

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék

Mechatronikai mérnöki alapszak

**SZÖGMÁSODPERC ÉRZÉKENYSÉGŰ  
OPTIKAI SENZOR FEJLESZTÉSE OPTIKAI  
ADATTÁROLÓ FEJ FELHASZNÁLÁSÁVAL**

Szerző: Baki Mihály Dezső

2013.

Konzulensek:

Dr. G. Szabó István, ügyvezető, OPTIKA Mérnökiroda Kft.

Dr. Antal Ákos, adjunktus, Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék

Alulírott Baki Mihály Dezső, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója kijelentem, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és a szakdolgozatban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen a forrás megadásával megjelöltem.

.....

## TARTALOMJEGYZÉK

I. Tartalmi összefoglaló.....	5
II. Abstract .....	6
III. Bevezető.....	7
III. 1. A feladat kiírása .....	7
III. 2. A magnetométer.....	7
III. 3. A szögmérés lehetőségei.....	8
III. 4. A javasolt megoldás alapgondolata.....	8
IV. Az optikai adattárolók rövid története .....	9
V. A CD LEJátszó rendszer részegységei.....	10
V. 1. A CD lemez.....	10
V. 2. Optikai alapok .....	11
V. 3. A lézerdióda .....	12
V.4. Az OPU felépítése.....	14
VI. A mérés alapjai .....	14
VI. 1. A fókuszhiba jel.....	14
VI. 2. A mérés követelményei .....	16
VI. 3. A hőtágulás hatása .....	17
VI.4. Az optikai úthossz változása különböző tükröző felületek esetén.....	19
VI. 5. A differenciálmérés.....	20
VII. A mérés kivitelezése.....	24
VII. 1. A megfelelő CD-fej kiválasztása.....	24
VII. 2. 3D modellezés .....	25
VII. 3. Az áramkör visszafejtése.....	26
VII. 4. A mérőáramkör feladata .....	28
VII. 5. A mérőáramkör felépítése .....	28
VII. 5. 1. Szenzor .....	29
VII. 5. 3. Lézerdióda .....	30

VII. 5. 4. A fókuszhiba jel előállítása .....	31
VIII. Az áramkör Tesztelése .....	34
VIII. 1. A részegységek ellenőrzése.....	34
VIII. 2. A teljes mérőberendezés tesztelése .....	34
IX. Összefoglalás .....	44
X. Tovább lépési lehetőségek .....	45
XI. Köszönetnyilvánítás.....	46
XII. Idézett forrásmunkák .....	47

## I. TARTALMI ÖSSZEFOGLALÓ

A dolgozatban leírt geofizikai magnetométer a Föld mágneses tere irányának és nagyságának mérésére szolgáló eszköz. A mérés során azonban az eszköz magja ismeretlen okok miatt elfordulhat, mely véletlenszerű hibát visz a rendszerbe.

Ezt a szögmásodperc nagyságrendű elfordulást mindeddig csak nagy térerősségű módszerrel lehetett detektálni: Egy, az eszközre erősített tükröt akár több 100m távolságból lézerrel megvilágítva, majd a visszaverődő nyalábot egy ernyővel/kamerával felfogva, a folt pozíciójának elmozdulásából következtetni lehet a szögelfordulás mértékére.

Ennél a módszernél nagyságrendekkel kifinomultabb, új megoldásra van szükség ahhoz, hogy a mágneses tér változását az épített és természetes környezettől függetlenül, a Föld bármely pontján, akár hónapokon keresztül folyamatosan mérhessük.

A cél egy olyan kisméretű (néhány cm<sup>3</sup> térerősségű) berendezés fejlesztése, mely érintésmentesen érzékel, érzékenysége szögmásodperc nagyságrendű (<2"), a lehető legkevesebb mágneses momentummal rendelkező anyagot tartalmazza és kereskedelmi forgalomban kapható, viszonylag olcsó alkatrészek felhasználásával elkészíthető.

A fejlesztéshez alkalmasnak tűnt egy optikai adattároló fejegységének felhasználása. A CD-lemez forgása közben elmozdulhat, ezért azt folyamatosan fókuszban kell tartani az információ kiolvasásához. Ezt a feladatot egy összetett szervó rendszer látja el.

Egy kereskedelmi forgalomban kapható CD-fejet elemezve, majd megfelelően átalakítva (a szervorendszert eltávolítva) és a kvadráns fotodektorból érkező feszültségértékeket kinyerve, a fej fókusz hibajelének felhasználásával a magnetométer tengelyére erősített tükrök kismértékű elfordulása érzékelhető, ami alkalmas alapot biztosított az érzékelő kifejlesztéséhez.

A kifejlesztett rendszerrel próbaméréseket végezve, a mérési eredményeket elemezve az eredeti elképzelés helytállónak bizonyult.

## II. ABSTRACT

The magnetometer, that emerges in my paper serves to measure the direction and magnitude of Earth's magnetic field. However, the core of the device may rotate during the measurement due to unknown causes.

This rotation used to be measured with a bulky method. A mirror, attached to the device is laser-illuminated from hundreds of meters away, the reflected beam is caught with a screen/camera, and conclusions can be drawn by the displacement of the spot.

A much more sophisticated method is needed to measure the change of the magnetic field, regardless of the built and natural environment, at any point of the Earth, for months.

The aim is to develop a small (few cm<sup>3</sup> large) device, that detects motion contactless, its sensitivity is of the order of arcseconds ( $<2'$ ), includes the least materials with magnetic momentum and can be built by quite cheap and commercially available components.

The head unit of an optical storage device seemed to meet these needs. A compact disk can move during its rotation, therefore it has to be kept in focus permanently to read information. This task is performed by a complicated servo system.

After analysing and converting (removing the servo system) a commercially available CD-head unit, I was able to retrieve the voltages from the four-segment detector, and after building the circuit to drive the laser diode and the sensor, and to form the focus error, small rotation of the mirror (attached to the axis of the magnetometer) was measurable, that provided a good basis to develop the sensor.

After performing measurements with the developed system and after analyzing the results, the original idea proved to be correct.

### III. BEVEZETŐ

#### III. 1. A feladat kiírása

Szakirányomból adódóan szakmai gyakorlatomat célirányosan műszaki optikával foglalkozó cégnél akartam tölteni, így jutottam el az OPTIKA Mérnökiroda Kft.-hez. Célom volt továbbá, hogy TDK vagy szakdolgozat témával is foglalkozhassak az adott cégnél.

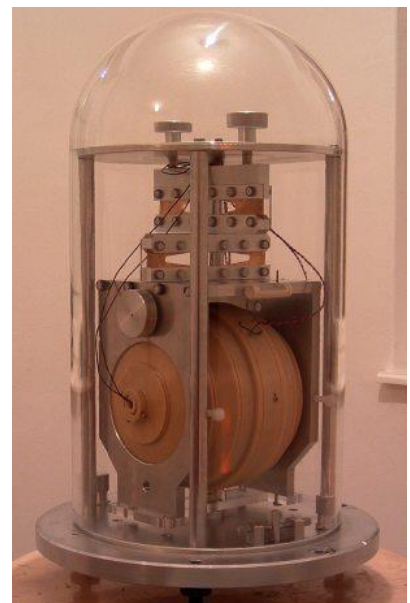
A mérnökiroda Dr. G. Szabó István vezetésével elsősorban ipari képfeldolgozáshoz tartozó problémák megoldásával foglalkozik, azonban minden optikai jellegű feladatot szívesen vállal. A MinGeo Kft. kereste meg a céget azzal, hogy az általuk gyártott magnetométerben eddig ismeretlen okokból bekövetkező elfordulást nem tudták olyan eszközzel mérni, ami nem befolyásolná a mérési eredményeket, ugyanis valamilyen mágneses momentummal rendelkező anyagot az összes kereskedelmi forgalomban kapható mérőeszköz tartalmaz.

A berendezésnek emellett kis térigényűnek és nagy érzékenységűnek is kell lennie, valamint lehetőleg olyan alkatrészekből kell felépülnie, melyek kereskedelmi forgalomban kaphatóak. A fejlesztés célja a magnetométer pontosságának növelése.

#### III. 2. A magnetométer

A magnetométert a mágneses tér mérésére használják. Egy árammal átjárt vezetőt tartalmaz, erre a mágneses mező nyomatékot gyakorol, aminek hatására a magnetométer elfordul. A MinGeo Kft. által gyártott berendezés egy Overhauser-féle, vektoros, kéttengelyes magnetométer, mely a Föld mágneses mezőjének csökkenését, növekedését, illetve irányának változását is méri és naplózza. A korábbi protonprecessziós magnetométerekhez képest ez az eszköz folyamatos mérésre is alkalmas és egy vázba van integrálva az összes alkatrész, ezért a piacon egyedülálló. [1]

A magnetométer alkalmazható mágneses viharok előrejelzésére, kutak térbeli helyzetének megállapításához azok fúrása során, sőt az időjárás változása is okoz változást a mágneses térben, de rengeteg egyéb kutatási lehetőséget is rejt magában a mágneses tér vizsgálata.



1. ábra A magnetométer

### III. 3. A szögmérés lehetőségei

A leggyakoribb szögmérésre használt mértékegység a fok. Egy kör 360 egyforma fokból áll, mely továbbosztható 60 szögpercre, egy szögperc pedig további 60 szögmásodpercre. Egy szögmásodperc tehát egy fok 3600-ad része.

Szögméréshez elengedhetetlen követelmény a forgórész megfelelő csapágyazása. Ha a mechanika kotyog, szorul stb. a mérési pontosság nagymértékben csökken.

Klasszikus szögmérő műszer a *teodolit*. Két megírányzott pont közötti szög mérhető vele, függőleges és vízszintes síkban. Egy osztott skálát tartalmaz, melynek leolvasása optikai úton történik, a szerkezetbe egy objektíven keresztül betekintve. A műszerrel a teljes 360° fokos szögtartományban közvetlenül mérhetünk abszolút pozíciót.

*Digitális enkóderek* esetében a skála leolvasása elektronikus, általában Gray-kód alkalmazott a skálán, így az abszolút szöghelyzet is meghatározható.

Az *inkrementális útdók* impulzust számlálva határozzák meg a szöghelyzetet. Az impulzus létrehozható optikai, mágneses vagy induktív úton is. Abszolút pozíció ezzel a módszerrel nem mérhető, viszont jelentősen olcsóbb módszer.

*Autokollimátorok* esetében a forgórészen elhelyezett tükör egy kollimált lézernyalábbal van megvilágítva, a visszaverődő foltot egy CCD detektor felfogja, és annak pozíciójából a szögváltozás megállapítható.

A felsorolt módszerek direkt szögmérésre alkalmasak. Helyigényük azonban az elforduló eszközhöz viszonyítva nagy.

A szögelfordulást lineáris elmozdulássá alakítva a mérési lehetőségek gyakorlatilag korlátlanok. A linearizálás azonban csak kis szögtartományon alkalmazható, egyéb esetben

$$\alpha = \arctan\left(\frac{x}{R}\right), \quad (1)$$

ahol  $\alpha$  a szögelfordulás,  $x$  az elmozdulás,  $R$  a lineáris elmozdulás mérés tengelyének a kör középpontjától mért távolsága. Ilyen lineáris mérést hajthatunk végre egy *finomtapintóval*, *lézeres távolságmérővel*, *Michelson-inteferométerrel*, vagy a dolgozatban felmerülő *CD-fejjel*.

### III. 4. A javasolt megoldás alapgondolata

A megfelelő csapágyazás adott a magnetométerben a torziós szál által, így elég a mérési módszerre koncentrálni. A cél kis szögelfordulások mérése, így eltekinthetünk egy abszolút skála alkalmazásától. A fejlesztéshez a Dr. G. Szabó István által javasolt optikai adattároló fejegységének felhasználása tűnt a legalkalmasabbnak. A modern CD-fejek általában műanyag házzal



rendelkeznek, kisméretűek, egyszerű felépítésűek, olcsók, és kereskedelmi forgalomban is kaphatóak.

A feladat megvalósításához a CD-fej lemezkövető mechanizmusában alkalmazott fókusz hibajelet [2] használtam. Ez a rendszer folyamatosan mérve a lemez távolságát úgy mozgatja a fejegységben található objektívet, hogy a lemez  $\mu\text{m}$  alatti pontossággal a lencse fókuszában van, így biztosítva a folyamatos adatkiolvasást. Mindez természetesen érintésmentesen történik. A szervorendszert eltávolítva és a hibajelet létrehozva távolságmérés is megvalósítható lehet. A forgórészre egy CD-lemezt szerelve, az állórészre pedig a fejegységet rögzítve a CD-lejátszóban fennálló viszonyhoz hasonló elrendezés hozható létre.

A szögmásodperces pontosság elérése érdekében a hőtágulást és egyéb környezeti hatásokat is figyelembe kell venni a fejlesztés során. Ezen probléma orvoslására egy differenciálmérés alkalmas lehet. A magnetométerre két CD-fejet szerelve, a mért értékeket megfelelően feldolgozva, a már említett hatások okozta mérési hibák kiküszöbölhetőek lehetnek.

A modern CD-fejek nagyrész műanyagból készülnek, az esetleges mágneses elemeket eltávolítva vagy helyettesítve a mágneses momentum mentesség is megvalósítható lehet.

#### **IV. AZ OPTIKAI ADATTÁROLÓK RÖVID TÖRTÉNETE**

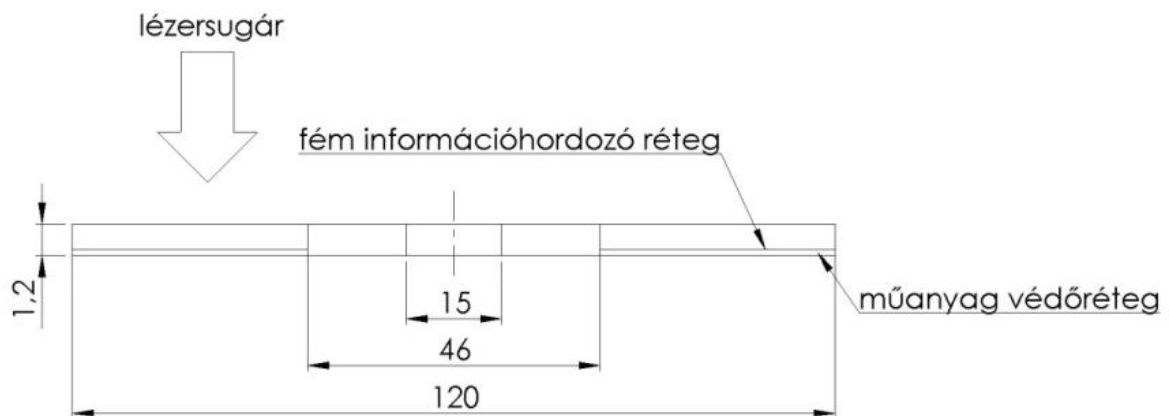
A CD-t (Compact discet) James T. Russel találta fel az 1960-as évek végén. Russel egy olyan rendszert képzelt el, mely képes hangot lejátszani és rögzíteni fizikai érintkezés nélkül. Úgy gondolta, hogy ha a bináris 0-t és 1-et sötét és világos foltként tudná reprezentálni, akkor egy eszköz anélkül tudna információt kiolvasni, hogy a hordozó valaha is elkopna. Megtalálta a módját annak, hogy egy fotoszenzitív anyagba írjon  $1\ \mu\text{m}$  átmérőjű pontokat, és ki is olvassa azokat. 1970-ben szabadalmaztatta találmányát, és mivel a találmány jóval kora előtt járt, így befektetőket is könnyedén talált. [3]

A kereskedelmi forgalomban ma is kapható CD végleges formáját a Philips és a Sony közösen alakították ki, és 1980-ban létrehozták az ún. „Red Bookot”, mely lefektette a compact disc összes szabványát. [4] A CD átmérőjének  $12\ \text{cm}$ -et határoztak meg, így  $74$  percnyi zene fért rá, mely időtartam megegyezik Beethoven 9. szimfóniájának hosszával. A rendszer tervezői ugyanakkor a jövőre is gondoltak. Az emberi fül érzékenységét alapul véve elegendő lenne  $14$  bit a hangok tökéletes rögzítéséhez és lejátszásához, mégis a  $16$  bites megoldás mellett döntöttek, melyet ma már rengeteg alkalmazás ki is használ.

## V. A CD LEJÁTSZÓ RENDSZER RÉSZEGYSÉGEI

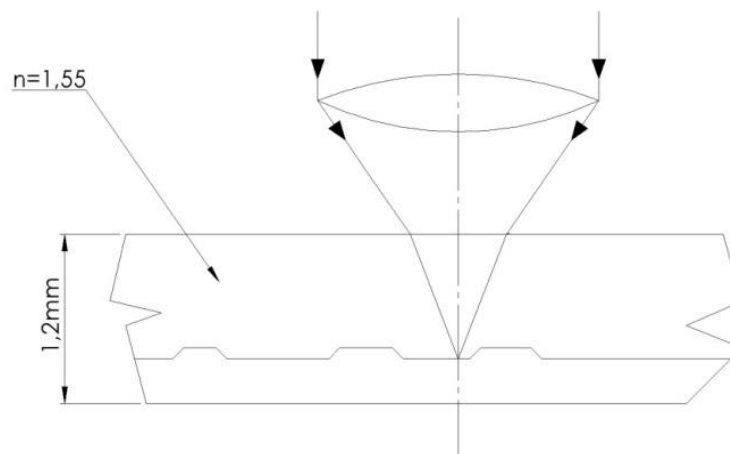
### V. 1. A CD lemez

A lemez alapanyaga polikarbonát, melyből fröccsöntéssel kerül kialakításra a 120 mm-es átmérőjű és 1,2 mm vastag CD, melynek törésmutatója 1,55. Erre kerül egy 0,1  $\mu\text{m}$  vastag fém információhordozó réteg, melyet egy 5-10  $\mu\text{m}$  vastag védőréteg borít. Erre kerül a gyártás folyamán a márkajelzés és egyéb mintázatok. [5]



2. ábra: a CD-lemez metszete

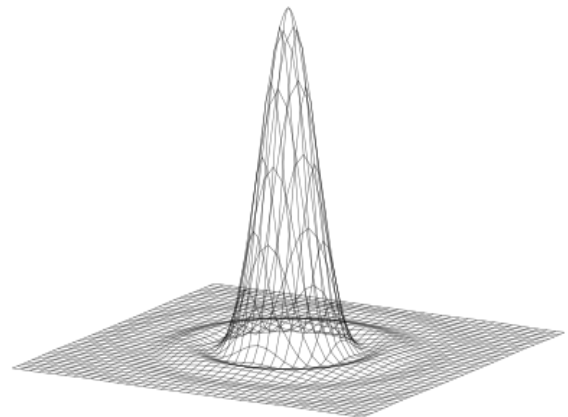
Az információt a fémfelületen található bemélyedések (pittek) hordozzák. Ezek egy hosszú, több mint 5km-es spirált alkotnak. A pittek 0,12  $\mu\text{m}$  mélyek, 0,5  $\mu\text{m}$  szélesek és 0,83  $\mu\text{m}$  ... 3,56  $\mu\text{m}$  hosszúak, de csak az elemei hossz egész számú többszöröse lehetnek. (Az elemi hossz 0,278  $\mu\text{m}$ .) A barázdák távolsága egymástól 1,6  $\mu\text{m}$ . A lemezt egy 15 mm átmérőjű furat központosítja, körülötte található egy 46 mm átmérőjű barázdamentes rész.



