

# Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti segmentiranom fotodiodom

---

**Vdović, Tomislav**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:241724>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-02**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Tomislav Vdović**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr.sc. Marko Katić, dipl.ing.

Student:

Tomislav Vdović

Zagreb, 2022.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru Dr.sc. Marku Katiću, dipl. ing. i asistentu Marku Horvateku, mag. ing. na vrijednoj pomoći i korisnim savjetima te utrošenom vlastitom vremenu. Zahvaljujem se i cjelokupnoj obitelji i prijateljima i svima koji su na bilo koji način sudjelovali u ovom razdoblju moga života.



Tomislav Vdović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-04/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **TOMISLAV VDOVIĆ** Mat. br.: 0035201845

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti segmentiranom fotodiodom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Measurement of straightness using segmented photodiode**

Opis zadatka:

Razvojem segmentiranih fotodioda na tržištu su se pojavili modeli s karakteristikama koje potencijalno omogućuju upotrebu ovih senzora za mjerenje odstupanja od pravocrtnosti. Budući da se radi o sensorima koji su razvijani za druge primjene, nisu dostupni podaci o točnosti detekcije otklona laserske zrake, već se uglavnom specificira osjetljivost. U skladu s navedenim, u diplomskom radu je potrebno obraditi sljedeće:


1. detaljno opisati vrste i način rada segmentiranih fotodioda
2. predložiti plan mjerenja odstupanja od pravocrtnosti na odabranom postavu u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina
3. provesti usporedbena mjerenja odstupanja od pravocrtnosti korištenjem segmentirane fotodiode i odabrane standardne metode.

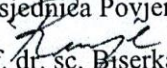
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
3. ožujka 2022.

Rok predaje rada:  
5. svibnja 2022.

Predvideni datum obrane:  
9. svibnja do 13. svibnja 2022.

Zadatak zadao:  
  
doc. dr. sc. Marko Katić

Predsjednica Povjerenstva:  
  
prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
POPIS KRATICA .....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
2. MJERITELJSTVO .....	3
2.1. O mjeriteljstvu.....	3
2.2. Mjerenje .....	3
2.3. Mjerna nesigurnost.....	4
2.4. Točnost, preciznost i ponovljivost .....	4
2.5. Pogreške u mjerenju.....	5
2.6. Standardni mjeriteljski uvjeti .....	6
3. PRAVOCRTNOST .....	8
3.1. Tolerancije oblika i položaja.....	8
3.1.1. Tolerancije oblika .....	8
3.2. Odstupanje od pravocrtnosti .....	9
3.3. Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti.....	9
3.4. Metode mjerenja odstupanja od pravocrtnosti .....	11
3.4.1. Laserski mjerni sustav.....	11
3.4.1.1. Laser.....	11
3.4.1.2. Interferometar .....	12
4. FOTODETEKTOR.....	17
4.1. Fotodioda .....	17
4.1.1. Značajke fotodioda.....	19
4.1.1.1. Spektralni odziv .....	19
4.1.1.2. Kvantna iskoristivost .....	19
4.1.1.3. Tamna struja.....	19
4.1.1.4. Vrijeme odziva.....	19
4.1.1.5. NEP – snaga ekvivalentna šumu.....	19
4.2. Uređaji osjetljivi na položaj (PSD) .....	20
4.2.1. PSD na principu lateralnog efekta .....	20
4.2.2. Segmentirana fotodioda .....	21
4.2.2.1. Thorlabs PDQ80A .....	22
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	27
5.1. Postav za mjerenje .....	27
5.1.1. Optički stol.....	28
5.1.2. HeNe laser.....	28

---

5.1.3.	Linearna vodilica i klizač .....	29
5.1.4.	KPA101.....	30
5.1.5.	Kinesis softver .....	31
5.1.6.	Enkoder .....	31
5.1.7.	Komponente za spajanje .....	33
5.2.	Plan mjerenja.....	36
5.3.	Mjerenje interferometrom .....	36
5.4.	Umjeravanje .....	37
5.5.	Rezultati referentnog mjerenja odstupanja od pravocrtnosti interferometrom .....	38
5.5.1.	Horizontalno mjerenje .....	38
5.5.2.	Vertikalno mjerenje .....	41
5.6.	Rezultati mjerenja odstupanja od pravocrtnosti fotodiodom .....	44
5.6.1.	Horizontalno mjerenje .....	44
5.6.2.	Vertikalno mjerenje .....	48
5.7.	Usporedba rezultata.....	52
6.	ZAKLJUČAK.....	55
	LITERATURA.....	56
	PRILOZI.....	58

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Egipatski kraljevski lakat [1].....	1
Slika 2.	Točnosti i preciznost [5].....	4
Slika 3.	Vrste pogrešaka .....	5
Slika 4.	Sustavna pogreška [5] .....	6
Slika 5.	Slučajna pogreška [5] .....	6
Slika 6.	Standardni mjeriteljski uvjeti okoline [6].....	7
Slika 7.	Osnovni simboli tolerancija oblika i položaja [6] .....	8
Slika 8.	Zona odstupanja od pravocrtnosti [6].....	9
Slika 9.	Označavanje odstupanja od pravocrtnosti na tehničkom crtežu [6].....	9
Slika 10.	Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti temeljeno na mjerenu duljine [7].....	10
Slika 11.	Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti temeljeno na mjerenju kutnih odstupanja [7] .....	10
Slika 12.	Dijelovi lasera [9].....	12
Slika 13.	Konstruktivna i destruktivna interferencija valova [12].....	13
Slika 14.	Skica Michelsonovog interferometra [13].....	14
Slika 15.	Skica sustava za mjerenje pravocrtnosti pomoću interferometra [14] .....	15
Slika 16.	Horizontalno mjerenje odstupanja od pravocrtnosti [14].....	15
Slika 17.	Vertikalno mjerenje odstupanja od pravocrtnosti [14].....	16
Slika 18.	PIN fotodioda [17].....	18
Slika 19.	PN fotodioda [18].....	18
Slika 20.	PSD na principu lateralnog efekta [20] .....	20
Slika 21.	Skica kvadrantne fotodiode [21] .....	21
Slika 22.	Thorlabs PDQ80A .....	22
Slika 23.	Skica PDQ80A [22].....	23
Slika 24.	6 pinova konektora PDQ80A [22].....	25
Slika 25.	Postav za mjerenje u laboratoriju .....	27
Slika 26.	Optički stol .....	28
Slika 27.	Thorlabs HTPS-EC-1 HeNe laser .....	29
Slika 28.	Linearna vodilica i klizač .....	29
Slika 29.	KPA101 .....	30
Slika 30.	Ploča za montiranje KPA101 na optički stol [23].....	30
Slika 31.	Kinesis sučelje preko kojeg se očitavaju dobivene vrijednosti .....	31
Slika 32.	RLS magnetna traka postavljena u laboratoriju .....	32
Slika 33.	RLS LA11 [25].....	33
Slika 34.	Thorlabs MB1015/M [26] .....	33
Slika 35.	Thorlabs BA1/M [27].....	34
Slika 36.	Spojteni elementi za pozicioniranje laserske zrake .....	34
Slika 37.	Thorlabs PH elementi za pozicioniranje s pripadnim vijcima za stezanje [28] ....	35
Slika 38.	Thorlabs TR element za pozicioniranje.....	35
Slika 39.	Spoj fotodiode na klizač .....	35
Slika 40.	Mjerenje horizontalnih odstupanja pomoću laserskog interferometra .....	36
Slika 41.	Mjerenje vertikalnih odstupanja pomoću laserskog interferometra .....	37
Slika 42.	Umjeravanje fotodiode na Renishaw RGH22Y30F61 .....	37
Slika 43.	Graf horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenih interferometrom .....	41
Slika 44.	Graf vertikalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenih interferometrom .....	44
Slika 45.	Normalizirane vrijednosti horizontalnih odstupanja .....	46
Slika 46.	Graf horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenih fotodiodom .....	48
Slika 47.	Normalizirane vrijednosti vertikalnih odstupanja .....	50



---

Slika 48.	Graf vertikalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenih fotodiodom .....	52
Slika 49.	Graf usporedbe horizontalnih odstupanja.....	53
Slika 50.	Graf usporedbe vertikalnih odstupanja.....	53
Slika 51.	Reflektor i fotodioda različite visine postavljanja.....	54

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Električne karakteristike PDQ80A [22] .....	23
Tablica 2. Fizičke karakteristike PDQ80A [22] .....	24
Tablica 3. Funkcije pinova [22] .....	25
Tablica 4. Tehnički podaci RLS LA11 sustava [25] .....	32
Tablica 5. Rezultati horizontalnih mjerenja .....	38
Tablica 6. Regresijski pravac kod horizontalnog mjerenja .....	39
Tablica 7. Metoda najmanjih kvadrata za horizontalna mjerenja interferometrom .....	39
Tablica 8. Rezultati vertikalnih mjerenja .....	41
Tablica 9. Regresijski pravac kod vertikalnog mjerenja .....	42
Tablica 10. Metoda najmanjih kvadrata za vertikalna mjerenja interferometrom .....	42
Tablica 11. Normalizirane vrijednosti horizontalne .....	44
Tablica 12. Nagib i odsječak pravca horizontalno .....	46
Tablica 13. Metoda najmanjih kvadrata za horizontalna mjerenja fotodiodom .....	46
Tablica 14. Normalizirane vrijednosti vertikalne .....	48
Tablica 15. Nagib i odsječak pravca vertikalno .....	50
Tablica 16. Metoda najmanjih kvadrata za vertikalna mjerenja fotodiodom .....	50

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Opis oznake</b>
<i>NEP</i>	W/ $\sqrt{\text{Hz}}$	optički signal
<i>I<sub>a</sub>, I<sub>b</sub>, I<sub>c</sub>, I<sub>d</sub></i>	V	fotostruja
<i>k</i>	/	koeficijent
<i>Q1, Q2, Q3, Q4</i>	V	napon
<i>XDIFF</i>	V	razlika napona horizontaln
<i>YDIFF</i>	V	razlika napona vertikalnih
<i>SUM</i>	V	jačina signala na diodi

---

**POPIS KRATICA****Kratika**      **Opis****Primjer:**

NEP	<i>Noise-equivalent power</i> – snaga ekvivalentna šumu
PSD	<i>Position-sensitive detectors</i> – uređaji osjetljivi na položaj
QD	<i>Quadrant detector</i> – kvadrantna segmentirana fotodioda

**SAŽETAK**

Cilj ovog diplomskog rada je prikazati mogućnosti mjerenja pravocrtности pomoću segmentirane fotodiode te ih usporediti sa standardnom metodom mjerenja pravocrtности.

U prvom dijelu rada opisana je teorija o mjeriteljstvu, odstupanju od pravocrtности te je opisana korištena fotodioda Thorlabs PDQ80A.

U eksperimentalnom dijelu rada predložen je plan mjerenja te su prikazani rezultati izvedenih mjerenja i uspoređeni sa standardnom metodom.

Ključne riječi: mjerenje pravocrtности, segmentirana fotodioda, kvadrantna fotodioda

---

**SUMMARY**

The aim of this master thesis is to show the possibilities of measuring straightness using a segmented photodiode and to compare them with the standard method of straightness measurement.

The first part of this thesis describes the theory of metrology, deviation from straightness and describes the used photodiode Thorlabs PDQ80A.

In the experimental part of the thesis, a measurement plan is proposed and the results of the performed measurements are presented and compared with the standard method.

Key words: straightness measurement, segmented photodiode, quadrant photodiode

## 1. UVOD

Mjerenje je od davnina jedna od najvažnijih aktivnosti u ljudskom životu. Koristi se svakodnevno, a u današnje vrijeme je gotovo nezamislivo živjeti bez mjernih uređaja. U počecima stvaranja civilizacija ljudi su koristili različite mjere u svrhe agrikulture, trgovine, raspodjele zemlje, pravljenja alata itd. Za prve mjere duljine najčešće su korišteni dijelovi tijela kao što su lakat, pedalj, stopa, što se može i vidjeti iz njihovih naziva.



**Slika 1. Egipatski kraljevski lakat [1]**

Standardizacija i unifikacija mjera su bili glavni problemi mjeriteljstva kroz cijelu povijest čovječanstva. Svaki grad je imao svoje mjerne jedinice što je bio veliki problem kod trgovine između različitih područja. S ciljem unifikacije mjera, Francuska Akademija je 1790. godine pokrenula projekt jedinstvenog sustava mjera gdje je predložen decimalni metrički sustav koji se oslanja na prirodne pramjere. To je dovelo do osnivanja Međunarodnog ureda za utege i mjere 20. svibnja 1875. te potpisivanja Dogovora o metru kojeg je potpisnik bila i Hrvatska kao članica Austro-Ugarske.[2]

Pojavom sve većih mogućnosti međunarodne trgovine i sve veće konkurencije dolazi do potrebe poboljšanja kvalitete proizvoda. Da bi se zadovoljila potrebna kvaliteta strojevi kojim se proizvodi izrađuju moraju biti vrlo precizni u izradi istih. To dovodi do potrebe za konstantnim napredovanjem u području mjernih uređaja i istraživanjem novih metoda pomoću kojih se mogu provjeravati točnosti dijelova strojeva.

U ovom radu će biti prikazan način mjerenja odstupanja od pravocrtnosti korištenjem segmentirane kvadrantne fotodiode koja je primarno razvijena za druge funkcije. Da bi se vidjelo koliko je taj način mjerenja odstupanja od pravocrtnosti točan usporedit će se sa standardnom metodom mjerenja odstupanja od pravocrtnosti.



## 2. MJERITELJSTVO

### 2.1. O mjeriteljstvu

Mjeriteljstvo je znanost o mjerenju i primjeni istoga. Može se podijeliti na tri različita područja:

1. Zakonsko mjeriteljstvo koje se bavi točnošću mjerenja u kojem ona utječu na razvidnost gospodarskih transakcija, posebice kad postoji potreba za ovjeravanje mjerila.
2. Znanstveno mjeriteljstvo koje se bavi organizacijom i razvojem mjernih etalona te njihovim održavanjem. To je ujedno i najviša razina.
3. Industrijsko mjeriteljstvo koje treba osigurati funkcioniranje mjerila koja se upotrebljavaju u industriji te u procesima proizvodnje i ispitivanja, koja osiguravaju kakvoću života ljudi i za potrebe akademskog istraživanja.[3]

Tri glavna zadatka mjeriteljstva kao znanosti su:

1. Definiranje međunarodno priznatih mjernih jedinica.
2. Ostvarenje definiranih mjernih jedinica znanstvenom metodom.
3. Utvrđivanje lanca sljedivosti kod određivanja i dokumentiranja vrijednosti i točnosti mjerenja te prenošenja znanja.[4]

### 2.2. Mjerenje

Mjerenje je proces eksperimentalnog dobivanja jedne ili više vrijednosti neke veličine. Prema mjernim metodama može se podijeliti na 3 vrste:

1. Izravna ili direktna – vrijednost mjerene veličine se određuje izravno (bez mjerenja drugih veličina funkcijski povezanih s mjernom veličinom).
2. Usporedbena ili diferencijska – mjerena veličina se uspoređuje s istovrsnom veličinom poznate vrijednosti (mjeri se razlika tih dviju vrijednosti)
3. Posredna – vrijednost mjerene veličine se određuje mjerenjem drugih veličina koje su s njom funkcijski povezane. [5]

### 2.3. Mjerna nesigurnost

Svako mjerenje podliježe nekim pogreškama koje dovode do toga da se mjerni rezultat razlikuje od prave vrijednosti mjerene veličine. To rasipanje vrijednosti mjerenja kod više mjerenja iste veličine se naziva mjerna nesigurnost i definira se kao parametar koje je pridružen rezultatu mjerenja i opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno mogle pripisati mjerenoj veličini. [5]

Mjerna nesigurnost je važan dio svakog mjerenja i pokazuje granice unutar kojih se nalazi pravi rezultat mjerene veličine. Da bi mjerenja bila što točnija rasipanje vrijednosti bi trebalo svesti na što manje granice tako da se uklone greške kod postupka mjerenja i da se koriste što točniji mjerni uređaji.

