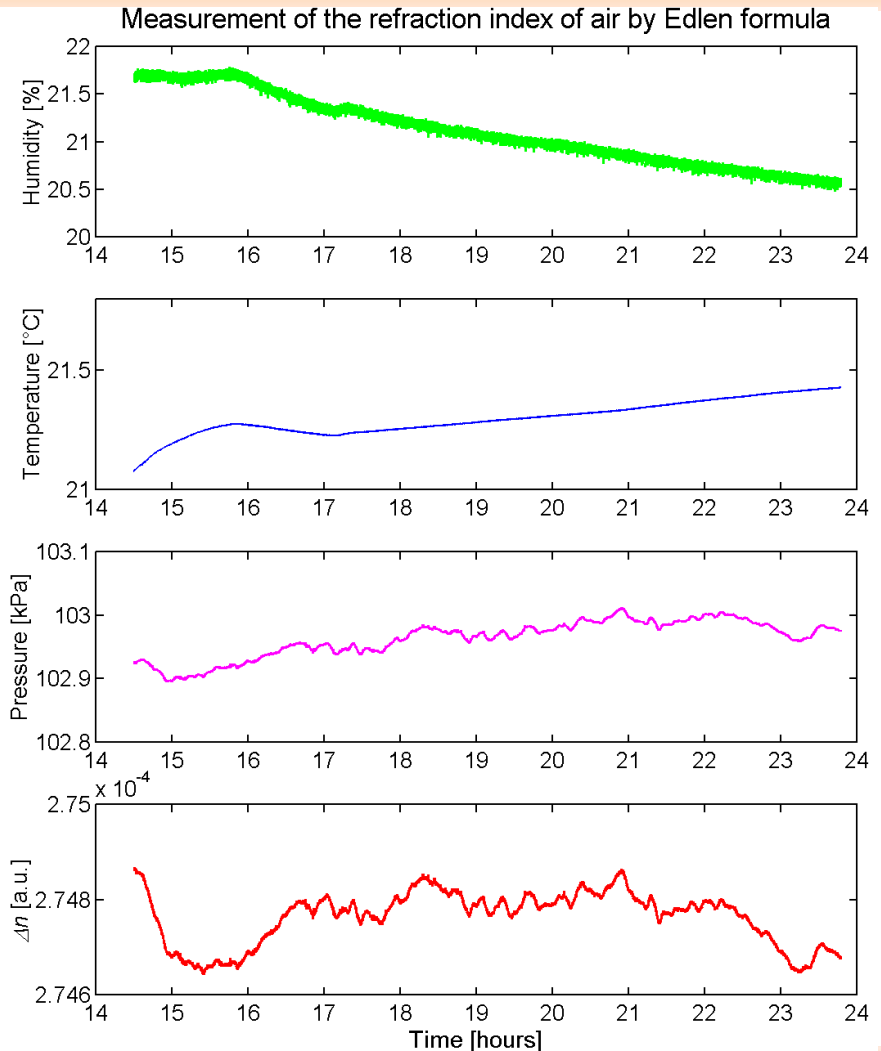
T – teplota vzduchu [°C]

P – atmosférický tlak [Pa]

H – vlhkost vzduchu [%]

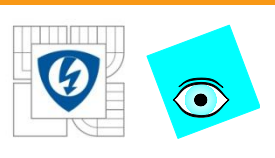
**Index lomu vzduchu
je pak dán vztahem:**

$$(n-1) \cdot 10^{-6} = 2,87782 \cdot P \cdot \frac{[1 + P \cdot (6.01 - 0.0972T) \cdot 10^{-6}]}{(1 + 0.003661 \cdot T)} - \frac{6.49 \cdot H \cdot (1.0005 + 2.3 \cdot T + 3.1 \cdot P)}{\left(\frac{-532}{T+27315}\right)}$$



14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Edlénova rovnice – korekce pro CO₂

Měření veličiny:

T – teplota vzduchu [°C]

P – atmosférický tlak [Pa]

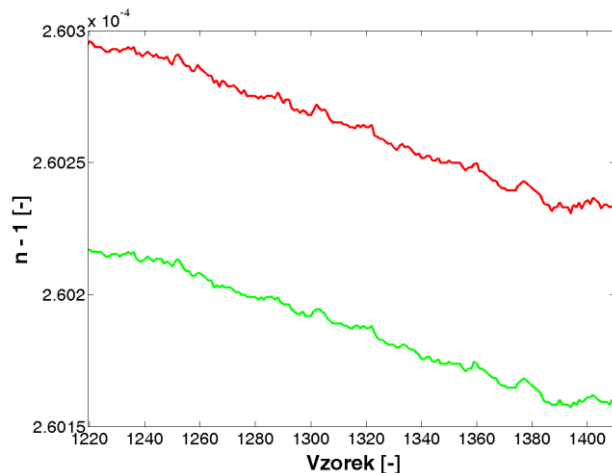
H – vlhkost vzduchu [%]

CO_2 – koncentrace CO₂ [%]

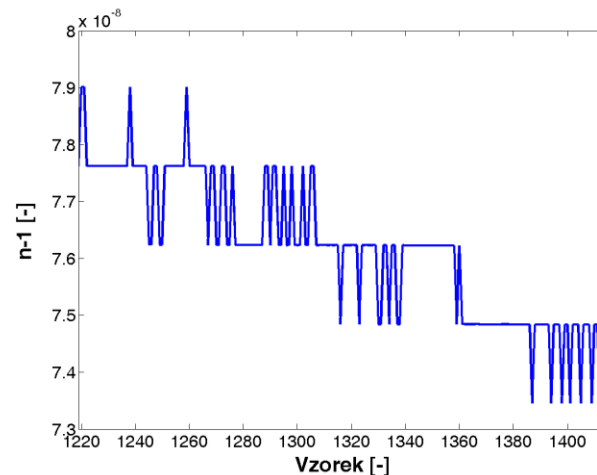


$$(n-1) \cdot 10^{-6} = 2,87782 \cdot P \cdot \frac{[1 + P \cdot (6.01 - 0.0972T) \cdot 10^{-6}]}{(1 + 0.003661 \cdot T)} -$$

$$6.49 \cdot H \cdot (1.0005 + 2.3 \cdot T + 3.1 \cdot P) \left(\frac{-532}{T+273.15} \right)$$

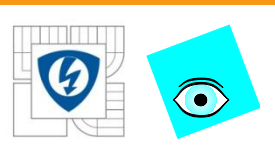


$$(n_{CO_2}-1) = (n-1) \cdot (1 + 0.5327 \cdot (CO_2/100 - 0.0004))$$

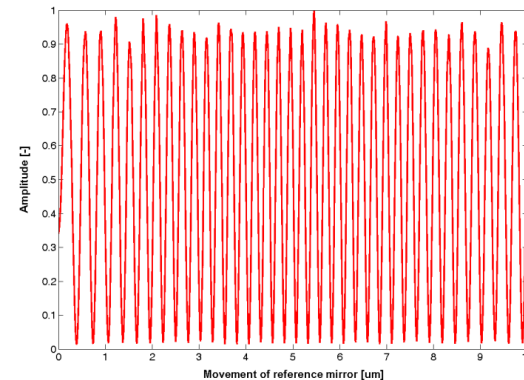
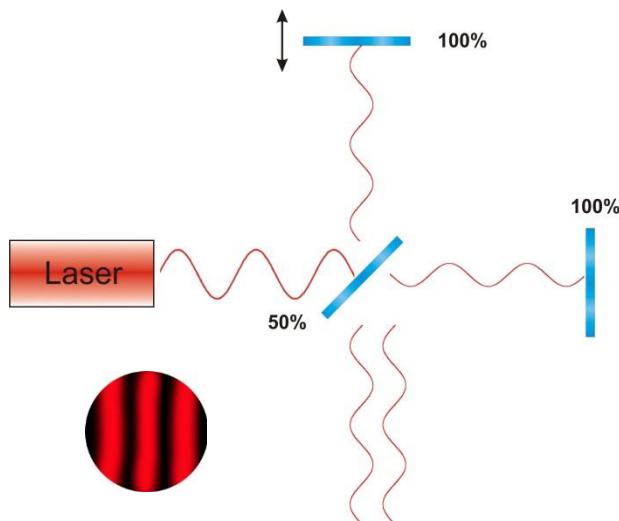


14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Laserový interferometr – kompenzace n



$$L_x = (N + \varphi) \lambda_0 / (2 \cdot n)$$

Počet interf. proužků $(N + \varphi) = 3159,604$ $\lambda_0 = 632,990796 \text{ nm}$ $n = 1,000274$

$$L_0 = (N + \varphi) \cdot \lambda_0 / (2 \cdot n) = (N + \varphi) \cdot \lambda_0 / (2 \cdot 1) = 3159,604 \cdot 632,990796 \cdot 10^{-9} / 2 = 1 \text{ mm}$$

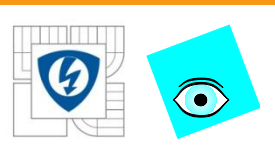
$$L_n = (N + \varphi) \cdot \lambda_0 / (2 \cdot n) = (N + \varphi) \cdot \lambda_0 / (2 \cdot 1,000274) = 3159,604 \cdot 632,990796 \cdot 10^{-9} / (2 \cdot 1,000274) = 0,999 \, 726 \, 2 \text{ mm}$$

$$L_n = (N + \varphi) \cdot \lambda_0 / (2 \cdot n) = (N + \varphi) \cdot \lambda_0 / (2 \cdot 1,000275) = 3159,604 \cdot 632,990796 \cdot 10^{-9} / (2 \cdot 1,000275) = 0,999 \, 725 \, 2 \text{ mm}$$

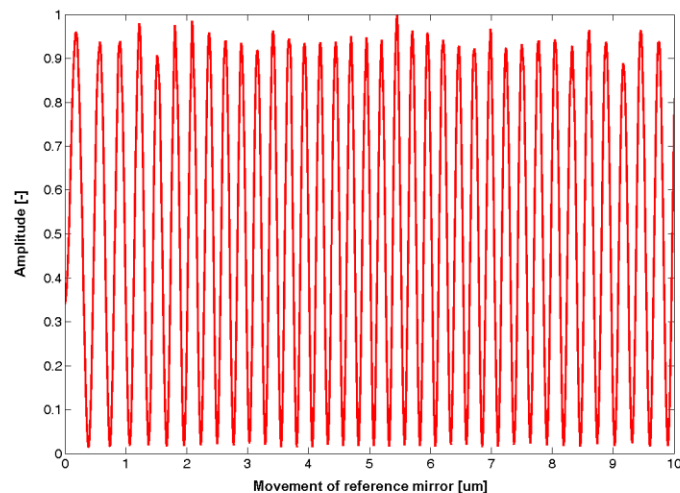
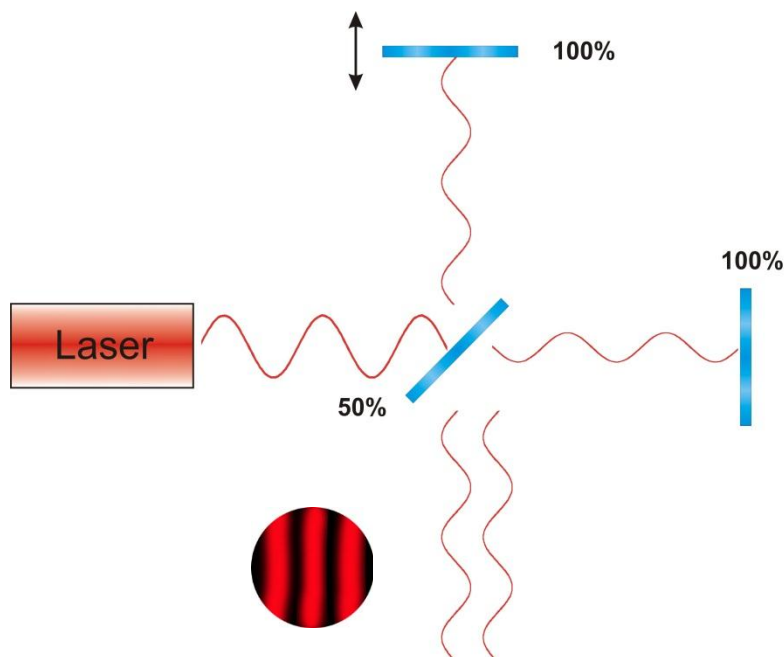
14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Laserový interferometr – kompenzace n



$$L_x = (N + \phi) \lambda_0 / (2 \cdot n)$$

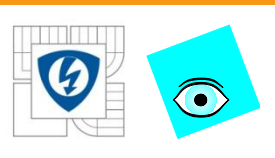
$$\lambda_1 = 632,817404 \text{ nm} \quad n_1 = 1,000274 \quad \lambda_2 = 632,816771 \text{ nm} \quad n_2 = 1,000275$$

$$\begin{aligned} \Delta n = 1 \cdot 10^{-6} &\Leftarrow \Delta T = 1^\circ\text{C} \quad (T_{\text{st}} = 1^\circ\text{C}) \\ &\Leftarrow \Delta P = 373 \text{ Pa} \quad (P_{\text{st}} = 101,325 \text{ kPa}) \\ &\Leftarrow \Delta H = 90\% \quad (H_{\text{st}} = 50\%) \end{aligned}$$

14.10.2011

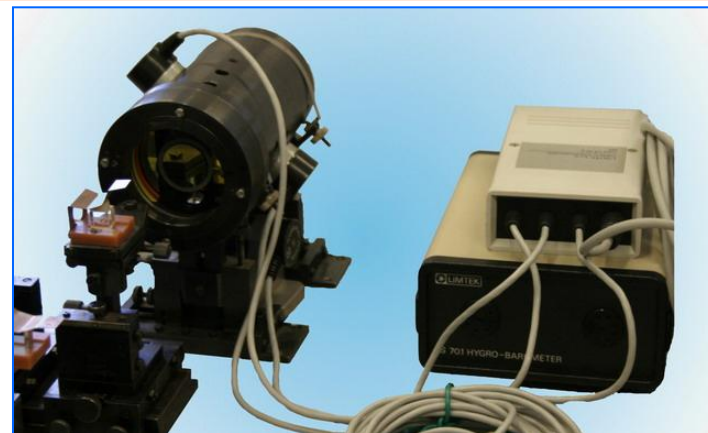
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Edlénova rovnice

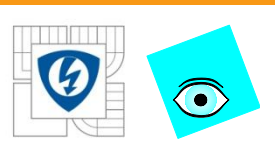
A) Nepřímá metoda založená na empirickém vzorci (Edlén).



Index lomu vzduchu: n

Nevýhoda:

- nepřímé měření (jiné vlivy než měřené)
- teplotní gradienty
- rychlost měření
- turbulence

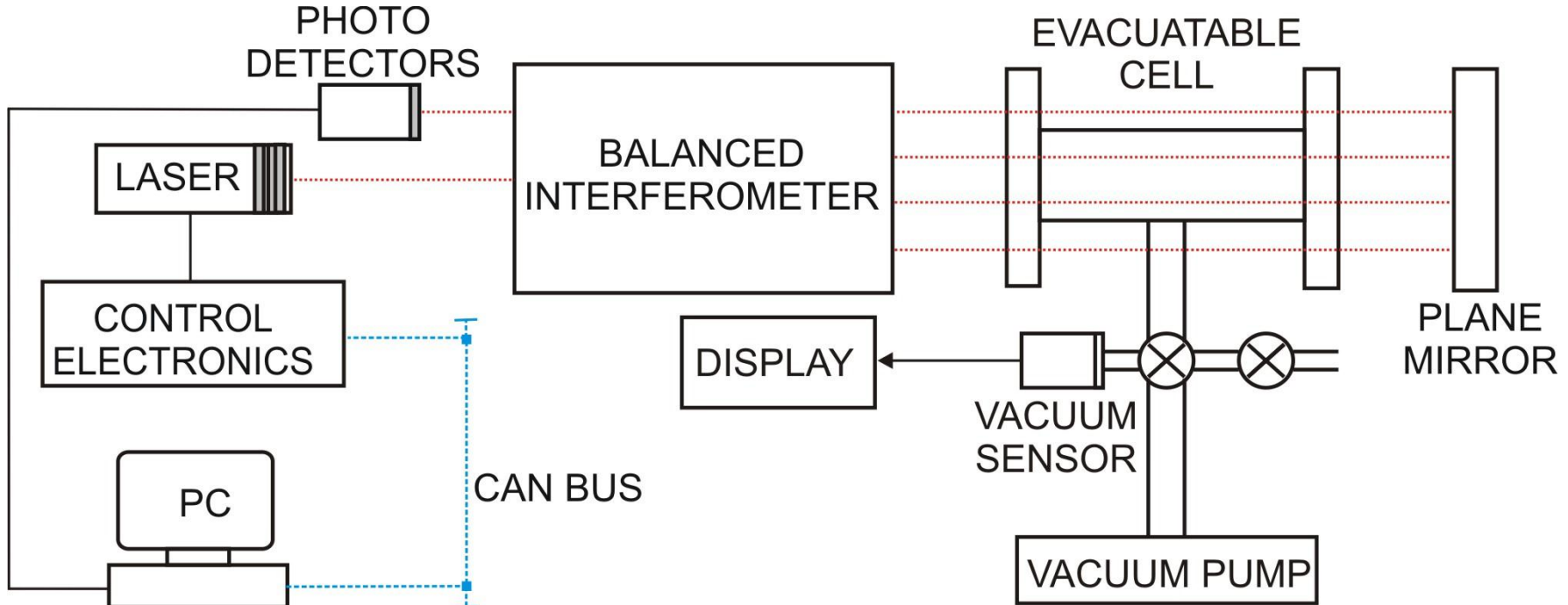


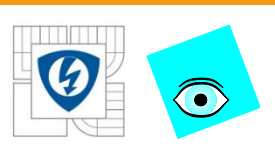
Přímá metoda – čerpatelná kyveta

Referenční větev Michelsonova interferometru obsahuje čerpatelnou kyvetu, měřicí větev je trvale „na vzduchu“. Geometrická délka obou větví je stejná. Na počátku měření je v kyvetě vzduch, který je v průběhu měření odčerpán (vakuum).

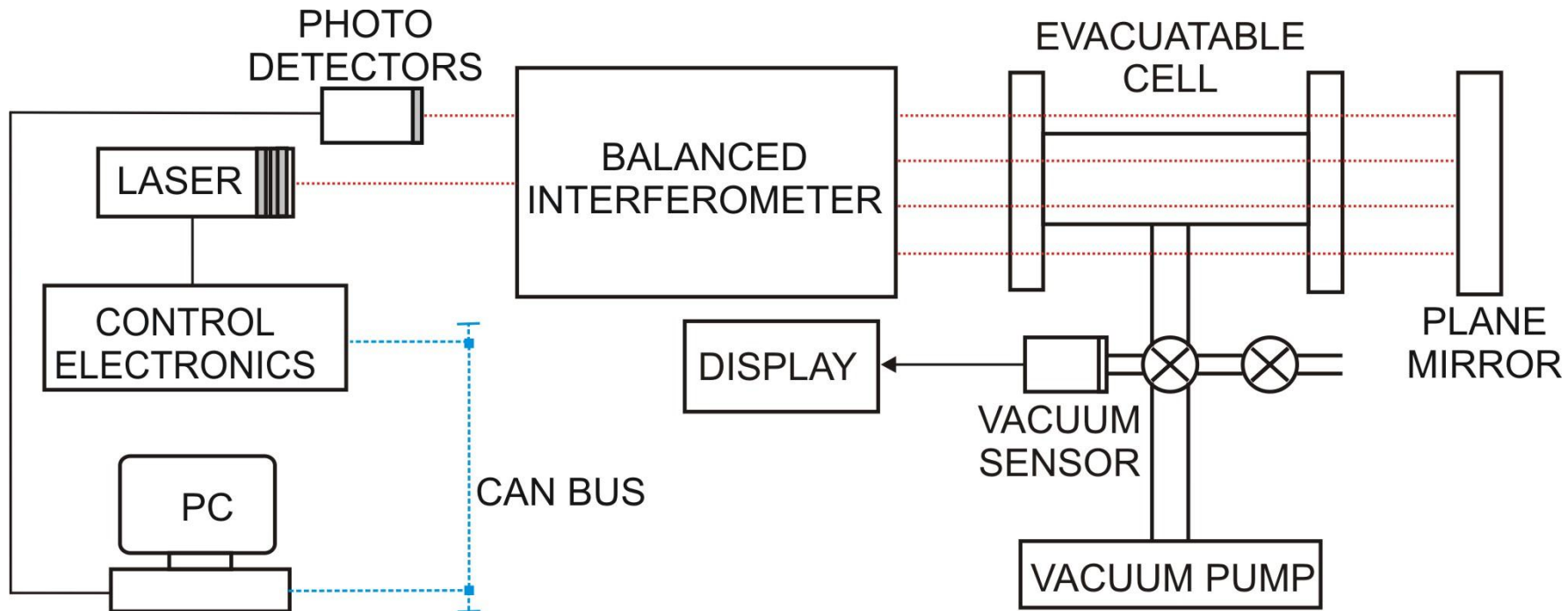
Toto odčerpání způsobí rozvážení interferometru s výsledkem ΔL_0 .

Pro kyvetu délky L platí $n = (L + \Delta L_0) / L$.





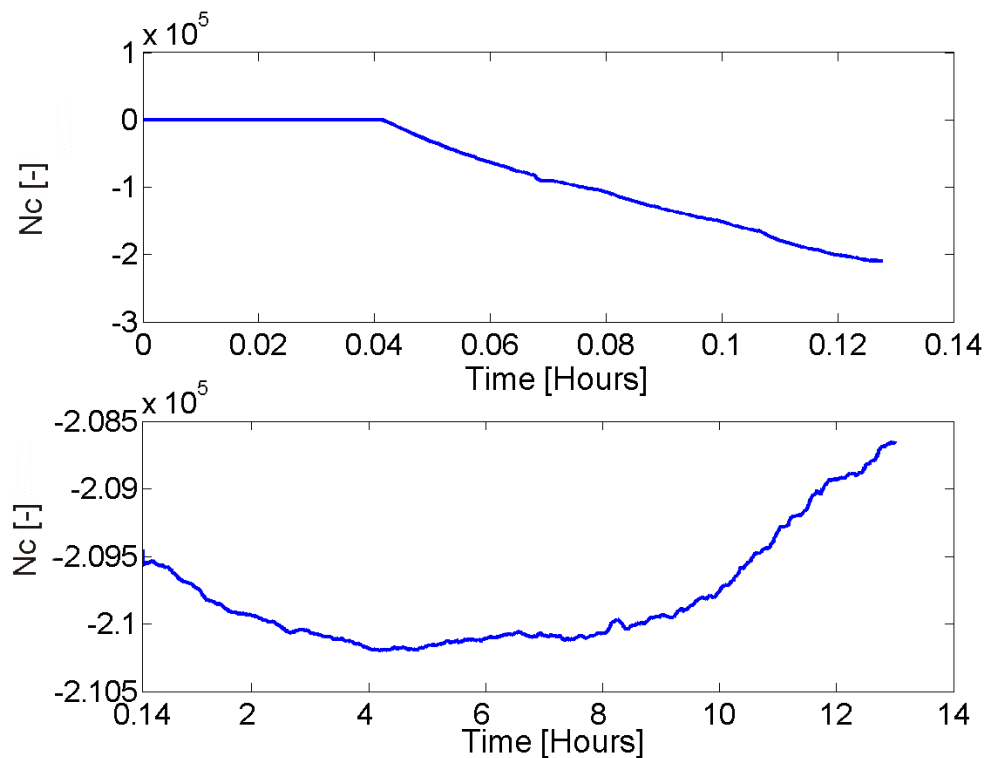
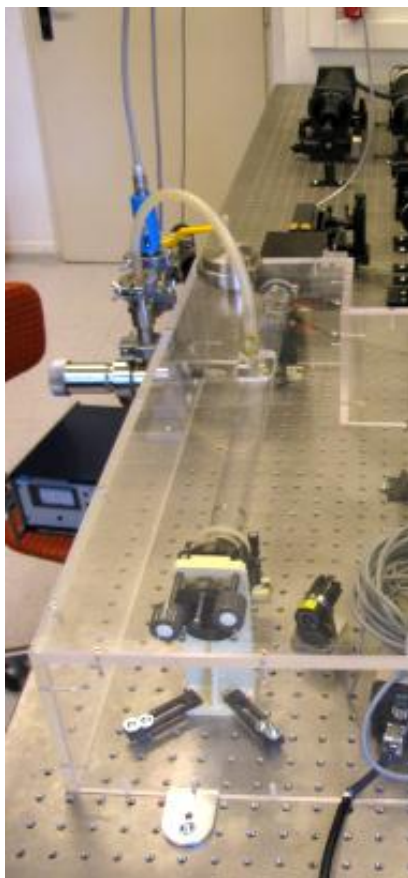
Přímá metoda – čerpatelná kyveta



Nevýhoda - potřeba při každém měření odčerpat vzduch z kyvety, dále pak s tím související vibrace, zahřívání, změna délky kyvety – možné ovlivnění n při dlouhodobém měření.

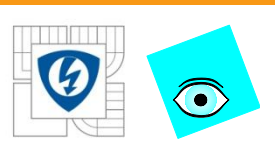


Přímá metoda – čerpatelná kyveta

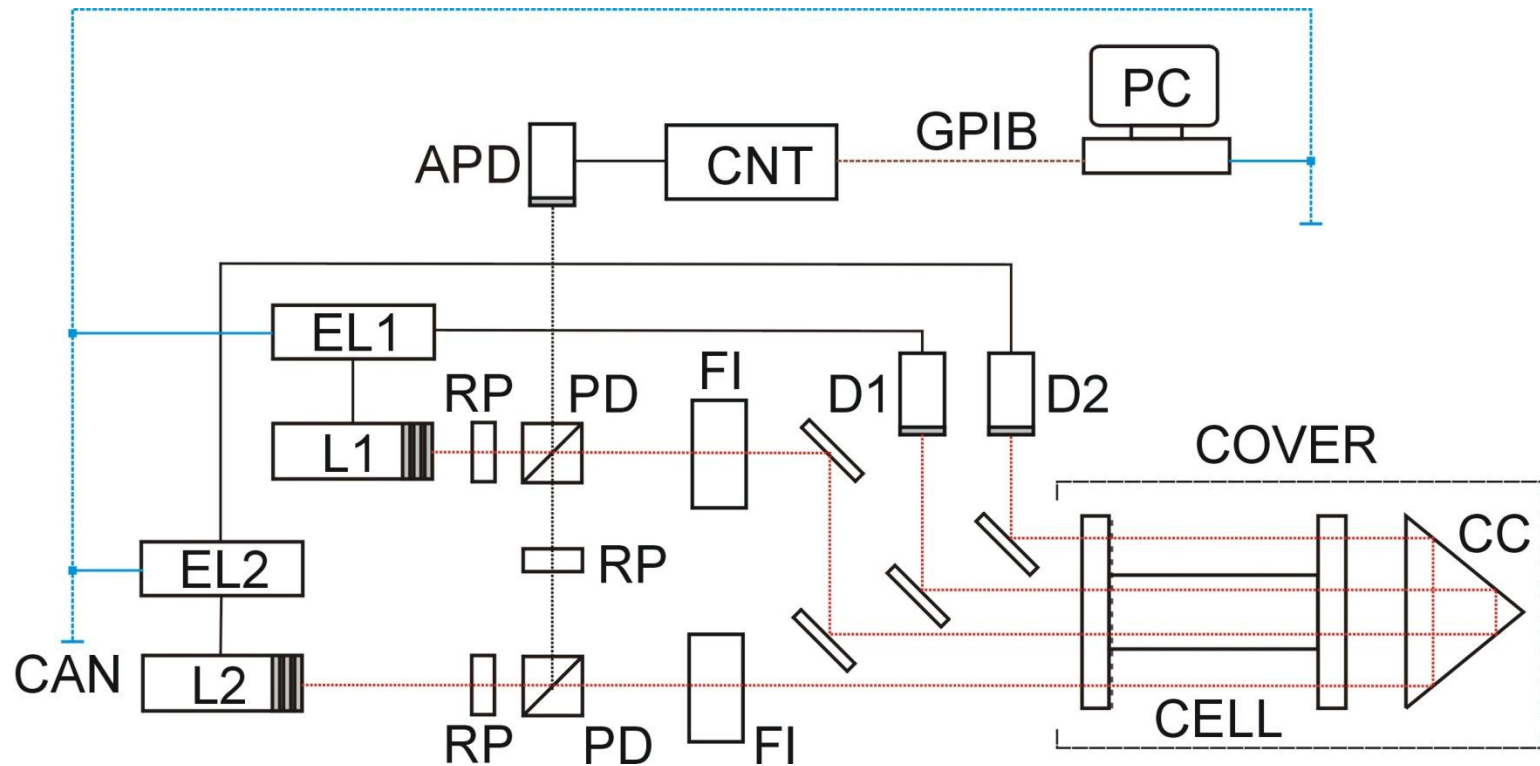


Výpočet rozvážení interferometru: $\Delta L_0 = N_c \cdot \lambda / 2048$

Rozlišení interferometru: $\lambda / 2048 \approx 0.3 \text{ nm}$ for $\lambda = 633 \text{ nm}$ vlnová délka.



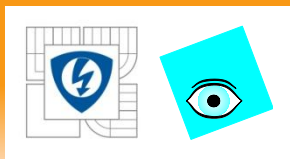
Metoda s dvojitým optickým rezonátorem



Použitý Fabry-Perottův interferometr představují dvě kruhová zrcadla. Oblast mezi nimi je v radiálním směru rozdělena na vnitřní a vnější část. Tyto jsou vzájemně odděleny, přičemž vnitřní část je permanentně evakuovaná, zatímco vnější část je volně přístupná atmosférickému proudění.

