



Vetítő ernyő vizsgálata mobil 3D kivetítő rendszerhez

Héricsz Dalma
Fizikus MSc I. évfolyam
Témavezetők: Dr. Koppa Pál, Sarkadi Tamás
BME Fizikai Intézet,
Atomfizika Tanszék

BME
2012. 12. 18.

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.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Háromdimenziós megjelenítő rendszer.....	5
3. A létező minták minősítése	9
3.1. A minták kvalitatív jellemzése	9
3.2. Az ernyők mérése.....	11
3.3. A mérés továbbfejlesztése.....	13
4. Retroreflektív ernyő modellje	17
4.1. Modell a ZEMAX nem sorrendi módjában	18
4.2. Modell a ZEMAX sorrendi módjában	18
4.3. A szórás becslése.....	21
5. Rendszer specifikáció számolása	24
5.1. A számolás bemutatása	24
5.2. Eredmények.....	26
5.3. Kitekintés	29
6. Összefoglalás	30
Köszönetnyilvánítás	31
Hivatkozások	32

1. Bevezetés

A háromdimenziós megjelenítés a technikai fejlődésnek köszönhetően nagyon széles spektrumon kutatott téma. Ezen sokféle kutatások mind arra törekednek, hogy a valós térérzékelést reprodukálják.

A térérzékelés a két szemünkkel látott, két kissé különböző képnek köszönhető – bár tapasztalataink alapján egyetlen képről is tudunk bizonyos információkra következtetni, azonban nem érhető el vele ugyanolyan hatás. Így a háromdimenziós rendszerek célja az, hogy az egyes szemekbe az adott nézetnek megfelelő képeket juttassák.

A problémára rengeteg megoldás született. Elsődleges szempontként a rendszereket az általuk nyújtott perspektívák mennyisége alapján mutatom be. Ugyanezt a sémát követi Benton [1], akinek könyvében jelen dolgozatnál bővebb, átfogó leírás olvasható a háromdimenziós megjelenítőkről.

A legegyszerűbb a kétnézetes megvalósítás. Ekkor két képet vetítenek ki, egyet a jobb és egyet a bal szem számára, azaz egyetlen, előre meghatározott perspektíva adott. Ilyen elven működik a hullámhossz szerinti szelektálás, a legtöbb fejre szerelhető elrendezés, az időosztásos és időpárhuzamos megjelenítők [2]. Ezek közül elterjedt a mindenki által jól ismert alkalmazás, a polarizációs multiplexelésen alapuló 3D mozi, és az LCD-szemüveggel kiegészülő videójátékok.

A kétnézetes megoldásnál magasabb szintűek az ún. vízszintes parallaxist tartalmazó rendszerek. Ezek több vízszintes nézetet biztosítanak, tehát oldalirányban mozogva más-más részét láthatjuk a megjelenített térfogatnak. Ennek típusai a hengerlencsés, a parallaxiskorlátozó (parallax barrier) [2], a több projektoros és a holografikus elemeket tartalmazó megjelenítők [3]. Azonban a nézetek száma itt is korlátozott: az első két példánál az egyszerűbb rendszerek csupán négy vízszintes nézettel rendelkeznek, a fejlettebb verziók héttel, az utóbb két példánál pedig a megvilágító projektorok mennyiségétől függ a nézetszám.

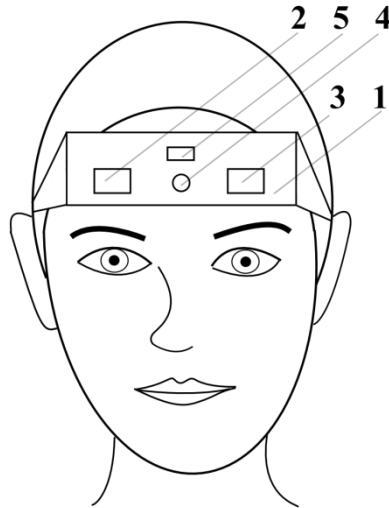
A valós térérzékelést a teljes parallaxis közelíti meg a legjobban: ekkor akár vízszintes, akár függőleges irányba végzünk mozgást, az elmozdulásunk irányának megfelelő nézetet kapunk. Erre példa a félgömb lencséből készített elrendezés, illetve a térfogati (volumetrikus) megjelenítők [4]. Előbbi problémája a térbeli felbontás, a korlátolt látószög és a megfelelő mennyiségű jó minőségű lencse gyártása, míg utóbbi esetében a szerkezet elhelyezése lehet problémás, tehát nagy mennyiségű forgalmazása nem jellemző.

A felsorolt megvalósítások ismeretében a 3D rendszerek a következőkkel jellemezhetők: a diszkrét nézőzónák számával, a felbontással, a szimultán nézők számával, a fejmozgás korlátaival, az érzékelt mélységgel az érzékelt fényerővel, a nézetek közti áthallással, az alkalmazás méretével, az árával és azzal, hogy mennyire praktikus a felhasználó szempontjából [5].

Mindezeket figyelembe véve célunk olyan 3D rendszer létrehozása, mely a fenti szempontok szerint előnyös tulajdonságokkal bír: teljes parallaxist nyújt, jó felbontású, több néző használhatja egyszerre, kis áthallású, nem túl nagy méretű és könnyen kezelhető.

2. Háromdimenziós megjelenítő rendszer

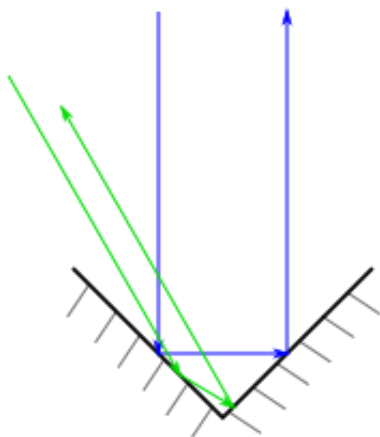
Az 3D-s alkalmazások előző fejezetben tárgyalt követelményeinek megfelelően az általunk tervezett rendszer egy fejre szerelhető eszközből áll (1. ábra (1)), melyen két kisméretű, kis teljesítményű, ún. nanoprojektor (1. ábra (2) és (3)) foglal helyet. A projektorok egyidejűleg vetítik ki egy képsorozat két perspektíváját, a jobb oldali a jobb szemnek megfelelőt, a bal oldali a bal szemnek megfelelőt.