### 2.4. Točnost, preciznost i ponovljivost

Točnost i preciznost su dva pojmovna u mjeriteljstvu koji većinom dolaze vezani jedan uz drugog. Preciznost pokazuje blizinu slaganja između izmjerenih vrijednosti veličina dobivenih ponovljenim mjerenjima na istim ili sličnim predmetima pod određenim uvjetima. Točnost pokazuje bliskost rezultata mjerenja i usvojene referentne vrijednosti. [5]



Slika 2. Točnosti i preciznost [5]

Ponovljivost se definira kao usko slaganje rezultata uzastopnih mjerenja jednake veličine u istim uvjetima mjerenja. Isti uvjeti mjerenja uključuju:

- isti mjerni postupak
- istog mjeritelja
- isto mjerilo koje se upotrebljava u istim uvjetima

- isto mjerno mjesto
- ponavljanje u kratkom vremenu. [6]

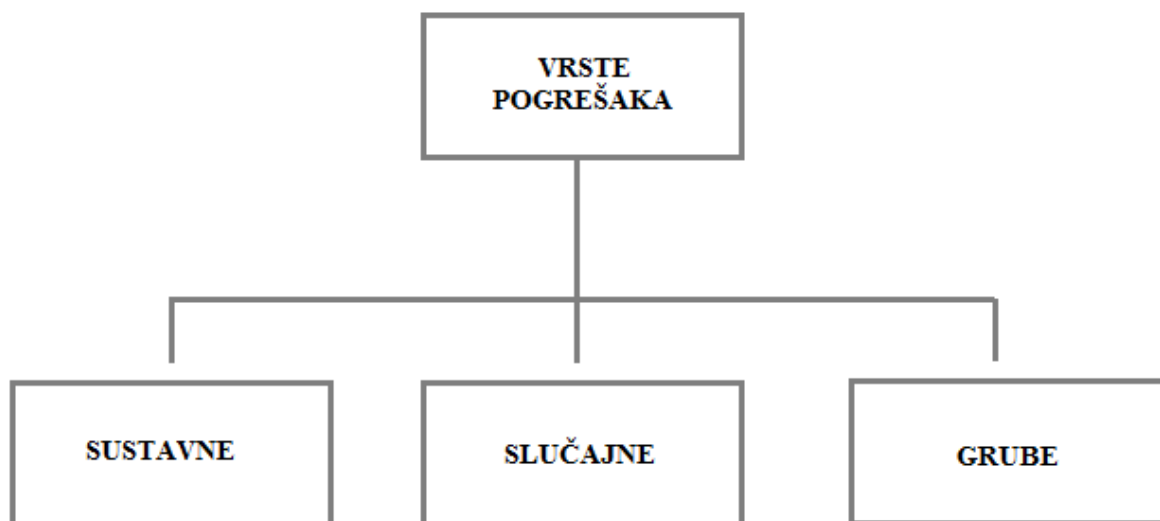
## 2.5. Pogreške u mjerenju

Pošto nijedan mjerni uređaj nije savršen, kao što nijedan mjeritelj nije savršen, nijedno mjerenje se ne može gledati kao apsolutno točno. Nadalje postoje mnogi vanjski utjecaji koji također utječu na svako pojedinačno mjerenje pa se rezultati više pojedinačnih mjerenja ne mogu potpuno podudarati. Zbog svih tih razloga se svakom mjerenju pridodaje pogreška. Pogreška u mjerenju se definira kao razlika dobivene vrijednosti mjerne veličine od stvarne vrijednosti [5].

Najčešće pogreške u mjerenju su:

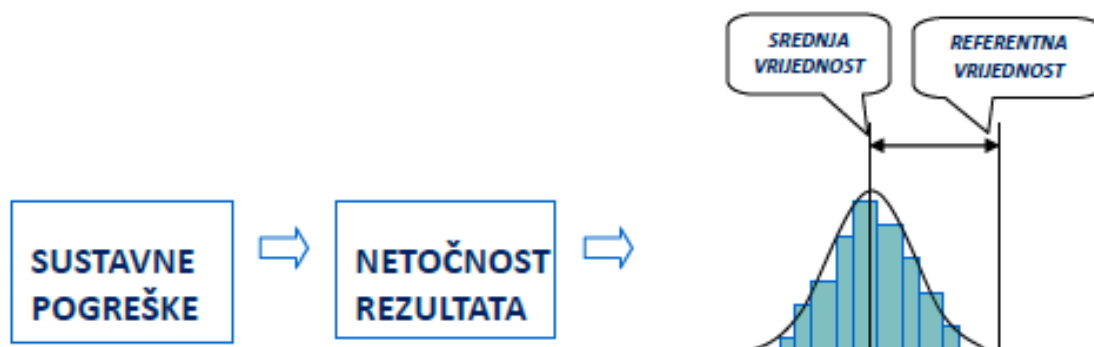
- nepravilno rukovanje mjernim uređajem
- neispravnost mjernog uređaja
- okolinski uvjeti.

Prema uzroku nastajanja pogreške u mjerenju mogu se podijeliti na sustavne, slučajne i grube.



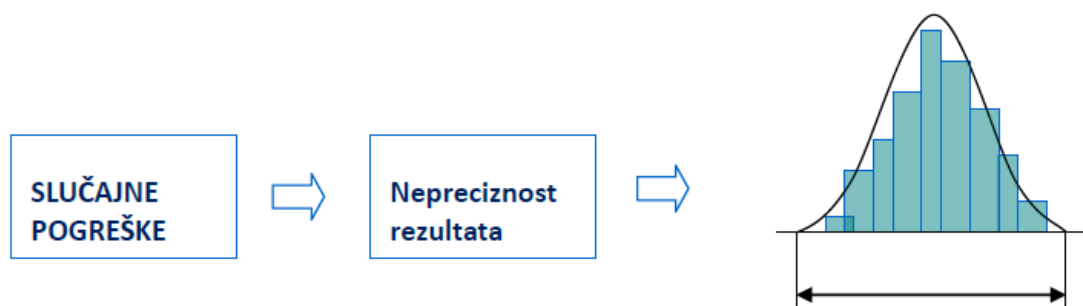
Slika 3. Vrste pogrešaka

Sustavne pogreške nastaju zbog neispravnih mjernih instrumenata, pogrešnim izborom metode mjerenja i pogrešnog izvođenja mjerenja. Takve greške se ponavljaju i ostaju stabilne kod ponovljenih mjerenja ili se mijenjaju na predvidiv način. Posljedica im je netočnost rezultata. [5]



Slika 4. Sustavna pogreška [5]

Slučajne pogreške nastaju na nepredvidiv način, a uzrok nastajanja istih je nepoznat. Kod takvih grešaka u tijeku ponovljenih mjerenja iste veličine se mijenjaju na nepredvidiv način. Posljedica im je nepreciznost rezultata.[5]

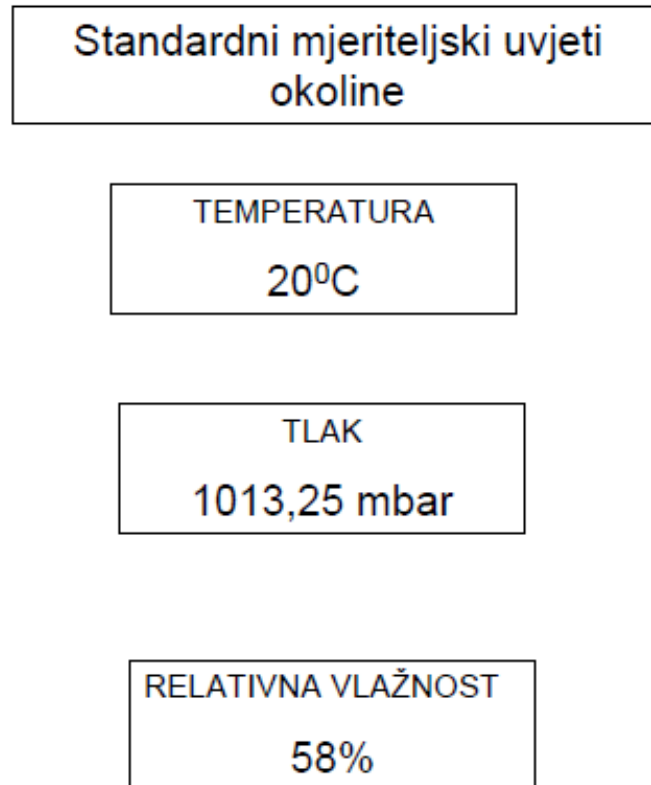


Slika 5. Slučajna pogreška [5]

Grube pogreške su uzrok nepravilnog korištenja mjerne opreme, neispravnosti mjerne opreme i pogreške pri očitavanju rezultata. Takve pogreške u tijeku ponovljenih mjerenja iste veličine značajno odstupaju od ostalih rezultata. Daju neispravan rezultat koji se izbacuje iz analize.[5]

## 2.6. Standardni mjeriteljski uvjeti

Kako bi se mogli uspoređivati mjerni rezultati vrlo je važno osigurati iste uvjete okoline u kojoj se provode mjerenja. Standardni mjeriteljski uvjeti okoline su prikazani na Slika 6.



Slika 6. Standardni mjeriteljski uvjeti okoline [6]

### 3. PRAVOCRTNOST

#### 3.1. Tolerancije oblika i položaja

Sustavom tolerancija oblika i položaja se definiraju dopuštena odstupanja oblika i dimenzija pojedinih elemenata što je ključno za postizanje funkcionalnosti. Potrebno ih je koristiti pošto je nemoguće apsolutno točno izraditi neki dio. Na Slika 7. mogu se vidjeti osnovni simboli tolerancija oblika i položaja.

TOLERANCIJE OBLIKA		TOLERANCIJE POLOŽAJA		SLOŽENE TOLERANCIJE	
Karakteristika koja se tolerira	Simbol	Karakteristika koja se tolerira	Simbol	Karakteristika koja se tolerira	Simbol
1.1 pravocrtnost		2.1 paralelnost		3.1 netočnost okretanja	
1.2 ravnoća		2.2 okomitost		3.2 radijalna netočnost okretanja	
1.3 kružnost		2.3 kut nagiba		3.3 aksijalna netočnost okretanja	
1.4 cilindričnost		2.4 lokacija			
1.5 oblik linije		2.5 koncentričnost			
1.6 oblik površine		2.6 simetričnost			

Slika 7. Osnovni simboli tolerancija oblika i položaja [6]

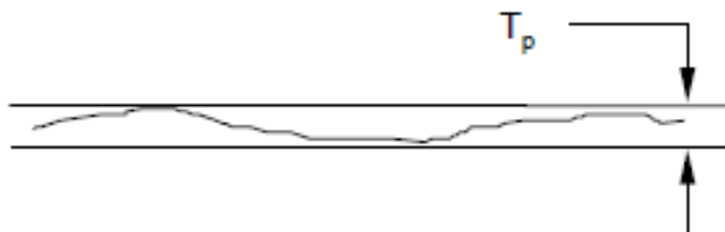
##### 3.1.1. Tolerancije oblika

Tolerancija oblika opisuje odstupanje elemenata od idealnog geometrijskog oblika. S njom se može odrediti:

- pravocrtnost
- ravnost
- kružnost
- cilindričnost
- oblik površine
- oblik linije. [6]

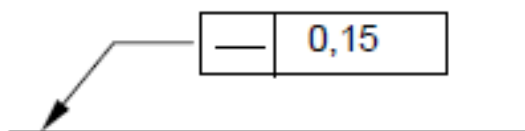
### 3.2. Odstupanje od pravocrtnosti

Pravocrtnost je stanje kod kojeg se sve točke nalaze na istom pravcu. Dopušteno odstupanje od pravocrtnosti određeno je udaljenošću dva paralelna pravca koji leže u istoj ravnini i udaljeni su za iznos odstupanja  $T_p$ . [6]



Slika 8. Zona odstupanja od pravocrtnosti [6]

Odstupanje od pravocrtnosti se na tehničkom crtežu označuje u pogledu u kojem je element koji treba označiti ravna linija.



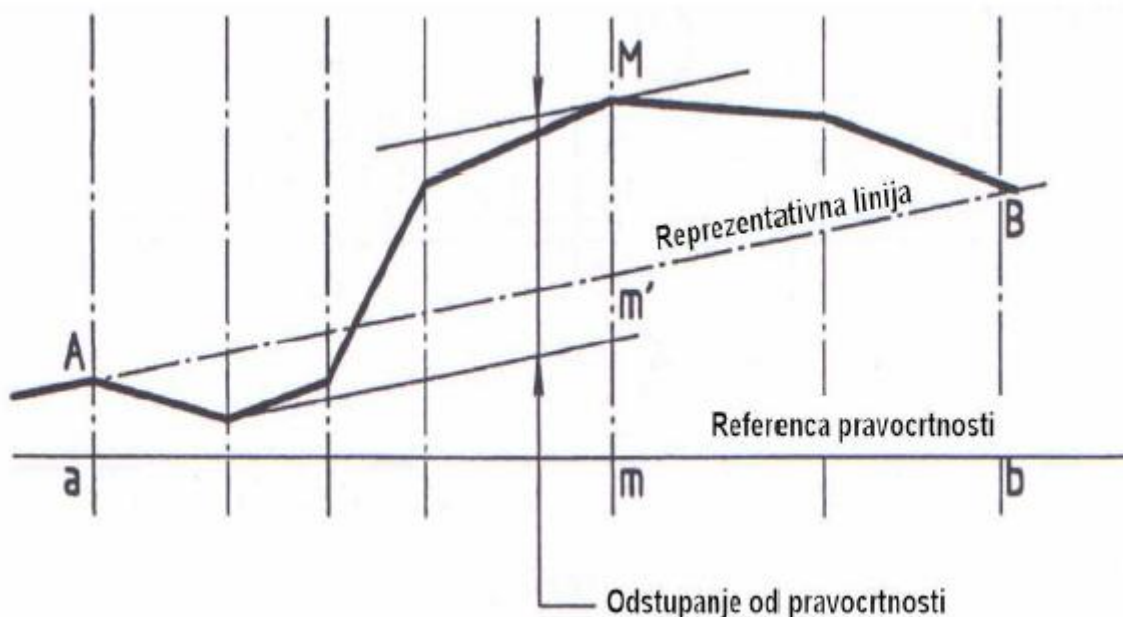
Slika 9. Označavanje odstupanja od pravocrtnosti na tehničkom crtežu [6]

### 3.3. Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti

Odstupanje od pravocrtnosti može mjeriti na dva različita načina. Prvi način se temelji na mjerenju duljina, a drugi na mjerenju kutnih odstupanja.

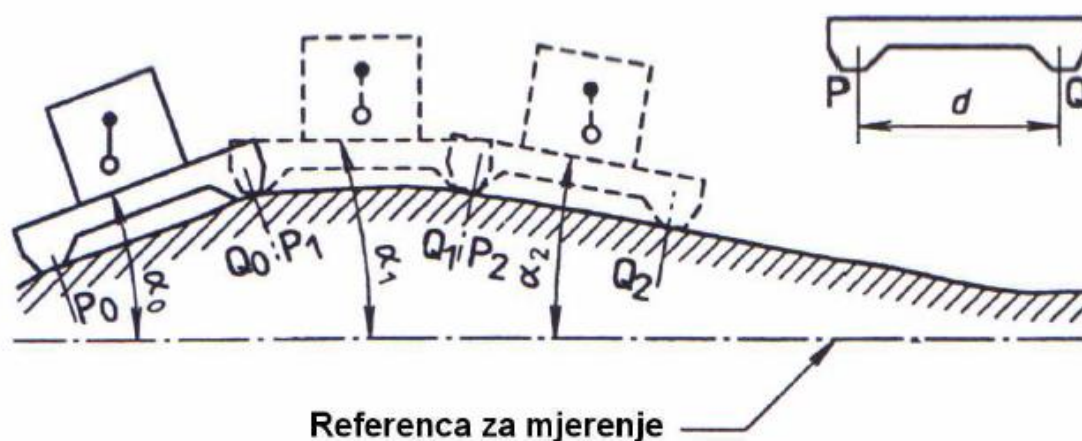
Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti temeljeno na mjerenju duljina provjerava se tako da se mjerni uređaj postavi ekvivalentno u odnosu na liniju čija se pravocrtnost ispituje. Mjerni uređaj pokazuje odstupanja linije koja se provjerava u odnosu na referentnu liniju pravocrtnosti (Slika 10.).

Provjerava se duž cijele linije između različitih točaka koje su udaljene za određeni razmak.



Slika 10. Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti temeljeno na mjerenu duljine [7]

Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti temeljeno na mjerenju kutnih odstupanja bazira se na tome da je element u dodiru s linijom koja se provjerava u dvije točke P i Q koje su udaljene za udaljenost  $d$  (Slika 11.). Element kojim se provjerava se pomiče tako da se na svakoj novoj poziciji P podudara s prethodnom pozicijom Q. Naprimjer ako imamo početne pozicije  $P_0$  i  $Q_0$ , na sljedećoj poziciji će se  $P_1$  podudarati s pozicijom  $Q_0$ .



Slika 11. Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti temeljeno na mjerenju kutnih odstupanja [7]



### 3.4. Metode mjerenja odstupanja od pravocrtnosti

Postoji više metoda pomoću kojih se može mjeriti odstupanje od pravocrtnosti. Podjela tih metoda se temelji na mjernim uređajima koji se koriste:

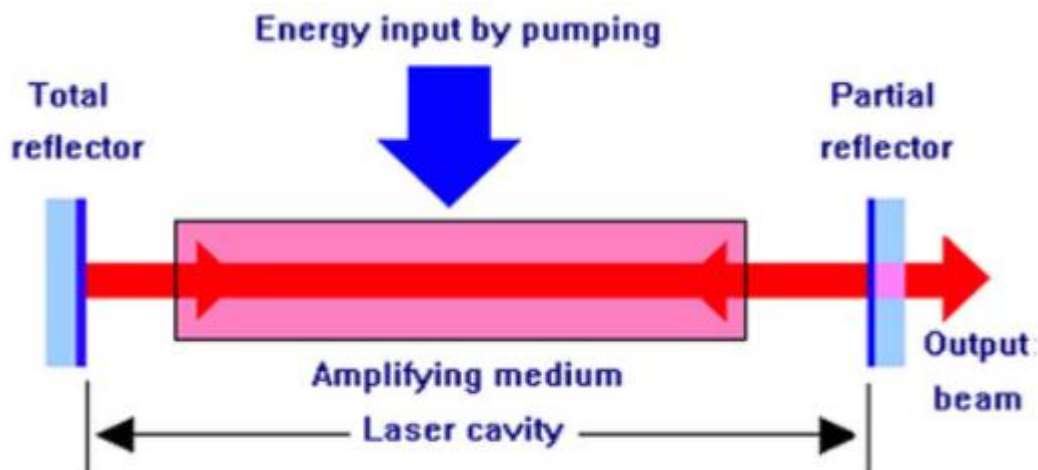
- lineal s komparatorom
- autokolimator
- laserski mjerni sustav
- 3D dužinski mjerni uređaji
- libela itd.

