



Ústav fyzikálního inženýrství  
Fakulta strojního inženýrství  
Vysoké učení technické v Brně

Disertační práce na téma

# Aplikace barevného vidění při studiu elastohydrodynamického mazání

Ing. Radek Poliščuk

# Cíle disertační práce

- Vývoj kolorimetrické metody pro vyhodnocování chromatických interferogramů elastohydrodynamicky (EHD) mazaných kontaktů:
  - ▶ Rozbor přístupů k problematice EHD mazání a k interpretaci barev;
  - ▶ Výběr barevného prostoru a vhodné diferenční formule;
  - ▶ Softwarová implementace metody;
  - ▶ Ověření metody a její aplikace při výzkumu tenkých mazacích filmů.

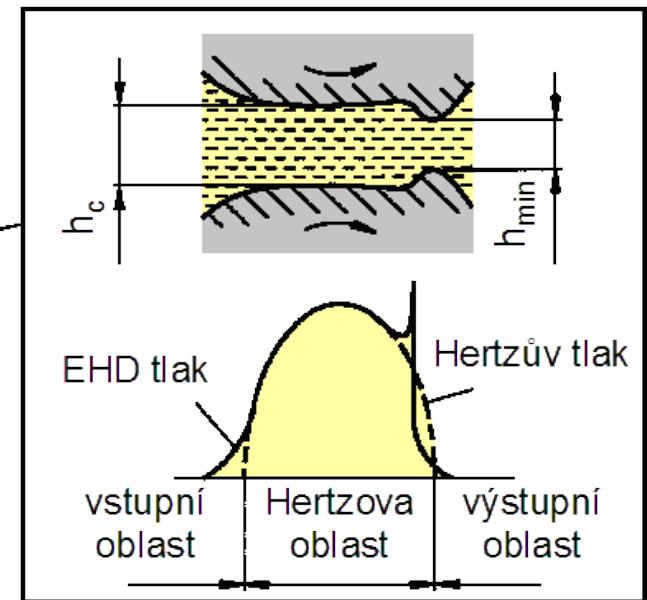
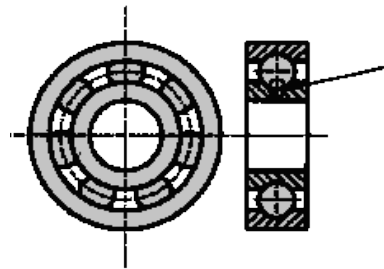
# Použitý aparát a vybavení

- **Experimentální vybavení:**
  - ▶ Simulátor EHD kontaktu („tribometr“);
  - ▶ Mikroskopový zobrazovací systém.
- **Interferometrie:**
  - ▶ Vícesvazková interference na tenké vrstvě;
  - ▶ Interferometrie v bílém světle.
- **Kolorimetrie:**
  - ▶ Vyhodnocování barev metodami barevného vidění;
  - ▶ Barevné diferenční formule pro identifikaci tloušťky vrstvy.



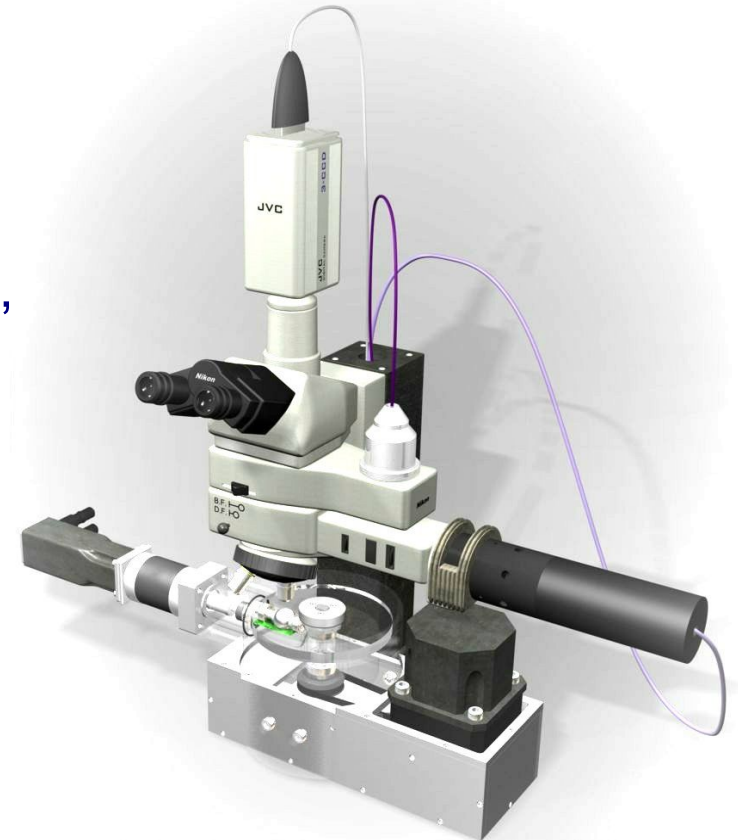
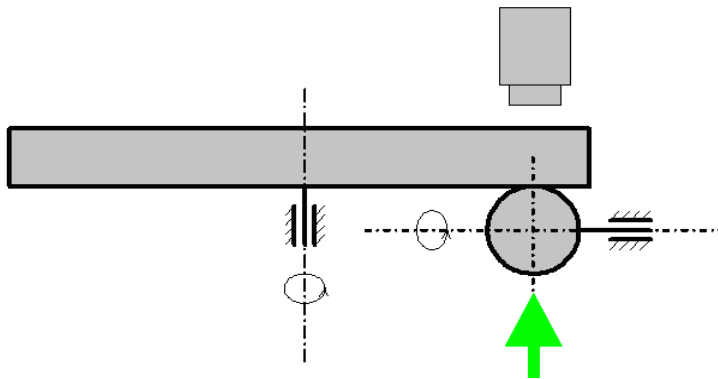
# Elastohydrodynamické mazání

- Velká část tribologických soustav pracuje v podmínkách částečného nebo úplného EHD mazání.
- Třecí povrchy odděluje velmi tenký mazací film, o tloušťkách menších než 50 nm.
- Schopnost maziva vytvářet účinný mazací film za těchto podmínek je rozhodující pro správnou funkci takovýchto soustav.



# Experimentální model

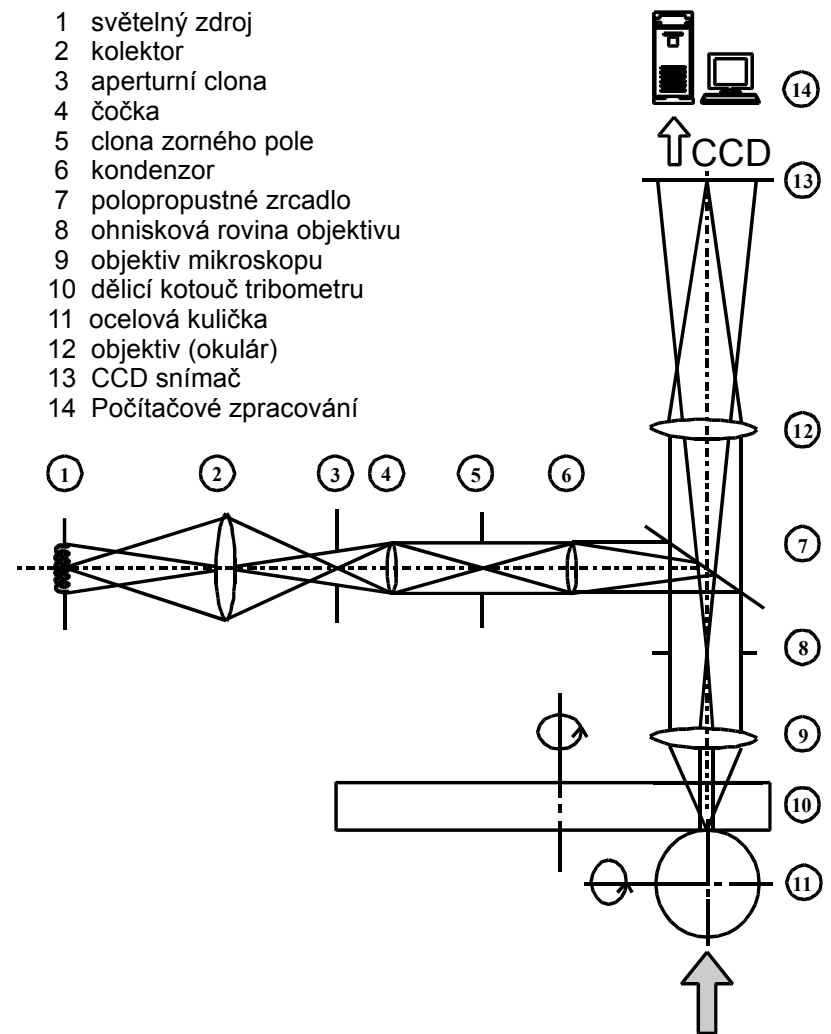
- Z řady experimentálních metod studia jevů v kontaktní oblasti bývá nejčastěji využívána simulace na principu optického **tribometru**.
- Zařízení sestává ze dvou kontaktních ploch, z nichž jedna je transparentní a umožňuje „nahlédnutí“ do zkoumané oblasti.



- Velikost kontaktní plochy je cca  $0,3 \text{ mm}^2$  => nutno použít **mikroskop**.

