

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ**  
**FAKULTA STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**MĚŘENÍ NA PROFILPROJEKTORU**

2017

VĚRA ŽÁČKOVÁ

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Žáčková** Jméno: **Věra** Osobní číslo: **306768**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Měření na profilprojektoru**

Název bakalářské práce anglicky:

**Profile projector measurement**

Pokyny pro vypracování:

Měření ve dvou souřadnicích  
Profilprojektor - princip měření  
Návrh experimentů  
Vyhodnocení naměřených dat

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. BcA. Jan Podaný Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

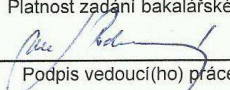
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

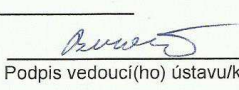
,

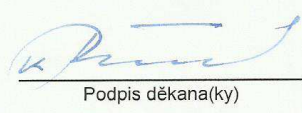
Datum zadání bakalářské práce: **27.10.2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13.01.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
Podpis vedoucí(ho) práce

  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

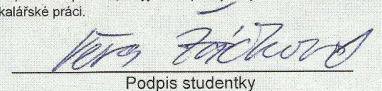
  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.  
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

31.10.2016

Datum převzetí zadání

  
Podpis studentky

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila pouze podklady uvedené v seznamu.

V Praze dne 13.1.2017

Věra Žáčková

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou měření na profilprojektoru. V teoretické části přináší úvod do metrologie a seznámení se základními pojmy. Dále popisuje možnosti měření ve dvou souřadnicích a princip měření na profilprojektoru. V praktické části je představeno použité zařízení a zpracováno měření a to porovnání dvou možných metod měření, zhodnocení způsobilosti procesu a vyhodnocení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měřidla.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Strojírenská metrologie, měření ve dvou souřadnicích, měření na profilprojektoru, způsobilost procesu, opakovatelnost a reprodukovatelnost měřidla

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with problematics of profile projector measurement. In theoretical part it provides an introduction to metrology and basic concepts. It also describes 2D measurement options and principle of profile projector measurement. Practice part presents used equipment and there is processed measurement – comparison of two possible methods, evaluation of process capability and repeatability and reproducibility of measuring device.

## **KEY WORDS**

Engineering metrology, 2D measurement, profile projector measurement, process capability, repeatability and reproducibility of measuring device.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěla poděkovat panu Ing. BcA. Janu Podanému, PhD. za rady a vedení při práci a celému týmu kvality společnosti Stokvis Promi s.r.o. v čele s panem Ing. Janem Maťátkem za umožnění měření a spolupráci. Dále děkuji své rodině za podporu při studiu.

## Obsah

0	Úvod .....	8
1	Úvod do metrologie [1, 2, 3, 4] .....	8
1.1	Národní metrologický systém České republiky [5].....	8
1.2	Právní předpisy v metrologii [6] .....	9
1.3	Základní pojmy [4] .....	10
1.3.1	Veličiny a jednotky .....	10
1.3.2	Měření .....	10
1.3.3	Prostředky měření.....	11
1.3.4	Vlastnosti měřicích zařízení.....	12
1.3.5	Etalony.....	12
2	Měření ve dvou souřadnicích .....	13
2.1	Základy optického měření [8, 9].....	13
2.1.1	Čočka spojná.....	14
2.1.2	Čočka rozptylná .....	14
2.1.3	Ohnisko.....	14
2.1.4	Ohnisková vzdálenost.....	14
2.1.5	Nekonečný optický systém.....	15
2.1.6	Konečný optický systém .....	15
2.1.7	Zvětšení objektivu .....	15
2.1.8	Numerická apertura (NA) .....	15
2.1.9	Rozlišovací schopnost (R) .....	16
2.1.10	Pracovní vzdálenost.....	16
2.1.11	Parafokální vzdálenost .....	16
2.1.12	Hloubka ostrosti (DOF) .....	16
2.1.13	Světlé a tmavé světelné pole.....	16
2.1.14	Apochromatické a achromatické objektivy.....	16
2.2	Měřicí mikroskopy [1, 2, 9, 10].....	17
2.2.1	Způsoby měření.....	18
2.2.2	Dílenské mikroskopy.....	19
2.2.3	Univerzální měřicí mikroskop.....	20
2.3	2D měřicí skener [12] .....	20
3	Profilprojektory .....	21

3.1	Princip zobrazení [1, 9, 10] .....	21
3.1.1	Zvětšení .....	21
3.1.2	Zorné pole.....	22
3.1.3	Pracovní vzdálenost.....	22
3.1.4	Telecentrický optický systém .....	22
3.1.5	Paralaxní chyba.....	23
3.1.6	Zobrazení procházejícím světlem (diaskop) .....	23
3.1.7	Zobrazení odraženým světlem (episkop) .....	24
3.2	Typy profilprojektorů podle konstrukce.....	24
3.2.1	Vertikální .....	24
3.2.2	Horizontální .....	25
3.3	Způsoby měření na profilprojektorech [7, 9, 10] .....	25
3.3.1	Měření na matnici .....	25
3.3.2	Měření pomocí měřicího stolku [7, 10, 14] .....	26
3.3.3	Příslušenství k profilprojektorem [9, 14].....	27
3.4	Digitální profilprojektory [13, 17].....	29
3.4.1	Princip měření .....	29
3.4.2	Měřicí software .....	29
3.4.3	Oblast využití .....	30
4	Měření .....	31
4.1	Použité měřicí zařízení.....	31
4.1.1	Specifikace použitého profilprojektoru [20].....	31
4.1.2	Vyhodnocovací jednotka Qm – Data 200 [21].....	34
4.1.3	Hranový senzor OPTOEYE – 200.....	35
4.2	Specifikace měřené součásti .....	35
4.3	Postup měření .....	36
4.4	Porovnání měření pomocí nitkového kříže a hranového senzoru .....	37
4.5	Hodnocení stability procesu [22] .....	38
4.5.1	Měření a výpočet parametrů .....	38
4.6	Hodnocení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měřidla .....	41
4.6.1	Opakovatelnost [23] .....	41
4.6.2	Reprodukovatelnost [23].....	42
4.6.3	Opakovatelnost a reprodukovatelnost měřidla (GRR nebo Gage R&R) [23] .....	42
4.6.4	Měření a výpočet parametrů .....	42

5	Závěr .....	46
7	Seznam použitých symbolů a zkratk: .....	47
8	Literatura .....	48
9	Seznam příloh .....	49



# 0 Úvod

Ve výrobním průmyslu je stále důležitější zaměřit se na proces kvality a tím pádem i na měření, protože to je nejdůležitější nástroj kontroly. Dnes je celá řada podniků orientovaná na zákazníka a ve velké konkurenci musí zákazníkovi nabídnout co nejvyšší kvalitu za co nejnižší cenu. Proto musí každý podnik sledovat, jak vyrábí a snižovat nebo eliminovat náklady na nekvalitu.

Kontrolu ve výrobním procesu dnes usnadňují moderní měřicí zařízení, jako jsou multisenzorové souřadnicové stroje, které umožňují automatické měření složitých dílů. Existuje však celá řada výrobních aplikací, která plně nevyužije potenciál těchto strojů a je pro dostatečné měření na méně složitých zařízeních, jako například dvou souřadnicová optická měřidla.

Cílem této práce je popsat principy měření ve dvou souřadnicích a to především na profilprojektorech a na závěr ukázat měření v průmyslové praxi.

## 1 Úvod do metrologie [1, 2, 3, 4]

Metrologie je vědní obor zabývající se všemi poznatky a činnostmi, které se týkají měření. Strojírenská metrologie je oblast metrologie, která se zabývá měřením ve strojírenské výrobě. Měření je soubor experimentálních úkonů, který má za cíl stanovit hodnoty dané fyzikální veličiny v daných jednotkách. Metrologie je základem jednotného a přesného měření, které je předpokladem vzájemné důvěry při směně zboží a také nutnou podmínkou efektivní výroby. Velké množství výrobků se skládá z částí vyrobených na různých místech světa, které spolu musí bezvadně tvořit celek a to je možné jen díky jednotnému a přesnému měření. V systému řízení jakosti je úkolem metrologie také udržování, evidence, kalibrace a ověřování měřidel. Současná metrologie je charakterizována prudkým technickým rozvojem měřicí techniky, uplatnění elektroniky, výpočetní techniky, automatizace a datové komunikace u měřicí techniky a uznávání výsledků měření a zkoušek v mezinárodním měřítku.

Metrologii lze členit na vědeckou, užitnou a fundamentální. Vědecká metrologie se zabývá výzkumem a vývojem a dále vývojem a uchováváním etalonů. Z vědeckého hlediska jde o nejvyšší stupeň metrologie. Užitná metrologie (metrologie v procesu produkce) se člení na průmyslovou a legální. Průmyslová metrologie zajišťuje funkci měřidel používaných v průmyslu a ve výrobních, zkušebních a vývojových procesech. Legální metrologie upravuje činnosti týkající se měření, měřicích jednotek, měřidel a metod měření, které jsou prováděny oprávněnými orgány podle zákonem stanovených požadavků. Fundamentální metrologie má znaky vědecké i užitné metrologie a lze charakterizovat, jako vědeckou metrologii doplněnou o ty části užitné metrologie, které vyžadují vědeckou kompetenci.

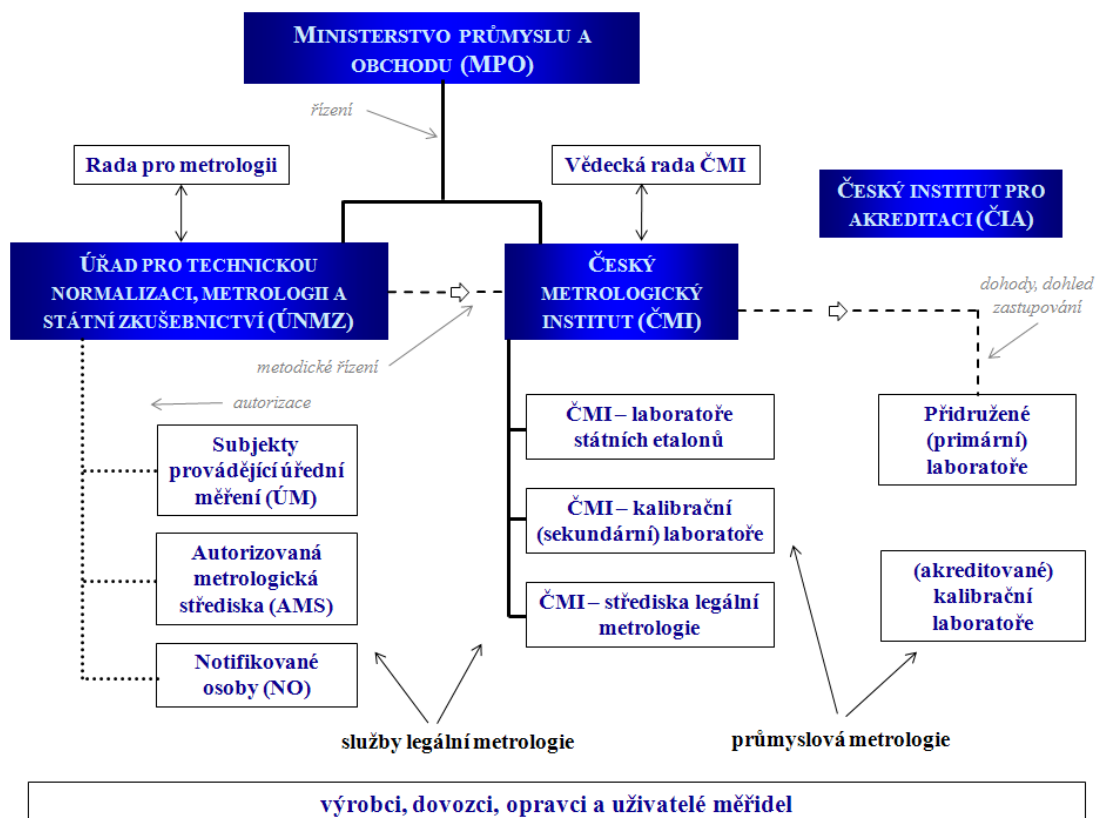
### 1.1 Národní metrologický systém České republiky [5]

Národní metrologický systém slouží k zajištění jednotnosti a správnosti měřidel a měření v daném státě. Základním prvkem Národního metrologického systému České republiky (dále jen NMS ČR) jsou spotřebitelé, druhým významným prvkem jsou podnikatelské subjekty a samozřejmě je zde zastoupen stát.

Subjekty působící v NMS ČR:

- Ministerstvo průmyslu a obchodu – ústřední orgán státní správy pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
- Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví – orgán státní správy
- Český metrologický institut – plní funkci národního metrologického institutu
- Český institut pro akreditaci – národní akreditační orgán sloužící při posuzování odborné způsobilosti subjektů, které působí v metrologii

Na obrázku č. 1 je zjednodušené schéma vazeb mezi jednotlivými prvky NMS ČR.



Obr. 1 Struktura NMS ČR [5]

## 1.2 Právní předpisy v metrologii [6]

Základním právním předpisem v České republice v oblasti metrologie je zákon č. 505/1990 Sb. o metrologii ve znění pozdějších předpisů (např. zákon č. 20/1993 Sb. o zabezpečení výkonu státní správy v oblasti technické normalizace, metrologie a zkušebnictví). Další právní předpisy jsou vyhlášky ministerstva průmyslu a obchodu (např. vyhláška č. 262/200 Sb., kterou se zajišťuje jednotnost a správnost měřidel a měření) a nařízení vlády (např. nařízení vlády č. 121/2016 Sb. o posuzování shody vah s neautomatickou činností při jejich dodávání na trh).

### 1.3 Základní pojmy [4]

Základním dokumentem, který definuje podstatnou část všeobecných a základních termínů v metrologii na mezinárodní úrovni je Mezinárodní slovník základních a všeobecných termínů v metrologii. Oficiální označení tohoto slovníku je „International Vocabulary of Metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM), Third Edition, ISO, 2007“ a byl vydán jako technická normalizační informace TNI 01 0115:2009.

#### 1.3.1 Veličiny a jednotky

- *veličina – vlastnost jevu, tělesa nebo látky, která má velikost, jež může být vyjádřena jako číslo a reference*
- *základní veličina – veličina v konvencí zvolené podmnožině dané soustavy veličin, z níž žádná veličina podmnožiny nemůže být vyjádřena pomocí jiných veličin*
- *odvozená veličina – veličina v soustavě veličin definovaná pomocí základních veličin této soustavy*
- *rozměr veličiny – vyjádření závislosti veličiny na základních veličinách soustavy veličin jako součinu mocnin činitelů odpovídajících základním veličinám s vynecháním všech číselných činitelů*
- *měřicí jednotka – reálná skalární veličina, definovaná a přijatá konvencí, se kterou může být porovnávána jakákoliv jiná veličina stejného druhu vyjádřením podílu dvou veličin jako čísla*
- *základní jednotka – měřicí jednotka, která je přijata konvencí pro základní veličinu*
- *odvozená jednotka – měřicí jednotka pro odvozenou veličinu*
- *hodnota veličiny – číslo a reference společně vyjadřující velikost veličiny*

#### 1.3.2 Měření

- *měření – proces experimentálního získávání jedné nebo více hodnot veličiny, které mohou být důvodně přiřazeny veličině*
- *metrologie – věda o měření a jeho aplikaci*
- *měřená veličina – veličina, která má být měřena*
- *měřicí princip – jev sloužící jako základ měření*
- *metoda měření – generický popis logického organizování činností použitých při měření*
- *postup měření – podrobný popis měření podle jednoho nebo více měřících principů a dané metody měření založený na modelu měření a zahrnující jakýkoliv výpočet k získání výsledku měření*
- *výsledek měření – soubor hodnot veličiny přiřazený měřené veličině společně s jakoukoliv další dostupnou relevantní informací*
- *naměřená hodnota veličiny – hodnota veličiny reprezentující výsledek měření*
- *pravá hodnota veličiny – hodnota veličiny, která je ve shodě s definicí veličiny*
- *přesnost měření – těsnost shody mezi naměřenou hodnotou veličiny a pravou hodnotou veličiny měřené veličiny*
- *chyba měření – naměřená hodnota veličiny minus referenční hodnota veličiny*
- *systematická chyba měření – složka chyby měření, která v opakovaných měřeních zůstává konstantní nebo se mění předvídatelným způsobem*

