

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

Přírodovědecká fakulta



DISERTAČNÍ PRÁCE

Stanislav Michal

2023

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

Přírodovědecká fakulta



Mgr. Stanislav Michal

**SWING ARM PROFILOMETR PRO MĚŘENÍ TVARU
ROZSÁHLÝCH OPTICKÝCH PLOCH**

Katedra experimentální fyziky

Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu
Akademie věd České republiky

Školitel: prof. RNDr. Miroslav Hrabovský, DrSc.

Studijní program: Fyzika

Obor: Aplikovaná fyzika

Forma studia: prezenční

Olomouc 2023

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně pod vedením prof. RNDr. Miroslava Hrabovského, DrSc., za použití literatury uvedené v závěru práce.

V Olomouci dne

.....

Mgr. Stanislav Michal

Děkuji svému školiteli prof. RNDr. Miroslavu Hrabovskému, DrSc. za studijní a pracovní podmínky, které mi vytvořil, za odborné vedení, podporu a pomoc, kterou mi během studia poskytoval.

Rád bych dále poděkoval RNDr. Petru Schovánkovi za odborné konzultace z oblasti optické technologie a metrologie. Mé poděkování je určeno i dalším blízkým spolupracovníkům, jmenovitě Mgr. Miroslavu Pechovi, Ph.D., Ing. Petru Buchníčkovi, Ing. Martinu Kittlerovi a Ing. Jaromíru Křepelkovi, CSc. za vytvoření příjemného a podnětného pracovního prostředí a za pomoc s technickými problémy. Děkuji také své rodině a přítelkyni za velkou podporu během studia.

Tato práce vznikla za podpory interního grantu Univerzity Palackého č. IGA_PrF_2022_004 a projektu Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/17_049/0008422.

Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora:	Mgr. Stanislav Michal
Název práce:	Swing arm profilometr pro měření tvaru rozsáhlých optických ploch
Typ práce:	disertační
Pracoviště:	Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky
Vedoucí práce:	prof. RNDr. Miroslav Hrabovský, DrSc.
Rok obhajoby práce:	2023
Počet stran:	149 (včetně příloh)
Jazyk:	český

Abstrakt:

Tato práce se věnuje hodnocení tvaru rozsáhlých optických povrchů. V úvodní, teoretické části práce, je zaveden pojem velkoplošné optické díly, jsou představeny nejčastější technologie jejich výroby a také nejběžněji využívané metody kontroly tvaru jejich funkčních ploch. Jednou z možností měření tvaru rozsáhlých optických ploch je metoda swing arm profilometrie (SAP), popsána ve stěžejní části práce. Kromě teoretického rozboru metody je na prototypu zařízení Zeeko SAP detailně vysvětlena funkce tohoto typu zařízení. Zvláštní pozornost je věnována odhaleným nedostatkům stávajícího řešení a navrženým a realizovaným úpravám. Tyto úpravy zahrnují mechanická vylepšení, výměnu klíčových komponent a zavedení nových postupů justáže zařízení před startem automatické měřicí procedury. Jedna z úprav vedla k podání mezinárodní patentové PCT přihlášky. Vlastnosti zařízení Zeeko SAP po provedených úpravách byly ověřeny měřením několika různých vzorků a srovnáním dosažených výsledků s měřením na dalších čtyřech nezávislých měřicích zařízeních.

Klíčová slova:

Swing arm profilometr, interferometr, profilometr, bezkontaktní interferometrická sonda, stitching, tvar povrchu, optický povrch, optické zrcadlo.

Bibliographical identification

Author's first name and surname:	Mgr. Stanislav Michal
Title:	Swing arm profilometer for measuring the shape of large optical surfaces
Type of thesis:	doctoral
Department:	Joint Laboratory of Optics of Palacky University and Institute of Physics of the Czech Academy of Sciences
Supervisor:	prof. RNDr. Miroslav Hrabovský, DrSc.
Year of presentation:	2023
Number of pages:	149 (including attachments)
Language:	Czech

Abstract:

This thesis is focused on the large-scale optical surface shape evaluation. The large-scale optical parts definition is introduced, the most common technologies of their production are presented, as well as the most widely used methods of their functional surface shape inspecting, in the initial theoretical part of the thesis. One of the possibilities of the large optical surface shape measuring is the swing arm profilometer (SAP) method, described in the central part of dissertation. In addition to theoretical analysis of this method, this type of function is explained in detail using a prototype Zeeko SAP machine. Special attention is paid to the revealed weaknesses of original solution and the proposed and implemented modifications. These modifications include mechanical improvements, key components replacement and new device adjustment procedures implementation before the machine automatic measurement procedure start. One of the modifications led into an international PCT application submission. The performance of the Zeeko SAP machine was verified by several different samples measuring and comparing the results obtained with four other independent measuring devices measurements, after all these modifications.

Keywords:

Swing arm profilometr, interferometer, profilometer, non-contact interferometrical probe, stitching, surface shape, optical surface, optical mirror.

Obsah

1. Úvod a cíle práce.....	9
2. Současný stav problematiky.....	11
2.1 Velkoplošné optické elementy	11
2.1.1 Typy velkoplošných optických elementů	11
2.1.2 Technologie výroby velkoplošných optických elementů	14
2.2 Metrologie tvaru optických povrchů.....	20
2.2.1 Interferometrické metody	30
2.2.2 Profilometrické metody	38
2.2.3 Souřadnicové metody	42
2.3 Swing arm profilometrie	48
2.3.1 Obecný princip SAP	48
2.3.2 Zařízení Zeeko SAP.....	53
3. Úpravy zařízení Zeeko SAP.....	55
3.1 Měřicí sondy.....	55
3.1.1 Typy sond využitelných v zařízení SAP.....	55
3.1.2 Sondy dodané se zařízením Zeeko SAP.....	56
3.1.3 Sondy Luphos a jejich implementace	59
3.2 Úprava vzorkového stolu	64
3.3 Uložení velkoplošných vzorků.....	65
3.4 Laserový modul pro uložení vzorku	69
3.5 Matematický model zařízení.....	71
3.6 Výpočty nutné pro justáž před měřením	77
3.7 Laserové moduly pro justáž před měřením.....	79
3.8 Nastavení nosného bloku	82

3.9	Druhá – referenční sonda	85
4.	Ověření zařízení SAP po úpravách	89
4.1	Rovinné vzorky	89
4.1.1	Referenční flatobjektiv Zygo, průměr 150 mm	89
4.1.2	Zrcadlo 440 mm × 370 mm	96
4.2	Sférické vzorky	100
4.2.1	Hexagon průměr 900 mm	100
4.2.2	Hexagon průměr 435 mm	102
5.	Závěr.....	106
6.	Summary	108
7.	Reference.....	111
8.	Seznam použitých zkratk.....	116
9.	Přílohy.....	119
10.	Seznam autorových publikací a publikací s přispěním autora.....	139

1. Úvod a cíle práce

Vyrobitelnost každého průmyslového výrobku úzce souvisí se schopností hodnotit jeho parametry. To platí ve všech odvětvích průmyslu. Každý výrobek by měl po ukončení nebo již v průběhu své výroby procházet celou řadou zkoušek, které potvrdí nebo vyvrátí, zda je vyroben v souladu se zadávací specifikací. Tyto zkoušky nazýváme mezioperačním a finálním měřením parametrů. Završením výrobního procesu je tvorba akceptačního protokolu, který potvrzuje jakost hotového produktu. V některých případech nastává situace, kdy se výsledky mezioperační kontroly stanou součástí výsledného protokolu, neboť zkoumání (měření) určité vlastnosti výrobku po finální výrobní operaci již není možné nebo je značně komplikované. Z důvodu poptávky po nových typech výrobků a na ni reagující nabídky nových typů výrobních zařízení je třeba hledat a vyvíjet nové typy měřicích či kontrolních metod a zařízení. Nejinak je tomu ve vědecké praxi.

Součástí částicového a astročásticového výzkumu, jehož se pracoviště Společná Laboratoř Optiky UP a FZÚ AV ČR dlouhodobě účastní, jsou mimo jiné konstrukce a výroba optických dílů nebo optomechanických sestav. Mezi optickými díly převažují velkoplošné a zároveň relativně tenké skleněné odrazné elementy. Nejčastěji se jedná o leštěná rovinná a sférická zrcadla o poloměrech křivosti v řádu jednotek metrů a příčných rozměrech v řádu stovek milimetrů. Často jsou tyto díly po vyleštění opatřeny odraznou a krycí vrstvou. Hlavními hodnocenými parametry těchto zrcadel jsou kvalita nanesené vrstvy a geometrický tvar substrátu, resp. jeho funkční plochy. Tedy té plochy, na které dochází k interakci dopadajícího záření s optickým rozhraním. Měřením tvaru funkční plochy se myslí dodržení dovolené odchylky od nominálního tvaru předepsaného technickým výkresem.

Výroba přesných optických dílů probíhá poměrně složitým technologickým postupem. Po každé výrobní operaci je třeba ověřit tvar opracovávané plochy, aby mohl následovat další technologický krok. V případě použití CNC výrobních zařízení vzniká další možnost uplatnění měřicího mezikroku. Data získaná měřením lze po zpracování použít jako tzv. korekční mapu. Obráběcí centrum dostane touto formou informaci o odchylce tvaru součásti, kterou následně aplikuje v cyklu korekčního obrábění. Kromě mezioperačního a finálního ověření tvaru může mít měření také funkci posouzení změn

tvaru již hotových výrobků inicializovaných změnami fyzikálních parametrů nebo například způsobem jejich montáže do složitějších podsestav.

V současnosti lze na trhu nalézt široké spektrum zařízení, která měří tvar povrchu pomocí různých fyzikálních metod. Metody je možno třídít podle různých kritérií. Např. podle interakce měřidla a obrobku na kontaktní a bezkontaktní nebo podle postupu snímání tvaru povrchu, kdy některá měřidla detekují jednotlivé body povrchu postupně, jiná snímají celou mapu povrchu naráz. Některé metody vyžadují opticky hladký povrch s velmi malou odchylkou od nominálního tvaru a nabízí za to velmi vysokou přesnost měření. Jiné metody poskytují velkou variabilitu, co se struktury povrchu a měřených odchylek týká, ale dosahují nižší přesnosti měření. Tedy už při návrhu budoucího optického dílu je vhodné rozmyslet, jakou metodou či zařízením se bude výsledný produkt kontrolovat.

Vedle tradičních měřicích zařízení jako jsou interferometry, kontaktní profilometry, souřadnicová měřidla atd. je jednou z možností využití tzv. swing arm profilometru (SAP). Dle dostupných informací jsou měřidla tohoto typu využívána pouze na několika pracovištích pro výzkumné účely. Zařízení SAP, na které cílí předkládaná disertační práce, je prototyp dodaný do SLO společností Zeeko Ltd. jako součást výrobního řetězce. Zařízení dle dodavatele umožňuje měřit tvar rovinných a sférických konvexních a konkávních ploch o příčném rozměru do 900 mm a o rádiusu minimálně 3000 mm.

Předkládaná disertační práce si klade za hlavní cíl ověření možností zařízení Zeeko SAP a jeho začlenění do výrobního procesu mezi ostatní užívaná měřicí zařízení pracoviště SLO. Pro úspěšné splnění hlavního cíle je třeba dosáhnout i dílčích cílů, kterým se věnují jednotlivé kapitoly práce. Prvním z dílčích cílů je zavedení pojmu velkoplošné optické díly, jejich charakterizace, popis nejběžněji využívaných výrobních technologií a také měřicích metod vhodných pro tyto díly. Druhým dílčím cílem je detailní rozbor metody SAP na příkladu zařízení Zeeko SAP. Předpokládalo se, že během řešení této fáze budou odhaleny slabiny současného řešení. V příslušné části práce tedy následuje výčet zjištěných nedostatků a realizovaných úprav stávajícího zařízení. Třetím dílčím cílem je verifikace zařízení SAP po provedených úpravách. V poslední části práce jsou proto uvedeny výsledky měření tvaru čtyř různých optických ploch na zařízení SAP a ty pak porovnány s výsledky získanými několika dalšími nezávislými komerčně dostupnými měřidly.

2. Současný stav problematiky

Druhá kapitola vysvětluje význam termínu „velkoplošné optické elementy“ a jak je možno tyto díly rozlišovat. Jednotlivé podkapitoly osvětlují technologii výroby a současné techniky použitelné pro měření tvaru výše zmíněných optických dílů, a to jak obvyklých komerčních zařízení, tak prototypu SAP dodaného firmou Zeeko do SLO.

2.1 Velkoplošné optické elementy

Existuje mnoho kritérií, podle nichž je možno vytvářet různé kategorie optických elementů. Jedním z těchto kritérií je příčný rozměr funkční plochy dílu. Další mohou být např. funkce, tvar či materiál dílu. Pokud hovoříme o velkoplošných optických elementech, myslíme tím optické díly s různou funkcí, tvarem a vyrobené různou technologií z různých materiálů, které mají společné to, že příčný rozměr funkční plochy dosahuje velikosti v řádu stovek milimetrů a více. Ačkoli se nejedná o pravidlo, nejčastěji jde o leštěná rovinná a sférická konvexní či konkávní zrcadla o poloměru křivosti v řádu jednotek metrů. Často jsou tyto díly po vyleštění opatřeny odraznou a krycí vrstvou.

Sledovanými parametry těchto zrcadel jsou hlavně geometrický tvar substrátu a jeho textura a kvalita nanesené vrstvy (odraznost, celistvost a adheze). Kontrola tvaru plochy substrátu spočívá v jejím porovnání s tvarem navržené (nominální) plochy dané technickým výkresem, případně dodržení tolerované odchylky od nominálního tvaru. Kritickým parametrem je tvar funkční plochy dílu. Tedy v případě zrcadel je to tvar té plochy, na které dochází k odrazu dopadajícího záření.

2.1.1 Typy velkoplošných optických elementů

Jak bylo řečeno v úvodu kapitoly, existuje několik kritérií, podle nichž je možno rozdělovat velkoplošné optické díly. Jedním z kritérií je tvar, jiným například funkce v optické soustavě. Dále je možno elementy rozlišovat podle materiálu, z něhož jsou vyrobeny, nebo podle technologie jejich výroby.

Z hlediska interakce dílu, resp. jeho funkční plochy, se světelným zářením se optické díly rozdělují na **transmisní, reflexní a částečně reflexní** [1]. U transmisního dílu jím záření prochází a u reflexního se odráží. V případě částečně reflexních dílů se odráží část záření a zbytek prochází, tedy součást slouží např. jako optický dělič. U reflexních dílů je obecně nízká reflektance substrátu často podpořena nějakým typem nanosené reflexní vrstvy. Vrstva může být tvořena kovem či dielektrikem. Naopak, pokud díl slouží jako transmisní, je vhodné minimálně vstupní plochu opatřit antireflexní vrstvou potlačující optické ztráty vlivem reflexe na vstupním rozhraní.

Další dělení je možné provést podle **tvarových charakteristik**, čímž je myšlen tvar funkční plochy dílu. Ten může být rovinný, sférický, asférický či freeform neboli obecný nepravidelný tvar. **Rovinný** tvar bychom mohli také aproximovat jako kouli (sféru) o nekonečném poloměru křivosti (rádiusu). Proto se také někdy ve výkresové dokumentaci rovinných elementů setkáme s výrazem „infinity“, popřípadě symbolem pro nekonečno „∞“. Z hlediska symetrie je k rovině symetrická opět jen další rovina.

Sférickým tvarem je vždy myšlena část povrchu koule o určitém rádiusu. Rádus může nabývat jak kladných, tak záporných hodnot. Podle toho rozdělujeme povrchy na konkávní (značeno CC), kdy je nominální rádus záporný, a konvexní (CX povrchy) s kladnými hodnotami rádiusu. Všechny sférické povrchy jsou symetrické podle svého středu křivosti.

Dalším typem jsou povrchy **asférické**. Asférické plochy se často používají k potlačení aberací (např. zkreslení, komy či astigmatismu) sférických prvků. Použitím asférických ploch v kombinaci se sférickými je také často dosaženo zmenšení velikosti soustavy, aniž se změní její vlastnosti. Jedná se o tvar, k jehož popisu se používají vhodné polynomy s příslušnými koeficienty. Více k definici asférického tvaru je uvedeno v oddíle 2.2 této práce, která se zabývá metrologií tvaru optických povrchů. Asféry se od sfér liší v tom, že v různých částech povrchu mají různou hodnotu rádiusu. Hodnota rádiusu se u rotačních asfér mění se vzdáleností od osy symetrie. A to tak, že hodnota lokálního rádiusu může dokonce přecházet z hodnot kladných na záporné či naopak. V takovém případě pak hovoříme o tom, že asférická plocha má inflexní bod. Asférický povrch může obsahovat dokonce několik takových inflexních bodů. Asférický povrch má jednu osu symetrie, která je rotační osou. Proto, pokud hovoříme o asférickém povrchu,

máme na mysli povrch s rotační symetrií. Z důvodu jednodušší výroby a měření je třeba, aby rotační osa asféry procházela středem funkční plochy. Během finální fáze výroby je pak možné optický díl opracovat (např. oříznout) tak, že se již osa nebude nacházet ve středu funkční plochy. Dokonce je možné vyříznout takovou část plochy, kdy se rotační osa bude nacházet zcela mimo funkční plochu. Pak již hovoříme o nerotační asféře, či o segmentu asféry a takto vzniklou plochu je také možné chápat jako freeform tvar. Příkladem takové plochy může být např. segment korekčního prstence fluorescenčního detektoru projektu PAO v Argentině.

Jiným tvarem jsou plochy **cylindrické**. Jak název napovídá, jedná se o část pláště válce s jednou osou symetrie. Tato plocha má dva význačné směry. Pokud vedeme řez cylindrickou plochou kolmo na osu válce, bude výsledkem řezu kružnice o konstantním rádiu. A to buď konvexním, nebo konkávním. Ve směru podél osy válce bude mít řez rovinný tvar. Speciálním případem cylindrické plochy je plocha **acylindrická**. Ve směru osy symetrie bude řez mít opět tvar roviny, ve směru kolmém na osu to pak bude tvar popsaný polynomiálním rozvojem, stejně jako v případě asféry.

Nejsložitějším tvarem z hlediska jeho popisu a výroby je pak **freeform** plocha. Ta může nabývat libovolné hodnoty zakřivení a rádiu ve všech místech svého povrchu. Do této kategorie spadají všechny tvary, které nepatří do výše zmíněných skupin. Freeform plocha může mít jednu, dvě nebo více os symetrie včetně bodů inflexe.

Dalším kritériem pro dělení velkoplošných optických dílů je **materiál**, z něhož jsou díly vyrobeny. Nejklasičtějším materiálem využívaným v optice zůstává **sklo**. Ať už se jedná o optická skla s vysokou homogenitou a jinými optickými vlastnostmi, skla filtrová nebo technická skla s výhodnými mechanickými vlastnostmi. Nespornou výhodou všech skleněných materiálů je jejich vysoká tvrdost a odolnost, jak už mechanická, tak chemická či termální, a také dobrá znalost chování skleněných materiálů během jejich opracování. Nevýhodou zůstává velká hustota a z ní vyplývající vysoká hmotnost vyrobených dílů. Nezřídka se setkáváme s velkoplošnými díly vyrobenými ze sklokeramiky, **krystalických materiálů a kovů**. Každý z těchto materiálů má své zvláštnosti a jejich opracování mají své zákonitosti, které budou zmíněny v další části této práce.

Velmi vhodnými se pro výrobu rozměrově velkých optických dílů jeví využití **kompozitních materiálů** neboli kompozitů. Obecně se jedná o materiály ze dvou nebo více složek s rozdílnými vlastnostmi, které dohromady dávají výslednému výrobku nové vlastnosti, které nemá sama o sobě žádná z jeho součástí. Obvykle jedna ze složek dodává výrobku pevnost a druhá slouží jako pojivo. V optice se nejčastěji jedná o kompozity tvořené skelnými nebo uhlíkovými vlákny a pryskyřicí a tyto materiály je možné vyztužit i různými kovovými voštinami či profily. Pro zajištění optické kvality povrchu je možno na povrch substrátu nalepit tenkou skleněnou desku. Pak bude zajištěna jak nízká hmotnost celého dílu, tak tvarová stabilita a kvalita funkční plochy.

Speciálním případem jsou **sendvičové konstrukce** dílů. Tedy spojení (nejčastěji lepením) několika vrstev různých materiálů. Např. spojení kompozit-sklo, kov-sklo, kov-kov nebo spojení různých typů skel.

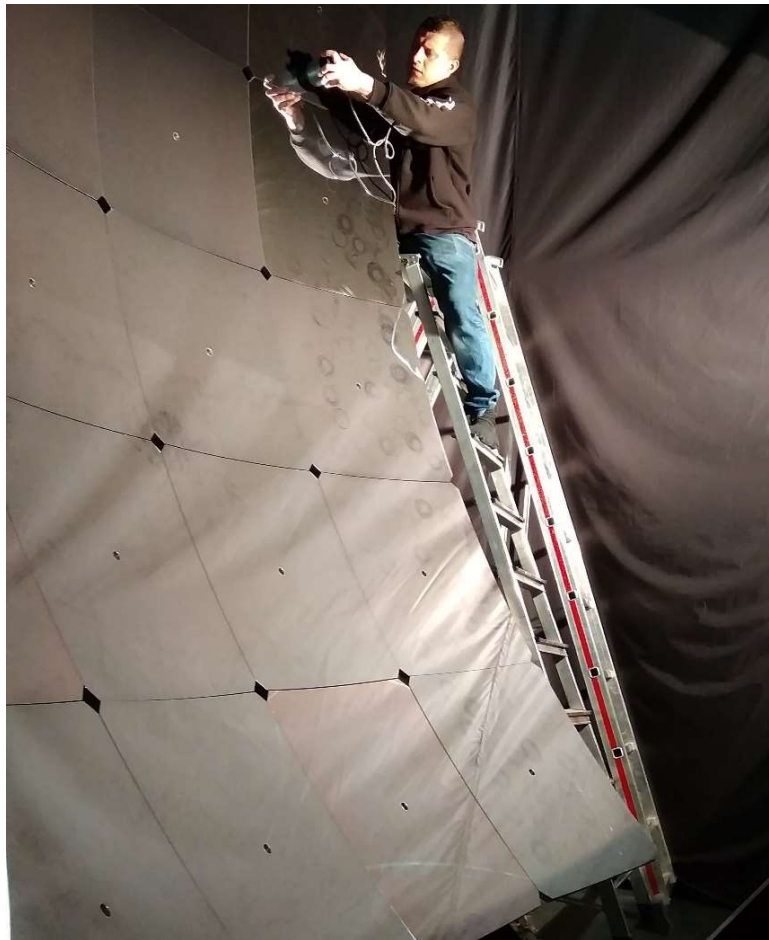
2.1.2 Technologie výroby velkoplošných optických elementů

Existuje velké množství technologií využitelných pro výrobu velkoplošných optických dílů. Jejich patrně nejjednodušší rozdělení je podle materiálu výsledného produktu. Tedy bychom mohli technologie rozdělit na ty, které vytvářejí skleněné nebo neskleněné optické elementy. V následující kapitole budou zmíněny ty technologie, které se jeví v současnosti jako nejefektivnější.

Mezi neskleněné díly můžeme řadit např. odrazná zrcadla vyrobená z kovových nebo z kompozitních materiálů. Každý materiál má své specifické vlastnosti, se kterými je třeba počítat při návrhu optického systému a využití technologického procesu.

Výroba reflexních optických prvků z **kovových materiálů** se jeví jako vhodná z hlediska bohatých zkušeností s jejich třískovým obráběním nebo lisováním. Nevýhodou kovových materiálů je vysoká teplotní roztažnost, a tedy tvarová nestabilita. Další nevýhodou pramenící z nehomogenní polykrystalické struktury kovových materiálů (oproti amorfní struktuře skla) je nízká dosažitelná kvalita leštěné plochy. Do kovů se proto přidávají různé příměsi a vznikají tak slitiny jako např. karbidem křemíku vyztužený hliník [2]. Nejhojněji využívaným materiálem pro výrobu reflexních dílů jsou

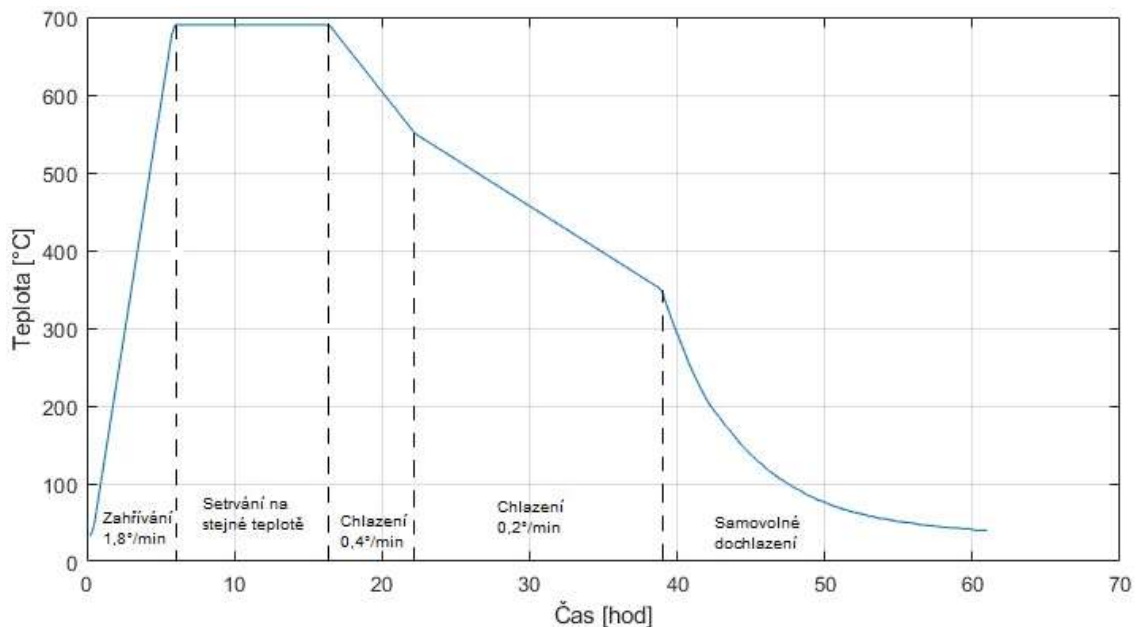
slitiny hliníku. Výhodné jsou zejména pro svou snadnou obrobiteľnost soustružením, frézováním či broušením. V posledních cca 15 letech je jednou z velmi využívaných technologií výroby kovových odrazných elementů **metoda SPDT** (single point diamond turning) neboli soustružení diamantovým hrotem [3]. Jedná se o subtraktivní metodu, principálně stejnou jako klasické soustružení. Rozdíl je v tom, že všechny pohyby (rotace obrobku a posuvy nástroje) se konají s maximální přesností na vzduchových nebo hydrostatických ložích. Navíc lze touto technologií vytvářet nejen osově symetrické (rovinné, sférické a asférické) tvary, ale díky precizně řízeným pohybům diamantového hrotu lze vytvářet i osově nesymetrické freeform povrchy, popř. různé typy difrakčních mřížek [4]. Ze všech dostupných subtraktivních metod pro výrobu optiky má technologie SPDT nejvyšší dosažitelný úběr materiálu. Otáčky obrobku typicky dosahují tisíců za minutu. Velkou výhodou této technologie je, že výsledný produkt často nevyžaduje žádné dodatečné technologické operace, protože hodnoty tvarových odchylek bývají typicky v desetinách mikrometru a hodnoty drsnosti povrchu se pohybují v jednotkách až desítkách nanometrů [5]. Předleštěné nebo vysoustružené kovové optické elementy jsou také často opatřeny vrstvami pro ochranu před vlivem okolního prostředí (křemen) nebo pokoveny např. vrstvou niklu, která kromě ochrany umožní další formy opracování konvenčními optickými metodami [2]. Příkladem technologie SPDT jsou lichoběžníkové segmenty primárních zrcadel fluorescenčních detektorů (FD) observatoře PAO v Argentině ze slitiny hliníku o průměru opsané kružnice 900 mm, viz obr. 1, konkávním rádiu 3 410 mm a tloušťce 23 mm. Nesférická deformace těchto zrcadel je v řádu desítek μm .



Obr. 1: Měření odraznosti na lichoběžníkových segmentech zrcadla FD teleskopu Los Leones PAO ze slitiny hliníku vyráběná metodou SPDT. Foto z pracovní kampaně pracovníků SLO v Argentině.

Druhou skupinou technologií pro výrobu velkoplošných dílů jsou **technologie zpracování skleněných materiálů**. Velmi vhodná se jeví technická a kompozitní skla s nízkou teplotní roztažností. Příkladem technických skel jsou borosilikátová skla (Pyrex [6], Simax [7]) nebo titansilikátová skla (ULE [8]). Využívají se také sklokeramické materiály jako Cer-Vit nebo Zerodur [9].

Pro formování technických borosilikátových skel se jako vysoce efektivní ukazuje **technologie gravitačního propadání za tepla** na předem zhotovenou formu. Materiálem formy je nejčastěji litina, keramika či sklokeramika. Efektivita spočívá hlavně v relativní jednoduchosti a v nízkých nákladech na zhotovení požadovaného tvaru skleněného povrchu. V některých případech je během termálního cyklu zařazeno i působení tlaku na skleněnou desku [10], v jiných případech je deska podrobena pouze působení gravitace. Příklad jednoho teplotního cyklu je uveden na obr. 2.



Obr. 2: Příklad jednoho cyklu gravitačního propadání rovinné skleněné desky za tepla na sklokeramickou formu.

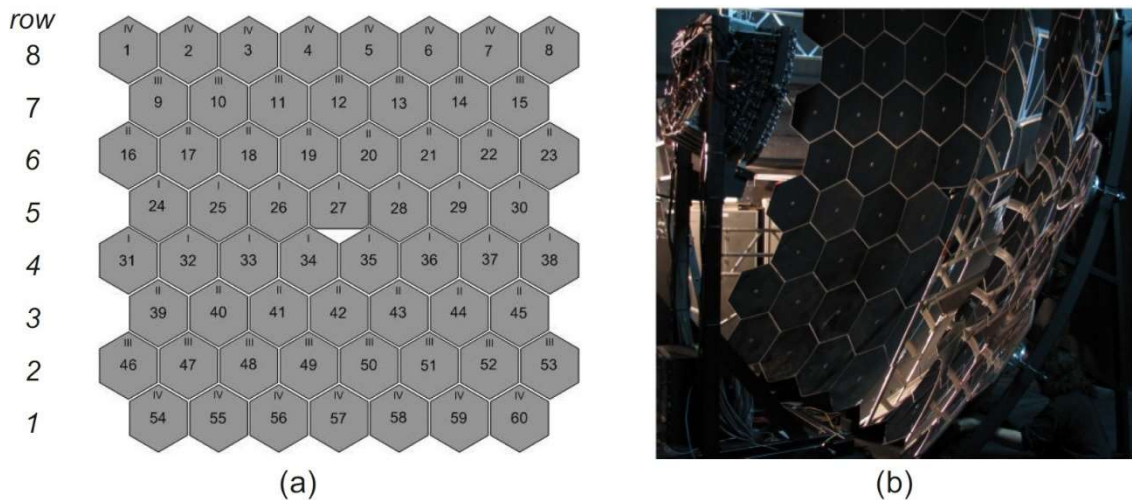
Další využívanou metodou tvorby velkoplošných dílů je **lisování za tepla**. V tomto případě se vkládá horká tavenina (ručně nebo strojově) přímo do lisovací formy. Po úspěšném vylisování, ochlazení a vyjmutí dílu z formy jsou surové výlisky zpravidla podrobeny dalšímu tepelnému zpracování v peci za účelem odstranění vnitřního pnutí.

V případě výroby velmi přesných dílů (např. pro zobrazovací optiku) lze teplotní propadání či lisování považovat za základní technologickou operaci pro vytvoření tvaru obrobku. Po propadání zpravidla následuje broušení klasickou technologií s volným brusivem (popř. CNC frézování) a leštění klasickou technologií nebo subaperturní CNC leštění. Výsledkem jsou pak plochy s nesférickou odchylkou v řádu jednotek až desítek μm . V případě superpřesné aplikace dílu, kdy jsou velmi přísné požadavky na tvar a odraznost plochy, následují po mezioperační validaci povrchu dílu dodatečné technologické operace, např. subaperturní korekční leštění pomocí technologií jako WPT (technologie lešticího kola) [11], A-FJP (tryskání proudem leštiva) [12], MRF (korekce magnetoreologickou tekutinou) [13], IBF (korekce iontovým svazkem) [14] [15] atd. Výsledné odchylky tvaru korigovaných zrcadel od nominálního sférického či rovinného tvaru jsou obvykle ve zlomcích mikrometrů s drsností v jednotkách až desítkách nanometrů. Pro zvýšení či snížení odraznosti, popř. pro ochranu povrchu, jsou na

výsledný povrch nanášeny reflexní/antireflexní nebo ochranné vrstvy z různých materiálů (kovy, dielektrika). Pokud se jedná o méně precizní aplikace výsledných dílů, lze teplotní propadání považovat za finální tvarovací operaci před nanášením povrchových vrstev.

Pro opracování skleněných materiálů je samozřejmě možné použít i klasické nebo CNC řízené subtraktivní metody, kdy je hrubý skleněný obrobek nebo výlisek podroben broušení (frézování) a následně leštění. V případě obrábění velkoplošných skleněných elementů proti těmto metodám stojí extrémní nároky na časy jednotlivých operací nutných pro odebrání velkého množství materiálu. Proto jsou tyto metody používány primárně pro výrobu transmisních optických elementů, popř. pro opracování takových materiálů, které není možno tepelně tvarovat.

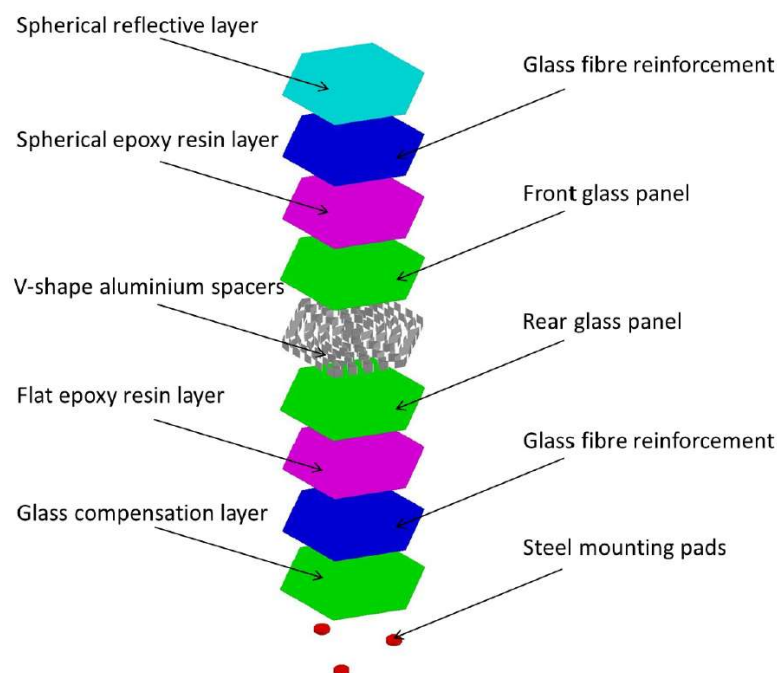
Technologií lisováním z taveniny a následným frézováním, broušením, leštěním a vrstvením byla např. vyráběna hexagonální skleněná zrcadla z materiálu Simax [7], která se nacházejí na třech FD detektorech observatoře PAO v Argentině. Jedná se o konkávní sférická zrcadla o průměru opsané kružnice 626 mm, rádiusu 3 400 mm a tloušťce 15 mm, viz obr. 3. Odchylka tvaru funkční plochy od ideální koule je v řádu několika desítek μm a drsnost povrchu v jednotkách nm.



Obr. 3: Skleněné hexagonální segmenty primárního zrcadla DF teleskopu observatoře PAO. (a) – uspořádání segmentů, (b) – reálný snímek sestaveného primárního zrcadla [16].

Třetí skupinou technologií pro tvorbu velkoplošných optických dílů jsou **technologie tvorby sendvičových struktur**. Jeden z postupů výroby sendvičového

zrcadla je zmíněn v článku [17]. Základem jsou otevřené hliníkové tenkostěnné profily tvaru V vlepěné mezi dvě skleněné desky. Následně jsou z obou stran epoxidem nalepeny výztuhy ze skelných vláken a na ně borosilikátové skleněné desky. Přední skleněná deska z původně rovinného skla je opatřena odraznou vrstvou a následně za studena v lisovací formě přilepena ke sférické ploše epoxidové výztuže. Na zadní ploše zrcadla se nachází kompenzační skleněná vrstva osazená ocelovými bloky pro přichycení zrcadla. Velmi důležité je také boční opláštění sendviče, aby do struktury nevnikala voda a nečistoty. Hrany vnějších skleněných ploch jsou chráněny silikonovými obrubami. Schéma sendviče je možno vidět na obr. 4. Celý produkt je touto technologií vyráběn např. na pracovišti Polské akademie věd v Krakově. Jedná se o konkávní sférické hexagonální zrcadlo o rádiu cca 32 m s průměrem opsané kružnice 1,34 m, tloušťkou cca 60 mm a hmotností cca 16 kg. Výsledná nesférická odchylka dosahuje hodnot v desítkách až stovkách μm . Drsnost povrchu odpovídá drsnosti použitého skla pro přední skleněnou desku.



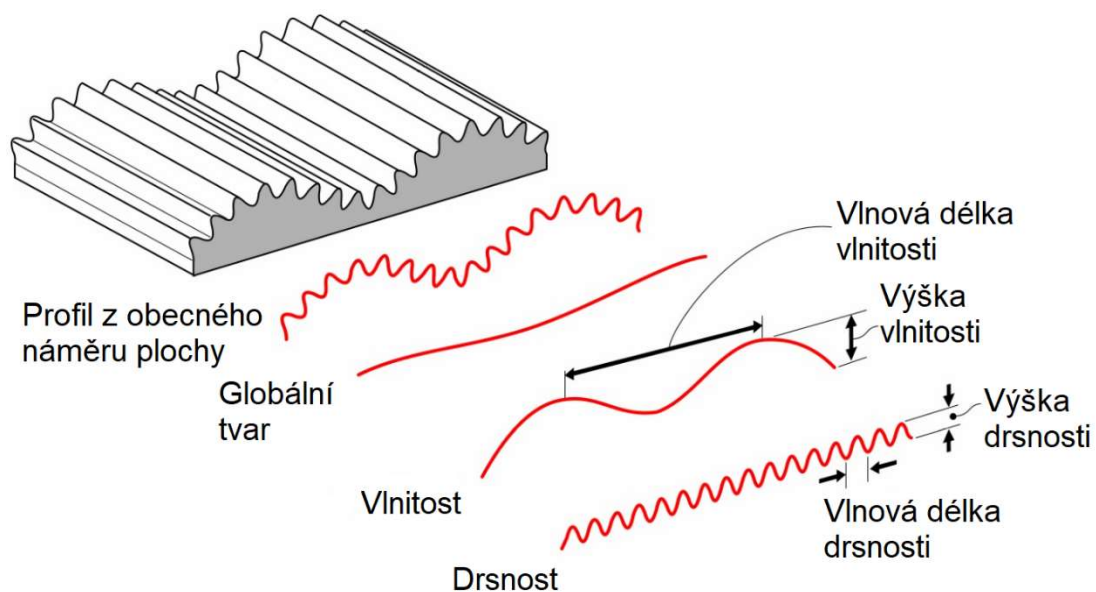
Obr. 4: Sendvičová struktura zrcadlového segmentu teleskopu CTA MST [17].

Podobná technologie je využita také v článku [18], zde se ale nevyužívá otevřená struktura hliníkových výztuží jako v předchozím odkazu [17], nýbrž je užito uzavřené hliníkové voštiny.

2.2 Metrologie tvaru optických povrchů

V případě optických povrchů se prakticky setkáváme s několika typy tvarových odchylek, které dělíme podle jejich prostorových frekvencí. Tyto odchylky zpravidla vznikají různými mechanismy a pro svůj popis vyžadují odlišný přístup. Typy tvarových odchylek jsou dobře patrné z obr. 5. Odlišné jsou metody jejich detekce a na výsledné optickém zobrazení se podílejí různě.

Odchylky **středních prostorových frekvencí** (mid-spatial frequency errors) je možno nazývat také jako vlnitost povrchu (waviness). Odchylky **vysokých prostorových frekvencí** souhrnně nazýváme drsnost povrchu. Vlnitostí nazýváme takové vady povrchu, jejichž perioda zvlnění je oddílem optické normy ISO 10110-8 stanovena v rozmezí 0,08 mm až 2,5 mm. Drsnost je pak souhrnný název pro vady povrchu s periodami zvlnění menšími než 0,08 mm. Norma ISO 10110 se těmito vadám věnuje ve své části „8 – Struktura povrchu“. V části „12 – Asférické povrchy“ jsou pak uvedeny možnosti specifikace požadavků na přípustné zvlnění povrchu asférické optiky. Norma definuje mnoho pojmů nutných pro pochopení celé problematiky, jejich definice a měření. Zaměříme se nyní na ty nejdůležitější. **Opticky matná plocha** je taková optická plocha, u níž výšková změna struktury povrchu není výrazně menší než vlnová délka světla. **Opticky hladká plocha** je oproti ní taková plocha, u níž je výšková změna struktury povrchu výrazně menší než vlnová délka světla. Dále je potřeba definovat **vyhodnocovanou délku l_n** , na které má být posouzena struktura plochy. Jedná se o délku, na které se vyhodnocují hodnoty parametrů drsnosti povrchu a může obsahovat jednu nebo několik základních délek. **Základní délka l** je pak délka použitá pro rozpoznání nerovnosti a odpovídá vlnové délce zvlnění či drsnosti, jejíž amplitudu zjišťujeme měřením. Běžná vyhodnocovací délka je pětinasobkem základní délky [19].



Obr. 5: Typy tvarových odchylek podle prostorových frekvencí [20].

V minulosti byla vlnitost nebo drsnost povrchu vyhodnocována hlavně kontaktními přístroji (profilometry), a to pouze dvourozměrně pomocí sondy tažené po povrchu měřeného dílu. V posledních dvou dekádách výrobci kontaktních profilometrů kromě zvýšení přesnosti do svých zařízení přidali také možnost 3D měření díky příčnému stolku a možnosti stitchingu 2D náměrů do 3D mapy. Stitchingem neboli sešitím je míněna matematická operace, kdy je soubor 2D křivek proložen spojitou 3D plochou. Takovéto proložení je možné na základě znalosti poloh jednotlivých dílčích křivek nebo ze znalosti poloh jejich průsečíků. Stitching je možné využít také při sčítání dvou nebo více dílčích 3D map do větší výsledné 3D mapy. Opět je k tomu třeba detailně znát polohy dílčích ploch, popř. jejich společných bodů. S rozvojem měřicích prostředků se rozšířilo také užití bezkontaktních metod a data jsou vyhodnocována z plošného náměru (interferometrie v bílém světle, konfokální mikroskopy, mikroskopy se skenující sondou – SPM, AFM, detektory rozptylu – skaterometry, elektronové mikroskopy SEM) [21]. V obou případech je pro vyhodnocování struktury povrchu nejprve třeba odečíst (přifitovat a odstranit) samotný tvar plochy (např. kulový či válcový). Zároveň se nepočítá ani s vlivy vad povrchu (škrábance, dírky atd.).

V čem jsou výhody či nevýhody mezi jednotlivými metodami je dobře patrné. Bezkontaktní optické měření je výrazně rychlejší, přesnější a předchází možnému poškození povrchu během kontaktního měření. Norma ISO 10110 zavádí tyto statistické metody popisu opticky hladkých povrchů:

- a) pomocí rms drsnosti R_q, S_q
- b) pomocí rms vlnitosti W_q ,
- c) předpisem hustoty mikrodefektů,
- d) použitím *PSD* funkce,
- e) specifikací RMS sklonu.

Metody měření se mohou kombinovat a mohou se používat v různých prostorových vlnových rozsazích na stejné oblasti. V případě, že jsou parametry vyhodnoceny na řezu (2D profilu), nesou označení R_q, R_a atp. V případě měření plochy (3D) se označují S_q, S_a . Jednotlivé parametry znamenají:

X_a – průměrná aritmetická úchylka profilu definovaná vztahem

$$X_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (1)$$

X_q – průměrná kvadratická úchylka profilu definovaná vztahem

$$X_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l |Z^2(x)| dx}, \quad (2)$$

kde X značí chtěný parametr (drsnost R , vlnitost W), l je základní délka a $Z(x)$ je hodnota pořadnic (výšky) posuzovaného profilu.

Vlnitost povrchu optického dílu nejčastěji vzniká během subaperturního obrábění malým nástrojem při fázi broušení [22] nebo leštění dílu [23] nebo jeho lisovací formy. Odchylky středních prostorových frekvencí jsou také často důsledkem vibrací uvnitř obráběcích strojů [24]. Zároveň může být vlnitost projevem struktury kompozitního materiálu (např. skelná nebo uhlíková vlákna v tkanině vystupující na povrch nebo těsně pod něj). Drsnost optických dílů je pak nejčastěji důsledkem nedokonalého lešticího

procesu, nevhodně zvolenou kombinací leštiva a substrátu nebo důsledkem nanesené krycí či odrazné vrstvy nebo jejího poškození.

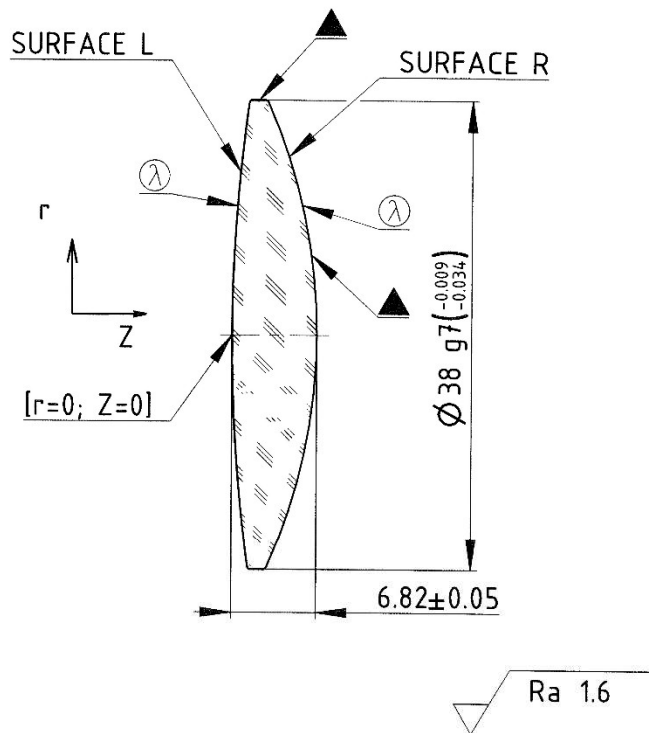
Odchytky malých prostorových frekvencí, a tedy velkých vlnových délek, také nazýváme odchytkami globálního tvaru, kdy perioda nejmenších detekovaných vln je větší než 2,5 mm. Patří mezi ně odchytky rotačně symetrické a nesymetrické nebo sedlovité deformace, které pak způsobují dobře známé odchytky zobrazení jako sférickou aberaci, komu, astigmatismus, trefoil atd. Tyto odchytky vznikají nepřesnostmi celoplošného nebo lokálního (subaperturního) opracování obrobku nebo např. jeho lisovací formy, deformací hotového výrobku vlivem jeho uchycení, působením gravitace, vlivem nanesené vrstvy apod. K detekci a vyhodnocení těchto odchylek je možné použít klasické interferometry, dotyková souřadnicová měřidla, deflektometry, profilometry aj.

Obecně se odchytkami globálního tvaru a částečně i vlnitostí optických elementů zabývá optická norma ISO 10110 ve svém oddílu „5 – Tolerance tvaru povrchu“. Odchytkou tvaru je vzdálenost mezi zkoušenou optickou plochou a teoretickou požadovanou plochou, měřená kolmo k teoretické ploše, která leží rovnoběžně ke zkušební ploše. Přičemž teoretická plocha může být reprezentována zkušebním kalibrem, interferometrickou referenční plochou (či vlnoplochou) nebo jiným měřicím prostředkem s dostatečnou přesností. Je jedno, jestli se pro měření využívají kontaktní nebo bezkontaktní zařízení. Kódové číslo tolerance tvaru povrchu na výkrese je „3/“. Předpisy pro tvarové odchytky lze vidět vyznačené na dvou technických výkresech na obr. 6 a obr. 7. V optické praxi nejběžněji využívaná norma ISO 10110 obsahuje několik dalších kódových označení, které shrnuje následující seznam. Se všemi těmito zkoumanými parametry se můžeme setkat na výkresové dokumentaci optických dílů a podsestav.

- 0/ – vady materiálu – optický dvojlom (část normy ISO 10110-2),
- 1/ – vady materiálu – bubliny a vměstky (část normy ISO 10110-3),
- 2/ – vady materiálu – nehomogenity a šlíry (část normy ISO 10110-4),
- 3/ – tolerance tvaru povrchu (část normy ISO 10110-5),
- 4/ – tolerance centrování (část normy ISO 10110-6),
- 5/ – vady povrchu (část normy ISO 10110-7),
- 6/ – práh narušení laserovým ozářením (část normy ISO 10110-13).

Dále jsou v normě ISO 10110 zmíněny ještě tyto parametry:

- zobrazování optických elementů, rozměry a úhly, testovací pásma, fazety, materiálové specifikace (část normy ISO 10110-1),
- struktura povrchu (část normy ISO 10110-8),
- úpravy povrchu a vrstvy (část normy ISO 10110-9),
- tabulková data optického elementu (část normy ISO 10110-10),
- netolerované rozměry (část normy ISO 10110-11),
- asférické povrchy (část normy ISO 10110-12),
- deformace průchozí vlnoplochy (část normy ISO 10110-14).



