

A KSTAR tokamak nyalábemissziós diagnosztikájában működő leképező rendszer tervezése és tesztelése

OTDK dolgozat

Czopf Anna, MSc I. évf.

Konzulensek: Dr. Erdei Gábor, Atomfizika tanszék
Dr. Pokol Gergő, Nukleáris Technikai Intézet

A dolgozat bemutatását a TÁMOP - 4.2.2.B-10/1--2010-0009 "Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" című program támogatta.

BME TTK
2012.12.28.

A KSTAR tokamak nyalábemissziós diagnosztikájában működő leképező rendszer tervezése és tesztelése

Czopf Anna, MSc I. évf.

Konzulensek: Dr. Erdei Gábor, Atomfizika tanszék
Dr. Pokol Gergő, Nukleáris Technikai Intézet

Jelenleg zajlik a Dél-Koreában (Daejeon) nemrégiben megépült KSTAR tokamak [1] kísérleti eszközökkel történő felszerelése. Az egyik ilyen eszköz egy több detektorral ellátott leképező rendszer, amely a plazma fűtőnyalábjának térbeli fényeloszlását vizsgálja [2]. A műszer két részből áll: az egyik egy periszkóp-szerű optika, amely a fúziós tér egy tartományát képezi le a reaktoron kívülre, a másik pedig egy detektor rendszer, amely a leképzett fényeloszlás alapján vizsgálja a fűtőnyaláb térbeli, időbeli fluktuációit.

A leképező rendszer tervezésénél a legnagyobb kihívást az jelenti, hogy a tokamak belső terének képét egy 150 mm átmérőjű, 2 m hosszú csövön kell kivezetni. Ez indokolja a periszkóp-szerű elrendezést [3]. Az alkalmazott lavinadióda detektorok térbeli mintavételezése alacsony (kb. 10 mm-es tárgytérbeli felbontás), azonban egy nagyobb felbontású képet is ki kell vetíteni egy CCD kamera számára, amit a térbeli kalibrációhoz használunk. A rendszer sarkalatos pontja egy, a beesési szögre rendkívül érzékeny színszűrő, amelyet a detektorok elé kell helyezni, hogy a fűtőnyalábból és a plazma egyéb részeiből érkező sugárzást spektrálisan le tudjuk választani. További követelmény, hogy a tárgytér különböző pontjait pásztázással tudjuk a lavinadióda detektormátrix kisméretű érzékelő felületére leképezni.

Munkám első lépéseként összeállítottam a specifikációt, majd két koncepciót modelleztem le paraxiális közelítésben. Ezek közül a megfelelőbbet kiválasztva felépítettem a valós rendszer vázát és közreműködtem ennek optimalizációjában. Konkrét feladatomban az optikai tulajdonságok vizsgálata volt: képanalízis, a szóródási foltok és a rendszer transzmissziójának elemzése a tervezés különböző fázisaiban, részrendszerenként és a teljes berendezés esetén. A rendszer összeállításában és tesztelésben is részt vettem Dél-Koreában, ahol a beállításhoz szükséges analíziseket végeztem. Végezetül a tesztelési eredményeket kiegészítő optikai szimulációk segítségével ellenőriztem.

TDK dolgozatomban bemutatom a tervezés során végzett munkámat, a végleges optikai rendszert és a tesztelési eredményeket.

Irodalom:

1. G. S. Lee et al., „Design and construction of the KSTAR tokamak”, *Nuclear Fusion* 41 1515 R&D Center, Korea Basic Science Institute, Taejeon, (2001).
2. A. R. Field, D. Dunai, N. J. Conway, S. Zoletnik, J. Sárközi, „Beam emission spectroscopy for density turbulence measurements on the MAST spherical tokamak” *Review of Scientific Instruments* 80, 073503, (2009).
3. D V Udupa, Sanjiva Kumar, „Optical design of a 10 meter remote viewing periscope using radiation hard glasses”, *Spectroscopy Division, Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai*, (2009).

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	3
1. Bevezetés.....	4
2. Specifikáció.....	8
2.1. Detektorok, kalibráció.....	8
2.2. Geometria.....	10
3. Konceptiók.....	11
3.1. Referencia koncepció.....	11
3.2. Funkcionális koncepció.....	12
4. A rendszerterv	14
4.1. Valós lencsék	14
4.2. A periszkóp optikai elemei	15
4.3. Az APD ág elemei.....	18
4.4. Az optimalizáció folyamata	18
4.5. A CCD ág.....	19
5. Optikai tulajdonságok vizsgálata	20
5.1. Szóródási folt mérete	20
5.2. Transzmisszió vizsgálata.....	21
5.3. Geometriai képanalízis.....	24
5.4. Pixelok közötti áthallás vizsgálata	26
6. Tesztelés	28
6.1. A tesztelés előkészítése: a tárgytér beállítása.....	29
6.2. A CCD ág tesztelése	30
6.3. Transzmisszió vizsgálata.....	31
6.4. Lencsék tesztelése	32
6.5. A prizma beállítása.....	33
6.6. Az első tükör beállítása	35
6.7. A köztes kép pozíciójának vizsgálata	36
7. Összefoglalás.....	37
8. Köszönetnyilvánítás	37
9. Felhasznált irodalom	38

1. Bevezetés

A Föld növekvő villamosenergia-szükségletének fedezéséhez a jövőben új energiaforrások feltárására lesz szükség. Egyik legígéretesebb lehetőségnek az atommagban tárolt energia kinyerése látszik, mely kétféleképpen valósítható meg: a vasnál nagyobb rendszámú atommagok hasításával, vagy kisebb rendszámú magok egyesítésével, a magfúzióval. Bár a magfúzióban szabadítható fel nagyobb energia, ma még csak a maghasadás elvét hasznosító erőművek működnek a gyakorlatban. A fúzió kontrollált fenntartására és az energia hatékony kinyerésére azonban jelenleg is sok kutatás folyik.

A fúzió megvalósulásához az atommagoknak le kell győzniük a Coulomb-gátat, amihez nagy hőmérséklet szükséges. Alacsony küszöbenergiája miatt a legígéretesebb energiatermelő reakció a deutérium és a trícium fúziója (1):



A kísérletek főként ennek a megvalósítására irányulnak [1].

A kívánt hőmérséklet a 100 millió °C körüli tartományba esik, ahol az anyag már plazmaállapotban van. A fúzióhoz szükséges hőmérséklet fenntartásához gondoskodni kell a nagy energiájú plazma részecskék összetartásáról. Ennek feltételét a Lawson-kritérium adja meg, miszerint a sűrűség (n) és az energia-összetartási idő (τ_E , az energiavesztés karakterisztikus ideje) szorzatára optimális hőmérsékleten fennáll a (2) egyenlet [2]:

$$n\tau_E > 10^{20} \text{ (sm}^{-3}\text{)} \quad (2)$$

A Lawson-kritériumnak kétféleképpen tudunk eleget tenni: tehetlenségi összetartással vagy mágneses összetartással. Tehetlenségi összetartás esetén egy kritikus sűrűséget kell elérni rövid ideig. Mágneses összetartás esetén a plazmát a mágneses tér tartja össze. Ekkor egy kritikus energiaösszetartási időt kell elérni alacsony sűrűség mellett [3]. Ezt a megoldást valósítják meg a toroidális mágneses terű sztellarátorok és tokamakok.

A KSTAR [4] (Korea Superconductive Tokamak Advanced Research) egy, a koreai Daejeon-ban található közepes méretű tokamak, mely 2008 óta üzemel (1. ábra). A KSTAR fejlesztőcsapata a kutatásokhoz szükségesnek találta egy nyalábemissziós diagnosztikai rendszer beépítését.



1. ábra: A KSTAR tokamak

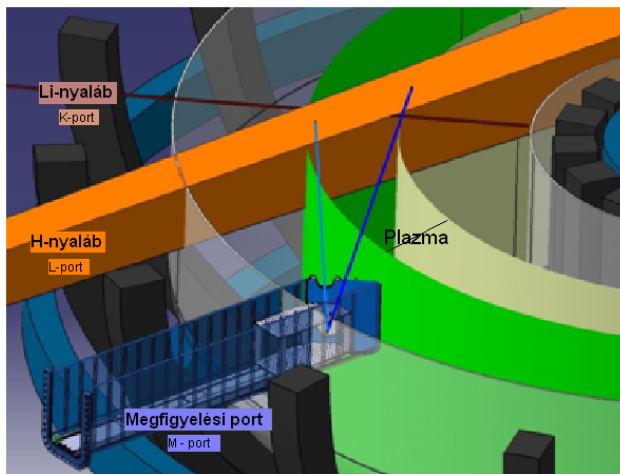
A nyalábemissziós diagnosztikai eljárások lehetőséget adnak a plazma sűrűségének mérésére. A mérési eljárás során egy nagyenergiájú semleges atomnyalábot lőnek a plazmába. A részecskék a plazmarészecskékkel kölcsönhatnak, gerjesztődnek, és fényt bocsátanak ki. A kibocsátott fény nyalábmenti intenzitáseloszlását fényprofilnak nevezik, mely a plazma sűrűségeloszlására enged következtetni [5]. Ezzel a turbulencia vizsgálható. A turbulenciát a tokamakokban maga a plazma szolgáltatja különböző instabilitásokon keresztül. Ez határozza meg a részecskék és a hő transzportját [6].

A tervek szerint a KSTAR-on végzendő nyalábemissziós diagnosztikánál két mérőnyalábot, egy lítium- és egy hidrogén-nyalábot fognak használni.

A Li-nyaláb keskeny és nem perturbálja a plazmát. 5-10 cm-es behatolás után ionizálódik, ezért ez leginkább a szélplazma vizsgálatára alkalmas. A lítium atomok relaxációjakor kibocsátott fény hullámhossza a látható tartományba esik (671 nm), és intenzitása arányos az elektronsűrűséggel; tehát segítségével az elektronsűrűség-profil meghatározható a plazma szélén [7;8].

A H-nyaláb egy fűtőnyaláb, mely széles és perturbálja a plazmát. Nagy energiája és a hidrogén izotópok magas ionizációs potenciálja miatt mélyre hatol a plazmába, így a plazma teljes keresztmetszetében alkalmas mérésre. A kibocsátott fény hullámhossza szintén a látható tartományban van (662 nm).

A Li-nyalábot a tokamak K-portján, a H-nyalábot a tokamak L-portján fogják belőni. A két nyaláb egy térfogatban keresztezi egymást, melyet az M horizontális porton keresztül figyelhetünk meg (2. és 3. ábra).



2. ábra: Nyalábemissziós spektroszkópia és a portok elhelyezkedése a KSTAR-on



3. ábra: A megfigyelési port (M), a berendezés helye

A nyalábemissziós diagnosztika beépítését egy közös koreai-magyar laboratórium keretében valósítják meg, mely együttműködés létrehozásáról a Magyar Tudományos Akadémia és a Korea Research Council of Fundamental Science and Technology 2010-ben állapodott meg [9]. Az első feladat a nyalábemissziós plazmadiagnosztika rendszer modellezése és a koncepciók tervek elkészítése volt. A tervezés szimulációs támogatását a BME NTI végezte [10].

2011-ben próbaméréseket végeztek [11], melyet követően a következő KSTAR mérési kampányt 2012 szeptemberére tervezték. Ehhez készült a dolgozatomban ismertetett optimalizált nyalábemissziós spektroszkópia mérőberendezés.

A tokamak mágneses terét nagy szupravezető tekercsek hozzák létre. Ezek hűtését a kriosztát biztosítja. A vastag kriosztáton keresztül a vákuumkamrához egy hosszú (2 m körüli) porton keresztül lehet hozzáférni. Az optikai rendszer feladata, hogy a mérni kívánt fényt a hosszú porton átvezetve a detektorokra juttassa. Erre a port és a tokamak méreteiből adódóan, egy periszkópszerű lencserendszer alkalmas [12]. A periszkóptervezés lényege, hogy a tárgyteret egy objektívvel leképezze, majd ezt az adott távolságon lencsesorral átvetítse az okulárig. Általánosan három elkülöníthető modulból áll: a fejből, a periszkóp csőből és az okulárból. A fej-modul a belépő ablakot tartalmazza, a fej-prizmát, vagy tükröt, az objektívet és esetenként egy távolságmérőt. A periszkóp cső tartalmazza az átvetítő lencsék és mezőlencsék sorozatát. Az okulár-modulban egy tükör vagy egy prizma után kerül a fény az okulár (azaz betekintő) lencsére. A periszkóptervezésben nemigen találtam viszonyítási pontot, mert nagyon kevés a témához kapcsolódó szakirodalom [13].

A tervezés során a geometriai optika két közelítését használtam: a koncepcionális tervek megalkotásához a paraxiális közelítést, a végleges rendszer optikai elemeinek megtervezéséhez a valós sugárátvezetést alkalmaztam.

A geometriai optika [14] a fény terjedésének olyan közelítése, mely a közeghatáron való áthaladást geometriai alakzatok – görbék segítségével írja le. Ezek a görbék, melyek mindenhol merőlegesek a hullámfrontra, a fénysugarak. A fénytörés és fényterjedés geometriai optikai leírásához szükségünk van arra, hogy a teret lokálisan síkhullámnak tekintsük. Ebből adódik a geometriai optika alkalmazhatóságának feltétele: az elektromos térerősségnek ne legyenek ugrásai, és az anyag térbeli változásai ne legyenek összemérhetőek a fény hullámhosszával. Az általunk tervezett optikai rendszerben ezek a közelítések igazak.

Az elsőrendű, paraxiális közelítés alkalmazhatóságának feltétele, hogy a fénysugarak az optikai tengely közelében haladjanak, azzal kis szöget zárjanak be. A felületeket síkkal közelíti és teljesíti az ideális leképezés feltételeit.