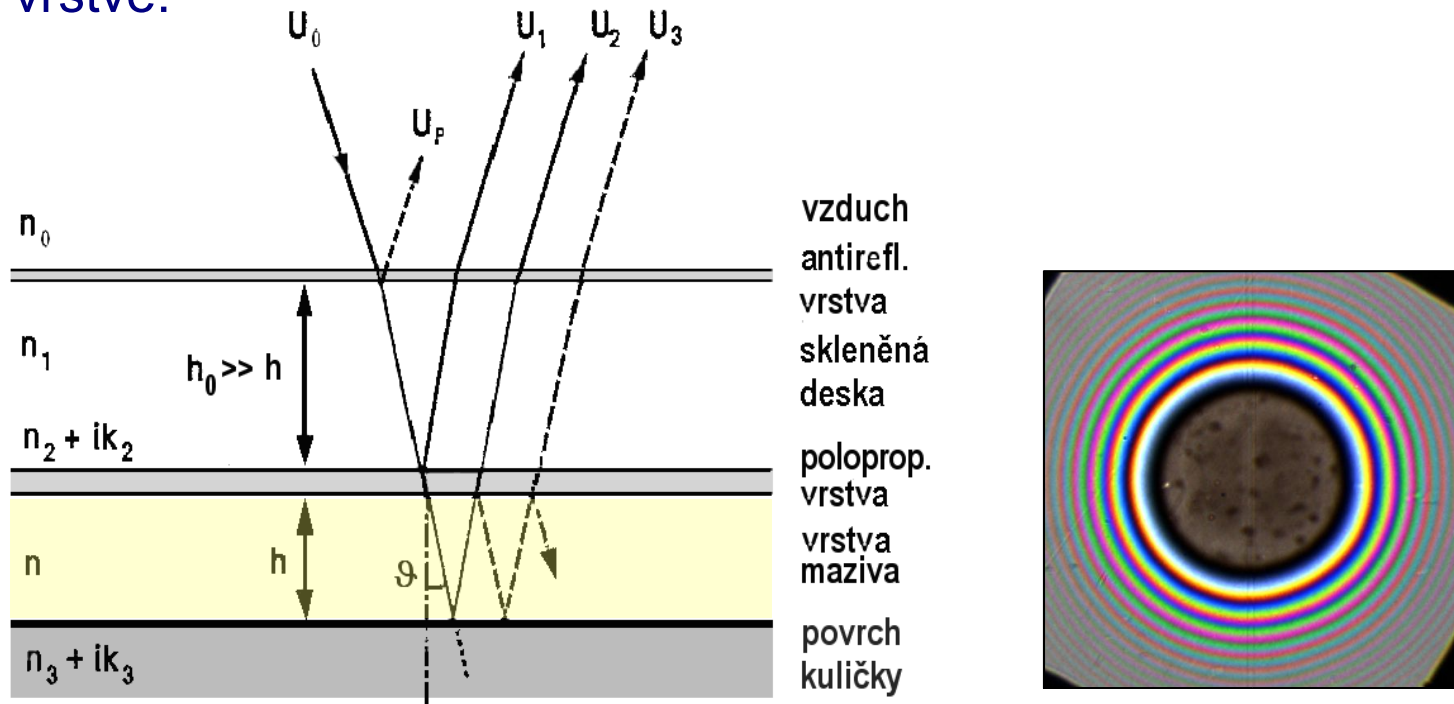
# Mikroskopový zobrazovací systém

- Průmyslový mikroskop pro pozorování obrazu v odraženém světle,
- stabilizovaný zdroj bílého světla (D65),
- tříčipová CCD kamera (PAL, SXGA),
- počítačové vybavení pro záznam a zpracování získaných interferogramů v reálném čase.



# Vícesvazková interference

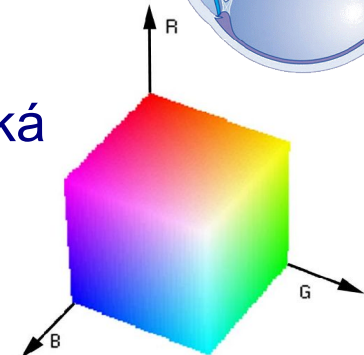
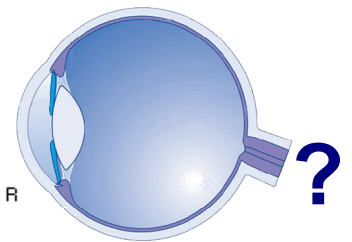
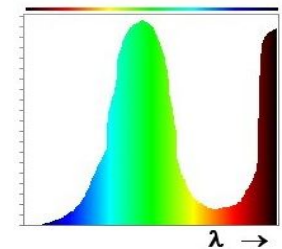
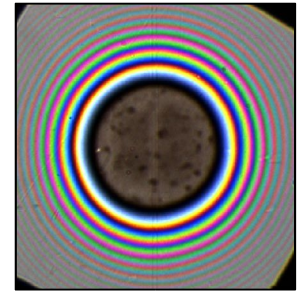
- Na mazacím filmu v tribometru dochází k vícesvazkové interferenci na tenké vrstvě:



- ▶ V odraženém světle jsou viditelné proužky stejné tloušťky (Fizeauovy proužky).

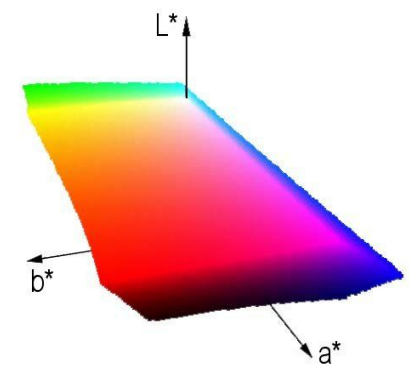
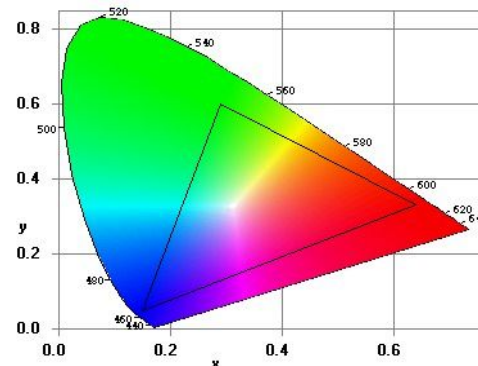
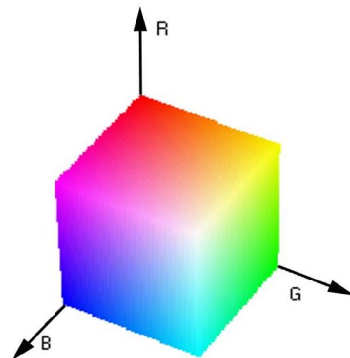
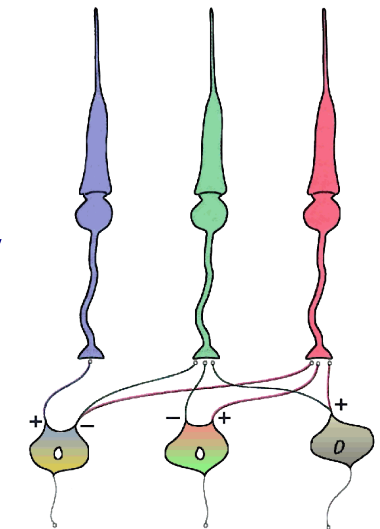
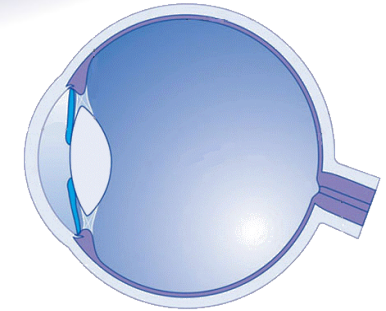
# Chromatické interferogramy

- **Barva** proužků v chromatickém interferogramu je dána spektrálním složením pozorovaného světla;
- Pozorované spektrum je při experimentu ovlivněno superpozicí intenzit všech sledovaných vlnových délek a tedy i lokální **optickou tloušťkou vrstvy**.
- Při zpětném určování této tloušťky je proto možné použít:
  - ▶ Spektrální složení (omezeno na bodová nebo liniová měření);
  - ▶ **Porovnávání barev „vzorek - etalon“:**
    - ▶ Subjektivní: lidské oko, vjem pozorovatele;
    - ▶ Objektivní: 3-kanálová energetická/fotometrická veličina, odvozená od spektrálního složení.



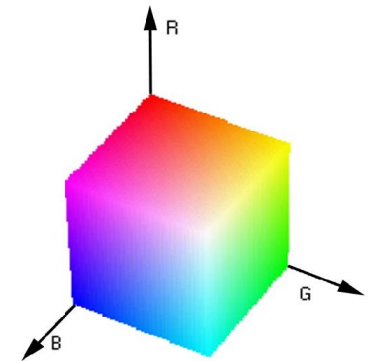
# Barevné vidění

- **Lidské oko** barevný obraz fyziologicky transformuje v čípcích (denní, fotonické vidění) a tyčinkách (šero). Trichromatický signál je pak překódován do jedné jasové a dvou barvonosných složek a předán do mozku.
- **Umělé barevné vidění** napodobuje lidské oko trojicemi fotosenzorů pro rozdílné vlnové délky (obvykle RGB), jejichž signál je matematicky převoditelný do obdobné charakteristiky jakou má jeho přírodní vzor („standardní pozorovatel“).



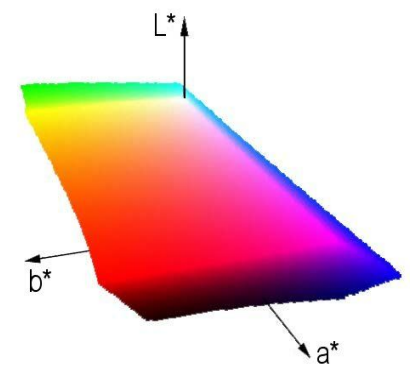
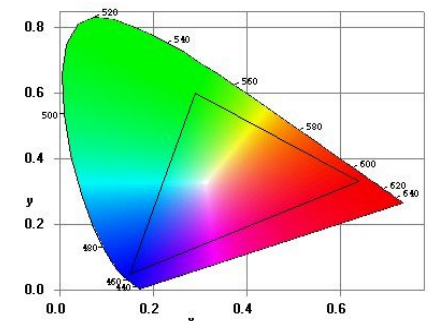
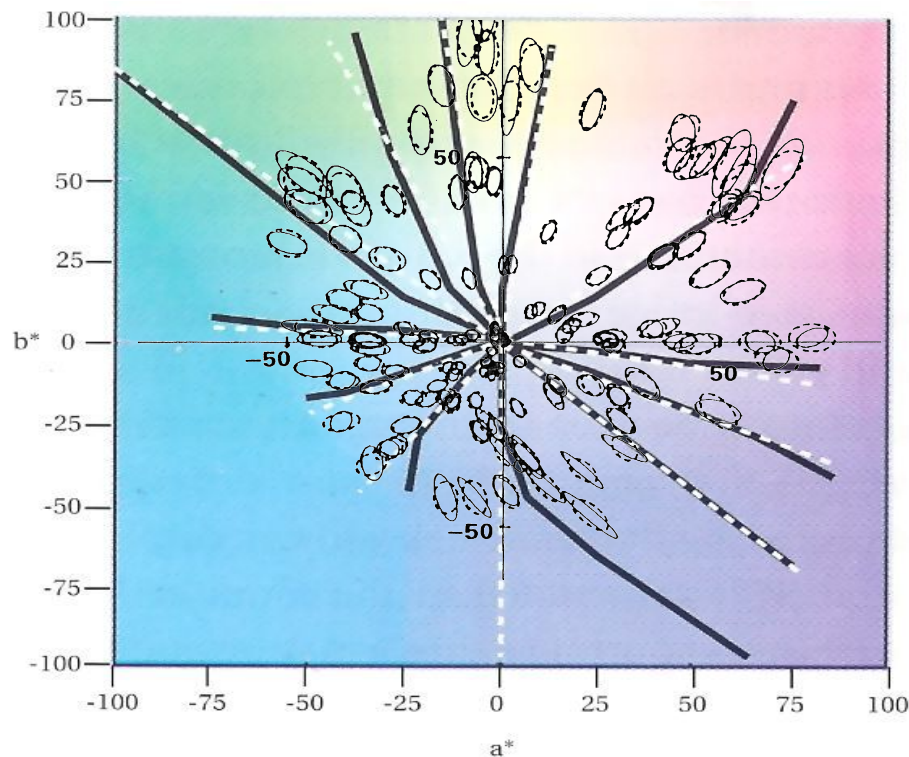
# Barevné prostory