#### 3.4.1. Laserski mjerni sustav

U ovom radu će se kao metoda za mjerenje odstupanja od pravocrtnosti koristiti laserski mjerni sustav. Glavno mjerenje će se izvoditi pomoću lasera i segmentirane fotodiode, a kao usporedno mjerenje koristit će se interferometrijski laserski mjerni sustav.

##### 3.4.1.1. Laser

Riječ laser dolazi iz engleskog jezika i puno značenje joj je „*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*“ ili u prijevodu na hrvatski pojačavanje svjetlosti s pomoću stimulirane emisije zračenja. Laser je uređaj koji stvara i pojačava koherentno elektromagnetsko, najčešće monokromatsko, usko usmjereno zračenje velike jakosti. Zasniva se na kvantnim pojavama kod prijenosa energije zračenjem. Izmjena energije zračenja s atomima aktivnoga medija u laseru odvija se stimuliranom emisijom. Uvjet za stimuliranu emisiju je veći broj atoma u pobuđenom stanju od broja atoma u nepobuđenom stanju što se naziva inverzija populacije. Da bi došlo do inverzije populacije treba se na atom u pobuđenom energijskom stanju (elektroni na višoj energetskej razini) djelovati dodatnim izvorom energije. Fotoni dobiveni laserom imaju jednaki smjer, frekvenciju, polarizaciju i energiju. S tim se dobiva monokromatsko zračenje uskog paralelnog snopa skoro identičnih fotona i velike gustoće energije po širini spektralne linije. [8]



Slika 12. Dijelovi lasera [9]

Na slici 12. prikazani su osnovni dijelovi lasera. Svaka vrsta lasera mora se sastojati od:

1. medija koji može emitirati svjetlost
2. vanjski izvor energije koji pobuđuje taj medij
3. optičke šupljine koja ograničava i usmjerava lasersko svjetlo.

Prema aktivne optičke tvari laseri se dijele na:

- plinske
- tekućinske
- poluvodičke
- lasere s čvrstim tvarima. [7]

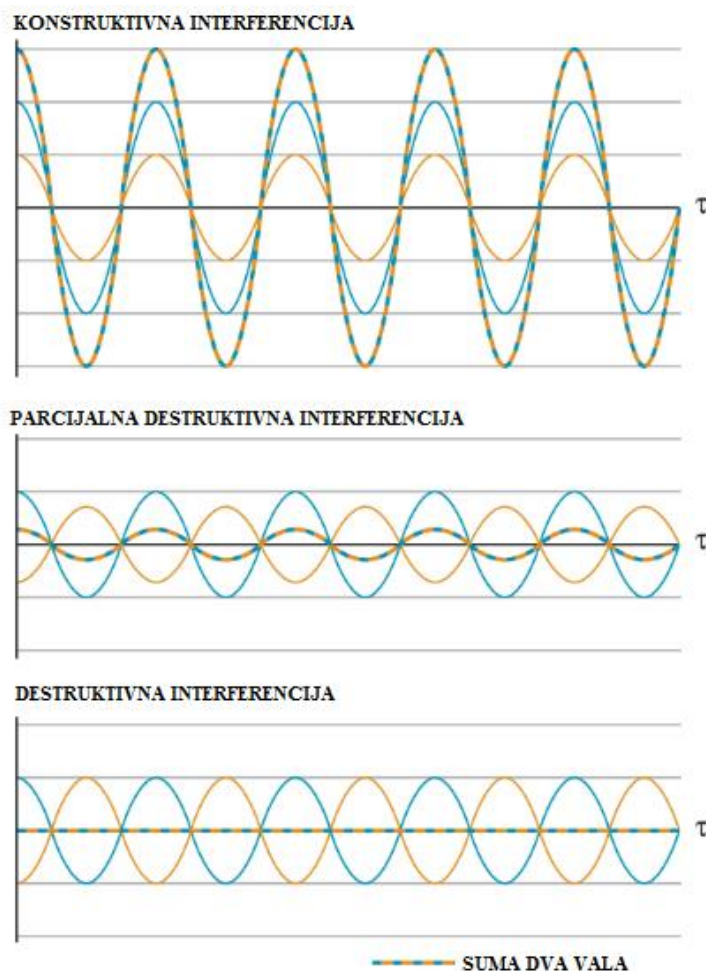
#### 3.4.1.2. Interferometar

Laserska interferometrija je odlično rješenje kod preciznih dimenzionalnih mjerenja posebno kod primjene za mjerenje odstupanja od pravocrtnosti. Interferometar je uređaj koji s izvora prima elektromagnetske ili mehaničke valove uz pomoć dva ili više objektivna te se s pomoću pruga interferencije valova provode precizna mjerenja [10]. Interferencija valova je međudjelovanje dvaju ili više valova koji istodobno prolaze kroz isti prostor. Interferencija može biti:

- konstruktivna

- destruktivna. [11]

Konstruktivna interferencija se događa kada su dva interferirajuća vala jednake valne duljine, amplitude i faze te se pojačavaju, a destruktivna interferencija se događa kada su dva vala jedan prema drugom u fazi pomaknuti za polovicu valne duljine pa im se njihovo djelovanje poništava. [11]



**Slika 13. Konstruktivna i destruktivna interferencija valova [12]**

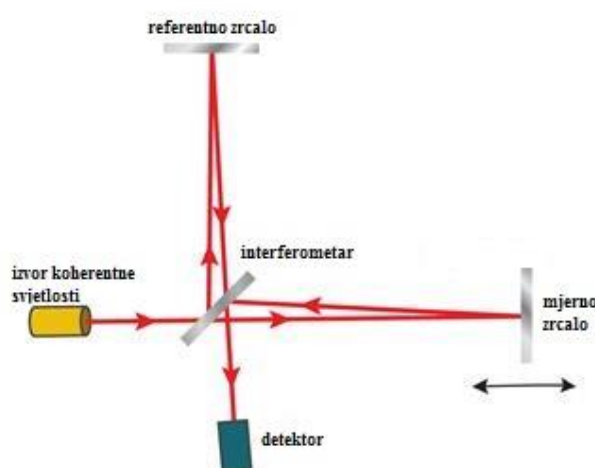
Da bi došlo do interferencije valova moraju se zadovoljiti uvjeti koherentnosti tj. valovi moraju imati:

- razliku faza koja je konstantna
- identične valne duljine (ne može doći do interferencije različitih boja svjetlosti)
- identične amplitude. [11]

Superponiranjem dviju zraka svjetla, koje se najčešće stvaraju dijeljenjem jednog izvora svjetla na dva snopa, dobiva se interferencijski uzorak. Interferencijski uzorak se sastoji od svijetlih i tamnih pruga. Pošto je valna duljina vidljivog svjetla jako kratka, mogu se otkriti vrlo male promjene u razlikama prijeđene udaljenosti između te dvije zrake. Radi toga je optička interferometrija jako korisna mjerna tehnika. Kasnije se točnost interferometra poboljšala još više izumom lasera. [13]

Prvi interferometar koristio je Thomas Young 1805. godine u svom pokusu kojim je istraživao prirodu svjetlosti dok je prvi interferometar koji je korišten u svrhe mjerenja razvio je Albert A. Michelson 1880-ih godina. Kroz povijest se tehnologija, a i točnost razvijala no princip rada interferometra koji je Michelson izradio ostao je isti.[13]

Michelsonov interferometar se sastoji od razdjelnika snopa zrake svjetlosti i dva zrcala. Na Slika 14. prikazana je skica principa rada Michelsonovog interferometra. Snop svjetla dolazi iz izvora i prolazi kroz razdjelnik gdje se djelomično i reflektira. Tu se dijeli na dva snopa. Jedna zraka svjetlosti ide prema referentnom zrcalu, dok druga ide prema mjernom zrcalu. Zatim se te dvije zrake reflektiraju od oba zrcala i vraćaju prema razdjelniku gdje se spajaju i putuju prema detektoru. Razlika putanja tih dviju zraka je vidljiva kroz faznu razliku koja generira interferencijski uzorak. Nakon toga se uzorak analizira pomoću detektora kako bi se procijenile pomicanje zrcala, karakteristike vala ili svojstva materijala. [13]

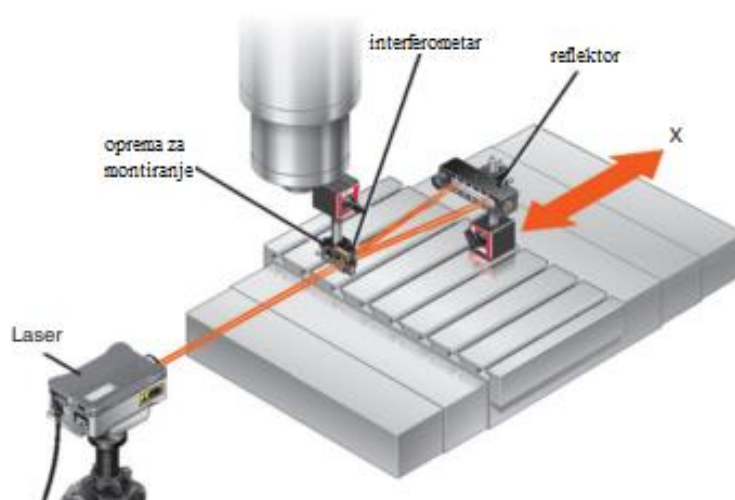


Slika 14. Skica Michelsonovog interferometra [13]

Da bi se dobio interferencijski uzorak velike preciznosti koristi se laser kao izvor svjetlosti jer se s njim dobiva stabilan izvor valne duljine.

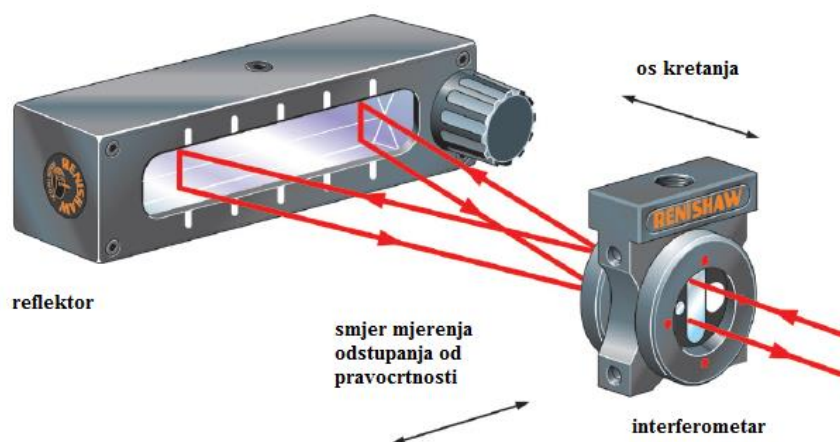
Kako bi koristili interferometar za mjerenje pravocrtnosti potrebne su nam tri ključne komponente:

1. laser
2. interferometar za mjerenje pravocrtnosti
3. reflektor. [14]

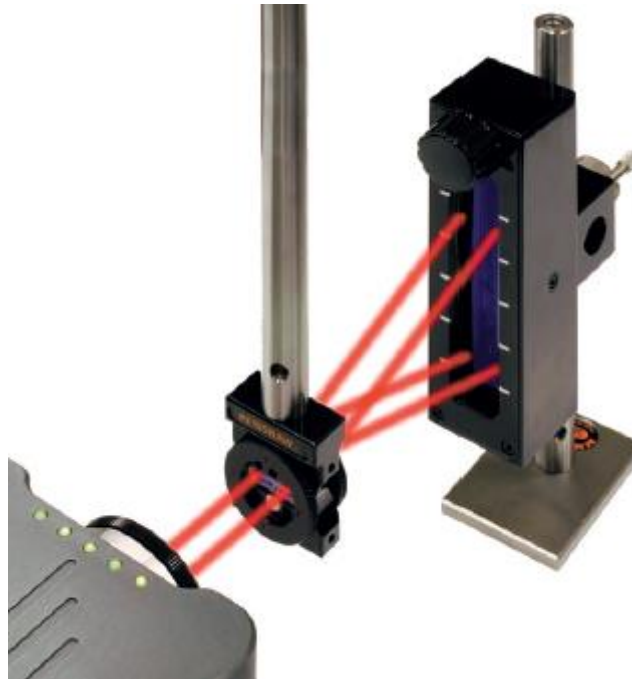


**Slika 15. Skica sustava za mjerenje pravocrtnosti pomoću interferometra [14]**

Ako se stol giba u smjeru osi x (strelica), laser i optika će zabilježiti svako horizontalno odstupanje stola od savršene ravne linije. Ovom konfiguracijom se može mjeriti i vertikalno odstupanje od savršene linije tako da se interferometar i reflektor zakrenu za  $90^\circ$ .



**Slika 16. Horizontalno mjerenje odstupanja od pravocrtnosti [14]**



Slika 17. Vertikalno mjerenje odstupanja od pravocrtnosti [14]

## 4. FOTODETEKTOR

Fotodetektori su fotoelektrični elementi u kojima svjetlost fotoelektričnim efektom uzrokuje izravnu promjenu nekih električnih svojstava. Kod fotootpornika i fotovodiča mijenja se električni otpor, u poluvodičkim fotodetektorima se mijenjaju električne karakteristike poluvodičkog elementa dok se kod fotoćelija i fotomultiplikatora izbijaju elektroni iz katode. Ugrađuju se u sklopove koji promjenom svjetlosnog snopa dojavljaju neku informaciju ili promjenu postojećeg stanja. [15]

Fotoelektrični efekt je pojava kod koje se izbijaju elektroni iz tvari djelovanjem elektromagnetskog zračenja dovoljno kratke valne duljine. Elektroni koji se na taj način izbijaju iz tvari nazivaju se fotoelektroni. Vrste fotoelektričnog efekta su:

- vanjski fotoelektrični efekt
- Comptonov efekt
- unutarnji električni efekt
- fotovodljivost
- Demberov efekt
- fotonaponski efekt. [16]

### 4.1. Fotodioda

Fotodioda je poluvodički element u kojem svjetlost uzrokuje unutarnji fotoelektrični efekt u zapornome sloju poluvodičkog kristala (P-N prijelaz). Struja se javlja kao posljedica prijenosa energije s fotona na elektrone u poluvodičkome materijalu. Mala struja prolazi diodom i kada nema svjetlosti. Ta struja se naziva tamna struja, a generira se pozadinskim zračenjem i zasićenjem poluvodičkog priključka. Fotodiode su slične običnim poluvodičkim diodama, a razlika je u tome što mogu biti spojene optičkim vlaknima kako bi omogućile svjetlu da dođe do osjetilnog dijela uređaja. Materijal koji se koristi kod fotodiode ovisi o željenim svojstvima. Najčešći materijali koji se koriste za izradu fotodiode su:

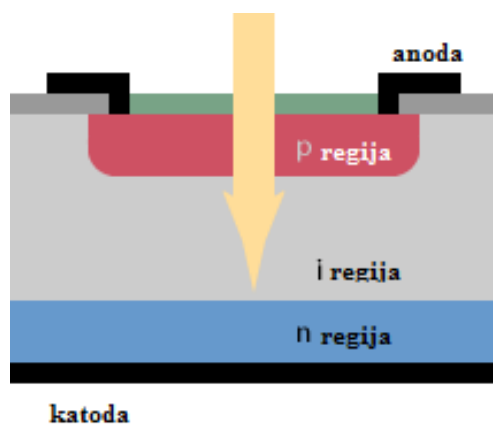
- silicij
- germanij
- indij
- galij

- arsen.

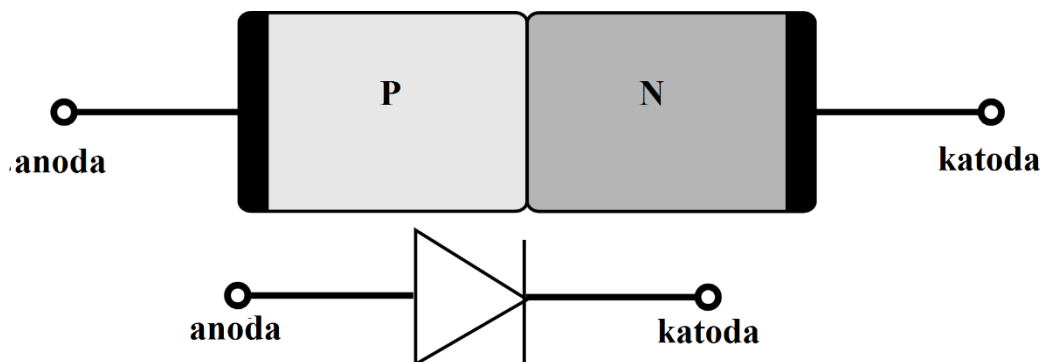
Primjena fotodioda baziranih na siliciju ima široku primjenu:

- očitavanje bar kodova
- laserski printeri
- medicinska snimanja
- spektroskopiju itd.
- optički senzor položaja.

Fotodioda se može spojiti PN ili PIN priključkom. One koje imaju PIN priključak većinom imaju brži odziv. Kada foton, koji ima dovoljne energije, udari u diodu stvara se par elektronskih rupa. Ako se apsorpcija dogodi u području prostornog naboja nositelji će biti pomaknuti od spoja električnim poljem. Takve rupe tada se pomiču prema anodi, a elektroni prema katodi te se proizvodi fotostruja. Ukupna struja koja prolazi kroz fotodiodu je zbroj tamne struje i fotostruje pa je zbog toga poželjno tamna struja bude što manja kako bi osjetljivost uređaja bila maksimalna. [17]



Slika 18. PIN fotodioda [17]



Slika 19. PN fotodioda [18]



Fotodioda može raditi u dva načina rada.