3. ábra A lézernyaláb egy pitre fókuszálva

## V. 2. Optikai alapok

Az adatok lemezből történő kiolvasásához a lézertől kilépő fényt le kell fókuszálni a lemezre. A CD-n azonban nem hozható létre egy geometria pont, csak egy véges méretű ún. Airy-korong vagy elhajlási korong. [6] A jelenség megértéséhez a fényre, mint elektromágneses hullámra kell gondolnunk. Párhuzamos nyalábokat egy, a fény hullámhosszának mérettartományába eső kör apertúrán átvezetve a létrejövő folt nem egy pont lesz, hanem egy ún. Airy-mintázat fog létrejönni,



4. ábra: az Airy-korong intenzitáseloszlása

melynek középső része az Airy-korong, körülötte pedig diffrakciós gyűrűk jelennek meg. Az intenzitás eloszlását a 4. ábra szemlélteti. Ez a jelenség a fényelhajlás, vagy diffrakció.

Optikai eszközökön általában a foglalaton történő elhajlás miatt alakul ki az Airy-korong, mely meghatározza az eszköz felbontóképességét. A felbontási határ reciproka a felbontóképesség. A felbontási határ két pontnak az a legkisebb távolsága, mely fennállása esetén még megkülönböztethető a két pont.

Párhuzamos fénynyalábot  $D$  átmérőjű és  $f$  fókusztávolságú lencsével leképezve a legkisebb létrehozható foltot Airy szerint az alábbi képlet határozza meg:

$$r = 1,22 * \frac{\lambda f}{D} \quad (2)$$

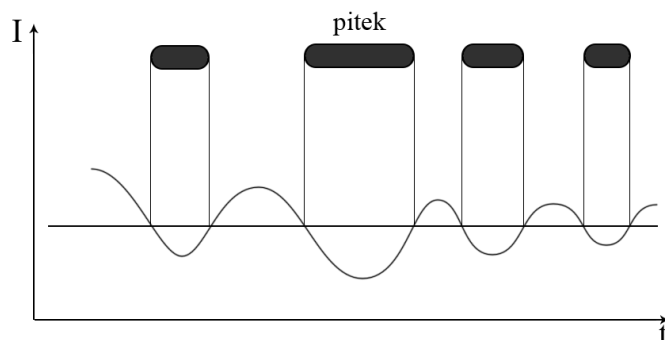
Ahol  $\lambda$  a fény hullámhossza,  $r$  az Airy-korong sugara. Megállapítható, hogy a korong sugara akkor kisebb, ha a fény hullámhossza kisebb vagy adott átmérő mellett minél rövidebb a lencse fókusza.

$$NA \geq \frac{\lambda}{D} \quad (3)$$

A Red Bookban előírtak szerint az objektív numerikus apertúrájának értéke  $0,45$ , mivel a folt maximum  $1,7 \mu\text{m}$  nagyságú lehet, különben a szomszédos sávban lévő pitek megzavarnák a jel kiolvasását. A fejegységben alkalmazott objektívnek a fókusztávolság és track követés miatt könnyűnek is kell lenni. Ezeket a feltételeket egy műanyag, mindkét felén aszférikus lencse tudja kielégíteni.

A lemez információhordozó felületére fókuszált, majd a pit aljáról illetve annak környezetéből visszaverődő sugár intenzitását a nyalábok interferenciája határozza meg. A pit mélysége által létrehozott intenzitáscsökkenés akkor maximális, ha a pit mélyéről visszaverődő fénysugár optikai úthossza a hullámhossz negyedével rövidebb.

Az CD-fej a fényerősség változását alakítja intenzitásváltozássá, és az elektronika dönt a pitek hosszúságáról. A döntési szint átlépése  $I$ -nek, míg a szint alatt vagy fölött tartózkodás  $0$ -nak minősül.



5. ábra: az intenzitás változása a piteken és azok mellett

### V. 3. A lézerdióda

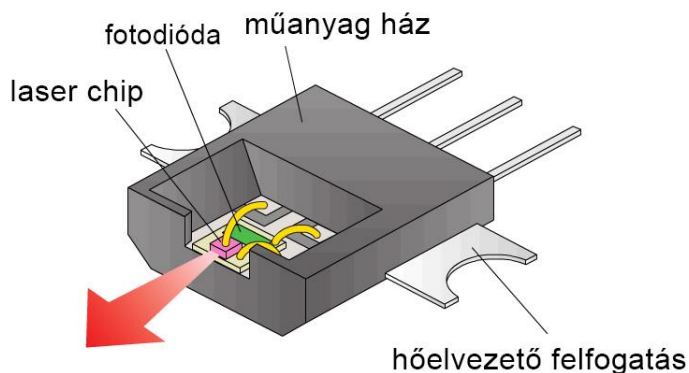
A CD-k fejlesztése csak a félvezető lézerek elterjedése után kezdődhetett meg, hiszen az információ kifogástalan kiolvasásához olyan fényre van szüksége, melynek állandó, meghatározott hullámhossza és fázisállapota van.

Szükséges továbbá, hogy a fényforrás kisméretű és sorozatban gyártható legyen. 2003-ban a lézerpiac 60%-a optikai adattárolásra fordított kiadás volt. A lézerek ára a sorozatgyártásnak köszönhetően 1 USD-ig is lesüllyedt. [7]

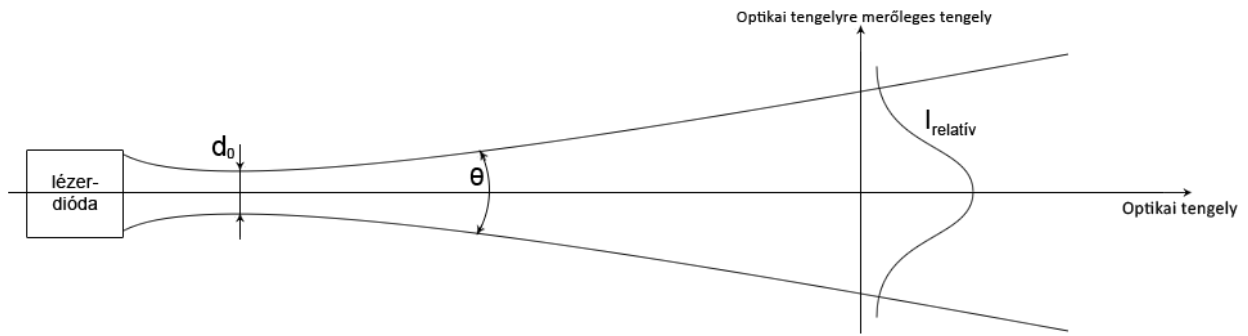
A lézerdióda egy elektromos árammal gerjesztett félvezető lézer, melyben az

aktív részt a LED-ekben találhatóhoz hasonló p-n átmenet képezi. CD-k esetében a kilépő fény hullámhossza a közeli infra tartományban található, 780 nm körüli. Ez azt jelenti, hogy az emberi szem által alig észlelhető, így fokozottan ügyelni kell arra, hogy látószervünkbe ne világítsunk, hiszen észrevétlenül is károsodást okozhat. A lézerből kilépő fénysugár viszonylag homogén eloszlású és éles határvonallal rendelkezik.

A lézernyaláb széttartó, a sugáron belüli intenzitás Gauss-eloszlású,  $d_0$  a nyalábdereék átmérője,  $\theta$  a divergencia. (7. ábra) Az optikai adattárolás fejlesztése során egyre rövidebb hullámhosszú fény

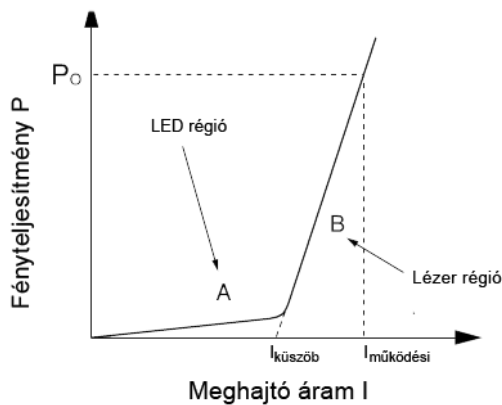


6. ábra Egy ún. „frame” típusú lézerdióda

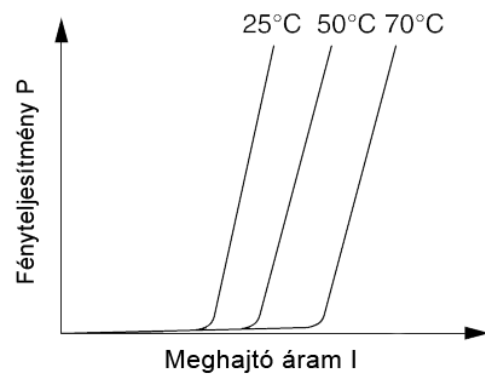


7. ábra A lézernyaláb alapvető jellemzői

felhasználásával valósulhatott meg az adattárolás. A DVD lejátszóknak használatos fény hullámhossza 650 nm, Blu-ray lemezek esetében 405 nm. Maximális teljesítményük 5mW, ugyanakkor átlagos kibocsátásuk 0,5-1 mW. A meghajtó áram 30...100 mA körüli, a teljesítmény görbe azonban nem lineáris, egy bizonyos küszöbérték alatt pedig nincs megfigyelhető lézerműködés, csak IR LED-szerű sugárzás. [8] (8. ábra)



8. ábra A dióda karakterisztikája



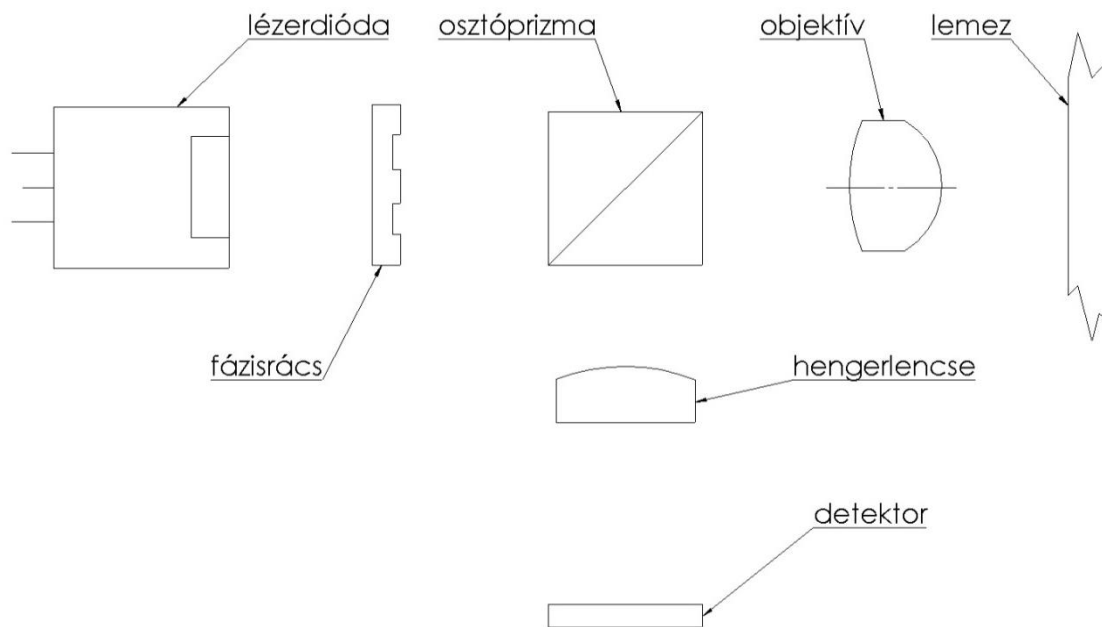
9. ábra A dióda karakterisztikája a hőmérséklet függvényében

Egy 50 mA-es névleges áramú dióda esetén a küszöb 30 mA körüli. A szűk működési tartomány és hőmérsékletérzékenység miatt általában egy optikai érzékelő is beépítésre kerül a lézer mellé. Ez a szenzor általában egy fotodióda, melyben fény hatására töltéshordozók szabadulnak fel, így vezetővé válik, és a lézerdióda által kibocsátott teljesítmény függvényében változik a lábai közt mérhető feszültség, mellyel a lézerdióda árama szabályozható. A lézerdióda fénykibocsátása a meghajtó áram és a hőmérséklet függvényében az 9. ábrán látható. A monitordiódán átfolyó áram tipikusan 0,2 mA. [9]

A lézerdióda a megengedettnél nagyobb áram hatására egy pillanat alatt, akár tranziens jelenség hatására is tönkremehet, ezért bekapcsolásuk és üzembe helyezésük fokozott figyelmet igényel.

## V.4. Az OPU felépítése

Az Optical Pick Up az az eszköz, mely kiolvassa az adatot a CD-ből, azáltal hogy a lemezt megvilágítja és a visszatükröződő lézernyalábot gyűjti. Mindez érintésmentesen történik. A lemez forgása közben saját síkjára merőlegesen is elmozdulhat, és olvasás közben a foltot a megfelelő barázdán kell tartani. A lézerdiodából kilépő fénysugár először a fázisrácson halad át. Majd az osztóprizmán és az objektíven keresztül eléri a diszk felületét. A lemezen a fázisrácsnak köszönhetően három foltot láthatunk. A középső folt az adat kiolvasásához és a CD fókuszbán tartásához szükséges. A két szélső folt segítségével tartja a szervó rendszer az adott barázdán a foltot. A visszaverődő fénysugár újra az objektíven áthaladva az osztóprizmáról a hengerlencsén keresztül a detektorra tükröződik.



7. ábra: a CD-fej elvi felépítése

## VI. A MÉRÉS ALAPJAI

### VI. 1. A fókuszhiba jel

A megkövetelt nagy numerikus apertúra miatt a mélységélesség igen kicsi. ( $\pm 2 \mu\text{m}$ ) A CD-lemez a lejátszás során elmozdulhat, ezért a azt állandóan fókuszbán kell tartani. A fókuszkövetést egy

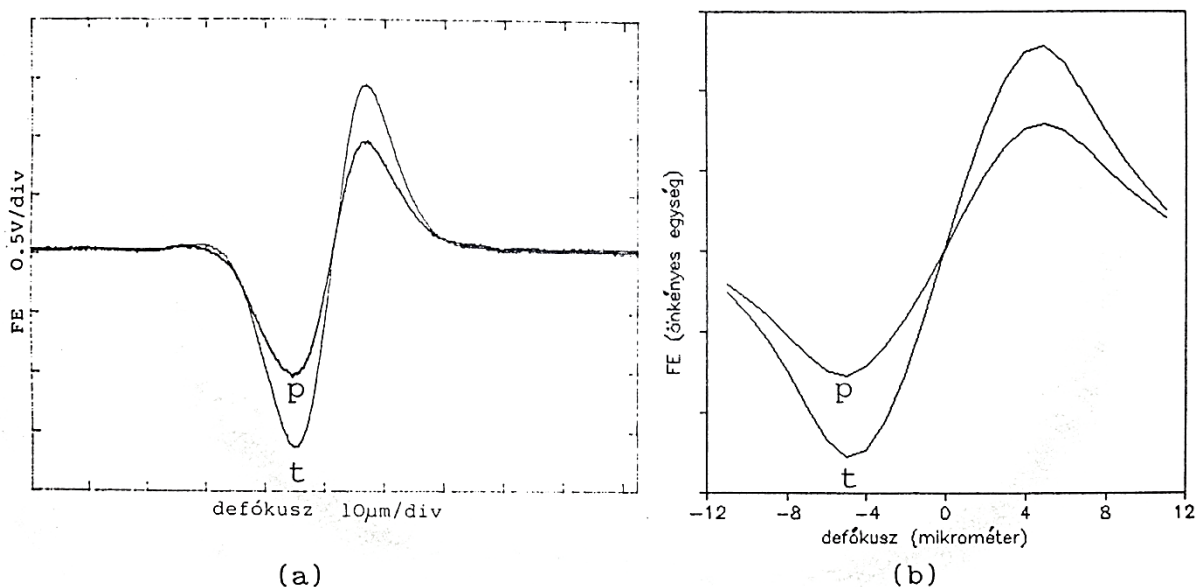
szervorendszer végzi. A kvadráns fotodetektor, a szabályozó által felhasználható feszültségértéket ad. nA hengerlencsére áthaladó kör keresztmetszetű fénynyaláb a lencsétől állandó távolságra elhelyezett detektorra esik, a detektoron kör vagy ellipszis alakú foltot létrehozva. Az ellipszis formája attól függ, hogy a lencse fókuszban van, vagy attól távolabb vagy közelebb. A detektor 8 pixelből (fotodiódából) áll. Ezekből feladatombhoz csak az A, B, C, D egységekre van szükségem. A szegmensek 65 μm x 65 μm nagyságúak, köztük 5 μm-es rés található. Mindez egy 3,5 mm x 3,5 mm-es hordozón helyezkedik el, melybe egy erősítő áramkör is integrálva van, így a kimenő jel közvetlenül használható a mérésekhez. A fotodetektor elhelyezkedése az 14. ábrán látható. Középfeszültség generáló áramkört azonban nem tartalmaz, így azt egy külső eszközzel kell biztosítani. A 4 szegmens összege eredményezi a lemezből kiolvasott adatjelet:

$$A + B + C + D = HF \quad (4)$$

Az egyes pixelek a rájuk eső fény mennyiségével arányos feszültségjelet adnak ki. Ha a lemez pontosan fókuszban van, a detektorra eső nyaláb kör keresztmetszetű. Így képezve az

$$FE = (A + C) - (B + D) \quad (5)$$

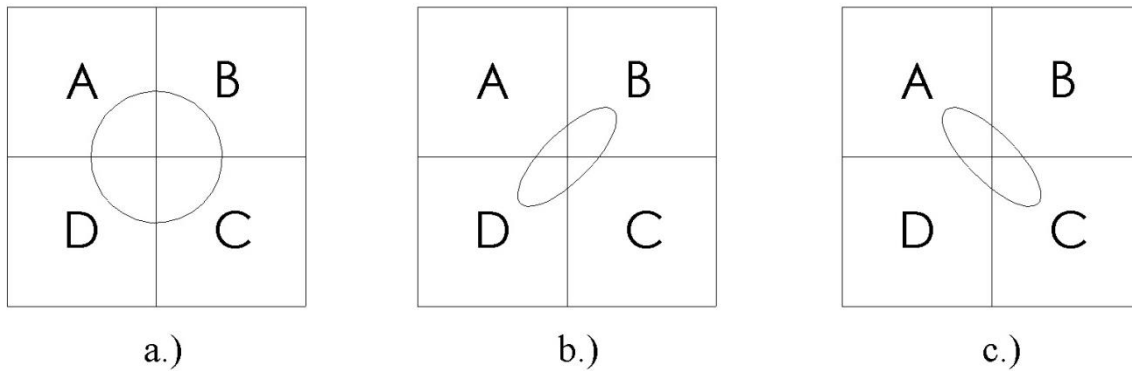
fókuszhiba jelet  $\theta$ -t kapunk. Ha a lemez a fókuszban elmozdul, a detektor síkjában A-C vagy B-D irányba mutató ellipszis keresztmetszetű lesz a nyaláb. A FE lineáris tartománya  $\pm 12 \mu\text{m}$ . [2].