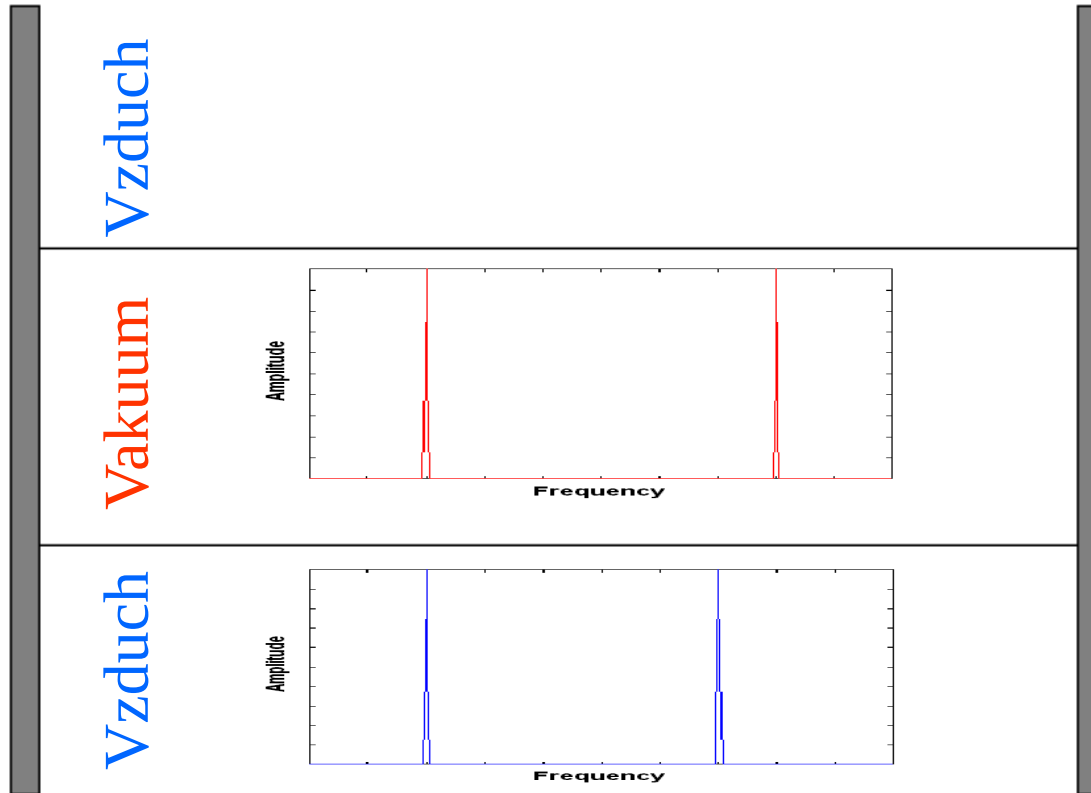
14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Metoda s dvojitým optickým rezonátorem

Optický rezonátor – Fabry-Perotův interferometr



$$d = \frac{\lambda_0}{2 \cdot n_1} (m_1 + e_1)$$

$$d = \frac{\lambda_0}{2 \cdot n_2} (m_2 + e_2)$$

$$n_2 - n_1 = \frac{\lambda_0}{2 \cdot d} (\Delta m + \Delta e)$$

$$\Delta \nu_{\text{vakuum}} = \frac{c}{2 \cdot n_1 \cdot d} \dots n_1 = 1$$

Podmínky:

$$e_1 = e_2 = 0 \Rightarrow \text{rezonance}$$

Index lomu je definován

$$-\text{teoreticky } \frac{c}{n_2 \Delta \nu} \approx \frac{\Delta m}{m_1}$$

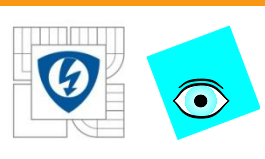
$$-\text{prakticky } \Delta n \approx \frac{\Delta \nu_{12}}{\Delta \nu_{\text{vakuum}}}$$

$$n_{\text{vzduch}} = 1 + \Delta n$$

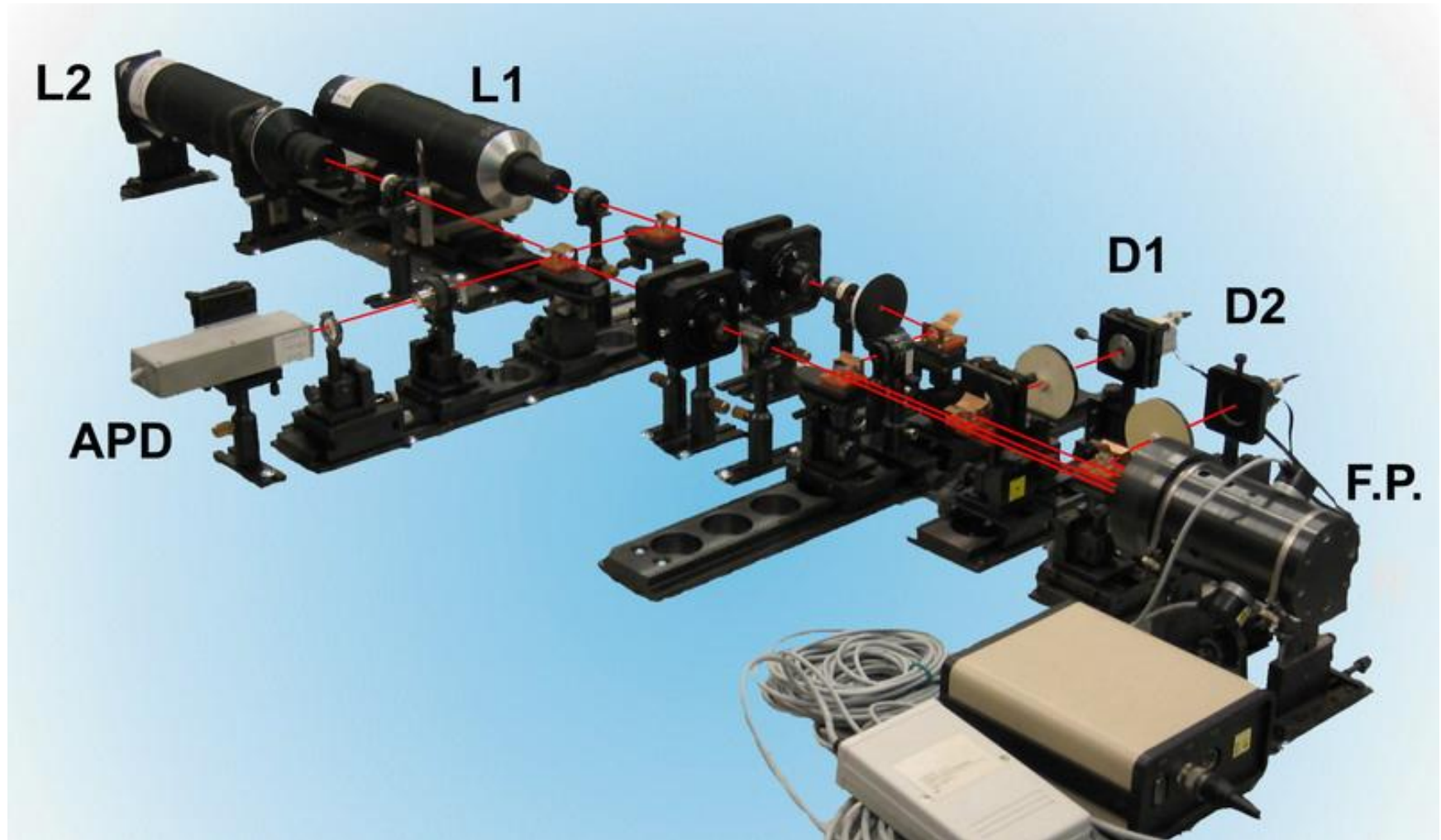
d...vzdálenost zrcadel m... rezonanční řád

e...zlomek rezonančního řádu

λ_0 ...vlnová délka He-Ne laseru ve vakuu (632,990796 nm)



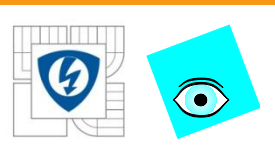
Metoda s dvojitým optickým rezonátorem



14.10.2011

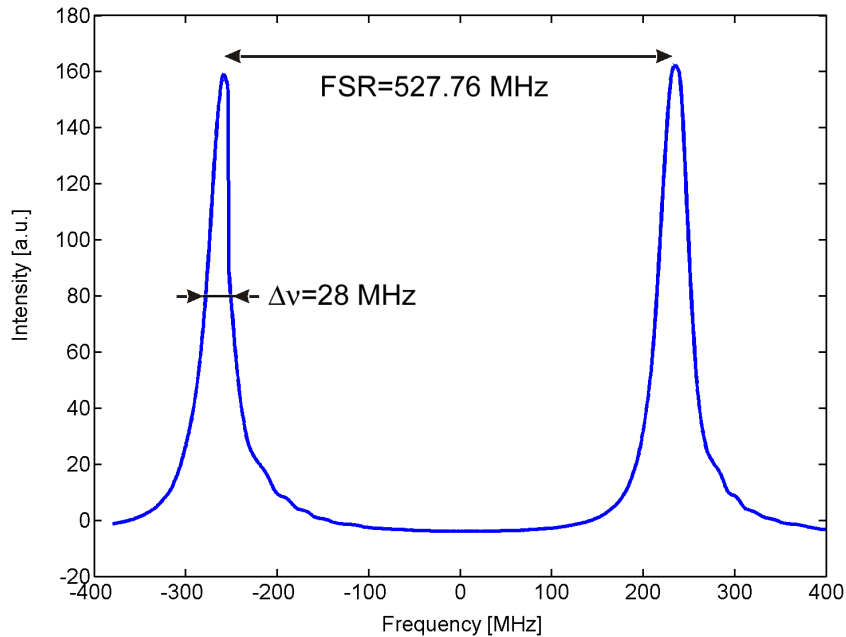
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



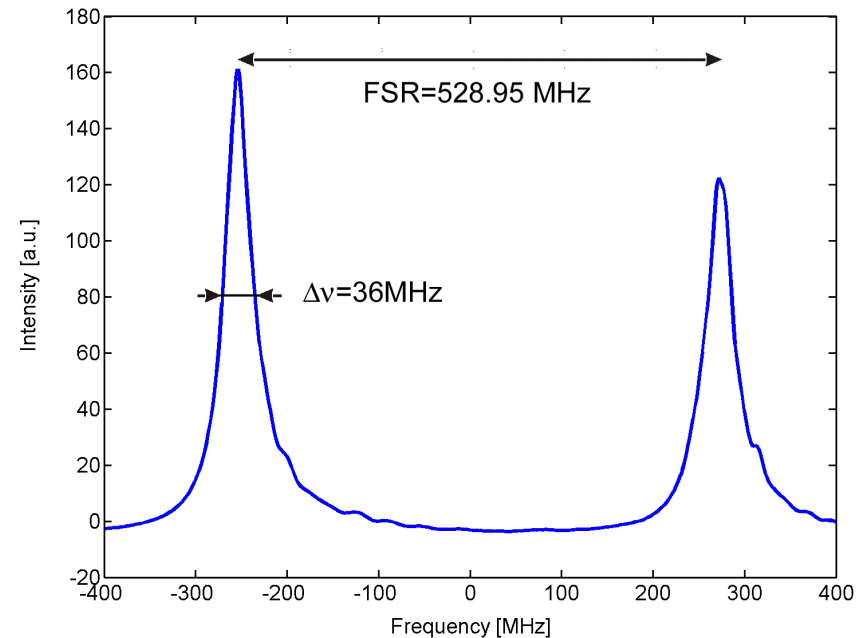


Metoda s dvojitým optickým rezonátorem

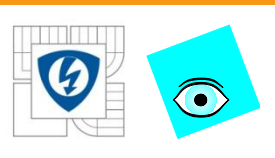
F.-P. rezonátor - vzduch



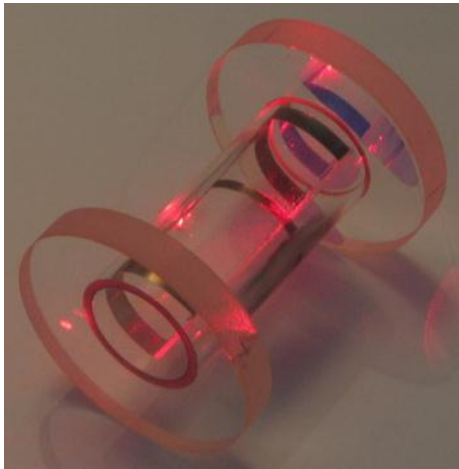
F.-P. rezonátor - vakuum



Profily spektrálních čar byly změřeny přeladěním laseru přes dvě sousední rezonance příslušné části Fabry-Perotova rezonátoru.



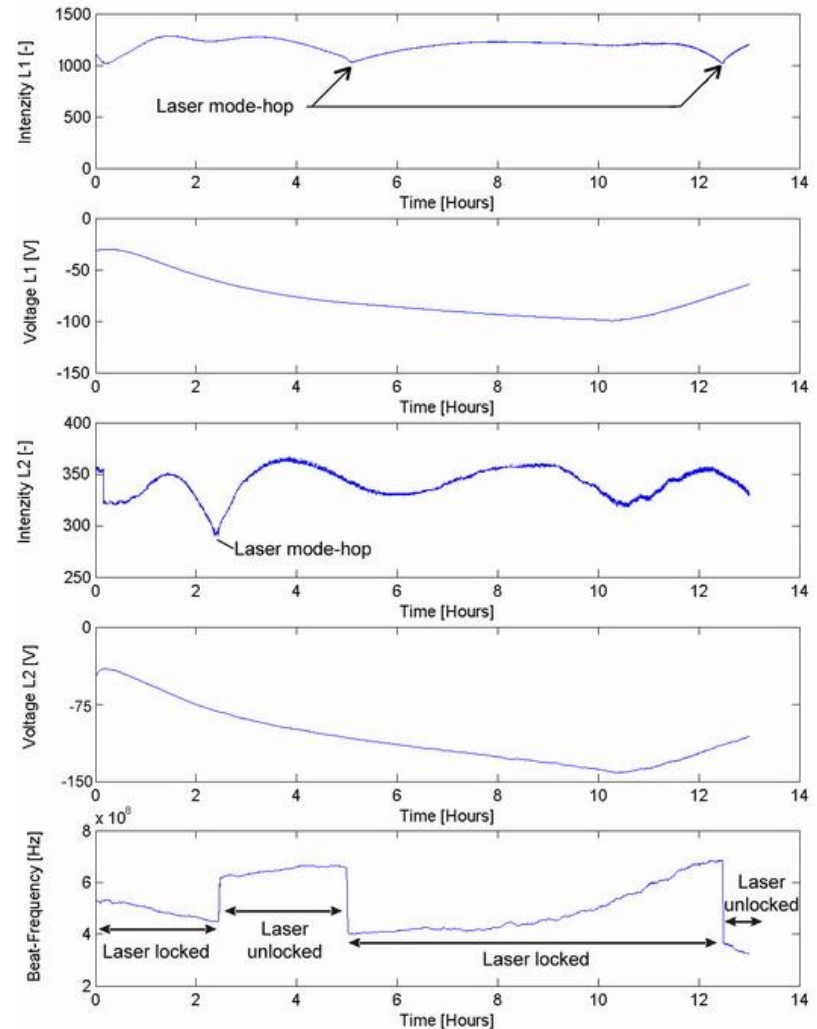
Metoda s dvojitým optickým rezonátorem



Použitý F.-P. rezonátor

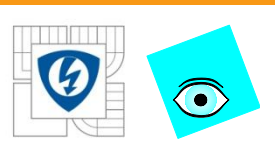


Použitý koutový odražeč

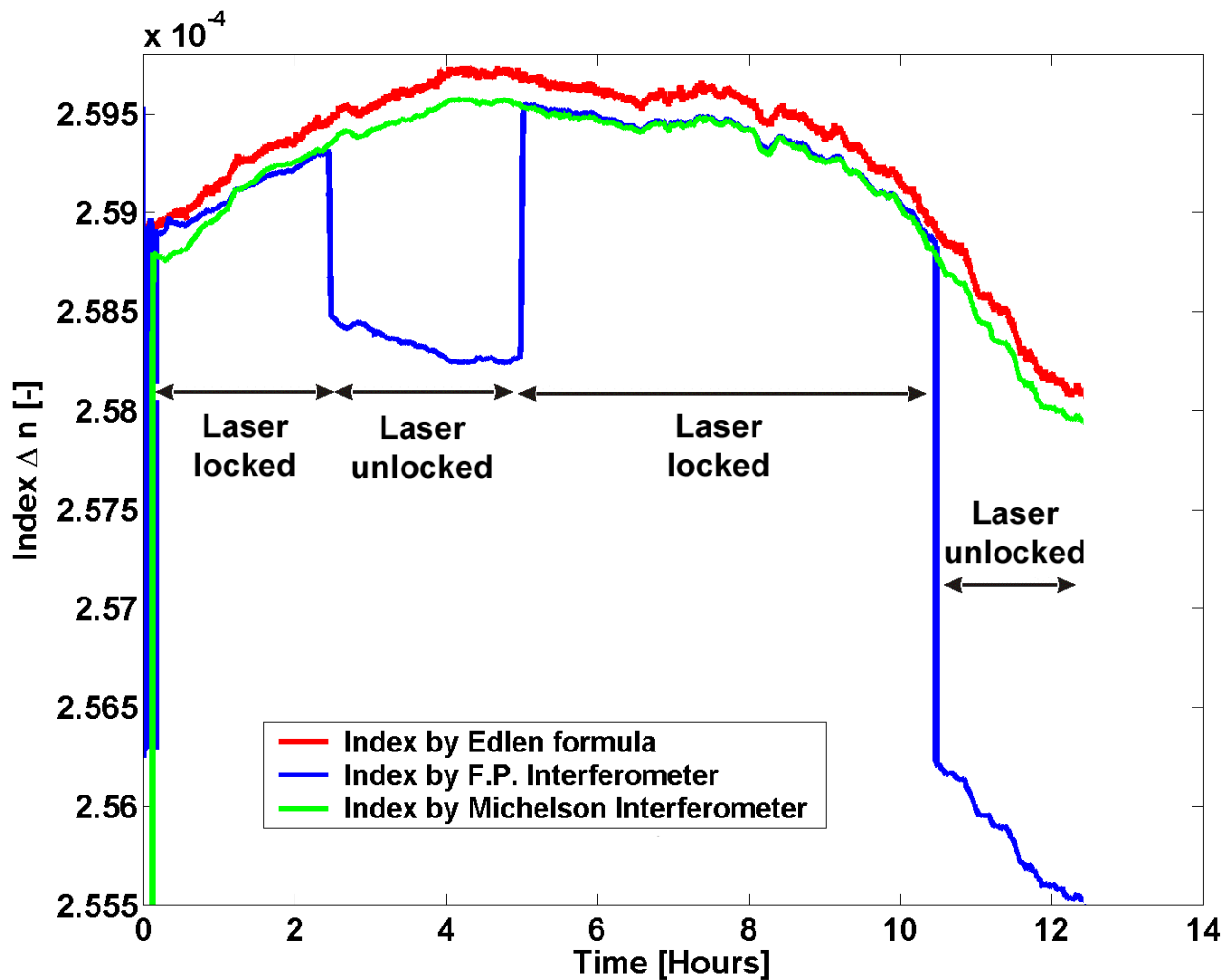


14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

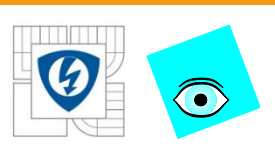


Porovnání tří metod

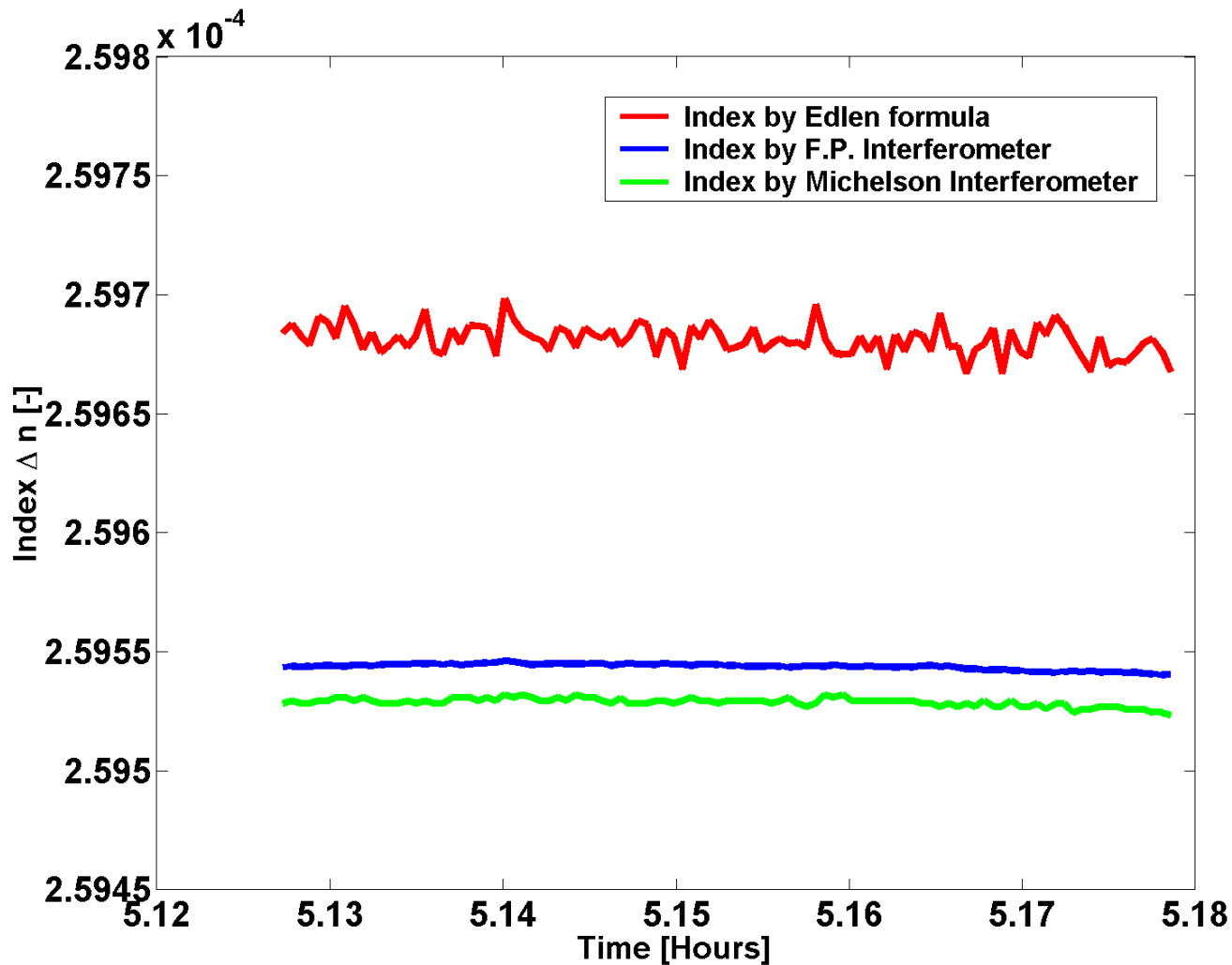


14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



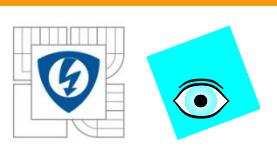
Porovnání tří metod



14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



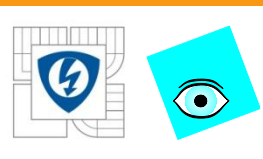


Porovnání tří metod

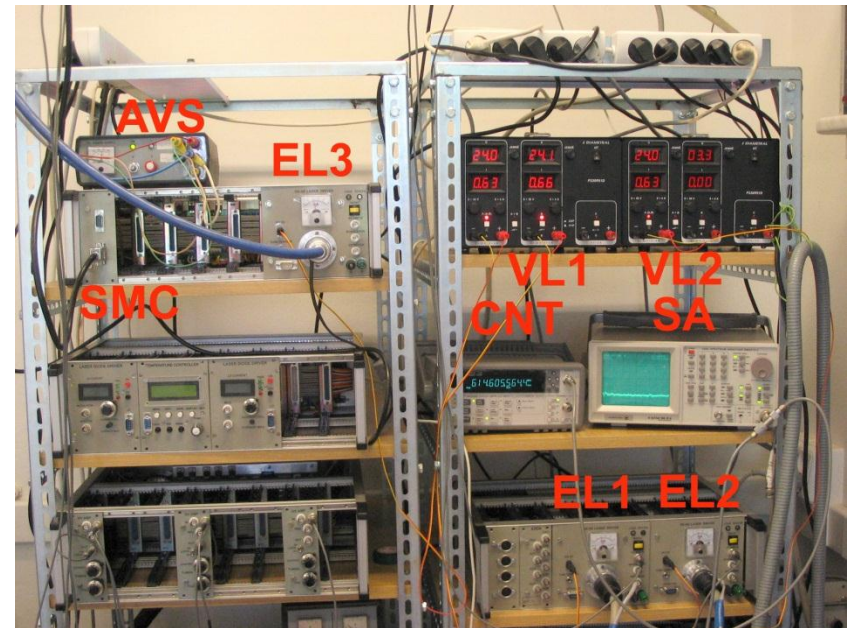
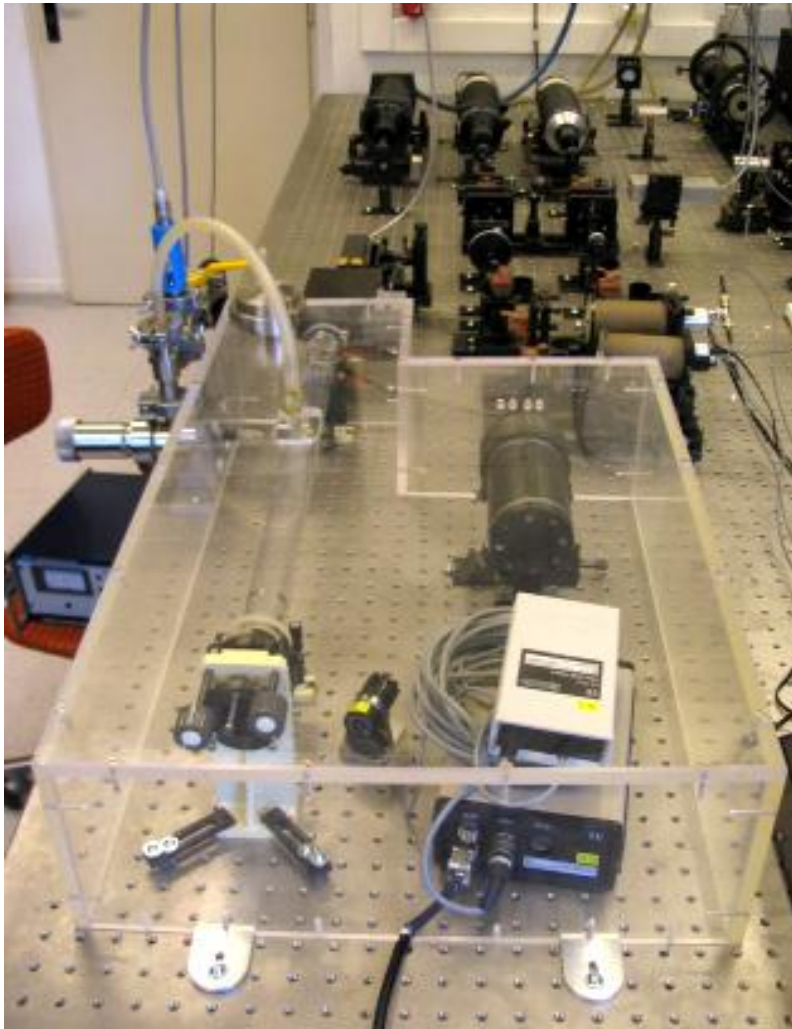
Average for $\tau = 3$ minutes

METODA	STŘEDNÍ HODNOTA INDEXU LOMU	SMĚRODATNÁ ODCHYLKA
Edlén	1.000 259 681	$6.4 \cdot 10^{-9}$
Čerpatelná kyveta	1.000 259 535	$1.7 \cdot 10^{-9}$
F.-P. rezonátor	1.000 259 541	$1.3 \cdot 10^{-9}$

Šum uvedených metod byl kvantifikován výpočtem směrodatné odchylky vypočtené ze tříminutového úseku záznamu.



Fotografie experimentálního uspořádání

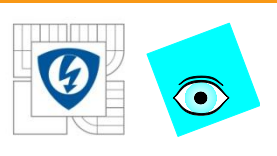


Vlevo: Sestava s čerpatelnou kyvetou a sestava s dvojitým optickým rezonátorem.

Vpravo: Řídící elektronika.

14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



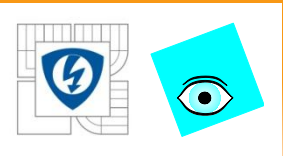
Index lomu - závěr

Index lomu vzduchu – změna vlnové délky

Nezanedbatelný vliv na přesnost interferometrických měření

Nepřímé měření – měří se T, P, H, CO₂ – výpočet indexu lomu. Přesnost až 10⁻⁷.

Přímé metody – refraktometr, případně kombinace s nepřímou metodou měření. Přesnost až 10⁻⁹.



