

**České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní**

**Czech Technical University in Prague,  
Faculty of Mechanical Engineering**

Ing. Jan Hošek, Ph.D.

**Využití optických metod pro měření vlastností tekutin**

**Application of Optical Methods for Properties  
Measurement of Liquids**

## Summary

This habilitation lecture gives a short review of the optical measurement principles, optomechanical measurement systems and its applications for properties measurement of liquids. This review relates to the ten-year experience with design and development of optomechanical measurement systems applied to measurement of liquids and summarizes necessary theoretical knowledge for its development. There are quoted author's selected papers related to the presented problems too.

There are presented basic methods based on the liquid refractive index measurement as refractometry and spectrometry. Presented methods and measurement instruments are applied in a number of industrial, technical, natural and other commercial applications. There are presented special optical methods used for scientific applications too, like visualization methods giving spatial information of liquid properties distributions.

Problems, which are presented in my lecture - development of the new optical methods and optomechanical instruments for liquid's properties measurement is still actually and new developing systems are using new and modern technical knowledge and instruments, like light sources and detectors, data acquisition and processing methods, computer technology and new technological approaches in measurement instruments production.

## Souhrn

Tato habilitační přednáška podává krátký přehled využití různých optických principů a jejich uplatnění v konstrukci speciálních mechanickooptických zařízení pro měření vlastností tekutin. Práce vychází z několikaleté intenzivní činnosti na vývoji experimentálních zařízení pro měření tekutin a snaží se shrnout teoretické poznatky nutné k jejich vývoji a konstrukci. V přednášce jsou také citovány vybrané publikace autora související s jím řešenou problematikou – konstrukce speciálních mechanickooptických zařízení pro měření různých vlastností tekutin.

Přednáška prezentuje několik základních metod pro měření hodnoty indexu lomu měřených tekutin, jako jsou refraktometrické a spektrometrické metody měření, které nacházejí uplatnění v širokém spektru průmyslových, technických, přírodovědných i dalších aplikací. Pro vědeckotechnické účely jsou pak využívány a prezentovány příklady řady vizualizačních metod přinášejících informace o prostorovém rozložení měřených vlastností v objemu tekutiny.

Přednáška dokumentuje aktuálnost problematiky vývoje nových metod měření a optomechanických měřicích přístrojů pro měření vlastností tekutin, které plynule reagují na neustálé pokroky a rozvoj v oblasti technického poznání, zejména nových zdrojů a detektorů záření, numerických metod zpracování dat, obecně měřicí a výpočetní techniky a samozřejmě také nových technologických postupů výroby hromadné i speciální výroby měřicích přístrojů.

Klíčová slova: optické měřicí metody, refraktometrie, spektrometrie, index lomu, holografie, vizualizace, interferenční metody měření, vícefázové tekutiny, zobrazovací měřicí metody, Mieův rozptyl, víceaperturní měřicí metody, anamorfotické měření, Dopplerův princip, IPI, PIV, PTV

Keywords: optical measurement methods, refractometry, spectrometry, refractive index, holography, visualization, interference measurement methods, multiphase liquids, imaging measurement methods, Mie scattering, multiaperure measurement methods, anamorphic measurement, Doppler principle, Interferometric Particle Imaging, Particle Image Velocimetry, Particle Tracking Velocimetry

## **Obsah**

Summary	2
Souhrn	3
Klíčová slova	4
Obsah	5
1. Úvod do problematiky měření vlastností tekutin	6
2. Refraktometrické metody měření tekutin	7
3. Optické metody zviditelňování tekutin	10
4. Měření vlastností vícefázových tekutin	13
5. Závěr	17
Literatura	18
Ing. Jan Hošek, Ph.D.	20

## 1. Úvod do problematiky měření vlastností tekutin:

Tekutiny se vyskytují všude kolem nás i v nás a jsou pro nás doslova životně důležité. To je důvod, proč jsou různé fyzikální, chemické, mechanické a jiné vlastnosti tekutin a jejich soustav využívány odnepaměti a systematicky studovány již od 17. století.

Měření fyzikálních vlastností a obecného chování tekutin je významným problémem, ať už z pohledu studia fyziky tekutin na vědecké úrovni, a nebo v celé řadě jejich technických nebo biologických aplikací. Metody měření jednotlivých uvedených parametrů jsou neustále rozvíjeny a zdokonalovány tak, aby maximálně využily možnosti aktuálního technického poznání.

