

# Provjera pravocrtnosti 1D mjernog uređaja

---

**Radić, Lucija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:401227>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-27**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Lucija Radić**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Vedran Šimunović, dipl. ing.

Student:

Lucija Radić

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno pritom koristeći znanja stečena tijekom studija uz navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Vedranu Šimunoviću na svojoj pruženoj pomoći prilikom izrade i pisanja rada te uloženom vremenu i trudu.

Posebno se zahvaljujem svome suprugu i obitelji koji su mi sve studentske dane činili lakšima.

Lucija Radić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 01	
Ur.broj: 15 - 24 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: Lucija Novak

JMBAG: 0035217179

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**Provjera pravocrtnosti 1D mjernog uređaja**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**Straightness Verification of a 1D Measuring Device.**

Opis zadatka:

Laserski interferometri često su korišteni mjerni uređaji u dimenzionalnom mjeriteljstvu. Njihovu primjenu nalazimo u mjerenju duljine i umjeravanju mjerne opreme. Ovim uređajima moguće je mjeriti pomak, kut, odstupanje od pravocrtnosti, ravnost i dr. U ovom radu bit će primijenjen Renishaw ML10 laserski interferometar za utvrđivanje pravocrtnosti pomaka 1D mjernog uređaja.

U radu je potrebno:

1. Opisati mjerenje pravocrtnosti laserskim interferometrom.
2. Provesti mjerenja.
3. Utvrditi pogrešku pravocrtnosti pomaka 1D mjernog uređaja.
4. Analizirati dobivene rezultate.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

16. studenoga 2023.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Vedran Šimunović

Datum predaje rada:

18. siječnja 2024.

Predviđeni datumi obrane:

22. – 26. siječnja 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

**SADRŽAJ**

<b>SADRŽAJ</b> .....	1
<b>POPIS SLIKA</b> .....	3
<b>POPIS TABLICA</b> .....	5
<b>POPIS OZNAKA</b> .....	6
<b>SAŽETAK</b> .....	7
<b>SUMMARY</b> .....	8
<b>1. UVOD [1]</b> .....	1
<b>2. OSNOVE INTERFEROMETRIJE [1]</b> .....	2
<b>2.1. PRIMIJENJENA INTERFEROMETRIJA</b> .....	2
<b>2.2. INTERFEROMETAR ZA MJERENJE POMAKA</b> .....	4
<b>3. LINEARNO MJERENJE [2]</b> .....	5
<b>3.1. POSTUPAK IZVOĐENJA LINEARNOG MJERENJA</b> .....	5
<b>3.2. POSTAVLJANJE LINEARNOG MJERENJA</b> .....	6
<b>3.3. LINEARNA OPTIKA ZA MJERENJE</b> .....	8
<b>3.4. PORAVNANJE LINEARNOG SNOPA (engl. ALIGNMENT)</b> .....	9
<b>3.4.1. Pozicioniranje linearnog interferometra i reflektora</b> .....	9
<b>3.4.2. Jednostavan postupak linearnog poravnanja</b> .....	13
<b>4. INTERFEROMETRIJSKO MJERENJE PRAVOCRTNOSTI I PRIMJENA NA POKRETNE STOLNE STROJEVE [3]</b> .....	15
<b>4.1. PREGLED OPTIKE PRAVOCRTNOSTI</b> .....	15
<b>4.2. REFLEKTOR PRAVOCRTNOSTI</b> .....	21
<b>4.3. INTERFEROMETAR PRAVOCRTNOSTI</b> .....	23
<b>5. NORME</b> .....	29
<b>5.1. NORMA ISO 12780-1 [4]</b> .....	29
<b>5.1.1. Opći pojmovi</b> .....	29
<b>5.1.2. Pojmovi koji se odnose na profile</b> .....	30
<b>5.1.3. Pojmovi koji se odnose na referentnu liniju</b> .....	30
<b>5.1.4. Termini koji se odnose na funkciju filtera</b> .....	32
<b>5.1.5. Termini koji se odnose na parametre</b> .....	33
<b>5.2. NORMA ISO 12780-2 [5]</b> .....	35

---

5.2.1.	<i>Djelokrug</i> .....	35
5.2.2.	<i>Općenito</i> .....	36
5.2.3.	<i>Dugovalni filter</i> .....	36
5.2.4.	<i>Granične valne duljine</i> .....	37
5.2.5.	<i>Sustav sondiranja</i> .....	37
6.	<b>OPREMA</b> .....	38
6.1.	<b>RENISHAW ML-10 LASER [6]</b> .....	38
6.2.	<b>JEDINICA ZA KOMPENZACIJU OKOLINE EC10</b> .....	39
6.3.	<b>1D UREĐAJ ZA MJERENJE DULJINE</b> .....	40
7.	<b>PROVEDBA MJERENJA</b> .....	44
8.	<b>PODACI ZA RAD</b> .....	48
8.1.	<b>HORIZONTALNA PRAVOCRTNOST</b> .....	48
8.1.1.	<i>Slope i Intercept [7]</i> .....	52
8.1.2.	<i>Analiza drugog mjerenja</i> .....	59
8.2.	<b>VERTIKALNA PRAVOCRTNOST</b> .....	64
9.	<b>ZAKLJUČAK</b> .....	75
10.	<b>LITERATURA</b> .....	76

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Michelsenov interferometar .....	2
Slika 2.	XL-80 laserski sustav .....	3
Slika 3.	Tipična postavka sustava za mjerenje položaja .....	6
Slika 4.	Položaj zatvarača ML10 - nema izlaza snopa.....	7
Slika 5.	Linearna optika za mjerenje .....	8
Slika 6.	Interferometar kao nepokretna optika.....	9
Slika 7.	Zatvarač lasera na početku .....	10
Slika 8.	Gađanje bijele točke.....	10
Slika 9.	Pogodak središta .....	11
Slika 10.	Postavljanje opreme.....	11
Slika 11.	Postavljanje interferometra .....	12
Slika 12.	Postavke na laseru.....	12
Slika 13.	Horizontalno pomicanje .....	13
Slika 14.	Vertikalano pomicanje.....	13
Slika 15.	Mjerenje horizontalne pravocrtnosti .....	15
Slika 16.	Putovi između optike i laserske zrake .....	16
Slika 17.	Prikaz rotacije .....	16
Slika 18.	Reflektor kao pokretna optika .....	17
Slika 19.	Reflektor pomičan po z osi .....	18
Slika 20.	Zakrenuti reflektor .....	19
Slika 21.	Usporedba sa mjernom urom i linealom .....	20
Slika 22.	Istozačnost .....	21
Slika 23.	Reflektor .....	22
Slika 24.	Putovi zraka.....	22
Slika 25.	Prikaz osi.....	24
Slika 26.	Putanje zraka u prizmi .....	24
Slika 27.	Diferencijalna refrakcija .....	26
Slika 28.	Naginjanje Wollastona.....	27
Slika 29.	Pomicanje prizme (Wollastona) po liniji.....	27
Slika 30.	Pomicanje prizme s nagibom .....	28
Slika 31.	Ravnina pravocrtnosti i izvučena linije.....	29
Slika 32.	Lokalno odstupanje pravocrtnosti.....	30
Slika 33.	Referentna linija minimalne zone.....	31
Slika 34.	Referentna linija najmanjeg kvadrata .....	32
Slika 35.	Prijenosna karakteristika za dugovalni filter koji ima granične duljine .....	36
Slika 36.	Pogled na Renishaw ML10 za mjerenje pravocrtnosti.....	39
Slika 37.	EC10 .....	39
Slika 38.	Senzori.....	40
Slika 39.	1D mjerni uređaj .....	40
Slika 40.	Mjerna skala na kolicima .....	41
Slika 41.	Mjerna skala na mjernoj glavi.....	41
Slika 42.	Izvor svjetla .....	42



Slika 43.	Prozori.....	43
Slika 44.	Najfinija mjerna skala .....	43
Slika 45.	Interferometar .....	44
Slika 46.	Laser.....	44
Slika 47.	Reflektor pravocrtnosti – horizontalno ispitivanje .....	45
Slika 48.	Reflektor pravocrtnosti - odozgor .....	45
Slika 49.	Prikaz stroja iz kuta reflektora.....	46
Slika 50.	Reflektor pravocrtnosti i interferometar – vertikalno ispitivanje pravocrtnosti vođenja 47	47
Slika 51.	Sučelje .....	47
Slika 52.	Aritmetičke sredine prvog mjerenja horizontalne pravocrtnosti .....	51
Slika 53.	Aritmetičke sredine drugog mjerenja horizontalne pravocrtnosti.....	51
Slika 54.	Aritmetičke sredine trećeg mjerenja horizontalne pravocrtnosti.....	52
Slika 55.	Usporedba aritmetičkih sredina i prvog pravca.....	54
Slika 56.	Usporedba aritmetičkih sredina i drugog pravca .....	55
Slika 57.	Usporedba aritmetičkih sredina i trećeg pravca .....	55
Slika 58.	Usporedba pravaca .....	56
Slika 59.	Odstupanje prvog mjerenja od horizontalne pravocrtnosti.....	57
Slika 60.	Odstupanje drugog mjerenja od horizontalne pravocrtnosti .....	58
Slika 61.	Odstupanje trećeg mjerenja od horizontalne pravocrtnosti .....	58
Slika 62.	Usporedba odstupanja od horizontalne pravocrtnosti svih mjerenja .....	59
Slika 63.	Usporedba odstupanja od pravocrtnosti drugog mjerenja .....	62
Slika 64.	Usporedba odstupanja od horizontalne pravocrtnosti svih mjerenja (bez drugog mjerenja, drugi smjer).....	63
Slika 65.	Aritmetičke sredine prvog mjerenja vertikalne pravocrtnosti .....	67
Slika 66.	Aritmetičke sredine drugog mjerenja vertikalne pravocrtnosti .....	67
Slika 67.	Aritmetičke sredine trećeg mjerenja vertikalne pravocrtnosti .....	68
Slika 68.	Usporedba aritmetičkih sredina i prvog pravca.....	70
Slika 69.	Usporedba aritmetičkih sredina i drugog pravca .....	70
Slika 70.	Usporedba aritmetičkih sredina i trećeg pravca .....	71
Slika 71.	Usporedba pravaca .....	71
Slika 72.	Odstupanje prvog mjerenja od vertikalne pravocrtnosti.....	73
Slika 73.	Odstupanje drugog mjerenja od vertikalne pravocrtnosti .....	73
Slika 74.	Odstupanje trećeg mjerenja od vertikalne pravocrtnosti .....	74
Slika 75.	Usporedba odstupanja od pravocrtnosti vertikalnog mjerenja.....	74

**POPIS TABLICA**

<b>Tablica 1</b>	<b>Tablica graničnih vrijednosti .....</b>	<b>37</b>
<b>Tablica 2</b>	<b>Rezultati prvog mjerenja horizontalne pravocrtnosti .....</b>	<b>48</b>
<b>Tablica 3</b>	<b>Rezultati drugog mjerenja horizontalne pravocrtnosti .....</b>	<b>49</b>
<b>Tablica 4</b>	<b>Rezultati trećeg mjerenja horizontalne pravocrtnosti .....</b>	<b>50</b>
<b>Tablica 5</b>	<b>Pravci najmanjih kvadrata .....</b>	<b>53</b>
<b>Tablica 6</b>	<b>Rezultati odstupanja od horizontalne pravocrtnosti .....</b>	<b>56</b>
<b>Tablica 7</b>	<b>MNK drugog mjerenja .....</b>	<b>60</b>
<b>Tablica 8</b>	<b>Rezultati odstupanja .....</b>	<b>61</b>
<b>Tablica 9</b>	<b>Rezultati prvog mjerenja vertikalne pravocrtnosti .....</b>	<b>64</b>
<b>Tablica 10</b>	<b>Rezultati drugog mjerenja vertikalne pravocrtnosti .....</b>	<b>65</b>
<b>Tablica 11</b>	<b>Rezultati trećeg mjerenja vertikalne pravocrtnosti .....</b>	<b>66</b>
<b>Tablica 12</b>	<b>Pravci najmanjih kvadrata .....</b>	<b>69</b>
<b>Tablica 13</b>	<b>Rezultati odstupanja od vertikalne pravocrtnosti .....</b>	<b>72</b>

---

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$a$	/	nagib pravca
$b$	/	odsječak pravca na y osi
$d$	mm	pomak
$N$	/	broj pruga
$R$	mm	maksimalni radijus vrha ticala
$S_i$	/	lokalno odstupanje pravocrtnosti
$S_{rms}$	/	odstupanje pravocrtnosti korijena srednje vrijednosti kvadrata
$X$	mm	valna duljina
$x$	/	trenutni položaj u profilu pravocrtnosti
$Y$	%	prijenos

**Grčka slova**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$\alpha_o$	/	amplituda valovitosti sinusnog vala prije filtriranja
$\alpha_l$	/	amplituda valovitosti sinusnog vala poslije filtriranja
$\lambda$	$\mu\text{m}$	valna duljina sinusnog vala
$\lambda_c$	$\mu\text{m}$	odsječena duljina dugovalnog filtra

**SAŽETAK**

Tema ovog rada je provjera pravocrtosti 1D mjernog uređaja. U prvom dijelu rada objašnjena je sama interferometrija, linearno mjerenje i njegov postupak te postavljanje linearnog mjerenja. Dan je teorijski pregled poravnanja linearnog snopa, interferometrijskog mjerenja pravocrtosti, samog reflektora pravocrtosti i interferometra pravocrtosti. Korištene norme prilikom mjerenja su također opisane. U drugom dijelu rada pobliže se opisuje praktični dio. Predstavlja se korištena oprema i provedba mjerenja pomaka. I horizontalna i vertikalna pravocrtost provedena je u tri mjerenja, svaki u dva smjera. Iz aritmetičke sredine svih mjerenja, uporabom metode najmanjih kvadrata, dobivaju se odstupanja od pravocrtosti te se analiziraju dobiveni podaci.

Ključne riječi: pravocrtost, interferometar, reflektor, zraka, razdjelnik zrake

**SUMMARY**

The topic of this paper is the straightness check of a 1D measuring device. In the first part of the paper interferometry itself, linear measurement and its procedure for setting up are explained. A theoretical overview of linear beam alignment, interferometric straightness measurement, straightness reflector and straightness interferometer is given. The standards used during the measurements are also described. The equipment used and the implementation of the displacement measurement are presented. Both horizontal and vertical straightness were performed in three measurements, each in two directions. Using the least squares method, deviations from straightness are obtained from the arithmetic mean of all measurement and the obtained data are analyzed.

Key words: straightness, interferometer, reflector, beam, beam splitter

## **1. UVOD [1]**

Laserska interferometrija dobro je poznata metoda za mjerenje udaljenosti s velikom točnošću.

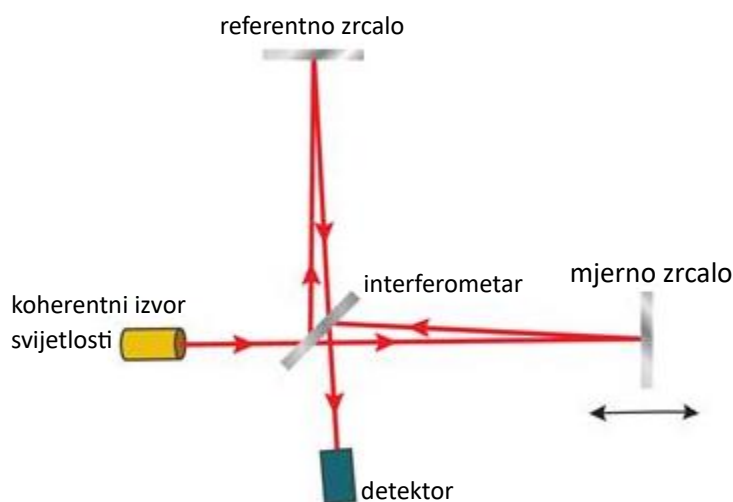
Interferometrija je mjerna metoda koja koristi fenomen interferencije valova (obično svjetlosti, radijskih ili zvučnih valova). Mjerenja mogu uključivati mjerenja određenih karakteristika samih valova i materijala s kojima valovi stupaju u interakciju. Osim toga, interferometrija se koristi za opisivanje tehnika koje koriste svjetlosne valove za proučavanje promjena u pomaku. Ova interferometrija za mjerenje pomaka uvelike se koristi za kalibraciju i mehaničku kontrolu pomaka stupnja u preciznoj strojnoj obradi.

Upotrebom dviju svjetlosnih zraka (obično dijeljenjem jedne zrake u dvije) može se formirati interferencijski uzorak kada se te dvije zrake superponiraju [slagati jedno na drugo kod valovitog gibanja]. Budući da je valna duljina vidljive svjetlosti vrlo kratka, mogu se detektirati male promjene u razlikama u optičkim putovima (prijeđena udaljenost) između dviju zraka (budući da će te razlike proizvesti primjetne promjene u uzorku interferencije). Stoga je optička interferometrija vrijedna mjerna tehnika već više od 100 godina. Točnost te mjerne tehnike kasnije je poboljšana izumom lasera.

Prvu demonstraciju korištenja načela interferencije svjetlosti kao mjernog alata ostvario je Albert A. Michelson 1880-ih razvijajući prvi interferometar. Iako je tehnologija (i točnost mjerenja) od tada uznapredovala, temeljni principi Michelsonovog interferometra i dalje ostaju u srži interferometrije.

## 2. OSNOVE INTERFEROMETRIJE [1]

Michelsonov interferometar [Slika 1] sastoji se od djelatelja snopa (polusrebreno zrcalo) i dva zrcala. Kada svjetlost prolazi kroz polusrebreno zrcalo/razdjelnik snopa (koji se djelomično reflektira), dijeli se na dvije zrake s različitim optičkim putevima (jedna ide na zrcalo 1, a druga na zrcalo 2). Nakon što se zrake reflektiraju natrag na zrcala, te se zrake ponovno rekombiniraju na razdjelnik snopa prije nego stignu do detektora. Razlika u putu ovih dviju zraka uzrokuje faznu razliku koja stvara interferencijski rubni uzorak. Ovaj uzorak zatim analizira detektor kako bi se procijenila valne karakteristike, svojstva materijala ili pomak jednog od zrcala (ovisno za koje se mjerenje interferometar koristi).



Slika 1. Michelsonov interferometar

### 2.1. PRIMIJENJENA INTERFEROMETRIJA

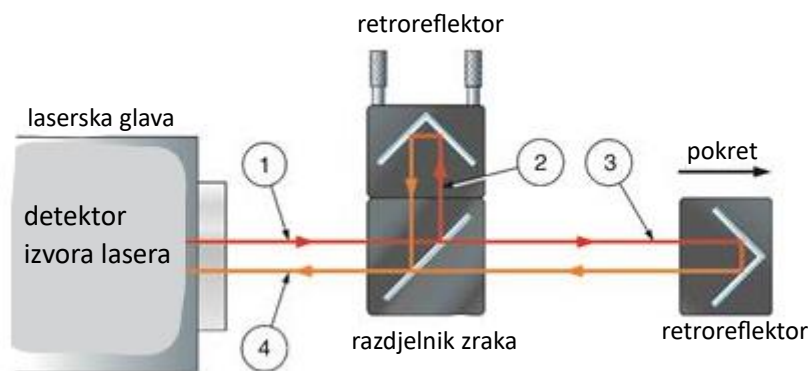
Kako bi se generirao interferencijski uzorak s visokom preciznošću (izraziti rubovi), vrlo je važno imati jedan vrlo stabilan izvor valne duljine.

Postoje različite postavke interferometra temeljene na Michelsonovom principu, međutim, linearna postava najjednostavniji je tip za objašnjenje.

U laserskom sustavu XL-80 [Slika 2] dva zrcala (koja se koriste u Michelsonovom interferometru) su retroreflektori (prizme koje reflektiraju upadnu svjetlost natrag u smjeru paralelnom sa smjerom

iz kojeg dolazi). Jedan od njih je pričvršćen na razdjelnik snopa tvoreći referentni krak. Drugi retroreflektor čini mjerni krak promjenjive duljine jer njegova udaljenost varira u odnosu na razdjelnik snopa.

Laserska zraka (1) izlazi iz laserske glave XL-80 i dijeli se na dvije zrake (reflektirana (2) i propuštena (3)) na razdjelniku polarizirajuće zrake. Ove se zrake reflektiraju natrag od dva retroreflektora, rekombiniraju na razdjelniku zrake prije nego što dođu do detektora. Korištenje retroreflektora osigurava da su zrake koje dolaze iz referentnog i mjernog kraka paralelne kada se rekombiniraju jedna s drugom na razdjelniku zraka. Rekombinirane zrake dolaze do detektora gdje interferiraju jedna s drugom bilo konstruktivno bilo destruktivno. Tijekom konstruktivne interferencije dva su snopa u fazi i vrhovi oba snopa se međusobno pojačavaju što rezultira svijetlim rubom, dok su tijekom destruktivnih smetnji snopovi izvan faze i vrhovi jednog snopa poništeni su udubljenima drugog što rezultira tamnim rubom.



Slika 2. XL-80 laserski sustav

Optička obrada signala u detektoru omogućuje promatranje interferencije ovih dviju zraka. Pomak mjernog kraka uzrokuje promjenu relativne faze dviju zraka. Ovaj ciklus destruktivne i konstruktivne interferencije uzrokuje cikličku varijaciju intenziteta rekombinirane svjetlosti. Jedan ciklus varijacije intenziteta od svijetlog preko tamnog do svijetlog javlja se svaki put kada se mjerna ruka/retroreflektor pomakne za  $316,50 \text{ nm}$ , što je polovica valne duljine lasera (budući da to kretanje uzrokuje promjenu optičke putanje za  $633 \text{ nm}$ , što je valna duljina lasera). Stoga se kretanje mjeri izračunavanjem broja ciklusa pomoću sljedeće formule:



$$d = \frac{\lambda N}{2} \quad (1.1)$$

Gdje je:

$d$ -pomak [ $\mu\text{m}$ ],

$\lambda$ -valna duljina lasera ( $\mu\text{m}$ ),

$N$ -broj pruga koje prolaze.

Veća rezolucija od 1 nm postiže se faznom interpolacijom unutar ovih ciklusa.

Bez obzira koliko je dobra laserska jedinica koja se koristi (tj. koliko je točna i „stabilna“), točnost linearnih mjerenja položaja ovisi o točnosti do koje je poznata valna duljina laserske zrake. Radna valna duljina laserske zrake ovisi o indeksu loma zraka kroz koji prolazi, a to se mijenja s temperaturom zraka, tlakom zraka i relativnom vlagom. Stoga se valna duljina snopa mora prilagoditi kako bi se pripojila bilo kakvim promjenama ovih parametara.

## **2.2.INTERFEROMETAR ZA MJERENJE POMAKA**

Neki sustavi lociraju interferometar/razdjelnik zrake unutar laserske glave. Toplinski rast laserske glave mijenja duljinu puta mjerenja, tako da je potrebno dodatno vrijeme zagrijavanja prije nego što se mogu izvršiti točna mjerenja. Korištenjem udaljenog razdjelnika snopa, Renishaw izbjegava ovaj problem.

