

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

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



Ing. Pavel Novák, Ph.D.

**Analýza a aplikace aktivních optických prvků s proměnnými
parametry**

**Analysis and application of active optical elements with variable
parameters**

Summary

The lecture discusses selected problems of analysis and applications of active optical elements with variable parameters in imaging and measuring systems investigated by the author and his co-workers and published and realized in the last five years. Firstly, fundamental principles and types of active optical elements are described and possible applications of such optical elements, especially the tunable-focus lenses and deformable mirrors, are discussed. Undisputed advantage of such special elements is the possibility to design and construct adaptive optical systems for measuring and imaging purposes that would be hard or even impossible to realize without these elements. This field is very perspective for future imaging and measuring optical systems and one can expect that these active elements will cause a little revolution in the area of design and applications of modern optical systems in the future. This work gives a brief overview of individual research areas and topics in this progressive field that the author dealt with in last five years and that were published in peer-reviewed international journals with impact factor and proceedings from international conferences.

The first area discussed in the lecture is devoted to the author's research in the field of active lenses enabling a continuous change of focal length (tunable-focus lenses). Novel and original results and contributions regarding an analysis of imaging properties of active lenses based on two immiscible liquids with a tunable curvature of their mutual interface and liquid membrane lenses with pressure actuated shape of the optically transparent elastic membrane are summarized. Further, the application of these elements in primary optical design of special optical systems is described. A brief review of author's contribution to the theoretical analysis of thin elastic deformable membranes for applications in membrane lenses and simple deformable mirrors is given. The following part of the lecture is focused on the theoretical analysis and application of methods of adaptive optics in interferometric systems for testing and quality control of optical surfaces, where the active optical element (deformable mirror, spatial light modulator based on liquid-crystal technology) is used for adaptive adjustment and shaping of the wavefront to fit the measured surface. This idea seems to be promising and very perspective for the design of future measurement methods and devices in optical testing and quality assessment. Finally, the problem of a numerical reconstruction of the wavefront and techniques for fast and robust numerical evaluation of Zernike polynomials and their Cartesian derivatives, which is important both in optical design and controlling of adaptive optics systems, is mentioned.

Souhrn

Přednáška pojednává o vybraných problémech analýzy a aplikace aktivních optických prvků s proměnnými parametry v zobrazovacích a měřicích systémech, které byly autorem a jeho spolupracovníky navrženy, publikovány a realizovány v minulých pěti letech. Nejprve jsou stručně prezentovány základní principy a typy aktivních optických prvků a jsou zmíněny možnosti jejich aplikace, zejména pak čoček s proměnnou ohniskovou vzdáleností a deformovatelných zrcadel. Nespornou výhodou takovýchto speciálních prvků je možnost konstrukce adaptivně přizpůsobitelných optických soustav pro zobrazovací či měřicí účely, které by bez těchto prvků byly jen velmi obtížně realizovatelné nebo zcela nerealizovatelné. Tato problematika je vysoce perspektivní pro budoucí optické zobrazovací i měřicí systémy a lze očekávat, že tyto prvky způsobí do jisté míry revoluci v návrhu a aplikacích moderních optických soustav budoucnosti. V práci jsou stručně zmíněna jednotlivá témata, kterými se autor v rámci této progresivní oblasti v posledních pěti letech zabýval a která byla publikována v mezinárodních impaktovaných časopisech a příspěvcích ve sbornících z prestižních mezinárodních konferencí.

První část přednášky je zaměřena na výzkum čoček s plynule proměnnou ohniskovou vzdáleností. Jsou zde shrnuty nové, originální příspěvky autora k analýze zobrazovacích vlastností aktivních čoček na bázi dvojice kapalin s proměnným tvarem jejich rozhraní a kapalinových membránových čoček s plynule proměnným tvarem povrchu pružné, opticky transparentní membrány. Dále jsou popsány aplikace těchto čoček v primárním optickém návrhu specializovaných optických soustav. Je též stručně zmíněn autorův příspěvek k teoretické analýze tenkých elastických deformovatelných membrán a jejich aplikací pro membránové kapalinové čočky nebo jednoduché deformovatelné zrcadlo. Druhá část přednášky je zaměřena na teoretickou analýzu a použití metod adaptivní optiky v interferometrických systémech pro měření tvaru a kontrolu kvality optických ploch, kde jsou aktivní prvky (deformovatelné zrcadlo nebo fázový modulátor) použity pro adaptivní přizpůsobení tvaru vlnoplochy měřené optické ploše. Tento způsob se jeví jako velmi perspektivní pro konstrukci budoucích přesných optických měřicích metod. V neposlední řadě je potom zmíněna problematika numerické rekonstrukce tvaru vlnoplochy a metod rychlého výpočtu Zernikeových polynomů a jejich derivací, která je velmi důležitá jak při optickém návrhu tak při řízení systémů adaptivní optiky.

Klíčová slova:

Aktivní optika, deformovatelná zrcadla, prostorové modulátory světla, čočky s proměnnou ohniskovou vzdáleností, adaptivní optika, senzor vlnoplochy, analýza vlnoplochy, optické zobrazování, optická metrologie.

Keywords:

Active optics, deformable mirrors, spatial light modulators, tunable-focus lenses, adaptive optics, wavefront sensor, wavefront analysis, optical imaging, optical metrology.

Obsah

Summary	2
Souhrn	3
Klíčová slova	4
Obsah	5
1. Úvod	6
2. Aktivní optické a optoelektronické prvky s proměnnými parametry	8
2.1. Aktivní kapalinové čočky a jejich aplikace	10
2.2. Interferometrie s adaptivní korekcí tvaru vlnoplochy	18
3. Závěr	21
Literatura	23
Ing. Pavel Novák, Ph.D. - životopis	27

1. Úvod

V poslední době dochází k prudkému rozvoji ve výzkumu, vývoji i výrobě nových optických a optoelektronických prvků a soustav [1-31,35-39]. Klasické optické prvky jako jsou například čočky, zrcadla, polarizační prvky, odrazné a dělicí hranoly mají neměnné optické parametry, jež závisí zejména na jejich geometrickém tvaru a indexu lomu. Tyto prvky tedy nemohou definovaně měnit svoje základní parametry a vlastnosti optického záření (polarizační vlastnosti, amplituda, fáze a frekvence optického záření). Proměnnost optických parametrů zobrazovacích optických soustav (ohnisková vzdálenost, zvětšení) může být potom zajištěna tím, že jsou tyto soustavy složeny ze dvou nebo více klasických optických prvků, které se vůči sobě definovaně posouvají. To je např. případ pankratických soustav, které jsou široce využívány v praxi pro aplikace v optických zobrazovacích a měřicích soustavách a přístrojích. Značnou nevýhodou takovýchto soustav s proměnnými charakteristikami je nutnost přesného mechanického posuvu jednotlivých optických členů vůči sobě tak, aby se zajistila proměnnost charakteristik optické soustavy, což klade vysoké požadavky na optomechanickou konstrukci a řízení. U takovýchto optických soustav je mechanická konstrukce relativně komplikovaná a finančně nákladná na výrobu. Také je nelze dosti dobře miniaturizovat, což je v mnoha aplikačních oblastech současný trend vývoje. Rychlost odezvy a změny optických charakteristik těchto optických soustav je často dosti pomalá, což neumožňuje jejich použití pro rychlé dosažení větších dynamických změn parametrů optických soustav.