A valós sugárátvezetés a geometriai optika legfontosabb modellje. A sugárkövetés egy lépésekből álló algoritmus, mely során az optikai tervezőprogram felületről-felületre végigvezet egy sugarat az optikai elemeket modellező felületeken, és mindegyikre kiszámolja a sugár dőfspontjának magasságát és a kilépő sugár irányát. Ezzel modellezni tudjuk a leképezési hibákat is, például a defókusz, a kómát, az asztigmatizmust és a képmező-elhajlást. Ezt a közelítést használtam a fény terjedésének és törésének modellezésére a valós lencsék felületein.

Munkám során bekapcsolódtam a kutatócsoport munkájába, megismerkedtem az optikai tervezés folyamatával és a Zemax tervezőprogram használatával. Szakdolgozati munkám során összeállítottam a pontos specifikációt. Két koncepciót modelleztem le paraxiális közelítésben. Ezek közül a megfelelőbbet kiválasztva felépítettem a valós rendszer vázát. Ennek optimalizációjában is segítettem, de a megfelelő hibafüggvény összeállítását, a főbb optimalizációs lépéseket és a végső optimalizált rendszert témavezetőm dolgozta ki. Feladatom volt az optikai tulajdonságok vizsgálata: képanalízis, a szóródási foltok és a rendszer transzmissziójának vizsgálata. A szakdolgozatot a TDK munkám eredményeivel egészítettem ki, mely magába foglalja a CCD ág optimalizálását és analízisét. TDK dolgozatom továbbá bemutatja a rendszer helyszíni (Daejeon, Dél-Korea) installálásában végzett munkámat, mely során részt vettem a berendezés összeállításában. Az én feladatom

volt az optikai terv kezelése, szükséges analízisek elvégzése, és a méréseink dokumentálása.

2. Specifikáció

Az optikai tervezés első lépése a specifikáció összeállítása. Szükséges ismerni a geometriai követelményeket, melyeket a port méretei szabnak meg, a környezeti feltételeket és a leképezéstől elvárt tulajdonságokat (pl.: nagyítás, felbontás, hullámhossz-tartomány). A következő részben ismertetem a mérést végző detektorokat, és az ezek által megszabott követelményeket.

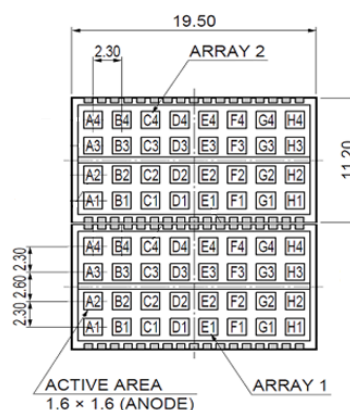
2.1. Detektorok, kalibráció

A látható tartományba eső hullámhosszak detektálásához három detektort fognak használni: egy lavinadióda (APD, Avalanche Photodiode Detector) kamerát [15], egy CCD-t (Charge Coupled Device) [16] és egy PCD (Photoconductive Detector) sort optikai szálakkal.

Az APD kamera egy nagy érzékenységű félvezető elektromos berendezés (4. ábra), egy 8×8 pixeles kamera, melyet úgy fejlesztettek ki, hogy olyan speciális esetekben lehessen alkalmazni, amikor alacsony fényintenzitás mérése szükséges nagy sebességgel (μs -os felbontással). A detektor Hamamatsu S8550 típusú. A detektor pixel mérete nagy ($1,6 \times 1,6$ mm) (5. ábra). Az érzékelő a teljes tárgytérnek csak egy részletét látja, látóterét szkenneléssel lehet változtatni. A detektor által megfigyelt terület behatárolását a beépített intenzív kalibrációs fények segítik.



4. ábra: Az APD kamera



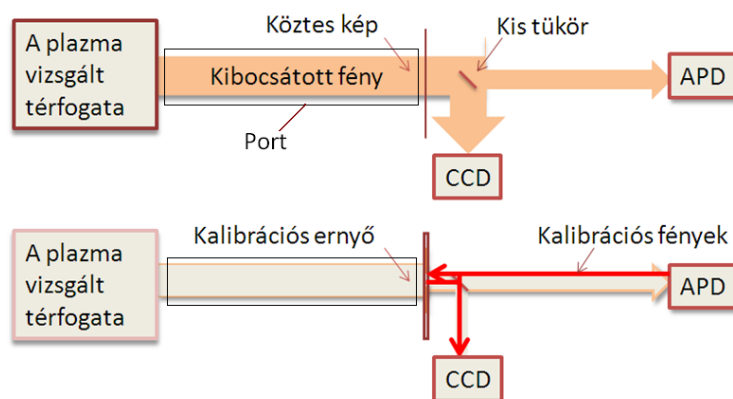
5. ábra: A detektor dimenziói és a pixelek elrendezése a detektoron (a méretek mm-ben vannak megadva)

A CCD a teljes tárgysteret látja. A detektor mérete: 6,4×4,8 mm, pixelszám: 640×480. A kamera ellenálló a mágneses térrel szemben. Gyenge időbeli, de jó térbeli felbontással a teljes nyalábot monitorozza.



6. ábra: A CCD kamera

A CCD segítségével végezhető el az abszolút térbeli kalibráció. Ehhez egy jó felbontású köztes kép szükséges a teljes tárgyról. A kalibráció során – amikor nincs plazmakisülés – a CCD-vel a vákuumkamra belső terét figyeljük meg. A berendezésnek a CCD által a vákuumkamrában látott, ismert pozíciójú elemekhez képest való relatív elhelyezkedéséből a berendezés pontos helyzete meghatározható. Ezt követően a köztes kép síkjába egy kalibrációs ernyőt helyezünk. Az APD kalibrációja a négy kalibrációs LED intenzív fényének felgyújtásával végezhető el. Ezek a fények leképeződnek az ernyőre, amit a CCD is lát, ha az APD és a CCD ága csak az ernyő/köztes kép után – egy kis kicsatoló tükörrel – válik szét (ld. 7. ábra). Az APD pozíciója és nagyítása az ernyőre leképezett kalibrációs fények foltjainak elhelyezkedéséből számolható. Ezzel megvan a CCD és az APD közti keresztkalibráció. Mivel a CCD helyzete a berendezéshez kalibrált, egyszerre megvan az APD abszolút térbeli kalibrációja is.



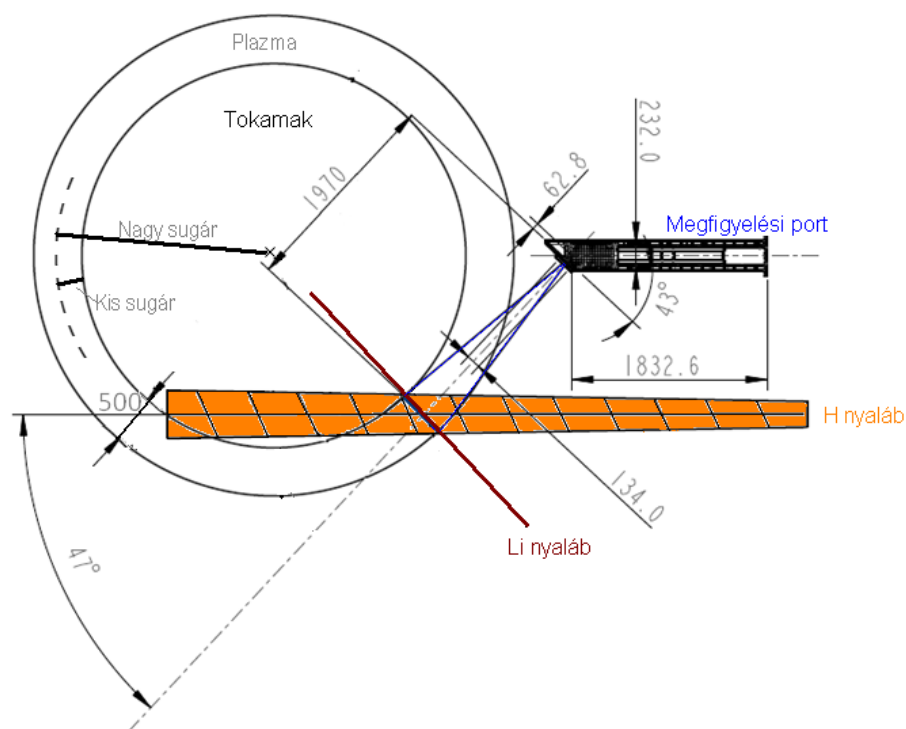
7. ábra: Az CCD és az APD keresztkalibrációjának folyamata

A PCD fotokonduktív detektorok használatának célja, hogy egyszerre tudjunk gyors mérést végezni a plazma két különböző tartományában. Ez lehetővé teszi, hogy a

magplazma és a szélplazma transzportfolyamatainak kölcsönhatását vizsgáljuk. Rendelkezései és képességei az APD-hez hasonlóak, de telepítésére csak később kerül sor.

2.2. Geometria

A nyalábemissziós diagnosztikai berendezésnek a KSTAR kutatócsapata az M port alsó nagy horizontális ablakát jelölte ki. Az intenzív neutron sugárzás miatt, ld. (1), a detektorokat a porton kívül neutron-árnyékolással körülvéve kell elhelyezni. Ehhez számottevő helyre van szükség, amit már az optika tervezésekor figyelembe kellett venni.



8. ábra: A tokamak vízszintes keresztmetszete

A 8. ábrán látható a tokamak vízszintes keresztmetszete. A tórusz alakú vákuumkamra függőleges keresztmetszete kör, melynek teljes (vízszintesen 500 mm-es) átmérőjének képét kell átvetíteni a porton kívülre, amely után a CCD és az APD ág szétválhat. A leképezendő tárgy egy 500×116 mm-es rész a plazmából, melyből érkező fénysugarak a port vízszintes síkjával 9,7°-ot zárnak be.

A CCD a teljes tárgysteret látja, míg az APD által látott tárgy méretét a specifikáció szerinti 10 mm-es tárgytérbeli felbontásból számítottuk: Ha 10 mm képződik le a pixel oldalára (1,6 mm), akkor a detektor oldalának felére (9,2 mm) $T = \frac{9,2 \text{ mm} \cdot 10 \text{ mm}}{1,6 \text{ mm}} = 58 \text{ mm}$ képződik le. Ez tehát az APD látószöge által meghatározott radiális tárgyméret. A tárgytér többi részét az APD-re egy szkennelő tükör segítségével lehet leképezni. A specifikációs paramétereket az 1. táblázatban foglaltam össze.

1. táblázat: Specifikációs paraméterek

Teljes tárgymagasság (radiális)	250 mm	
Távolság az ablaktól	1970 mm	
Tárgytéri numerikus apertúra	0,034	
Belépő pupilla átmérő	134,0 mm	
Port átmérő	232,0 mm	
Port hossz	1832,6 mm	
Hullámhossz tartomány	662 nm, 671 nm	
Interferencia szűrő sávszélesség	670,8±0,98 nm	
	CCD ág	APD ág
Tárgymagasság (radiális)	250 mm	58 mm
Tárgytérbeli felbontás	0,8 mm	10 mm
Pixelszám	640×480	8×8
Pixelméret	n.a.	1,6×1,6 mm
Pixel periódus	9,9 μm	2,3 mm
Képtéri numerikus apertúra	0,34	0,69

A H-nyaláb vizsgálatakor a 662 nm-es hullámhossznak megfelelő, a Li-nyaláb vizsgálatakor a 671 nm-es hullámhossznak megfelelő keskenysávú sáváteresztő szűrőt kell a detektorok elé helyezni, hogy spektrálisan leválasszuk a vizsgált hullámhosszat a szennyező vonalaktól és a plazma más részeiből jövő sugárzástól. Ez az elem egy dielektrikum rétegekből álló speciális interferenciaszűrő, így a merőlegeshez képest csak maximum $\pm 5^\circ$ -os térszögben érkező fénynyalábokra működik. Ezért megfelelő helyet kell biztosítani számára az optikai rendszerben, melyben a sugármenet telecentrikus, és a beesési szögek kellőképpen kicsik. Az optika transzmissziójának célértéke 50%, de elvárás szerint minimum 30%.

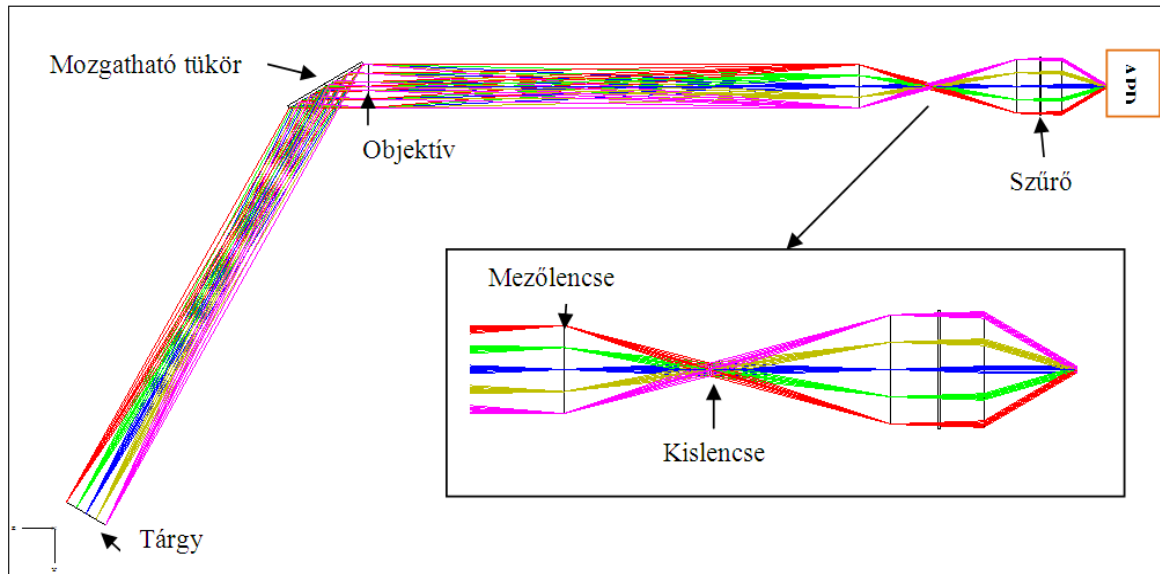
3. Konceptiók

Az ismertett specifikációra két alapkoncepciót dolgoztam ki: a referencia koncepciót és a funkcionális koncepciót.