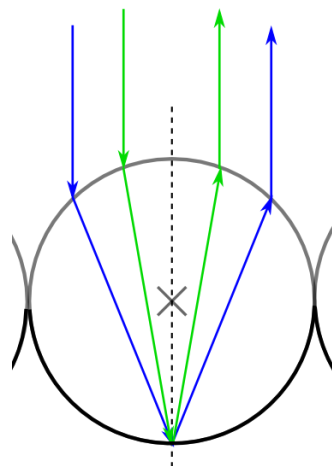
1. ábra: A fejre szerelhető eszköz (1) a szem felett elhelyezkedő két nanoprojektort (2 és 3), egy képernyőkövető szenzort (4) és egy feldolgozó egységet (5) tartalmaz.

A 3D érzet megvalósításának kulcsfontosságú pontja az, hogy a nanoprojektorokkal egy retroreflektív ernyőre vetít a néző (4. ábra (6)). Azért a retroreflektív anyagokra esett a választás, mert a retroreflektív réteg a fényt annak beesési irányába veri vissza, nagyon kis szórási szöggel [6][7].

A retroreflektív felület gyakorlati megvalósítása általában prizmás struktúra (corner-cubic) (2. ábra), ekkor szabályos piramisokkal ellátott felületről a fénysugarak három visszaverődés után a beesés irányába haladnak; illetve gömbstruktúra (3. ábra), ekkor megfelelő törésmutatójú gömböket ágyaznak egy hordozóba, mely hordozón vékony, nagy reflexiójú fémréteg található. A gömbbe belépő sugarak a hátoldalra fókuszálódva, jó hatásfokkal verődnek vissza, s szintén a beesés irányában lépnek ki. Homogén felületet mikroszkopikus (néhányszor 10 μm) méretű prizmák ill. gömbök a felületen szabályos vagy véletlenszerű elosztásával érik el.



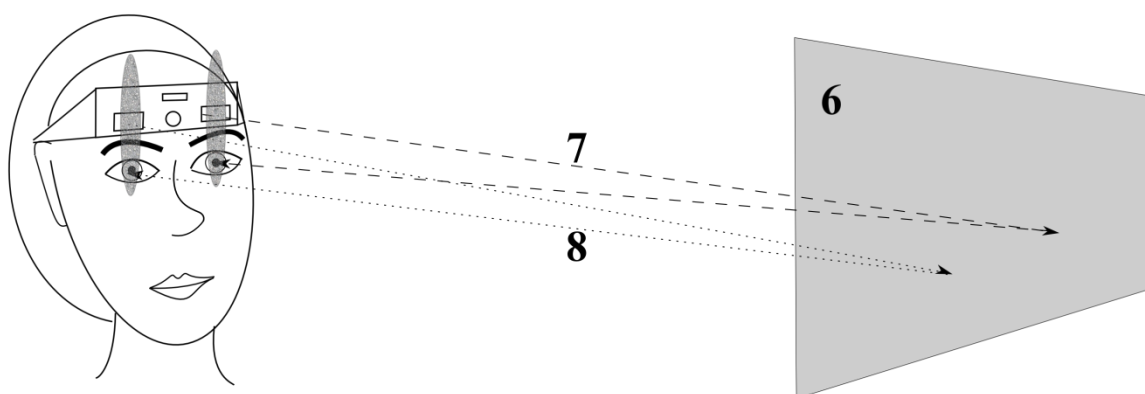
2. ábra: Prizma struktúrájú retroreflektor működése



3. ábra: Gömb struktúrájú retroreflektor működése

Az ilyen struktúrák a fényt kis kúpszögbe koncentráltan verik vissza kollimált megvilágítás esetén, a visszavert teljesítmény jelentős része 1° -on belül van. Ennek következtében a szemhez közel elhelyezkedő projektorból a közelebbi szembe nagy fényteljesítmény jut, azaz jól látható, míg a távolabbiba sokkal kevesebb – vagyis szemüveg nélkül is szelektíven működik a rendszer. Azaz az egyik nanoprojektor reflektált képét csak az egyik, a másik nanoprojektor reflektált képét lényegében csak a másik szem látja (4. ábra). Ha a tökéletes retroreflektor helyett függőleges irányban elnyújtott fényeloszlást hozunk létre, tovább növelhetjük a közelebbi szembe jutó fény mennyiségét.

Ugyanakkor a retroreflexió jó hatásfoka miatt a kis területre koncentrált nyalábok (4. ábra) nagy fényteljesítménnyel bírnak, ezért lehetséges a kis fényerejű nanoprojektorok használata.

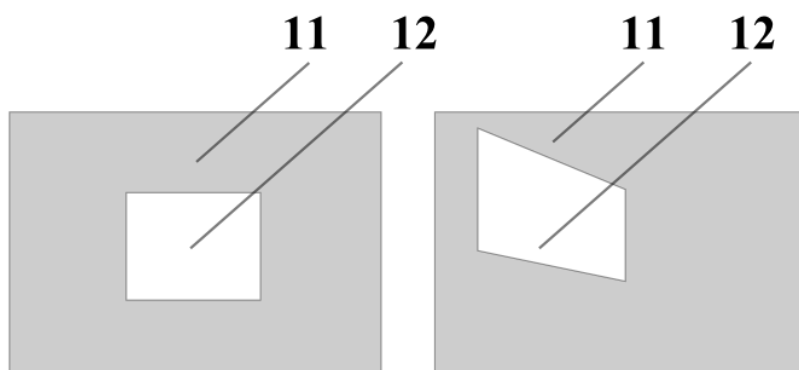


4. ábra: A fényt a jobb (7) és a bal (8) képeknek megfelelően egy diffúz retroreflektív ernyő (6) veri vissza két elnyújtott területre (9 és 10) a jobb és bal projektorok körül, mely megvilágított terület tartalmazza a bal és jobb szemeket is

A retroreflektív ernyő egy további előnye az, hogy több néző is használhatja ugyanazt a vetítővásznat egyszerre, különböző filmeket vetítve, hiszen ha a néző egyik projektorból vetített képéből kellően kevés jut a másik szemébe, akkor egy távolabbi megfigyelő még kevesebbet fog érzékelni, s nem fogja egymást zavarni több, időben párhuzamos vetítés sem.