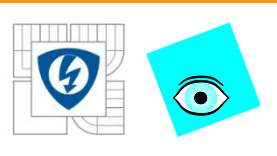
Detekční techniky interferometrů

Ondřej Číp

14.10.2011

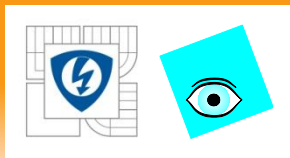
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Detekční techniky interferometrů

- **Laserové interferometry pro měření délek**
 - Perioda mezi konstruktivní a destruktivní interferencí určuje základní rozlišení laserového interferometru
 - Pro případ interferometru s He-Ne laserem na vlnové délce 633 nm činí tato perioda 316,5 nm
 - Toto rozlišení je poměrně malé k tomu, aby tento optický systém mohl pracovat jako přesný odměřovač vzdáleností
 - Je nutné doplnit interferometr o další systémovou techniku, která zajistí jemné dělení proužku



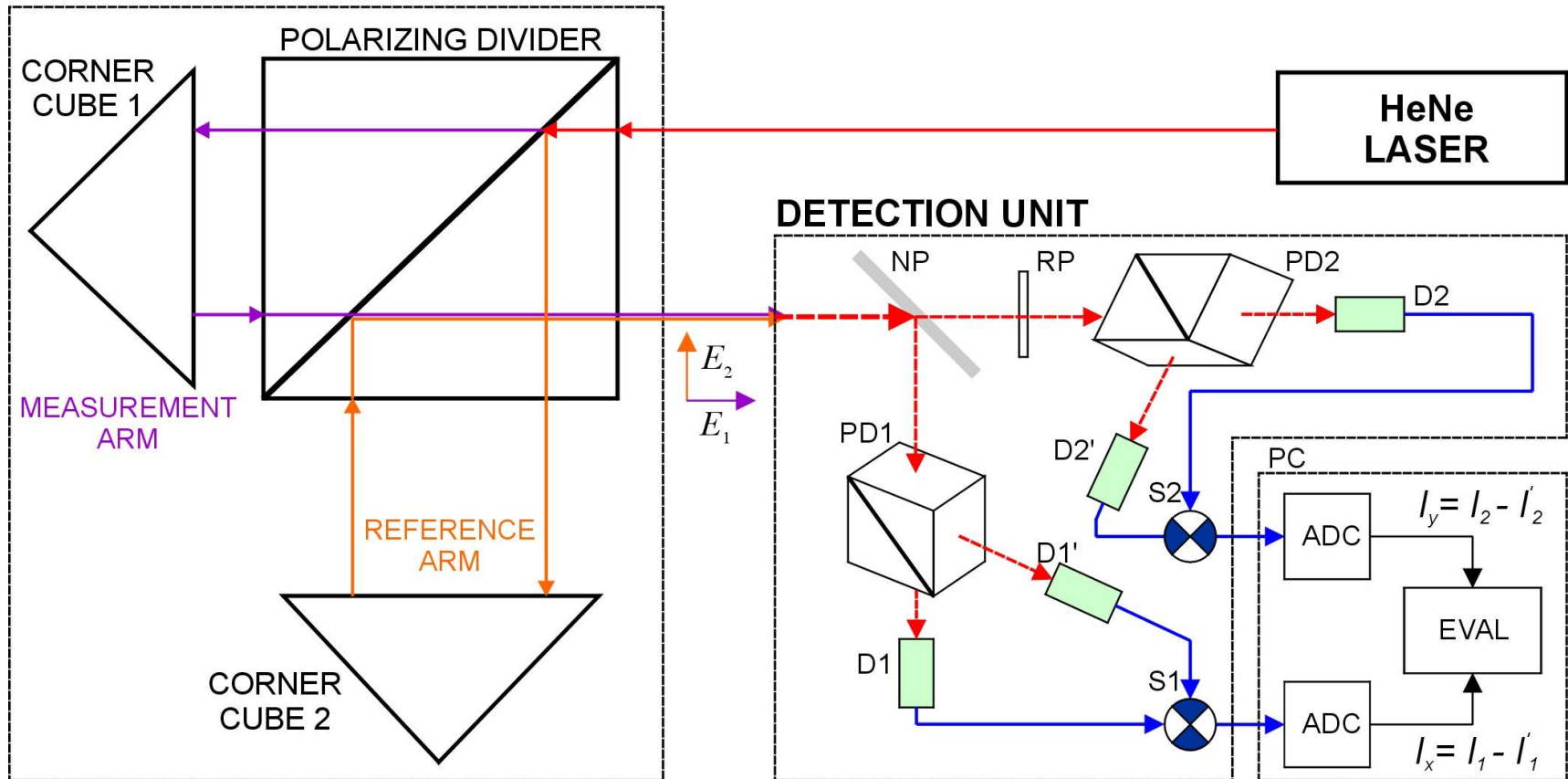
Detekční techniky interferometrů

- Z hlediska funkčního principu se tyto techniky rozdělují do dvou základních typů:
 - **homodynní detekce** – interferují laserové svazky o stejné optické frekvenci
 - **heterodynní detekce** – interferují laserové svazky s různými optickými frekvencemi (výsledkem není interferenční vlna s konstantní interferenční fází, ale záznějový kmitočet)

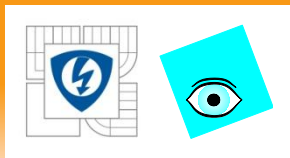
Detekční techniky interferometrů - homodynní technika

- Homodynní detekce interferenční fáze :

MICHELSON INTERFEROMETER

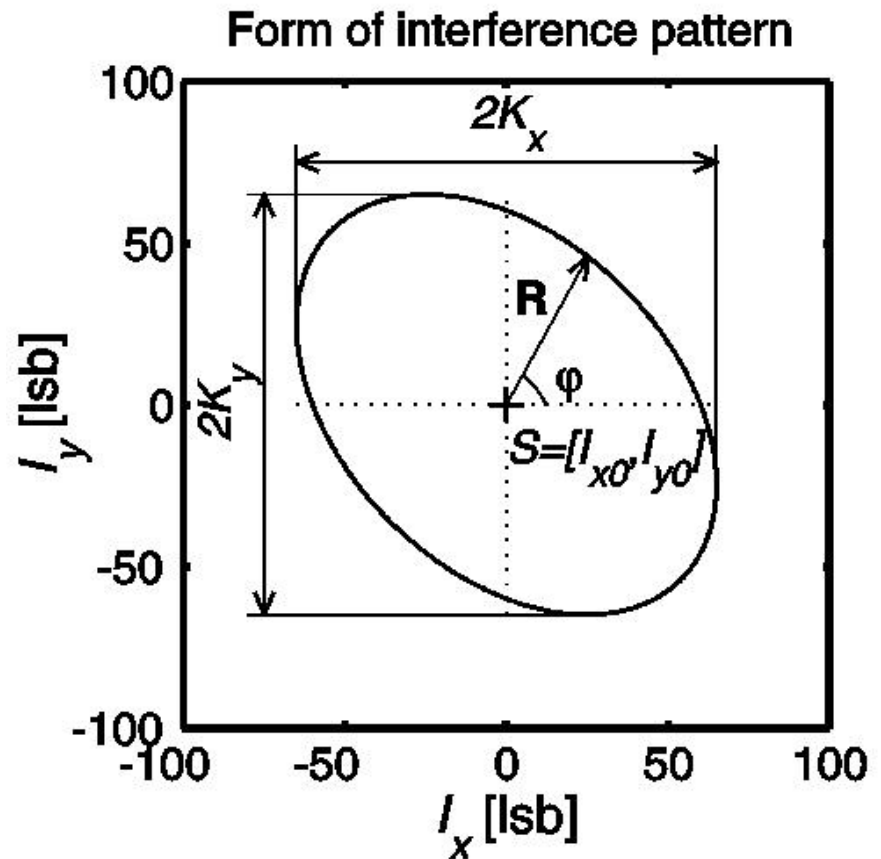
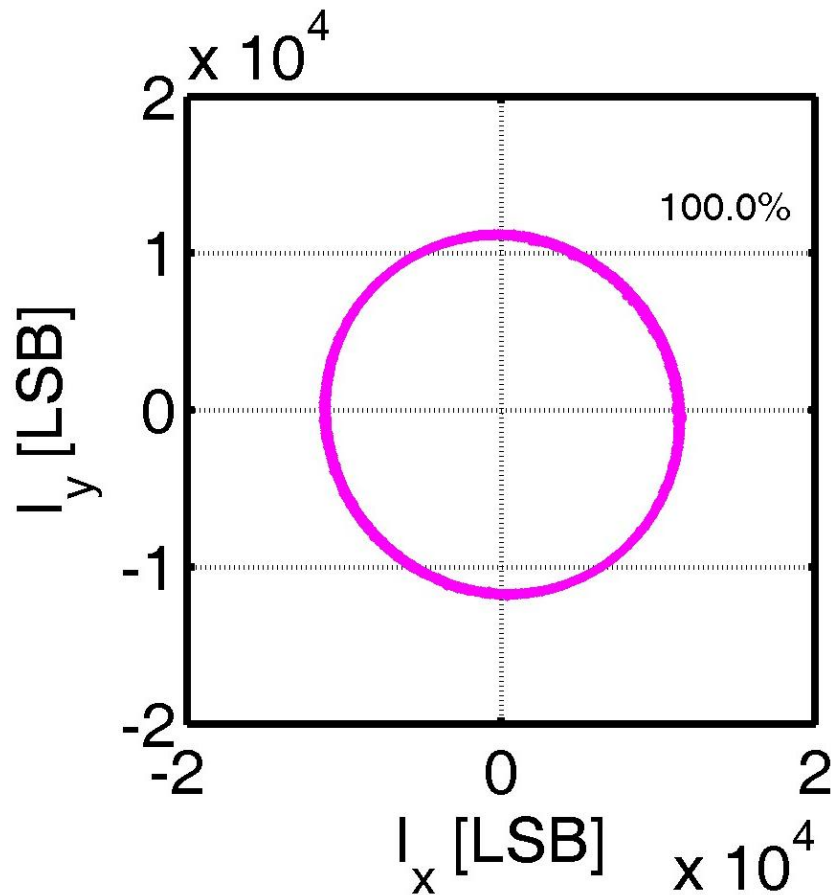


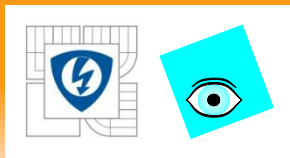
14.10.2011



Detekční techniky interferometrů - homodynní technika

- Výstupem detekce je kuželosečka v rovině XY:





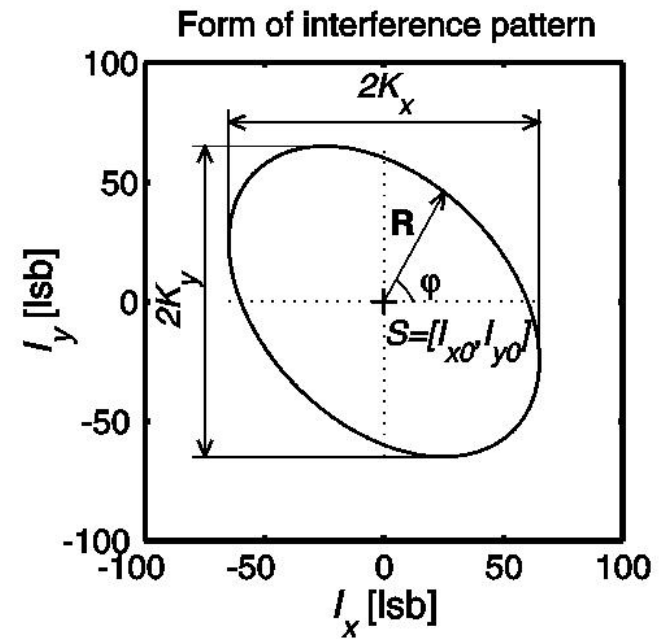
Detekční techniky interferometrů - homodynní technika

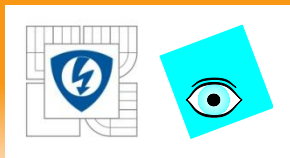
- Vznikají problémy s linearitou stupnice:
 - Zkreslení při výpočtu vztahem

$$\varphi' = 2\pi \cdot N + \arctan \frac{I_y}{I_x}$$

- Nezbytná správná inverzní funkce

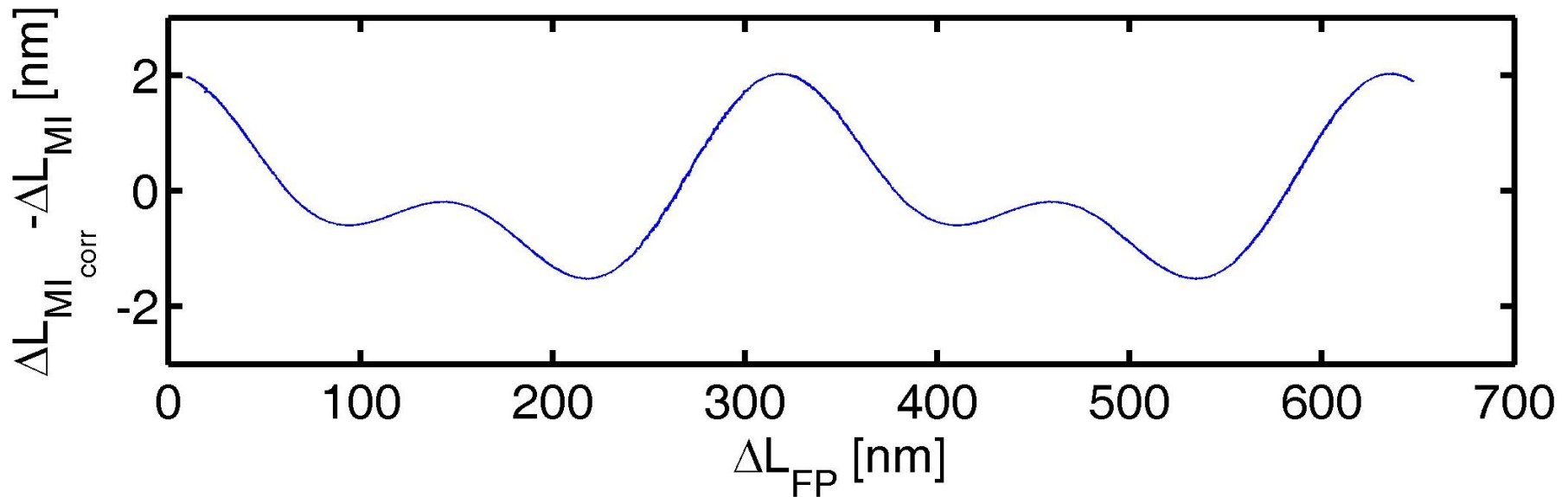
$$\varphi = 2\pi \cdot N + \arctan \left(\frac{K_x (I_y - I_{y0}) \cos \delta_{TR}}{K_y (I_x - I_{x0}) + K_x (I_y - I_{y0}) \sin \delta_{TR}} \right) - \delta_0$$

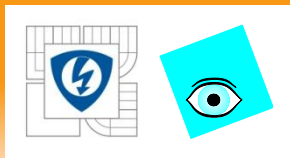




Detekční techniky interferometrů - homodynní technika

- Příklad výpočtu nelinearity stupnice homodynního interferometru:

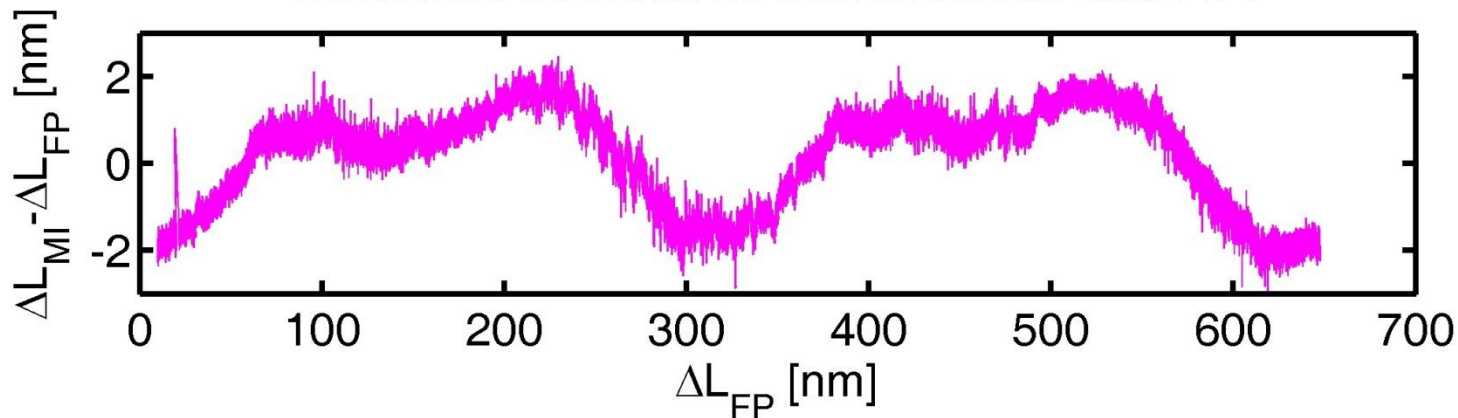




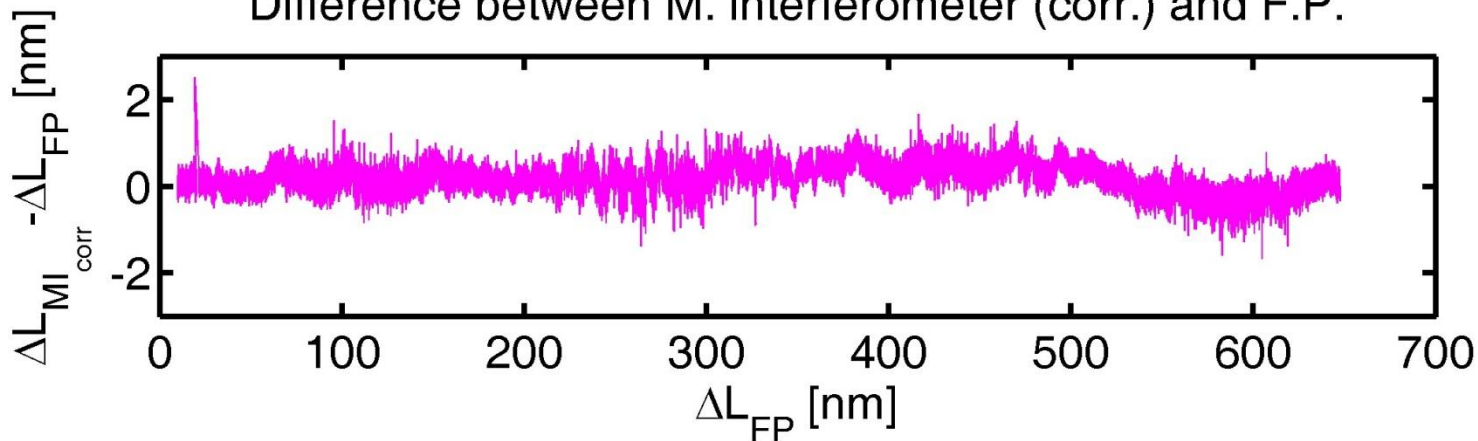
Detekční techniky interferometrů - homodynní technika

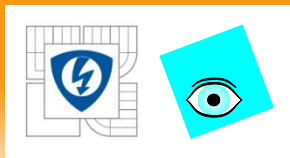
- Příklad měření bez a s linearizací stupnice:

Difference between M. interferometer and F.P.



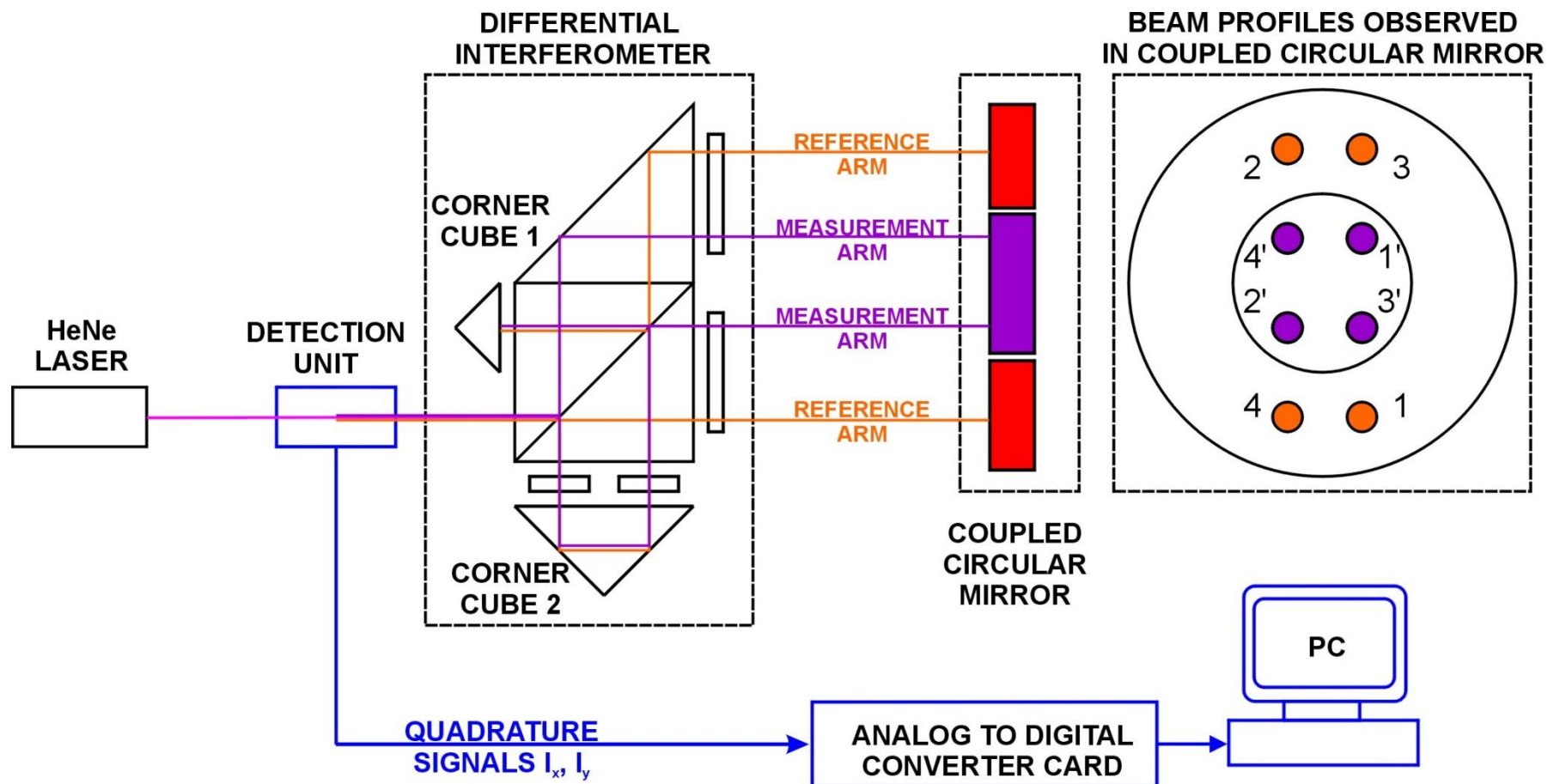
Difference between M. interferometer (corr.) and F.P.





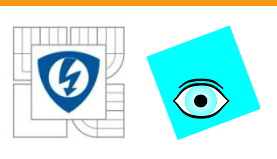
Detekční techniky interferometrů - homodynní technika

- Specializovaný homodynní interferometr



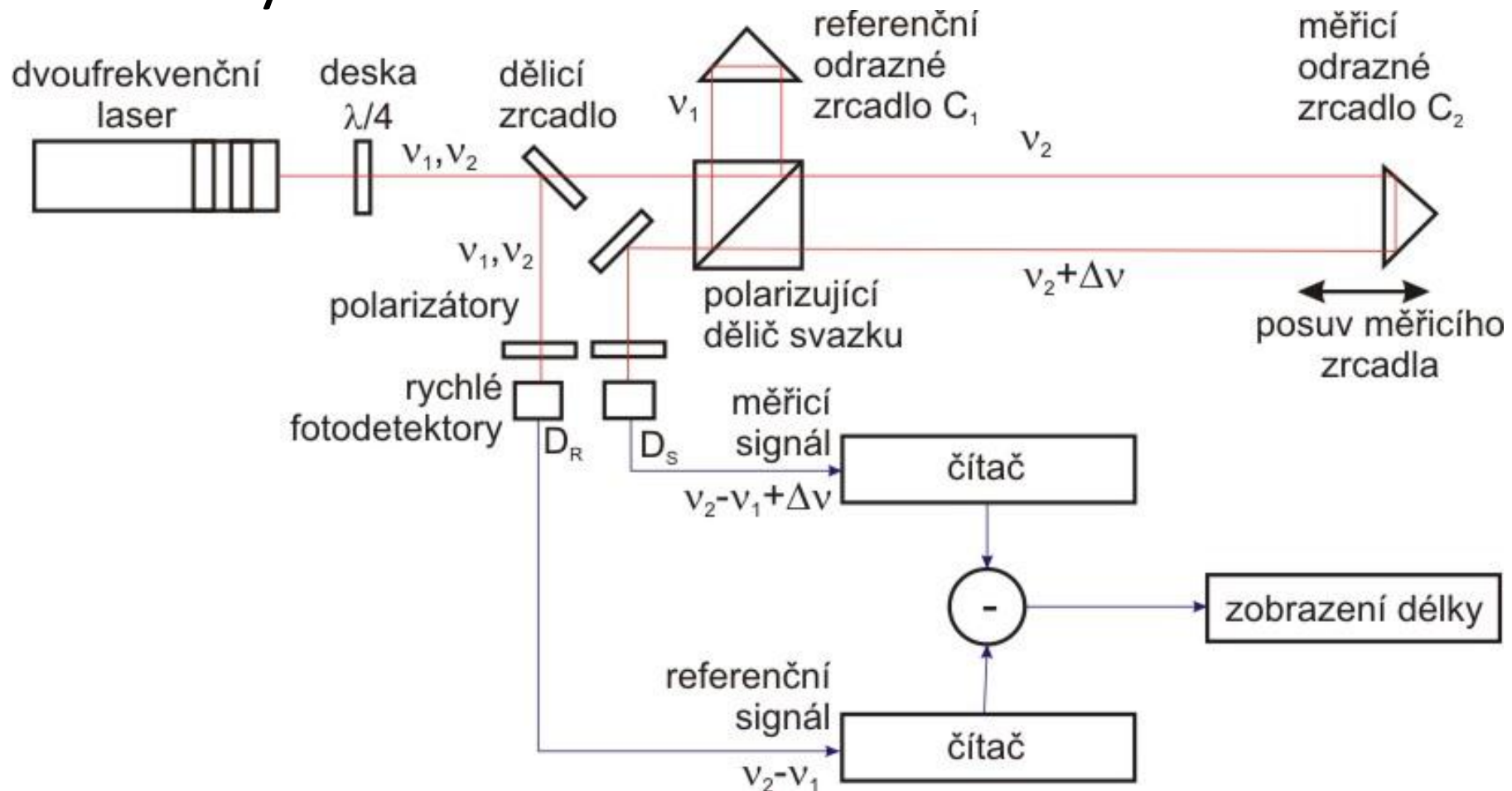
14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

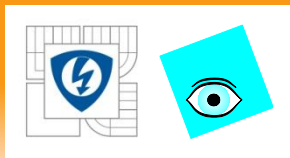


Detekční techniky interferometrů - heterodynní technika

- Heterodynní detekce interferenční fáze :



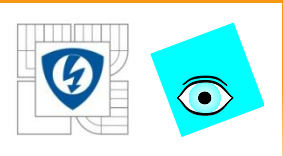
14.10.2011



Detekční techniky interferometrů

Závěr - porovnání detekčních technik

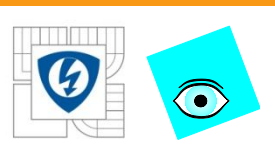
- Heterodynní detekce interferenční fáze :
 - Interferometr s heterodynní detekcí je z hlediska složitosti optiky méně náročný než interferometr s homodynní detekcí, po stránce elektronické zpracování je však složitější
 - V současnosti jsou systémy homodynní i heterodynní velmi hojně rozšířeny v průmyslových i vědeckých aplikacích
 - Nelze říci, že jedna technika je lepší než druhá, neboť obě dosahují rozlišení v řádu desetin nanometrů a nejistoty měření či nelinearity stupnic jsou rovněž srovnatelné



Převod definice 1m na mechanický normál, koncové měrky, metody kalibrace

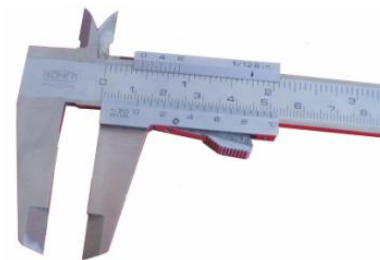
Zdeněk Buchta

14.10.2011

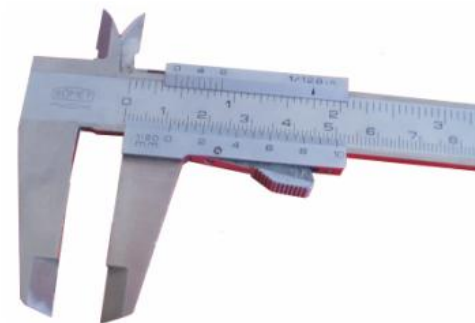


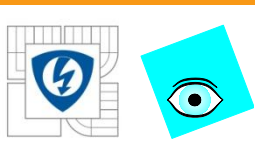
Interferometrie nízké koherence

Délková měřidla a jejich kalibrace



Diagnostika koncových měrek - motivace





Interferometrie nízké koherence – již od roku 1881!

No. 203. Vol. XXXIV.

NOVEMBER, 1887.

Established by BENJAMIN SILLIMAN in 1818.

THE
AMERICAN
JOURNAL OF SCIENCE.

EDITORS

JAMES D. AND EDWARD S. DANA.

ASSOCIATE EDITORS

PROFESSORS ASA GRAY, JOSIAH P. COOKE, AND
JOHN TROWBRIDGE, OF CAMBRIDGE,

PROFESSORS H. A. NEWTON AND A. E. VERRILL, OF
NEW HAVEN,

PROFESSOR GEORGE F. BARKER, OF PHILADELPHIA.

THIRD SERIES.

VOL. XXXIV.—[WHOLE NUMBER, CXXXIV.]

WITH PLATES II TO IX.

No. 203—NOVEMBER, 1887.

NEW HAVEN, CONN.: J. D. & E. S. DANA.
1887.

TUTTLE, MOREHOUSE & TAYLOR, PRINTERS, 571 STATE STREET.

Six dollars per year (postage prepaid). \$6.40 to foreign subscribers of countries in the Postal Union. Remittances should be made either by money orders, registered letters, or bank checks.

THE

AMERICAN JOURNAL OF SCIENCE.

[THIRD SERIES.]

ART. XXXVI.—*On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether*; by ALBERT A. MICHELSON and EDWARD W. MORLEY.*

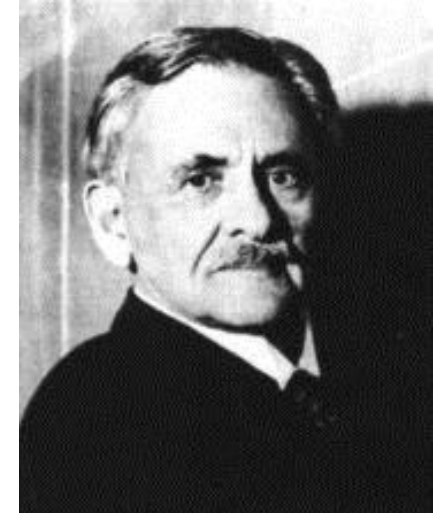
THE discovery of the aberration of light was soon followed by an explanation according to the emission theory. The effect was attributed to a simple composition of the velocity of light with the velocity of the earth in its orbit. The difficulties in this apparently sufficient explanation were overlooked until after an explanation on the undulatory theory of light was proposed. This new explanation was at first almost as simple as the former. But it failed to account for the fact proved by experiment that the aberration was unchanged when observations were made with a telescope filled with water. For if the tangent of the angle of aberration is the ratio of the velocity of the earth to the velocity of light, then, since the latter velocity in water is three-fourths its velocity in a vacuum, the aberration observed with a water telescope should be four-thirds of its true value.†

* This research was carried out with the aid of the Beche Fund.

† It may be noticed that most writers admit the sufficiency of the explanation according to the emission theory of light; while in fact the difficulty is even greater than according to the undulatory theory. For on the emission theory the velocity of light must be greater in the water telescope, and therefore the angle of aberration should be less; hence, in order to reduce it to its true value, we must make the absurd hypothesis that the motion of the water in the telescope carries the ray of light in the opposite direction!

AM. JOUR. SCI.—THIRD SERIES, Vol. XXXIV, No. 203.—Nov., 1887.