SURFACE L ∇	MATERIAL	SURFACE R ∇
ASPHERE CX $\varnothing_e 35.000$ CHAMFERS 0.2-0.1 (FACE WIDTH) λ $R_{max} \leq 0.5\%$ FOR 480-650nm FOR AOI 0-20° $\varnothing > 36.5$ ∇ 0.2 $\varnothing 38$ - 3/ 4(1/0.6) RMSi<0.4 SLOPE=0.75'/1mm 4/ 1.5' (0.01) 5/ 3x0.16; L3x0.1; E0.5 ISO 10110-7 6/ -	COMPANY OHARA CODE 439950 TYPE S-FPL53 n_d 1.43875 ± 0.0005 n_e 1.43985 ± 0.0005 v_d 94.93 $\pm 0.5\%$ v_e 94.49 $\pm 0.5\%$ 0/ 5 1/ 2x0.1 2/ -	$R 46.563$ CX — 1 CHAMFERS 0.2-0.1 (FACE WIDTH) λ $R_{max} \leq 0.5\%$ FOR 480-650nm FOR AOI 0-25° $\varnothing > 36.5$ ∇ 0.2 $\varnothing 38$ - $3/ 2 (0.5)$ — 2 4/ - 5/ 3x0.16; E0.3 ISO 10110-7 6/ -

Obr. 6: Část technického výkresu s tabulkou dle normy ISO 10110. 1 – nominální tvar pravého povrchu čočky, 2 – předpis pro tvarovou odchylku od nominálního tvaru.

výsledek parametru kvantifikují podle zaběhlé konvence, kdy záporná hodnota parametru Power značí konkávní odchylku a kladná hodnota značí konvexní odchylku. Výpočet parametru Power v nejčastěji užívaném softwaru MetroPro [26] probíhá dle rovnic

$$Z(X, Y) = C_0 + C_1X + C_2Y + C_3(X^2 + Y^2), \quad (3)$$

$$\text{Power} = C_3R^2, \quad (4)$$

kde C_x jsou koeficienty odvozené z fitování povrchu a R je poloměr, resp. vzdálenost mezi středovým bodem a bodem nejvzdálenějším od středu.

Údaj B značí maximální přípustnou deformaci měřené plochy po odečtení sférické složky A . Označujeme ji jako iregularitu, ovalitu, nepravidelnost atd. C označuje rotačně symetrickou deformaci, což vyjadřuje rotačně symetrický podíl deformace B .

Zjednodušeně lze říci, že obecný náměr odchylky měřené plochy od plochy požadované (nominální) je třeba rozložit do několika podsložek. Nejprve je k náměru přilicována kulová plocha, vyčíslena výška jejího vrchlíku ($PV = \text{peak-to-valley}$) jako A . Pak je tento vrchlík z náměru odstraněn a vyčíslena výška PV toho, co zbylo, tedy B . Pak je ke zbytku B přilicována rotačně symetrická plocha (asféra), následně je vyčíslena její výška PV jako hodnota C , neboli RSI (rotačně symetrická iregularita). Hodnoty RMS_x , kde x zastupuje symboly t, i, a . $RMS_t - t$ znamená total, tedy RMS_t je střední kvadratická odchylka počítaná z naměřených odchylek tvaru plochy se započítáním všech vlivů – počítá se z obecného tvaru dle vzorce [20]

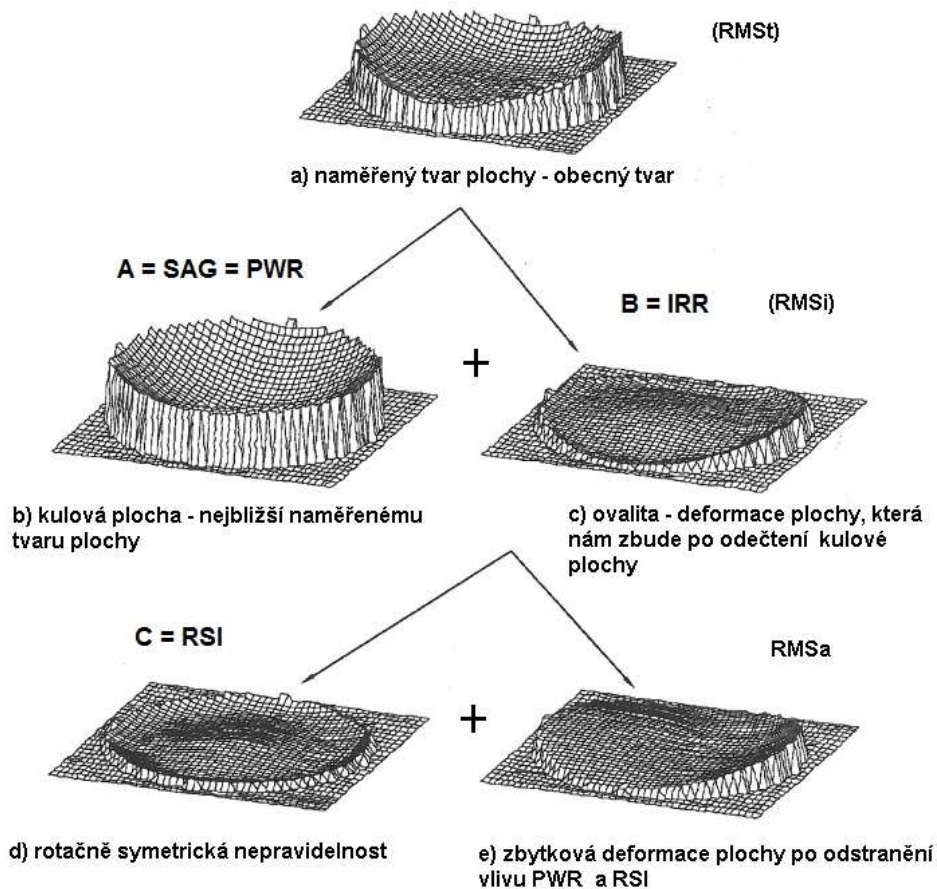
$$RMS = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A Z^2(x, y) dx dy}, \quad (5)$$

kde A značí měřenou oblast a Z značí výškovou hodnotu.

$RMS_i - i$ znamená irregularity, tedy RMS_i je střední kvadratická odchylka počítaná z naměřeného tvaru plochy bez započítání vlivu vrchlíku – SAG . Počítá se z deformace $IRR - \text{ovality}$. $RMS_a - a$ znamená asymmetry, tedy RMS_a je střední kvadratická odchylka počítaná z naměřených odchylek tvaru plochy bez uvážení vlivu vrchlíku –

PWR a bez vlivu rotačně symetrické nepravidelnosti – počítá se ze zbývající deformace. Celý rozklad na jednotlivé složky je dobře patrný z obr. 8.

$3/ A(B/C)RMS_x$ je obecný předpis zahrnující všechny možnosti zápisu, v praxi se spíše setkáme se zkrácenými předpisy, např. $3/ A(B)$ nebo $3/ A(B/C)$ apod. I tyto předpisy jsou v soulase s normou. Norma umožňuje též v poznámce na výkresu definovat PV hodnotu celkové deformace plochy. Tedy chyba vrchlíku SAG i deformace IRR zároveň.



Obr. 8: Rozklad surového náměru dle normy ISO 10110-5.

Pokud se jedná o vyhodnocování tvaru asférických ploch, tak zde se setkáváme s částí normy ISO 10110-12. Na výkrese asféry je možno nalézt několik odlišností. Jelikož asférický povrch nelze zadat jen jedním číslem (rádiusem), je potřeba uvést nejen vrcholový rádius, ale i příslušnou matematickou rovnici. Pro zadávání vrcholového rádiusu platí znaménková konvence odlišná od klasického zadání sféry. Rovnic asférického povrchu je několik druhů podle typu asférické plochy (kuželové, parabolické, torické, polynomiální a kombinované). Nejčastěji využívaný zápis pro tvar asférické

plochy, který je uveden na obr. 7, se mezinárodně označuje jako „asphere (conic + power series)“. Rovnice asféry je

$$Z = \frac{C \cdot r^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k) \cdot C^2 r^2}} + \sum_{i=1}^n A_i \cdot r^{2i}, \quad (6)$$

kde zlomek v této rovnici představuje základní plochu, kterou poté může modifikovat mocinná řada s parametry A . C značí křivost neboli převrácenou hodnotu R , kde R je vzdálenost vrcholu plochy (vrchol je v ose z) do středu křivosti základní plochy vyjádřené zlomkem ve vztahu (6). Proměnná r představuje radiální vzdálenost od osy symetrie (osy z). Číslo k modifikuje charakter základní plochy vyjádřené zlomkem v rovnici (6). Základní plocha dle hodnoty parametru k nabývá hodnot dle tabulky 1.

Tabulka 1: Hodnoty parametru k a jemu příslušné tvary základní plochy [27].

$k < -1$	hyperboloid
$k = -1$	paraboloid
$-1 < k < 0$	elipsoid
$k = 0$	sféra
$k > 0$	elipsoid

Pokud je rovnice modifikována mocninou řadou, je třeba na výkrese asféry uvést i tabulku, která uvádí závislost výšky vrchlíku na vzdálenosti od středu rotačního povrchu, tedy tzv. sagitální tabulku. Ta slouží hlavně pro kontrolu, při zadávání měřeného povrchu do měřicího či obráběcího zařízení. Předpis tvaru pro asférické povrchy lze zadat dvěma způsoby.

První vychází ze standardního předpisu jako u sférických ploch $3/ A (B/C) RMS_x$ (viz výše). Protože se při výrobě asférických ploch používá lokální opracování malými nástroji (tzv. subaperturní obrábění), které nezděkuje generuje chyby středních frekvencí neboli vlnitost povrchu, je možno doplnit další tolerance pro odchylku lokálního sklonu neboli parametr $SLOPE$. Jedná se o úhlovou odchylku lokální kolmice aktuální (skutečně) plochy od lokální kolmice teoretické plochy. Odchylka sklonu v kterémkoli bodě se vypočítává jako průměr lokálních sklonů v rámci celé integrační délky měření sklonu. Integrační délka měření sklonu je příčná velikost hodnocené plochy. Odchylka sklonu plochy může být specifikována jako hodnota maxima nebo hodnota RMS .

Maximum odchylky sklonu je dáno největší odchylkou lokálního sklonu plochy. *RMS* odchylka sklonu je dána odmocninou součtu čtverců odchylek sklonu celé plochy. Je-li specifikována tolerance sklonu, na výkrese musí být také uvedena integrační délka sklonu (neboli na jaké příčné délce je sklon vyhodnocován, např. 1' / 1 mm) a prostorové rozlišení vzorkování. Prostorové rozlišení vzorkování si je možno jednoduše představit jako velikost pixelů, kterými je snímek povrchu nasnímán. Podle Shannonova-Nyquistova-Kotělnikova teorému musí být vzorkovací frekvence alespoň dvojnásobná, než je největší frekvence vzorkovaného signálu. Tedy převedeno do praxe – pokud chceme detekovat vlnění povrchu, musí na jednu délku jeho vlny vycházet nejméně dva pixely detektoru.

Druhá možnost značení tolerance odchylky měřeného povrchu vychází ze sagitální tabulky, kde je u každé výškové souřadnice nominálního povrchu uveden i rozptyl jejích hodnot a přidává se i tolerance sklonu (*SLOPE*), viz tabulka 2. Písmeno *r* zde značí vzdálenost od rotační osy asféry, *z* je výška od počátku souřadného systému *r-z*, Δz je rozptyl hodnot *z*.

Tabulka 2: Sagitální tabulka s vyjádřením odchylky tvaru povrchu a lokálního sklonu.

<i>r</i>	<i>z</i>	Δz	tolerance sklonu
0,0	0,000	0,000	0,3'
5,0	0,219 352	0,002	0,5'
10,0	0,825 330	0,004	0,5'
15,0	1,600 528	0,006	0,8'
19,0	1,938 077	0,008	

Existuje mnoho měřicích metod a zařízení pro měření jednotlivých tvarových odchylek optických dílů. V následujících řádcích práce bude kladen důraz na měření odchylek malých prostorových frekvencí. Jednou z možností, vedle interferometrických [28-30], souřadnicových [31] nebo jiných (bezkontaktní optický profilometr [32], skenovací pentaprismový test nebo inklinometrické měření [33]) více či méně tradičních zařízení pro měření tvaru přesného povrchu velkorozměrových součástí, je metoda SAP [34-38]. Jak již bylo zmíněno v úvodu práce, značná část optických součástí je vyráběna pomocí CNC obráběcích center. Samotné měření tedy už neslouží pouze jako mezioperační nebo finální testování, ale výsledky měření poskytují také zpětnou vazbu pro výrobní proces. Data z měření lze po počítačovém zpracování využít jako mapu zásahů. CNC obráběcí centrum tak získává informace o tvarové odchylce obráběného dílu, které se následně uplatní v korekčním obráběcím cyklu [39-41].

2.2.1 Interferometrické metody

Všechny interferometrické metody jsou obecně metody založené na principu interference světelného vlnění. Tedy interferometrem bychom mohli souhrnně nazvat každé zařízení, které tento fyzikální princip využívá za účelem měření. Interferometrické měření je založeno na detekci fázových rozdílů, které se projeví při superpozici dvou nebo více vln ve výsledné intenzitě interferenčního pole.

Interferenční jevy, které se projevují zesilováním nebo zeslabováním světla, jsou pozorovatelné jen tehdy, jsou-li vzájemné fázové rozdíly mezi skládanými vlnami stálé v čase (případně jejich změna nastává v čase delším, než je doba detekce nebo pozorování interferenčního pole). Vlny, které splňují podmínku stálého fázového rozdílu, jsou fázově koordinované a říkáme jim koherentní vlny. Interference a koherence jsou dva aspekty téhož jevu: pozorovatelná interference prokazuje koherenci skládaných vln a naopak koherence vln se projevuje interferencí.

Rozlišují se dva typy koherence, a to koherence časová a koherence prostorová. Z hlediska **časové koherence** platí, že dvě světelná pole, která pocházejí z téhož zdroje a procházejí různými optickými drahami, budou interferovat pouze tehdy, je-li časové zpoždění (rozdíl optických drah), které mezi nimi vznikne, menší než koherenční čas (koherenční délka) zdroje. Koherenční délka ΔL je vyjádřena vztahem

$$\Delta L = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}, \quad (7)$$

kde λ je střední vlnová délka a $\Delta\lambda$ je šířka spektra.

Pro koherenční čas Δt pak platí

$$\Delta t = \frac{\Delta L}{c}, \quad (8)$$

kde c je fázová rychlost šíření světla.

Čím je koherenční čas (koherenční délka) větší, tím je záření „monochromatictější“ a zdroj je z hlediska časové koherence kvalitnější.

Prostorová koherence světla souvisí se vztahem (korelací) dvou vln ve dvou různých bodech prostoru ve stejném časovém okamžiku. Mírou prostorové koherence je koherenční šířka Δx . Je to největší příčný rozměr oblasti zdroje, z níž je vysílané záření ještě koordinované (koherentní). Parametr Δx^2 se nazývá koherenční plocha. Čím je koherenční šířka větší, tím jsou lepší koherenční vlastnosti zdroje. Pro interferenční pokusy je důležitá jak prostorová, tak i časová koherence, které se dají souhrnně charakterizovat parametrem koherenční objem [42]

$$\Delta V = \Delta L \times \Delta x^2 . \quad (9)$$

Interferenci lze pozorovat pomocí vzniklého interferenčního obrazce neboli interferogramu v podobě tzv. interferenčních proužků na stínítku nebo na detektoru kamery. O výsledku interference rozhoduje fázový posun vlnění $\Delta\varphi$, který určíme jako rozdíl fází jednotlivých vlnění v určitém okamžiku:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} , \quad (10)$$

kde d je dráhový rozdíl vlnění – je to vzdálenost dvou bodů, v nichž mají obě vlnění stejnou fázi a λ je vlnová délka interferujícího světla.

Zvláštní případy interference vlnění dostáváme v případě, kdy je dráhový rozdíl roven celistvému počtu půlvln interferujících vlnění

$$d = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda ; k \in N_0 , \quad (11)$$

kdy se vlnění setkávají ve všech bodech se stejnou fází a vzniká **interferenční maximum** – **světlý proužek**,

$$d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} ; k \in N_0 , \quad (12)$$

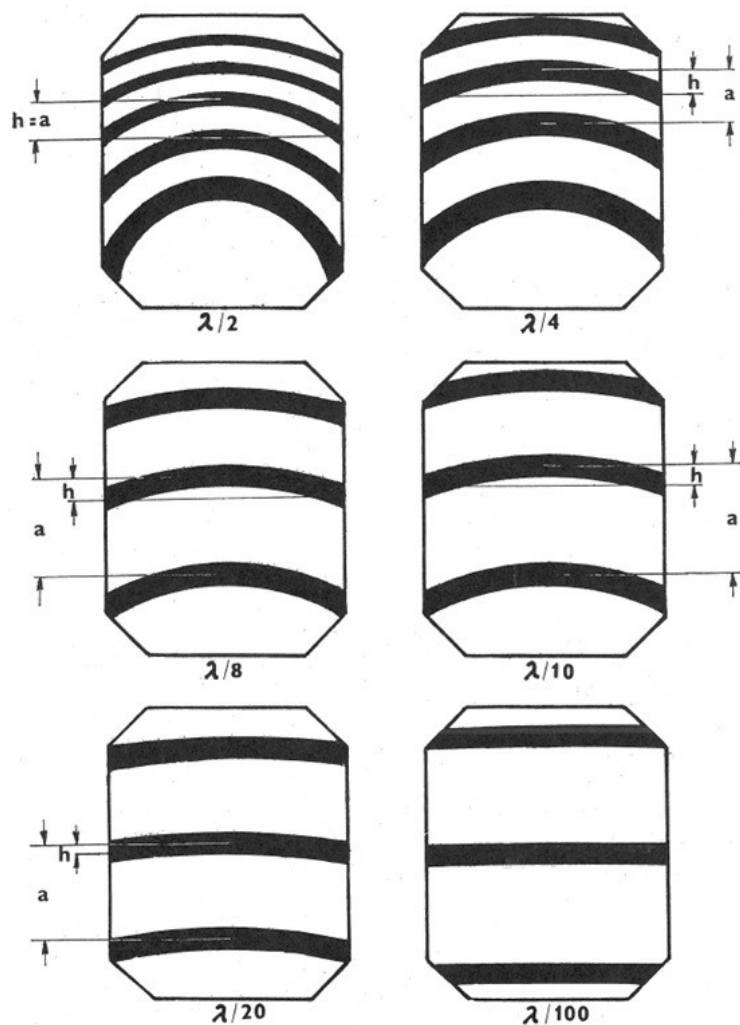
kdy se interferující vlnění setkávají s opačnou fází a vzniká **interferenční minimum** – **tmavý proužek**.

Interferometry můžeme rozdělit do tří skupin podle interakce měřeného obrobku s měřidlem:

1. kontaktní interferometry = skleněné kalibry přikládáné na měřenou plochu,
2. bezkontaktní interferometry s vizuálním vyhodnocením interferenčního obrazce,
3. bezkontaktní interferometry s digitálním vyhodnocením interferenčního obrazce.

Všechny tři skupiny mají společné to, že je porovnáván tvar plochy reálného vzorku s tvarem referenční plochy. Rozdíl je v tom, jestli dojde k fyzickému kontaktu těchto ploch (kontaktní interferometry), nebo je srovnání tvaru reálných ploch výsledkem srovnání tvaru dvou odražených vlnoploch záření (bezkontaktní interferometry). První metoda se používá téměř výhradně při kontrole tvaru sférických a rovinných ploch vyrobených klasickou technologií a slouží nejčastěji jako rychlé mezioperační měření. Nevýhodou je potřeba dokonalého očištění měřené plochy a přikládaného kalibru, protože jakákoli nečistota (prach, zbytky abraziv) výrazně ovlivní vznik interferenčního obrazce. Částice mezi dvěma leštěnými plochami navíc představuje riziko poškrábání obou ploch. Další nevýhodou je potřeba mít ke každému nominálnímu tvaru příslušný kalibr.

Rozšířenější a mnohem univerzálnějším kontrolním nástrojem jsou bezkontaktní interferometry. Ty s vizuálním vyhodnocením se nejčastěji užívají jak pro kontrolu jednotlivých sférických a rovinných ploch, tak pro vyhodnocení rovinných ploch obrobků nalepených na nosičích při opracování. Vyhodnocení interferogramů se provádí vizuálně např. podle příručky jako je ta na obr. 9. V případě digitálního vyhodnocení je interferenční obrazec vyhodnocován počítačem a výstup (interferogram) obsahuje číselné hodnoty hodnocených parametrů. Digitální interferometry slouží pro měření tvaru ploch vysoce přesných součástí a součástí, u kterých zákazníci požadují dokladovat odchylku tvaru ploch interferogramem. Mohou také vyhodnocovat deformaci prošlé vlnoplochy neboli TWE (Transmitted Wavefront Error).



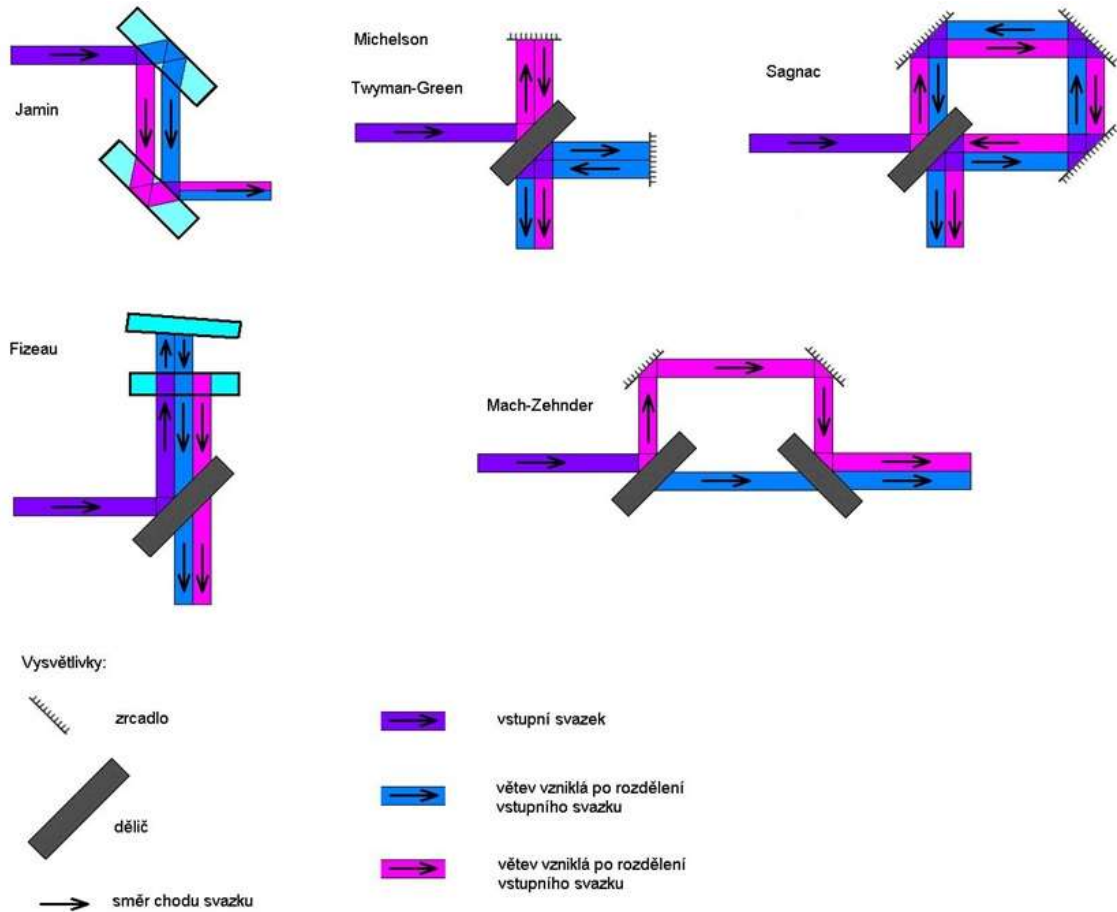
Obr. 9: Pomůcka pro vizuální vyhodnocení interferenčních proužků u rovinných ploch – vyhodnocení deformace *PV*.

Přepočít mezi nejčastěji používanými jednotkami je uvedený v následujícím vztahu:

$$\lambda/10 = 0,1 \text{ wave} = 0,2 \text{ fr} = 0,1 \times 632,8 \text{ nm} = 63,28 \text{ nm.} \quad (13)$$

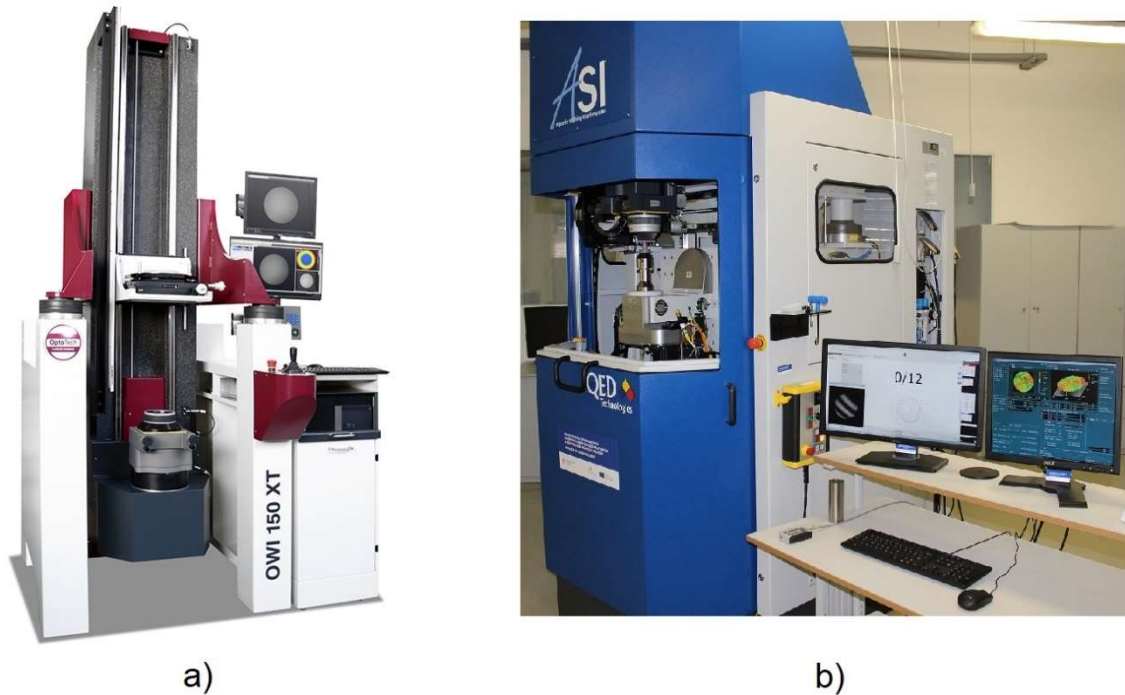
Bezkontaktní interferometry je možno rozdělovat podle jejich **optického uspořádání**. Obecně se jedná vždy o dvousvazkové interferometry, které mají společné to, že vstupní vlna (svazek) je pomocí vhodného dělicího prvku (polopropustná deska, dělicí kostka apod.) rozdělena na dvě vlny (svazky), kdy jedna z těchto vln (svazků) je nějakým způsobem ovlivněna měřeným elementem – tuto vlnu nazýváme testovací, kdežto druhá vlna tímto elementem ovlivněna není – referenční vlna. Dále jsou tyto dvě vlny opět složeny pomocí dělicího prvku. Složením (interferencí) těchto vln vzniká interferenční

obrazec, ze kterého máme možnost zjistit, jak se výsledná složená vlna liší od vlny referenční. Jednotlivé typy interferometrů jsou schematicky znázorněny na obr. 10.



Obr. 10: Typy interferometrů dle jejich optického uspořádání [43].

Interferometry dále rozlišujeme podle jejich **prostorového uspořádání** na **horizontální** a **vertikální**. V případě horizontálního uspořádání leží interferometrická jednotka nejčastěji na optickém stole a měřicí svazek směřuje paralelně s rovinou stolu – horizontálně. Při vertikálním uspořádání je interferometrická jednotka natočena, popř. je svazek zalomen zrcadlem tak, že osa svazku směřuje svisle. Interferometrická jednotka se může nacházet nahoře nad měřeným vzorkem nebo dole pod ním. Příkladem horizontálního interferometru je dále zmiňovaný Zygo Verifire, viz obr. 12. Příkladem vertikálního interferometru je např. OWI 150 XT výrobce Optotech nebo ASI výrobce QED, viz obr. 11.

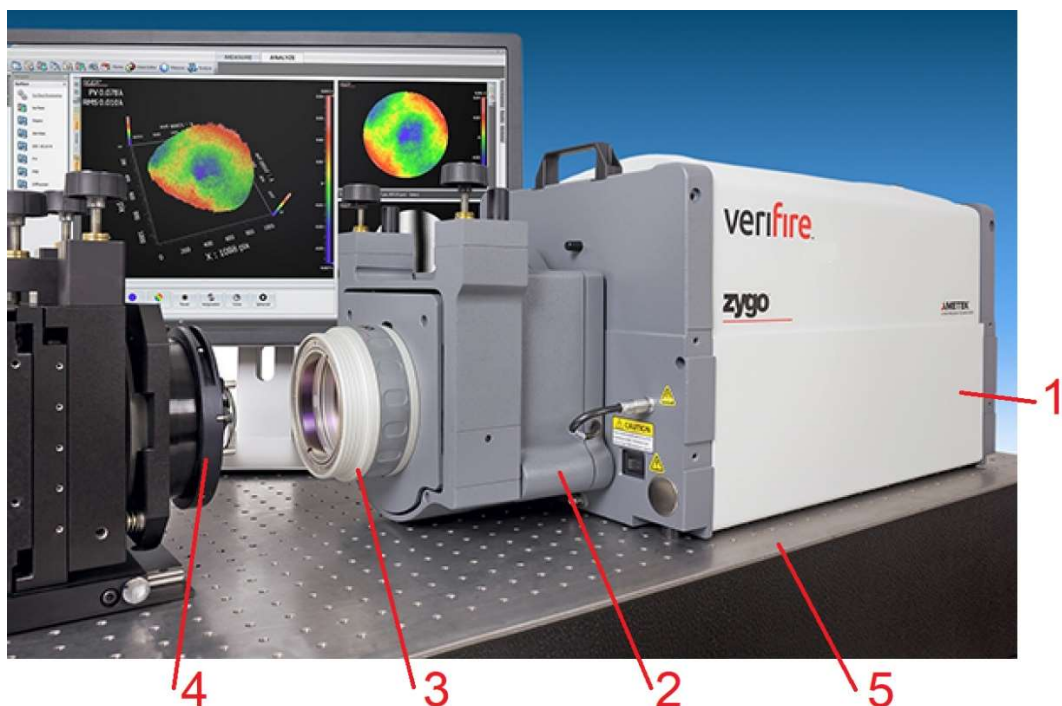


Obr. 11: Příklady vertikálních interferometrů: a) Optotech OWI 150 XT [44], b) stitching interferometr QED ASI [30].

Pro účely získání experimentálních dat v této práci byl využit digitální interferometr Zygo Verifire uvedený na obr. 12. Jedná se o interferometr Fizeauova typu v horizontálním uspořádání, kdy referenci tvoří poslední leštěná plocha na výměnném transmisním elementu (objektivu). Objektivy mohou být jak rovinné, tak s kulovou referenční plochou – konvergentní (konkávní referenční plocha) či divergentní (konvexní plocha). Je také možno interferometr vybavit holografickou mřížkou (CGH = computer generated hologram), který zaujme místo objektivu a generuje referenci pro různé typy měřených součástí. Mohou to být sférické, cylindrické, asférické i freeform plochy. Výstupní svazek interferometru má průměr 6 palců (152 mm) a pracuje na vlnové délce 632,8 nm vyzařované HeNe laserem. Vysoké rozlišení CCD snímače (5,3 Mpx) umožňuje interferometru zaznamenávat i velmi malé nedokonalosti na úrovni chyb středních prostorových frekvencí. Zároveň díky zdokonalenému algoritmu QPSI (Quick Phase-Shifting Interferometry) je zařízení méně citlivé na vibrace z okolního prostředí. Přístroj Zygo Verifire je vybaven odečítáním polohy měřeného kusu, což umožňuje měření rádiusu sférické optiky, a tedy i jejího parametru SAG . U rovinné optiky, kdy je vždy měřena odchylka od rovinné reference, přesné odečítání polohy kusu není třeba. Samotná interferometrická jednotka je uložena na antivibračním pneumatickém stole.

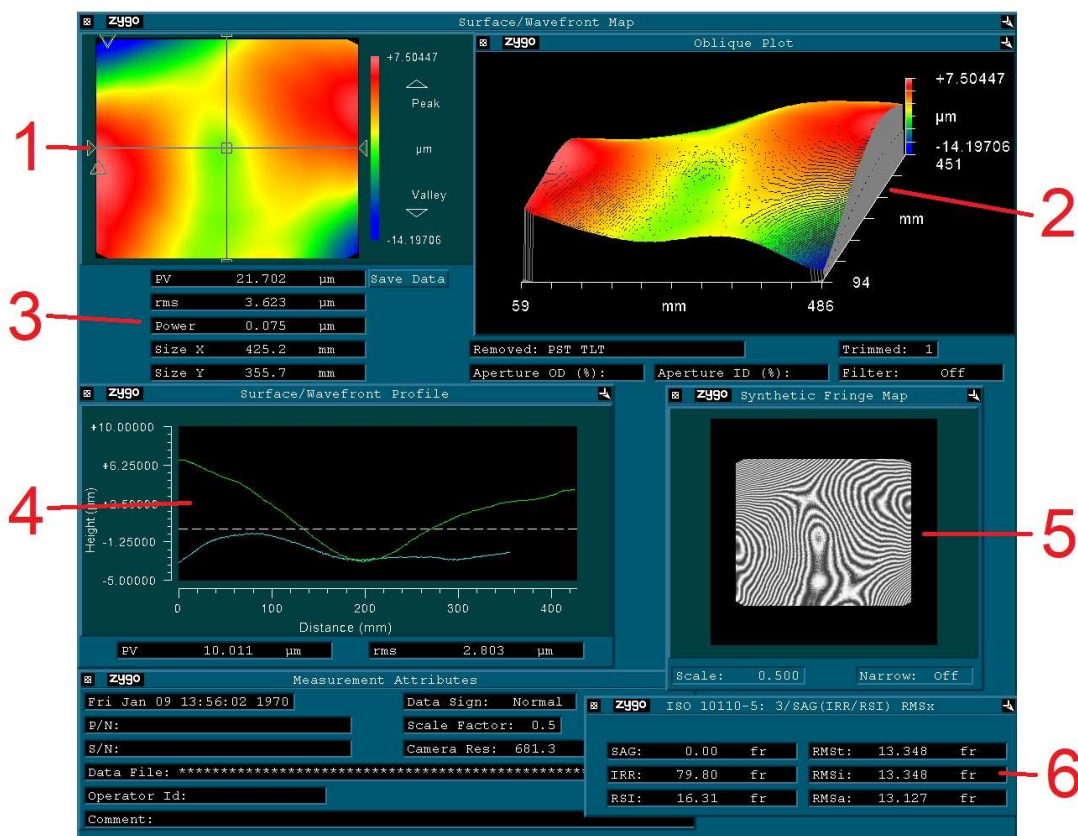
Antivibrační stůl slouží jako optická lavice. Na stole je umístěno vedení, podél něhož se pohybuje držák kusů. Součástí vybavení jsou další stolky a držáky. Pokud je délka stolu příliš malá, je možné např. měřené zrcadlo o velkém rádiu umístit na masivní stativ vybavený antivibračním systémem a celý stativ polohovat v rámci prostoru v laboratoři. Interferometr Zygo Verifire lze využít k následujícím aplikacím:

- měření tvarů ploch čoček, sférických povrchů a rovinných ploch,
- měření deformace průchozí vlnoplochy (TWE) pro jednotlivé komponenty, montážní podsestavy i montážní celky, jako je měření TWE na čočce, planskle, okuláru, objektivu i celém dalekohledu a pro všechny typy hranolů,
- měření klínovitosti na planskle,
- měření úhlu 90° u pravoúhlých hranolů,
- měření deviace koutových hranolů,
- měření homogenity skla.



Obr. 12: Fizeaův interferometr Zygo Verifire. 1 – interferometrická jednotka, 2 – phase shifting jednotka, 3 – referenční optika, 4 – pětiosý držák měřených dílů, 5 – antivibrační stůl [45].

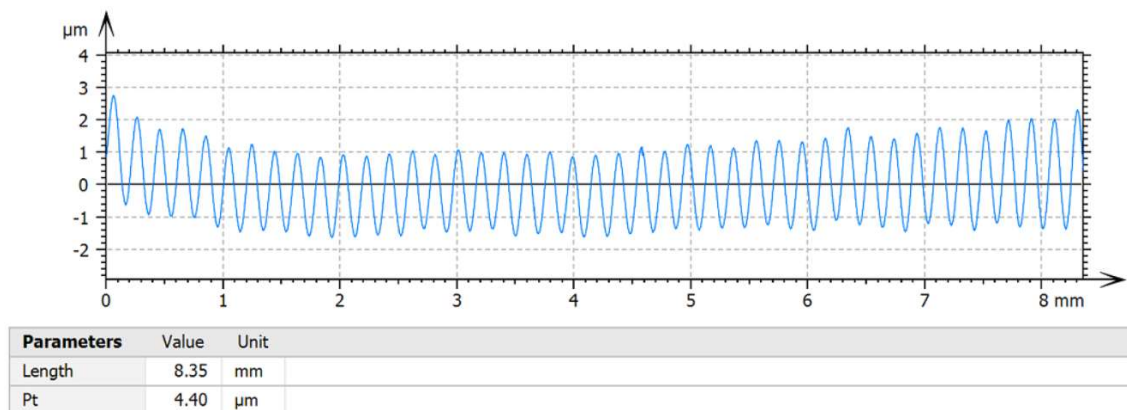
Tento interferometr, stejně jako ostatní digitální interferometry jiných výrobců mají společné to, že výrobcem dodaný obslužný počítač obsahuje software, který má dvě funkce. Ovládá elektroniku interferometrické jednotky a také zajišťuje sběr dat na CCD čipu pomocí tzv. phase-shifting algoritmu. Algoritmus pomocí mechanického posuvu referenční optiky (objektivu) generuje posuv interferenčních proužků na CCD čipu. Navíc software získaná data ve formě interferenčního obrazce transformuje na 3D mapu odchylek povrchu od požadovaného nominálního tvaru. V případě interferometru Verifire se jedná o software MetroPro verze 10.0.4, viz obr. 13. Následně lze data analyzovat, ukládat a exportovat. Většina programů navíc umožňuje přímou analýzu náměru dle předpisu normy ISO 10110.



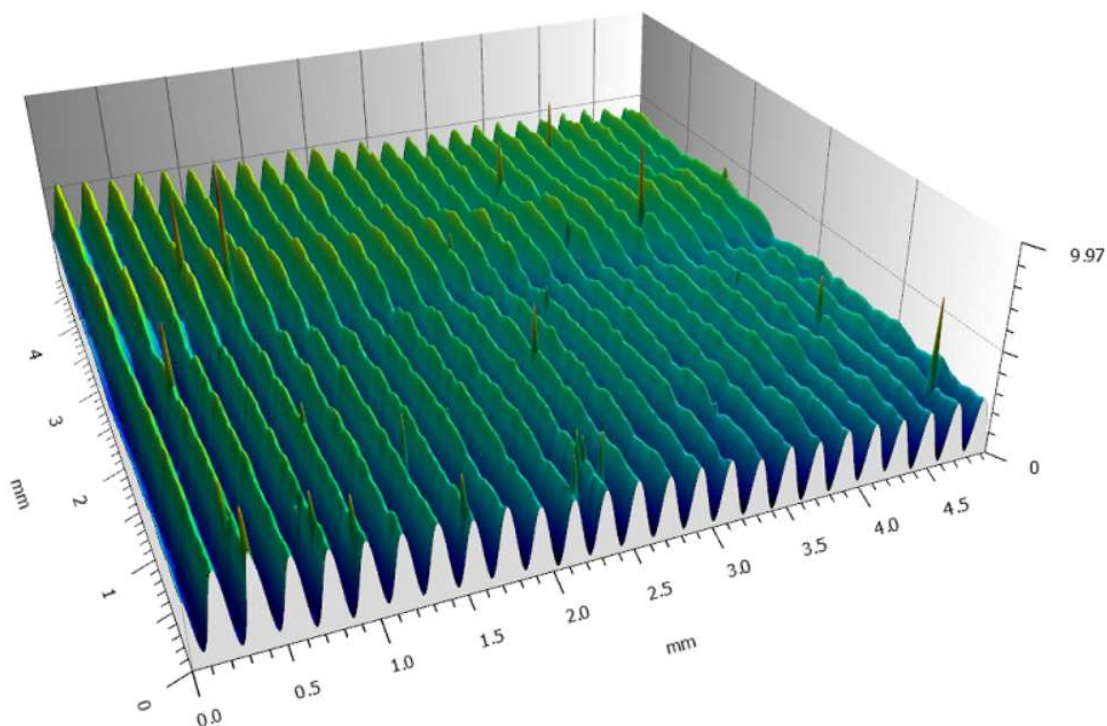
Obr. 13: Okno softwaru MetroPro, odchylka rovinného dílu od ideální roviny. 1 – kolorovaná 3D mapa povrchu, 2 – 3D vizualizace povrchu, 3 – číselné vyjádření výsledků, 4 – horizontální a vertikální řez 3D mapou povrchu, 5 – vizualizace povrchu v interferenčních proužcích, 6 – tabulka odchylek dle normy ISO 10110-5.

2.2.2 Profilometrické metody

Profilometry jsou obecně měřicí zařízení, která mapují tvar, popř. i texturu povrchu zkoumaného dílu, pomocí skenovacího pohybu. Při tomto pohybu v ose x se vůči sobě vzájemně posouvá snímač profilometru a zkoumaný povrch. Snímačem může být např. kontaktní měřicí raménko (stylus) umístěný v detektoru náklonu raménka nebo nějaký typ bezkontaktní měřicí sondy. Výsledkem je pak dvoudimenzionální profil měřeného povrchu, který reprezentuje změnu výšky povrchu na svislé ose v závislosti na poloze na vodorovné ose, podobně jako je tomu na obr. 14. Podle detekčního mechanismu rozlišujeme profilometry na kontaktní a bezkontaktní. Některé typy profilometrů navíc obsahují kromě základního posuvu měřený díl vs. snímač (v ose x) také posuv vzorku v ose y s cílem tvorby komplexní 3D mapy zkoumaného povrchu. 3D mapa je pak výsledkem softwarového sečtení (stitchingu) dílčích 2D skenů, viz obr. 15.



Obr. 14: Dílčí 2D sken povrchu vzorku z profilometru Taylor Hobson. Length – délka skenu, Pt – peak-to-valley svislá vzdálenost od nejnižšího údolí po nejvyšší vrchol.



Obr. 15: 3D mapa vzorku z obr. 14 vzniklá sečtením 207 dílčích 2D skenů z profilometru Taylor Hobson.

Pro získání některých experimentálních dat v praktické části této práce byl využit profilometr Taylor Hobson PGI Optics, viz obr. 17. Jedná se o nejmodernější zařízení britské společnosti Taylor Hobson s kontaktním snímáním povrchu. Poslední generace [46] zařízení se dotýká povrchu pomocí karbonového raménka různých tvarů a různých zakončení. Na pracovišti SLO se v současnosti využívá devět typů ramének, viz obr. 16. Délka nejdelších ramének je 180 mm, středních 120 mm a nejkratších 60 mm. Jak krátká, tak dlouhá raménka disponují dvěma typy zakončení. Jedno zakončení je tvořeno rubínovou kuličkou o poloměru 0,5 mm. Druhým typem zakončení je diamantová „konisféra“ neboli kužel s vrcholovým úhlem 60°, zakončený koulí o poloměru 2 μm . Výběr tvaru raménka a jeho zakončení musí odpovídat plánu měření. Pro měření drsnosti je nutno použít „ostré“ raménko s konisférou, pro měření tvaru a vlnitosti stačí použít raménko s kuličkou.



Obr. 16: Ukázka několika typů měřicích ramének kontaktního profilometru Taylor Hobson.

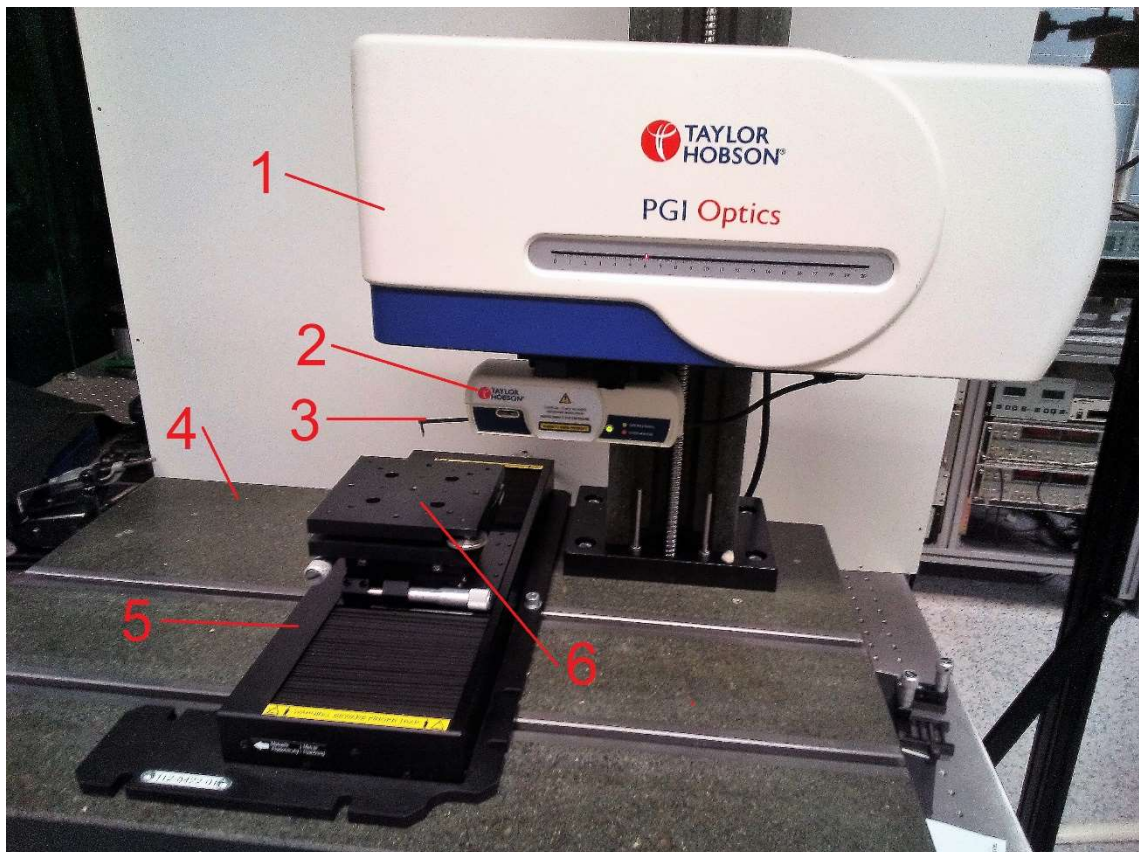
Raménko je napojeno na vysoce citlivý snímač, který měří změnu sklonu raménka detektorem na bázi optické interference. Zařízení je určeno pro mapování libovolných pevných povrchů a tvarů. K zařízení přísluší obslužný software pro vyhodnocování drsnosti, ale i různých tvarů, úhlů, výšky schodů atd. Díky příčnému motorizovanému stolku je možno vytvářet 3D obrazy zvoleného povrchu. Toto měření je sice zdlouhavější než lineární měření, ale zato může nabídnout mnohem komplexnější obraz zkoumané oblasti.

Zařízení disponuje třemi motoricky řízenými osami. Vodorovná osa x má délku 200 mm, čímž definuje maximální měřenou dráhu. Svislý posuv slouží pouze pro polohování snímače s raménkem před samotným měřením. Má délku 480 mm. Zařízení disponuje příčným stolkem, který zajišťuje posuv v ose y o délce 200 mm. Maximální svislý rozsah měření závisí na délce raménka. Za použití raménka o délce 180 mm je to cca 47 mm. Přesnost měření je úměrná délce měřicího raménka. U nejkratších ramének výrobce uvádí nejistotu určení tvaru menší než 100 nm.

Stejně jako starší verze profilometru (Form Talysurf Series 2 [47]) zařízení disponuje pokročilým softwarem pro obsluhu a vyhodnocení naměřených dat. Pro vyhodnocení drsnosti, schodů, úhlů, rádiusů a jiných tvarových parametrů obecných vzorků se využívá program Talymap [48]. Pokud se jedná o měření sférických a také asférických ploch, je vhodné pro analýzu použít software Aspheric analysis utility, který

umožňuje odečet nominálního asférického tvaru z naměřených dat, čímž se získá požadovaná odchylka měřeného tvaru vzorku od technického výkresu.

Z výše zmíněných vlastností kontaktního profilometru T-H Optics vyplývá, že toto zařízení je značně univerzální a umožňuje mapovat odchylky všech tří druhů prostorových frekvencí, tedy jak drsnost, tak vlnitost a globální tvar. Limity zařízení jsou rozměry použitých posuvů (osa x a y), maximální výkyv měřicího raménka a přesnost snímače. Výhodou je možnost měřit i globální tvar neleštěného – difúzního povrchu. Nevýhodou je časová náročnost při pořizování 3D snímků kvůli postupnému skenování povrchu v jednotlivých 2D řezech.



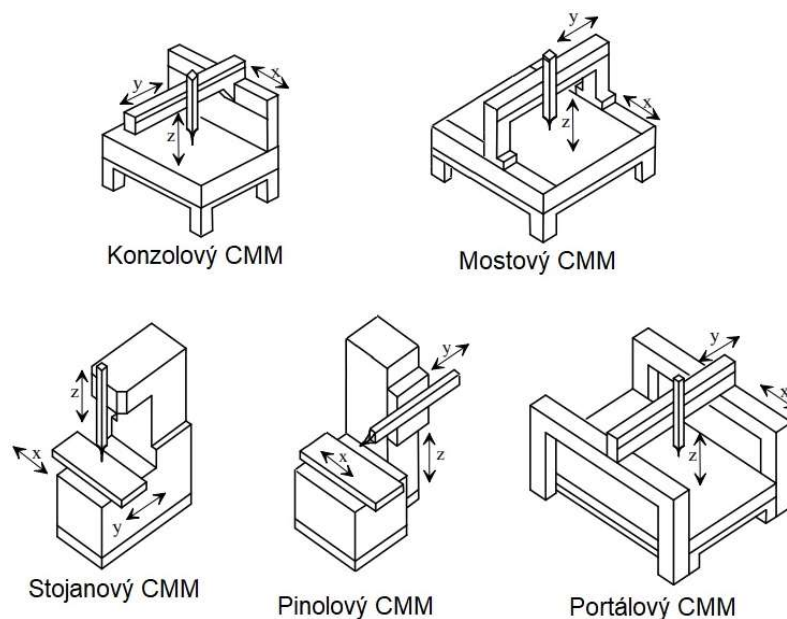
Obr. 17: Kontaktní profilometr Taylor Hobson PGI Optics. 1 – posuvová jednotka na vertikálním sloupu, 2 – snímač, 3 – snímací raménko (stylus), 4 – granitová základna, 5 – příčný stolek, 6 – stolek pro jemný manuální posun a náklon vzorku.