- náhodná chyba měření – složka chyby měření, která se v opakovaných měřeních mění nepředvídatelným způsobem
- podmínka opakovatelnosti měření – podmínka měření ze souboru podmínek, který zahrnuje stejný postup měření, stejný obslužný personál, stejný měřicí systém, stejné pracovní podmínky a stejné místo, a opakování měření na stejném objektu nebo podobných objektech v krátkém časovém úseku
- podmínka reprodukovatelnosti měření – podmínka měření ze souboru podmínek, který zahrnuje různá místa, obslužný personál, měřicí systémy a opakování měření na stejném objektu nebo podobných objektech
- nejistota měření – nezáporný parametr charakterizující rozptýlení hodnot veličiny přiřazených k měřené veličině na základě použité informace
- vyhodnocení nejistoty měření způsobem A – vyhodnocení složky nejistoty měření statistickou analýzou naměřených hodnot veličiny získaných za definovaných podmínek měření
- vyhodnocení nejistoty měření způsobem B – vyhodnocení složky nejistoty měření stanovené jinými způsoby než vyhodnocením nejistoty měření způsobem A
- standardní nejistota měření – nejistota měření vyjádřená jako směrodatná odchylka
- kombinovaná standardní nejistota měření – standardní nejistota měření, která je získána použitím individuálních standardních nejistot měření přidružených ke vstupním veličinám v modelu měření
- relativní standardní nejistota měření – standardní nejistota měření dělená absolutní hodnotou naměřené hodnoty veličiny
- kalibrace – činnost, která za specifikovaných podmínek v prvním kroku stanoví vztah mezi hodnotami veličiny s nejistotami měření poskytnutými etalony a odpovídajícími indikacemi s přidruženými nejistotami měření a ve druhém kroku použije tyto informace ke stanovení vztahu pro získání výsledku měření z indikace
- metrologická návaznost – vlastnost výsledku měření, pomocí níž může být výsledek vztažen ke stanovené referenci přes dokumentovaný nepřerušovaný řetězec kalibrací, z nichž každá se podílí svým příspěvkem na stanovené nejistotě měření
- řetězec metrologické návaznosti – řetězec návaznosti sled etalonů (standardů) a kalibrací, který je použit ke vztažení výsledku měření k referenci
- model měření - matematický vztah mezi všemi známými veličinami, které mají být zahrnuty v měření

### 1.3.3 Prostředky měření

- měřidlo – zařízení používané k měření buď samotné, nebo ve spojení s jedním nebo více přidavnými zařízeními
- měřicí systém – sestava jednoho nebo více měřidel a často dalších zařízení, včetně jakýchkoliv činidel a zdrojů, sestavená a přizpůsobená k poskytování informace používané ke generování naměřených hodnot veličiny ve specifikovaných intervalech pro veličiny specifikovaných druhů
- snímač – prvek měřicího systému, který je přímo ovlivněn jevem, tělesem nebo látkou, nesoucí veličinu, která má být měřena
- detektor – zařízení nebo látka, které indikují výskyt jevu, tělesa nebo látky, když je překročena prahová hodnota přidružené veličiny

#### 1.3.4 Vlastnosti měřicích zařízení

- *indikace - údaj hodnota veličiny poskytnutá měřidlem nebo měřicím systémem*
- *jmenovitá hodnota veličiny – jmenovitá hodnota zaokrouhlená nebo přibližná hodnota charakterizující veličinu, která poskytuje vodítko pro příslušné použití měřidla nebo měřicího systému*
- *měřicí interval – soubor hodnot veličin stejného druhu, které mohou být měřeny daným měřidlem nebo měřicím systémem se specifikovanou přístrojovou nejistotou za definovaných podmínek*
- *stanovená pracovní podmínka – pracovní podmínka, která musí být splněna během měření k zajištění, aby měřidlo nebo měřicí systém pracovaly tak, jak byly navrženy*
- *citlivost měřicího systému – podíl změny indikace měřicího systému a odpovídající změny hodnoty veličiny, která je měřena*
- *rozlišení - nejmenší změna veličiny, která je měřena, která způsobí rozeznatelnou změnu v odpovídající indikaci*
- *stálost měřidla – vlastnost měřidla, určující zda jeho metrologické vlastnosti zůstávají v čase konstantní*
- *třída přesnosti – třída měřidel nebo měřicích systémů, které splňují stanovené metrologické požadavky určené k udržení chyb měření nebo přístrojových nejistot za specifikovaných pracovních podmínek ve specifikovaných mezích*

#### 1.3.5 Etalony

- *etalon – realizace definice dané veličiny, se stanovenou hodnotou veličiny a přidruženou nejistotou měření, používaná jako reference*
- *mezinárodní etalon - etalon uznaný signatáři mezinárodní dohody a určený k celosvětovému využití*
- *státní etalon – etalon uznaný národním orgánem k využití v zemi nebo ekonomice jako základ pro převod hodnoty veličiny na jiné etalony pro daný druh veličiny*
- *primární etalon – etalon stanovený použitím primárního postupu měření nebo vytvořený konvencí zvoleným artefaktem*
- *sekundární etalon – etalon stanovený kalibrací vzhledem k primárnímu etalonu pro veličinu stejného druhu*
- *referenční etalon – etalon navržený ke kalibraci dalších etalonů pro veličiny daného druhu v dané organizaci nebo v dané lokalitě*
- *pracovní etalon – etalon, který je běžně používán ke kalibraci nebo ověřování měřidel nebo měřicích systémů*

## 2 Měření ve dvou souřadnicích

Ve většině případů se měření uskutečňuje ve dvou na sobě kolmých souřadnicích v kartézském souřadnicovém systému na osách  $x$  a  $y$ , méně časté je pak měření v polárních souřadnicích  $r$  a  $\varphi$ , kde  $r$  udává vzdálenost bodu od počátku a  $\varphi$  úhel mezi spojnicí tohoto bodu s počátkem a zvolenou osou.

Nejvýznamnějšími představiteli měřicího zařízení ve dvou souřadnicích jsou optické měřicí přístroje a to měřicí mikroskopy a profilprojektory. Jejich výhoda oproti multisenzorovým souřadnicovým měřicím strojům je menší velikost a menší náročnost na čistotu okolního prostředí. Díky tomu mohou být tato měřicí zařízení i mobilní, což zvyšuje rychlost měření a zpětnou vazbu na výrobní proces, protože je možné umístit měřicí stanoviště přímo u výrobní operace.

Měření je možné provádět zaměřením nitkového kříže a odměřením souřadnic na měřicím stolku nebo pomocí různých šablon a měřítek.

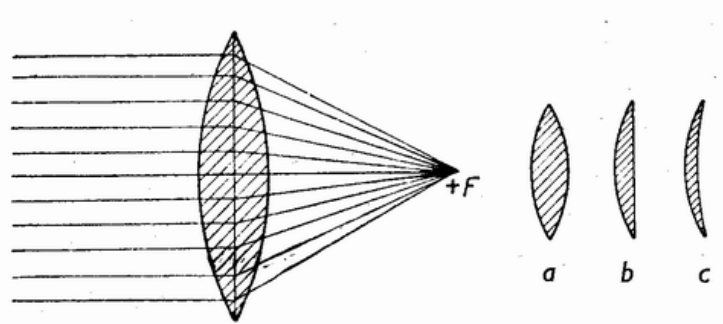
Nevýhoda měření pomocí mikroskopů a profilprojektorů je ta, že obsluha vizuálním najížděním měřených bodů přímo ovlivňuje výsledek měření. Měření se stává subjektivním. Na rozdíl od multisenzorových souřadnicových strojů nelze měření poloautomatizovat anebo plně automatizovat. Vždy je nejpřesnější, když se měření může opakovat v automatickém režimu. Vypracování komplexních měřicích programů je ale velmi náročné a nepřehledné. [7]

V dnešní době se měření uskutečňuje pomocí vyhodnocovacích jednotek a počítačů. Vzhledem k tomu, že měření probíhá pouze ve dvou osách, je dostačující na vyhodnocovací počítač instalovat 2D software, který je méně náročný a má nižší pořizovací náklady než 3D verze programu. Tato měřicí zařízení se dnes používají pro jednodušší měřicí úkoly v dvourozměrné oblasti, případně jako rychlé dílenské porovnávací měřidlo.

### 2.1 Základy optického měření [8, 9]

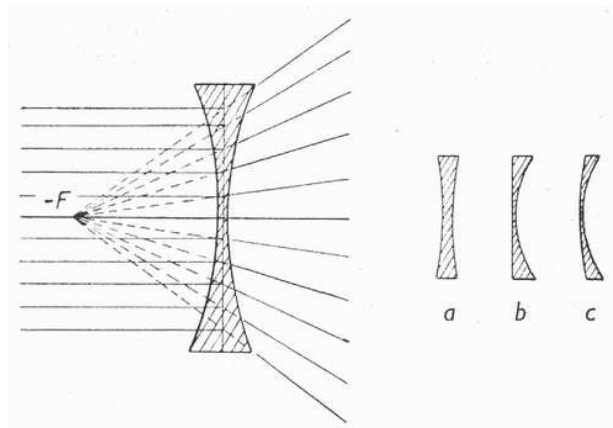
Jedním z hlavních úkolů optických zařízení je optické zobrazování, to znamená zobrazování předmětů prostřednictvím světla, které buď sami vyzařují nebo odrážejí. K tomuto účelu slouží optické soustavy, které divergentní svazky paprsků vycházejících z jednotlivých bodů objektu spojují tak, aby se protnuly v jednom bodě a vytvořily tak jeho obraz. Skutečný (reálný) obraz se nazývá průsečík paprsků, které se po průchodu optickou soustavou sbíhají. Jestliže je svazek paprsků pro průchodu soustavou divergentní a paprsky se po prodloužení protínají v opačném směru než je šíření světla, je jejich průsečík zdánlivým (virtuálním) obrazem bodu.

### 2.1.1 Čočka spojná



Obr. 2 Spojná čočka a) dvojvypuklá (bikonvexní), b) ploskovypuklá (plankonvexní), c) dutovypuklá (konkávkonvexní) [19]

### 2.1.2 Čočka rozptylná



Obr. 3 Rozptylná čočka a) dvojdutá (bikonkávni), b) ploskodutá (plankonkávni), c) vypuklodutá (konvexkonkávni)[19]

### 2.1.3 Ohnisko

Obrazové ohnisko je bod obrazového prostoru sdružený s nekonečně vzdáleným bodem na hlavní ose předmětového prostoru.

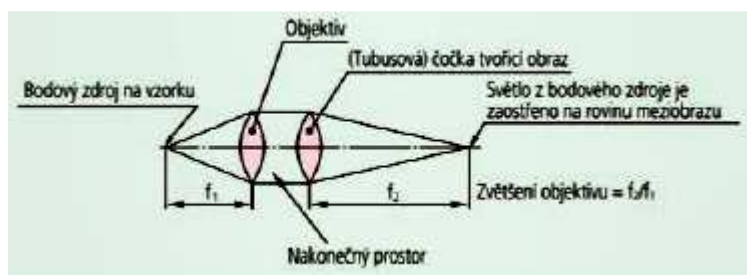
Předmětové ohnisko je bod předmětového prostoru sdružený s nekonečně vzdáleným bodem na hlavní ose obrazového prostoru.

### 2.1.4 Ohnisková vzdálenost

Vzdálenost ohnisek od příslušných hlavních bodů se nazývá obrazová resp. předmětová ohnisková vzdálenost.

### 2.1.5 Nekonečný optický systém

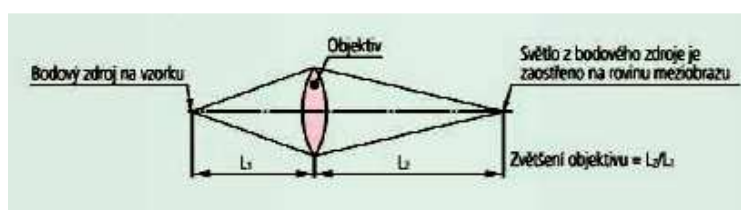
Optický systém, ve kterém objektiv tvoří obraz v nekonečnu a tubusová čočka je umístěna v tubusu mezi objektivem a okulárem tak, aby vznikl meziobraz. Světlo prochází objektivem a potom efektivně prostupuje rovnoběžně s optickou osou do tubusové čočky přes tak zvaný „nekonečný prostor“, ve kterém mohou být umístěny pomocné prvky s minimálním vlivem na korekce ostření a odchyly, například diferenciální interferenční kontrastní hranoly (DIC), polarizátory.



Obr. 4 Nekonečný optický systém [9]

### 2.1.6 Konečný optický systém

Optický systém, ve kterém se k vytvoření meziobrazu používá objektiv v konečné poloze. Světlo prochází z měřeného objektu objektivem a pak směřuje k rovině meziobrazu (umístěné v přední ohniskové rovině okuláru) a v této rovině konverguje.



Obr. 5 Konečný optický systém [9]

### 2.1.7 Zvětšení objektivu

V případě nekonečné optické soustavy je zvětšení objektivu dáno poměrem mezi ohniskovou vzdáleností objektivu  $f_1$  a ohniskovou vzdáleností obrazu  $f_2$ :

$$\text{Zvětšení objektivu} = \frac{f_1}{f_2} \quad (2.1)$$

### 2.1.8 Numerická apertura (NA)

Údaj NA označuje rozlišovací schopnost čoček objektivu. Čím je hodnota NA větší, tím jemnější detail může být viděn. Objektiv, který má vyšší NA, také umožňuje větší průchod světla a obvykle poskytuje jasnější obraz s menší hloubkou ostrosti než objektiv s nižší hodnotou NA. Numerická apertura je dána vztahem (2.2).

$$NA = n \cdot \sin \theta \quad (2.2)$$

$n$  ..... index lomu prostředí mezi přední částí objektivu a měřeným objektem (např. pro vzduch je  $n=1,0$ )

$\theta$  ..... poloviční úhel maximálního kužele světla, které může objektivem projít



### 2.1.9 Rozlišovací schopnost (R)

Mez rozlišení představuje minimální vzdálenost mezi dvěma body, kterou lze zjistit. Rozlišovací schopnost závisí na vlnové délce osvětlení a numerické apertuře a je dána vztahem (2.3).

$$R = \frac{\lambda}{2 \cdot NA} [\mu m] \quad (2.3)$$

$\lambda$  ..... vlnová délka osvětlení, jako referenční vlnová délka se často užívá  $\lambda=0,55\mu m$

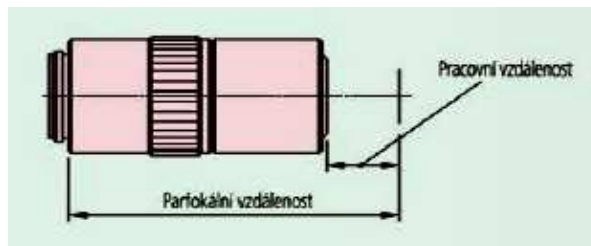
NA ..... numerická apertura

### 2.1.10 Pracovní vzdálenost

Vzdálenost mezi přední stranou objektivu mikroskopu a povrchem měřené součásti, při které je zaostření nejostřejší

### 2.1.11 Parafokální vzdálenost

Vzdálenost mezi montážní polohou objektivu mikroskopu a povrchem měřené součásti, při které je zaostření nejostřejší. Objektivy namontované na jednom karuselu by měly mít stejnou parafokální vzdálenost, aby při použití dalšího objektivu bylo potřeba minimální doostření.



Obr. 6 Parafokální a pracovní vzdálenost [9]

### 2.1.12 Hloubka ostrosti (DOF)

Vzdálenost mezi dvěma rovinami, které definují hranice přijatelné ostrosti, když je mikroskop zaměřen předmět (měřeno ve směru optické osy). Hloubka ostrosti se stává mělkou, když se zvětšuje numerická apertura. Pro hloubku ostrosti platí vztah (2.4).

$$DOF = \frac{\lambda}{2 \cdot (NA)^2} [mm] \quad (2.4)$$

$\lambda$  ..... vlnová délka osvětlení, jako referenční vlnová délka se často užívá  $\lambda=0,55\mu m$

NA ..... numerická apertura

### 2.1.13 Světlé a tmavé světelné pole

Ve světlém poli je celý kužel světla soustředěn objektivem na povrch pozorovaného předmětu, což je normální režim pozorování optickým mikroskopem. V tmavém světelném poli je vnitřní plocha světelného kuželu blokována tak, že je povrch pozorovaného předmětu osvětlen pouze šikmým světlem. Tmavé světelné pole je ideální pro odhalování a pozorování povrchových škrábanců a nečistot.