Oproti klasickým optickým prvkům s neproměnnými optickými parametry se tzv. aktivní optické prvky [1-16] vyznačují možností definované změny optických parametrů, která je v mnoha případech plynulá a velmi rychlá. Je zřejmé, že tyto optické a optoelektronické prvky s proměnnými parametry budou v budoucnu poskytovat stále širší možnosti návrhu netradičních optických soustav, které by principiálně něšlo realizovat s klasickými prvky. Již v současnosti jsou prvky aktivní a adaptivní optiky postupně začleňovány do vybraných zobrazovacích či měřicích optických soustav přístrojů, které tak mohou dosáhnout vyšší užité hodnoty, lepší kvality zobrazení, zjednodušení optomechanické konstrukce, miniaturizace, rychlejší změny optických parametrů a často i snížení výrobních nákladů. Možnost kontrolovaně měnit fázi vlnového pole procházející optickou soustavou pomocí speciálních prvků a

systemů přidává další stupně volnosti v procesu optického návrhu, jež umožňují principiálně konstruovat komplexní optické soustavy s vlastnostmi, které by byly jen obtížně dosažitelné či vůbec nedosažitelné s klasickými optickými prvky s fixními parametry. I když některé zmiňované prvky jsou již komerčně dostupné, teorie návrhu i výrobní technologie jsou v této oblasti stále ještě v počátečních fázích vývoje a je oprávněné očekávat, že jak se postupně tyto prvky budou zdokonalovat a budou i finančně méně náročné, tak bude docházet k jejich výrazně většímu rozšíření v nejrůznějších zobrazovacích i měřicích optických soustavách. S vysokou pravděpodobností budou čím dál více vznikat hybridní optické soustavy, které budou kombinovat použití klasických optických prvků, jejichž technologie výroby je v současnosti téměř perfektně zvládnutá, a speciálních optických a optoelektronických prvků (fázové modulátory, aktivní prvky s proměnnými optickými a geometrickými parametry, adaptivní korektory aberací, řízené polarizační prvky, apod.). Vzhledem k možnosti aktivního řízení zmiňovaných speciálních prvků, budou vlastnosti takových optických soustav jednoduše programovatelné. Začlenění systémů adaptivní optiky [11,12] pro aktivní kompenzaci aberací optických soustav způsobí do budoucna jistou revoluci v konstrukci optických soustav a přístrojů, neboť bude možno prakticky dokonale odstranit aberace. Optomechanická konstrukce optických soustav tak bude moci být méně náročnější na kvalitu použitých optických a mechanických prvků a jejich justáž, jelikož adaptivním korekčním systémem bude možné redukovat aberace celé optické soustavy a získat tak vysoce kvalitní zobrazení.

Autor se dlouhodobě věnuje problematice analýzy, návrhu a vývoje nových specializovaných měřicích a zobrazovacích optických soustav v rámci řešení vědeckovýzkumných projektů základního i aplikovaného výzkumu na pracovišti katedry fyziky Fakulty stavební ČVUT v Praze a ve spolupráci s předním evropským výrobcem optiky fy.Meopta-optika, s.r.o. Významná část autorovy odborné činnosti se zaměřuje v posledních letech zejména na výzkum vlastností prvků aktivní a adaptivní optiky a jejich implementace do optických soustav jak pro zobrazovací, tak pro měřicí účely. Tato přednáška shrnuje a dokumentuje stručně problematiku analýzy, návrhu a aplikace speciálních aktivních optických prvků s proměnnými parametry, kterou se autor v posledních letech intenzivně zabýval.

2. Aktivní optické a optoelektronické prvky s proměnnými parametry

V současnosti dochází k nástupu a rozvoji speciálních optických a optoelektronických prvků [1-12], které umožňují plynule měnit některé svoje parametry (tvar, index lomu, optickou mohutnost, apod.). Tyto prvky mohou být založeny na různých fyzikálních principech. Velká pozornost je věnována jak vývoji nových adaptivních prvků s lepšími parametry, tak i problematice možných praktických aplikací těchto prvků v různých oblastech vědy a techniky [1,2,11-17,22-25,35-39]. Obrovskou výhodou těchto prvků je možnost provádět definované změny parametrů procházejícího nebo odraženého vlnového pole, což umožňuje provádět například korekci aberací optických soustav a aberací způsobených vlivem prostředí v reálném čase. Dále je možné s využitím těchto prvků navrhovat zcela nové typy optických soustav, které by v případě klasických prvků nebylo možné realizovat.

Optické prvky, které umožňují měnit plynule některé své parametry lze realizovat různými způsoby. Při průchodu světla optickým prvkem dochází k jeho interakci s prostředím, ze kterého je tento optický prvek zhotoven. Chceme-li plynule měnit parametry optických prvků, je tedy nutno umět měnit index lomu prostředí, ze kterého je optický prvek zhotoven, nebo měnit tvar jednotlivých ploch optických prvků. Jednou z možností realizace takových prvků jsou deformovatelná zrcadla [6-8,11,12,30,31], která umožňují pomocí piezoelektrických, elektromagnetických, či elektrostatických aktuátorů měnit tvar plochy zrcadla a ovlivňovat tak tvar vlnoplochy vlnového pole od tohoto zrcadla odraženého. Další skupinou prvků, které umožňují plynulou změnu svých parametrů jsou aktivní kapalinové čočky s proměnnou ohniskovou vzdáleností [1-5,18-21]. Tyto mohou být založeny na různých principech. Nejčastěji se využívá membránových kapalinových čoček [1,2,4,19,29], kdy jedna nebo obě plochy takovéto čočky jsou tvořeny pružnou průhlednou elastickou membránou a mezi těmito plochami se nachází transparentní kapalina o vhodných optických vlastnostech (index lomu, disperze), přičemž změnou tlaku kapaliny dochází k řízené změně tvaru povrchů čočky a tedy ke změně ohniskové vzdálenosti této čočky. Jiný používaný způsob realizace kapalinové čočky, je založen na principu elektrosmáčivosti [1-3,5]. Čočka je v tomto případě tvořena dvěma nemísitelnými kapalinami o stejné hustotě, avšak různých elektrických a optických vlastnostech (index lomu, disperze). Změna ohniskové vzdálenosti je dosažena přiloženým elektrickým polem

generovaným vhodně umístěnými elektrodami, jelikož v důsledku přiloženého napětí dojde ke změně úhlu smáčení a tedy ke změně zakřivení rozhraní mezi těmito kapalinami. Jinou významnou skupinou prvků s proměnnými parametry jsou optické prvky na bázi tekutých krystalů, pomocí nichž lze ovlivňovat amplitudu a fázi jimi procházejícího nebo od nich odraženého vlnového pole [9-12].