22



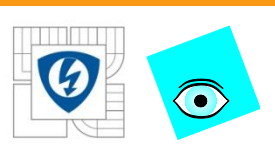
Albert
Abraham
Michelson

1907
Nobelova
cena
za fyziku

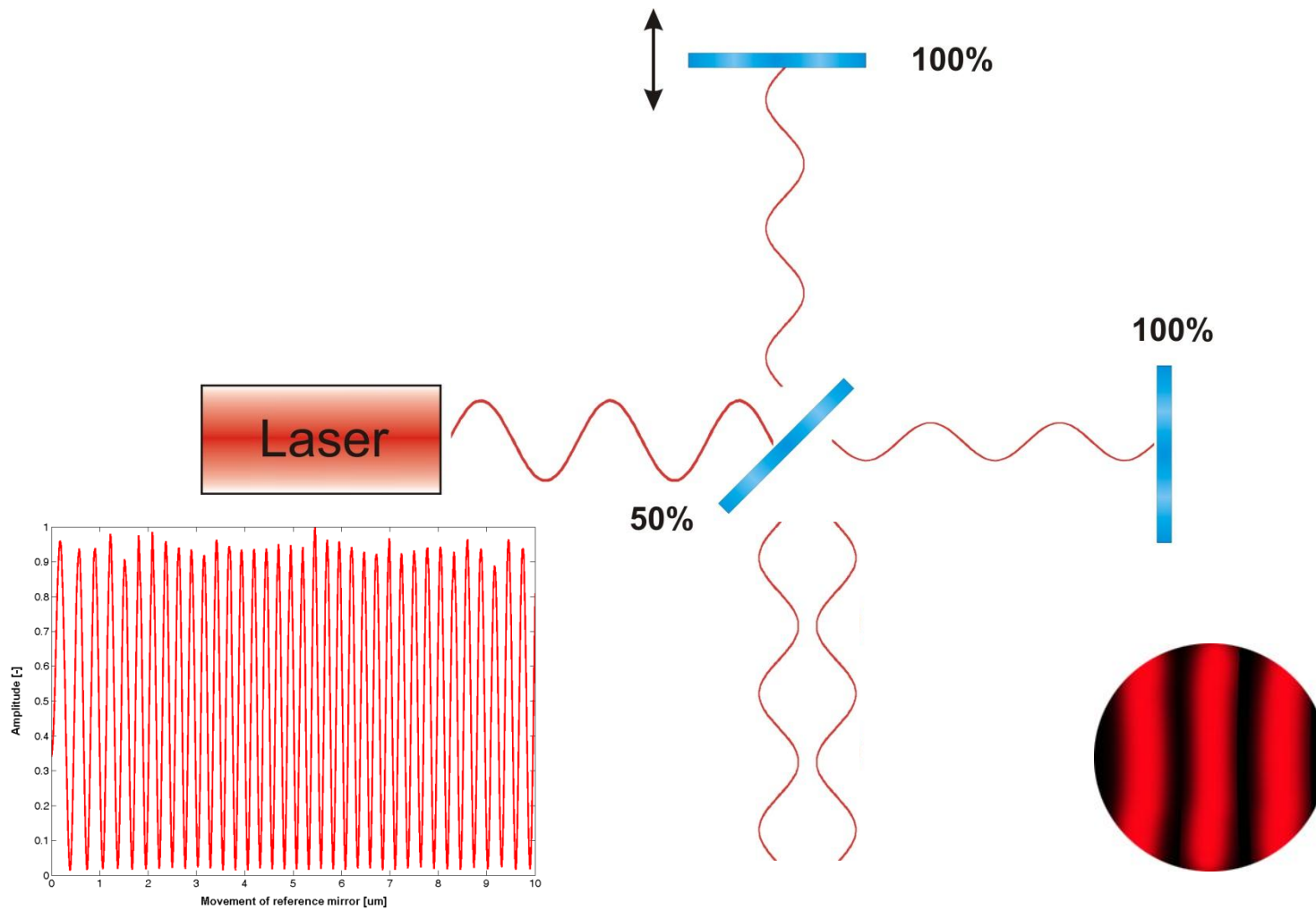
14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





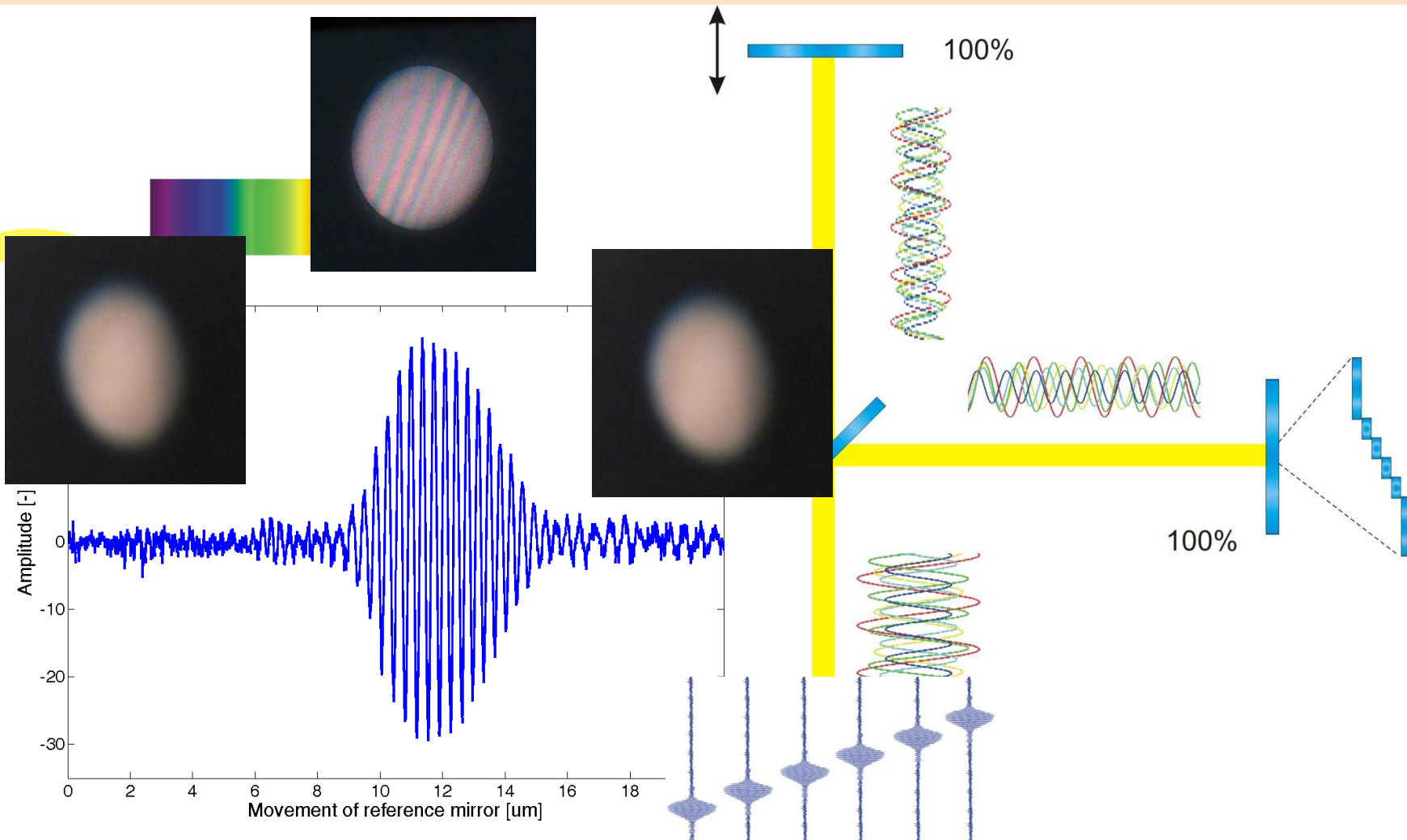
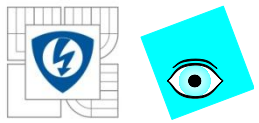
Laserová interferometrie - princip



14.10.2011

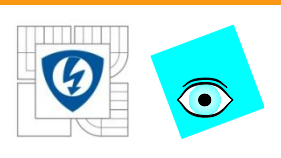
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Bílá interferometrie – princip



14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

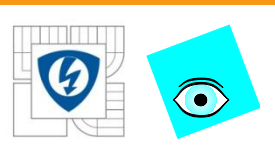


Hlavní aplikační oblasti

diagnostika povrchů makroskopických objektů (rozlišení až jednotky nanometrů)

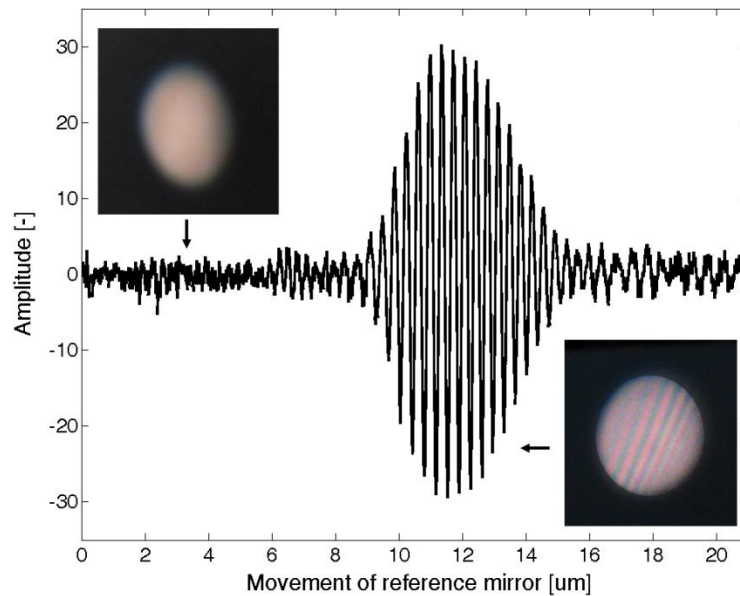
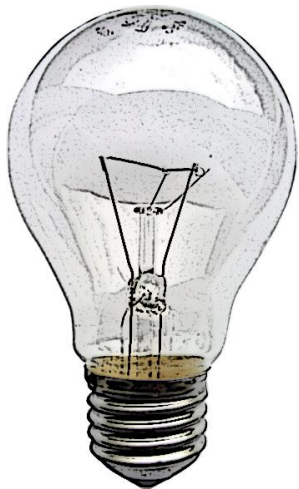
měření tloušťky tenkých průsvitných vrstev (planparalelní vrstvy, klínové desky)

optická tomografie (přelom 80. a 90. let 20. stol. rozlišení μm , IČ záření, 3D snímky tkání – pokožka, oči, zuby)



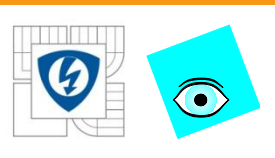
Bílá interferometrie

zdroj světla, detekce interferenčního signálu

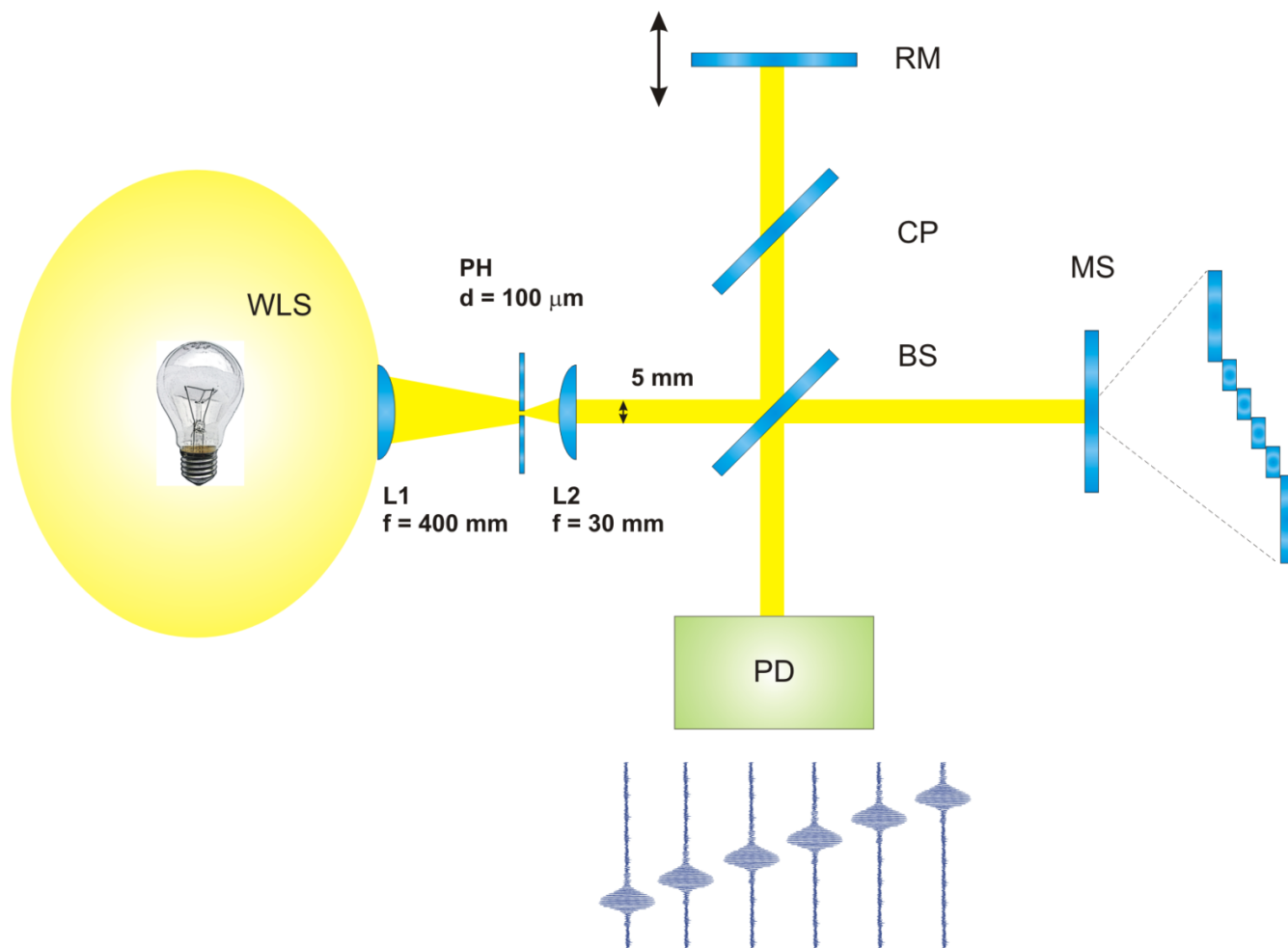


14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



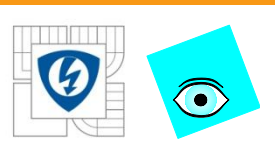
Základní experimentální sestava



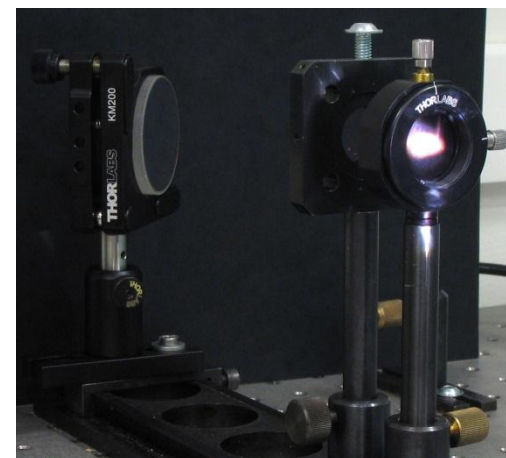
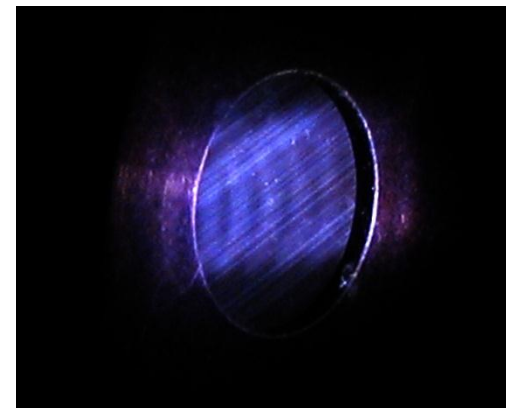
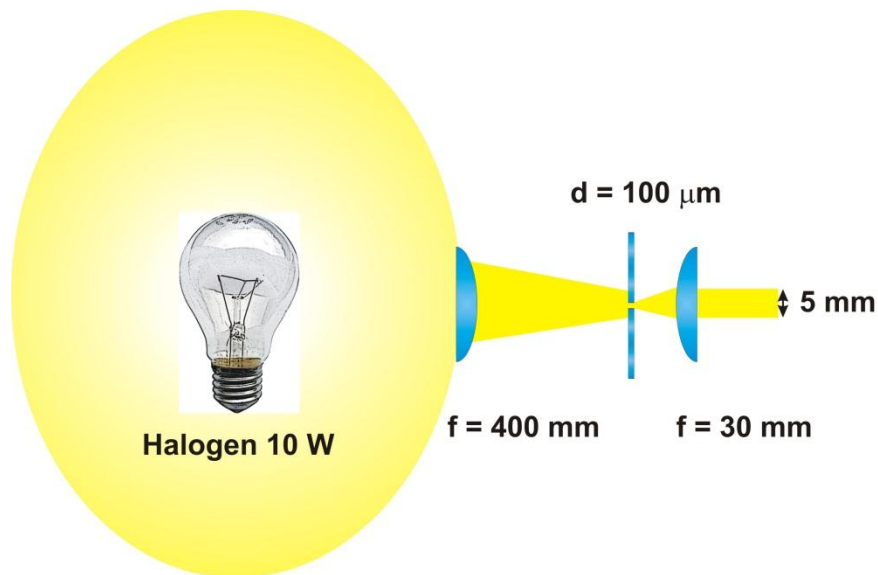
14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





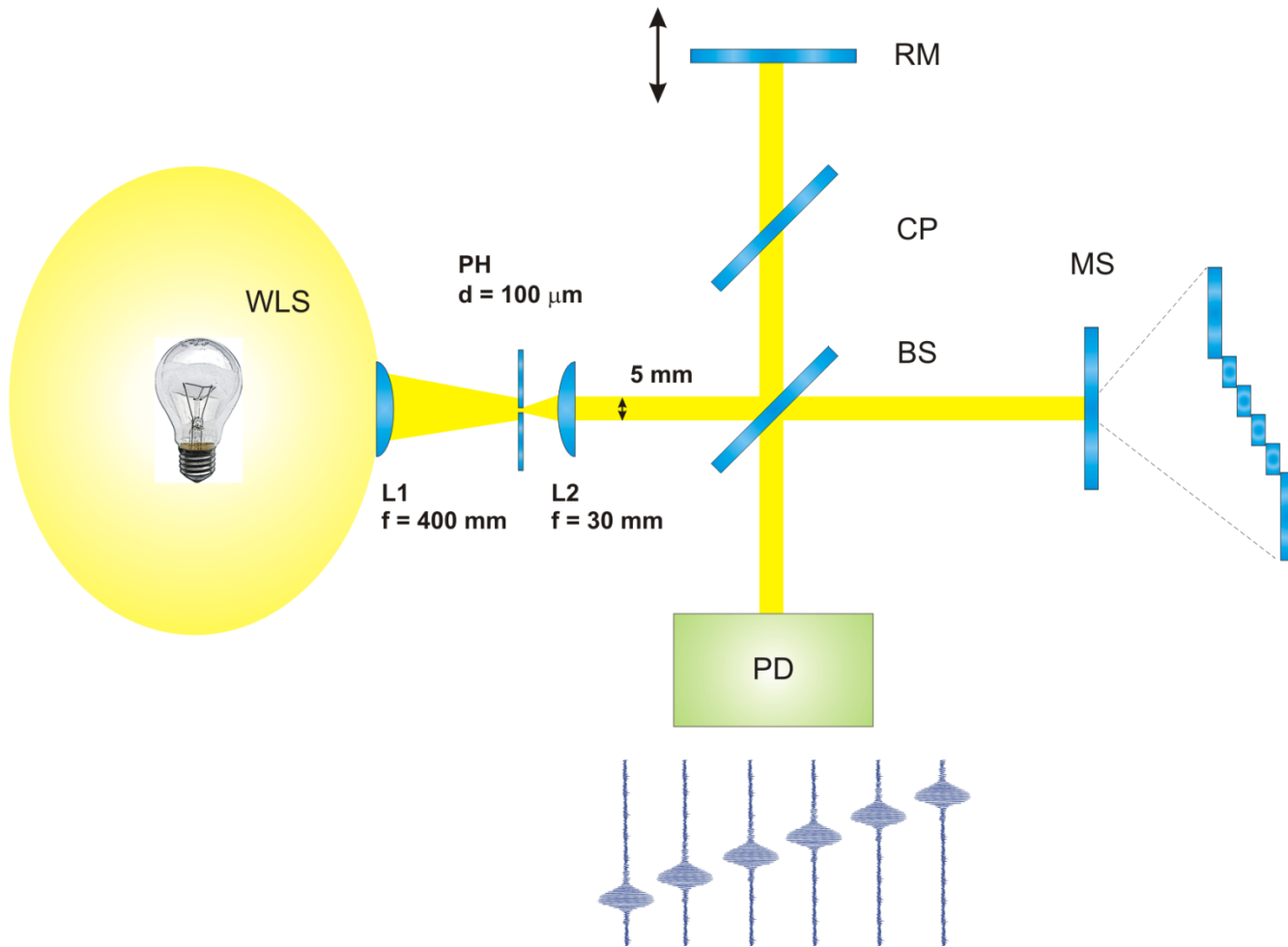
Zdroj bílého světla



14.10.2011

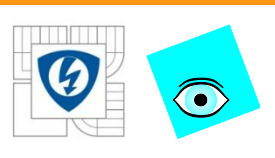
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Základní experimentální sestava

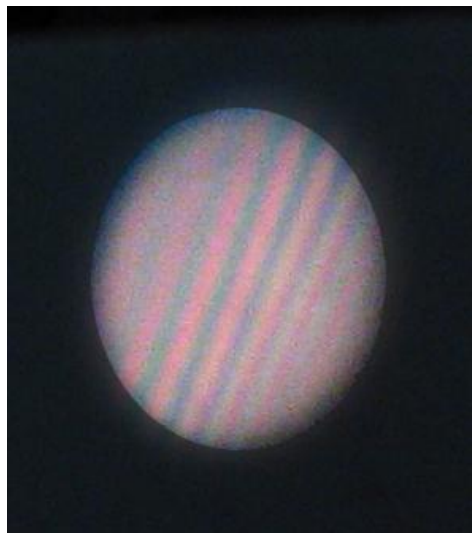


14.10.2011

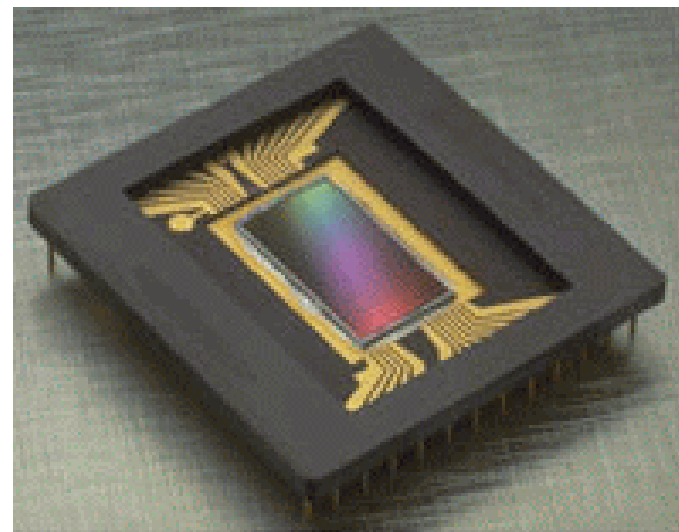
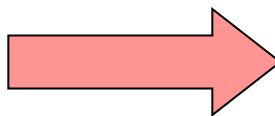
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Detekce středu bílého proužku

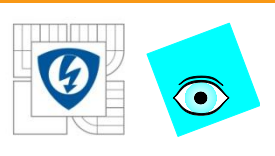


Měřený povrch



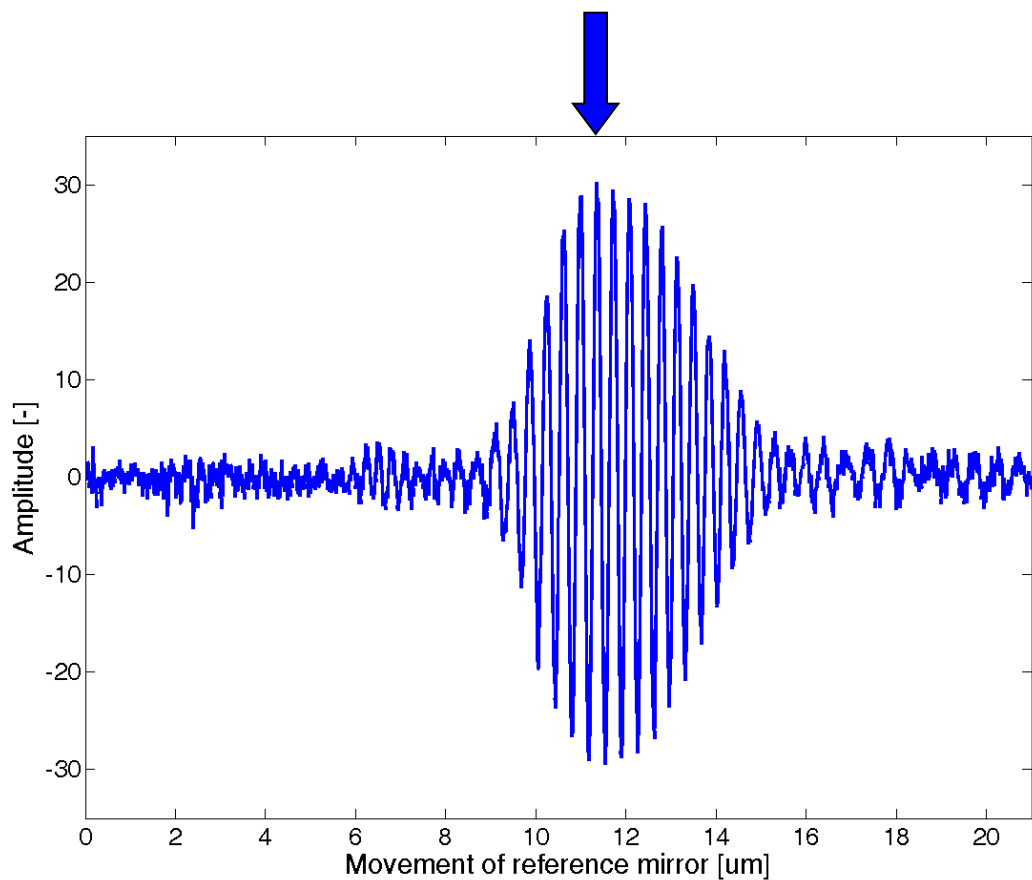
CCD snímač

1 pixel CCD = 1 bod měřeného povrchu



Detekce středu bílého proužku

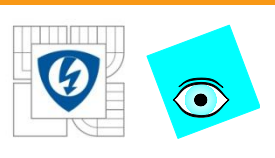
Střed bílého proužku = bod měřeného povrchu



14.10.2011

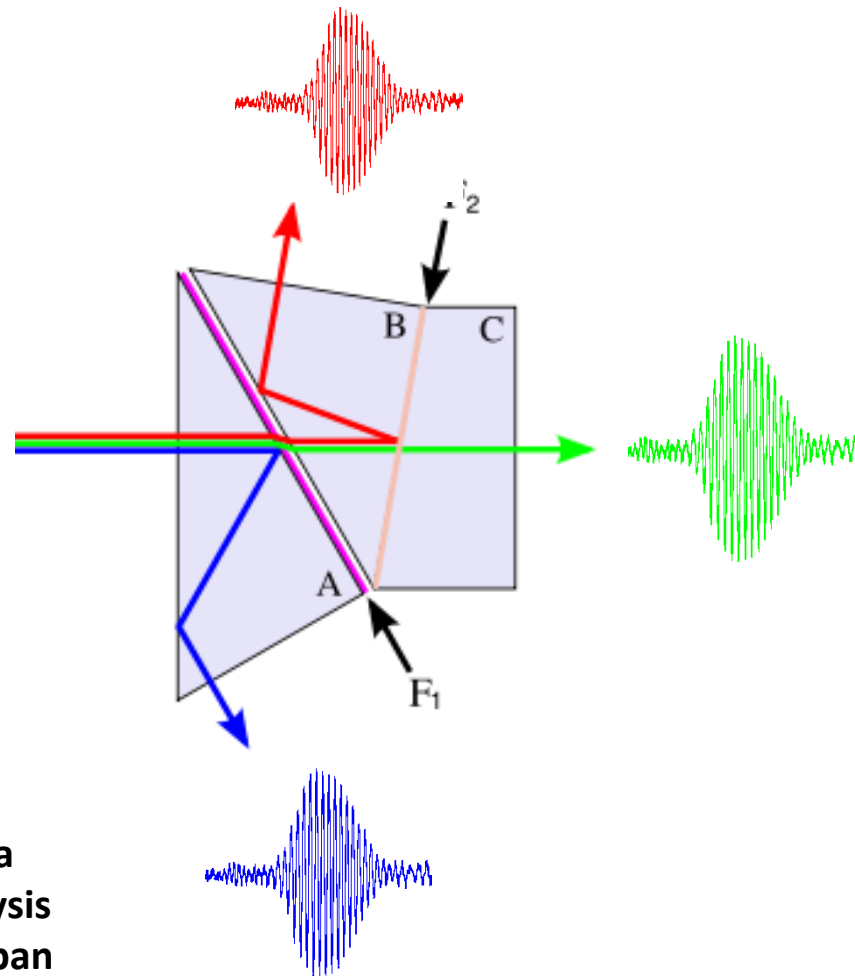
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Metoda křížení fází – 3CCD kamera

SONY DXC-990
½" SONY CCD snímač
rozlišení 768 x 494

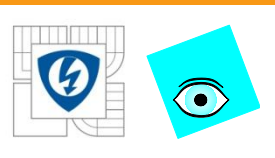


M. E. Pawlowski, Y Sakano, Y. Miyamoto, M. Takeda
Phase-crossing algorithm for white-light fringes analysis
The University of Electro-Communications, Tokyo, Japan
Optics Communications 260 (2006) pp. 68 - 72

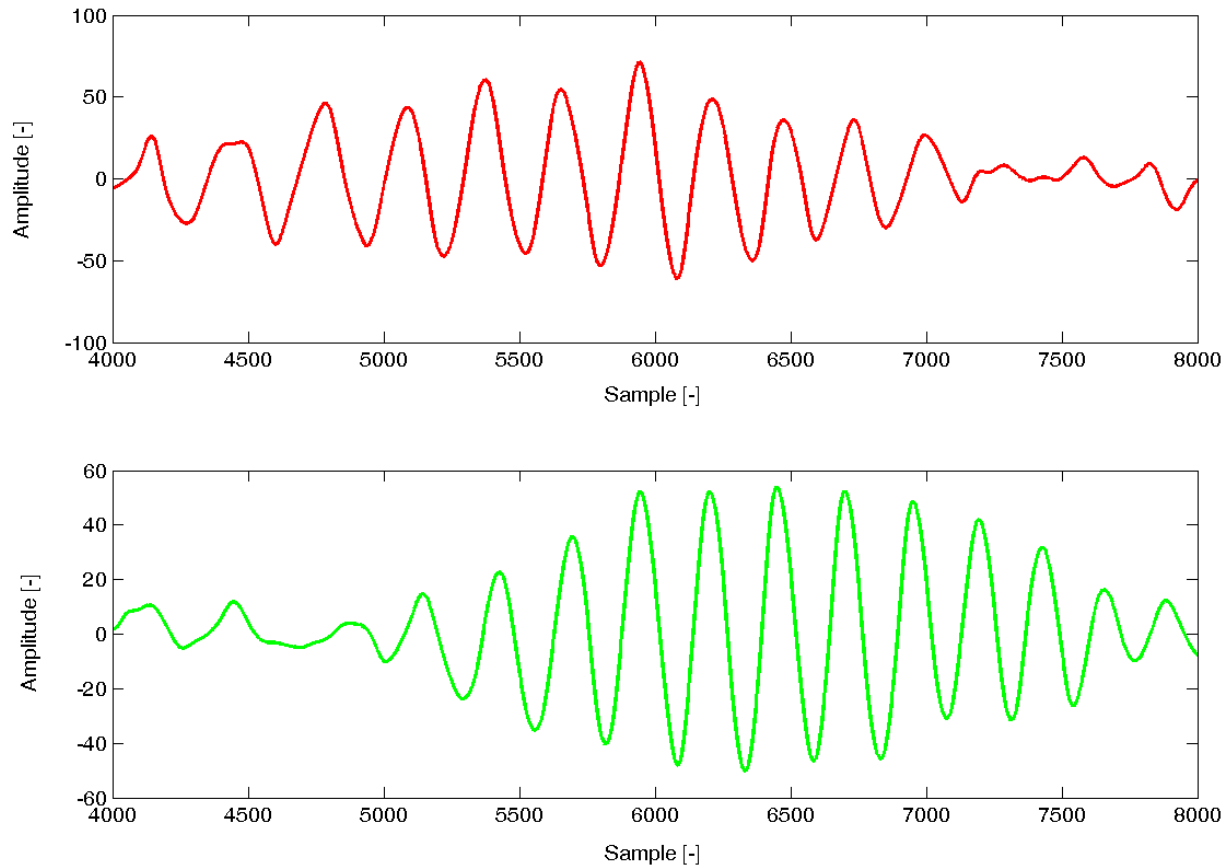
14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