### 2.1.14 Apochromatické a achromatické objektivy

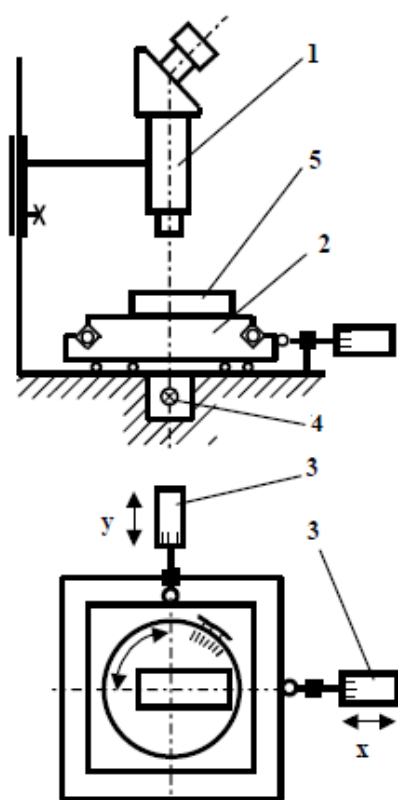
Apochromatický objektiv je korigovaný pro chromatické odchylky (barevné skvrny) ve třech barvách a to červené, modré, žluté.

Achromatický objektiv je korigovaný pro chromatické odchyly ve dvou barvách a to červené a modré.

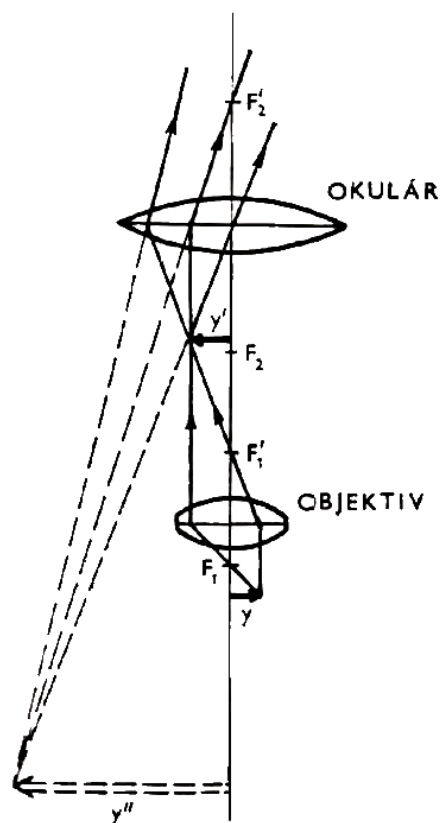
## 2.2 Měřicí mikroskopy [1, 2, 9, 10]

Mikroskopy slouží k přesnému měření velmi malých součástí. Měření je bezdotykové a provádí se zaměřením nitkového kříže na hranu, od které měříme rozměr nebo projekci součásti. Pomocí mikroskopů se měří délky součástí v pravouhlých souřadnicích, úhly (např. na nástrojích, šablonách atd.), závity (střední průměr, malý a velký průměr, úhly boků), poloměry a různé tvary.

Optickou soustavu mikroskopu tvoří objektiv a okulár. Objektiv je spojná čočka (nebo soustava spojných čoček) s krátkou ohniskovou vzdáleností, která je blíž k pozorovanému předmětu. Okulár je spojná čočka (nebo soustava spojných čoček) s krátkou ohniskovou vzdáleností, která je blíž k oku. Okulár vytváří reálný, obrácený, zvětšený obraz pozorovaného předmětu, jehož virtuální zobrazení pozorujeme okulárem. Tím se docílí několikanásobného zvětšení zorného úhlu, to znamená, že součást se oku zobrazuje zvětšena. Zvětšení mikroskopu dostaneme vynásobením zobrazovacího měřítka objektivu a zvětšení okuláru.



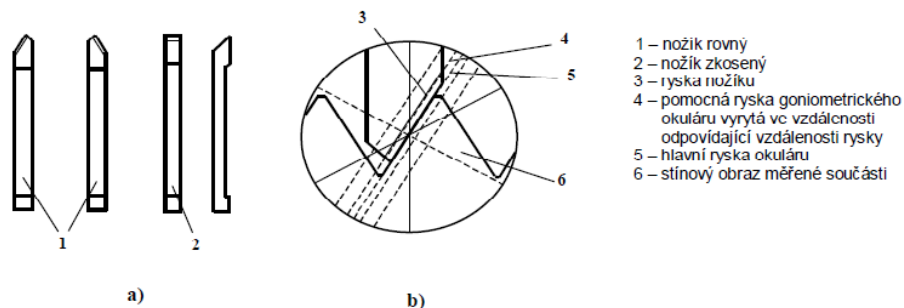
Obr. 7 Schéma mikroskopu [2]  
(1 – okulár, 2 – měřicí stolek, 3 – měřicí soustava posuvu stolku, 4 – osvětlení, 5 – měřená součást)



Obr. 8 Optické schéma mikroskopu ( $F_1$  – předmětové ohnisko objektivu,  $F'_1$  – obrazové ohnisko objektivu,  $F_2$  – předmětové ohnisko okuláru,  $F'_2$  – obrazové ohnisko okuláru,  $y$  – pozorovaný předmět,  $y'$  – reálný převrácený obraz a zároveň předmět pro okulár,  $y''$  – obraz pozorovaného předmětu [8])

### 2.2.1 Způsoby měření

- měření stínovým obrazem (měřená součást je vložena do svazku paralelních paprsků a je pozorován stínový obraz)
- měření v osovém řezu (použití měřicích nožiček s ryskami pro určení roviny, ve které se provádí měření, místo na obrys se zaměřuje na přesné rysky nožičku, tato metoda je přesnější než metoda měření stínovým obrazem)



Obr. 9 Měřicí nožičky a) vzhled nožičků, b) nastavení při měření [2]

### Možnosti úpravy hlavice mikroskopu

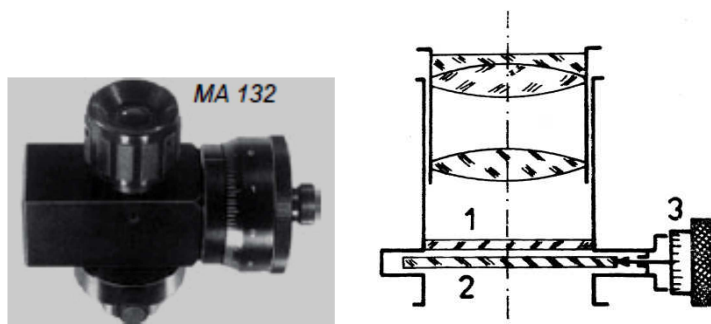
- Úhlový měřicí okulár - používá se k měření úhlu, souřadnic, kuželů stínovou metodou nebo metodou použití nožičku. Okulár má otočnou destičku s dělením 360 a možností odčítat 1'.



Obr. 10 Otáčivé okuláry s odečítáním úhlu [9,11]

- Revolverový okulár – má otočnou skleněnou destičku s různými normalizovanými profily a pevnou skleněnou destičku s úhlovou stupnicí. Slouží ke kontrole tvaru stínovou metodou na závitech, poloměrech, úhlových profilech apod. Destičky a profily jsou vyměnitelné.

- Mikrometrický okulár – používá se ke čtení měřitek a také k přesnému měření malých délek. V zorném poli okuláru je pevná rytá destička, která má dělení stejné jako na bubínku mikrometrického šroubu. Nepřesnost okuláru je závislá na nepřesnosti stoupání vřetene a na zvětšení objektivu mikroskopu.



Obr. 11 mikrometrický okulár (1 – rytá destička odpovídající stoupání vřetene, 2 – destička s nitkovým křížem, 3 – bubínek mikrometrického šroubu) [1, 11]

Měřicí mikroskop je předchůdce všech souřadnicových měřicích strojů. U moderních měřicích mikroskopů přebírají a vyhodnocují souřadnice přímo připojené vyhodnocovací počítače pomocí speciálních programů. [7]

Typy měřicích mikroskopů:

- dílenské mikroskopy – velké a malé
- mikroskopy univerzální

### 2.2.2 Dílenské mikroskopy

Princip měření spočívá v tom, že v okuláru pozorujeme zvětšený obraz předmětu a nitkový kříž. Pohybem měřicího stolku, na kterém je měřená součást umístěná, vůči nitkovému kříži se určuje hledaný rozměr jako rozdíl dvou čtení.



Obr. 12 Mikrometrické měřicí stolky [11]

Mikroskop má tuhý stojan, na kterém je vedení pro křížový stolek a stojan s vedením pro upevnění hlavice mikroskopu, který se může vychýlit o určitý úhel (úhel stoupání šroubovice) do stran, to je nutné pro měření úhlu závitu. Osvětlovací zařízení je ve stojanu umístěno tak, že se paprsky odrážejí od zrcadla uvnitř stojanu do mikroskopu. Měřicí saně křížového stolku pro příčný i podélný posuv se pohybují v přesném kuličkovém vedení. Pohyb se provádí pomocí mikrometrických šroubů.



Obr. 13 Dílenský měřicí mikroskop Asimeto AM 2 [16]

### 2.2.3 Univerzální měřicí mikroskop

Ve srovnání s dílenským mikroskopem se zde dají měřit součásti větších rozměrů a dosahuje větší přesnosti díky vyšší rozlišovací schopnosti. Měření délek se u starších typů provádí srovnáním rozměru s délkovým měřítkem, které je vyryté na skleněné destičce spirálového mikroskopu. Pohyb stolu s měřenou součástí je v přesném valivém provedení a umožňuje hrubý a jemný posuv v obou souřadnicích.

## 2.3 2D měřicí skener [12]

Maticový skener s telecentrickým objektivem, má plně krytou konstrukci, takže se dá použít i v dílenském prostředí. Nahrazuje vertikální profilprojektory v oblasti měření plochých dílů a slouží pro rychlou, precizní, opakovatelnou sériovou kontrolu. Využívají se hlavně na komplexní měření profilů (guma, plasty, hliník apod.) a dále ke kontrole fólií, plošných spojů, laserem řezaných profilů, přesně vypalovaných součástek atd.

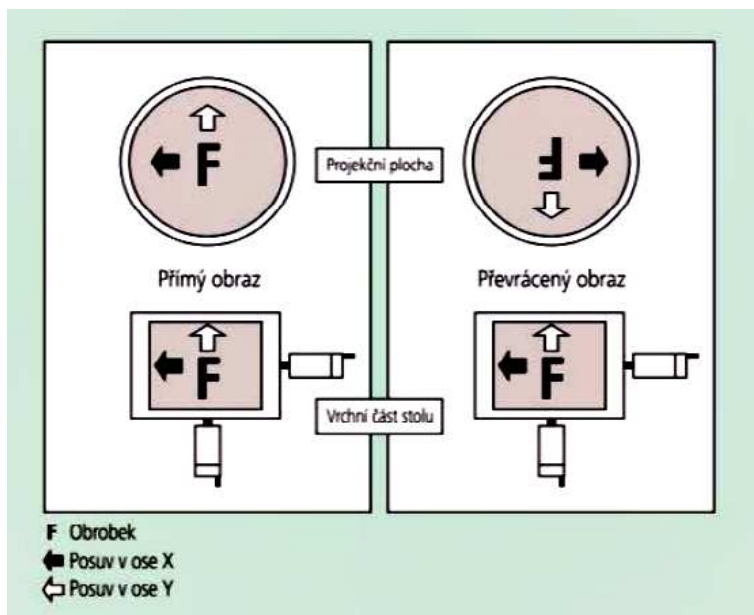


Obr. 14 3D skener Werth FlatScope [12]

## 3 Profilprojektory

### 3.1 Princip zobrazení [1, 9, 10]

Objektiv pomocí soustavy zrcadel vytváří na matnici zvětšený reálný obraz měřené součásti, která je umístěna do světelného paprsku. Obraz je přímý nebo převrácený. Přímý obraz promítaného objektu znamená, že je orientován stejně jako objekt na stole. Pokud je obraz obrácený shora dolů a zleva doprava jedná se o obraz převrácený (nebo také reverzní). Směr posuvu stolu a pohyb obrazu na matnici je znázorněn na obrázku 15. Obrácený obraz bývá přesnější.



Obr. 15 Přímý a převrácený obraz [9]

#### 3.1.1 Zvětšení

Zvětšení je závislé na vlastnostech objektivu a také na vzdálenosti od matnice. Zvětšení je dáno vztahem (3.1)

$$\frac{y'}{y} = \frac{b}{a} \quad (3.1),$$

kde  $y$  je délka měřené součásti,  
 $y'$  je délka zvětšeného obrazu součásti,  
 $a$  je vzdálenost mezi součástí a objektivem a  
 $b$  je vzdálenost mezi objektivem a promítací plochou.

Přesnost zvětšení projektoru s určitým objektivem se stanovuje promítnutím referenčního objektu na matnici a porovná se velikost obrazu s očekávanou velikostí. Jako referenční objekt se obvykle používá skleněné pravítko s malým dělením a nazývá se objektivový mikrometr nebo standardní pravítko. Jeho promítaný obraz se měří větším skleněným pravítkem, které se nazývá odečítací pravítko. Přesnost zvětšení je vyjádřena jako procento jmenovitého zvětšení objektivu a je dána vztahem (3.2).

$$\Delta M = \frac{L-l \cdot M}{l \cdot M} \cdot 100 [\%] \quad (3.2),$$

kde  $L$  je délka promítaného obrazu referenčního objektu měřeného na matnici,  
 $l$  je délka sledovaného objektu a  
 $M$  je zvětšení promítacího objektivu.

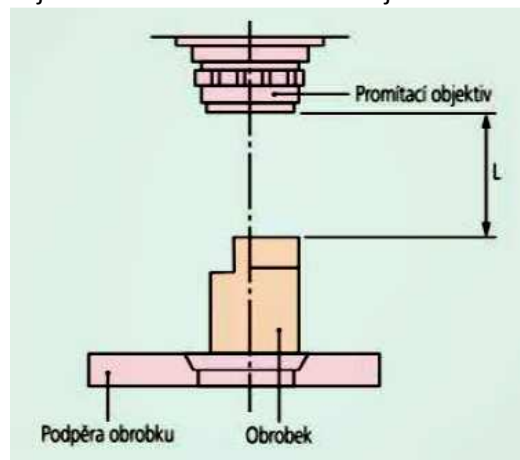
Přesnost zvětšení bývá do 1% při zobrazení procházejícím světlem a do 1,5% při zobrazení dopadajícím světlem. Přesnost zvětšení není stejná jako přesnost měření. Větší zvětšení zmenšuje velikost zorného pole a hloubku ostroty.

### 3.1.2 Zorné pole

Průměr zorného pole značí maximální průměr měřeného objektu při použití konkrétního objektivu. Je dán poměrem průměru matnice profilprojektoru ke zvětšení použitého promítacího objektivu. Například pokud se na profilprojektor s průměrem matnice 500mm použije objektiv se zvětšením 5x, průměr zorného pole je  $\frac{500mm}{5} = 100mm$ .

### 3.1.3 Pracovní vzdálenost

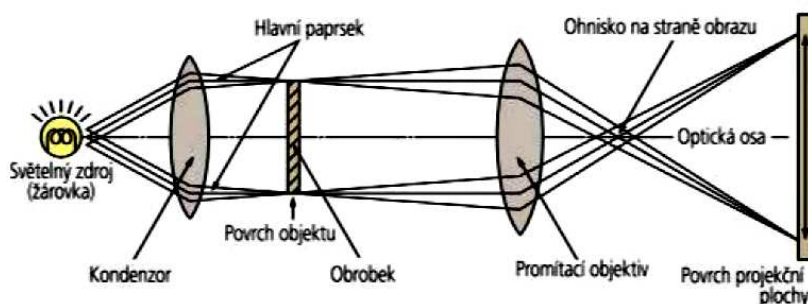
Jedná se o vzdálenost mezi povrchem promítacího objektivu a povrchem měřeného objektu v ohnisku. Pracovní vzdálenost je znázorněna na obrázku 16 jako  $L$ .