- Kolorimetrický aparát **CIE** definuje
  - ▶ standardních iluminantů (A-F),
  - ▶ standardního pozorovatele a jemu odpovídající barevné prostory (CIE XYZ, CIE LAB, CIE LUV, CIE LCH).



- Používané barevné diferenční formule:

- ▶ CIE1976,
- ▶ CIE94,
- ▶ CMC(*l:c*),
- ▶ BFD(*l:c*),...



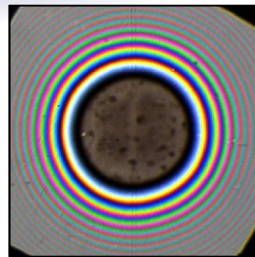
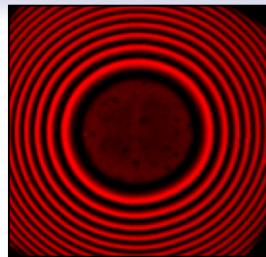
# Kolorimetrická interferometrie

(TFCI, Thin Film Colorimetric Interferometry)

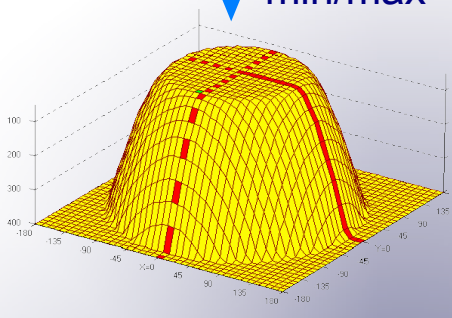
## Kalibrace:

$\lambda = 633 \text{ nm}$

bílé světlo

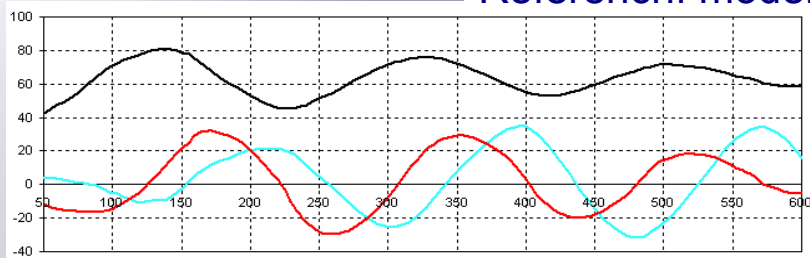


detekce  
min/max



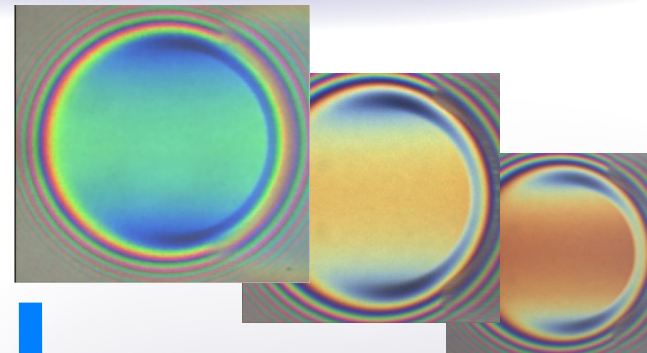
statistická  
analýza

Referenční model



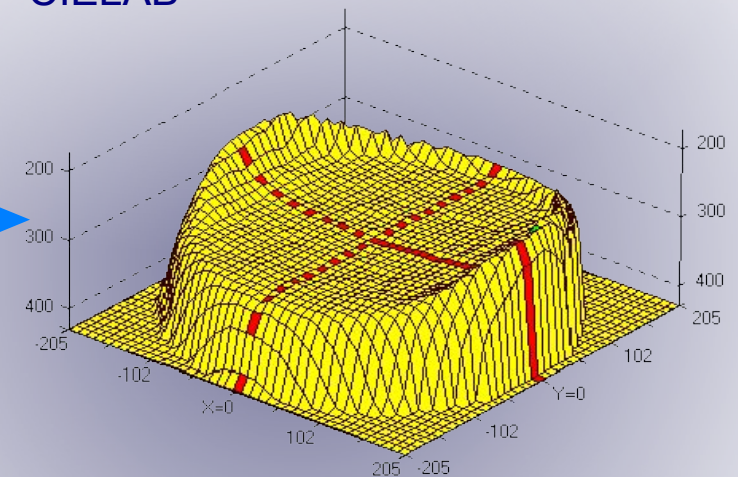
## Vyhodnocování:

zkoumané chromatické interferogramy



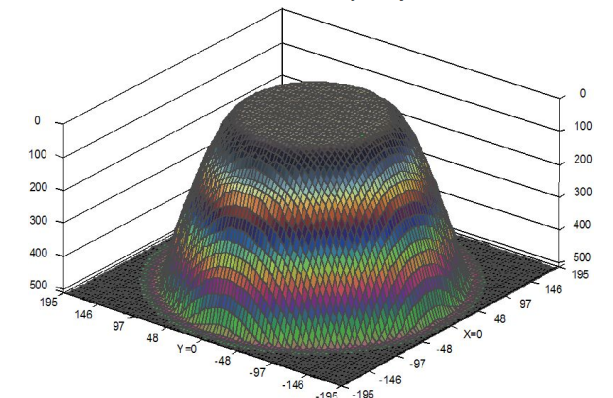
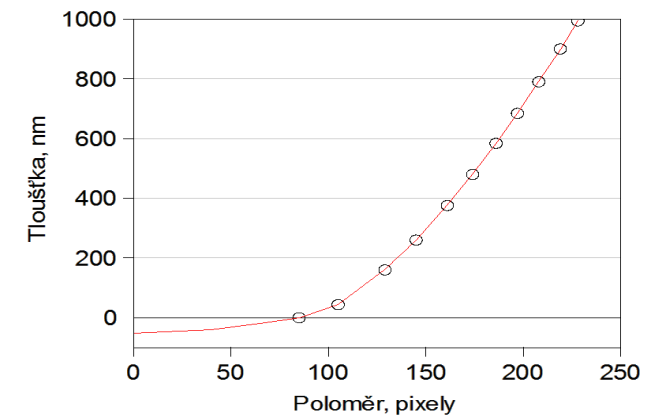
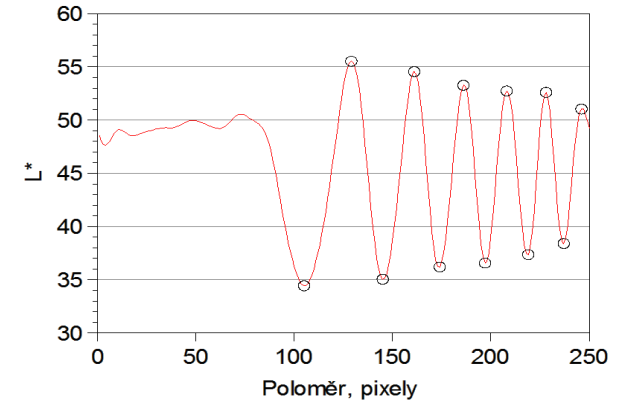
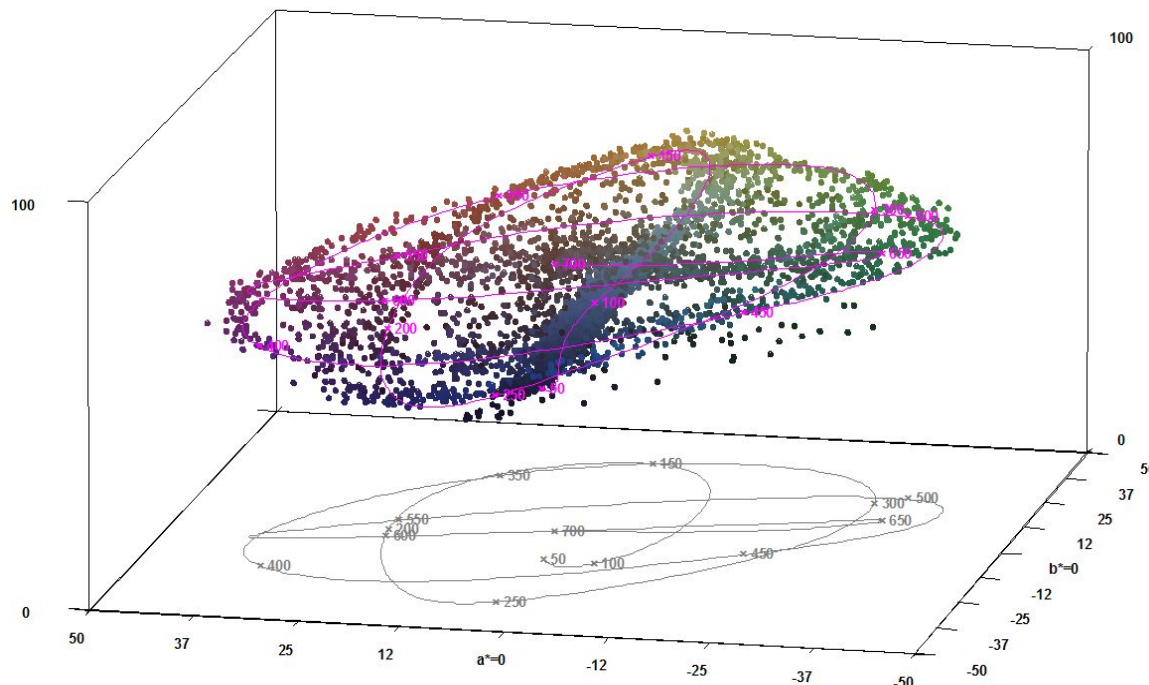
konverze  
RGB - CIELAB