2.2.3 Souřadnicové metody

Souřadnicová měřidla, někdy také nazývána jako CMM (Coordinate Measuring Machine), jsou vysoce univerzální zařízení určená pro měření rozměrových charakteristik optických i mechanických součástí. Mohou měřit jak tvar jednoduchých dílů, tak i vzdálenosti, úhly, průměry a vzájemné polohy částí velmi komplexních obrobků. Princip měření na všech souřadnicových měřidlech spočívá v pohybu měřicí kontaktní či bezkontaktní sondy uvnitř známého souřadného systému. Jakmile dojde ke kontaktu sondy s povrchem, popř. k najetí bezkontaktní sondy do detekční vzdálenosti, je zaznamenána poloha měřicího bodu sondy (jejího hrotu či fokusačního bodu). U drtivé většiny souřadnicových zařízení se sonda vůči vzorku pohybuje v kartézském souřadném systému, tedy ve třech na sebe navzájem kolmých osách x, y, z . Některá zařízení pohybují sondou vůči pevně přichycenému dílu, jiná pak mohou mít sondu pohyblivou ve dvou osách a třetí osu reprezentuje pohyb měřeného dílu. V současné době se nejčastěji využívá 5 hlavních konstrukčních uspořádání třísouřadnicových měřidel, viz obr. 18:

- mostové,
- portálové,
- výložníkové (konzolové),
- typ vodorovných vyvrtávaček (pinolové),
- typ svislých vyvrtávaček (sloupové, stojanové).

Každý typ konstrukce má jiné vlastnosti a nachází jiná praktická uplatnění [49]. Většina souřadnicových zařízení disponuje sofistikovaným softwarem, který řídí a zaznamenává pohyb sondy, zajišťuje její kalibraci a má v sobě uložený matematický model měřeného dílu, od něhož pak ve finále vypočítává reálné odchylky. Přesnost metody z principu odpovídá přesnosti použité měřicí sondy a přesností odečítání její polohy. Právě díky obslužnému softwaru mohou souřadnicové měřicí systémy vyhodnocovat nejen vzdálenosti, poloměry, přímosti a úhly mezi reálnými a na povrchu přítomnými tvarovými prvky, ale také rozměrové a úhlové charakteristiky průniků rovin, přímek či jiných geometrických prvků měřeného dílu [50-52].



Obr. 18: Konstrukční uspořádání CMM měřidel [49].

Pro účel ověření experimentálních dat bylo v této disertační práci využito zařízení, které se nachází na pracovišti průmyslového partnera Meopta - optika, s. r. o. Jedná se o tříosouřadnicové měřidlo Zeiss **Contura G2 HTG** [31], viz obr. 19. Zařízení je vybaveno teplotní kompenzací a umožňuje použít několik typů měřicích sond. Měřidlo je ovládáno softwarem Zeiss Calypso dodaným výrobcem [53], kde je ke každé měřené součásti uložen 3D model, na němž se vyhodnocují konkrétní charakteristiky – délky, úhly, rovinnosti, průměry, průniky rovin atd. Měření probíhá tak, že po kalibraci měřicí sondy a jejího raménka je nejprve manuálně určen souřadný systém měřeného vzorku. K tomu je zapotřebí nasnímat minimálně rovinu, přímku a bod. Tyto tři geometrické elementy jsou nutnou podmínkou pro stanovení souřadného systému vzorku. Dále je pak třeba manuálně nasnímat části jednotlivých geometrických prvků vzorku a přiřadit jim bezpečnostní vzdálenosti. Až poté má software zařízení dostatek informací pro vytvoření automatického měřicího procesu. V něm je pak možno stanovit, v kolika bodech jednotlivých geometrických prvků bude měření provedeno. Po jeho spuštění pak probíhá automatický nájezd sondy s raménkem z bezpečnostní vzdálenosti k povrchu, kde dojde ke kontaktu sondy s povrchem a zaznamenání polohy každého kontaktního bodu v souřadném systému vzorku. Vyhodnocení polohy v jednotlivých osách je prováděno měřeními na patentovaných sklokeramických měřítkách integrovaných v každé ose. V automatickém režimu měření se kontaktní měřicí sonda ke vzorku přibližuje vždy ve

směru normály povrchu, aby se eliminovalo riziko poškrábání povrchu vzorku a snížilo se také opotřebení dotyku sondy. Zařízení Contura umožňuje manuální i automatickou výměnu měřicího senzoru a jeho měřicího raménka, a to i během automatické fáze měření. Měřicí rozsah tohoto zařízení v jednotlivých osách xyz je 700 mm×700 mm×600 mm. Maximální hmotnost vzorku je omezena na 560 kg. Zařízení disponuje otočnou hlavou RDS-CAA, do níž se upíná skenovací senzor VAST XXT. Nejistota měření podle normy ISO 10360-2 v této konfiguraci je

$$MPE_E = \left(1,8 + \frac{L}{300}\right) \mu\text{m}, \quad (14)$$

$$MPE_P = 1,8 \mu\text{m}. \quad (15)$$

Při získávání experimentálních dat byl senzor Zeiss VAST XXT osazený měřicím raménkem (stylem) s karbonovým dříkem zakončeným rubínovou kuličkou o průměru 1,5 mm. Maximální povolená odchylka měření tvaru (maximum permissible form error) v této konfiguraci je dle výrobce 1,8 μm [31].

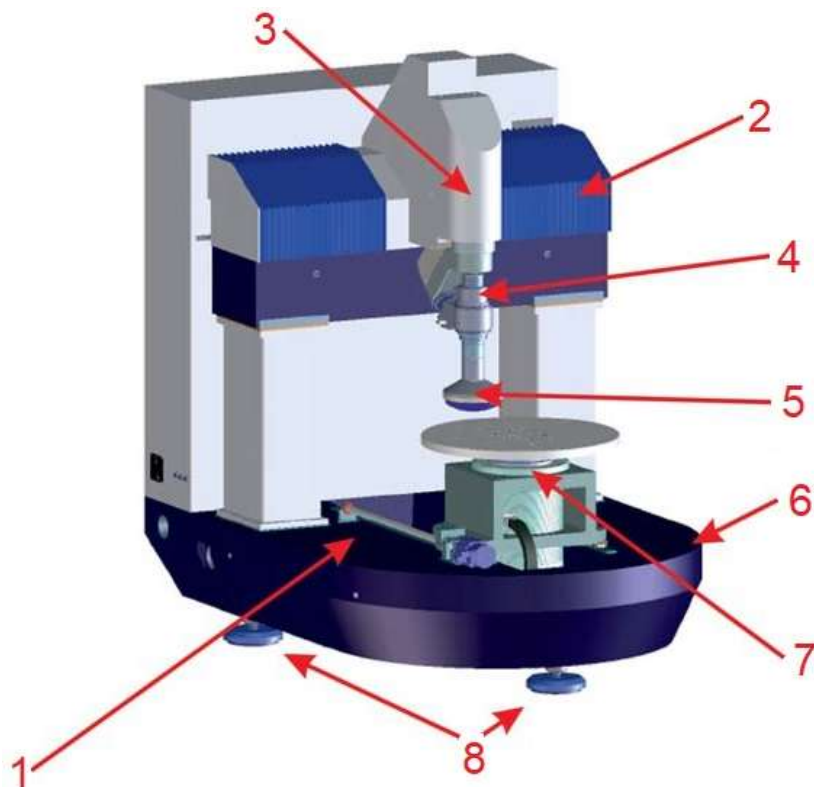


Obr. 19: Třísouřadnicové měřidlo Zeiss Contura G2 HTG. 1 – granitový stůl, 2 – manuální ovládání všech os, 3 – výměnná měřicí hlava se sondou, 4 – držák sond pro jejich automatickou výměnu, 5 – měřený vzorek. x , y , z – vyznačené osy zařízení.

Dalším typem souřadnicového měřidla je ve SLO hojně využívané multifunkční zařízení **Zeeko IRP-800G**. Jedná se o sedmiosou CNC frézu britského výrobce Zeeko [54], která umožňuje místo obráběcího nástroje upnout kontaktní měřicí hlavici, viz obr. 20. Ve standardním režimu zařízení pracuje s hrncovými frézami, tedy opracovává obrobky vázaným brusivem. Schéma zařízení je uvedeno na obr. 21. Pokud je frézovací nástroj vyjmut, lze místo něj jednoduše namontovat měřicí hlavici nesoucí stylus. Konkrétně se jedná o hlavici Renishaw RMP600 využívající patentovou technologii Rengage [55], která nejběžněji nese karbonové raménko délky 60 mm zakončené rubínovou kuličkou o průměru 6 mm, popř. plastovou kuličku z materiálu Delrin [56]. Z výrobního zařízení se tak stane kontaktní 3D souřadnicový měřicí přístroj. Během měření jsou blokovány všechny osy, kromě os x , y , z . Hlavní výhodou tohoto typu zařízení je, že během výrobního procesu není třeba s obrobkem manipulovat a mezioperační (popř. finální) měření je prováděno ve stejném zařízení, ve kterém budou následovat další obráběcí, popř. korekční kroky. Při manipulaci s velkorozměrným a těžkým obrobkem hrozí jak jeho poškození, tak změna tvaru povrchu obrobku vlivem změn upnutí při měření a obrábění. Další výhodou je možnost přímého zadání změřených dat do ovládacího softwaru frézy a vytvoření korekční mapy pro následnou korekci změřených odchylek. Na zařízení je možno obrábět, a tedy i měřit elementy obecného tvaru do rozměru 800 mm × 800 mm nebo rotačně symetrické elementy až do průměru 1 000 mm. Ve specifických případech poloměrů křivosti sférických zrcadel až do průměru 1 200 mm [57]. Přesnost této měřicí metody odpovídá kombinaci přesnosti měřicí sondy ($\pm 1 \mu\text{m}$) a přesnosti vedení jednotlivých os zařízení IRP-800G (cca $\pm 3 \mu\text{m}$). Měření probíhá tak, že nejprve je potřeba vytvořit model měřeného elementu v podprogramu „Surface designer“ programu „Zeeko TPG“. Následně je v podokně programu TPG vytvořena matice bodů, ve kterých dojde k dotyku sondy s měřeným povrchem. Sonda se svým raménkem, pokud není stanoveno jinak, přijíždí k povrchu ze směru $+z$, tedy shora.



Obr. 20: Zařízení Zeeko IRP – 800G, vlevo celkový pohled na zařízení, vpravo detail nástrojové hlavy osazené měřicí sondou [57].



Obr. 21: Schematický popis CNC obráběcího centra Zeeko IRP-800G. 1 – posuv v ose x , 2 – posuv v ose y , 3 – posuv v ose z , 4 – osy a , b (pouze orientační označení, pro měření jsou blokovány), 5 – obráběcí nástroj (rotační osa h), 6 – granitová základna, 7 – otočný stůl (osa c), 8 – stavitelné nohy zařízení [57].

2.3 Swing arm profilometrie

2.3.1 Obecný princip SAP

Měřicí zařízení typu SAP mají společný princip měření, který je znázorněn na obr. 22. Měření pomocí SAP vychází z využití sondy (*Probe*) pro měření vzdálenosti, která je umístěna na konci otočného ramene (*Swinging arm*), které se pohybuje po trajektorii nad povrchem měřeného vzorku (*Sample*) uloženého na otočném stole (*Sample table*) [34-38]. Vzhledem k principu zařízení bude mít trajektorie sondy na konci ramene vždy tvar části kružnice nakloněné v prostoru. Střed této kružnice leží na ose otáčení měřicího ramene, tedy na ose hlavního ložiska (*Main bearing*). Normála roviny, v níž kružnice leží, je rovnoběžná s osou otáčení měřicího ramene. Poloměr kružnice (*Effective arm length*) je roven kolmé vzdálenosti měřicího bodu sondy od osy otáčení ramene. Úhel náklonu této kružnice je totožný s úhlem θ svíraným osou hlavního ložiska a osou rotace *sample table*. Trajektorii konce ramene se sondou (oblouk v prostoru) je možno přesně ztotožnit s povrchem virtuální koule o poloměru R a středu C . Bod C je průsečíkem osy hlavního ložiska s osou rotace *sample table*.

V případě měření konkávního povrchu, viz obr. 22, se střed virtuální koule C nachází nad vzorkem. Při měření konkávního vzorku platí vztah

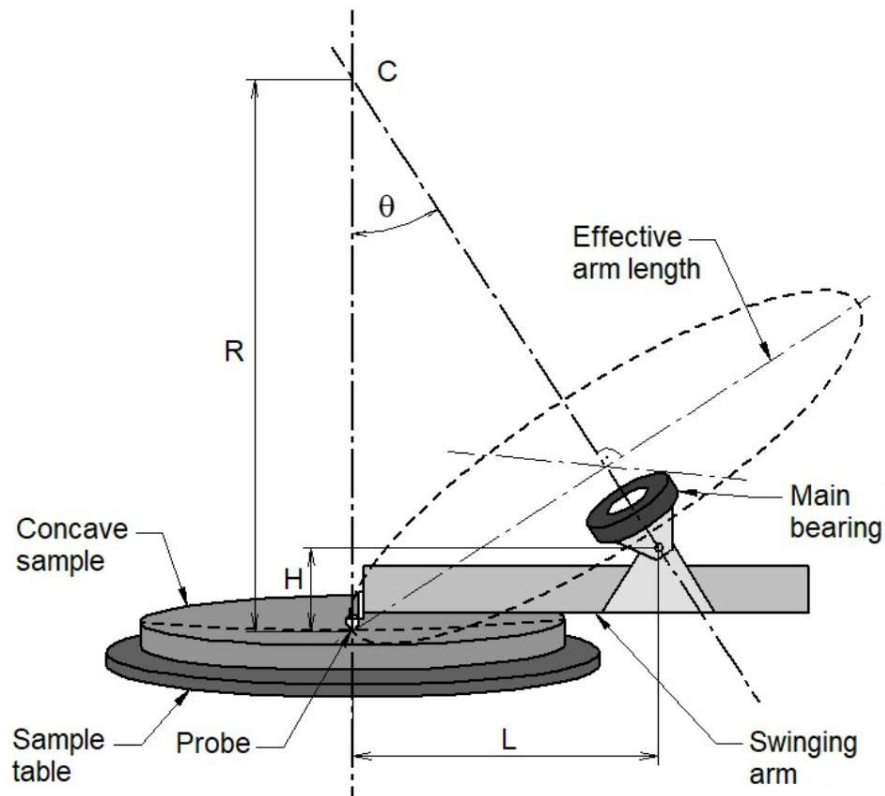
$$\tan\theta = \frac{L}{R-H}, \quad (16)$$

kde L značí vodorovnou vzdálenost od osy rotace *sample table* k ose čepu náklonu ramene se sondou, H značí svislou vzdálenost mezi osou čepu náklonu ramene se sondou a povrchem měřeného vzorku. V případě měření konvexního vzorku je bod C umístěn pod vzorkem a platí vztah

$$\tan\theta = \frac{L}{R+H}. \quad (17)$$

Povrch virtuální koule v prostoru tvoří referenční plochu, od které je měřicí sondou odměřována vzdálenost reálného povrchu vzorku. Při změně sklonu osy ramene (úhel θ) se nakloní také kružnice, po níž se pohybuje sonda. Takto lze měnit polohu bodu C a rádius virtuální koule R . V závislosti na sklonu osy rotace ramene a hlavního ložiska je tedy možné generovat různě zakřivenou sférickou (konkávní nebo konvexní) či

rovinnou virtuální referenční plochu. Přesnost tvaru reference je ovlivněna mechanickým nastavením jednotlivých os zařízení a přesností výroby mechanických dílů konkrétního zařízení a rotačních systémů. Od této reference je pak možné pomocí libovolné odměřovací sondy (kontaktní či bezkontaktní) stanovit vzdálenost povrchu reálného měřeného vzorku.



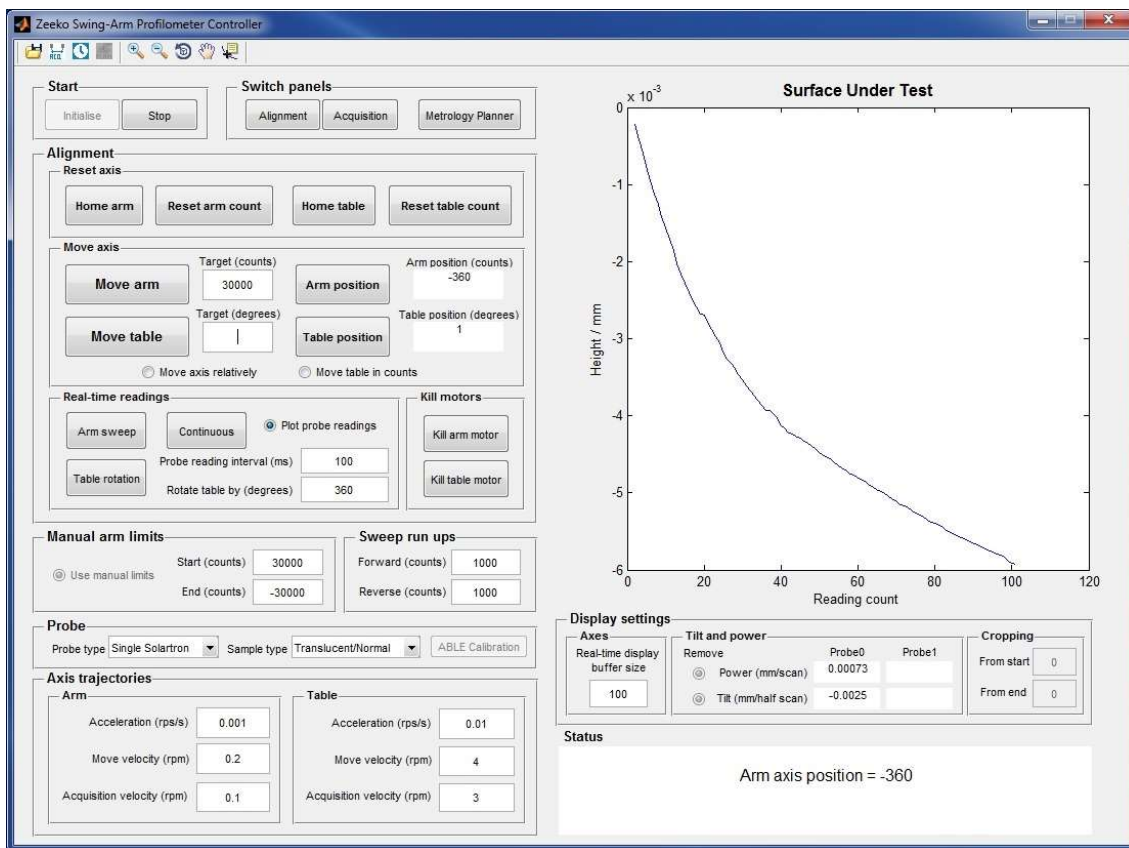
Obr. 22: Obecné schéma zařízení SAP v případě měření tvaru konkávní plochy. Probe – měřicí sonda, Sample table – vzorkový stůl, Concave sample – konkávní vzorek, Effective arm length – efektivní délka ramene, Swinging arm – měřicí rameno, Main bearing – hlavní ložisko, H – svislá vzdálenost čepu sklonu ramene od měřeného povrchu, L – vodorovná vzdálenost čepu sklonu ramene od osy otáčení vzorkového stolu, R – rádius konkávního povrchu vzorku, C – průsečík osy hlavního ložiska a osy vzorkového stolu, θ – sklon osy hlavního ložiska od vertikály.

Rádius virtuální referenční plochy ale není explicitně znám, protože závisí na nastavení sklonu osy a geometrickém uspořádání celého zařízení. Proto jsou zařízení SAP využívána typicky pouze pro měření irregulární složky deformace povrchu [58]. Pokud je třeba změřit kompletní tvar povrchu (sférickou i nesférickou deformaci), je nutno získat jiným způsobem také informaci o rádiusu virtuální referenční koule, po které se

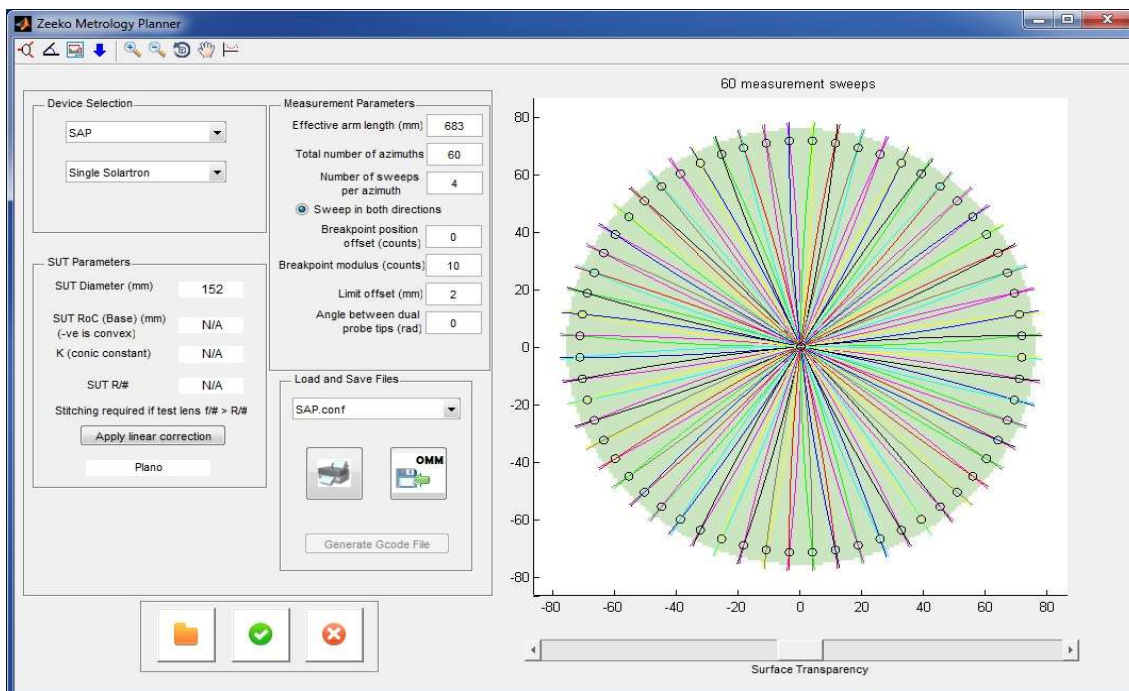
pohybuje konec ramene s měřicí sondou. To je možno provést např. triangulačními metodami za pomoci jednoho nebo více přidružených nezávislých měřicích systémů.

Měření probíhá tak, že je změna vzdálenosti povrchu vzorku od trajektorie ramene zaznamenána jako 2D profil. Měření probíhá v řadě jednotlivých kroků. Ty jsou vzájemně posunuty o vhodně zvolený úhel otočného stolu, který nese měřenou součást. Z 2D profilů protínajících se minimálně v ose rotace vzorkového stolu je následně počítačem (stitchovacím algoritmem) vygenerována výsledná 3D mapa celého měřeného povrchu. V závislosti na nastavení stroje před samotným měřením (sklon osy rotace ramene, délka ramene, nastavený počet 2D profilů) se mohou jednotlivé 2D profily protínat v mnohem větším počtu bodů než jen v jednom. Např. na schématu na obr. 24 se trajektorie 2D profilů protínají ve třech bodech. Jedná se o návrh měřicího plánu vytvořeného dodaným softwarem „Metrology planner“. Výrobce zařízení je doporučeno, aby se profily protínaly minimálně v pěti bodech. Samotný ovládací software „Zeeko Swing-Arm Profilometer Controller“, jehož okno lze vidět na obr. 23, umožňuje nastavení rychlosti jednotlivých motoricky pohyblivých os a také elektronické ovládání všech os. Program má dva hlavní úkoly. Prvním z nich je nastavení zařízení v panelu „Alignment“ před začátkem měření a druhým je start automatické měřicí procedury v panelu „Acquisition“. Podokno „Surface under test“ pak zobrazuje v reálném čase aktuální 2D profil. Ze zobrazení profilu je možno pak odečíst vliv náklonu (Tilt) a zbytkového vrchlíku (Power). Na obr. 5 je vidět okno dalšího programu „Stitching Toolkit“, který po ukončení automatické měřicí procedury zajišťuje sečtení dílčích 2D profilů do výsledné 3D mapy. Kromě samotného sečtení možné v programu aplikovat několik druhů filtrací

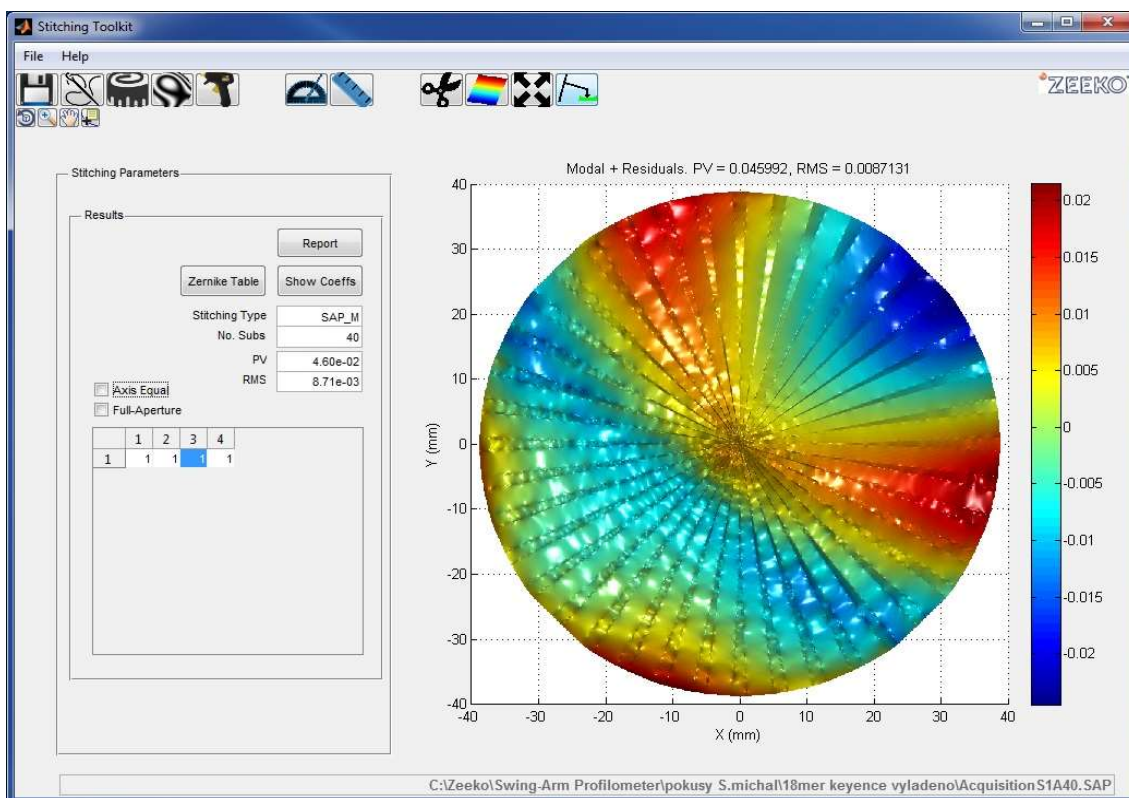
Díky omezenému úhlu náklonu hlavního vzduchového ložiska lze měřit jen vzorky s relativně malou odchylkou od roviny. Zařízení tedy změří tvar obrobků o rádiusu minimálně $\pm 1\ 800$ mm. Maximální měřený průměr součásti je omezen délkou měřicího ramene a možností pohybu hlavního ložiska na cca 650 mm.



Obr. 23: Podokno ovládacího programu Zeeko Swing-Arm Profilometer Controller.



Obr. 24: Podokno ovládacího programu Metrology Planner s vyznačenými trajektoriemi měření. Rovinný vzorek, průměr 160 mm, 60 měřících směrů – azimutů. Průsečíky trajektorií jsou označeny malými kroužky.

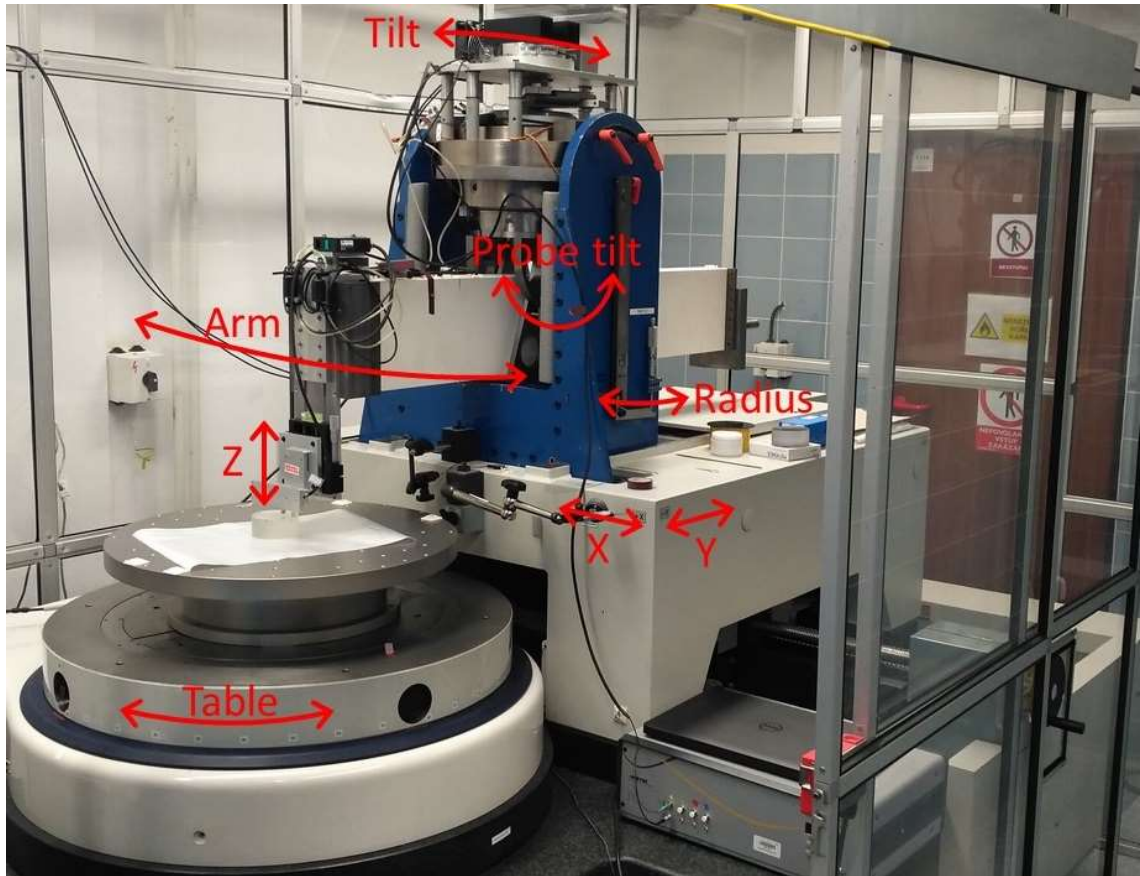


Obr. 25: Okno programu Stitching Toolkit se sešitou 3D mapou povrchu vzorku.

2.3.2 Zařízení Zeeko SAP

Úpravy SAP, které budou představeny v dalších kapitolách této disertační práce, jsou v obecnosti aplikovatelné na libovolné zařízení typu SAP. Všechny tyto úpravy byly odzkoušeny na přístroji, který je využíván na pracovišti SLO. Jedná se o zařízení dodané firmou ZEEKO [54] pro potřeby kontroly tvaru ploch obráběných na CNC strojích ZEEKO řady 800. Popisovaný SAP je v principu skenovací profilometr s osmi stupni volnosti, které umožňují rotace a posuvy měřicí sondy a kontrolovaného vzorku. Dále budou prvky umožňující jednotlivé pohyby (posuvy a rotace) souhrnně označovány jako osy. Tři z osmi os jsou uloženy na vzduchových ložiscích, zbytek na kovových ložiscích či šroubech. Fotografie s vyznačenými osami je na obr. 26. Na vzduchovém ložisku se pohybuje rotační osa měřicího ramene *Arm*. Součástí rotační osy ramene je servomotor a digitální enkodér. Na jednom konci ramene se nachází svisle polohovatelný držák měřicích sond – osa *z*. Mezi měřicím ramenem a hlavním ložiskem se nachází osa *Probe tilt* umožňující náklon celého ramene a zároveň měřicí sondy tak, aby sonda směřovala vždy ve směru normály měřeného povrchu. Hlavní ložisko je dále možné naklánět ve směru osy θ (na obr. 26 označené *Radius*), což umožňuje změnu úhlu osy hlavního ložiska. Změna úhlu θ má za následek změnu trajektorie konce měřicího ramene se sondou vzhledem k obrobku. Další osou je *Tilt*, jež nastavuje náklon celé věže nesoucí hlavní vzduchové ložisko s měřicím ramenem. Věž je možné naklonit ve směru osy *x* pomocí šroubů. Věž je umístěna na nosném bloku. Celý nosný blok je možné ručně posouvat po granitové základně ve směrech *x* a *y* na vzduchových polštářích pomocí závitových tyčí. Měřený vzorek se pokládá na motorizovaný otočný stůl vybavený digitálním enkodérem. Stůl nesoucí vzorek kromě rotace okolo svislé osy jdoucí jeho středem (ve směru *Table*) umožňuje i vodorovný posun své horní plochy ve dvou na sebe kolmých směrech.

K zařízení přísluší elektronický kabinet obsahující switche, drivery a obslužné PC. Ovládací software sestává ze dvou primárních programů. Pro nastavení a kontrolu měřicího procesu slouží *Swing-Arm Profilometer Controller*, jehož součástí je podprogram *Metrology Planner* s vizualizací průběhu měření (viz obr. 24). Spojování – stitching naměřených 2D dat do výsledné 3D mapy je možné díky programu *Stitching Toolkit* [59, 60].



Obr. 26: Celkový pohled na zařízení SAP umístěného na pracovišti SLO s červeně vyznačenými osami.

3. Úpravy zařízení Zeeko SAP

3.1 Měřicí sondy

Měřicí sondou, někdy též senzorem, se obecně nazývá zařízení, pomocí kterého lze zaznamenat okamžitou hodnotu nějaké fyzikální, chemické nebo biologické veličiny. Pomocí senzoru se vstupní měřená veličina mění na výstupní elektrický signál, který lze dále přenášet a zpracovávat. Výstupní signály mohou být analogové nebo digitální. Pokud hovoříme o měřicích sondách vhodných pro využití v profilometrii, bude se jednat o sondy mapující změnu polohy či vzdálenosti. V praxi se jedná o pasivní sondy, tedy zařízení, která působením měřené veličiny (změnou polohy) mění některý ze svých elektrických parametrů.

3.1.1 Typy sond využitelných v zařízení SAP

Pro profilometrické měření tvaru vzorku se jako nejvhodnější jeví sondy, které splňují základní kritéria:

- mapují vzdálenost měřeného povrchu na velmi malé ploše, kdy průměr detekční plošky je v setinách až desetínách mm,
- měří s dostatečným výškovým rozlišením – setiny až desetiny μm ,
- měří s dostatečně rychlou odezvou, kdy vzorkovací frekvence jsou v desítkách až stovkách Hz,
- jsou schopny detekovat změnu vzdálenosti různých typů povrchů – různá drsnost, různá odraznost, různý materiál.

Těmto požadavkům mohou vyhovovat kontaktní i bezkontaktní (optické) sondy pracující na různých fyzikálních principech [61]. Kontaktní sondy jsou často voleny pro svou univerzálnost, protože mohou měřit vzdálenost jak hrubě broušených, tak hladkých optických povrchů. Kontakt se vzorkem je zprostředkovaný nějakým typem doteku na konci pohyblivého dřívku (ocelová, rubínová nebo plastová kulička). Během profilometrického měření je zakončení sondy v kontinuálním kontaktu s měřeným povrchem. Dochází tedy k tření sondy po povrchu, což vždy vede k určitému opotřebení

doteku sondy a nezdídká také k poškrábání měřeného povrchu vlivem tažení prachových částic po povrchu nebo přímo materiálem dotyku. Proti použití kontaktních sond stojí také jejich menší přesnost, než je tomu u optických sond. Nejčastějšími typy kontaktních sond jsou sondy **indukčnostní** nebo **kapacitní** [62]. Někteří výrobci však přicházejí na trh také s kontaktními sondami s optickou detekcí pomocí snímáním skleněného pravítka uvnitř sondy [63].

Sondy na bázi **interference v bílém světle** [64] jsou optické bezkontaktní senzory využívající nekoherentní bílé světlo (typicky z LED zdroje) a umožňují detekovat v subnanometrové přesnosti jak lesklé, tak difúzní matné povrchy.

Další možností je využití **konfokálních snímačů**, viz odkazy [65, 66], které jsou také bezkontaktní a měří s dostatečnou frekvencí a submikronovou přesností na lesklých i matných površích.

3.1.2 Sondy dodané se zařízením Zeeko SAP

Zařízení Zeeko SAP bylo v době dodání do SLO vybaveno dvěma kontaktními sondami Solartron LE LT 12P [67] a jednou bezkontaktní triangulační sondou Keyence LK-G32 [68], viz obr. 27.

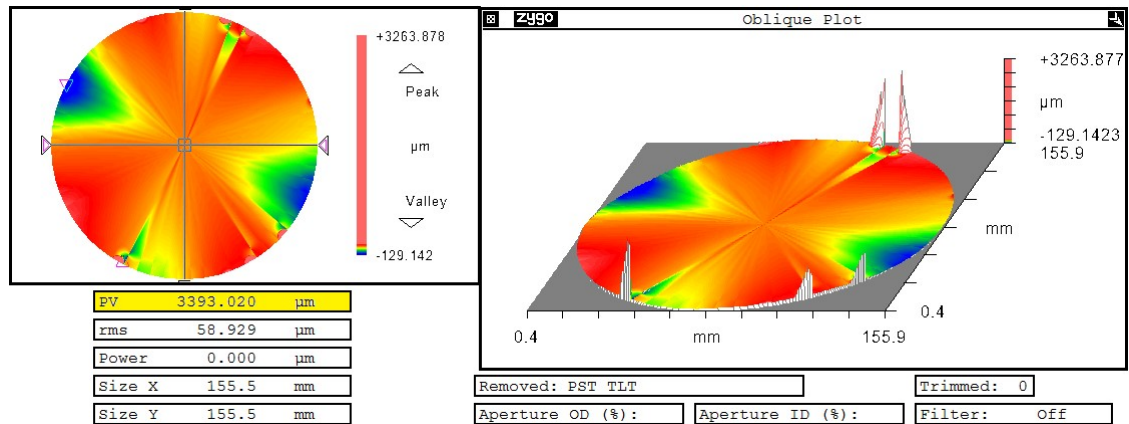
Kontaktní sonda Solartron umožňuje měření na hladkém leštěném či vrstveném povrchu a také na drsném broušeném povrchu. Kontakt s měřeným povrchem je realizován ocelovou kuličkou o průměru 3 mm na konci tenkého ocelového dřívku. Rozlišení sondy je výrobcem deklarováno od 0,0125 mm do 0,4 mm (v závislosti na nastavení sondy) [67].



Obr. 27: Vlevo – kontaktní sonda Solartron LE LT 12P, vpravo – bezkontaktní triangulační sonda Keyence LK-G32.

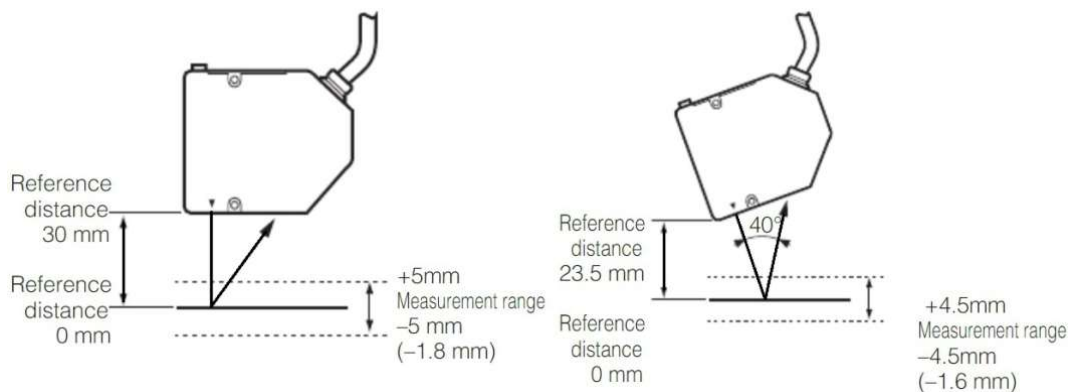
Po mnoha testech s původně instalovanými sondami Solartron, při měření přesné rovinné leštěné skleněné plochy o průměru 150 mm (deklarovaná odchylka menší než 63 nm), sondy vykazovaly odchylku v tvaru plochy max. $\pm 0,4 \mu\text{m}$, což odpovídá dokumentaci sond Solartron. Hrot sondy je ovládán (zvedán a spouštěn) tlakovým vzduchem. SAP umožňuje montáž jedné nebo druhé sondy zvlášť nebo je možno namontovat a vyčítat a průměrovat signál z obou sond současně, podobně jako je tomu v odkazu [38]. Duální zapojení sond nebylo použito, protože zmenšuje využitelnou aperturu měření. Zjednodušeně, kdyby se jedna ze sond (více na vnitřní straně měřeného kusu) měla dostat k vnějšímu okraji kusu, tak by vnější sonda přepadla přes okraj vzorku. Aby k této komplikaci nedošlo, je třeba zmenšit měřenou aperturu. Proto na okraji není možno počítat s výsledky obou sond. Další nevýhodou kontaktního měření je možnost poškození měřeného povrchu. Během testování SAP s jednou sondou Solartron se objevil problém v krajích měřené apertury. Hrot je mezi přejezdy nadzvednut, aby pod ním mohl povrch rotovat do dalšího měřeného směru – azimutu. Během sestupu měřicího hrotu pak často nastalo zadrhnutí dřívku sondy. Tato závada vedla ke generování extrémních skokových hodnot na okrajích měřené oblasti, často v hodnotách až jednotek milimetrů, viz obr. 28. Nedostatečná přesnost, chyby v krajích apertury, nutná redukce měřené

oblasti a riziko poškrábání měřeného povrchu hrály svou roli v rozhodnutí upustit od dalšího používání sond tohoto typu.



Obr. 28: Skoky v datech z měření rovinné skleněné desky na okraji apertury, průměr desky 150 mm, počet azimutů 60. Hodnota $PV = 3\,393\ \mu\text{m}$ vyznačena žlutě.

Druhým typem sondy, kterou bylo zařízení vybaveno v době dodávky na SLO, byla bezkontaktní triangulační sonda Keyence LK-G32 [68], která podle výrobce umožňuje měření na leštěném odrazném a rovněž na jemně broušeném difúzním povrchu. Nastavení sondy pro různé povrchy je dobře patrné z obr. 29. Při kontrole tvaru reflexního povrchu sonda vyhodnocuje změnu polohy odraženého svazku na maticovém detektoru. Sonda by jistě našla dobré uplatnění v případě měření jednoosého posuvu rovinného odrazného povrchu směrem k a od měřicí sondy, protože v takovém případě nenastává změna sklonu povrchu vzorku. Avšak pokud je sonda využita pro postupné skenování, dochází k jejímu nesystematickému chování. Poloha odraženého svazku dopadajícího na detektor sondy je ovlivněna změnou výšky a lokálním sklonem odrazného povrchu. Tedy pro potřeby měření tvaru optických ploch se spojitým povrchem, kdy výšková změna vždy přichází současně se změnou sklonu, není tato sonda vhodná.



Obr. 29: Nastavení sondy Keyence LK-G32 pro měření difúzního broušeného povrchu (vlevo) a odrazného leštěného (vpravo) [68].

3.1.3 Sondy Luphos a jejich implementace

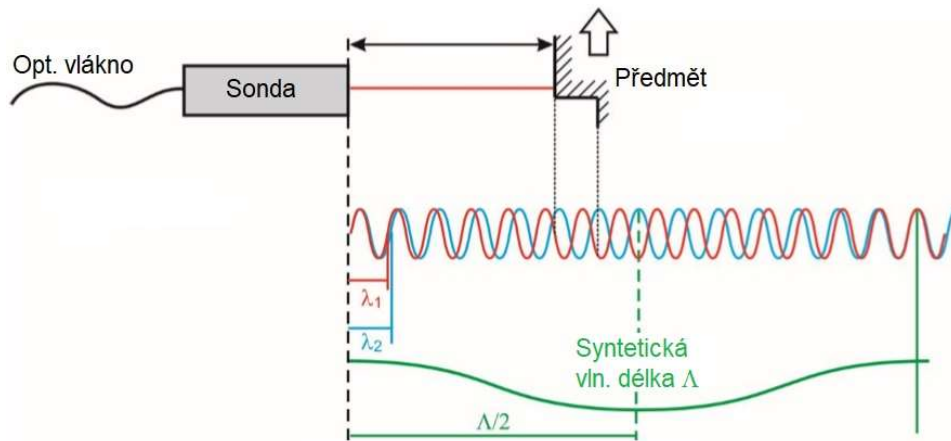
Z výše zmíněných důvodů bylo rozhodnuto využít pro měření na zařízení SAP bezkontaktního systému s laserovými optickými sondami LuphoSmart [69]. Sestava obsahuje 4 bezkontaktní sondy, kontrolér a obslužný software. Všechny sondy pracují na multivlnném interferometrickém (MWLI – MultiWaveLength Interferometry) principu a využívají záření o čtyřech vlnových délkách v rozsahu 1530 nm – 1610 nm. Přesné hodnoty jednotlivých vlnových délek jsou chráněny patentem výrobce. Kontrolér a jednu ze sond je možno vidět na obr. 31.

Interferometrie s více vlnovými délkami (MWLI) využívá několik nezávislých diskrétních vlnových délek, které sdílejí jednu optickou dráhu, a vypočítává syntetickou vlnovou délku. Tímto způsobem lze kombinovat velmi dobré rozlišení s velmi širokým měřicím rozsahem.

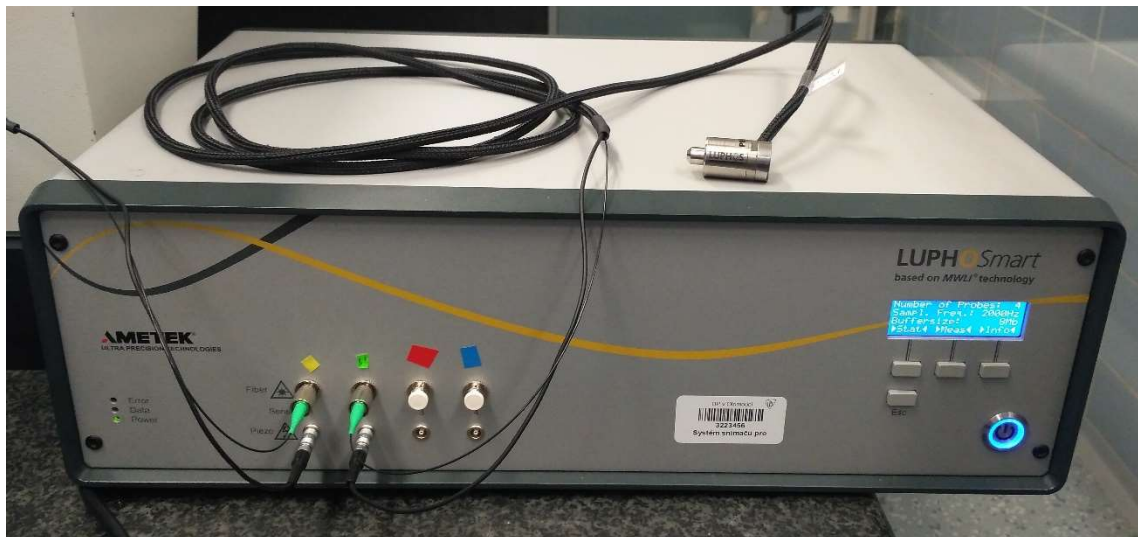
Princip funkce je vysvětlen na příkladu použití dvou vlnových délek λ_1 a λ_2 [70]. K měření stejné vzdálenosti bude každá vlnová délka poskytovat vlastní interferenční signál. To odpovídá dvěma nezávislým interferometrům s vysokou přesností, ale malým měřicím rozsahem $\lambda_1/2$, resp. $\lambda_2/2$. Díky technologii MWLI však lze měřicí rozsah rozšířit výpočtem syntetické vlnové délky z obou diskrétních vlnových délek podle vztahu

$$\Lambda = \frac{\lambda_2 \cdot \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (18)$$

Velikost dosaženého rozsahu jednoznačnosti se rovná polovině syntetické vlnové délky Λ , což prakticky může být více než 1 mm.

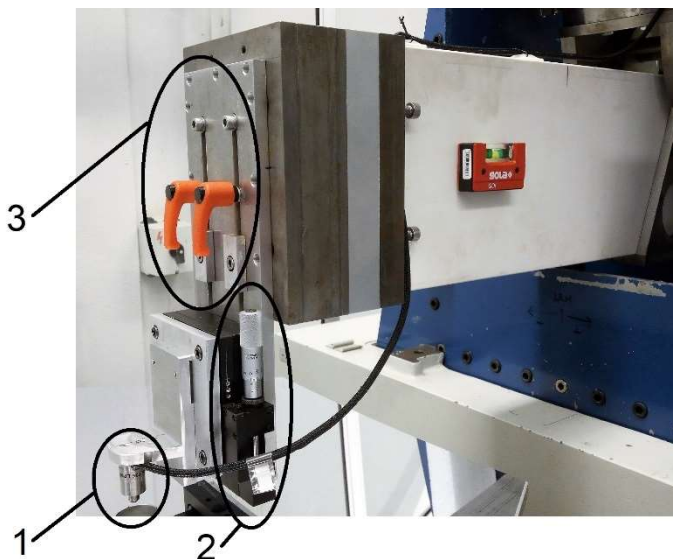


Obr. 30: Schéma k vysvětlení principu MVLI.