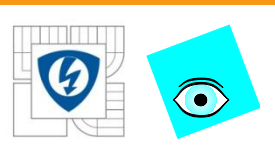
Metoda křížení fází



14.10.2011

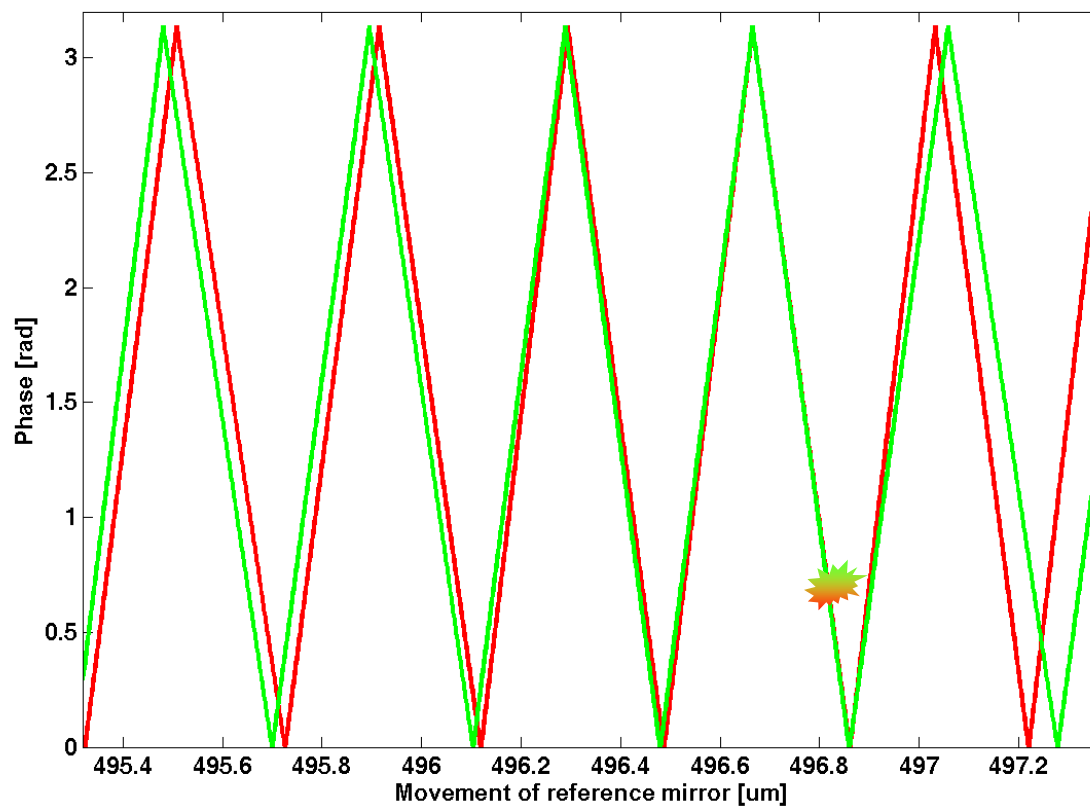
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Metoda křížení fází

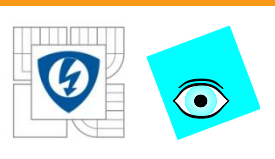
Křížení-fází = nulový bod



14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





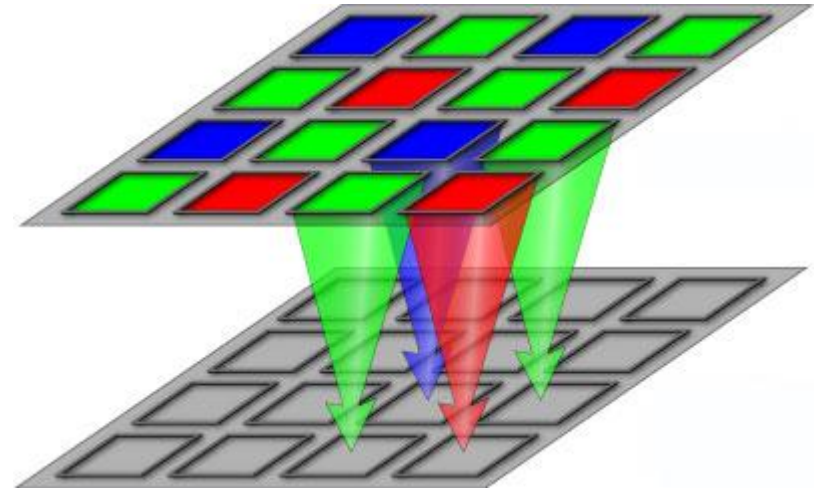
Metoda křížení fází – CCD kamera



i-tec webkamera
¼" SONY CCD snímač
rozlišení 1280 x 960



IS kamera DFK 41BU02
½" SONY CCD snímač
rozlišení 1280 x 960



Source image



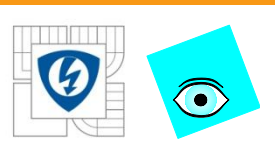
0	0	0	0	255	255	0	255
255	0	255	255	0	0	0	0
0	0	0	0	255	255	0	255
255	0	255	255	0	0	0	0
255	0	255	255	0	255	255	255
255	255	255	0	255	255	0	255
255	0	255	255	0	255	255	255
255	255	255	0	255	255	0	255

Raw digital image

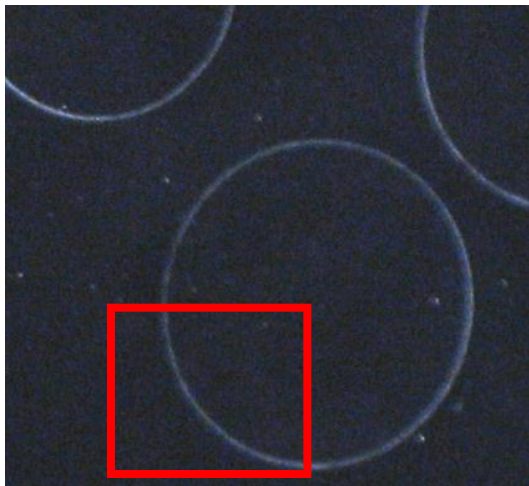
255	255	255
255	255	255
255	255	255

$$G = \frac{255 + 255 + 255 + 255}{4}$$

$$B = \frac{255 + 255 + 255 + 255}{4}$$



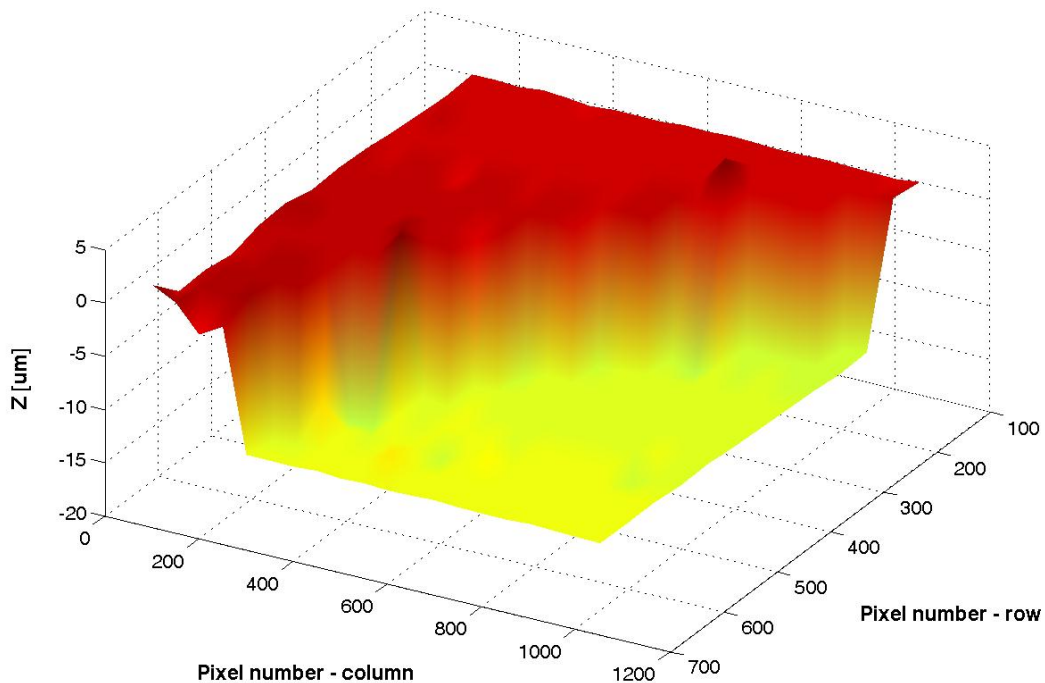
Metoda křížení fází - výsledky



Výška schodu $12\ \mu\text{m}$
Rozdíl $10\ \text{nm}$
Směrodatná odchylka $60\ \text{nm}$

Měření profilometrem
TALYSTEP

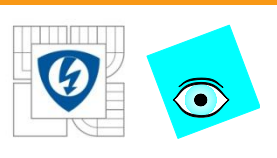
LabVIEW, Matlab



14.10.2011

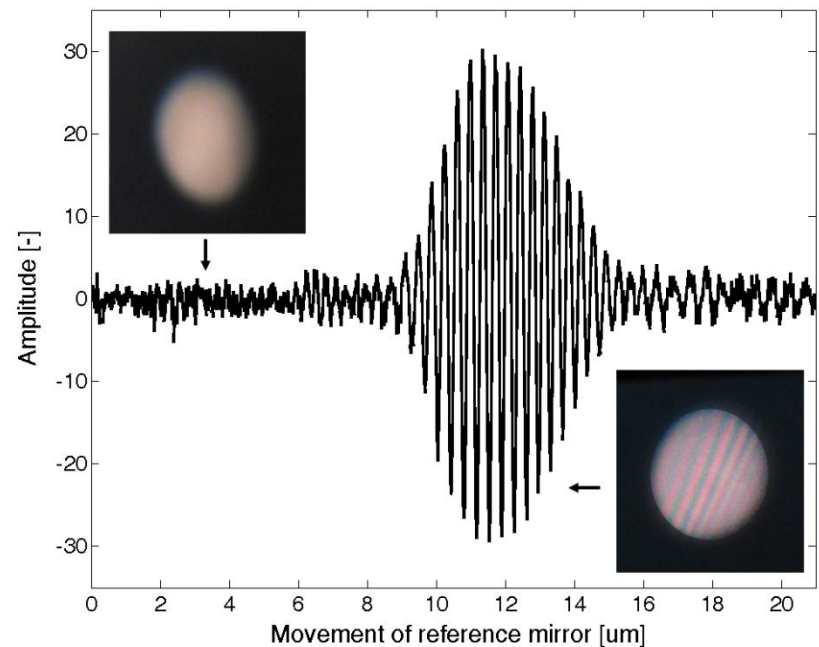
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

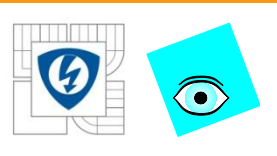




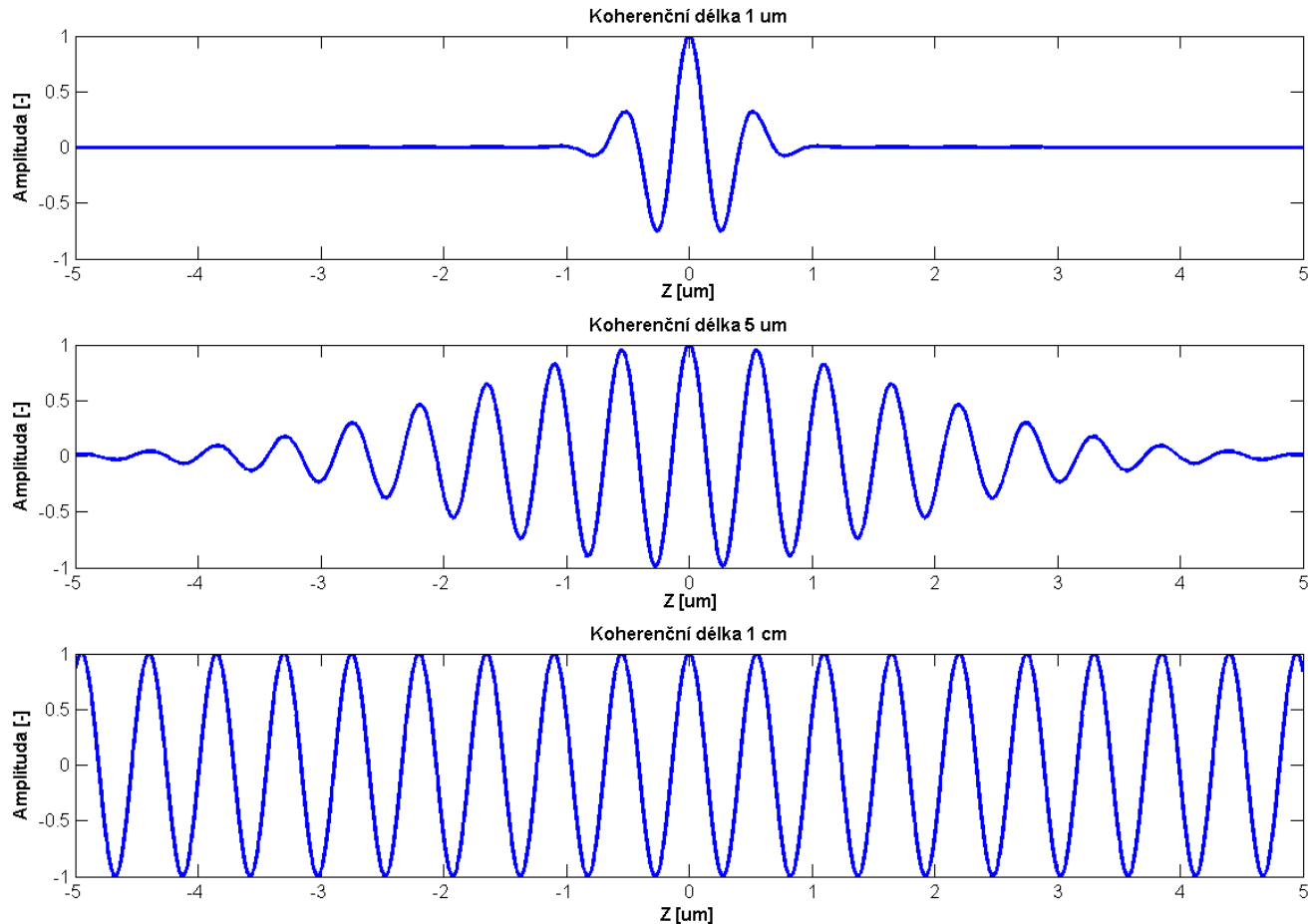
Další detekční techniky

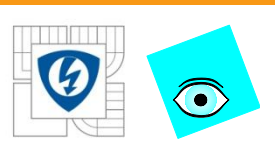
- weight-center
- phase-shift algorithm
- frequency domain analysis
- coherent correlation



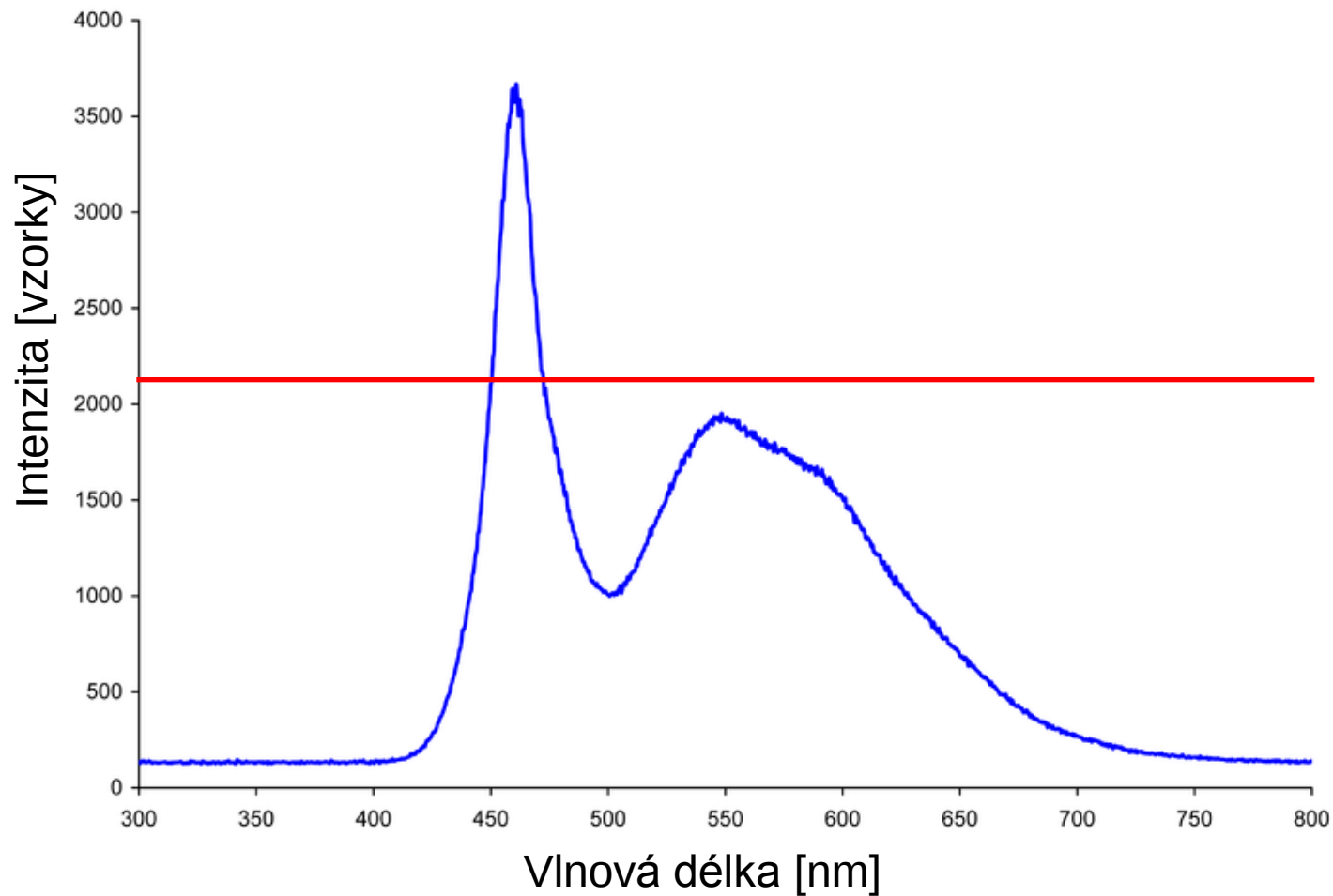


Vztah šířky interferenčního proužku a koherenční délky zdroje světla





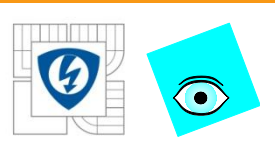
Typické spektrum bílé LED



14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



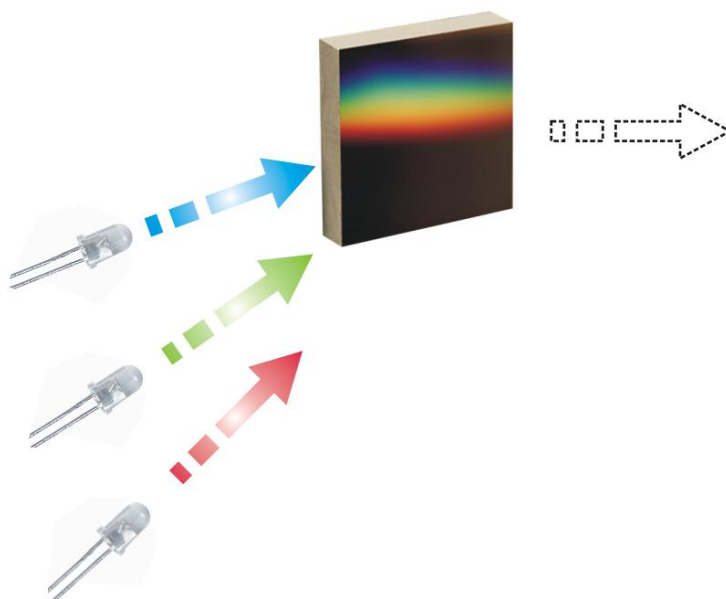


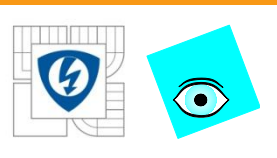
Optimalizace spektra bílého zdroje

Formování spektra

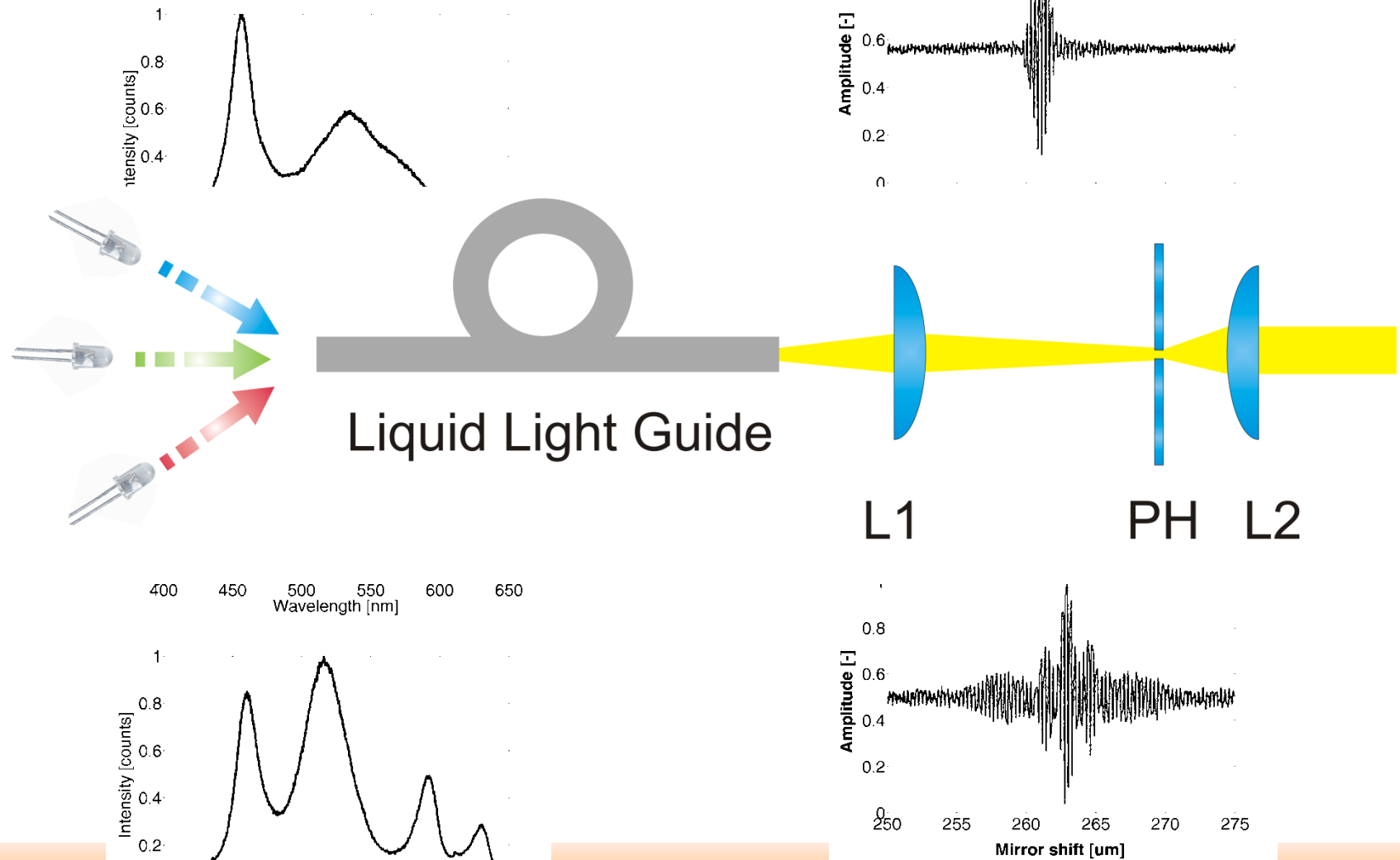
aktivní – barevné LED

pasivní – barevný filtr



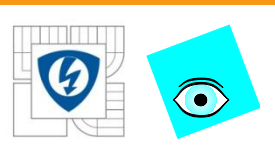


Optimalizace spektra bílého zdroje

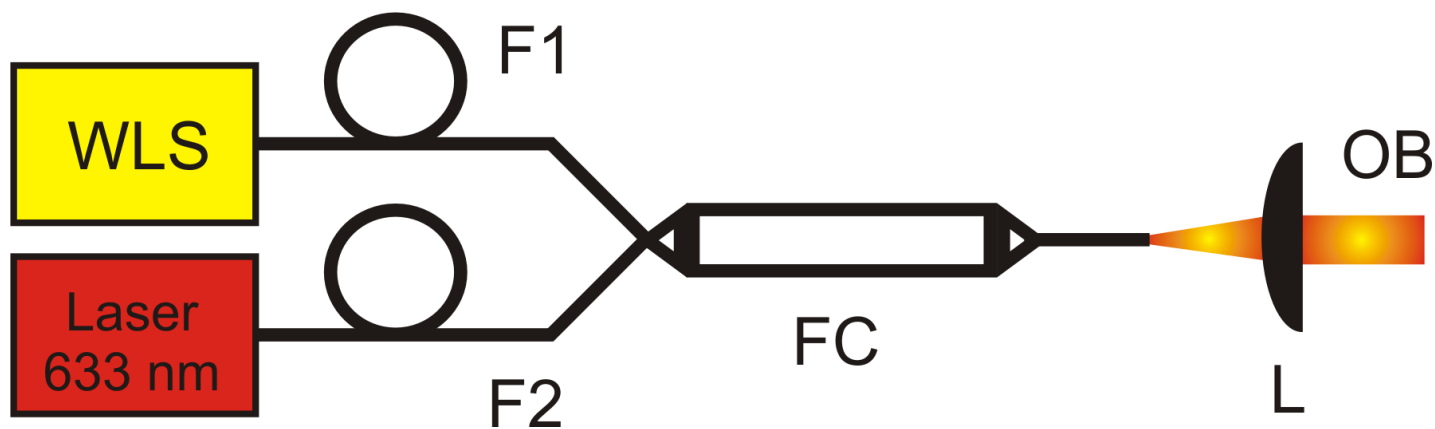
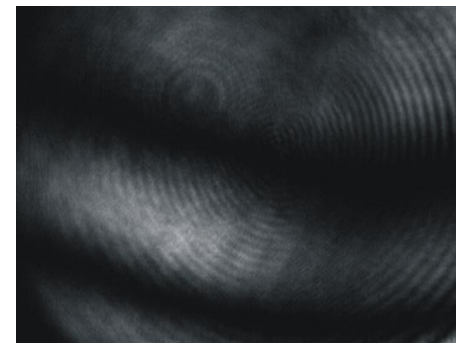
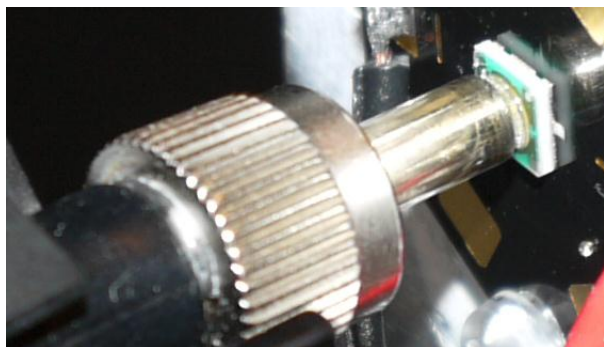


14.10.2011

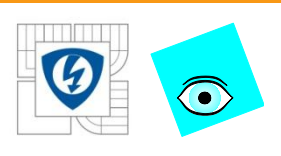
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Kombinace bílého světla a laseru



F1, F2 ... jednomodové optické vlákno pro 1550 nm
FC ... vláknový dělič 90/10 (90% pro bílé světlo)



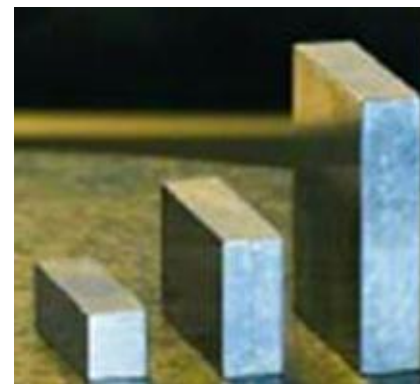
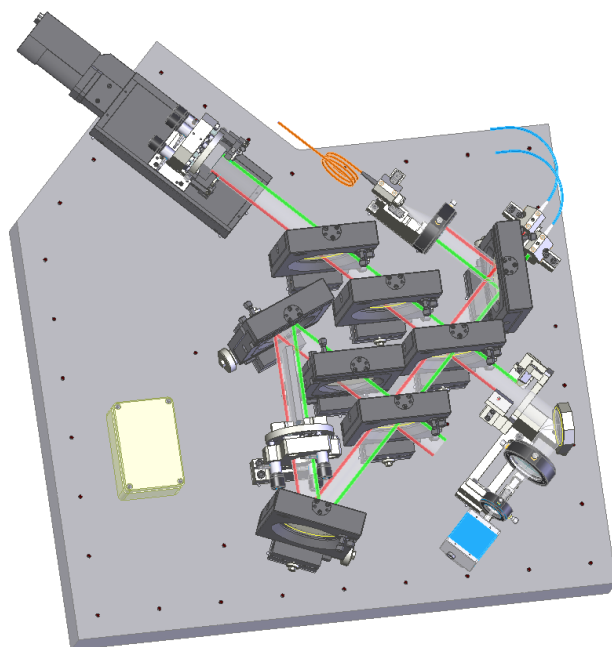
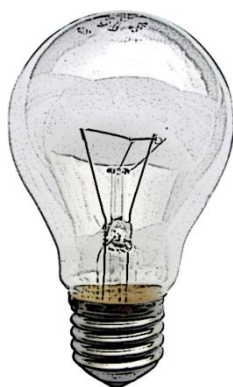
Z. Buchta, B. Mikel, J. Lazar, O. Číp

White-light fringe detection based on a novel light source and colour CCD camera

Measurement Science and Technology,
vol. 22, no. 094031, 2011



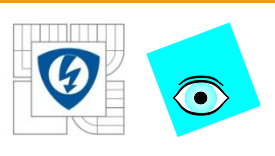
Kalibrace koncových měrek



14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Bílá interferometrie na ÚPT

1.11. 2006

Výzkum metod diagnostiky koncových měrek pro přesné strojírenství

MPO 2A-1TP1/127
GA ČR GP102/09/P293
GA ČR GP102/09/P630

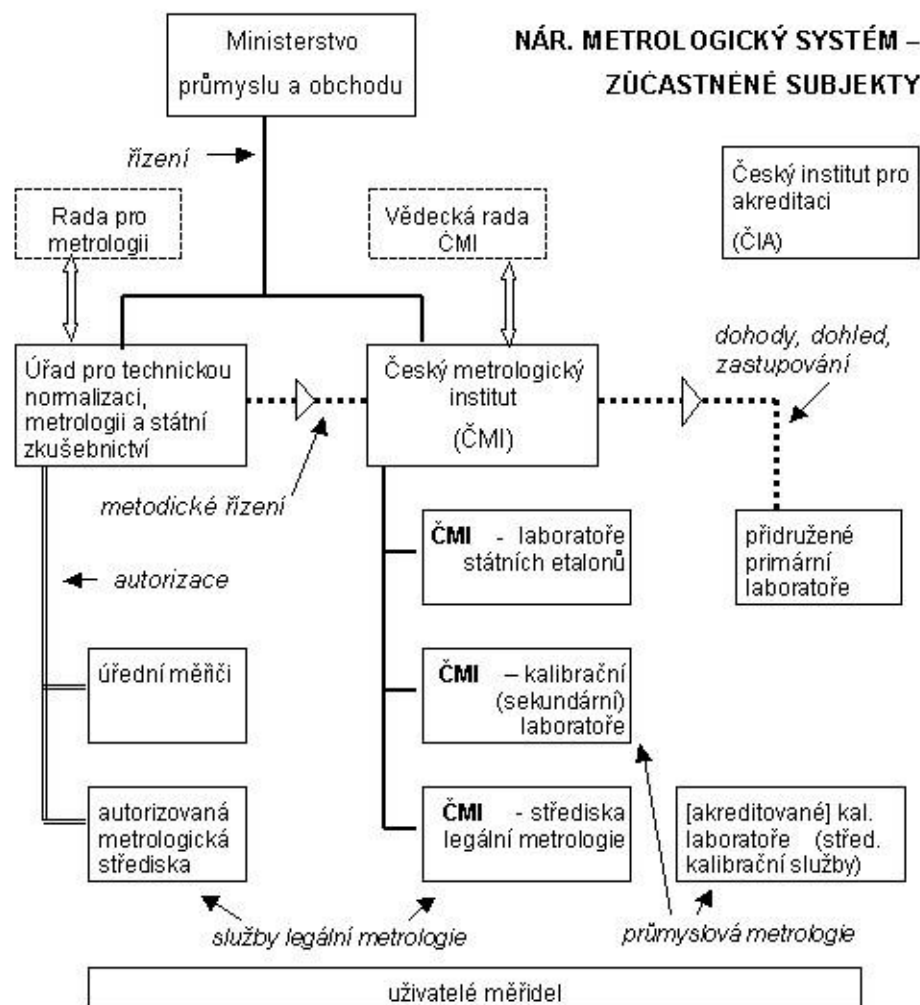
Ondřej Číp
Zdeněk Buchta
Břetislav Mikel



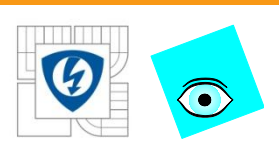
14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



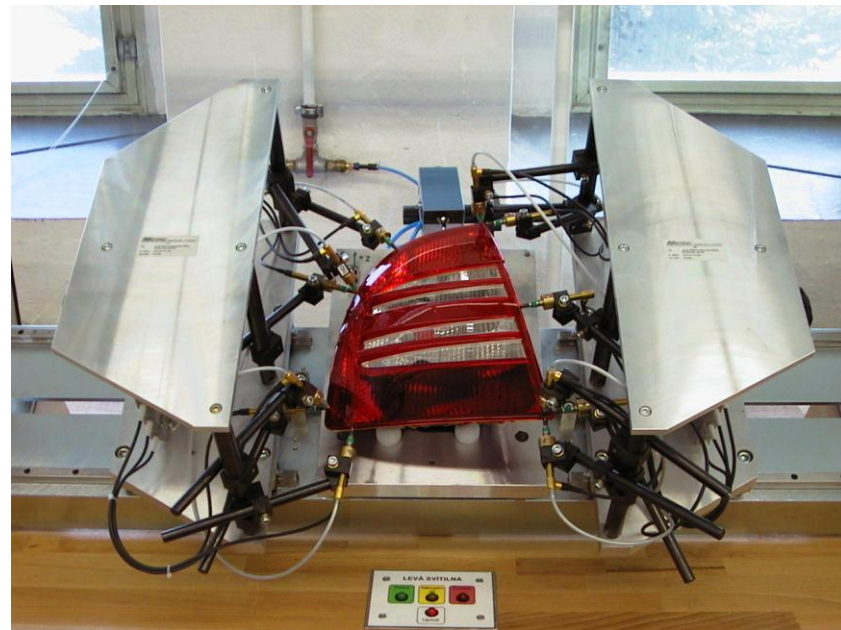


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



MESING, s.r.o.