Heuristická  
identifikace



# Vytvoření etalonu: Kalibrace

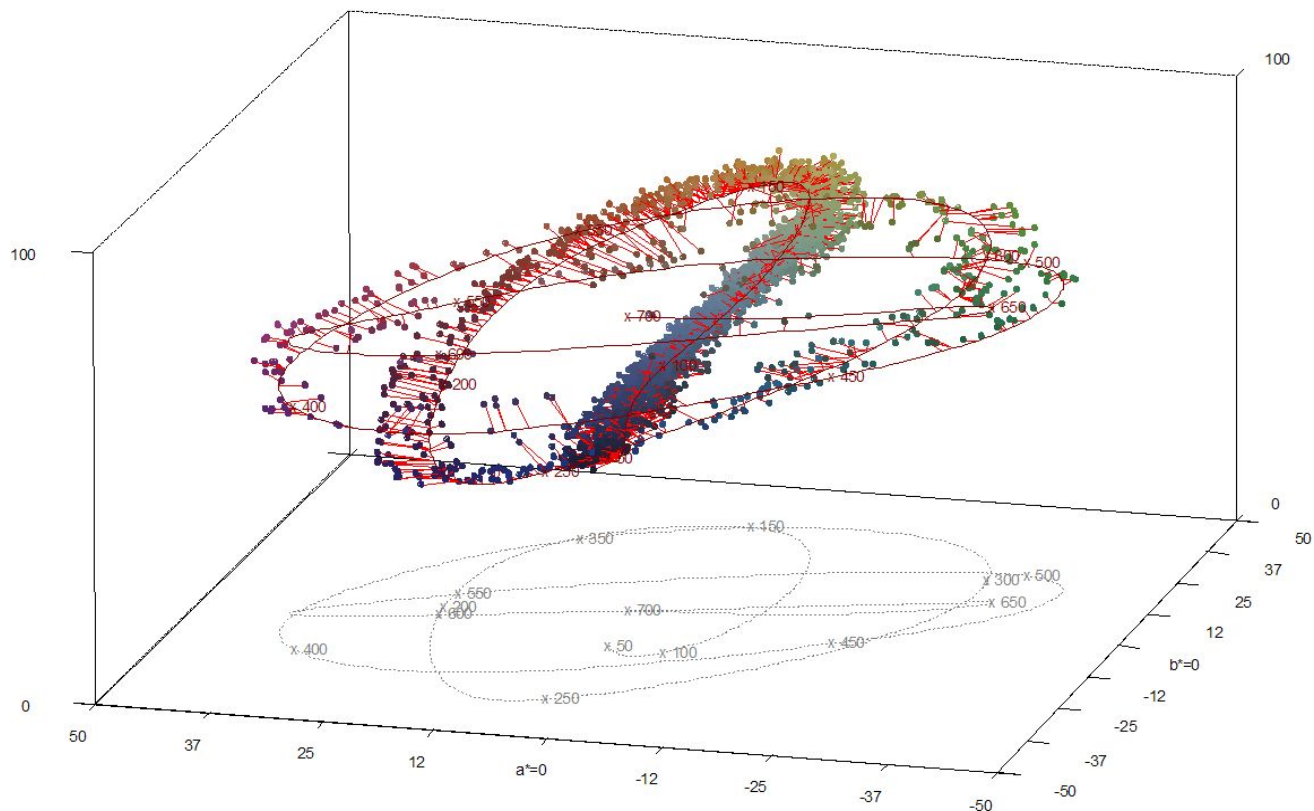
- Statistická forma etalonu byla zvolena z důvodu obtížné definice parametrů analytického tvaru funkce **Barva(tloušťka)**.
- ▶ Etalon je tabulka typických hodnot (nebo trojice Fourierových řad) v prostoru CIELAB, určených z barev a tvaru objektu se známou geometrií.



# Porovnávání vzorek-etalon

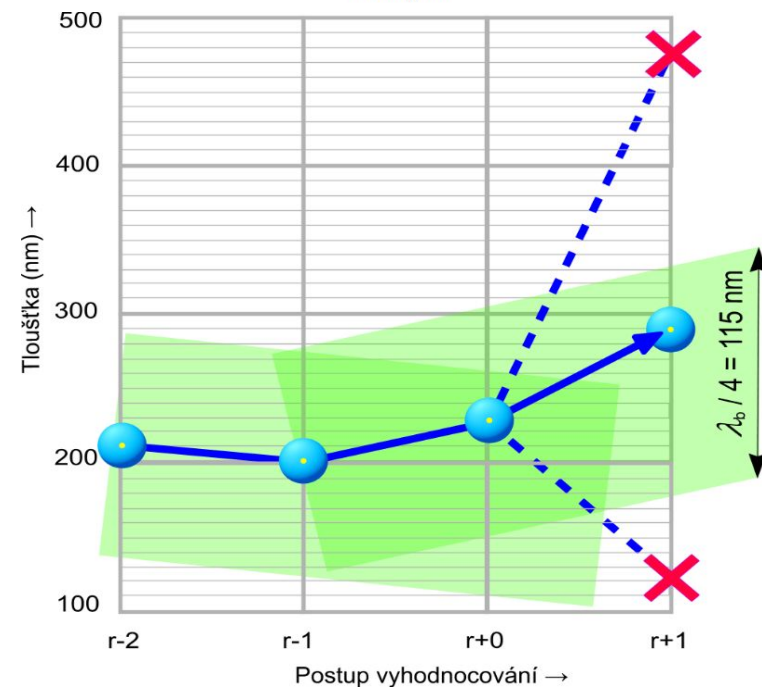
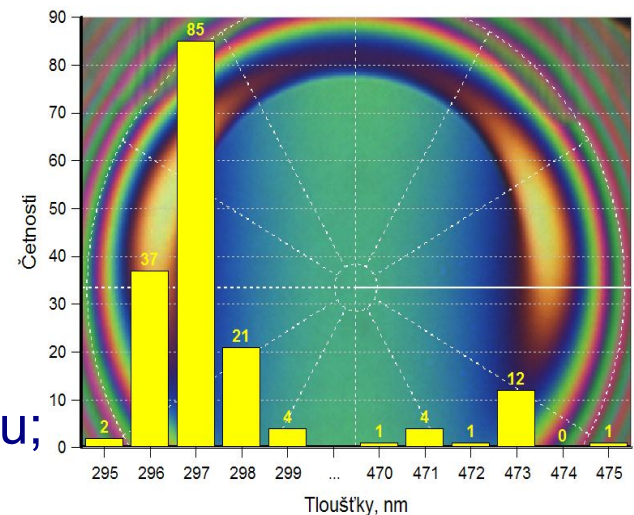
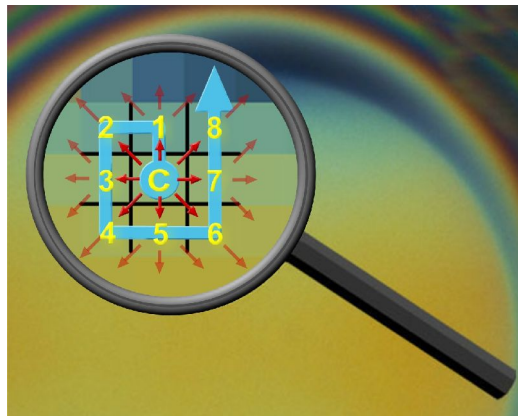
- Barvy v obrazových bodech vzorku jsou zvolenou diferenční formulí dvoustupňově porovnávány s etalonem.
- Za hodnotu tloušťky je považován index nejbližšího nalezeného záznamu.

Thickness	L*	a*	b*
141	80,34	-3,71	23,82
142	80,18	-3,32	24,37
143	80	-2,91	24,89
144	79,79	-2,49	25,39
145	79,56	-2,06	25,86
146	79,31	-1,62	26,31
147	79,04	-1,16	26,73
148	78,74	-0,69	27,12
149	78,43	-0,21	27,48
150	78,1	0,28	27,81
151	77,75	0,79	28,11
152	77,38	1,3	28,38
153	77	1,83	28,61
154	76,61	2,37	28,82
155	76,2	2,91	28,98
156	75,78	3,46	29,12
157	75,35	4,02	29,21
158	74,91	4,59	29,28