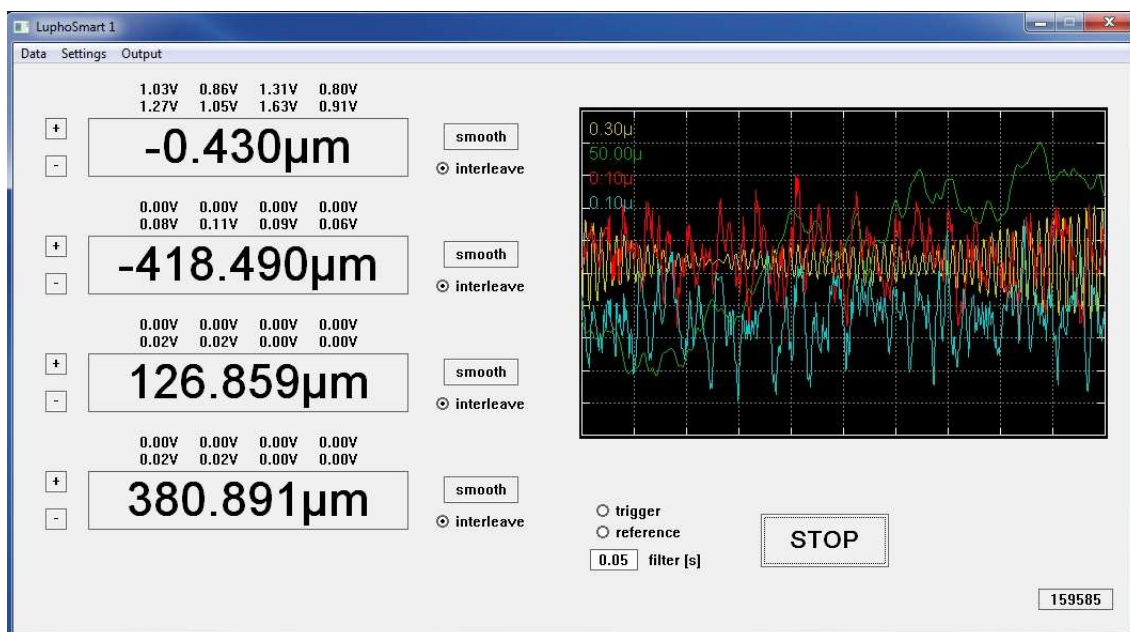


Obr. 31: Kontrolér sond LuphoSmart se dvěma připojenými sondami, na kontroléru je možno vidět jednu ze sond.

Výrobce nabízí několik typů sond s různou pracovní délkou (2,5 mm – 5 mm, 5 mm – 10 mm, 10 mm – 300 mm). Pracovní délkou se rozumí vzdálenost měřeného povrchu od vrcholu sondy, na které je sonda schopna vyhodnotit změnu vzdálenosti povrchu. Systém může vyhodnocovat až čtyři signály od čtyř různých sond současně a je možno měřit hladké i difúzní povrchy. U leštěného povrchu a sondy s nejkratší pracovní délkou může povrch dosahovat sklonu až 7°. Rozlišení všech sond je deklarováno jako 0,1 nm a obvyklá přesnost ve stabilním prostředí je lepší než 50 nm. Po prvotním testování byla použita sonda P026 s nejkratší pracovní vzdáleností. Její uchycení na konci měřicího ramene je možno vidět na obr. 32. Na obr. 33 je pak základní obrazovka obslužného softwaru systému sond LuphoSmart. V levé části jsou vypsány aktuální vzdálenosti povrchů od čtyř měřicích sond, v grafu vpravo jsou čtyři časové průběhy měřených vzdáleností. Program umožňuje vypnout zobrazení jedné nebo více sond. Stejně tak je možné nastavit časovou filtraci dat, či připojit externí trigger. Kromě změny vzdálenosti povrchu od sondy je možné po přepnutí detekovat kvalitu signálu od měřeného povrchu ve formě změny napětí na jednotlivých sondách.

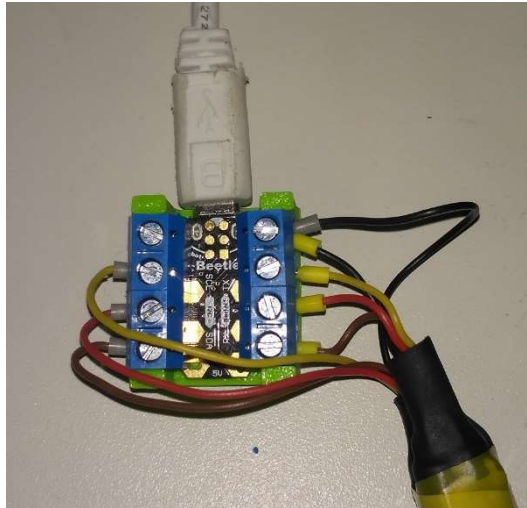


Obr. 32: Bližší pohled na uchycení sondy LuphoSmart. 1 – sonda, 2 – mikrometrický výškový posuv, 3 – hrubý výškový posuv.



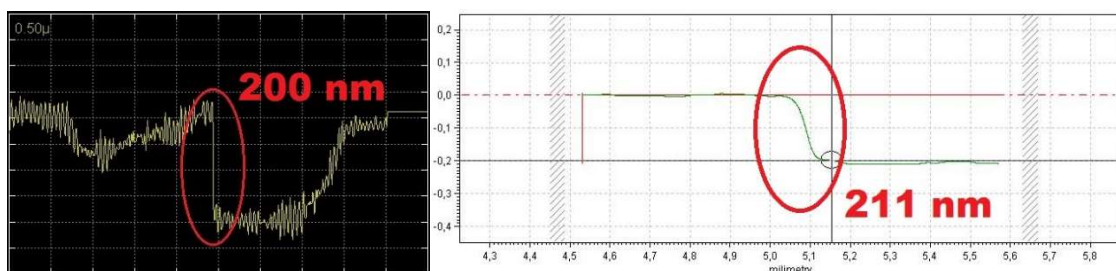
Obr. 33: Obslužný software sond LuphoSmart.

Pro plnou implementaci sond Luphos do měřicího zařízení ZEEKO SAP bylo třeba sondy začlenit do obslužného softwaru, aby měřicí procedura automaticky ukládala naměřená data ze sond. To se záhy projevilo jako velmi podstatný problém, protože vývojáři programu odmítli dodat kódy pro úpravu softwaru. Nejefektivnějším řešením tedy bylo upravit signál ze sond a kontroléru Luphos tak, aby se formálně shodoval se signálem z původních sond Solartron. K předzpracování signálu slouží skript v prostředí Matlab, který je nadřazený a spouští původní software sond LuphoSmart. Skript v Matlabu je uveden v příloze 1 této disertační práce. Signál je dále zpracován pomocí MiniPC Beetle, viz obr. 34. Do tohoto zařízení je možno připojit a předzpracovávat signál ze dvou sond současně. Součástí procesu implementace sond bylo experimentální zjištění koeficientu pro přepočítání změny signálu na reálnou změnu vzdálenosti měřeného povrchu od sondy a zadání koeficientu do skriptu v Matlabu.

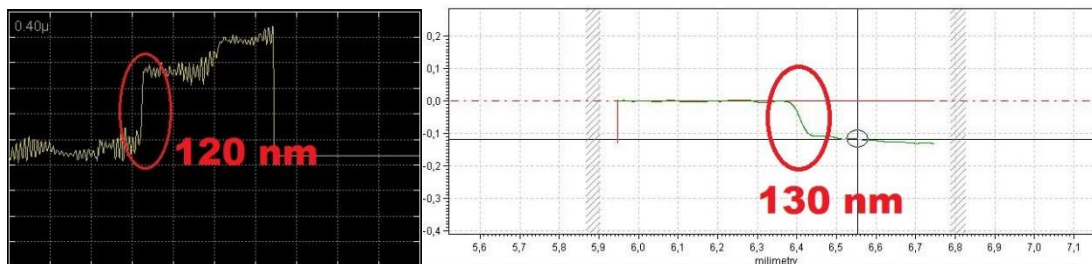


Obr. 34: MiniPC Beetle pro předzpracování signálu z dvou souběžně připojených sond LuphoScan.

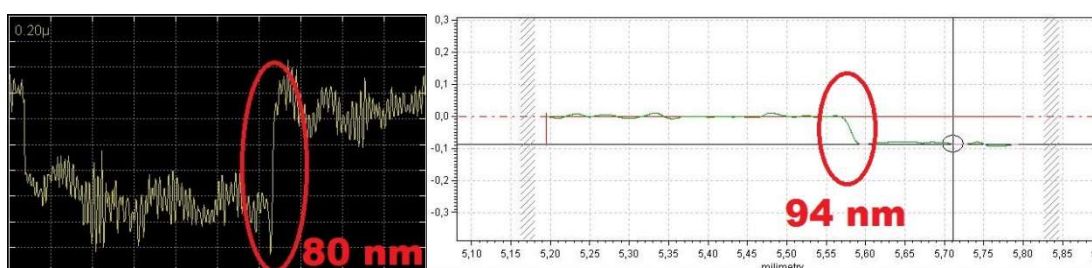
Při prvním testování s jednou osazenou sondou proběhlo porovnání náměrů ze SAP a kontaktního profilometru Taylor-Hobson Form Talysurf Series 2. Na několika různých vzorcích s relativně ostrým výškovým schodem, který byl realizován okrajem napařené kovové hliníkové vrstvy na skleněném substrátu. Vrstva měla na každém ze tří vzorků různou tloušťku odpovídající délce napařování. Výsledky měření jsou vedeny na obr. 35–37. Rozdíl v hodnotách mezi měřením pomocí sondy Luhos a profilometrem je dán pouze vizuálním odečtem výšky schodu z grafu měření sondou Lufhos.



Obr. 35: Porovnání náměru výšky vrstvy kovové vrstvy, vlevo náměr ze SAP se sondou Lufhos, změřená výška vrstvy 200 nm; vpravo náměr ze zařízení Taylor-Hobson Form Talysurf Series 2, změřená výška vrstvy 211 nm.



Obr. 36: Porovnání náměru výšky vrstvy kovové vrstvy, vlevo náměr ze SAP se sondou Luphos, změřená výška vrstvy 120 nm; vpravo náměr ze zařízení Taylor-Hobson Form Talysurf Series 2, změřená výška vrstvy 130 nm.



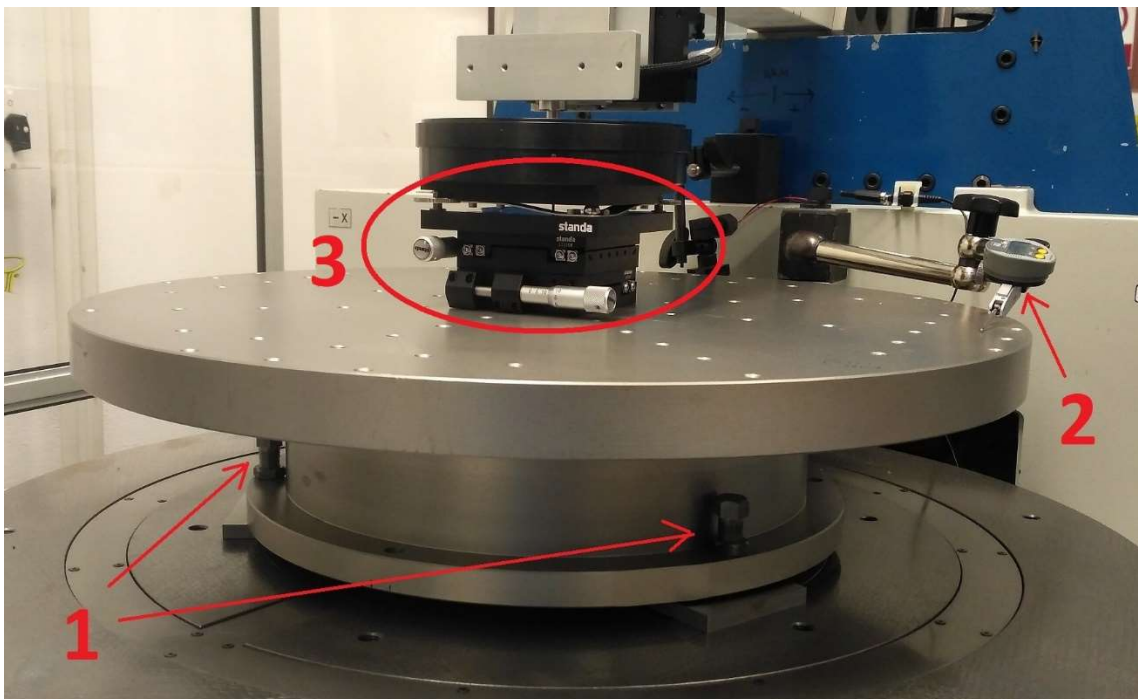
Obr. 37: Porovnání náměru výšky vrstvy kovové vrstvy, vlevo náměr ze SAP se sondou Luphos, změřená výška vrstvy 80 nm; vpravo náměr ze zařízení Taylor-Hobson Form Talysurf Series 2, změřená výška vrstvy 94 nm.

3.2 Úprava vzorkového stolu

Během testovacích měření s plochými díly (díly rovinné, popř. s velkým rádiusem) se projevila negativní vlastnost rotačního stolu. Stůl sice disponuje možností příčného posuvu ve dvou na sebe kolmých osách, ale neumožňuje změnu náklonu své horní plochy, na kterou se ukládají vzorky. Pro kvalitní měření horní plochy vzorku je vhodné odstranit náklon už před měřením mechanicky, nikoli dodatečně softwarově, což by mohlo zavádět další problémy. Ze zkušenosti a testování je vhodné horní plochu nastavit tak, aby výškový rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším bodem měřené plochy byl v řádu jednotek μm . Pokud se jedná o velmi rozlehlý a nepravidelný vzorek, je maximální doporučená hodnota 20 μm .

Vyrovnání vzorku bylo vyřešeno dvěma zásahy či způsoby. Pokud se jedná o malý díl s průměrem do cca 250 mm, lze tento vzorek uložit na dodatečně sestavený

a namontovaný stolek s dvěma mikrometrickými na sebe kolnými posuvy a dvěma na sebe kolnými náklony. Tento stolek lze vidět pod číslem 3 na obr. 38. Pokud je snaha měřit tvar velkoplošného vzorku, je vzorek ukládán přímo na nástavec stolu. Proto byly do nástavce v jeho spodním límci instalovány šrouby s jemným závitem, viz 1 na obr. 38. Šrouby jsou rozmístěny do vrcholů rovnostranného trojúhelníka. Jeden z nich je fixovaný a další dva umožňují vyrovnání měřené plochy vzorku do vodorovné polohy. Náklon horní plochy vzorku je během rotace stolu se vzorkem snadno detekovatelný pomocí měřicí sondy umístěné mimo střed vzorku, popř. může být detekován setinovým úchylkoměrem označeným číslem 2 na obr. 38.

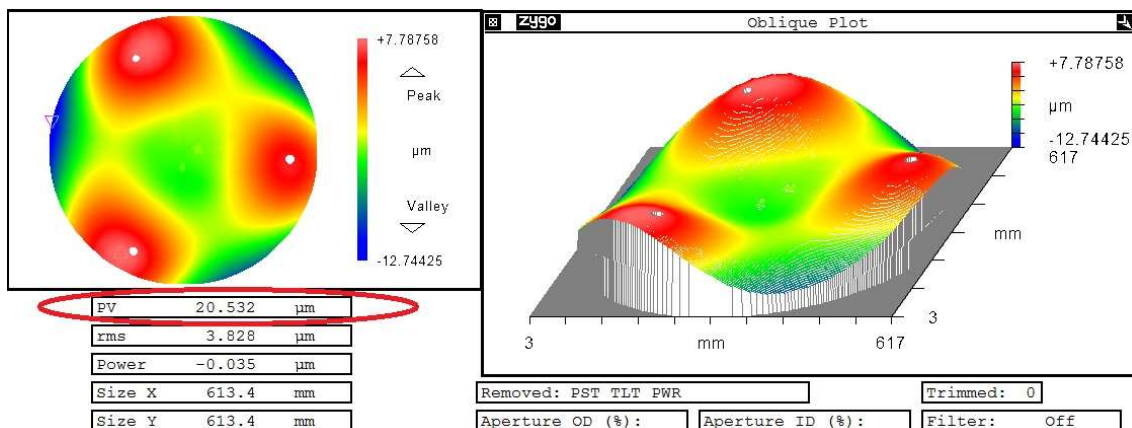


Obr. 38: Úpravy vzorkového stolu. 1 – šrouby s jemným stoupáním v základně nástavce, 2 – setinový úchylkoměr pro hrubé nastavení, 3 – přídavný čtyřosý posuvný a náklonný stolek pro malé díly.

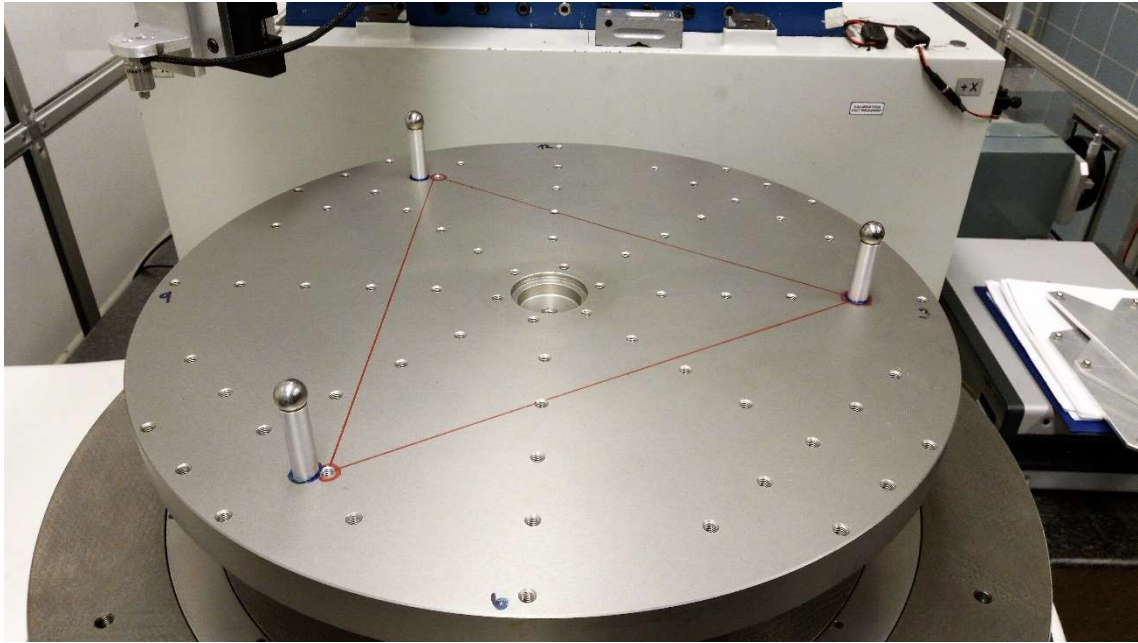
3.3 Uložení velkoplošných vzorků

Během prvotního testování přístroje SAP se potvrdil teoretický předpoklad, že velkoplošná skleněná zrcadla s velmi vysokým poměrem příčný rozměr/tloušťka se vlivem působící gravitace na vzorkovém stole budou prohýbat. Tento jev je dobře demonstrován na příkladu níže. Jedná se o skleněné hexagonální zrcadlo o průměru

kružnice opsané hexagonu 900 mm, tloušťka zrcadla činí 17 mm a hmotnost zrcadla je cca 20 kg. Na obr. 39 je náměr zrcadla ze zařízení SAP, kdy bylo zrcadlo volně uloženo na třech bodech – ocelových kuličkách. Kuličky byly pevně fixované epoxidovým lepidlem na duralových válečkách a ty závitem spojeny s nástavcem vzorkového stolu, viz obr. 40. Protože nástavec stolu z výroby disponoval sítí děr se závity, byly pro umístění využity ty pozice, které se nejvíce blížily vrcholům rovnostranného trojúhelníka. Na obr. 40 jsou vidět úložné body v původních pozicích. Zároveň je v obrázku červeně vyznačený přesný rovnostranný trojúhelník a nové díry se závity přesně v jeho vrcholech. Poloha původních úložných bodů je rovněž vyznačena na náměru zrcadla na obr. 39 jako tři bílé body. Z náměru je dobře patrný průhyb zrcadla mezi úložnými body a výsledná hodnota nesférické deformace $PV = 20,538 \mu\text{m}$.



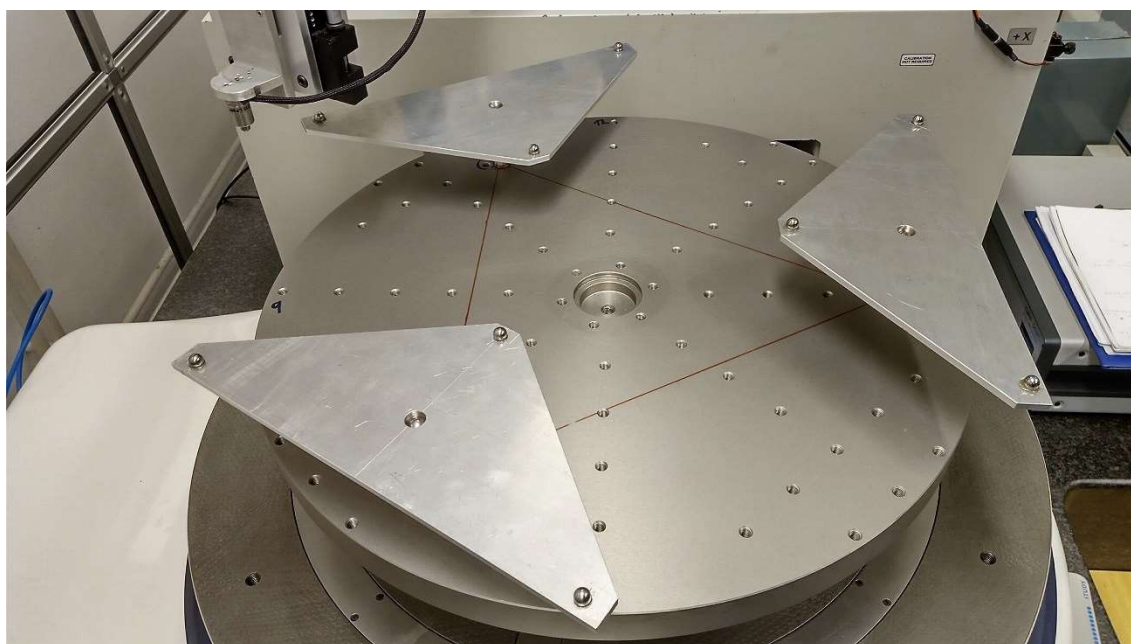
Obr. 39: Změřený tvar povrchu velkoplošného zrcadla uloženého na třech bodech – kuličkách. Poloha kuliček vyznačena třemi bílými tečkami. Výsledná hodnota nesférické deformace $PV = 20,538 \mu\text{m}$ vyznačena červeně.



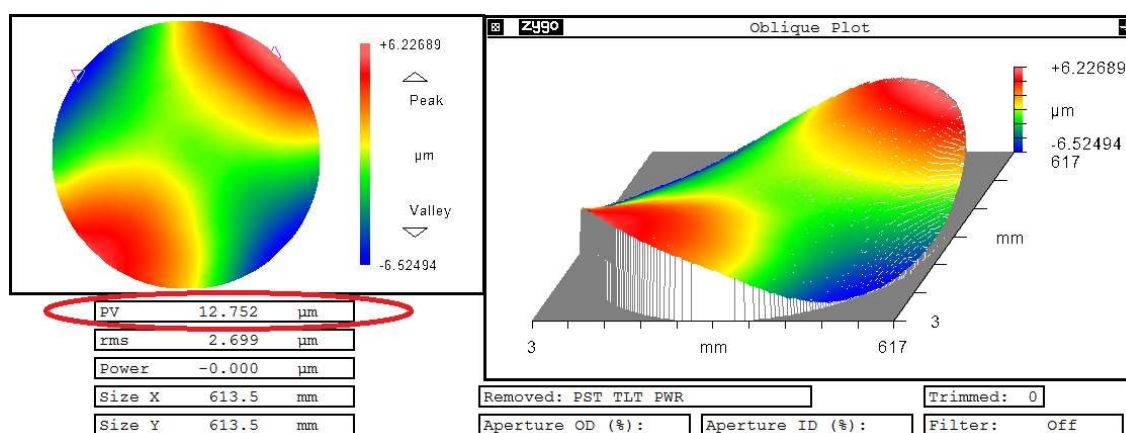
Obr. 40: Uložení velkoplošných vzorků na nástavci vzorkového stolu. Tři ocelové kuličky pevně fixované na svých válcových nožkách v původních polohách. Červeně vyznačené nové polohy rozmístěné ve vrcholech rovnostranného trojúhelníku.

Pro dosažení rovnoměrnějšího rozložení hmotnosti zrcadla byl navržen a realizován nový systém uložení. Skládá se ze tří původních úložných bodů (ocelové kuličky přilepené na duralových válečcích) a také ze tří nových duralových trojúhelníkových desek. Technický výkres desek je možno vidět v příloze 2 této práce. Desky jsou osazené pevně fixovanými ocelovými kuličkami o průměru 10 mm (přípevněny epoxidovým lepidlem), přičemž kuličky tvoří vrcholy rovnostranného trojúhelníku. V těžišti tohoto trojúhelníku je v desce vyvrtán otvor, který tvoří kluzné uložení. Toto kluzné uložení pak umožňuje náklon a rotaci duralových trojúhelníků. Kompletní sestavu je pak možno vidět na obr. 41. Testování tohoto mechanismu bylo provedeno na několika vzorcích velkoplošných skleněných zrcadel. Výsledek měření tvaru plochy uvedený na obr. 42 přísluší stejnému vzorku jako na obr. 39. Vzorek byl vůči souřadnému systému měřicího zařízení orientován naprosto stejně. Přesto je patrný značný rozdíl ve tvaru měřené funkční plochy zrcadla. Lze pozorovat, že vymizela deformace tvaru v optické praxi označovaná jako „trefoil“, jež nastala důsledkem působení gravitace na vzorek uložený na třech bodech. Celková nesférická deformace PV klesla z výchozích 20,538 μm na polovinu původní hodnoty 12,752 μm . Správnou funkci nového ukládacího mechanismu dále demonstruje výsledek měření uvedený na obr. 43.

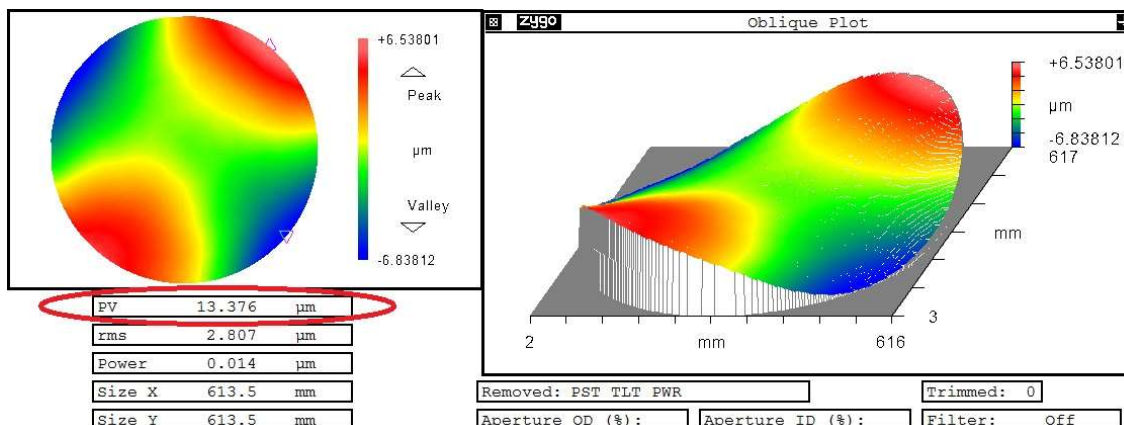
Zde je tentýž vzorek opět orientován vůči měřicímu zařízení stejně jako v předešlých dvou případech. Změnou je, že vzorkový stůl s novým uložením byl vůči vzorku otočen o 90° proti směru hodinových ručiček. Výsledek ukazuje značnou shodu s předchozím měřením. Rozdíl v hodnotě nesférické deformace mezi dvěma měřeními s otočeným uložením vzorku činí pouze 624 nm.



Obr. 41: Nové uložení. Tři duralové trojúhelníky podepřené ve svých těžištích s fixovanými ocelovými kuličkami.



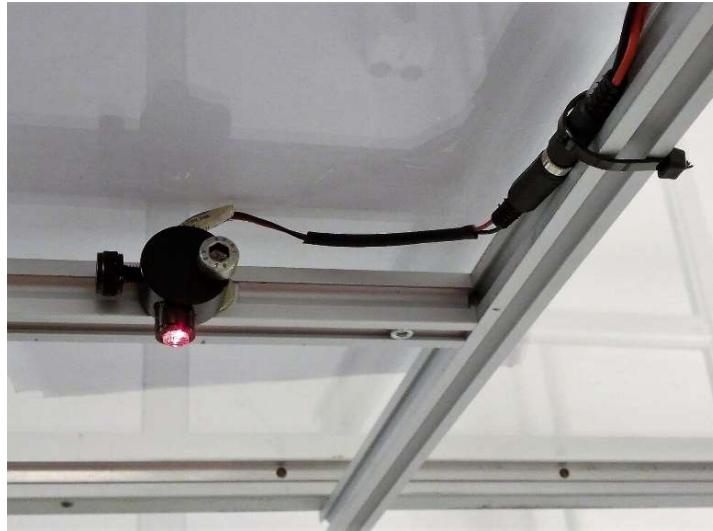
Obr. 42: Změřený tvar povrchu velkoplošného zrcadla uloženého na devíti bodech nového úložného systému. Výsledná hodnota nesférické deformace $PV = 12,752 \mu\text{m}$ je vyznačena červeně.



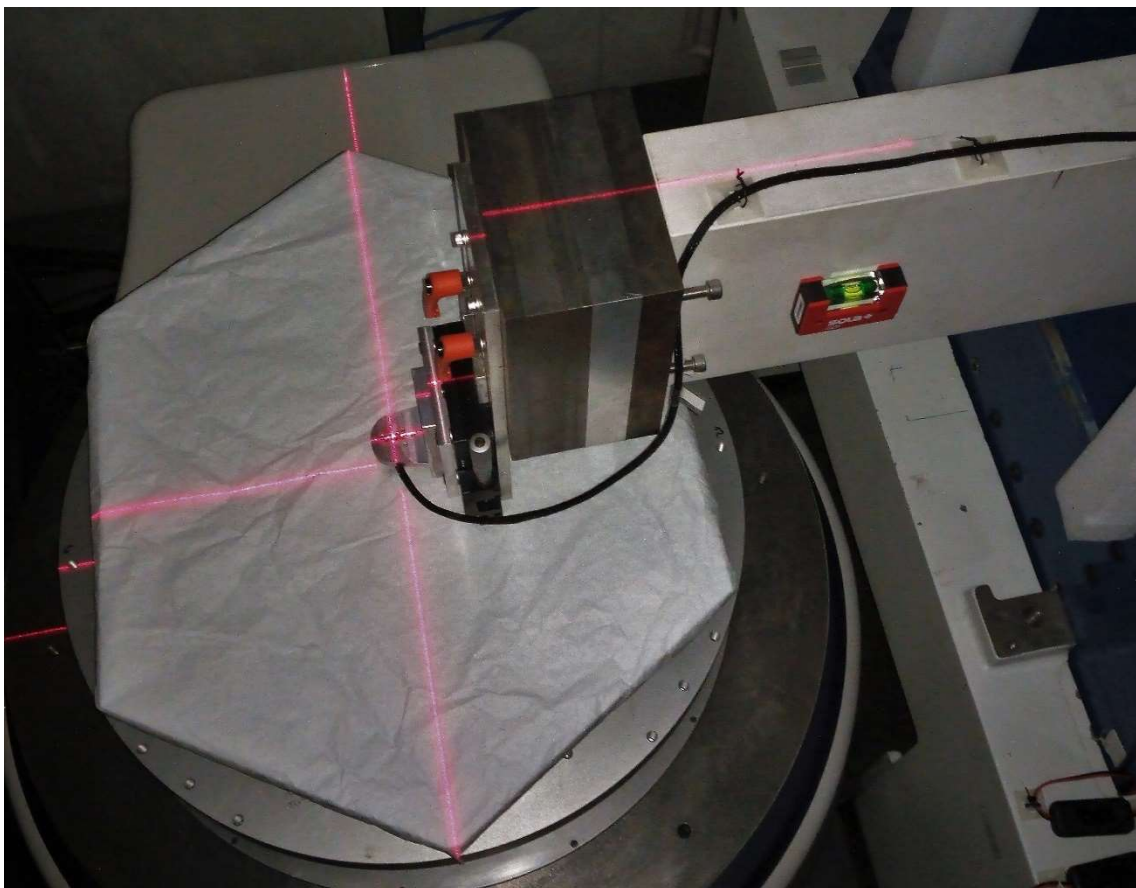
Obr. 43: Změřený tvar povrchu velkoplošného zrcadla uloženého na devíti bodech nového úložného systému. Uložení pod vzorkem otočeno o 90° proti směru hodinových ručiček. Výsledná hodnota nesférické deformace $PV = 13,376 \mu\text{m}$ vyznačena červeně.

3.4 Laserový modul pro uložení vzorku

Jedním ze základních předpokladů pro přesné měření pomocí SAP je ztotožnění polohy vzorku na měřicím zařízení s matematickým modelem uvnitř měřicího softwaru a také s výsledným 3D náměrem. Pro tento účel je třeba mít vzorek na vzorkovém stole přesně orientovaný. Orientací je myšlena poloha vzorku v souřadnicích x a y a také rotace vzorku. Pro usnadnění tohoto úkolu byl nad střed otočného stolu nainstalován držák nesoucí laserový modul zobrazující polohovou značku, viz obr. 44. Jedná se o levný kompaktní laserový modul vykreslující červený kříž o výkonu deklarovaném výrobcem maximálně 6 mW, třídy 3B, s napájecím napětím 3,5 V – 5 V [71]. Střed kříže leží přesně v ose rotace vzorkového stolu a čáry směřují ve směrech os X a Y souřadného systému SAP. Pokud má být měřený povrch na základě naměřených dat následně opracován, je znalost jeho orientace vůči naměřeným datům naprosto klíčová. Snímek světelného kříže na měřeném vzorku je na obr. 45. Vzorek byl orientován na kříž dvěma vrcholy hexagonu (na obr. 45 nahoře a dole) a dvěma značkami ve středech dvou protilehlých hran hexagonu. Díky středu světelného kříže, který směřuje ve směru osy vzorkového stolu, je také možno s dostatečnou přesností kontrolovat polohu měřicí sondy, která se při správném nastavení a v základní pozici měřicího ramene musí nacházet také na ose vzorkového stolu.



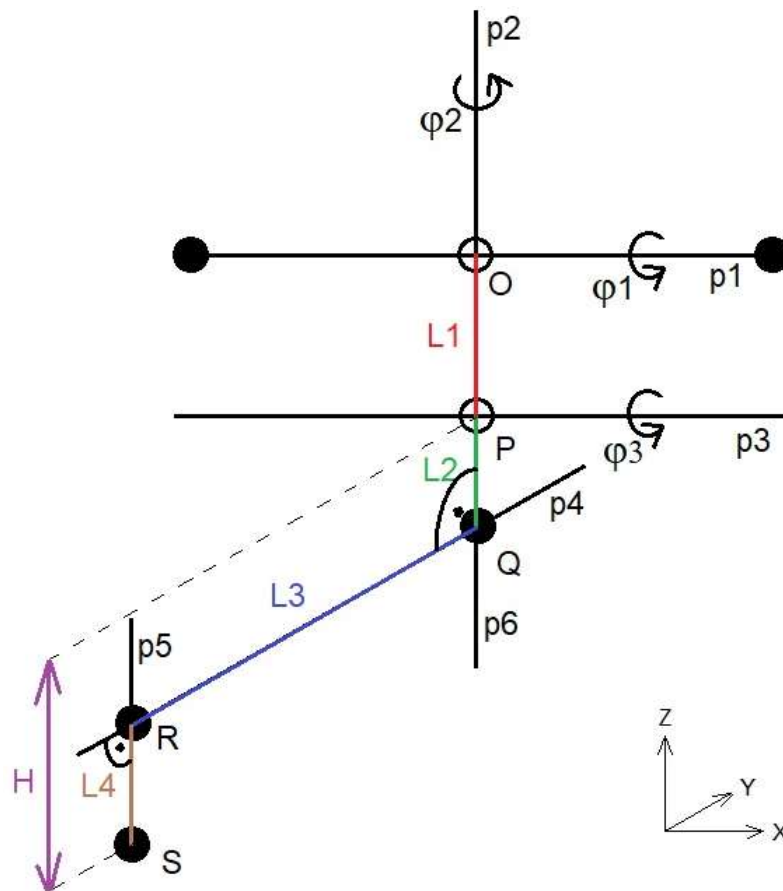
Obr. 44: Laserový modul na držáku umístěný nad středem vzorkového stolu



Obr. 45: Světelný kříž vykreslený laserovým modulem na měřeném vzorku hexagonálního skleněného zrcadla. Zrcadlo bylo pro zvýraznění kříže překryto papírem.

3.5 Matematický model zařízení

Za účelem zjištění či ověření pohybu jednotlivých komponent zařízení SAP byl vytvořen matematický model zařízení, který vychází z ideového modelu na obr. 46. Následné výpočty byly provedeny pomocí translačních a rotačních matic, jež jsou zmíněny v článku [72].



Obr. 46: Ideové schéma matematického modelu zařízení SAP.

Osy označené p_1 – p_6 reprezentují osy klíčových součástí zařízení SAP. Osa p_1 značí osu čepu náklonu hlavního vzduchového ložiska, p_2 je osa rotace hlavního ložiska, p_3 je osa čepu náklonu měřicího ramene, p_4 je osa měřicího ramene, p_5 je osa měřicí sondy a p_6 je osa držáku měřicího ramene na čepu jeho náklonu. Úhly φ_1 až φ_3 pak značí rotační pohyby okolo os p_1 až p_3 φ_1 představuje změnu sklonu osy hlavního ložiska, konkrétně pak úhel odklonu osy hlavního ložiska od svislé osy z . Pokud $\varphi_1 = 0^\circ$, znamená

to, že osa hlavního ložiska je paralelní vůči svislé ose z a zařízení SAP je nastaveno na měření rovinných povrchů. Úhel φ_3 určuje změnu sklonu měřicího ramene a na něm namontované sondy. Během nastavování zařízení je potřeba dosáhnout stavu, kdy osy p_5 a p_6 směřují paralelně k ose z a osa p_4 vodorovně – paralelně k ose y . Z toho vyplývá, že po dokončení nastavení SAP je

$$\varphi_3 = -\varphi_1. \quad (19)$$

Změna úhlu φ_2 pak reprezentuje otáčení měřicího ramene (osa p_4) během procesu měření a na něm namontované sondy (p_5), držáku ramene (p_6) a čepu sklonu ramene (p_3) okolo osy hlavního ložiska (p_2). Hodnota $\varphi_2 = 0^\circ$ označuje střed měřicího rozsahu, tedy směřování měřicího ramene (p_4) ve směru osy y .

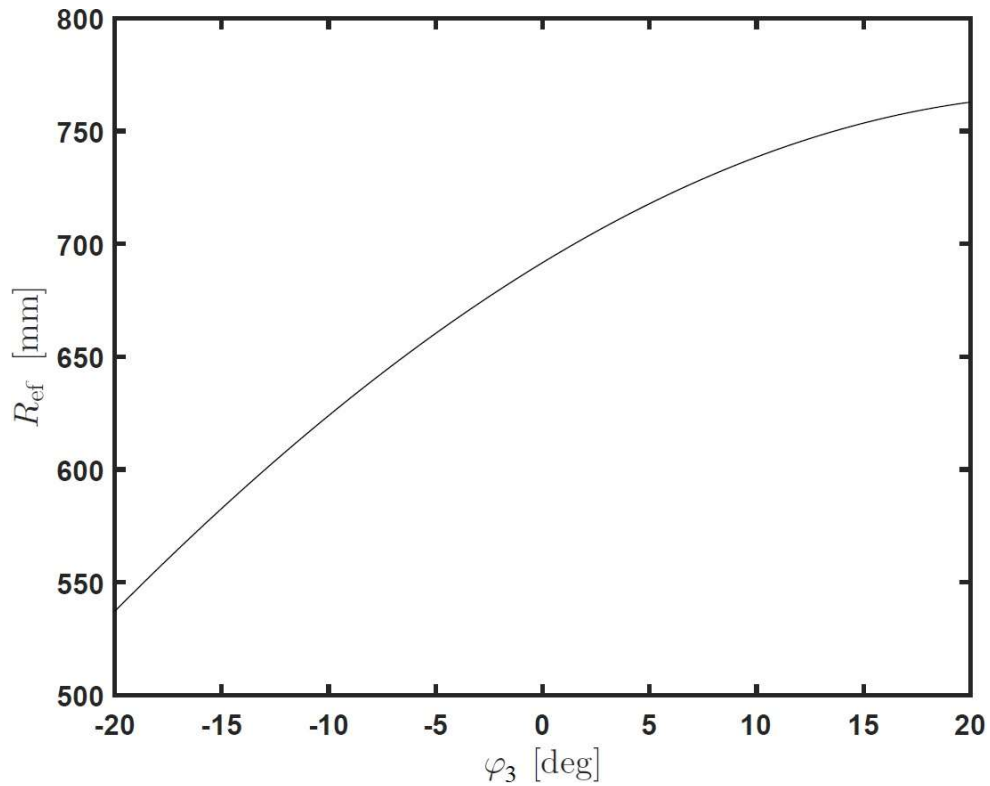
Body O , P , Q , R a S jsou klíčové průsečíky jednotlivých přímek. O je průsečík osy p_2 a p_1 , prakticky se jedná o průsečík rotační osy hlavního ložiska a osy jeho náklonu. V následujících výpočtech je tento bod počátkem souřadného systému. P je průsečík osy p_2 a p_6 s osou p_3 . Dochází zde ke změně úhlu mezi osami p_2 a p_6 . Body P , Q , R jsou pevně svázané a nedochází ke změně jejich vzdáleností. Bod S pak reprezentuje detekční bod měřicí sondy (kontaktní nebo fokusační bod) a také povrch měřeného dílu. $L_1 - L_4$ jsou vzdálenosti mezi klíčovými body či osami. Některá jsou pevně dané konstrukcí zařízení SAP, jiné podléhají změnám během nastavovací procedury. Červeně vyznačená L_1 je nejkratší vzdálenost mezi paralelními osami p_1 a p_3 , což prakticky značí pevnou vzdálenost mezi osami čepu sklonu hlavního ložiska a čepu sklonu měřicího ramene. Zelená L_2 je pevná vzdálenost mezi body P a Q . Modrá L_3 je délka měřicího ramene (vzdálenost $|QR|$). Hnědě označená L_4 je vzdálenost mezi body R a S , která se mění v závislosti na vertikálním posuvu měřicí sondy pomocí mikrometrického šroubu držáku sondy. Platí

$$H = L_4 + L_2, \quad (20)$$

což představuje svislou vzdálenost mezi osou čepu sklonu ramene a detekčním bodem měřicí sondy (a také měřeným povrchem vzorku).

Veškeré výpočty a zjednodušení jejich výsledků byly provedeny v prostředí softwaru Matlab prostřednictvím skriptu uvedeného v příloze 3. Ve skriptu se navíc

Závislost R_{ef} na úhlu φ_3 pak je graficky znázorněna na obr. 48. Pro výpočet této závislosti byly do vztahu (21) dosazeny měřením zjištěné hodnoty $H = 330$ mm a $L_3 = 691,7$ mm.



Obr. 48: Závislost efektivní délky měřicího ramene R_{ef} na úhlu sklonu hlavního ložiska φ_3 .

Pro pohyb detekčního bodu měřicí sondy (bod S) v prostoru $r = (x, y, z)$ platí

$$\mathbf{r} = \mathbf{a} \cos \varphi_2 + \mathbf{b} \sin \varphi_2 + \mathbf{c}, \quad (22)$$

$$\mathbf{a} = R_{ef}(\varphi_3) \cdot [\sin \varphi_2, -\cos \varphi_3 \cdot \cos \varphi_2, \cos \varphi_2 \cdot \sin \varphi_3], \quad (23)$$

$$\mathbf{b} = R_{ef}(\varphi_3) \cdot [\cos \varphi_2, \cos \varphi_3 \cdot \sin \varphi_2, -\sin \varphi_3 \cdot \sin \varphi_2], \quad (24)$$

$$\mathbf{c} = (L_1 + H \cdot \cos \varphi_3 + L_3 \cdot \sin \varphi_3) \cdot [0, -\sin \varphi_3, -\cos \varphi_3]. \quad (25)$$

Vektory \mathbf{a} , \mathbf{b} jsou na sebe kolmé a jejich velikosti jsou si rovny

$$|\mathbf{a}| = |\mathbf{b}| = R_{ef} = |(L_3 \cdot \cos \varphi_3 - H \cdot \sin \varphi_3)|, \quad (26)$$

což znamená, že při otáčení o úhel φ_2 (měřicí proces) se pohyb detekčního bodu sondy děje vždy po kružnici. Vektor c určuje polohu středu kružnice opisované detekčním bodem sondy S .

Pro **virtuální kouli**, viz kapitola 2.3.1 této práce, platí

poloha středu koule C_v

$$C_v = -(L1 + L3/\sin\varphi_3) \cdot [0, \sin\varphi_3, \cos\varphi_3], \quad (27)$$

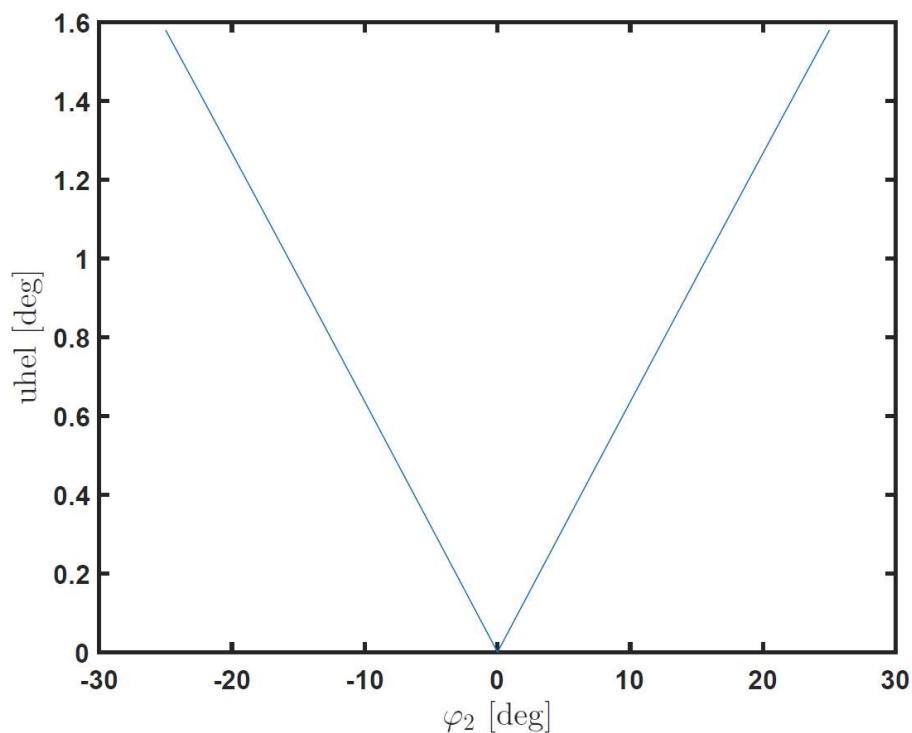
poloměr koule R_v (nezávisí na φ_2)

$$R_v = |L3/\tan\varphi_3 + H|. \quad (28)$$

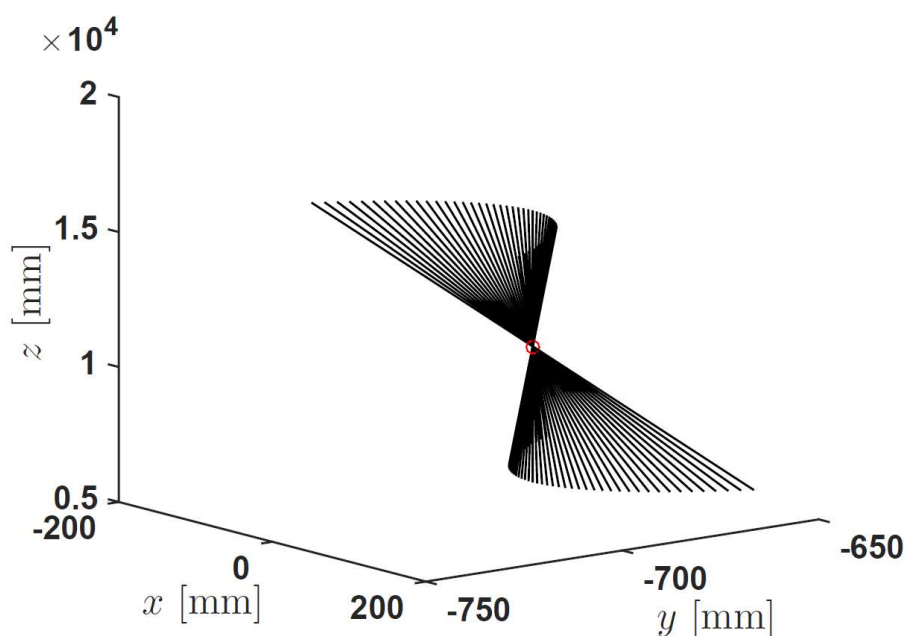
Výraz (28) pak odpovídá základnímu vztahu (16) pro měření konkávního povrchu uvedenému v kapitole 2.3.1.

Zkoumáním vlastností osy $p5$ procházející body R a S , která prakticky tvoří osu měřicí sondy, bylo zjištěno následující. Vlastnosti osy $p5$ byly zkoumány při dosazení hodnot $\varphi_2 \in \langle -25^\circ, 25^\circ \rangle$, $H = 330$ mm, $L1 = 125$ mm, $L3 = 691,7$ mm, $\varphi_3 = 3,6518^\circ$, které odpovídají nastavení měření konkávního sférického zrcadla o nominálním rádiusu 11 200 mm.