A terveket a Zemax optikai tervezőprogrammal készítettem, a koncepcionális terveket ideális (paraxiális) lencsékkel valósítottam meg.

3.1. Referencia koncepció

A referencia koncepció (9. ábra) által megvalósított rendszer hasonló a 2011-es próbamérések során használt elrendezéshez [17].



9. ábra: Referencia koncepció

A Zemax-ban az ideális lencsék vastagságát (következő felülettől mért távolságát), félátmérőjét és fókusz távolságát állítottam be, a specifikációs paramétereknek megfelelően. A fókusz távolságot a leképezési törvény alapján számoltam:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{t} + \frac{1}{k} \quad (3)$$

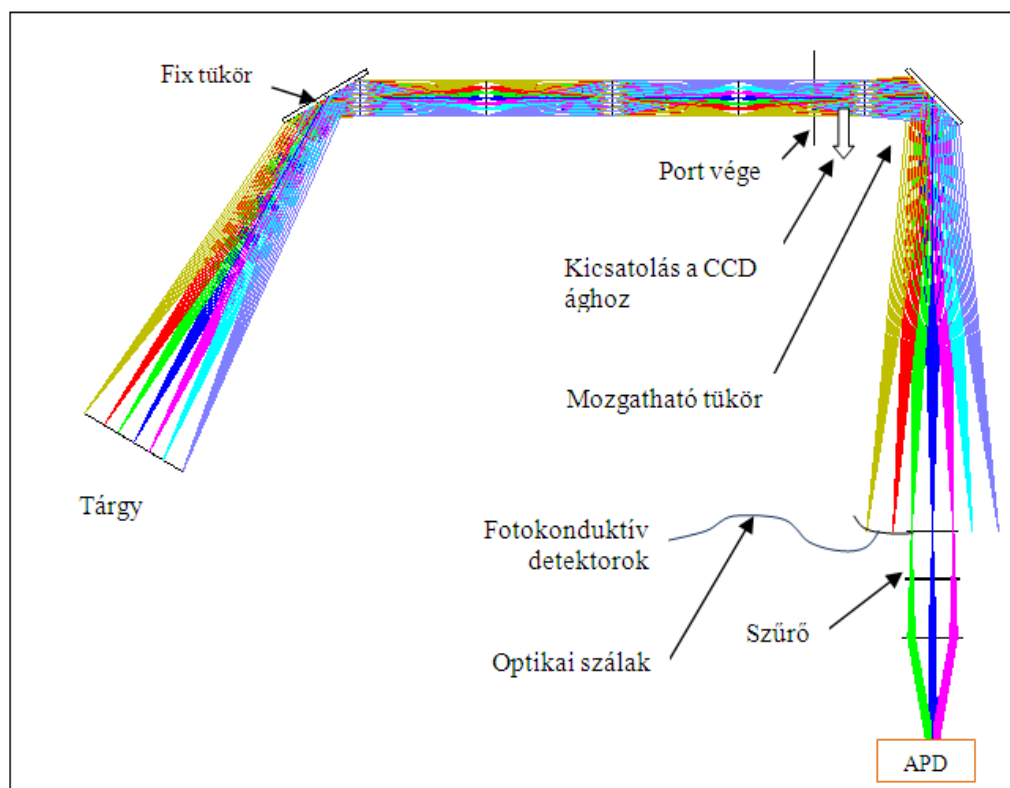
ahol f a fókusz távolság, t a tárgytávolság, k a képtávolság. A mozgatható tükör utáni objektív befördítja a fénykúpokat úgy, hogy az apertúra sugár a port falával legyen párhuzamos és egy (radiálisan) 75 mm-es képet hoz létre. Ennek a képnek a síkjában egy kis fókusz távolságú mezőlencse található. Egy kis átmérőjű objektívlencse nagyítja fel a képet a fénykúpok kúpszögét kellően lecsökkentve, hogy aztán egy következő mezőlencse után létrejöjjön az a tartomány, ahová a szűrő elhelyezhető. Itt a sugármenetek telecentrikusak. A szűrő utáni lencse a fényt a megfelelő kúpszögbe fordítja, és a zoomos objektívre, vagy más, az APD-re képező elemre vetíti. A vizsgált térfogatot a tükör mozgásával lehet végigszkennelni.

A koncepció előnye az egyszerűsége: kevés lencséből megvalósítható. Hátránya, hogy így csak egy detektor, az APD lenne használható, viszont a specifikáció szerint szükség van mind a három detektorra.

3.2. Funkcionális koncepció

Kidolgoztam egy további koncepciót, amelyben mindhárom detektorral történő mérés lehetséges. Mivel a CCD-nek a kalibrációhoz a teljes tárgyszeret látnia kell, ezért az első tükör nem lehet szkennelő tükör, hanem csak rögzített. Az optikai rendszer (ld. 10. ábra)

két részből áll. Az első rész egy periszkópszerű lencserendszer, mely objektívek és mezőlencsék sorozatából áll, és a radiálisan 250 mm-es tárgyat leképezi a porton kívülre. A CCD-ágak a port végén létrehozott köztes kép után lehet fényt kicsatolni.

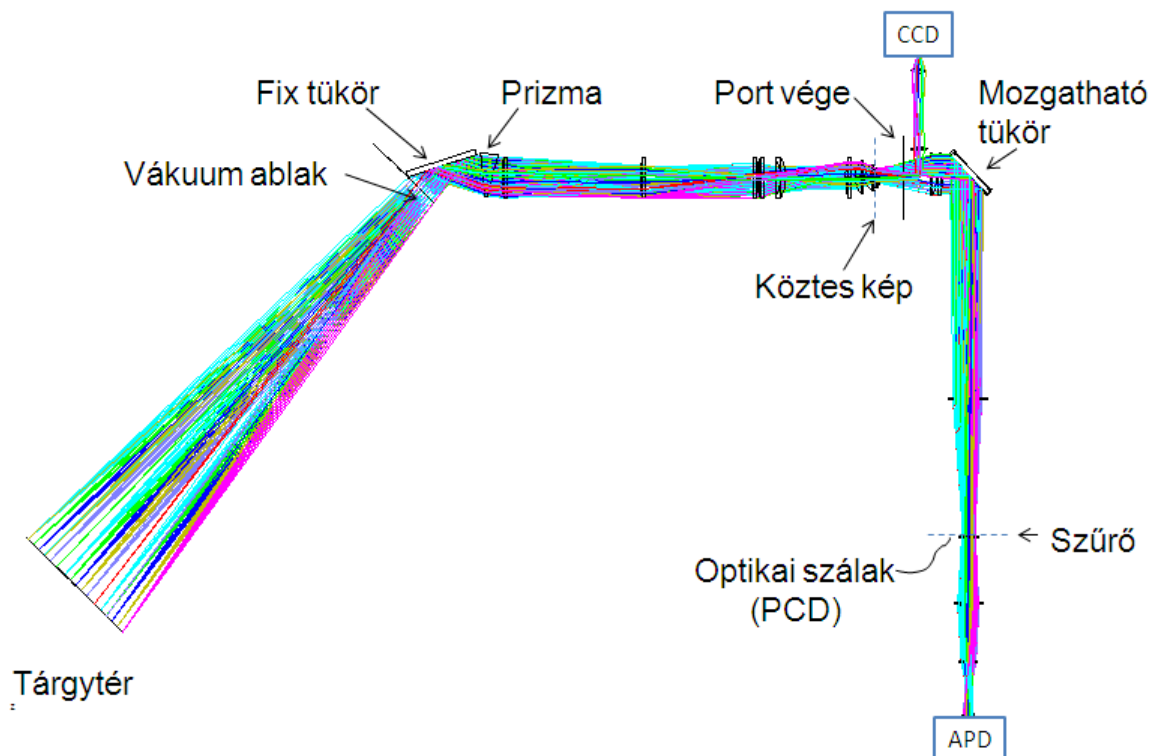


10. ábra: Funkcionális koncepció

A rendszer második része az APD-ág, aminek első eleme egy mozgatható tükör, mely már a porton kívül helyezkedik el. Ezzel ki lehet választani azt a tárgytér-részletet, amit az APD-ra képezünk. A szűrő számára megfelelő szög eléréséhez szükséges nagyított kép a teljes tárgytérről létrejön, viszont az APD csak egy – adott tükörállásnak megfelelő – tartományt lát. Az APD előtti optika mellé helyezve az optikai szálakat, a tárgytér nem az APD-re képezett részeiből jövő fényt a fotokonduktív detektorokkal történő mérésre lehet használni.

4. A rendszerterv

A következő fejezetben a funkcionális koncepció valós lencsés realizálását fogom bemutatni. Amint az a 11. ábrán látható, az ideális rendszerhez képest jóval összetettebb, mivel az ott szereplő paraxiális lencsákat csak 2-3 elemű csoportokkal sikerült kiváltani.



11. ábra: A rendszerterv

4.1. Valós lencsék.

A valós lencsés rendszer felépítésekor gömb felületű lencsákat használtunk.

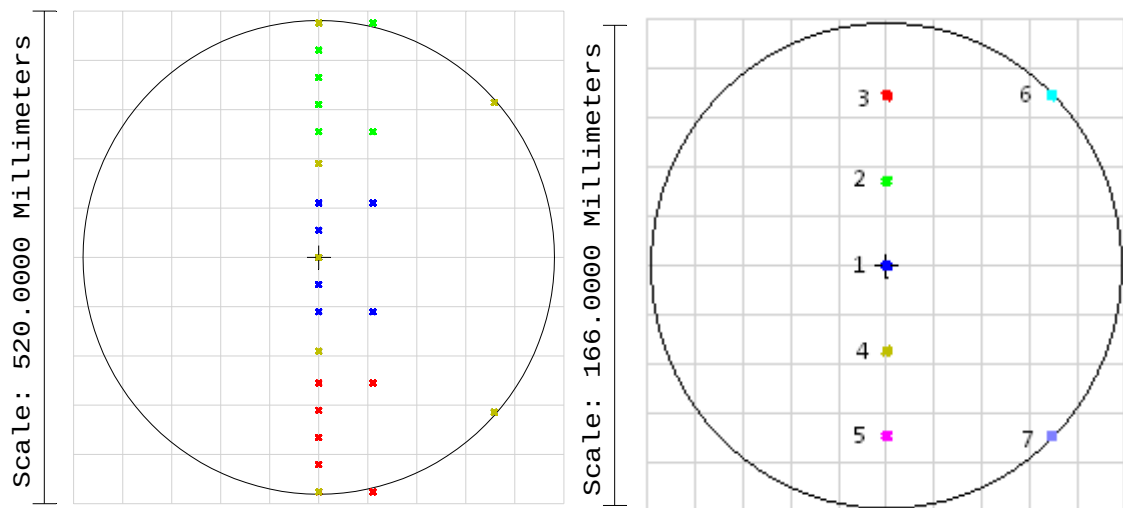
A lencsék üvegét a Schott katalógusból választottam gyárthatósági szempontokat figyelembe véve. Mivel a geometriai aberrációk erősen csökkenthetők a törésmutató növelésével, ezért a periszkóp-részben az N-SF56 típusú, relatíve nagy törésmutatójú üveget választottam. Az APD-ágban és a CCD-ágban levő lencsék anyaga SFL57, a prizma anyaga pedig a magas Abbe-számú (azaz alacsony diszperziójú) BK7G18. A lencsákat végül a kínai AGOptics gyártotta, így a rendszert a Schott üvegek kínai megfelelőjére kellett átoptimalizálnunk.

2. táblázat: Alkalmazott üvegtípusok

	Schott üveg	Kínai megfelelője
Prizma	BK7G18	HK9L
Periszkóp-lencsék	N-SF56	ZF51
APD, CCD ág	SFL57	HZF52A

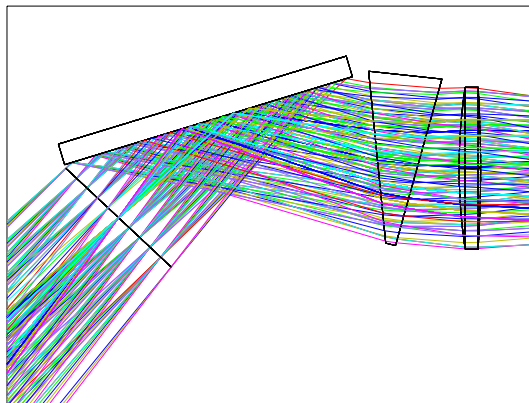
4.2. A periszkóp optikai elemei

Y-irányban (a tokamak vízszintes tengelye) négy különböző konfigurációban vettünk fel tárgypontokat: az APD látószögének megfelelően a tokamak kis sugarának szélén, belsején és egy köztes helyzetben radiálisan 58 mm-es szakaszon egyenletesen, és a CCD látószögének megfelelően a radiálisan 250 mm-es teljes tárgytéren egyenletesen. A tárgypontokat x-irányban kiterjesztettük 58 mm-el a 12.a) ábrának megfelelően.