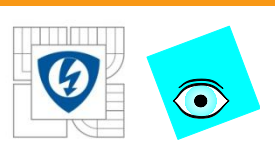
MESING, s.r.o. - specializuje se zejména na zakázková délková měřicí zařízení a automatizační techniku, od jednoduchých dílenských měřidel až po plně automatické stanice a linky.



14.10.2011

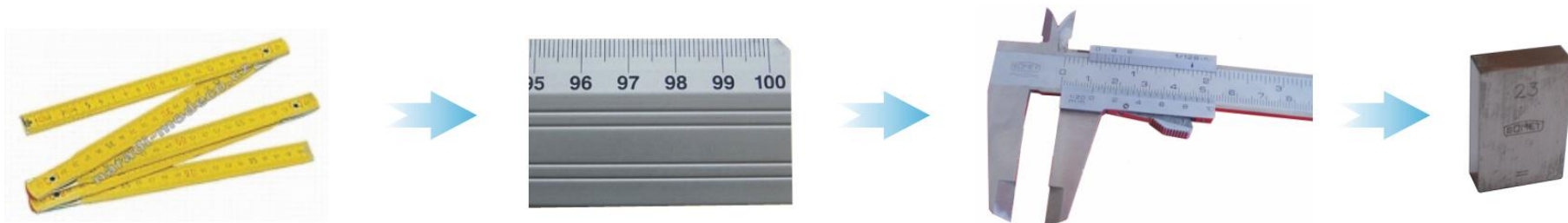
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Interferometrie nízké koherence

Délková měřidla a jejich kalibrace

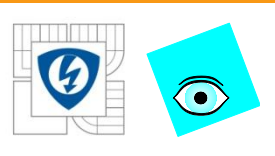


Diagnostika koncových měrek - motivace



14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

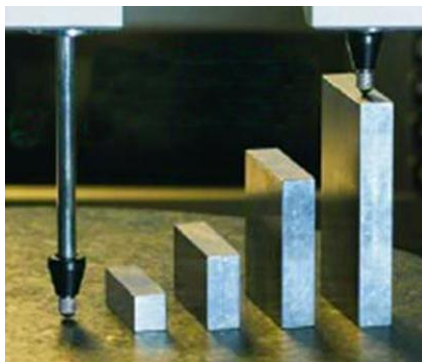


Kalibrace koncových měrek - současnost

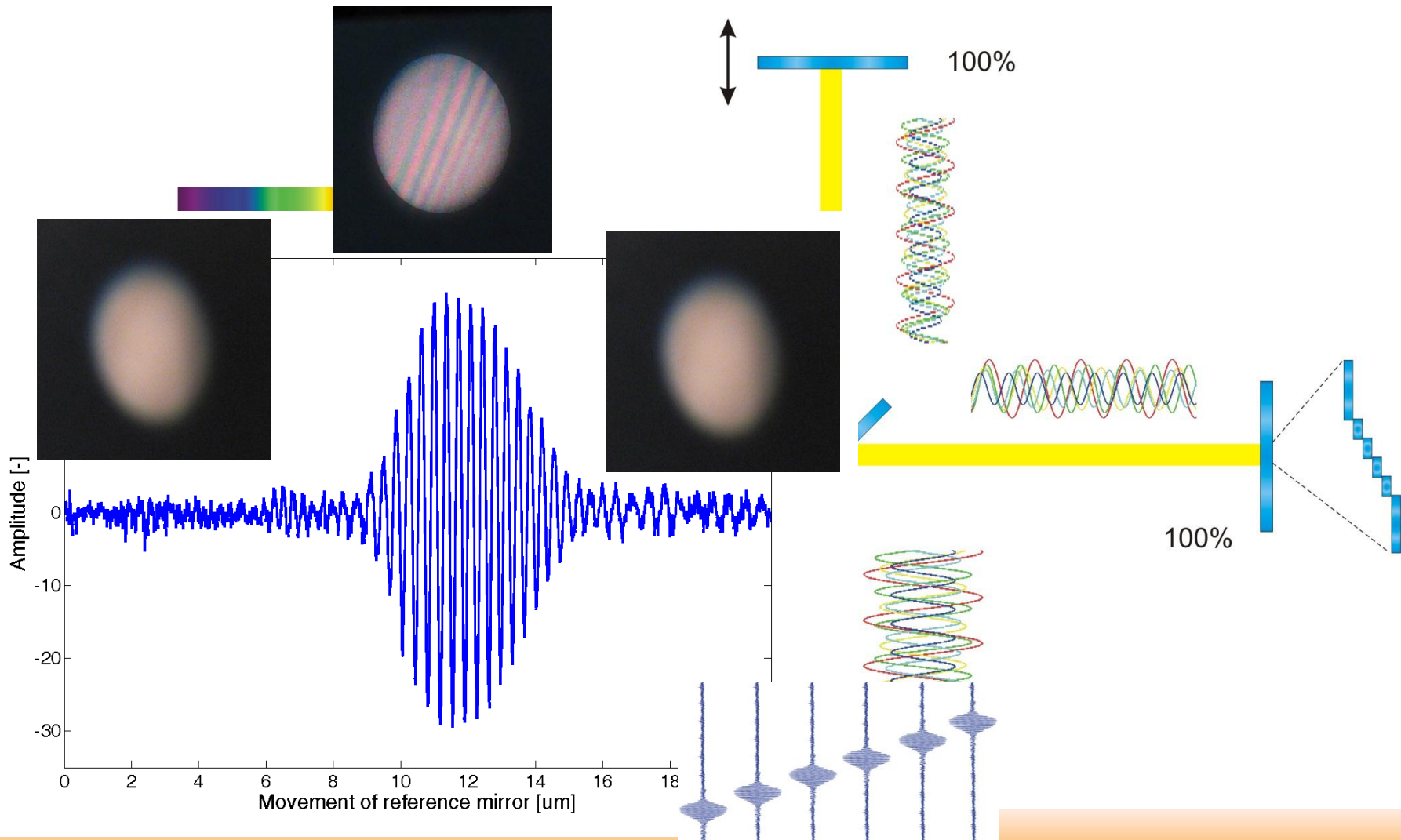
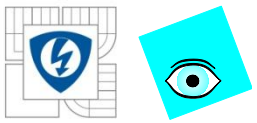
Metodika kalibrace koncových měrek je dána mezinárodní normou **EN ISO 3650** popisující dva základní kalibrační postupy.

První z nich je „plně kontaktní“ metoda. V tomto případě je měrka porovnávána s **referenční měrkou** a její délka je měřena **inkrementálním délkovým měřidlem**. Tato metoda se běžně využívá v průmyslové praxi – interní podnikové kalibrace.

Druhá varianta je částečně bezkontaktní. Koncová měrka je, stejně jako v předchozím případě, přilnuta k referenčnímu povrchu. Délka měrky je stanovena pomocí bílé nebo vícevlonné **interferometrie**. Tato metoda se využívá v metrologických laboratořích – kalibrace.



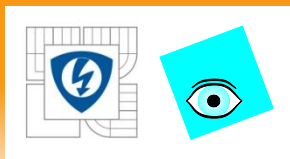
Bílá interferometrie – princip



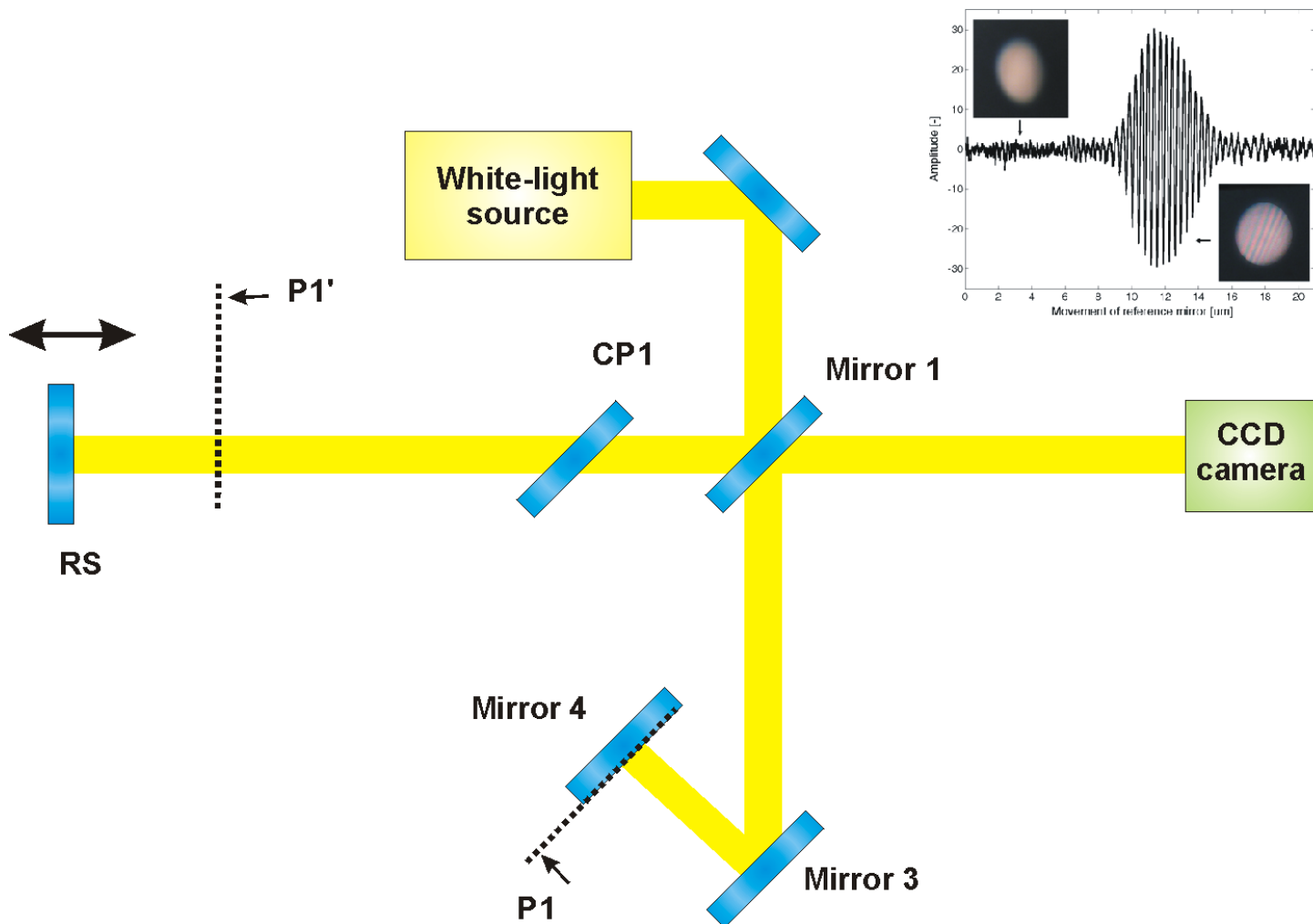
14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



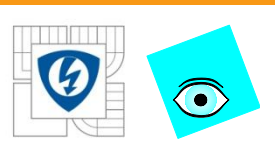


Kalibrace koncových měrek – princip

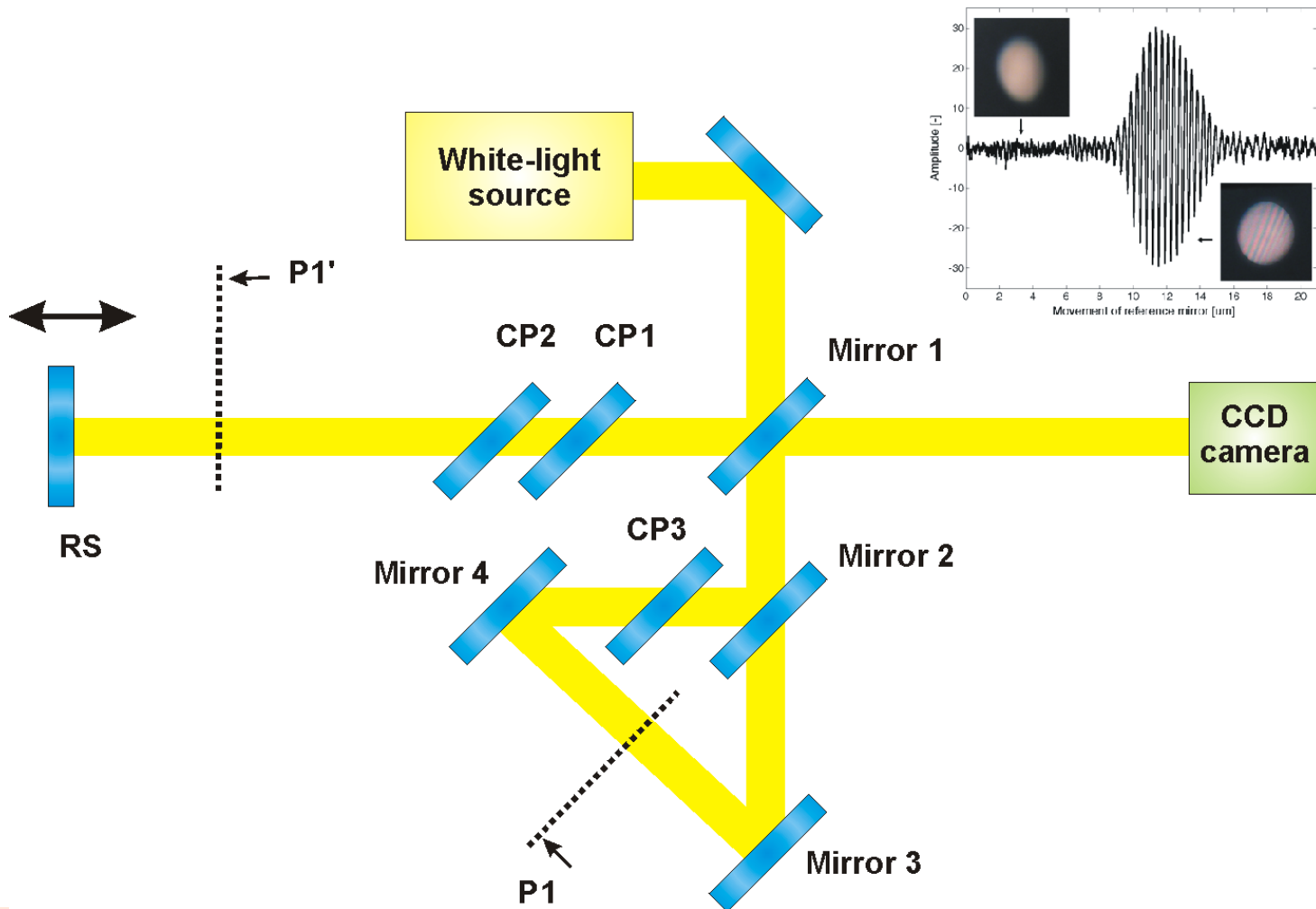


14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

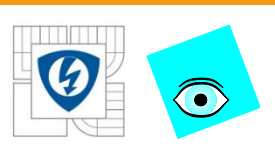


Kalibrace koncových měrek – princip

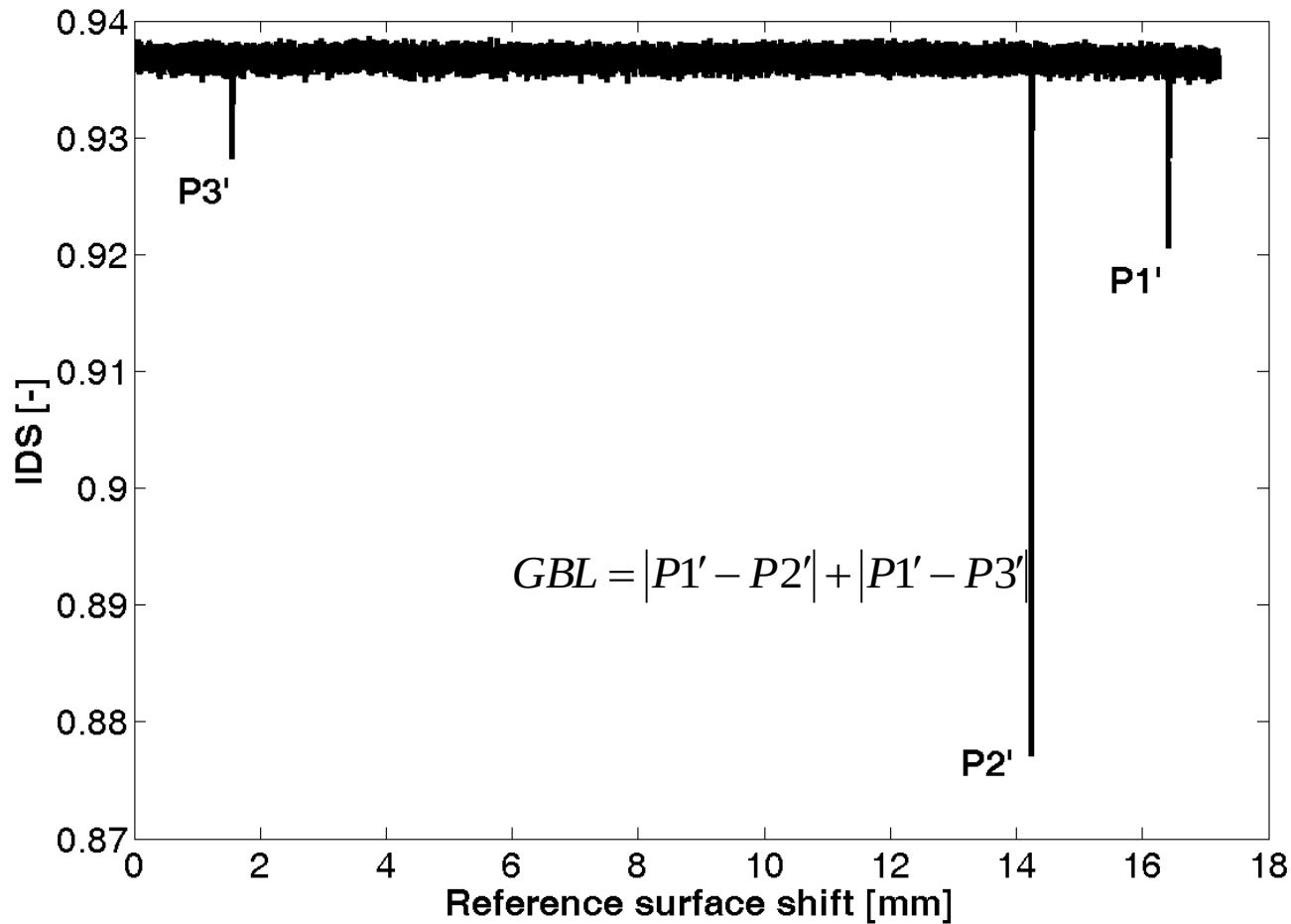


14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

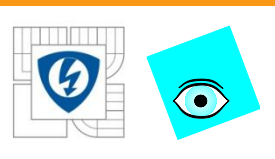


Kalibrace koncových měrek – princip

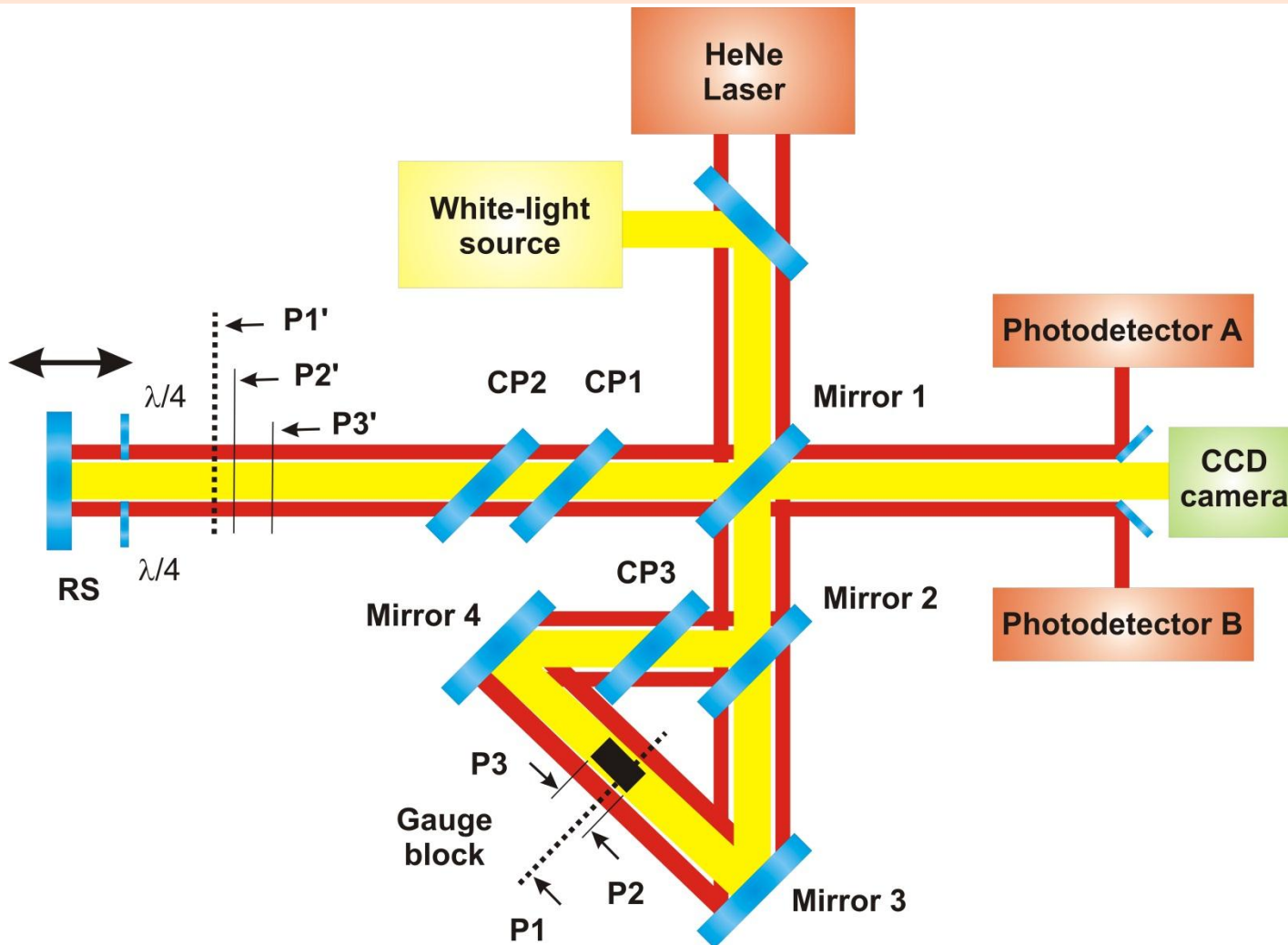


14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

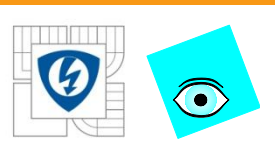


Kalibrace koncových měrek – princip



14.10.2011

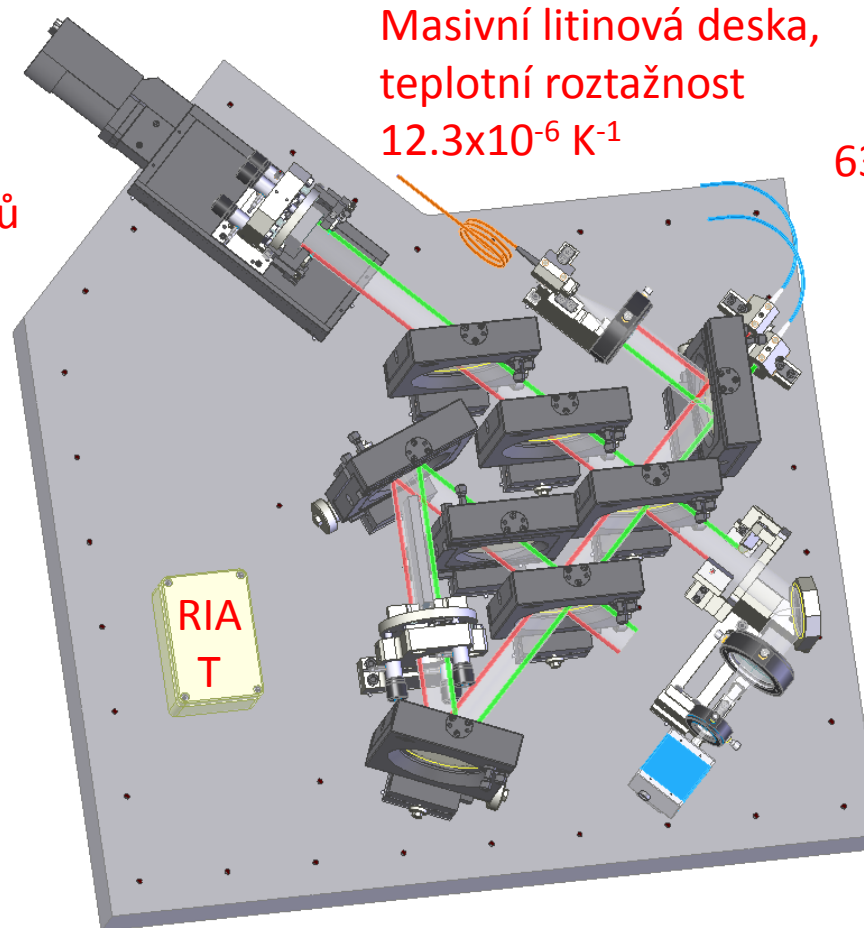
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Sestava pro kalibraci koncových měrek

Motorizovaný posuv
LIMES 80-100-HiDS
(OWIS)
105 mm s roztečí závitů
vřetene
1 mm a 2000 kroky na
otáčku

Polohovací šrouby
s PZT,
4 mm manuálně,
15 $\mu\text{m}/150\text{ V}$



Masivní litinová deska,
teplotní roztažnost
 $12.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

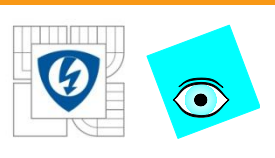
633 nm He-Ne laser

3" polohovací
uchycení pro optiku
TRANS 90G (OWIS)

DMK 31BU03
1/3 " Sony CCD
1024x768 pixel
30 snímků/s

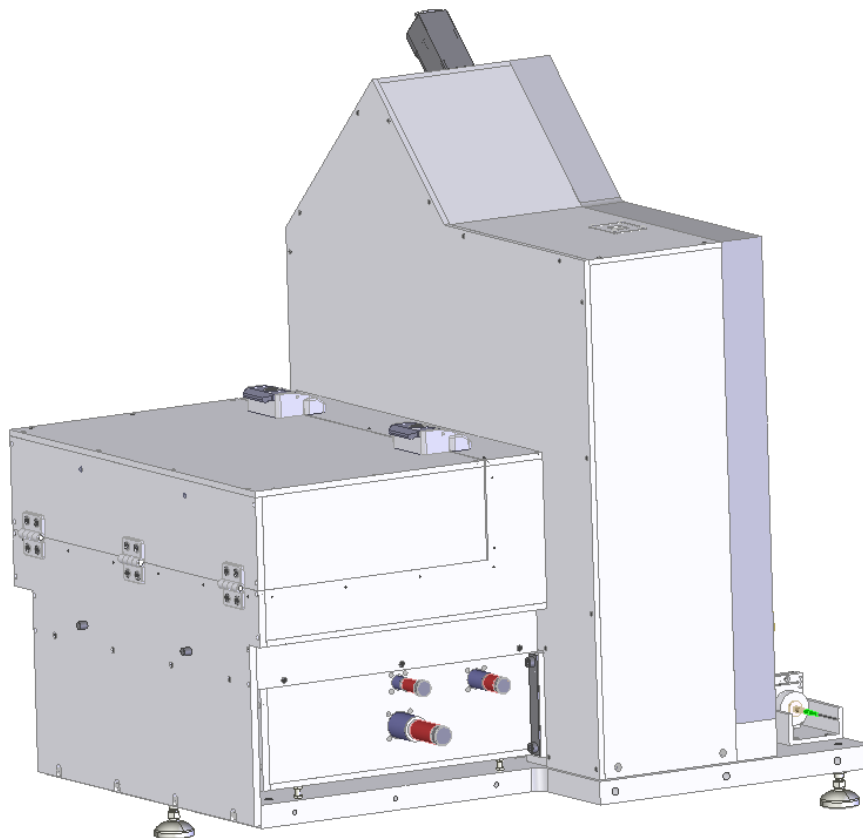
14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Sestava pro kalibraci koncových měrek

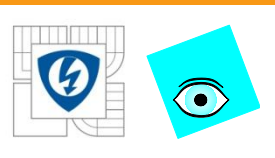
**Systém pro automatickou kalibraci koncových měrek
s výměníkem pro 126 měrek (0,5 mm až 100 mm)**



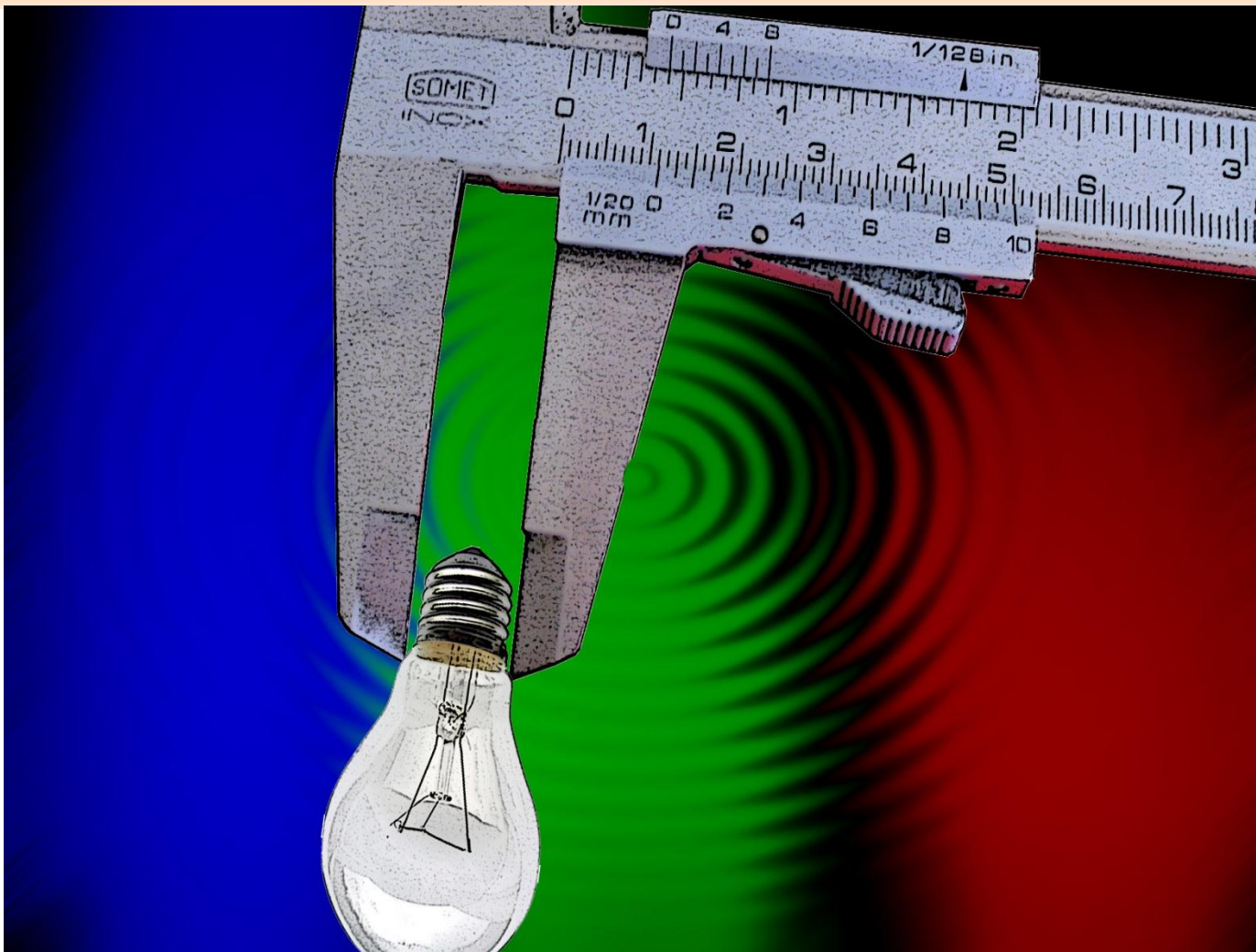
14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





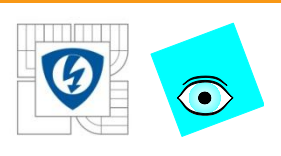
Děkuji za pozornost!