1. Pokud je φ_3 konstantní, pak pro různá φ_2 se mění sklon osy $p5$. Pro jednotlivé hodnoty φ_2 byl pak vykreslen graf závislosti sklonu osy $p5$ od osy z . Tento graf uvedený na obr. 49 prakticky ukazuje, jak se mění sklon osy měřicí sondy v závislosti na pohybu měřicího ramene (pro $\varphi_2 \in \langle -25^\circ, 25^\circ \rangle$) během procesu měření.
2. Dále bylo zjišťováno, zda různě skloněné osy $p5$ mají společný průsečík. Ze 3D grafu na obr. 50 je zřejmé, že tento průsečík existuje. Průsečík označený červeným kroužkem je potom střed virtuální koule popsany vztahem (27). Je to rovněž důkazem toho, že měřicí sonda se během měření vždy pohybuje v normále ke kulové ploše měřeného povrchu.
3. Ze vztahu (27) a (28) rovněž plyne, že poloha středu virtuální koule a její poloměr nezávisí na úhlu φ_2 .



Obr. 49: Závislost sklonu osy p_5 (osa měřicí sondy) na úhlu φ_2 (pohyb měřicího ramene na hlavním vzduchovém ložisku). Rozsah úhlu $\varphi_2 \in \langle -25^\circ, 25^\circ \rangle$, $H = 330$ mm, $L_1 = 125$ mm, $L_3 = 691,7$ mm, $\varphi_3 = 3,6518^\circ$.



Obr. 50: Střed virtuální koule (označený červeným kroužkem) jako průsečík os p_5 pro úhly $\varphi_2 \in \langle -25^\circ, 25^\circ \rangle$, $H = 330$ mm, $L_1 = 125$ mm, $L_3 = 691,7$ mm, $\varphi_3 = 3,6518^\circ$. Souřadnice středu virtuální koule [0 mm; -683,7 mm; 10 713 mm].

3.6 Výpočty nutné pro justáž před měřením

Výpočet předpokládaného nastavení celého zařízení se skládá z několika dílčích podvýpočtů. Do jednotlivých vztahů pak vstupují jak konstanty, tak proměnné hodnoty. Konstantní hodnoty byly zjištěny jednorázově měřením pomocí Faro laser Trackeru podobně jako v článku [73]. Jedná se o vzdálenosti některých os a klíčových součástí zařízení, které se během nastavování zařízení nemění. Proměnné hodnoty jsou zjišťovány z technického výkresu měřeného opt. dílu nebo z měření realizovaného např. vizuálním odečtem polohy ze stupnice mikrometrického šroubu.

Níže zmíněné výpočty vedou ke stanovení předpokládaného sklonu osy hlavního vzduchového ložiska a posuvu nosného bloku v ose y . Výpočet obou hodnot vychází z hodnoty nominálního rádiusu měřeného vzorku daného technickým výkresem a také ze zjištění svislé vzdálenosti měřeného povrchu vůči ose čepu sklonu měřicího ramene H . Po úspěšném nastavení zařízení pomocí níže zmíněných vztahů a nominálních hodnot vzorku, je pak vždy třeba udělat kontrolní měření, jímž je myšlen jeden přejezd měřicí sondou nad povrchem vzorku. V případě, že se rádius vzorku velmi liší od nominálního rádiusu daného výkresem (sonda naměří odchylku vrchlíku $PWR > 10 \mu\text{m}$), je třeba jemného manuálního doladění v obou níže zmíněných osách tak, aby se sonda pohybovala paralelně k povrchu a měřila odchylku vrchlíku $PWR < 10 \mu\text{m}$.

Vztah pro výpočet **sklonu osy hlavního ložiska** vychází ze vztahu (16) a obr. 22 uvedeného v kapitole 2.3.1 této práce. Pro případ nastavení měření konkávního povrchu je využíván vztah odvozený ze vztahu (28)

$$\tan\varphi_3 = \frac{L3}{R_v - (H \pm \Delta Z)}, \quad (29)$$

kde φ_3 je úhel mezi svislicí (osou z) a osou hlavního ložiska, což je sklon ložiska, $L3$ značí vodorovnou vzdálenost od osy měřicí sondy k ose čepu náklonu ramene se sondou, H značí základní svislou vzdálenost mezi osou čepu náklonu ramene se sondou a povrchem měřeného vzorku. Hodnota ΔZ je hodnota svislého posuvu měřicí sondy odečítaná vizuálně z mikrometrického šroubu držáku sondy. Sondu je vždy třeba nastavit v závislosti na výšce povrchu vzorku tak, aby její detekční bod (ohnisko) ležel na měřeném povrchu. Prakticky se to provádí sledováním signálu odezvy měřicí sondy

v ovládacím softwaru LuphoSmart. Hodnoty $L3$ a H byly experimentálně zjištěny pomocí laser trackeru jako $L3 = 691,7$ mm a $H = 381,5$ mm.

V případě nastavení měření konvexního povrchu je vztah (17) modifikován do podoby

$$\tan\varphi_3 = \frac{L3}{R_v + (H \pm \Delta Z)}, \quad (30)$$

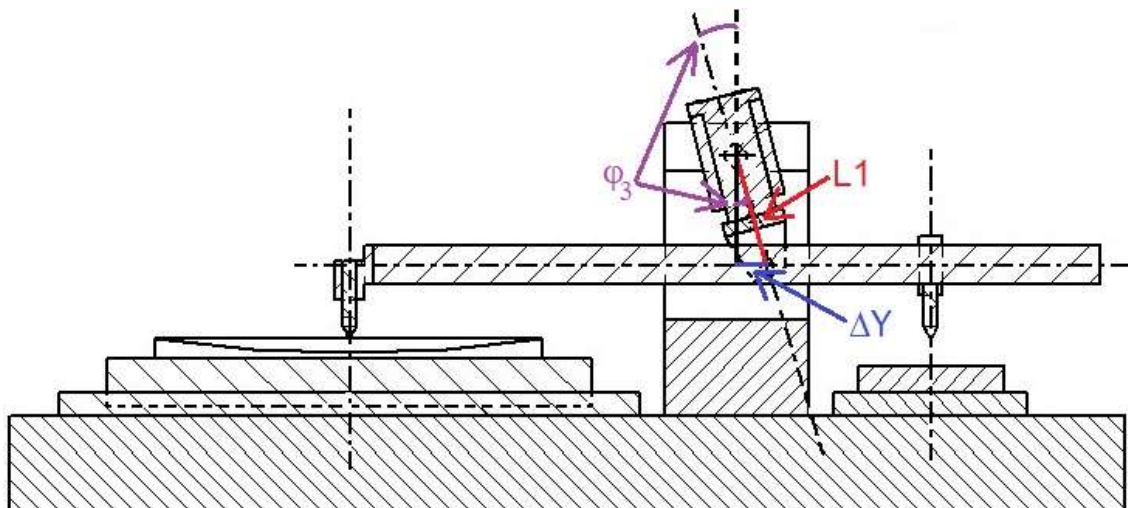
Pro výpočet potřebného **posuvu nosného bloku ve směru osy y** lze využít jednoduchý vzorec vycházející ze schématu na obr. 51

$$\Delta Y = L1 \cdot \sin\varphi_3, \quad (31)$$

kde ΔY značí posuv ve směru osy y, $L1$ je vzdálenost mezi osami dvou čepů (čep sklonu hlavního ložiska a čep sklonu měřicího ramene. Hodnota $L1$ byla experimentálně určena měřením pomocí laser trackeru, platí pro ni

$$L1 = 125,0 \text{ mm}. \quad (32)$$

Hodnota ΔY pak určuje vzdálenost, o kterou je třeba posunout nosný blok nesoucí hlavní ložisko a měřicí rameno, aby měřicí sonda během měření procházela přes osu rotace vzorkového stolu.



Obr. 51: Schéma k výpočtu posunutí v ose y. Fialově jsou zvýrazněny souhlasné úhly sklonu hlavního ložiska φ_3 , červeně vyznačená vzdálenost mezi dvěma čepy $L1$, modře vyznačena změna polohy ΔY v případě měření konkávního povrchu.

3.7 Laserové moduly pro justáž před měřením

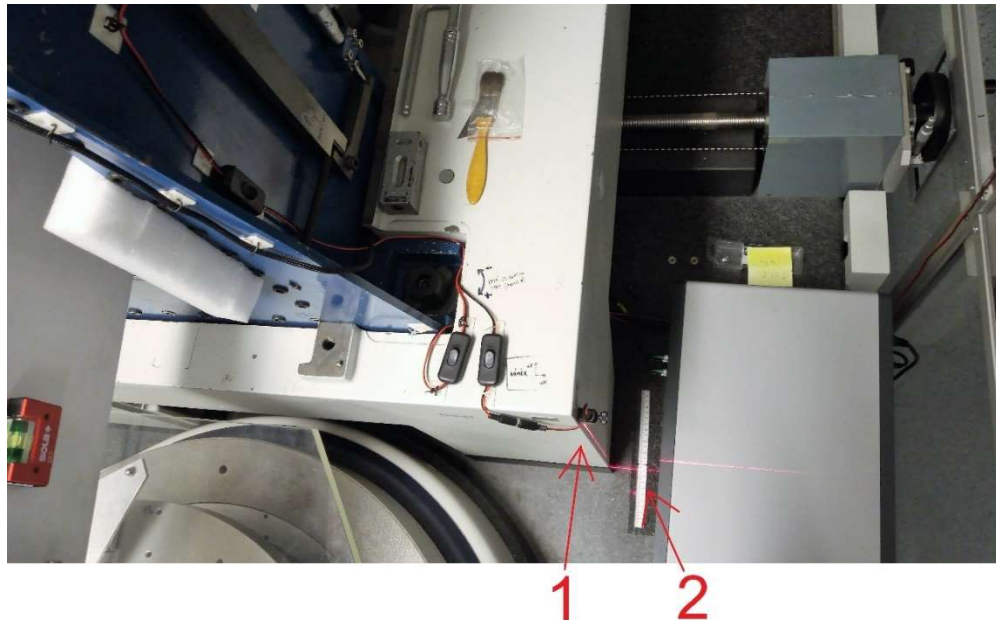
Pro usnadnění justáže zařízení SAP před startem měření je třeba manuálně nastavit dvě osy tak, aby se měřicí sonda pohybovala paralelně k povrchu měřeného vzorku a zároveň procházela přes střed rotace vzorkového stolu. To se děje pomocí změny náklonu hlavního vzduchového ložiska a posuvem nosného bloku, viz předchozí kapitola 3.6. Aby bylo možné osy nastavit do odpovídajících pozic, byla na zařízení umístěna dvě pravítka a laserové moduly [71] umožňující zjištění polohy, což se děje vizuálně odečtením polohy stopy laserového svazku na příslušném pravítku.

Pro **posuv nosného bloku**, nesoucího mimo jiné hlavní vzduchové ložisko s měřicím ramenem a měřicí sondou, platí vztah (31) uvedený v kapitole 3.6. Pro konečnou polohu nosného bloku platí také následující vztah:

$$Y = Y_0 \pm \Delta Y, \quad (33)$$

kde Y je výsledná poloha laserového svazku, Y_0 je základní poloha laserového svazku, ΔY je vzdálenost mezi základní a výslednou polohou.

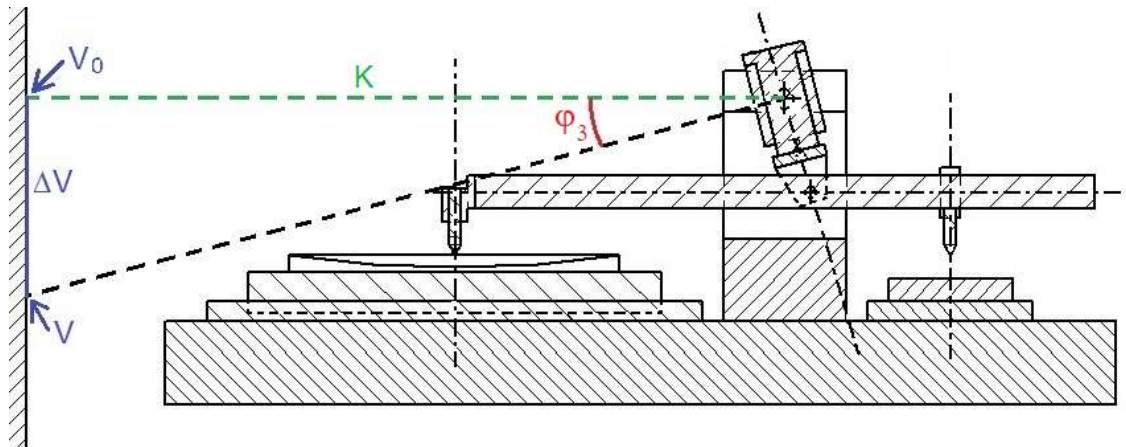
Poloha nosného bloku je monitorována prostřednictvím vizuálního odečítání polohy stopy lineárního laserového modulu připevněného pomocí držáku přímo v nosném bloku, viz obr. 52. Přesnost odečtu polohy je dána šířkou laserového svazku a nejmenším dílkem stupnice pravítka a z praktických zkoušek vychází $\pm 0,5$ mm. V základní poloze Y_0 se základní blok nachází, pokud je zařízení nastaveno pro měření rovinného dílu, tedy úhel $\varphi_3 = 0^\circ$, kdy osa hlavního ložiska míří svisle ve směru osy z paralelně s osou otáčení vzorkového stolu. Pokud se jedná o měření konkávního povrchu, podobně jako je tomu na obr. 51, je třeba hodnotu ΔY od základní polohy Y_0 odečítat. V případě měření konvexního povrchu se hodnoty Y_0 a ΔY sčítají.



Obr. 52: Laserový modul pro určení posuvu ve směru osy y . 1 – laserový modul připevněný na nosném bloku SAP, 2 – stopa lineárního svazku laseru na vodorovném odměřovacím pravítku.



Obr. 53: Laserový modul pro určení sklonu hlavního vzduchového ložiska. 1 – laserový modul namontovaný přímo v ose sklonu hlavního ložiska, 2 – stopa lineárního svazku laseru na svislém pravítku.



Obr. 54: Schéma k nastavení sklonu hlavního ložiska. Červeně je zvýrazněn úhel sklonu hlavního ložiska φ_3 , zeleně vyznačena vzdálenost K mezi osou čepu sklonu hlavního ložiska a svislým pravítkem, modře vyznačena základní poloha V_0 , výsledná poloha V a vzdálenost mezi základní a výslednou polohou ΔV .

Ze schématu na obr. 54 lze odvodit vztah pro výpočet změny polohy laserového svazku na svislém pravítku

$$\tan\varphi_3 = \frac{\Delta V}{K}. \quad (34)$$

Pro novou polohu laserového svazku platí také

$$V = V_0 \pm \Delta V, \quad (35)$$

kde V je výsledná poloha laserového svazku, V_0 je základní poloha laserového svazku, ΔV je vzdálenosti mezi základní a výslednou polohou. Pro nastavení měření konkávní plochy platí znaménko minus, v případě konvexního povrchu platí znaménko plus.

Díky platnosti vztahu (33) je pak možno ze vztahu (34) a (35) odvodit následující

$$V = V_0 - (K_0 - \Delta Y) \cdot \tan\varphi_3, \quad (36)$$

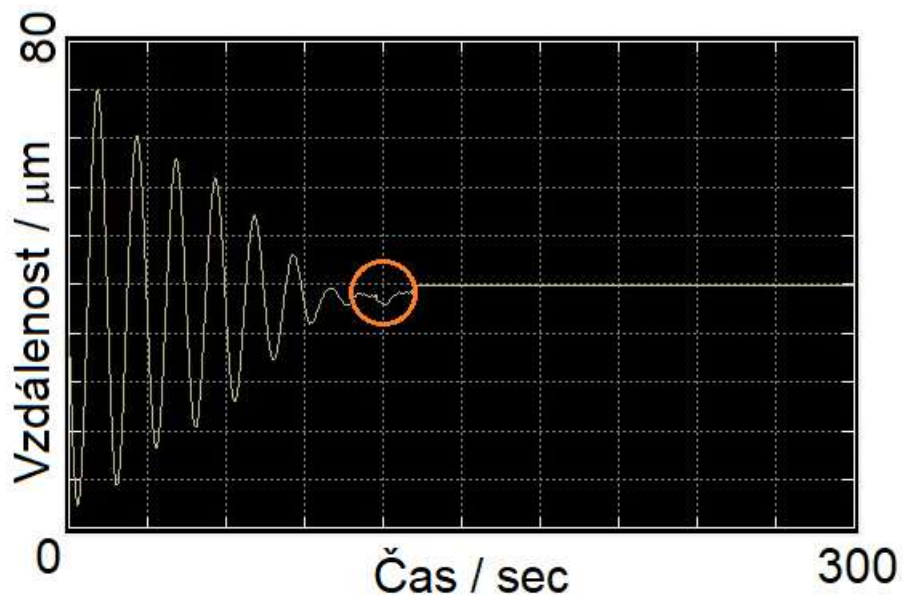
kde $K_0 = 1\,303$ mm je měřením zjištěná vodorovná vzdálenost osy čepu náklonu hlavního ložiska (a také laserového modulu) od svislého pravítka, pokud je zařízení SAP nastaveno

pro měření rovinného povrchu (laserový modul posuvu nosného bloku je na hodnotě Y_0). Nejistota určení laserového svazku na svislém pravítku je dána velikostí nejmenšího dílku stupnice pravítka (1 mm) a šířkou laserového svazku. Výsledně je chyba vizuálního určení polohy svazku na stupnici $\pm 0,5$ mm, což odpovídá nejistotě určení úhlu $\varphi_3 \pm 0,022^\circ$, tedy $\pm 1,32'$, což je z praktických testů hodnoceno jako dostatečná přesnost.

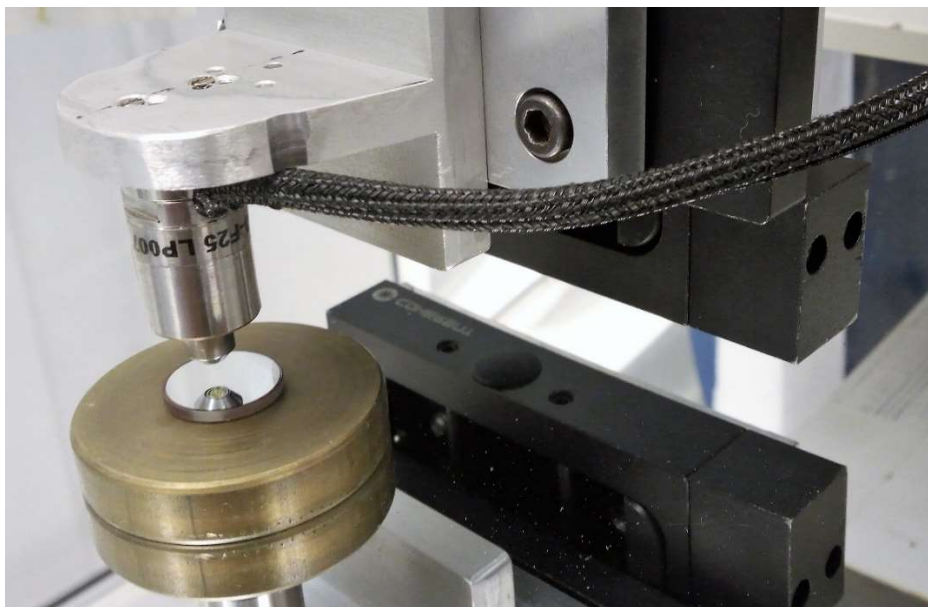
3.8 Nastavení nosného bloku

V kapitole 3.7 a 3.6 je zmíněna justáž zařízení SAP před začátkem měření a jejíž součástí je nastavení nosného bloku SAP. Výsledkem je ale pouze základní nastavení nosného bloku. Pro precizní nastavení, které je popsáno v článcích [58] a [73], bylo využito zařízení Laser Tracker. Pomocí něho se zjišťovalo, zda se sonda ve své centrální pozici nachází přesně nad středem otáčení stolu nesoucího měřený vzorek. Pokud sonda při měřicím pohybu neprochází přesně osou rotace vzorku, zařízení generuje nepřesné hodnoty, a to hlavně ve středu naměřených dat. [58].

Složitou a časově náročnou proceduru určení polohy měřicí sondy vzhledem k ose rotace stolu se vzorkem lze při realizovaném využití optických sond velmi snadno zjednodušit použitím klínového skla. Není pak třeba použít nákladné zařízení jako např. Laser Tracker. Pokud je do středu stolu položeno rovinné klínové sklo, stůl rotuje a sonda se nenachází přesně v ose rotace, vykresluje signál sondy harmonické kmity. To je možno vidět v levé části časového grafu na obr. 55. Pro nastavení sondy na osu otáčení stolu byl použit klín se sklonem horní plochy $\alpha = 1,2^\circ$ (ověřeno profilometrem T-H), na kterou je deponována reflexní vrstva. Klín umístěný pod měřicí sondou je na obr. 56.



Obr. 55: Záznam signálu z měřicí sondy během přibližování sondy k ose rotace skleněného klínu. Obrázek je exportem z ovládacího softwaru sond LuphoScan. Svislá osa značí změnu vzdálenosti povrchu klínu od sondy, na vodorovné ose je čas. Snižování amplitudy z počáteční hodnoty cca 65 μm na výslednou hodnotu cca 4 μm označenou oranžovou kružnicí. Rovná linie značí zastavení rotačního pohybu stolu s klínem po dosažení kýžené hodnoty amplitudy, kdy je osa sondy shodná s osou rotace stolu.

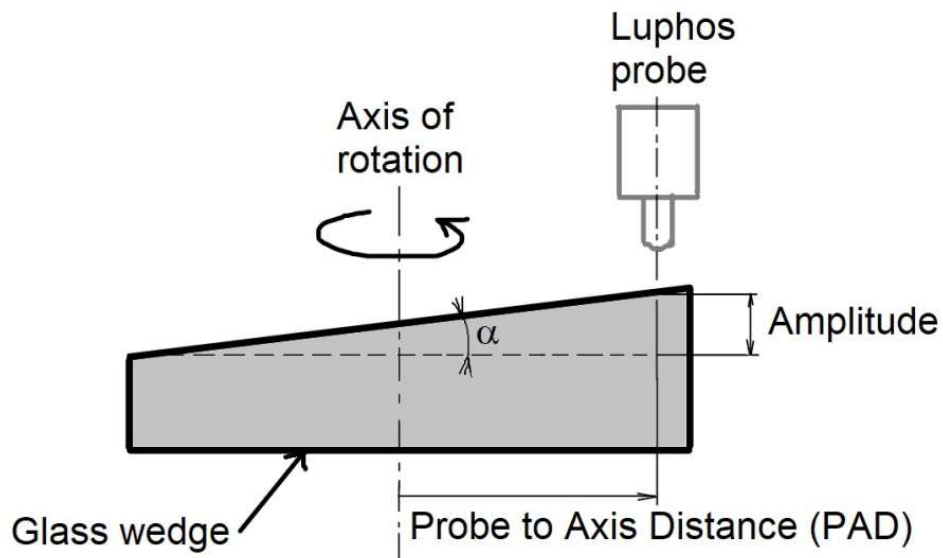


Obr. 56: Skleněný klín na kovové podložce umístěný na měřeném vzorku. Nad klínem se nachází měřicí sonda.

Amplituda kmitů se mění v závislosti na vzdálenosti sondy od osy rotace stolu. Pokud stůl se vzorkem a klínem rotuje a je sledován signál ze sondy, je možno pomocí ručního pohybu nosným blokem snižovat amplitudu kmitů, a tak přibližovat sondu k ose rotace stolu. Přibližování sondy k ose rotace je možno vidět na obr. 55. Na svislé ose je vidět změna vzdálenosti povrchu klínového zrcadla od sondy při otáčení stolu. Vzdálenost sondy od osy rotace (*PAD*) lze popsat pomocí jednoduchého vzorce, vycházejícího ze schématu na obr. 57

$$PAD = \frac{\text{amplituda}}{2 \cdot \tan \alpha} \quad (37)$$

Pokud amplituda kmitů klesne na hodnotu cca 4 μm (podobně jako na obr. 55) a za předpokladu, že sklon horní plochy klínu $\alpha = 1,2^\circ$, je sonda vzdálena cca 95 μm od osy rotace stolu. To je pro nastavení SAP plně dostačující.



Obr. 57: Schéma vyhodnocení vzdálenosti měřicí sondy od osy rotace stolu (*PAD*) pomocí skleněného klínu.

3.9 Druhá – referenční sonda

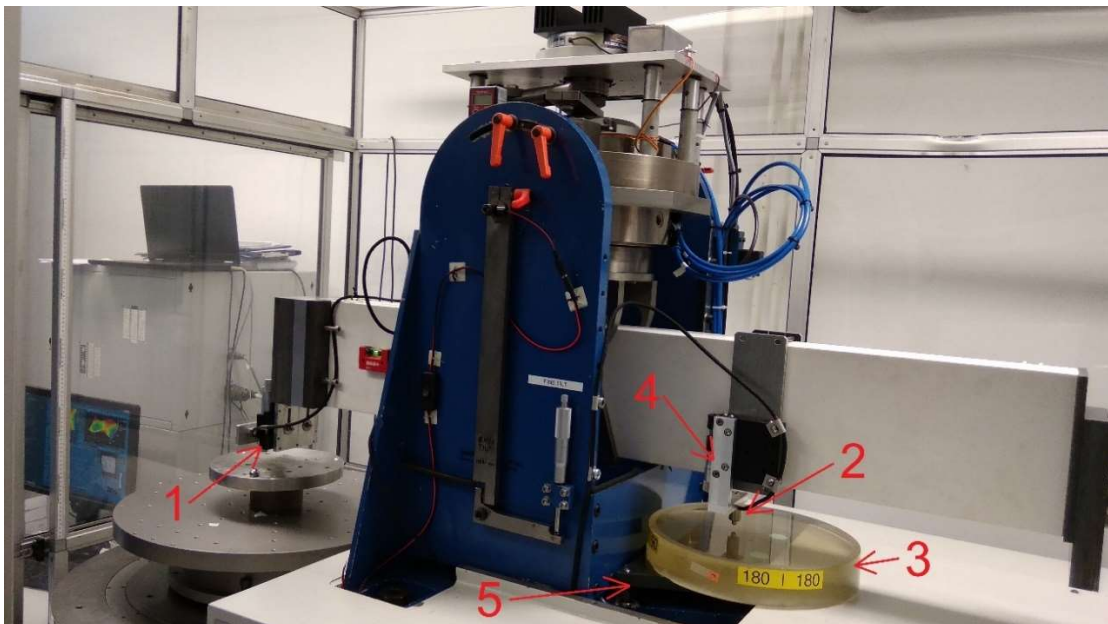
Jak bylo zmíněno v kapitole 2.3.1 této disertační práce, měřicí sonda SAP umístěná na konci měřicího ramene se pohybuje po trajektorii oblouku v prostoru, který je možno přesně ztotožnit s povrchem virtuální koule. Povrch virtuální koule v prostoru tedy tvoří referenční plochu, od které je měřicí sondou odměřována vzdálenost reálného povrchu vzorku. Rádus virtuální referenční plochy ale není explicitně znám, protože závisí na nastavení sklonu hlavní rotační osy a geometrickém uspořádání celého zařízení. Proto jsou SAP zařízení využívána typicky pouze pro měření iregulární, tedy nesférické složky deformace povrchu. Pokud je třeba změřit kompletní tvar povrchu, to je sférickou i nesférickou deformaci, je nutno získat jiným způsobem také informaci o rádiu virtuální referenční koule. To se zpravidla provádí nějakým typem přidruženého měřicího systému.

K získání informace o rádiu virtuální referenční koule lze dospět i jinou cestou. Pokud bude zjištěna trajektorie v prostoru nějakého bodu na měřicím rameni, lze z polohy tohoto bodu vůči počátku souřadné soustavy stroje a ze vztahů uvedených v kapitole 3.5 této práce dopočítat i pohyb vzorkové sondy, tedy i rádus virtuální referenční koule. Pro detailní zjištění pohybu měřicího ramene lze využít další sondu, která by mapovala pohyb ramene vůči známé referenci. Nic nebránilo realizaci tohoto řešení vzhledem k možnosti připojit do zařízení a vyčítat signál ze dvou interferometrických sond systému LuphoSmart současně. Výhoda tohoto řešení je tak podstatná, že vedla k rozsáhlé rešerši a následnému podání mezinárodní PCT přihlášky. Autorem přihlášky je tvůrce této disertační práce. Klíčové části dokumentů PCT přihlášky s registračním číslem: PCT CZ 2021.000045 jsou uvedeny v přílohách 4–6.

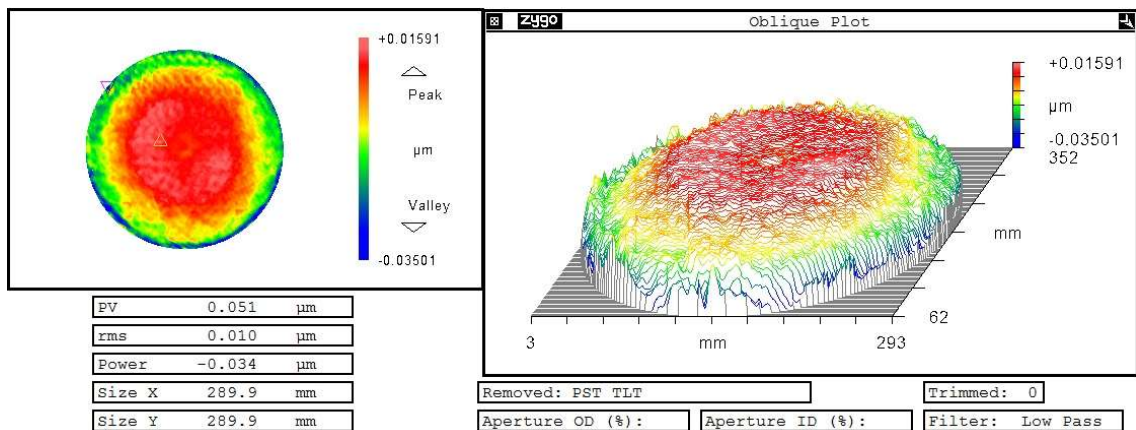
Zjednodušený popis navrženého řešení vyňatý z patentové přihlášky objasňuje funkci klíčových komponent ze schématu na obr. 58. „Vlastní měření probíhá kyvným pohybem ramene 5 kolem osy B1, který je dán otáčením hřídele rotačního motoru 3 a na této hřídeli upevněného třmene 4, ve kterém je rameno 5 uloženo, kdy se vzorková sonda 61 i referenční sonda 71 během měřicího procesu pohybují po obloukových trajektoriích určených aktuálním nastavením sklonu osy B1. Při měření sférického povrchu a správném nastavení sklonu osy B1 se vzorková sonda 61 pohybuje po povrchu virtuální koule s rádiusem stejným, jako je rádus měřeného vzorku 8. Přesná hodnota rádiu této

prostřednictvím jednoho z nejpřesnějšího zařízení na trhu – asférického stichovacího interferometru (ASI) amerického výrobce QED [30]. Toto zařízení se nachází na půdě průmyslového partnera SLO, v přerovské firmě Meopta – optika, s.r.o. Jedná se o jedenáctiosý CNC řízený vertikální interferometr, který umožňuje měření rovinných, sférických a sférických optických komponent. QED ASI bylo pro ověření tvaru referenční desky vybráno primárně proto, že díky automatické kalibraci během měřicího procesu se výsledky měření jeví jako nezpochybnitelné. Autor disertační práce se navíc v minulosti podílel velkou měrou na zavádění tohoto zařízení do sériového provozu, překladu návodu k obsluze a zaškolení operátorů zařízení. Výsledek měření tvaru zerodurové referenční desky, uvedený na obr. 60, je složen z 14 dílčích subapertur o průměru 148 mm. Výsledná odchylka od ideální roviny $PV = 51$ nm je pro účely referenční desky plně dostačující.

Referenční deska je uložena na nově realizovaném stolku (viz příloha 7), umožňujícím náklon ve dvou osách, aby bylo možné normálu horní plochy referenční desky nastavit do svislého směru. Zároveň referenční sonda je upevněna na držáku umožňujícím posuv sondy jak v horizontálním směru, tak ve vertikálním směru.



Obr. 59: Schematický snímek SAP s druhou sondou. 1 – měřicí (vzorková sonda), 2 – referenční sonda, 3 – referenční rovinná skleněná deska, 4 – držák referenční sondy s mikrometrickým vertikálním posuvem, 5 – náklonný stolek pro uložení referenční desky.



Obr. 60: Tvar rovinné referenční desky umístěné pod druhou, referenční sondou. Měřeno na asférickém stichovacím interferometru QED ASI. Hodnota $PV = 0,051 \mu\text{m}$.

Pomocí matematického modelu, viz kapitola 3.5 této disertační práce, lze získat vztah pro změnu vzdálenosti detekčního bodu referenční sondy od rovinné referenční desky. Pokud bude změna vzdálenosti sondy od referenční desky reálně změřena pro známé rozmezí úhlu φ_2 , lze pak z ní a z matematického modelu určit nejen úhel φ_3 (sklon osy hlavního ložiska – osa B1 na obr. 58), ale i poloměr virtuální koule, po níž se pohybuje detekční bod měřicí sondy na opačné straně měřicího ramene, a tedy i rádius měřeného vzorku.

Po několika testovacích měřeních na různých typech vzorků však bylo zjištěno, že ve stávající konfiguraci zařízení SAP není dostatečně přesně vyčítán signál z enkodéru měřicího ramene. Přestože použitý enkodér Heidenheim ERP880 umožňuje vyčítání polohy ramene s přesností $\pm 0,9''$ [74, 75], tak reálné vyčítání polohy pomocí ovládacího softwaru Zeeko probíhá s přesností pouze cca $\pm 2'$. To vede k nedostatečně přesnému určení rozsahu úhlu φ_2 , tedy délky měřené křivky nad referenční deskou. Což má za následek chybu v určení trajektorie referenční sondy a následně rádiusu virtuální koule, po níž se pohybuje vzorková sonda nad vzorkem. Řešení tohoto problému spočívá ve vyčtení signálu z enkodéru mimo prostředí softwaru Zeeko Swing-Arm Profilometer Controller. Další vývoj v této problematice je nezbytný a bude zahrnovat vyčtení signálu přímo z enkodéru a následné zpracování dat v nově vyvinutém algoritmu pro výpočet rádiusu virtuální koule, po níž se pohybuje vzorková sonda.

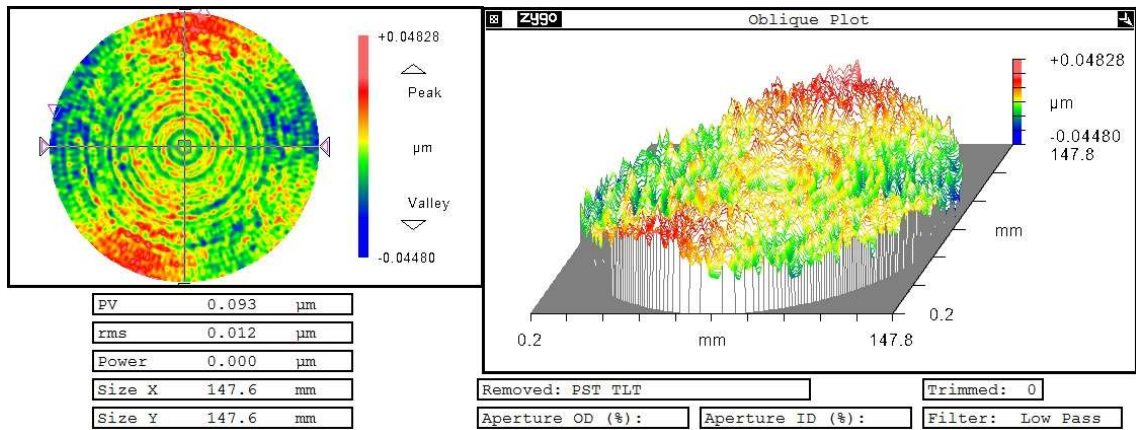
4. Ověření zařízení SAP po úpravách

V této části disertační práce jsou uvedeny výsledky měření několika různých vzorků na zařízení SAP. Stejně vzorky jsou pak změřeny na jiných dostupných měřicích zařízeních a výsledky jsou předloženy pro srovnání. Důvody výběru konkrétních měřicích zařízení jsou vždy uvedeny v příslušné podkapitole. Většina výsledků měření, byla analyzována a zobrazena pomocí softwaru Zygo MetroPro verze 8.3.5., jež je v optickém průmyslu uznávaným programem pro ovládání měřicích zařízení, zpracování a zobrazení naměřených dat. Aby byly výsledky z různých zařízení srovnatelné, byla pomocí Mask editoru v softwaru MetroPro vybrána vždy stejně velká a stejně orientovaná oblast vzorku. Pokud zařízení neumožňuje export dat do tohoto softwaru, byly výsledky zobrazeny v jiných dostupných analyzačních programech (např. Matlab, T-H Talymap).

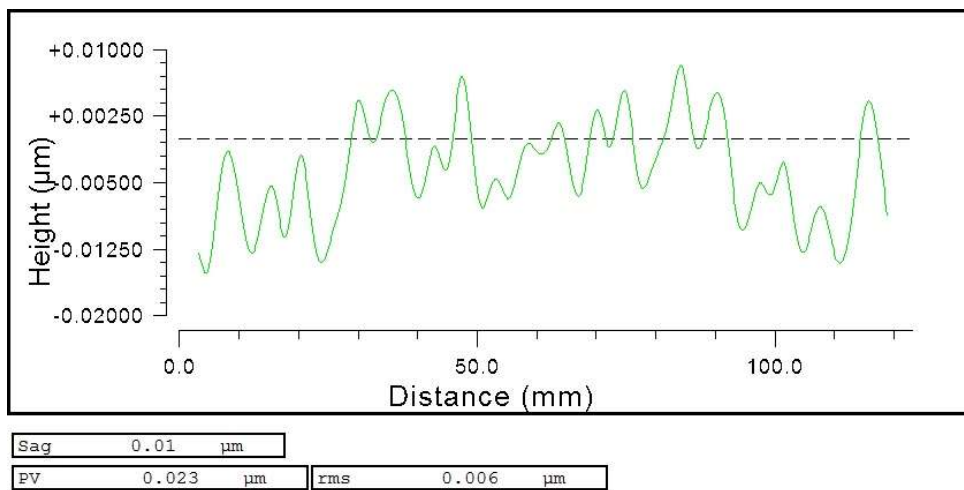
4.1 Rovinné vzorky

4.1.1 Referenční flatobjektiv Zygo, průměr 150 mm

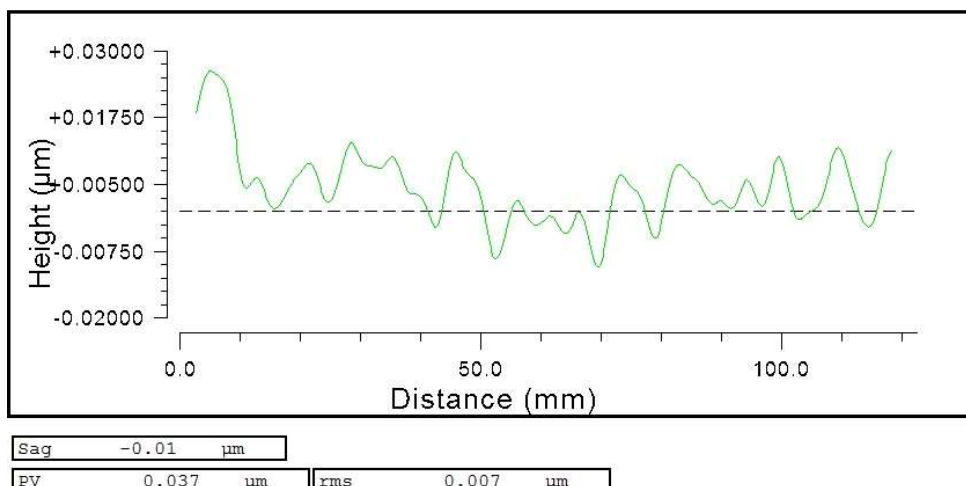
Jako první ověřovací vzorek slouží rovinný transmisní objektiv interferometru Zygo Verifire s certifikovanou odchylkou od ideální roviny menší než $\lambda/20$. Jedná se o skleněnou a oboustranně leštěnou desku o průměru 6 palců (= 150 mm) umístěnou ve hliníkové objímce opatřené čepy pro bajonetové přichycení do výstupu interferometru Zygo nebo do pětiosého držáku téhož výrobce. Měření na zařízení SAP probíhalo ve 240 dílčích skenech. Tím je myšleno měření ve 120 různých směrech (azimuths) \times 2 přejezdy (sweeps) v každém směru. Průměr změřené plochy činil 148 mm, aby byla dodržena bezpečná vzdálenost sondy od kovové objímky objektivu. Výsledek měření na zařízení SAP je uveden na obr. 61. Hodnota celkové deformace $PV = 93$ nm. Z 3D dat byly následně pro srovnání s profilometrem extrahovány dva 2D profily (horizontální a vertikální směr), přičemž polohy profilů jsou vyznačeny na obr. 61. Hodnota PV horizontálního profilu (obr. 65) je 23 nm a u vertikálního profilu (obr. 66) 37 nm. Měření zabralo dobu 2 hodin a 12 minut.



Obr. 61: Výsledek měření tvaru rovinného referenčního flatobjektivu na zařízení SAP. Výsledná hodnota $PV = 0,093 \mu\text{m} = 93 \text{ nm}$. V levé horní části je vyznačena poloha horizontálního a vertikálního 2D profilu.



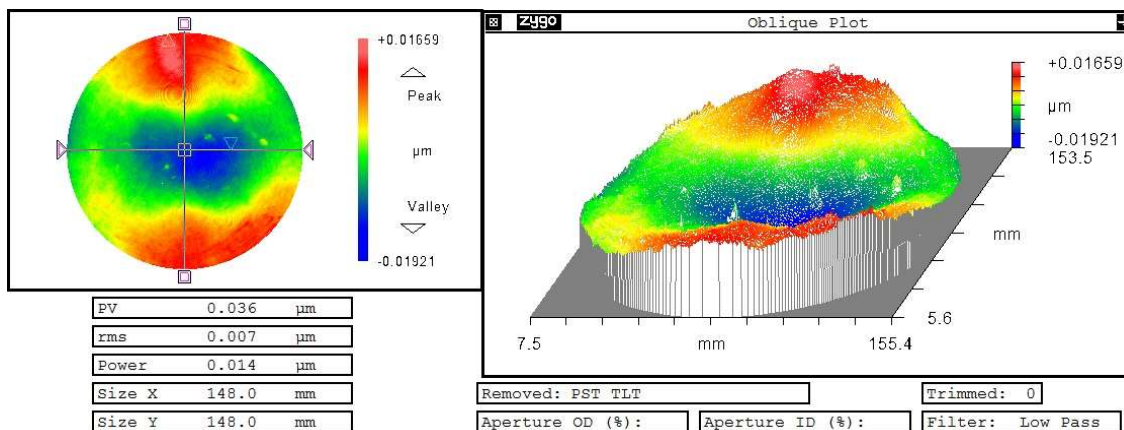
Obr. 62: 2D profil extrahovaný z 3D dat získaných zařízením SAP na obr. 61 - horizontální směr. $PV = 0,023 \mu\text{m} = 23 \text{ nm}$.



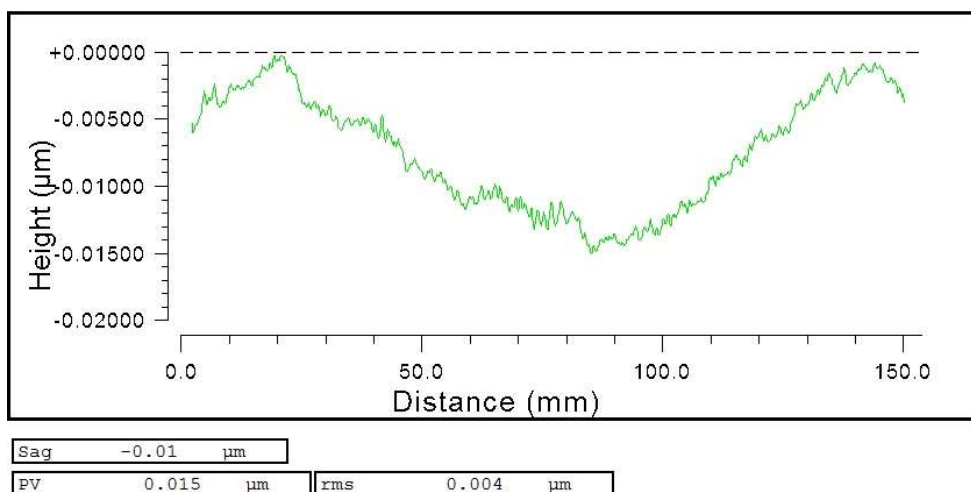
Obr. 63: 2D profil extrahovaný z 3D dat získaných zařízením SAP na obr. 61- vertikální směr. $PV = 0,037 \mu\text{m} = 37 \text{ nm}$.

Ověřovací měření bylo provedeno pomocí dvou nezávislých měřicích zařízení, která se nacházejí mezi přístrojovým vybavením pracoviště SLO. Jednalo se o digitální interferometr Zygo Verifire a kontaktní profilometr Taylor-Hobson PGI Optics. Interferometr byl vybrán proto, že součástí jeho nákupu bylo dodání certifikátů ověřujících jeho přesnost a také rychlost vyhotovení náměru na celé účinné apertuře o průměru 150 mm. Profilometr T-H PGI byl u tohoto vzorku zvolen proto, že délkou svých posuvů $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ je pouze u tohoto vzorku schopen změřit celou plochu.

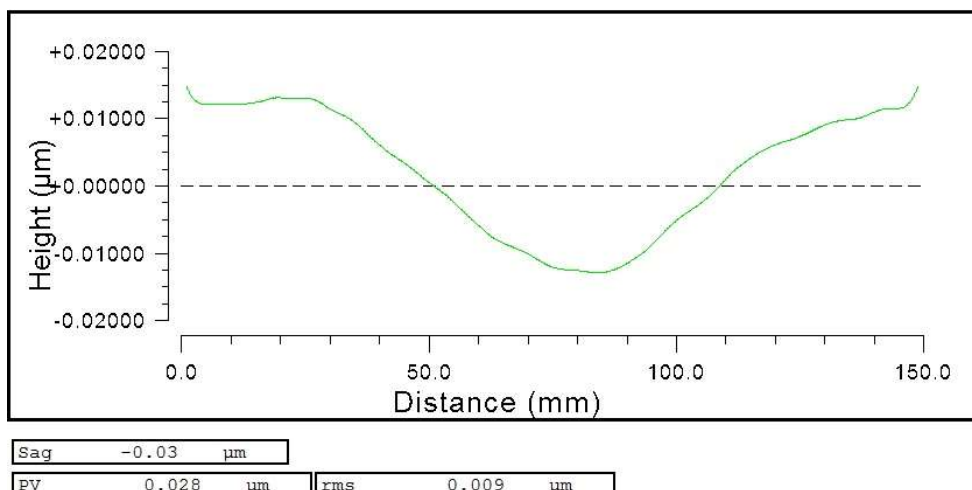
Zařízení Zygo Verifire disponuje měřicí aperturou o průměru 6 palců (150 mm). Optickou referenci tvoří druhý interferometrický objektiv „6-inch transmission flat“ výrobce Zygo s deklarovanou přesností lepší než $\lambda/20$ (31,6 nm). Výsledek měření je uveden na obr. 64. Hodnota celkové deformace $PV = 36 \text{ nm}$. Pro budoucí srovnání s profilometrem byly i z těchto 3D dat extrahovány dva 2D profily uvedené na obr. 65 a obr. 66, jejichž hodnoty PV dosahují 15 nm (horizontální směr), resp. 28 nm (vertikální směr).



Obr. 64: Výsledek měření tvaru rovinného referenčního flatobjektivu na zařízení Zygo Verifire. Výsledná hodnota PV vypočtená z celé 3D mapy je $0,036 \mu\text{m} = 36 \text{ nm}$. V levé horní části je vyznačena poloha horizontálního a vertikálního 2D profilu.



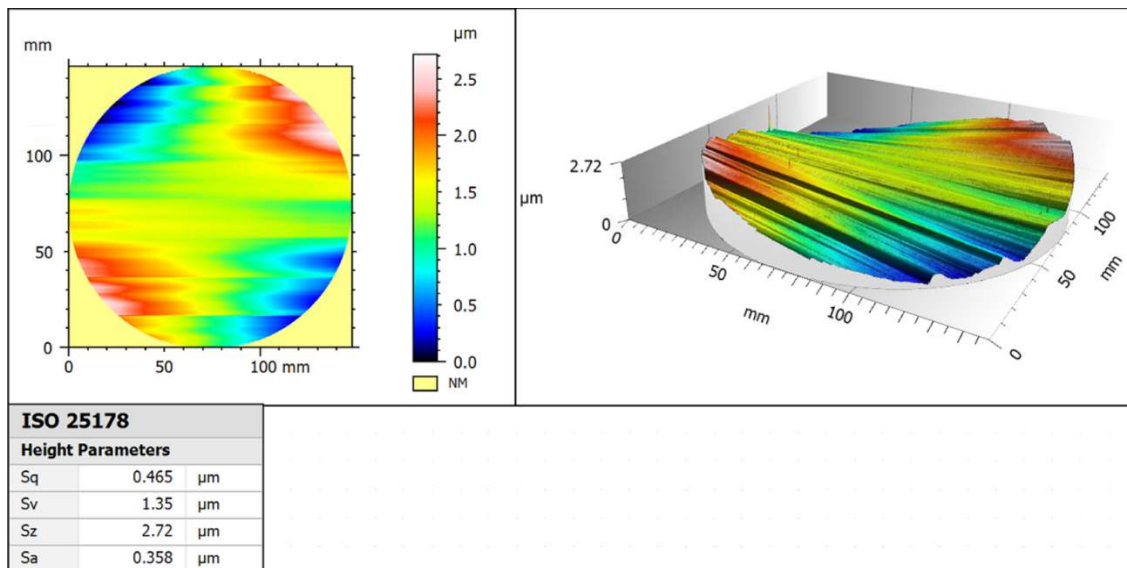
Obr. 65: 2D profil extrahovaný z 3D dat z interferometru Zygo na obr. 61 a obr. 64 – horizontální směr. $PV = 0,015 \mu\text{m} = 15 \text{ nm}$.