### **3. LINEARNO MJERENJE [2]**

#### **3.1. POSTUPAK IZVOĐENJA LINEARNOG MJERENJA**

Linearno mjerenje je najčešći oblik mjerenja koji se izvodi laserom. Laserski sustav mjeri točnost i ponovljivost linearnog pozicioniranja uspoređujući položaj prikazan na očitavanju osi sa stvarnim položajem izmjerenim laserskim sustavom.

Koraci potrebni za izvođenje linearnog mjerenja su sljedeći:

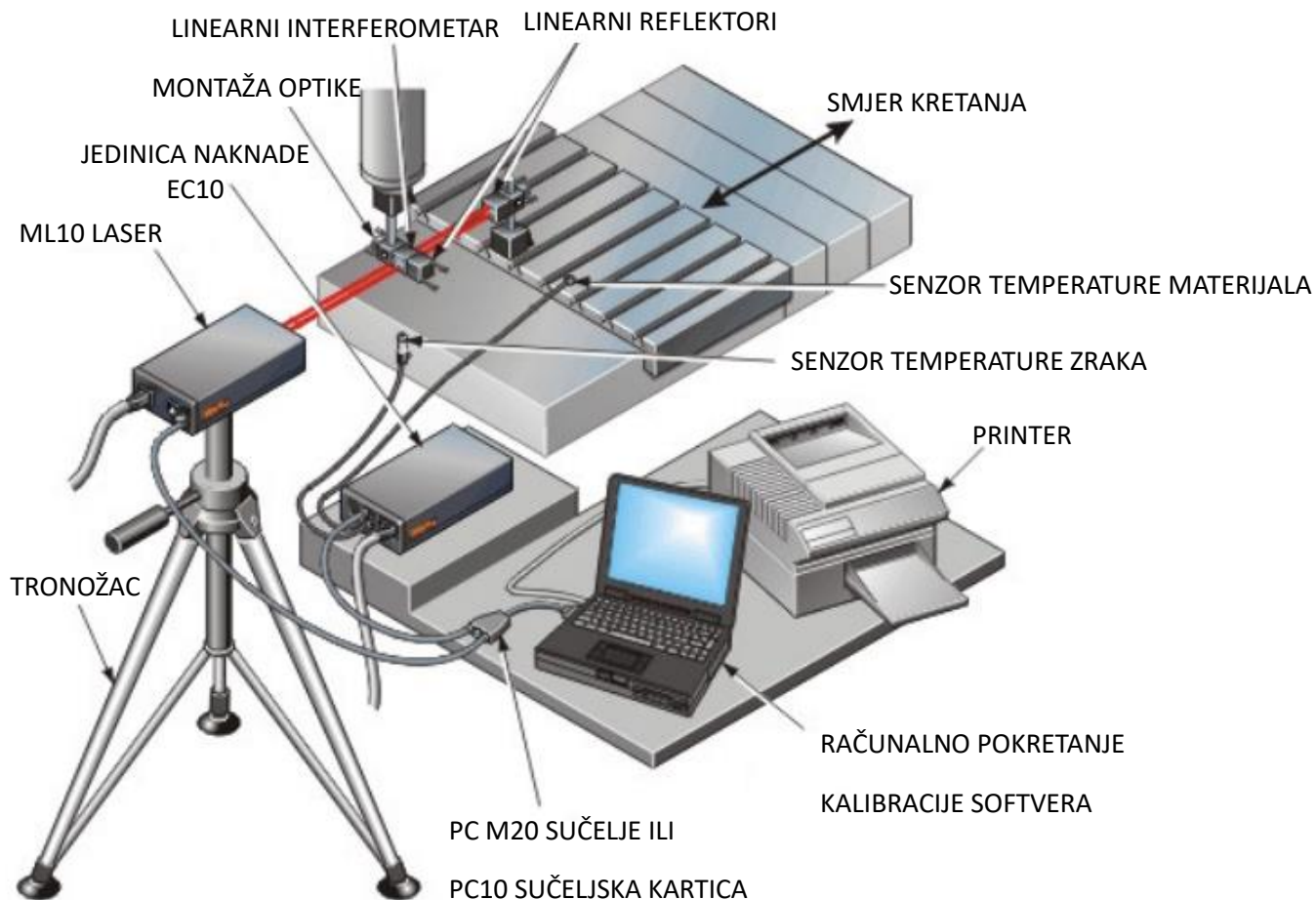
- Postaviti laserski sustav za izvođenje linearnih mjerenja
- Poravnati lasersku zraku s osi kretanja stroja
- Aktivirati automatsku ekološku kompenzaciju i osigurati da je točan koeficijent širenja materijala unesen u softver.

Ako se ne koristi automatska okolišna kompenzacija, varijacije u atmosferskim uvjetima mogu dovesti do značajnih pogrešaka mjerenja. Kada se koristi okolišna kompenzacija, mjerenje linearnog pomaka može se izvršiti s točnošću boljom od 1,1 ppm.

- Izmjeriti i zabilježiti linearne pogreške stroja
- Analizirati snimljene podatke.

### 3.2. POSTAVLJANJE LINEARNOG MJERENJA

Tipično postavljanje sustava za mjerenje linearnog položaja prikazano je ispod [Slika 3].



Slika 3. Tipična postavka sustava za mjerenje položaja

Načela linearnog mjerenja određuju kako linearna optika funkcionira i kako je treba postaviti za izvođenje linearnog mjerenja.

Za linearno mjerenje potrebno je provesti sljedeće korake:

- Ako nije instaliran, instalirati mjerni softver. Dodatno, osigurati da je jedno od sljedećih sučelja tvrtke Renishaw instalirano i konfigurirano na korištenom računalu:

- PCM10 ili PCM20 (PCMCIA) kartica za prijenosna računala
- PC10 ili USB za stolna računala
- Povezati linearnu optiku sa strojem koji se provjerava
- Montirati lasersku glavu ML10 na stalak.
- Povezati ML10, EC10 i sučelje kartice. Priključiti jedan kraj kabela za prijenos podataka u 5-pinski priključak na PC10/PCM20/USB sučeljskoj kartici i drugi priključak na stražnju stranu lasera ML10. Zatim spojiti EC10 na sučelje kartice na isti način. Dva 5-pinska priključka na sučeljskoj kartici PC10/PCM20 su zajednički, stoga nije važno na koji priključak se povezuje ML10 ili EC10.
- Povezati senzore okoline s EC10.
- Postavite zračne senzore EC10 na odgovarajuće pozicije na ili oko stroja.
- Postavite senzore temperature materijala na odgovarajuće pozicije na stroju.

Radi sigurnosti, zatvarač ML10 lasera trebao bi se prvotno okrenuti u svoj zatvoreni položaj prikazan u nastavku [Slika 4].



**Slika 4. Položaj zatvarača ML10 - nema izlaza snopa**

Napajanje za ML10 laser i EC10 i PC priključuje se na glavnu mrežu. Redosljed u kojem se napajanje primjenjuje nije važan. Vremenski period stabiliziranja ML10 traje otprilike 10 do 15 minuta.

- Pokrenuti softver za linearno prikupljanje podataka

- Poravnati laserski snop s osi kretanja stroja

### 3.3.LINEARNA OPTIKA ZA MJERENJE

Linearna optika za mjerenje koristi se za mjerenje linearne točnosti pozicioniranja. Komplet za linearnu optiku [Slika 5] sastoji se od:

- razdjelnika snopa,
- dva linearna reflektora i
- dvije mete (engl. *target*) koji pomažu u optičkom poravnanju.

Napomena: Kada se kombinira razdjelnik snopa i linearni reflektor to postaje linearni interferometar.



Slika 5. Linearna optika za mjerenje

Za izvođenje linearnih mjerenja možda će također trebati set za montažu optike i odgovarajuće stezaljke za pričvršćivanje optike na stroj koji se provjerava.

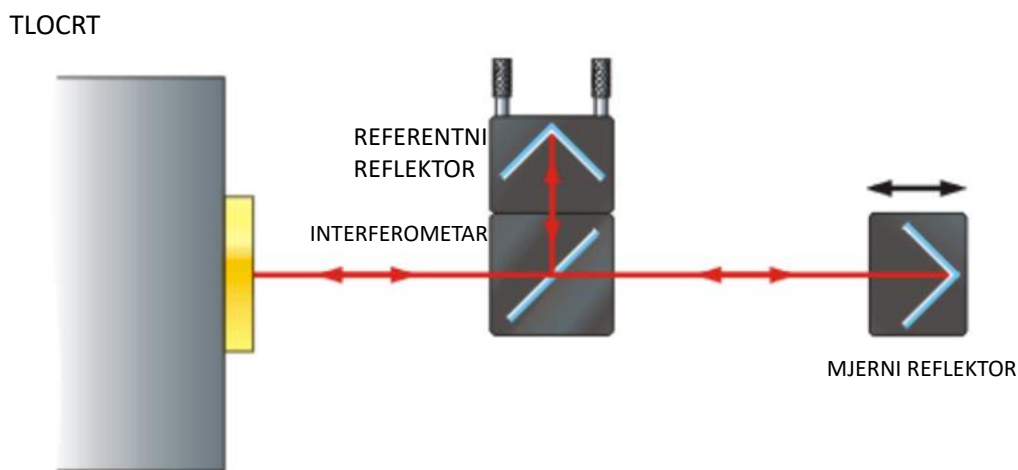
Renishaw-ova linearna optika koristi lagane legure aluminija kako bi se smanjilo savijanje stroja i minimiziralo termičko kašnjenje, omogućujući tako da se optika brže stabilizira.

### 3.4.PORAVNANJE LINEARNOG SNOPA (engl. *ALIGNMENT*)

Kako bi se osigurala dovoljna snaga signala duž cijele osi kretanja stroja i smanjile pogreške mjerenja kosinusa, laserski snop ML10 mora biti poravnan tako da je paralelan s osi kretanja.

- Laserski usmjerivač može se koristiti kako bi se pojednostavilo poravnanje snopa. Smanjuje potrebne prilagodbe na laserskoj glavi i stalku.
- ML10 se postavi na vrh stalka i postolja

Postupci poravnanja raspravljaju se u ovom odjeljku pretpostavljajući da su optike postavljene kao što je prikazano na Slici 6, gdje je interferometar nepokretna optika, a retroreflektor pokretna optika.

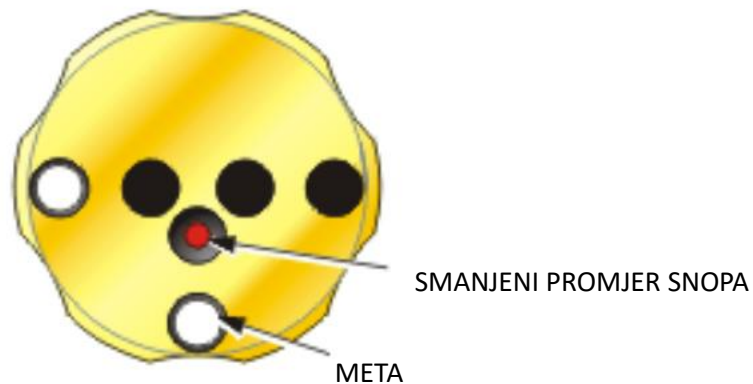


Slika 6. Interferometar kao nepokretna optika

Ovi postupci također se mogu prilagoditi drugim optičkim konfiguracijama.

#### 3.4.1. Pozicioniranje linearnog interferometra i reflektora

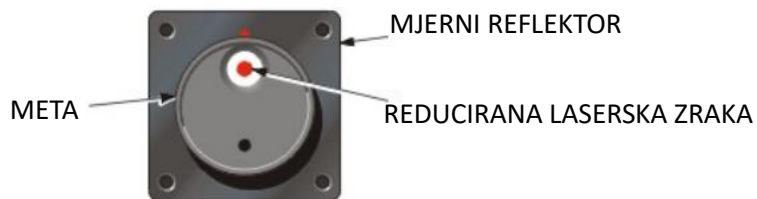
1. Postaviti stalak i laser tako da je usmjeren normalno prema optici mjerenja. Grubo poravnanje lasera s osi kretanja može se izvesti koristeći kućište kao liniju usmjerenja.
2. Okrenuti zatvarač lasera tako da laser izlazi smanjenim promjerom snopa [Slika 7]. Manji promjer snopa olakšava uočavanje svakog nesavršenog poravnanja.



**Slika 7. Zatvarač lasera na početku**

3. Stroj treba pomicati tako da je mjerni reflektor blizu lasera i postaviti metu s prednje strane sa bijelom točkom na vrhu . Pomicati laser ili stroj dok snop ne pogodi bijelu točku na meti [Slika 8].

Napomena: Linearni interferometar ne bi trebao biti postavljen između lasera i linearnog reflektora u ovoj fazi. Laserski usmjerivač može se koristiti kako bi se pojednostavilo poravnanje snopa. Smanjuje potrebnu količinu prilagodbi koje treba napraviti na laserskoj glavi i stalku.



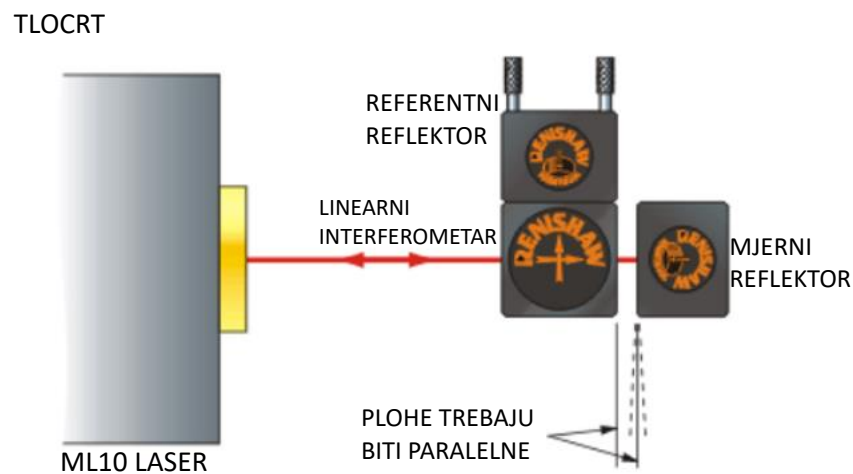
**Slika 8. Gađanje bijele točke**

- Ukloniti poklopac i provjeriti podudara li se vraćena zraka s reflektora sa središtem mete na zatvaraču ML10. Ako ne, potrebno je laser ili stroj pomicati dok zraka ne pogodi središte mete [Slika 9].



Slika 9. Pogodak središta

- Postaviti linearni interferometar što je bliže reflektoru [Slika 10]. Ako su postavljeni blizu jedan drugome, preostalo poravnanje može se postići samo podešavanjem laserske glave.



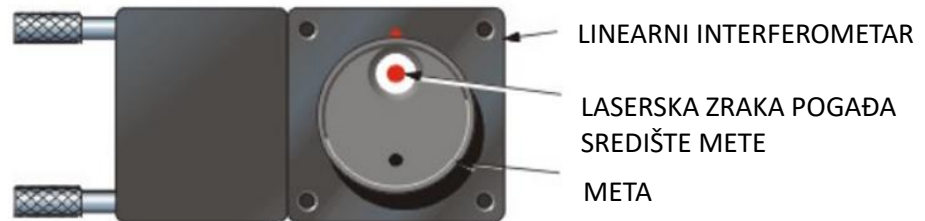
Slika 10. Postavljanje opreme

- Vanjska strana interferometra i reflektora trebaju biti okomite na stroj i poravnate jedna s drugom. Ako je interferometar nagnut, može doći do degradacije točnosti i moguće nemogućnosti otkrivanja kada je snop prekinut. Kao opća smjernica, preporučljivo je



poravnavati interferometar unutar  $\pm 2^\circ$  u nagibu, zakretanju i rolanju, što se često može postići golim okom.

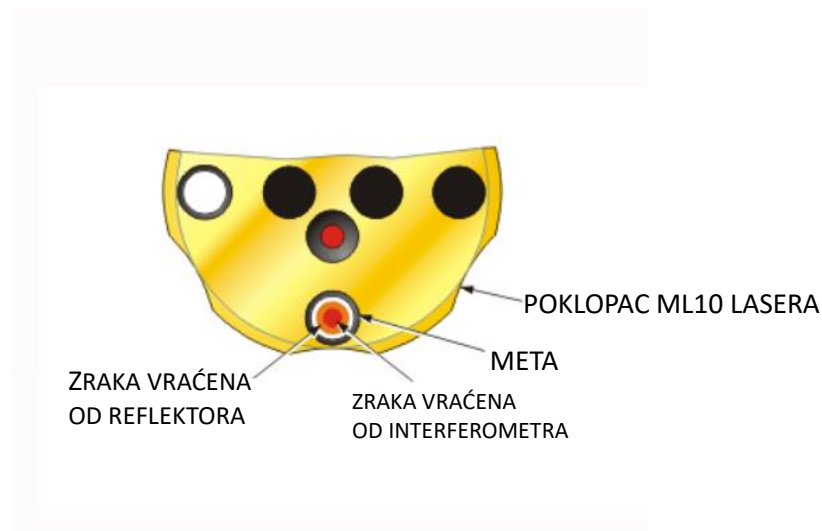
7. Postaviti metu tako da ulazni otvor interferometra odgovara s bijelom točkom na vrhu i pomicati interferometar vertikalno i horizontalno kako bi zraka pogodila metu [Slika 11].



**Slika 11. Postavljanje interferometra**

8. Ukloniti metu s linearnog interferometra i provjeriti pogađa li vraćena zraka s interferometra središte zatvarača ML10 preko zrake koja se vraća s reflektora. Ako ne, interferometar treba pomicati dok zraka ne pogodi središte bijele mete [Slika 12].

Napomena: Može biti korisno blokirati zraku koja se vraća s reflektora postavljanjem zapreke između interferometra i reflektora.



**Slika 12. Postavke na laseru**

### 3.4.2. Jednostavan postupak linearnog poravnanja

1. Pomicati stroj na kratkoj udaljenosti duž osi koja se provjerava da se može postaviti meta na retroreflektor s bijelom točkom na vrhu.

Poravnati laser tako da laserska zraka pogodi centar mete preko duljine hoda osi.

2. Ukloniti metu s linearnog reflektora i, prema potrebi, horizontalno pomicati lasersku glavu kako bi zrake koje se vraćaju s linearnog interferometra i retroreflektora pogodile horizontalnu središnju metu zatvarača [Slika 13].



Slika 13. Horizontalno pomicanje

3. Zatim vertikalno pomicati lasersku glavu kako bi se vratila zraka na središte cilja [Slika 14].

Napomena: U ovom trenutku može biti potrebno napraviti još jednu malu horizontalnu rotacijsku prilagodbu kako bi se ponovno usmjerila laserska zraka na središte cilja.



Slika 14. Vertikalano pomicanje

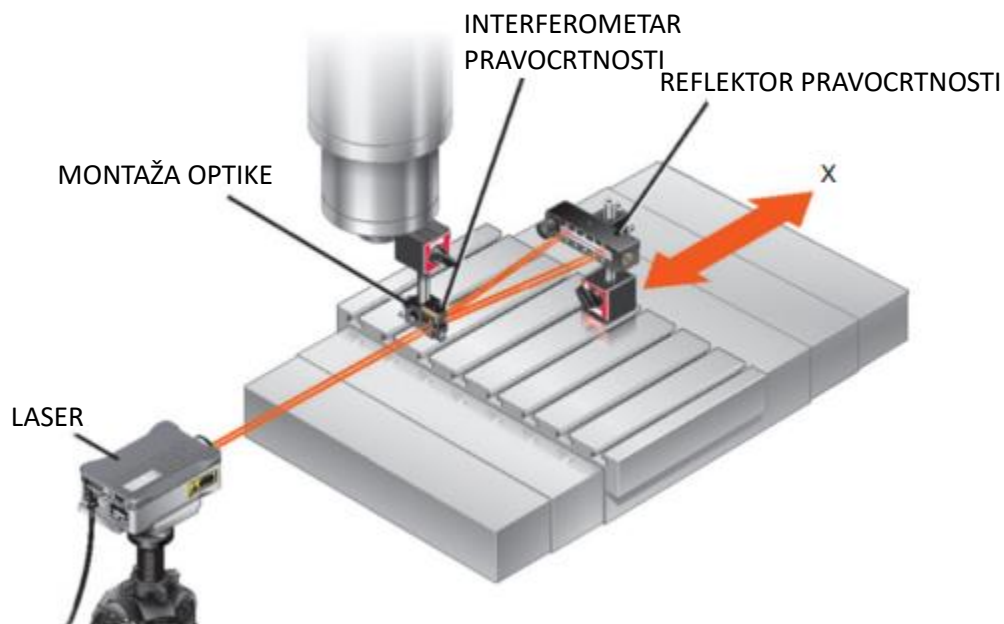
4. Ponovno provjeriti poravnanje povratnih zraka na laserskoj glavi. Na laserskoj glavi, učinak bilo kakve pogreške u poravnanju snopa je udvostručen, što olakšava otkrivanje pogrešaka u poravnanju.

## 4. INTERFEROMETRIJSKO MJERENJE PRAVOCRTNOSTI I PRIMJENA NA POKRETNE STOLNE STROJEVE [3]

### 4.1. PREGLED OPTIKE PRAVOCRTNOSTI

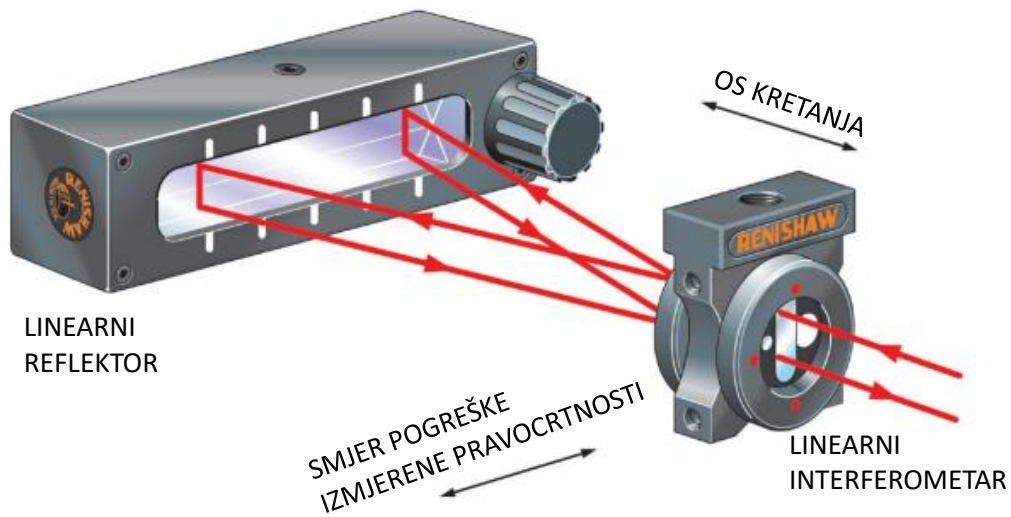
Tipično postavljanje za mjerenje horizontalne pravocrtnosti [Slika 15] na pokretnom stolnom stroju sadrži tri ključne komponente:

- laser (prikazan montiran na tronožac)
- interferometar pravocrtnosti (prikazan pričvršćen na osovinu)
- reflektor pravocrtnosti (prikazan montiran na pokretni stol).