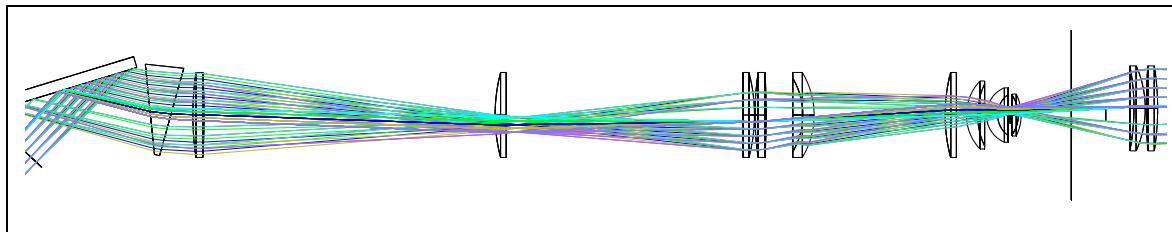
12.a) ábra: Tárgypontok felvétele a konfigurációk szerint színeve: kék: 1-es (APD látóterének köztes helyzete); piros: 3-as (melyben az APD a plazma szélét nézi); zöld: 2-es (APD a plazma belsejét nézi); sárga: 4-es (a CCD nek megfelelően a teljes tárgytéren felvett pontok). 12.b) A tárgypontok számozása egy konfigurációban

A tárgypontokból induló sugarak a 134 mm átmérőjű belépő pupilla után az első – fix – tükörré érkeznek. A belépő pupilla egyben az apertúra rekesz. A fix tükör után egy prizma lett elhelyezve. Ennek oka, hogy a vinyettálás csökkentésének érdekében az első tükör középpontját az optikai tengelyből eltolva helyeztük el. A prizma megtöri a nyalábot, és az optikai tengelyt a port tengelyébe tolja. A prizma után a 150 mm-es átmérőjű objektív található (13. ábra).

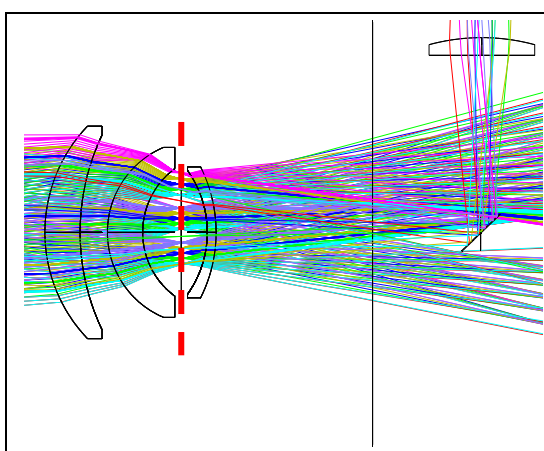


13. ábra: A periszkóp fej-modulja

A periszkóp lencséinek feladata, hogy a kalibráció számára egy jó minőségű képet hozzanak létre a port végénél. A prizma képsík-ferdítő hatásának következtében a fősugarak nem az optikai elemek középpontján haladnak át (ld. 14. ábra), azaz nem definiálható egy optikai tengely.



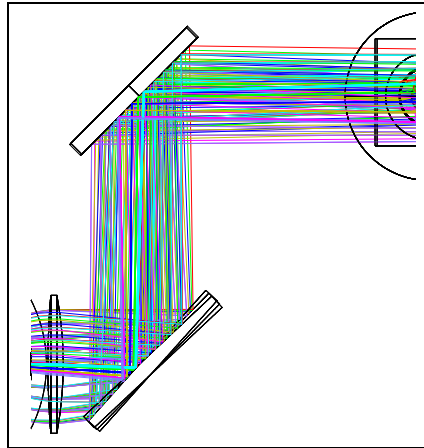
14. ábra: A periszkóp



15. ábra: Optikai elemek a port végén, a köztes kép (piros szaggatott vonal) és a CCD ág kicsatoló tükré

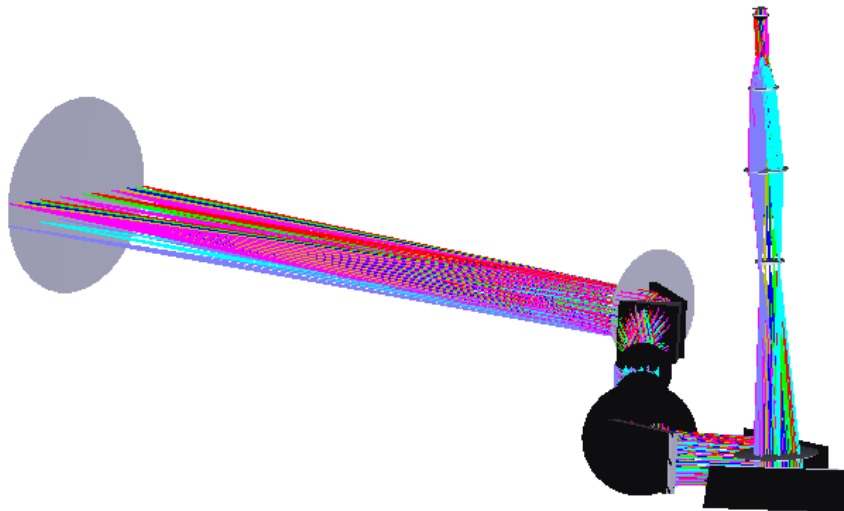
A 15. ábrán látható a létrehozott köztes kép, melynek síkjában a kalibrációs ernyő elhelyezhető. A függőleges fekete vonal a port végét jelzi. A porton kívül kialakítottunk egy olyan térrészt, melyben a különböző tárgypontokból érkező sugarak metszik egymást (kép esetén az azonos tárgypontból érkezők metszik egymást, itt éppen ellenkezőleg történik: a sugarak teljesen keverednek). Itt van lehetőség a CCD számára fényt kicsatolni, hiszen a köztes kép után, a porton kívül van, ezáltal hozzáférhető, valamint a sugarak keveredésének köszönhetően a kicsatoló tükör kitakarása nem rontja az APD-re való leképezés minőségét. Ekkor a kép csak az intenzitásából fog veszíteni, hiszen a kicsatoló tükör minden tárgypontból nagyjából egyforma számú sugarat takar ki.

A CCD és APD ág szétválása után az APD ágba elhelyeztünk egy szkennelő tükröt, mellyel az APD látószögét változtatni lehet. A Zemax tervben az APD ág mindhárom konfigurációjának egy-egy tükörállást feleltettünk meg (ld. 16. ábra).



16. ábra: A szkennelő tükör három különböző állás esetén

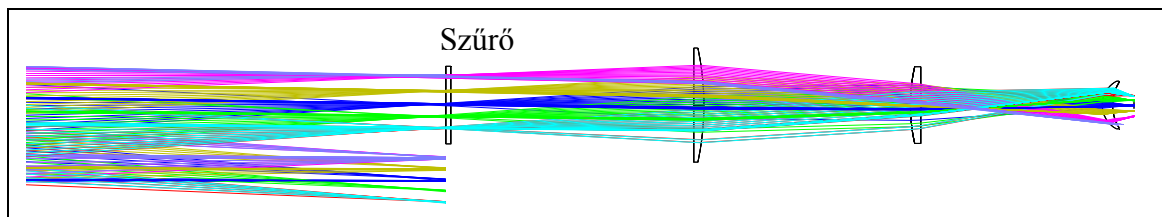
A szkennelő tükör a periszkóp kilépő pupillájában van, ennek köszönhetően a különböző konfigurációk fősugarait ugyanabba az optikai tengelybe tudja tükrözni. Egy fix tükörrel ezután a tokamak falától elvezetjük a sugarakat, majd egy újabb fix tükörrel függőlegesen felfelé tükrözzük őket az APD ágba (17. ábra). Ez helyproblémák és a neutron árnyékolás elhelyezése végett szükséges.



17. ábra: A függőlegesen álló APD ág

4.3. Az APD ág elemei

Közvetlenül a felfelé tükröző tükör után található lencse feladata, hogy telecentrikus sugármenetet hozzon létre a szűrő számára. A lencse 75 mm-es főtávolságára lehetőséget tesz, hogy egy szélső konfigurációnak megfelelő szkennelő tükör-állásnál, a plazma közepéről is kép jöjjön létre a szűrő síkjában. Ezt a képet használják később az amerikai detektorok optikai szálainak (18. ábra). A szűrőt követő három lencse leképezi a fényt az APD detektorra.



18. ábra: Kép a szűrő síkjában (APD a szélplazmát látja)

4.4. Az optimalizáció folyamata

Az optimalizáció során egy automatikus folyamatban a leképezés minőségét iteratív módon javítjuk azon szerkezeti paraméterek változtatásával, melyeket változónak tettünk meg. Változónak beállítottuk a felületek sugarát, távolságát, dőlését és decentráltóságát. A hibafüggvény összeállításakor ügyelnünk kellett arra, hogy a specifikáció minden szempontja szerepeljen és a megfelelő súllyal járjon hozzá a hibafüggvényhez. [19]

Az optimalizáció során a teljes rendszert három részre lehetett bontani. Külön optimalizáltuk a periszkóp részt a köztes képre, majd ezeket a paramétereket rögzítve az APD ágat, végül a CCD ágat.

Az ideális lencsés modellben először az ideális lencsét valós lencséből álló dublettekre cseréltem. Ekkor a témavezetőm a szóródási folt méretére felvett hibafüggvényt kiegészítette a többi specifikációs paramétert megkötő operandusokkal. Első lépésben csak a lencsék görbületi sugarára optimalizáltunk, majd a lencsék közötti távolságot is változónak tettük meg. A fény átjutását azzal biztosítottuk, hogy a lencsék átmérőjét automatikusra állítottuk, és a hibafüggvényben felületenként egy operandussal kényszerítettük, hogy a port átmérőnek megfelelően 150 mm-esek, vagy kisebbek legyenek. További optimalizációval helyet hoztam létre a CCD ág kicsatolásához. Témavezetőm ezt követően hozzáadta a CCD ágat, mint egy negyedik konfigurációt. További optimalizáció során sikerült a periszkóp részben csökkenteni a lencsék számát, és egyszer három és egyszer két lencsét egyformává tenni, mely a gyártást megkönnyíti.

A mechanikát tervező mérnökkel történő egyeztetés után építettem be azokat a tükröket az APD ágba, amelyek biztosítják, hogy függőleges tengelyű legyen.

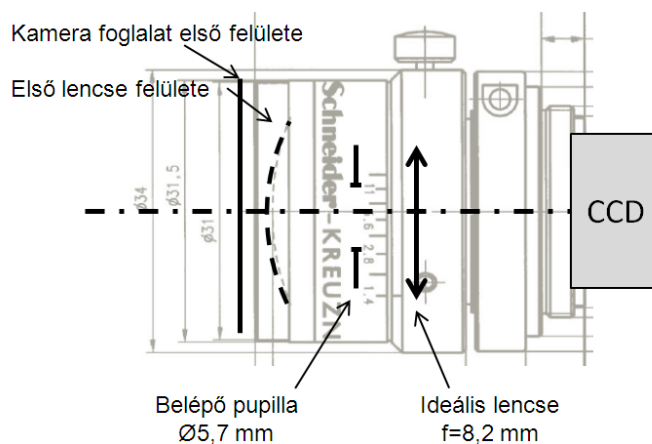
4.5. A CCD ág

A CCD ág optimalizálása az én feladatomból volt. A tervben a 4. konfigurációt tettem meg elsődlegesnek, hogy ezen végezhessem az optimalizációt.

A CCD kamera 640×480-as felbontásához illeszkedő leképező rendszert érdemes gyári lencserendszerrel megvalósítani, melynek tág a tárgytávolság tartománya (macro-objektív) és nagy a fényereje. Erre a Schneider-Kreuznach Cinegon (1.4/8.0) objektívet választottuk, melynek optomechanikai modellje a 19. ábrán látható.

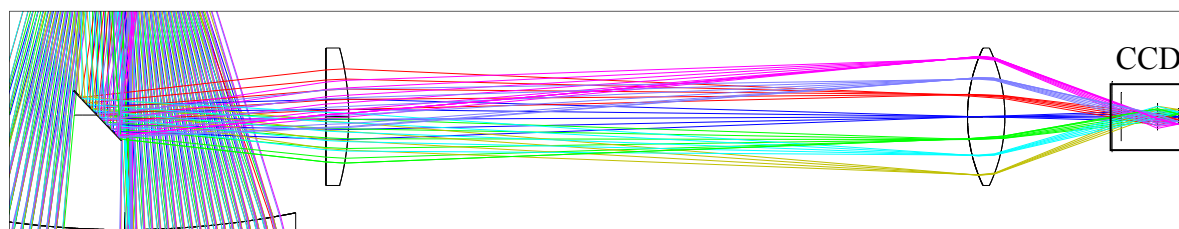
Mivel a fenti objektív tárgyszöge nem illeszkedett a periszkóp képteréhez, valamint az objektív belépő pupilláját sem lehetett közvetlenül a kicsatoló tükörhöz tenni, a kameraobjektívhez kiegészítő optikai rendszert terveztem. Az optimalizációhoz használt operandus készlet összeállításában célom a képminőség javítása mellett a lencseátmérők lehetőség szerinti csökkentése volt. Az optimalizáció során sikerült egy két lencséből álló rendszert kialakítani.