9. ábra A fókusz hibajel mért (a) és számított (b) értékei a piteken (p) és a felületen (t). Forrás: [2]

Az ábrán látható, hogy a valós érték igen közel van a számított értékekhez, a csúcsoktól eltekintve így akár 0,1 μm-es pontosság is elérhető lehet.

Ha a folt a középpontról lecsúszik, a távolságmérést nem befolyásolja, hiszen az A+C és B+D összegek ekkor egyformán változnak, és különbségük állandó marad. A rendszer tehát csak a keresztmetszet alakjának változására érzékeny.



10. ábra: a detektorra eső folt fókuszban(a), ha a lemez túl közel van (b), és ha a lemez túl messze van (c)

## VI. 2. A mérés követelményei

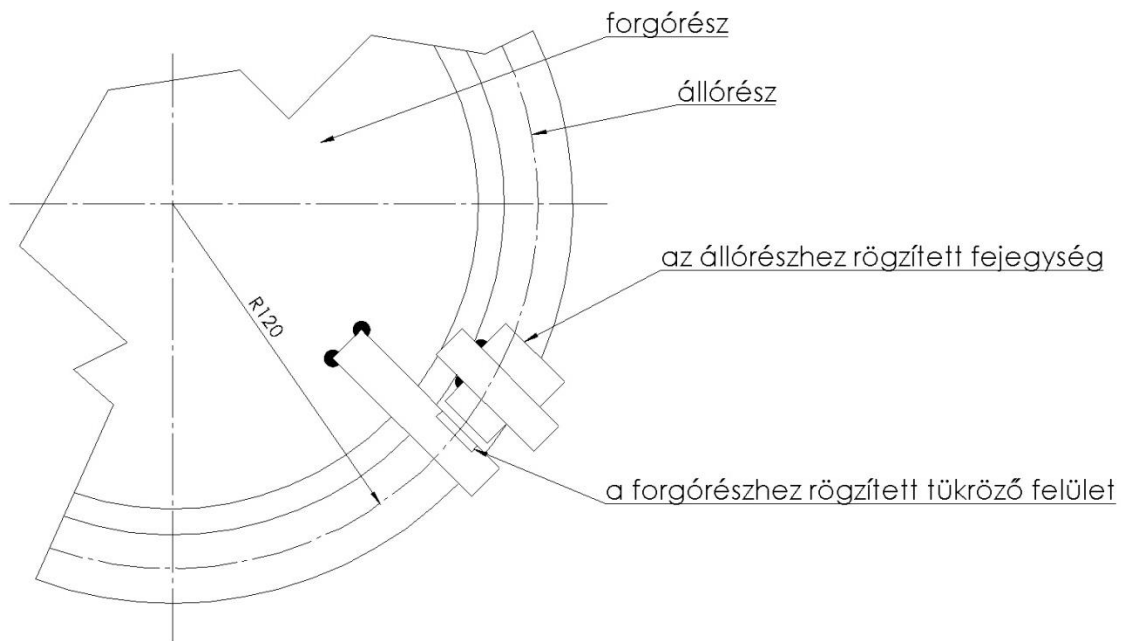
Egy szögmásodperc érzékenységű mérés komoly követelményeket támaszt: egy lézermódulból kiinduló lézernyalábot az attól 200 m-re található ernyővel felfogva, majd a diódát 1 szögmásodperccel elforgatva, a folt csupán 1 mm-rel mozdul el. Korábban erre az elvre alapozták a magnetométer magja elfordulásának mérését. Az eszköz forgórészére tükröt helyezve, majd azt megvilágítva és az így visszaverődő sugarat felfogva el lehet érni az igényelt felbontást. Ehhez azonban tiszta rálátás kell a magnetométerre és állandó légköri körülmények, hosszabb távú mérések esetén akár napokig, sőt hetekig is. Belátható, hogy egy ilyen térigényű módszerrel a mérések pontossága megkérdőjelezhető.

Ennek a mérésnek a magnetométer dimenziójában történő megvalósításához egy cd-olvasó fejegységének használata tűnt a legjobb választásnak. A mérés egy lehetséges elvi elrendezése a 13. ábrán látható. A tükröző felület egy 120 mm sugarú körön helyezkedik el, így 1 szögmásodperc elfordulás esetén a lineáris elmozdulás  $0,6 \mu\text{m}$ .

$$x = \text{tg}(\alpha) * R = \text{tg}(1'') * 120\text{mm} = 0,6 \mu\text{m} \quad (6)$$

A tükröző felület elfordulásától eltekinthetünk, hiszen ha a folt le is csúszik a kvadráns detektor pontos közepéről, a FE jel tulajdonságainak köszönhetően a távolság érzékelését ez nem befolyásolja.





11. ábra: egy megoldás a mérési elrendezésre

### VI. 3. A hőtágulás hatása

Kísérletek bizonyítják, hogy a nem túl nagy  $\Delta t = t - t_0$  hőmérsékletváltozás hatására fellépő  $\Delta l = l - l_0$  hosszúságváltozás

$$\Delta l = \alpha * l_0 * \Delta t \quad (6)$$

összefüggés szerint arányos a test  $t_0$  hőmérsékleten mért  $l_0$  hosszával és a hőmérséklet-változással, ahol  $\alpha$  a vizsgált anyag lineáris hőtágulási együtthatója. A valóságban csak kicsiny hőváltozások esetén közelíthető lineárisan. [10] A lineárisan hőtágult hossz tehát a következőképp számítható:

$$l_t = l_0 * (1 + \alpha * \Delta t), \quad (7)$$

ahol  $l_t$  a megváltozott hossz.

A tükröző felület felfogatásának illetve a magának a tükröző felület anyagának a kiválasztásánál is figyelembe kellett vennem az adott anyag hőváltozás hatására mutatott reakcióját.

A felfogatásnak már megfogalmazott alapkövetelménye a mágneses momentumtól mentesség. Fémek közül így gyakorlatilag csak alumíniumot választhattam.

A polimereknek köztudottan nagyobb a hőtágulási együtthatója, mint a fémeknek; kiváló forgácsolási tulajdonságai és szilárdsága miatt azonban érdemes összehasonlítani a polioxi-metilént (POM) az alumíniummal.

A tartószerkezetnek a mérés tengelyén vett hossza 2 mm. Az alumínium hőtágulási együtthatója 0 és 100 C között linearizálva  $2,38 \frac{10^{-5}}{C^\circ}$ . A POM együtthatója  $11 \frac{10^{-5}}{C^\circ}$ . A megrendelő igénye alapján

maximum +2 C° hőváltozásra vizsgáltam az anyagokat. Az alumínium változása 2 C° hőváltozás hatására:

$$\Delta l_{Al} = \alpha * l_0 * \Delta t = 2,38 * 10^{-5} * 0,002 * 2 = 0,095 \mu m \quad (8)$$

Hasonlóképpen számítva a polioxi-metilán hőtágulása:

$$\Delta l_{POM} = 11 * 10^{-5} * 0,002 * 2 = 0,440 \mu m \quad (9)$$

Látható, hogy míg az alumíniumé alig, addig a polimer változása a tized mikronos felbontást már jócskán befolyásolhatja.. A mérés során ezért a hőmérsékletet is naplózni kell, és a mérési eredményt a feldolgozó számítógépnek a hőváltozás alapján korrigálnia kell. Ez az állandó hiba számításal is becsülhető, méréssel pedig pontosabb karakterisztika is felvehető.

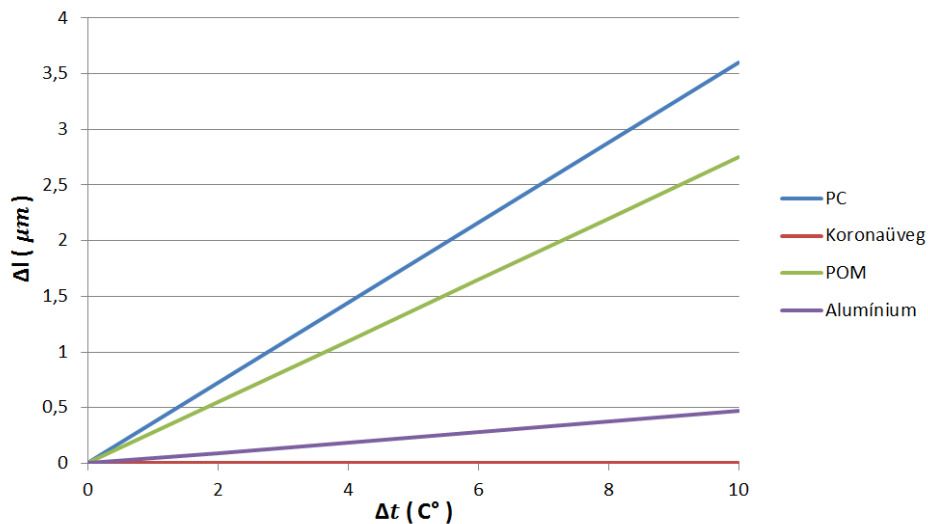
A fényútban is található egy elem, melynek hőtágulása befolyásolhatja a mérési eredményt. Mielőtt a lézernyaláb a CD tükröző felületéről visszaverődne, áthalad a polikarbonát rétegen is, mely a sérülésektől védi az írott felületet. A réteg méretének változása a geometria úthosszát nem, az optikai úthosszát azonban befolyásolja. Mindez az adat kiolvasására nincs hatással, hiszen a rendszer fókuszban tartása is optikai elven történik, így az optikai úthosszváltozás korrigálva van. Abszolút mérések esetén azonban az optikai úthossz változása a fókuszált folt eltolódását eredményezi, ami úgy jelenik meg a rendszerben, mintha a geometria távolság változott volna. Ezért meg kellett vizsgálnom a polikarbonát réteg hőtágulásást és összevetnem a köztudottan jó tulajdonságokkal rendelkező koronaüveggel.

A védőréteg vastagsága 1,2 mm. A koronaüveg hőtágulási együtthatója  $0,051 \frac{10^{-5}}{C^\circ}$ , míg a polikarbonaté  $30 \frac{10^{-5}}{C^\circ}$ . Már az arányokból is látszik a jelentős különbség, számszerűen a következőképpen alakul, 2 C° hőmérsékletváltozás hatására:

$$\Delta l_{polikarbonát} = 30 * 10^{-5} * 0,0012 * 2 = 0,720 \mu m \quad (10)$$

$$\Delta l_{koronaüveg} = 0,051 * 10^{-5} * 0,0012 * 2 = 0,001 \mu m \quad (11)$$

Megállapítható, hogy a polikarbonát (PC) védőréteg jelentős hatással lehet a mérési eredményre; a koronaüveg pedig egyáltalán nem befolyásolja azt.



12. ábra Az egyes anyagok hőtágulása

#### VI.4. Az optikai úthossz változása különböző tükröző felületek esetén

A hőtágulás számítása alapján magától értetődőnek tűnik, hogy a polikarbonátot érdemes lecserélni üvegre, annak a hátsó felületére tükröző anyagot gözölve. Mindez azonban az optikai úthossz megváltozásával jár, ami a folt elcsúszásához vezet. Ahhoz, hogy megfelelő foltot kapjunk, az üveg vastagságát megfelelően kell megválasztani.

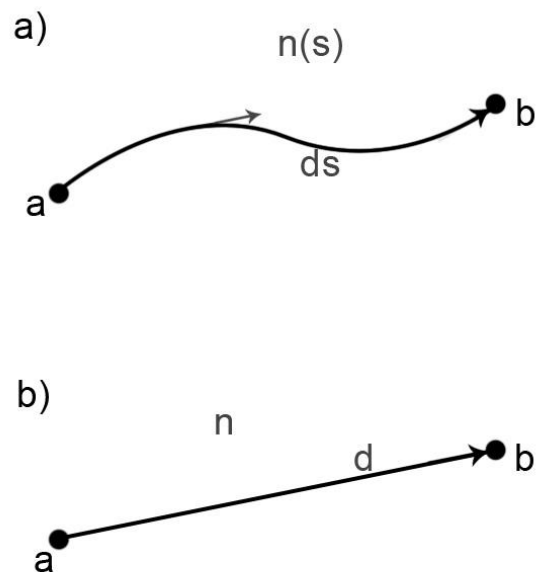
A Fermat-elv szerint egy fénysugár egy tetszőleges optikai rendszerben mindig olyan pályát követ, amelyre nézve a kezdő és végpontok között a terjedési idő minimális. [11]

$$\text{Optikai úthossz} = OPL = \int_a^b n(s) ds \quad (12)$$

Homogén közegben, ahol a törésmutató állandó, ez az út egy egyenes, az optikai úthossz pedig megegyezik a törésmutató ( $n$ ) és a geometriai távolság ( $d$ ) szorzatával:

$$OPL = n * d \quad (13)$$

Optikai rendszerekben gyakran használt



13. ábra Az optikai úthossz (a) illetve homogén közegben (b)

koronaüveg a BK7, melynek törésmutatója közel áll a polikarbonáéhoz, és megfelelhet helyettesítő anyagként.

Egy anyag törésmutatója az az érték, mellyel az elektromágneses hullám  $c$  sebessége lelassul egy anyagban a vákuumbeli  $c_0$  sebességéhez képest:

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (14)$$

A BK7 törésmutatója:  $n_{BK7} = 1,519$ . A CD-n található polikarbonát védőréteg törésmutatója:  $n_{PC} = 1,55$ . Az optikai úthossz a CD-lemezben így:

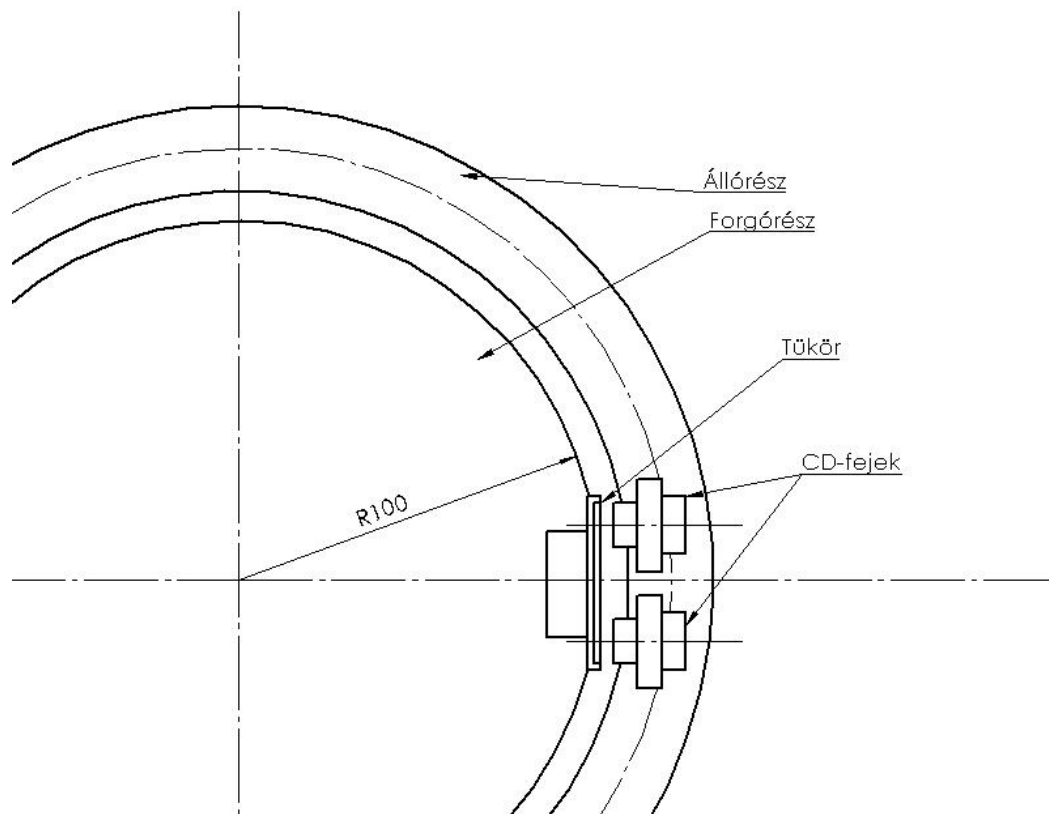
$$OPL = n_{PC} * d_{PC} = 1,55 * 1,2 = 1,860 \text{ mm} \quad (15)$$

Ahhoz, hogy az optikai úthosszak egyezzenek, az üvegréteg vastagsága a következő kell legyen:

$$d_{BK7} = \frac{OPL}{n_{BK7}} = 1,224 \text{ mm} \quad (16)$$

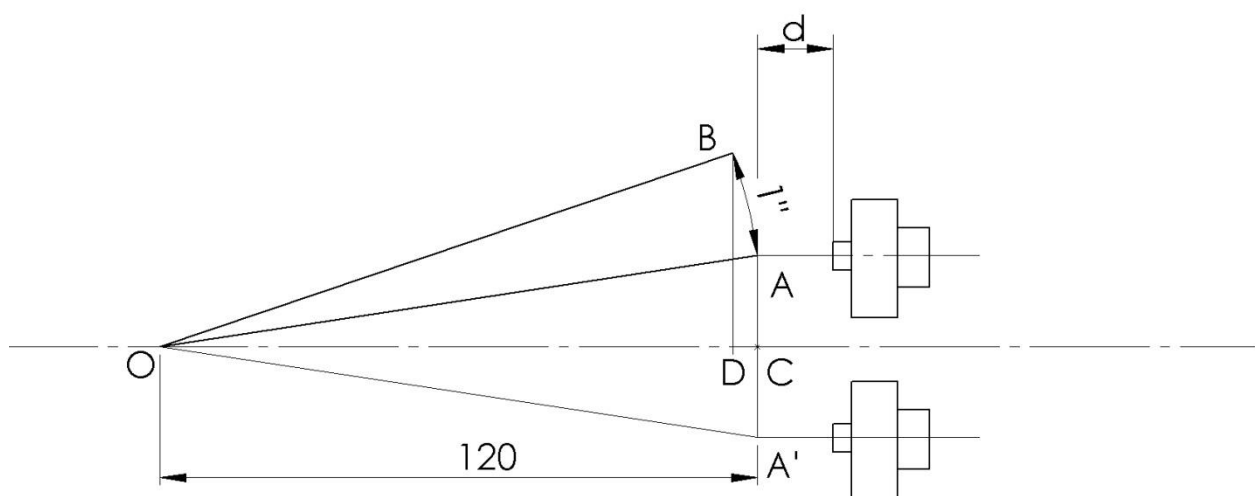
## VI. 5. A differenciálmérés

A hőmérsékletváltozás okozta hibák hatásosan orvosolhatóak lehetnek differenciálmérés megvalósításával. A felépítés elve az, hogy két fej kerül egyazon tartóelemre, így a tartó hőtágulása esetén a két olvasóegységből kinyert jel kompenzálja egymást. Az 14. ábrán látható elrendezés szerint az elfordulás során a tükör egyik fele közelebb kerül a fejegységhez, míg a másik fele távolodik.. Hőmérsékletváltozás miatt bekövetkező elmozdulás esetén azonban a két fej tükörtől vett távolsága egyszerre változik, ezért a két jel különbségét vizsgálva hőhatásra kevésbé, vagy egyáltalán nem érzékeny rendszer alkotható.