Slika 15. Mjerenje horizontalne pravocrtnosti

Kako se stol pomiče u smjeru strelice (x os), laser i optika će mjeriti, u kretanju stola, bilo koje *vodoravno* (s jedne na drugu stranu) odstupanje od savršene linije. Bolji pogled na optiku i put laserske zrake među njime prikazan je na Slici 16.



Slika 16. Putovi između optike i laserske zrake

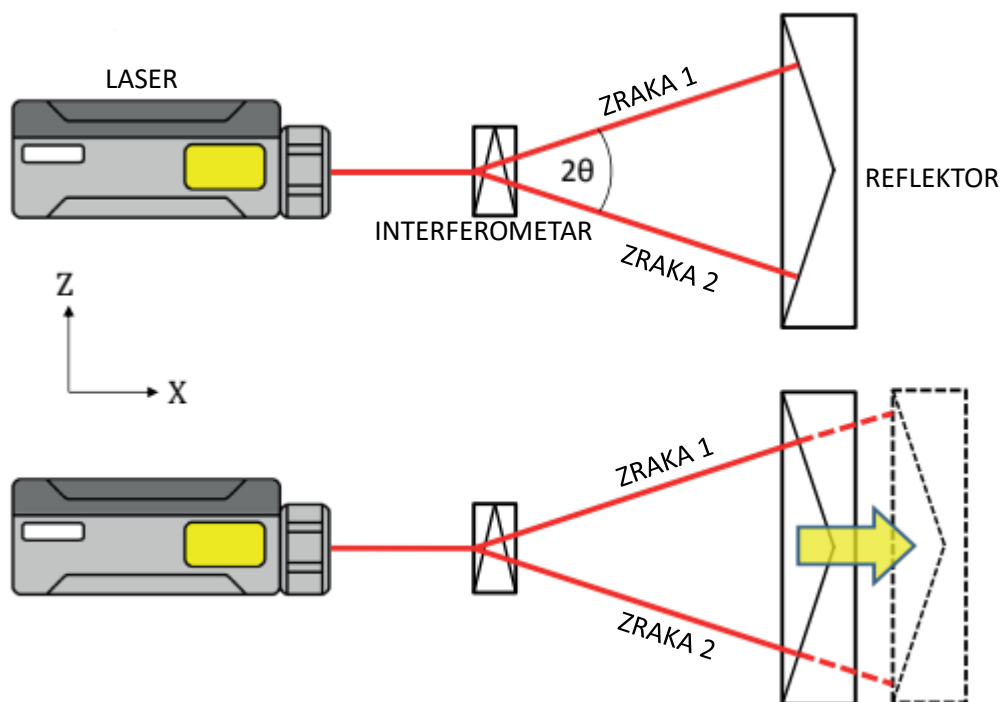
Alternativno je moguće mjeriti okomito odstupanje od pravocrtnosti (vertikalna pravocrtnost), zakretanjem interferometra za mjerenje pravocrtnosti i reflektora za  $90^\circ$  [Slika 17] i ponavljanjem mjerenja.



Slika 17. Prikaz rotacije

Radi jednostavnosti, svi daljnji opisi odnose se na mjerenje vertikalne pravocrtnosti. Međutim, opisana načela jednako se primjenjuju i na druge razmještaje uz odgovarajuće koordinate rotacije.

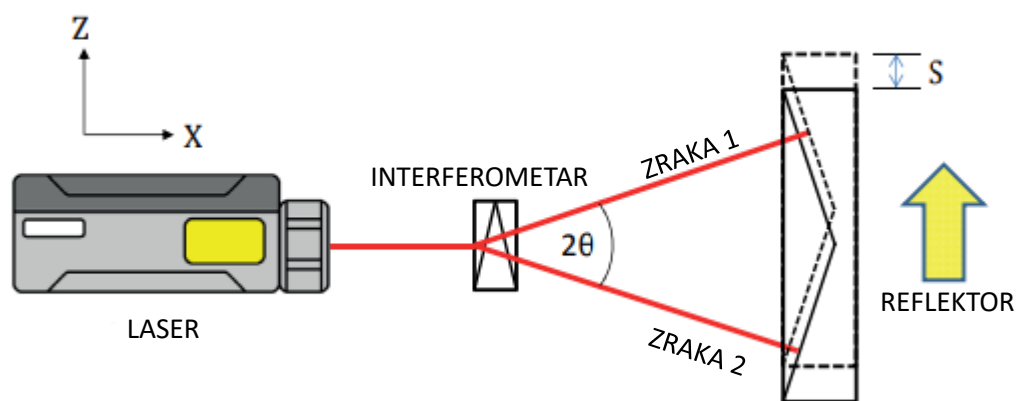
Najlakše je razumjeti kako sustav mjeri pravocrtnost ako prvo razmotrimo što se događa ako je reflektor pokretna optika [Slika 18]. Kada zraka iz laserske glave dopre do interferometra dijeli se na dvije odvojene zrake s kutom divergencije od  $20^\circ$  između njih. (Kasnije objašnjeno u poglavlju 4.3. *INTERFEROMETAR PRAVOCRTNOSTI*). Te dvije zrake putuju do reflektora gdje se reflektiraju natrag putem koji su došle (kasnije opisano u poglavlju 4.2. *REFLEKTOR PRAVOCRTNOSTI*). Prilikom vraćanja na interferometar pravocrtnosti rekombiniraju se i putuju natrag na lasersku glavu gdje se sudaraju radi proizvodnje mjernog signala. Laserski sustav mjeri ne-pravocrtnosti otkrivanjem relativnih promjena između duljina optičkih putova u dva kraka interferometra.



Slika 18. Reflektor kao pokretna optika

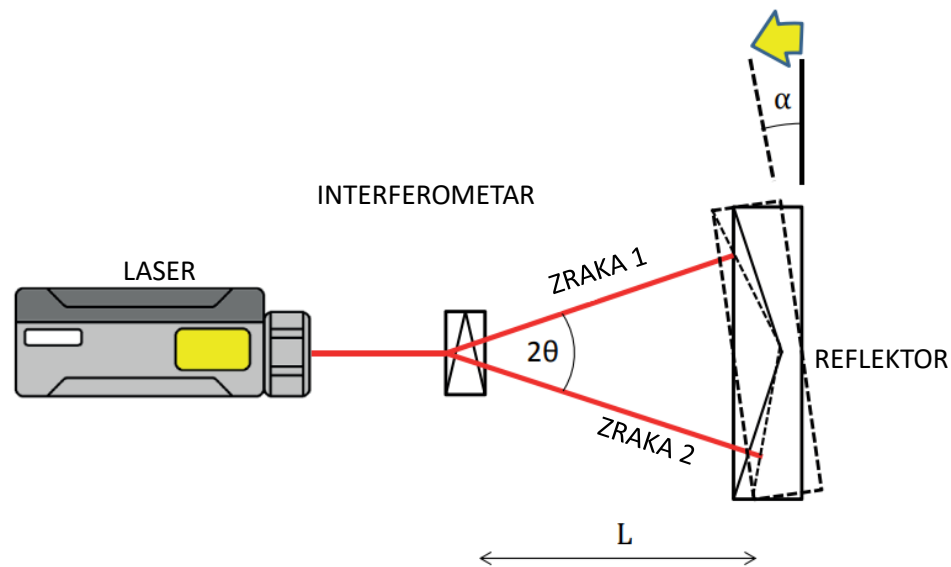
Ako se reflektor pravocrtnosti udalji od interferometra duž savršeno ravne linije u smjeru osi x (kako je naznačena žuta strelica i isprekidana nova linija položaja [Slika 18]), onda se laserske zrake u oba kraka povećavaju u dužini za isti iznos, a time se lasersko mjerenje pravocrtnosti neće promijeniti.

Međutim, ako se reflektor pravocrtnosti pomiče u smjeru z, za udaljenost S (označeno žutom strelicom i točkastom linijom pozicioniranja [Slika 19]), onda će se zraka lasera u kraku 1 produžiti za  $2 \cdot \sin(\varphi)$  dok putuje naprijed-nazad od reflektora, a snop u kraku 2 će se skraćivati za  $2 \cdot \sin(\varphi)$ . Vrijednost  $\varphi$  je unaprijed definirana prema optici pravocrtnosti koja se koristi (dugi ili kratki domet).



Slika 19. Reflektor pomičan po z osi

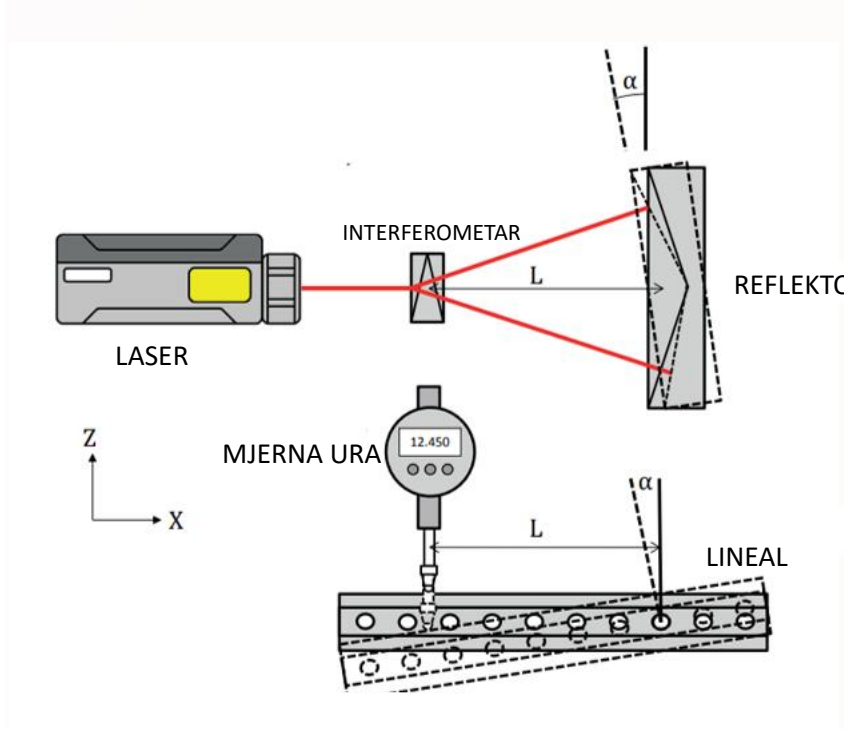
Ako je reflektor nagnut za mali kut [Slika 20], koji je na slici namjerno pretjeran radi jasnoće, vidi se da je duljina puta zrake u kraku 1 skraćena za  $2 \cdot L \cdot \sin(\varphi) \cdot \text{tg}(\varphi)$ , gdje je  $L$ -razmak između optika. Za isto toliko je dulja putanja trake na kraku 2. Dakle, kada laserski sistem podijeli ove relativne promjene duljine putanja sa  $4 \cdot \sin(\varphi)$ , proizvest će očitavanje ne-pravocrtnosti. Dakle, ako se kut reflektora pravocrtnosti promijeni, promijeni se i očitavanje pravocrtnosti.



Slika 20. Zakrenuti reflektor

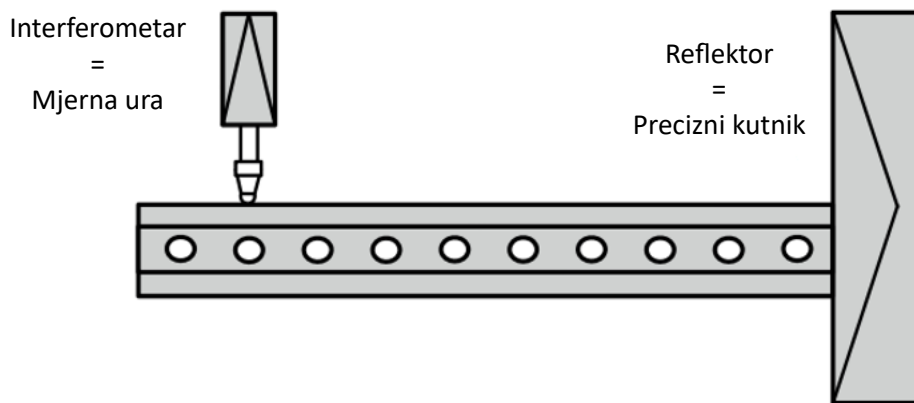
Čini se kako se očitavanje pravocrtnosti "kontaminira" mijenjanjem kuta reflektora. To često dovodi do vjerovanja da mora biti tako da je reflektor pravocrtnosti uvijek stacionarni optički element. Međutim, ovo nije uvijek slučaj, jer postoje trenuci kada se ovaj efekt može koristiti kao prednost. Može se razmatrati upotreba komparatora ili mjerne ure i preciznog lineala [Slika 20]. Reflektor pravocrtnosti i lineal ponašaju se na sličan način. Ako se bilo koji od njih pomakne u smjeru Z, komparator ili laser će izravno registrirati iznos kretanja.





Slika 21. Usporedba sa mjernom urom i linealom

Ako se reflektor nagnje za maleni kut  $\alpha$  oko točke udaljene  $L$  od interferometra, očitavanje pravocrtnosti mijenja se za  $L \cdot \tan(\alpha)$ . Na isti način, ako se lineal nagnje pod kutem  $\alpha$  oko točke udaljene  $L$  od vrha mjerne ure, očitavanje mjerne ure također se mijenja za  $L \cdot \tan(\alpha)$ . Stoga se pravocrtnost interferometra može zamisliti kao ekvivalent mjerne uri, a reflektor pravocrtnosti kao ekvivalent preciznom kutniku. Reflektor pravocrtnosti efikasno stvara virtualni kutnik u prostoru duž svoje središnje linije. Odstupanja od virtualnog kutnika zatim se "pokazuju" pravocrtnim interferometrom. Ovo razmatranje (vizualno prikazano na Slici 21 ispod) korisno je prilikom odlučivanja koji optički element pravocrtnosti treba biti u pokretu, a koji treba biti stacionaran.

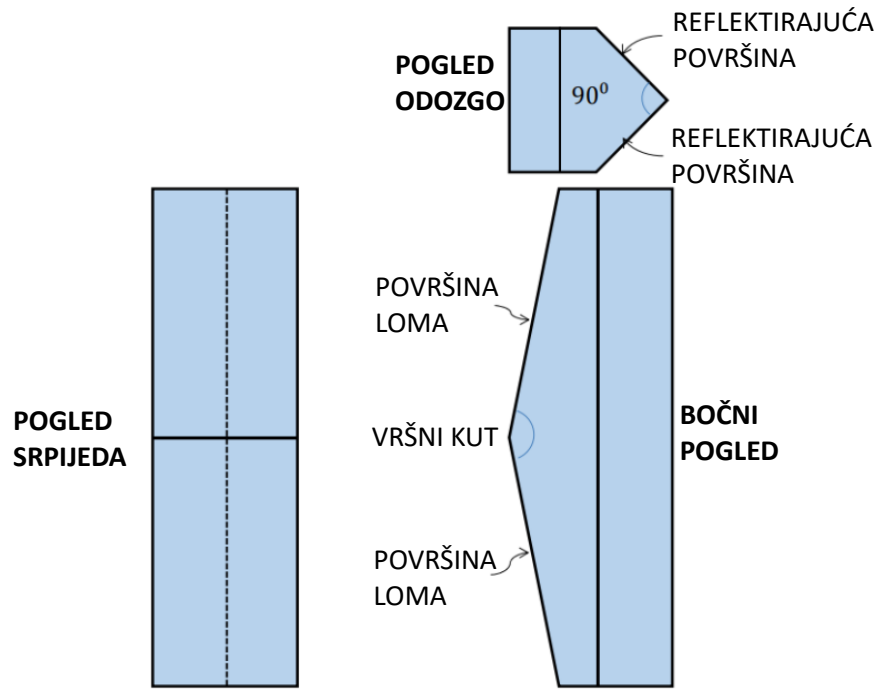


Slika 22. Istoznačnost

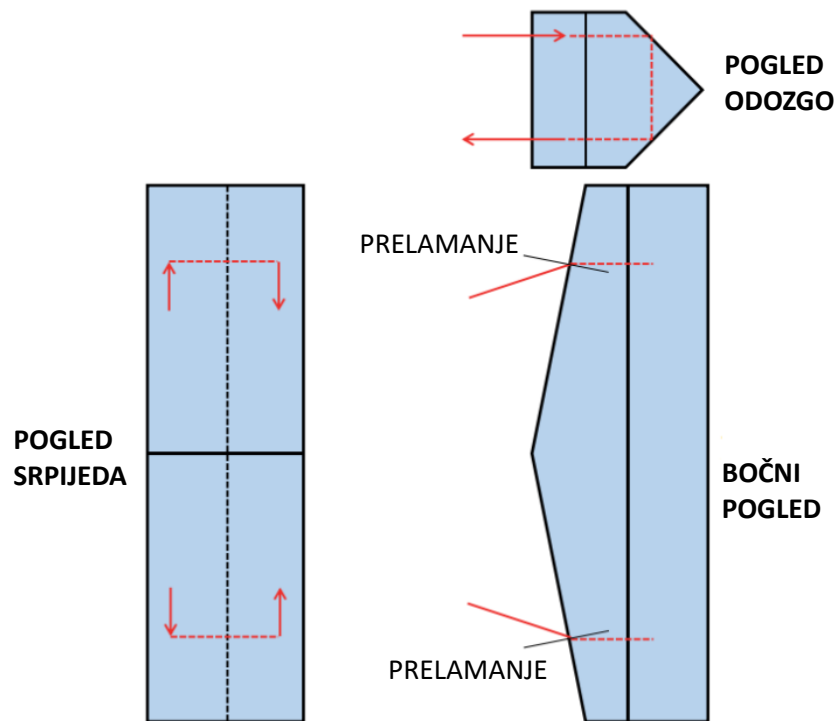
#### 4.2. REFLEKTOR PRAVOCRTNOSTI

Jednostavan ravnomjerni reflektor, kako je shematski prikazano na slikama 18-21, može se napraviti od dva ravna zrcala postavljena pod kutom jedno prema drugom. Međutim, slike 15-17 pokazuju da je Renishawov dizajn kompleksniji. Izgrađen je od čvrstog bloka stakla [Slika 23] i koristi dva loma površine i dvije reflektirajuće površine (vršni kut je promijenjen radni jasnoće, u stvarnosti je blizu  $177^\circ$  na ravnomjernom reflektoru kratkog dometa).

Slika 24 prikazuje putanje zraka uz i unutar reflektora. Kako laserska zraka ulazi u staklo lomi se prema normali povećanjem indeksa loma. Zato se retroreflektira od dvije reflektirajuće površine pod  $90^\circ$  prije nego što se konačno prelome od normale smanjenjem indeksa loma dok napušta staklo.



Slika 23. Reflektor



Slika 24. Putovi zraka

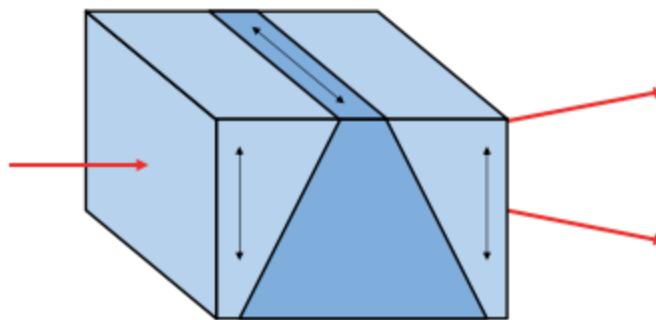
Iako je složeniji, ovaj dizajn ima neke prednosti u odnosu na jednostavan dizajn s dva ogledala.

- Retroreflektirajući dizajn osigurava da se zrake ne preklapaju što olakšava pratiti njihove putanje tijekom usmjeravanja snopa
- Retroreflektirajuće djelovanje također znači da precizno usmjeravanje reflektora oko svoje duge osi nije potrebno jer će retroreflektirajući učinak osigurati da se zrake vrate na interferometar. To također olakšava poravnavanje zraka.
- Upotreba čvrstog staklenog bloka osigurava stabilnost dimenzija i mehaničku robusnost.

Detaljno optičko modeliranje pokazuje da ako se čvrsti reflektor naginje pod malenim kutem  $\alpha$ , oko točke udaljene  $L$  od interferometra (kao na Slici 20), očitavanje pravocrtnosti i dalje se mijenja za  $L \cdot \tan(\alpha)$ , kako je opisano ranije. Dakle, dizajn složenijeg čvrstog reflektora pravocrtnosti od staklenog bloka i dalje se može zamisliti kao virtualni kutnik u prostoru.

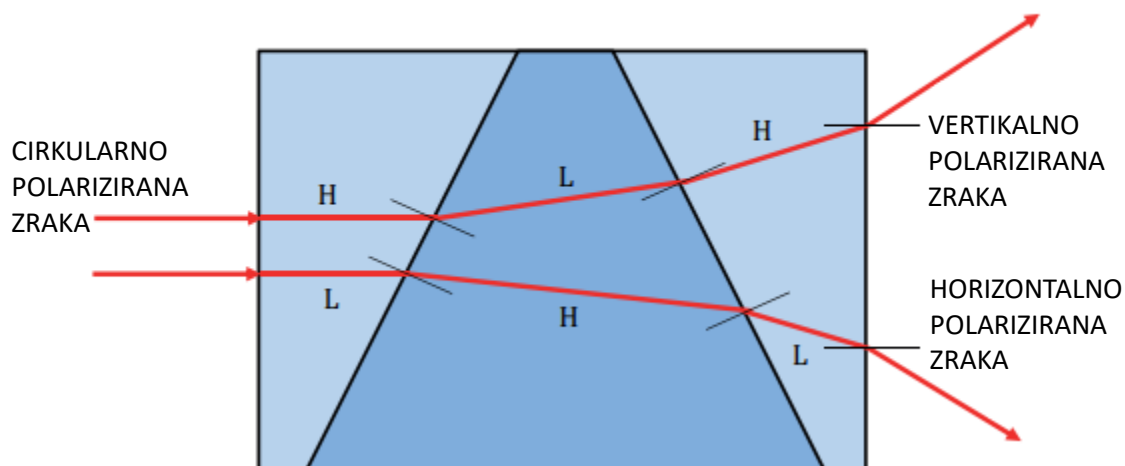
### **4.3.INTERFEROMETAR PRAVOCRTNOSTI**

Interferometrar pravocrtnosti, često zvan Wollastonova prizma, napravljena je od 3 klina dvolomnog kristala [Slika 25]. Za razliku od izotropnih materijala, koji imaju konstantan indeks loma, dvolomni materijali imaju indeks loma koji varira ovisno o orijentaciji njegovih kristalnih osi i polarizaciji svjetlosti koja prolazi kroz njih. Svjetlost se prenosi kroz takav materijal kao dvije linearne polarizacije orijentirane paralelno i okomito na optičke osi kristala. Jedna polarizacija imat će nešto veći indeks loma i putovat će sporije, dok će druge imati niži indeks loma i putovat će brže. Optičke osi dvaju vanjskih klinova kristala orijentirane su okomito, a optička os unutarnjeg klina orijentirana je vodoravno, kao što je naznačeno strelicama na Slici 25.