Beépítettem a modellbe az alkalmazandó objektívet az optomechanikai modellnek megfelelően. A főbb paramétereket az objektív adatlapjáról olvastam le és méréssel ellenőriztem. Az objektív fókusz távolságát megmértük: ez az adatlapon szereplő 8 mm helyett 8,2 mm-nek adódott. További mérésekkel meghatároztuk a belépő pupilla méretét és pozícióját, és az első lencse helyzetét az objektív elülső pereméhez képest. A belépő pupillát megfelelő kényszerekkel a CCD-ág kilépő pupillájába pozicionáltam. Számos iterációs ciklus lefuttatásával (ld. csillapított legkisebb négyzetek módszere [18]) létrehoztam az optimalizált elrendezést.



19. ábra: A CCD objektív optomechanikai modellje

Ezt követően a Zemax lencse-katalógusából az alkalmazott lencsékhez hasonló átmérőjű és effektív fókusz távolságú lencsét kerestem. A rendszer második lencsét egy a ROSS OPTICAL katalógusból vett kétszerdomború lencsére (L-BCX245) cseréltem. Nem volt az első lencsének megfelelő lencse a katalógusokban, azonban sikerült síkdomború lencsévé kialakítani, ami könnyen gyártható. A CCD ág végleges optimalizált modellje a 20. ábrán látható.



20. ábra: Az optimalizált CCD ág

5. Optikai tulajdonságok vizsgálata

5.1. Szóródási folt mérete [19]

A leképezés minőségét a szóródási folt méretével lehet jellemezni, használata a kis számítási igény miatt elsősorban az optimalizáció során praktikus. A szóródási folt az egy tárgypontról átvezetett valós sugarak képsíkkal vett döfpontjainak (sugár koordinátáinak) halmaza. A sugár koordinátákat a fősugár koordinátáihoz, vagy azok súlypontjához képest mérjük.

A súlypont koordinátája a valós képmagasságot (a képfolt helyét) adja meg. A szóródási folt mérete (sugara) egy szórás jellegű mennyiség, mely a súlyponttól való x és y irányú négyzetes eltérések átlagából számolható.

A Zemax által számolt szóródási foltok kiértékelésekor a súlypontra számolt folt-sugarakat tekintettem, 30-as sugársűrűséggel az APD ágban és 100-as sugársűrűséggel a CCD ágban. A szóródási foltok sugarait visszaskáláztam a nagyítással, hogy a tárgyterbeli felbontással összevethető mennyiséget kapjunk. A számolt értékek a 4. táblázatban találhatók.

A nagyítások értékét a 3. táblázatba foglaltam.

3. táblázat: A nagyítások értékei

	APD	Köztes kép	CCD
Tárgyméret/képméret	58/9,2	250/25,7	250/3,2
1/Nagyítás	6,30	9,73	78,13

4. táblázat: A szóródási foltok sugarai tárgypontonként, és a nagyítással visszaskálázott értékek

Szóródási folt sugara				
	Konfig.	Átlag (μm)	Max. (μm)	Követelmény
APD	1	483,1	553,4	max. 793 μm
	2	422,7	551,1	
	3	379,2	459,5	
Köztes kép		172,9	252,3	
CCD		13,1	18,7	15,4 μm
Nagyítással visszaskálázva				
	Konfig.	Átlag (mm)	Max. (mm)	
APD	1	3,0	3,5	max. 5 mm
	2	2,7	3,5	
	3	2,4	2,9	
Köztes kép		1,7	2,5	
CCD		1,0	1,5	1,2 mm

A specifikáció szerint elvárt tárgytérbeli felbontás 10 mm. Mivel a számolt értékek sugár jellegű mennyiségek, ezért a tárgytérbeli felbontást tekinthetjük radiálisan 5 mm-nek. Ezt az értéket egyik konfiguráció egyik tárgypontjához tartozó sugár sem haladja meg. Az egyes konfigurációban a legnagyobb a szóródási folt sugara, ami a képmezőhajlásnak a következménye. A legjobb minőségű kép a 2-es és 3-as konfigurációkban jön létre az APD-n. Ez nagyon előnyös, mivel a 2-es konfiguráció az, amiben az APD a plazma szélét nézi, s ez az, amit a végzendő mérések során jó felbontással szeretnének vizsgálni.

A CCD ágban a szóródási foltok sugarainak 50 μm -nél kisebbnek kellett lenniük a megfelelő felbontás eléréséhez, melyet a leképezés teljesít.

A szűrő síkjában létrejövő kép szóródási foltjainak átlagos sugara 919 μm .

A szóródási folt csak pontszerű tárgyak leképezéséről szolgáltat információt. Valódi, kiterjedt tárgyak vizsgálatáról az 5.3-as, képanalízisről szóló fejezetben lesz szó.

5.2. Transzmisszió vizsgálata

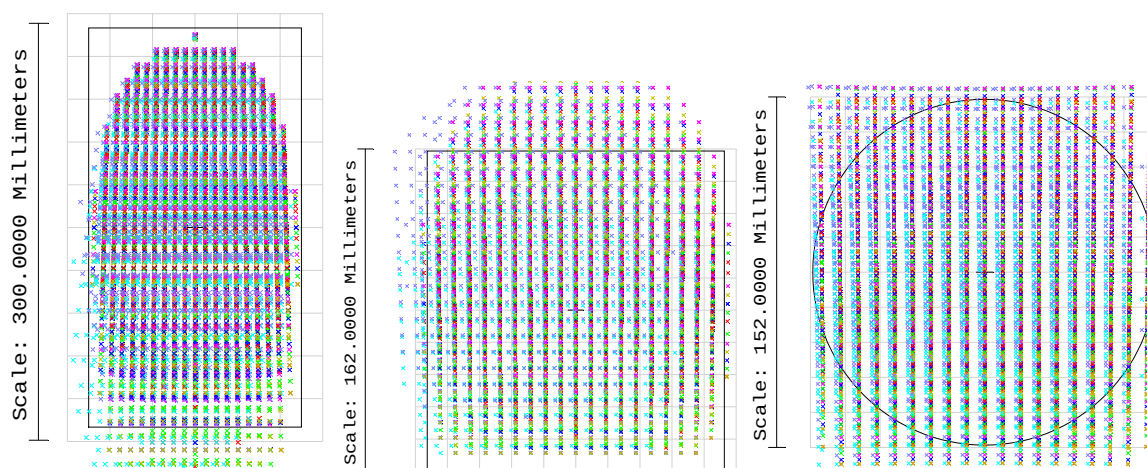
Az optikai rendszer fényvesztését a fellépő vinyettálás, reflexiós és abszorpciós jelenségek okozzák.

A vinyettálás mértéke a footprint diagramok vizsgálatával határozható meg. Vinyettálásról beszélünk, ha a nem tengelyen lévő tárgypontokból kiinduló fénynyalábokat nemcsak az apertúrarekesz korlátozza, hanem más lencsék apertúrái vagy foglalat alkatrészek is. Mivel az objektívet nem tudjuk a belépő ablakba helyezni, így nem tudjuk az összes fénysugarat begyűjteni, valamint a tükör méretét is korlátozza a port véges átmérője,

vinyettálás lép fel. A vinyettálás elvben növeli a diffrakciós folt méretét (hiszen egyik irányba a numerikus apertúra lecsökken), de itt ez nem játszik szerepet, mert a rendszer nem diffrakció korlátos, valamint csökkenti a rendszeren átjutó fény mennyiségét is a képtér széle felé csökkenő besugárzást eredményezve, mint azt a geometriai képanalízis is bizonyítani fogja. A Zemax segítségével a footprint diagramon egy felület alakját lehet ábrázolni, majd erre a felületre egy négyzethálóban kirajzolja a program a felületre érkező sugarakat.

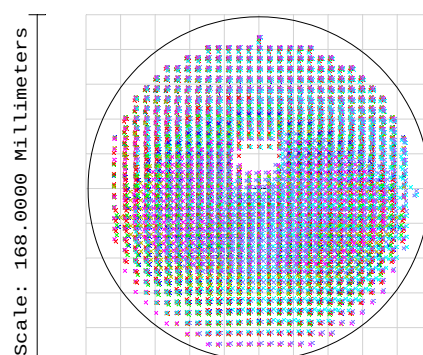
A négyzethálót a beállított sugár sűrűség paraméter határozza meg. A vizsgált felület előtti részrendszer által vinyettált sugarak nincsenek ábrázolva.

A port elején a tükör, a prizma első felülete és az objektív vinyettál (23 ábra).



21. ábra: Footprint diagram az első tükörön, a prizma első felületén és az objektív lencse első felületén

A periszkóp fej modulja (tükör, prizma, objektív) a sugarak 73 %-át eresztí át. A 24. ábrán látható a CCD ág kicsatoló tükre miatt fellépő vinyettálás, az optikai rendszer többi részén azonban nincs számottevő vinyettálás: a teljes optika a sugarak 68 %-át eresztí át.



22. ábra Footprint diagram a CCD ág kicsatoló tükre utáni lencsén, az APD ágban

A reflexiós jelenségek modellezéséhez antireflexiós vékonyrétegeket definiáltam a lencsék és tükrök felületeire. (Az üvegyanyagok belső abszorpcióját a Zemax az üvegyártó specifikációja alapján számolja.)

Mivel még nem volt ismert, hogy milyen vékonyréteg kerül a felületeken, ezért ideális rétegeket definiáltam. A rétegek paramétereit az 5. táblázat tartalmazza, ahol T-vel jelöltem az áteresztett, R-el a visszavert intenzitáshányadot.

5. táblázat: A definiált vékonyrétegek adatai

Név	T	R
KSTAR_AR	0,995	0,005
KSTAR_MIRROR	0	0,98

A KSTAR_MIRROR nevű réteget a tükrök felületére, a KSTAR_AR nevűt a lencsék két felületére állítottam be.

Ezt követően a reflexiós és abszorpciós veszteségek számítását egy-egy sugár átvezetésével végeztem el a Zemax segítségével. A vinyettálás miatt nem lehetett minden tárgypontból sugarat átvezetni, de a fősugár átvezetését több tárgypontra is elvégeztem, hogy azok átlagolásával pontosabb értéket kapjak (6. táblázat).

6. táblázat: Transzmisszió egy sugár átvezetésével

Konf.	Normalizált tárgypont koordináták	Transzmisszió	
		662 nm	670,9 nm
1.	(0;1)	0,626	0,634
	(0;0,5)	0,621	0,629
	(0;0)	0,619	0,628
	(0;-0,5)	0,622	0,63
	(0;-1)	0,628	0,636
2.	(0;1)	0,624	0,632
	(0;0,5)	0,621	0,629
3.	(0;-0,5)	0,628	0,636
	(0;-1)	0,642	0,649
Átlag		0,626	0,634

A vinyettálást figyelmen kívül hagyásával, csak a reflexiós és abszorpciós jelenségek figyelembevételével a transzmisszió 63%-os

Azt is láthatjuk, hogy a két vizsgált hullámhossz elég közel van egymáshoz, a transzmisszióban így nincs számottevő különbség. A fenti két analízis alapján a vinyettálás és a reflexiós és abszorpciós jelenségek figyelembe vételével a totális transzmisszió 42,8%-os.

A Zemax lehetőséget biztosít közvetlenül a totális transzmisszió meghatározására is. Ebben az egyes tárgypontokból kiinduló összes fénysugárra számol a program egy transzmisszió értéket, a vinyettálást, a reflexiós-abszorpciós jelenségeket és a Fresnel-reflexiót is figyelembe véve, a vizsgált hullámhosszakra átlagolva. A kapott értékeket a 7. táblázat tartalmazza.

7. táblázat: A tárgypontokra számolt totális transzmisszió

Konf.	Tárgypont	Transzmisszió	Átlag
1.	1	0,553	0,533
	2	0,548	
	3	0,530	
	4	0,550	
	5	0,532	
	6	0,509	
	7	0,508	
2.	1	0,415	0,413
	2	0,391	
	3	0,370	
	4	0,442	
	5	0,467	
	6	0,366	
	7	0,440	
3.	1	0,409	0,372
	2	0,436	
	3	0,462	
	4	0,381	
	5	0,358	
	6	0,417	
	7	0,140	

A különböző konfigurációkra átlagolva a totális transzmisszió az APD ágban 43,9%-os. A kapott két totális transzmisszió érték eltérése kicsi. A pontos értéknek a 43,9%-os transzmisszió értéket lehet tekinteni.

Hasonló számítás alapján, csak a vinyettálás hatását figyelembe véve, a transzmisszió a CCD ágban 1,4%-os. A totális transzmisszió a tárgypontokra átlagolva 1%-os.

5.3. Geometriai képanalízis

A geometriai képanalízis a leképezés minőségét nem számszerűen jellemzi, hanem egy ideális tárgy képét adja meg, melyen a felbontás, torzítás és a vinyettálás mértéke megbecsülhető. Az ideális tárgy modelljét a Zemax egy IMA fájlban tudja kezelni, melyben a szöveg első sorában egy szám áll, indikálva a fájl méretét pixelekből. Az ezt

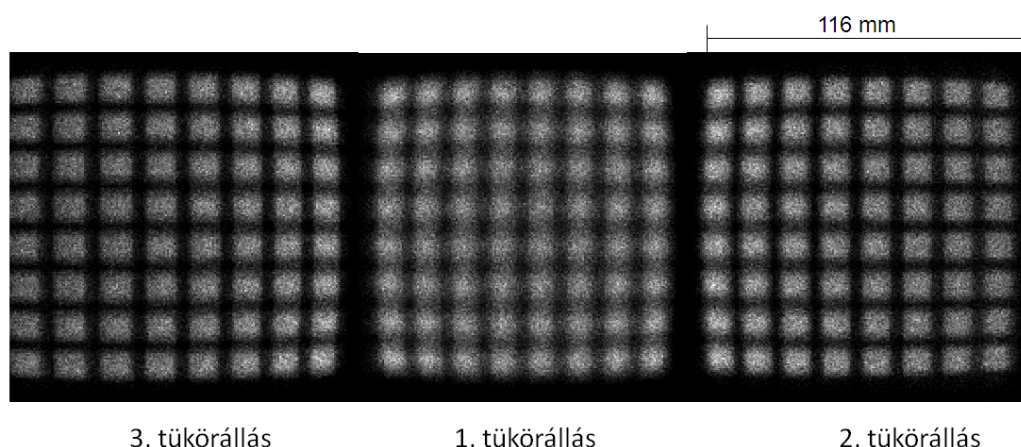
követő sorokban és oszlopokban álló számok a pixel adatok – pixelenként egy karakter – melyek megadják, a pixel intenzitását egy 0 és 9 közötti számmal. 0-s az a pixel, amiből nem lép ki egy sugár sem.