Základním požadavkem na měřicí zařízení a zvolenou měřicí metodu by mělo být dosažení očekávané přesnosti naměřené veličiny, bez toho, aby měřicí zařízení ovlivnilo chování měřené tekutiny. Protože tekutiny obecně velmi snadno podléhají působení externích sil, je pro měření vybraných fyzikálních veličin tekutin velmi vhodné použít bezkontaktní metody, které jen minimálně interagují s měřenou tekutinou. To je také důvod, proč pro měření tekutin, jejich fyzikálních vlastností, charakteru pohybu a dalších veličin se velmi často používají přístroje a zařízení využívající různé typy optických metod a jejich kombinací. Mimo na trhu běžně dostupných přístrojů pro měření různých vlastností tekutin, vycházejících z technických potřeb průmyslu, je zejména pro potřeby základního výzkumu nutné vyvíjet a konstruovat nová speciální nebo unikátní zařízení, která dokáží měřit vlastnosti a chování tekutin za zvláštních požadovaných podmínek.

Tato habilitační přednáška pak shrnuje velmi krátký přehled různých optických metod využitelných pro měření fyzikálních veličin tekutin, jejichž znalost je nutným podkladem pro volbu odpovídající měřicí metody nebo kombinace metod. V přednášce jsou pak citovány vybrané

publikace autora související s jím řešenou problematikou – konstrukce speciálních mechanickooptických zařízení pro měření různých vlastností tekutin.

## 2. Refraktometrické metody měření tekutin:

Nezákladnější fyzikální veličinou určující vzájemné chování elektromagnetického záření procházející libovolným typem látky, včetně tekutin, je hodnota indexu lomu daného materiálu vyjádřeného rovnicí:

$$n^2 = \frac{c^2}{v^2} = \epsilon_r \mu_r . \quad (1)$$

Tato fyzikálně jednoduše měřitelná veličina tak ve skutečnosti popisuje velmi komplikovanou interakci elektromagnetického záření šířícího se vakuem rychlostí světla  $c$  s atomy, molekulami a ionty látky, kde vlivem rozkmitávání jednotlivých částic látky a generaci s tím spojených dalších elektromagnetických vln dochází fázovému posunutí vln původního záření, které se projevuje jako by v dané látce existovala jistá fázová rychlost  $v$ .

Protože hodnota indexu lomu je charakteristickou vlastností každé látky lze měřením hodnoty indexu lomu jednotlivé látky nebo jejich směsi identifikovat nebo zjišťovat termodynamické vlastnosti stavu, v jakém se měřená látka nachází. Měření hodnot indexu lomu různých látek, označovanou jako refraktometrii, je nezbytnou fyzikální analytickou metodou pro řadu aplikací v oborech chemie, biologie, potravinářství, tribologie a dalších. Proto je vypracována řada standardních metod [1], podle kterých pracují standardně dodávané průmyslové refraktometry, vycházející z principů geometrické optiky s různými aplikacemi obecného zákona lomu:

$$\mathbf{r}_{s_2} = \frac{n_1}{n_2} \mathbf{r}_{s_1} + \left( \frac{n_2 \cos \alpha_2 - n_1 \cos \alpha_1}{n_2} \right) \mathbf{b} , \quad (2)$$

kde  $a_1$  a  $a_2$  jsou hodnoty úhlu dopadu a lomu,  $n_1$  a  $n_2$  jsou indexy lomu prostředí před a za rozhraním,  $\vec{s}_1$  a  $\vec{s}_2$  jsou směrové vektory dopadajícího a lomeného paprsku a  $\vec{b}$  je normálový vektor rozhraní. V závislosti na požadované přesnosti měření hodnoty indexu lomu měřené tekutiny lze zvolit celou řadu standardních typů refraktometrů, jejichž některé ukázky jsou uvedeny na obrázku 1:



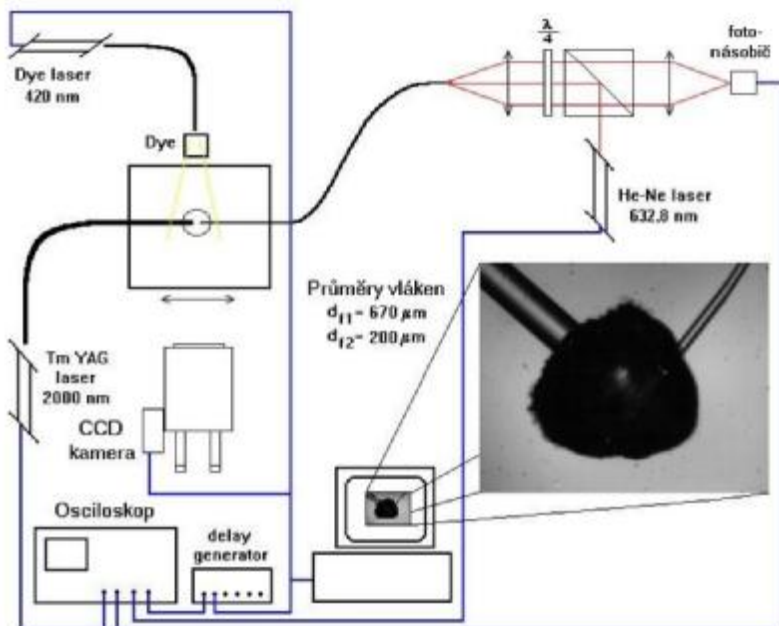
Obr. 1: Ukázka klasického Abbe refraktometru s externím termostátováním – vlevo, řez procesním refraktometrem firmy K-Patents – vpravo a příklad ručního refraktometru - dole.

Běžné rozlišení ručních přístrojů dosahuje hodnot  $10^{-2}$ - $10^{-3}$ , průmyslových refraktometrů až  $10^{-4}$  a laboratorních refraktometrů až  $10^{-6}$  hodnoty indexu lomu. Společnou nevýhodou klasických, komerčně dostupných refraktometrů, je jednoúčelovost těchto přístrojů a nutnost poměrně velkého



objemu měřeného vzorku. Tato skutečnost otevírá široké pole pro vývoj nových typů přístrojů pro měření indexu lomu tekutin využívající vláknových nebo interferenčních refraktometrů pro speciální použití. V současné době tak bylo vyvinuto několik typů vláknových refraktometrů vycházející od nejjednodušších principů geometrické optiky, přes využití multimódových vlnovodných vlastností optických vláken s využitím evanescentních vln, povrchových plazmonů nebo dlouhoperiodických mřížek, až po velmi lokální měření indexu lomu a dalších vlastností tekutin s využitím SNOM a AFM mikroskopů.

I já jsem využil vláknového refraktometrického senzoru k realizaci experimentálního zařízení pro měření termodynamického stavu tekutiny z vnitřního prostoru kavitační bubliny, jak je uvedeno na obrázku 2.



Obr.2: Celkové schéma experimentálního zařízení pro měření hustoty uvnitř kavitační bubliny.

Toto experimentální zařízení využívalo měření odrazivosti na konci optického vlákna pronikajícího do expandující kavitační bubliny, kde byl na základě Fresnelových vzorců pro odrazivosti a Lorentz-Lorenzovi rovnice pro molární lámavost tekutin zjištěn časový a prostorový průběh hustoty jejího vnitřního prostředí [2, 3].

Přestože měření indexu lomu na jedné vlnové délce dává řadu informací o složení a fyzikálních podmínkách stavu měřené tekutiny, pro detailní analytické měření složení tekutin se používá nikoli měření na jediné vlnové délce, ale spektrální měření v různě širokém oboru vlnových délek, obecně nazývaný spektrometrickými metodami měření tekutin.

Různé možnosti spektrometrického měření tekutin i konstrukce různých typů spektrometrů je detailně popsáno celou řadou publikací [4, 5, 6]. Tyto měřicí metody mají v současné době široké pole uplatnění, zejména v oblasti ochrany zdraví a bezpečnosti v místech hromadného výskytu osob, kdy lze spektrálním měřením nebo měřením na vhodných vlnových délkách bezkontaktně identifikovat zdravé škodlivé nebo i nebezpečné tekutiny typu hořlavín, výbušnin i jiných, méně nebezpečných tekutin. I já jsem využil měření rozptylu záření v tekutině na několika vlnových délkách při měření kondenzace kapek v rázové trubici [7, 8].

### **3. Optické metody zviditelňování tekutin:**

Zatímco refraktometrické a spektrometrické metody měření vlastností tekutin poskytují integrální informaci o typu nebo termodynamickém stavu měřené tekutiny v měřeném prostoru, existují i další metody, které lze použít pro určení rozložení těchto vlastností v celé měřené rovině nebo i prostoru. Z důvodu velkého množství zaznamenávaných a zpracovávaných dat typu 2D, 3D nebo i 4D jsou tyto metody založeny na řadě principů optického nebo numerického zviditelnění měřené oblasti s obvykle grafickým výstupem.

Historie prvních optických vizuizačních metod sahá až do druhé poloviny 19. století, kdy byly používány nejjednodušší vizualizační techniky vycházející ze změny trajektorie šíření světelných paprsků v opticky nehomogenním prostředí daným Fermatovým principem.