Slika 25. Prikaz osi

Slika 26 prikazuje putanje zraka unutar Wollastonove prizme. Radi jasnoće je cirkularno polarizirana ulazna zraka prikazana podijeljena u dvije odvojene grede (normalno bi se preklapale) i divergencije kutova zraka pretjerani su.



Slika 26. Putanje zraka u prizmi

Čim cirkularno polarizirana laserska zraka pogađa prvi klin dvolomnog materijala dijeli se na dvije linearno polarizirane zrake, jedna je vertikalno polarizirana (polarizirana paralelno s kristalnom osi prvog klina), a druga horizontalno (polarizirana okomito na kristalnu os prvog klina). Zbog dvolomne prirode materijala, okomito polarizirana zraka imat će nešto veći lom indeksa (H) od

horizontalno polarizirane zrake koja ima nešto niži indeks loma ( $L$ ). Obje zrake putuju u istom smjeru kroz prvi klin.

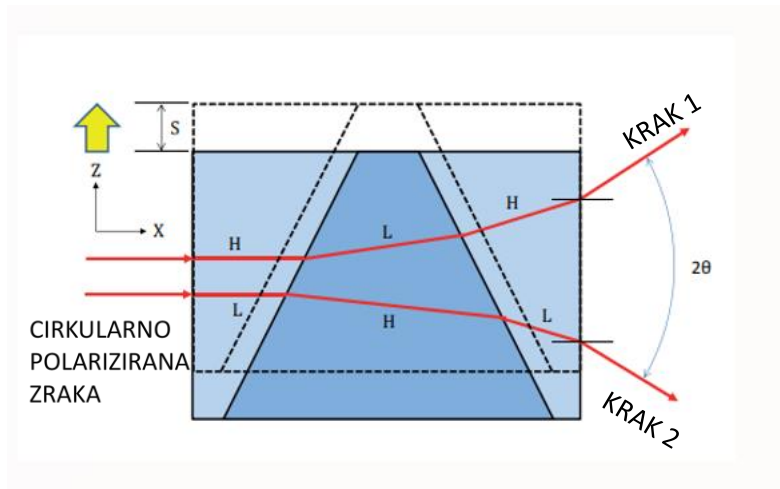
Kada vertikalno polarizirani (gornji) snop dosegne prijelaz između prvog i drugog klinastog elementa, doživljava smanjenje indeksa loma i stoga je refraktiran dalje od normale. Međutim, kada horizontalno polarizirani (donji) snop doseže isto sučelje, doživljava povećanje indeksa loma i stoga je refraktiran prema normali. Dakle, ovo je trenutak kada snopovi počinju slijediti divergentne putanje.

Kada vertikalno polarizirani snop dosegne sučelje između drugog i trećeg klinastog elementa, doživljava povećanje indeksa loma i stoga je ovaj put refraktiran prema normali. Slično tome, kada horizontalno polarizirani snop dosegne isto sučelje, doživljava smanjenje indeksa loma i stoga je ovaj put refraktiran dalje od normale. Budući da je sučelje između drugog i trećeg klinastog elementa nagnuto u suprotnom smjeru u odnosu na sučelje između prvog i drugog klinastog elementa, divergencija snopa dodatno se povećava.

Konačno, kada snopovi izlaze iz trećeg klinastog elementa, natrag u zrak, oba doživljavaju smanjenje indeksa loma i stoga se oba dalje odstupaju od normale, a njihova divergencija dodatno se povećava. Optike pravocrtnosti izrađuju se s visokim tolerancijama tako da kut divergencije snopa ( $20$ ) između snopova koji izlaze iz Wollastonove prizme podudara s efektivnim kutom reflektora pravocrtnosti, unutar nekoliko kutnih sekundi.

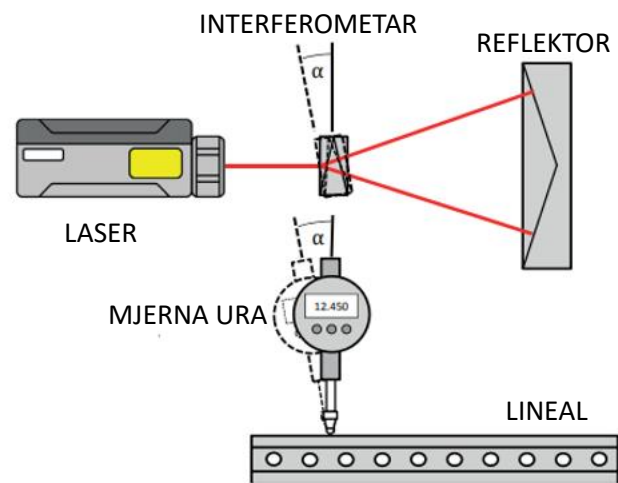
Diferencijalna refrakcija unutar Wollastonove prizme, koja uzrokuje rasipanje snopova, također je razlog zašto se optika može koristiti za mjerenje pravocrtnosti. Ako se Wollastonova prizma pomakne na udaljenost  $S$  u smjeru  $Z$ , na novu poziciju kako je naznačeno crtkanim linijama na Slici 27. Jasno je da će gornji (vertikalno polarizirani) snop proći kroz više materijala koji „vidi“ kao niži indeks loma ( $L$ ), dok će donji (horizontalno polarizirani) snop proći kroz više materijala koji prepoznaje kao viši indeks loma ( $H$ ), mijenjajući njihove optičke duljine puta sukladno tome. Budući da je gradijent optičke duljine puta kroz Wollaston također odgovoran za stvaranje kuta divergencije snopa od  $20$ , lako se može pokazati da će pomicanje Wollastona bočno za udaljenost  $S$  smanjiti optičku duljinu puta gornjeg snopa (koji čini krak 1 interferometrijskog mjerenja) za  $2 \cdot \sin(\varphi)$  i povećati optičku duljinu puta donjeg snopa (koji čini krak 2 interferometrijskog mjerenja) za  $2 \cdot S \cdot \sin(\varphi)$ . Dakle, čineći ukupnu relativnu promjenu duljina snopa između kraka 1 i

kraka 2 od  $-4 \cdot S \cdot \sin(\varphi)$ . Softver laserskog sustava će pretvoriti ovu relativnu promjenu duljina puta u očitavanje pravocrtnosti dijeljenjem s  $4 \cdot \sin(\varphi)$  kako bi dao očitavanje o nepravocrtnosti od  $-S$ .



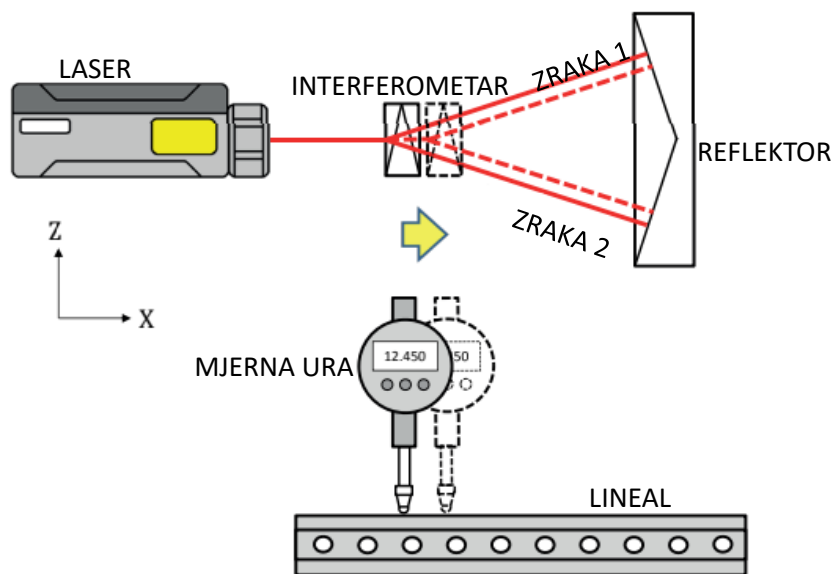
Slika 27. Diferencijalna refrakcija

Ako se Wollaston naginje pod malim kutem  $\alpha$  oko svojeg geometrijskog središta (kako je prikazano preuveličano radi jasnoće na Slici 28). Detaljno optičko modeliranje snopova kroz sustav otkriva da se razlika u optičkim duljinama puta između kraka 1 i kraka 2 (a time i rezultirajuće očitavanje pravocrtnosti) ne mijenja značajno malim kutnim pomacima Wollaston prizme. Ovo ponovno odgovara analogiji pravocrtnog interferometra koji djeluje poput mjerne ure (koji također ne bi bio značajno pogođen malim promjenama kuta).



Slika 28. Naginjanje Wollastona

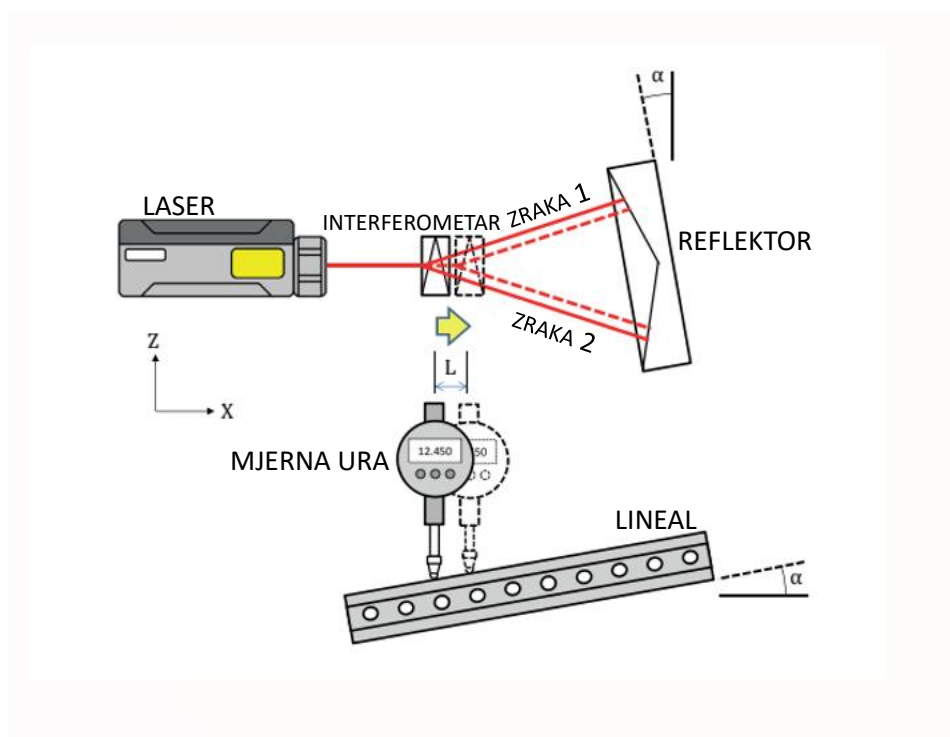
Slika 29 pokazuje što se događa ako Wollastonova prizma pomaknuta po savršeno ravnoj liniji u smjeru x (označeno žutom strelicom i točkasto nove linije položaja). Laserske zrake ulaze i krakovi 1 i 2 će se povećati za isti iznos tako da se lasersko mjerenje pravocrtnosti neće promijeniti. Ovo ponovno odgovara ponašanju mjerne ure koji se kreće duž lineala.



Slika 29. Pomicanje prizme (Wollastona) po liniji



Ako se Wollaston prizma ponovno pomiče u savršeno pravoj liniji u smjeru  $X$ , ali ovaj put je reflektor pravocrtnosti blago nagnut pod malim kutem  $\alpha$ , kako je prikazano (grubo preuveličano) na Slici 30. Ako je  $L$  udaljenost pomaka, lasersko očitavanje pravocrtnosti promijenit će se za  $L \cdot \tan(\alpha)$ . Napomena da će očitavanje mjerne ure biti pogođeno točno na isti način ako je lineal nagnut za isti iznos. U mjerenju pravocrtnosti, ako je reflektor ili lineal nagnut u odnosu na os kretanja, "greška nagiba" uvodi se u mjerenja. Ova pogreška obično se uklanja softverom pomoću prilagodbe na kraju **ili metodom najmanjih kvadrata**. Međutim, mudro je minimizirati grešku nagiba (prilagođavanjem lineala ili reflektora) kako bi se smanjila osjetljivost na pogreške položaja u smjeru  $X$  i, u slučaju lasera, kako bi se osiguralo maksimalno očuvanje signala duž osi.



Slika 30. Pomicanje prizme s nagibom

## 5. NORME

Korištene norme prilikom mjerenja opisane su u nastavku.

### 5.1. NORMA ISO 12780-1 [4]

#### GEOMETRIJSKE SPECIFIKACIJE PROIZVODA - PRAVOCRTNOST - VOKABULAR I PARAMETRI PRAVOCRTNOSTI

ISO 12780-1 norma određuje pojmove i koncepte neophodne za definiranje specifikacijskih operatora za pravocrtnost integralnih značajki. Određuje pojmove i koncepte vezane uz pravocrtnost individualnih integralnih značajki i obuhvaća isključivo potpune profile pravocrtnosti.

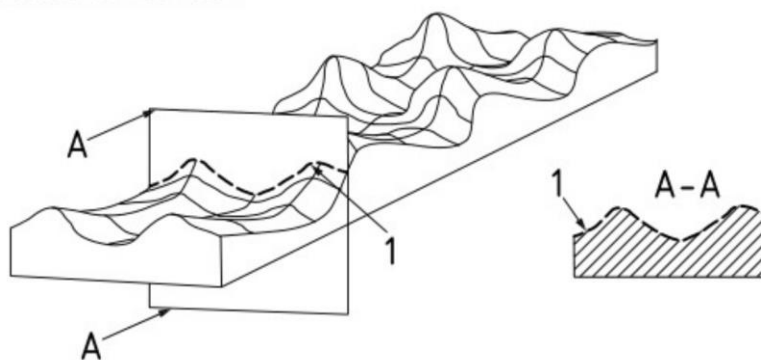
#### 5.1.1. Opći pojmovi

Pravocrtnost (engl. *straightness*) – svojstvo ravne linije (property of a straight line)

Normala površine (engl. *normal of the surface*) – normala značajke povezana s integralnom značajkom (normal of a feature associated with integral feature)

Ravnina pravocrtnosti (engl. *straightness plane*) - ravnina za koju je sjecište s pripadajućom integralnom značajkom ravna linija (plane for which the intersection with the associated integral feature is a straight line) [Slika 39]

Napomena: ravnina pravocrtnosti automatski uključuje normalu



Slika 31. Ravnina pravocrtnosti i izvučena linija

Ravnina pravocrtnosti A-A

Izvučena linija 1

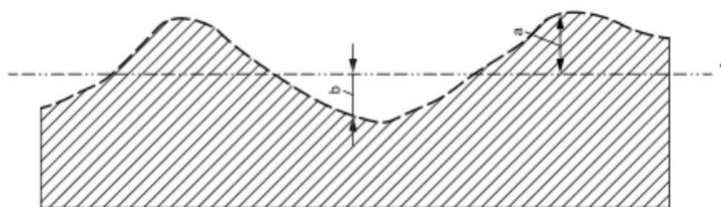
### 5.1.2. *Pojmovi koji se odnose na profile*

Izvučena linija (engl. *extracted line*) - izvučena linija namjerno modificirana filtrom (extracted line intentionally modified by a filter)

Napomena: ovo je profil na koji se mogu primijeniti koncepti i parametri ovog dijela ISO-a

Lokalno odstupanje pravocrtnosti (engl. *local straightness deviation*)  $\Delta S_i$  - odstupanje točke na profilu pravocrtnosti od referentne linije, pri čemu je odstupanje normalno na referentnu liniju (deviation of a point on a straightness profile from the reference line, the deviation being normal to the reference line)

Napomena: odstupanje je negativno od referentne linije točka leži u smjeru materijala



Slika 32. Lokalno odstupanje pravocrtnosti

**1** – referentna linija

**a** – pozitivno lokalno odstupanje pravocrtnosti

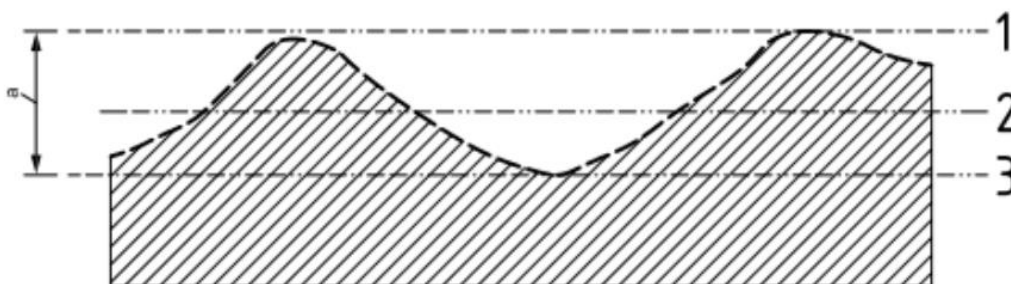
**b** – negativno lokalno odstupanje pravocrtnosti

### 5.1.3. *Pojmovi koji se odnose na referentnu liniju*

Referentna linija (engl. *reference line*) – povezana linija koja paše profilu pravocrtnosti u skladu sa posebnim konvencijama, na koje se odnose odstupanja od pravocrtnosti i parametri pravocrtnosti (associated line fitting the straightness profile in accordance with specific conventions, to which the deviations from straightness and the straightness parameters are referred)

Referentne linije minimalne zone (engl. *minimum zone reference lines*) - dvije paralelne crte u ravnini pravocrtnosti koje zatvaraju profil pravocrtnosti i imaju najmanji razmak (two parallel lines in the straightness plane enclosing the straightness profile and having the least separation)

Napomena: simbol MZ se koristi za označavanje referentnih elemenata minimalne zone



Slika 33. Referentna linija minimalne zone

**1 – referentna linija vanjske minimalne zone**

**2 – referentna linija srednje minimalne zone**

**3 – referentna linija unutarnje minimalne zone**

**a – najmanji razmak**

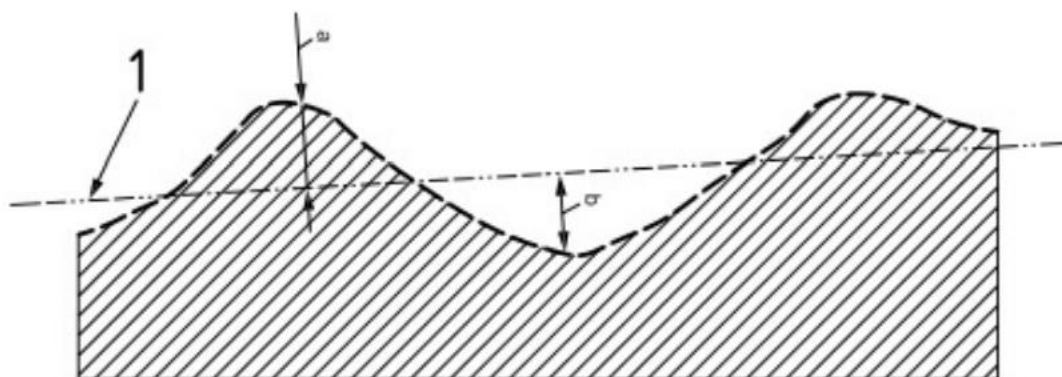
Referentna linija vanjske minimalne zone (engl. *outer minimum zone reference line*) – referentna linija minimalne zone izvan materijala (minimum zone reference line outside the material)

Referentna linija srednje minimalne zone (engl. *mean minimum zone reference line*) – linija aritmetičke sredine referentnih linija minimalne zone (arithmetic mean line of the minimum zone reference lines)

Referentna linija unutarnje minimalne zone (engl. *inner minimum zone reference line*) – referentna linija minimalne zone unutar materijala (minimum zone reference line inside the material)

Referentna linija najmanjeg kvadrata (engl. *least square reference line*) – linija takva da je zbroj kvadrata lokalnih odstupanja pravocrtnosti minimalan (line such the sum of the squares of the local straightness deviations is a minimum)

Napomena: simbol LS koristi se za označavanje referentnog elementa metodom najmanjih kvadrata, a simbol G (za Gaussa) koristi se kao prefiks za parametre temeljene na referentnim elementima metodom najmanjih kvadrata (the symbol LS is used to refer to least squares reference element and the symbol G (for Gaussian) is used as a prefix for parameters based on least squares reference elements).



Slika 34. Referentna linija najmanjeg kvadrata

**1** – referentna linija najmanjeg kvadrata

**a** – pozitivno lokalno odstupanje od pravocrtnosti

**b** – negativno lokalno odstupanje od pravocrtnosti

#### 5.1.4. Termini koji se odnose na funkciju filtera

Napomena: Ako nije drugačije naznačeno, detalji karakteristika filtera su kao što je opisano u ISO 12780-2.

Napomena: Trenutno je definiran samo fazno korigiran filter srednje linije. Prema tome, izrazi u ovoj potklauzuli odnose se samo na ovu vrstu filtra. Druge metode filtriranja trenutno istražuje ISO. Namjerava se uključiti ove nove filtere u buduće izdanje ovog dijela ISO 12780.

Filter profila (engl. *profile filter*) - filter koji radi na otvorenom profilu koji odašilje raspon sinusoidnih valovitosti za koje se definira omjer izlazne i ulazne amplitude dok se prigušuje (tj. smanjuje) omjer za valovitost koja leži izvan raspona na jednom ili na oba kraja.

Granična valna duljina (*engl. cut-off wavelength*) - granična valna duljina filtra primijenjenog na izvučenu liniju.

Prijenosna krivulja za profile pravocrtnosti (*engl. transmission band for straightness profiles*) - pojas valovitosti sinusoidnog profila koje filter prenosi u postotku većem od određenog, definiranog vrijednostima gornje i donje granične valne duljine.

Napomena: određeni postotak je obično 50%.

#### **5.1.5. Termini koji se odnose na parametre**

Odstupanje pravocrtnosti od vrha do doline (*engl. peak-to-valley straightness deviation*) - vrijednost najvećeg pozitivnog lokalnog odstupanja pravocrtnosti dodana apsolutnoj vrijednosti najvećeg negativnog lokalnog odstupanja pravocrtnosti

Napomena: odstupanje pravocrtnosti od vrha do doline definirana je za sve referentne linije

Napomena: odstupanje pravocrtnosti od vrha do udoline je jedini parametar koji je definiran za referentne linije minimalne zone.

Napomena: modifikator GT koristi se u specifikacijama za označavanje da se tolerancija oblika primjenjuje na odstupanje od vrha do udoline u odnosu na referentni element najmanjih kvadrata.

Odstupanje pravocrtnosti od vrha do reference (*engl. peak-to-reference straightness deviation*) – vrijednost najvećeg pozitivnog lokalnog odstupanja pravocrtnosti od referentne linije najmanjeg kvadrata

Napomena: odstupanje pravocrtnosti od vrha do reference definirano je samo za referentne linije najmanjeg kvadrata.