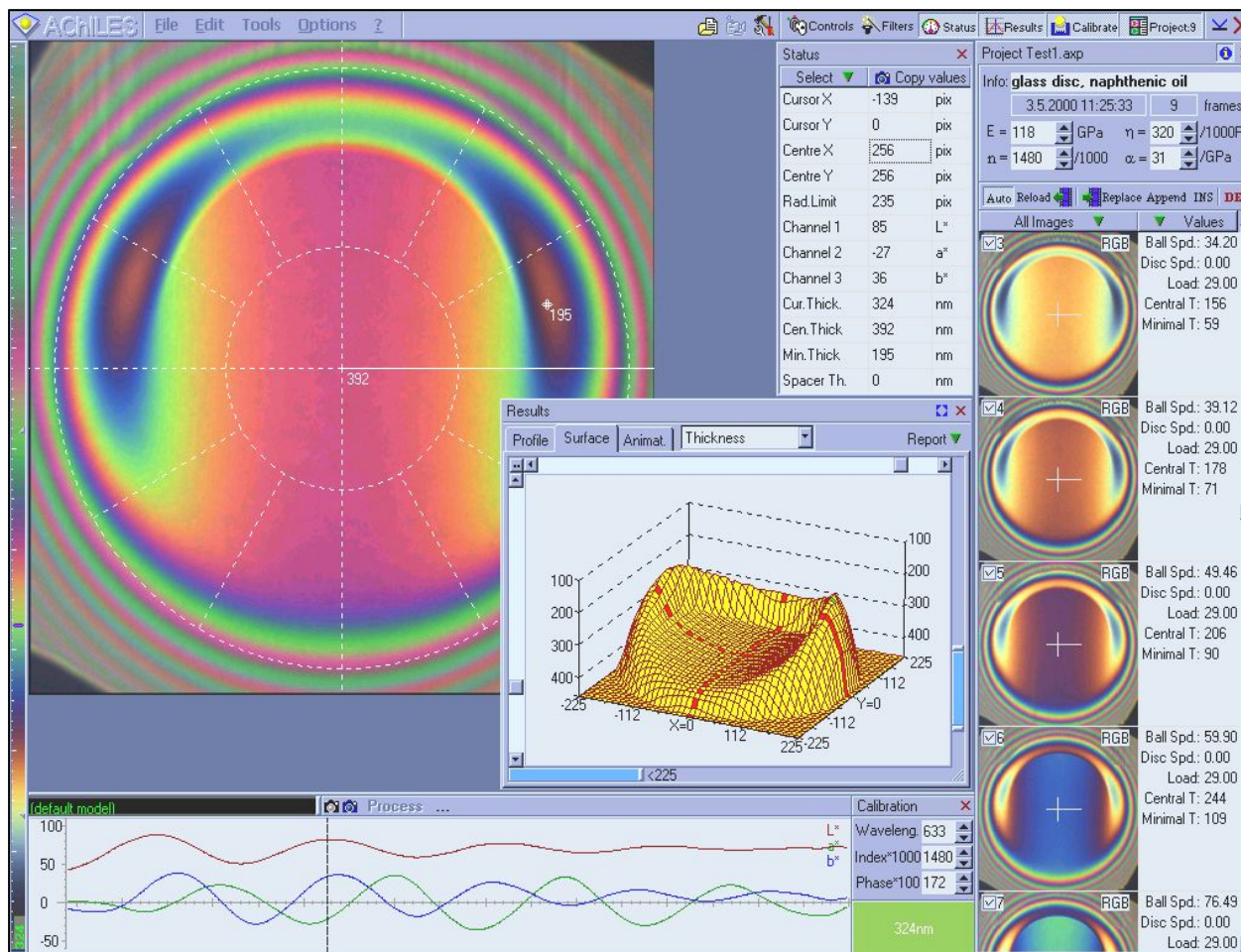


# Spojité vyhodnocování

- Přiřazení **Barva + Šum** → **tloušťka**  
není vždy jednoznačné ⇒ kontrola spojitosti.
  - ▶ Výchozí interval hodnoty tloušťky je určován v centrální oblasti interferogramu (tloušťka u EHD filmů je zde vždy spojitá) pomocí mediánu při plném rozsahu etalonu;
  - ▶ V dalších obrazových bodech je spojitost povrchu hlídána kontrolou gradientu;
  - ▶ Postup procházení obrazu a kontroly spojitosti je optimalizován (real time).



# Software



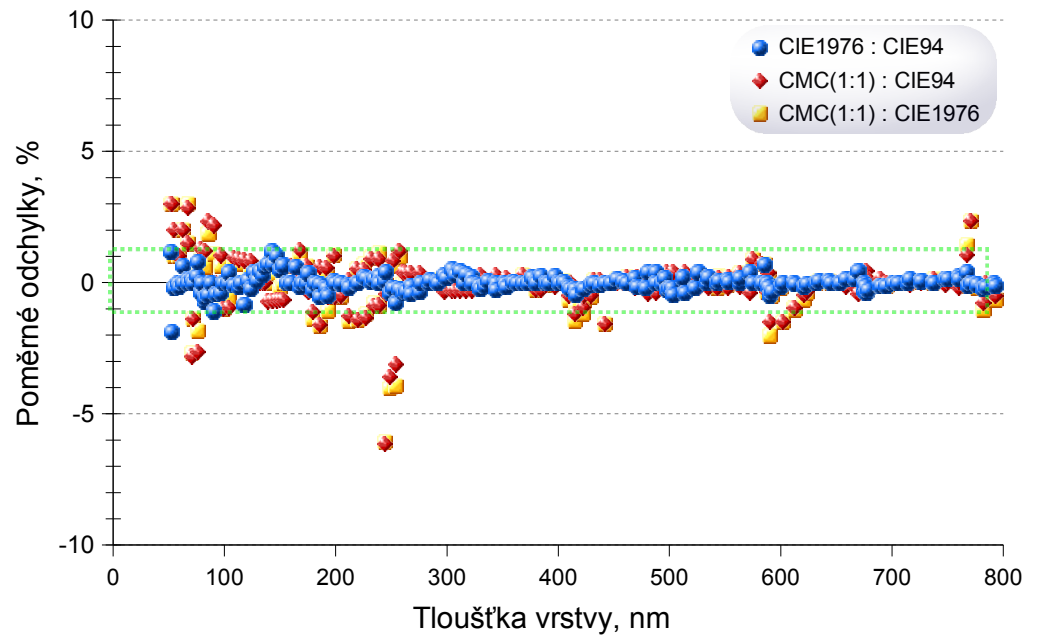
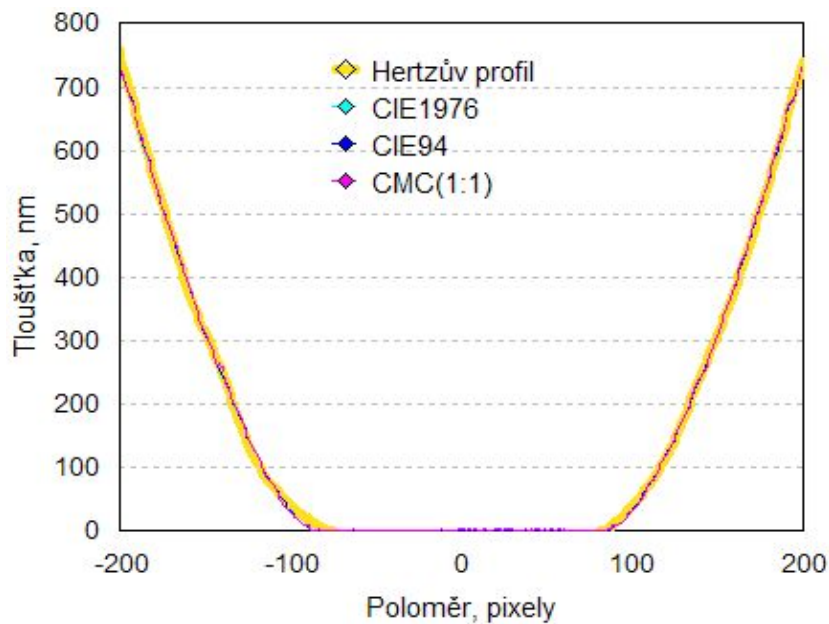
- řízení tribometru,
- řízení CCD kamery,
- synchronizované snímání obrazu,
- zpracování obrazu digitálními filtry,
- mapování hodnot tloušťky (TFCI) v reálném čase,
- vysokotlaké měření viskozity,
- mapování tlakového pole, ...

# Ověření metody a její aplikace

- Porovnání výsledků různých barevných diferenčních rovnic.
- Stanovení tvaru mazacího filmu v kruhových kontaktech a jeho porovnání s numerickým modelem.
- Srovnání centrální a minimální tloušťky mazacího filmu v kruhových a eliptických kontaktech s modelem Hamrocka a Dowsona.
- Použitelnost metody za podmínek smíšeného mazání.

# Ověření: Volba diferenční rovnice

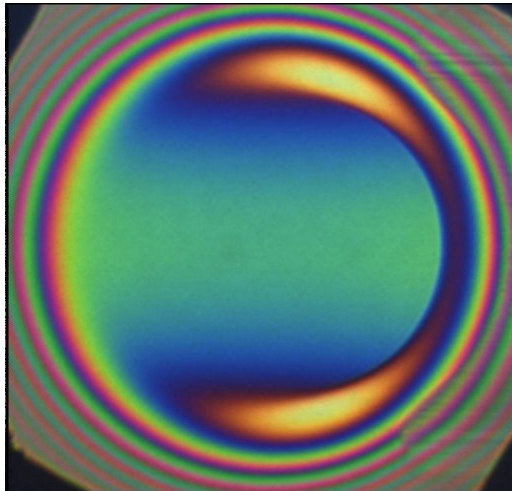
- Srovnání relativních rozdílů mezi výsledky TFCI s použitím různých diferenčních formulí, v závislosti na tloušťce měřené vrstvy:



- ▶ Nejvěrohodnější výsledky a zároveň nejvyšší výkon v celém rozsahu poskytuje Euklidovská barevná diferenční rovnice **CIE1976**.

# Ověření: Tvar mazacího filmu

- Experiment (TFCI):



- Numerické řešení (J.Čermák)

Společné vstupní parametry:

$F = 27 \text{ N}$  ( $p_{\max} = 0,425 \text{ GPa}$ )