Nejjednodušší metodou tohoto typu je stínová metoda, kdy je změna osvětlení stínítka  $DA$  v blízkosti směru původního neodchýleného paprsku zapsána rovnicí:

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{L}{n_0} \int_{z_A}^{z_B} \left( \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} \right) dz, \quad (3)$$

kde  $A$  je hodnota původního osvětlení daného místa stínítka, ležícího ve vzdálenosti  $L$ .

Kvalitativně lepší informace o rozložení indexu lomu měřené tekutiny lze ovšem získat různými modifikacemi šlírových metod, kdy v případě použití nožové clony lze vyjádřit vztah mezi změnou osvětlení stínítka  $DA$  a rozložením indexu lomu a tomu odpovídající hustoty tekutiny vztahem:

$$\frac{\partial n}{\partial y} = K \frac{\partial r}{\partial y} = \frac{a}{f'_2} \frac{n_0}{z_B - z_A} \left( \frac{\Delta A}{A} \right)_Y, \quad (4)$$

kde  $K = \frac{n-1}{r}$ ,  $f'_2$  je ohnisková vzdálenost zobrazovacího objektivu,  $a$  je menší rozměr nezakryté části obrazu zdroje a  $z_B - z_A$  je délka měřeného prostoru.

Další možností zviditelnění tekutiny nabízí použití principu interference světla. Hodnota intenzity záření v rovině vzniklého interferenčního obrazce je dána lokální hodnotou fázového rozdílu paprsků z měřené a referenční větve interferometru  $Dd(x,y)$  dané rovnicí:

$$I(x, y) = I_M + I_R + 2\sqrt{I_M I_R} \cos(\Delta d(x, y)), \quad (5)$$

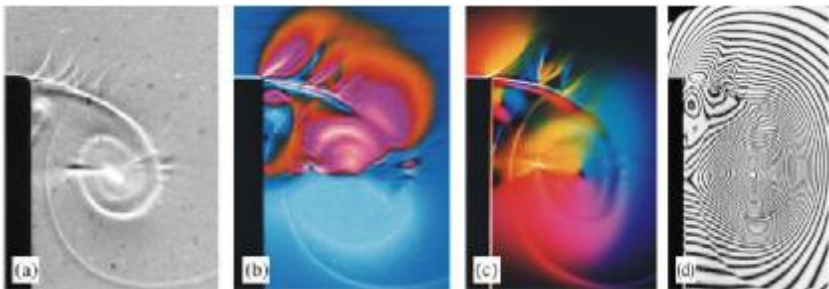
kde  $I_M$  a  $I_R$  jsou hodnoty intenzit záření z měřicí a referenční větve. Za předpokladu, že dráhy paprsků v obou interferujících

větvích jsou stejné, je hodnota tohoto fázového rozdílu paprsků dána pouze změnou indexu lomu v měřeném prostoru a jejich vztah lze obecně vyjádřit rovnicí:

$$\Delta d(x, y) = \frac{2p}{I} \int_0^L (n(x, y, z) - n_R) dz, \quad (6)$$

kde  $L$  je délka měřeného prostoru s proměnnou hodnotou indexu lomu,  $I$  je použitá vlnová délka záření a  $n_R$  je hodnota indexu lomu v referenční větvi.

Z uvedených vztahů je patrné, že každá z těchto vizualizačních technik poskytuje poněkud jiné informace o měřeném prostoru, nicméně použitím vhodného optického uspořádání takového měření lze provést současné měření několika vizualizačními technikami najednou, jak je naznačeno na obrázku 3:

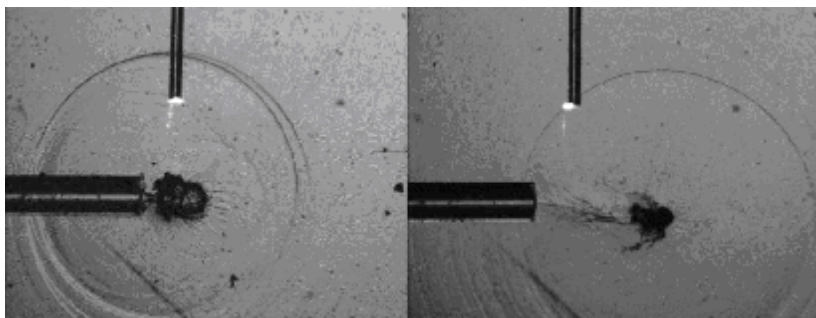


Obr.3: Srovnání různých typů vizualizačních metod na stejném objektu: (a) stínogram, (b) jednoose vertikálně citlivý barevný šlírogram, (c) 2D barevný šlírogram, (d) holografický interferogram [9].