Ideális tárgyként az APD és a CCD detektor pixelszerkezetét modelleztem le. Az APD esetén a pixelek intenzitását 1-re állítottam, a pixelek közötti sávokat sötétnek hagytam. Az így létrehozott ideális tárgy mérete 116×116 mm-es, mivel az APD által látott tárgyméret radiálisan 58 mm. A CCD esetén egy négyzethálót vettem fel a 640×480 pixelnek megfelelően. Itt a négyzethálónak állítottam be 1 intenzitást. Az ideális tárgy mérete 500×380 mm.

A beállításokat az 8. táblázat tartalmazza, és a következő ábrákon láthatóak a kapott eredmények.

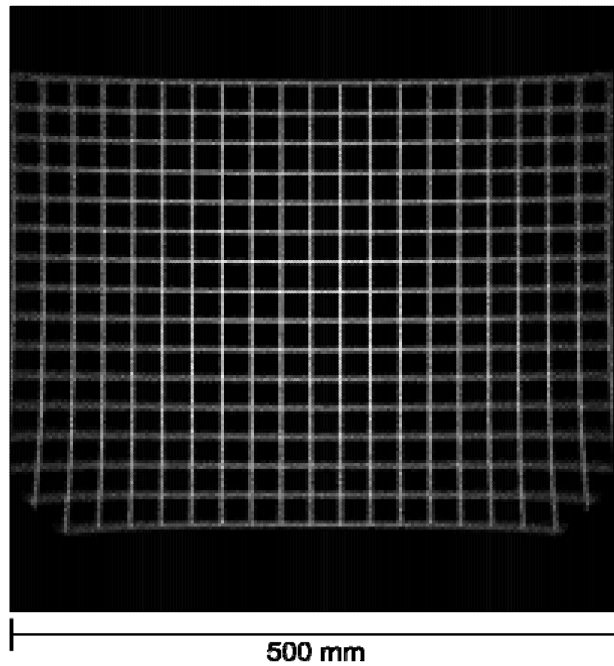
8. táblázat: A geometriai képanalízis beállításai

	Tárgyméret (mm)	Képméret (mm)	Rays×1000	Number of pixels
APD	116	18,4	1000	200×200
CCD (köztes kép)	500	51,73	1000	200×200
CCD	500	6,4	1000	200×200

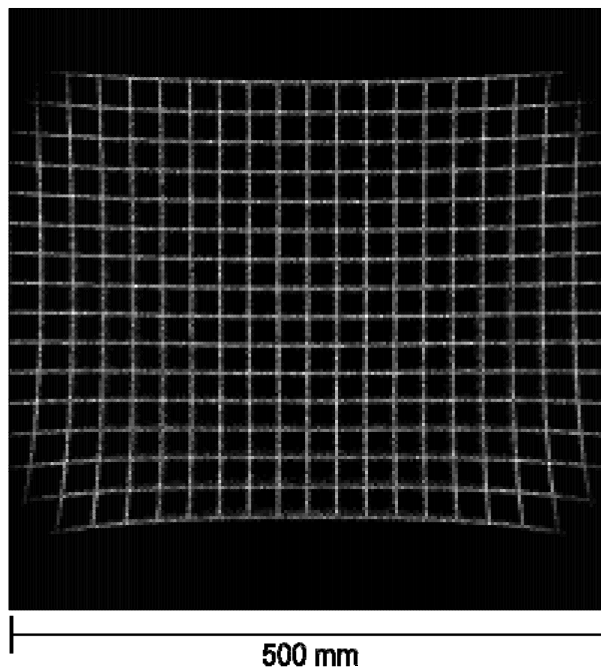


23. ábra: Geometriai képanalízis az APD ágba

Az APD képében (23. ábra) megfigyelhető intenzitás csökkenés a kép széle felé, amit a vinyettálás okoz. Mint azt a szóródási folt elemzése is megmutatta, a képminőség a szélső konfigurációkban jobb. Egy kis torzítás vehető még észre. Ugyanígy a köztes képen és a CCD ágba is (24. és 25. ábra) jól látható a vinyettálás hatása és a kis torzítás, de a kép elég jó felbontású.



24. ábra: Geometriai képanalízis a köztes képen, a 4. konfigurációban

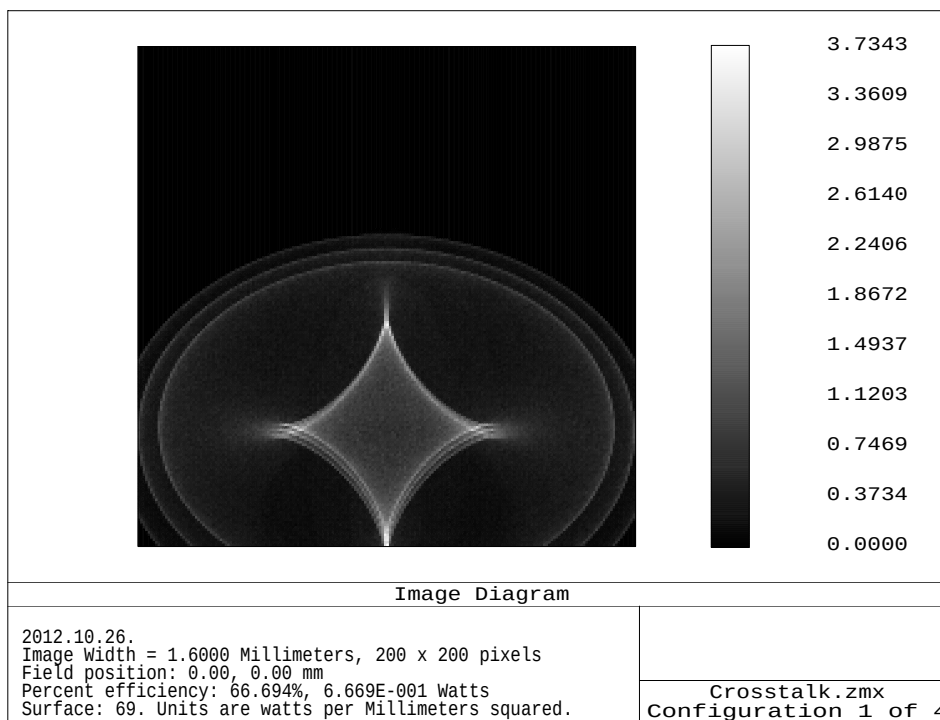


25. ábra: Geometriai képanalízis a CCD ágban (4. konfiguráció)

5.4. Pixelek közötti áthallás vizsgálata

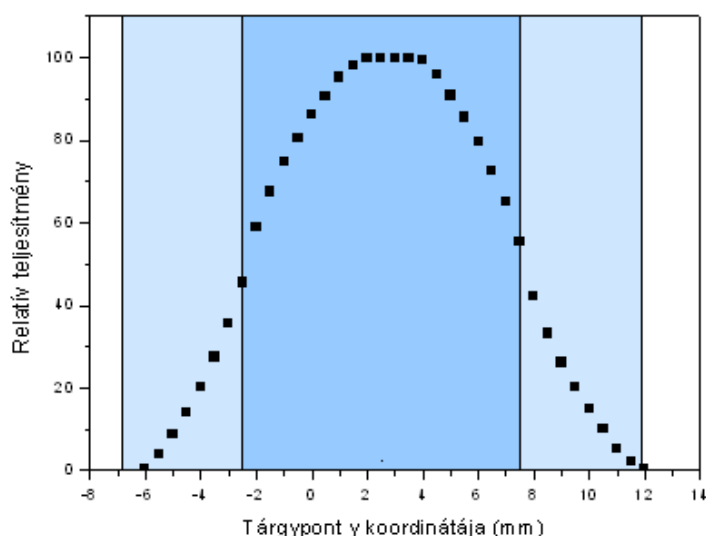
Szintén a TDK munka részeként megvizsgáltam egy tárgypontból az APD detektor pixel-felületre érkező intenzitást a tárgyponthelyzetének függvényében, mivel ez közvetlen információt szolgáltat a pixel melletti tárgytér-részből érkező zavaró fényteltjesítményről (áthallás).

Ezt a geometriai képanalízis segítségével végeztem el. Kiterjedés nélküli tárgyat vettem fel, a képsíkra pedig egy 1,6 mm-es oldalú négyzetes apertúrát helyeztem. Ezzel a megkaptam a rendszer pontválasz-függvényét (26. ábra).



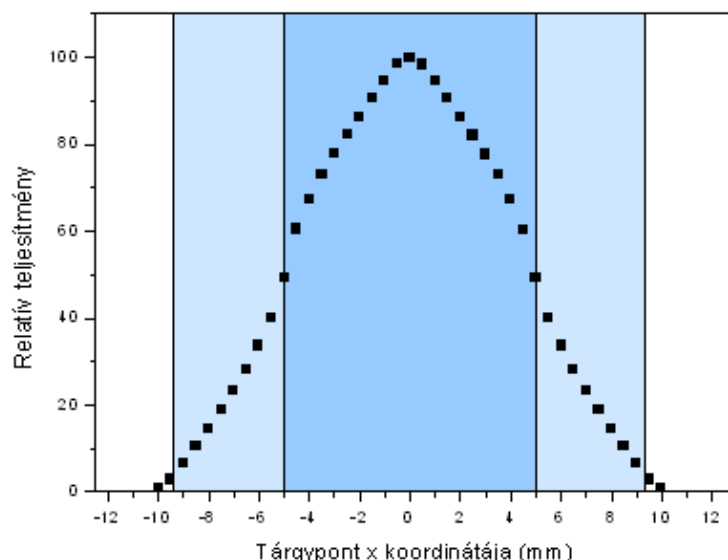
26. ábra: Pontválasz-függvény vizsgálata – szóródási folt fényeloszlása egyetlen APD pixelen

A program kiszámolja a képsíkra eső relatív teljesítményt, melyet a tárgy pont helyzetének függvényében ábrázoltam (27. ábra). A vizsgálatot az 1. konfigurációban végeztem el y (vízszintes) és x (függőleges) irányban. A teljesítményt itt csak a vinyettálás csökkenti.



27. ábra: Relatív teljesítmény vizsgálata egy tárgy pont y koordinátájának függvényében; sötét kékkel jelölve azt a tartományt, mely egy pixelre képeződik, fehér a szomszéd pixelre képeződő terület

Egy pixelre elvileg 10 mm képződik le a tárgytérből (az ábrán sötét kékkel jelölve). Látható, hogy 18,5 mm-es y-irányú szakaszból is érkezik nem nulla fénytjeljesítmény. A szomszéd pixelre azonban (az ábrán fehér rész) gyakorlatilag nincs áthallás. Megvizsgáltam ugyanezt x irányban is (28. ábra). Figyeltem arra, hogy x-irányú mozgás esetén a tárgy pont y koordinátája végig a maximális intenzitásnál legyen ($y=3,5$ mm). Az analízis szerint egy 20 mm-es x irányú szakaszcól esik egy pixel felületre nullától különböző fénytjeljesítmény, az áthallás itt is nagyon kicsi.



28. ábra: Relatív teljesítmény vizsgálata egy tárgy pont x koordinátájának függvényében; sötét kékkel jelölve azt a tartományt, mely egy pixelre képeződik, fehér a szomszéd pixelre képeződő terület

A szóródási folt vizsgálata alapján a második és harmadik konfigurációnak megfelelő tükröllésnél a képminőség jobb, összességében tehát elmondható, hogy a rendszerben elhanyagolható az áthallás.

6. Tesztelés

2012. szeptember 9-16-ig részt vehettem az NFRI-ben (National Fusion Research Center, Daejeon, Dél-Korea) a berendezés installálásában, részrendszerek tesztelésében, és a teljes rendszer tesztelésének előkészítésében. Az általam ott töltött idő alatt a teljes rendszer periszkóp részét és a CCD ágat tudtuk felépíteni és tesztelni, mivel pár lencse az APD ág második részéből csak később érkezett meg.

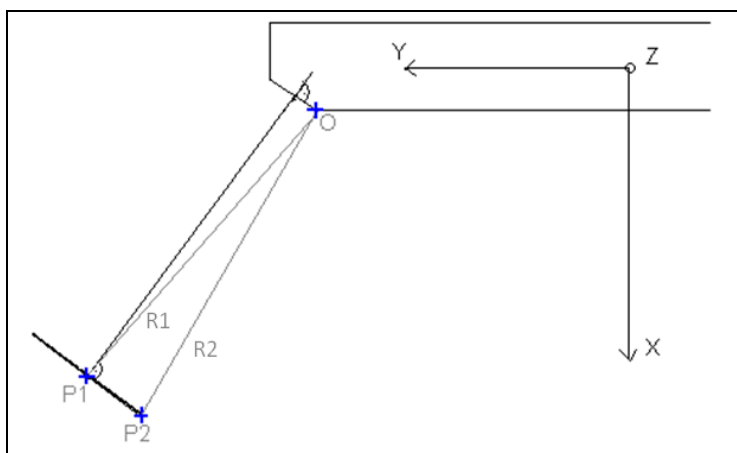
Az installálás során feladatom volt az optikai terv kezelése, szükséges analízisek elvégzése, és munkánkról jegyzőkönyv írása. Idő hiányában a lencsákat a kínai gyártó a gyártást követően mindjárt Dél-Koreába szállította, így ott, a helyszínen kellett végezni a tesztelést, a rendelkezésünkre álló eszközökkel.