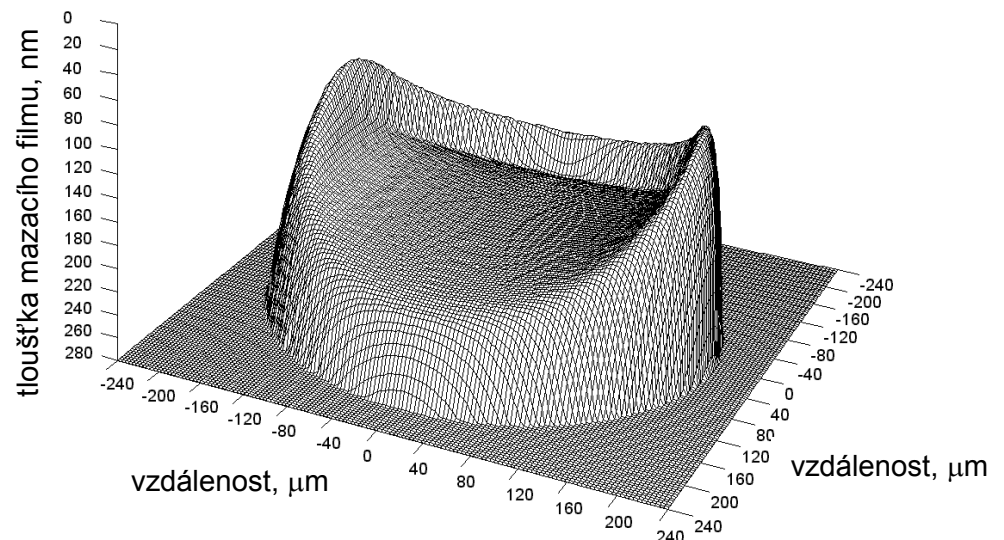
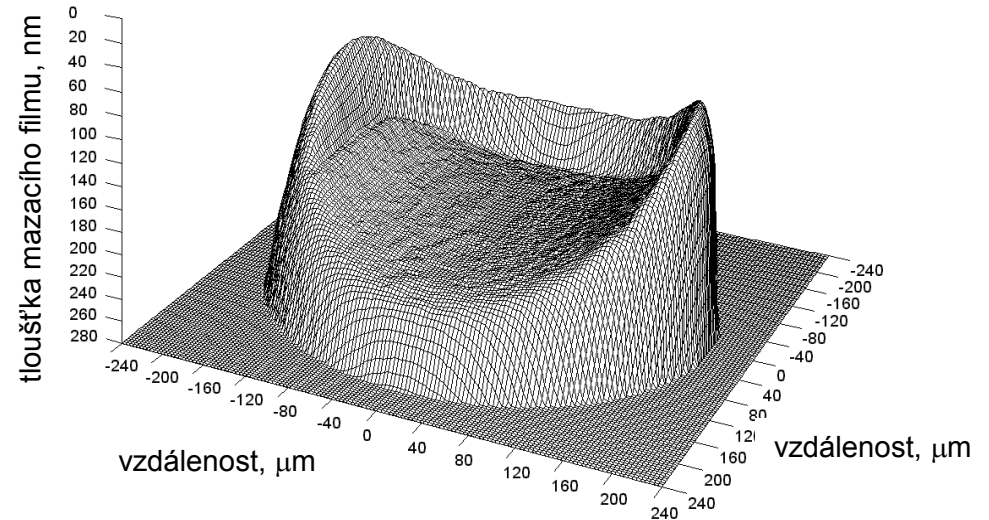
$u = 0,029 \pm 0,363 \text{ m/s}$

$\eta_0 = 0,321 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\alpha = 31 \text{ GPa}^{-1}$

kotouč - sklo BK7

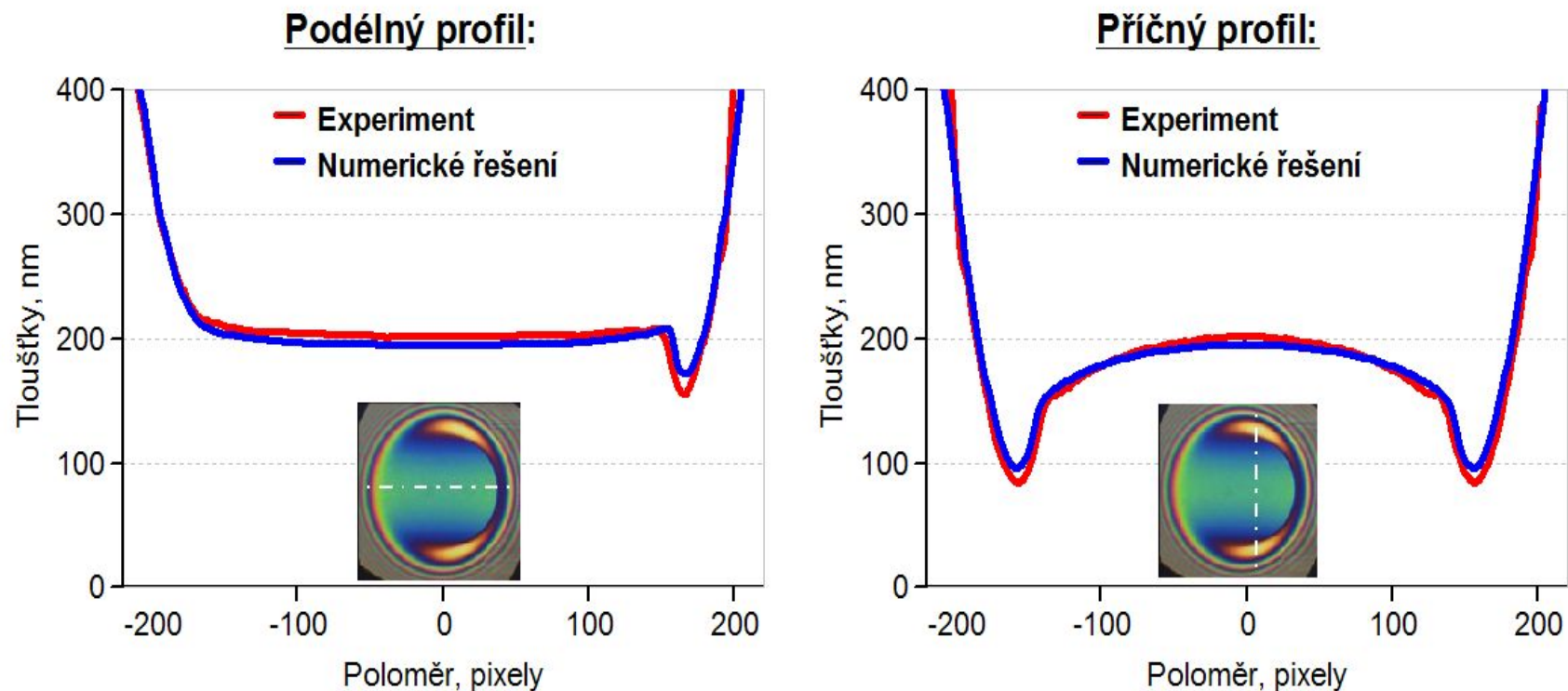
ocelová kulička -  $\varnothing 25,4 \text{ mm}$

naftenický základový olej



# Ověření: Tvar mazacího filmu

- Porovnání profilů ve výsledcích TFCl a v numerickém řešení:

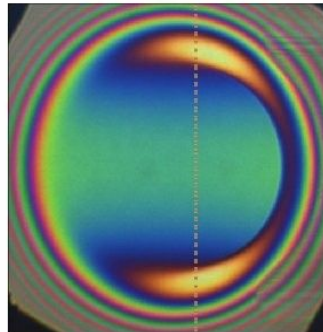


- ▶ V klíčových bodech relativní rozdíly nepřesahují **5%**

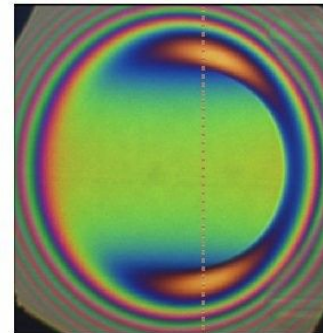
# Ověření: Tvar mazacího filmu

- Porovnání vrstevnic:

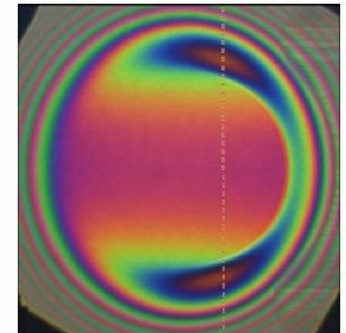
$u = 0,0759\text{m/s}$



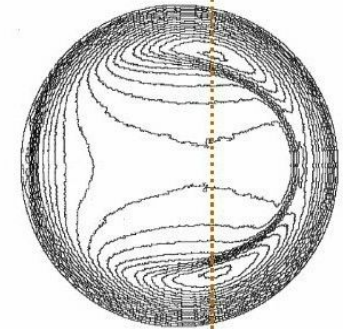
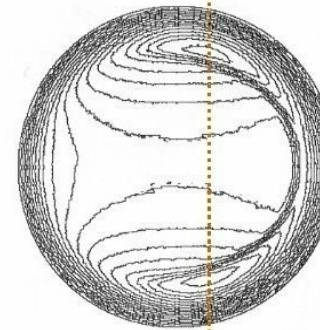
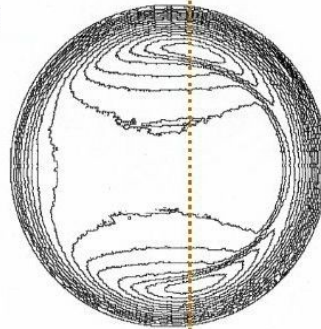
$u = 0,1107\text{m/s}$



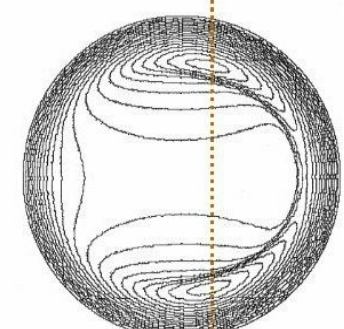
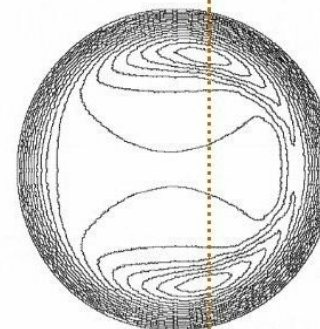
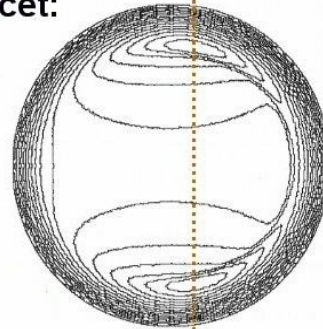
$u = 0,1789\text{m/s}$



TFCI:

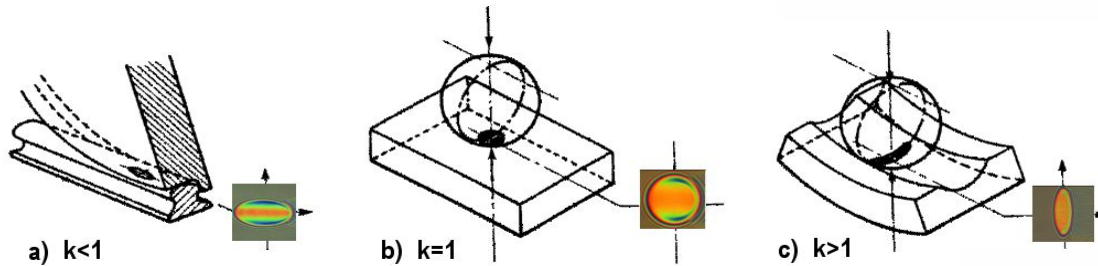


Výpočet:



# Ověření: Eliptické kontakty

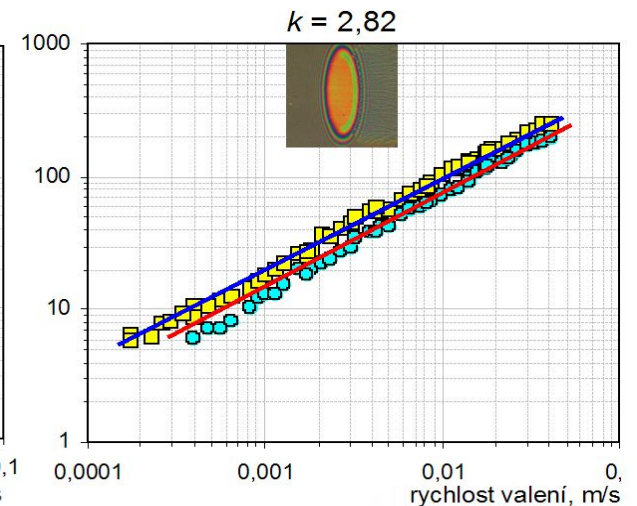
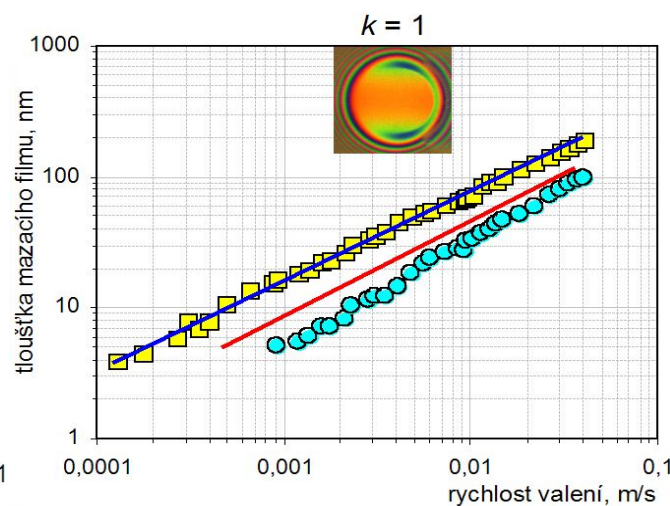
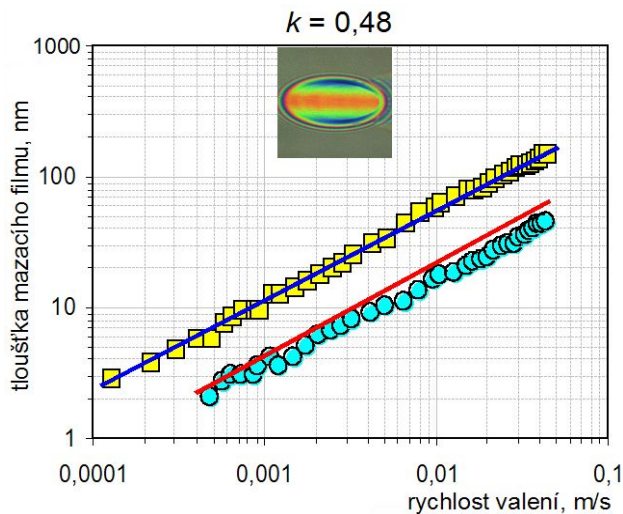
- Porovnání s formulemi Hamrocka a Dowsona pro různé rychlosti plného valení a parametry elipticity



$$k = \left( \frac{r_y}{r_x} \right)^{2/\pi}$$

- $h_c$  - exp
- $h_{\min}$  - exp
- $h_c$  - H-D
- $h_{\min}$  - H-D

► Velmi dobrá shoda, drobné odchylky  $h_c$  pro  $k = 1$ .



# Aplikace v režimu smíšeného mazání

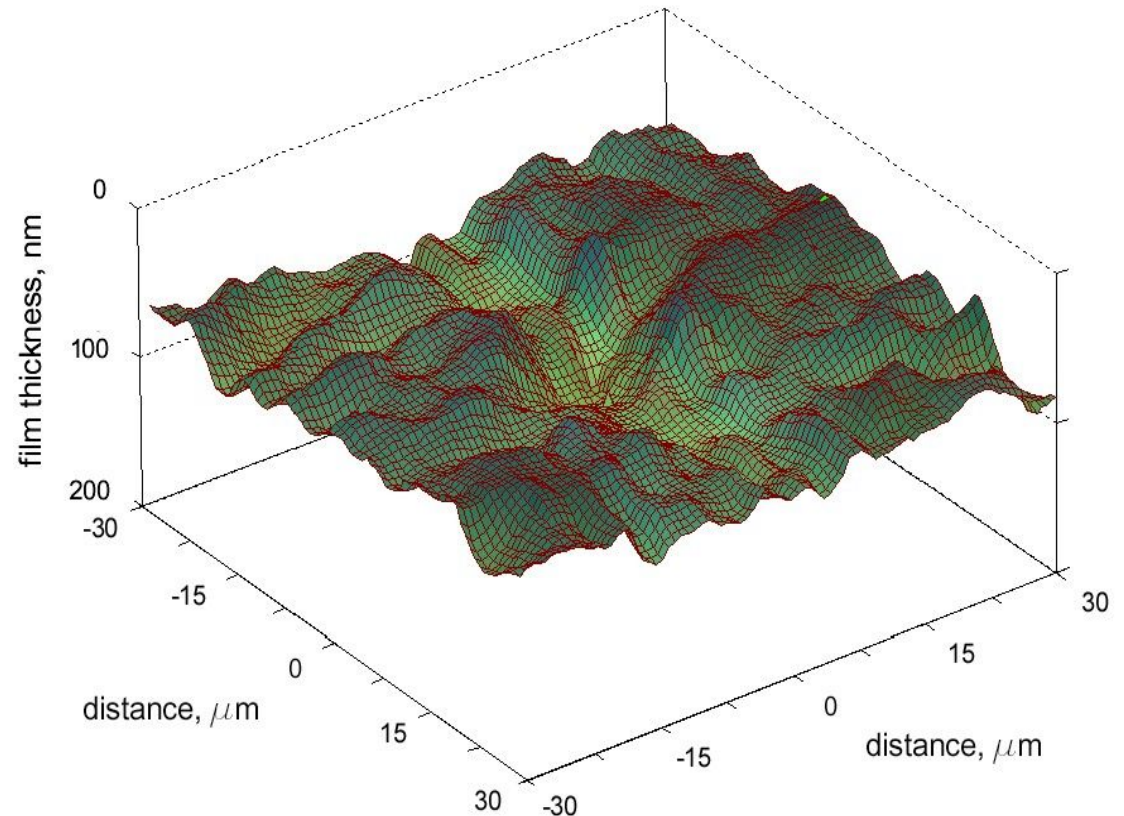
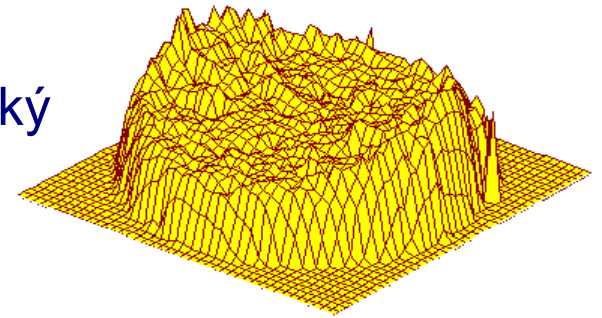
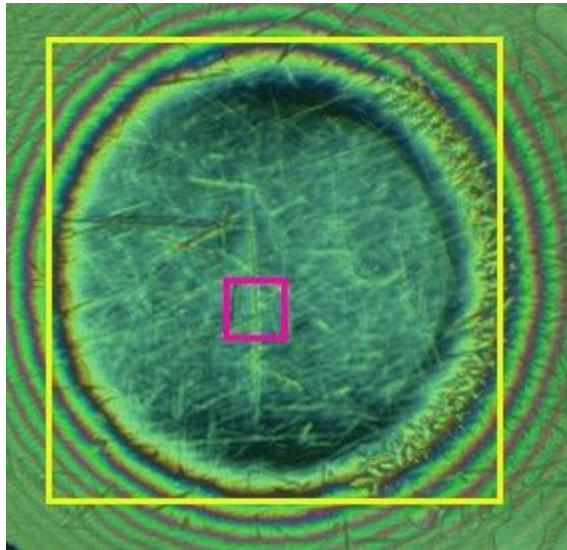
- V podmínkách smíšeného mazání hydrodynamický mazací film plně neodděluje třecí povrchy, takže dochází k vzájemné interakci mezi jejich povrchovými nerovnostmi.

$$R_q \sim 18 \text{ nm}$$

$$\eta_0 = 1.87 \text{ Pa}\cdot\text{s}, p_{\max} = 425 \text{ MPa}$$

$$W = 8.5 \times 10^{-7}, G = 3950,$$

$$U = 7.9 \times 10^{-13} \div 4.7 \times 10^{-12}$$



# Závěr

V rámci disertační práce byla vyvinuta nová metodika pro automatizované vyhodnocování chromatických interferogramů EHD mazaných kontaktů.

- ✓ Pro vyhodnocování byl zvolen přístup založený na kolorimetrickém porovnávání barev „vzorek-etalon“, napodobující lidské barevné vidění.
- ✓ Vyhledávání nejbližší barvy probíhá v rovnoměrném barevném prostoru CIELAB; jako optimální kritérium pro nalezení nejbližší barvy byla stanovena barevná diferenční formule CIE1976.
- ✓ V rámci implementace metodiky byl vytvořen speciální software pro řízení laboratorního zařízení, záznam a zpracování obrazu.
- ✓ Správnost dosažených výsledků byla ověřena porovnáním s numerickými modely tvaru EHD mazacího filmu a s modelem Hamrocka a Dowsona.
- ✓ Metodika je úspěšně nasazena v praxi při výzkumu EHD mazacích filmů a v současnosti na ni navazuje vývoj metod pro studium smíšeného mazání.