1. Fotonaponski način rada – u ovom načinu rada osvjetljena fotodioda stvara napon koji se može mjeriti, no međutim ovisnost napona o jačini struje nije linearna. Napon raste, dok je protok struje iz uređaja ograničen.
2. Fotovodljiv način rada – u ovom načinu rada fotodioda je obrnuto polarizirana (katoda je pozitivna u odnosu na anodu), što smanjuje vrijeme odziva jer obrnuta polariziranost povećava širinu područja prostornog naboja što dovodi do smanjenja kapaciteta spoja i povećavanja tamne struje bez velike promjene fotostruje. [18]

#### **4.1.1. Značajke fotodioda**

##### *4.1.1.1. Spektralni odziv*

Spektralni odziv predstavlja raspon optičkih valnih duljina ili frekvencija u kojima detektor ima značajan odziv. Kada se koristi u fotovodljivom načinu rada može se izraziti kao omjer generirane fotostruje i svjetlosne snage koji je izražen u A/W.

##### *4.1.1.2. Kvantna iskoristivost*

Kvantna iskoristivost je definirana kao broj generiranih parova elektronskih rupa po fotonu koji upada na fotodiodu.

##### *4.1.1.3. Tamna struja*

Tamna struja je struja koja prolazi fotodiodom kada je ona neosvijetljena, a fotodioda je u fotovodljivom načinu rada. Sadrži fotostruju stvorenu pozadinskim zračenjem i zasićenjem poluvodičkog priključka. Kod optičkih mjernih instrumenata se mora uračunati kod umjeravanja.

##### *4.1.1.4. Vrijeme odziva*

Vrijeme odziva se definira kao vrijeme koje je potrebno da se detektira ulazna optička jedinica.

##### *4.1.1.5. NEP – snaga ekvivalentna šumu*

NEP je mjera kojom se iskazuje osjetljivost fotodetektora. To je mjera najslabijeg optičkog signala koji se može detektirati. Mjerna jedinica je vat kroz korijen iz herca ( $W/\sqrt{Hz}$ ).

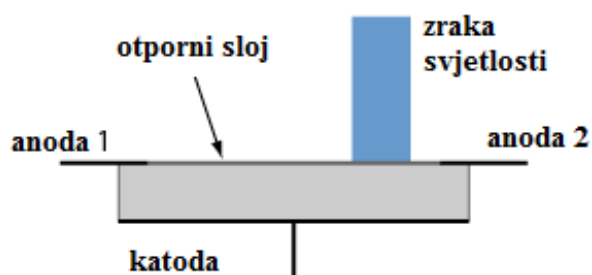
## 4.2. Uređaji osjetljivi na položaj (PSD)

Uređaji osjetljivi na položaj (nadalje PSD) su vrsta foto detektora koji se koriste mjerenje položaja svjetlosne točke, obično laserske, u jednoj ili dvije dimenzije (1D ili 2D). Mogu mjeriti položaj kod relativno velikih brzina. Omogućavaju istovremeno mjerenje pozicije i jačine svjetla. Prema principu rada mogu se podijeliti na PSD-ove koji rade na principu lateralnog efekta i segmentirane PSD-ove. Odlike su im:

- visoka analogna rezolucija
- brzo vrijeme odziva
- jednostavni strujni krug
- dobra linearnost položaja. [20]

### 4.2.1. PSD na principu lateralnog efekta

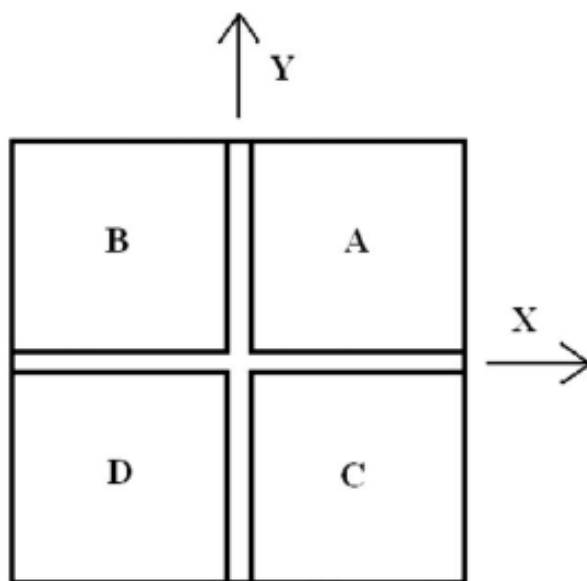
PSD-ovi s lateralnim efektom su jedno elementne poluvodičke difuzne fotodiode bez praznina ili mrtvih područja. Ove vrste PSD-a omogućuju izravno očitavanje pomaka svjetlosne točke preko cijelog aktivnog područja. To se postiže osiguravanjem analognog izlaza koji je izravno razmjeran i položaju i intenzitetu svjetlosne točke prisutne na aktivnom području detektora. Svjetlosna točka koja se nalazi na aktivnom području proizvede struju koja putuje od točke dodira preko otpornog sloja do kontakta. Ova struja obrnuto je proporcionalna otporu između upadne svjetlosne točke i kontakta. Kada je ulazna svjetlosna točka točno u središtu uređaja, generiraju se signali jednake struje. Pomicanjem svjetlosne točke preko aktivnog područja, količina struje generirane na kontaktima odredit će točan položaj svjetlosne točke u svakom trenutku vremena. Najveća prednost ovih PSD-ova je širok raspon. Mogu mjeriti poziciju svjetlosne točke sve do ruba senzora. Mogu se podijeliti na duo-lateralne i tetra-lateralne. [17]



Slika 20. PSD na principu lateralnog efekta [20]

#### 4.2.2. Segmentirana fotodioda

Segmentirani PSD se sastoji od dva ili četiri fotodiodna elementa odvojena prazninom. Ovaj rad se koncentrira na kvadrantnu segmentiranu fotodiodu (QD). Kvadrantna segmentirana fotodioda je PSD za određivanje relativne pozicije snopa svjetlosti koji je usmjeren na nju. Napravljena je od četiri jednake p-n diode koje su smještene simetrično oko centra i odvojene malim razmacima između njih (Slika 21).



Slika 21. Skica kvadrantne fotodiode [21]

Kada dođe do upada svjetlosti na fotodiodu dolazi do javljanja fotostruje. Očitanjem fotostruje na sva 4 polja može se odrediti relativna pozicija centra zrake u odnosu na centar segmentirane fotodiode. Da bi se pozicija zrake mogla odrediti potrebno je da ona pada na sva 4 polja kvadrantne fotodiode. Prednosti segmentirane fotodiode u odnosu na fotodiode na principu lateralnog efekta su:

- niži inherentni šum
- veća rezolucija
- jeftinije
- brzi odziv.

Zbog svih tih prednosti kvadrantna fotodioda u zadnje vrijeme ostaje nezaobilazan način kod mnogih beskontaktnih mjerenja.

Kvadrantna fotodioda ima dosta veliku preciznost, no međutim ona opada kako se zraka svjetlosti udaljava od njenog centra. To uvelike umanjuje područje u kojem se može znati točna pozicija zrake koja upada na nju.

Konvencionalne formule za procjenu pozicije zrake glase:

$$X = k \frac{(I_A + I_D) - (I_B + I_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \quad (1)$$

$$Y = k \frac{(I_A + I_B) - (I_C + I_D)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \quad (2)$$

gdje su X i Y procijenjene pozicije zrake u x i y smjeru,  $k$  je koeficijent rasta koji i njegov iznos ovisi o profilu zrake, a  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ ,  $I_D$  fotostruje mjerene na svakom kvadrantu. Kada je zraka centrirana na senzor, detektirati će se četiri jednake struje, što će rezultirati nultim razlikama signala, a time će normalizirane koordinate biti  $(X, Y) = (0, 0)$ . Struje će se promijeniti ako se zraka pomakne izvan središta, što dovodi do razlike signala na kvadrantima. [21]

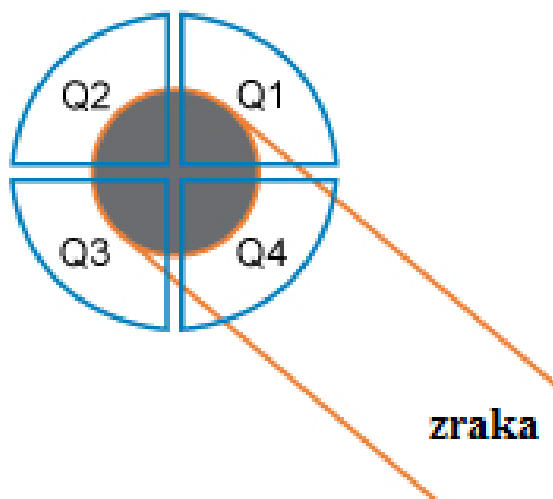
#### 4.2.2.1. Thorlabs PDQ80A

PDQ80A je kvadrantna silicijska segmentirana fotodioda koja služi za precizno određivanje položaja upadne zrake.



Slika 22. Thorlabs PDQ80A

Sastoji se od 4 podjednake fotodiode posložene tako da zajednički čine promjer od 7,8 mm što je ujedno i najveći promjer zrake koji se može izmjeriti. Između dioda se nalazi praznina koja ima širinu od 42  $\mu\text{m}$ . Zbog te praznine preporuča se da zraka bude promjera između 1 mm i 3,9 mm. Tako da ne prekriva cijeli senzor i da ne bude premala da bi se mogla izmjeriti. [22]



Slika 23. Skica PDQ80A [22]

Njome se može detektirati zraka svjetlosti u rasponu od 400 do 1050 nm valne duljine. Kada zraka upadne na PDQ80A javlja se fotostruja na svakoj diodi ovisno o tome koliko zrake prekriva koji dio kvadranta. U nastavku su prikazane tablice s važnijim električnim (Tablica 1) i fizičkim (Tablica 2) karakteristikama. [22]

Tablica 1. Električne karakteristike PDQ80A [22]

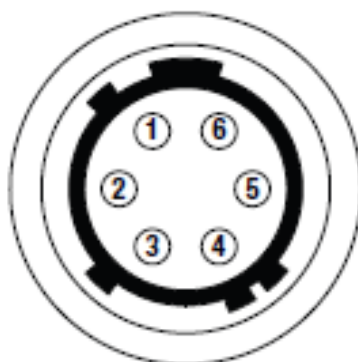
Podatak	Vrijednost
Raspon valne duljine	400 – 1050 nm
Maksimalni odziv	0,4 A/W pri 633 nm 0,64 A/W pri 900 nm
Maksimalna fotostruja	200 $\mu\text{A}$
Raspon izlaznog napona	$\pm 2 V_{\text{min}}$

Odstupanje izlaznog signala	100 mV <sub>max</sub>
Širina frekvencijskog pojasa	150 kHz
Preporučena veličina zrake	Ø1,0 mm - Ø 3,9 mm
Potreban napon napajanja	±5 VDC - ±15 VDC
Radna temperatura	10 – 40 °C
Temperatura skladištenja	-20 – 80 °C

**Tablica 2. Fizičke karakteristike PDQ80A [22]**

Podatak	Vrijednost
Veličina senzora	Ø7,8mm
Područje prikupljanja svjetlosti	Ø12,7mm
Dimenzije	50,8 x 30,5 x 16,5mm
Montažni navoj	8-32 x 0.25"
Metrički adapter	M4 u 8-32 Adapter
Duljina kabla	1,5m
Utikač konektora	Hirose HS10A-7P-6P
Glavni priključak	Hirose HR10A-7R-6S
Masa	114g

PDQ80A ima 6 pinova (Slika 24.) čije su funkcije prikazane u Tablica 3.



Slika 24. 6 pinova konektora PDQ80A [22]

Tablica 3. Funkcije pinova [22]

Pin	Funkcija
Pin 1	X-os $(Q2 + Q3) - (Q1 + Q4)$
Pin 2	Y-os $(Q1 + Q2) - (Q3 + Q4)$
Pin 3	SUM $(Q1 + Q2 + Q3 + Q4)$
Pin 4	+V (+5 do +15V)
Pin 5	Zajednički
Pin 6	-V (- 5 do -15V)

Tri glavna signala su „XDIFF“, „YDIFF“ i SUM. XDIFF je razlika između horizontalnih kvadranta, YDIFF je razlika između vertikalnih osi, a SUM je zbroj svih fotostruja u kvadrantima. Q1, Q2, Q3 i Q4 označavaju fotostruje na svakom kvadrantu.

Da bismo dobili x i y pozicije zrake koristimo vrijednost SUM da bi smo normalizirali vrijednosti XDIF i YDIFF.

$$x = \frac{(Q2 + Q3) - (Q1 + Q4)}{Q1 + Q2 + Q3 + Q4} = \frac{XDIF}{SUM} \quad (3)$$

$$y = \frac{(Q1 + Q2) - (Q3 + Q4)}{Q1 + Q2 + Q3 + Q4} = \frac{YDIFF}{SUM} \quad (4)$$

Korištenjem te dvije jednačbe mogu se pronaći koordinate x i y zrake na PDQ80A.

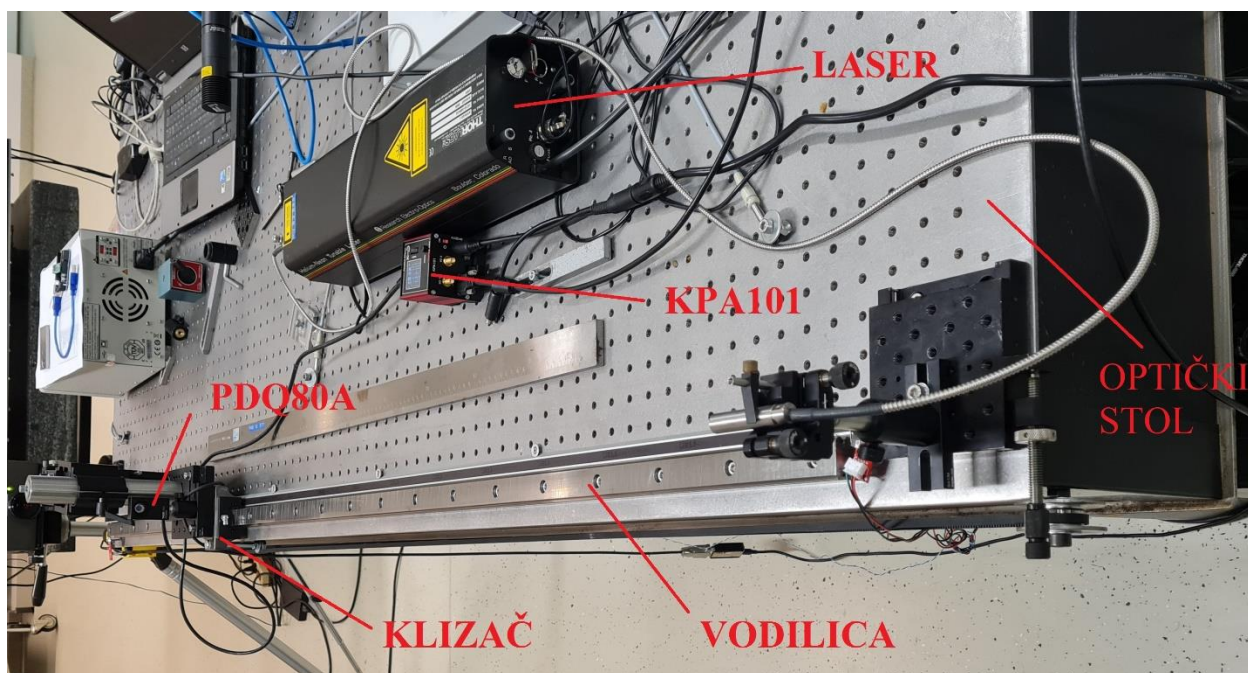


## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada će se prvo predložiti postava u Laboratoriju za precizna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje prema kojoj će se izvoditi mjerenja odstupanja od pravocrtnosti korištenjem prethodno opisane segmentirane fotodiode PDQ80A. Zatim će se provesti mjerenja kojima će se vidjeti kolika je sposobnost fotodiode kod korištenja za mjerenje odstupanja od pravocrtnosti. Da bi se provjerila točnost na kraju će se provesti usporedbeno mjerenje korištenjem metode mjerenja odstupanja od pravocrtnosti korištenjem laserskog interferometra.

### 5.1. Postav za mjerenje

U laboratoriju za precizna mjerenja dužina složio se sustav kojim će se mjeriti odstupanje od pravocrtnosti PDQ80A. Predloženi postav za izvođenje mjerenja prikazan je na Slika 25.