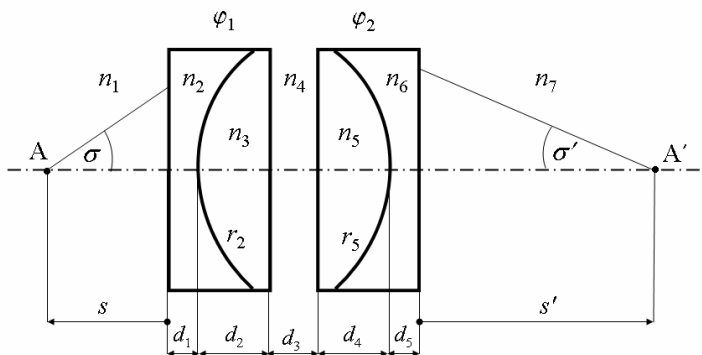
Problematika optických prvků s proměnnými optickými charakteristikami se začíná v poslední době velmi intenzivně rozvíjet neboť tyto prvky mohou najít širokou oblast uplatnění v mnoha oblastech vědy, techniky a biomedicíny jak ve speciálních přístrojích, tak i v běžném životě jako například brýlové čočky s plynule měnitelnou optickou mohutností, objektivy digitálních fotoaparátů v mobilních telefonech, objektivy endoskopů v medicínských aplikacích, laserové skenery, apod. [1,2,12-16]. Jednou z významných aplikačních oblastí těchto prvků jsou také systémy tzv. adaptivní optiky [11,12], které umožňují v reálném čase adaptivně korigovat vliv aberací způsobených např. optickou soustavou, pozorovaným objektem či prostředím, ve kterém probíhá zobrazovací či měřicí proces. Různé klasické zobrazovací metody jsou tak v současnosti modifikovány o vybavení adaptivní optikou pro zlepšení jejich vlastností [12-16] a do budoucna lze očekávat další rozšiřování těchto adaptivních systémů i do běžné optiky. Kromě výše zmíněné aplikace aktivních prvků v systémech adaptivní optiky pro korekci aberací existuje celá řada dalších možností využití těchto prvků. Jednokanálové optické prvky jako jsou čočky s plynule měnitelnou ohniskovou vzdáleností lze využít pro konstrukci nových optických soustav tvořených buď čistě těmito prvky nebo pro hybridní optické soustavy tvořené kombinací klasických optických prvků a těchto čoček [15-29]. Takovéto optické soustavy mohou potom mít zcela nové vlastnosti, které jsou nerealizovatelné v případě použití klasických optických prvků. Například můžeme měnit polohu předmětové roviny (tj. roviny, na kterou "zaostřujeme" optickou soustavu), přičemž daná optická soustava nemusí měnit svoji polohu ani se nemusí žádný člen této optické soustavy pohybovat. Další podstatnou výhodou je to, že rychlost změny "zaostřovací roviny" může být velmi vysoká. Tyto vlastnosti hybridních optických soustav naleznou v budoucnu široké uplatnění v zobrazovacích systémech i v oblasti laserové a měřicí techniky. Jak je z předcházejícího patrné, je oblast použití hybridních optických soustav velmi široká.

2.1. Aktivní kapalinové čočky a jejich aplikace

V rámci výzkumu prováděného na pracovišti autora byla problematika aktivních kapalinových čoček s plynule měnitelnou ohniskovou vzdáleností a jejich aplikací při návrhu optických soustav poměrně intenzivně zkoumána. V rámci vědeckovýzkumných projektů, jichž byl autor řešitelem nebo se na nich podílel, byla analyzována možnost konstrukce nových optických soustav založených na čočkách s proměnnou ohniskovou vzdáleností.

Při modelování vlastností čoček byly uvažovány jak modely již komerčně dostupných kapalinových čoček Varioptic Arctic 416 [5] resp. Optotune EL-10-30 [4], které jsou na pracovišti navrhovatele k dispozici, tak i obecné modely čoček založených na deformaci pružných transparentních membrán nebo tvaru rozhraní mezi dvěma nemísitelnými kapalinami. Problematika aberací a zobrazovacích vlastností těchto čoček byla modelována a rozpracována teoreticky v několika pracích [17,18,20,21,26-29]. V rámci práce [17] byla navržena metoda pro výpočet aberací třetího řádu tenké čočky s plynule měnitelnou ohniskovou vzdáleností. Analýza je provedena pro model čočky na principu elektrosmáčivosti, která je tvořena dvěma nemísitelnými kapalinami s různými elektrickými a optickými vlastnostmi (index lomu, disperze), jež jsou umístěny mezi dvěma skleněnými deskami. Byly odvozeny nové vztahy pro výpočet aberací třetího řádu takovéto čočky, které lze vyjádřit pomocí zavedených parametrů, jež závisí pouze na indexu lomu jednotlivých kapalin, ze kterých je čočka tvořena a nezávisí na lámavosti, poloze a velikosti předmětu či poloze vstupní pupily. Tyto parametry jsou tedy specifické pro danou čočku. Celkové aberace třetího řádu soustavy složené z několika takových čoček lze potom jednoduše určit jako součet aberačních koeficientů třetího řádu pro jednotlivé čočky. Bylo ukázáno, že jednoduchá kapalinová čočka má poměrně velké aberace. Proto byly zkoumány kombinace několika jednoduchých kapalinových čoček, tzv. zobecněné kapalinové čočky, s cílem snížení či úplné korekce některých primárních aberací takovéto složené optické soustavy [18]. S využitím zavedeného popisu aberací dané kapalinové čočky byla provedena analýza vlastností zobecněných kapalinových čoček (obr.1), které jsou tvořeny dvěma či více jednoduchými kapalinovými čočkami a bylo ukázáno, že takovéto optické prvky umožňují vhodnou volbou parametrů (lámavosti φ_i , poloměry křivosti r_i jednotlivých čoček) korigovat některé typy aberací. Byly odvozeny vztahy pro výpočet parametrů (lámavost, poloměry

křivosti) jednotlivých jednoduchých čoček, z nichž je zobecněná kapalinová čočka tvořena, které umožňují pro požadovanou ohniskovou vzdálenost minimalizovat sférickou aberaci této zobecněné čočky. Dále byly odvozeny vztahy pro výpočet parametrů optické soustavy složené ze tří jednoduchých kapalinových čoček, která umožňuje korigovat sférickou aberaci a komu. Kombinací většího počtu jednoduchých čoček lze principiálně získat soustavy s rostoucí možností korekce jednotlivých typů aberací. Jak již bylo uvedeno, v případě tří jednoduchých kapalinových čoček v kontaktu lze zkorigovat sférickou aberaci a komu. Daná optická soustava se potom chová jako obdoba klasického tmeleného dubletu, ale její výhodou je, že změnou poloměrů křivosti rozhraní mezi kapalinami lze docílit plynulé změny výsledné ohniskové vzdálenosti při zachování korekčního stavu, což u klasického dubletu není možné.

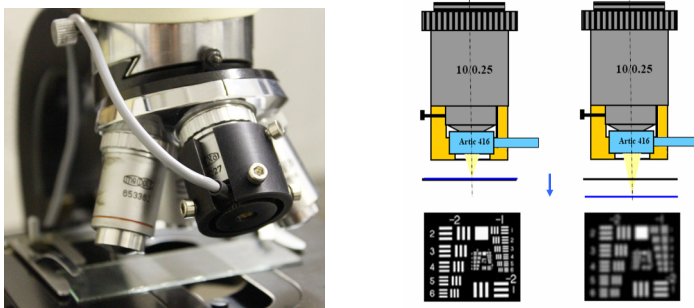


Obr. 1 Schéma zobecněné čočky složené ze dvou kapalinových čoček

Provedená analýza [18] pomocí zavedeného popisu aberací v prostoru třetího řádu umožňuje provést počáteční návrh takových složených soustav. Tyto soustavy lze potom s výhodou využít při konstrukci komplexnějších optických systémů jako analogie ke klasickým optickým soustavám, ale s možností plynulé změny ohniskové vzdálenosti. Na základě provedených analýz byla navržena konstrukce zobecněné dvoukomorové čočky, která je chráněna užitným vzorem č. 25953 [19]. Autor se též zabýval problematikou měření optických parametrů kapalinových čoček.

Mimo monochromatických aberací byly zkoumány i zobrazovací vlastnosti aktivních kapalinových čoček při použití polychromatického záření, kde se projeví závislost vlnové aberace na vlnové délce. V pracích [20,21] byla daná problematika rozpracována v rámci teorie aberací třetího řádu a byly odvozeny vztahy pro výpočet podélné a příčné chromatické aberace. Dále byla ukázána závislost Seidelových aberačních koeficientů na vlnové délce. S použitím odvozených vztahů je možné při specifikované změně vlnové délky vypočítat, jakým způsobem se změní aberace dané optické soustavy.

Jednou z aplikací, kterou se autor podrobně zabýval, je možnost využití kapalinových čoček s proměnnou ohniskovou vzdáleností v optické mikroskopii. Vzhledem k tomu, že takovéto čočky umožňují velmi rychlou změnu ohniskové vzdálenosti s frekvencí v řádu desítek až stovek Hz, jeví se takové prvky jako vhodné pro rychlé přestřování. Autor se zabýval možností aplikace kapalinových čoček pro plynulou změnu zaostření a změnu hloubky ostrosti optického mikroskopu bez vzájemného mechanického pohybu jeho jednotlivých částí [22]. Při reálném využití v mikroskopii je možné postupovat dvěma způsoby – buď je možné čočku zabudovat do optické cesty za mikroskopový objektiv nebo ji umístit před frontální čočku daného mikroskopového objektivu (obr.2).