14.10.2011

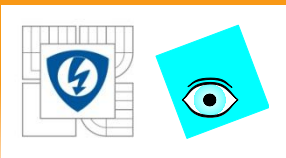
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





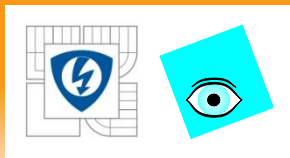
Nanokomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů

Ondřej Číp



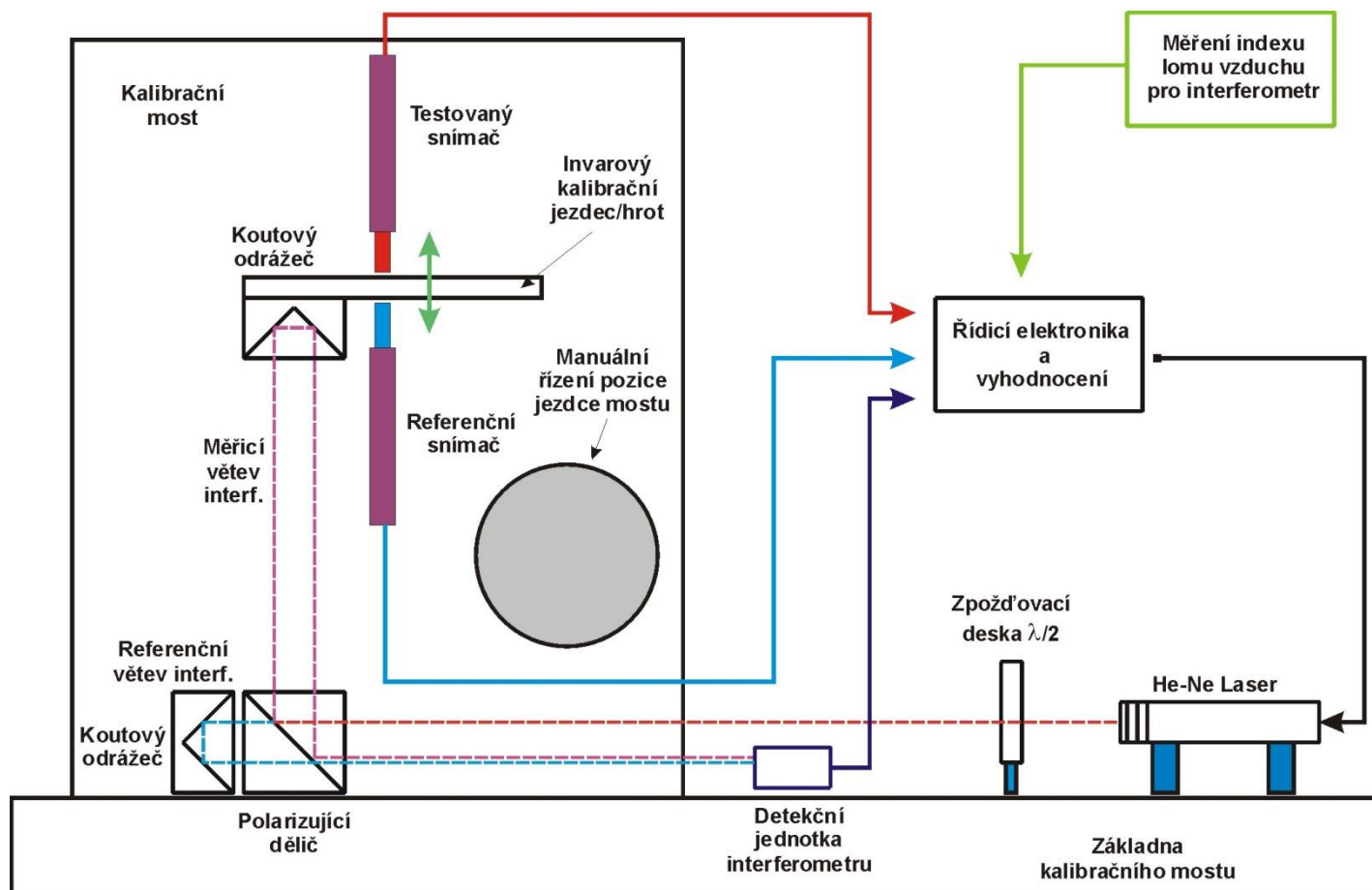
Nanokomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů

- Délkové komparátory
 - Slouží k převodu státních etalonů délky – stabilizovaných laserů na fyzickou geometrickou vzdálenost
 - Slouží **ke kalibraci délkových snímačů**:
 - indukčních
 - kapacitních
 - optoelektrických pravítek



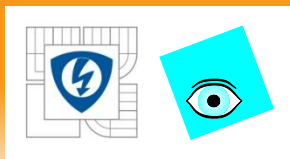
Nanokomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů

- Základní schéma komparátoru



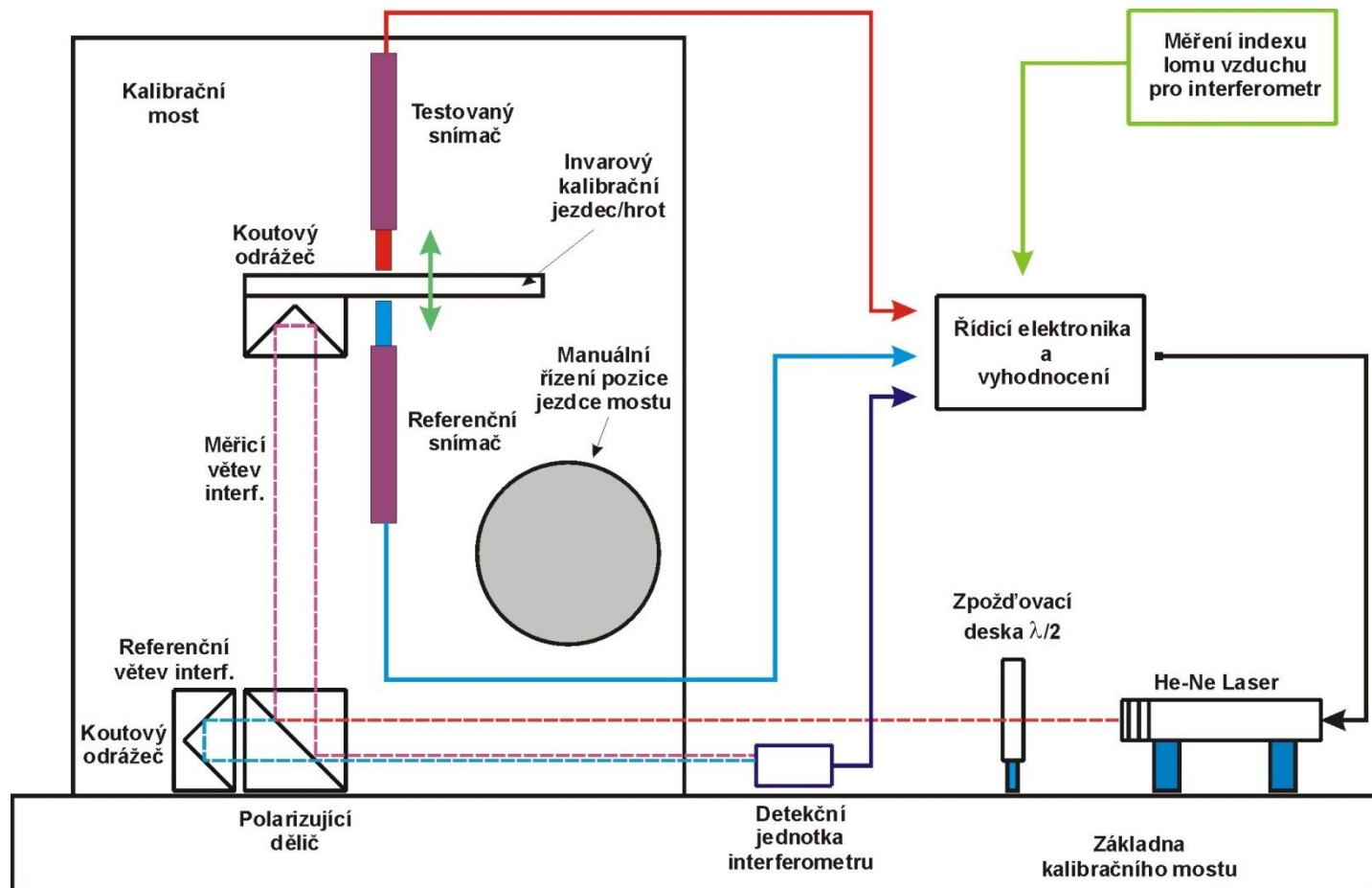
14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



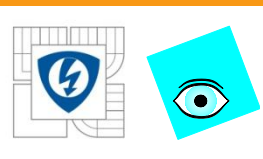
Nanokomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů

- Základní schéma komparátoru

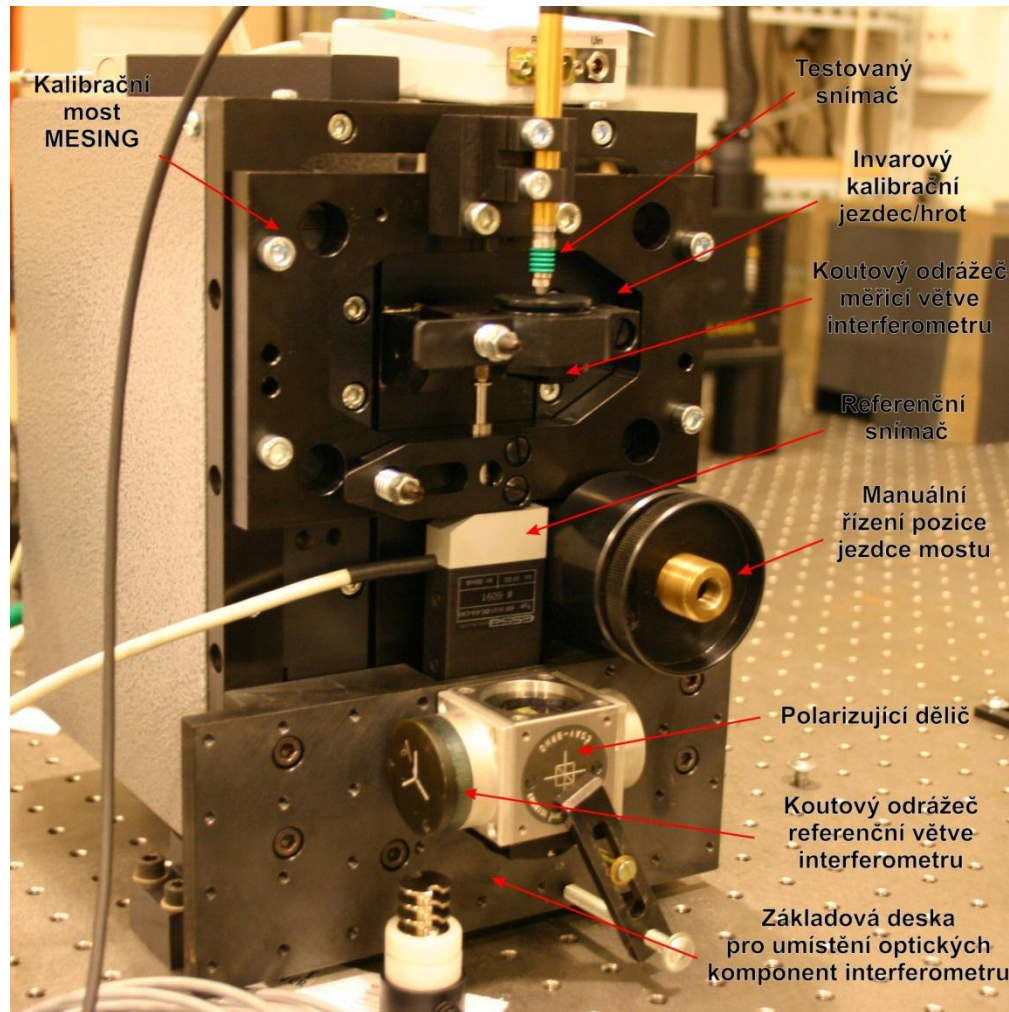


14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

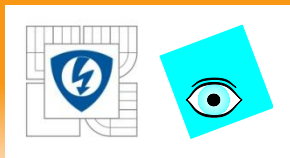


Nanokomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů



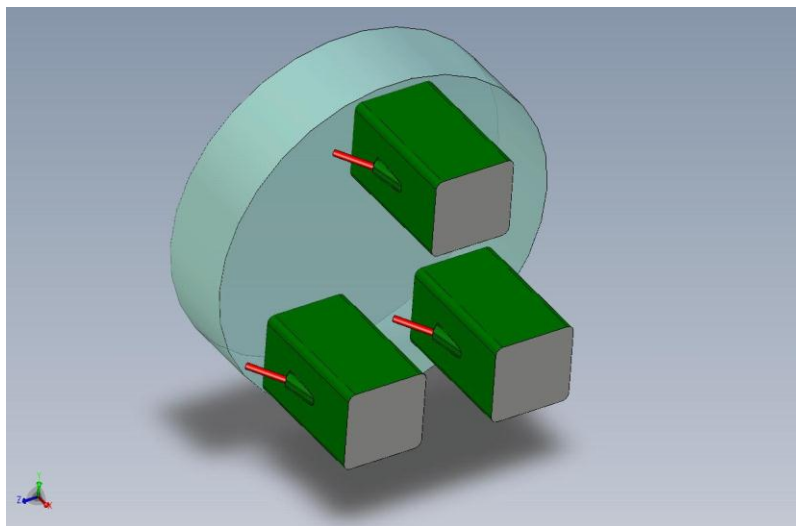
14.10.2011

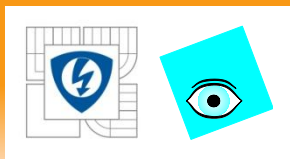
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Nanokomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů

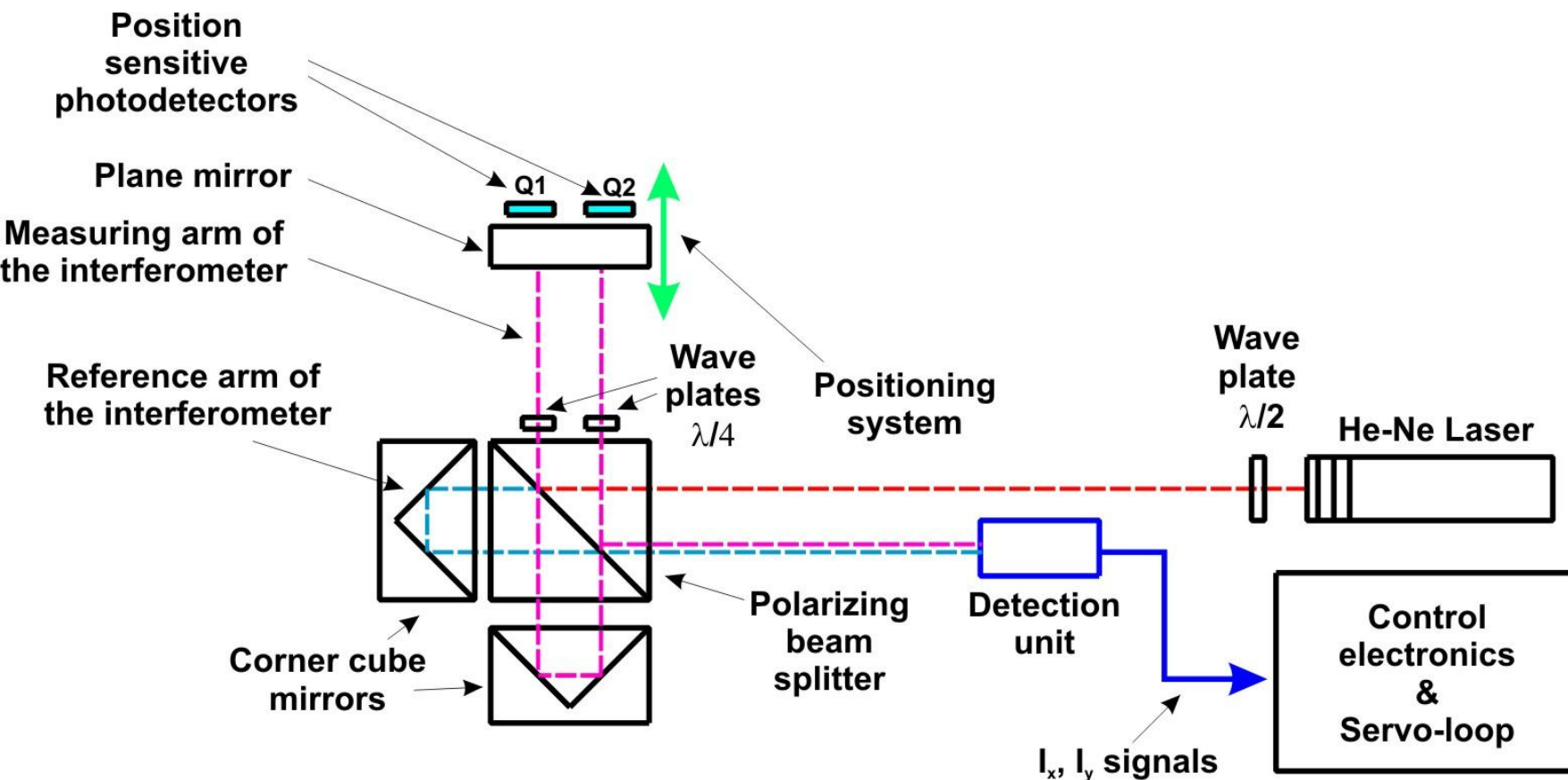
- U komparátorů je nezbytné dodržet:
 - Osa posuvu měřicího zrcadla musí být totožná s osou měřicího ramene interferometru
 - Je nezbytné kompenzovat chyby přímočarosti vedení zrcadla pomocí jemného naklápění

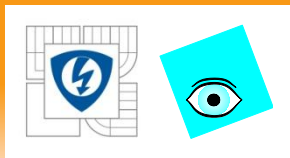




Nanokomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů

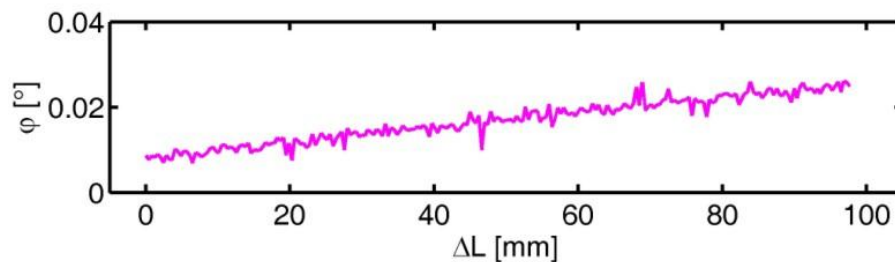
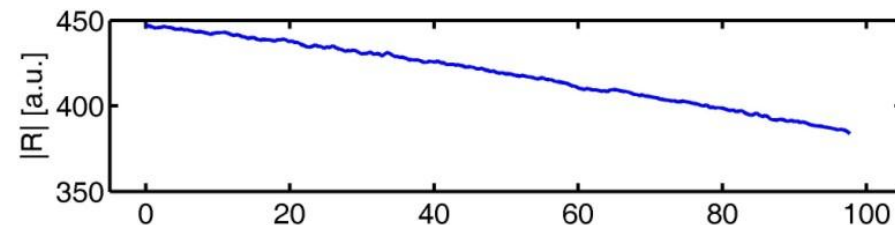
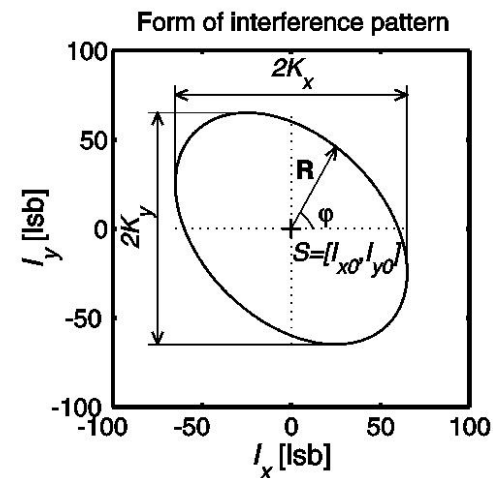
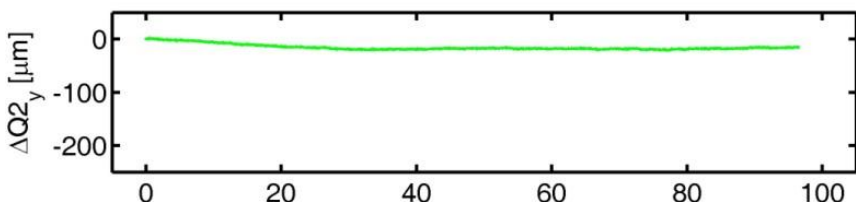
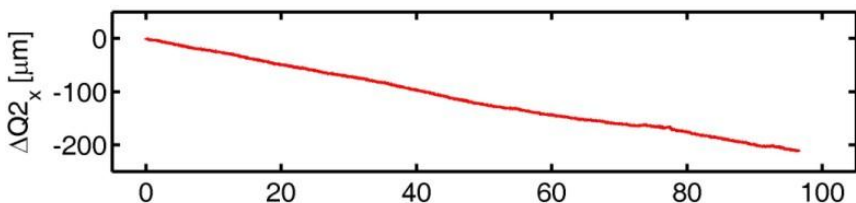
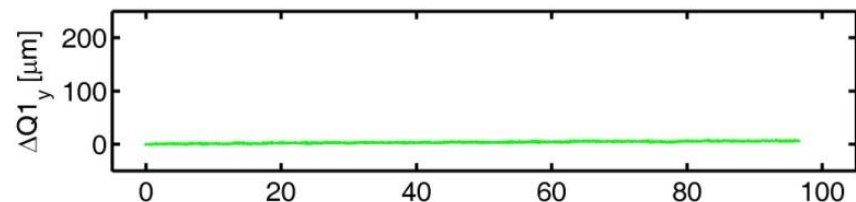
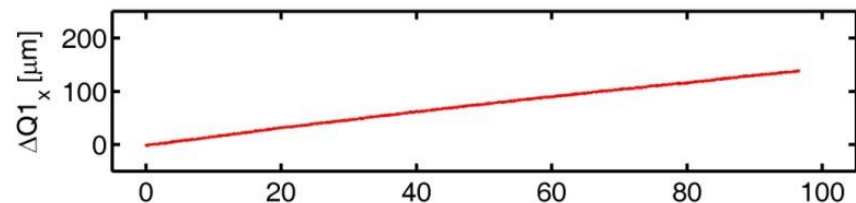
- Interferometr s dvojitým průchodem svazků

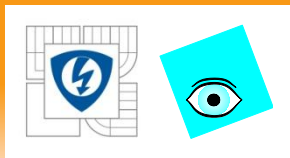




Nanokomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů

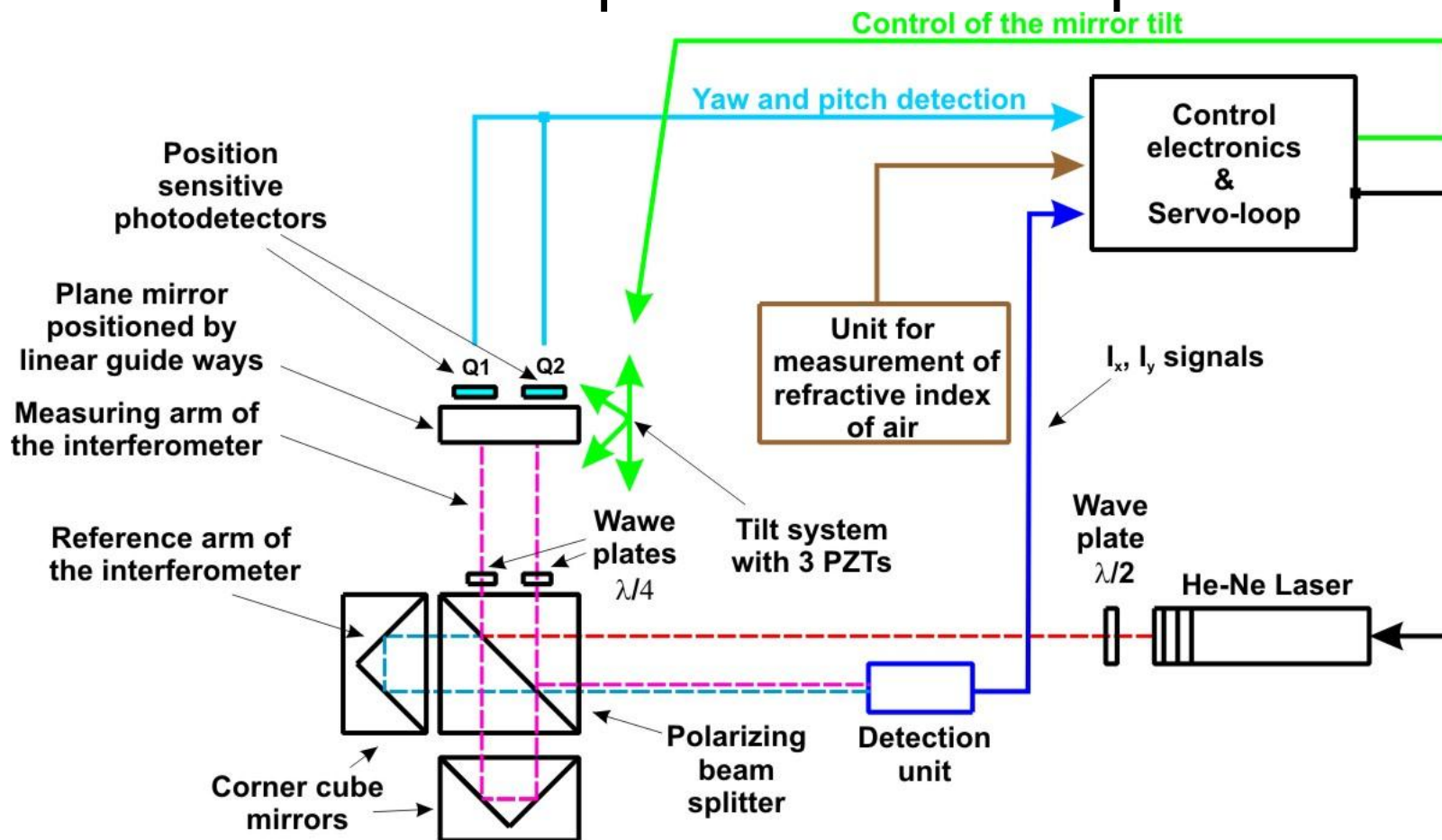
- Nesprávně nastavený interferometr

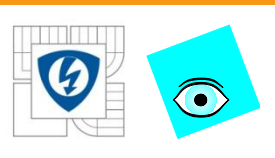




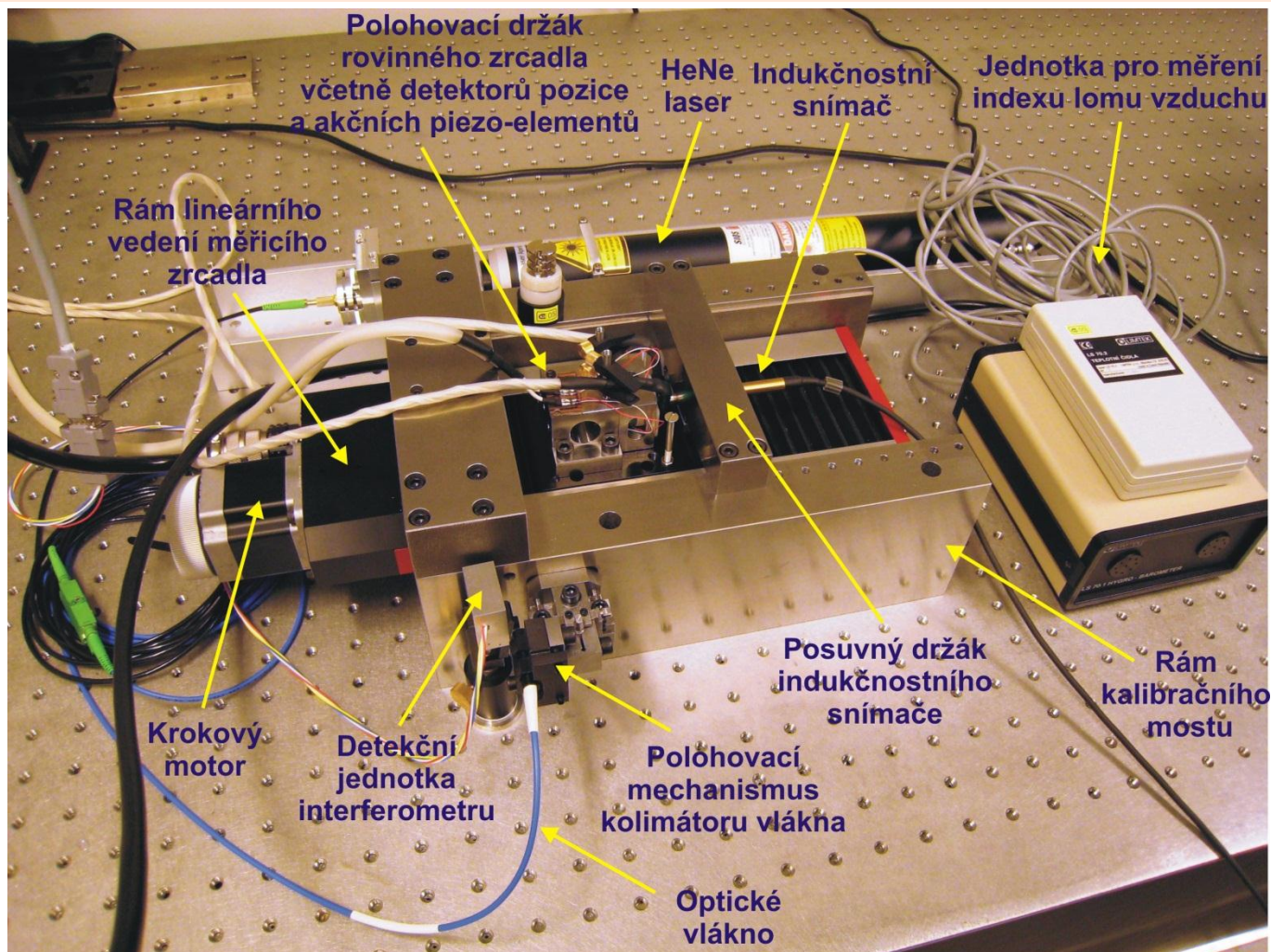
Nanokomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů

- Metoda řízení naklápění zrcadla ve zpětné vazbě



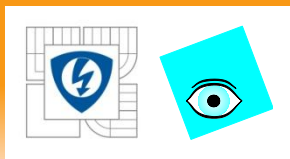


Nanokomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů – ukázka realizace



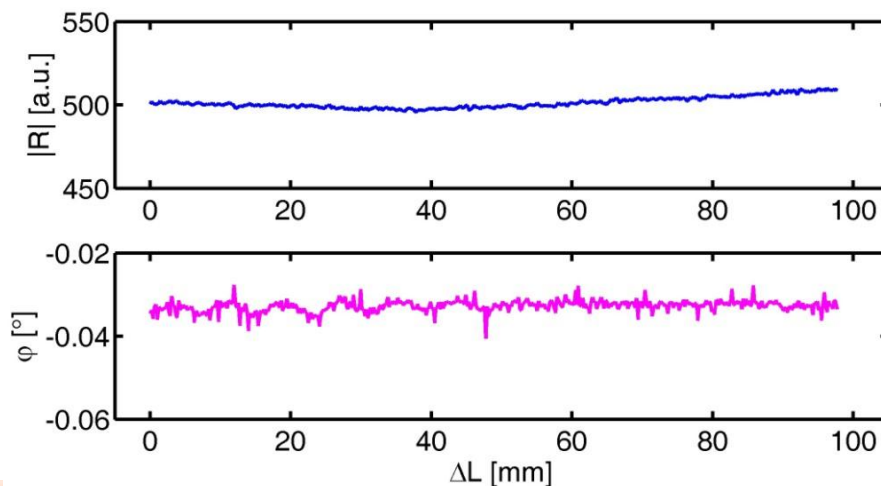
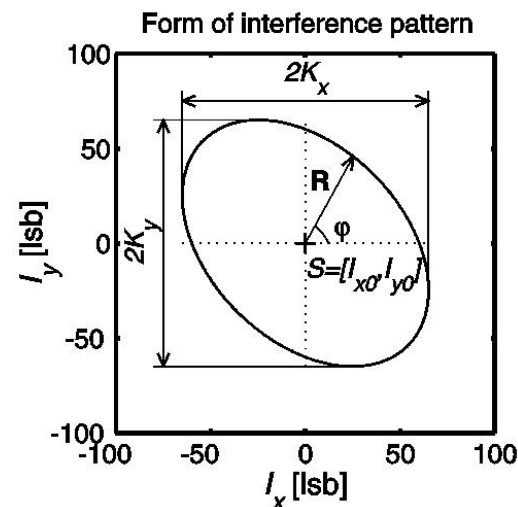
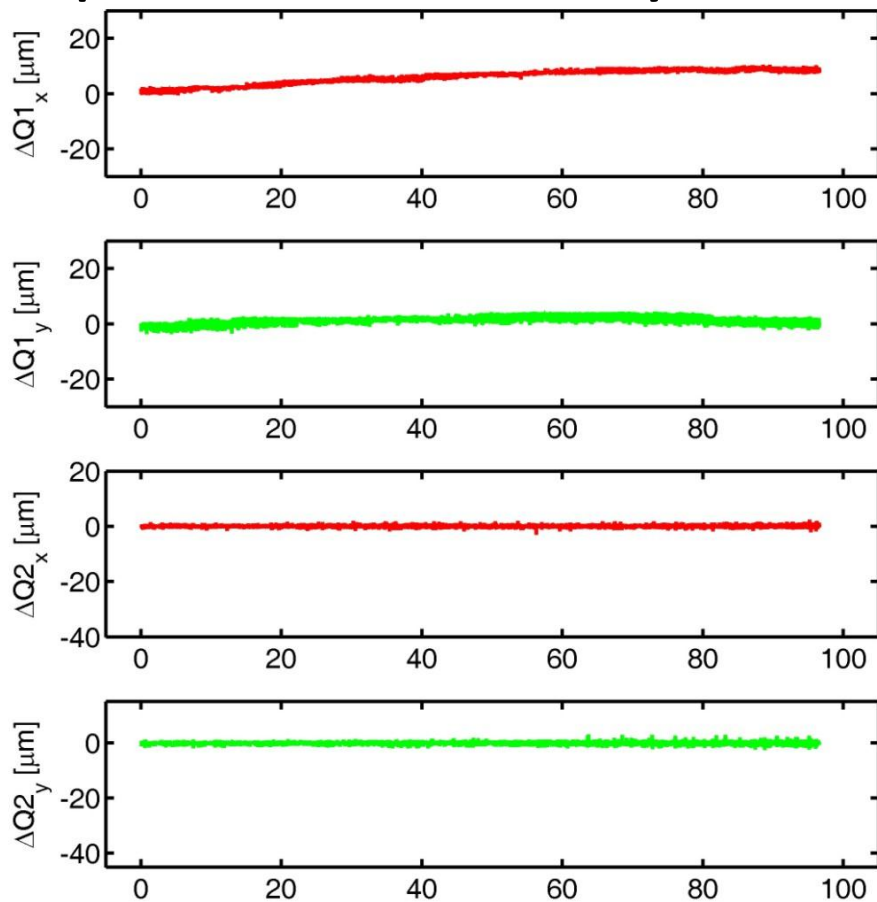
14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Nanokomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů - výsledek

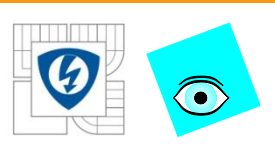
- Správně nastavený interferometr



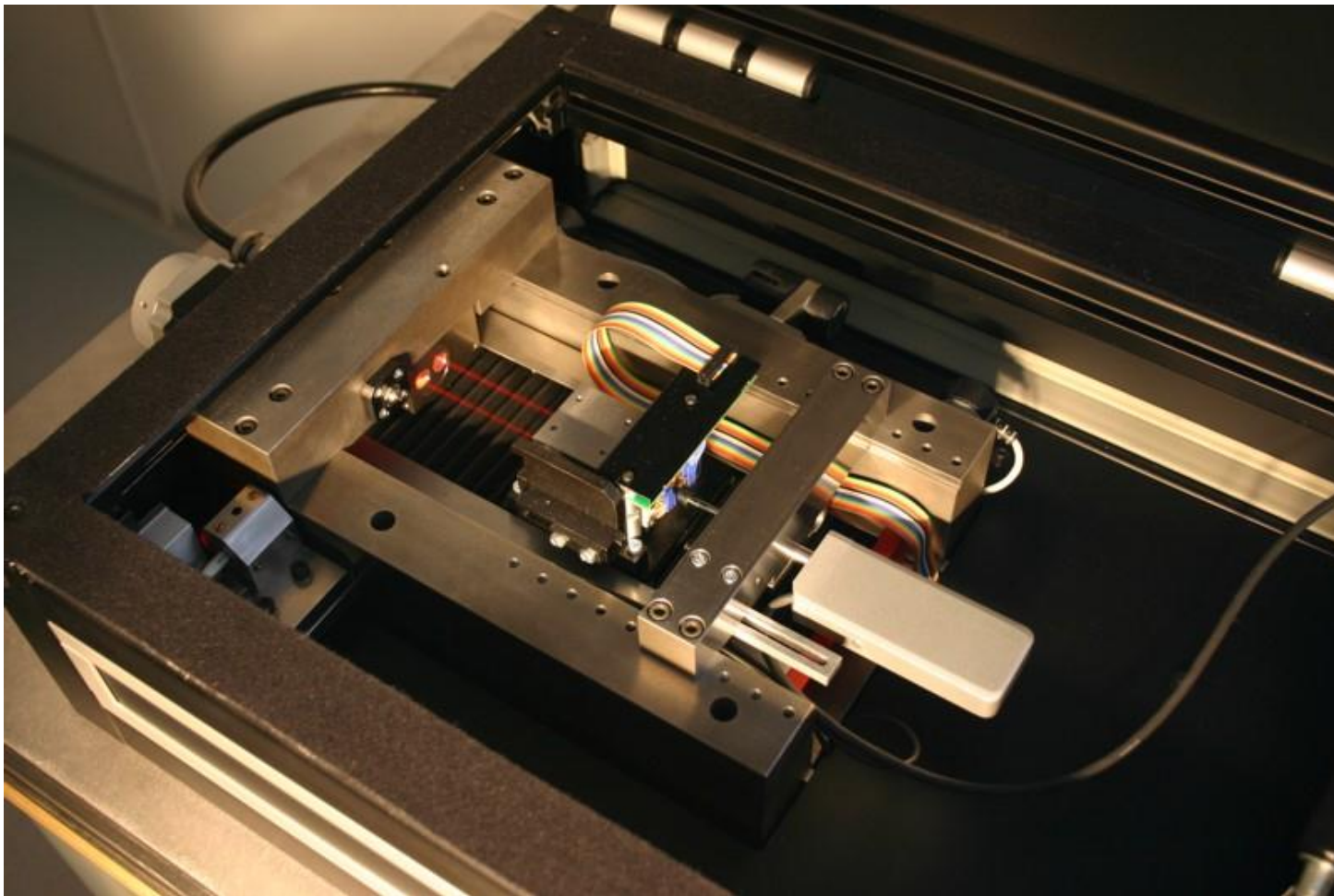
14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





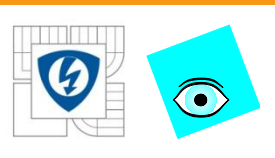
Nanokomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů - výsledek



14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





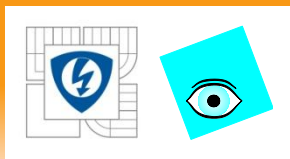
Nanokomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů - výsledek



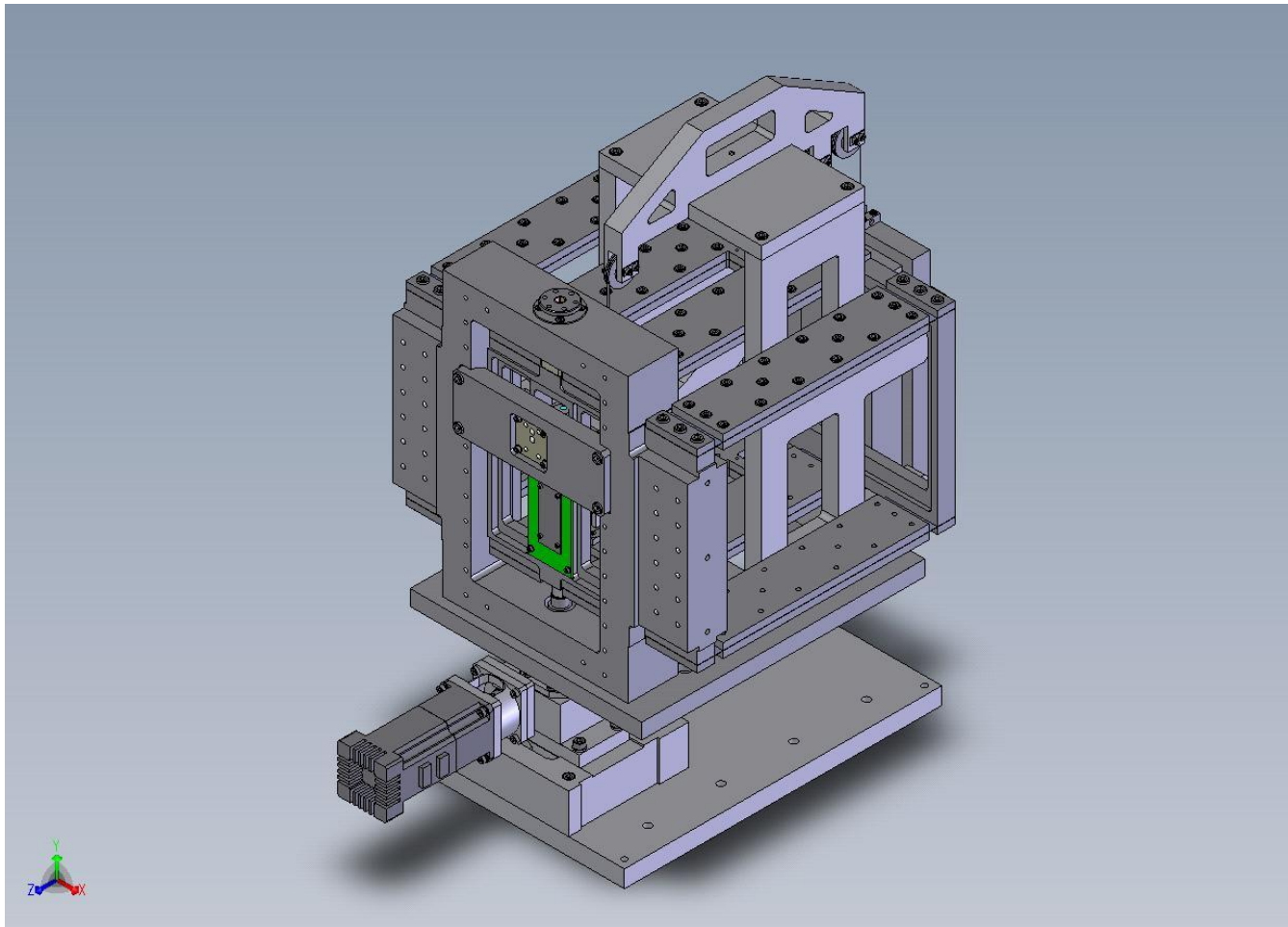
14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





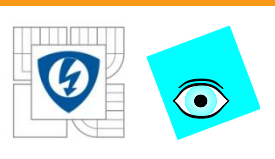
Nanokomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů – konstrukce II



14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Nanokomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů – konstrukce II

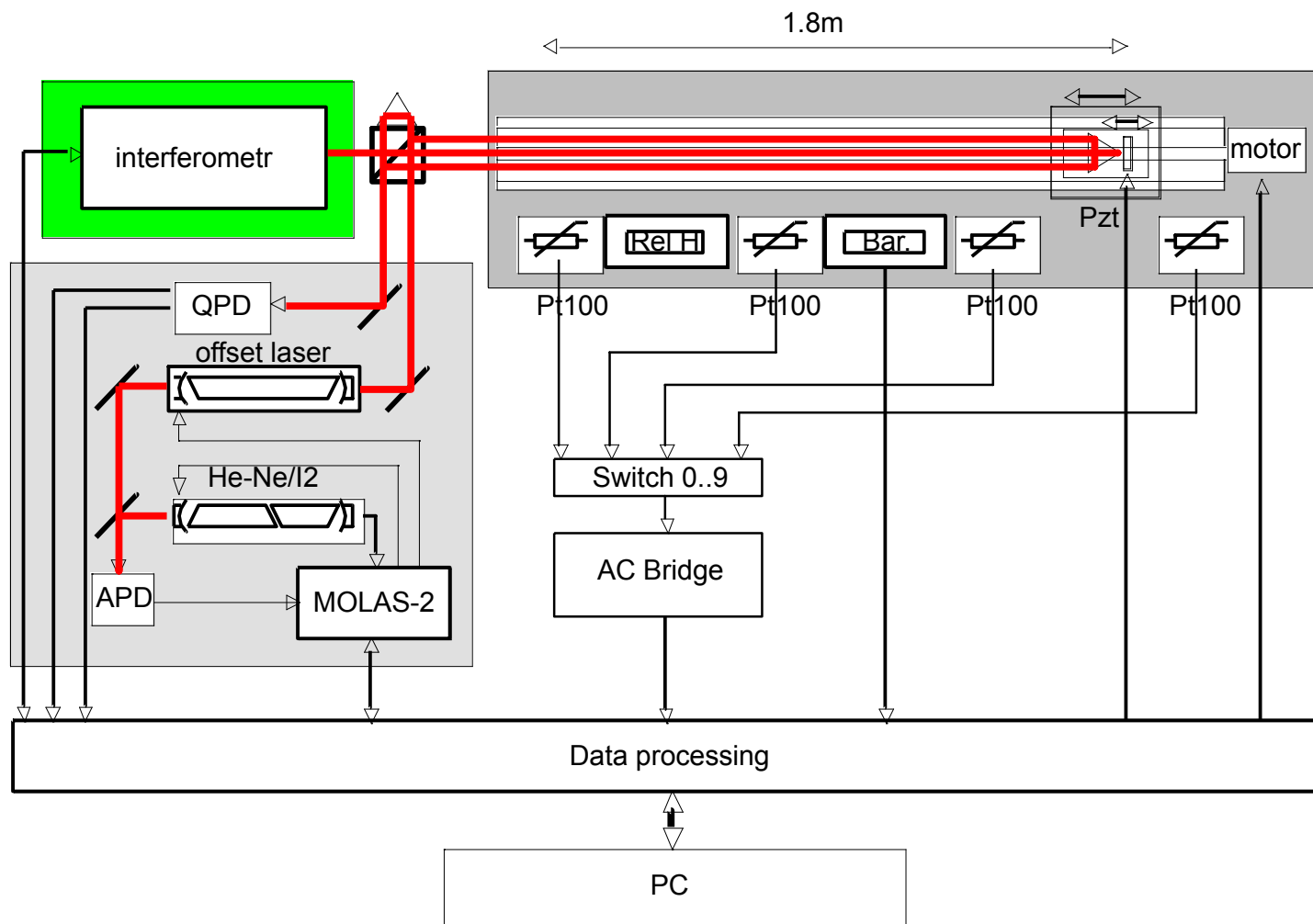


14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

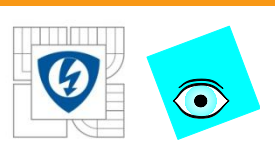


Nanokomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů – národní komparátor



14.10.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



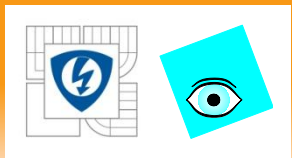
Nanokomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů – národní komparátor



14.10.2011

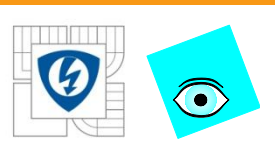
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



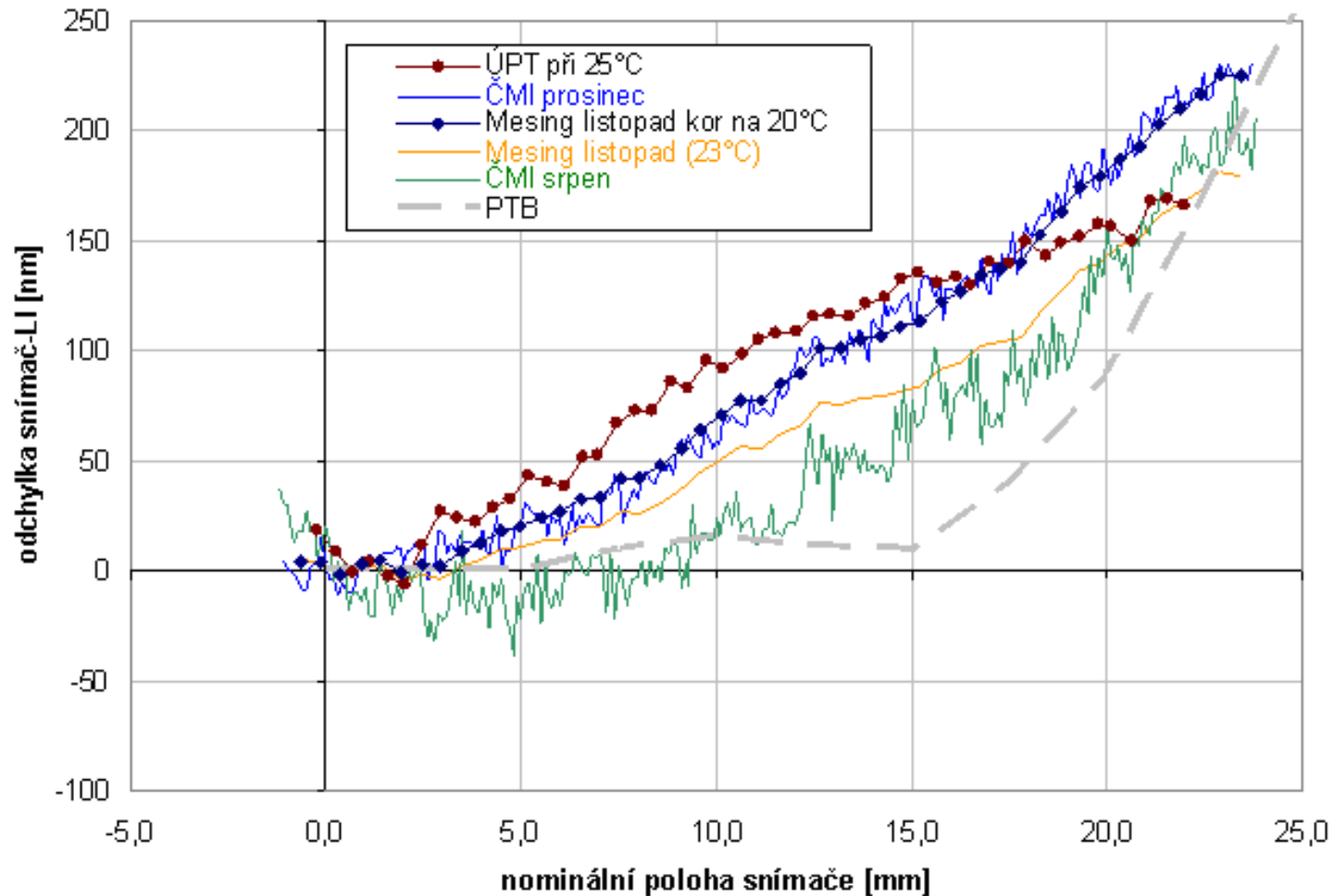


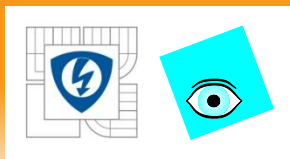
Nanokomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů

- Přesné komparátory se obtížně porovnávají mezi sebou, neboť každý využívá různý typ polohování měřicí sondy
 - Proto se používá k porovnání referenční snímač
 - V roce 2009 provedeno porovnání mezi :
 - Nanokomparátor MESING NK-1
 - Nanokomparátor ÚPT NK-1
 - Národní komparátor ČMI IK-1
 - Byl použit snímač **Heidenhain CT2581, rozlišení 2 nm, rozsah měření 25 mm**

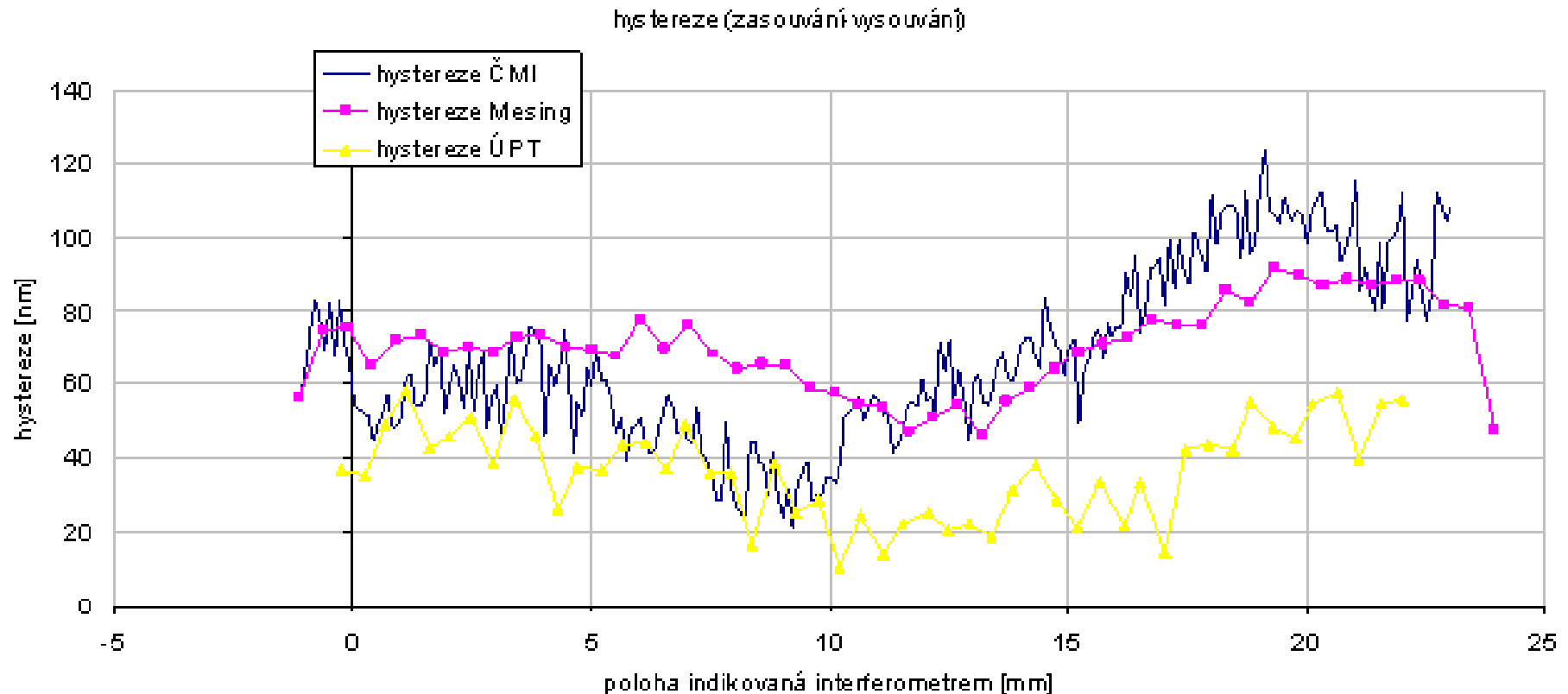


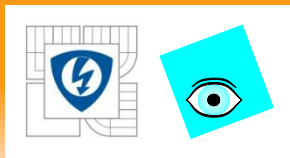
Nanokomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů – porovnání 2009





Nanokomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů – porovnání 2009



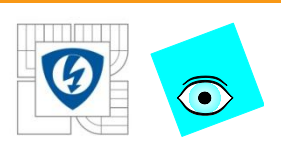


Nanokomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů – porovnání 2009

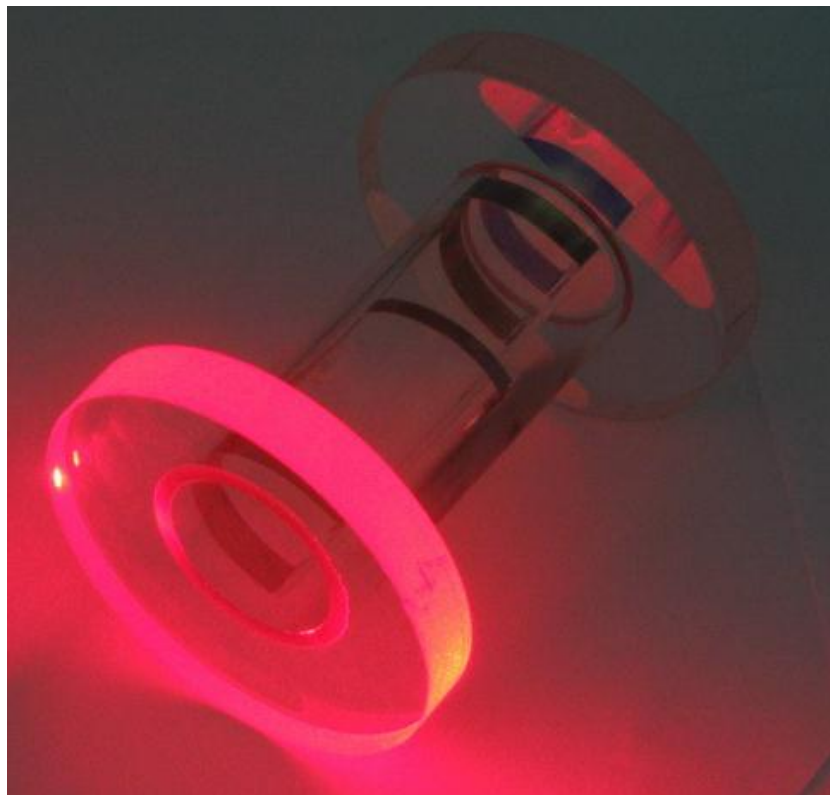
Interferometrický systém	nejistota poloze neúměrná (index lomu, čidla, atd.)	nejistota poloze úměrná (šum, linearita interf. a snímače, atd.)
ČMI	$U = Q(25) \text{ nm}$	$U = Q(2,6 \times L) \mu\text{m}$
ÚPT	$U = Q(15) \text{ nm}$	$U = Q(2,6 \times L) \mu\text{m}$
MESING	$U = Q(14) \text{ nm}$	$U = Q(2,5 \times L) \mu\text{m}$

Rozpočty nejistot :

- 2) Srovnávací měření snímače Heidenhain MT2581 na interferometrech MESING a ÚPT
- 5) Soustava laserových interferometrů pro nanometrologii délek – část ČMI 2009



Děkujeme za pozornost



Ondřej Číp
Zděnek Buchta

14.10.2011