Slika 25. Postav za mjerenje u laboratoriju

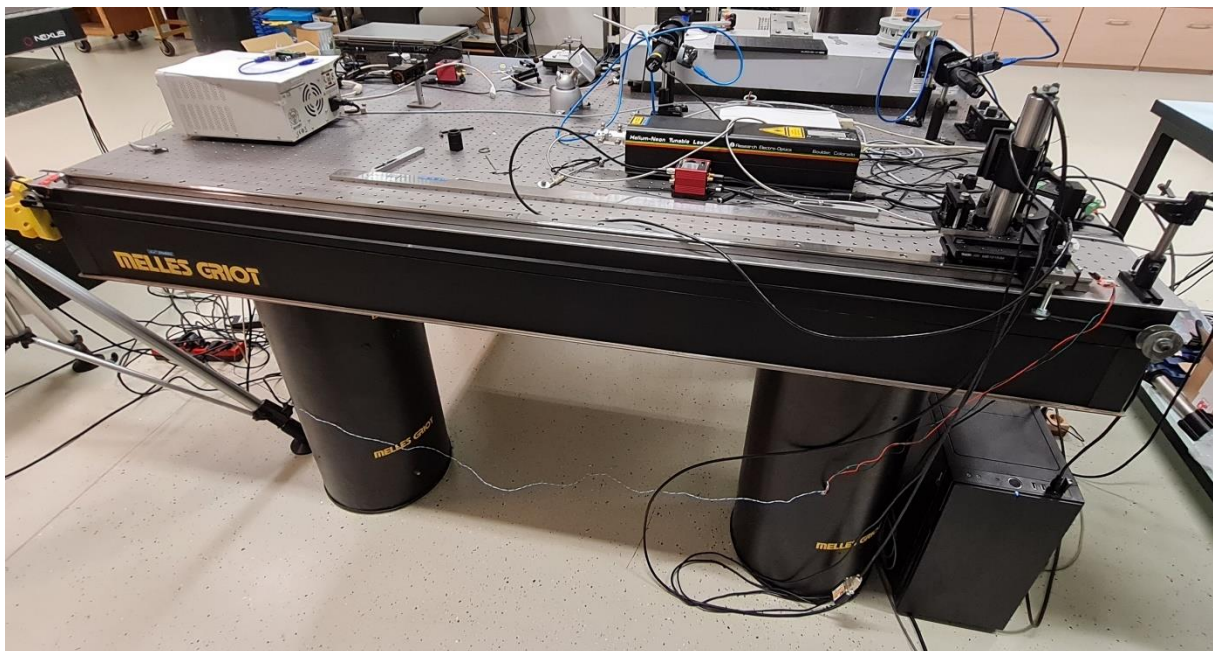
Glavni dijelovi koji služe za provođenje mjerenja su:

- optički stol
- laser
- vodilica
- klizač

- PDQ80A fotodioda
- KPA101 kontroler
- računalo
- Kinesis softver
- enkoder
- komponente za pozicioniranje.

### 5.1.1. Optički stol

U laboratoriju se nalazi optički stol Melles Griot koji se koristi za kontrolu vibracija kod mjerenja.



**Slika 26. Optički stol**

Vibracija na stolu se kontrolira pomoću mnogih pneumatskih elemenata i velike mase stola. Na stolu se nalazi ploča od nehrđajućeg čelika koja na sebi ima M6 utore za učvršćivanje komponenata koje se također mogu učvrstiti i magnetom.

### 5.1.2. HeNe laser

Kao izvor snopa svjetlosti koristi se Thorlabsov HeNe laser HTPS-EC-1. Ovaj laser krasi visoka izlazna snaga, a i također je vrlo praktičan jer ima izlaznu spojnicu koja uvelike olakšava

pozicioniranje izvora snopa svjetlosti. Izlazna snaga mu se kreće od 0,3 do 10 mW. Može emitirati snop svjetla valnih duljina 543 nm, 594 nm, 604 nm, 612 nm i 633 nm.



Slika 27. Thorlabs HTPS-EC-1 HeNe laser

### 5.1.3. Linearna vodilica i klizač

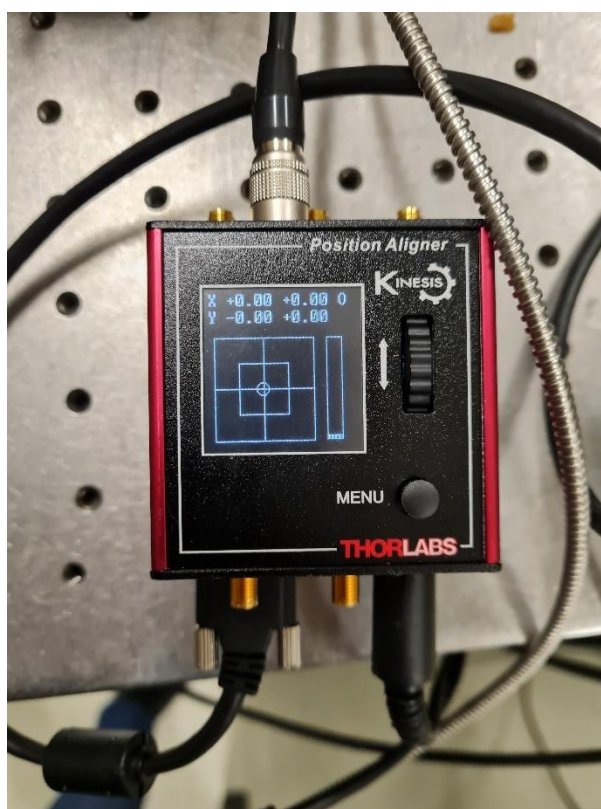
Korištena je linearna vodilica japanskog proizvođača NSK na kojoj se nalazi klizač koji je također proizvođača NSK. Mjerenja se odvijaju na dijelu od 1700 mm vodilice.



Slika 28. Linearna vodilica i klizač

#### 5.1.4. KPA101

PDQ80A daje signale koji otkrivaju položaj i intenzitet svjetlosnog snopa koji udara u fotodiodu, a KPA101 omogućuje praćenje ovih signala i vizualno predočava položaj snopa. To može činiti na vlastitom ugrađenom zaslonu, a može služiti i kao prijenosnik signala s PDQ80A na softver. Dolazi s pločom za montažu na stol (Slika 30.). Ploča sadrži dva magneta za privremeno postavljanje na optički stol i dva provrta za M6 vijke za trajnije postavljanje na ploču stola. [23]



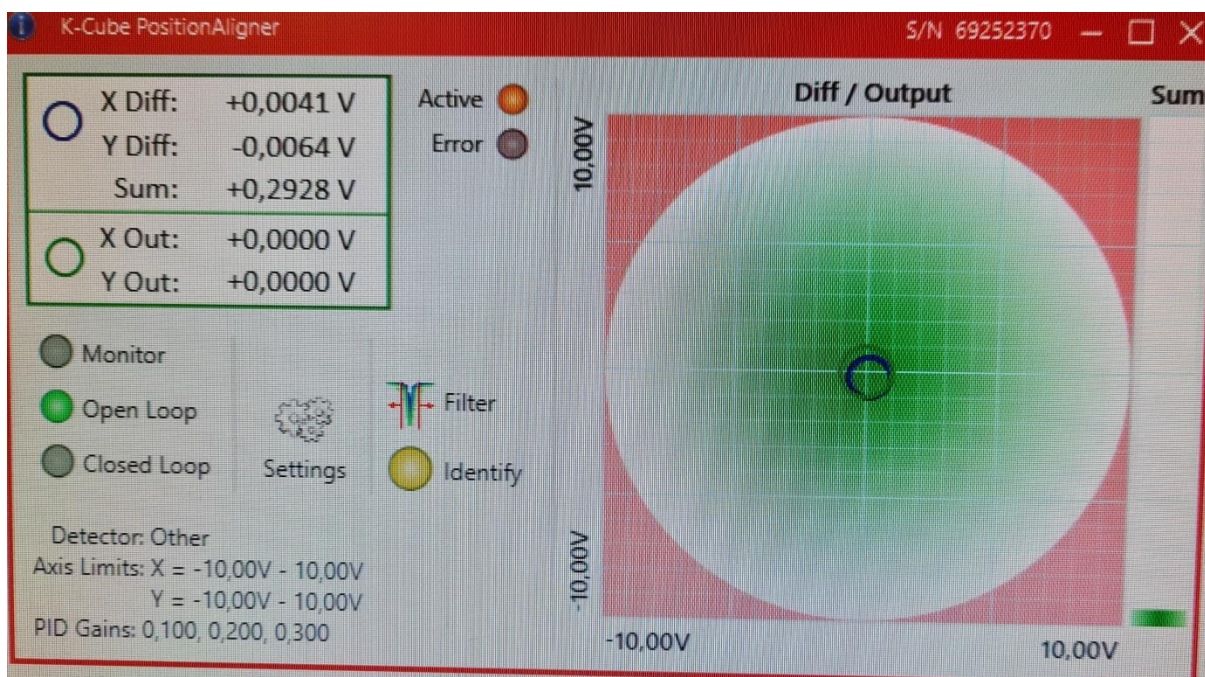
Slika 29. KPA101



Slika 30. Ploča za montiranje KPA101 na optički stol [23]

### 5.1.5. Kinesis softver

Kinesis je softver tvrtke Thorlabs koji sadrži .NET kontrole koje mogu koristiti programeri koji rade na najnovijim C#, Visual Basic, ili bilo kojim .NET kompatibilnim jezicima za stvaranje prilagođenih aplikacija. KPA101 je povezan preko USB-a i spojen na računalu na kojem je instaliran Kinesis. Preko softvera se očitavaju vrijednosti XDIFF, YDIFF i SUM koje se dobivaju tijekom mjerenja.



Slika 31. Kinesis sučelje preko kojeg se očitavaju dobivene vrijednosti

### 5.1.6. Enkoder

Za pomoć kod određivanja pozicija na kojima se rade mjerenja korišten je sustav enkodera slovenske tvrtke RLS. Sustav RLS LA11 se sastoji od uređaja za očitavanje i magnetne trake AS10.

AS10 magnetna traka je apsolutna magnetna skala širine 10 mm, maksimalne dužine 16,3 m sa slojem elasto-ferita pričvršćenim na fleksibilni nosač od nehrđajućeg čelika. Odlike su joj odlična otpornost na prašinu i vlagu, lako postavljanje pomoću adhezivne trake, te ima mogućnost dodatne zaštitne folije. Točnost joj iznosi  $\pm 40 \mu\text{m}$ . [24]



**Slika 32. RLS magnetna traka postavljena u laboratoriju**

LA11 je apsolutni magnetni linearni sustav enkodera čiji je zadatak kontrola kretanja za kontrolu položaja i brzine. Sustav je vrlo pouzdan zbog njegovog beskontaktnog apsolutnog principa mjerenja, ugrađenih sigurnosnih algoritama i visokokvalitetnih materijala i komponenti kojima je izrađen. Sustav je spojen na računalo preko RLS E201 sučelja. [25]

**Tablica 4. Tehnički podaci RLS LA11 sustava [25]**

Podatak	Vrijednost
Vrsta enkodera	Apsolutni
Očitavanje	Linearno
Rezolucija	0,244 $\mu\text{m}$
Brzina	Do 7 m/s
Masa	Uređaj za očitavanje 41 g, magnetna skala 60 g/m
Histereza	< 2 $\mu\text{m}$ na 0,1 mm visine vožnje



**Slika 33. RLS LA11 [25]**

#### **5.1.7. Komponente za spajanje**

Za spajanje dijelova postave na optičkom stolu većina korištenih dijelova za spajanje su proizvođača Thorlabs. Korišteni dijelovi su postolja, montažne baze, elementi za pozicioniranje, imbus vijci, baza za linearnu translaciju, nosač s V stezaljkom.

Korišteno postolje je MB1015/M (Slika 34.). To je aluminijska ploča dimenzija 100 mm x 150 mm debljine 12,7 mm koja na sebi ima 4 rupe M6 za spajanje s optičkim stolom. Na postolju se također nalaze rupe za spajanje dijelova na postolje koje su raspoređene u rešetkastu mrežu tako da je svako središte rupe udaljena od drugog za 25 mm. [26]



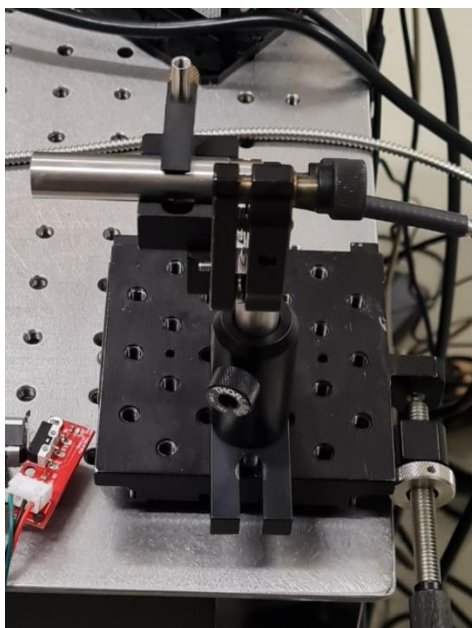
**Slika 34. Thorlabs MB1015/M [26]**

Korištena montažna baza je tipa BA1/M (Slika 35.) proizvođača Thorlabs. Dimenzije su joj 25 mm x 75 mm x 10 mm i također je napravljena od aluminija.



**Slika 35. Thorlabs BA1/M [27]**

Baza za linearnu translaciju je korištena u svrhu pomoći kod pozicioniranja izvora svjetla (lasera) (Slika 36.) prema senzoru smještenom na vodilicu. Na njoj je smještena prethodno opisana montažna baza na kojoj se PH (Slika 37.) i TR (Slika 38.) elementi za pozicioniranje. Zatim je na njih spojen nosač s V stezaljkom koji ima mogućnost finog pozicioniranja. PH elemente također pomaže kod učvršćivanja fotodiode na postolje smješteno na klizaču vodilice (Slika 39.).



**Slika 36. Spojeni elementi za pozicioniranje laserske zrake**

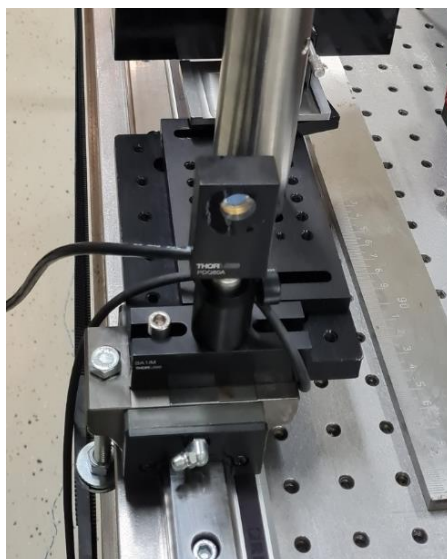




Slika 37. Thorlabs PH elementi za pozicioniranje s pripadnim vijcima za stezanje [28]



Slika 38. Thorlabs TR element za pozicioniranje



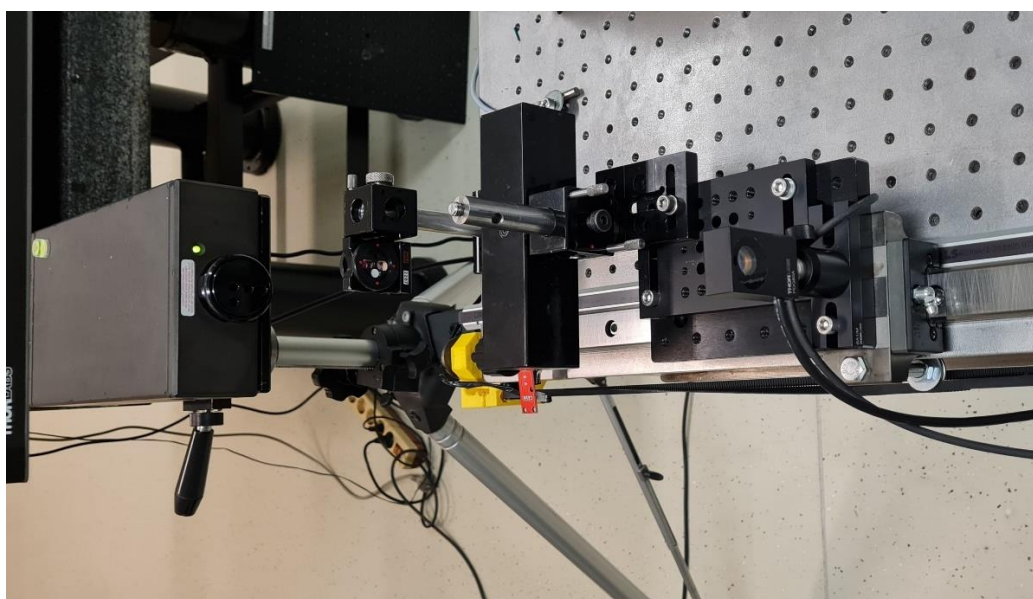
Slika 39. Spoj fotodiode na klizač

## 5.2. Plan mjerenja

Mjerenje se odvija na gore navedenoj NSK vodilici. Nakon što se spoje svi potrebni dijelovi, potrebno je pozicionirati lasersku zraku da bude kolinearna s vodilicom koja se provjerava. Pozicioniranje se izvodi iterativnim postupkom podešavanja zrake u centar fotodiode sve dok ista ne bude u centru ili što bliže centru posebno u prvoj i zadnjoj poziciji. Prvo se provjeri da li je zraka u centru na poziciji koja je blizu fotodiode, zatim se fotodioda pomiče prema zadnjoj poziciji i provjerava da li dolazi do prevelikog odstupanja, ako dolazi onda se fino podešava putanja laserske zrake sve dok se ne dobije željeni rezultat. Nakon što je zraka pozicionirana slijedi i sam postupak mjerenja. Mjerenje se izvodi svakih 50 mm prema poziciji koju kaže enkoder. Prva pozicija je 2100 mm očitanih na enkoderu, a zadnja pozicija je 3550 mm na enkoderu što je sveukupno 29 izmjerenih pozicija koje su označene od 0 do 1450 mm. Nakon što se dovede klizač na željenu poziciju tako da se na računalo očitava pozicija koju daje sučelje enkodera, pristupa se očitavanju podataka koji se nalaze u softveru Kinesis i njihovo daljnje zapisivanje u Excel tablicu.