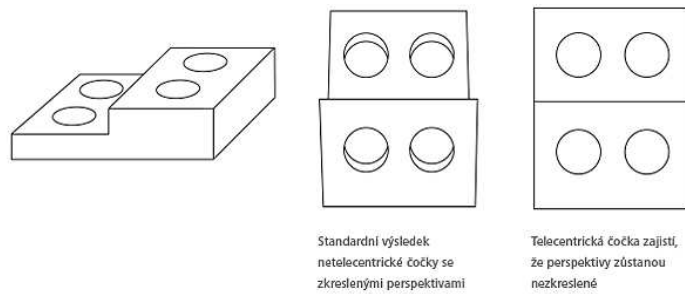
Obr. 16 pracovní vzdálenost [9]

### 3.1.4 Telecentrický optický systém

Potřebné správné osvětlení je docíleno kondenzorem, který přebírá paprsky ze zdroje. Optický systém je telecentrický, to znamená, že hlavní paprsek je rovnoběžný s optickou osou umístěním dorazu objektivu do ohniska na straně obrazu. Obraz se neliší velikostí, i když se rozostří a jako objekt je posunut podél optické osy. Pro měřicí projektor a mikroskopy je stejného efektu docíleno umístěním vlákna žárovky do ohniska kondenzoru namísto dorazu objektivu, takže objekt je osvětlen paralelními paprsky. Znamená to, že rozměrovou přesnost je možné zachytit správně bez ohledu na vzdálenost od objektu.



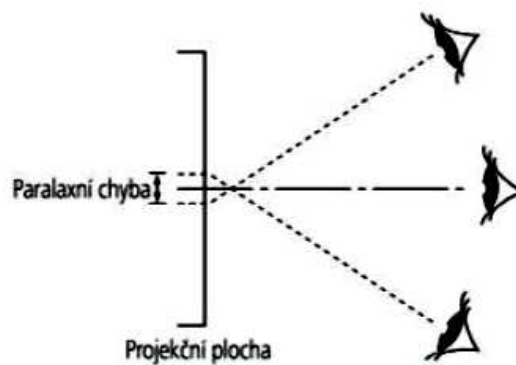
Obr. 17 Telecentrické osvětlení kontury [9]



Obr. 18 Porovnání zobrazení centrální projekcí a telecentrickou čočkou [17]

### 3.1.5 Paralaxní chyba

Jde o posun objektu vůči pevnému pozadí, který je způsoben změnou polohy pozorovatele a konečným oddělením tohoto objektu a rovinami pozadí.



Obr. 19 Paralaxní chyba [9]

Obrys součásti se na matnici zobrazuje buď procházejícím světlem, nebo odraženým světlem. Většina profilprojektorů umožňuje zobrazení procházejícím i odraženým světlem.

### 3.1.6 Zobrazení procházejícím světlem (diaskop)

Paprsky ze zdroje světla procházejí kondenzorem a rovnoběžně dopadají na měřenou součást, která je umístěna na skleněné desce stolku. Potom paprsky projdou objektivem, odrazí se od zrcadla a zobrazí profil součásti na matnici.



### 3.1.7 Zobrazení odraženým světlem (episkop)

Paprsky ze zdroje světla procházejí kondenzorem a polopropustným zrcadlem na kontrolovanou součást. Od ní se odrážejí zpátky na zrcadlo a opět na další zrcadlo a procházejí objektivem na matnici. Na matnici je pak vidět světlý obraz zvětšené součásti. Pro tento způsob zobrazení je důležité, aby měřená součást dobře odrážela světlo. Některé modely profilprojektorů umožňují otáčením kondenzoru a změnou úhlu polopropustného zrcátka v objektivu nastavit šikmé dopadající osvětlení, což zajišťuje zvýšený kontrast obrazu a tudíž lze optimálně zobrazit i špatně se odrážející plochy. Příklad je na obrázku 20.



Obr. 20 Šikmé osvětlení a) nastavitelné šikmé přepínatelné dopadající osvětlení, b) objekt nasvícený svislým osvětlením, c) objekt nasvícený šikmým osvětlením [9]

## 3.2 Typy profilprojektorů podle konstrukce

### 3.2.1 Vertikální

Profilprojektory se svislým optickým systémem jsou vhodné především na ploché součásti jako podložky, těsnění, šablony, výstřižky z plechu, fólie apod. Vertikální profilprojektory jsou buď stolní nebo stojanové a je na nich možné měřit součásti do 10 kg.



Obr. 21 Vertikální profilprojektor Starrett VF 600

### 3.2.2 Horizontální

Horizontální profilprojektory mají vodorovný paprsek osvětlení. Jsou vhodné pro měření větších a těžších dílů a pro prostorové součásti, jako například hřídelů, ozubených tyčí, lisovacích a střížných nástrojů. Horizontální profilprojektory jsou také stolní nebo stojanové. Maximální hmotnost měřené součásti je 50 kg u stolních profilprojektorů a až 150 kg u stojanových.



Obr. 22 Horizontální profilprojektor Starrett HF 600 [14]

## 3.3 Způsoby měření na profilprojektorech [7, 9, 10]

Na profilprojektorech se měření uskutečňuje na matnici nebo na měřicím stolku.

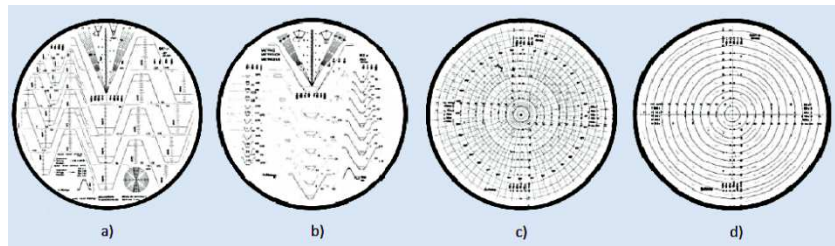
### 3.3.1 Měření na matnici

Odměřování rozměrů obrazu měřeného dílu se provádí pomocí měřítka. Je možné použít jakékoliv, avšak nejlepší je speciální skleněné s přesně vyrytou stupnicí. Dělení stupnice je 1mm, případně 0,5mm. Odečtená hodnota se musí přepočítat podle použitého zvětšení. Některá měřítka už mají na stupnici hodnoty uvedené v určitém zvětšení, např. 50:1, 100:1 atd.

Měření úhlů je možné za pomoci otočné matnice s úhlovou stupnicí nebo pomocí otočných měřicích stolků s úhlovou stupnicí, které se dodávají jako zvláštní příslušenství.

Další způsob je porovnání průmětu pomocí šablon. Na matnici přiložíme průhledný výkres měřené součásti, který je zvětšený stejně, jako je zvětšení profilprojektoru. Následně porovnáme obraz s výkresem a ihned vidíme případné odchylky ve tvaru či rozměrech. Na výkrese mohou být zakresleny i tolerance, v tom případě vidíme, jestli daná součást splňuje předepsané rozměry nebo ne. Pokud tolerance zakresleny nejsou, nebo potřebujeme případné odchylky znát, je nutné tyto odchylky změřit jiným způsobem. Výhodou je, že kontrola je velice rychlá, protože můžeme kontrolovat najednou několik geometrických prvků. Výsledkem této kontroly je zjištění, jestli součást vyhovuje nebo nevyhovuje. Jako příslušenství k profilprojektorům se dodávají měřicí šablony, které mají velký rozsah pevných rozměrů a přesných měřitek. Pomocí těchto šablon lze měřit a kontrolovat

délky, výšky, rovnoběžnosti, úhly, poloměry, soustřednost průměrů, kužele, rozteče otvorů, všechny normalizované profily závitů a ozubení.

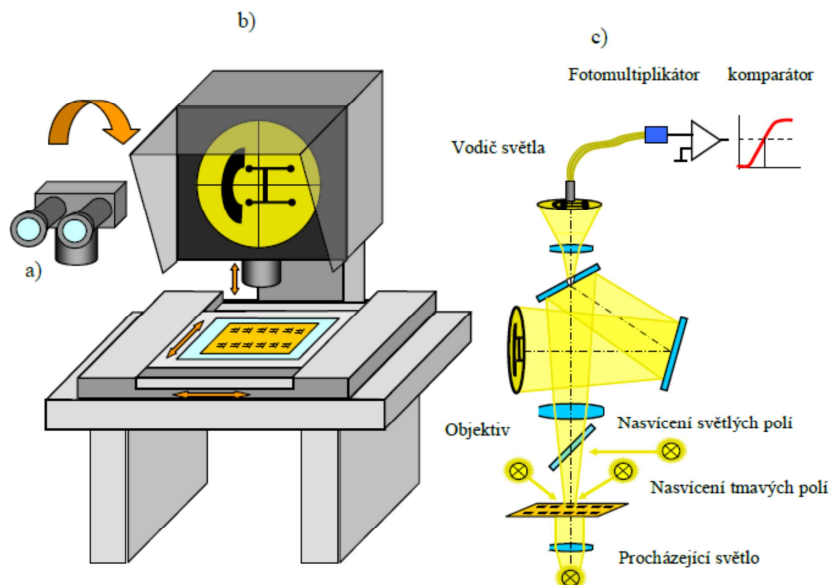


Obr. 23 Měřicí šablony pro profilprojektory a) evolventní ozubení, b) metrický závit ISO, c) čárová síť pravouhlá, d) čárová síť polární [9]

### 3.3.2 Měření pomocí měřicího stolku [7, 10, 14]

Měřená součást se umístí na stůl a stolem se pohybuje tak, aby se měřené body ztotožňovaly se středem nitkového kříže nebo s jednou jeho čarou. Hodnoty se odečítají na odměřovacím zařízení. Dříve to byly mikrometrické šrouby umístěné v osách  $x$  a  $y$ .

Nyní jsou měřicí stolky profilprojektorů vybaveny optoelektrickými inkrementálními pravítky v obou osách, což umožňuje snímání souřadnic, které se zobrazují na displeji nebo jsou zpracovány vyhodnocovací jednotkou, případně počítačem. Snímání bodů se provádí zaměřením nitkového kříže nebo pomocí hranového senzoru, který přebírá úlohu lidského oka pro kontrastní objekty a dovoluje automatické snímání bodů objektu.



Obr. 24 Princip konstrukce měřicího mikroskopu a měřicího projektoru s hranovým senzorem Verth a) měřicí mikroskop, b) měřicí projektor, c) hranový senzor Verth a dráha paprsků v projektoru [7]

Při zpracování souřadnic vyhodnocovací jednotkou není nutné měřenou součást v měřicím prostoru mechanicky vyrovnávat, aby byla rovnoběžná s posuvem pracovního stolku nebo s nitkovým křížem na matnici. Součást se obecně upne nebo položí v měřicím prostoru a po definování potřebných bodů je jednotka matematicky vyrovná, resp. transformuje souřadnicový systém do upnuté součásti. Z nasnímaných souřadnic bodů měřeného profilu vyhodnocovací jednotka určí rozměry a polohu základních geometrických prvků (bod, přímka, kružnice atd.). Z těchto nasnímaných prvků lze dále

konstruovat další prvky a vyhodnocovat běžné metrologické parametry včetně tolerování (úchytky rozměrů, roztečí, úhlů, úchytky tvaru a polohy).

Vlastní měření se tedy nevykonává na matnici, ale na měřicím stolku. Z toho plyne, že rozhodujícím parametrem pro výběr velikosti profilprojektoru není průměr matnice, ale měřicí rozsah stolku, protože není potřeba zobrazovat celou měřenou součást. Měřicí stolky jsou vybaveny jemným posuvem pro zaměření měřených bodů a rychloposuvem pro pohyb mezi jednotlivými body nebo částmi měřeného dílu.

### 3.3.3 Příslušenství k profilprojektorům [9, 14]

K profilprojektorům se dodává různé další příslušenství, které rozšiřuje oblast použití a možnosti nebo usnadňuje práci při měření.

- Promítací objektivy

Pro změnu zvětšení, obvyklé zvětšení objektivů je 5x, 10x, 20x, 50x a 100x. K některým typům se dodává karuselový výměník pro snadnou změnu zvětšení.

- Měřicí šablony

Dodávají se v různých velikostech, aby odpovídaly průměru matnice a v příslušném zvětšení.

- Upínací prvky

Slouží k požadovanému upnutí a umístění kontrolované součásti v měřicím prostoru. Příklady jsou středící suport, podstavec pro středící suport, nastavitelná upínka, otočné stoly, otočné stoly s odečítáním úhlů, otočný svěrák výkyvné středící suporty, horizontální prizma se svěrkou, vertikální upínací držák.



Obr. 25 Ukázka upínacích prvků [18]

- Hranový senzor

Umožňuje provádět přesná měření bez ohledu na úroveň dovedností obsluhy díky automatické detekci hran měřené součásti. Snižuje vliv lidského faktoru na přesnost měření.



Obr. 26 Hranový senzor Mitutoyo OPTOEYE 200 [9]

- Vyhodnocovací jednotky

Jsou určeny ke zpracování naměřených dat. Standardně vyhodnocuje geometrické elementy jako bod, přímka, kružnice, vzdálenost, elipsa, obdélníkový otvor, oválný otvor, rozteč, průsečík, úhel, kolmost, rovnoběžnost atd. Některé jednotky automaticky rozpoznají, o jaký typ elementu se jedná a automaticky vypočítají potřebné parametry. Existuje možnost vytvářet si programy dílu a ty následně spouštět a upravovat. Vyhodnocovací jednotky také nabízejí statistické zpracování, jako je počet hodnot, minimální a maximální hodnota, rozsah, směrodatná odchylka, histogram atd. Některé jednotky se dají připojit k PC, což přináší vyšší komfort a jednoduchost obsluhy při řešení náročných geometrických úloh a porovnání s CAD daty. K vyhodnocovacím jednotkám lze připojit tiskárnu, pro tisk protokolu naměřených hodnot.

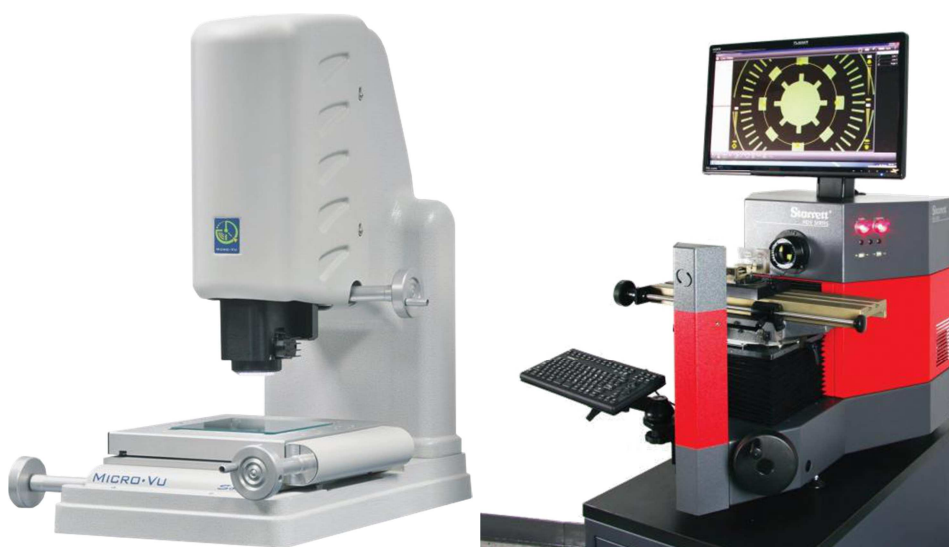


Obr. 27 Vyhodnocovací jednotka Tesa QC 200 [18]

## 3.4 Digitální profilprojektory [13, 17]

### 3.4.1 Princip měření

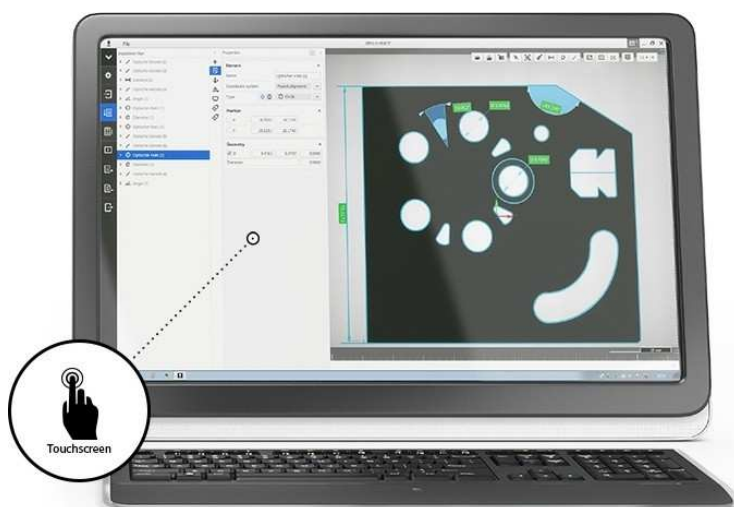
Měřená součást je snímána kamerou nebo fotoaparátem s vysokým rozlišením a její obraz je zobrazen na monitoru. Přístroj automaticky zaostří a nastaví optimální osvětlení, čímž snižuje zátěž obsluhy a měření stává se na obsluze nezávislé. Výsledky jsou zpracovávány měřicím programem a automaticky vyhodnoceny. Díky tomu je přesné měření rozměrů mnohem jednodušší a rychlejší a zároveň je zajištěna objektivita měření a eliminace chyb operátora. Některé přístroje umožňují i měření ve 3D.