Az 3D megvalósításához az ernyő megválasztása mellett a másik kiemelkedően fontos cél a teljes parallaxis létrehozása, melyet az alábbi módon kívánunk elérni.

Egy adott nézethez megfelelő képpár kiválasztásához ismernünk kell a néző pozícióját az ernyőhöz viszonyítva: milyen távol van tőle, milyen szögben vetít. Ebből kiindulva a képernyőkövetés az előbbi paramétereket felhasználva történik. A fejre szerelhető eszköz (1. ábra (1)) tartalmaz egy képernyőkövető szenzort (1. ábra (4)), mely a látható megvilágítás melletti láthatatlan (pl. közeli infravörös) megvilágítást bocsát ki, és egy leképező rendszerrel (pl. kamerával) érzékeli a képernyő (5. ábra (12)) pillanatnyi pozícióját. A begyűjtött információ a kivetített kép széle, vagy a képernyőn elhelyezett, szabad szemmel nem látható pozícionáló jel, amely alapján a rendszerhez tartozó feldolgozó egység (1. ábra (5)) kiszámolja a képernyő távolságát és a megfigyelési szögét. Ebből már egyértelmű, hogy a tökéletes 3D látványhoz pontosan milyen képeket kell kivetíteni. Ezáltal valósítható meg a teljes parallaxis: a néző bármely helyzetéhez tartozó perspektivikusan helyes képet lehet kivetíteni, akár vízszintesen, akár függőlegesen mozdul el.



5. ábra: Téglalap alakú képernyő (12), ahogy a képernyőkövető szenzor érzékeli. Az a) ábrán az ernyő középen helyezkedik el és a megfigyelő az ernyőre merőlegesen nézi. Az b) ábrán az ernyő kissé off-axis, valamivel közelebb található és a megfigyelő a bal alsó részen helyezkedik el.

Szintén a feldolgozó egység (1. ábra (5)) feladata a kép torzításának, a hirtelen fejmozdulatok és a képremegés korrigálása.

A megjelenítendő tartalmat a feldolgozó egységre lehet feltölteni valamilyen vezetékes vagy vezeték nélküli kommunikációs csatornán keresztül, így biztosítva a rendszer mobilitását.

A méret, a felbontás és a képminőség nem szab határt a rendszer összeállításának, mivel a mobil eszközökbe szánt projektorok fejlesztése egyre kisebb méretű és nagyobb fajlagos teljesítményű típusokat eredményez [8].

Munkám során a fejezetben bemutatott több néző által használható háromdimenziós, mobil, teljes parallaxist nyújtó kivetítő rendszerhez tartozó retroreflektor vetítő ernyők vizsgálatával foglalkoztam. A vizsgálat célja a vetítéshez legmegfelelőbb – kis áthallású, magas hatásfokú – ernyő elkészítése, melyhez szükséges az ernyők minősítésére szolgáló kísérlet megépítése és a teljes rendszer specifikációjának kiszámítása az ernyő tulajdonságainak függvényében.

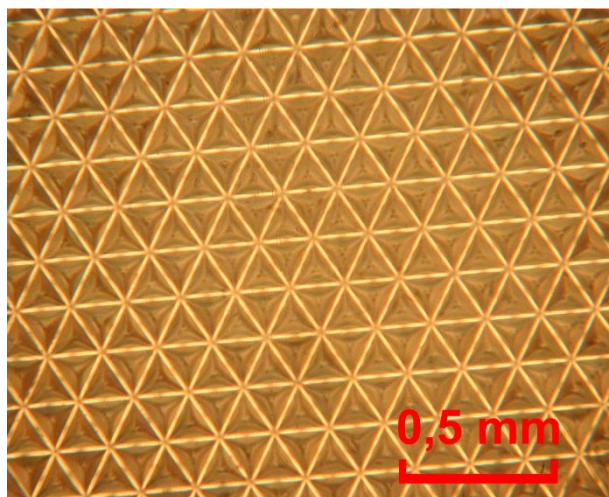
3. A létező minták minősítése

Munkám első szakaszában a kivetítésre használható, kereskedelemben kapható – és a későbbiekben általam készített – ernyők minősítésére szolgáló mérést építettem, mellyel megállapítottam a rendelkezésemre álló minták fényszórási tulajdonságait.

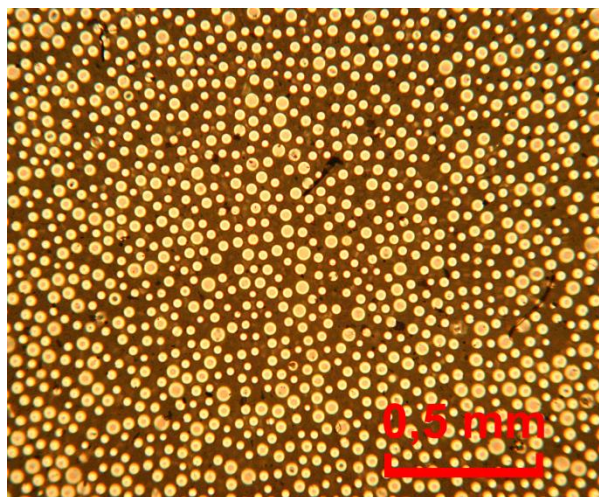
3.1. A minták kvalitatív jellemzése

A 2. fejezetben tárgyaltam a retroreflektív felületek előnyeit. Azonban azt is figyelembe véve, hogy egy vetítő ernyő alkalmazására szeretnénk használni, a következő szempontok szerint kell minősíteni egy ernyőt: mennyire homogén a látott kép, mekkora a visszavert fény teljesítménye, ebből mennyi jut az egyik, illetve a másik szemünkbe. Ez utóbbi két érték aránya meghatározó a 3D láthatóságának szempontjából, hányadosuk adja az áthallást (cross-talk) a két kép között.