6.1. A tesztelés előkészítése: a tárgytér beállítása

Az optikai rendszer leképezésének teszteléséhez szükséges volt, hogy a laborban a rendszerhez képest megfelelően pozícionált tárgytérrel beállítsuk. Ezt a helyszínen rendelkezésünkre álló eszközökkel valósítottuk meg. Első lépésként rögzítettük az alaplapot az optikai asztalon lévő tájoló csavarokhoz való ütköztetéssel. Megválasztottuk az alsó alaplap sarkát referencia pontnak (a 29. ábrán az „O” pont). Ehhez a ponthoz képest bemértük a tárgytér középpontját (P_1), majd a szélét (P_2 , a szélplazma felé eső részt). A pontok névleges koordinátáit (ld. 9. táblázat) a mechanikai tervből olvastuk le.

9. táblázat: P_1 és P_2 pontok koordinátái

	Koordináta	mm
P_1	x_1	1370
	y_1	1847
	z_1	314,5
	R_1	2321
P_2	x_2	1537,6
	y_2	1664
	z_2	343,1
	R_2	2291



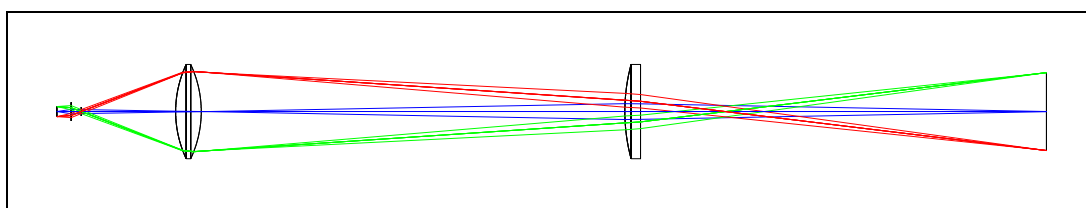
29. ábra: Koordináta tengelyek a mechanikai tervben, a tárgytér beállítása

A tárgytér bemérését P_1 bejelölésével kezdtük az x_1 és y_1 koordináták lemérésével. A távolságokat mérőszalaggal mértük, a merőleges szögek megtartásában a mechanikai váz nagy lapjai segítettek, a vízszintest vízszintmérő segítségével állítottuk be. A mért távolságok hibáját $\pm 0,5$ cm-nek becsülöm, mely alapján a P_1 -referencia pont távolságának hibája szintén 0,5 cm. Megjelöltük a P_1 pontot a térben egy rögzített mutatópálcával. A tárgytér síkjába egy táblát helyeztünk el és rajta a mutató által kijelölt P_1 pontot bejelöltük. A táblán a felmértük a P_1 ponthoz képest a P_1 - P_2 távolságot (250 mm).

Leellenőriztük P_1 beállítását R_1 (O és P_1 távolsága) felmérésével, mely pontosnak adódott, azaz a 0,5 cm-es hibahatáron belül volt. Ezt követően a P_1 pontot a térben fixen tartva úgy forgattuk a tábla síkját, hogy P_2 távolsága a referencia ponttól (R_2) megfelelő legyen.

6.2. A CCD ág tesztelése

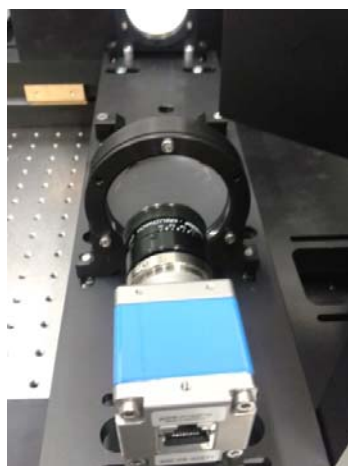
A CCD ág teljes rendszertől függetlenül való teszteléséhez szükséges, hogy találjunk egy tárgypozíciót, melyből a részrendszer éles képet hoz létre a CCD-n. Ennek a pozíciónak a megkereséséhez az optikai tervben fordított irányban vezettem át a sugarakat, a képsíktól a tárgysíkig. Ehhez megfordítottam a rendszer elemeit, a képsíkban vettem fel a tárgyat, és a tárgy vastagságára optimalizáltam. Így megkaptam azt a pozíciót, ahová a tesztelés során a tárgyat kell helyezni, és a szükséges tárgyméretet ahhoz, hogy a rendszer helyes összeállítása esetén elvileg jó képet kapjunk a CCD-n. A tárgyméret radiálisan 24,8 mm-nek, a tárgy vastagsága 261 mm-nek adódott (30. ábra).



30. ábra: A CCD ág fordított sugárátvezetéssel

Lecsavaroztam a kamerát és a lencsét a lencsetartókkal együtt az alaplagra. Tárgyként egy tartóba rögzített vonalzót használtam. Ennek segítségével a képen le lehetett olvasni a skáláról, hogy mekkora tárgyat képeztünk le. A CCD által látott képet számítógépen a kamera kontrol programmal tudtuk vizsgálni.

A tárgy mozgásával megkerestem azt a pozíciót, melyben a CCD-n éles kép keletkezik. Ez a modelltől jelentősen eltért, következő feladatomban tehát a hiba okának felderítése volt. A mechanikai tervek áttanulmányozása során rájöttem, hogy a detektor felülete került a kamera első felületének a helyére. Az alaplappal úgy volt megtervezve, hogy a kamera pozíciója állítható legyen, melyet így még 29 mm-el (kamera elülső felületének és a detektorfelületnek a távolsága) távolabb állítottunk a lencsétől. A CCD fókuszának beállítása után egy 50 ± 3 mm-es tárgy képét láthattuk, a vártak megfelelően. Megfigyelhettük azt is, hogy a kép minősége érzékeny volt a pontos lencse-pozicionálásra.



31. ábra: A CCD ág optikai rendszere

6.3. Transzmisszió vizsgálata

Következő feladatunk a prizma üvegyanyagának vizsgálata volt. A prizma HK9L-es üvegét túlságosan sárgának láttuk, ezért ellenőrzést végeztünk, hogy a vizsgált hullámhosszon (671 nm) abszorpciója megegyezik-e az adatlapon megadott 0,4%/cm-es értékkel.

Egy erős fehér fényforrást vettünk, mely elé a szűrőt behelyezve a 671 ± 1 nm-es hullámhossz-tartományon vizsgálhattuk az áteresztett intenzitást a CCD-vel. Ahhoz, hogy a prizma az áteresztett fény irányát ne változtassa meg, kihasználtuk, hogy a prizma két részből lett legyártva. Ezeket úgy fordítottunk egymásnak, hogy a két prizma együtt hasábot alkosson, és a fény a be/kilépő felületekre közel merőlegesen essen be. Az üveg vastagsága a fényútban 39 ± 1 mm, a kamera távolsága a fényforrástól 1,5 m volt.

A kamera kontrol programban az expozíciót 0,002-re állítottuk, hogy az érzékelő épp ne menjen telítésbe. A képen látható fényfolt maximális intenzitású pixelében mértük meg az besugárzást a prizmával és prizma nélkül. A 10. táblázat mutatja a leolvasott szürkeskála értékeket 12 bites számábrázolásban. A mérésünk hibáját 1%-ra becsüljük.

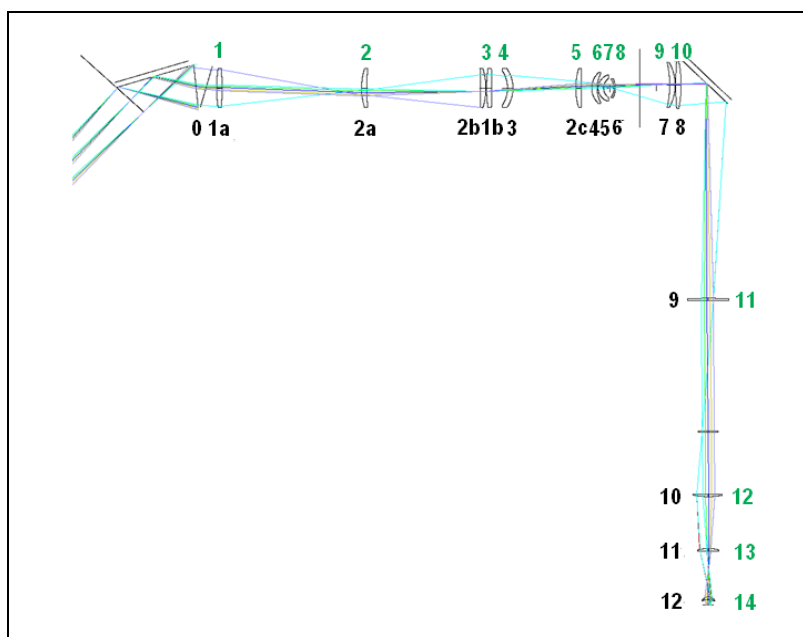
9. táblázat: Transzmisszió analízis

	Prizma nélkül	Prizmával
	2967	2819
	2932	2870
	2853	2852
	2878	2892
	2860	2906
Átlag	2898	2867,8

A prizma abszorpciója mérésünk szerint 1% körüli. 0,4%/cm-es abszorpció esetén a Lambert-Beer törvény alapján 1,6%-os abszorpciót vártunk, a felületi reflexiókat is figyelembe véve pedig 2,5%-ot, azaz nem mérhető ki szignifikáns eltérés a hivatalos értéktől. Az üveg sárga színét a kis hullámhosszokon való abszorpciója okozza.

6.4. Lencsék tesztelése

A lencsék beazonosításához és ellenőrzéséhez megmértük azok fókusz távolságait. Beszámoztam a lencsákat a 32. ábrán látható módon (feketével a lencse-számozás, zölddel a lencsetartó-számozást jelölve).



32. ábra: lencsék és lencsetartók számozása

Az egyes lencsék teszteléséhez berögzítettem a lencsét a tartójába, majd egy leképezést hoztam létre a pontszerű fehér fényforrásról. Megmértem a tárgy és kép-távolságokat, melyekből a fókusz távolságot (3) alapján számoltam. Mivel a lencsék vastaglencsék, és többségük nem síkdomború, a kép- és tárgytávolságokat nem tudtam pontosan a fősíktól mérni. Ez a mért távolságokban kis görbületű lencsék esetén 0,5 cm hibát, a nagyobb görbületűek esetén 1-2 cm hibát okozott, mely pontosság a lencsék beazonosítására és ellenőrzésére megfelelő volt. A mért fókusz távolságokat a lencsék Zemax segítségével meghatározott effektív fókusz távolságaival vettem össze. A mért és számolt értékeket a 10. táblázat mutatja.

10. táblázat: Lencsék fókusztávolságának mérése és összevetése annak várt értékével

Lencse	Tartó	$f_{\text{mért}}$ (mm)	$f_{\text{számolt}}$ (mm)
1a	1	440	450
1b	3		
2a	2	370	372
2b	3		
2c	5	378	372
3	4	szóró	
4	6	294	279
5	7	szóró	
6	8	szóró	
8	10	424	425
9	11	950	904
10	12	298	305
11	13	193	196
12		70	64

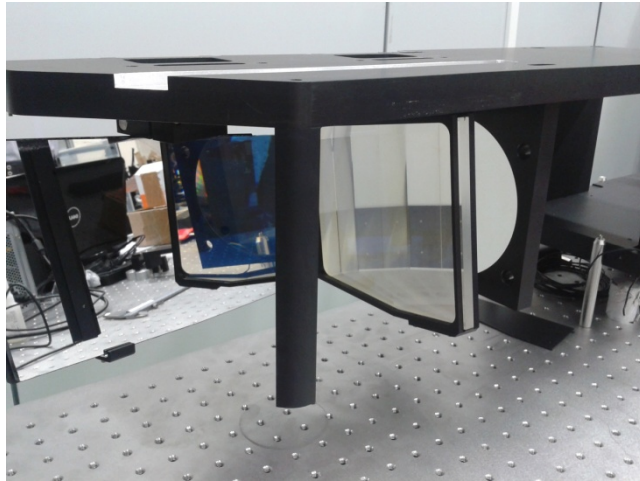
Szóró lencsék esetén a fénynyaláb tágulását ellenőriztem. A 12-es lencse átmérőjét 46 mm helyett 48 mm-re gyártották, ezért annak tartóját újra kellett tervezni. A 7. lencse ottlétem alatt még gyártás alatt volt.

A bemért lencsét a lencsetartókkal együtt az alaplagra rögzítettük. Először a periszkóp rész lencsét helyeztük fel. Egy lézert állítottunk be az optikai rendszer tengelyébe. A lencsék egymáshoz képesti távolságának beállítását az alaplalba 0,1 mm pontossággal belefűrt tájoló csapok segítették. A lencsék felületéről visszaverődő lézerfoltot vizsgáltuk, mely a lézerbe verődött vissza, ha a lencse merőlegesen állt a rendszer tengelyére. A tájoló csapok pontosságának köszönhetően a pozíciók korrekciójára nem volt szükség.

Ezt követően a lézert áthelyeztük a periszkóp képtér felőli oldalára, hogy a prizmat és az első tükröt beállítsuk.