Obr. 28 Digitální profilprojektor Micro-Vu SOL [13] a Starrett HDV 300 [14]

### 3.4.2 Měřicí software

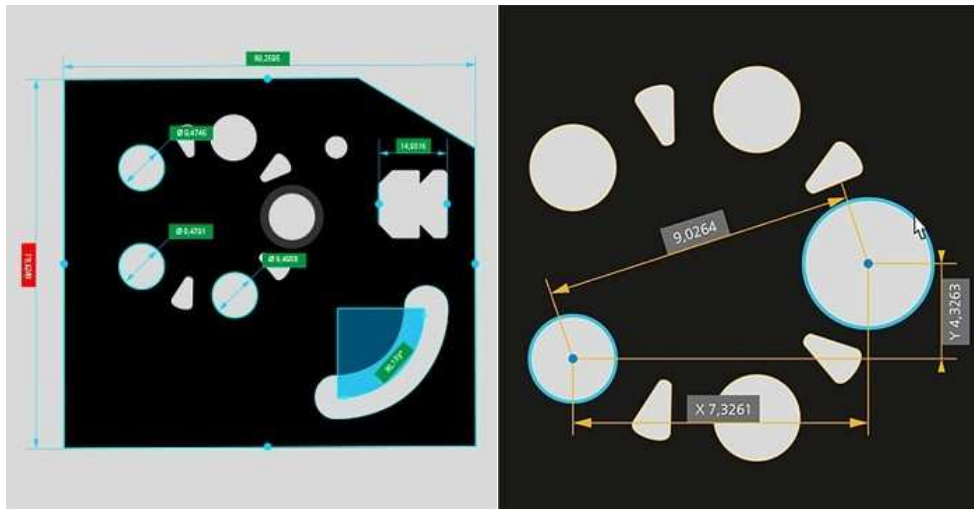
Software na zpracování obrazu vyhodnocuje tvary nasnímaného digitálního obrazu a s vysokou přesností měří požadované rozměry kontrolované součásti. Ovládání bývá jednoduché a intuitivní.



Obr. 29 Ovládání softwaru pomocí dotykové obrazovky [17]

Měření se provádí přímo v obraze a díky zpracování CAD dat je možná okamžitá kontrola s výkresem součásti. Některé programy mají funkci reverzního designu, to znamená, že z digitálního obrazu

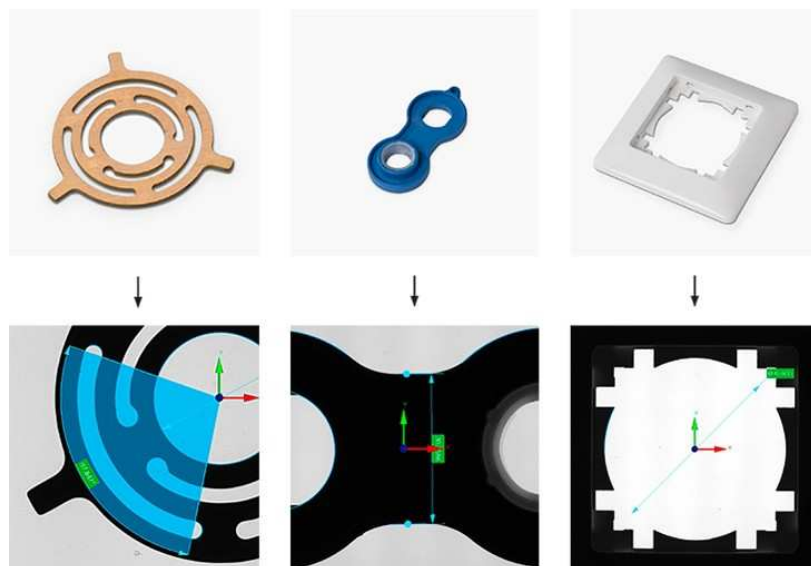
vytvoří výkres součásti. Software také umožňuje vytvářet měřicí programy, které urychlují práci a usnadňují opakovaná měření pro sériovou výrobu. U součástí, pro které byl vytvořen měřicí plán, systém rozpozná umístěnou součást a automaticky načte program. Výsledkem je automatický výstup nebo tištěná zpráva. Další možností je například sběr dat pro SPC a archivace naměřených dat.



Obr. 30 Příklad měření v obraze [17]

### 3.4.3 Oblast využití

Je v podstatě stejná jako u klasických profilprojektorů. Uplatnění nachází v automobilovém a elektronickém průmyslu nebo při zpracování plastů. Je vhodný zejména ke kontrole vzdáleností, poloměrů a úhlů. Obvyklé zkušební součástky představují perforované a ohýbané díly nebo injekčně tvarované a laserem řezané součásti, jak je ukázáno na obrázku.



Obr. 31 Příklad součástí měřených na digitálním profilprojektoru [17]

## 4 Měření

### 4.1 Použité měřicí zařízení

Měření probíhalo na měřicím pracovišti společnosti Stokvis Promi s.r.o. na profilprojektoru Mitutoyo PJ-A3000, model PJ-A3010F-200 s hranovým senzorem Optoeye 200 a vyhodnocovací jednotkou QM – Data 200.

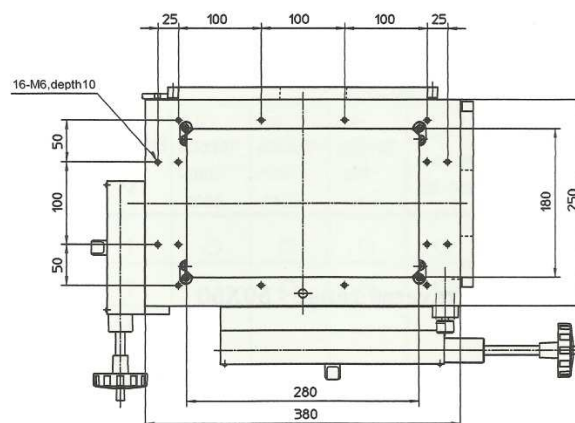


Obr. 32 Měřicí stanoviště s profilprojektorem

#### 4.1.1 Specifikace použitého profilprojektoru [20]

Měřicí stůl

Pojzdový rozsah (X × Y)(mm): 200x100  
Rozměry stolu (mm): 380x250  
Rozměry skla stolu (mm): 266x170  
Výška (mm): 75,5



Obr.33 Rozměry křížového měřicího stolu [20]



Měřicí systém: lineární měřítko

Vestavěný zobrazovač X, Y      Číslcová kroková hodnota: 1  $\mu$ m  
Rozsah ukazatele:  $\pm 999,999$  mm  
Funkce:      Nulová poloha  
             Směr počítání  
             Přepínání mezi Inch/mm  
Datový výstup: osa X, Y / úhel

Zvětšení použitého objektivu: 10X

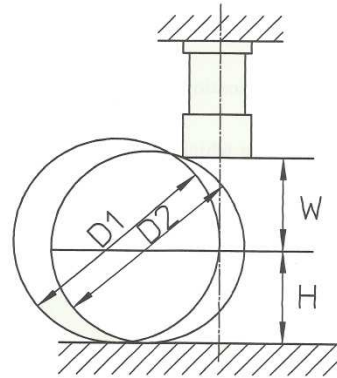
Možnosti projekce přes dolní osvětlení

Zvětšení: 10X  
Zorné pole: 31,5 mm  
W: 66,0mm  
H: 92,5 mm  
D<sub>1</sub>: 185 mm  
D<sub>2</sub>: 154 mm

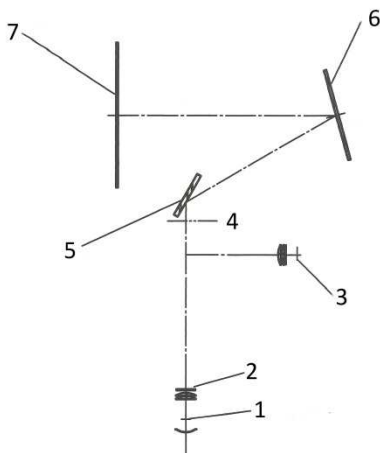
Možnosti projekce přes horní osvětlení

Zvětšení: 10X  
Zorné pole: 31,5 mm  
W: 20,0 mm  
H: 92,5 mm  
D<sub>1</sub>: 185 mm  
D<sub>2</sub>: 120 mm

W..... Pracovní vzdálenost  
H..... Maximální výška dílce  
D<sub>1</sub>..... Maximální průměr válce jehož okraj  
         může být projektován na středovém  
         bodě obrazovky  
D<sub>2</sub>..... Maximální průměr válce jehož okraj  
         může být projektován na okraji  
         obrazovky



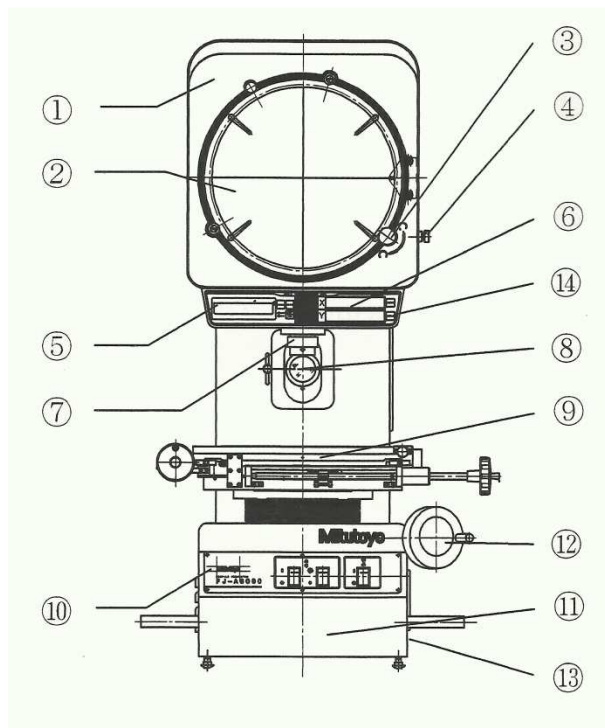
Obr 34 Možnosti měření [20]



Obr.35 Průchod paprsků [20]

- 1 - žhavicí vlákno
- 2 - teplo pohlcující filtr
- 3 - žhavicí vlákno
- 4 - vestavěná rovina pro objektiv
- 5 - první zrcátko
- 6 - druhé zrcátko
- 7 - matnice

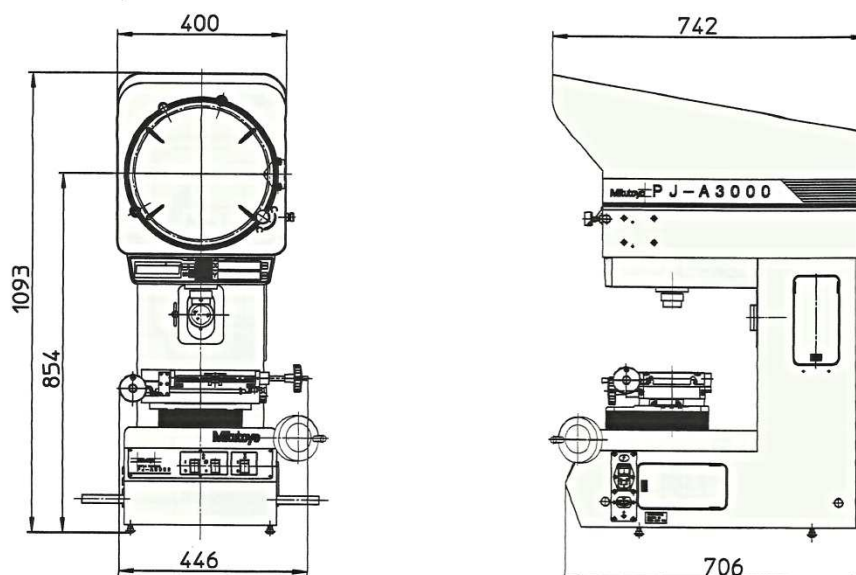
Jednotlivé části a hlavní rozměry jsou znázorněny na následujících obrázcích.



- 1) Hlava projektoru
- 2) Otočná matnice
- 3) Otočný knoflík matnice
- 4) Pojistný knoflík matnice
- 5) Ukazatel úhlu
- 6) Zobrazovač (ukazatel) os X, Y
- 7) Objektiv
- 8) Horní světelná lampa, čočka kondenzoru pro horní světelnou lampu
- 9) Měřicí stůl
- 10) Obsluhový panel
- 11) Dolní osvětlení (vnitřní)
- 12) Ruční kolo pro zaostřování
- 13) Připojovací panel
- 14) Výstup pro zobrazení X, Y

Obr.36 Popis jednotlivých částí[20]

### PJ-A3010F-200



Obr. 37 Vnější rozměry profilprojektoru[20]

#### 4.1.2 Vyhodnocovací jednotka Qm – Data 200 [21]

Základní funkce měření

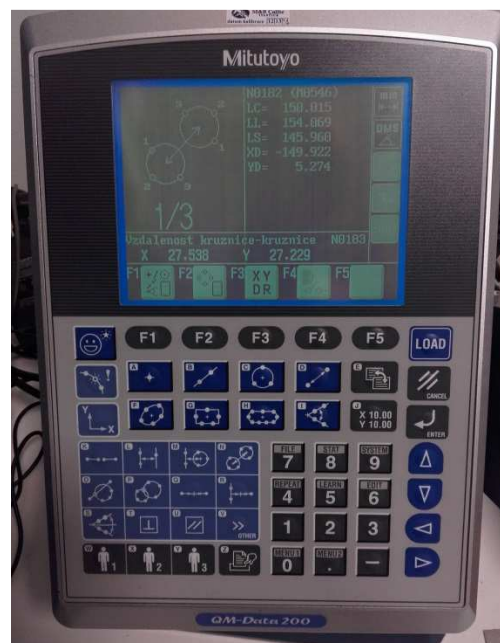
- Měření bodu
- Měření přímé čáry
- Měření kruhu
- Měření vzdálenosti mezi dvěma body
- Měření elipsy
- Měření obdélníkového otvoru
- Měření drážky
- Měření vrcholu úhlu (získání průsečíku a úhlu svíraného dvěma přímými čarami)

Makroinstrukce měření

- Měření roztečí
- Měření vzdálenosti mezi přímkou a bodem
- Měření vzdálenosti mezi dvěma kružnicemi
- Měření průsečíků přímky a kružnice
- Měření průsečíků dvou kružnic
- Měření středu úsečky
- Měření středového bodu mezi přímkou a bodem
- Měření osy úhlu zadaného dvěma přímkami
- Měření kolmosti dvou přímek
- Měření rovnoběžnosti dvou přímek

Funkce AI

Měření pomocí funkce umělé inteligence je funkcí automatického rozpoznání typu měřeného objektu.



Obr. 38 Vyhodnocovací jednotka QM – Data 200

#### 4.1.3 Hranový senzor OPTOEYE – 200

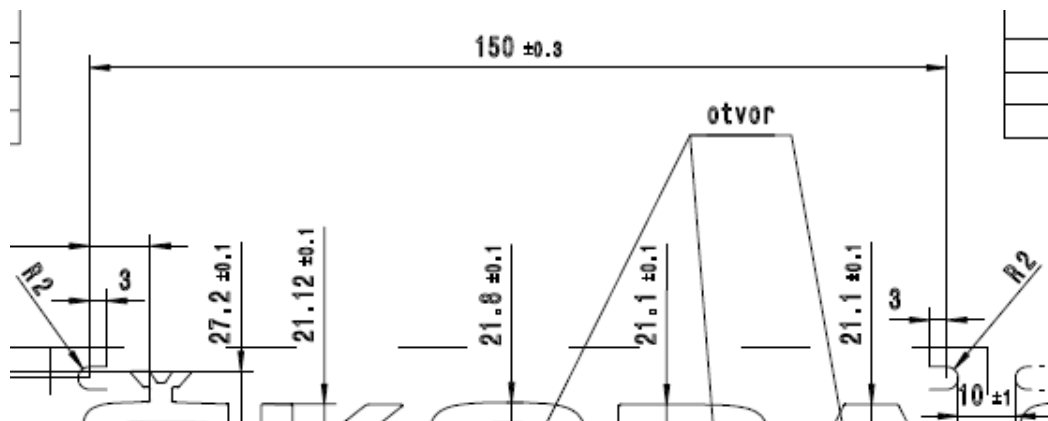
Toto zařízení automaticky rozpozná konturu měřeného dílce na matnici projektoru, když je připojeno k vyhodnocovací jednotce QM – Data 200.