Az ernyő homogenitása egyszerűen vizsgálható: a minta kellően nagy felületét egyenletesen kivilágítjuk. Mint már a 2. fejezetben írtam, alapvetően kétféle típusú retroreflektort különböztetünk meg: a prizma struktúráját (6. ábra) és a gömb struktúráját (7. ábra).

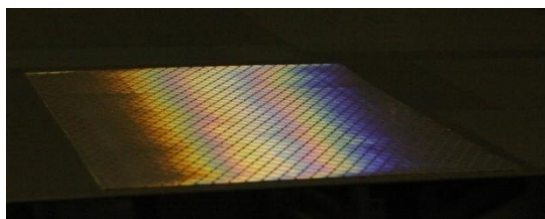


**6. ábra: Prizma struktúrájú retroreflektor
fénymikroszkópos képe**



**7. ábra: Gömb struktúrájú retroreflektor
fénymikroszkópos képe**

A homogenitás vizsgálata alapján azonban egyértelműen látható, hogy a magas hatásfokú, prizma struktúrájúak nem felelnek meg, melyet a 8. ábra illusztrál: szemmel látható csíkozottsággal és színi hibával rendelkeznek. A 9. ábrán a bal felső sarokban elhelyezkedő minta szintén prizma struktúrájú, s megfigyelhető az inhomogenitása a többi, gömbös struktúrájú minta homogenitásához képest.



8. ábra: Inhomogén, színesen fénylő prizma struktúrájú retroreflektor

Az áthallás jól jellemezhető a retroreflektorról visszavert fény szórási karakterisztikájával a szórási szög függvényében. Ideális esetben a projektorhoz közelebbi szembe jut a legtöbb fény, a másikba pedig minimális. Ennek egy lehetséges megoldása lenne olyan retroreflektor létrehozása, mely a beesési iránytól megadott szögben eltérítve veri vissza a sugarakat, ezzel megcélózva a megfelelő szemet, míg a másikba egyáltalán nem jutna fény. Ezt az elképzelést egyelőre nem sikerült megvalósítani. A következő, az ideálist közelítő lehetőség az, hogy a közelebbi szembe sok fényt verünk vissza úgy, hogy a szórási profil meredek csökkenése miatt még mindig kevés fény jusson a másik szembe. Tehát nagy csúcsteljesítményű, gyors lecsengésű szórási profillal rendelkező retroreflektort keresünk.



9. ábra: Retroreflektorok a kamerához közeli megvilágítással

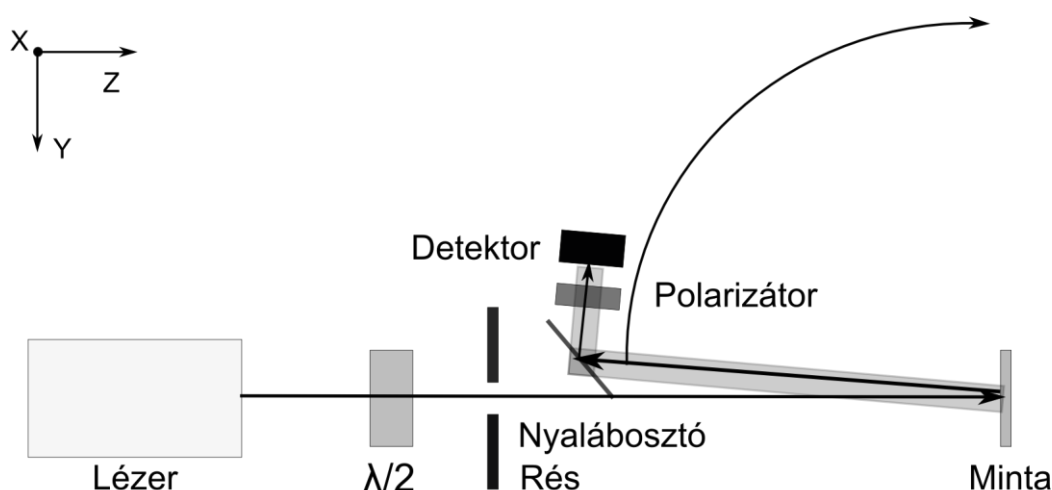


10. ábra: Retroreflektorok a kamerától távolabbi megvilágítással

Bár a minták egy részét a homogenitási kritérium miatt kizártam, még mindig rengeteg közül választhattam, ezért gyors, kvalitatív minősítési eljárásra volt szükség. A retroreflektorokat egymás mellé helyeztem, sötétben, azonos záridővel lefényképeztem őket a fényképezőt végig azonos helyen tartva, miközben a megvilágítást a fényképezőtől kis lépésekben távolítottam. Így a karakterisztikák könnyen láthatóvá váltak, egymással összehasonlítható módon, mint például a 9. és 10. ábrákon. Így leredukáltam a vizsgálandó mintákat azokra, melyek kiemelkedően fényesek a 9. ábrán és jóval sötétebbek a 10. ábrán.

3.2. Az ernyők mérése

A kvalitatív kiválasztás után vizsgáltam meg alaposabban azokat a mintákat, melyek várhatóan a legjobb karakterisztikával rendelkeznek. A szórás karakterisztikát úgy határoztam meg, hogy a mintára merőleges beesés mellett a beesési síktól mért szög függvényében detektáltam a szórt fény teljesítményét goniofotométeres [9] elrendezéssel, mely mérési összeállítást előző TDK munkám során készítettem retroreflektorok vizsgálatára (11. ábra) [10].