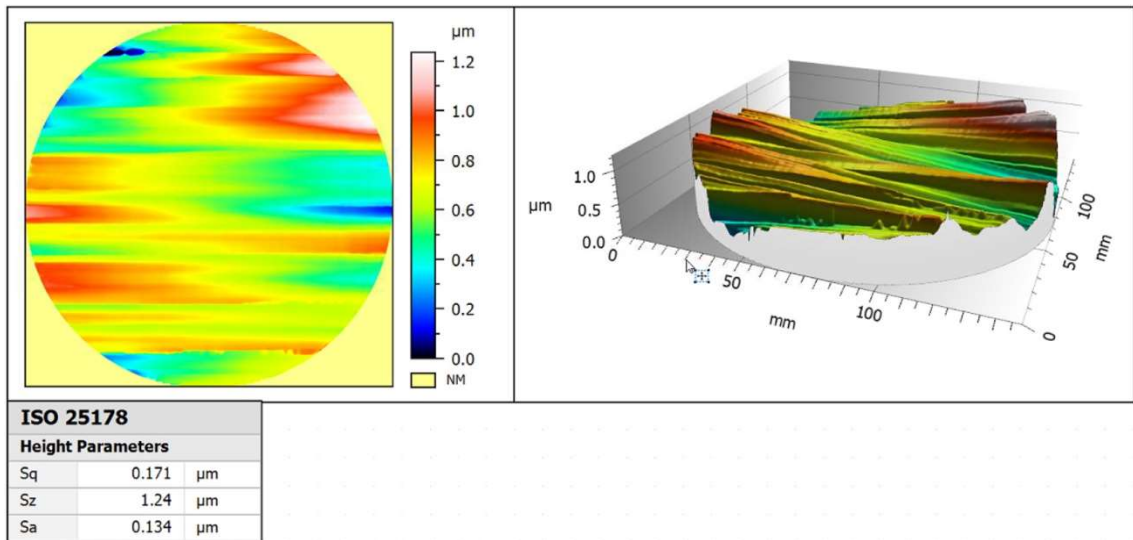
Obr. 66: 2D profil extrahovaný z 3D dat z interferometru Zygo na obr. 64 - vertikální směr. $PV = 0,028 \mu\text{m} = 28 \text{ nm}$.

Vzorek byl následně podroben měření na kontaktním profilometru Taylor-Hobson PGI Optics. Během měření přes téměř plný příčný rozsah (150 mm z celkových 200 mm) byl zjištěn závažný nedostatek tohoto zařízení. Primárním zdrojem nepřesnosti měření je příčný lineární stolek Steinmeyer PMT160-DC, kterým výrobce Taylor Hobson sériově osadil své zařízení PGI Optics. Přestože stolek je možno kalibrovat pomocí přesné rovinné reference na přímost, což bylo před měřením provedeno, výrobce i poté garantuje přímost vedení pouze $\pm 1,4 \mu\text{m}$, což značí maximální boční odchylku středu měřicího stolku v celém rozsahu posuvu. Druhým parametrem je rovinnost posuvu, tedy změna polohy všech bodů úložné plochy stolku, $\pm 2 \mu\text{m}$ [76]. Výsledek 3D měření z profilometru je uveden na obr. 67. Celková odchylka od ideální roviny (na obrázku označena tentokrát jako S_2) je $2,72 \mu\text{m}$. 3D mapa povrchu byla složena ze 199 dílčích 2D profilů vzdálených od sebe $0,74 \text{ mm}$ a celková doba měření byla 480 minut, tedy 8 hodin. Z výsledku je dobře patrná vodorovná struktura vzniklá nepřesným posuvem v ose y a také zkroucení náměru „twist“. Artefakt twist, který se opakoval ve všech provedených měřeních (různé natočení vzorku), byl důsledkem nedostatečné přesnosti příčného stolku. Proto proběhla konzultace s výrobcem a dodavatelem zřízení. Výsledkem spolupráce pak byla instalace softwarového doplňku umožňujícího kalibraci parametru twist pomocí měření přesné rovinné desky. Výsledek měření téhož vzorku (jako na obr. 67) po kalibraci je uveden na obr. 68. Dále proběhlo měření 2D profilů, jejichž výsledky jsou uvedeny na obr. 69 a obr. 70. Při těchto dvou měřeních byl využit pouze měřicí posuv v ose x . Profily byly

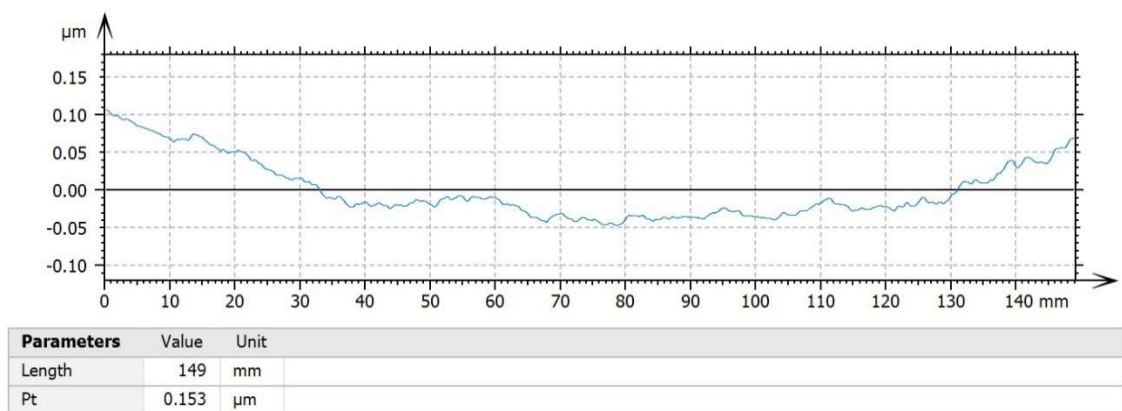
vedeny přes střed vzorku v identických polohách, jako 2D řezy extrahované z 3D mapy na obr. 62/obr. 63 a obr. 65/obr. 66. V případě horizontálního směru profilu je rozdíl PV mezi interferometrickým a profilometrickým měřením 121 nm a v případě vertikálního směru pouze 82 nm. Výsledky hodnot PV vypočtených z 3D map i z 2D profilů jsou souhrnně uvedeny v tabulce 3. Výsledky, vyplývající ze všech uvedených měření, a souhrnné tabulky ukazují značnou míru podobnosti mezi 3D a 2D daty ze zařízení SAP a z interferometru. Rozdíl hodnot PV mezi 3D daty je v řádu desítek nm a mezi 2D profily v řádu jednotek nm. Značná odchylka je pak mezi 3D daty z profilometru a ostatních dvou metod. Zde se nepříznivě projevuje výrobcem zařízení přípustná odchylka rovinnosti příčného posuvného stolku. 2D profily naměřené profilometrem vykazují odchylku od zbylých dvou metod v rozmezí 63 nm – 138 nm. Vzhledem k tolerované přímosti vedení osy x profilometru PGI (< 110 nm), viz příloha 8, se jedná o mírně nadlimitní hodnoty. Zjištění těchto odchylek povede k zajištění pravidelné kalibrace profilometru PGI certifikovanou autoritou.



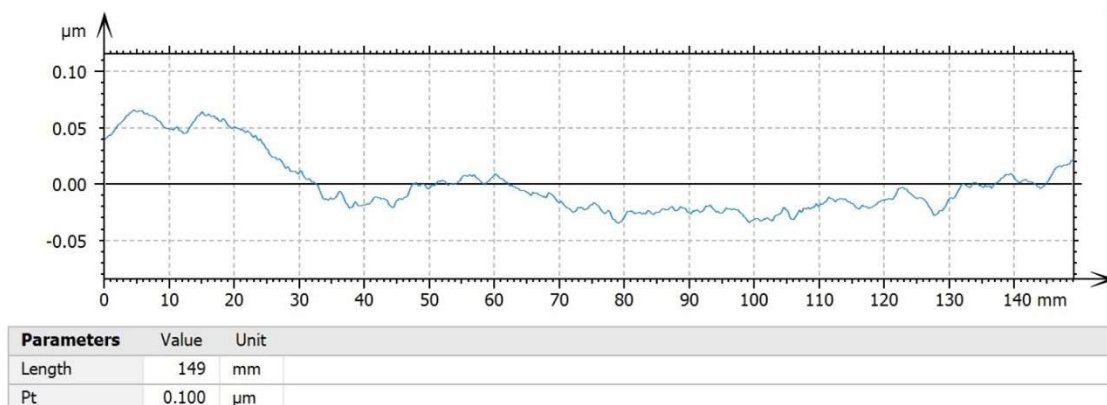
Obr. 67: Výsledek měření tvaru rovinného referenčního flatobjektivu na zařízení Taylor-Hobson PGI Optics před kalibrací příčného stolku. Výsledná hodnota PV vypočtená z celé 3D mapy 2,72 μm (v softwaru T-H Talymap uvedena pod označením S_z).



Obr. 68: Výsledek měření tvaru rovinného referenčního flatobjektivu na zařízení Taylor-Hobson PGI Optics po kalibraci příčného stolku. Výsledná hodnota PV vypočtená z celé 3D mapy je $1,24\ \mu\text{m}$ (v softwaru T-H Talymap uvedena pod označením S_z).



Obr. 69: Profil umístěný přes střed rovinného referenčního flatobjektivu v horizontálním směru. PV hodnota $0,153\ \mu\text{m}$. (v softwaru T-H Talymap uvedena pod označením P_t).



Obr. 70: Profil umístěný přes střed rovinného referenčního flatobjektivu ve vertikálním směru. PV hodnota 0,100 µm. (v softwaru T-H Talymap uvedena pod označením P_t).

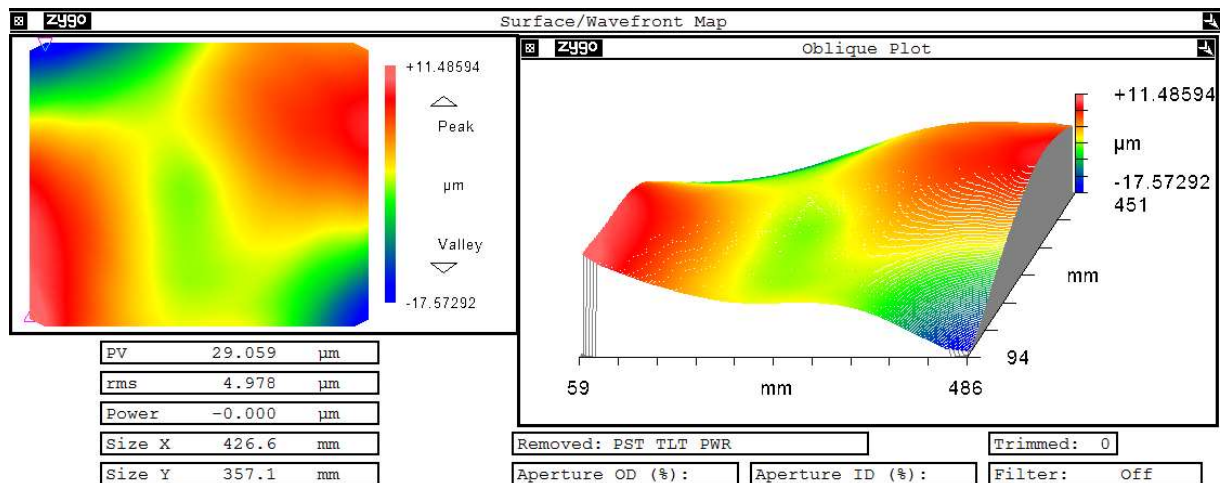
Tabulka 3: Souhrn výsledků PV měření tvaru referenčního flatobjektivu z 3D map a 2D profilů

Měřicí zařízení	Výsledek PV měření tvaru rovinného referenčního flatobjektivu		
	3D mapa [nm]	2D profil horizontální směr [nm]	2D profil vertikální směr [nm]
SAP	93	23	37
Interferometr	36	15	28
Profilometr	1 240	153	100

4.1.2 Zrcadlo 440 mm × 370 mm

Jedná se o rovinné skleněné zrcadlo o rozměrech 440 mm × 370 mm vyráběné na pracovišti SLO pro externí vědecký projekt. Tloušťka zrcadla je 6 mm, je jednostranně leštěné (broušené na opačné straně). Zrcadlo v době měření nebylo opatřeno žádnou reflexní vrstvou. Měření na zařízení SAP probíhalo na ploše 430 mm × 360 mm, abychom se vyhnuli okrajovým defektům mimo opticky funkční plochu „clear aperture“. Výsledná 3D mapa byla programem Zeeko Stitching toolkit sešita ze 160 dílčích 2D skenů, tzn. 80 směrů (azimuths) × 2 přejezdy (sweeps). Následně byla 3D mapa exportována do formátu „.dat“. Během analýzy v softwaru Zygo MetroPro byla celková plocha náměru zmenšena na 426,6 mm × 357,1 mm. Výsledek měření je uveden na obr. 71. Celková

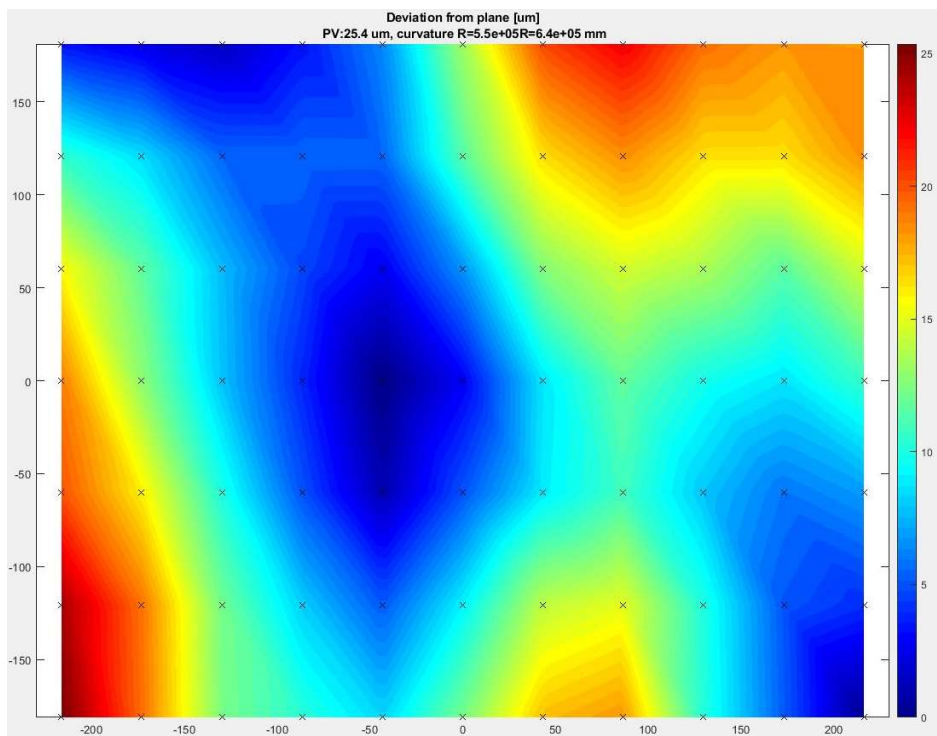
doba měření byla 270 minut. Zrcadlo bylo položeno na kovovém rovinném stole a na něm volně umístěné 3 mm silné podložce z neoprenu. Výsledná hodnota irregulární složky $PV = 29,059 \mu\text{m}$.



Obr. 71: Výsledek měření tvaru rovinného zrcadla na zařízení SAP. Výsledná hodnota $PV = 29,059 \mu\text{m}$.

Pro porovnání byla vybrána dvě na pracovišti SLO dostupná zařízení. Kontaktní souřadnicové zařízení Zeeko IRP800-G a digitální interferometr Zygo Verifire. Zařízení IRP800-G bylo vybráno proto, že právě toto zařízení je využíváno pro rutinní mezioperační a finální kontrolu těchto rovinných vzorků, které jsou na něm frézovány. Následné leštění pak probíhá klasickou technologií.

Zrcadlo jako v případě měření na obr. 71 bylo uvnitř zařízení IRP800-G položeno na kovový stůl a volně loženou neoprenovou podložku stejně jako v případě měření na zařízení SAP. Výsledná hodnota PV jako deviace od ideální roviny je $25,4 \mu\text{m}$. Délka měření byla cca 20 minut. Jak hodnota PV , tak rozložení nerovností na zrcadle vykazuje značnou míru podobnosti, viz obr. 71 a obr. 72. U měření na zařízení IRP-800G se projevuje podstatně menší hustota měřicích bodů. V případě měření na obr. 72 je to $11 \times 7 = 77$ měřicích bodů. Měřicí body (body dotyku sondy se vzorkem) jsou označeny černými křížky. Výsledek měření byl zobrazen v prostředí Matlab, protože zařízení Zeeko IRP-800G nedisponuje exportem do programu MetroPro.

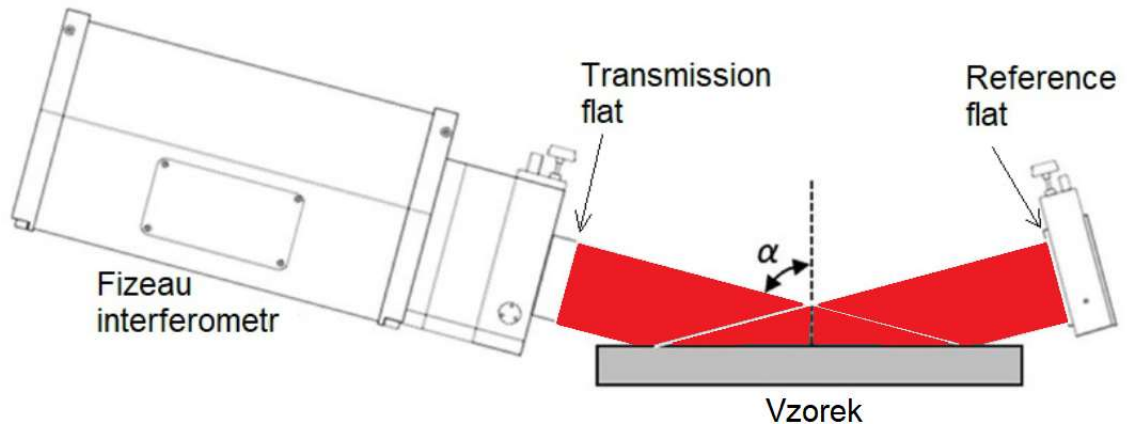


Obr. 72: Výsledek měření tvaru rovinného zrcadla na zařízení Zeeko IRP-800G vybaveného měřicí sondou Renishaw RMP600. Výsledná hodnota $PV = 25,4 \mu\text{m}$.

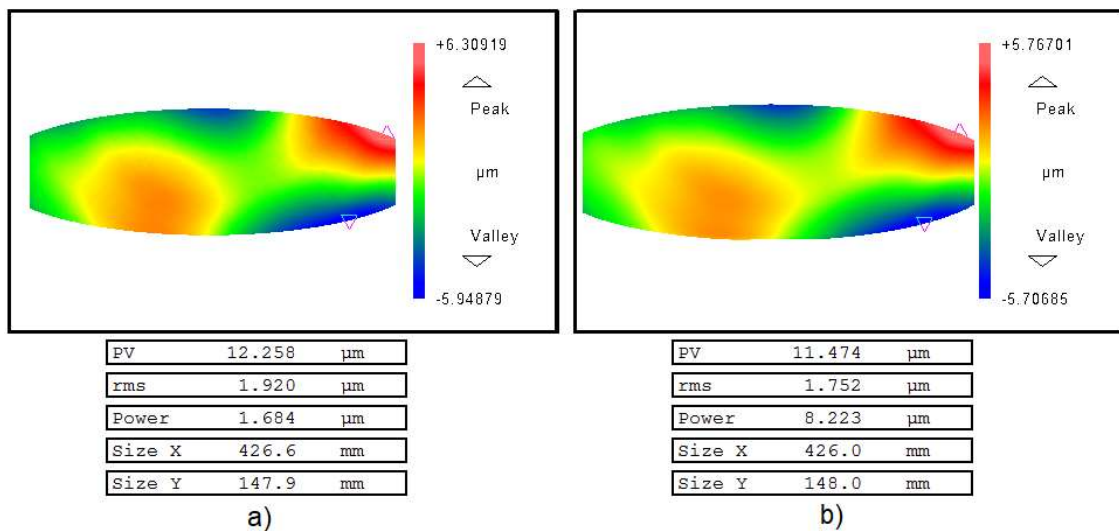
Přestože je měřicí apertura interferometru pouze 150 mm, lze pomocí metody „grazing incidence“ měřit i několikanásobně větší plochy [77, 78]. Díky náklonu měřeného vzorku vůči ose interferometru a využití odrazné plochy, viz obr. 73, lze z kruhové apertury vytvořit aperturu eliptickou. Díky tomu bylo možno na výše zmíněném rovinném zrcadle změřit plochu o rozměru 426 mm × 148 mm. Doba potřebná pro změření této plochy je v řádu několika sekund.

Stejně velká a stejně umístěná plocha pak byla softwarem MetroPro vyříznuta z 3D dat získaných zařízením SAP, aby bylo možno výsledky měření porovnat. Po odečtení vlivu parametru PWR se výsledné hodnoty PV sobě značně blíží. Rozdíl v hodnotách získaných dvěma různými metodami činí 784 nm. Hodnota PWR je u obou metod pravděpodobně rozdílná z důvodu diametrálně odlišného uložení vzorků při měření. V případě metody SAP vzorek ležel na zadní ploše na vrstvě neoprenu. U měření na interferometru vzorek stál svisle postavený na spodní hraně na aktivním antivibračním stole společně s interferometrem. Různé umístění vzorku pravděpodobně vedlo k odlišnému globálnímu pronutí velmi tenkého skleněného zrcadla a generování

různého parametru PWR . Irregulární tvar měřené plochy (viz obr. 74a a obr. 74b) je téměř identický. Podobné porovnání proběhlo na několika dalších vzorcích o stejném rozměru s velmi podobnými výsledky.



Obr. 73: Schéma metody „grazing incidence“ neboli změna kruhové apertury na eliptickou za pomoci náklonu vzorku a užití odrazné plochy. Tvar měřicího svazku je vyznačen červeně [77].



Obr. 74: a) Výsledek měření na zařízení SAP. Eliptický výřez z výsledků na obr. 71. Elipsa umístěna u horní hrany vzorku. Hodnota $PV = 12,258 \mu\text{m}$. b) Výsledek měření na interferometru Zygo Verifire. Elipsa vytvořená metodou grazing incidence u horní hrany rovinného zrcadla. Hodnota $PV = 11,474 \mu\text{m}$.

4.2 Sférické vzorky

4.2.1 Hexagon průměr 900 mm

Dalším srovnávacím vzorkem bylo konkávní sférické skleněné zrcadlo, které je na pracovišti SLO vyráběno ověřenou technologií teplotního propadání, frézování a leštění a následně napařováno soustavou vrstev pro zajištění požadované reflexe ($R > 85\%$). Velikost kružnice opsané hexagonu je 900 mm, tloušťka zrcadla 17 mm, nominální rádius plochy 11 200 mm a hmotnost zrcadla je cca 20 kg.

Kombinace geometrických rozměrů – rádiusu a průměru kontrolované plochy – dovolila na zařízení SAP měřit tvar pouze na kruhové apertuře o průměru 613,5 mm. Výsledná 3D mapa byla vytvořena sešitím z celkem 120 měření (60 azimutů \times 2 přejezdy). Doba měření po optimalizaci činila 120 min. Výsledná hodnota $PV = 9,222\ \mu\text{m}$. 3D mapa tvaru povrchu je na obr. 77a.

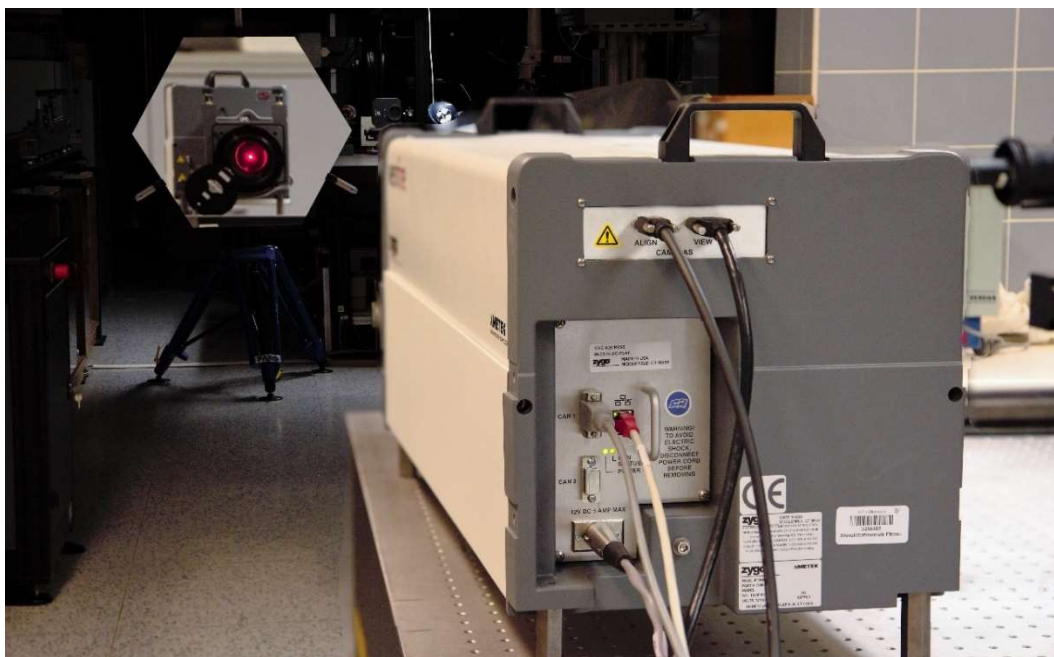
Stejný vzorek byl následně změřen pomocí digitálního interferometru Zygo Verifire. Jako reference sloužila transmission sphere Zygo $f/7,2$ s deklarovanou přesností lepší než $\lambda/10$ (63,2 nm). Protože byl povrch zrcadla opatřen vysoce reflektivní vrstvou (kombinace odrazné vrstvy Al a krycí vrstvy SiO_2) bylo pro zvýšení kontrastu interferenčního obrazce třeba použít atenuační „pellicle filter Zygo“.

Během měření bylo třeba umístit vzorek do vzdálenosti cca 11,8 m, což je součet rádiusu referenční plochy a rádiusu vzorku. Interferometr i vzorek byly umístěny na aktivních antivibračních stolech uvnitř teplotně stabilní laboratoře. Pro umístění vzorku – skleněného zrcadla – byl navíc navržen a zkonstruován nový třiramenný upínací mechanismus s dvěma na sebe kolmými náklony, umístěný na masivním stativu. Držák vzorku je možno vidět v pravé části schématu na obr. 75. Snímek měřicí sestavy je pak možno vidět na obr. 76.

Interferometr umožňoval změřit celou plochu zrcadla a získat tak 3D mapu povrchu z celého hexagonu. Pro porovnání výsledků byla z této mapy pomocí softwaru MetroPro vyříznuta kruhová apertura o průměru 613,8 mm umístěná ve středu zrcadla. Měřené oblasti v případě zařízení SAP a Zygo jsou tedy stejné. Výsledek měření na interferometru je uveden na obr. 77b. Hodnota $PV = 9,152\ \mu\text{m}$.

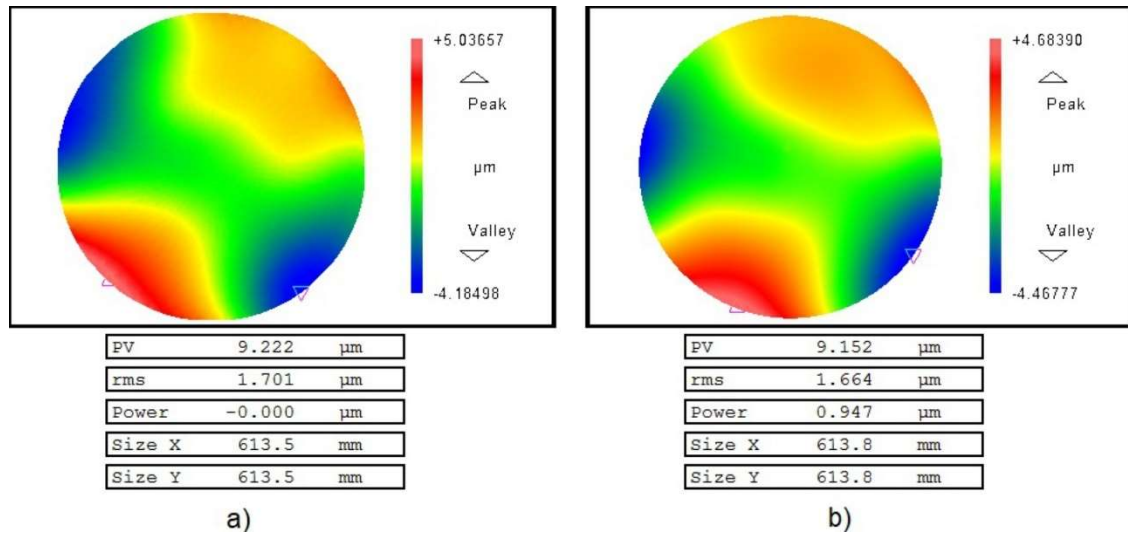


Obr. 75: Schéma měření konkávní sférické plochy hexagonálního skleněného zrcadla pomocí interferometru. Interferometr s optickou referencí i vzorek jsou umístěny na aktivních antivibračních stolech. Mezi interferometrem a vzorkem je červeně vyznačen tvar měřicího svazku.



Obr. 76: Reálná fotka měřicí sestavy zrcadlo (vlevo nahoře) – interferometr Zygo (vpravo).

Hodnoty deformace i rozložení nerovností na povrchu u obou měřicích metod vykazují značně podobný trend, viz obr. 77a a obr. 77b. Rozdíl v hodnotách PV v uvedených měřeních činí 70 nm.

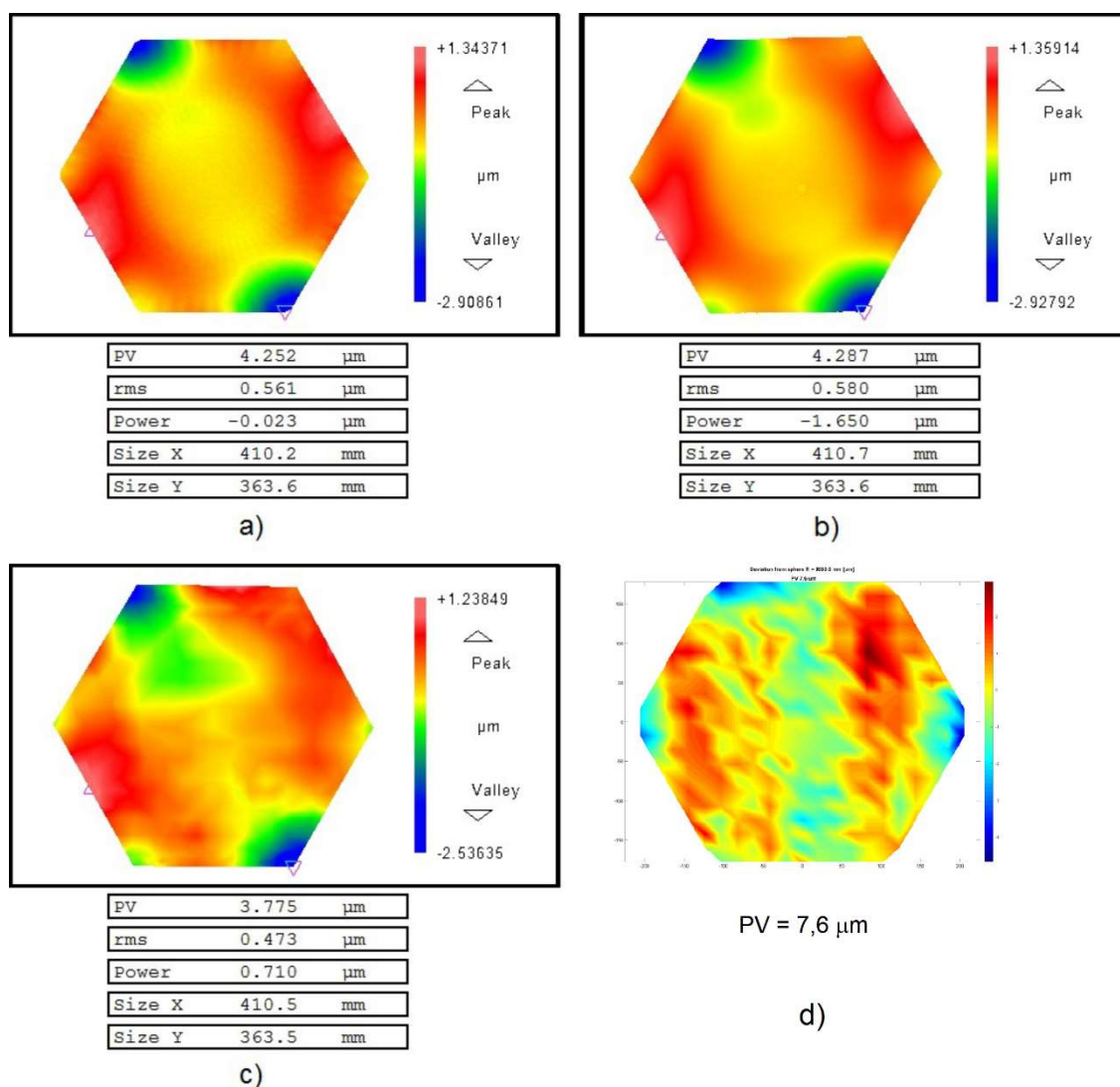


Obr. 77: a) Výsledek měření sférického konkávního zrcadla na zařízení SAP. Výsledná hodnota $PV = 9,222 \mu\text{m}$. b) Výsledek měření sférického konkávního zrcadla na interferometru Zygo Verifire. Výsledná hodnota $PV = 9,152 \mu\text{m}$.

4.2.2 Hexagon průměr 435 mm

Pro další srovnání bylo vybráno jiné konkávní sférické hexagonální zrcadlo. Kružnice opsaná hexagonu má průměr 435 mm. Důvodem, proč byl vybrán další sférický vzorek, je, že proti předchozímu má tento diametrálně odlišnou sendvičovou konstrukci. Ta zaručuje podstatně vyšší tvarovou stabilitu měřeného povrchu, tedy tvar měřeného vzorku je invariantní vůči různému uložení během měření (vodorovné, svislé). Celý vzorek má tloušťku 51,8 mm. Horní funkční plochu tvoří 2,8 mm tlusté sklo opatřené vysoce odraznou kovovou vrstvou. Střední vrstva o tloušťce 46,8 mm je vyrobena z pěnového skla. To zaručuje vysokou mechanickou a teplotní stabilitu při zachování velmi nízké hmotnosti. Spodní vrstva sendviče je opět 2,2 mm tlustá skleněná deska, jejíž vnější plocha je jemně broušená. Celková hmotnost vzorku je pouze 1,5 kg.

Měření na zařízení SAP probíhalo ve 120 dílčích krocích (60 azimutů × 2 přejezdy). Celková 3D mapa povrchu byla zmenšena v okrajích o 5 mm, aby výsledek nebyl ovlivněn okrajovými defekty mimo účinnou aperturu. Výsledek měření je možno vidět na obr. 78a. Výsledná hodnota nesférické deformace PV je 4,252 μm . Doba měření byla 93 min.



Obr. 78: a) Výsledek měření hexagonálního sférického konkávního zrcadla na zařízení SAP. Hodnota $PV = 4,252 \mu\text{m}$. b) Výsledek měření hexagonálního sférického konkávního zrcadla na zařízení Zygo Verifire. Hodnota $PV = 4,287 \mu\text{m}$. c) Výsledek měření hexagonálního sférického konkávního zrcadla na zařízení Zeiss Contura G2 HTG. Hodnota $PV = 3,775 \mu\text{m}$. d) Výsledek měření na zařízení Zeeko IRP-800G. Hodnota $PV = 7,6 \mu\text{m}$.

Kontrolní měření téhož vzorku probíhalo na interferometru Zygo Verifire. Vzorek byl měřen ve stejné sestavě jako na obr. 75. Vzorek i interferometr byly uloženy na

aktivních antivibračních stolech. Opět byla využita referenční transmission sphere Zygo $f/7,2$ s deklarovanou přesností lepší než $\lambda/10$ (63,2 nm). Protože byl povrch zrcadla opatřen vysoce reflektivní vrstvou, bylo pro zvýšení kontrastu interferenčního obrazce třeba použít útlumový atenuační „pellicle filter Zygo“. Protože rádius vzorku činí 9 880 mm, bylo třeba vzorek umístit do vzdálenosti 10,5 m od interferometru.

Výsledek měření je uveden na obr. 78b. Velikost změřené plochy je stejná jako v případě měření na SAP. Výsledná 3D mapa je průměrem z 5 opakujících se měření. Výsledná hodnota nesférické deformace PV je 4,287 μm . Čas potřebný pro nasnímání celého povrchu (pět měření v řadě) je cca 3 vteřiny.

Rozdíl v hodnotách nesférické deformace povrchu PV získaných měření na SAP a interferometru Zygo je 35 nm. Rovněž rozložení nerovností na povrchu (viz obr. 78 a obr. 78b) je velmi podobné.

Dalším zařízením využitým pro ověření výsledku ze SAP bylo souřadnicové zařízení Zeiss Contura G2 HTG, viz kapitola 2.2.3 této práce. Senzor byl osazený měřicím raménkem s karbonovým dříkem zakončeným rubínovou kuličkou o průměru 1,5 mm.

Výsledek měření ze zařízení Zeiss je uveden na obr. 78c. Velikost změřené plochy je stejná jako v případě měření na SAP a Zygo Verifire. Výsledná 3D mapa vznikla interpolací souřadnic 311 měřicích bodů, což trvalo souhrnně cca 18,5 minuty. Hodnota nesférické deformace PV je 3,775 μm . Rozdíl v hodnotách nesférické deformace povrchu PV získaným měřením na SAP a na zařízení Zeiss Contura je 477 nm. Rozložení nerovností na povrchu vzorku (viz obr. 78a a obr. 78c) vykazuje stejný trend. Rozdílné hodnoty PV v rozložení nerovností na povrchu je pravděpodobně způsobeno mnohem menším počtem měřicích bodů v případě kontaktního měření na zařízení Zeiss a také mnohem menší přesností měřidla Zeiss. Výrobce deklarovaná nejistota měření může dosáhnout až hodnoty 1,8 μm , proto je možné odchylku cca 0,5 μm od výsledku ze SAP a z interferometru považovat za očekávatelnou.

Posledním kontrolním měřením téhož vzorku bylo měření na zařízení Zeeko IRP-800G. Výsledek měření zobrazený na obr. 78d vznikl interpolací 341 měřicích bodů. Stejně jako v případě obr. 72 je výsledek zobrazen v prostředí Matlab, protože obslužný

software neumožňuje přímý export dat pro analýzu v prostředí MetrPro. Vzorek byl během měření uložen v horizontální pozici na třech podpurných bodech pod zadní plochou a celková doba měření byla cca 71 minut. Hodnota nesférické deformace, tedy odchylka od ideální koule je $PV = 7,6 \mu\text{m}$. Co se hodnoty PV tvaru výsledné 3D mapy povrchu týče, lze konstatovat, že použitá metoda měření vykazuje největší odchylku od ostatních tří měření. Je to způsobeno nejnižší přesností v určení polohy měřicí sondy, neboť sonda se pohybuje po stejných posuvech, jako se využívají při abrazivním obrábění optických dílů. Posuvy tedy zcela určitě nesou známky opotřebení a snížené linearitě vedení. Snížená přesnost je pak jistě daní za výrobně/měřicí univerzalitu tohoto zařízení. Ze zkušenosti s dlouholetým provozem zařízení IRP-800G plyne, že zařízení není vysoce přesné pro absolutní měření. Ale díky značné tuhosti všech os nutné pro abrazivní opracování tvrdých materiálů má zařízení dostatečnou opakovatelnost naměřených výsledků. Prakticky to vede k využití primárně v módu komparačního mezioperačního a finálního měření, což však v případě měření na obr. 78 nebylo možné, protože k dispozici byl pouze jeden kus tohoto zrcadla.

5. Závěr

Předložená disertační práce v postupném sledu plní všechny dílčí cíle uvedené v úvodu. Prvním cílem je komplexní popis velkoplošných optických dílů zařazený v druhé kapitole. Zde je zaveden nejen pojem velkoplošné optické díly, ale i typizace těchto dílů a technologie jejich výroby. Druhá a třetí podkapitola této teoretické části se věnuje metrologii rozsáhlých optických povrchů. Popsány jsou principy měřicích zařízení, které jsou nejčastěji využívány v optickém výrobním průmyslu. Důraz je kladen na ta zařízení, která jsou následně využita v experimentální části práce pro získání porovnávacích měření. Konkrétně se jedná o digitální laserový interferometr, kontaktní profilometr a dvě kontaktní souřadnicová měřidla.

Zvláštní podkapitola je věnována teoretickému rozboru metody SAP a popisu zařízení Zeeko SAP, čímž je splněn i druhý dílčí cíl práce. Během prvotního testování zařízení Zeeko SAP a osvojování si jeho obsluhy bylo odhaleno několik nedostatků tohoto prototypu. V třetí kapitole proto nalezneme výčet problémů a navržených řešení, která zjednodušují činnost operátora, zvyšují přesnost a opakovatelnost výsledků měření, šetří čas a eliminují možnost poškození měřeného vzorku. Řešení představují mechanické úpravy, výměny některých komponent a zavedení nových postupů justáže zařízení. Přidaná hodnota jedné z úprav zařízení se tvůrci disertační práce jevila natolik zásadní, že vedla k provedení rozsáhlé rešerše a následnému podání mezinárodní PCT přihlášky. Jedná se o užití druhé – referenční měřicí sondy společně s referenčním etalonem. Takto vylepšená sestava pak bude schopna změřit další parametr zkoumaného vzorku, kterým je poloměr křivosti neboli rádius funkční plochy. Přestože byly všechny úpravy provedeny na konkrétním zařízení Zeeko SAP, jsou přenositelné i na jiná zařízení typu SAP.

Ověření zařízení SAP po provedených úpravách je věnována čtvrtá kapitola, čímž je prakticky splněn třetí dílčí cíl disertační práce. Jsou zde uvedeny výsledky měření tvaru funkčních ploch čtyř různých optických dílů. Jedná se o dva rovinné a dva sférické díly. Všechny čtyři vzorky byly podrobeny měření nejen na zařízení SAP, ale i na dalších měřicích zařízeních, která se nachází na pracovišti SLO nebo na pracovišti jeho průmyslového partnera. Součástí plnění třetího dílčího cíle bylo mimo jiné zvládnutí obsluhy všech využitých měřicích zařízení. Všechna měření jsou včetně rozborů

dosažených výsledků detailně popsána v kapitole 4. Z výsledků měření plyne značná shoda mezi měřeními na zařízení SAP a v optické praxi nejčastěji využívaným měřidlem – interferometrem Zygo Verifire. Rozdíly v hodnotách nesférické deformace *PV* naměřené těmito dvěma zařízeními jsou ve všech případech menší než 800 nm. Je tedy zřejmé, že rozdíly v hodnotách *PV* jsou vzhledem k plánované aplikaci zařízení SAP (měření velkoplošných dílů s nesférickými odchylkami v řádu jednotek až stovek mikrometrů) plně akceptovatelné. Porovnávací měření tvaru na zařízení SAP a souřadnicovém stroji Zeiss Contura G2 na jednom srovnávacím vzorku (sférické zrcadlo) rovněž vykazuje značnou shodu. Rozdíl v hodnotách *PV* dosáhl cca 0,5 μm , což opět potvrzuje správnost výsledků ze zařízení SAP. Ve dvou případech byly vzorky změřeny pomocí obráběcího zařízení Zeeko IRP-800G a jednou pomocí kontaktního profilometru Taylor Hobson PGI Optisc. V případě konfrontace výsledků ze SAP a souřadnicového měření (IRP) na rovinném a sférickém vzorku byl rozdíl hodnot *PV* cca 3,5 μm . Mírně vyšší rozdíl mezi výsledky na těchto dvou zařízeních je třeba přisoudit menší přesnosti zařízení IRP. Výsledky měření ze zařízení IRP jsou zatíženy větší chybou, protože toto zařízení je primárně určeno pro abrazivní opracování optických dílů a jeho lineární posuvy jeví opotřebením. Nepřesnosti v absolutním určení tvaru plochy pomocí IRP se při obvyklém měření kompenzují komparačním měřením několika kusů stejného nominálního tvaru. Tento postup nebylo u vzorků zmíněných v této práci možné použít, neboť se nejedná o díly ze sériové výroby. V případě porovnání SAP s profilometrem PGI byla během měření odhalena nedokonalost jedné z klíčových komponent profilometru. Po konzultaci s dodavatelem zařízení byl problém s nelinearitou posuvu řešen dodatečnou kalibrací příčného stolku. Výsledky měření tvaru opraveným profilometrem vykazují rozdíl *PV* vůči měření dvěma zařízeními (SAP, interferometr) cca 1 μm v režimu 3D měření. Avšak v případě 2D lineárního měření, na které je profilometr primárně konstruován, jsou odchylky pouze cca 100 nm. Podle specifikace profilometru jsou jak 3D, tak 2D rozdíly proti dvěma dalším metodám v rámci tolerance. Všechny zmíněné porovnávací výsledky měření prokazují vysokou míru přesnosti měřicího zařízení Zeeko SAP po provedených úpravách, čímž je možno toto zařízení validovat pro začlenění do produkčního řetězce v rámci pracoviště SLO. Tím je splněn hlavní cíl předložené disertační práce.

6. Summary

The presented dissertation fulfils all the partial goals mentioned in the introduction in a sequential order. The first goal is a comprehensive description of large-area optical parts included in the second chapter. And here, not only the concept of large-area optical parts is introduced, but also the typical sorting of these parts and the technology of their production. The second and third sub chapters of this theoretical part are devoted to the metrology of large-scale optical surfaces. The principles of measuring devices, that are most commonly used in the optical manufacturing industry are described. Emphasis is placed on those devices that are subsequently used in the experimental part of the thesis to obtain comparative measurements. Specifically, these are a digital laser interferometer, a contact profilometer and two contact coordinate measuring machines (CMM).

A special subchapter is devoted to the theoretical analysis of the SAP method and description of the Zeeko SAP device, thus fulfilling the second partial goal of the thesis. During the initial testing of the Zeeko SAP device and learning how to operate it, several weaknesses of this prototype were revealed. Therefore, Chapter 3 lists the problems and proposed solutions that simplify the operator's work, increase the accuracy and repeatability of this device, save time and eliminate the possibility of damage to the measured samples. The solutions taken were mechanical modifications, replacements of some components and the introduction of new procedures for the equipment adjusting. The added value of one of the equipment modifications was so substantial to the thesis author, that it led to an extensive research and subsequent submission of an international PCT application. And this substantial modification was use of the second reference measuring probe together with its reference standard. This improved set-up will enable to measure another parameter of the investigated sample - functional area radius of curvature. Although all modifications have been made to a specific Zeeko SAP device, they are fully transferable to other SAP type devices.

The fourth chapter is devoted to the verification of the SAP device after the modifications were made, thus practically fulfilling the third sub-objective of the dissertation. The functional surfaces shape measurement results for four different optical components (two planar and two spherical) are presented. All four samples were

subjected to measurement not only on SAP equipment, but also on other measuring equipment located on the JLO site or on site of its industrial partner. The third sub-objective included, among other things, was mastering the operation of all these measuring equipment used. All the measurements are described in detail, including analyses of the results obtained, in Chapter 4. The results of the measurements show a considerable agreement between the measurements on the SAP equipment and the most commonly used measuring instrument in optical practice - the Zygo Verifire interferometer. The differences in the values of the non-spherical deformation PV, measured by these two devices are less than 800 nm, in all cases. It is therefore clear that the differences in PV values are fully acceptable given the planned application of the SAP device (measurement of large parts with non-spherical deviations in the order from a single micrometer to hundreds of micrometers). Comparative shape measurements on the SAP and on a Zeiss Contura G2 coordinate machine also show considerable agreement on a same single comparison sample (spherical mirror). The difference in PV values was about 0.5 μm , which again confirms the accuracy of the results from the SAP device. The samples were measured using a Zeeko IRP-800G machining device in two cases and once using a Taylor Hobson PGI Optics contact profilometer., The difference in PV values was approximately 3.5 μm , when the results from SAP and the coordinate measurement (IRP) on the planar and spherical sample were confronted. The slightly higher difference between the results on these two devices is due to the lower accuracy of the IRP device. The measurement results from the IRP device are burdened with higher error influence, because this device is primarily designed for optical parts abrasive machining and its linear traverse show wear. Inaccuracies in the absolute determination of the area shape by the IRP are compensated for by comparative measurements of several same nominal shape pieces in a repetitive measurement. This procedure could not be applied to the specimen utilized in this paper as they are not mass-produced parts. An imperfection in one of the key components of profilometer device was revealed during the SAP to the PGI profilometer comparison. The problem with the traverse non-linearity was solved by additional cross table calibration after consultation with the equipment supplier. The shape measurements result on the corrected profilometer show a PV difference with respect to the measurements on both comparison devices (SAP, interferometer) of about 1 μm in 3D measurement mode. Nevertheless, in the case of 2D linear section measurement, for which the profilometer is primarily designed, the deviations are only

about 100 nm. Either 3D and 2D differences against the other two methods are within tolerance, according to the profilometer specification. All of the above mentioned comparative measurement results demonstrate the high level of accuracy of the Zeeko SAP measuring device after the modifications made, which allows the device to be validated for integration into the production chain within the JLO site. This fulfils the main goal of the presented dissertation.