Obr. 39 Jednotka hranového senzoru OPTOEYE – 200

#### 4.2 Specifikace měřené součásti

Jedná se o výseky z oboustranně lepící polyetylenové pěny s uzavřenou strukturou o tloušťce 0,5 mm na nosiči ze silikonizovaného papíru, které se používají k přilepení označení automobilu na karoserii. Měří se rozteče zakládacích otvorů (vzdálenost středů poloměrů), jde rozměr  $150 \pm 0,3$  mm, viz obr.



Obr.40 Část výkresu společnosti Megatech s vyobrazením zakládacích otvorů (rozměr  $150 \pm 0,3$ )



Obr.41 Měřený díl

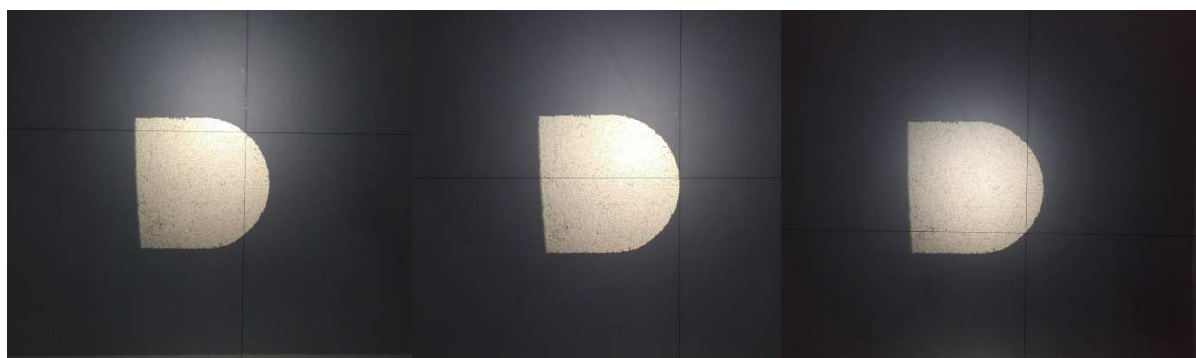
### 4.3 Postup měření

Po spuštění profilprojektoru se kontrolované díly umístí na měřicí stůl. Pomocí páček rychloposuvu a vestavných měřicích šroubů se pohybuje stolem ve směru souřadnic X a Y tak, aby se na matnici zobrazil měřený segment. Obraz se zaostří otáčením ručního kola pro zaostřování.



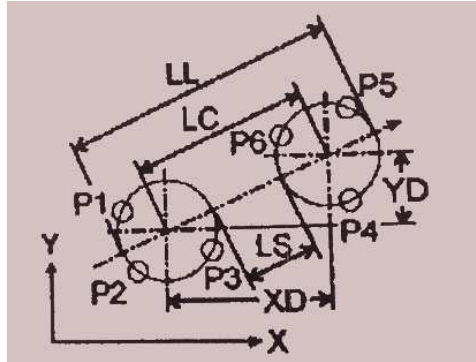
Obr. 42 Umístění měřených dílů na měřicí stůl

Při měření pomocí nitkového kříže se nejprve na vyhodnocovací jednotce vybere požadovaná funkce měření, v našem případě je to vzdálenost kružnic. Na obrazovce vyhodnocovací jednotky se zobrazí schéma měření a začne blikat bod, který se má měřit. Na každé kružnici jsou to tři libovolné body. Nasnímání bodu se provede zaměřením nitkového na bod pomocí pohybu stolku a následným stlačením nožního spínače nebo tlačítka LOAD na vyhodnocovací jednotce.



Obr. 43 Zaměření bodu na kružnici, příp. části kružnice

Po nasnímání posledního bodu se na obrazovce vyhodnocovací jednotky zobrazí naměřené hodnoty LC, LL, LS, XD a YD. Význam hodnot je znázorněn na obrázku.



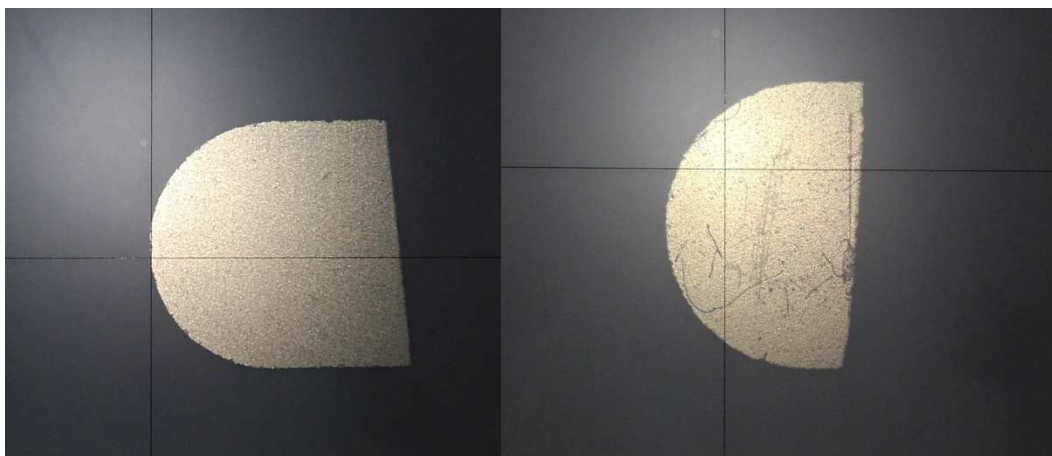
Obr. 44 Význam naměřených hodnot [21]

Při použití hranového senzoru OPTOEYE – 200 je před měřením nejprve potřeba provést kalibraci. Ta se provede stisknutím tlačítka START na jednotce hranového senzoru, následně se rozsvítí LED indikace „DARK“, pohybuje se stolcem tak, aby pod snímačem hranového senzoru na matnici byla tmavá plocha, a zmáčkne se tlačítko SET. Stejný postup se opakuje pro světlou plochu po rozsvícení LED indikace „BRIGHT“. Pak se na vyhodnocovací jednotce zapne požadovaná funkce měření a klávesou F4 se aktivuje snímač hranového senzoru. Přejetím hrany se nasnímá bod. Před každým požadovaným přechodem hrany se snímač hranového senzoru musí aktivovat klávesou F4.

#### 4.4 Porovnání měření pomocí nitkového kříže a hranového senzoru

Jelikož měříme otvory vysekuté v papíru, může být někdy složité vybrat správné body pro definici daného geometrického tvaru, protože z kontury mohou místy vyčnívat nedoseknutá vlákna. Při použití hranového senzoru by mohl být tento problém ještě výraznější.

V tabulce 1 jsou hodnoty dvou vzorků naměřené pomocí nitkového kříže a hranového senzoru. Předepsaná rozteč zakládacích otvorů vzorku A je  $150 \pm 0,3 \text{ mm}$ , vzorku B  $180,1 \pm 0,4 \text{ mm}$ . Vzorek A má hladší konturu a u vzorku B jsou patrná nedoseknutá vlákna a nečistoty, jak je vidět na obrázku.



Obr. 45 Vzorek A (vlevo) a vzorek B (vpravo)

Tab. 1 Porovnání měření pomocí nitkového kříže a měření hranovým senzorem

vzorek	A [mm]		B [mm]	
	Nitkový kříž	Hranový senzor	Nitkový kříž	Hranový senzor
1	150,069	150,078	180,327	180,355
2	150,076	150,136	180,339	180,937
3	150,082	150,065	180,330	180,172
4	150,085	150,111	180,343	180,106
5	150,086	150,110	180,351	180,922
6	150,088	150,217	180,357	180,423
7	150,079	150,032	180,345	180,275
8	150,083	150,133	180,332	180,374
9	150,077	150,126	180,322	181,554
10	150,073	150,110	180,334	180,340
průměr	<b>150,080</b>	<b>150,112</b>	<b>180,338</b>	<b>180,546</b>
rozpětí	<b>0,019</b>	<b>0,185</b>	<b>0,035</b>	<b>1,448</b>
sm. odchylka	<b>0,00609</b>	<b>0,04945</b>	<b>0,01105</b>	<b>0,45226</b>

Hodnoty naměřené pomocí nitkového kříže mají mnohem menší rozpětí, u vzorku B je tento rozdíl ještě markantnější, protože kontura otvoru je členitější a hranový senzor tak detekuje body, které neleží na kružnici. Pro tuto aplikaci je lepší používat měření pomocí nitkového kříže, protože lze lépe body zaměřit, navíc časová úspora při používání hranového senzoru není příliš velká.

## 4.5 Hodnocení stability procesu [22]

Při hodnocení stability procesu se využívají indexy způsobilosti procesu  $C_p$  a  $C_{pk}$ , které představují poměr předepsané a skutečně dosahované variability procesu. Způsobilost je schopnost procesu trvale dosahovat stanovených parametrů kvality.

### 4.5.1 Měření a výpočet parametrů

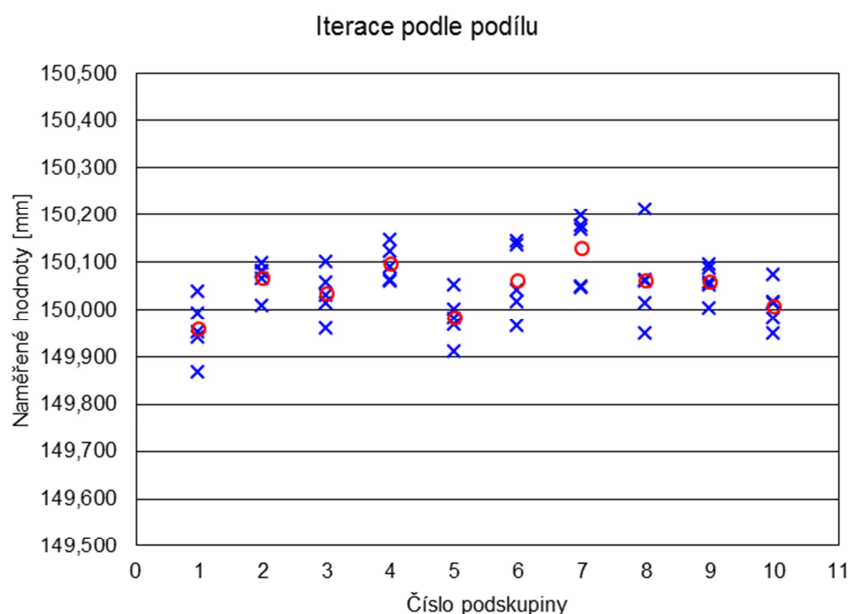
Pro určení způsobilosti procesu bylo naměřeno 50 vzorků, vždy po pěti kusech z jedné role. V následující tabulce jsou naměřené hodnoty společně s výpočtem hodnoty aritmetického průměru naměřených dílů z jedné role  $\bar{x}_j$  vypočítané podle (4.1) a jejich rozpětí  $R_j$  jako rozdíl maximální a minimální naměřené hodnoty.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4.1)$$

Tab. 2 Hodnoty pro zjištění stability procesu

j	naměřené hodnoty					$\bar{x}_j$	$R_j$
1	149,951	150,037	149,867	149,990	149,941	149,96	0,170
2	150,082	150,065	150,007	150,078	150,096	150,07	0,089
3	150,101	149,959	150,014	150,030	150,057	150,03	0,142
4	150,147	150,088	150,122	150,060	150,061	150,10	0,087
5	149,999	150,050	149,910	149,966	149,980	149,98	0,140
6	150,017	150,142	150,039	149,963	150,136	150,06	0,179
7	150,168	150,196	150,175	150,046	150,049	150,13	0,150
8	150,211	149,949	150,061	150,059	150,013	150,06	0,262
9	150,002	150,085	150,055	150,052	150,094	150,06	0,092
10	149,980	149,947	150,014	150,072	150,015	150,01	0,125

V následujícím grafu jsou zobrazeny naměřené hodnoty a je zde patrná jedna odlehlejší hodnota u podskupiny 8, která mohla být způsobena regulačním zásahem ve výrobě. Jinak diagram neukazuje žádné další odlehle hodnoty a nekonzistentní podskupiny.



Obr. 46 Diagram průběhu hodnot podle podílu

V tabulce 3 jsou zaznamenány toleranční meze (horní – USL, dolní – LSL), konstanty pro regulační meze  $D_3$ ,  $D_4$ ,  $A_2$ , dělitel pro odhad směrodatné odchylky  $d_2$ , počet podskupin  $k$  a rozsah podskupiny  $n$ . Hodnoty konstant a dělitele jsou z Tabulky konstant a vzorců pro regulační diagramy [22].

Tab. 3 Konstanty potřebné pro určení stability procesu

USL	150,3	k	10
LSL	149,7	n	5
$D_4$	2,114	$d_2$	2,326
$D_3$	0,000	$A_2$	0,577



Výpočet průměrné hodnoty rozpětí  $\bar{R}$  [22]

$$\bar{R} = \frac{\sum_{j=1}^k R_j}{k} \quad (4.2)$$

$$\bar{R} = \frac{\sum_{j=1}^k 1,436}{10} = 0,14$$

Regulační meze pro průměrnou hodnotu rozpětí[22]

$$UCL_R = D_4 \cdot \bar{R} \quad (4.3)$$

$$LCL_R = D_3 \cdot \bar{R} \quad (4.4)$$

$$UCL_R = 2,114 \cdot 0,14 = 0,30$$

$$LCL_R = 0 \cdot 0,14 = 0$$

Centrální přímka[22]

$$CL = \hat{\mu}_0 = \bar{\bar{x}} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \bar{x}_j \quad (4.5)$$

$$CL = \frac{1500,44}{10} = 150,04$$

Regulační meze pro střední hodnotu znaku jakosti[22]

$$UCL_x = \bar{\bar{x}} - A_2 \cdot \bar{R} \quad (4.6)$$

$$LCL_x = \bar{\bar{x}} + A_2 \cdot \bar{R} \quad (4.7)$$

$$UCL_x = 150,04 - 0,577 \cdot 0,14 = 149,96$$

$$LCL_x = 150,04 + 0,577 \cdot 0,14 = 150,13$$

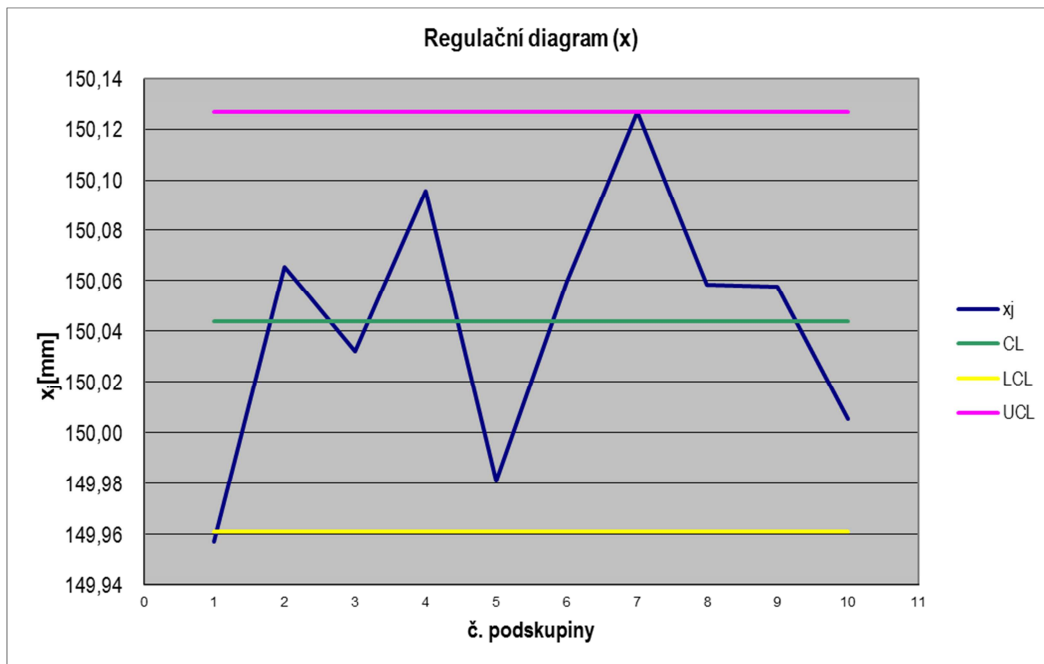
Odhad indexů způsobilosti procesu [22]

$$\hat{C}_p = \frac{USL - LSL}{6\hat{\sigma}} = \frac{USL - LSL}{6 \frac{\bar{R}}{d_2}} \quad (4.8)$$