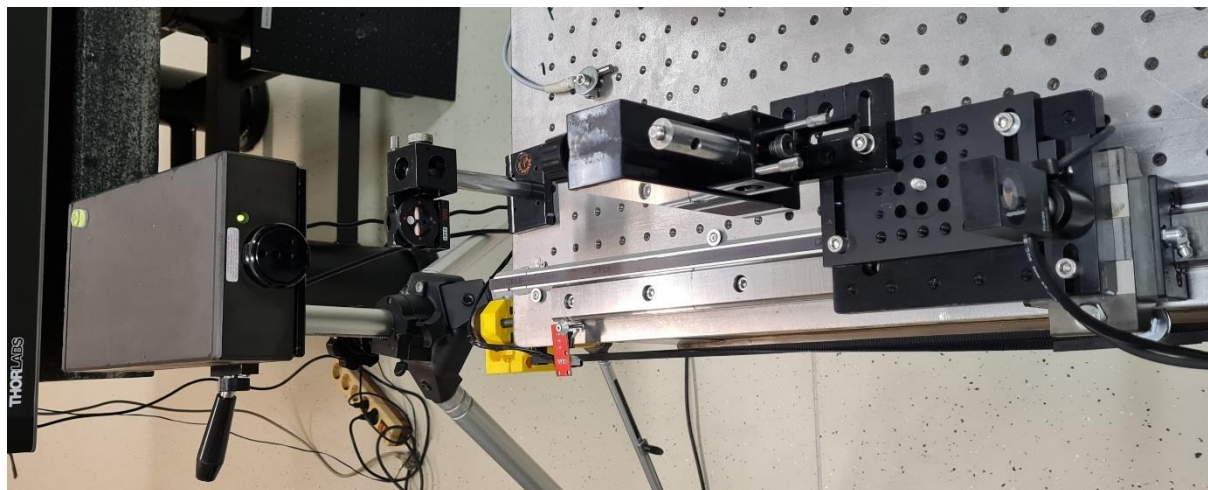
## 5.3. Mjerenje interferometrom

Na Sliku 40. može se vidjeti postav za referentnu metodu mjerenja laserskim interferometrom za horizontalna odstupanja, a na Sliku 41. može se vidjeti postav za vertikalna odstupanja. Za mjerenja je korišten laserski sustav Reinshaw ML10.



**Slika 40. Mjerenje horizontalnih odstupanja pomoću laserskog interferometra**

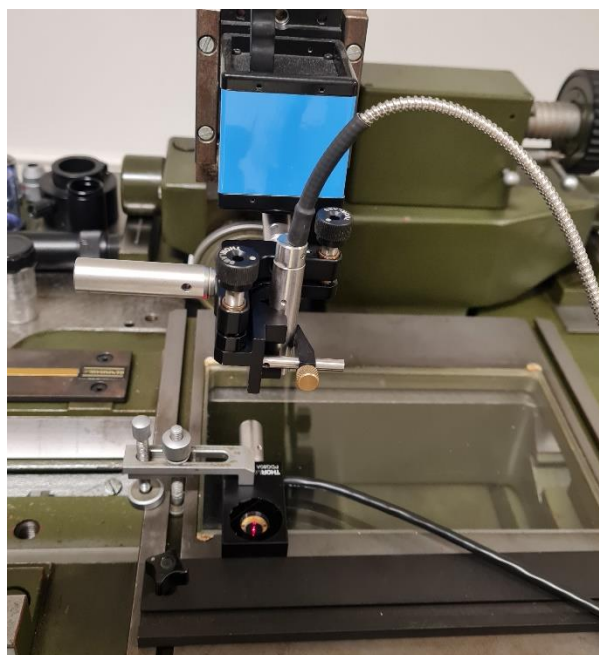
Taj sustav kao laserski izvor koristi HeNe laser čija je zraka valne duljine 632,99 nm. Rezolucija ovog sustava je 1 nm, a preciznost iznosi  $\pm 0,7 \mu\text{m/m}$ . Mjerenja su provedena na istoj vodilici te na istim pozicijama enkodera od 2100 mm do 3550 mm.



**Slika 41. Mjerenje vertikalnih odstupanja pomoću laserskog interferometra**

#### 5.4. Umjeravanje

Da bi se odmak na diodi koji se iskazuje u voltima doveo u vezu s definicijom metra korišten je mjerni sustav Renishaw RGH22Y30F61 i RLS Meropt softver. Tim sustavom može se mjeriti u dvije osi, a točnost mu je na razini mikrometra. Izvor svjetlosti i fotodioda su postavljeni prema Slika 42.



**Slika 42. Umjeravanje fotodiode na Renishaw RGH22Y30F61**

Na Kinesis softveru se postavi zraka na nulu koordinatnog sustava te se u mjernom softveru Meropt zapamti ta točka kao središte. Nakon toga se izvor pomiče na različite iznose volta u X i Y ravnini te se zapisuju odmaci u milimetrima koji se pojavljuju na mjernom softveru. Jačina signala zrake namještena je na 3 V što je važno kod kasnijeg normaliziranja vrijednosti. Rezultat umjeravanja pokazao je da kod jačine signala od 3 V pomak od 1 V na diodi označava prosječni pomak od 46  $\mu\text{m}$  na horizontalnoj osi dok je to kod vertikalne osi 43  $\mu\text{m}$ .

## 5.5. Rezultati referentnog mjerenja odstupanja od pravocrtnosti interferometrom

Na vodilici su odrađena mjerenja odstupanja od pravocrtnosti pomoću laserskog interferometra koja će kasnije poslužiti kao referentno mjerenje prema kojem će se usporediti metoda mjerenja segmentiranom fotodiodom. Mjerenja se odvijaju u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini.

### 5.5.1. Horizontalno mjerenje

Za horizontalna mjerenja odstupanja od pravocrtnosti pomoću laserskog interferometra napravljen je postav kao što je prikazano na Slika 40. Dobiveni rezultati mjerenja su prikazani u Tablica 5.

**Tablica 5. Rezultati horizontalnih mjerenja**

Pozicija, mm	Rezultat, $\mu\text{m}$
0	0
50	-1,06
100	-1,64
150	-2,92
200	-4,63
250	-8,28
300	-9,55
350	-9,89
400	-9,99
450	-10,90
500	-11,20
550	-12,32
600	-12,36
650	-11,92

700	-10,56
750	-9,02
800	-9,72
850	-9,80
900	-7,29
950	-4,69
1000	-5,80
1050	-3,80
1100	-2,28
1150	-4,91
1200	-5,46
1250	-6,87
1300	-8,54
1350	-15,50
1400	-15,89
1450	-15,55

Iz dobivenih podataka su izračunati nagib i odsječak pravca da bi se dobio regresijski pravac.

**Tablica 6. Regresijski pravac kod horizontalnog mjerenja**

Nagib pravca:	-0,0039
Odsječak pravca :	-5,2514

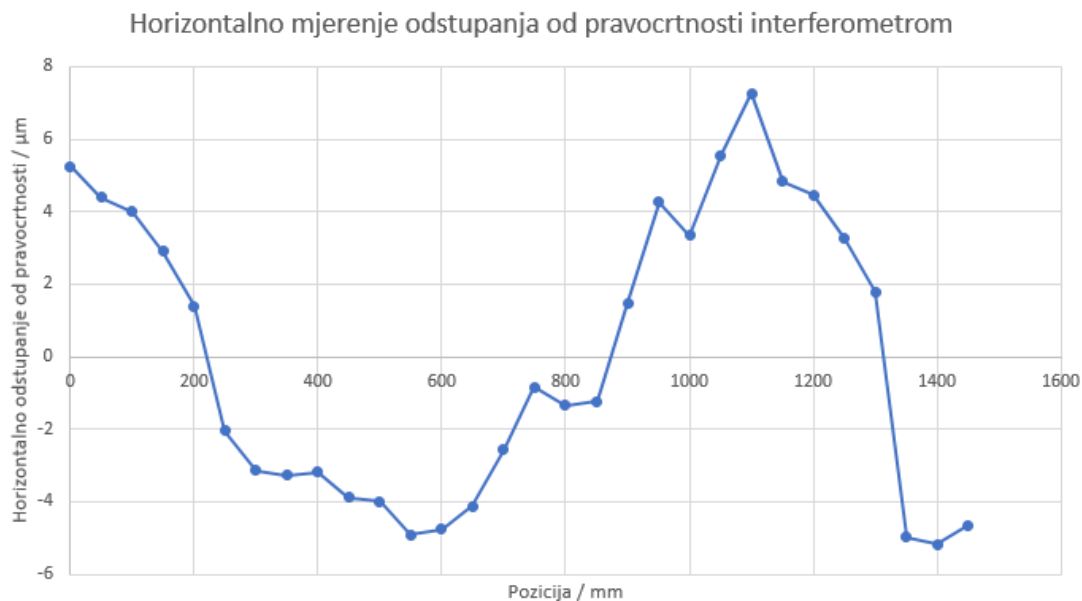
Nakon toga se pomoću metode najmanjih kvadrata eliminira nesuosnost i iz toga se dobiva odstupanje od pravocrtnosti vodilice.

**Tablica 7. Metoda najmanjih kvadrata za horizontalna mjerenja interferometrom**

Pozicija, mm	Rezultat, $\mu\text{m}$
0	5,25142
50	4,38642
100	4,00142
150	2,91642
200	1,40142
250	-2,05358
300	-3,12858

350	-3,27358
400	-3,17858
450	-3,89358
500	-3,99858
550	-4,92358
600	-4,76858
650	-4,13358
700	-2,57858
750	-0,84358
800	-1,34858
850	-1,23358
900	1,47142
950	4,26642
1000	3,35142
1050	5,54642
1100	7,26142
1150	4,82642
1200	4,47142
1250	3,25642
1300	1,78142
1350	-4,98358
1400	-5,17858
1450	-4,64358

Iz dobivenih rezultata se vidi da je odstupanje od pravocrtnosti 12,44  $\mu\text{m}$ . Na Slika 43. prikazan je graf s rezultatima.



**Slika 43. Graf horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenih interferometrom**

### 5.5.2. Vertikalno mjerenje

Za vertikalna mjerenja odstupanja od pravocrtnosti pomoću laserskog interferometra napravljen je postav kao što je prikazano na Slika 41. Dobiveni rezultati mjerenja su prikazani u Tablica 8. Princip izračunavanja odstupanja je jednak kao i kod horizontalnog mjerenja.

**Tablica 8. Rezultati vertikalnih mjerenja**

Pozicija, mm	Rezultat, $\mu\text{m}$
0	0
50	-0,13
100	-1,48
150	-1,94
200	-0,22
250	-5,32
300	-4,88
350	-4,94
400	-4,42
450	-7,15
500	-9,20
550	-7,67
600	-8,04

650	-7,25
700	-6,17
750	-5,91
800	-7,61
850	-10,02
900	-12,56
950	-10,54
1000	-13,98
1050	-16,50
1100	-16,12
1150	-18,67
1200	-21,44
1250	-27,85
1300	-28,78
1350	-28,83
1400	-28,99
1450	-33,09

**Tablica 9. Regresijski pravac kod vertikalnog mjerenja**

Nagib pravca:	-0,02055
Odsječak pravca :	3,2392

**Tablica 10. Metoda najmanjih kvadrata za vertikalna mjerenja interferometrom**

Pozicija, mm	Rezultat, $\mu\text{m}$
0	-3,23920
50	-2,34170
100	-2,66420
150	-2,09670
200	0,65080
250	-3,42170
300	-1,95420
350	-0,98670
400	0,56080



450	-1,14170
500	-2,16420
550	0,39330
600	1,05080
650	2,86830
700	4,97580
750	6,26330
800	5,59080
850	4,20830
900	2,69580
950	5,74330
1000	3,33080
1050	1,83830
1100	3,24580
1150	1,72330
1200	-0,01920
1250	-5,40170
1300	-5,30420
1350	-4,32670
1400	-3,45920
1450	-6,53170

Iz dobivenih rezultata vidljivo je da je odstupanje od pravocrtnosti 12,80  $\mu\text{m}$ . Na Slika 44. prikazan je graf s rezultatima.



**Slika 44. Graf vertikalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenih interferometrom**

## 5.6. Rezultati mjerenja odstupanja od pravocrtnosti fotodiodom

Mjerenja segmentiranom fotodiodom PDQ80A na vodilici rađena su na principu objašnjenom u poglavljima 5.1. i 5.2. Izvedena su u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini. Iznosi mjerenja ovise o jačini signala izvora svjetlosti, a pošto su kod mjerenja ti iznosi bili različiti prvo su se normalizirala odstupanja u voltima tako da se kao referentna vrijednost jačine signala uzela vrijednost pri kojoj su rađena umjeravanja (3 V) te su se prema njoj normalizirale ostale vrijednosti jačine signala. Nakon toga su se te vrijednosti pomnožile s očitanim odstupanjima i zapisale njihove vrijednosti koje će se koristiti u prikazanim rezultatima. Sva mjerenja A, B, C i D su napravljena na različitim jačinama intenziteta lasera zbog čega su rađene normalizacije da bi doveli rezultate u svezu s referentnom vrijednosti kod koje je umjeravano.

### 5.6.1. Horizontalno mjerenje

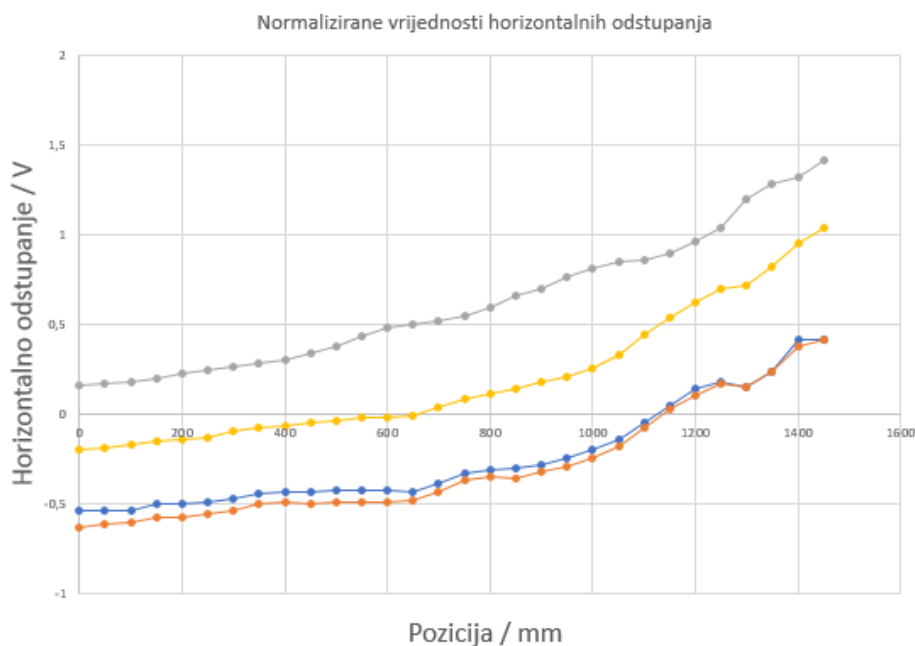
Vrijednosti horizontalnih odstupanja u voltima dobivene nakon normaliziranja su prikazane u Tablica 11.

**Tablica 11. Normalizirane vrijednosti horizontalne**

Pozicija, mm	Mjerenje A, V	Mjerenje B, V	Mjerenje C, V	Mjerenje D, V
0	-0,53930	-0,63468	0,15543	-0,20017
50	-0,54289	-0,61854	0,16970	-0,18576

100	-0,54160	-0,60481	0,17922	-0,17134
150	-0,49730	-0,57271	0,19825	-0,15213
200	-0,50047	-0,57750	0,22680	-0,14412
250	-0,49112	-0,55849	0,24742	-0,13611
300	-0,47314	-0,53981	0,26645	-0,09608
350	-0,44395	-0,50196	0,28073	-0,07366
400	-0,43489	-0,49429	0,30452	-0,06886
450	-0,43676	-0,50547	0,33941	-0,04804
500	-0,42885	-0,49222	0,38065	-0,03843
550	-0,42799	-0,49429	0,43140	-0,02402
600	-0,42612	-0,49269	0,48374	-0,01922
650	-0,43360	-0,48455	0,50277	-0,00961
700	-0,38585	-0,43089	0,51863	0,03843
750	-0,33264	-0,36844	0,54718	0,08807
800	-0,31250	-0,34704	0,59476	0,11209
850	-0,30675	-0,35535	0,66296	0,14412
900	-0,28662	-0,31877	0,69944	0,18095
950	-0,24160	-0,29146	0,76447	0,20817
1000	-0,20277	-0,24323	0,81364	0,25621
1050	-0,14525	-0,17791	0,84694	0,33307
1100	-0,04487	-0,07793	0,86122	0,43876
1150	0,04918	0,02443	0,89611	0,53805
1200	0,14309	0,10285	0,95797	0,62452
1250	0,18034	0,16577	1,04044	0,69818
1300	0,15488	0,14629	1,19587	0,72060
1350	0,23456	0,23253	1,28469	0,82148
1400	0,41174	0,37914	1,32117	0,95279
1450	0,41921	0,41923	1,41157	1,04087

Graf normaliziranih vrijednosti prikazan je na Slika 45. gdje možemo vidjeti da linije svih mjerenja imaju sličnu tendenciju rasta samo što počinju na različitim početnim točkama.