Uvedené vizualizační techniky podávají správné výsledky pouze za předpokladu, že se průběh indexu lomu tekutiny podél optické osy v měřeném prostoru příliš nemění a podávají tak 2D + časovou informaci o stavu měřené tekutiny. Nicméně pro získání 3D informace o rozložení vlastností tekutiny lze využít vícesměnového měření uvedenými i dalšími optickými, například holografickými, technikami a

v kombinaci s numerickými tomografickými algoritmy lze ze získaných vzájemně prostorově natočených 2D informací získat kompletní 3D + časovou informaci měřené tekutině [10]. Na základě měření rozložení hodnot indexu lomu v měřeném prostoru výše uvedenými metodami lze při známém termodynamickém ději určit nejen hustotu, ale i další fyzikální veličiny, jakými jsou například teplota, tlak, entalpie, střední rychlosti proudů a další.

I já jsem použil šlírovou vizualizační techniku pro zviditelňování kavitačních dějů [2, 3], kdy bylo možné stanovit časový průběh laserem indukovaného kavitačního děje, včetně generace rázových vln a analýzy jeho opakovatelnosti, jak je uvedeno na příkladu na obrázku 4, a i další vizualizační techniky [11].



Obr. 4: Šlírově zviditelněné rázové vlny během laserově indukovaného kavitačního procesu [3].

#### 4. Měření vlastností vícefázových tekutin:

Tekutiny v běžných podmínkách se obvykle nevykytují v čisté jednofázové podobě, ale jako směsi více fází kapalin, plynů a pevných částic v různých poměrech zastoupení jednotlivých fází. To samozřejmě ovlivňuje jak jejich vlastnosti, tak i způsoby a techniky měření jejich vlastností.

Při interakci záření s takovými vícefázovými tekutinami dochází k řadě optických jevů v důsledku skokové

změny indexu lomu na rozhraní jednotlivých fází a obecně dochází k lomu, odrazu, absorpci, rozptylu a interferenci dopadajícího a rozptylovaného záření. Směr a intenzita rozptýleného záření na heterogenní částici v tekutině se mění výrazně se změnou poměru velikosti této částice k vlnové délce dopadajícího záření.

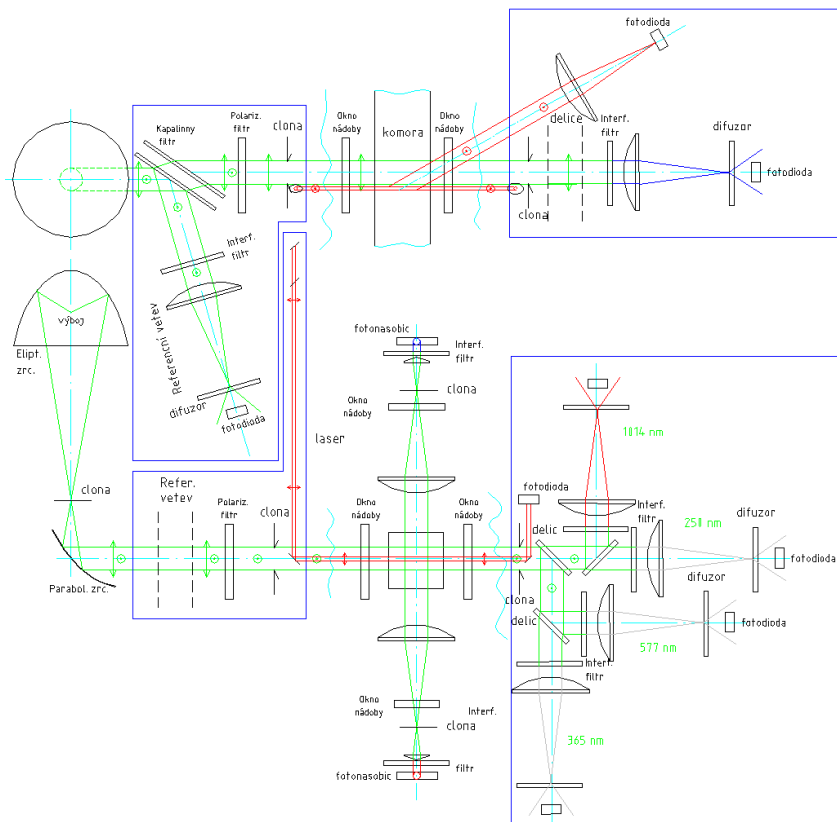
Úplné řešení rozptylu elektromagnetického vlnění na částici kulového tvaru podal Mie (1908), který studoval rozptyl a absorpci na malých koloidních částicích zlata rozptýlených ve vodě. Podle něho se řešení problému rozptylu nazývá obecná Lorentz-Mieova teorie. Výslednou intenzitu rozptýleného záření (zářivost) v závislosti na směru rozptylu, fyzikálních vlastnostech prostředí obklopující částici a vlnové délce dopadajícího záření pro jednu kulovou částici lze vyjádřit rovnicí:

$$I(\mathbf{a}; n; \mathbf{q}; \mathbf{y}) = \frac{I_0}{2k^2 r_d^2} (i_1(\mathbf{a}; \mathbf{q}; n) \sin^2 \mathbf{y} + i_2(\mathbf{a}; \mathbf{q}; n) \cos^2 \mathbf{y}), (7)$$

kde  $I_0$  je intenzita dopadajícího záření (ozáření),  $r_d$  je poloměr částice,  $k$  je úhlový vlnčet média obklopujícího částici,  $n$  je komplexní index lomu média obklopujícího částici,  $\mathbf{a}$  je parametr velikosti částice,  $\mathbf{q}$  a  $\mathbf{y}$  jsou úhly rozptylu a  $i_1$  a  $i_2$  jsou součinitele rozptylu dané superpozicí vyzářování elektrického a magnetického dipólu, kvadrupólu a příslušných vyšších multipólů dle věty o multipólovém rozvoji. Průběh intenzity rozptylovaného záření tak má pro velikosti částic řádově odpovídající vlnové délce dopadajícího záření velmi komplikovaný charakter, ale při zvyšujícím se nebo snižujícím se parametru velikosti částice  $\mathbf{a}$  přechází do jednodušších řešení odpovídajících Rayleighovu a Fraunhoferovu rozptylu.

Skutečnost rozptylu záření na heterogenních částicích tekutin využívá přímo či nepřímo celá řada měřicích a diagnostických metod vlastností tekutin. I já jsem využil měření intenzity rozptylu ke konstrukci optomechanického zařízení pro měření časového průběhu kondenzace kapek

v rázové trubici [7, 8], které je instalováno v Ústavu termomechaniky AV ČR a jehož optické schéma je zobrazeno na obrázku 5:



Obr. 5: Optické schéma zařízení pro měření kondenzace pomocí čtyřvlnové extinkce, dvou rozptylů do 90° a rozptylu do 15°. Nahoře půdorys, dole bokorys.

Kromě přímého měření směrové intenzity rozptýleného záření byla vyvinuta řada dalších optických metod využívající rozptýlené záření k určení velikosti, rychlosti pohybu nebo rozložení jednotlivých částic v objemu tekutiny. Tyto měřicí metody využívají například principu vhodného optického zobrazení tekutiny, kdy lze velikost a polohu jednotlivých

částic v tekutině určit například z difrakčního obrazce částice, jejich víceaperturního a defokusovaného obrazu nebo i pomocí mnou vyvinuté metody využívající zobrazení jednotlivých heterogenních částic tekutiny pomocí anamorfotického zobrazení [12, 13].

Další skupina měřicích metod vícefázových tekutin využívá k určení vlastností jednotlivých částic interferenční optické jevy. Kromě klasického holografického zobrazení, kde lze optickou nebo numerickou rekonstrukcí předmětového prostoru získat kompletní informaci o stavu měřené tekutiny, lze využít i další metody využívající interferenci záření přímo na jednotlivých částicích v tekutině. Mezi tyto metody patří celá skupina zobrazovacích metod označovaných Interferometric Particle Imaging (IPI), ale také další rozsáhlá skupina metod využívající Dopplerova principu změny frekvence emitovaného záření při průchodu částice přes pole interferenčních proužků [14]. Kromě hodnoty velikosti a směru rychlosti procházejících částic daných rovnicí (8) lze pomocí vyhodnocování posunu fáze rozptýleného záření určit i velikost jednotlivých částic, například pomocí rovnice (9):

$$f_d = -\frac{v}{l} = \frac{\mathbf{u} \cdot (\mathbf{f} - \mathbf{s})}{l} = \frac{2u \sin f}{l}, \quad (8)$$

$$\Phi_{12} = C_2 d = \frac{2pd}{l} \frac{\sin f \sin y}{\sqrt{2(1 - \cos f \cos y \cos q)}}, \quad (9)$$

kde  $f$  je poloviční úhel mezi směry interferujících svazků.