14. ábra Egy lehetséges differenciálmérési elrendezés

A két fejegységet az állórészen egy közös tartó rögzítve, a forgórészre tükröt szerelve könnyedén felállítható a mérés. Kérdéses azonban a szögmásodperces elfordulás érzékeléséhez megkövetelt sugárirányú pontosság. A tükör érintőlegesen helyezkedik el egy 100mm sugarú körön, a forgás tengelye a magnetométer tengelye. A két fejegység párhuzamos a tükröző felülettel. Ebben az esetben a geometria jóval bonyolultabb, mint az egy fejes megoldásnál.



15. ábra Az elrendezés alageometriája

A két fej távolsága 100 mm. A COA szög így:

$$COA = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{AC}{OC}\right) = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{50}{120}\right) = 22^\circ 37' 11,514'' \quad (17)$$

OA hossza pedig:

$$\overline{OA} = \frac{\overline{CO}}{\cos(COA\Delta)} = 130 \text{ mm} \quad (18)$$

A derékszögű háromszögben az OAC szög így:

$$OAC\Delta = 67^\circ 22' 48,486'' \quad (19)$$

A tükröző felület az AA' szakasz. Az elfordulás során az A pont a B-be fordul. A már elfordult tükör az 16. ábrán látható helyzetben van. Tehát  $\overline{OB} = \overline{OA} = 130 \text{ mm}$ . Az F pont a tükör azon része, ahol a lézernyaláb éri, ennek a pontnak a tükörtől vett távolsága keresett. Az ábrán a tükröző felület eredeti pozíciójának középpontját a C pont jelzi. Az OBD illetve EBF háromszögeket megismerve az elmozdulás az alábbi módon számítható:

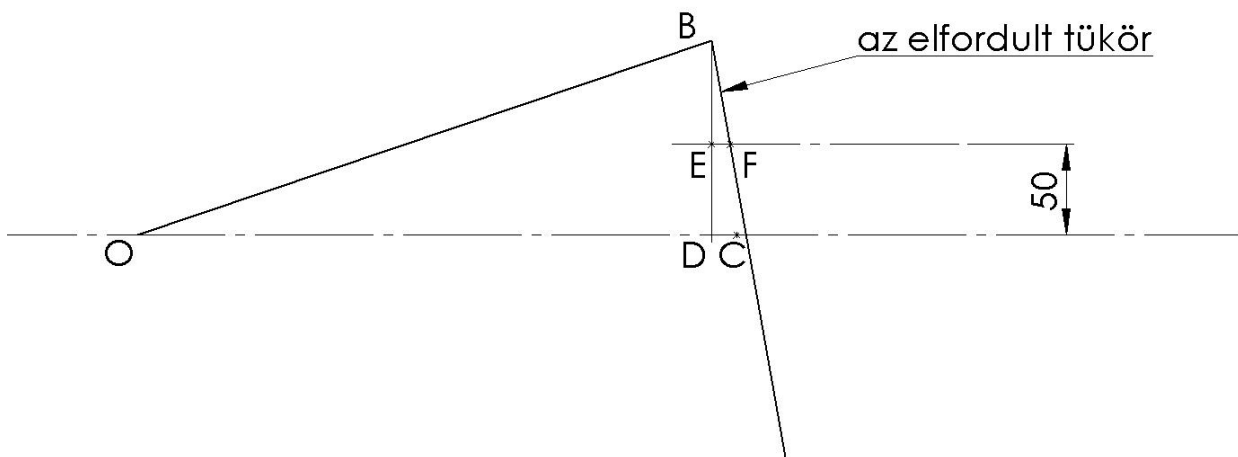
$$x = \overline{OC} - (\overline{DO} + \overline{EF}) \quad (20)$$

A szögmásodperces elfordulás után a COB szög:

$$COB\Delta = 22^\circ 37' 12,514'' = DOB\Delta \quad (21)$$

Az OBF szög ismert, hiszen a tükör és sugár által bezárt szög állandó marad.

$$OBF\Delta = OAC\Delta = 67^\circ 22' 48,486'' \quad (22)$$



16. ábra Az elfordult tükör helyzete (vastag vonallal)

A DOB háromszögben számolva:

$$\overline{DB} = \sin(DOB\Delta) * \overline{OB} = 50,0006 \text{ mm} \quad (23)$$

$$\overline{DO} = \frac{\overline{DB}}{\operatorname{tg}(DOB\Delta)} = 119,9998 \text{ mm} \quad (24)$$

$$OBD\Delta = 180^\circ - 90^\circ - DOB\Delta = 67^\circ 22' 47,486'' \quad (25)$$

Az EBF háromszögben:

$$EBF\Delta = OAC\Delta - OBD\Delta = 1'' \quad (26)$$

$$\overline{EB} = \overline{DB} - 50 = 0,0006 \text{ mm} \quad (27)$$

$$\overline{EF} = \text{tg}(EBF\Delta) * \overline{EB} = 2,4 * 10^{-8} \text{ mm} \quad (28)$$

Az OC szakasz hossza ismert:

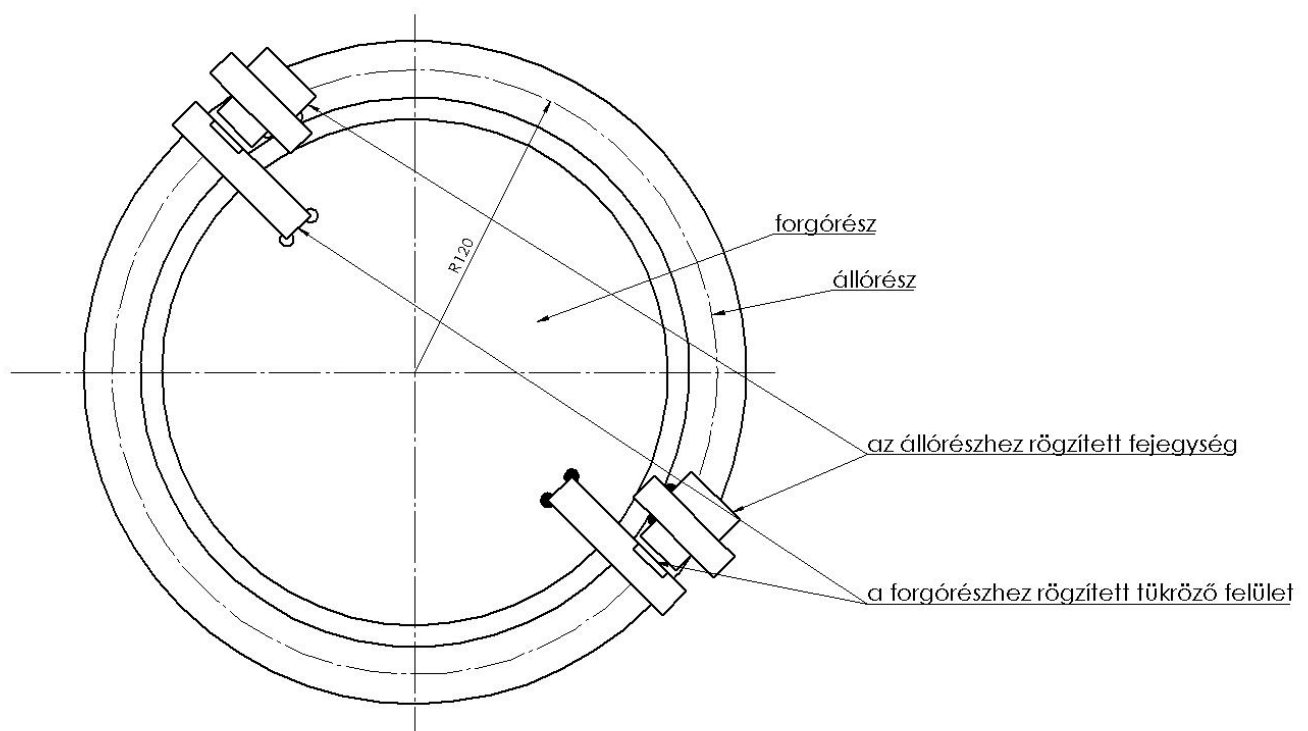
$$OC = 120 \text{ mm} \quad (29)$$

Így az 1''-es elforduláshoz tartozó x elmozdulás értéke a következő:

$$x = 120 - (119,9998 + 2,4 * 10^{-8}) = 0,0002 \text{ mm} = 0,2 \mu\text{m} \quad (30)$$

Belátható tehát, hogy ebben a mérési elrendezésben nagyobb pontosságú mérésre van szükség az 1''-es felbontás eléréséhez.

További differenciálmérési elrendezési lehetőség látható az 17. ábrán. Ebben az esetben a már tárgyalt szimpla fejes elrendezés kerülne a magnetométer mindkét oldalára. Így szimmetrikusan elhelyezve, azonos anyagokat felhasználva a hőtágulás kompenzálható lehet, és a korábban tárgyalt 6 μm-es felbontási követelmény is megmarad.



17. ábra További differenciálmérési elrendezés

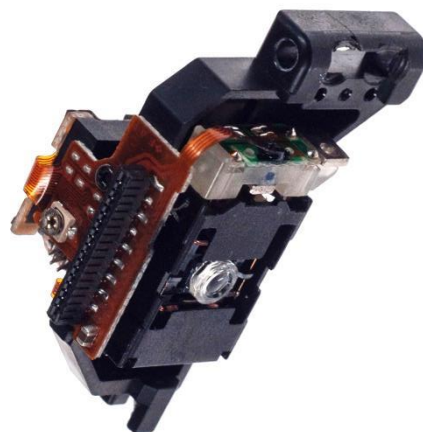
## VII. A MÉRÉS KIVITELEZÉSE

### VII. 1. A megfelelő CD-fej kiválasztása

A dolgozat elkészítésének egyik legfontosabb pontja a megfelelő fej kiválasztása, hiszen az áramkör illetve a mechanika tervezése is ehhez illesztve történik, és ha a feladat elvégzése közben kellene váltani, az a tervezési folyamat újrakezdésével járna.

A választásban nagy segítséget nyújtott, hogy egy szerviztől sikerült hozzájutnunk több, CD-lejátszóból kiserelt fejhez. A vizsgálatok célja a legkevesebb mágneses anyagot tartalmazó, és legegyszerűbb konstrukció megtalálása volt.

Első lépésben a fejek adatlapjait akartam megtalálni. Ez azonban számításaimnál jóval nehezebb feladatnak bizonyult. A gyártók nagyon kevés pontos adatot adnak meg ezen alkatrészekről, hiszen ha javításról van szó, egyszerűbb egy teljesen új fejet beszerezni, így a szervizeknek sincs szüksége szerelési kézikönyvekre. Továbbá így a konkurens gyártóknak is jóval nehezebb lemásolni egy konstrukciót. Így, adatlap hiányában, megpróbáltam a legáltalánosabb információkat összegyűjteni, külön-külön a kvadráns detektorról, a lézerdiódáról és a konstrukcióról. A fejegységek szétszedésével, és az egyes alkatrészek egyedi vizsgálatával az általános adatokat többnyire sikerült egyeztetnem a CD-fejekkel.



18. ábra A kiválasztott CD-fej

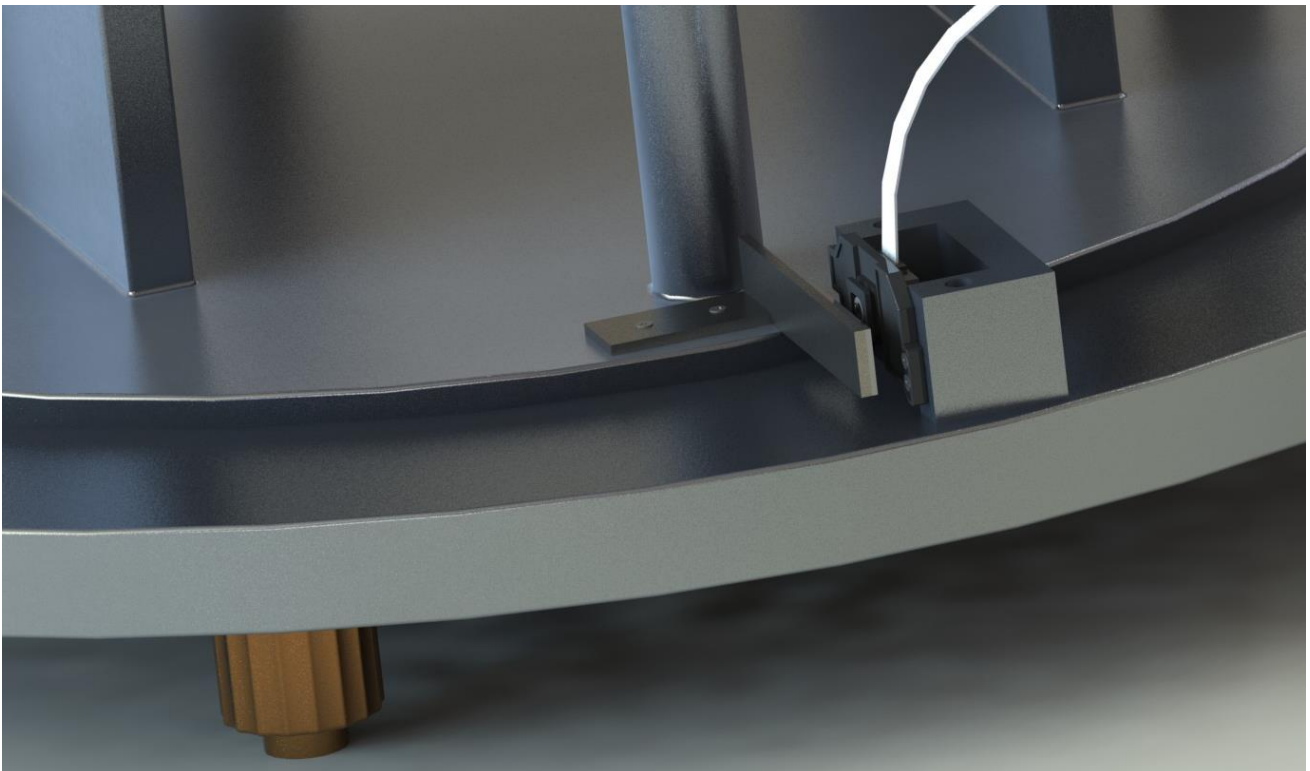
A kiválasztásban további nehézséget jelentett, hogy nagyon kevés modell kapható kereskedelmi forgalomban. Ez valószínűleg az optikai adattárolás háttérbe szorulásának köszönhető. Magyarországon egyetlen forgalmazót sem találtam, ezért a nemzetközi piacon kellett kutatnom. A legkisebb mágneses momentummal rendelkező és legegyszerűbb (és nagyon hasonló) konstrukciójú modell a Sony és a Sanyo egy-egy modellje volt. Mindkét modell teljesen műanyag házba van szerelve, a szervorendszert eltávolítva pedig minimalizálható a mágneses befolyásolás. Végül az elérhetőség döntött a két fej között, hiszen csak a Sanyo SF-P151 kapható kereskedelmi forgalomban. Az OPTIKA Mérnökiroda Kft. anyagi támogatásának köszönhetően sikerült 4db-ot beszereznem.



A mágneses momentum csökkentése érdekében az összes fölösleges alkatrészt el kellett távolítanom a CD-fejről. A szervorendszer tekerceselését, és az ehhez kapcsolódó objektív felfogatását kellett leszerelnem, ezért a lencsének egy új távtartót terveztem alumíniumból, melyet a mérnökiroda technikusa készített el. A távtartót a vázhoz és az objektívet a távtartóban ragasztással rögzítettük.

## VII. 2. 3D modellezés

A CD-fej magnetométeren történő elhelyezését SolidWorksben modelleztem. Így meggyőződhettem arról, hogy a modul elfér a korábban egyeztetett pozícióban, illetve a megrendelő is elképzelhette, hogy a végleges termék hogy fog mutatni. A már korábban tárgyalt szimpla mérőfejes elrendezés megjelenése az 19. ábrán látható.