**Slika 45. Normalizirane vrijednosti horizontalnih odstupanja**

Nakon što su izračunate normalizirane vrijednosti treba ih preračunati u  $\mu\text{m}$ . Kao što je određeno kod umjeravanja 1 V iznosi  $46 \mu\text{m}$  i prema tome se izračunavaju vrijednosti odstupanja. Iz tih se vrijednosti zatim izračunaju nagib i odsječak regresijskog pravca da bi se moglo metodom najmanjih kvadrata prikazati odstupanje od pravocrtnosti.

**Tablica 12. Nagib i odsječak pravca horizontalno**

	Mjerenje A	Mjerenje B	Mjerenje C	Mjerenje D
Nagib pravca:	0,02787	0,03009	0,03742	0,03517
Odsječak pravca:	-31,13488	-34,88620	0,74518	-16,75996

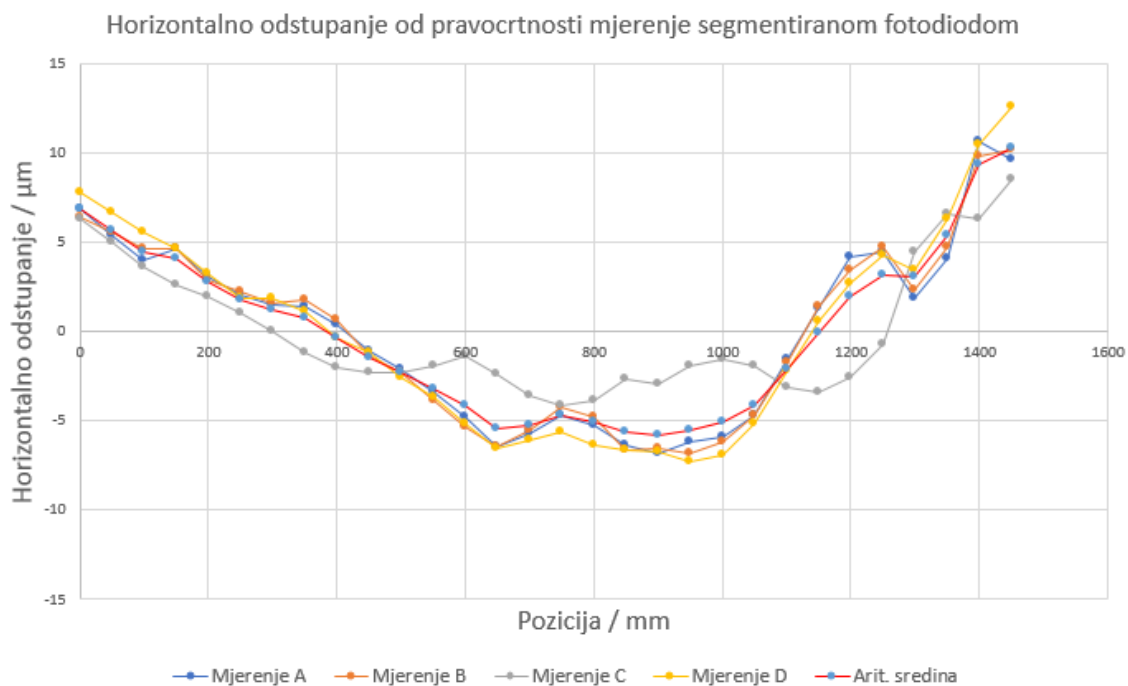
Iz tih vrijednosti se zatim izračunavaju odstupanja metodom najmanjeg kvadrata. Te vrijednosti su prikazane na Tablica 13. u kojoj se nalazi još i aritmetička sredina vrijednosti svih mjerenja po pozicijama iz koje je izračunato horizontalno odstupanje od pravocrtnosti.

**Tablica 13. Metoda najmanjih kvadrata za horizontalna mjerenja fotodiodom**

Pozicija, mm	Mjerenje A, $\mu\text{m}$	Mjerenje B, $\mu\text{m}$	Mjerenje C, $\mu\text{m}$	Mjerenje D, $\mu\text{m}$	Aritmetička sredina, $\mu\text{m}$
0	6,86622	6,32560	6,24926	7,752439	6,79838
50	5,31070	5,54686	5,02056	6,642135	5,63006

100	3,97522	4,66032	3,57773	5,53183	4,43628
150	4,57476	4,60027	2,56314	4,637706	4,09397
200	3,03866	2,88005	1,97678	3,239161	2,78366
250	2,06559	2,23067	1,03356	1,840616	1,79261
300	1,48082	1,56692	0,01896	1,883275	1,23750
350	1,40084	1,76559	-1,20974	1,133272	0,77249
400	0,41483	0,60595	-2,01022	-0,40939	-0,34971
450	-1,06303	-1,40174	-2,31110	-1,23146	-1,50183
500	-2,10082	-2,30985	-2,32648	-2,55794	-2,32377
550	-3,45571	-3,90789	-1,91364	-3,66825	-3,23637
600	-4,76531	-5,34063	-1,42942	-5,21091	-4,18657
650	-6,49556	-6,47872	-2,44401	-6,5374	-5,48892
700	-5,74070	-5,56854	-3,60135	-6,13444	-5,26126
750	-4,73991	-4,26309	-4,18771	-5,65942	-4,71253
800	-5,22761	-4,80466	-3,91761	-6,33736	-5,07181
850	-6,36247	-6,68299	-2,71967	-6,655	-5,60503
900	-6,85017	-6,54181	-2,94917	-6,75646	-5,77440
950	-6,21827	-6,81747	-1,89398	-7,29029	-5,55500
1000	-5,86465	-6,15165	-1,55250	-6,88733	-5,11403
1050	-4,66972	-4,71684	-1,92475	-5,18728	-4,12465
1100	-1,54624	-1,72247	-3,15346	-2,19015	-2,15308
1150	1,29249	1,37969	-3,45433	0,518732	-0,06585
1200	4,12475	3,40383	-2,54188	2,651137	1,90946
1250	4,40718	4,73084	-0,70160	4,207061	3,16087
1300	1,86798	2,34943	4,42179	3,457057	3,02406
1350	4,05954	4,72573	6,54757	6,238004	5,39271
1400	10,63888	9,81866	6,31806	10,3881	9,29092
1450	9,58168	10,11795	8,51521	12,59256	10,20185

Iz dobivenih rezultata može se očitati horizontalno odstupanje od pravocrtnosti u iznosu od 15,976  $\mu\text{m}$ . Na Slika 46. je prikazan graf horizontalnog odstupanja od pravocrtnosti mjerenjem segmentnom fotodiodom koji sadrži sva 4 mjerenja i aritmetičku sredinu.



**Slika 46. Graf horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenih fotodiodom**

Iz grafa se vidi dobra ponovljivost rezultata jedini rezultat koji malo odstupa je mjerenje C.

### 5.6.2. Vertikalno mjerenje

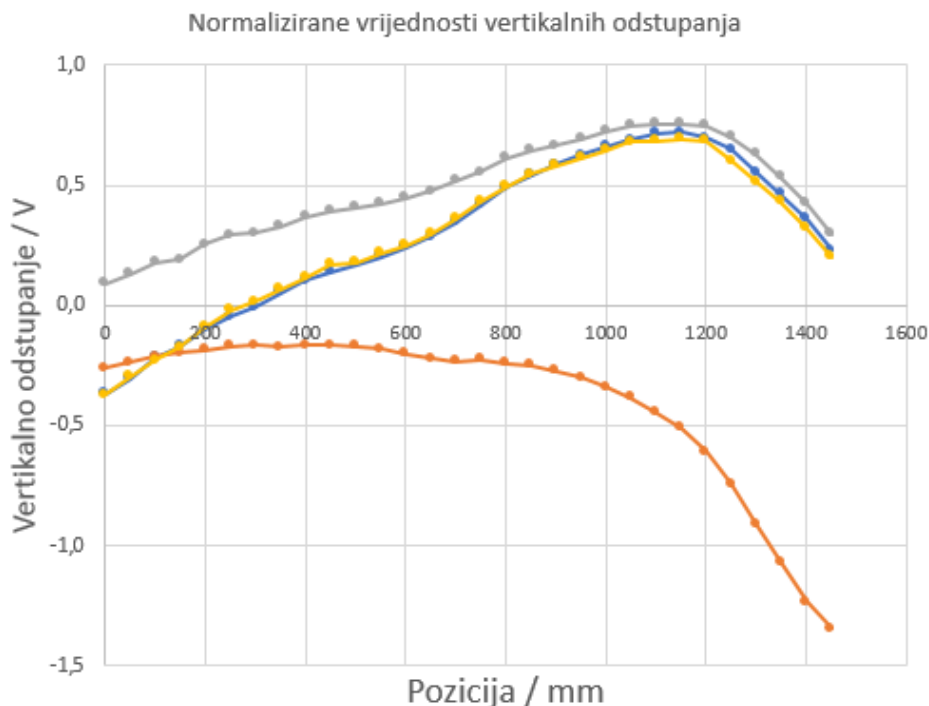
Vrijednosti vertikalnih odstupanja u voltima dobivene nakon normaliziranja su prikazane u Tablica 14.

**Tablica 14. Normalizirane vrijednosti vertikalne**

Pozicija, mm	Mjerenje A, V	Mjerenje B, V	Mjerenje C, V	Mjerenje D, V
0	-0,37492	-0,37103	-0,26170	0,09160
50	-0,29741	-0,30586	-0,23902	0,12859
100	-0,22938	-0,21925	-0,21285	0,17615
150	-0,17338	-0,17217	-0,19715	0,18848
200	-0,09065	-0,09979	-0,18668	0,25189
250	-0,02025	-0,04831	-0,17098	0,29064
300	0,01424	-0,01001	-0,16574	0,29945
350	0,06518	0,05200	-0,17446	0,32763
400	0,11438	0,10295	-0,16574	0,36639
450	0,17006	0,13826	-0,16574	0,39281
500	0,17670	0,17111	-0,17098	0,40514

550	0,21578	0,20150	-0,18144	0,42275
600	0,24995	0,24015	-0,20238	0,44565
650	0,29788	0,28583	-0,22331	0,47560
700	0,36021	0,34205	-0,23378	0,51611
750	0,42966	0,41548	-0,22680	0,55310
800	0,49294	0,49050	-0,24425	0,61299
850	0,54736	0,54267	-0,24948	0,64470
900	0,58058	0,58712	-0,27216	0,66584
950	0,61253	0,62682	-0,30357	0,69402
1000	0,64449	0,66161	-0,34021	0,72220
1050	0,67977	0,68989	-0,38382	0,74686
1100	0,68261	0,71782	-0,44663	0,75743
1150	0,69290	0,71870	-0,51118	0,75743
1200	0,68261	0,69534	-0,61063	0,74686
1250	0,60273	0,64773	-0,74496	0,69930
1300	0,51509	0,55392	-0,91071	0,62885
1350	0,43029	0,46327	-1,06947	0,53196
1400	0,32114	0,35926	-1,23521	0,42275
1450	0,20043	0,22733	-1,34687	0,29593

Graf normaliziranih vrijednosti prikazan je na Slika 47. gdje možemo vidjeti da linije triju mjerenja imaju sličnu putanju dok jedna linija donekle odstupa od njih.



**Slika 47. Normalizirane vrijednosti vertikalnih odstupanja**

Nakon što su izračunate normalizirane vrijednosti treba ih preračunati u  $\mu\text{m}$ . Kao što je određeno kod umjeravanja 1 V iznosi  $43 \mu\text{m}$  i prema tome se izračunavaju vrijednosti odstupanja. Iz tih se vrijednosti zatim izračunaju nagib i odsječak regresijskog pravca da bi se moglo metodom najmanjih kvadrata prikazati odstupanje od pravocrtnosti.

**Tablica 15. Nagib i odsječak pravca vertikalno**

	Mjerenje A	Mjerenje B	Mjerenje C	Mjerenje D
Nagib pravca:	0,02594	0,02748	-0,02546	0,01521
Odsječak pravca:	-6,49351	-7,45056	1,48039	9,41008

Iz tih vrijednosti se zatim izračunavaju odstupanja metodom najmanjeg kvadrata. Te vrijednosti su prikazane u Tablica 16. u kojoj se nalazi još i aritmetička sredina vrijednosti svih mjerenja po pozicijama iz koje je izračunato horizontalno odstupanje od pravocrtnosti.

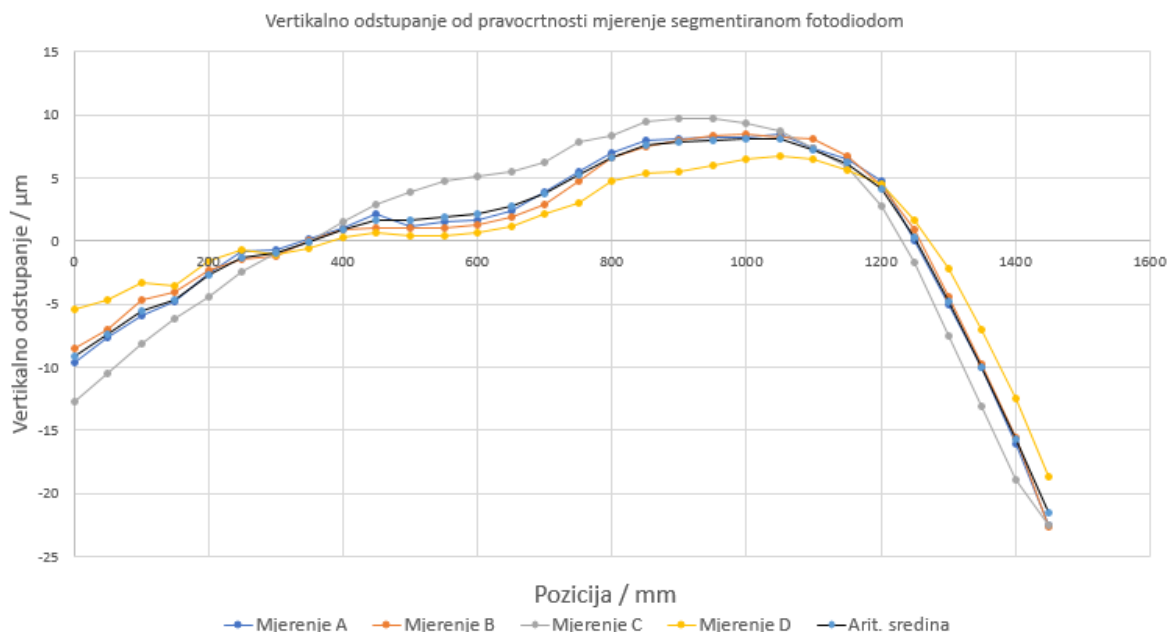
**Tablica 16. Metoda najmanjih kvadrata za vertikalna mjerenja fotodiodom**

Pozicija, mm	Mjerenje A, $\mu\text{m}$	Mjerenje B, $\mu\text{m}$	Mjerenje C, $\mu\text{m}$	Mjerenje D, $\mu\text{m}$	Aritmetička sredina, $\mu\text{m}$
0	-9,62821	-8,50389	-12,73337	-5,47143	-9,08423



50	-7,59233	-7,07560	-10,48484	-4,64138	-7,44854
100	-5,96459	-4,72570	-8,08627	-3,35686	-5,53336
150	-4,85384	-4,07549	-6,13783	-3,58720	-4,66359
200	-2,59348	-2,33748	-4,41444	-1,62100	-2,74160
250	-0,86370	-1,49842	-2,46600	-0,71519	-1,38583
300	-0,67808	-1,22592	-0,96767	-1,09703	-0,99217
350	0,21500	0,06640	-0,06950	-0,64569	-0,10845
400	1,03325	0,88280	1,57887	0,26012	0,93876
450	2,13040	1,02688	2,85213	0,63572	1,66128
500	1,11880	1,06519	3,90034	0,40537	1,62242
550	1,50169	0,99775	4,72349	0,40225	1,90630
600	1,67371	1,28536	5,09652	0,62636	2,17049
650	2,43754	1,87514	5,46955	1,15345	2,73392
700	3,82039	2,91816	6,29270	2,13499	3,79156
750	5,50935	4,70150	7,86604	2,96505	5,26049
800	6,93302	6,55283	8,38911	4,77977	6,66368
850	7,97574	7,42211	9,43732	5,38260	7,55444
900	8,10695	7,95900	9,73533	5,53097	7,83306
950	8,18374	8,29193	9,65824	5,98232	8,02906
1000	8,26052	8,41335	9,35609	6,43366	8,11591
1050	8,48016	8,25526	8,75387	6,73351	8,05570
1100	7,30530	8,08206	7,32642	6,42742	7,28530
1150	6,45016	6,74552	5,82395	5,66687	6,17162
1200	4,71070	4,36649	2,82109	4,45186	4,08754
1250	-0,02182	0,94499	-1,68217	1,64624	0,22181
1300	-5,08766	-4,46326	-7,53578	-2,14404	-4,80769
1350	-10,03106	-9,73554	-13,08932	-7,07047	-9,98160
1400	-16,02203	-15,58194	-18,94294	-12,52710	-15,76850
1450	-22,50958	-22,62946	-22,47094	-18,74117	-21,58779

Iz dobivenih rezultata može se očitati vertikalno odstupanje od pravocrtnosti u iznosu od 29,704  $\mu\text{m}$ . Na Slika 48. prikazan je graf vertikalnog odstupanja od pravocrtnosti mjerenjem segmentnom fotodiodom koji sadrži sva 4 mjerenja i aritmetičku sredinu.