Umělé přidávání heterogenních částic do tekutiny s úspěchem využívá také řada metod pro vizualizaci tekutin, počínaje přidáváním kouřových částic, praporců, klasických či fluorescenčních barviv nebo částic definované velikosti. Pro sledování trajektorie těchto uměle přidávaných částic pak byla vyvinuta řada, z optického hlediska velmi jednoduchých, měřicích metod využívající časově-sekvenční snímkování a numerické metody vyhodnocování trajektorie jednotlivých částic označovaných dle způsobu osvětlení jednotlivých



snímků jako metody Particle Image Velocimetry (PIV) nebo Particle Tracking Velocimetry (PTV).

## 5. Závěr:

Tento text habilitační přednášky prezentuje velmi krátký přehled základních optických metod a jejich využití pro měření vlastností tekutin, včetně výběru několika mých publikací, kterými jsem k rozvoji daného tématu sám přispěl [2, 3, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 16].

Optické měření různých vlastností tekutin představuje velmi širokou oblast měřicí techniky využívané v celé řadě oborů lidské činnosti počínaje potravinářským a chemickým průmyslem, přes zdravotnictví, meteorologii, až po energetiku, strojírenství a samozřejmě i základní výzkum. Z tohoto důvodu je oblast měření a vývoje nových měřicích metod a zařízení pro měření vlastností tekutin velmi aktuální. Neustále jsou proto vyvíjena nová komerční i speciální měřicí zařízení využívající jak široký obor teoretických znalostí interakce záření s hmotou tekutiny, tak i neustálý rozvoj v oblasti technického poznání, zejména nových zdrojů a detektorů záření, numerických metod zpracování dat, obecně měřicí a výpočetní techniky a samozřejmě také nových technologických postupů výroby hromadné i speciální výroby měřicích přístrojů.

Tato habilitační přednáška tak prezentuje nutnost širokého přehledu teoretických znalostí, nezbytných pro úspěšnou konstrukční práci na přístrojích přesné mechaniky a optiky. Výhody znalostí a zkušeností s konstrukcí optomechanických zařízení pro měření vlastností tekutin vedly v současné době k velmi zajímavé aplikaci těchto metod i na případě návrhu metod měření polohy pohybujícího se laserového fuzního terče mezinárodního projektu HiPER [16], kde jsme v loňském roce navázali úspěšnou spolupráci na tomto projektu.

## Literatura

- [1] G. F. Stanley, *Refractometers: Basic Principles*, Bellingham & Stanley Ltd., 1989.
- [2] J. Hošek, W. Garen, W. Neu, H. Schönig, A. Hopfmüller, Vapor Density Measurement Inside Laser Induced Cavitation Bubbles, Laser-Assisted Microtechnology (LAM-2000), St. Petersburg, Russia, August 23-25, 2000, *Proc SPIE*, **Vol 4157** (67), pp. 67-77, January 2001.
- [3] W. Garen, J. Hošek, A. Hopfmüller, W. Neu, H. Schönig, S. Tiedeken, Density measurements inside laser induced cavitation bubbles behind shock waves in water, 23. International Symposium on Shock Tubes and Waves, Lasertechnik, July 22 - 27, 2001, Texas, USA.
- [4] N. Tkachenko, *Optical Spectroscopy*, Elsevier, 2006.
- [5] S. Davis, M. Abrams, J. Brault, *Fourier Transform Spectroscopy*, Academic Press, 2001.
- [6] J. Ferraro, *Introductory to Raman Spectroscopy*, Academic Press, 2002.
- [7] J. Hošek, J. Hrubý, K. Studenovský, Optical Setup for Condensation Measurement with a Shock Tube, Czech-Finish Aerosol Symposium, Prague, May 23-26, 2002.
- [8] J. Hošek, K. Studenovský, J. Hrubý, Konstrukce optické aparatury pro měření kondenzace v rázové trubici, *Jemná mechanika a optika*, **Vol 48**, No 8-9/2003, 249-253.
- [9] H. Kleine, H. Grönig, K. Takayama, Simultaneous Shadow, Schlieren and Interferometric Visualisation of Compressible Flows, *Optics and Lasers in Engineering*, **44**, 170-189, 2006.
- [10] M. E. Brezinski, *Optical Coherence Tomography: Principles and Applications*, Elsevier Inc. 2006.
- [11] Z. Trávníček, K. Peszynski, J. Hošek: S. Wawrzyniak,