11. ábra: Goniométeres mérési összeállítás

A mintát egy 532 nm-es frekvenciakétszerezett, 25 mW teljesítményű Nd-YAG lézerrel, a minta síkjára merőleges beeséssel világítottam meg. A lézerfény polarizációja $\lambda/2$ -es fázistoló lemezzel állítható, melyet fix pozícióban használtam, mert ezúttal a polarizációfüggést nem vizsgáltam. A szórt fény teljesítményét egy Coherent FieldMate típusú teljesítménymérővel detektáltam, mely a maximális lézerteljesítménytől a 10 nW-os tartományig képes mérni. Az adatok begyűjtéséhez a detektort AD-konverterrel kötöttem össze a számítógéppel, s a beolvasást a Labview környezetben írt programmal végeztem.

A fényszórás mérésére a reflexiós tartományban volt szükség, melynek hangsúlyos része kis szögeknél van a retroreflexió miatt. Ezért a forgatható karra nyalábosztót tettem, így átengedve a lézer fényét a minta felé, mely a szórt fényt a karra merőlegesen elhelyezkedő detektorra reflektálja [11].

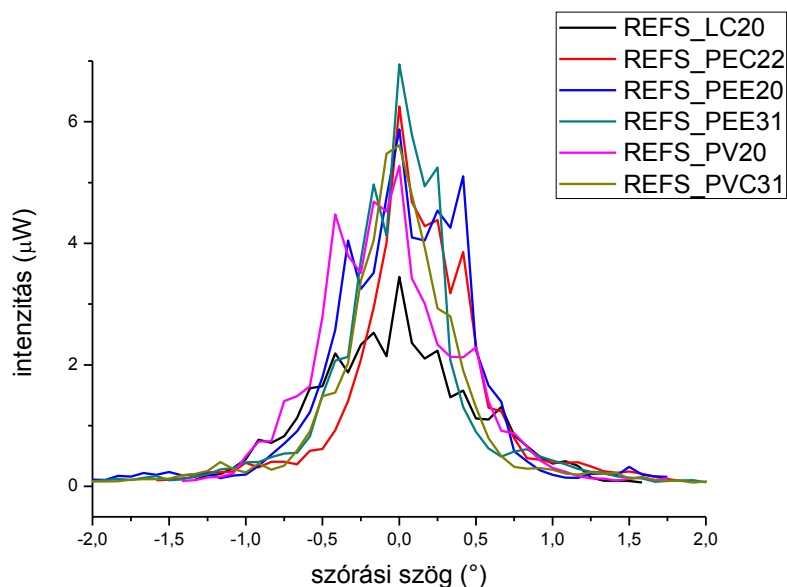
A nyalábosztó és a forgástengely távolsága 25 cm, a nyalábosztó és a detektor távolsága 12 cm, így $r_{\text{det}} = 37$ cm. A felbontást ($\Delta\phi$) úgy választottam meg, hogy a keskeny csúcs körüli intenzitás is jól mintavételezett legyen, így olyan rést helyeztem a detektor elé, hogy az a mintáról érkező fényt körülbelül $\Delta\phi = 0,15^\circ$ kúpszögben érzékelje. Ismert, hogy

$$\Delta\varphi = \frac{d_{det}}{r_{det}} \quad (1)$$

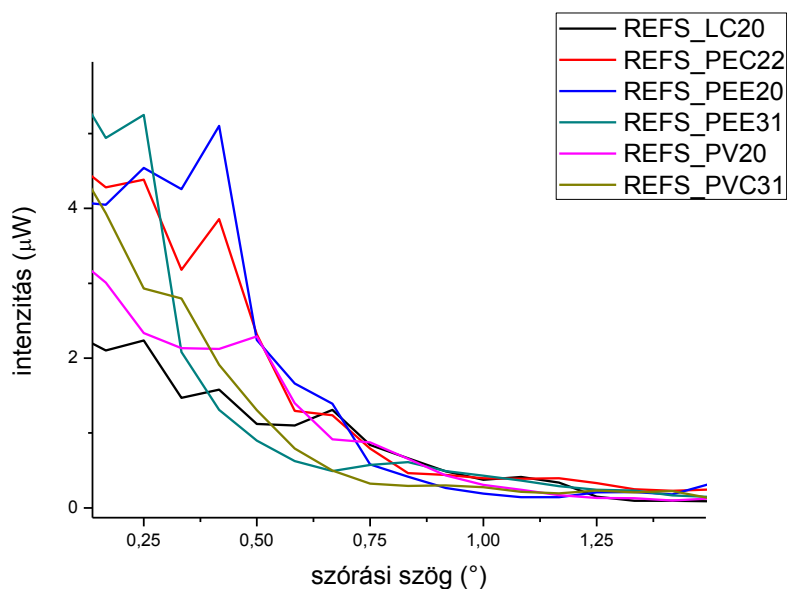
ahol d_{det} a detektor elé helyezett kör alakú apertúra átmérője, vagyis

$$d_{det} = \Delta\varphi \cdot r_{det} = 0,97 \text{ mm}. \quad (2)$$

Ilyen módon felvettem a választott minták által szórt teljesítményt a szórási szög függvényében, melyek a 12. és a 13. ábrákon láthatóak.



12. ábra: A kiválasztott minták szögkarakterisztikái



13. ábra: A szögkarakterisztikák nagyítva

A lecsengés három jellemző pontját az 1. táblázatban tüntettem fel számszerűen: a csúcsteljesítménynél, 1°-nál és egy köztes szögnél.

Minta		REFS_ LC20	REFS_ PEC22	REFS_ PEE20	REFS_ PEE31	REFS_ PV20	REFS_ PVC31
Teljesítmény (μW)	0°	3,448	6,250	5,874	6,943	5,273	5,615
	0,33°	1,467	3,178	4,257	2,080	2,133	2,797
	1°	0,375	0,394	0,190	0,428	0,305	0,274

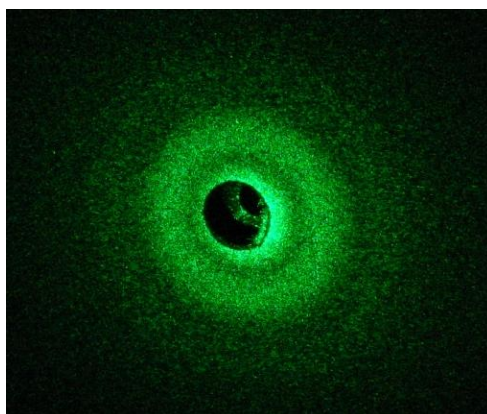
1. táblázat: Az egyes minták teljesítményei különböző szórési szögeknél

A fenti értékek alapján megállapítható, hogy a REFS_LC20 jelű mintát kivéve mindegyik csúcsteljesítmény 6 μW körüli, s 1°-ig a REFS_PEE20 jelű minta szórása cseng le a leggyorsabban. A félértékszélességek az összes mintára 1° körüliek.