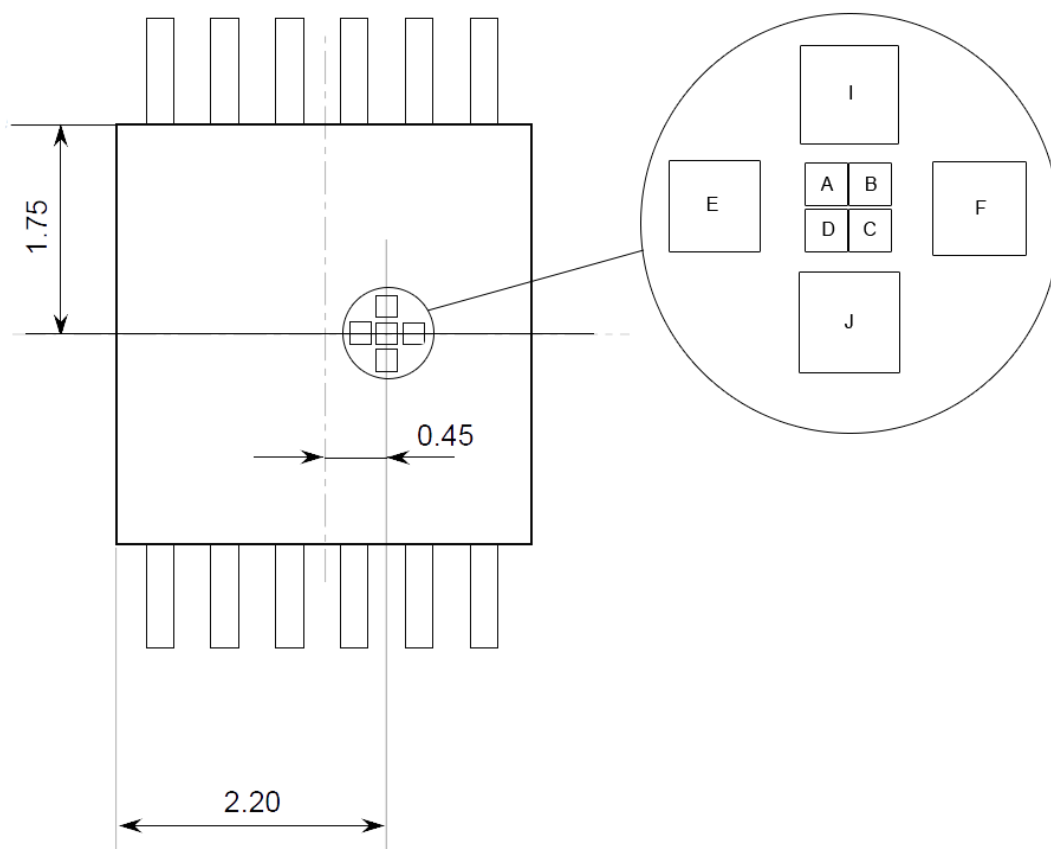


19. ábra A modellezett elhelyezés

### VII. 3. Az áramkör visszafejtése

A megrendelt CD-fej semmiféle adatlapot nem tartalmazott. A fejhez egy 18 pin-es csatlakozón keresztül lehet csatlakozni. A lézerciódát meghajtása, a fotodetektor feszültség alá helyezése, a szegmensek feszültségének kiolvasása és a szervorendszer vezérlése is ezen a csatlakozón keresztül történik.

Ahhoz, hogy a CD-fejhez saját áramkörömet meg tudjam építeni, minden egyes pin jelentését meg kellett határoznom. Első lépésben a CD-fejet teljesen szétszedtem és a nyomtatott áramkorról eltávolítottam a forrasztott alkatrészeket. Így tiszta rálátást kaptam az egyes szálakra, és sikerült megállapítanom, hogy a lézerciódát és a fotodetektor lábait melyik kivezetésen keresztül érhetőek el. Adatlap hiányában azt azonban még mindig nem tudtam, hogy az egyes lábak mire szolgálnak.

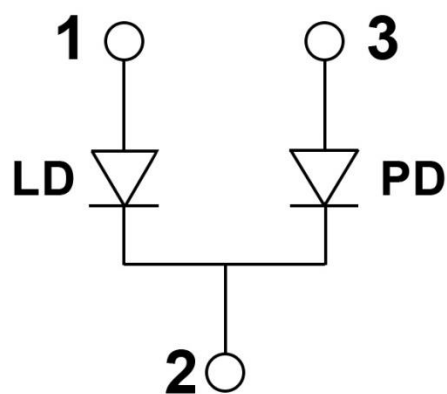


20. ábra Sony CXA 1915AN típusú kvadráns detektor

A négysegmenses detektor esetében könnyen meg lehetett állapítani az egyes lábak szerepét, mivel gyakorlatilag az összes modern CD-fejben ugyanaz a kiosztás alkalmazott. Az  $A, B, C, D$  lábak a kvadráns detektor egyes szegmensei, potenciáljuk a rájuk eső fény függvényében változik. A  $V_c$ ,  $V_{cc}$  és  $Gnd$  lábak a detektor tápfeszültségét szolgáltatják:  $V_c=5\text{ V}$ ,  $V_{cc}=2,5\text{ V}$  és  $Gnd=0\text{ V}$ . [12]

A lézertióda lábai kiosztásának megállapítása már jóval összetettebb feladat, mivel nincs egy általánosan elterjedt típus. Amint azt korábban is tárgyaltam egy fotodióda is található a lézertióda mellett. A két diódának az egyik lába közös, így összesen három kivezetés található a tokozáson. A lézertióda a fotodiódára eső fény alapján kerül szabályozásra. E feladat megoldására rengeteg kereskedelmi forgatóban kapható megoldás létezik, ezért ennek megtervezésére idő és erőforrás hiányában nem tértem ki. A Roithner cég Eu-38-PD modelljét választottam a dióda szabályozásához. A szabályozó bekötése előtt azonban még ki kellett deríteni, hogy melyik láb közös, és melyik diódák anódja illetve katódja.

A kevés számú interneten fellelt CD-fej adatlap alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a lézertióda m-típusú. A lézer- és fotodióda elrendezése az 21. ábrán látható.



21. ábra Az m-típusú lézertióda áramköre

A lézertióda feltételezett lábaira direkt feszültséget kötve, azt rövid ideig működtetve, és az áramot 50-60mA-en tartva elkerülhető a maradandó károsodás. Így sikerült a lézert működésbe hozni. A 780nm-es fény kis mértékben szabad szemmel is érzékelhető, azonban a legtöbb CMOS érzékelő ebben a tartományban tökéletesen érzékel, így egy IR-szűrő mentes mobiltelefon kamerát alkalmazva meggyőződhettem a működésről.

A fotodiódán eső feszültség a ráeső fény függvényében változik, megvilágítani azonban csak a lézertióda tudja azt. Ezért a lézertiódára különböző feszültségeket kapcsolva kellett figyelni a fotodiódán eső feszültséget, ebben a nehézséget a lézertnek a korábban már taglalt érzékenysége okozta, azonban a lézert többször, rövid ideig működtetve sikerült azt megóvni a meghibásodástól. Így a CD-fejen található csatlakozó összes, a dolgozatban használatos lábának funkciója megállapításra került.

## VII. 4. A mérőáramkör feladata

A mérőáramkör elsődleges feladata, hogy a már említett FE-jelet előállítsa a kvadráns detektorból érkező jelekből, továbbá az áramkör elemeihez szükséges feszültséget biztosítsa. A lézerdíoda meghajtó-áramkörének 0 és 5 V-ra van szüksége, a detektornak 0, 2,5 és 5 V-ra. Az összeadást és kivonást műveleti erősítővel valósítom meg. A műveleti erősítő kimenő jele a tápfeszültségen belüli értékeket vehet fel, ezért +-15 V-ra van szüksége, hogy a fókusz hibajel minden lehetséges értéke esetén pontos eredményt kapjak. A műveleti erősítőt a következő fejezetben tárgyalom részletesen.

A megfelelő tápegység megválasztásával elkerülhető egy bonyolult feszültség átalakító áramkör előállítása. Választásom ezért egy Meanwell T40C tápra esett. Hálózati 230 V feszültségből -15, 0, 5 és 15 V kimeneti értékeket ad. Így egyedül a 2,5 V biztosítását kell a mérőáramkörrel megvalósítani. A prototípus megvalósításához egy raszteres próbanyágot használtam, a felhasznált elemeket és az áramkört a következő fejezetben részletezem. Összegezve tehát a feladatok: a lézerdíoda meghajtása, a FE-jel előállítása, 2,5 V előállítása.

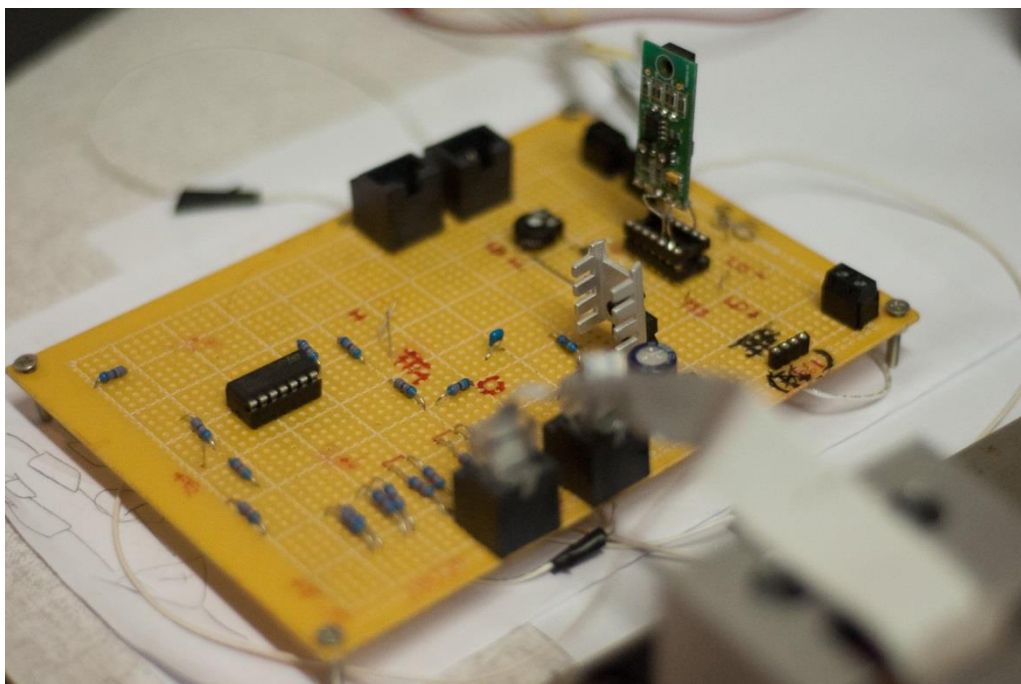
## VII. 5. A mérőáramkör felépítése

A tápegységből érkező vezetékeket egy 4 pines sorkapoccsal csatlakoztattam a próbapanelhez. A forrasztáshoz egy klasszikus Weller-pákát használtam.



22. ábra A CD-fej a kialakított UTP-kábellel

A CD-fejen egy 18 pines, 0,5 mm-es raszteres sorcsatlakozó található. Ilyen csatlakozó sajnos nem kapható kereskedelmi forgalomban. A soros kábelt ezért megvágtam, és két UTP-csatlakozóba osztottam. Ez a szabvány azonban csak 8 pines, így összesen 16 pint tudtam lefedni két csatlakozóval. Mivel a feladat megvalósításához az 1..13 pinekerekre van szükség, ezért a két használaton kívüli érintkező nem jelent problémát. Az UTP előnye könnyen elérhető és gyakorlatilag korlátlan számban újracsatlakoztatható, de szerelése egyedi szerszámot igényel.



23. ábra A próbapanelen elkészített áramkör

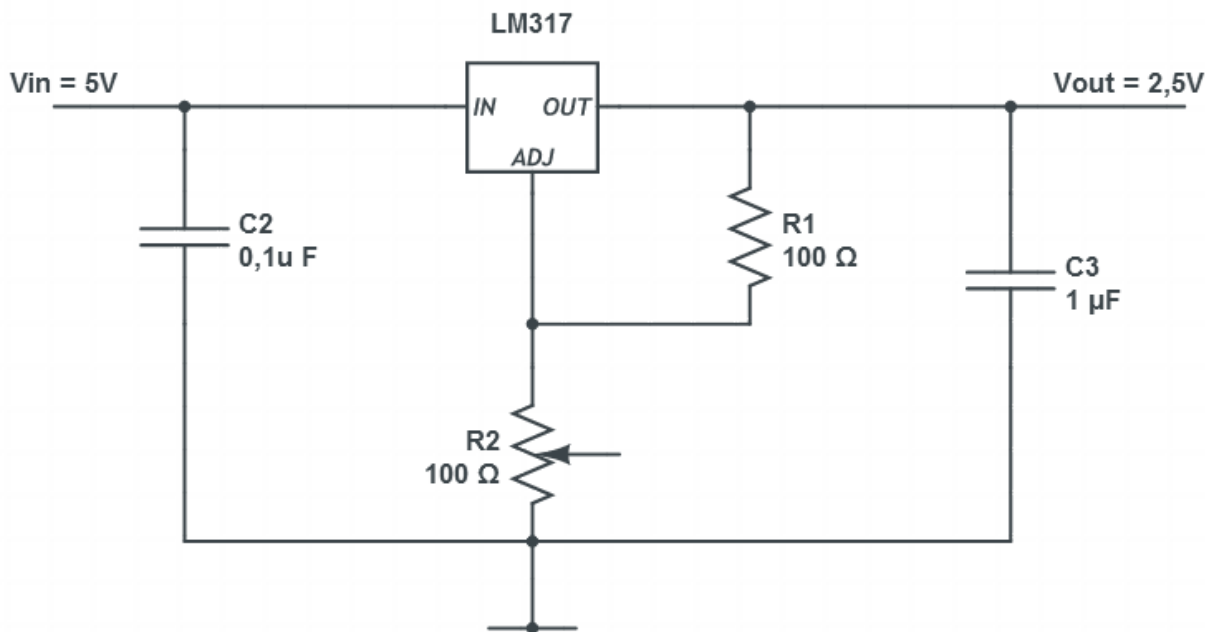
### VII. 5. 1. Szenzor

Első lépésben a 2,5 V eléréséhez szükséges áramkört terveztem meg. Legegyszerűbben egy feszültségszabályozó alkalmazásával valósítható meg, a 16. ábrán látható módon. A feszültségszabályozó típusa LM317T. A feszültség az  $R_1$  és  $R_2$  ellenállások segítségével állítható be.

$$U_{out} = 1,25 * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 1,25 * \left(1 + \frac{100}{100}\right) = 2,5V \quad (31)$$

A hidegítő kondenzátorok kerámiák ( $C_2, C_3$ ); feladatuk, hogy megakadályozzák, hogy a tápforrás felé zavaró jelek jussanak vissza. A szabályozóhoz lehető legközelebb kell elhelyezni őket. Nagy átfolyó áram esetén érdemes hűtőbordát is elhelyezni az integrált áramkörön, itt azonban két 100  $\Omega$ -os ellenállást használva az átfolyó áram:

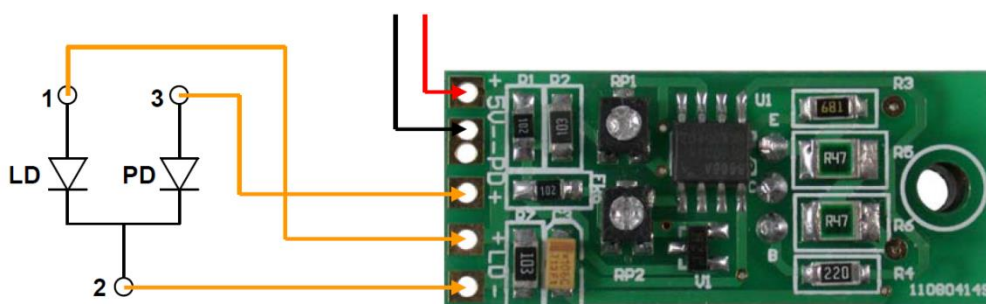
$$I_{átfolyó} = I_1 + I_2 = \frac{U_{out}}{R_1} + \frac{U_{out}}{R_1} = \frac{2,5}{100} + \frac{2,5}{100} = 50mA \quad (32)$$



24. ábra A feszültszabályozó áramkör

### VII. 5. 3. Lézerdióda

A lézerdióda meghajtó áramköréhez a bemeneti 0 és 5 V-t kell biztosítani. A lézerdióda két potméter segítségével szabályozható. Az egyik potméter a lézerdióda maximális áramát határozza meg. Ezt az értéket soha nem lépi át a diódán átfolyó áram, így biztosított a túláram védelem. A másik potméterrel a monitor dióda árama szabályozható, azaz a lézer fényét ezzel tudjuk szabályozni a már beállított határon belül. A bekötés az 25. ábrán látható.



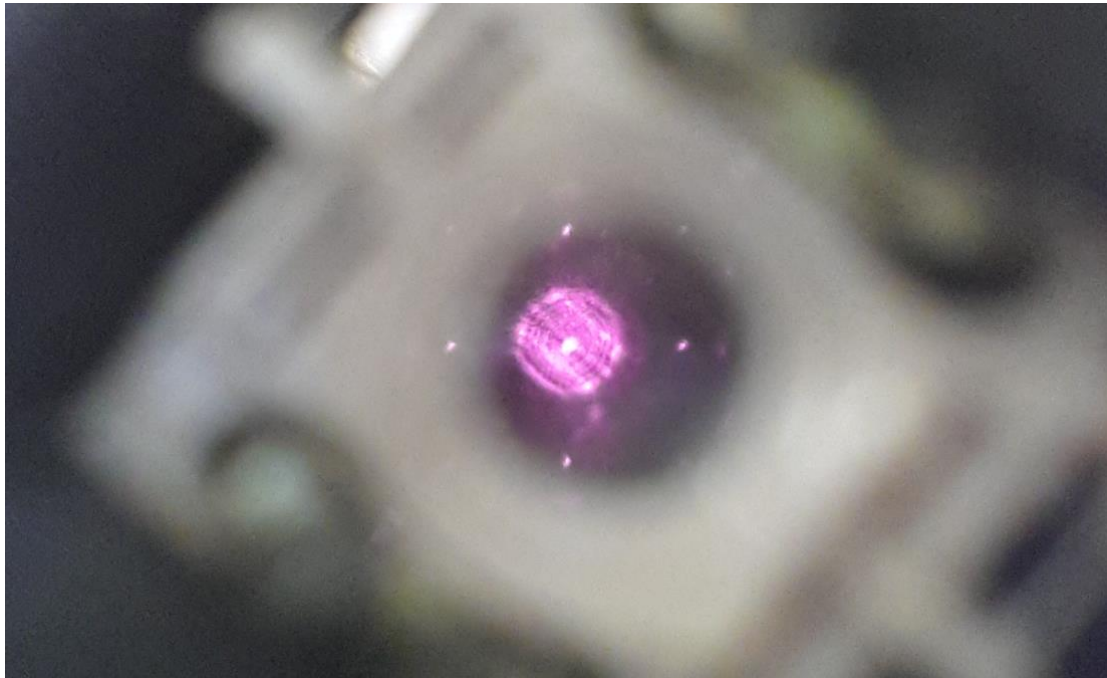
25. ábra A lézerdióda áramgenerátora és annak bekötése

A tesztelés során azt tapasztaltam, hogy a lézerdióda pozitív lábán a potenciál állandó 5V, a szabályozást a negatív lábbal hajtja tehát végre az áramgenerátor. Ez a negatív láb a CD-fej nyomtatott áramkörén azonban közös a kvadráns detektor negatív lábával. Egy CD-olvasóban valószínűleg a szabályozás a pozitív lábbal történik, így a szenzort nem befolyásolja a lézerdióda áramköre. A már megvásárolt meghajtó áramkörön azonban a szabályozást módosítani nem lehet. A



szenzor azon lábát, mely 0V potenciált igényel, leválasztottam ezért a nyomtatott áramkőről és közvetlenül 0V-ra kapcsoltam.