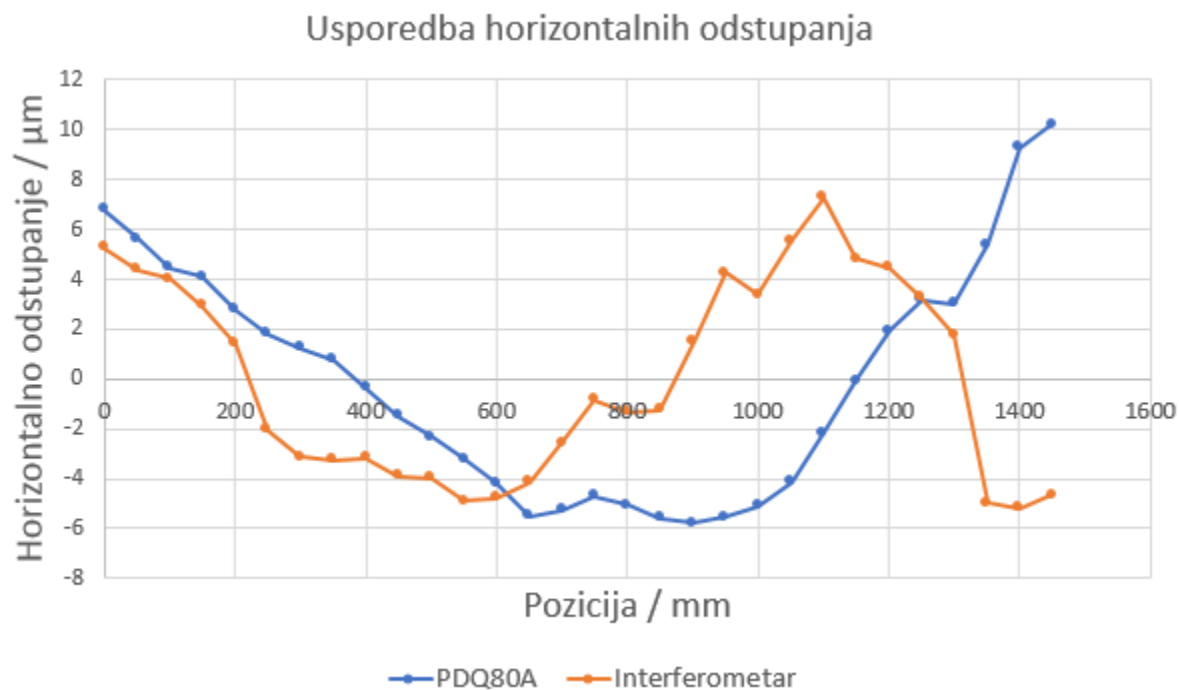


**Slika 48. Graf vertikalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenih fotodiodom**

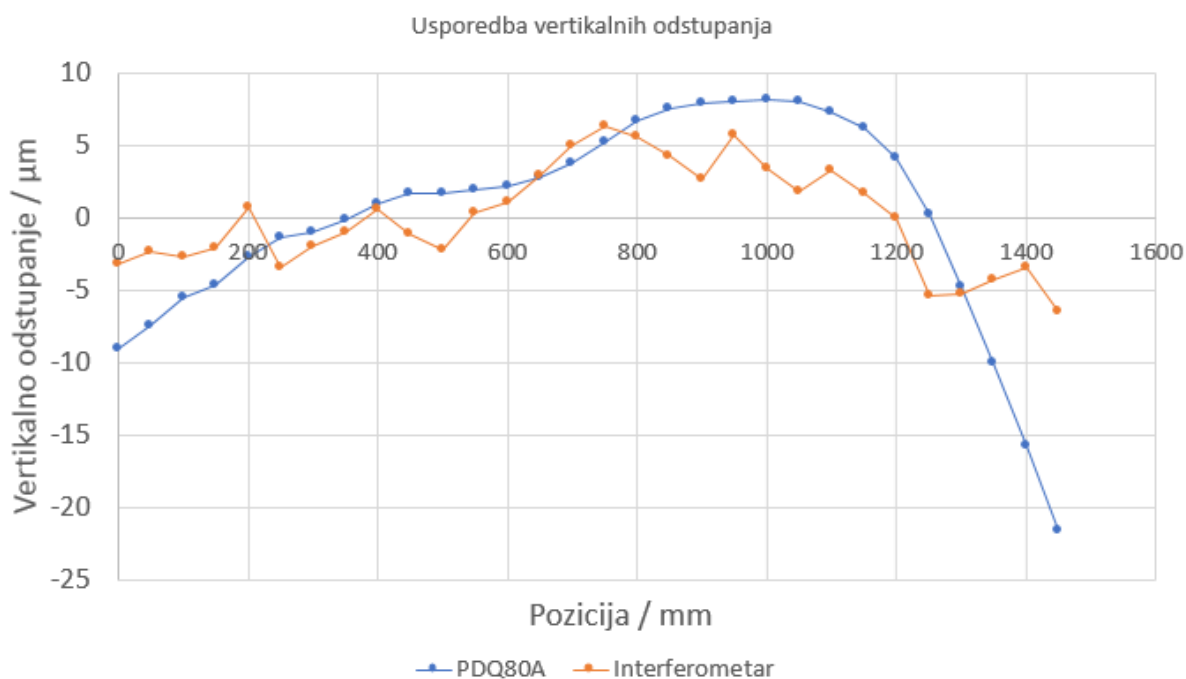
Može se vidjeti dobra ponovljivost rezultata jedino C rezultat malo odstupa od ostalih vrijednosti kao i kod horizontalnog mjerenja.

### 5.7. Usporedba rezultata

Kod horizontalnih odstupanja mjerenih referentnom metodom iznos odstupanja od pravocrtnosti je  $12,44 \mu\text{m}$  dok je kod odabrane metode segmentiranom fotodiodom PDQ80A taj iznos nešto veći i iznosi  $15,976 \mu\text{m}$  što je za takve male vrijednosti relativno dobar rezultat. Dok je kod vertikalnih odstupanja od pravocrtnosti iznos odstupanja  $12,80 \mu\text{m}$  prema referentnoj metodi, a kod odabrane metode  $29,704 \mu\text{m}$  što je dosta veća razlika od one u horizontalnom slučaju. Na Slika 49. je prikazan graf koji pokazuje horizontalna odstupanja obje metode dok je na Slika 50. prikazan graf koji to pokazuje kod vertikalnih odstupanja.



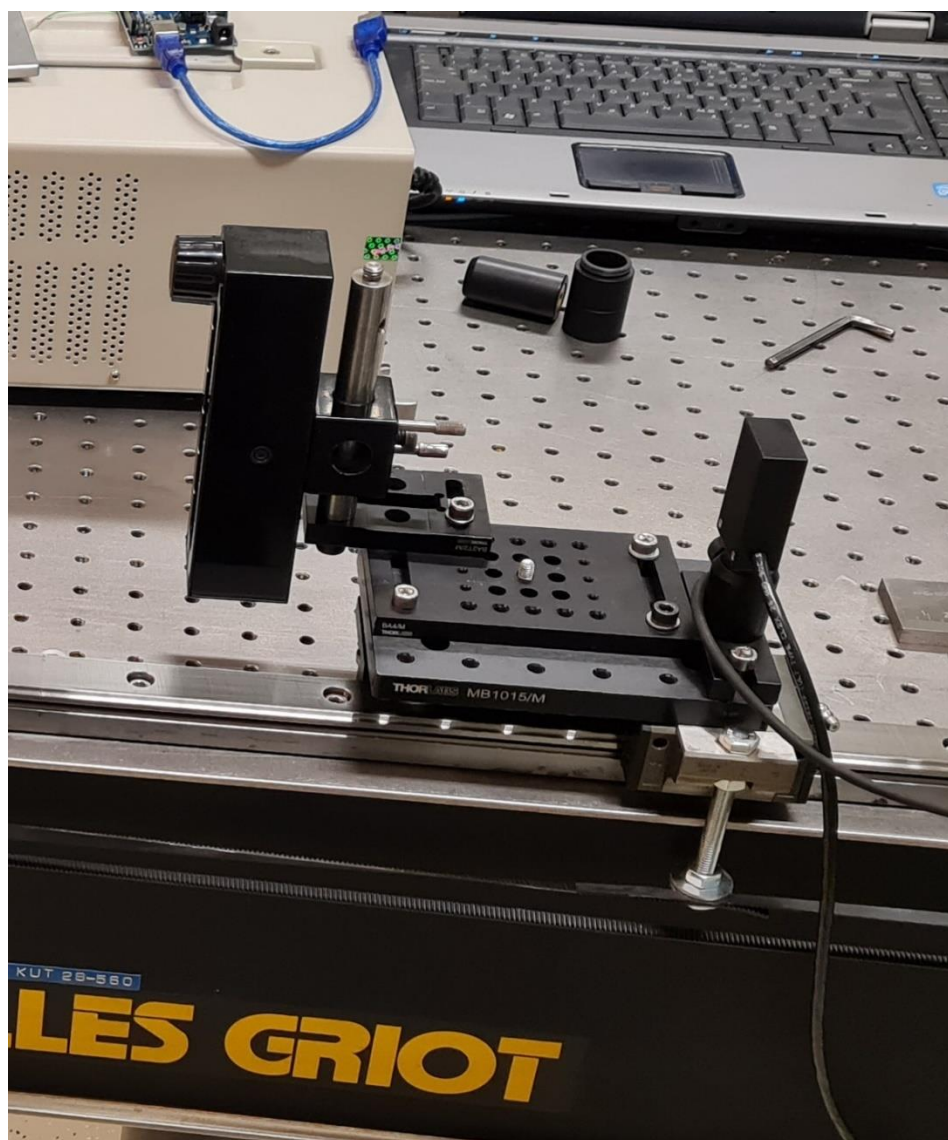
**Slika 49. Graf usporedbe horizontalnih odstupanja**



**Slika 50. Graf usporedbe vertikalnih odstupanja**

Iz priloženih grafova može se vidjeti da se graf referentne metode i metode mjerenja PDQ80A ne podudaraju ni u horizontalnoj ni u vertikalnoj osi. Jedan od razloga za to je postavljanje reflektora kod interferometra i fotodiode na različite visine kod mjerenja što se može vidjeti na

Slika 51. Na toj slici možemo vidjeti i da ni reflektor ni dioda nisu postavljeni izravno na vodilicu nego su spajani različitim postoljima i nosačima koji također mogu utjecati na dobivene rezultate. Izvor svjetlosti je bio priključen i kod mjerenja interferometrom i kod mjerenja fotodiodom blizu oba računala na kojem su se očitavale vrijednosti pa postoji mogućnost utjecaja operatera koji se micao tim područjem. Iz Slika 51. se također može vidjeti razlika horizontalne udaljenosti postavljenog reflektora od osi klizača na kojem se nalazi što znači da je optika interferometra bila i na većem horizontalnom kraku od fotodiode što utječe na rezultate.



Slika 51. Reflektor i fotodiode različite visine postavljanja

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu mjerena su odstupanja od pravocrtnosti vodilice postavljene na optički stol u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Za mjerenje je korištena Thorlabs-ova PDQ80A kvadrantna segmentirana fotodioda. Primarna funkcija te diode nije mjerenje odklona zrake pa to nije ni specificirano kod proizvođača. Pozicije za mjerenje su određene pomoću enkodera na poziciji enkoder 2100 mm je određena početna pozicija, a na poziciji enkodera 3550 mm određena je zadnja točka te se mjerilo na svakih 50 mm što daje ukupnu duljinu mjerenja 1450 mm. Za referentno mjerenje preko kojeg će se usporediti točnost te metode mjerenja odabran je laserski interferometar. Prvotno je trebalo dovesti u svezu mjere dobivene u voltima koje prikazuje fotodioda i definiciju metra da bi se to mjerenje moglo usporediti s referentnim. Vrlo je važno pratiti jačinu signala na fotiodi označenu sa SUM da bi se mogle normalizirati vrijednosti jer se razlikuju kod različitih jačina signala. Kod umjeravanja jačina signala bila je 3 V što se kasnije koristilo za normalizaciju vrijednosti odstupanja u voltima prikazanih kao XDIFF i YDIFF. Rezultat umjeravanja je pokazao da pomak od 1 V označava pomak od 46  $\mu\text{m}$  u horizontalnoj osi, a 43  $\mu\text{m}$  u vertikalnoj osi. Nakon dobivenih vrijednosti umjeravanja pomoću referentne jačine signala određene su normalizirane vrijednosti odstupanja u voltima u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini te su ti iznosi preračunati u  $\mu\text{m}$  da bi se mogli usporediti s iznosima kod mjerenja interferometrom. Dobivena odstupanja od pravocrtnosti primjenom PDQ80A su 15,974  $\mu\text{m}$  u horizontalnoj ravnini te 29,704  $\mu\text{m}$  u vertikalnoj ravnini. Kod referentne metode dobivena su odstupanja od 12,44  $\mu\text{m}$  u horizontalnoj ravnini i 12,80  $\mu\text{m}$  u vertikalnoj ravnini. Mjerenja su pokazala dosta dobru ponovljivost, no razlika kod vertikalne ravnine je dosta veća u odnosu na horizontalnu kad se usporedi s referentnom metodom. Na kraju su izvedeni grafovi s usporedbom kretanja linija odstupanja. Grafovi se ne poklapaju, ali na nekim dijelovima ima naznake podudaranja grafova. Razlog ne poklapanja mogu biti različite visine postavljenih reflektora i fotodiode, različita horizontalna udaljenost reflektora od osi klizača, spojevi nosača i postolja na kojima se nalaze fotodioda i reflektor ili utjecaj operatera koji je očitavao vrijednosti u tom području i ručno pomicao klizač na željenu poziciju. Važno je i napomenuti da su sva mjerenja obavljena na različitim intenzitetima lasera zbog čega su rađene normalizacije.

## LITERATURA

- [1] <https://nistdigitalarchives.contentdm.oclc.org/digital/collection/p15421coll3/id/205/>,  
Pristupljeno: 19. veljače 2022.
- [2] <https://www.britannica.com/science/metric-system-measurement>, Pristupljeno: 19.  
veljače 2022.
- [3] <https://dzm.gov.hr/istaknute-teme/zakonsko-mjeriteljstvo/o-mjeriteljstvu/431>,  
Pristupljeno: 19. veljače 2022.
- [4] [https://dzm.gov.hr/UserDocsImages/Zakonsko%20mjeriteljstvo/Publikacije/Metrologija\\_ukratko.pdf](https://dzm.gov.hr/UserDocsImages/Zakonsko%20mjeriteljstvo/Publikacije/Metrologija_ukratko.pdf), Pristupljeno: 19. veljače 2022.
- [5] Runje, B. Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2014.
- [6] Mahović, S. Teorija i tehnika mjerenja. Sveučilište u Zagrebu
- [7] Valjak, M. Ispitivanje točnosti 2D-koordinatnog mjernog uređaja [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2008.
- [8] <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=35494>, Pristupljeno: 14. travnja 2022.
- [9] <http://newtonianlabs.com/ifo/InterferometryHandout.pdf>, Pristupljeno: 14. travnja 2022.
- [10] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=27623>, Pristupljeno: 15. travnja 2022.
- [11] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=27621>, Pristupljeno: 15. travnja 2022.
- [12] <https://cdn.britannica.com/95/96595-050-935D1570/waves-wavelength-phase-wave-amplitude-amplitudes-sum.jpg>, Pristupljeno: 15. travnja 2022.
- [13] <https://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854>, Pristupljeno: 19. travnja 2022.
- [14] <https://www.renishaw.com/media/pdf/en/de7952e15bcf461fbeb54f1642110add.pdf>,  
Pristupljeno: 19. travnja 2022.
- [15] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=20238>, Pristupljeno: 20. travnja 2022.
- [16] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=20243>, Pristupljeno: 20. travnja 2022.
- [17] Andersson, H. Position Sensitive Detectors - Device Technology and Applications in Spectroscopy. Sundsvall; 2008.
- [18] <https://www.rp-photonics.com/photodiodes.html>, Pristupljeno: 21. travnja 2022.
- [19] [https://en.wikipedia.org/wiki/P%E2%80%93junction#/media/File:PN\\_diode\\_with\\_electrical\\_symbol.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/P%E2%80%93junction#/media/File:PN_diode_with_electrical_symbol.svg), Pristupljeno: 21. travnja 2022.

- 
- [20] [https://www.rp-photonics.com/position\\_sensitive\\_detectors.html](https://www.rp-photonics.com/position_sensitive_detectors.html), Pristupljeno: 22. travnja 2022.
- [21] Cui, S, Soh Y C. Improved measurement accuracy of the quadrant detector through improvement of linearity indeks. Appl. Phys. Lett. 96; 2010
- [22] [https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=4400](https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4400), Pristupljeno: 22. travnja 2022.
- [23] [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=3180&pn=KPA101](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3180&pn=KPA101), Pristupljeno: 25. travnja 2022.
- [24] <https://www.rls.si/eng/as10-absolute-magnetic-scale>, Pristupljeno: 26. travnja 2022.
- [25] [https://www.rls.si/eng/fileuploader/download/download/?d=1&file=custom%2Fupload%2FLA11D01\\_12\\_EN\\_data\\_sheet.pdf](https://www.rls.si/eng/fileuploader/download/download/?d=1&file=custom%2Fupload%2FLA11D01_12_EN_data_sheet.pdf), Pristupljeno: 26. travnja 2022.
- [26] <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=MB1015/M>, Pristupljeno: 26. travnja 2022.
- [27] <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=BA1/M>, Pristupljeno: 26. travnja 2022.
- [28] [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=1268](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1268), Pristupljeno: 26. travnja 2022.

## **PRILOZI**

I. CD-R disk