A célom a REFS_PEE20-nál jobb ernyő készítése. A további munkához az itt kiválasztott ernyőt vizsgáltam, hiszen ezzel szükséges összehasonlítani a jobb eredmény elérése érdekében.

3.3. A mérés továbbfejlesztése

A 12. és 13. ábrák alapján azonban megállapítható, hogy a mérés túl zajos, a görbék a sűrű mintavételezés ellenére sem simák. Ennek oka az, hogy a 14. ábrán a szórt fényben látható lézer szemcsekép összemérhető nagyságú a résmérettel. A további vizsgálathoz szerettem volna lecsökkenteni az ebből fakadó bizonytalanságot.



14. ábra: A lézer szemcseképe a REFS_PEE20 mintáról visszaverődve

A szemcseképből adódó szórás csökkentése térbeli átlagolással lehetséges. Ennek egy módja, hogy több mérést kell végezni a minta különböző pontjain. A térbeli átlagolás a résméret növelésével is elérhető. A vízszintes felbontást nem szerettem volna csökkenteni, ezért egy 0,9 mm széles és 8 mm hosszú rést helyeztem a detektor elé, így a felbontás továbbra is $\Delta\varphi = 0,15^\circ$.

A minta különböző pontjainak megméréséhez egy xy-mozgatót használtam, melyet szintén a LabView környezetből vezéreltem. A mozgatus léptetőmotorral történt, melyről ismert, hogy 5000 fordulattal lép 20 mm-t. A méréshez megfelelően kellett megválasztanom a mérési pontok számát és távolságát. A szórás csökkentéséhez egyrészt kellő mennyiségű

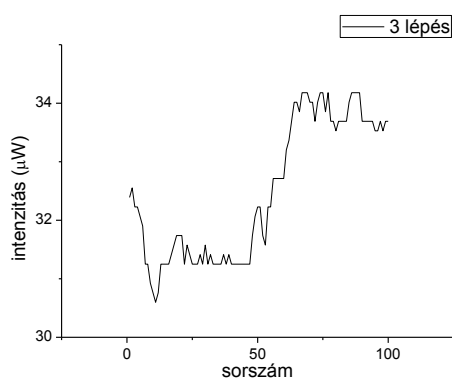
pontot kell felvenni nem túl hosszú idő alatt. Másrészt fontos, hogy ezek a pontok egymástól kellően távol helyezkedjenek el, ugyanis ha túl közel vannak, akkor csak a lokális változásokat és a detektor zaját mérjük, ha túl távol, akkor pedig a minta inhomogenitásából adódó szórás tevődik hozzá a szóráshoz.

A mérésszámot 100-nak választottam. A szórás a mérésszám négyzetgyökével arányosan csökken, így a szórás egy nagyságrendi javulása két nagyságrenddel több mérés elvégzését tenné szükségessé, ami a mérési időt is két nagyságrenddel növelné. Több mérési sorozatot végeztem a mintán, melyekről statisztikát készítettem. A 2. táblázatból kiolvasható, hogy az átlagok 32,3 μW körüliek, a szórásuk is hasonló: a mért értékek szórása kevesebb, mint 5 %, amit elfogadhatónak ítélttem.

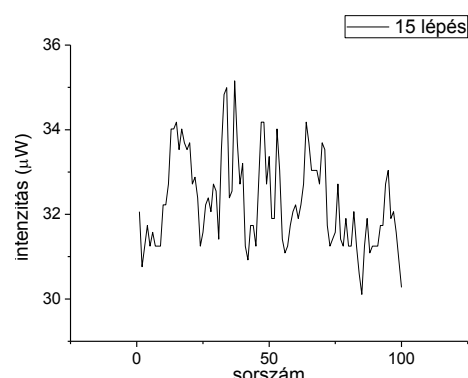
	1. adatsor	2. adatsor	3. adatsor	4. adatsor	5. adatsor
Átlag (μW)	32,319	32,304	32,283	32,293	32,281
Szórás(μW)	1,218	1,213	1,231	1,237	1,174
Relatív szórás(%)	3,76	3,75	3,81	3,83	3,63

2. táblázat: 100 mérési pont statisztikai adatai, öt méréssorozat esetén

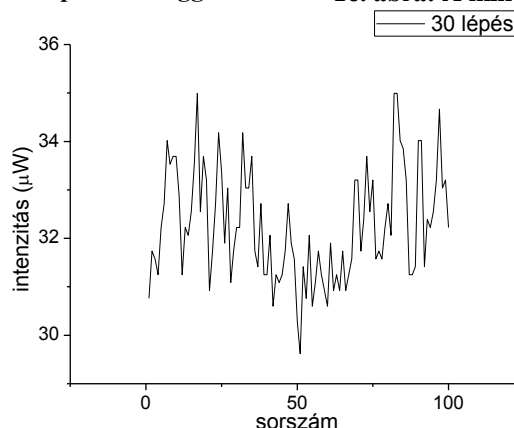
Ezután különböző lépéshosszakkal végeztem méréseket a REFS_PEE20 mintán, melyek eredményei alább láthatóak a 15-17. ábrákon és a 3. táblázatban.