A lézerdíoda fényét kamera segítségével is ellenőriztem, a képeken jól elkülöníthető a főfolt a és a mellékfoltok. (Az ipari kamerák általában nem tartalmazznak infravörös szűrőt, így látható a képen a 780nm hullámhosszú lézergyeny. (26. ábra))



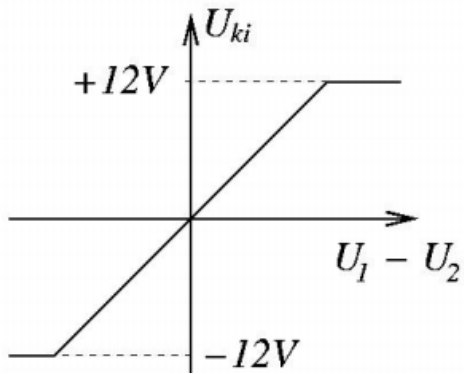
26. ábra A lézernyaláb a másodrendű foltokkal

#### VII. 5. 4. A fókuszhiba jel előállítás

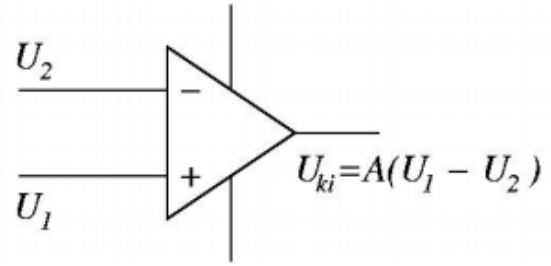
A fókusz hibajel előállításához a kvadráns detektor 4 szegmenséből érkező jelekkel kell műveleteket végrehajtunk. Az összeadásokat és kivonásokat egy műveleti erősítő segítségével lehet megvalósítani. Két összeadásra, illetve egy kivonásra van szükségünk a FE-jel létrehozásához. A műveleti erősítő egy invertáló( $U_2$ ) és egy nem invertáló( $U_1$ ) bemenettel rendelkezik.(20. ábra), a kimenő jel csak a tápfeszültség határain belüli lehet, a karakterisztika lineáris. (19. ábra) Az alapvető összeadó(33) és kivonó(34) kapcsolásokon a kimenő feszültség a következőképpen alakul:

$$U_{ki} = -R \left( \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} \dots \right) \quad (33)$$

$$U_{ki} = \frac{R_2}{R_1} (U_2 - U_1) \quad (34)$$

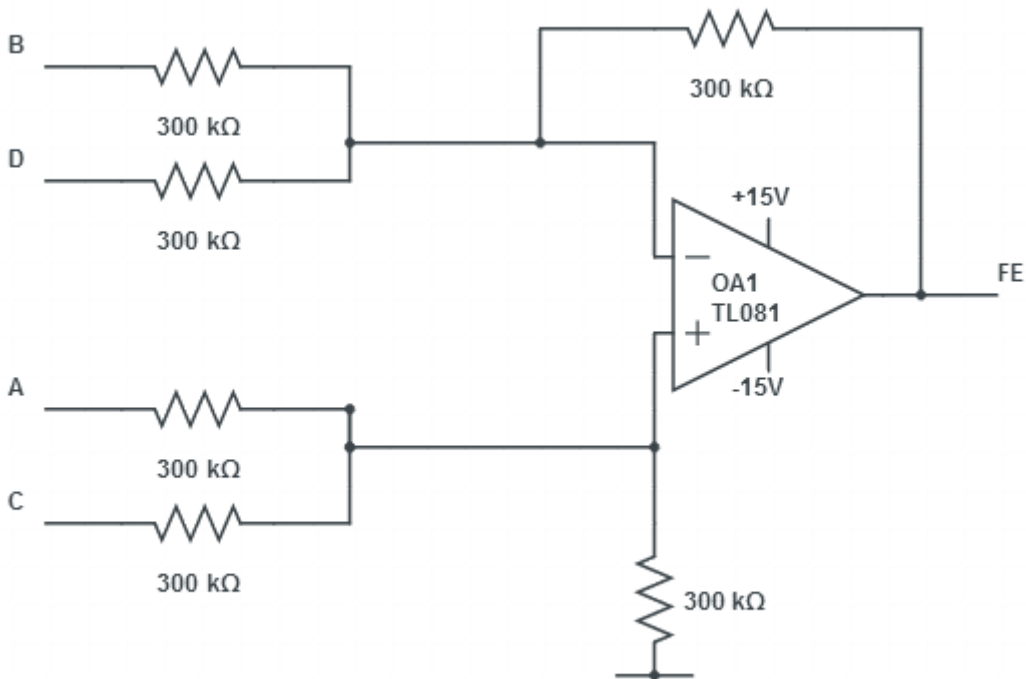


28. ábra Az erősítő karakterisztikája



27. ábra Az erősítő rajzjele

Ezt a két alapelemet felhasználva előállítható a fókuszhiba jel, melynek rajza az 16. ábrán látható. Egy integrált áramkörrel megvalósított műveleti erősítő általában 3-4 erősítőt is tartalmaz egy házon belül.



29. ábra A fókuszhiba jel képzése

A feladathoz egy furatszerelt típust választottam a könnyű kezelhetőség érdekében. Típusa: ST TL-074CD. A tápfeszültség maximum  $\pm 16$  V lehet. A kvadráns fotodetektor kimenetén maximum 3,2 V jelenhet meg, így legrosszabb esetben:

$$A + C = 0 \text{ és } B + D = 6,4 \quad (35)$$

$$FE = (A + C) - (B + D) = -6,4 \quad (36)$$

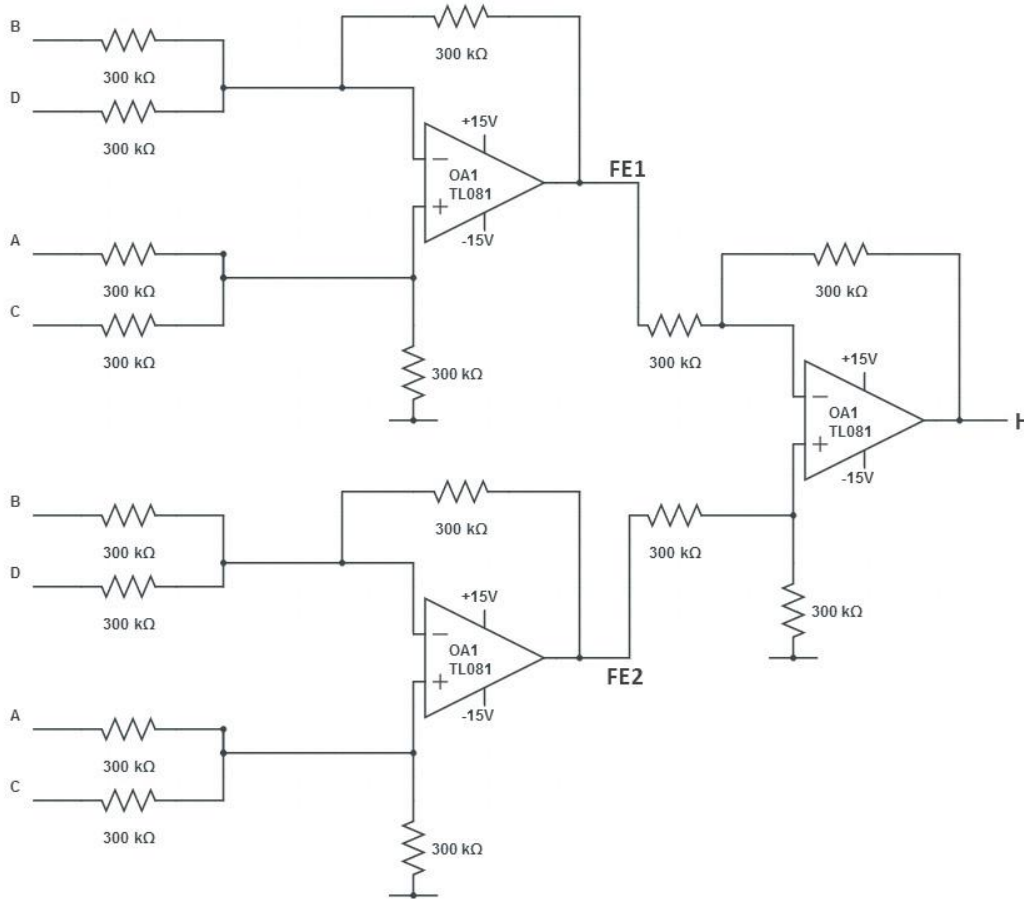
Azaz a műveleti erősítő határait nem lépjük túl.

A műveleti erősítő kiválasztásakor azt is figyelembe vettem, hogy a differenciálméréshez is megfelelő legyen ekkor legrosszabb esetben:



$$FE_1 - FE_2 = -12,8. \quad (37)$$

A differenciálméréshez a már tárgyalt FE jelet kell még egyszer előállítani, illetve a két FE jel különbségét képezni. A különbségképzéshez a műveleti erősítő invertáló illetve nem invertáló bemenetére kell kötni a két jelet. A teljes méréshez szükséges három darab műveleti erősítő egy integrált áramkörben helyezkedik el, így egyszerűen és olcsón felépíthető a mérőállás. A teljes áramkör blokkdiagramja az 30. ábrán látható.



30. ábra A differenciál hibajelet is képző áramkör blokkdiagramja

## VIII. AZ ÁRAMKÖR TESZTELÉSE

### VIII. 1. A részegységek ellenőrzése

Első lépésben a lézerdióda áramgenerátorát ellenőriztem. A bekötés ellenőrzése céljából a lézerdiódát egy LED és egy fotodióda összekapcsolásával modelleztem. Így, ha a fotodiódára eső fényt változtattam egy külön megvilágítással, a lézerdiódát modellező LED fényereje is változott, továbbá a potméterekkel a lézerdiódán átfolyó maximális áramot 500mA-re állítottam be, egy sorba kötött árammérő segítségével. A lézerdióda fénye így a monitordióda áramát szabályozza, viszont a túláramvédelem biztosítva van.

Az áramkör tesztelését 4 db tápegység segítségével végeztem (szimulálva az  $A, B, C, D$  jeleket), melyeket közös nulla pontra csatlakoztattam és meggyőződtem a helyes működésről.

A CD-fejet az UTP-csatlakozós kábelekkel csatlakoztattam a mérőáramkörhöz. Első lépésben a kvadráns detektor működéséről kellett meggyőződnöm. Ehhez elhelyeztem egy fényforrást a CD-fejtől 5 m távolságban, a fényt pedig egy 50 mm-es fókusz távolságú lencsével a detektorra fókuszáltam. A fókuszhoz képest 5m végtelennek tekinthető, egy domború lencse pedig a végtelenből érkező párhuzamos fénysugarakat a fókuszpontjába képezi le. Pontos méréseket így természetesen nem tudtam végezni, de arról meggyőződtem, hogy az  $A, B, C, D$  jelek a rájuk eső fény függvényében változást mutatnak.

A differenciálméréshez a teljes áramkört is ellenőriztem, a két fókusz hibajel generálást a már tárgyalt módon külön-külön, az FE-jelek különbségképzését pedig a műveleti erősítő két lábára direkt feszültséget kapcsolva.

### VIII. 2. A teljes mérőberendezés tesztelése

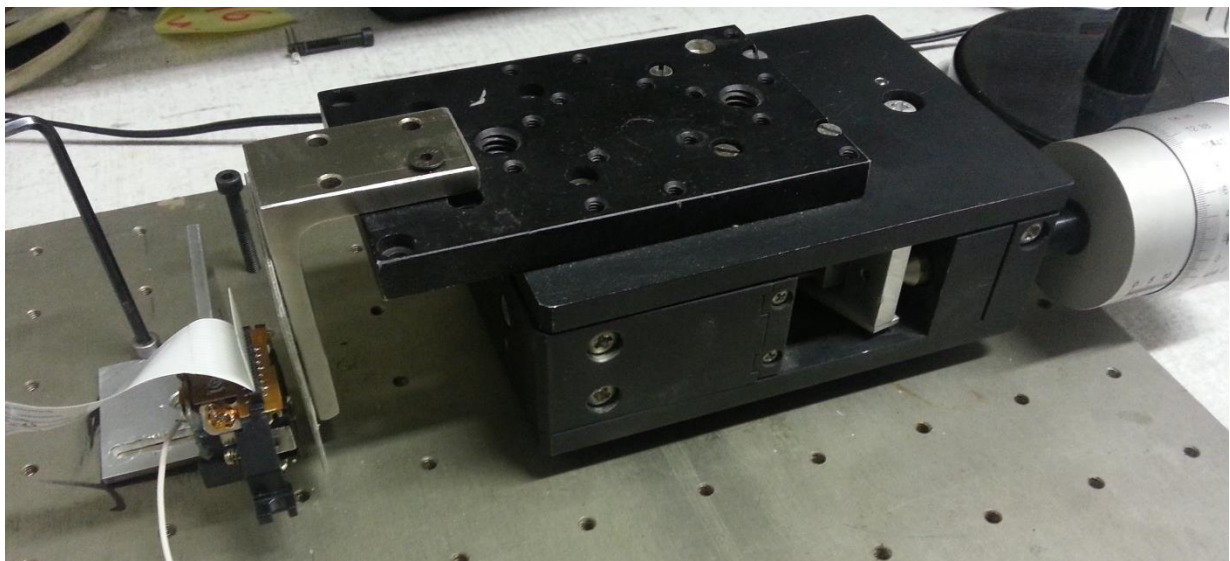
A mérési eljárás kidolgozásának egyik legfontosabb pontja a mérőberendezés tesztelése. A megrendelt új, gyári fejek antisztatikus csomagolásban érkeztek, a lézerdióda két lába össze volt forrasztva, elkerülve így azt, hogy a lábak között bármilyen potenciálkülönbség fellépjen a környezettel való érintkezés következtében. Ezt a forrasztást eltávolítottam, majd a CD-fejet a mérőáramkörhöz csatlakoztattam.

A fejet egy raszteres optikai próbalapra helyeztem. Tükröző felületnek egy CD lemez íratlan részét használtam, hiszen itt a pitek nem befolyásolják (csökkentik) a tükröződő fény intenzitását. A lemezt egy mikrométeres orsóval felszerelt tízes osztóra szereltem. A mikrométer Mitotoyo gyártmányú, 0,002 mm felbontású. A tízes osztóval a felbontás 0,2  $\mu\text{m}$ -re módosul, mely elegendő a 120mm-es sugár esetében megkövetelt 0,6  $\mu\text{m}$ -es pontosság teszteléséhez.

Első lépésben a teljes tartományon mértem 30 lépésben a feszültség változást, így a teljes fókuszhiba jel karakterisztikáját megállapíthattam. A mérés 26,3 °C-on történt, az OPTIKA Mérnökiroda Kft. huzatmentes optikai laborjában. A hőmérsékletváltozást minden mérés során feljegyeztem. A mérési elrendezés az 31. ábrán látható. Első lépésben a tápfeszültségtől függést vizsgáltam, a táp finomállítási lehetőségét kihasználva megállapítottam, hogy a fókuszhiba jel nem függ a tápfeszültség értékétől,  $\pm 2\%$ -on belüli értékek esetén. A mérés során az alábbi tápfeszültségek voltak beállítva:

$$U_+ = 15,2 \text{ V}; U_- = -14,4 \text{ V}; U = 5 \text{ V}; \text{COM} = 0 \text{ V}$$

A tápegység  $\pm 2\%$ -os pontossággal tartja ezeket az értékeket adatlapja alapján. A feszültségmérést Maxwell MX25-304 típusú multiméterrel végeztem.