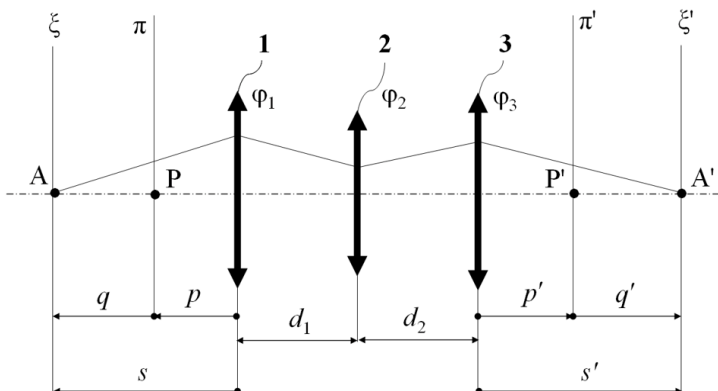


Obr. 2 Funkční vzorek předsádkového adaptéru pro fokusaci v mikroskopii

Vzhledem k vlastnostem kapalinových čoček dostupných na pracovišti autora byla provedena analýza jejich využití jako předsádkové fokusační čočky, která se pomocí mechanického adaptéru připevní na mikroskopový objektiv. Výsledky teoretické analýzy zobrazovacích vlastností takové hybridní optické

soustavy byly publikovány v práci [22]. Na základě provedené analýzy byl poté navržen a vyroben funkční vzorek adaptéru pro aktivní fokusaci v mikroskopii (obr.2). Čočka je ovládána softwarově pomocí kontroleru, který byl zkonstruován ve spolupráci s Meopta-Optika s.r.o. Tento systém lze použít pro rychlé přestřování vzorku v ose z.

Další z praktických aplikací aktivních čoček s plynule měnitelnou ohniskovou vzdáleností je konstrukce pankratických optických systémů (optických systémů s proměnnou ohniskovou vzdáleností), které by umožňovaly změnu ohniskové vzdálenosti a ostření této soustavy bez vzájemného pohybu jednotlivých členů optické soustavy. V autorově práci [17] je provedena analýza tohoto problému a jsou zde odvozeny vztahy pro primární návrh dvoučlenného pankratického objektivu s využitím čoček s plynule měnitelnou ohniskovou vzdáleností. Změna ohniskové vzdálenosti tohoto objektivu je zajištěna změnou lámavosti jednotlivých optických členů na rozdíl od klasických pankratických soustav, kde je tato změna realizována vzájemným pohybem jednotlivých členů dané optické soustavy. Výhodou takového systému jsou potom nižší nároky na optomechanickou konstrukci soustavy neboť odpadá potřeba velmi přesného vzájemného posunu jednotlivých členů objektivu. Na základě vlastností aktivních čoček byl proveden koncepční primární návrh objektivu s proměnnou ohniskovou vzdáleností a neměnnou pozicí pupil, předměťové a obrazové roviny. Současné klasické objektivy mohou této vlastnosti dosáhnout pouze specifickým návrhem změny poloh jednotlivých členů optické soustavy. Uvedené nevýhody nutnosti mechanického posuvu optických členů a složité optomechanické konstrukce odstraňuje objektiv s proměnnou ohniskovou vzdáleností, který byl patentován [23]. Tento objektiv se skládá z optických členů s plynule proměnnou ohniskovou vzdáleností, které se při změně zvětšení neposouvají a zaujímají pevné místo v prostoru. Pozice jeho předměťové a obrazové roviny i roviny vstupní a výstupní pupil zůstává neměnná pro různá zvětšení. Jedná se tedy o dvojnásobně konjugovaný objektiv. Optická soustava objektivu je tvořena třemi optickými členy, které leží na společné optické ose (obr.3). Vzdálenost s předměťové roviny od prvního optického členu, vzdálenost s' obrazové roviny od třetího optického členu, vzdálenost p roviny vstupní pupil od prvního členu a vzdálenost p' roviny výstupní pupil od třetího členu jsou pro zvolený rozsah hodnot příčného zvětšení objektivu $m \in [m_{\min}, m_{\max}]$ konstantní.



Obr. 3 Tříčlenný objektiv s proměnnou ohniskovou vzdáleností a neměnnou pozicí vstupní a výstupní pupily a též předmětové i obrazové roviny - schéma

Pro lámavosti φ_1 , φ_2 , φ_3 jednotlivých optických členů objektivu pro různá příčná zvětšení m a celkovou lámavost objektivu φ byly odvozeny vztahy:

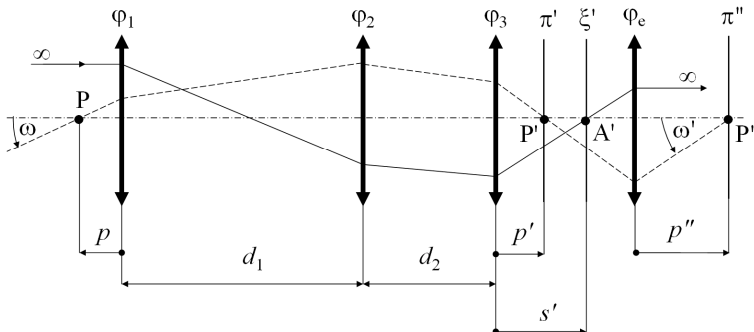
$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{m(1 - \varphi_3 d_2 + (s - d_1)(\varphi_2 + \varphi_3 - \varphi_2 \varphi_3 d_2)) - 1}{ms(\varphi_3 d_1 - (1 - \varphi_3 d_2)(1 - \varphi_2 d_1))}, \\ \varphi_2 &= \frac{(d_1 + d_2)}{d_1 d_2} + \frac{ps'}{d_1 d_2 m(p - s)} + \frac{p'sm}{d_1 d_2 (s' - p')}, \\ \varphi_3 &= \frac{(s' + d_2)(1 - \varphi_2 d_1) + d_1 - ms}{s'(d_1 + d_2(1 - \varphi_2 d_1))}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\varphi = (\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) - \varphi_1 \varphi_2 d_1 - \varphi_2 \varphi_3 d_2 - \varphi_1 \varphi_3 (d_1 + d_2) + \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 d_1 d_2.$$

Z výše uvedeného vyplývá, že změna ohniskové vzdálenosti se realizuje pomocí optických členů, například na bázi kapalinových mechanických či elektroaktivních čoček, jejichž ohnisková vzdálenost se dá plynule měnit bez změny jejich pozice či geometrického uspořádání. Optická soustava podle uvedeného návrhu může nalézt uplatnění zejména v oblasti mikroskopie, optických systémech pro analýzu struktury objektů využívajících metodu

fázového kontrastu a metodu temného pole, v oftalmologických přístrojích a optických soustavách puškohledů.

Jiným navrženým řešením, vycházejícím z využití čoček s proměnnou ohniskovou vzdáleností, je principiální návrh soustavy puškohledu s proměnným zvětšením využívajícím takovéto aktivní čočky. Při změně zvětšení u klasických typů puškohledů dochází také k tomu, že poloha výstupní pupily za okulárem při změně zvětšení není konstantní a v určitých mezích se mění. Tento nedostatek odstraňuje návrh puškohledu, který byl patentován [24,25], kde nedochází k mechanickým pohybům jednotlivých členů. Schéma optické soustavy takového puškohledu je znázorněno na obr.4 (tři aktivní členy s plynule proměnnou lámavostí $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ a okulár s lámavostí φ_e).