# Interferenční kontrast

- Při dvousvazkové interferenci v odraženém světle v tribometru interferují svazky  $I_0$  a  $I_1$  se shodným spektrálním složením, lišící se amplitudou a fází (hodnoty  $R(\lambda)$ ,  $T(\lambda)$  a  $A_0(\lambda)$  ve vztahu (7) budeme považovat za konstanty).
- Pro každou vlnovou délku  $\lambda$  spektra pak pro její intenzitu platí vztah

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) + I_1(\lambda) \cos(\Delta\varphi), \quad (8)$$

kde  $\cos(\Delta\varphi)$  dle vztahu (9) nabývá hodnoty dané rozdílem optických tras.

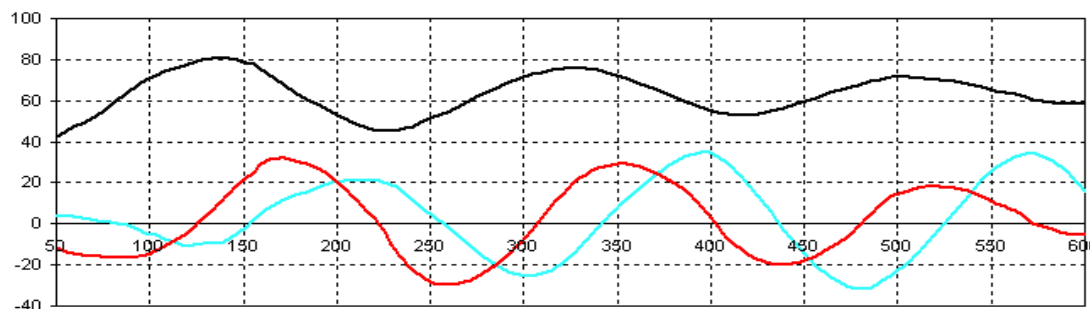
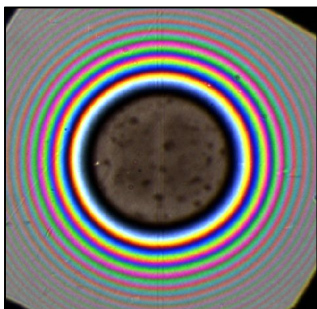
- Interferenční kontrast (viditelnost)

$$v = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$$

nabývá maxima ( $v = 1$ )  $\Leftrightarrow$  argument  $\cos(\Delta\varphi)$  splňuje podmínku (10)  
 $\Leftrightarrow I_0 = I_1$ .

# Pracovní rozsah a citlivost TFCL

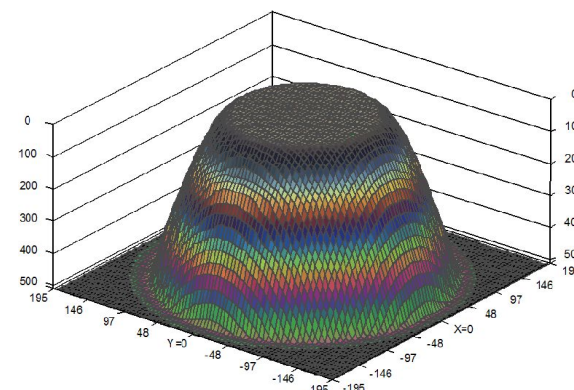
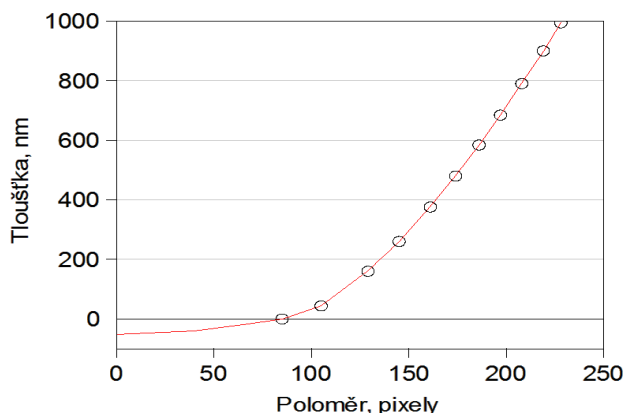
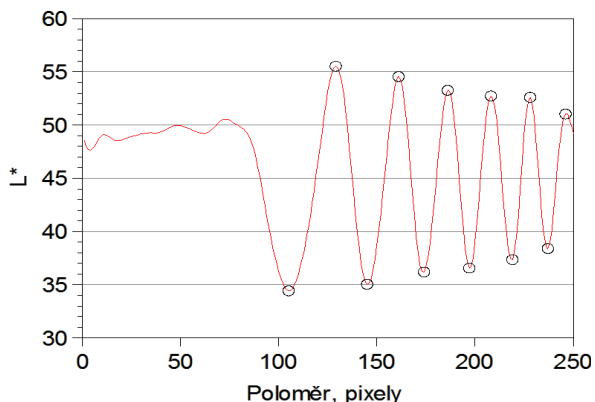
- Dolní mez je daná citlivostí použité kamery (pod 100 nm je už jen slabá interference v modré oblasti spektra) a je možné ji posunout až k 0 nm použitím Spacer Layer.
- Při interferenci v bílém světle (450-750nm) koherenční délka  $\sim 1\mu\text{m}$  a z kolorimetrického hlediska dochází na horním konci pracovního rozsahu k postupnému míchání barev různých řádů, které znemožňuje další spolehlivé rozlišování.



- Rozlišení je dáno interferenčním kontrastem a související efektivní bitovou hloubkou zaznamenaného obrazového signálu v kontaktní oblasti.
  - ▶ Velmi kvalitních snímky (24-bit zpracování) dosahuje gamut až 14 bitů, => pro danou šířku prvního interferenčního řádu je efektivní rozlišení odhadováno na méně než 0,1 nm.
  - ▶ Ve vyšších interferenčních řádech (tloušťky nad 500 nm) však klesá celkový kontrast a tím i reálné rozlišení metody, => vyššího rozlišení je možné dosáhnout použitím kamery s nižším šumem na snímačích a s vyšší bitovou hloubkou vzorků, nebo dichromatickým osvětlením.

# Shoda profilů

- Kalibrace je založena na nalezení vrcholů (minim i maxim) ve vybraných profilech, proložení a jejich ztotožnění s barvami v "barevném" snímku.



- V případě obrazových defektů na monochromatickém snímku může dojít k chybné detekci některých minim a maxim, která se v programu projeví např. jako "vynechané" maximum v jednom a nebo více řezech ("škrtnutí" přes kalibrační pásek).

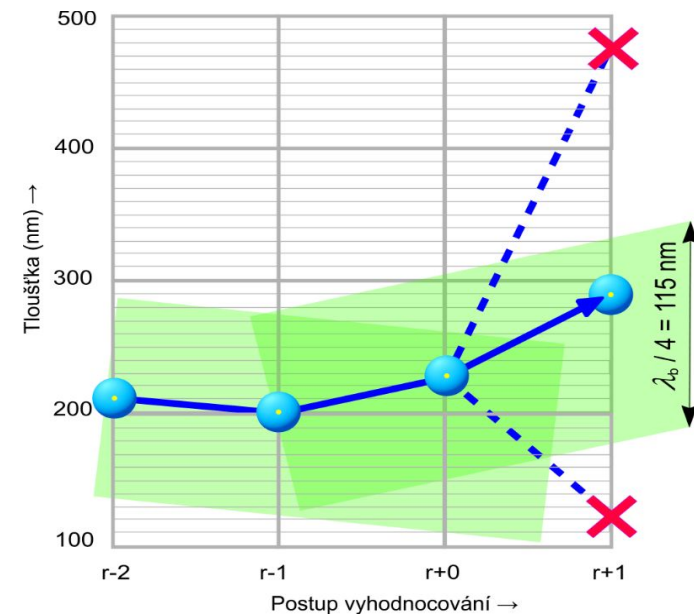
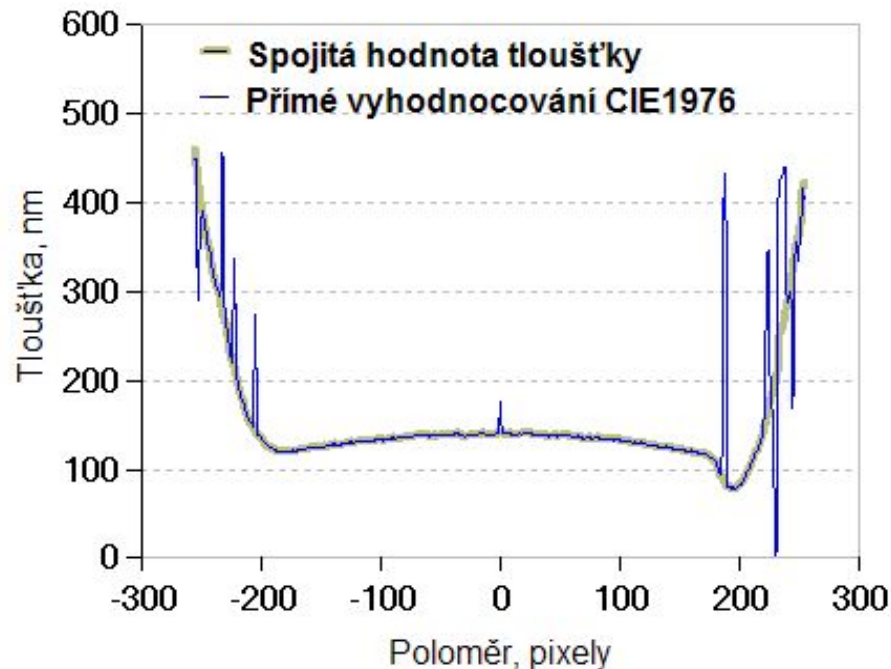


- ▶ Defektní řezy je nutné buď vynechat a nebo přestavením kalibrační růžice zvolit jiné, ve kterých už bude spojitost uspokojivá.



# Stabilita / nestabilita metody

- Vlivem rozsáhlých zašuměných oblastí, typicky u přechodových jevů, může nastat situace, kdy kontrola spojitosti gradientů TFCl zafunguje kontraproduktivně a je zvoleno nesprávné řešení.



- Tyto situace jsou velmi řídké, jejich řešení je součástí dalšího výzkumu.