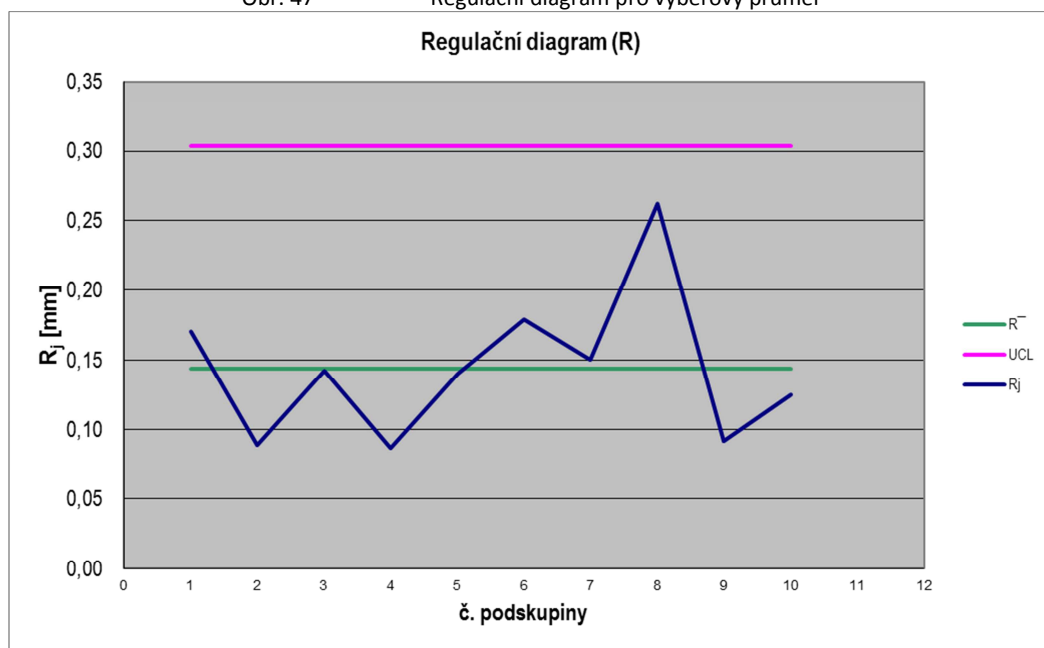
$$\hat{C}_{pk} = \min\left(\frac{USL - \hat{\mu}}{3\hat{\sigma}}, \frac{\hat{\mu} - LSL}{3\hat{\sigma}}\right) = \min\left(\frac{USL - \bar{\bar{x}}}{3 \frac{\bar{R}}{d_2}}, \frac{\bar{\bar{x}} - LSL}{3 \frac{\bar{R}}{d_2}}\right) \quad (4.9)$$

$$\hat{C}_p = \frac{150,3 - 149,7}{6 \frac{0,14}{2,326}} = 1,62$$

$$\hat{C}_{pk} = \min\left(\frac{150,3 - 150,04}{3 \frac{0,14}{2,326}}, \frac{150,04 - 149,7}{3 \frac{0,14}{2,326}}\right) = 1,38$$



Obr. 47 Regulační diagram pro výběrový průměr



Obr. 48 Regulační diagram pro výběrové rozpětí

Odhadovaná hodnota indexů způsobilosti procesu je větší než 1,33 a to znamená, že proces je stabilní pro zahájení výroby.

## 4.6 Hodnocení opakovatelnosti a reprodukovatelnost měřidla

### 4.6.1 Opakovatelnost [23]

Variabilita měření získaných jedním měřicím přístrojem, který několikrát použije operátor na měření identické charakteristiky u stejného dílu. Obecně je označována jako EV – variabilita zařízení.

#### 4.6.2 Reprodukovatelnost [23]

Variabilita průměru měření provedených různými operátory při použití jednoho měřidla a měření charakteristik jednoho dílu. Obecně je označována jako AV – variabilita operátora.

#### 4.6.3 Opakovatelnost a reprodukovatelnost měřidla (GRR nebo Gage R&R) [23]

Jedná se o kombinovaný odhad opakovatelnosti a reprodukovatelnosti systému měření. Způsobilost systému měření může a nemusí zahrnovat účinky času, v závislosti na použité metodě.

Kritéria opakovatelnosti a reprodukovatelnosti (GRR) [23]:

- GRR pod 10%

Obecně platí, že se jedná o přijatelný systém měření, doporučuje se a lze jej využít především v případě třídění nebo klasifikování dílů nebo požaduje-li se zpřísněná regulace procesu.

- GRR 10% až 30%

Systém může být přijatelný pro některé aplikace. Rozhodnutí by mělo vycházet z důležitosti měření aplikace, nákladů vynaložených na měřicí zařízení, z nákladů na přepracování nebo opravu. Měl by být schválený zákazníkem.

- GRR nad 30%

Systém se považuje za nepřijatelný, Veškeré úsilí se má vynaložit na zlepšení systému měření, použitím vhodné strategie měření.

#### 4.6.4 Měření a výpočet parametrů

Pro měření bylo vybráno 10 dílů a každý díl se měřil třikrát. Měření prováděli 3 operátoři. Naměřené hodnoty jsou zaneseny v následující tabulce.

Tab. 4 Sběr dat o opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měřidla

operátor č. měření	díl										průměr	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
A	1	149,844	150,097	149,985	150,032	149,941	150,202	150,225	150,234	150,050	149,931	<b>150,054</b>
	2	149,851	150,105	149,999	150,024	149,932	150,191	150,211	150,236	150,039	149,939	<b>150,053</b>
	3	149,859	150,112	149,987	150,039	149,935	150,189	150,221	150,244	150,052	149,928	<b>150,057</b>
průměr	<b>149,851</b>	<b>150,105</b>	<b>149,990</b>	<b>150,032</b>	<b>149,936</b>	<b>150,194</b>	<b>150,219</b>	<b>150,238</b>	<b>150,047</b>	<b>149,933</b>	$\bar{X}_a = 150,0545$	
rozpětí	<b>0,015</b>	<b>0,015</b>	<b>0,014</b>	<b>0,015</b>	<b>0,009</b>	<b>0,013</b>	<b>0,014</b>	<b>0,01</b>	<b>0,013</b>	<b>0,011</b>	$\bar{R}_a = 0,013$	
B	1	149,866	150,110	150,023	150,041	149,981	150,187	150,212	150,234	150,066	149,936	<b>150,066</b>
	2	149,856	150,112	150,012	150,045	149,962	150,196	150,227	150,229	150,064	149,945	<b>150,065</b>
	3	149,869	150,102	150,018	150,044	149,973	150,183	150,224	150,246	150,076	149,954	<b>150,069</b>
průměr	<b>149,864</b>	<b>150,108</b>	<b>150,018</b>	<b>150,043</b>	<b>149,972</b>	<b>150,189</b>	<b>150,221</b>	<b>150,236</b>	<b>150,069</b>	<b>149,945</b>	$\bar{X}_b = 150,0664$	
rozpětí	<b>0,013</b>	<b>0,010</b>	<b>0,011</b>	<b>0,004</b>	<b>0,019</b>	<b>0,013</b>	<b>0,015</b>	<b>0,017</b>	<b>0,012</b>	<b>0,018</b>	$\bar{R}_b = 0,013$	
C	1	149,862	150,094	150,012	150,001	149,935	150,189	150,243	150,222	149,997	149,913	<b>150,047</b>
	2	149,861	150,105	150,019	150,009	149,943	150,197	150,232	150,239	150,001	149,926	<b>150,053</b>
	3	149,867	150,087	150,006	150,013	149,954	150,184	150,226	150,234	150,013	149,928	<b>150,051</b>
průměr	<b>149,863</b>	<b>150,095</b>	<b>150,012</b>	<b>150,008</b>	<b>149,944</b>	<b>150,190</b>	<b>150,234</b>	<b>150,232</b>	<b>150,004</b>	<b>149,922</b>	$\bar{X}_c = 150,0504$	
rozpětí	<b>0,006</b>	<b>0,018</b>	<b>0,013</b>	<b>0,012</b>	<b>0,019</b>	<b>0,013</b>	<b>0,017</b>	<b>0,017</b>	<b>0,016</b>	<b>0,015</b>	$\bar{R}_c = 0,015$	
průměr pro díl	<b>149,859</b>	<b>150,103</b>	<b>150,007</b>	<b>150,028</b>	<b>149,951</b>	<b>150,191</b>	<b>150,225</b>	<b>150,235</b>	<b>150,040</b>	<b>149,933</b>	$\bar{X} = 150,0571$ $R_p = 0,376$	

V řádku průměr jsou vypočteny hodnoty aritmetických průměrů třech měření podle vztahu (4.1)

V řádku rozpětí jsou hodnoty rozpětí jednotlivých měření dílu, jako rozdíl největší a nejmenší hodnoty.

V posledním řádku jsou vypočítané hodnoty aritmetického průměru všech měření pro jeden díl podle vztahu (4.1).

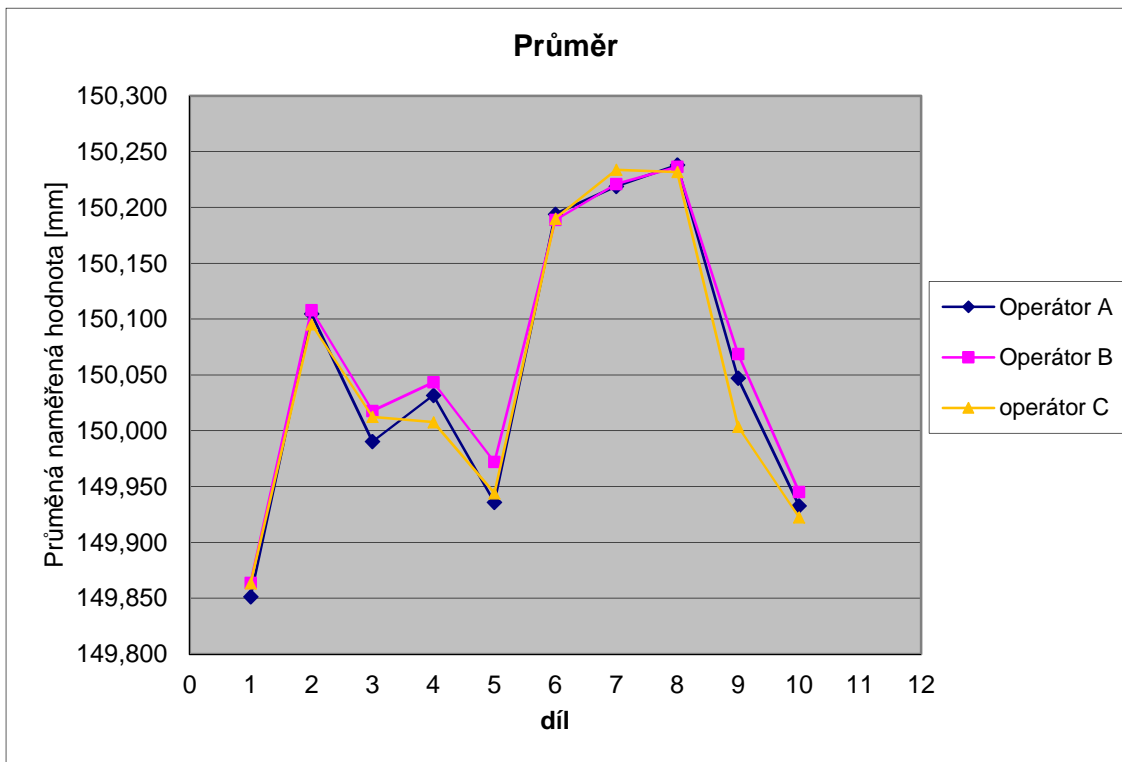
Ve sloupci průměr jsou vypočítané hodnoty aritmetického průměru průměrných hodnot  $\bar{X}_a, \bar{X}_b, \bar{X}_c$  a rozpětí pro každého operátora  $\bar{R}_a, \bar{R}_b, \bar{R}_c$  a dále hodnota  $\bar{X}$  jako aritmetický průměr průměrů pro díl podle vztahu (4.1) a dále hodnota  $R_p$ .

Dále se vypočítá průměr všech rozpětí  $\bar{R}$ , jako aritmetický průměr hodnot  $\bar{R}_a, \bar{R}_b, \bar{R}_c$  podle vztahu (4.1),  $\bar{X}_{DIFF}$  jako rozdíl největší a nejmenší hodnoty z hodnot  $\bar{R}_a, \bar{R}_b, \bar{R}_c$  a hodnota horní regulační meze jednotlivých rozpětí  $UCL_R$  podle vztahu (4.10) [23], kde pro 3 měření je hodnota  $D_4=2,58$ .

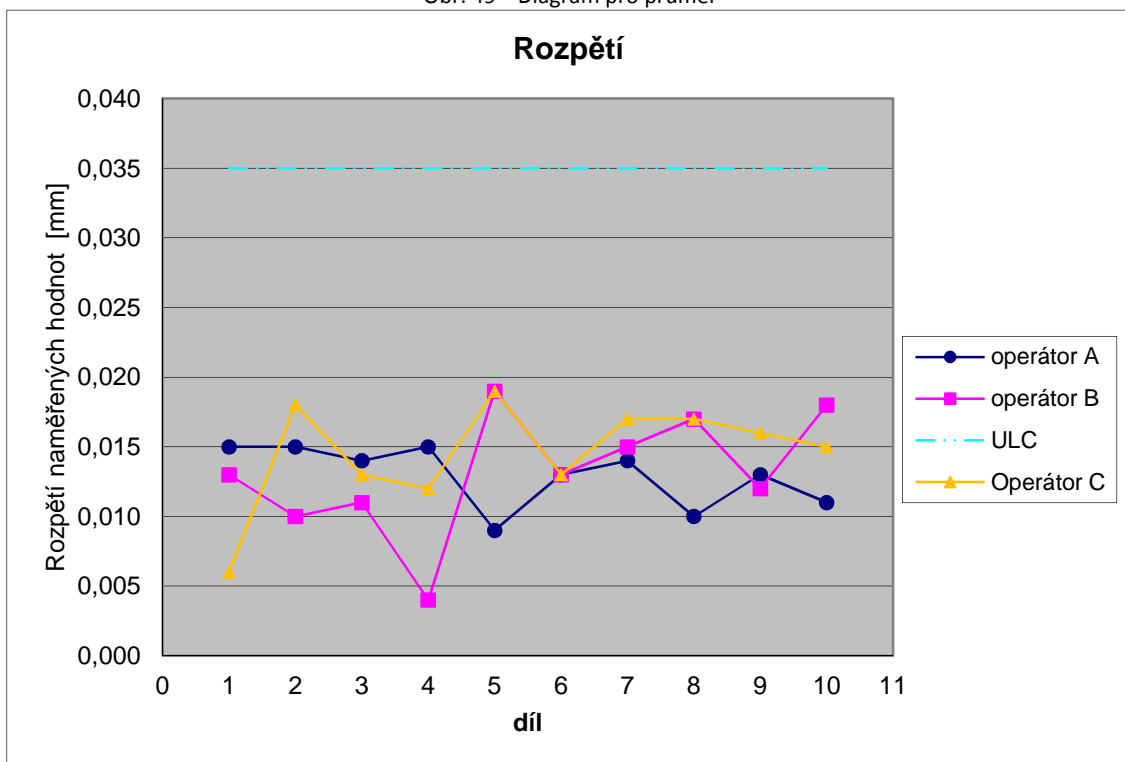
$$UCL_R = \bar{R} \cdot D_4 \quad (4.10)$$

$$UCL_R = 0,0136 \cdot 2,58 = 0,0350$$

Z následujících diagramů je patrné, že systém měření má dostatečný práh citlivosti pro procesy s variabilitou měřenou na vybraných vzorcích. Nejsou zjevné žádné rozdíly mezi jednotlivými operátory.