Napomena: modifikator GP koristi se u specifikacijama za označavanje da se tolerancija oblika primjenjuje na odstupanje od vrha do reference u odnosu na referentni element najmanjih kvadrata.

Odstupanje pravocrtnosti od reference do udoline (engl. *reference-to-valley straightness deviation*) - apsolutna vrijednost najvećeg negativnog lokalnog odstupanja pravocrtnosti od referentne linije najmanjih kvadrata

Napomena: : odstupanje pravocrtnosti od reference do udoline definirano je samo za referentne linije najmanjeg kvadrata.

Napomena: modifikator GV koristi se u specifikacijama za označavanje da se tolerancija oblika primjenjuje na odstupanje od reference do udoline u odnosu na referentni element najmanjih kvadrata.

Odstupanje pravocrtnosti korijena srednje vrijednosti kvadrata (engl. *root-mean-square straightness deviation*)  $\Delta S_{rms}$ - kvadratni korijen zbroja kvadrata lokalnih odstupanja pravocrtnosti od referentne crte metodom najmanjih kvadrata.

Napomena: odstupanje srednje kvadratne pravocrtnosti definirano je samo za referentne linije najmanjih kvadrata

Napomena: modifikator GQ koristi se u specifikacijama za označavanje da se tolerancija oblika primjenjuje na odstupanje korijena srednje vrijednosti kvadrata u odnosu na referentni element najmanjih kvadrata.

Napomena: odstupanje pravocrtnosti korijena srednje vrijednosti kvadrata dano je formulom

$$\Delta S_{rms} = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L \Delta S_l^2 dX} \quad (5.1.)$$

gdje je:

$\Delta S_{rms}$  - Odstupanje pravocrtnosti korijena srednje vrijednosti kvadrata

$\Delta S_l$  - Lokalno odstupanje pravocrtnosti

$X$  – trenutni položaj u profilu pravocrtnosti

$L$  – dužina referentne linije.

## 5.2. NORMA ISO 12780-2 [5]

### *Geometrijske specifikacije proizvoda (GPS) - Pravocrtnost*

#### *Drugi dio: Operatori specifikacije*

Izdvajanje podataka uvijek uključuje primjenu određenog procesa filtriranja. Dodatno filtriranje ekstrahiranih podataka možda se neće primijeniti. Ovaj dodatni filter može biti srednji linijski filter (Gaussov itd.) ili nelinearni filter (npr. morfološki filter). Vrsta filtriranja utječe na definiciju pravocrtnosti i specifikacijske operatore i, stoga, treba biti navedena nedvosmisleno.

Napomena: Filtriranje ticalom nije dovoljno za izgladiti profil. U određenim okolnostima može stvoriti lažni visokofrekventni sadržaj, dajući netočne vrijednosti. Da bi se to ispravilo, može se koristiti dugovalni filter. Koristi se Gaussov filter. Ovaj filter ima neke nedostatke, npr. može prije iskriviti nego eliminirati neka obilježja hrapavosti i može prije iskriviti nego ispravno prenijeti neka obilježja valovitosti. Zamišljeno je da novi filter koji se razvija unutar ISO-a pruži bolja rješenja za nekoliko od ovih problema.

Napomena: Ako se koristi ticalo manjeg radijusa od navedenog, izmjerena vrijednost općenito je veća. Taj je učinak obično beznačajan. Ako se koristi veći polumjer ticala, izmjerena vrijednost općenito je niža. Količina promjene uvelike ovisi o izmjerenoj površini.

Napomena: Mjerna sila od 0 N odabrana je kako bi se eliminirali učinci elastične deformacije izratka od operatora specifikacije. Na metalnim površinama odgovarajuće debljine, učinak mjernih sila koje se normalno javljaju je zanemariv.

Napomena: Preklapanje i drugi problemi tijekom izdvajanja, zbog većeg sadržaja jarmonika u modelu, u smjerovima pravocrtnosti, mogu uzrokovati nesigurnost specifikacije.

#### **5.2.1. Djelokrug**

Ovaj dio ISO 12780 specificira operator potpune specifikacije samo za pravocrtnost integralnih značajki i pokriva samo potpune profile pravocrtnosti, tj. geometrijske karakteristike značajki tipa linije.

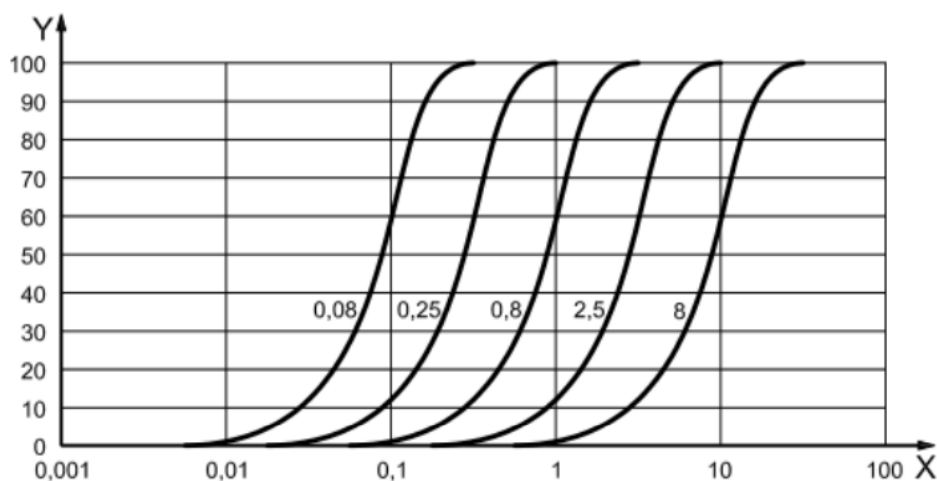


### 5.2.2. Općenito

Potpuni specifikacijski operator je potpuni uređen skup jednoznačnih specifikacijskih operacija u dobro definiranom redoslijedu. Potpuni operator specifikacije definira prijenosnu krivulju za profil pravocrtnosti, zajedno s odgovarajućom geometrijom vrha igle.

### 5.2.3. Dugovalni filter

Dugovalni filter mora biti fazno korigiran filter koji propušta valove beskonačne duljine i postupno prigušuje neravnine profila u području valovitosti oko granične duljine.



Slika 35. Prijenosna karakteristika za dugovalni filter koji ima granične duljine

$X$  – valna duljina [mm]

$Y$  – prijenos [%]

Funkcija prigušenja dana je izrazom:

$$\frac{a_1}{a_0} = e^{-\pi \left( \frac{\alpha \lambda_c}{\lambda} \right)^2} \quad (5.2.)$$

gdje je:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\ln(2)}{\pi}} = 0,4697$$

$a_0$  - amplituda valovitosti sinusnog vala prije filtriranja,

$a_1$  – amplituda valovitosti sinusnog vala poslije filtriranja,

$\lambda_c$  - odsječena duljina dugovalnog filtra,

$\lambda$  – valna duljina sinusnog vala.

#### 5.2.4. Granične valne duljine

Filter profila određuje raspon periodičnih sinusoidnih valovitosti značajke uključene u procjenu pravocrtnosti. Raspon je određen vrijednostima iz tablice. Tablica također daje maksimalni razmak točaka uzorka koji će se koristiti za izvučenu liniju i radijus igle koji je potreban da bi se izbjeglo izobličenje profila pravocrtnosti zbog utjecaja vrha igle.

**Tablica 1**      **Tablica graničnih vrijednosti**

Dimenzije u milimetrima

Dugovalni filtri		
Filter koji se kreće od beskonačne valne duljine do	Maksimalni razmak točaka uzorka	Maksimalni radijus vrha ticala <sup>a</sup> <i>R</i>
8	1,14	5
2,5	0,357	1,5
0,8	0,114	0,5
0,25	0,035 7	0,15
0,08	0,011 4	0,05
<sup>a</sup> Kada je zahtjev za maksimalni radijus vrha ticala ispunjen, radijus vrha ticala je usporedive veličine s valnom duljinom najkraćih valova koje propušta filter profila. Ovo je u skladu sa zahtjevima radijusa vrha ticala za instrumente za mjerenje teksture površine.		

Napomena: Potreban broj točaka odgovara sedam točaka uzorka za svaku graničnu vrijednost, što je minimalni broj točaka za procjenu.

Napomena: Ako se koristi dulja ili kraća granična vrijednost od onih navedenih u tablici, tada se primjenjivi maksimalni razmak točaka uzorkovanja i maksimalni radijus vrha ticala mogu izračunati iz omjera u tablici.

#### 5.2.5. Sustav sondiranja

Metoda ticanja - kontakti sustav ticanja s vrhom ticala dio je specifikacijskog operatora.

Geometrija vrha ticala - teoretski točna geometrija vrha je sfera

Sila sondiranja - sila sondiranja je 0 N.

## 6. OPREMA

### 6.1. RENISHAW ML-10 LASER [6]

Laserski interferometar Renishaw ML10 korišten je kao mjerni uređaj za provedbu postupka mjerenja.

Tehnički podaci

- Točnost sustava: Točnost sustava:  $\pm 0,7 \mu\text{m/m}$
- Razlučivost sustava je 1 nm pri brzini gibanja od maksimalno 1 m/s
- Mjerni raspon do 40 m
- Određivanje položaja, pravokutnosti i kutova na kratkim i dugačkim relacijama
- Izvor lasera je laserska cijev (KLASA II)

Prisutne komponente:

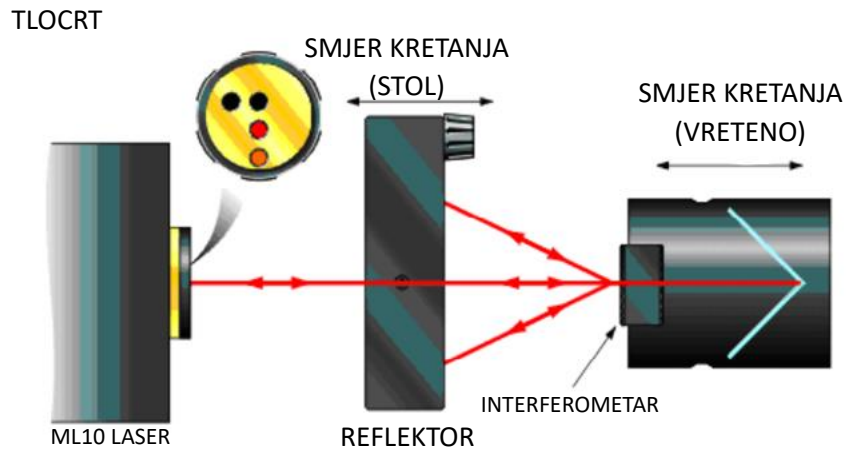
- Osnovna jedinica laserski interferometar Renishaw ML10
- Kartica sučelja PCM 20
- Zlatna optika za veliki domet raspona mjerenja ( $\geq 40 \text{ m}$ )
- Crna optika za kratki domet raspona mjerenja ( $\leq 40 \text{ m}$ )

Moguća mjerenja:

- Pravokutnost
- Položaj
- Kut nagiba
- Pravocrtnost

Područja primjene

- U nastavi proizvodnog strojarstva i u laboratoriju
- Usluge na području mjerenja u proizvodnom području
- Kalibracija i mjerni prsten strojeva za plazmu u brodogradnji



Slika 36. Pogled na Renishaw ML10 za mjerenje pravocrtnosti

## 6.2. JEDINICA ZA KOMPENZACIJU OKOLINE EC10

Zbog što preciznijeg laserskog interferometra, EC10 kompenzacijska jedinica prati i prikuplja podatke iz okoline putem senzora. Mjeri okolnu temperaturu, vlažnost u zraku i tlak. Kompenzirajući podatke izračunava valnu duljinu laserske zrake.

Senzori topline postavljaju se na strateške pozicije tijekom mjerenja. Izbjegava se postavljanje senzora blizu izvora topline/hladnoće radi izbjegavanja netočnog mjerenja.

Senzoru temperature materijala treba osigurati dobar i čvrst kontakt s materijalom koji se mjeri. Glavna svrha senzora je procijeniti linearnu točnost pozicioniranja.



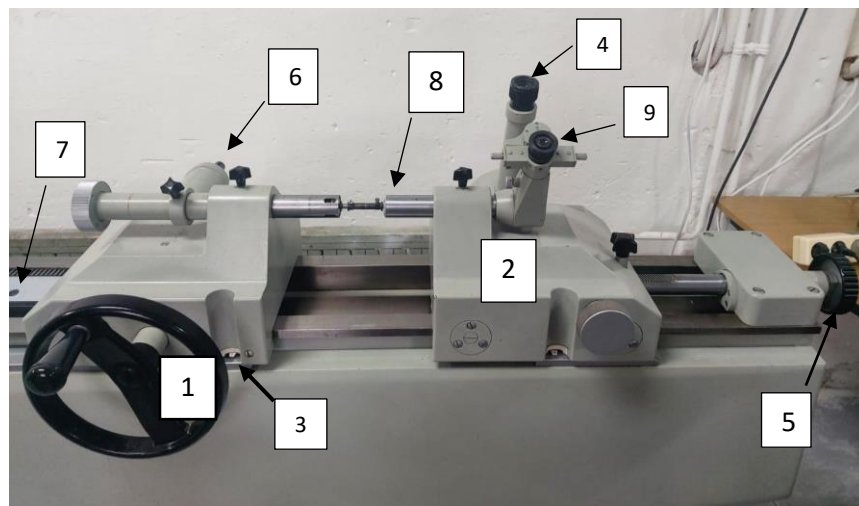
Slika 37. EC10



Slika 38. Senzori

### 6.3.1D UREĐAJ ZA MJERENJE DULJINE

Provedba mjerenja odrađena je na 1D mjernom uređaju proizvođača ZEISS Jena prikazanom na slici ispod. Uređaj služi za mjerenje duljina do 3000 mm. Uređaj se sastoji od kolica (1) i mjerne glave (2).



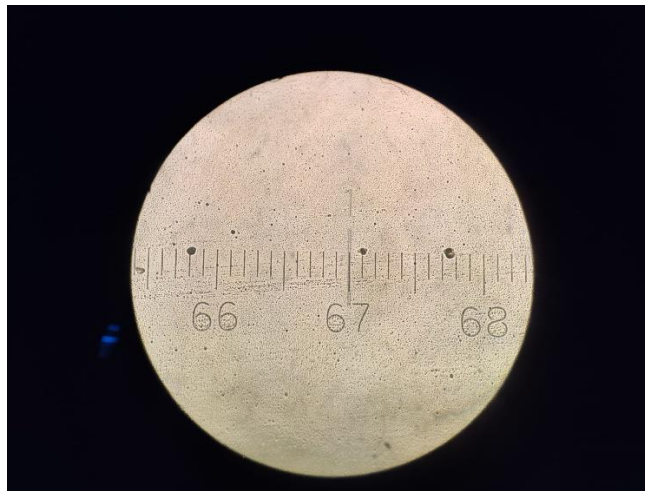
Slika 39. 1D mjerni uređaj

Pokretanjem kolica (1) kreće se po mjernoj skali (3) te se pomiču dvije glavne linije prikazane na Slici 41. Vrijednost se očitava „golim okom“. To je ugrubo pozicionirana duljina. Mjerna skala (3) pobliže (tlocrt) prikazana je na slici ispod [Slika 40].



**Slika 40. Mjerna skala na kolicima**

Mjerna skala (4) koja se nalazi na mjernoj glavi proteže se od 0 do 100 mm, a jedan njen dio prikazan je na slici ispod. Ručica (5) koristi se za pomicanje same mjerne glave, a time i skale koja se nazali za gornjoj optici. Ona odrađuje tzv. fino pozicioniranje. Sa mjerne skale (4) očitavaju se prve dvije decimale od postavljene pozicije.

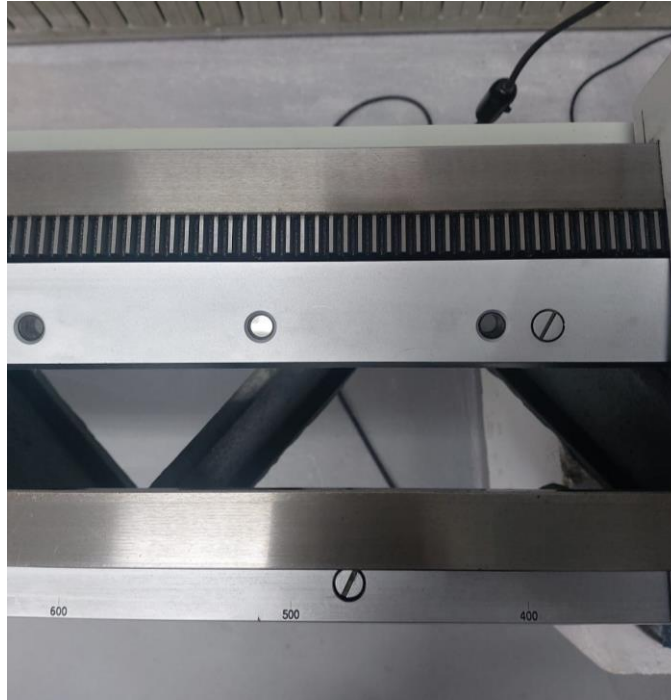


**Slika 41. Mjerna skala na mjernoj glavi**

Sa druge strane kolica nalazi se izvor svjetla (6) [Slika 42] ispod. Sa druge strane mjerne skale (3) su prozori (7) [Slika 43] iz kojih, kad ih svjetlost obasja, je moguće očitavanje decimale prilikom finog očitavanja.



**Slika 42. Izvor svjetla**



**Slika 43.      Prozori**

Ugradnjom dodatnog optičkog sustava s ticalom (8) dobiva se tzv. najfinije pozicioniranje, tj. očitavanje u  $\mu\text{m}$ . Ako se ticalo prisloni na mjerni predmet moguće je očitati i najmanji pomak na najfinijoj mjernoj skali (9) [Slika 44]. Ova skala raspona je od  $-100 \mu\text{m}$  do  $+100 \mu\text{m}$ . Očitava treću i četvrtu decimali i postavlja sustav u točan položaj i u mikrometrima.



**Slika 44.      Najfinija mjerna skala**



## 7. PROVEDBA MJERENJA

Jedna od tri ključne komponente mjerenja horizontalne pravocrtnosti na pokretnom stolnom stroju je sami interferometar pravocrtnosti. On je u ovom mjerenju pričvršćen na klizač duge mjerne skale kao što je prikazano na slikama ispod.



Slika 45. Interferometar

Na jednom kraju mjernog uređaja nalazi se laser koji je postavljen na tronožac kao što se vidi na slici ispod. Laserska zraka podešena je na način opisan u poglavlju 3. *LINEARNO MJERENJE*. Nakon što je snop laserske zrake pravilno podešen bilo je moguće mjeriti vertikalnu i horizontalnu pravocrtnost.



Slika 46. Laser

Na drugom kraju mjernog uređaja postavljen je reflektor pravocrtnosti. On je postavljen na stol kao što je prikazano na slikama ispod.



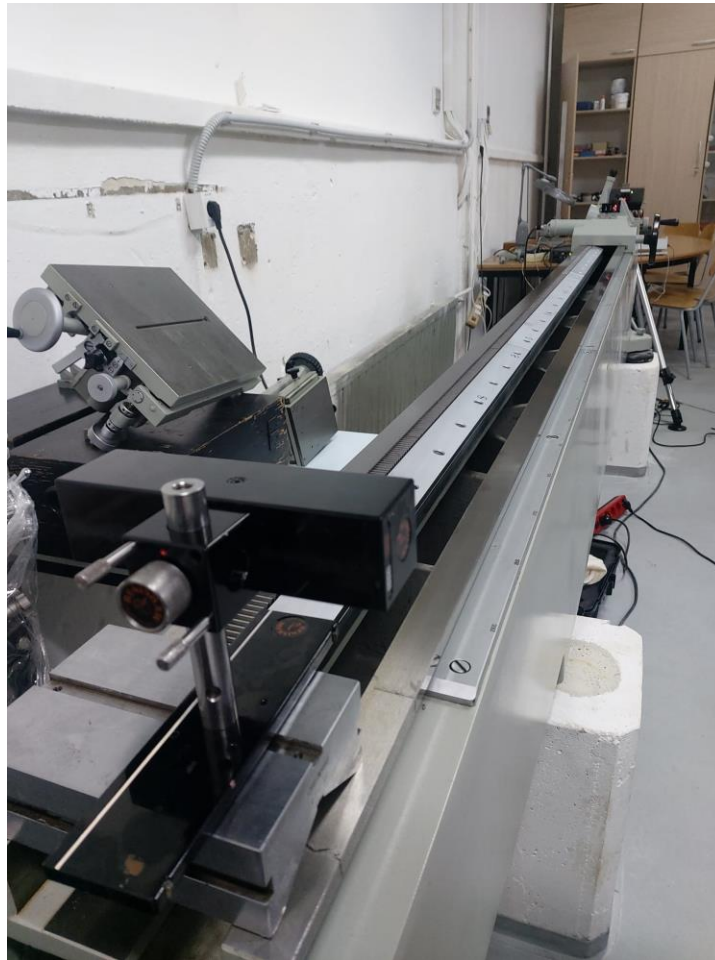
Slika 47. Reflektor pravocrtnosti – horizontalno ispitivanje

Pogled na reflektor odozgor prikazan je na slici ispod.



Slika 48. Reflektor pravocrtnosti - odozgor

Pogled na stroj iz kuta reflektora prikazan je na slici ispod.



**Slika 49. Prikaz stroja iz kuta reflektora**

Kolica se dovode na željenu vrijednost mjerenja u razmacima od 100 mm. Kako pomičemo kolica, laser i optika mjere *vodoravno* odstupanje od referentne linije.

Zakretanjem interferometra i reflektora za  $90^\circ$  [Slika 50] moguće je mjeriti vertikalno odstupanje od pravocrtosti (*vertikalna pravocrtost*).

Kada zraka iz lasera dođe do interferometra dijeli se na dvije odvojene zrake s kutom divergencije između njih. Dvije takve zrake dolaze do reflektora koji ih reflektira natrag putem kojim su došle. Vraćajući se na interferometar zrake se rekombiniraju te nastavljaju natrag prema laseru. U laseru

se preklapaju te nastaje mjerni signal. Laserski sustav mjeri pravocrtnosti otkrivanjem relativnih promjena između duljina optičkih putova u dva kraka interferometra.



Slika 50. Reflektor pravocrtnosti i interferometar – vertikalno ispitivanje pravocrtnosti vođenja

Prikaz sučelja programa prilikom rada lasera.