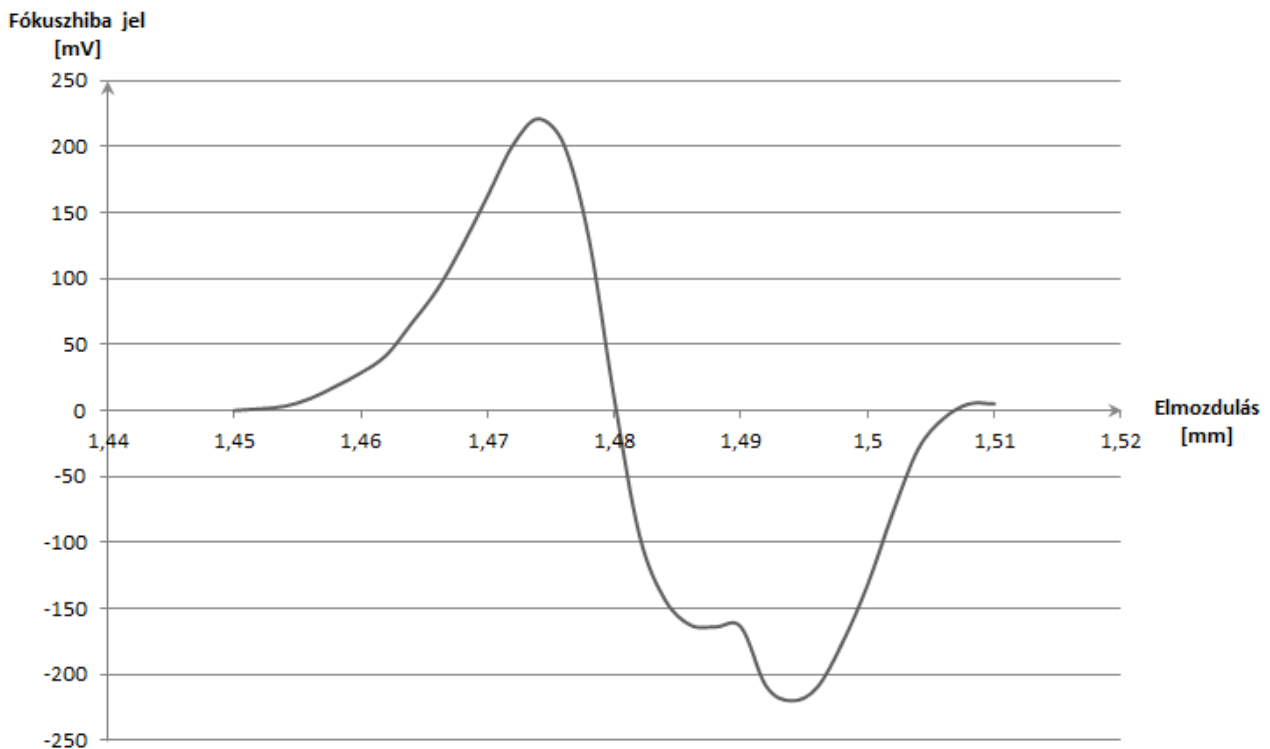


31. ábra A CD-fejjel szemben, egy mikrométerorsóval ellátott tízes osztóra szerelt tükröző felület

A mérési eredményeket az 1. táblázat tartalmazza. A fókuszhiba jel karakterisztikája az elvárásoknak megfelelően változik. (32.ábra) A jel 1,45-től 1,51 mm-ig mutat nullától eltérő értéket, ez 0,06mm-es teljes tartományt jelent. A rendszer legérzékenyebb azonban a középső, 0 körüli, meredek tartományon.

I. táblázat A teljes tartományon mért értékek

A mérés sorszáma	Elmozdulás [mm]	Az FE jel értéke [mV]	A mérés sorszáma	Elmozdulás [mm]	Az FE jel értéke [mV]
1.	1,450	0	17.	1,482	-95
2.	1,452	1,2	18.	1,484	-143,3
3.	1,454	3,2	19.	1,486	-162,5
4.	1,456	9	20.	1,488	-164
5.	1,458	18,2	21.	1,490	-164
6.	1,460	28,5	22.	1,492	-209
7.	1,462	41,8	23.	1,494	-220
8.	1,464	66	24.	1,496	-210
9.	1,466	91,2	25.	1,498	-176
10.	1,468	124,6	26.	1,500	-132
11.	1,470	162,5	27.	1,502	-77
12.	1,472	201	28.	1,504	-29
13.	1,474	221	29.	1,506	-6
14.	1,476	202	30.	1,508	5
15.	1,478	130	31.	1,510	5
16.	1,480	9,1	32.	1,512	5



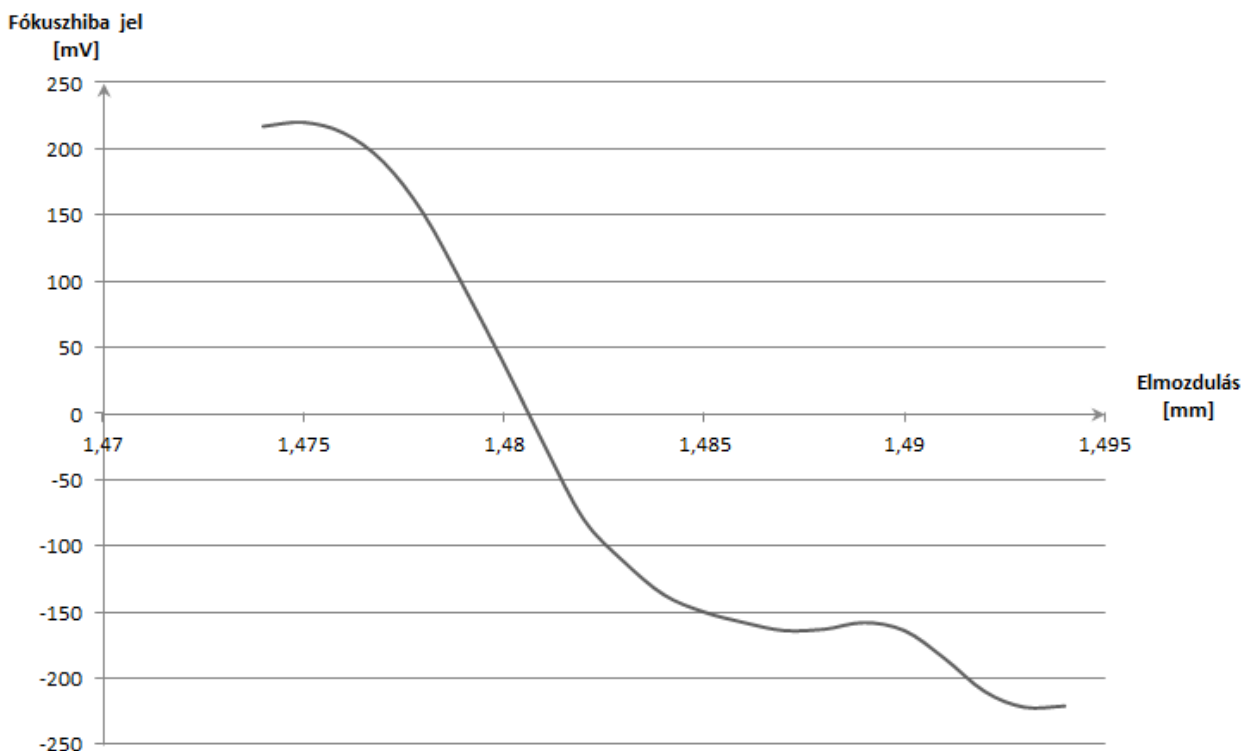
32. ábra A teljes tartomány karakterisztikája

A szögelfordulás mérését ezen a tartományon kell megvalósítani, ezért további, részletesebb méréseket csak itt végeztem. Az 20-tól 25-ig terjedő mérési eredményeket véletlen hiba terheli, melyet a mikrométeres orsó vagy a tízes osztó hibája okozhat. A tized mikronos mérési

tartományba azonban már nem tartoznak bele, így a jelben látható szabálytalanságtól eltekinthettem. A legérzékenyebb, közel lineáris tartomány meghatározása céljából egy további közelítő mérést végeztem 20 lépésben, mikrométeres felbontással. A mérés eredményét az 2. táblázat tartalmazza, a karakterisztika az 33. ábrán látható.

2.táblázat Az érzékeny tartomány első mérésének eredménye

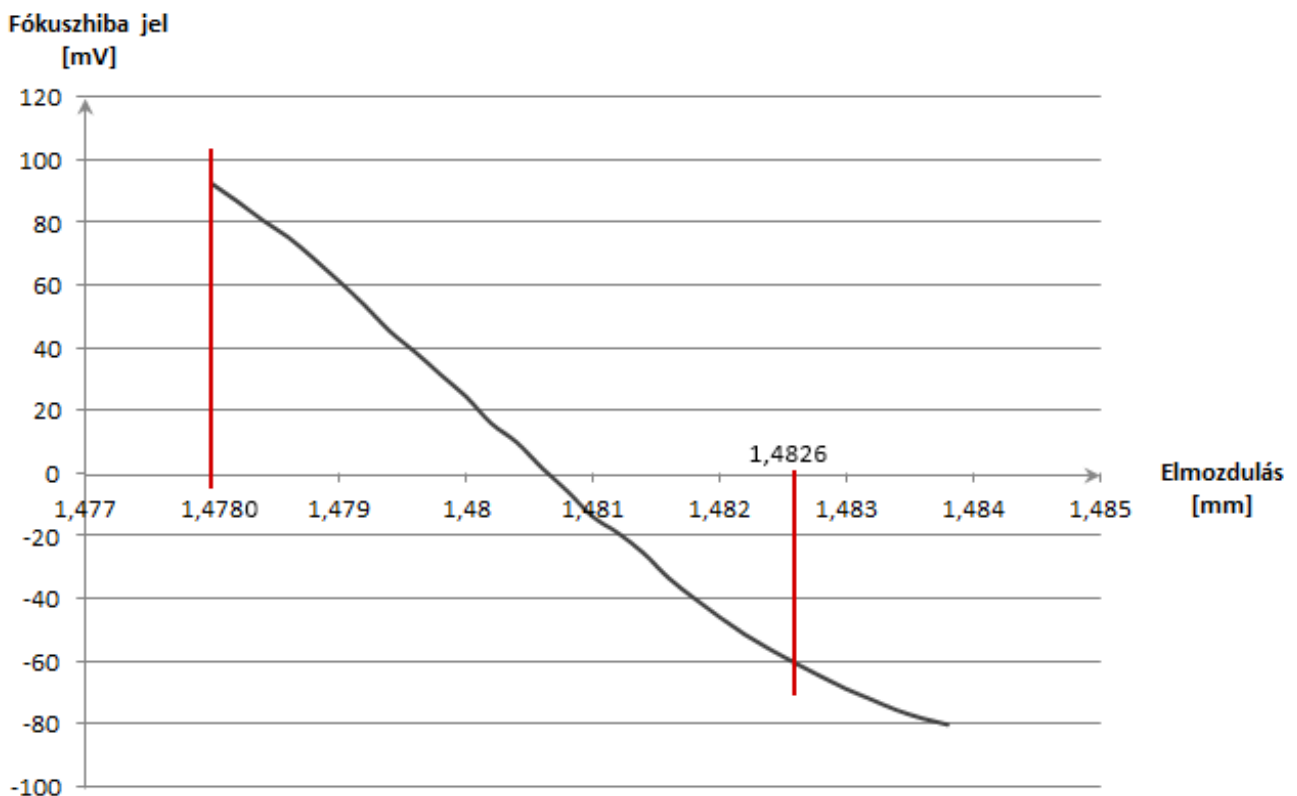
A mérés sorszáma	Elmozdulás [mm]	Az FE jel értéke [mV]	A mérés sorszáma	Elmozdulás [mm]	Az FE jel értéke [mV]
1.	1,474	217	11.	1,484	-137
2.	1,475	220	12.	1,485	-150
3.	1,476	212	13.	1,486	-158
4.	1,477	190	14.	1,487	-164
5.	1,478	151	15.	1,488	-163
6.	1,479	96	16.	1,489	-158
7.	1,480	38	17.	1,490	-164
8.	1,481	-23	18.	1,491	-185
9.	1,482	-80	19.	1,492	-210
10.	1,483	-112	20.	1,493	-222



33. ábra Az érzékeny tartomány karakterisztikája

Látható, hogy az átmeneti 0 pont körüli  $\pm 2-3 \mu\text{m}$ -es tartományon a leglineárisabb a rendszer, ezért a szögmásodperc pontosságú szögelfordulás mérésére alkalmas tartománynak ezt részt jelöltem ki, további méréseket csak ezen a tartományon végeztem, hiszen a kész berendezés is itt fog funkcionálni.

A linearitás megállapításához a lépésköz változását kell vizsgálni, szórását megállapítva a továbblépés szempontjából fontos következtetések vonhatóak le. A kérdés tehát, hogy a legpontosabb tartományon a tükröző felületet  $0,2 \mu\text{m}$ -es lépésekkel mozgatva milyen válasz látható a fókuszhiba jelben.



34. ábra A kijelölt mérési tartomány

Az első mérésekből jól látható, hogy a lépésközt az 1,4780 és 1,4826 közötti tartományon érdemes vizsgálni, mert ezután kezd laposodni a görbe, csökken a linearitás.

Ezen a tartományon további két mérést végeztem.

3.táblázat A kijelölt mérési tartományon mért értékek

Elmozdulás [mm]	I.mérés		II. mérés		III. mérés	
	Az FE jel értéke [mV]	Lépésköz [mV]	Az FE jel értéke [mV]	Lépésköz [mV]	Az FE jel értéke [mV]	Lépésköz [mV]
1,4780	162	11	162	10	159	8
1,4782	151	9	152	11	151	10
1,4784	142	10	141	10	141	10
1,4786	132	9	131	8	131	14
1,4788	123	10	123	10	117	9
1,4790	113	13	113	14	108	15
1,4792	100	14	99	9	93	13
1,4794	86	14	90	15	80	12
1,4796	72	11	75	10	68	12
1,4798	61	12	65	12	56	10
1,4800	49	14	53	11	46	12
1,4802	35	16	42	15	34	13
1,4804	19	8	27	9	21	11
1,4806	11	11	18	19	10	14
1,4808	0	10	-1	13	-4	12
1,4810	-10	18	-14	11	-16	11
1,4812	-28	6	-25	9	-27	10
1,4814	-34	10	-34	12	-37	16
1,4816	-44	14	-46	10	-53	9
1,4818	-58	11	-56	12	-62	13
1,4820	-69	8	-68	9	-75	9
1,4822	-77	11	-77	8	-84	6
1,4824	-88	8	-85	10	-90	6

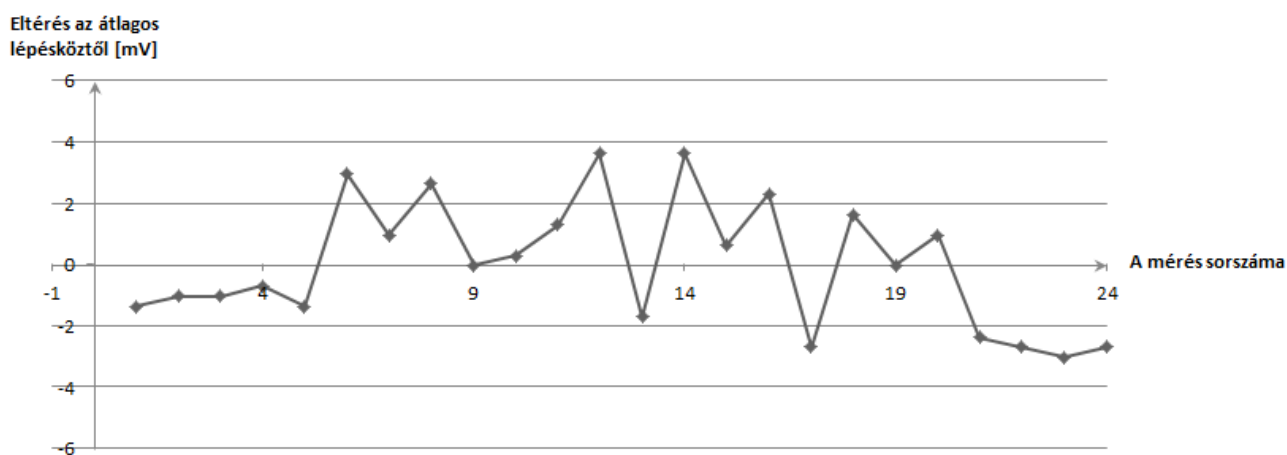
Megállapítható, hogy a lépésköz megfelelő állandóságot mutat, az átlagos lépésköz: 11,04 mV, a lépésköz szórása: 2,69 mV. Mindez tehát azt jelenti, hogy a 0,2  $\mu\text{m}$ -es elmozdulásra bekövetkező átlagos feültségváltozás 11,04 mV. A szórást is figyelembe véve elmondható, hogy 0,1  $\mu\text{m}$ -es mérési pontosság is elérhető a rendszerrel.

A IV.2-ben kapott érték alapján látható, hogy 120 mm-es sugárra vontakoztatva 0,2  $\mu\text{m}$  0,33" elfordulásnak felel meg. A mérési tartomány ekkor 4,6  $\mu\text{m}$ . A korábbi számítás alapján a különböző sugarakhoz tartozó felbontást és mérési tartományt az 4. táblázat tartalmazza. (A mérőeszköz elhelyezése a magnetométeren több pozícióban is lehetséges, a felfogató mechanikától függően. ) Nagyobb sugár esetén a felbontás nő, azonban a mérési tartomány csökken.

4.táblázat A különböző sugarú körökön elhelyezett mérőberendezés jellemzői

Sugár [mm]	1"-hez tartozó lineáris elmozdulás [ $\mu\text{m}$ ]	Mérési tartomány ["]
60	0,3	15,3
80	0,4	11,5
100	0,5	9,2
120	0,6	7,7
140	0,7	6,6
160	0,8	5,8

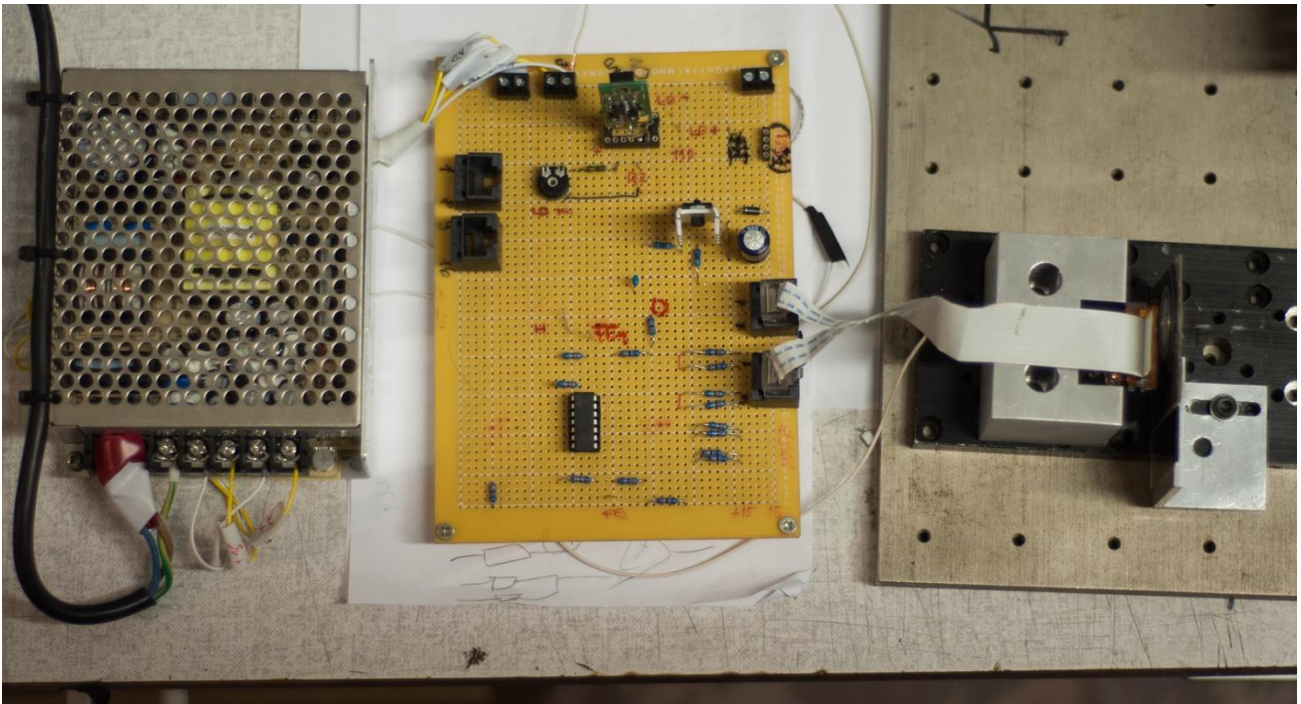
A nullpontban azonban nagyobb változás észlelhető, ezért az időbeli állandóság vizsgálatához további méréseket végeztem.