- Aerodynamic and mass transfer characteristics of an annular bistable impinging jet with a fluidic flip–flop control, *International Journal of Heat and Mass Transfer* **Vol 46** No 7 1265 - 1278, USA, 2003.
- [12] J. Hošek, Single Camera System for Dimension and Position Measurement of Spheres, *Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics* 2008 (**18**), No 33, 15-22.
- [13] J. Hošek, Zařízení pro určení polohy a/nebo velikosti alespoň jednoho sférického tělesa v měřeném prostoru tekutiny, patent č.: 299674, 2008.
- [14] J. Hošek, Bubble Diameter Determination in Large Measurement Volume Using Phase Doppler Anemometry, *Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics* 2008 (18), No 33, 45-50.
- [15] J. Hošek, Surface Tension Determination Using Liquid Sample Micromirror Property, SPIE Europe Optics and Optoelectronics symposium, *Proc. SPIE*, **Vol 6584**, April 16-19, 2007, Prague, Czech Republic.
- [16] J. Hošek, Analysis of Possible Solutions of HiPER Project Inspection Tracking System for the Laser Targets Insertion, výzkumná zpráva pro Fyzikální ústav AV ČR, 14 stran, 2009.
- [17] Pierre Pognat, Lionel Duvillaret, Remy Jost, Guy Vitrant, Daniele Romanini, Andrzej Siemko, Rafik Ballou, Bernard Barbara, Michael Finger, Miroslav Finger, Jan Hošek, Miroslav Král, Krzysztof A. Meissner, Miroslav Šulc, Josef Zicha, Results from the OSQAR photon-regeneration experiment: No light shining through a wall, *Phys. Rev. D*, **78** (9), 2008, p. 092003.
- [18] J. Hošek, Úvod do Nanotechnologie, skripta ČVUT, 2010, v tisku.

## **Ing. Jan Hošek, Ph.D.**

Jan Hošek (\*1974 v Praze) studoval na fakultě strojní ČVUT v Praze v letech 1993-1999 v magisterském studiu oboru Přesná mechanika a optika a dále v doktorském studiu téhož oboru v letech 1999-2003. Své studium v obou případech zakončil s výsledkem „prospěl s vyznamenáním“, doplněné ještě získáním prvního a třetího místa v celofakultní soutěži studentské tvůrčí činnosti. Svůj zájem o přístrojovou techniku v oboru Přesné mechaniky a optiky projevil však ještě dříve, kdy v letech 1990-1991 vystudoval astronomický kurs při Hvězdárně a Planetáriu Praha, kde v letech 1991-1998 pracoval jako demonstrátor. Svoji vědeckou činnost zahájil na Ústavu termomechaniky AV ČR, kde od roku 1996 působil jako pomocná vědecká síla, od roku 1999 jako mladší vědecký pracovník. Zde zaměřil svoji odbornou činnost na návrh, konstrukci a realizaci unikátních optomechanických zařízení pro měření různých vlastností tekutin, z nichž některé jsou podstatnou částí obhajované habilitační práce. V roce 2002 nastoupil zpět na ČVUT na Odbor přesné mechaniky a optiky Ústavu přístrojové a řídicí techniky jako odborný asistent, avšak stále zůstal v úzkém kontaktu s ÚT AV ČR, pro který řešil v rámci grantových úkolů různé optomechanické přístroje a zařízení. V roce 2000 se zúčastnil půlroční vědecké stáže v laboratoři lékařské laserové techniky na University of Applied Science v německém Edenu, kde navrhl a provedl vůbec první měření fyzikálních parametrů z vnitřního prostoru kavitační bubliny. Od roku 2007 je pak Team Leader za ČVUT mezinárodního projektu OSQAR v CERNu [17]. Od roku 2005 je vedoucím Odboru přesné mechaniky a optiky, roku 2007 byl zvolen do rady České strojnické společnosti a roku 2009 byl jmenován tajemníkem Ústavu přístrojové a řídicí techniky FS ČVUT. Je autorem nebo spoluautorem 12 článků v odborných časopisech, 23 příspěvků na mezinárodních konferencích, autorem 1 patentu, 1 užitého vzoru a řady lokálních publikací. Jeho odborný zájem v současné době nesměřuje pouze na konstrukci optických přístrojů, ale také na technologii výroby systémů malých rozměrů, zejména mikrosystémů. V této souvislosti se zúčastnil v letech 2005 a 2008 mezinárodních letních škol i v oboru nanotechnologií a od školního roku 2005/6 zavedl na Fakultě strojní ČVUT výuku zcela nového předmětu Nanotechnologie [18].