Obr.4 Schéma čtyřčlenné optické soustavy puškohledu

Patentově chráněná optická soustava puškohledu se skládá z optických členů s plynule proměnnou ohniskovou vzdáleností, které se při změně zvětšení neposouvají a zaujímají pevné místo v prostoru, přičemž pozice roviny výstupní pupily a obrazové roviny zůstává neměnná pro různá zvětšení. Soustava puškohledu je tvořena třemi optickými členy a okulárem ležícími na společné optické ose. Optické členy jsou tvořeny jednou nebo více čočkami, z nichž alespoň jedna je čočka s plynule proměnnou ohniskovou vzdáleností. Vzdálenost p' roviny π' obrazu vstupní pupily, vytvořené těmito třemi optickými členy od třetího optického členu, jakož i vzdálenost p'' roviny π'' výstupní pupily od okuláru a vzdálenost s' obrazové roviny ξ' od třetího

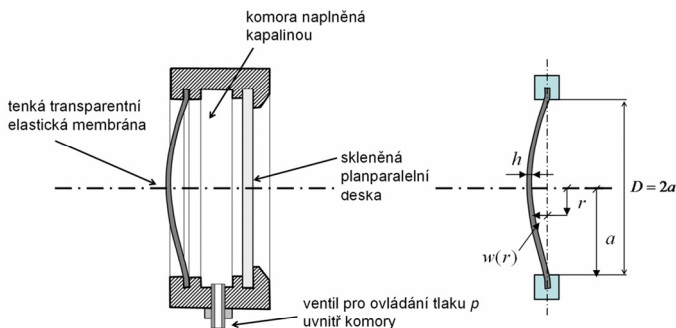
optického členu, jsou pro zvolený rozsah hodnot zvětšení $\Gamma \in [\Gamma_{\min}, \Gamma_{\max}]$ puškohledu konstantní. Zároveň je také konstantní i vzdálenost d_1 mezi prvním a druhým optickým členem a vzdálenost d_2 mezi druhým a třetím optickým členem. Optické mohutnosti $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ jednotlivých optických členů puškohledu pro různá zvolená zvětšení Γ jsou poté dány vztahy:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \frac{1}{d_1} + \frac{\varphi(s' - p')(d_2 + \varphi d_1 s')}{d_1 [p\varphi^2 s'(p' - s') + p']}, \\ \varphi_2 &= \frac{d_1 + d_2 - \varphi p s' - p' / \varphi (p' - s')}{d_1 d_2}, \\ \varphi_3 &= \frac{1}{d_2} + \frac{d_2 + \varphi(s' - p')(d_1 - \varphi d_2 p)}{d_2 [p\varphi^2 s'(p' - s') + p']},\end{aligned}\quad (2)$$

kde p je vzdálenost středu vstupní pupily puškohledu od prvního optického členu a φ je celková optická mohutnost soustavy tří optických členů, která je pro zvolené zvětšení Γ puškohledu a pro optickou mohutnost φ_e použitého okuláru dána vztahem $\varphi = -\varphi_e / \Gamma$. Tímto řešením je též zjednodušena optomechanická konstrukce, může být snížena celková délka puškohledu a též je principiálně možno dosáhnout větších rozsahů zvětšení.

V poslední době se autor též podílel na řešení grantu GA13-31765S (*Aktivní membránové prvky na bázi kapalin*), který je zaměřený na teoretickou analýzu a aplikace membránových kapalinových čoček. V rámci této oblasti byla provedena základní analýza membránových kapalinových čoček. Z teorie pružnosti byl odvozen tvar membrány zatížené rovnoměrným tlakem a bylo ukázáno, že pro nepřilíš velké deformace membrány lze tvar plochy aproximovat paraboloidem. Následně byla provedena analýza zobrazení pomocí membránové čočky s dvěma optickými povrchy o tvaru rotačního paraboloidu. S využitím teorie aberací třetího řádu byla provedena analýza aberací a bylo ukázáno, že u čočky s paraboloidálními plochami je možné korigovat sférickou aberaci třetího řádu, což v případě klasických čoček se sférickými povrchy není možné. Tato analýza byla publikována v pracích [26-28]. Dále se autor zaměřuje na analýzu elastického chování tenkých pružných membrán při velkých průhybech. V tomto případě je popis této problematiky složitější a diferenciální rovnice popisující průhyb membrány je nelineární.

V rámci řešení uvedeného výzkumného projektu byla odvozena zobecněná nelineární diferenciální rovnice pro velké deformace po okraji pevně upnuté dokonale pružné membrány kruhového tvaru (obr.5).



Obr.5 Schéma modelu membrány kapalinové membránové čočky

Pro řešení této nelineární rovnice byla navržena metoda s pomocí rozvoje řešení v řadu a technik matematické optimalizace. Tato problematika byla autorem publikována v práci [29] a aplikována na analýzu zobrazovacích vlastností membránových kapalinových čoček.

V rámci řešení grantového projektu GP202/09/P553 (*Analýza optických prvků s proměnnými charakteristikami a jejich možné aplikace*) se autor mimo jiného zabýval možnostmi použití jednoduchého deformovatelného zrcadla fungujícího na bázi změny tlaku plynu či kapaliny v komoře za zrcadlem. Takovéto zrcadlo je určeno pro kompenzaci rotačně symetrických vlnoploch. Jedno z možných využití je např. v oblasti korekce aberací a fokusace laserového svazku v laserových technologiích (řezání, gravírování, povrchové zušlechťování apod.). Byla provedena teoretická analýza vlastností takovéhoho typu zrcadla a byly odvozeny zobecněné vztahy popisující malé deformace uvažovaného zrcadla kruhového tvaru, které zohledňují konečnou tloušťku elastické desky tvořící povrch zrcadla [30,31]. V práci [31] byl odvozen vztah pro výpočet tlaku, který zajistí optimální korekční stav z hlediska Strehlovy definice. Dále jsou v publikaci uvedeny vztahy umožňující odhadnout rozsah aberací, které je zrcadlo schopné korigovat s určitou požadovanou tolerancí a je

odvozen vztah pro stanovení tolerance na hodnotu tlaku, která zajistí požadovanou korekci. Výsledky této práce lze využít při návrhu, konstrukci a řízení takového deformovatelného zrcadla.