15. ábra: A minta profilja 3 lépéstávolsággal



16. ábra: A minta profilja 15 lépéstávolsággal



17. ábra: A minta profilja 30 lépéstávolsággal

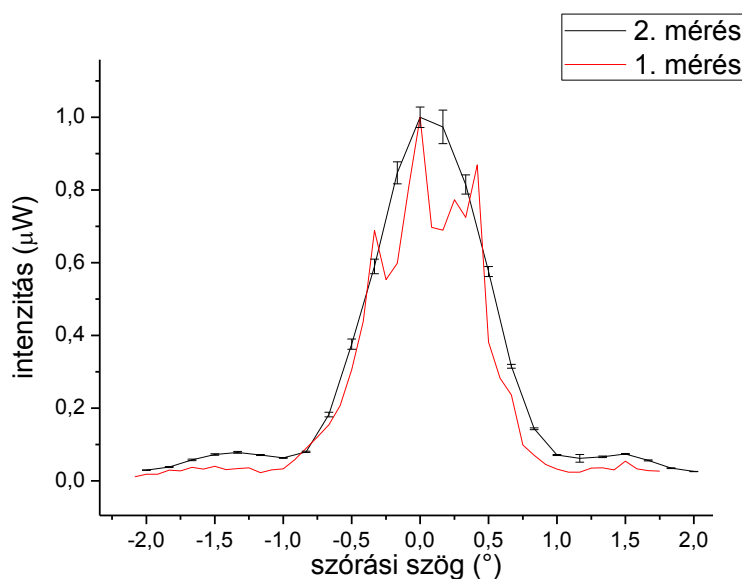
A 15. ábrán látható, hogy ha túl kicsi a lépésszám, akkor valóban túl kicsi területet pásztáz be a mérés és a detektálás zaja jelenik meg, míg nagyobb lépésszámok esetében az átlagérték driftel a minta inhomogenitása miatt, mint például a 17. ábrán. A kiszámolt szórásokat a 3. táblázatban tüntettem fel. A legkisebb szórással az 5, a 10 és a 15 lépéshez tartozó mérések bírnak. A lézer szemcseméret néhány tizedmilliméter nagyságrendű, ezért az ehhez legközelebb álló lépéshosszat, a 60 μm -nek megfelelő 15 lépést választottam.

	30	25	20	18	15	10	8	5	3
átlag (μW)	32,263	32,179	32,011	32,084	32,296	32,579	32,641	32,503	32,490
szórás (μW)	1,330	1,286	1,275	1,249	1,210	1,200	1,291	1,161	1,413
relatív szórás (%)	4,125	3,996	3,985	3,895	3,747	3,684	3,955	3,572	4,349

3. táblázat: A különböző lépésszámokkal felvett méréssorozatok adatai

Így a detektor elé helyezett 0,9 mm·8 mm-es réssel, 0,2°-onként mintavételezve, 100, egymástól 60 μm távolságban lévő mérési ponttal újra elvégeztem a REFS_LC20 minta szórási karakterisztikájának mérését.

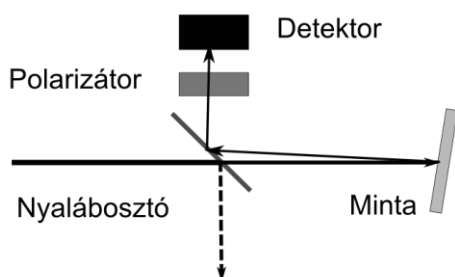
Az újonnan mért görbe a 18. ábrán látható a kezdeti méréssel összevetve, melyen az új eredmények relatív hibáját is feltüntettem. Az azonos skálán való ábrázoláshoz az intenzitás maximumával normáltam a görbéket.



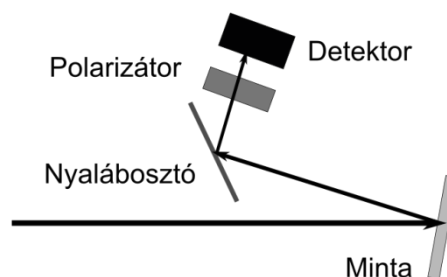
18. ábra: A mérési eredmények a módosítások előtt (1. mérés) és a módosítások után (2. mérés)

A további munkához a kisebb szóráson kívül szükségessé vált a nagyobb szögekben történő mérés is. Azonban a nyálábosztó véges kiterjedése miatt nem lehetséges közvetlenül tetszőleges szórási szögben mérni, illetve nem az abszolút szórt intenzitást detektáljuk a rajta történő kiszóródás és elnyelődés miatt – az ebből adódó különbséget szemléltetik a 19. és a 20. ábrákon mutatott elrendezések. Így két mérési sorozatot végeztem el: nagyobb szögekben

is mértem, és megállapítottam, hogy hogyan viszonyulnak az eredmények a kisebb szögeknel végzett méréshez. Vagyis felvettem egy adatsort a nyalábosztón, és felvettem egyet a nyalábosztón kívül úgy, hogy mindkét esetben egy jól meghatározott szöghöz képest fordítottam el a goniométer karját, és hogy a két tartománynak legyen átfedő része. Így megállapítottam egy skálafaktort a két mérési sorozat összehasonlításából, mely eredményeit a 4. táblázatban tüntettem fel.



19. ábra: Retroreflexió nyalábosztóval



20. ábra: Direkt reflexió nyalábosztó nélkül

Szórási szög (°)	Teljesítmény nyalábosztóval (μW)	Teljesítmény nyalábosztó nélkül (μW)	skálafaktor
4,000	0,237	5,743	24,208
4,167	0,224	5,569	24,796
4,333	0,213	5,251	24,589
4,500	0,197	4,849	24,496
4,667	0,187	4,574	24,462
4,833	0,178	4,355	24,422
5,000	0,172	4,049	23,448
átlag			24,346
szórás			0,433
relatív szórás			1,781

4. táblázat: A két, részben átfedő szögtartományban végzett mérések összeillesztése

A két méréssorozat közti hányados minden pontra jó közelítéssel egyezik, a relatív szórás mindössze 1,781%, melyet a szögbeállítás és a detektálás pontatlanságai okozhatnak (4. táblázat), így az átlagértéket, 24,346-ot használtam a két görbe összeillesztésére. A számolással olyan szórási karakterisztikát kaptam, mintha úgy mértem volna, meg hogy a detektor a kar végén helyezkedik el – ezzel elimináltam a nyalábosztó hatását.