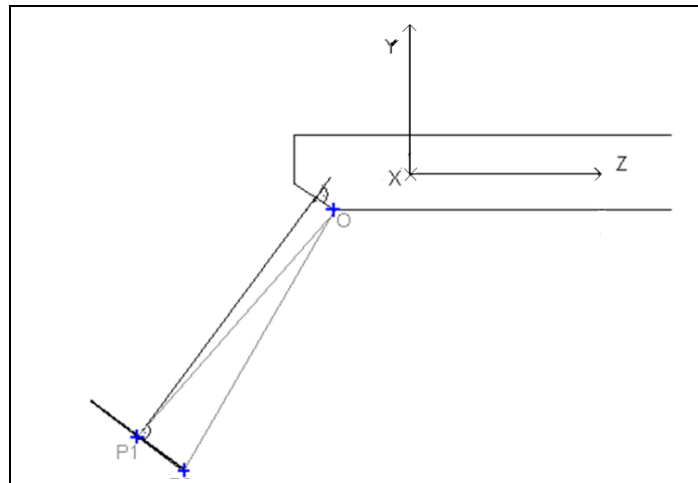
6.5. A prizma beállítása

A prizmat befogtuk a tartójába, és feltettük a rendszer elején a felső alaplagra (a 33. ábrán látható).



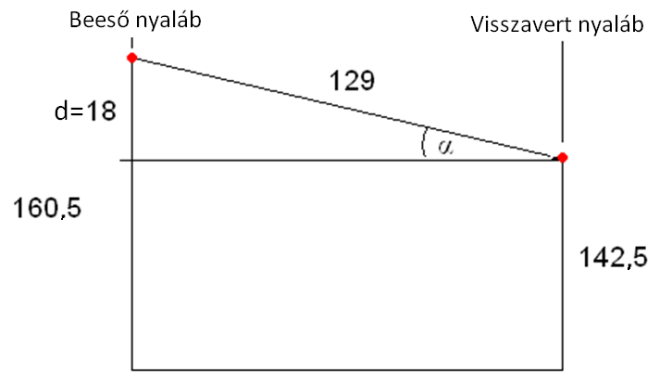
33. ábra: Prizma és tükör rögzítése a felső alaplagra

A tengelyek körüli forgatásokat az optikai terv koordináta rendszerében értem, ld. 34. ábra.



34. ábra: Koordinátatengelyek az optikai tervben

A z-tengely körüli elfordulás beállításához (α_z) egy ernyőt helyeztünk el a lencsék síkjával párhuzamosan a prizma és az első lencse között. Bejelöltük rajta a tengelyben haladó beeső nyaláb foltját, és a prizma felületéről visszavert nyaláb helyét. α_z a foltok geometriájából a 35. ábrának megfelelően számolható.

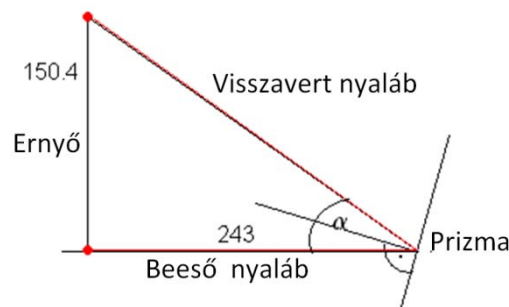


35. ábra: α_z beállítása (az értékek mm-ben értendők)

$$\alpha_z = \sin\left(\frac{160,5-142,5}{129}\right) = 8,2^\circ \quad (4)$$

α_z névleges értéke $9,6^\circ$. A korrekció érdekében kiszámoltuk, hogy a különbségnek $d=21,6$ mm-nek kell lennie 18 mm helyett, ezért egy-egy alátétet tettünk a prizma vastagabbik oldalát tartó csavarok alá. Ezzel $d=20,5$ mm és $\alpha_z=9,1^\circ$ lett.

Az x-tengely körüli elfordulás ellenőrzéséhez újra a nyaláb fényfoltjainak helyzetét vettük alapul a 36. ábrának megfelelően.



36. ábra: α_x beállítása

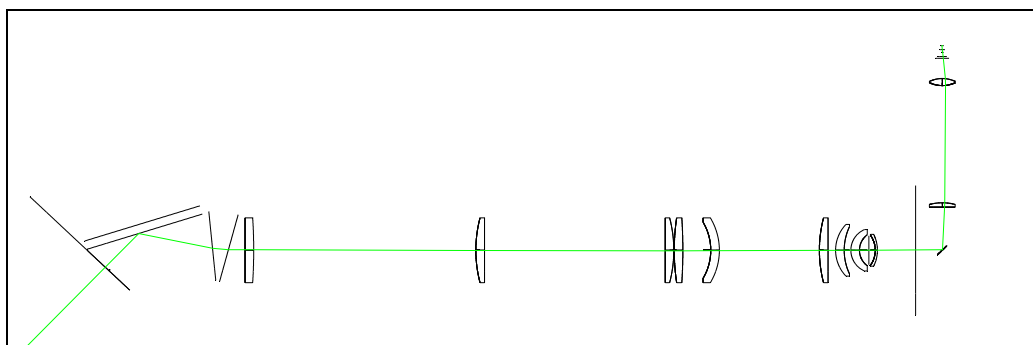
$$\alpha = \frac{\arctan\left(\frac{150,4}{243}\right)}{2} = 15,87^\circ \quad (5)$$

A terv szerint $\alpha_x=15,6^\circ$. A mért szög pontossága megfelelő.

6.6. Az első tükör beállítása

A tükör beállításához ismernünk kellett a tárgyternek azt a pontját, ahova a tervben az optikai tengelyben haladó fénysugár (a gyakorlatban a lézernyaláb) esik. Ennek meghatározásához 5 mm sugarú kör alakú apertúrákat vettem fel a Zemax modell 17-es és 31-es felületein (az 1. lencse és az 5. lencse első felületein). Ezt követően a negyedik konfiguráció második tárgypontját mozgattam úgy, hogy az abból induló sugár az apertúrákon átmenjen. Iterálva egyre kisebbre vettem az apertúrák sugarát, melyek végül

0,2 mm-esnek adódtak a 17. felületen, és 0,3 mm-esnek a 31. felületen. Ekkor a negyedik tárgypontból indított fénysugár kellően pontosan a tengelyben halad (ld. 37. ábra).

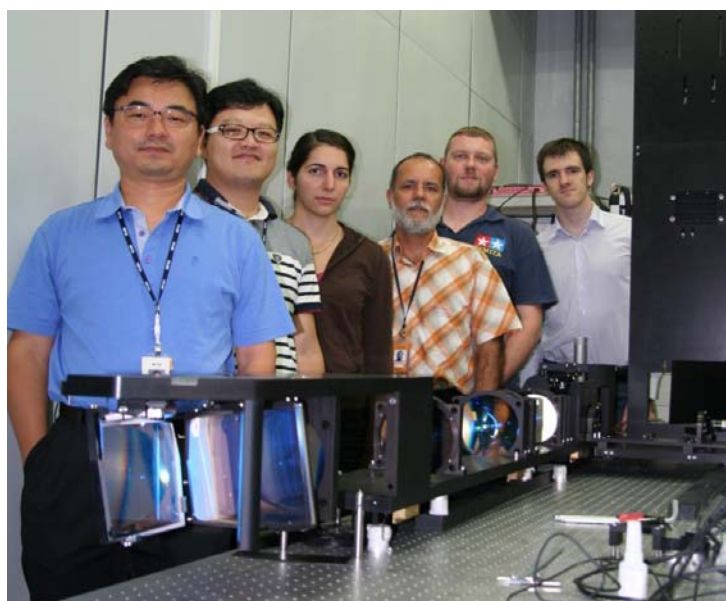


37. ábra: A tengelyben haladó fénysugár

A kapott tárgypont koordinátája $y=76$ mm-nek adódott. Bejelöltük ezt a pontot a tárgyter síkjában elhelyezkedő táblán, és a tükröt úgy állítottuk be, hogy a lézer fénye erre a helyre essen.

6.7. A köztes kép pozíciójának vizsgálata

A köztes kép pozíciójának vizsgálatához egy tárgyat helyeztünk a köztes kép síkjába. Tárgyként az APD detektormaszka szolgált. Ezt a fehér fényforrásunkkal világítottuk meg, melynek spektrumát a szűrővel megszűrtük. A képet a tárgyter helyére állított táblán néztük. A kapott kép pontosan akkor volt éles, amikor a tárgy a köztes kép síkjában volt. Megfigyelhettük azt is, hogy abban az esetben, amikor nem a tervezési hullámhosszon vizsgáltuk a leképezést, hanem szűrő nélkül alkalmaztuk a fehér fényforrást, éles képet a 1 mm-el a köztes kép síkja előtti pozíciónál kaptunk.



38. ábra: A berendezés és a tesztelést végző munkacsoport

7. Összefoglalás

Munkám első lépéseként összeállítottam a specifikációt. Erre két modellt dolgoztam ki: egy egyszerű koncepciót, mely könnyen megvalósítható, és a próbamérések során használt rendszerhez való hasonlósága miatt beváltak mondható; és egy funkcionális koncepciót, mely bonyolult ugyan, de alkalmas a tervek szerinti összetett – 3 detektoros – mérésre. Következő lépésként a funkcionális koncepciót fejlesztettem tovább valós lencsés modellé, melyben a képalkotási hibákat is figyelembe vettem. Az optikai rendszer optimalizálása során figyelembe vettük a tervezési specifikáció minden paraméterét. A választott üvegekből tervezett lencsék gyárthatóak. Jó felbontású köztes képet hoztunk létre a kalibráció számára a port végén, ahol a kép síkjában az ernyő elhelyezhető lett. Ezután válik szét az APD és CCD ág, melyek közül a CCD a teljes tárgyteret látja, az APD pedig egy tükör segítségével szkenneli a tárgyteret. A beesési szögek a szűrő számára elegendően kicsik, és a szűrő síkjában a fotokonduktív detektorok optikai szálainak is megfelelő képet hoztunk létre. Az elkészült optikai tervet egy konferencián és egy Koreai-Magyar workshopon is bemutattam [20].

Szakdolgozatomban bemutattam a rendszer felépítését és a tervezés folyamatát. Az optikai rendszer működését analízissel igazoltam. TDK munkám során ezt az optimalizált CCD ág megtervezésével egészítettem ki. Ennek leképezésére szintén elvégeztem az analíziseket. Részt vettem továbbá a helyszíni installálásban (NFRI, Dél-Korea), mely során végzett munkám lépéseit dolgozatomban bemutattam.

8. Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni Dr. Erdei Gábornak a gondos témavezetést, hogy segített beletanulnom a tervezésbe, és hogy mindig rendelkezésemre állt, ha segítségre volt szükségem. Köszönöm Dr. Pokol Gergőnek munkám gondos ellenőrzését, és hogy a fúziós háttérrel való ismerkedésben segítségemre volt. Kovácsik Ákosnak köszönöm, hogy mérnöki szemmel javította a tervet. Köszönettel tartozok Dr. Zoletnik Sándornak a munkacsoportba való bevonásért, és a koreai tesztelésben való részvétel lehetőségéért.

9. Felhasznált irodalom

- [1] Dr. Zoletnik Sándor: Szabályozott magfúzió mágneses összetartással I., Fizikai Szemle 2005/3.
- [2] J. Wesson: The Science of JET, 2000.
- [3] Dr. Pokol Gergő: Bevezetés a fúziós plazmafizikába (előadássorozat) BME, 2010.
- [4] K. Kim: Status of the KSTAR superconducting magnet system development, Nuclear Fusion, 2005.
- [5] A. R. Field, D. Dunai, N. J. Conway, S. Zoletnik, J. Sárközi: Beam emission spectroscopy for density turbulence measurements on the MAST spherical tokamak. Review of Scientific Instruments 80, 073503, 2009.
- [6] Dr. Zoletnik Sándor: Turbulencia tokamakban és tokamak körül, Nukleon, 2011.
- [7] B. Schweer. Application of atomic beams for plasma diagnostics. Fusion Science and Technology, 49:404 – 411, 2006.
- [8] Szepesi Tamás: Plazmadiagnosztikai Li ionnyaláb vizsgálata, MSc diplomamunka, BME, 2005.
- [9] Szegedi Imre: Magyarok segítik a dél-koreai fúziós kutatásokat, Innotéka, Budapest, 2012.
- [10] D. Guszejnov, G. I. Pokol: Overview of the RENATE beam emission spectroscopy simulation package, 2012.
- [11] Y. U. Nam: Analysis of edge density fluctuation measured by trial KSTAR BES system, submitted to Fusion Engineering and Design, 2012.
- [12] D V Udupa, Sanjiva Kumar: Optical design of a 10 meter remote viewing periscope using radiation hard glasses, Spectroscopy Division, Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai, 2009
- [13] Bruce H. Walker: Optical Design for Visual Systems, Washington, 2000.
- [14] Dr. Erdei Gábor: Geometriai optika, jegyzet, BME, 2008.
- [15] APDCAM, Digital Avalanche Photodiode camera, User's Guide, AdimTech Kft., 2011.
- [16] Pixelfly product sheet: High performance digital 12 bit CCD camera system, PCO AG, Kelheim, 2009.
- [17] G. Veres, S. Zoletnik, Optical design of the KSTAR trial BES system, internal report, Budapest, 2010.
- [18] Radiant Zemax: Getting Started Using ZEMAX, version 2.1, 2012.
- [19] Dr. Erdei Gábor: Az optikai tervezés alapjai, órai jegyzet, 2005-2012.

-
- [20] Czopf Anna: Imaging system for the beam emission diagnostics of the KSTAR tokamak, Hungarian Plasma Physics and Fusion Technology Workshop, Tata, 2012.