7. Reference

1. Bliedtner, J., G. Grafe, and R. Hector, *Optical Technology*. 2011: McGraw-Hill Education.
2. Karow, H.H., *Fabrication Methods for Precision Optics*. 1993, New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.
3. Steinkopf, R., et al. *Metal mirrors with excellent figure and roughness*. in *Optical Systems Design*. 2008. Glasgow, Scotland, United Kingdom: SPIE.
4. Vojtíšek, P., M. Possolt, and R. Doleček, *Design a výroba difrakčního elementu pro aplikaci v hyperspektrálním zobrazovacím systému pro LWIR*. *Jemná mechanika a optika*, 2015. **62**(3): p. 96-100.
5. Precitech Inc. *Nanoform L 1000*. Large Frame Lathes 2019 [cited 2022 11. 12.]; Available from: <https://www.precitech.com/product/largeframelathesoverview/nanoforml1000>.
6. Wikipedia, *Pyrex*, in *Wikipedia, the free encyclopedia*. 2022, Wikimedia Foundation, Inc.
7. Kavalierglass, a.s. *Sklo Simax*. 2022 [cited 2022 11. 12.]; Available from: <https://www.kavalier.cz/simax-professional/sklo-simax.html>.
8. Corning Incorporated. *Corning® ULE® Glass*. 2022 [cited 2022 11. 12.]; Available from: <https://www.corning.com/worldwide/en/products/advanced-optics/product-materials/semiconductor-laser-optic-components/ultra-low-expansion-glass.html>.
9. Schott UK Ltd. *ZERODUR®*. 2022 [cited 2022 1. 12.]; Available from: <https://www.schott.com/en-gb/products/zerodur-p1000269>.
10. Canestrari, R., et al. *Lightweight optical segment prototype for adaptive optics manufactured by hot slumping*. in *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation*. 2008. Marseille, France: SPIE.
11. OptoTech Optikmaschinen GmbH. *Advanced Wheel Polishing Tool (A-WPT)*. 2022 [cited 2022 23. 12.]; Available from: <https://www.optotech.de/en/advanced-wheel-polishing-tool-awpt>.
12. OptoTech Optikmaschinen GmbH. *Active Fluid Jet Polishing (A-FJP)* 2022 [cited 2022 23. 12.]; Available from: <https://www.optotech.de/en/active-fluid-jet-polishing-afjp>.
13. QED Technologies. *MRF polishing*. 2023 [cited 2022 23. 12.]; Available from: <https://qedmrf.com/mrf-polishing/>.
14. Savvides, N. and A. Knittel, *Ion Beam Figuring of Optics*. 2016, CSIRO Industrial Physics: Lindfield.
15. Polák, J., et al., *Zkušenosti s používáním ion beam figuring technologie v TOPTEC*. *Jemná mechanika a optika*, 2018. **63**(2): p. 56-67.
16. Nozka, L., et al., *Monitoring of mirror degradation of fluorescence detectors at the Pierre Auger Observatory due to dust sedimentation*. *Journal of Instrumentation*, 2018. **13**(05): p. T05005.
17. Dyrda, M., et al. *Open-structure composite mirrors for the Cherenkov Telescope Array*. in *33rd international cosmic ray conference*. 2013. Rio de Janeiro: Institute of Nuclear Physics, PAS.
18. La Palombara, N., et al., *Mirror production for the Cherenkov telescopes of the ASTRI mini-array and the MST project for the Cherenkov Telescope Array*. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2022. **8**.

19. Havelková, M. and H. Hiklová, *Mapování povrchu pevných těles se zaměřením na kontaktní profilometrii*. Vol. 1. 2014, Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta.
20. Zygo Corporation, *Mx Surface Texture Parameters* 2017, Zygo Corporation, Ametek ultra precision metrologies.
21. Špína, M., et al., *Analýza referenčních povrchových vad optických ploch za použití konfokální mikroskopie, interferometrie v bílém světle a mikroskopie atomárních sil*. *Jemná mechanika a optika*, 2018. **63**(3): p. 81-84.
22. Procháska, F., et al., *Chování "mid spatial frequencies" při CNC opracování optických ploch*. *Jemná mechanika a optika*, 2015. **60**(10): p. 293-295.
23. Procháska, F., et al., *Vliv kinematiky na tvorbu povrchových struktur při leštění asférických ploch*. *Jemná mechanika a optika*, 2017. **62**(4): p. 132-134.
24. Špína, M., et al., *Měření vibrací CNC zařízení při obrábění asférických optických ploch za účelem sledování středních prostorových frekvencí*. *Jemná mechanika a optika*, 2018. **63**(9): p. 235-238.
25. Crystran Ltd. *Explanation of optical drawing standard ISO 10110*. 2012 [cited 2022 13. 9.]; Available from: <https://www.crystran.co.uk/explanation-of-optical-drawing-standard-iso-10110>.
26. Zygo Corporation, *MetroPro Reference Guide*. Vol. OMP-0347K. 2022, Middlefield, Connecticut, USA: Zygo.
27. Sun, W., J.W. McBride, and M. Hill, *A new approach to characterising aspheric surfaces*. *Precision Engineering*, 2010. **34**(1): p. 171-179.
28. OptoTech Optikmaschinen GmbH. *OWI 150 XLC*. Interferometer for form measurement of cylindrical and plano optical components 2022 [cited 2022; Available from: <https://www.optotech.de/en/measuring/owi-150-xlc>.
29. *OptoTech Optikmaschinen GmbH*. UPG 2000 CNC, 8-Axis Ultra-Precision Generating and Polishing Center 2022; Available from: <https://www.optotech.de/en/precision-optics/upg-2000-cnc>.
30. QED Technologies. *ASI(Q) Aspheric Stitching Interferometer with QIS*. 2022 21. 8. 2022]; Available from: <https://qedmrf.com/ssi-metrology/asiq/>.
31. ZEISS Metrology. *Prepared for all challenges - today and tomorrow*. ZEISS CONTURA G2 2022 [cited 2022 15. 6.]; Available from: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/coordinate-measuring-machines/bridge-type-cmms/contura-2019.html>.
32. AMETEK.Inc. Taylor Hobson Metrology. *LUPHOScan 850 HD Non-contact Profilometer*. 2022 [cited 2022 27. 6.]; Available from: <https://www.taylor-hobson.com/products/non-contact-3d-optical-profilers/luphos/luphoscan-850-hd>.
33. Burge, J., et al. *Optical surface measurements for very large flat mirrors*. in *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation*. 2008. Marseille, France: SPIE.
34. Jing, H., C. King, and D. Walker, *Measurement of influence function using swing arm profilometer and laser tracker*. *Optics Express*, 2010. **18**(5): p. 5271-5281.
35. Xiong, L., et al., *Swing arm profilometer: analytical solutions of misalignment errors for testing axisymmetric optics*. 2016. **Optical Engineering**(7): p. 074108.
36. Su, P., et al. *Swing-arm optical CMM for aspherics*. in *SPIE Optical Engineering + Applications*. 2009. San Diego, California, USA: SPIE.
37. Su, P., et al., *Swing-arm optical coordinate measuring machine: modal estimation of systematic errors from dual probe shear measurements*. 2012. **Optical Engineering**(4): p. 043604.

38. Su, P., et al. *Swing arm optical CMM: self calibration with dual probe shear test*. in *SPIE Optical Engineering + Applications*. 2011. San Diego, California, USA: SPIE.
39. Huang, C.-Y., et al. *Freeform correction polishing for optics with semi-kinematic mounting*. in *SPIE Optifab*. 2015. Rochester, New York, USA: SPIE.
40. Jones, R.A., *Optimization of computer controlled polishing*. *Applied Optics*, 1977. **16**(1): p. 218-224.
41. Jing, H., et al. *Measurement of an off-axis parabolic mirror using coordinates measurement machine and swing arm profilometer during the grinding process*. in *6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies (AOMATT 2012)*. 2012. Xiamen, China: SPIE.
42. Bouchal, Z., *Učební pomůcka pro studenty oborů MF, Ch-F, Opt, BF, AF*, in *OPTIKA (část I)*. Katedra optiky, Přírodovědecká fakulta Univerzita Palackého: Olomouc. p. 108.
43. Saleh, B.E.A. and M.C. Teich, *Wave Optics*, in *Fundamentals of Photonics*. 1991, John Wiley & Sons, Ltd. p. 41-79.
44. OptoTech Optikmaschinen GmbH. *OWI 150 XT 1500*. High Precision Interferometer for Spherical Optics up to Ø 150 mm 2022; Available from: <https://www.optotech.de/en/measuring/owi-150-xt-1500>.
45. Zygo Corporation. *Verifire™ Laser Interferometer*. 2022 [cited 2023 19. 1.]; Available from: <https://www.zygo.com/products/metrology-systems/laser-interferometers/verifire>.
46. AMETEK.Inc. Taylor Hobson Metrology. *Form Talysurf PGI Optics*. Optics Surface Finish & Form Measurement Equipment 2022 [cited 2022 24. 11.]; Available from: <https://www.taylor-hobson.com/products/surface-profilers/optics-pgi/talysurf-pgi-optics>.
47. Taylor Hobson Limited, *Form TalySurf Series 2*, in *A unique concept in form and surface measurement*. 2022, Taylor Hobson: Leicester, England.
48. Taylor Hobson Precision. *Program TalyMap*. Nejmodernější software pro 2D, 3D a 4D povrchové analýzy 2008 [cited 2022 24. 11.]; Available from: https://www.imeco-th.cz/files/tinymce/Taly_map_cz_low.pdf.
49. automatizace, K.v.s.a., *Rapid prototyping: Souřadnicové měřicí stroje*. 2011, Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní.
50. Fojtek, O., L. Pomykalová, and D. Budínský, *ELUC - Elektronické učebnice*, in *Přístrojové měření*. 2015, MŠMT.
51. Novotný, R., *Problematika 3D měření*, in *Fakulta technologická*. 2017, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně: Zlín. p. 68.
52. Petřkovská, L., *Přednáška 13 - souřadnicové měřicí stroje*. Technické měření a metrologie - teoretický základ. 2013, Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
53. Carl Zeiss Industrial Metrology, L. *Zeiss Calypso*. Universal software for dimensional metrology applications 2022 [cited 2022 25. 11.]; Available from: <https://www.zeiss.com/metrology/products/software/calypso-overview/calypso.html>.
54. Zeeko LTD. *Zeeko LTD official website*. 2022 [cited 2022 27. 6.]; Available from: <https://www.zeeko.co.uk/home>.
55. Renishaw plc. *RMP600 high-accuracy machine probe*. 2022 [cited 2022 10.11.]; Available from: <https://www.renishaw.com/en/rmp600-high-accuracy-machine-probe--8880>.

56. LPM s.r.o. *Plasty-Lexikon*. Delrin 2022 [cited 2023 5. 1.]; Available from: <https://www.lpm.cz/cs/delrin>.
57. Stanke, L., *Metodika broušení optických elementů na CNC strojích Zeeko IRP-800G*, in *Přírodovědecká fakulta*. 2014, Univerzita Palackého v Olomouci: Olomouc. p. 75.
58. Lewis, A., *Uncertainty budget for the NPL-UCL swing arm profilometer operating in comparator mode*. 2008, National Physical Laboratory: Teddington, Middlesex, UK.
59. Zeeko Ltd., *Zeeko Swing-Arm Profilometer Controller guide*, in *Document Revision 100204a*. 2015, Zeeko.
60. Zeeko LTD, *SAP Operational and Maintenance Manual*, in *First issue: 190514SM*. 2014, Zeeko LTD.
61. Vodička, P., *Systém pro kontrolu rozměrů transportního nosiče*, in *Fakulta strojního inženýrství*. 2015, Vysoké učení technické v Brně.: Brno. p. 38.
62. Linhart, J., *Přípravek pro výuku měření mechanické polohy*, in *Fakulta elektrotechnologická*. 2019, Západočeská univerzita v Plzni: Plzeň. p. 67.
63. Keyence Corporation. *Principle and types of contact positioning sensors*. 2022 [cited 2022 11. 12.]; Available from: <https://www.keyence.eu/ss/products/sensor/sensorbasics/contact/principles/>.
64. Micro-Epsilon. *InterferoMETER IMS5400-DS*. 2022 [cited 2022 16. 12.]; Available from: <https://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/interferometer/IMS5400-DS/>.
65. Micro-Epsilon. *ConfocalDT, Konfokální snímače vzdálenosti, polohy a tloušťky pro transparentní materiály*. 2022 [cited 2022 16. 12.]; Available from: <https://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/confocal-sensor/>.
66. Marposz Stil. *Non-contact distance measurement*. 2022 [cited 2022 10. 12.]; Available from: <https://www.stil-sensors.com/eng/application/non-contact-distance-measurement>.
67. AMETEK Inc., *Solartron Metrology*, in *Linear Encoders with TTL output, user manual*. 2022, Ametek.
68. Keyence Corporation. *Sensor Head: High Accuracy, Small spot, LK-G32*. High-speed, High-accuracy CCD Laser Displacement Sensor LK-G3000 series 2022 [cited 2022 28. 6.]; Available from: https://www.keyence.eu/products/measure/laser-1d/lk-g3000/models/lk-g32/?search_sl=1.
69. Lumphos GmbH, *LuphoSmart sensor system*, in *Operating instructions* 2014, Lumphos: Mainz-Germany.
70. AMETEK.Inc. Taylor Hobson Metrology, *Non-contact Surface Metrology-Introduction to LUPHOScan Ranges* in *taylor-hobson.com/resource-center*. 2022, Ametek/Taylor Hobson: Leicester, UK.
71. Laser shop. *Laserový modul s optikou vykreslující kříž - Červený, 4~6mW 9mm 3V*. 2022 [cited 2022 14. 8.]; Available from: <https://laser-shop.cz/laserove-moduly/104-laserovy-modul-cerveny-4-6mw-9mm-3v-s-optikou-vykreslujici-kriz.html>.
72. Murray, G. *Rotation About an Arbitrary Axis in 3 Dimensions*. Glenn Murray's Home Page 2013 15. 10. 2021 [cited 2022 22. 12.]; Available from: <https://sites.google.com/site/glennmurray/glenn-murray-ph-d/rotation-matrices-and-formulas/rotation-about-an-arbitrary-axis-in-3-dimensions?pli=1>.

73. Jing, H., C. King, and D. Walker. *Alignment and arm length measurement of the swing arm profilometer using a laser tracker*. in *5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies*. 2010. Dalian, China: SPIE.
74. Dr. Johannes Heidenhain GmbH, *ERP 880 Mounting Instructions*. 2015, Heidenhain: Traunreut, Germany. p. 42.
75. Dr. Johannes Heidenhain GmbH, *Modular Angle Encoders With Optical Scanning*, Heidenhain, Editor. 2017: Traunreut, Germany.
76. Steinmeyer Mechatronik GmbH. *PMT160-DC Linear Stages*. 2022 [cited 2022 18. 12.]; Available from: <https://www.steinmeyer-mechatronik.de/en/positioning-systems/standardaxes/linear-stages/pmt160-dc/>.
77. de Groot, P.J., *A review of selected topics in interferometric optical metrology*. *Reports on Progress in Physics*, 2019. **82**(5): p. 056101.
78. Zygo Corporation. *How to Use Grazing Incidence Interferometry to Measure Large Surfaces*. 2020 [cited 2022 28. 6.]; Available from: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=19061>.

8. Seznam použitých zkratek

A-FJP	Active Fluid Jet Polishing (aktivní leštění proudem leštiva)
a, b, c	vektory v matematickém modelu SAP
AFM	Atomic Force Microscopy (mikroskopie atomárních sil)
ASI	Aspheric Stitching Interferometr (asférický stitching interferometr výrobce QED)
C	křivost povrchu v asf. rovnici
c	fázová rychlost šíření světla
C, C_v	střed virtuální koule
CCD	Charge-Coupled Device (záznamový čip)
CGH	Computer Generated Hologram (počítačem generovaná holohrafičká mřížka pro účely interferometrické reference)
CMM	Coordinate Measuring Machine (souřadnicový měřicí přístroj)
CNC	Computer Numerical Control
CTA - MST	Cherenkov Telescope Array - Middle Size Telescope
d	dráhový rozdíl vlnění
ΔV	vzdálenost mezi základní a výslednou polohou svazku na svislém pravítku
ΔY	posuv ve směru osy y
FD	Fluorescent Detector (fluorescenční detektor)
H	svislá vzdálenost mezi osou čepu náklonu ramene a koncovým bodem sondy
HeNe	Helium - neonový (laser)
IBF	Ion Beam Figuring (tvarování iontovým svazkem)
IRR	Irregularity (nepravidelnost)
k	parametr modifikující základní tvar asf. povrchu
K, K_0	vodorovná vzdálenost mezi osou čepu sklonu hlavního ložiska a svislým pravítkem, základní vzdálenost K
l	základní délka
L	vodorovná vzdálenost od osy koncového bodu sondy k ose čepu náklonu měř. ramene
$L1 - L4$	vzdálenosti mezi klíčovými body a osami SAP
l_n	vyhodnocovaná délka
MPE_E	Maximum Permissible Error (maximální povolená odchylka stroje)
MPE_P	Maximum Permissible Error (maximální povolená odchylka snímání)
MRF	MagnetoRheological Fluid (magnetoreologická lešticí kapalina)

MWLI	MultiWaveLength Interferometry (multivlnná interferometrie)
O, P, Q, R, S	význačné body matematického modelu SAP
$p1 - p6$	osy v matematickém modelu SAP
PAD	Probe to Axis Distance (vzdálenost sondy od osy)
PAO	Pierre Auger Observatory (Observatoř Pierra Augera)
PCT	Patent Cooperation Treaty (dohoda o patentové spolupráci)
PSD	Power Spectrum Density (Spektrální hustota výkonu)
P_t	Peak-to-Valley (výškový rozdíl nejvyšší pík - nejhlubší údolí na 2D profilu v sw. Talymap)
PV	Peak-to-Valley (výškový rozdíl nejvyšší pík - nejhlubší údolí v sw. Metropro)
PWR	power (sférická odchylka)
QPSI	Quick Phase-Shifting Interferometry
R	reflektance (odrazivost)
R	vzdálenost vrcholu asf. plochy od středu křivosti
r	radiální vzdálenost od osy asf. povrchu
R_v	rádus virtuální koule
$R_{a,q}$	drsnost vypočtená z profilu (aritmetická, kvadratická)
R_{ef}	efektivní délka měřicího ramene SAP
$RMS_{t,i,a}$	Root Mean Square (střední kvadratická odchylka celková, irregulární, asymetrická)
RPM	Rotation Per Minute (počet otáček za minutu)
RSI	Rotationally Symmetric Irregularity (rotačně symetrická nepravidelnost)
$S_{a,q}$	drsnost vypočtená z plochy (aritmetická, kvadratická)
SAG	Sagitta (vrchlík)
SAP	Swing Arm Profilometr
SEM	Scanning Electron Microscopy (skenovací elektronová mikroskopie)
SLO	Společná Laboratoř Optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu Akademie věd České Republiky, (anglický překlad JLO)
SPDT	Single Point Diamod Turning (jednobodové soustružení diamantovým hrotem)
SPM	Scanning Probe Microscopy (mikroskopie skenující sondou)
S_z	výškový rozdíl nejvyšší pík - nejhlubší údolí na 3D mapě v sw. Talymap
TWE	Transmitted Wavefront Error (deformace prošlé vlnoplochy)
V	výsledná poloha laserového svazku na svislém pravítku
V_0	základní poloha laserového svazku na svislém pravítku
$W_{a,q}$	vlnitost (aritmetická, kvadratická)
WLI	White Light Interferometry (interferometrie v bílém světla)

WPT	Wheel Polishing Tool (leštění pomocí kolečka)
$X_{a,q}$	úchylka povrchu (aritmetická, kvadratická)
x, y, z	osy souřadného systému
Y	výsledná poloha laserového svazku na vodorovném pravítku
Y_0	základní poloha laserového svazku na vodorovném pravítku
Z	výška povrchu v asf. rovnici
$Z(x)$	hodnota výšky posuzovaného povrchu
α	úhel mezi plochami skleněného klínu
ΔL	koherenční délka
Δt	koherenční čas
ΔV	koherenční objem
Δx^2	koherenční plocha
ΔZ	hodnota svislého posuvu měřicí sondy
$\Delta \lambda$	šířka spektra
$\Delta \varphi$	fázový posun vlnění
θ	úhel sklonu osy hl. ložiska od vertikály
λ	střední vlnová délka světla
Λ	syntetická vln. délka
$\lambda_{1,2}$	dílčí vln. délky
$\varphi_1 - \varphi_3$	rotační pohyby okolo os $p1 - p6$

9. Přílohy

Příloha 1: Skript v prostředí Matlab pro vyčítání signálu ze sond LuphoScan

```
%%Testovací rutina pro zapis z Lophose na Arduino micro vyuziti
obou kanalu
% Vyuzito Simple demo file LupoSmart-DLL
% poupravena verze pro dva kanaly-snimace a jedno arduino ve
velmi jednoduchem usporadani
% doplneny nekteere nastaveni ohledne grafiky
% 30.5.2018 Mk

% zakladni nastaveni
koef_0 = 80; % koeficient kterym se prenasobi hodnota sejmuta
z Lophose pred zapiseem na port
koef_1 = 80;
koef_2 = 80;
koef_3 = 80;
% nastaveni vzorkovaci frekvence vysledna bude o neco nizsi nez
zadana
VzorkovaciFrekvence = 50; % pokud je frekvence vice než 10 Hz
musi byt vypnut vypis_ComWin = no
vypis_ComWin = 'no'; %Ano = vypisovat, rozhodnuti jestli vypisuje
do Comand Window = zdrzuje

%Arduino
name_ArduinoPort = 'COM4'; % kde se nachazi arduino

%Luphos
LibName = 'LupoSDK'; % jmeno knihovny
FileName =
'C:\LupoSmart\Software\LupoSmart_1.2.6\LupoSDK\Examples\Examp
le64\LupoSDK. h'; % cesta kde je knihovna
programFolder =
'C:\LupoSmart\Software\LupoSmart_1.2.6\Program64'; % kde se
nachazi exe?

deviceIndex = 0; %cislo zarizeni pro nas 0

%% Load Library

if ~libisloaded(LibName) [notfound , warnings] =
    loadlibrary(LibName,FileName); pause(2);
    if ~libisloaded(LibName)
        error(['Could not load library ', LibName])
    end
end

%% Start LupoSmart.exe

%{
RemoteRunLupoSmart starts LupoSmart.exe.
```

```

the folder that contains LuphoSmart.exe must be given in
'programFolder' return value is 1 (success), 0 (already running)
or -1 (error)
%}

[RemoteRunLuphoSmart,RemoteRunLuphoSmartFolder]=calllib(LibName,'RemoteRunLuphoSmart', deviceIndex , programFolder);

%% get LuphoSmart configuration

%{
RemotePeekConfig writes number of probes, analog inputs, surface
modes and maximum buffer size to its arguments.
return value is 0 (success) or -3 (LuphoSmart software not
enabled)
%}
noProbes = libpointer('int32Ptr', zeros(1, 'int32'));
noModes = libpointer('int32Ptr', zeros(1, 'int32'));
noInputs = libpointer('int32Ptr', zeros(1, 'int32'));
bufferSize = libpointer('int32Ptr', zeros(1, 'int32'));

[RemotePeekConfig]=calllib(LibName, 'RemotePeekConfig',
deviceIndex , noProbes , noModes, noInputs, bufferSize);

fprintf('LuphoSmart running with %d probes\n%d surface modes
available\n%d analog inputs available\n\n', noProbes.value,
noModes.value, noInputs.value);

% Create Pointer to data arrays
dist = libpointer('voidPtr', zeros(bufferSize.value,
noProbes.value, noModes.value, 2, 'double'));
signal = libpointer('voidPtr', zeros(bufferSize.value,
noProbes.value, 2, 'double'));
analog = libpointer('voidPtr', zeros(bufferSize.value,
noInputs.value, 2, 'double'));
time = libpointer('voidPtr', zeros(bufferSize.value,1,
'double'));
trigger = libpointer('int32Ptr', zeros(bufferSize.value,
noInputs.value, 'int32'));

%% switch reference state

%{
RemoteReference activates (on != 0) or deactivates (on = 0) the
reference mode return value is 1 (activation), 0 (deactivation)
or -1 (error)
%}

% activate reference mode
ReferenceState=1;

[RemoteReference] = calllib(LibName, 'RemoteReference',
deviceIndex , ReferenceState); pause(0.5);
%% Set surface mode rough on last probe

```



```

% nastaveni jednotlivych kanalu

%{
RemoteSurface sets the surface mode to surf = 0(smooth),
1(coarse), 2(rough), 3(aslope), 4(signal)
of the probe sensor = 0... < number of sensors on device set
sensor = number of sensors to adress all sensors
return value is 0, 1, 2 or 3 corresponding to set surface mode
or -1 (error)
%}

% set surface mode for 1 sensor
calllib(LibName, 'RemoteSurface', deviceIndex , 0 , 0);
pause(0.5);

% set surface mode for 2 sensor
calllib(LibName, 'RemoteSurface', deviceIndex , 1 , 0);
pause(0.5);

% set surface mode for 3 sensor
calllib(LibName, 'RemoteSurface', deviceIndex , 2 , 4);
pause(0.5);

% set surface mode for 4 sensor
calllib(LibName, 'RemoteSurface', deviceIndex , 3 , 4);
pause(0.5);

%% Set Filter Length

%{
RemoteFilter sets the devices filter length to 'FilterLength'
seconds and writes the set value to 'Filter_DoublePtr'
return value is 0 (success) or -1 (error)
%}

FilterLength=0.01;% Set Filterlength to 0.1s
Filter_DoublePtr=libpointer('doublePtr',zeros(1,1));

[RemoteFilter] = calllib(LibName, 'RemoteFilter', deviceIndex ,
FilterLength , Filter_DoublePtr);

%% Start measurement

%{
RemoteStart starts measurement
return value is 1 (success) or -1 (error)
%}

[RemoteStart] = calllib(LibName, 'RemoteStart', deviceIndex);
pause(0.5);

```

```

%% otevrit port pro zapis
serialComPort = serial(name_ArduinoPort,'BaudRate',9600);
fopen(serialComPort);

%% Pripravim okno ktere bude signalizovat prenos
fig_m = figure( 'Name','Okno pro ukonceni',...
                'MenuBar','none',...
                'Position',[100 150 250 150],...
                'Visible','off');
btn = uicontrol('Style','pushbutton','String',
               'Ukoncit', ...
               'Position',[50 25 150 50],...
               'Callback','delete(gcbo)');
str = uicontrol('Style','text',...
               'Position',[50 75 150 50],...
               'String','Pro ukonceni prenosu stiskni
               tlacitko "Ukoncit");
fig_m.Visible = 'on'; % zvidilenim ... proc az ted?

%nastaveni pouzitych poli
PeekDistance=libpointer('doublePtr',zeros(1,1));
PeekSignal=libpointer('doublePtr',zeros(1,1));
PeekSamples=libpointer('int32Ptr',zeros(1,1));

i = 0;
while ishandle(btn) %vlastni ciklus ktery kotroluje jestli
    nedoslo ke      zmene tlacitka
    pause(1/VzorkovaciFrekvence); % nastaveni vzorkovaci frekvence
    vysledna bude o neco nizsi nez zadana
    i = i+1;
    if strcmpi(vypis_ComWin,'Ano')
        disp('');
        disp(['Measurment no.:', int2str(i)]);
    end

    % probe A = odpovida hodnote na senzoru 0
    Sensor = 0;
    [RemotePeekDistance] =
    calllib(LibName, 'RemotePeekDistance', deviceIndex,
    PeekDistance, Sensor);
    A_value = koef_0 * PeekDistance.Value;% zname meritka
    str2port = ['A', int2str(A_value)]; % priprava retezce pro
    port fprintf(serialComPort,str2port);% zapis na port
    statusComPort = fscanf(serialComPort);% kontrola zda zapis
    probehl korektne

    if strcmpi(cellstr(statusComPort), 'ok')
        if strcmpi(vypis_ComWin,'Ano')
            %vypisuje hodnoty z jednotlivych mereni
            fprintf('Measurment no.: %dA \n\n',i);
            fprintf('PeekDistance: % 3.3f µm
            \n',PeekDistance.Value);
            fprintf(['Zapsana hodnota', str2port , '\nOdpoved
            na zapis ',statusComPort],'\n');

```

```

        [RemotePeekSignal] =
        calllib(LibName, 'RemotePeekSignal', deviceIndex,
        PeekSignal, Sensor);
        fprintf('PeekSignal:   % 3.3f mV
        \n', PeekSignal.Value);
        [RemotePeekSamples] =
        calllib(LibName, 'RemotePeekSamples',
        deviceIndex, PeekSamples);
        fprintf('PeekSample: % 10.0f
        \n', PeekSamples.Value);
        fprintf('##### \n\n');
    end
else
    fprintf('##### \n');
    fprintf('## ZAPIS NA PORT SELHAL. ##\n');
    fprintf('## Mereni c.: %d   A   ##\n', i);
    fprintf('##### \n\n');
end

% probe B = odpovida hodnote na senzoru 1
Sensor = 1;
[RemotePeekDistance] = calllib(LibName, 'RemotePeekDistance',
deviceIndex, PeekDistance, Sensor);
B_value = koef_1 * PeekDistance.Value; % zname meritka
str2port = ['B', int2str(B_value)]; % priprava retezce pro port
fprintf(serialComPort, str2port); % zapis na port
statusComPort = fscanf(serialComPort); % kontrola zda zapis
probekl korektne

if strcmpi(cellstr(statusComPort), 'ok')
    if strcmpi(vypis_ComWin, 'Ano')
        %vypisuje hodnoty z jednotlivych mereni
        fprintf('Measurment no.: %dB \n\n', i);
        fprintf('PeekDistance: % 3.3f µm
        \n', PeekDistance.Value);
        fprintf(['Zapsana hodnota   ', str2port , '\nOdpoved
        na zapis ', statusComPort], '\n');
        [RemotePeekSignal] =
        calllib(LibName, 'RemotePeekSignal', deviceIndex,
        PeekSignal, Sensor);
        fprintf('PeekSignal:   % 3.3f mV \n', PeekSignal.Value);
        [RemotePeekSamples] =
        calllib(LibName, 'RemotePeekSamples',
deviceIndex,
        PeekSamples);
        fprintf('PeekSample: % 10.0f \n', PeekSamples.Value);
        fprintf('##### \n\n');
    end
else
    fprintf('##### \n');
    fprintf('## ZAPIS NA PORT SELHAL. ##\n');
    fprintf('## Mereni c.: %d   B   ##\n', i);
    printf('##### \n\n');
end
end

```

```

fclose(serialComPort); %uklidit znamena korektne uzavrit port

%% Stop the measurement

if calllib(LibName, 'RemoteStop', deviceIndex) == 0 %return value
    is 0 (success) or -1 (error)
    disp('Ukonceni mereni probehlo korektne.');
```

end

```

pause(0.5);

%% Close LuphoSmart.exe

if calllib(LibName, 'RemoteTerminateLuphoSmart', deviceIndex) ==
    1 %return value is 1 (success) or -1 (error)
    disp('Zavreni aplikace LuphoSmart probehlo korektne.');
```

end

```

pause(0.5);

%% Unload the library

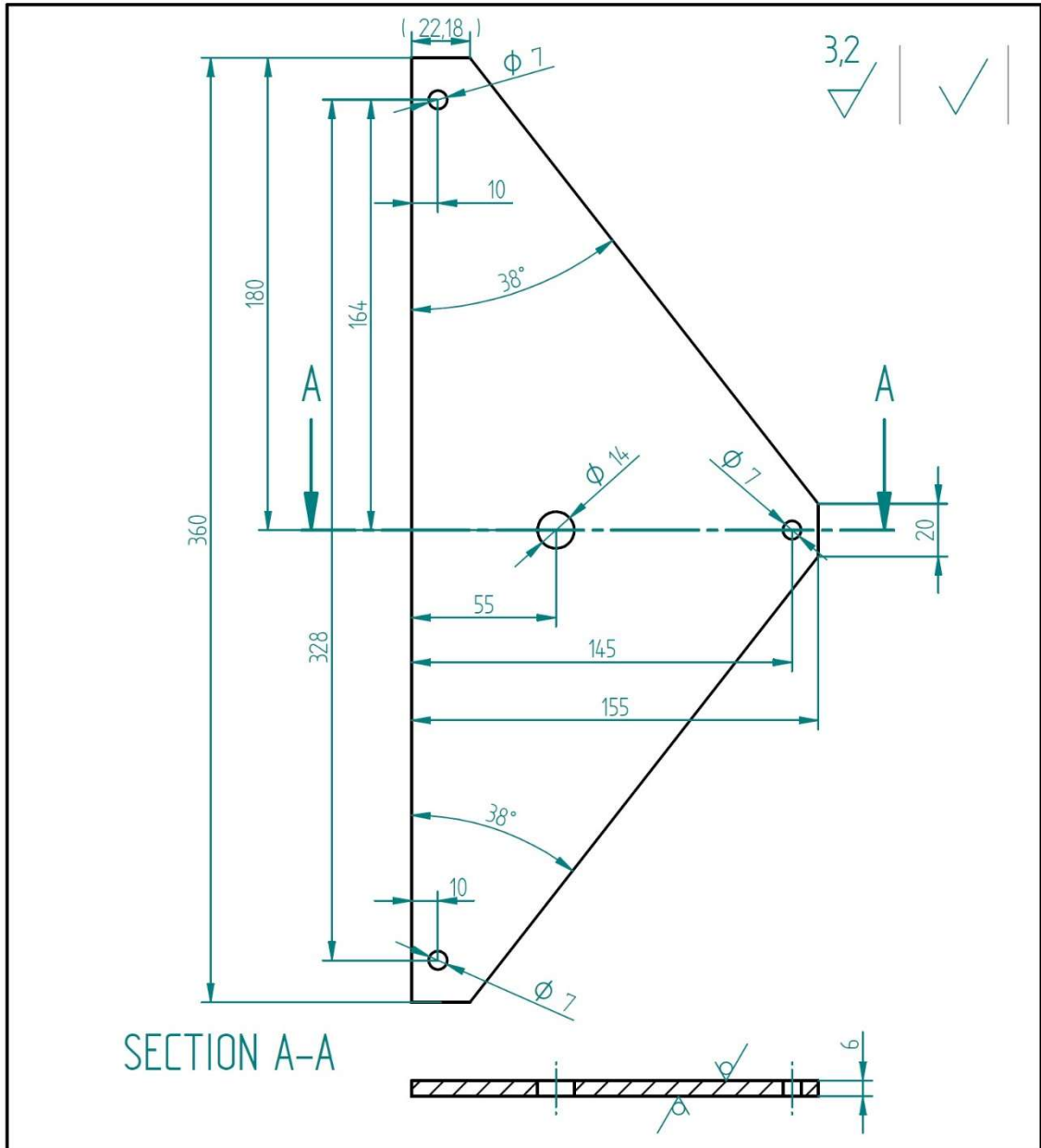
unloadlibrary LuphoSDK
disp('Knihovna LuphoSDK byla uvolnena z pameti.');
```

disp('Program skoncil korektne.');

```

close; %zavreni vsech otevrenych oken po ukonceni mereni
```

Příloha 2: Technický výkres podpůrné desky nového uložení velkoplošných dílů



1	TL.6-155 x 360		DURAL						1
POČET KUSŮ	NAZEV - ROZMER	POLOTOVAR	MAT.KONEČNÝ	MAT.VÝCHOZÍ	TRÍDA ODPADU	C VÁHA	POVRCH	ČÍSLO SESTAVY	POZ.
POZNAMKA				SOUBOR SES					
MERITKO	KRESLIL			ZMENA		DATUM		PODPIS	INDEX
1 : 2	PREZKOUSEL								
	NORM.REF.								
	SCHVALIL								
	DNE	14.4.2022							
SLO UP FZÚ AVČR OLOMOUC	TYP	SKUPINA	SOUBOR DET.						
	NÁZEV	DESKA	ČÍSLO VÝKRESU						
			LISTU						
			LIST						

Příloha 3: Skript v prostředí Matlab pro výpočty pohybů klíčových součástí zařízení SAP

```
%Mechanicka soustava s vazanymi osami rotace - analyza pomoci
%symbolickeho vypoctu

clear all
close all
syms m1 m2 m3 f f1 f2 f3 f4 t1 t2 t3 t4 t5 t6 L1 L2 L3 L4 H c s konst
real
%L_j jsou velikosti ramen, vsechny kladne az na L_3, ktere je kladne pro
%leve rameno a zaporne pro prave rameno

L4=H-L2;
%f2=0;
moje=0;% 1 moje nastaveni souradnic, 0 firemni nastaveni souradnic

%definice matice rotace kolem jednotkove osy m (prochazejici pocatkem)
o uhel f
m=[m1 m2 m3]; %souradnice osy rotace
c=cos(f);
s=sin(f);
Rot=[c+m1*m1*(1-c) m1*m2*(1-c)-m3*s m1*m3*(1-c)+m2*s
      m1*m2*(1-c)+m3*s c+m2*m2*(1-c) m2*m3*(1-c)-m1*s
      m1*m3*(1-c)-m2*s m2*m3*(1-c)+m1*s c+m3*m3*(1-c)];
if moje==1
%moje vychozi nastaveni osy
n1=[0 1 0];
n2=[0 0 1];
n4=[1 0 0];
else
%firemni vychozi nastaveni os
n1=[1 0 0];
n2=[0 0 1];
n4=[0 -1 0];
end

n3=n1;
n5=n2;
n6=n2;
O=[0 0 0];%pocatek kartezskech souradnic
p1=O+t1*n1;
p2=O+t2*n2;
P=subs(p2,t2,-L1);
p3=P+t3*n3;
p6=P+t6*n6;
Q=subs(p6,t6,-L2);
p4=Q+t4*n4;
R=subs(p4,t4,L3);
p5=R+t5*n5;
S=subs(p5,t5,-L4);% poloha hrotu sondy

%otoceni o f1 kolem n1
R1=simplify(subs(Rot,[m1 m2 m3 f],[n1(1) n1(2) n1(3) f1]));
n1b=n1; % tato osa se nemeni pri rotaci kolem n1 (sebe)
%n1b=simplify((R1*n1'))';%dava n1
n2b=simplify((R1*n2'))';
```

```

n3b=simplify((R1*n3'))';
n4b=simplify((R1*n4'))';
n5b=simplify((R1*n5'))';
n6b=simplify((R1*n6'))';
Ob=simplify((R1*O'))';
Pb=simplify((R1*P'))';
Qb=simplify((R1*Q'))';
Rb=simplify((R1*R'))';
Sb=simplify((R1*S'))';
p1b=simplify((R1*p1'))';
p2b=simplify((R1*p2'))';
p3b=simplify((R1*p3'))';
p4b=simplify((R1*p4'))';
p5b=simplify((R1*p5'))';
p6b=simplify((R1*p6'))';

%otoceni o f2 kolem n2b (p2b prochazi pocatkem)
R2=simplify(subs(Rot,[m1 m2 m3 f],[n2b(1) n2b(2) n2b(3) f2]));
n1bb=n1b; % tato osa se nemeni, nevim jiz proc?
%n1bb=simplify((R2*n1b'))';
n2bb=simplify((R2*n2b'))';
n3bb=simplify((R2*n3b'))';
n4bb=simplify((R2*n4b'))';
n5bb=simplify((R2*n5b'))';
n6bb=simplify((R2*n6b'))';
Obb=simplify((R2*Ob'))';
Pbb=simplify((R2*Pb'))';
Qbb=simplify((R2*Qb'))';
Rbb=simplify((R2*Rb'))';
Sbb=simplify((R2*Sb'))';
p1bb=simplify((R2*p1b'))';
p2bb=simplify((R2*p2b'))';
p3bb=simplify((R2*p3b'))';
p4bb=simplify((R2*p4b'))';
p5bb=simplify((R2*p5b'))';
p6bb=simplify((R2*p6b'))';

%otoceni jen n4, n5, n6, p4, p5, p6, Q, R, S o f3 kolem primky p3bb se
smernici n3bb - s posouvanim o Pbb
R3=simplify(subs(Rot,[m1 m2 m3 f],[n3bb(1) n3bb(2) n3bb(3) f3]));
n1bbb=n1bb;
n2bbb=n2bb;
n3bbb=n3bb;
Obbb=Obb;
Pbbb=Pbb;
p1bbb=p1bb;
p2bbb=p2bb;
p3bbb=p3bb;

n4bbb=simplify((R3*n4bb'))'; % jednotkove smery, ty se neposouvaji
n5bbb=simplify((R3*n5bb'))';
n6bbb=simplify((R3*n6bb'))';

Qbbb=simplify((R3*(Qbb-Pbb))'+Pbb);
Rbbb=simplify((R3*(Rbb-Pbb))'+Pbb);
Sbbb=simplify((R3*(Sbb-Pbb))'+Pbb);

p4bbb=simplify((R3*(p4bb-Pbb))'+Pbb);
p5bbb=simplify((R3*(p5bb-Pbb))'+Pbb);

```

```

p6bbb=simplify((R3*(p6bb-Pbb)')'+Pbb);

%otoceni o f4 kolem n2bbb = n2bb = n2b
R4=simplify(subs(Rot,[m1 m2 m3 f],[n2bbb(1) n2bbb(2) n2bbb(3) f4]));
n1bbbb=n1bbb;
n2bbbb=simplify((R4*n2bbb)');
n3bbbb=simplify((R4*n3bbb)');
n4bbbb=simplify((R4*n4bbb)');
n5bbbb=simplify((R4*n5bbb)');
n6bbbb=simplify((R4*n6bbb)');
Obbbb=simplify((R4*Obbb)');
Pbbbb=simplify((R4*Pbbb)');
Qbbbb=simplify((R4*Qbbb)');
Rbbbb=simplify((R4*Rbbb)');
Sbbbb=simplify((R4*Sbbb)');
p1bbbb=simplify((R4*p1bbb)');
p2bbbb=simplify((R4*p2bbb)');
p3bbbb=simplify((R4*p3bbb)');
p4bbbb=simplify((R4*p4bbb)');
p5bbbb=simplify((R4*p5bbb)');
p6bbbb=simplify((R4*p6bbb)');

%vzdalenost Sbbbb od spojnice o s Pbbbb
n=(Obbbb-Pbbbb)/norm(Obbbb-Pbbbb);
pom=simplify(Obbbb+((Sbbbb-Obbbb)*n')*n);
roSodOP1=simplify(sqrt((Sbbbb(1)-pom(1))^2+(Sbbbb(2)-
pom(2))^2+(Sbbbb(3)-pom(3))^2));
roSodOP2=abs(L3*cos(f3)-H*sin(f3));
R_eff=roSodOP2;%tj. L3*cos(f3)-H*sin(f3)

S0=Sbbbb;Sd=diff(S0,f4);Sdd=diff(Sd,f4);
aS=-subs(Sd,f4,pi/2);
bS= subs(Sd,f4,0);
cS=S0+Sdd;
aS=expand(aS);
bS=expand(bS);
cS=expand(cS);
kontrola1=simplify(S0-(aS*cos(f4)+bS*sin(f4)+cS)); %dava nulovy vektor
kontrola2=simplify(aS*bS'); %overeni kolmosti
kontrola3=simplify(norm(aS)-norm(bS)); %stejnost norem
kontrola4=simplify(norm(aS)-R_eff); %overeni, ze polomer kruznice je
R_eff
pom=simplify(bS(3)/aS(3));% ma byt -sin(f2)/cos(f2)=tan(f2)
f4min=-f2; %zde nastane min Sbbbb(3)
%f4min=-f2+pi; % zde nastane maximum Sbbbb(3)- nebo naopak
Sbbbb_min=expand(subs(Sbbbb,f4,-f2)); %poloha extremu (minima pro leve
rameno nebo maxima pro prave rameno v zavislosti na f4)

% poloha stredu koule a její polomer
if moje==1
B1=subs(p5bbbb,t5,-15000);
B2=subs(p5bbbb,t5,15000);
r1=subs(p5bbbb,f4,-25*180/pi);a1=subs(r1,t5,0);b1=diff(r1,t5);
r2=subs(p5bbbb,f4,25*pi/180);a2=subs(r2,t5,0);b2=diff(r2,t5);
mat=[b1(1) -b2(1)
      b1(3) -b2(3)];
prava_strana=[a2(1)-a1(1) a2(3)-a1(3)]';
t=inv(mat)*prava_strana;

```



```

%stred_R=simplify(a1+t(1)*b1); % poloha stredu koule z analyticke
geometrie
stred_R=-(L1+L3/sin(f3))*[sin(f1),0,cos(f1)];% spravny zjednoduseny
vysledek pro moji volbu souradnic
%Rs0=norm(stred_R-Sbbbb); % polomer koule (nezavisi na f4)
%Rs0=expand(Rs0);Rs0=simplify(Rs0);
Rs=abs(L3/tan(f3)-H); % spravny vyraz, dava stejny vysledek
jako Rs0
%Pozn. tan(f3)=L3/(H+Rs), kdyz H-L3/tan(f3)<0 nebo tan(f3)=L3/(H-Rs),
kdyz H-L3/tan(f3)>0
else
B1=subs(p5bbbb,t5,-15000);
B2=subs(p5bbbb,t5,15000);
r1=subs(p5bbbb,f4,-25*180/pi);a1=subs(r1,t5,0);b1=diff(r1,t5);
r2=subs(p5bbbb,f4,25*pi/180);a2=subs(r2,t5,0);b2=diff(r2,t5);
mat=[b1(2) -b2(2)
      b1(3) -b2(3)];
prava_strana=[a2(2)-a1(2) a2(3)-a1(3)]';
t=inv(mat)*prava_strana;
%stred_R=simplify(a1+t(1)*b1); % poloha stredu koule z analyticke
geometrie
stred_R=-(L1+L3/sin(f3))*[0,-sin(f1),cos(f1)];% spravny zjednoduseny
vysledek pro moji volbu souradnic
%Rs0=norm(stred_R-Sbbbb); % polomer koule (nezavisi na f4)
%Rs0=expand(Rs0);Rs0=simplify(Rs0);
Rs=abs(L3/tan(f3)-H); % spravny vyraz, dava stejny vysledek
jako Rs0
%Pozn. tan(f3)=L3/(H+Rs), kdyz H-L3/tan(f3)<0 nebo tan(f3)=L3/(H-Rs),
kdyz H-L3/tan(f3)>0
end

%uhel mezi primkou p5bbbb a osou z plus sikma vzdalenost hrotu sondy S
od
%roviny s normalou nn a parametrem d=-konst
Bp5=diff(p5bbbb,t5); % B smernice primky p5=Ap5+Bp5*t5, mela by byt
jednotkova
Ap5=subs(p5bbbb,t5,0); % A abs. clen p5=Ap5+Bp5*t5
nn=[0 0 1]; % osa, pro kterou se hleda uhel mezi ni a primkou
p5bbbb,tj. normala roviny definovane (nn,r)-konst=0
uh=nn*Bp5'/(norm(nn)*norm(Bp5));%cos uhlu mezi smernici primky p5bbbb
a osou nn
%uh=cos(f1)*cos(f3)-
cos(f2)*cos(f4)*sin(f1)*sin(f3)+sin(f1)*sin(f2)*sin(f3)*sin(f4);%pro
cos uhlu se dostane tento vysledek
%prusecik primky p5bbbb s rovinou (nn,r)-konst=0
Qp5=Ap5-Bp5*(-konst+nn*Ap5')/(nn*Bp5');%prusecik primky p5bbbb
s rovinou (nn,r)-konst=0
sikma=norm(Qp5-Sbbbb); % vzdalenost mezi sondou Sbbbb
a prusecikem primky p5bbbb s rovinou (nn,r)-konst=0 }sikma vzdalenost
mezi Sbbb a rovinou)
sikma_expand=expand(sikma);
sikma_simplify=simplify(sikma);
kolma=abs(-konst+nn*Sbbbb')/norm(nn);%kolma vzdalenost body Sbbbb od
roviny (nn,r)-konst=0

%pro kolmou vzdalenost dostavam analyticky vysledek
%kolma = abs(konst+L1*cos(f1)+H*cos(f1)*cos(f3)+L3*cos(f1)*sin(f3)-
L3*cos(f3)*sin(f1)*sin(f2)*sin(f4)+H*sin(f1)*sin(f2)*sin(f3)*sin(f4)+L
3*cos(f2)*cos(f3)*cos(f4)*sin(f1)-H*cos(f2)*cos(f4)*sin(f1)*sin(f3))

```

```

%pro sikmou vzdalenost dostavam analyticky vysledek
%sikma=(abs(konst+L1*cos(f1)+H*cos(f1)*cos(f3)+L3*cos(f1)*sin(f3)-
L3*cos(f3)*sin(f1)*sin(f2)*sin(f4)+H*sin(f1)*sin(f2)*sin(f3)*sin(f4)+L
3*cos(f2)*cos(f3)*cos(f4)*sin(f1)-
H*cos(f2)*cos(f4)*sin(f1)*sin(f3))*sign(cos(f1)*cos(f3)-
cos(f2)*cos(f4)*sin(f1)*sin(f3)+sin(f1)*sin(f2)*sin(f3)*sin(f4)))/(cos
(f1)*cos(f3)-
cos(f2)*cos(f4)*sin(f1)*sin(f3)+sin(f1)*sin(f2)*sin(f3)*sin(f4));
%nebo
%sikma = kolma/abs(cos(f1)*cos(f3)-
cos(f2)*cos(f4)*sin(f1)*sin(f3)+sin(f1)*sin(f2)*sin(f3)*sin(f4));

%-----
fp1=-14.7*pi/180;
fp2=0;
fp3=-fp1;
fp4=0;
ro1=simplify(subs(roSodOP1,[f2 f3 f4],[fp2 -f1 0]));
ro2=simplify(subs(roSodOP2,[f2 f3 f4],[fp2 -f1 0]));

%pohyb hrotu v prostoru
s1=Sbbbb;
ders1=diff(s1,f4);
a1=-simplify(subs(ders1,f4,pi/2));
b1=simplify(subs(ders1,f4,0));
a10=simplify(a1/R_eff);
b10=simplify(b1/R_eff);
c1=simplify(s1-a1*cos(f4)-b1*sin(f4));

s2=simplify(subs(Sbbbb,f2,0));
ders2=diff(s2,f4);
a2=-simplify(subs(ders2,f4,pi/2));
b2=simplify(subs(ders2,f4,0));
a20=simplify(a2/R_eff);
b20=simplify(b2/R_eff);
c2=simplify(s2-a2*cos(f4)-b2*sin(f4));

s3=simplify(subs(Sbbbb,[f2 f3],[0 -f1]));
ders3=diff(s3,f4);
a3=-simplify(subs(ders3,f4,pi/2));
b3=simplify(subs(ders3,f4,0));
R_eff3=simplify(subs(R_eff,f3,-f1));
a30=simplify(a3/R_eff3);
b30=simplify(b3/R_eff3);
c3=simplify(s3-a3*cos(f4)-b3*sin(f4));

```

Příloha 4: Dohoda o patentové spolupráci – potvrzení přiřazení čísla a data mezinárodní patentové přihlášky (patentový zástupce Petr Soukup)

PATENT COOPERATION TREATY

From the RECEIVING OFFICE

To: SOUKUP, Petr tř. Svobody 43/39 779 00 Olomouc Czechia		PCT NOTIFICATION OF THE INTERNATIONAL APPLICATION NUMBER AND OF THE INTERNATIONAL FILING DATE (PCT Rule 20.2(c))	
Applicant's or agent's file reference		Date of mailing (day/month/year) 17 September 2021	
International application No. PCT/CZ2021/000045		International filing date (day/month/year) 16 September 2021	Priority date (day/month/year)
Applicant UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI			
Title of the invention SWING ARM PROFILOMETER AND METHOD OF MEASUREMENT WITH THIS PROFILOMETER			
1. The applicant is hereby notified that the international application has been accorded the international application number and the international filing date indicated above.			
2. The applicant is further notified that the record copy of the international application:			
<input checked="" type="checkbox"/> was transmitted to the International Bureau on 17 September 2021			
<input type="checkbox"/> has not yet been transmitted to the International Bureau for the reason indicated below and a copy of this notification has been sent to the International Bureau*:			
<input type="checkbox"/> because the necessary national security clearance has not yet been obtained.			
<input type="checkbox"/> because (reason to be specified):			
* The International Bureau monitors the transmittal of the record copy by the receiving Office and will notify the applicant (with Form PCT/IB/301) of its receipt. Should the record copy not have been received by the expiration of 14 months from the priority date, the International Bureau will notify the applicant (Rule 22.1(c)).			
Name and mailing address of the receiving Office Industrial Property Office of the Czech Republic Antonina Cermaka 2a 160 68 Praha 6 Czechia Telephone No. (420) 220 383 111 (standard), 220 383 459 (PCT Department) Facsimile No. +420224324718		Authorized officer Eva Krautova Telephone No.	