2.2. Interferometrie s adaptivní korekcí tvaru vlnoplochy

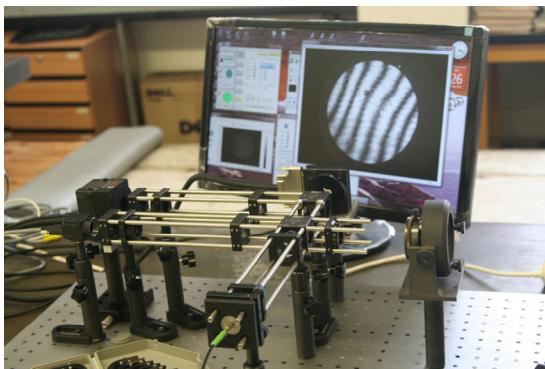
Měření tvaru optických ploch je jednou ze základních úloh kontroly optické výroby. V praxi se pro měření tvaru optických ploch, např. ploch čoček a zrcadel, využívají rozličné metody založené na odlišných fyzikálních principech [32-34]. Tyto metody umožňují kvantitativně určit odchylky testované optické plochy od jejího nominálního tvaru, který je dán výkresovou dokumentací. Pro kontrolu tvaru optických ploch bylo v minulosti vyvinuto velké množství metod, avšak je nutno poznamenat, že obecně neexistuje žádná univerzální metoda pro celé spektrum úloh, které se mohou vyskytnout v praxi [32-34]. Metody optické interferometrie, které nabízí nejvyšší přesnost měření, se staly asi nejvyužívanější skupinou metod pro měření tvaru optických ploch [32-34]. Bezkontaktní interferometrické metody využívají obvykle Fizeauova nebo Twyman-Greenova interferometru a digitálních vyhodnocovacích metod [32,33], které jsou často založeny na modulaci fáze referenčního svazku interferometru. Tyto metody zajišťují dosažení nejvyšší možné přesnosti. Pro měření sférických a rovinných ploch lze tyto metody poměrně jednoduše aplikovat a existuje celá řada firem, které komerčně nabízejí různé varianty interferometrů pro tyto aplikace. Princip těchto vyhodnocovacích metod je založen na srovnávání vlnoplochy odražené od měřené plochy s nějakou referenční vlnoplochou, jejíž tvar dovedeme přesně realizovat. V případě měření rovinných ploch je referenční vlnoplocha rovina, v případě sférické plochy je referenční vlnoplocha sférická plocha. Na rozdíl od rovinné plochy, kdy vystačíme s jednou rovinnou referenční vlnoplochou, musíme v případě sférických ploch použít celou řadu sférických referenčních vlnoploch, kde vždy pro určitý rozsah poloměrů křivosti měřených sférických ploch musíme mít k dispozici velmi přesný a drahý referenční objektiv. Chceme-li tedy mít zařízení pro měření velkého rozsahu poloměrů křivosti, musíme mít celou sadu těchto speciálních objektivů. V případě měření ploch obecného tvaru, které se značně liší od rovinné nebo sférické plochy, nelze výše zmíněné standardní interferometry použít vzhledem k vysokému počtu interferenčních proužků, které již nemohou být správně vzorkovány současnými maticovými

fotodetektory. Problém měření asférických ploch je značně složitější a v praxi se používá několika metod [32-34]. Obvykle je v kombinaci s klasickými interferometry využívána tzv. *nulová optika*, jejíž úlohou je přizpůsobit tvar vlnoplochy co nejlépe měřené ploše. Takováto speciální optika je velmi náročná na návrh a výrobu. Pro každou měřenou asféru je pak nutno navrhnout a vyrobit speciální nulovou optiku, což je jak časově, tak i finančně velmi náročné. Přesnost měření poté též závisí na správné justáži a kalibraci interferometru. Jako nulová optika bývá často užíván syntetický difrakтивní prvek, který je navržen tak, aby generoval vlnoplochu "šitou na míru" měřené ploše. Je tedy nutno, pro každou měřenou plochu vyrobit k ní příslušný difrakтивní prvek. Všechny zmíněné metody jsou málo flexibilní a při přechodu na jiný tvar testované plochy je nutno změnit buď referenční objektiv nebo prvek nulové optiky. Možnosti flexibilnějšího přizpůsobení interferometrických metod nabízí využití prvků adaptivní optiky pro kontrolu a tvarování vlnoplochy v interferometrickém systému [35-39].

V rámci řešení grantového projektu GAP102/10/2377 (*Adaptivní interferometry*), na němž se autor podílel, byla zkoumána problematika možné aplikace adaptivních optických prvků pro využití v interferometrii (závěrečné hodnocení po ukončení projektu: *V - Vynikající výsledky*). V pracích autora [35-39] je navrženo několik variant implementace těchto prvků do systému interferometru, který má tu vlastnost, že v rámci možností rozsahu adaptivního prvku je schopen se přizpůsobovat tvaru měřené plochy a nebude tedy nutno v tak velké míře používat speciální optické prvky "šité na míru" měřené ploše. Pro měření rovinných a sférických ploch místo velmi drahých referenčních objektivů interferometru lze užít jen méně přesně korigované objektivy, složené z jedné nebo několika běžných čoček, jejichž zbytkové aberace se principiálně dají vykompenzovat pomocí adaptivního optického prvku. Speciální a velmi nákladné objektivy interferometru nebo přesná nulová optika může být takovýmto způsobem principiálně nahrazena.

Jak již bylo zmíněno, v současnosti existuje několik možných variant adaptivních optických prvků, které lze použít pro tvarování vlnoplochy. Nejčastěji využívanými jsou deformovatelná zrcadla a prostorové modulátory světla na bázi tekutých krystalů. Membránová deformovatelná zrcadla nabízejí oproti fázovým modulátorům opticky hladký spojitý povrch, což je pro oblast optické metrologie velmi výhodné. V rámci laboratorního testování bylo

použito deformovatelné zrcadlo MiraoTM52-e (Imagine Eyes) [6], jehož tvar byl v uzavřené smyčce kontrolován pomocí Shack-Hartmannova senzoru vlnoplochy HASO (Imagine Optic) [7] (obr.6). Uvedené adaptivní zrcadlo má 52 aktuátorů s maximálním rozsahem posuvu 50 μm a velikost efektivní pupily je 15mm.



Obr. 6 Laboratorní sestava adaptivního interferometru

Ze zaznamenané intenzity detekovaného interferenčního pole lze určit odchylky interferujících vln pomocí metody Fourierovy transformace a softwarově může být dle těchto vypočtených odchylek korigován tvar deformovatelného zrcadla tak, aby např. kompenzovalo zbytkové vady optické soustavy interferometru a použitého objektivu. Na základě provedených měření bylo zjištěno, že přesnost adaptivní kompenzace tvaru vlnoplochy pomocí deformovatelného zrcadla je lepší nežli $\lambda/10$, kde $\lambda = 633 \text{ nm}$ je vlnová délka světla. Pro měření byl použit frekvenčně stabilizovaný He-Ne laser. Hlavní výhodou navrženého adaptivního interferometru je možnost aktivního tvarování referenční vlnoplochy interferometru, což umožňuje měření odchylek různých tvarů optických ploch v rámci rozsahu změn tvaru vlnoplochy daných použitým deformovatelným zrcadlem. V principu je takto možné přizpůsobit tvar vlnoplochy v interferometru různým tvarům optických ploch. Omezení je dáno rozsahem změn tvaru vlnoplochy, které lze realizovat pomocí adaptivního prvku (v našem případě deformovatelného zrcadla). V rámci řešené problematiky byly též navrženy varianty adaptivního nástavce interferometru,

keré umožňují použití adaptivního systému s klasickým dvousvazkovým interferometrem. Tyto varianty jsou chráněny užitným vzorem č.25807 z roku 2013 [39].

V rámci této problematiky se autor též podrobně zabýval numerickou rekonstrukcí tvaru vlnoplochy a popisem tvaru optických ploch pomocí rozvoje v řadu vhodně zvolených báзовých funkcí. V publikaci [40] byla autorem provedena analýza metod pro numerický výpočet Zernikeových polynomů z hlediska rychlosti a numerické stability. Bylo ukázáno, že rekurentní metody výpočtu Zernikeových polynomů jsou výrazně rychlejší a numericky stabilnější nežli přímý výpočet podle analytických vztahů. Dále byly v pracích [41,42] odvozeny rychlé a robustní metody pro výpočet kartézských parciálních derivací Zernikeových polynomů. V další autorově práci [43] bylo navrženo několik dalších metod numerického výpočtu derivací Zernikeových polynomů a byla provedena podrobná srovnávací analýza z hlediska výpočetní náročnosti a numerické stability jednotlivých algoritmů. Na základě této analýzy byly vybrány dva algoritmy, které se jeví pro daný řád polynomu jako nejvýhodnější. Tyto algoritmy lze s výhodou využít pro rychlý výpočet tvaru vlnoplochy měřené Shack-Hartmannovým senzorem vlnoplochy. Další vhodnou aplikací těchto algoritmů je oblast modelování tvaru optických ploch při návrhu optických soustav. Při optimalizaci tvaru asférické plochy s cílem dosáhnou požadovaných zobrazovacích vlastností dané soustavy jsou využívány iterativní metody matematické optimalizace. V rámci těchto metod je opakovaně propočítáváno velké množství paprsků danou optickou soustavou. Proto je vhodné, aby vlastní propočet danou asférickou plochou byl co nejrychlejší. Vyjádříme-li si tvar hledané asférické plochy pomocí Zernikeových polynomů, potom při propočtu paprsku asférickou plochou lze s výhodou využít odvozené rychlé a numericky stabilní vztahy pro výpočet kartézských derivací Zernikeových polynomů v kombinaci s metodou pro rychlý výpočet normály asférické plochy na základě vztahů pro výpočet směrového vektoru dopadajícího a lomeného paprsku popsanych v autorových pracích [44,45].