Slika 51. Sučelje

## 8. PODACI ZA RAD

### 8.1. HORIZONTALNA PRAVOCRTNOST

Tablica 2      Rezultati prvog mjerenja horizontalne pravocrtnosti

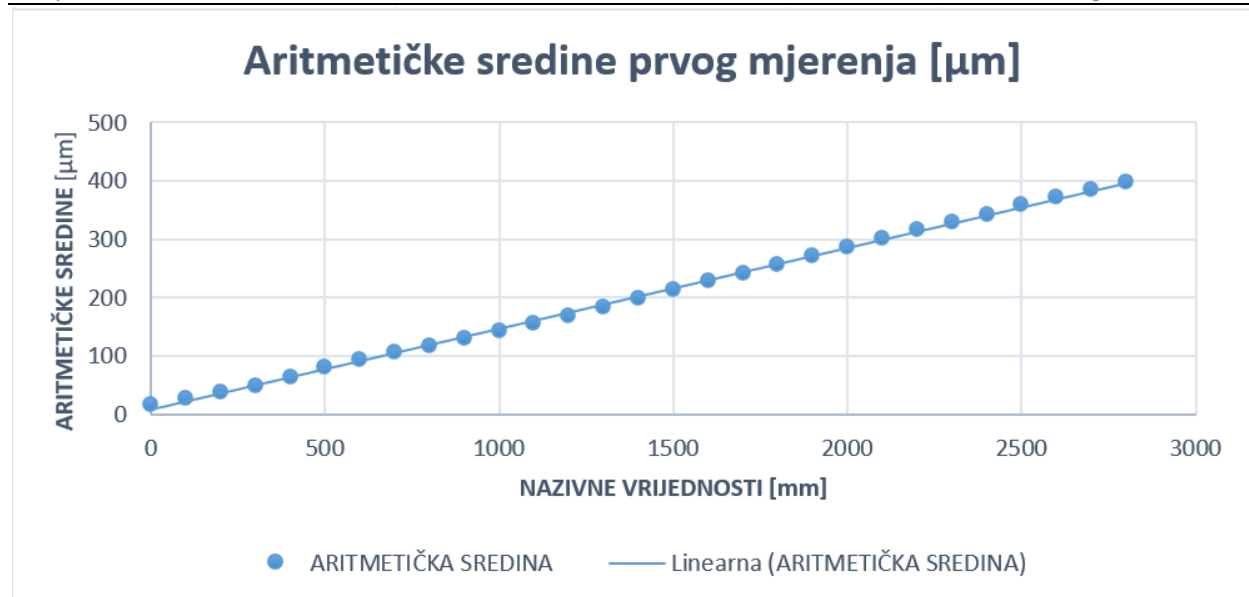
Pozicija, $x$ [mm]	Jedan smjer [mm]	Drugi smjer [mm]	Jedan smjer [ $\mu\text{m}$ ]	Drugi smjer [ $\mu\text{m}$ ]	Aritmetičke sredine podataka [ $\mu\text{m}$ ]
0	0,001	0,034	1,016	34,29 <u>0</u>	17,653
100	0,01 <u>0</u>	0,045	10,16 <u>0</u>	45,212	27,686
200	0,02 <u>0</u>	0,057	19,558	57,15 <u>0</u>	38,354
300	0,035	0,063	34,798	63,5 <u>00</u>	49,149
400	0,05 <u>0</u>	0,076	49,784	76,454	63,119
500	0,072	0,092	71,882	91,694	81,788
600	0,085	0,104	85,09 <u>0</u>	103,632	94,361
700	0,097	0,115	97,282	115,062	106,172
800	0,110	0,125	110,236	125,476	117,856
900	0,123	0,137	123,19 <u>0</u>	137,414	130,302
1000	0,136	0,149	135,89 <u>0</u>	149,352	142,621
1100	0,15 <u>0</u>	0,163	150,368	162,56	156,464
1200	0,164	0,176	163,83 <u>0</u>	175,514	169,672
1300	0,178	0,191	178,054	190,5 <u>00</u>	184,277
1400	0,193	0,203	193,04 <u>0</u>	203,2 <u>00</u>	198,12 <u>0</u>
1500	0,208	0,218	208,026	218,44 <u>0</u>	213,233
1600	0,223	0,234	222,758	233,68 <u>0</u>	228,219
1700	0,238	0,247	237,744	247,396	242,57 <u>0</u>
1800	0,252	0,262	252,476	261,62 <u>0</u>	257,048
1900	0,268	0,276	267,716	275,844	271,78 <u>0</u>
2000	0,283	0,291	283,464	290,83 <u>0</u>	287,147
2100	0,296	0,305	296,418	305,054	300,736
2200	0,314	0,32 <u>0</u>	313,69 <u>0</u>	319,786	316,738
2300	0,327	0,334	326,898	334,264	330,581
2400	0,34 <u>0</u>	0,347	339,598	347,472	343,535
2500	0,357	0,361	357,378	360,934	359,156
2600	0,371	0,373	371,348	373,38 <u>0</u>	372,364
2700	0,385	0,386	385,318	385,826	385,572
2800	0,398	0,397	398,018	397,256	397,637

**Tablica 3**      **Rezultati drugog mjerenja horizontalne pravocrtnosti**

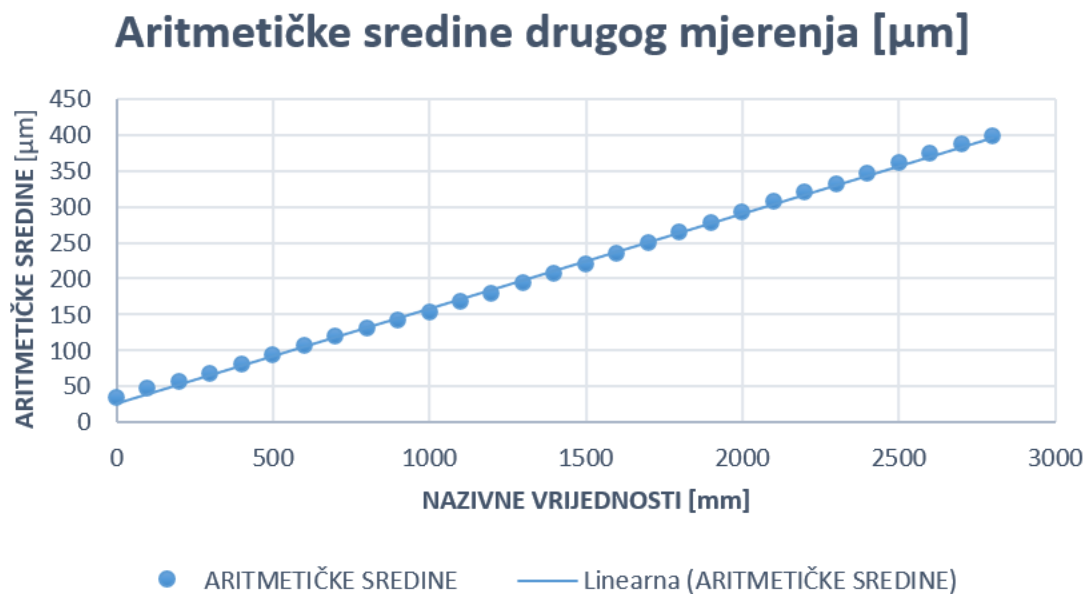
Pozicija, $x$ [mm]	Jedan smjer [mm]	Drugi smjer [mm]	Jedan smjer [ $\mu\text{m}$ ]	Drugi smjer [ $\mu\text{m}$ ]	Aritmetičke sredine podataka [ $\mu\text{m}$ ]
<b>0</b>	0,024	0,045	23,622	44,704	34,163
<b>100</b>	0,037	0,055	37,084	54,61 <u>0</u>	45,847
<b>200</b>	0,048	0,064	48,26 <u>0</u>	63,754	56,007
<b>300</b>	0,057	0,074	57,912	74,422	66,167
<b>400</b>	0,073	0,088	72,644	87,63 <u>0</u>	80,137
<b>500</b>	0,086	0,1 <u>00</u>	86,106	100,076	93,091
<b>600</b>	0,098	0,113	98,298	113,03 <u>0</u>	105,664
<b>700</b>	0,111	0,125	111,252	125,476	118,364
<b>800</b>	0,123	0,137	123,19 <u>0</u>	136,906	130,048
<b>900</b>	0,135	0,149	134,62 <u>0</u>	149,098	141,859
<b>1000</b>	0,147	0,159	147,32 <u>0</u>	159,004	153,162
<b>1100</b>	0,162	0,172	161,544	171,958	166,751
<b>1200</b>	0,173	0,184	173,482	183,896	178,689
<b>1300</b>	0,189	0,198	188,722	197,866	193,294
<b>1400</b>	0,202	0,212	201,676	212,344	207,01 <u>0</u>
<b>1500</b>	0,215	0,225	215,392	225,298	220,345
<b>1600</b>	0,23 <u>0</u>	0,24 <u>0</u>	229,87 <u>0</u>	239,776	234,823
<b>1700</b>	0,246	0,254	245,618	254,0 <u>00</u>	249,809
<b>1800</b>	0,26 <u>0</u>	0,269	260,096	268,732	264,414
<b>1900</b>	0,274	0,282	273,558	282,194	277,876
<b>2000</b>	0,289	0,297	289,052	296,672	292,862
<b>2100</b>	0,303	0,311	302,514	311,15 <u>0</u>	306,832
<b>2200</b>	0,316	0,324	315,722	323,596	319,659
<b>2300</b>	0,331	0,312	330,708	312,42 <u>0</u>	321,564
<b>2400</b>	0,343	0,35 <u>0</u>	342,9 <u>00</u>	349,758	346,329
<b>2500</b>	0,359	0,363	359,41 <u>0</u>	362,712	361,061
<b>2600</b>	0,372	0,375	371,602	374,904	373,253
<b>2700</b>	0,386	0,387	385,572	386,842	386,207
<b>2800</b>	0,398	0,398	398,272	398,018	398,145

Tablica 4 Rezultati trećeg mjerenja horizontalne pravocrtnosti

Pozicija, $x_i$ [mm]	Jedan smjer [mm]	Drugi smjer [mm]	Jedan smjer [ $\mu\text{m}$ ]	Drugi smjer [ $\mu\text{m}$ ]	Aritmetičke sredine podataka [ $\mu\text{m}$ ]
<b>0</b>	0,002	0,073	2,032	72,898	37,465
<b>100</b>	0,009	0,08 <u>0</u>	8,89 <u>0</u>	80,264	44,577
<b>200</b>	0,018	0,087	18,034	87,376	52,705
<b>300</b>	0,03 <u>0</u>	0,082	30,226	81,788	56,007
<b>400</b>	0,042	0,092	42,418	91,948	67,183
<b>500</b>	0,055	0,102	55,372	102,108	78,74 <u>0</u>
<b>600</b>	0,07 <u>0</u>	0,114	69,85 <u>0</u>	114,3 <u>00</u>	92,075
<b>700</b>	0,082	0,125	81,788	124,714	103,251
<b>800</b>	0,094	0,135	93,726	135,128	114,427
<b>900</b>	0,106	0,145	105,664	144,78 <u>0</u>	125,222
<b>1000</b>	0,117	0,154	117,094	154,432	135,763
<b>1100</b>	0,131	0,166	131,064	166,116	148,59 <u>0</u>
<b>1200</b>	0,144	0,177	143,764	176,53 <u>0</u>	160,147
<b>1300</b>	0,157	0,188	157,226	188,214	172,72 <u>0</u>
<b>1400</b>	0,17 <u>0</u>	0,201	170,18 <u>0</u>	200,914	185,547
<b>1500</b>	0,185	0,213	185,42 <u>0</u>	213,106	199,263
<b>1600</b>	0,198	0,226	197,866	225,552	211,709
<b>1700</b>	0,211	0,237	211,328	237,49 <u>0</u>	224,409
<b>1800</b>	0,225	0,25 <u>0</u>	224,79 <u>0</u>	249,682	237,236
<b>1900</b>	0,239	0,262	238,76 <u>0</u>	262,382	250,571
<b>2000</b>	0,254	0,275	254,0 <u>00</u>	275,336	264,668
<b>2100</b>	0,266	0,288	266,446	287,528	276,987
<b>2200</b>	0,281	0,299	281,432	299,212	290,322
<b>2300</b>	0,294	0,31 <u>0</u>	294,386	309,880	302,133
<b>2400</b>	0,309	0,322	309,118	321,564	315,341
<b>2500</b>	0,322	0,334	322,326	333,502	327,914
<b>2600</b>	0,334	0,343	334,518	343,154	338,836
<b>2700</b>	0,347	0,349	347,472	348,996	348,234
<b>2800</b>	0,36 <u>0</u>	0,359	359,664	359,41 <u>0</u>	359,537

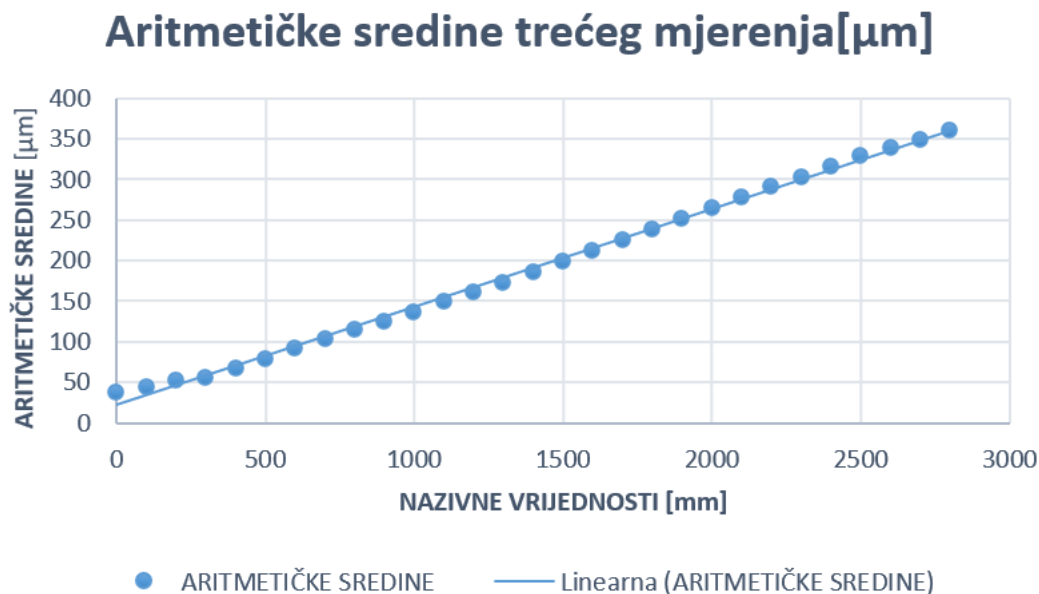


Slika 52. Aritmetičke sredine prvog mjerenja horizontalne pravocrtnosti



Slika 53. Aritmetičke sredine drugog mjerenja horizontalne pravocrtnosti





Slika 54. Aritmetičke sredine trećeg mjerenja horizontalne pravocrtnosti

#### 8.1.1. Slope i Intercept [7]

Kao što je i prikazano u gornjim grafovima, aritmetičke sredine mjerenja su y vrijednosti, dok su nazivne vrijednosti x vrijednosti. Tražena funkcija pravca dana je formulom

$$y = ax + b \quad (8.1.)$$

Gdje je:

$a$  – SLOPE ( $y_i, x_i$ )

$b$  – INTERCEPT ( $y_i, x_i$ )

Funkcija *SLOPE* unutar *Microsoft Office Excel* programa vraća nagib pravca linearne regresije kroz dane točke podataka. Jednostavno unutar jedne excelove „kućice“ upišemo `=SLOPE`. Excel nas odmah traži y i x podatke koji nas zanimaju. Za  $y_i$  vrijednosti označeni su svi podaci iz stupca *Aritmetičke sredine podataka [ $\mu\text{m}$ ]*, a za  $x_i$  vrijednosti označeni su svi podaci iz stupca *Pozicija,  $x_i$  [ $\text{mm}$ ]* iz gore navedenih tablica.

Za podatke iz gornjih tablica, tražena funkcija *SLOPE* dala je vrijednosti:

$$a_1 = 0,138719034 \quad (8.2.)$$

$$a_2 = 0,132479768 \quad (8.3.)$$

$$a_3 = 0,230534877 \quad (8.4.)$$

Funkcija *INTERCEPT* unutar *Microsoft Office Excel* programa izračunava točku u kojoj pravac presijeca os  $y$  pomoću pravca regresije s najmanjim odstupanjem iscrtanim kroz poznate vrijednosti. Funkcionira kao i funkcija *SLOPE* opisana u ovom poglavlju. Unutar excelove „kućice“ upišemo `=INTERCEPT`. Excel nas odmah traži  $y$  i  $x$  podatke koji nas zanimaju. Za  $y_i$  vrijednosti označeni su svi podaci iz stupca *Aritmetičke sredine podataka* [ $\mu\text{m}$ ], a za  $x_i$  vrijednosti označeni su svi podaci iz stupca *Pozicija*,  $x_i$  [ $\text{mm}$ ] iz gore navedenih tablica.

Za podatke iz gornjih tablica, tražena funkcija *INTERCEPT* dala je vrijednosti:

$$b_1 = 0,138719034 \quad (8.5.)$$

$$b_2 = 0,132479768 \quad (8.6.)$$

$$b_3 = 0,230534877 \quad (8.7.)$$

Umetanjem (8.2.), (8.3.), (8.4.), (8.5.), (8.6.), (8.7.) u formulu pravca (8.1.) dobijemo jednadžbe pravaca

$$y_1 = 0,138719034x + 0,138719034 \quad (8.8.)$$

$$y_2 = 0,132479768x + 0,132479768 \quad (8.9.)$$

$$y_3 = 0,230534877x + 0,230534877 \quad (8.10.)$$

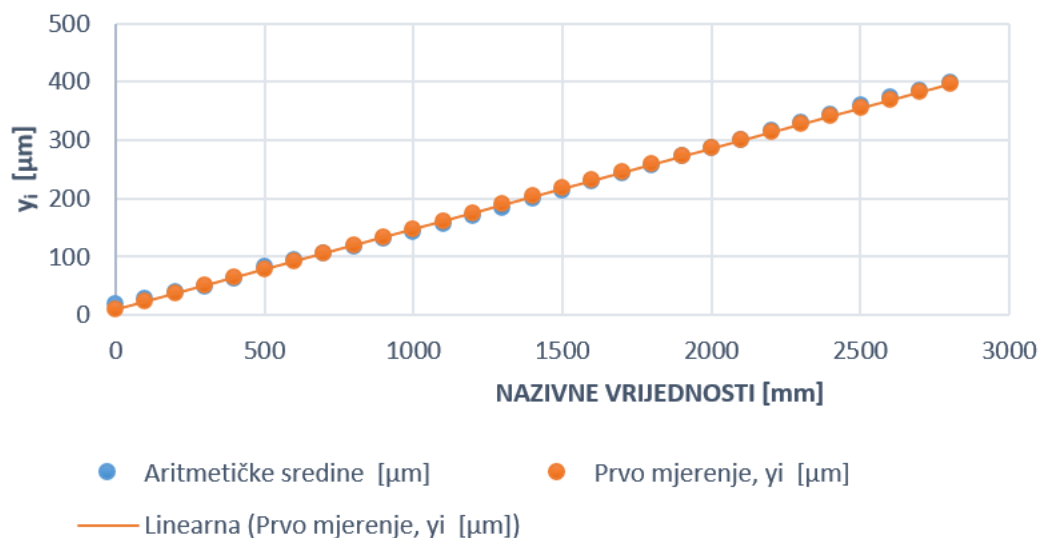
Uvrštavanjem  $x$  vrijednosti (nazivne vrijednosti) u gore navedene jednadžbe dobivamo  $y$  vrijednosti od sva tri mjerenja. Vrijednosti su prikazane tablično i grafično.

**Tablica 5 Pravci najmanjih kvadrata**

Pozicija, $x_i$ [mm]	Prvo mjerenje $y_i$ [ $\mu\text{m}$ ]	Drugo mjerenje $y_i$ [ $\mu\text{m}$ ]	Treće mjerenje $y_i$ [ $\mu\text{m}$ ]
<b>0</b>	8,6868	25,996	21,664
<b>100</b>	22,559	39,244	33,717
<b>200</b>	36,431	52,492	45,769
<b>300</b>	50,303	65,740	57,822
<b>400</b>	64,174	78,988	69,874
<b>500</b>	78,046	92,236	81,927
<b>600</b>	91,918	105,484	93,979
<b>700</b>	105,790	118,732	106,032

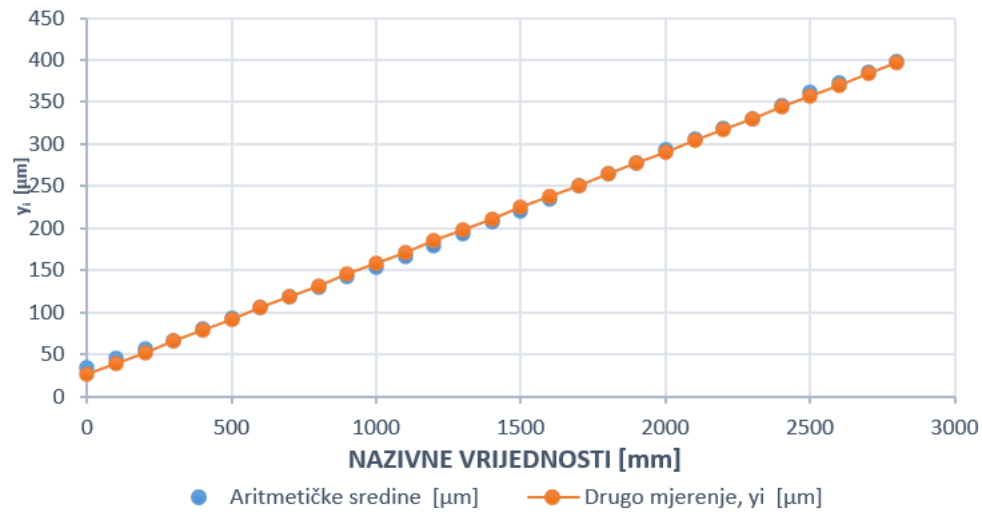
<b>800</b>	119,662	131,980	118,084
<b>900</b>	133,534	145,228	130,137
<b>1000</b>	147,406	158,476	142,189
<b>1100</b>	161,278	171,724	154,242
<b>1200</b>	175,150	184,972	166,294
<b>1300</b>	189,022	198,220	178,347
<b>1400</b>	202,893	211,468	190,399
<b>1500</b>	216,765	224,716	202,452
<b>1600</b>	230,637	237,964	214,504
<b>1700</b>	244,509	251,212	226,557
<b>1800</b>	258,381	264,460	238,609
<b>1900</b>	272,253	277,708	250,662
<b>2000</b>	286,125	290,956	262,714
<b>2100</b>	299,997	304,204	274,767
<b>2200</b>	313,869	317,452	286,819
<b>2300</b>	327,741	330,700	298,872
<b>2400</b>	341,612	343,948	310,924
<b>2500</b>	355,484	357,196	322,977
<b>2600</b>	369,356	370,444	335,029
<b>2700</b>	383,228	383,692	347,081
<b>2800</b>	397,100	396,940	359,134