35. ábra Az átlagos lépésköztől való eltérés

Az új mérésekhez egy fix, saját gyártású rögzítő elemre helyeztem a CD-fejet, mellyel szemben fixen rögzítettem a CD lemezt. A legnagyobb érzékenységű rész időbeli változását vizsgáltam, ezért úgy helyeztem el a tükröző felületet, hogy a fókusz hibajel értéke 0-hoz közeli legyen. A mérési elrendezés az 36. ábrán látható.



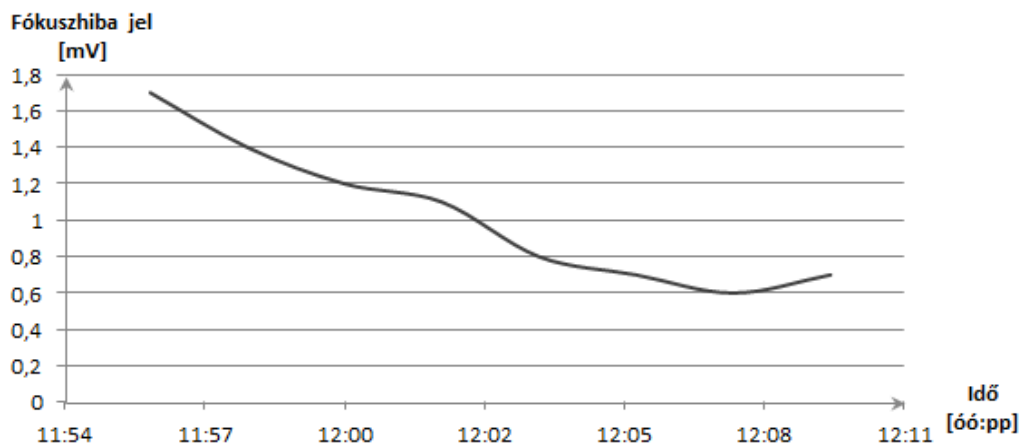


36. ábra A mérőelrendezés a tápegységgel, áramkörrrel és a fixen rögzített CD-fejjel és lemezzel

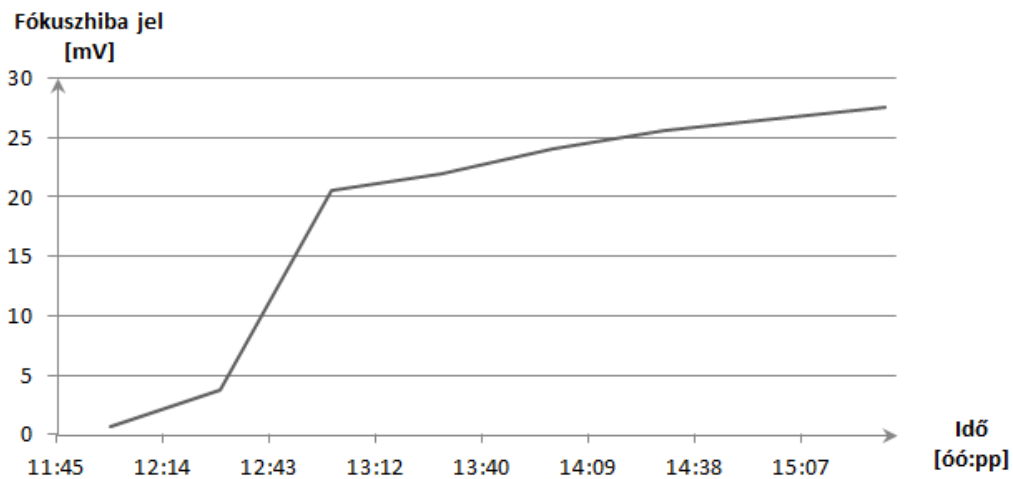
A mérést először két perces időtartamonként vizsgáltam. Az eredményt az 5. táblázat és 37. ábra tartalmazza. Megállapítható, hogy a 15 perces intervallum alatt számottevő változás nincsen, hiszen a maximális változása a fókuszhiba jelnek 1 mV, miközben az átlagos lépésköz ennek több mint tízszerese, azaz 11,04 mV.

5. táblázat A FE-jel változása az idő függvényében

Idő [óó:pp]	Fókuszhiba jel [mV]
11:56	1,7
11:58	1,4
12:00	1,2
12:02	1,1
12:04	0,8
12:06	0,7
12:08	0,6
12:10	0,7



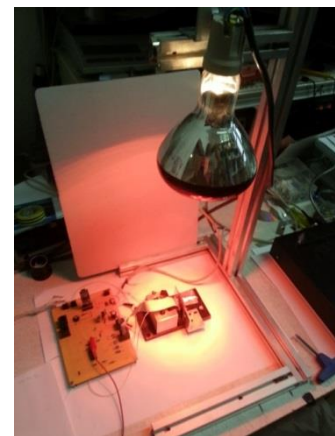
37. ábra A FE-jel változása az idő függvényében, rövidtávon



38. ábra A FE-jel változása az idő függvényében, hosszabb távon

A stabilitásra vonatkozóan további mérést végeztem 30 perces időközönként vizsgálva a fókuszhiba jel értékét. A 13:00-kor látható változást véletlen hiba okozhatja, akár az ajtó kinyitása okozta huzat is előidézhet ekkora változást.

Az időbeli változások mellett a FE-jel hőmérsékletváltozás hatására bekövetkező elmozdulását is mérni kell. A IV.3-ban kifejtett számítások alapján nagy eltolódás nem várható, azonban mindezt a gyakorlatban is igazolni kell. A mérési elrendezés az 39. ábrán látható.



39. ábra A hőtágulás mérése

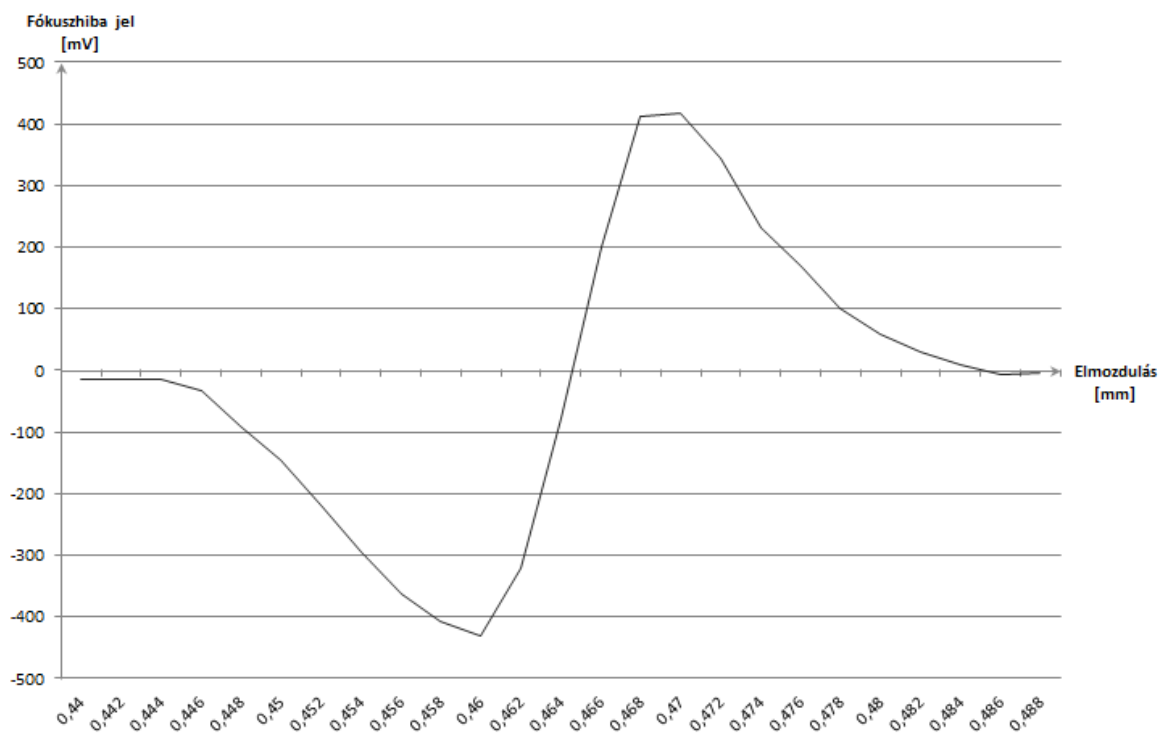
A méréshez egy 250W-os infravörös lámpát használtam, a mérőasztal fölött 300mm-es távolságban elhelyezve. A mérést  $26 \pm 10$  °C-on végeztem, bőven túlteljesítve így a várható, illetve megrendelő által megkövetelt  $\pm 2$  °C-os határt. A mérési eredményét az 6. táblázat tartalmazza.

6.táblázat A FE-jel értéke különböző hőmérsékletek esetén

A mérés sorszáma	Hőmérséklet [C°]	Fókuszhiba jel	A mérés sorszáma	Hőmérséklet [C°]	Fókuszhiba jel
1.	18	6,5	11.	28	3,0
2.	19	5,4	12.	29	2,7
3.	20	5,1	13.	30	2,4
4.	21	5,1	14.	31	2,1
5.	22	5,2	15.	32	2,0
6.	23	4,4	16.	33	0,0
7.	24	4,7	17.	34	0,2
8.	25	3,8	18.	35	0,6
9.	26	3,2	19.	36	0,7
10.	27	3,0	20.	37	0,6

Jól látható, hogy a hőmérsékletváltozás gyakorlatilag egyáltalán nem befolyásolja a 0,2  $\mu\text{m}$ -es felbontást.

CD lemez mellett hátsó felületén tükröző alumínium tükröt is használtam fényvisszaverő felületként. Az 7. táblázatból jól látható, hogy a fókuszhiba jel amplitúdója jóval nagyobb, mint CD lemez esetében. Ez valószínűleg a tükrő nagyobb reflexiójának köszönhető.



40. ábra A fókuszhiba jel karakterisztikája tükröt alkalmazva fényvisszaverő felületként

Az érzékeny tartomány mérése során azonban azt tapasztaltam, hogy már néhány  $^{\circ}\text{C}$  hőmérsékletváltozásra is 100 mV változás következik be a fókuszhiba jelben.

7. táblázat A fókuszhiba jel alumínium tükrő esetén

A mérés sorszáma	Elmozdulás [mm]	A fókuszhiba jel értéke [mV]	A mérés sorszáma	Elmozdulás [mm]	A fókuszhiba jel értéke [mV]
1.	0,440	-14	14.	0,466	200
2.	0,442	-14	15.	0,468	413
3.	0,444	-14	16.	0,470	417
4.	0,446	-34	17.	0,472	343
5.	0,448	-90	18.	0,474	231
6.	0,450	-145	19.	0,476	170
7.	0,452	-220	20.	0,478	100
8.	0,454	-294	21.	0,480	60
9.	0,456	-363	22.	0,482	30
10.	0,458	-408	23.	0,484	9
11.	0,460	-431	24.	0,486	-6
12.	0,462	-320	25.	0,488	-5
13.	0,464	-77	26.	0,490	-5

Az 39. ábrán látható mérési elrendezést újra összeállítva megállapítottam, hogy 3 C° változás esetén a fókuszhiba jel az érzékeny tartományon kívül esik, ezért további méréseket nem végeztem alumínium tükörrel.

Az egyes mérések során a párhuzamosság beállítását kézzel végeztem, a mérések során a karakterisztikában és jelerősségben számottevő változást nem tapasztaltam. Ebből arra lehet következtetni, hogy az elvárásoknak megfelelően az eszköz nem érzékeny a kis szögváltozásokra, így a szögmásodperces nagyságrendben az elfordulás nem befolyásolja a mérést.

## **IX. ÖSSZEFOGLALÁS**

A dolgozatban áttekintettem a szögmérési lehetőségeket, majd a CD olvasóra vonatkozó alapkövetelményeket, ezek alapján pedig megállapítottam, hogy a G. Szabó István által felvetett módszerrel elvileg megvalósítható lehet a szögmásodperc pontosságú mérés. Megvizsgáltam több mérési elrendezést, és számításokat végeztem, hogy az 1 szögmásodperces elforduláshoz mekkora lineáris elmozdulás tartozik. Kiszámoltam a felhasznált anyagok hőtágulását, majd javaslatot tettem a tükröző felület anyagára és vastagságára vonatkozóan. Kiválasztottam egy kereskedelmi forgalomban kapható CD-fejet, majd modelleztem a magnetométeren történő elhelyezését. Adatlap hiányában mikroszkóp segítségével visszafejtettem a fejegység áramkörét, így megállapítottam a csatlakozó egyes lábainak szerepét. A fókuszhiba jel előállításához és a lézerdióda meghajtásához áramkört terveztem és kiviteleztem. Az olvasófejet így működésbe hoztam, és méréseket végeztem a pontosságra vonatkozóan.

A mérésekből kiderül, hogy 4,4  $\mu\text{m}$ -es tartományon nagy linearitás mellett 0,2  $\mu\text{m}$ -es pontosság érhető el. A szögmásodperces elfordulásérzékeléshez a tárgyalt elrendezésben 0,6  $\mu\text{m}$ -es felbontásra van szükség, így ez a feltétel teljesíthető. A hőváltozás során mutatott viselkedés alapján megkérdőjelezhető a differenciálmérés szükségessége, hiszen a fókuszhiba jel különböző hőmérsékleten sem mutatott tizedmikronos elmozdulásra utaló feszültségváltozást.

## X. TOVÁBBLÉPÉSI LEHETŐSÉGEK

A fókuszhiba jel fél óránál hosszabb távú mérések során fellépő eltolódását javítani kell, illetve igen hosszú távú, akár hetekig tartó méréseket is kell végezni. A próbapanelen összeállított áramkört nyomtatott áramkörre kell cserélni ahhoz, hogy a termék végleges formába kerüljön. Ugyanakkor az eszköz mágneses momentummentesítése továbbra sem teljesen megoldott, mivel az érzékelő az 1 cm-ről megengedett 1 nT-nál nagyobb értéket mutat.

Megoldás lehet egy üvegszál használata, egyik végét a szenzor jelenlegi pozíciójába helyezve, másik végét pedig a szenzor felületére ragasztva. Ekkor azonban újra kell pozícionálni a szenzort, hogy a visszaverődő lézernyaláb a kvadránsdetektor felületére kerüljön. A mikrométeres pontosságú pozícionálás azonban igen komplikált technológiát igényel.

A fókuszhiba jel feldolgozását a magnetométert is kezelő PC végzi majd, melynek szoftverét ennek megfelelően módosítani kell.

## **XI. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS**

Szeretném megköszönni G. Szabó Istvánnak, hogy a dolgozat megírásához szükséges minden segédeszközt rendelkezésemre bocsátott az OPTIKA Mérnökiroda Kft. telephelyén, valamint a kiváló alapgondolat mellett a készítés során rengeteg hasznos tanáccsal látott el. Köszönöm Csihar Zoltánnak az áramkör tervezésében és a lézertióda azonosításában nyújtott segítségét, valamint barátaimnak a korrepetálásokat és rengeteg segítséget, amit az alapképzés elvégzése folyamán nyújtottak.

## XII. IDÉZETT FORRÁSMUNKÁK

- [1] „MinGeo Kft.,” [Online]. Available: <http://mingeo.com/mainframe.htm>. [Hozzáférés dátuma: 21 október 2013].
- [2] I. Dr. G. Szabó, *Opto-elektromechanikai kapcsolatok CD lejátszó olvasófejében*, Budapest: Egyetemi doktori értekezés, 1992.
- [3] „MIT Archive,” [Online]. Available: <http://web.mit.edu/invent/iow/russell.html>. [Hozzáférés dátuma: 28 szeptember 2013].
- [4] I. Dr. G. Szabó, G. Dr. Szarvas, G. Hudoba és M. Barabás, „Optikai pick-up kompakt diszk lejátszókhöz,” *Finommechanika-Mikrotechnika*, 28. évf, pp. 136-141., 1992.
- [5] H. György, B. István és S. Gábor, „Compact Disc Audio adatrögzítés,” *Finommechanika - Mikrooptika*, 28. évf, pp. 131-135, 1992.
- [6] G. B. Airy, „On the Diffraction of an Object-glass with Circular Aperture,” in *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, Cambridge, 1835, pp. 283-291.
- [7] F. Ujhelyi, „Alkalmazott lézertechnika jegyzet,” Budapest, 2012.
- [8] „Sam's Laser FAQ,” [Online]. Available: <http://www.k3pgp.org/Notebook/Lasersam/laserdio.htm#diolpv1>. [Hozzáférés dátuma: 28 október 2013].
- [9] S. M. Goldwasser, „Notes on the Troubleshooting and Repair of CD players and CDROM drivers,” *Sci Electronics*, 2011. jún. 22..
- [10] N. W. Ashcroft és N. D. Mermin, *Solid State Physics*, Saunders College, 1976.
- [11] A. Schuster, *An Introduction to the Theory of Optics*, London: Edward Arnold, 1904.
- [12] Sony, *CXA1753M típusú CD-fej adatlapja*.
- [13] „Angle measurement,” Clark University, [Online]. Available: <http://www.clarku.edu/~djoyce/trig/angle.html>. [Hozzáférés dátuma: 11 október 2013].