3. Závěr

V tomto spisu byla stručně shrnuta problematika analýzy, návrhu a aplikace aktivních optických prvků s proměnnými parametry, kterou se autor v

posledních pěti letech intenzivně vědecky zabýval se spolupracovníky na pracovišti katedry fyziky Fakulty stavební ČVUT v Praze při řešení vědeckovýzkumných projektů základního i aplikovaného výzkumu a ve spolupráci s firmou Meopta-optika, s.r.o. v Přerově.

Hlavní přínosy autora k dané problematice spočívají v provedení teoretické analýzy a počítačových simulací zobrazovacích vlastností aktivních prvků (kapalinových čoček a membránových prvků), experimentálním ověření a návrhu jejich možného použití v praktických aplikacích (mikroskopie, pankratické systémy, atd.). Dále v návržení, sestavení a experimentálním ověření laboratorního modelu adaptivního interferometru využívajícího deformovatelného zrcadla a návrhu a analýze nových algoritmů pro rychlý a numericky robustní výpočet Zernikeových polynomů a jejich parciálních derivací. Dosažené autorovy výsledky v těchto oblastech jsou demonstrovány odkazy do seznamu literatury, v němž jsou zahrnuty vybrané autorovy publikace v prestižních impaktovaných časopisech z aplikované optiky a měřicí techniky, články v tuzemských odborných časopisech, průmyslově chráněné výsledky a články ve sbornících z mezinárodních a tuzemských konferencí, kde byla tato problematika autorem prezentována.

Vzhledem k perspektivnosti daného tématu bude autorova vědecká práce v této oblasti dále pokračovat i v příštích letech. Nyní se podílí na výzkumu aktivních membránových prvků na bázi kapalin, jehož cílem je analýza vhodných opticky transparentních materiálů pro membránové prvky ovládané tlakem tekutiny, teoretická analýza a experimentální výzkum deformací tenkých elastických membrán a jejich implementace do membránových prvků jako jsou např. čočky. Po úspěšném ukončení společného projektu aplikovaného výzkumu v oblasti vývoje a průmyslové implementace vysoce přesného měřicího zařízení pro kontrolu tvaru rotačně symetrických asférických ploch (2014, závěrečné hodnocení projektu: *V - vynikající výsledek s mezinárodním uplatněním*) nadále pokračuje intenzivní spolupráce s firmou Meopta-optika, s.r.o. v rámci projektu zaměřeného na výzkum a vývoj nových interferometrických a gradientních metod pro kontrolu tvaru optických ploch a hodnocení kvality zobrazení vyráběných optických soustav a projektu Superachromáty.

Literatura

- [1] Li Guoqiang, Chapter 4 - Adaptive Lens, In: E.Wolf, (Ed), *Progress in Optics*, Elsevier, 2010, vol. 55, s. 199-283.
- [2] Ren H., Wu T.S: *Introduction to Adaptive Lenses*, Hoboken: Wiley, 2012.
- [3] Berge B., Peseux J.: Variable focal lens controlled by an external voltage: An application of electrowetting, *Eur. Phys. J. E.* 2000, vol. 3, no. 2, 159-163.
- [4] <http://www.optotune.com/>
- [5] <http://www.varioptic.com/>
- [6] <http://www.imagine-eyes.com/>
- [7] <http://www.imagine-optic.com/>
- [8] <http://www.okotech.com/>
- [9] <http://www.holoeye.com/>
- [10] <http://www.hamamatsu.com/>
- [11] Tyson R.K.: *Principles of Adaptive Optics*, Boca Raton (FL): CRC Press, 2010.
- [12] Dainty C. (Ed.): *Adaptive Optics for Industry and Medicine: Proceedings of the Sixth International Workshop*, London: Imperial College Press, 2008.
- [13] Novák P., Novák J.: Vybrané moderní aplikace optoelektronických prvků s proměnnými parametry. In Sborník příspěvků 6. konference o matematice a fyzice na VŠ technických s mezinárodní účastí. Brno: Univerzita obrany, 2009, s. 405-413.
- [14] Novák P.: Adaptivní optické systémy v oční optice, optometrii a oftalmologických přístrojích. In: Moderní metody a přístroje v oční optice 2009. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2009, s. 73-85.
- [15] Novák J., Novák P.: Aktivní brýlové čočky pro korekci zraku. *Jemná mechanika a optika*. 2013, roč. 58, č. 2, s. 48-51.
- [16] Novák P., Novák J., Mikš A.: Variable-focus lenses and their applications. In 7. konference o matematice a fyzice na vysokých školách technických s mezinárodní účastí: Sborník příspěvků, část 2 - fyzika. . Brno: Univerzita obrany, 2011, vol. 2, p. 91-96.

- [17] Mikš A., Novák J., Novák P.: Zoom systems with tunable-focus lenses. In Proceedings of SPIE Vol. 7717. Bellingham: SPIE, 2010, p. 77171K-1-77171K-11.
- [18] Mikš A., Novák J., Novák P.: Generalized refractive tunable-focus lens and its imaging characteristics. *Optics Express*. 2010, vol. 18, no. 9, p. 9034-9047.
- [19] Mikš A., Novák J., Novák P.: Kapalinová čočka. Úřad průmyslového vlastnictví, Užité vzor č.25953. 2013-10-14.
- [20] Mikš A., Novák J., Novák P.: Monochromatic and chromatic aberrations of the thin refractive variable-focus lens. In Proceedings of SPIE Vol. 8167. Bellingham: SPIE, 2011, p. 81671P-1-81671P-7.
- [21] Mikš A., Novák J., Novák P.: Chromatic aberrations of thin refractive variable-focus lens. *Optics Communications*. 2012, vol. 285, no. 10-11, p. 2506-2509.
- [22] Novák P., Novák J., Mikš A.: Analysis and application of refractive variable-focus lenses in optical microscopy. In Proceedings of SPIE Vol. 8083. Bellingham: SPIE, 2011, p. 808316-1-808316-9.
- [23] Mikš A., Novák J., Novák P.: Objektiv s proměnnou ohniskovou vzdáleností. Úřad průmyslového vlastnictví, Patent č.304175. 23.10.2013.
- [24] Mikš, A. - Novák, J. - Novák, P.: Optická soustava puškohledu s proměnným zvětšením a konstantní polohou výstupní pupily využívající aktivních čoček s proměnnou ohniskovou vzdáleností. *Jemná mechanika a optika*. 2014, roč. 59, č. 3, s. 67-69.
- [25] Mikš A., Novák J., Novák P.: Puškohled s proměnným zvětšením. Úřad průmyslového vlastnictví, Patent č.304284. 2014-01-02.
- [26] Novák J., Novák P., Mikš A.: Analysis of design parameters and imaging properties of membrane fluidic lenses. In 3rd International Topical Meeting on Optical Sensing and Artificial Vision OSAV' 2012. Melville (NY): AIP Publishing LLC, 2013, p. 197-204.
- [27] Mikš A., Novák J., Novák P., Pokorný, P.: Imaging properties of the lenses with paraboloidal surfaces. *Jemná mechanika a optika*. 2012, vol. 57, no. 11-12, p. 330-332.