Form PCT/RO/105 (July 2008)

Příloha 5: Report o mezinárodní rešerši

PATENT COOPERATION TREATY		
PCT		
INTERNATIONAL SEARCH REPORT (PCT Article 18 and Rules 43 and 44)		
Applicant's or agent's file reference	FOR FURTHER ACTION see Form PCT/ISA/220 as well as, where applicable, item 5 below.	
International application No. PCT/CZ2021/000045	International filing date (<i>day/month/year</i>) 16 September 2021 (16.09.2021)	(Earliest) Priority Date (<i>day/month/year</i>)
Applicant Univerzita Palackého v Olomouci		
<p>This international search report has been prepared by this International Searching Authority and is transmitted to the applicant according to Article 18. A copy is being transmitted to the International Bureau.</p> <p>This international search report consists of a total of <u> 4 </u> sheets.</p> <p><input type="checkbox"/> It is also accompanied by a copy of each prior art document cited in this report.</p>		
<p>1. Basis of the report</p> <p>a. With regard to the language, the international search was carried out on the basis of:</p> <p style="padding-left: 40px;"><input checked="" type="checkbox"/> the international application in the language in which it was filed.</p> <p style="padding-left: 40px;"><input type="checkbox"/> a translation of the international application into _____ which is the language of a translation furnished for the purposes of international search (Rules 12.3(a) and 23.1(b)).</p> <p>b. <input type="checkbox"/> This international search report has been established taking into account the rectification of an obvious mistake authorized by or notified to this Authority under rule 91 (Rule 43.6bis(a)).</p> <p>c. <input type="checkbox"/> With regard to any nucleotide and/or amino acid sequence disclosed in the international application, see Box No. I.</p> <p>2. <input type="checkbox"/> Certain claims were found unsearchable (see Box No. II).</p> <p>3. <input type="checkbox"/> Unity of invention is lacking (see Box No. III).</p> <p>4. With regard to the title,</p> <p style="padding-left: 40px;"><input checked="" type="checkbox"/> the text is approved as submitted by the applicant.</p> <p style="padding-left: 40px;"><input type="checkbox"/> the text has been established by this Authority to read as follows:</p> <p>5. With regard to the abstract,</p> <p style="padding-left: 40px;"><input type="checkbox"/> the text is approved as submitted by the applicant.</p> <p style="padding-left: 40px;"><input checked="" type="checkbox"/> the text has been established, according to Rule 38.2, by this Authority as it appears in Box No. IV. The applicant may, within one month from the date of mailing of this international search report, submit comments to this Authority.</p> <p>6. With regard to the drawings,</p> <p>a. the figure of the drawings to be published with the abstract is Figure No. <u> 1 </u></p> <p style="padding-left: 40px;"><input checked="" type="checkbox"/> as suggested by the applicant.</p> <p style="padding-left: 40px;"><input type="checkbox"/> as selected by this Authority, because the applicant failed to suggest a figure.</p> <p style="padding-left: 40px;"><input type="checkbox"/> as selected by this Authority, because this figure better characterizes the invention.</p> <p>b. <input type="checkbox"/> none of the figures is to be published with the abstract.</p>		
Form PCT/ISA/210 (first sheet) (July 2019)		

Box No. IV **Text of the abstract (Continuation of item 5 of the first sheet)**

A profilometer with a swing arm (5) comprised of a base (1), on which a sample table (6) is mounted, where the arm (5) is mounted to swing horizontally on a supporting block (2) and one of its end sections overlaps the sample table (6), where at this end section of the arm (5), an object probe (61) is mounted sliding both along the longitudinal axis (Z1) of the arm (5) and also vertically, perpendicular to the longitudinal axis (Z1). Opposite the sample table (6) under the second end section of the arm (5) on the base (1) a standard table (7) is mounted and above it on the arm (5) a reference probe (71) is mounted sliding both along the longitudinal axis (Z1) of the arm (5) and also along the vertical axis (R2) perpendicular to the axis (Z1). The arm (5) is on the support block (2), mounted with its area positioned above the connecting line between the geometric centers of the sample table (6) and standard table (7), and the arm (5) is on the support block (2) mounted so as to swing vertically as well.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CZ2021/000045

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC: G 01 B 21/20, G 01 B 21/04

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC: G 01 B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Database IPO CZ

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPOQUE (EPODOC, PATENW)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2005235507 A1 (CORNING INCORPORATED) 27 October 2005 (27.10.2005) * whole document *	1 - 6
A	US 2008072442 A1 (HONGFUJIN PREC IND SHENZHEN; HON HAI PREC IND CO LTD; FINE TECH CORP) 27 March 2008 (27.03.2008) * whole document *	1 - 6

 Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"D" document cited by the applicant in the international application	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"&" document member of the same patent family
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search
20 May 2022 (20.05.2022)

Date of mailing of the international search report

Name and mailing address of the ISA/
VISEGRAD PATENT INSTITUTE
Branch Office CZ
Antonína Čermáka 2a, 160 68 Praha
Czech RepublicAuthorized officer
Ing. Jiří Kejval, Ph.D.

Facsimile No. +420 224 324 718

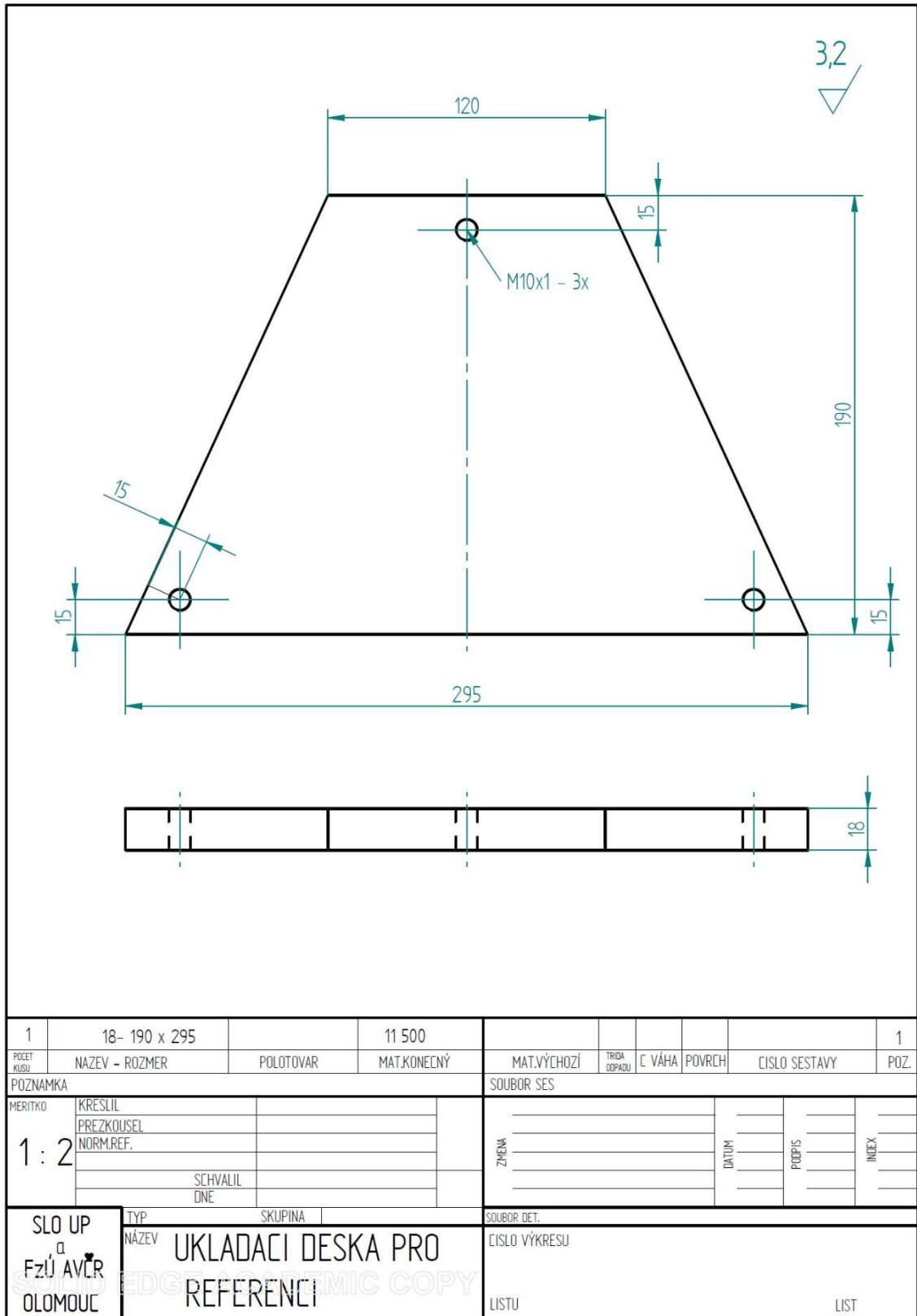
Telephone No. +420 220 383 178

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 2019)

Příloha 6: Písemné stanovisko mezinárodního pátracího orgánu – úvodní strana

PATENT COOPERATION TREATY		
From the INTERNATIONAL SEARCHING AUTHORITY		
To: SOUKUP, Petr tř. Svobody 43/39 779 00 Olomouc Czechia		<h1 style="margin: 0;">PCT</h1> <p style="margin: 0;">WRITTEN OPINION OF THE INTERNATIONAL SEARCHING AUTHORITY</p> <p style="margin: 0;">(PCT Rule 43bis.1)</p>
Applicant's or agent's file reference		Date of mailing (day/month/year)
		FOR FURTHER ACTION See paragraph 2 below
International application No. PCT/CZ2021/000045	International filing date (day/month/year) 16 September 2021 (16.09.2021)	Priority date (day/month/year)
International Patent Classification (IPC) or both national classification and IPC		
IPC: G 01 B 21/20, G 01 B 21/04		
Applicant Univerzita Palackého v Olomouci		
1. This opinion contains indications relating to the following items: <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Box No. I Basis of the opinion <input type="checkbox"/> Box No. II Priority <input type="checkbox"/> Box No. III Non-establishment of opinion with regard to novelty, inventive step and industrial applicability <input type="checkbox"/> Box No. IV Lack of unity of invention <input checked="" type="checkbox"/> Box No. V Reasoned statement under Rule 43bis.1(a)(i) with regard to novelty, inventive step and industrial applicability; citations and explanations supporting such statement <input type="checkbox"/> Box No. VI Certain documents cited <input checked="" type="checkbox"/> Box No. VII Certain defects in the international application <input checked="" type="checkbox"/> Box No. VIII Certain observations on the international application 		
2. FURTHER ACTION If a demand for international preliminary examination is made, this opinion will be considered to be a written opinion of the International Preliminary Examining Authority ("IPEA") except that this does not apply where the applicant chooses an Authority other than this one to be the IPEA and the chosen IPEA has notified the International Bureau under Rule 66.1bis(b) that written opinions of this International Searching Authority will not be so considered. If this opinion is, as provided above, considered to be a written opinion of the IPEA, the applicant is invited to submit to the IPEA a written reply together, where appropriate, with amendments, before the expiration of 3 months from the date of mailing of Form PCT/ISA/220 or before the expiration of 22 months from the priority date, whichever expires later. For further options, see Form PCT/ISA/220.		
Name and mailing address of the ISA/ VISEGRAD PATENT INSTITUTE Branch Office CZ Antonína Čermáka 2a, 160 68 Praha Czech Republic Facsimile No: +420 224 324 718	Date of completion of this opinion 20 May 2022 (20.05.2022)	Authorized officer Ing. Jiří Kejval, Ph.D. Telephone No. +420 220 383 178
Form PCT/ISA/237 (cover sheet) (revised January 2019)		

Příloha 7: Technický výkres desky pro uložení rovinné referenční desky pod referenční sondou



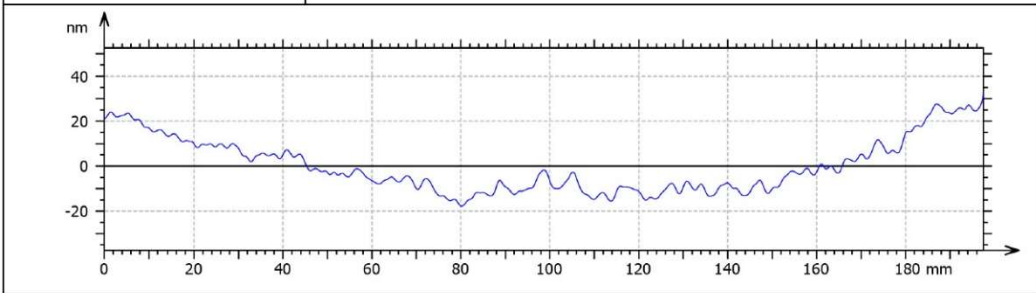
Příloha 8: Výsledky měření přímosti posuvové jednotky profilometru T-H PGI Optics v ose x po kalibraci z předávacího protokolu

Iss.6 SFH



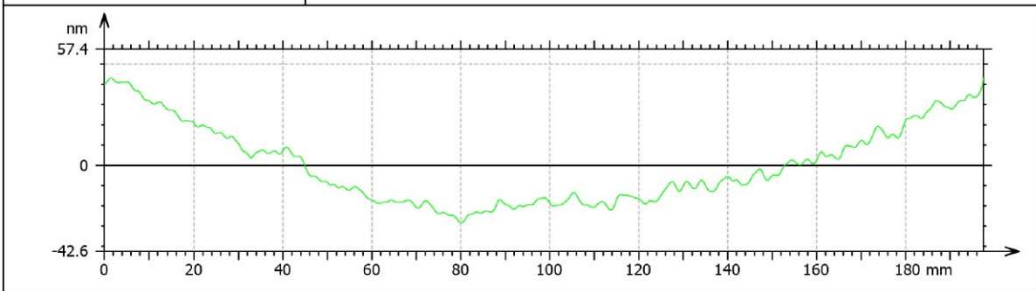
Corrected Straightness Tests - 200mm

Straightness Corrected Test 1



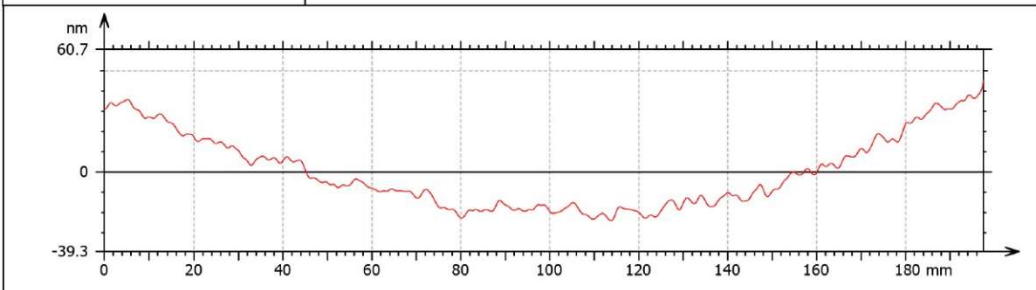
Parameters	Value	Unit	Tolerance
Pt - Amplitude parameters - Primary profile - ISO 4287	50.9	nm	< 110 nm ✓

Straightness Corrected Test 2



Parameters	Value	Unit	Tolerance
Pt - Amplitude parameters - Primary profile - ISO 4287	71.8	nm	< 110 nm ✓

Straightness Corrected Test 3



Parameters	Value	Unit	Tolerance
Pt - Amplitude parameters - Primary profile - ISO 4287	69.5	nm	< 110 nm ✓

TalyMap Platinum 7.4.8703

10. Seznam autorových publikací a publikací s přispěním autora

Odborné články (časopisecké a ve sbornících z konferencí):

- **S. MICHAL**, P. HORVÁTH, M. HRABOVSKÝ, L. CHYTKA, D. MANDAT, L. NOZKA, M. PALATKA, M. PECH, P. SCHOVÁNEK, M. VACULA, Swing arm profilometer as a tool for measuring the shape of large optical surfaces, *Optik* 264 (2022) 169419. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.169419>.
- VACULA, M.; HORVÁTH, P.; CHYTKA, L.; DAUMILLER, K.; ENGEL, R.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; MATHES, H.-J.; **MICHAL, S.**; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHÄFER, CH. M.; SCHOVÁNEK, P. Use of a general purpose integrating sphere as a low intensity near-UV extended uniform light source. *Optik* 242, 167469, 2021. ISSN:0030-4026, IF 2,443, DOI: 10.1016/j.ijleo.2021.167169 [P2968/SLO/21]
- **MICHAL, S.**: Swinging arm profilometr jako nástroj pro měření tvaru rozsáhlých optických ploch. *Jemná mechanika a optika*, 2018, Vol. 63, No. 7-8, pp. 212–217. ISSN 0447-6441.
- **MICHAL, S. jr.**; PROVAZNÍKOVÁ, P.: Korekce Ti-safírového disku za použití metody MRF. *Jemná mechanika a optika*, 2017, Vol. 62, No. 4, pp. 127-131. ISSN 0447-6441.
- PROVAZNÍKOVÁ, P.; MACOŠEK, D.; **MICHAL, S. jr.**: SPIE Optifab a QED UGM meeting Rochester, N. Y., USA (12. – 16. 10. 2015). *Jemná mechanika a optika*, 2016, Vol. 61, No. 3, pp. 78–79. ISSN 0447-6441.
- PROCHÁSKA, F.; **MICHAL, S. Jr.**; MELICH, R.; PSOTA, P. Metodika měření tvaru asférických povrchů jakožto součást optické výroby. *Jemná mechanika a optika*, 2015, Vol. 60, No. 2, pp. 81–84. ISSN 0447-6441.
- **MICHAL, S. jr.** Přístrojová technika pro kontrolu optických součástí ve společnosti Meopta – optika, s. r. o. *Jemná mechanika a optika*, 2015, Vol. 60, No. 1, pp. 32–41. ISSN 0447-6441.
- **MICHAL, S. jr.**; ŠEVČÍK, S. Interferenční měření aberací dalekohledu Meostar S2 82-APO, měření jeho volných součástí a optických podsestav. *Jemná mechanika a optika*, 2014, Vol. 59, No. 3, pp. 82-85. ISSN 0447-6441.
- **MICHAL, S.**; HRABOVSKÝ, M.; SCHOVÁNEK, P. Swing arm profilometer modifications and its validation. *The World General Congress for Optics and Photonics of the International Commission for Optics (ICO) and the International Society on Optics Within Life Sciences (OWLS)*, 5. - 9. 9. 2022, Dresden, Germany. PO-08, <https://ico25.org/?s=ico-25> [P3141/SLO/22]
- HORVÁTH, P.; VACULA, M.; CHYTKA, L.; DAUMILLER, K.; ENGEL, R.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; MATHES, H.-J.; **MICHAL, S.**; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHAEFER, CH. M.; SCHOVÁNEK, P. Radiance uniformity of general purpose integrating sphere. *The World General Congress for Optics and Photonics of the International Commission for Optics (ICO) and the International Society on Optics Within Life Sciences (OWLS)*, 5. - 9. 9. 2022, Dresden, Germany. PO-20, <https://ico25.org/?s=ico-25> [P3142/SLO/22]

Publikace v rámci mezinárodních fyzikálních kolaborací:

- Pierre Auger Collaboration (HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDAT, D.; MICHAL, S.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.). Observation of a large-scale anisotropy in the arrival directions of cosmic rays above 8×10^{18} eV. *Science*, 2017, Vol. 357, Issue 6357, pp. 1266–1270. ISSN: 0036-8075, IF 37,205. DOI:10.1126/science.aan4338. [P2411/SLO/17]
- Pierre Auger Collaboration (HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDAT, D.; MICHAL, S.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.). Spectral calibration of the fluorescence telescopes of the Pierre Auger Observatory. *Astropart Phys*, 2017, Vol. 95, pp. 44-56. ISSN: 0927-6505. DOI: 10.1016/j.astropartphys. 2017.09.001. IF 3,425. [P2440/SLO/17]
- Pierre Auger Collaboration (HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDAT, D.; MICHAL, S.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.). Inferences on mass composition and tests of hadronic interactions from 0.3 to 100 EeV using the water-Cherenkov detectors of the Pierre Auger Observatory. *Phys Rev D*, 2017, Vol. 96, Issue 12, pp. 122003-1-122003-22. ISSN: 2470-0010. DOI: 10.1103/PhysRevD.96.122003. IF 4,506. [P2457/SLO/17]
- Pierre Auger Collaboration (HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDAT, D.; MICHAL, S.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.). An Indication of Anisotropy in Arrival Directions of Ultra-high-energy Cosmic Rays through Comparison to the Flux Pattern of Extragalactic Gamma-Ray Sources. *Astrophys J Lett*, 2018, Vol. 853, Issue 2, pp. L29-1-L29-10. ISSN: 2041-8205. DOI: 10.3847/2041-8213/aaa66d. IF 5,487. [P2537/SLO/18]
- Pierre Auger Collaboration (HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDAT, D.; MICHAL, S.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; CHYTKA, L.; ŠUPÍK, J.). Observation of inclined EeV air showers with the radio detector of the Pierre Auger Observatory. *J Cosmol Astropart Phys*, 2018, Issue 10, pp. 026-1-026-22. ISSN: 1475-7516. DOI: 10.1088/1475-7516/2018/10/026. IF 5,634. [P2611/SLO/18]
- Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDAT, D.; MICHAL, S.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.) Large-scale Cosmic-Ray Anisotropies above 4 EeV Measured by the Pierre Auger Observatory. *Astrophys J*, 2018, Vol. 868, Issue 1, pp. 4-1-4-12. ISSN: 0004-637X. DOI: 10.3847/1538-4357/aae689. IF 5,909. [P2645/SLO/18]
- Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDAT, D.; MICHAL, S.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.). Measurement of the average shape of longitudinal profiles of cosmic-ray air showers at the Pierre Auger Observatory. *J Cosmol Astropart Phys*, 3, 018, 2019. ISSN: 1475-7516, IF 5,524. DOI: 10.1088/1475-7516/2019/03/018. [P2695/SLO/19]
- Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDAT, M.; MICHAL, S.; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.;

SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.). Data-driven estimation of the invisible energy of cosmic ray showers with the Pierre Auger Observatory. *Phys Rev D*, 100(8), 082003, 2019, ISSN: 2470-0010, IF 4,368, DOI: 10.1103/PhysRevD.100.082003. [P2780/SLO/19]

- Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, M.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.). Probing the origin of ultra-high-energy cosmic rays with neutrinos in the EeV energy range using the Pierre Auger Observatory. *J Cosmol Astropart Phys*, 2019(10), 022, 2019, ISSN: 1475-7516, IF 5,524. DOI: 10.1088/1475-7516/2019/10/022. [P2800/SLO/19]
- Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, M.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.). Limits on point-like sources of ultra-high-energy neutrinos with the Pierre Auger Observatory. *J Cosmol Astropart Phys*, 2019(11), 004, 2019, ISSN: 1475-7516, IF 5,524. DOI: 10.1088/1475-7516/2019/11/004. [P2801/SLO/19]
- Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; **MICHAL, S.**; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.). A 3-Year Sample of Almost 1,600 Elves Recorded Above South America by the Pierre Auger Cosmic-Ray Observatory. *Earth And Space Science* 7(4), e2019EA000582, 2020, ISSN: 2333-5084, IF 2,312. DOI: 10.1029/2019EA000582. [P2841/SLO/20]
- Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.; VÁCLAVEK, L.; VACULA, M.). Studies on the response of a water-Cherenkov detector of the Pierre Auger Observatory to atmospheric muons using an RPC hodoscope. *J Instrum* 15(9), P09002, 2020, ISSN: 1748-0221, DOI: 10.1088/1748-0221/15/09/P09002. IF 1,454. [P2901/SLO/20]
- Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.; VÁCLAVEK, L.; VACULA, M.). A Search for Ultra-high-energy Neutrinos from TXS 0506+056 Using the Pierre Auger Observatory. *Astrophys J* 902(2), 105, 2020, ISSN: 0004-637X, DOI: 10.3847/1538-4357/abb476. IF 5,746. [P2912/SLO/20]
- Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.; VÁCLAVEK, L.; VACULA, M.). Reconstruction of events recorded with the surface detector of the Pierre Auger Observatory. *J Instrum* 15(10), P10021, 2020, ISSN: 1748-0221, IF 1,454. DOI: 10.1088/1748-0221/15/10/P10021. [P2919/SLO/20]
- Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, M.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.; VACULA, M.; VÁCLAVEK, L.). Design, upgrade and characterization of the silicon photomultiplier front-end for the AMIGA detector at the Pierre Auger Observatory. *J. Instrum.* 16(1), P01026, 2021,

ISSN:1748-0221, IF 1,415. DOI: 10.1088/1748-0221/16/01/P01026.
[P2971/SLO/21]

- Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, M.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.; VACULA, M.; VÁCLAVEK, L.). Measurement of the Fluctuations in the Number of Muons in Extensive Air Showers with the Pierre Auger Observatory. *Phys. Rev. Lett.* 126(15), 152002, 2021, ISSN:0031-9007, IF 7.645. DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.152002. [P2972/SLO/21]
- Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HAMAL, P.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, M.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.; VÁCLAVEK, L.; VACULA, M.). Design and implementation of the AMIGA embedded system or data acquisition. *J. Instrum.* 16(7), T07008, 2021, ISSN: 1748-0221, DOI: 10.1088/1748-0221/16/07/T07008. IF 1,415. [P3001/SLO/21]
- Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HAMAL, P.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, M.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.; VÁCLAVEK, L.; VACULA, M.). The FRAM robotic telescope for atmospheric monitoring at the Pierre Auger Observatory. *J. Instrum* 16(6), P06027, 2021, ISSN: 1748-0221, DOI: 10.1088/1748-0221/16/06/P06027. IF 1,415. [P3019/SLO/21]
- Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HAMAL, P.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, M.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.; VÁCLAVEK, L.; VACULA, M.). Calibration of the underground muon detector of the Pierre Auger Observatory. *J. Instrum* 16(4), P04003, 2021, ISSN: 1748-0221, DOI: 10.1088/1748-0221/16/04/P04003. IF 1,415. [P3020/SLO/21]
- Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HAMAL, P.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, M.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.; VÁCLAVEK, L.; VACULA, M.). Extraction of the muon signals recorded with the surface detector of the Pierre Auger Observatory using recurrent neural networks. *J. Instrum.* 16(7), P07016, 2021, ISSN: 1748-0221, DOI: 10.1088/1748-0221/16/07/P07016. IF 1,415. [P3027/SLO/21]
- Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HAMAL, P.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, M.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; VÁCLAVEK, L.; VACULA, M.). The energy spectrum of cosmic rays beyond the turn-down around 10^{17} eV as measured with the surface detector of the Pierre Auger Observatory. *Eur. Phys. J. C* 81(11), 966, 2021, ISSN: 1434-6044, DOI: 10.1140/epjc/s10052-021-09700-w. IF 4,912. [P3028/SLO/21]
- Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HAMAL, P.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, M.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.; VÁCLAVEK, L.; VACULA, M.). Deep-learning based reconstruction of the shower maximum $X(\max)$ () using the water-Cherenkov detectors of the Pierre Auger Observatory. *J. Instrum.* 16(7),

P07016, 2021, ISSN: 1748-0221, DOI: 10.1088/1748-0221/16/07/P07019. IF 1,415. [P3029/SLO/21]

- SCHÄFER, Ch. M. on behalf of the Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HAMAL, P.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, M.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; VÁCLAVEK, L.; VACULA, M.). The XY Scanner – A Versatile Method of the Absolute End-to-End Calibration of Fluorescence Detectors. *Proc. of the 37th International Cosmic Ray Conference (ICRC2021) – GAI – Gamma Ray Indirect*, July 12-23, 2021, online Berlin, Germany. *PoS*, 395, 220, 2021. ISSN:1824-8039. DOI: 10.22323/1.395.0220 [P3061/SLO/21]
- Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HAMAL, P.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, M.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; VÁCLAVEK, L.; VACULA, M.). A Search for Photons with Energies Above 2×10^{17} eV Using Hybrid Data from the Low-Energy Extensions of the Pierre Auger Observatory. *Astrophys J* 933(2), 125, 2022, ISSN: 0004-637X, IF 5,521. DOI: 10.3847/1538-4357/ac7393. [P3106/SLO/22]
- Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HAMAL, P.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, M.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; VÁCLAVEK, L.; VACULA, M.). Arrival Directions of Cosmic Rays above 32 EeV from Phase One of the Pierre Auger Observatory. *Astrophys J* 935(2), 170, 2022, ISSN: 0004-637X, IF 5,521. DOI: 10.3847/1538-4357/ac7d4e. [P3107/SLO/22]
- Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HAMAL, P.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, M.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; VÁCLAVEK, L.; VACULA, M.). Searches for Ultra-High-Energy Photons at the Pierre Auger Observatory. *Universe* 8, 579, 2022. ISSN: 2218-1997, IF 2,813. DOI: 10.3390/universe8110579 [P3146/SLO/22]
- Pierre Auger Collaboration (Chytka, L.; Hamal, P.; Horváth, P.; Hrabovský, M.; Mandát, M.; **MICHAL, S.**; Nožka, L.; Palatka, M.; Pech, M.; Schovánek, P.; Václavek, L.; Vacula, M.). Constraining Lorentz Invariance Violation using the muon content of extensive air showers measured at the Pierre Auger Observatory. *Proceedings Of Science* 406, 343, 2022.
- Pierre Auger Collaboration (Chytka, L.; Hamal, P.; Horváth, P.; Hrabovský, M.; Mandát, M.; **MICHAL, S.**; Nožka, L.; Palatka, M.; Pech, M.; Schovánek, P.; Václavek, L.; Vacula, M.). Sensitivity of the Cherenkov Telescope Array to emission from the gamma-ray counterparts of neutrino events. *Proceedings Of Science* 395, 975, 2022.
- Pierre Auger Collaboration (Chytka, L.; Hamal, P.; Horváth, P.; Hrabovský, M.; Mandát, M.; **MICHAL, S.**; Nožka, L.; Palatka, M.; Pech, M.; Schovánek, P.; Václavek, L.; Vacula, M.). A search for ultra-high-energy photons at the Pierre Auger Observatory exploiting air-shower Universality. *Proceedings Of Science* 395, 373, 2022.
- Pierre Auger Collaboration (Chytka, L.; Hamal, P.; Horváth, P.; Hrabovský, M.; Mandát, M.; **MICHAL, S.**; Nožka, L.; Palatka, M.; Pech, M.; Schovánek, P.;

- Václavek, L.; Vacula, M.). Prospects for Galactic transient sources detection with the Cherenkov Telescope Array. *Proceedings Of Science* 395, 784, 2022.
- Pierre Auger Collaboration (Chytka, L.; Hamal, P.; Horváth, P.; Hrabovský, M.; Mandát, M.; **MICHAL, S.**; Nožka, L.; Palatka, M.; Pech, M.; Schovánek, P.; Václavek, L.; Vacula, M.). Status and performance of the underground muon detector of the Pierre Auger Observatory. *Proceedings Of Science* 395, 233, 2022.
 - Pierre Auger Collaboration (Chytka, L.; Hamal, P.; Horváth, P.; Hrabovský, M.; Mandát, M.; **MICHAL, S.**; Nožka, L.; Palatka, M.; Pech, M.; Schovánek, P.; Václavek, L.; Vacula, M.). Exploring the population of Galactic very-high-energy γ -ray sources. *Proceedings Of Science* 395, 798, 2022.
 - Pierre Auger Collaboration (Chytka, L.; Hamal, P.; Horváth, P.; Hrabovský, M.; Mandát, M.; **MICHAL, S.**; Nožka, L.; Palatka, M.; Pech, M.; Schovánek, P.; Václavek, L.; Vacula, M.). Performance of a proposed event-type based analysis for the Cherenkov Telescope Array. *Proceedings Of Science* 395, 752, 2022.
 - Pierre Auger Collaboration (Chytka, L.; Hamal, P.; Horváth, P.; Hrabovský, M.; Mandát, M.; **MICHAL, S.**; Nožka, L.; Palatka, M.; Pech, M.; Schovánek, P.; Václavek, L.; Vacula, M.). The Cherenkov Telescope Array: layout, design and performance. *Proceedings Of Science* 395, 885, 2022.
 - Pierre Auger Collaboration (Chytka, L.; Hamal, P.; Horváth, P.; Hrabovský, M.; Mandát, M.; **MICHAL, S.**; Nožka, L.; Palatka, M.; Pech, M.; Schovánek, P.; Václavek, L.; Vacula, M.). The Cherenkov Telescope Array transient and multi-messenger program. *Proceedings Of Science* 395, 736, 2022.
 - Pierre Auger Collaboration (Chytka, L.; Hamal, P.; Horváth, P.; Hrabovský, M.; Mandát, M.; **MICHAL, S.**; Nožka, L.; Palatka, M.; Pech, M.; Schovánek, P.; Václavek, L.; Vacula, M.). Sensitivity of CTA to gamma-ray emission from the Perseus galaxy cluster. *Proceedings Of Science* 395, 546, 2022.
 - Pierre Auger Collaboration (Chytka, L.; Hamal, P.; Horváth, P.; Hrabovský, M.; Mandát, M.; **MICHAL, S.**; Nožka, L.; Palatka, M.; Pech, M.; Schovánek, P.; Václavek, L.; Vacula, M.). Detection methods for the Cherenkov Telescope Array at very-short exposure times. *Proceedings Of Science* 395, 694, 2022.
 - The ANTARES Collaboration, IceCube Collaboration; Pierre Auger Collaboration (CHYTKA, L.; HAMAL, P.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, M.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; VÁCLAVEK, L.; VACULA, M.); Telescope Array Collaboration. Search for Spatial Correlations of Neutrinos with Ultra-high-energy Cosmic Rays. *Astrophys J* 934(2), 164, 2022, ISSN: 0004-637X, IF 5,521. DOI: 10.3847/1538-4357/ac6def. [P3105/SLO/22]
 - LIGO Sci Collaboration & Virgo Fermi GBM INTERGRAL; IceCube Collaboration; AstroSat Cadmium Zinc Telluride IPN Collaboration; Insight-Hxmt Collaboration; ANTARES Collaboration; Swift Collaboration; AGILE Team; The 1M2H Team Dark Energy Camera GW-EM DLT40 Collaboration; GRAWITA GRAvitational Wave Fermi Large Area Telescope ATCA Australia Telescope ASKAP Australian SKA Pathfinder Las Cumbres Observatory Grp OzGrav DWF Deeper Wider Faster VINROUGE Collaboration; MASTER Collaboration; J-GEM GROWTH JAGWAR CALTECH Pan-STARRS MAXI Team; TZAC Consortium;

KU Collaboration; Nordic Optical Telescope; ePESSTO GROUND Texas Tech Univ Salt Grp Toros Transient Robotic Observat BOOTES Collaboration MWA Murchison Widefield Array CALET Collaboration IKI-GW Follow-up Collaboration H E S S Collaboration LOFAR Collaboration LWA Long Wavelength Array; HAWC Collaboration; Pierre Auger Collaboration; ALMA Collaboration; Euro VLBI Team; Pi Sky Collaboration; Chandra Team; McGill Univ DFN Desert Fireball Network ATLAS High Time Resolution Universe RIMAS RATIR SKA South Africa MeerKAT (HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDAT, D.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.) Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger. *Astrophys J Lett*, 2017, Vol. 848, Issue 2, pp. L12-1-L12-59. ISSN: 2041-8205. DOI: 10.3847/2041-8213/aa91c9. IF 5,487. [P2477/SLO/17]

- ANTARES Collaboration; IceCube Collaboration; Pierre Auger Collaboration; LIGO Sci Collaboration & Virgo (HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDAT, D.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; ŠUPÍK, J.) Search for High-energy Neutrinos from Binary Neutron Star Merger GW170817 with ANTARES, IceCube, and the Pierre Auger Observatory. *Astrophys J Lett*, 2017, Vol. 850, Issue 2, pp. L35-1-L35-18. ISSN: 2041-8205. DOI: 10.3847/2041-8213/aa9aed. IF 5,487. [P2462/SLO/17]
- CHYTKA, L.; MANDÁT, D.; HAMAL, P.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; KVITA, J.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; TRÁVNÍČEK, P.; VACULA, M. et al (FAST collaboration) An automated all-sky atmospheric monitoring camera for a nextgeneration ultrahigh-energy cosmic-ray observatory. *J Instrum* 15(11), T10009, 2020, ISSN: 1748-0221, DOI: 10.1088/1748-0221/15/10/T10009. IF 1,454. [P2897/SLO/20]
- FUJII, T.; ALBURY, J.; BELLIDO, J.; CHYTKA, L.; FARMER, J.; HAMAL, P.; HORVÁTH, P.; HRABOVSKÝ, M.; KUBO, H.; KVITA, J.; MALACARI, M.; MANDÁT, D.; **MICHAL, S.**; NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.; P. TRÁVNÍČEK, P.; VACULA, M. et al. Latest results of ultra-high-energy cosmic ray measurements with prototypes of the Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes (FAST). *Proc. of the 37th International Cosmic Ray Conference (ICRC2021) – GAI – Gamma Ray Indirect*, July 12-23, 2021, online Berlin, Germany. *PoS*, 395, 402, 2021. ISSN:1824-8039. DOI: 10.22323/1.395.0402 [P3037/SLO/21]

Výzkumné zprávy:

- **MICHAL, S.**: Zaměření pozemku pro budoucí umístění teleskopu FAST na observatoři Pierre Auger, Los Leones, Malargue. Zpráva č. 570/SLO/2018, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2018.
- **MICHAL, S.**; HIKLOVÁ, H.; PALATKA, M.; SCHOVÁNEK, P. Měření kvality vybraných plošek automobilových reflektorů (souhrnná zpráva). Zpráva č. 592/SLO/2019, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2019.
- SCHOVÁNEK, P.; HIKLOVÁ, H.; HRABOVSKÝ, M.; PALATKA, M.; **MICHAL, S.**; ZATLOUKAL, J. Měření drsnosti vzorků na zadaných úsečkách. Zpráva č. 593/SLO/2019, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2019.

- **SCHOVÁNEK, P.; HIKLOVÁ, H.; HRABOVSKÝ, M.; MICHAL, S.; HAVELKOVÁ, M.** Měření parametrů drsnosti na PMMA vzornících (souhrnná zpráva). Zpráva č. 594/SLO/2019, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2019.
- **SCHOVÁNEK, P.; PECH, M.; KITTLER, M.; HRABOVSKÝ, M.; MICHAL, S.; PALATKA, M.** Results of ultrathin substrate plane mirrors testing 2019/20 (souhrnná zpráva). Zpráva č. 611/SLO/2020, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2020.
- **MICHAL, S.; HIKLOVÁ, H.; SCHOVÁNEK, P.; HRABOVSKÝ, M.** Měření tvaru lensletů automobilových světel (souhrnná zpráva). Zpráva č. 612/SLO/2020, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2020.
- **MICHAL, S.; HIKLOVÁ, H.; SCHOVÁNEK, P.; PECH, M.** Měření drsnosti pokovených plastových parabolických vzorků (souhrnná zpráva). Zpráva č. 614/SLO/2020, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2020.
- **MICHAL, S.; HIKLOVÁ, H.; SCHOVÁNEK, P.; ČTVRTLÍK, R.; VACULA, M.; HRABOVSKÝ, M.** 3D mapování vrchlíků dvou sad plastových kondenzátorů (souhrnná zpráva). Zpráva č. 615/SLO/2020, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2020.
- **MICHAL, S.; VÁCLAVEK, L.; JÍLEK, V.; SCHOVÁNEK, P.; HRABOVSKÝ, M.; PECH, M.** 3D mapování sady čtyř reflektorů typ „UPPER“ (souhrnná zpráva). Zpráva č. 617/SLO/2020, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2020.
- **HRABOVSKÝ, M.; JÍLEK, V.; MICHAL, S.; PECH, M.; SCHOVÁNEK, P.** Analýza povrchu vložek do lisovací formy (souhrnná zpráva). Zpráva č. 618/SLO/2020, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2020.
- **PALATKA, M.; MICHAL, S.; VÁCLAVEK, L.; SCHOVÁNEK, P.; HRABOVSKÝ, M.; PECH, M.** 3D mapování sady reflektorů typ „LOWER“ (souhrnná zpráva). Zpráva č. 620/SLO/2020, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2020.
- **MICHAL, S.; PALATKA, M.; HRABOVSKÝ, M.; SCHOVÁNEK, P.** Srovnání výlisků čoček pro senzor příze (souhrnná zpráva). Zpráva č. 622/SLO/2020, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2020.
- **MICHAL, S.; SCHOVÁNEK, P.; HRABOVSKÝ, M.; VACULA, M.; PECH, M.** Kontrola dvou párů plastových reflektorů (souhrnná zpráva) Zpráva č. 625/SLO/2020, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2020.
- **TOMÁŠTÍK, J., ČTVRTLÍK, R., MALECOVÁ, S., KUDĚLKA, R., MICHAL, S.** Vliv laserové technologie na mechanické vlastnosti ozubeného kola (souhrnná zpráva). Zpráva č. 629/SLO/2020, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2020.
- **TOMÁŠTÍK, J., ČTVRTLÍK, R., VÁCLAVEK, L., MICHAL, S.** Testování tvrdosti laserem ovlivněné strojní součásti (souhrnná zpráva). Zpráva č. 634/SLO/2020, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2020.
- **MICHAL, S.; SCHOVÁNEK, P.; ČTVRTLÍK, R.; HRABOVSKÝ, M.; VÁCLAVEK, L.; PECH, M.; MANDÁT, D.** Hodnocení vybraných parametrů funkčních ploch 4 sad výlisků plastových čoček pro automobilové reflektory (Souhrnná zpráva). Zpráva č. 644/SLO/2021, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2021.

- **MICHAL, S.;** SCHOVÁNEK, P.; HRABOVSKÝ, M.; VÁCLAVEK, L.; PALATKA, M. Hodnocení povrchu ocelové vložky do lisovací formy (Souhrnná zpráva). Zpráva č. 645/SLO/2021, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2021.
- PALATKA, M.; MANDÁT, D.; HRABOVSKÝ, M.; **MICHAL, S.;** TOMÁŠTÍK, J.; SCHOVÁNEK, P.; JÍLEK, V. Hodnocení povrchu systému hranolků na plastových světlovodech (Souhrnná zpráva). Zpráva č. 647/SLO/2021, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2021.
- **MICHAL, S.;** TOMÁŠTÍK, J.; HRABOVSKÝ, M.; SCHOVÁNEK, P.; JÍLEK, V. Studie měření na součásti s třemi dutými paraboloidy (Souhrnná zpráva). Zpráva č. 648/SLO/2021, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2021.
- **MICHAL, S.;** ČTVRTLÍK, R.; HRABOVSKÝ, M.; SCHOVÁNEK, P. Kontrola vybrané části povrchu reflektoru typ „UPPER“ (Souhrnná zpráva). Zpráva č. 649/SLO/2021, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2021.
- **MICHAL, S.;** ČTVRTLÍK, R.; HRABOVSKÝ, M.; SCHOVÁNEK, P. Měření tvaru a drsnosti čtyř různých vzorků plastových výlisků (Souhrnná zpráva). Zpráva č. 653/SLO/2021, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2021.
- VÁCLAVEK, L.; ČTVRTLÍK, R.; TOMÁŠTÍK, J.; PECH, M.; MAREK, M.; **MICHAL, S.** Analýza mechanických vlastností optických skel po obrábění. Zpráva č. 654/SLO/2021, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2021
- **MICHAL, S.;** ČTVRTLÍK, R.; HRABOVSKÝ, M.; SCHOVÁNEK, P. Měření tvaru a drsnosti čtyř různých vzorků plastových výlisků. Zpráva č. 653/SLO/2022, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2022.
- **MICHAL, S.;** HRABOVSKÝ, M.; SCHOVÁNEK, P.; JÍLEK, V.; PALATKA, M. Měření součástí s třemi dutými paraboloidy – „axikony“ (2 vybrané metody). Zpráva č. 661/SLO/2022, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2022.
- **MICHAL S.,** SCHOVÁNEK P., VÁCLAVEK L. Charakterizace povrchů a vymezení tolerančních pásem dvou vzorků. Zpráva č. 664/SLO/2022, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2022.
- **MICHAL, S.;** VÁCLAVEK, L.; SCHOVÁNEK, P.; HRABOVSKÝ, M.; HAVELKOVÁ, M. Mapování sady reflektorů typ „lower“ a „upper“ (souhrnná zpráva). Zpráva č. 667/SLO/2022, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2022.
- **MICHAL S.;** SCHOVÁNEK P.; PALATKA, M.; PECH, M.; MANDÁT, D. Komplexní analýza funkčních ploch plastového kolimátoru. Zpráva č. 674/SLO/2022, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2022.
- **MICHAL S.;** SCHOVÁNEK P.; HRABOVSKÝ, M.; PALATKA, M. Měření tvaru povrchu rovinného skleněného zrcadla. Zpráva č. 675/SLO/2022, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 2022.

Užitný vzor, funkční vzorek, patent, přednáška, poster:

- SCHOVÁNEK, P.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; **MICHAL, S.;** NOŽKA, L.; PALATKA, M.; PECH, M.; PLAŠTIAKOVÁ, M.; JANKUJ, J.; PAVLAČÍK, P. Zařízení pro měření tloušťky deponované tenké vrstvy. Užitný vzor č. 31036 ze dne 19. 9. 2017 (Přihláška užitného vzoru PUV 2017-33258 ze dne 31. 12. 2016).

- **MICHAL, S.**; SCHOVÁNEK, P.; PECH, M.; MIČEK, B.; KITTLER, M. Zařízení pro vakuové upínání skleněných desek. Funkční vzorek č. FV39/SLO/2017.
- PECH, M.; MANDÁT, D.; HRABOVSKÝ, M.; SCHOVÁNEK, P.; VACULA, M.; **MICHAL, S.**; PALATKA, M.; HORVÁTH, P.; CHYTKA, L. Zařízení pro měření spektrální odrazivosti, zejména konkávních sférických zrcadlových ploch. Příhláška vynálezu PV 2022-204 ze dne 16. 5. 2022, (v řízení).
- SCHOVÁNEK, P.; DEJNEKA, A.; HRABOVSKÝ, M.; GRUBER, P.; JETMAR, T.; **MICHAL, S.**; PALATKA, M.; PECH, M. Kompozitní materiál. Příhláška vynálezu PV 2022-529 ze dne 16. 12. 2022, (v řízení).
- PECH, M.; MONTARULI, T.; BARBANO, A.; HRABOVSKÝ, M.; SCHOVÁNEK, P.; MANDÁT, D.; VACULA, M.; **MICHAL, S.**; PALATKA, M. Polarizing optical separator for stellar intensity interferometry. Mezinárodní PCT přihláška. PCT/CZ2020/000016 ze dne 14. 5. 2020 (WO 2021/228287 A1 ze dne 18. 11. 2021).
- PECH, M.; MANDÁT, D.; HRABOVSKÝ, M.; SCHOVÁNEK, P.; VACULA, M.; **MICHAL, S.**; PALATKA, M.; HORVÁTH, P.; CHYTKA, L. Device for the measurement of the spectral reflectance, in particular concave spherical mirror surfaces, and method of the measurement on this device. Mezinárodní PCT přihláška č. PCT/CZ2021/000026 ze dne 16. 6. 2021 (WO 2022/262880 ze dne 22.12.2022).
- SCHOVÁNEK, P.; **MICHAL, S.**; HRABOVSKÝ, M.; PALATKA, M.; PECH, M.; MANDÁT, D. Swing arm profilometer and method of measurement with this profilometer. Mezinárodní PCT přihláška č. PCT/CZ2021/000045 ze dne 16. 9. 2021, (oznámeno kladné rešeršní řízení, očekává se uveřejnění).
- **MICHAL, S.**: Přednáška 1: „Paprsková optika“ 2: „Interferometrie“. 29. 3. 2018 v rámci lekcí jednosemestrálního kurzu „Základy fyzikální optiky“, firma Hella Autotechnik Nova, s.r.o., Mohelnice.
- **MICHAL, S.** Přednáška v rámci programu Fórum optonika: „Moderní měření tvaru rozsáhlých optických povrchů“, 19. 3. 2019, Veletrh Amper - mezinárodní veletrh elektrotechniky, energetiky, automatizace a komunikace.
- **MICHAL, S.**; HRABOVSKÝ, M.; SCHOVÁNEK, P. Poster: Swing arm profilometer modifications and its validation. *The World General Congress for Optics and Photonics of the International Commission for Optics (ICO) and the international society on Optics Within Life Sciences (OWLS)*, 5. 9. až 9. 9. 2022, Dresden, Germany.
- HORVÁTH, P.; VACULA, M.; CHYTKA, L.; DAUMILLER, K.; ENGEL, R.; HRABOVSKÝ, M.; MANDÁT, D.; MATHES, H. - J.; **MICHAL, S.**; PALATKA, M.; PECH, M.; SCHAEFER, C. M.; SCHOVÁNEK, P. Poster: Radiance uniformity of general purpose integrating sphere. *The World General Congress for*

Optics and Photonics of the International Commission for Optics (ICO) and the international society on Optics Within Life Sciences (OWLS), 5. 9. až 9. 9. 2022, Dresden, Germany.

- **MICHAL, S.;** PROVAZNÍKOVÁ, P. Poster: Correction of Titan Sapphire disc using MRF finishing method. *Optics and Measurement International Conference (OAM)*, 11. 10. až 14. 10. 2016, Liberec, Czech republic.