### Poklapanje aritmetičkih sredina sa $y_1$



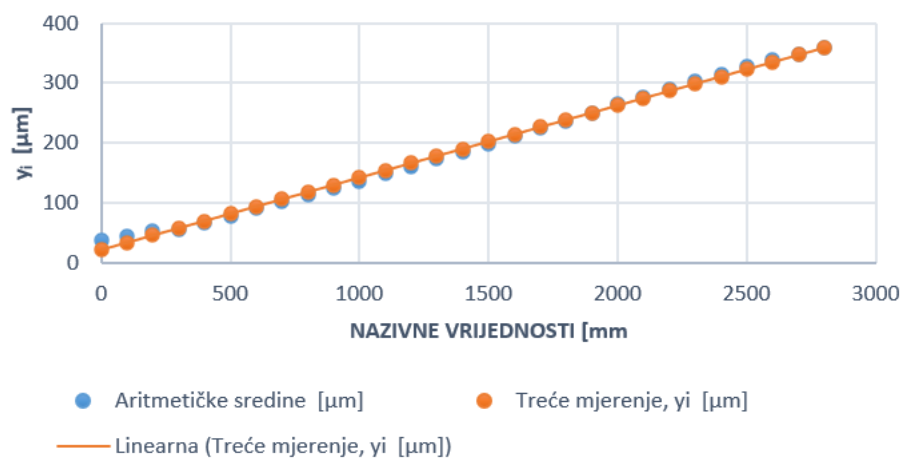
Slika 55. Usporedba aritmetičkih sredina i prvog pravca

### Poklapanje aritmetičkih sredina sa $y_2$



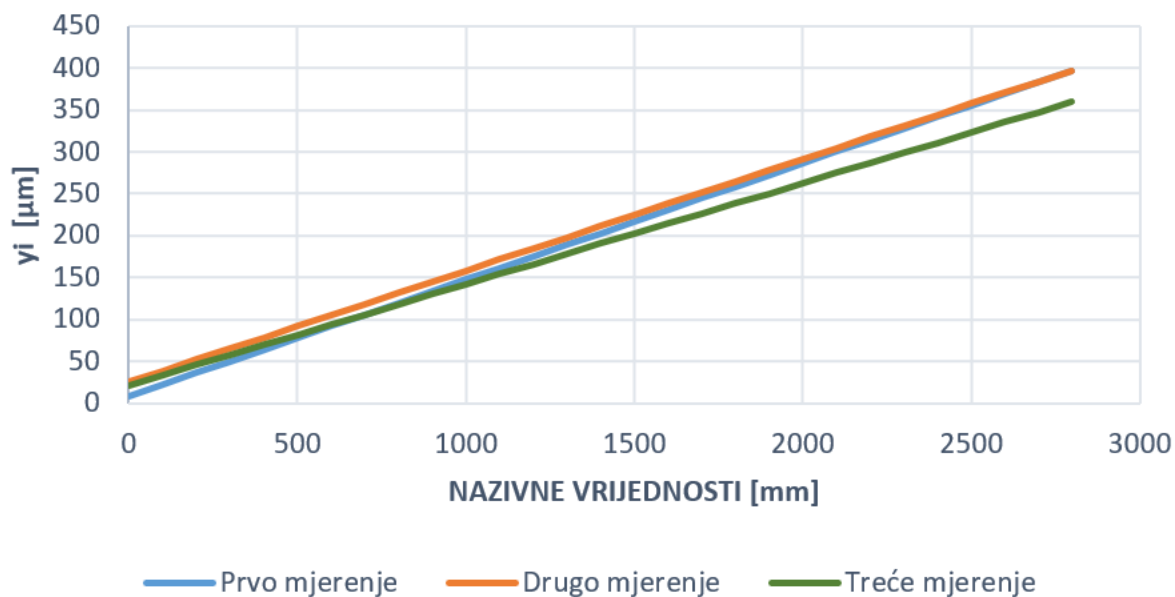
Slika 56. Usporedba aritmetičkih sredina i drugog pravca

### Poklapanje aritmetičkih sredina s $y_3$



Slika 57. Usporedba aritmetičkih sredina i trećeg pravca

## Usporedba pravaca $y_i$



Slika 58. Usporedba pravaca

Tablica 6 Rezultati odstupanja od horizontalne pravocrtnosti

Pozicija, $x_i$ [mm]	Prvo mjerenje $y_i - y$ [ $\mu\text{m}$ ]	Drugo mjerenje $y_i - y$ [ $\mu\text{m}$ ]	Treće mjerenje $y_i - y$ [ $\mu\text{m}$ ]
<b>0</b>	-8,966	-8,167	<b>-15,801</b>
<b>100</b>	-5,127	-6,603	-10,860
<b>200</b>	-1,923	-3,515	-6,936
<b>300</b>	1,154	-0,427	1,815
<b>400</b>	1,055	-1,149	2,691
<b>500</b>	-3,742	-0,855	3,187
<b>600</b>	-2,442	-0,180	1,904
<b>700</b>	-0,382	0,368	2,781
<b>800</b>	1,806	1,932	3,657
<b>900</b>	3,232	3,369	4,915
<b>1000</b>	4,785	5,314	<b>6,426</b>
<b>1100</b>	4,814	4,973	5,652
<b>1200</b>	5,478	6,283	6,147
<b>1300</b>	4,745	4,926	5,627

<b>1400</b>	4,773	4,458	4,852
<b>1500</b>	3,532	4,371	3,189
<b>1600</b>	2,418	3,141	2,795
<b>1700</b>	1,939	1,403	2,148
<b>1800</b>	1,333	0,046	1,373
<b>1900</b>	0,473	-0,168	0,091
<b>2000</b>	-1,022	-1,906	-1,954
<b>2100</b>	-0,739	-2,628	-2,220
<b>2200</b>	-2,869	-2,207	-3,503
<b>2300</b>	-2,840	<b>8,456</b>	-3,261
<b>2400</b>	-1,923	-2,381	-4,417
<b>2500</b>	-3,672	-3,865	-4,937
<b>2600</b>	-3,008	-2,809	-3,807
<b>2700</b>	-2,344	-2,515	-1,152
<b>2800</b>	-0,537	-1,205	-0,403



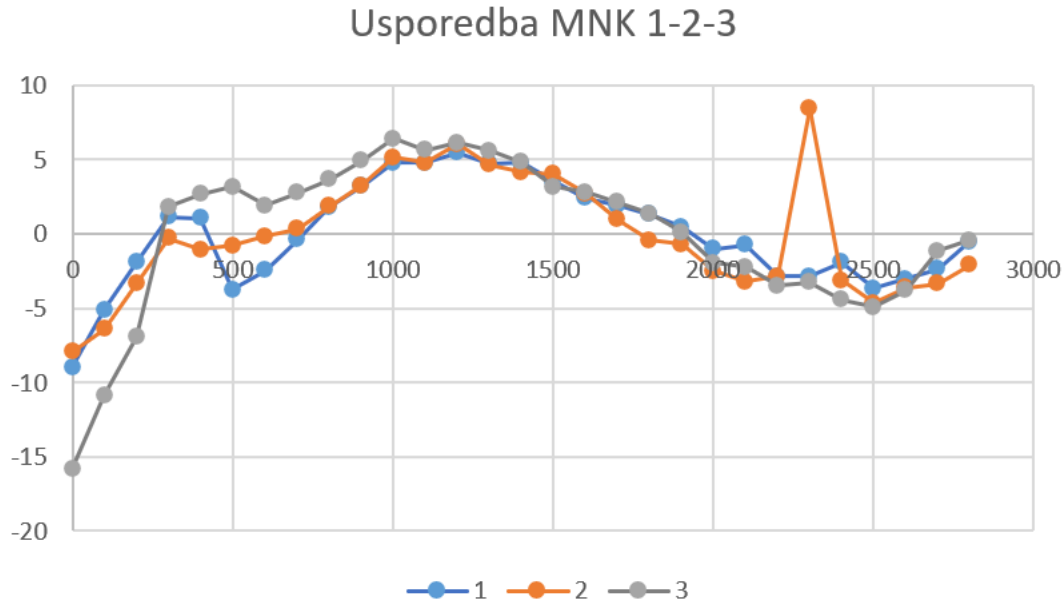
Slika 59. Odstupanje prvog mjerenja od horizontalne pravocrtnosti



Slika 60. Odstupanje drugog mjerenja od horizontalne pravocrtnosti



Slika 61. Odstupanje trećeg mjerenja od horizontalne pravocrtnosti



**Slika 62. Usporedba odstupanja od horizontalne pravocrtnosti svih mjerenja**

Za horizontalno mjerenje pravocrtnosti najmanja vrijednost je  $-15,80 \mu\text{m}$  (treće mjerenje, u vrijednosti  $x = 0 \text{ mm}$ ), dok je najveća vrijednost je  $8,45 \mu\text{m}$  (drugo mjerenje, u vrijednosti  $x = 2300 \text{ mm}$ ). Ukupno odstupanje od pravocrtnosti iznosi:  $T_p = 24,25 \mu\text{m}$ .

### **8.1.2. Analiza drugog mjerenja**

Na drugom mjerenju vidi se značajni pomak na dvadeset trećoj poziciji, tj. nazivnoj vrijednosti od  $2300 \text{ mm}$ . Moguća je gruba greška mjerenja ili oštećenje samog uređaja.

Probat ćemo za svaki smjer drugog mjerenja napraviti zasebnu metodu najmanjih kvadrata da bi dobili uvid u svaki smjer mjerenja zasebno.



Tablica 7 MNK drugog mjerenja

Pozicija, $x_i$ [mm]	Prvi smjer [ $\mu\text{m}$ ]	Drugi smjer [ $\mu\text{m}$ ]
<b>0</b>	23,622	44,704
<b>100</b>	37,084	54,610
<b>200</b>	48,260	63,754
<b>300</b>	57,912	74,422
<b>400</b>	72,644	87,630
<b>500</b>	86,106	100,076
<b>600</b>	98,298	113,030
<b>700</b>	111,252	125,476
<b>800</b>	123,190	136,906
<b>900</b>	134,620	149,098
<b>1000</b>	147,320	159,004
<b>1100</b>	161,544	171,958
<b>1200</b>	173,482	183,896
<b>1300</b>	188,722	197,866
<b>1400</b>	201,676	212,344
<b>1500</b>	215,392	225,298
<b>1600</b>	229,870	239,776
<b>1700</b>	245,618	254,000
<b>1800</b>	260,096	268,732
<b>1900</b>	273,558	282,194
<b>2000</b>	289,052	296,672
<b>2100</b>	302,514	311,150
<b>2200</b>	315,722	323,596
<b>2300</b>	330,708	312,420
<b>2400</b>	342,900	349,758
<b>2500</b>	359,410	362,712
<b>2600</b>	371,602	374,904
<b>2700</b>	385,572	386,842
<b>2800</b>	398,272	398,018

Prilikom stvaranja funkcije *SLOPE* i *INTERCEPT* u prvom slučaju su za  $y_i$  vrijednosti za prvi pravac označeni svi podaci iz stupca *Prvi smjer* [ $\mu\text{m}$ ], a u drugom slučaju označene su vrijednosti iz stupca *Drugi smjer* [ $\mu\text{m}$ ]. Za  $x_i$  vrijednosti označeni su svi podaci iz stupca *Pozicija,  $x_i$*  [mm] iz gore navedene tablice.

Za te podatke tražene funkcije *SLOPE* i *INTERCEPT* dale su vrijednosti:

$$a_1 = 0,135403271 \quad (8.11.)$$

$$a_2 = 0,128745468 \quad (8.12.)$$

$$b_1 = 16,84983448 \quad (8.13.)$$

$$b_2 = 35,64758621 \quad (8.14.)$$

Uvrštavanjem vrijednosti (8.11.), (8.12.), (8.13.), (8.14.) u jednadžbu pravca (8.1.) dobijemo:

$$y_1 = 0,135403271x + 16,84983448 \quad (8.15)$$

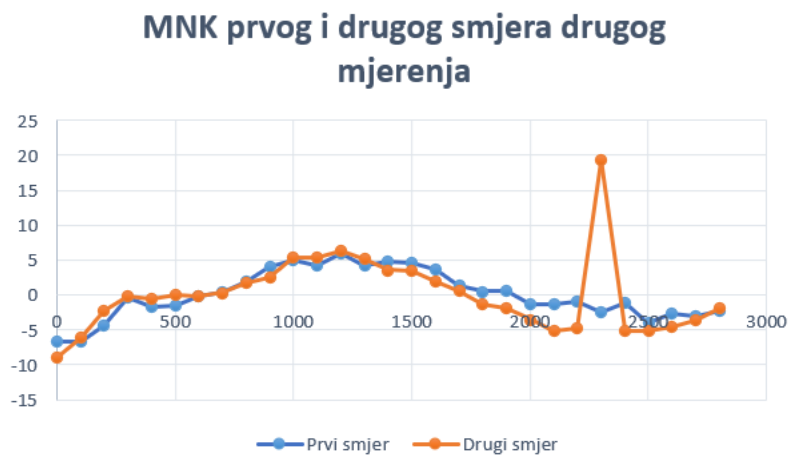
$$y_2 = 0,128745468x + 35,64758621 \quad (8.16.)$$

Uvrštavanjem  $x$  vrijednosti (nazivne vrijednosti) u gore navedene jednadžbe dobivamo  $y$  vrijednosti od sva oba smjera. Vrijednosti su prikazane tablično i grafično.

**Tablica 8**      **Rezultati odstupanja**

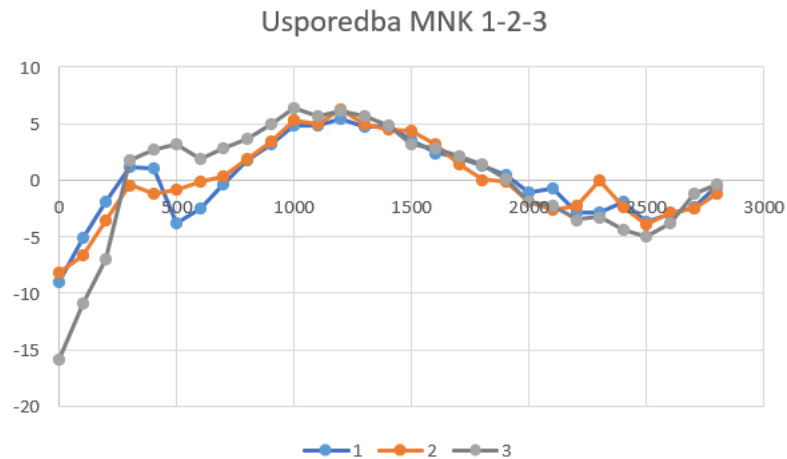
Pozicija, $x_i$ [mm]	Prvi smjer $y_i - y$ [μm]	Drugi smjer $y_i - y$ [μm]
<b>0</b>	-6,772	-9,056
<b>100</b>	-6,694	-6,088
<b>200</b>	-4,330	-2,357
<b>300</b>	-0,441	-0,151
<b>400</b>	-1,633	-0,484
<b>500</b>	-1,555	-0,056
<b>600</b>	-0,206	-0,135
<b>700</b>	0,380	0,293
<b>800</b>	1,982	1,738
<b>900</b>	4,093	2,421
<b>1000</b>	4,933	5,389
<b>1100</b>	4,249	5,310
<b>1200</b>	5,852	6,246
<b>1300</b>	4,152	5,151
<b>1400</b>	4,738	3,547
<b>1500</b>	4,563	3,468
<b>1600</b>	3,625	1,864
<b>1700</b>	1,417	0,515
<b>1800</b>	0,450	-1,343
<b>1900</b>	0,558	-1,930
<b>2000</b>	-1,396	-3,533
<b>2100</b>	-1,317	-5,137

<b>2200</b>	-0,985	-4,708
<b>2300</b>	-2,430	19,342
<b>2400</b>	-1,082	-5,121
<b>2500</b>	-4,052	-5,201
<b>2600</b>	-2,704	-4,518
<b>2700</b>	-3,133	-3,582
<b>2800</b>	-2,293	-1,883



**Slika 63. Usporedba odstupanja od pravocrtnosti drugog mjerjenja**

Zaključujemo da je analizirana greška nastala zbog lokalnog oštećenja stroja na tom dijelu ili nečistoće/korozije. Analizirana greška nalazi se u drugom smjeru drugog mjerjenja horizontalne pravocrtnosti. Napravit će se isti prikaz, ali će se uzeti u obzir samo prvi smjer drugog mjerjenja. Na taj način drugo mjerjenje će biti izvan odstupanja.



**Slika 64.** Usporedba odstupanja od horizontalne pravocrtnosti svih mjerenja (bez drugog mjerenja, drugi smjer)

Sada je za horizontalno mjerenje najmanja vrijednost i dalje  $-15,80 \mu\text{m}$  (treće mjerenje, u vrijednosti  $x = 0 \text{ mm}$ ), a najveća sada iznosi  $6,42 \mu\text{m}$  (treće mjerenje, u vrijednosti  $x = 1000 \text{ mm}$ ). Uzimajući u obzir ovu analizu, konačno odstupanje od pravocrtnosti u horizontalnoj ravnini  $T_p = 22,22 \mu\text{m}$ .

## 8.2. VERTIKALNA PRAVOCRTNOST

Tablica 9 Rezultati prvog mjerenja vertikalne pravocrtnosti

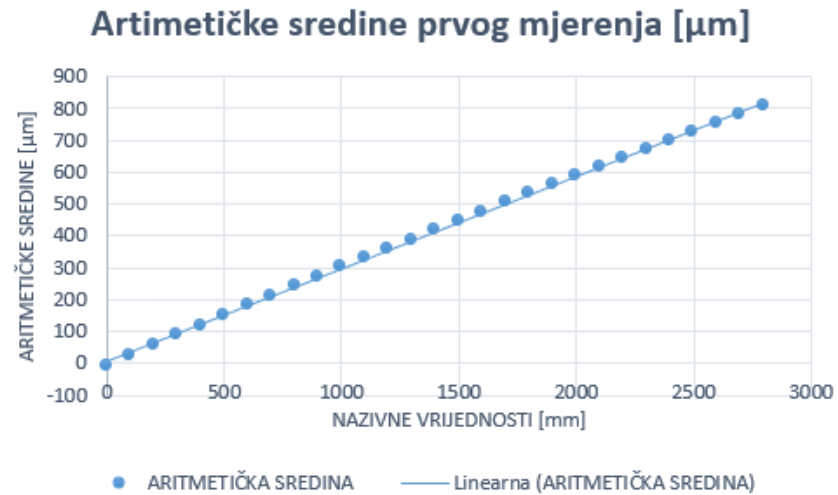
Pozicija, $x$ [mm]	Jedan smjer [mm]	Drugi smjer [mm]	Jedan smjer [ $\mu\text{m}$ ]	Drugi smjer [ $\mu\text{m}$ ]	Aritmetičke sredine podataka [ $\mu\text{m}$ ]
0	-0,0077	-0,0086	-7,700	-8,600	-8,150
100	0,0237	0,0261	23,700	26,100	24,900
200	0,0565	0,0568	56,500	56,800	56,650
300	0,0876	0,0898	87,600	89,800	88,700
400	0,1180	0,1171	118,000	117,100	117,550
500	0,1507	0,1486	150,700	148,600	149,650
600	0,1806	0,1806	180,600	180,600	180,600
700	0,2112	0,2131	211,200	213,100	212,150
800	0,2422	0,2410	242,200	241,000	241,600
900	0,2726	0,2703	272,600	270,300	271,450
1000	0,3019	0,2994	301,900	299,400	300,650
1100	0,3310	0,3291	331,000	329,100	330,050
1200	0,3584	0,3588	358,400	358,800	358,600
1300	0,3883	0,3875	388,300	387,500	387,900
1400	0,4173	0,4171	417,300	417,100	417,200
1500	0,4471	0,4475	447,100	447,500	447,300
1600	0,4756	0,4762	475,600	476,200	475,900
1700	0,5044	0,5041	504,400	504,100	504,250
1800	0,5338	0,5329	533,800	532,900	533,350
1900	0,5607	0,5608	560,700	560,800	560,750
2000	0,5888	0,5885	588,800	588,500	588,650
2100	0,6164	0,6161	616,400	616,100	616,250
2200	0,6445	0,6439	644,500	643,900	644,200
2300	0,672	0,6722	672,000	672,200	672,100
2400	0,6992	0,6988	699,200	698,800	699,000
2500	0,7264	0,7262	726,400	726,200	726,300
2600	0,7538	0,7534	753,800	753,400	753,600
2700	0,7806	0,7807	780,600	780,700	780,650
2800	0,8077	0,8077	807,700	807,700	807,700