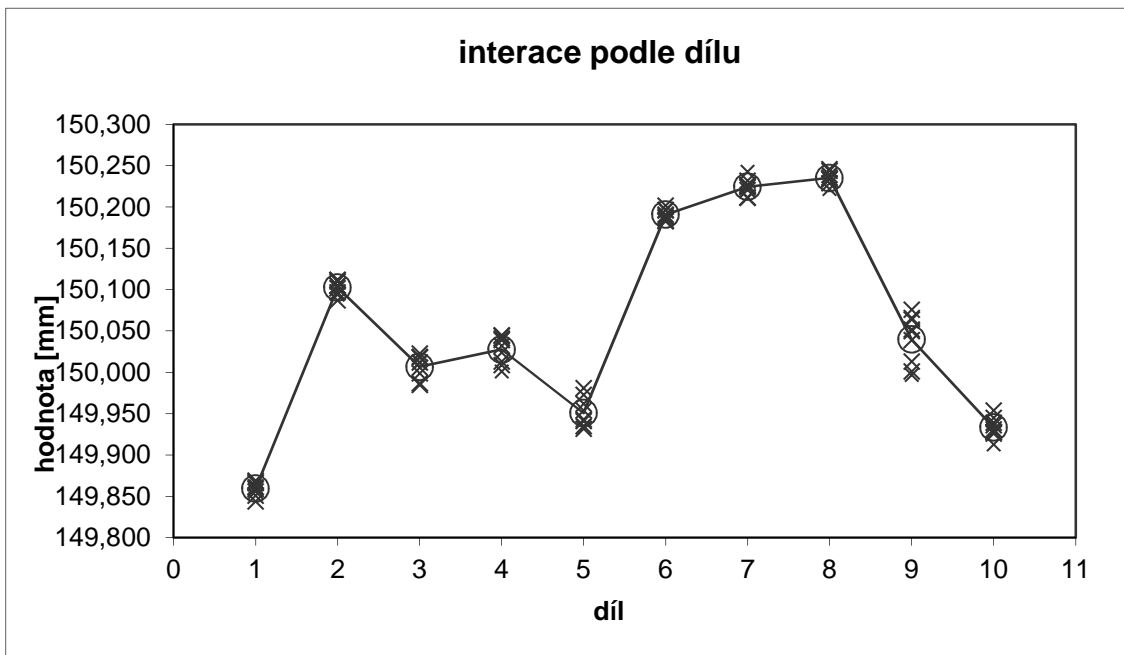


Obr. 49 Diagram pro průměr



Obr. 50 Diagram pro rozpětí

Diagram pro iteraci znázorňuje vliv jednotlivých dílů na konzistenci variability a ukazuje odlehle hodnoty měření. Na následujícím diagramu žádné odlehle hodnoty ani nekonzistentní díly nejsou.



Obr. 51 Průběh hodnot podle dílu

Výpočet variability zařízení EV. [23]

$$EV = \bar{R} \cdot K_1 \quad (4.11)$$

Hodnota koeficientu  $K_1$  je pro 3 měření 0,5908.

$$EV = 0,0136 \cdot 0,5308 = 0,00802$$

Výpočet variability operátora AV [23]

$$AV = \sqrt{(\bar{X}_{DIFF} \cdot K_2)^2 - \left(\frac{EV^2}{nr}\right)} \quad (4.12)$$

kde  $n$  je počet dílů a  $r$  počet měření

Hodnota koeficientu  $K_2$  je pro 3 operátora 0,5231.

$$AV = \sqrt{(0,0160 \cdot 0,5231)^2 - \left(\frac{0,00802^2}{10 \cdot 3}\right)} = 0,00826$$

Výpočet opakovatelnosti a reprodukovatelnosti GRR [23]

$$GRR = \sqrt{EV^2 + AV^2} \quad (4.13)$$

$$GRR = \sqrt{0,00802^2 + 0,00826^2} = 0,01151$$

Výpočet variability dílu PV [23]

$$PV = R_p \cdot K_3 \quad (4.14)$$

Hodnota koeficientu  $K_3$  je pro 10 dílů rovna 0,3146

$$PV = 0,376 \cdot 0,3146 = 0,11825$$

Výpočet celkové variability (TV) [23]

$$TV = \sqrt{GRR^2 + PV^2} \quad (4.15)$$

$$TV = \sqrt{0,01151^2 + 0,11825^2} = 0,11881$$

Výpočet %GRR

$$\%GRR = \frac{GRR}{TV} \cdot 100 \quad (4.16)$$

$$\%GRR = \frac{0,01151}{0,11881} \cdot 100 = 9,69\%$$

Hodnota %GRR je menší než 10%, to znamená, že měřicí systém je přijatelný a lze jej využívat. V příloze 1 je List pro sběr dat o opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měřidla a v příloze 2 je Protokol o opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měřidla.

## 5 Závěr

Při ručním měření na optických měřicích zařízeních může operátor značně ovlivňovat průběh měření, ale jak bylo ukázáno při porovnání měření zaměřením nitkového kříže a hranovým senzorem, existují aplikace, kde ruční měření dosahuje lepší přesnosti měření.

## 7 Seznam použitých symbolů a zkratek:

$\bar{x}$	[mm]	výběrový aritmetický průměr
AV	[-]	variabilita operátora
CL	[-]	centrální přímka
$C_p$	[-]	index způsobilosti procesu
$C_{pk}$	[-]	kritický index způsobilosti procesu
D	[mm]	průměr kružnice
DOF	[mm]	hloubka ostrosti
EV	[-]	variabilita zařízení
f	[mm]	ohnisková vzdálenost
F	[-]	ohnisko
GRR	[-]	opakovatelnost a reprodukovatelnost
H	[mm]	výška
L	[mm]	vzdálenost
LCL	[mm]	horní regulační mez
LSL	[mm]	dolní toleranční mez
M	[-]	zvětšení objektivu
n	[-]	index lomu
N	[-]	počet měření
NA	[-]	numerická apertura
PV	[-]	variabilita dílu
R	[mm]	rozpětí
R	[ $\mu$ m]	rozlišovací schopnost
SPC	[-]	statistická regulace procesu
TV	[-]	celková variabilita
UCL	[mm]	dolní regulační mez
USL	[mm]	horní toleranční mez
W	[mm]	pracovní vzdálenost
$\Delta M$	[-]	přesnost zvětšení objektivu
$\lambda$	[ $\mu$ m]	vlnová délka



## 8 Literatura

- [1] Mlčoch, L. Řízení jakosti a strojírenská metrologie (část Strojírenská metrologie). Praha: Ediční středisko ČVUT, 1986.
- [2] Tichá, Š. Strojírenská metrologie 1. část. In: [www.fs.vsb.cz](http://www.fs.vsb.cz) [online]. FS VŠB – TU Ostrava, 2004. [vid. 18.2.2016]. ,Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>
- [3] Petřkovská, L., Čepová, L. Strojírenská metrologie. In: [www.fs.vsb.cz](http://www.fs.vsb.cz) [online]. FS VŠB – TU Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2723-0 [vid. 18.2.2016]. ,Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2723-0.pdf>
- [4] Terminologie z oblasti metrologie (2. Vydání). In: Sborníky technické harmonizace 2010 [online]. ÚNMZ, 2010. [vid. 9.11.2016]., Dostupné z: [http://www.unmz.cz/files/Sborn%C3%ADky%20TH/Terminologie%20v%20oblasti%20metrologie\\_DEF.pdf](http://www.unmz.cz/files/Sborn%C3%ADky%20TH/Terminologie%20v%20oblasti%20metrologie_DEF.pdf)
- [5] Národní metrologický systém České republiky. In: [www.unmz.cz](http://www.unmz.cz) [online]. ÚZNM, [vid.9.11.2016]., Dostupné z: <http://www.unmz.cz/urad/narodni-metrologicky-system-ceske-republiky>
- [6] Právní předpisy z oblasti metrologie. In: [www.unmz.cz](http://www.unmz.cz) [online]. ÚZNM, [vid.9.11.2016]., Dostupné z: <http://www.unmz.cz/urad/pravni-predpisy-v-oblasti-metrologie>
- [7] Christoph, R., Neumann, H. J. Multisenzorová souřadnicová měřicí technika. Uherské Hradiště: L.V.Print, 2008
- [8] Fyzika 2. Praha:
- [9] [http://dl.mitutoyo.eu/HE/eBook/cz\\_cz/index.html](http://dl.mitutoyo.eu/HE/eBook/cz_cz/index.html)
- [10] Dvořák, R., Chmelík, V., Marek, M. Strojírenská metrologie Návody ke cvičení. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1992. ISBN 80-01-00876-2
- [11] [http://www.unimetra.cz/soubory\\_zbozi/76\\_1.pdf](http://www.unimetra.cz/soubory_zbozi/76_1.pdf)
- [12] <http://www.merici-pristroje.cz/werth-flatscope/>
- [13] Dostupné z: <http://www.deom.cz/digitalni-profilprojektor>
- [14] Dostupné z: <http://www.metrotest.cz/pristroje-pro-mereni/profilprojektory/>
- [15] [http://www.mikroskopy-mikroskop.cz/filemanager/userfiles/PROSPEKTY/Merici\\_a\\_krizove\\_stolky\\_pro\\_stereomikroskop\\_y\\_2012\\_05\\_01.pdf](http://www.mikroskopy-mikroskop.cz/filemanager/userfiles/PROSPEKTY/Merici_a_krizove_stolky_pro_stereomikroskop_y_2012_05_01.pdf)
- [16] [http://www.proexport.cz/katalog/merici-nastroje/merici-a-opticke-pristroje/642-05-3\\_dilensky-merici-mikroskop-am-2/](http://www.proexport.cz/katalog/merici-nastroje/merici-a-opticke-pristroje/642-05-3_dilensky-merici-mikroskop-am-2/)
- [17] <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/opticka-merici-technika/o-select.html>
- [18] <http://www.microtes.cz/Tesa/profilprojektory-T.pdf>
- [19] Vojkuláková, Z. Světelná mikroskopie. In: studijní opory [online]. FSI VUT Brno [vid. 2.1.2017]., Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/sm/Principy%20zobrazovani.html>
- [20] PJ-A3000 Series Measuring Projector User's Manual. No. 99MBA043A, Mitutoyo Corporation
- [21] QM-Data 200 Jednotka pro zpracování dat v režimu 2D Uživatelská příručka (Programové vybavení). Č.99MBA040A, Mitutoyo Corporation
- [22] QS-9000 SPC. Česká společnost pro jakost. Český Krumlov, 1999. ISBN 80-02-01293-3
- [23] Analýza systémů měření (MSA) Příručka. 4. vydání. Česká společnost pro jakost. Praha, 2010. ISBN 778-80-02-02323-5

## 9 Seznam příloh

1. List pro sběr dat o opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měřidla
2. Protokol o opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měřidla

### List pro sběr dat o opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měřidla

operátor č. měření	díł										průměr	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
A	1	149,844	150,097	149,985	150,032	149,941	150,202	150,225	150,234	150,050	149,931	150,054
	2	149,851	150,105	149,999	150,024	149,932	150,191	150,211	150,236	150,039	149,939	150,053
	3	149,859	150,112	149,987	150,039	149,935	150,189	150,221	150,244	150,052	149,928	150,057
průměr	149,851	150,105	149,990	150,032	149,936	150,194	150,219	150,238	150,047	149,933	$\bar{X}_a = 150,0545$	
rozpětí	0,015	0,015	0,014	0,015	0,009	0,013	0,014	0,01	0,013	0,011	$\bar{R}_a = 0,013$	
B	1	149,866	150,110	150,023	150,041	149,981	150,187	150,212	150,234	150,066	149,936	150,066
	2	149,856	150,112	150,012	150,045	149,962	150,196	150,227	150,229	150,064	149,945	150,065
	3	149,869	150,102	150,018	150,044	149,973	150,183	150,224	150,246	150,076	149,954	150,069
průměr	149,864	150,108	150,018	150,043	149,972	150,189	150,221	150,236	150,069	149,945	$\bar{X}_b = 150,0664$	
rozpětí	0,013	0,010	0,011	0,004	0,019	0,013	0,015	0,017	0,012	0,018	$\bar{R}_b = 0,013$	
C	1	149,862	150,094	150,012	150,001	149,935	150,189	150,243	150,222	149,997	149,913	150,047
	2	149,861	150,105	150,019	150,009	149,943	150,197	150,232	150,239	150,001	149,926	150,053
	3	149,867	150,087	150,006	150,013	149,954	150,184	150,226	150,234	150,013	149,928	150,051
průměr	149,863	150,095	150,012	150,008	149,944	150,190	150,234	150,232	150,004	149,922	$\bar{X}_c = 150,0504$	
rozpětí	0,006	0,018	0,013	0,012	0,019	0,013	0,017	0,017	0,016	0,015	$\bar{R}_c = 0,015$	
průměr pro díł	149,859	150,103	150,007	150,028	149,951	150,191	150,225	150,235	150,040	149,933	$\bar{X} = 150,0571$ $\bar{R}_p = 0,376$	
$\bar{R} = (\bar{R}_a + \bar{R}_b + \bar{R}_c) / g$											$\bar{R} = 0,0136$	
$\bar{X}_{DIFF} = \text{Max } \bar{X} - \text{Min } \bar{X}$											$\bar{X}_{DIFF} = 0,0160$	
$UCL_R = D_4 \times \bar{R}$											$UCL_R = 0,0350$	
<p>*D<sub>4</sub>=3,27 pro 2 měření a 2,58 pro 3 měření. UCL<sub>R</sub> představuje mez pro jednotlivá R. Označí se hodnoty mimo tuto mez. Identifikuje se příčina a uskuteční se náprava. Čtení se opakuje se stejným operátorem a na téže jednotce, která byla původně použita, nebo se hodnoty vyřadí a opakovaně se přepočítá a mez.</p>												
Poznámky:												

## Protokol o opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měřidla

Číslo a název dílu	Y991610	název měřidla	profil projektor	datum	15.12.2016																	
Znaky	délka	číslo měřidla	75	provedl	JAMO																	
Specifikace	150 ± 0,3 mm	typ měřidla	optika																			
Operátoři g=		3	díly n=		10																	
			měření r=		3																	
Hodnoty z listu pro sběr dat:		$\bar{R} =$	0,0136	$\bar{X}_{DIFF} =$	0,0160																	
				$R_p =$	0,376																	
<b>Analýza měřicí jednotky</b>			<b>% celkové variability (TV)</b>																			
Opakovatelnost - variabilita zařízení (EV)			$\%EV = \frac{EV}{TV} \times 100 = \underline{6,75\%}$																			
$EV = \bar{R} \times K_1 = \underline{0,00802}$		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">počet měření</th> <th style="text-align: center;"><math>K_1</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">0,8862</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">0,5908</td> </tr> </tbody> </table>				počet měření	$K_1$	2	0,8862	3	0,5908											
počet měření	$K_1$																					
2	0,8862																					
3	0,5908																					
Reprodukovatelnost - Variabilita operátora (AV)			$\%AV = \frac{AV}{TV} \times 100 = \underline{6,95\%}$																			
$AV = \sqrt{(\bar{X}_{DIFF} \times K_2)^2 - (EV^2/n)}$																						
$AV = \underline{0,00826}$		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">operátoři</th> <th style="text-align: center;"><math>K_2</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">0,7071</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">0,5231</td> </tr> </tbody> </table>	operátoři	$K_2$	2	0,7071	3	0,5231														
operátoři	$K_2$																					
2	0,7071																					
3	0,5231																					
Opakovatelnost a reprodukovatelnost (GRR)			$\%GRR = \frac{GRR}{TV} \times 100 = \underline{9,69\%}$																			
$GRR = \sqrt{EV^2 + AV^2}$																						
$GRR = \underline{0,01151}$		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">díly</th> <th style="text-align: center;"><math>K_3</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">0,7071</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">0,5231</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">0,4467</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">5</td> <td style="text-align: center;">0,4030</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">6</td> <td style="text-align: center;">0,3742</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">7</td> <td style="text-align: center;">0,3534</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">8</td> <td style="text-align: center;">0,3375</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">9</td> <td style="text-align: center;">0,3249</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">10</td> <td style="text-align: center;">0,3146</td> </tr> </tbody> </table>	díly	$K_3$	2	0,7071	3	0,5231	4	0,4467	5	0,4030	6	0,3742	7	0,3534	8	0,3375	9	0,3249	10	0,3146
díly	$K_3$																					
2	0,7071																					
3	0,5231																					
4	0,4467																					
5	0,4030																					
6	0,3742																					
7	0,3534																					
8	0,3375																					
9	0,3249																					
10	0,3146																					
Varibilita dílu (PV)			$\%PV = \frac{PV}{TV} \times 100 = \underline{99,53\%}$																			
$PV = R_p \times K_3$																						
$PV = \underline{0,11825}$																						
Celková variabilita (TV)			$ndc = \frac{PV}{GRR} \times 1,41 = \frac{14,488}{\sim 14}$																			
$TV = \sqrt{GRR^2 + PV^2} = \underline{0,11881}$																						
Závěr																						
Poznámky																						
Konstanty a vzorce dle příručky MSA Reference manual, 4. vydání																						