- [28] Mikš A., Novák J., Novák P.: Algebraic and numerical analysis of imaging properties of thin tunable-focus fluidic membrane lenses with parabolic surfaces. *Applied Optics*. 2013, vol. 52, no. 10, p. 2136-2144.
- [29] Mikš A., Novák, P.: Calculation of a surface shape of a pressure actuated membrane liquid lens, *Optics and Lasers in Engineering*. 2014, vol. 58, 60-66.
- [30] Mikš A., Novák J., Novák P.: Modeling of Adaptive Compensation of Aberrations of Optical System Using Deformable Mirror. In Proceedings of SPIE Vol. 7390. Bellingham: SPIE, 2009, p. 739010-1-739010-10.
- [31] Mikš A., Novák J., Novák P.: Theoretical analysis of imaging properties of a pressure-actuated deformable mirror for adaptive compensation of rotationally symmetrical wavefronts. *Optics and Lasers in Engineering*. 2011, vol. 49, no. 11, p. 1268-1273.
- [32] Dorband B., Muller H., Gross H.: Handbook of optical systems. Volume 5: Metrology of optical components and systems, Berlin: Wiley-VCH, 2012.
- [33] Malacara D., (ed.): Optical shop testing (3rd ed.), Hoboken: John Wiley and Sons, 2007.
- [34] Leach R.: Optical Measurement of Surface Topography. Berlin: Springer, 2011.
- [35] Mikš A., Novák J., Novák P.: Adaptive two-beam interferometer for testing optical surfaces. In Proceedings of SPIE Vol. 8169. Bellingham: SPIE, 2011, p. 81690Y-1-81690Y-7.
- [36] Novák J., Novák P., Mikš A.: Interferometer with Deformable Mirror for Adaptive Testing of Flat, Spherical and Aspheric Optical Surfaces. In OPTICAL MEASUREMENT TECHNIQUES FOR STRUCTURES & SYSTEMS2 (OPTIMESS2012). Maastricht: Shaker Publishing BV, 2013, p. 261-272.
- [37] Novák J., Novák P., Mikš, A.: Analysis of Interferometer With Adaptive Reference Wave. In 3rd International Topical Meeting on Optical Sensing and Artificial Vision OSAV' 2012. Melville (NY): AIP Publishing LLC, 2013, p. 115-122.

- [38] Mikš A., Novák J., Novák P.: Adaptivní dvousvazkový interferometr pro měření optických ploch. *Jemná mechanika a optika*. 2013, roč. 58, č. 2, s. 59-62.
- [39] Mikš A., Novák J., Novák P.: Adaptivní nástavec interferometru. Úřad průmyslového vlastnictví, Užité vzor č.25807. 2013-08-27.
- [40] Novák P.: Metody numerického výpočtu Zernikeových polynomů. *Jemná mechanika a optika*. 2013, roč. 58, č. 4, s. 108-111.
- [41] Novák P.: Využití rekurentních metod pro numerický výpočet derivací Zernikeových polynomů. *Jemná mechanika a optika*. 2013, roč. 58, č. 7-8, s. 208-210.
- [42] Novák P., Novák J.: Efficient and stable numerical method for evaluation of Zernike polynomials and their Cartesian derivatives. In Proceedings of SPIE Vol. 8789. Bellingham: SPIE, 2013, p. 878913-1-878913-8.
- [43] Novák P., Novák J., Mikš A.: Fast and robust computation of Cartesian derivatives of Zernike polynomials. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, vol. 52, p. 7-12.
- [44] Mikš A., Novák P.: Determination of unit normal vectors of aspherical surfaces given unit directional vectors of incoming and outgoing rays: comment. *Journal of the Optical Society of America A*. 2012, vol. 29, no. 7, p. 1356-1357.
- [45] Mikš A., Novák P., Novák J.: Calculation of aberration and direction of a normal to aspherical surface. *Optics and Laser Technology*. 2013, vol. 45, p. 708-712.

Ing. Pavel Novák, Ph.D. - životopis

Narozen: 14.4.1980, Kladno

Adresa pracoviště: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra fyziky, Thákurova 7, 166 29 Praha, tel: (+420) 224357919,

E-mail: pavel.novak.3@fsv.cvut.cz, www: <http://departments.fsv.cvut.cz/aog/>

Dosažené odborné vzdělání

2004 - 2007: postgraduální studium - obor Fyzikální a materiálové inženýrství
ČVUT v Praze, Fakulta stavební, státní doktorská zkouška
složena s vyznamenáním

1998 - 2004: absolvoval inženýrské studium ČVUT v Praze, Fakulta stavební,
promoval s vyznamenáním

Přehled pedagogické a odborné praxe

2007 - dosud: odborný asistent ČVUT v Praze, Fakulta stavební

2004 - dosud: poradenská a výzkumná činnost - Meopta-optika, s.r.o.

2005 - 2007: asistent ČVUT v Praze, Fakulta stavební

2002 - 2005: studentská vědecká síla na katedře fyziky FSv ČVUT v Praze

*přednášení v magisterském a bakalářském studiu na Fakultě stavební
ČVUT v Praze (od r.2008), vedení cvičení a seminářů (od r.2002), školitel
doktorandů a vedoucí diplomových a bakalářských prací*

Členství v odborných organizacích

Member of SPIE – The International Society of Optical Engineering (USA),
Member of EOS - European Optical Society, Member of Institute of Physics
(Velká Británie), člen České společnosti pro vědeckou kinematografii, člen
České a Slovenské společnosti pro fotoniku, člen České metrologické
společnosti

Ocenění

2008 *Cena rektora ČVUT II.stupně* za vynikající doktorskou práci za rok 2007

2007 *Cena Josefa Hlávky* pro nejlepší studenty a absolventy VŠ

2005 *Cena Josefa Hlávky* pro nejlepší studenty a absolventy VŠ

Publikace, aplikované výstupy, pořádání konferencí

- jako autor či spoluautor publikoval více než 120 odborných prací v časopisech a sbornících z mezinárodních a tuzemských konferencí, *h-index*: 5 (WoS), *h-index*: 4 (bez autocitací)
- z toho 27 článků v impaktovaných mezinárodních časopisech
- spoluautor 1 skriptu a 1 kapitoly v mezinárodní odborné monografii
- spoluautor 4 patentů a 5 užžitých vzorů
- prezentace vědeckých výsledků na více než 20 mezinárodních odborných konferencích a 20 tuzemských odborných konferencí
- spoluorganizátor a editor sborníků pravidelně pořádaných konferencí a odborných seminářů: *Physical and Material Engineering* (2005, 2008), *Optický seminář* (2006), *Digitální fotografie a analýza obrazu* (2012) a *Aplikovaná optika a mikroskopie* (2007, 2008, 2010, 2012, 2013)

Výzkumná specializace

- optická metrologie pro vědecké a průmyslové aplikace, optická interferometrie, optické metody měření topografie povrchů, vyhodnocování a rekonstrukce fáze vlnového pole v optice, aktivní a adaptivní optika, teorie optického zobrazení, teorie aberací, analýza a syntéza optických soustav, nedestruktivní defektoskopie, počítačové modelování v optice

Granty a výzkumné projekty

- řešitel tří externích vědeckovýzkumných projektů (GAČR, FRVŠ)
- řešitel tří interních grantů ČVUT
- jmenovaný spolupracovník na deseti grantových projektech (GAČR, MŠMT, MPO, FRVŠ, SGS ČVUT)
- 2004 - dosud: spolupráce s fy. Meopta-optika, s.r.o., člen vědeckovýzkumných týmů (nesouvislá spolupráce na několika projektech)
- 2013 - dosud: spolupráce s fy. Meopta-optika, s.r.o., vedení vědeckovýzkumných týmů