**Tablica 10**      **Rezultati drugog mjerenja vertikalne pravocrtnosti**

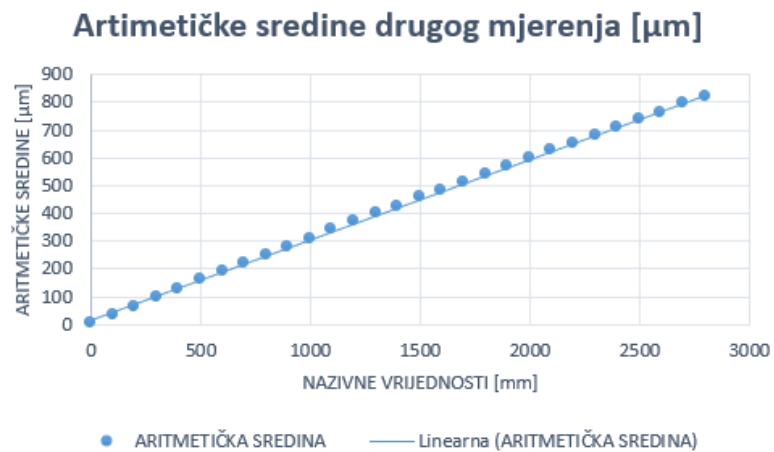
Pozicija, $x$ [mm]	Jedan smjer [mm]	Drugi smjer [mm]	Jedan smjer [ $\mu\text{m}$ ]	Drugi smjer [ $\mu\text{m}$ ]	Aritmetičke sredine podataka [ $\mu\text{m}$ ]
<b>0</b>	0,0007	0,0041	0,7 <u>00</u>	4,1 <u>00</u>	2,4 <u>00</u>
<b>100</b>	0,0303	0,0317	30,3 <u>00</u>	31,7 <u>00</u>	31, <u>000</u>
<b>200</b>	0,0653	0,0631	65,3 <u>00</u>	63,1 <u>00</u>	64,2 <u>00</u>
<b>300</b>	0,0946	0,102 <u>0</u>	94,6 <u>00</u>	102, <u>000</u>	98,3 <u>00</u>
<b>400</b>	0,1296	0,1271	129,6 <u>00</u>	127,1 <u>00</u>	128,35 <u>0</u>
<b>500</b>	0,161 <u>0</u>	0,1562	161, <u>000</u>	156,2 <u>00</u>	158,6 <u>00</u>
<b>600</b>	0,1885	0,1892	188,5 <u>00</u>	189,2 <u>00</u>	188,85 <u>0</u>
<b>700</b>	0,2203	0,2179	220,3 <u>00</u>	217,9 <u>00</u>	219,1 <u>00</u>
<b>800</b>	0,2473	0,2474	247,3 <u>00</u>	247,4 <u>00</u>	247,35 <u>0</u>
<b>900</b>	0,2793	0,2773	279,3 <u>00</u>	277,3 <u>00</u>	278,3 <u>00</u>
<b>1000</b>	0,3094	0,3072	309,4 <u>00</u>	307,2 <u>00</u>	308,3 <u>00</u>
<b>1100</b>	0,339 <u>0</u>	0,3396	339, <u>000</u>	339,6 <u>00</u>	339,3 <u>00</u>
<b>1200</b>	0,3693	0,3673	369,3 <u>00</u>	367,3 <u>00</u>	368,3 <u>00</u>
<b>1300</b>	0,3989	0,3965	398,9 <u>00</u>	396,5 <u>00</u>	397,7 <u>00</u>
<b>1400</b>	0,4268	0,4253	426,8 <u>00</u>	425,3 <u>00</u>	426,05 <u>0</u>
<b>1500</b>	0,4564	0,4555	456,4 <u>00</u>	455,5 <u>00</u>	455,95 <u>0</u>
<b>1600</b>	0,4856	0,4833	485,6 <u>00</u>	483,3 <u>00</u>	484,45 <u>0</u>
<b>1700</b>	0,513 <u>0</u>	0,5127	513, <u>000</u>	512,7 <u>00</u>	512,85 <u>0</u>
<b>1800</b>	0,5412	0,5408	541,2 <u>00</u>	540,8 <u>00</u>	541, <u>000</u>
<b>1900</b>	0,5704	0,5684	570,4 <u>00</u>	568,4 <u>00</u>	569,4 <u>00</u>
<b>2000</b>	0,5974	0,596 <u>0</u>	597,4 <u>00</u>	596, <u>000</u>	596,7 <u>00</u>
<b>2100</b>	0,6247	0,6245	624,7 <u>00</u>	624,5 <u>00</u>	624,6 <u>00</u>
<b>2200</b>	0,653 <u>0</u>	0,6527	653, <u>000</u>	652,7 <u>00</u>	652,85 <u>0</u>
<b>2300</b>	0,6807	0,6802	680,7 <u>00</u>	680,2 <u>00</u>	680,45 <u>0</u>
<b>2400</b>	0,7083	0,7078	708,3 <u>00</u>	707,8 <u>00</u>	708,05 <u>0</u>
<b>2500</b>	0,7356	0,7355	735,6 <u>00</u>	735,5 <u>00</u>	735,55 <u>0</u>
<b>2600</b>	0,7629	0,7631	762,9 <u>00</u>	763,1 <u>00</u>	763, <u>000</u>
<b>2700</b>	0,7902	0,7989	790,2 <u>00</u>	798,9 <u>00</u>	794,55 <u>0</u>
<b>2800</b>	0,8175	0,8175	817,5 <u>00</u>	817,5 <u>00</u>	817,5 <u>00</u>

**Tablica 11      Rezultati trećeg mjerenja vertikalne pravocrtnosti**

Pozicija, $x$ [mm]	Jedan smjer [mm]	Drugi smjer [mm]	Jedan smjer [ $\mu\text{m}$ ]	Drugi smjer [ $\mu\text{m}$ ]	Aritmetičke sredine podataka [ $\mu\text{m}$ ]
<b>0</b>	-0,0018	0,0051	-1,778	5,08 <u>0</u>	1,651
<b>100</b>	0,029 <u>0</u>	0,0203	28,956	20,32 <u>0</u>	24,638
<b>200</b>	0,0508	0,049 <u>0</u>	50,8 <u>00</u>	49,022	49,911
<b>300</b>	0,0808	0,0734	80,772	73,406	77,089
<b>400</b>	0,1054	0,1031	105,41 <u>0</u>	103,124	104,267
<b>500</b>	0,1321	0,1316	132,08 <u>0</u>	131,572	131,826
<b>600</b>	0,1588	0,1582	158,75 <u>0</u>	158,242	158,496
<b>700</b>	0,1841	0,1828	184,15 <u>0</u>	182,88 <u>0</u>	183,515
<b>800</b>	0,2088	0,2075	208,788	207,518	208,153
<b>900</b>	0,2342	0,235 <u>0</u>	234,188	234,95 <u>0</u>	234,569
<b>1000</b>	0,2604	0,2593	260,35 <u>0</u>	259,334	259,842
<b>1100</b>	0,2847	0,2842	284,734	284,226	284,48 <u>0</u>
<b>1200</b>	3,0988	0,3071	3098,8 <u>00</u>	307,086	1702,943
<b>1300</b>	0,3338	0,3338	333,756	333,756	333,756
<b>1400</b>	0,3594	0,3576	359,359	357,632	358,496
<b>1500</b>	0,3838	0,3835	383,794	383,54 <u>0</u>	383,667
<b>1600</b>	0,4082	0,4064	408,178	406,4 <u>00</u>	407,289
<b>1700</b>	0,4323	0,4313	432,308	431,292	431,8 <u>00</u>
<b>1800</b>	0,4567	0,4554	456,692	455,422	456,057
<b>1900</b>	0,479 <u>0</u>	0,4793	479,044	479,298	479,171
<b>2000</b>	0,5024	0,5014	502,412	501,396	501,904
<b>2100</b>	0,525 <u>0</u>	0,5248	525,018	524,764	524,891
<b>2200</b>	0,5479	0,5479	547,878	547,878	547,878
<b>2300</b>	0,5709	0,5707	570,992	570,738	570,865
<b>2400</b>	0,5933	0,5931	593,344	593,09 <u>0</u>	593,217
<b>2500</b>	0,616 <u>0</u>	0,616 <u>0</u>	615,95 <u>0</u>	615,95 <u>0</u>	615,95 <u>0</u>
<b>2600</b>	0,6383	0,6378	638,302	637,794	638,048
<b>2700</b>	0,6604	0,6601	660,4 <u>00</u>	660,146	660,273
<b>2800</b>	0,6825	0,6825	682,498	682,498	682,498

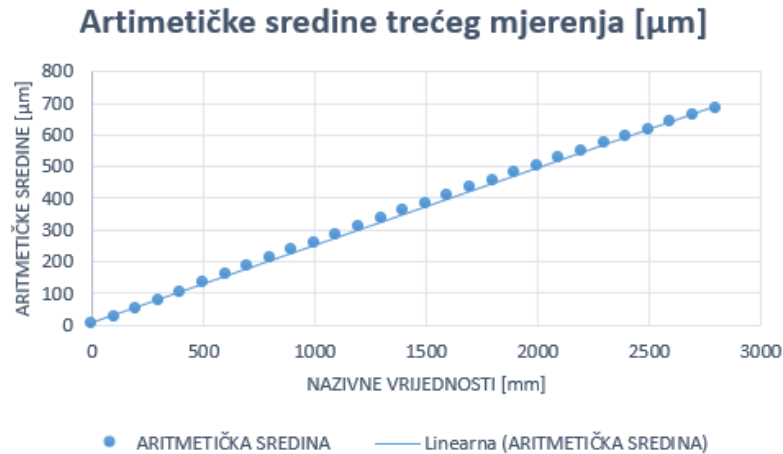


Slika 65. Aritmetičke sredine prvog mjerenja vertikalne pravocrtnosti



Slika 66. Aritmetičke sredine drugog mjerenja vertikalne pravocrtnosti





Slika 67. Arifmetičke sredine trećeg mjerenja vertikalne pravocrtnosti

Na isti način kao i u prethodnim primjerima formiramo funkciju pravca, a konstante dolaze iz Excelovih funkcija *SLOPE* i *INTERCEPT*.

Dobiveni parametri su:

$$a_1 = 0,2904133 \quad (8.17.)$$

$$a_2 = 0,290988424 \quad (8.18.)$$

$$a_3 = 0,244264167 \quad (8.19.)$$

$$b_1 = 5,128275862 \quad (8.20.)$$

$$b_2 = 13,06448276 \quad (8.21.)$$

$$b_3 = 10,19153103 \quad (8.22.)$$

Umetanjem (8.17.), (8.18.), (8.19.), (8.20.), (8.21.), (8.22.) u formulu pravca (8.1.) dobijemo jednadžbe pravaca

$$y_1 = 0,2904133x + 5,128275862 \quad (8.23.)$$

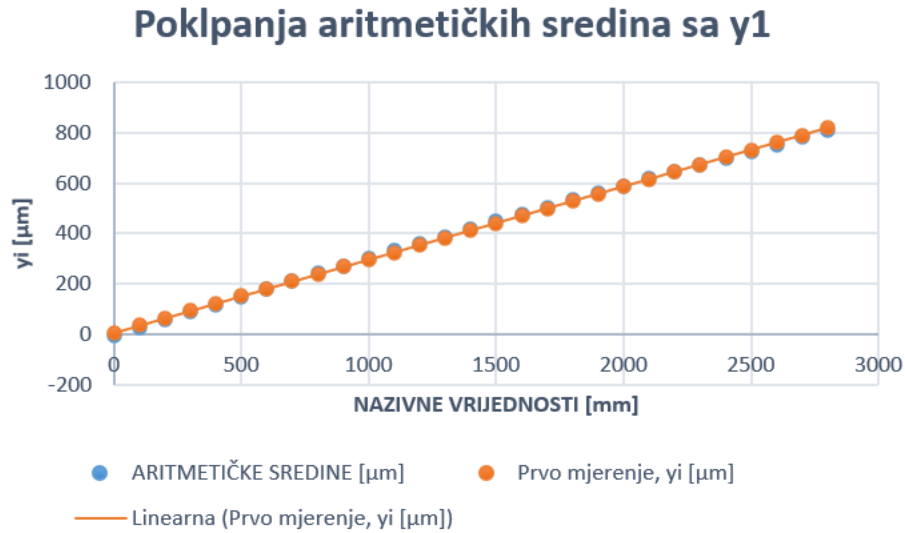
$$y_2 = 0,290988424x + 13,06448276 \quad (8.24.)$$

$$y_3 = 0,244264167x + 10,19153103 \quad (8.25.)$$

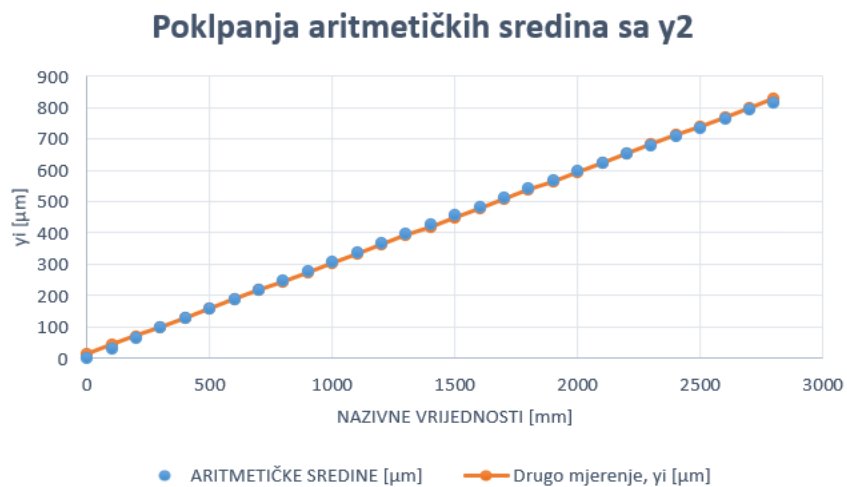
Uvrštavanjem  $x$  vrijednosti (nazivne vrijednosti) u gore navedene jednadžbe dobivamo  $y$  vrijednosti od sva tri mjerenja. Vrijednosti su prikazane tablično i grafično.

Tablica 12 Pravci najmanjih kvadrata

Pozicija, $x_i$ [mm]	Prvo mjerenje $y_i$ [ $\mu\text{m}$ ]	Drugo mjerenje $y_i$ [ $\mu\text{m}$ ]	Treće mjerenje $y_i$ [ $\mu\text{m}$ ]
<b>0</b>	5,128	13,064	10,192
<b>100</b>	34,170	42,163	34,618
<b>200</b>	63,211	71,262	59,044
<b>300</b>	92,252	100,361	83,471
<b>400</b>	121,294	129,460	107,897
<b>500</b>	150,335	158,559	132,323
<b>600</b>	179,376	187,658	156,750
<b>700</b>	208,418	216,756	181,176
<b>800</b>	237,459	245,855	205,603
<b>900</b>	266,500	274,954	230,029
<b>1000</b>	295,542	304,053	254,456
<b>1100</b>	324,583	333,152	278,882
<b>1200</b>	353,624	362,251	303,309
<b>1300</b>	382,666	391,349	327,735
<b>1400</b>	411,707	420,448	352,161
<b>1500</b>	440,748	449,547	376,588
<b>1600</b>	469,790	478,646	401,014
<b>1700</b>	498,831	507,745	425,441
<b>1800</b>	527,872	536,844	449,867
<b>1900</b>	556,914	565,942	474,293
<b>2000</b>	585,955	595,041	498,720
<b>2100</b>	614,996	624,140	523,146
<b>2200</b>	644,038	653,239	547,572
<b>2300</b>	673,079	682,338	571,999
<b>2400</b>	702,120	711,437	596,426
<b>2500</b>	731,162	740,536	620,852
<b>2600</b>	760,203	769,634	645,278
<b>2700</b>	789,244	798,733	669,705
<b>2800</b>	818,286	827,832	694,131



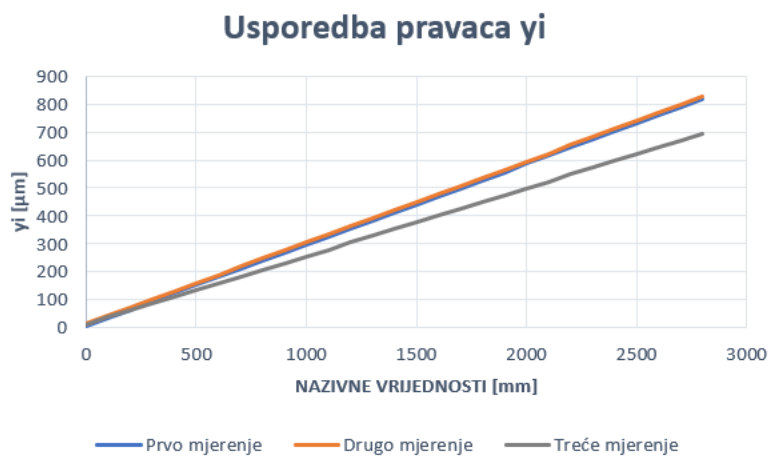
**Slika 68.**      **Usporedba aritmetičkih sredina i prvog pravca**



**Slika 69.**      **Usporedba aritmetičkih sredina i drugog pravca**



**Slika 70. Usporedba aritmetičkih sredina i trećeg pravca**



**Slika 71. Usporedba pravaca**

**Tablica 13**      **Rezultati odstupanja od vertikalne pravocrtnosti**

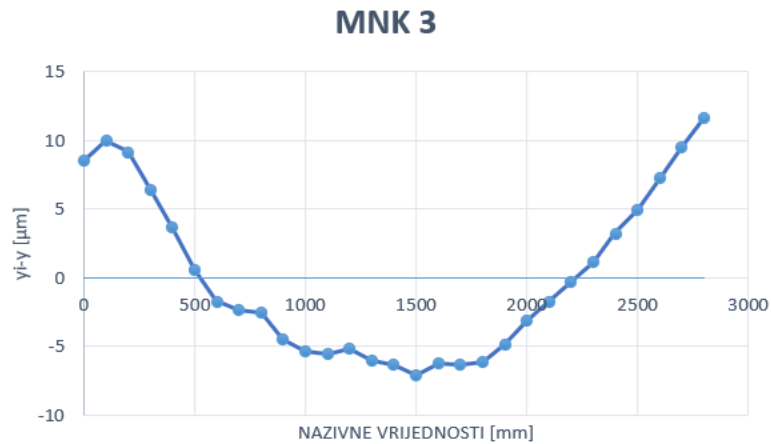
Pozicija, $x_i$ [mm]	Prvo mjerenje $y_i - y$ [ $\mu\text{m}$ ]	Drugo mjerenje $y_i - y$ [ $\mu\text{m}$ ]	Treće mjerenje $y_i - y$ [ $\mu\text{m}$ ]
<b>0</b>	<b>13,278</b>	10,664	8,541
<b>100</b>	9,270	11,163	9,980
<b>200</b>	6,561	7,062	9,133
<b>300</b>	3,552	2,061	6,382
<b>400</b>	3,744	1,110	3,630
<b>500</b>	0,685	-0,041	0,498
<b>600</b>	-1,224	-1,192	-1,746
<b>700</b>	-3,732	-2,344	-2,339
<b>800</b>	-4,141	-1,495	-2,550
<b>900</b>	-4,950	-3,346	-4,540
<b>1000</b>	-5,108	-4,247	-5,386
<b>1100</b>	-5,467	-6,148	-5,598
<b>1200</b>	-4,976	-6,049	-5,174
<b>1300</b>	-5,234	-6,351	-6,021
<b>1400</b>	-5,493	-5,602	-6,334
<b>1500</b>	-6,552	-6,403	<b>-7,079</b>
<b>1600</b>	-6,110	-5,804	-6,275
<b>1700</b>	-5,419	-5,105	-6,359
<b>1800</b>	-5,478	-4,156	-6,190
<b>1900</b>	-3,836	-3,458	-4,878
<b>2000</b>	-2,695	-1,659	-3,184
<b>2100</b>	-1,254	-0,460	-1,745
<b>2200</b>	-0,162	0,389	-0,305
<b>2300</b>	0,979	1,889	1,134
<b>2400</b>	3,120	3,387	3,209
<b>2500</b>	4,862	4,985	4,902
<b>2600</b>	6,603	6,634	7,230
<b>2700</b>	8,594	4,183	9,432
<b>2800</b>	10,586	10,332	11,633



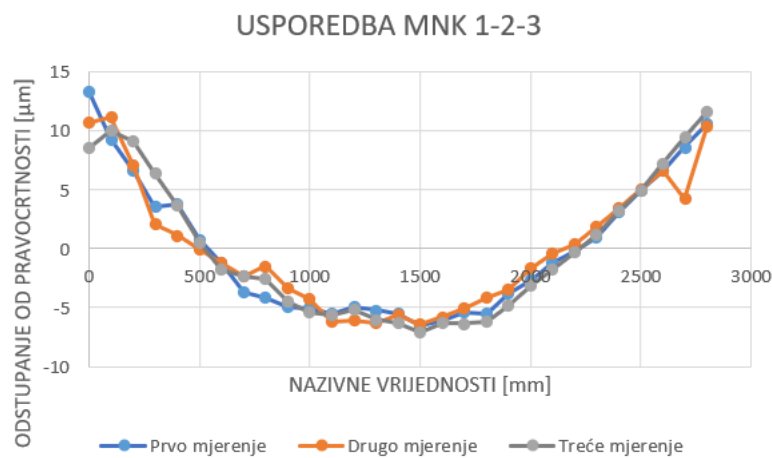
Slika 72. Odstupanje prvog mjerenja od vertikalne pravocrtnosti



Slika 73. Odstupanje drugog mjerenja od vertikalne pravocrtnosti



**Slika 74. Odstupanje trećeg mjerenja od vertikalne pravocrtnosti**



**Slika 75. Usporedba odstupanja od pravocrtnosti vertikalnog mjerenja**

Za vertikalno mjerenje najmanja vrijednost je  $-7,07 \mu\text{m}$  (treće mjerenje, u vrijednosti  $x = 1500$  mm), a najveća  $13,27 \mu\text{m}$  (prvo mjerenje, u vrijednosti  $x = 0$  mm). Ukupno odstupanje od pravocrtnosti iznosi:  $Tp = 20,34 \mu\text{m}$ .

## 9. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu utvrđeno je odstupanje od pravocrtnosti vodilica trometarskog 1D mjernog uređaja Carl Zeiss Jena koji se nalazi u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Na početku rada obrađena je teorijska pozadina rada interferometra, detaljno je objašnjen postupak postavljanja mjernog sustava pomoću optike za mjerenje pomaka kao i tehnika mjerenja pravocrtnosti pomoću laserskog interferometra.

Eksperimentalni dio rada započeo je postavljanjem linearnog mjerenja i poravnanjem linearnog snopa potrebnim za danje mjerenje horizontalne i vertikalne pravocrtnosti. Nakon provedbe mjerenja horizontalne i vertikalne pravocrtnosti u tri mjerenja, a dva smjera dobivaju se vrijednosti horizontalne i vertikalne pravocrtnosti i njihove aritmetičke sredine. Iz aritmetičke sredine svih mjerenja, uporabom metode najmanjih kvadrata, dobivaju se odstupanja od pravocrtnosti.

Analizom dobivenih podataka horizontalnog mjerenja i vidljivim, odstupanjem utvrđuje se lokalno oštećenje/ korozija na samom 1D mjernom uređaju. Oštećenje je malih karakteristika te bi ubuduće trebalo napraviti analizu točnosti 1D uređaja. Ukoliko se lokalno oštećenje zanemari, utvrđeno odstupanje od pravocrtnosti u horizontalnoj ravnini pomaka 1D mjernog uređaja iznosi 22, 22  $\mu\text{m}$ .

Podaci vertikalnog mjerenja ukazuju na progib, tj. da uređaj lagano „propada“ između dva oslonca na kojima je smješten. Utvrđeno odstupanje od pravocrtnosti u vertikalnoj ravnini pomaka 1D mjernog uređaja iznosi 20, 34  $\mu\text{m}$ .



---

## 10.LITERATURA

[1] „Renishaw: Interferometry explained“

<https://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854>., Pristupljeno: 01.09.2023.

[2] „Linear measurement: User guide“

<https://jitaruaugustin.files.wordpress.com/2010/01/liniaritate1.pdf>., Pristupljeno: 05.09.2023.

[3] „Renishaw: Interferometric straightness measurement and application to moving table machines“

<https://www.renishaw.com/resourcecentre/en/details/White-paper-Interferometric-straightness-measurement-and-application-to-moving-table-machines--48145?lang=English>, Pristupljeno: 05.09.2023.

[4] ISO 12780-1:2011 „Geometrical product specifications (GPS):Part 1: Vocabulary and parameters of straightness“

<https://www.iso.org/standard/53622.html>., Pristupljeno: 05.01.2024.

[5] ISO 12780-2:2011 „Geometrical product specifications (GPS) Part 2: Specification operators“

<https://www.iso.org/standard/53623.html>, Pristupljeno: 10.01.2024.

[6] „Interferometer: Renishaw ML10 Laser“

[https://www.igp.fraunhofer.de/content/dam/agg/en/documents/equipment/Measuring\\_technology/Laser\\_interferometer\\_Renishaw\\_ML10.pdf](https://www.igp.fraunhofer.de/content/dam/agg/en/documents/equipment/Measuring_technology/Laser_interferometer_Renishaw_ML10.pdf) Pristupljeno: 10.01.2024.

[7] Muralikrishnan, B., Raja, J. „Computational Surface an Roundness Metrology“; Springer, 2009

<https://dl.acm.org/doi/10.5555/1522349>. Pristupljeno: 10.01.2024.