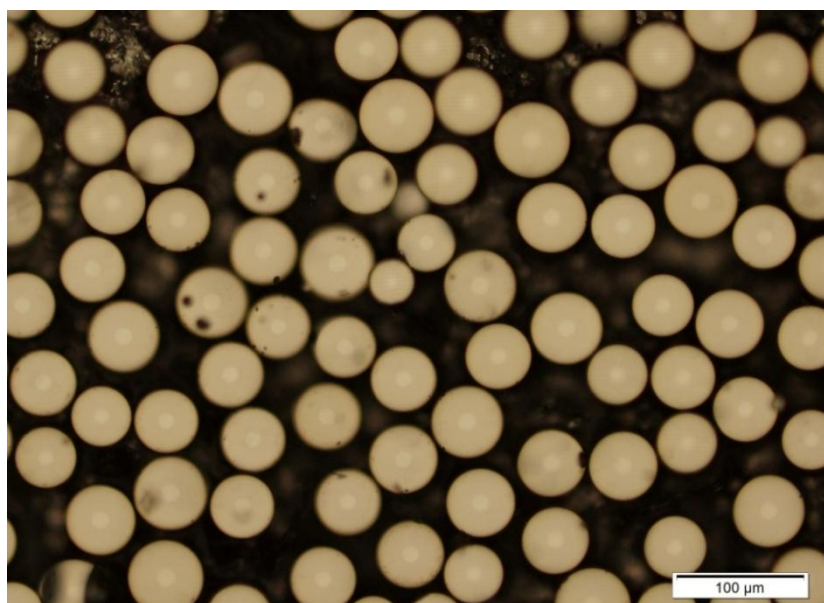
Tehát a korábbi mérési elrendezésem fejlesztésével lehetővé tettem a minták nagyszögű, nagyobb pontosságú, abszolút intenzitású mérését a vetítési jellemzők meghatározásához, mellyel kiválasztottam a rendelkezésre álló legjobb ernyőt és annak teljesítmény szögkarakterisztikáját a további munkámhoz.

4. Retroreflektív ernyő modellje

Az ernyő működését a ZEMAX optikai tervező programmal szimuláltam, mely sugárátvezetéssel számolja a fény terjedését valamely optikai rendszer modelljében. A programban lehetséges különböző fényforrások, lencsék, felületek és detektorok elhelyezése a tervezett rendszer működésének vizsgálatához. A program két módban működhet: nem sorrendi módban a fénysugár útja egy felülethez érve megtörhet, szóródhat vagy elnyelődhet a felület tulajdonságaitól függően. A nem sorrendi módban a sugarak a felületeket tetszőleges sorrendben érinthetik, akár többször is. A sorrendi módban ezzel szemben a sugarak egy előre jól meghatározott utat járnak be a tárgysíktól a képsíkgig.

A célból készítettem el az ernyő modelljét, hogy a paramétereinek vizsgálatával megfelelő beállításokat találjak egy jobb vetítő ernyő készítéséhez. Ehhez a fény visszaverődését és szóródását kell megvizsgálni. Mint bemutattam, a struktúra nagyon egyszerű. A fénysugarakkal a következők történhetnek a felületet elérve: egy része valamely golyóról retroreflektálódik miután lefókuszálódott annak hátuljára, egy része visszaverődik a golyó felületéről, a maradék rész pedig az ernyő golyóval nem fedett felületéről szóródik, illetve áthalad a mintán. A modellben nem alkalmaztam abszorpciót és transzmissziót, mert nincsenek mérési eredményeim róluk.

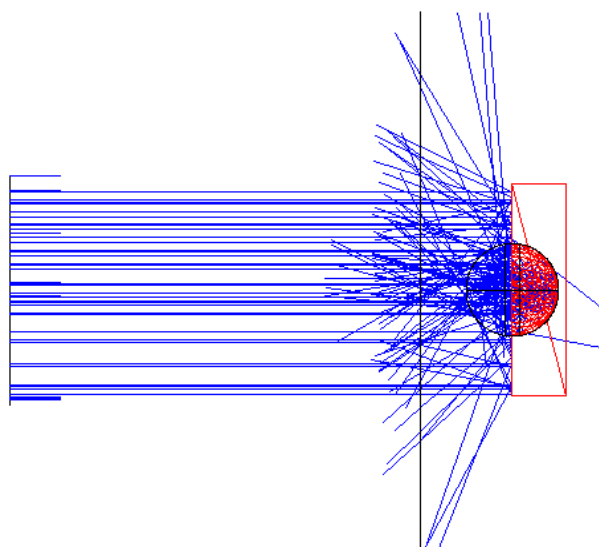
A modellszámításokhoz a REFS_PEE20 jelű ernyő adatiból indultam ki: az üveggyöngyök átlagos átmérője $50\ \mu\text{m}$, törésmutatójuk 1,93. A 21. ábra alapján egy egyszerű képfeldolgozó programmal megállapítottam, hogy az üveggyöngyök átlagosan a felület 60%-át töltik ki.



21. ábra: A REFS_PEE20 minta fénymikroszkópos képe

4.1. Modell a ZEMAX nem sorrendi módjában

A következő modellt készítettem el a ZEMAX nem sorrendi módjában (22. ábra): kollimált nyalábú fényforrással egyenletesen megvilágítottam egy Lambert-sugárzó felületen elhelyezkedő 1,93 törésmutatójú gömböt, melynek hátoldalát tökéletesen reflektáló felülettel borítottam. A gömb területaránya a teljes felülethez szintén a fentebb említett 60% volt. Belátható, hogy egyetlen gömb és a megfelelő területarányú ernyő ugyanazt az eredményt adja, mintha sok gömböt helyeznék el adott felületen ugyanilyen arányban. A retroreflektorhoz közel helyezett detektorral detektáltam a visszaverődő fényt a beesési szög függvényében, mely megfelel a 3. fejezetben bemutatott mérési eljárásomnak.



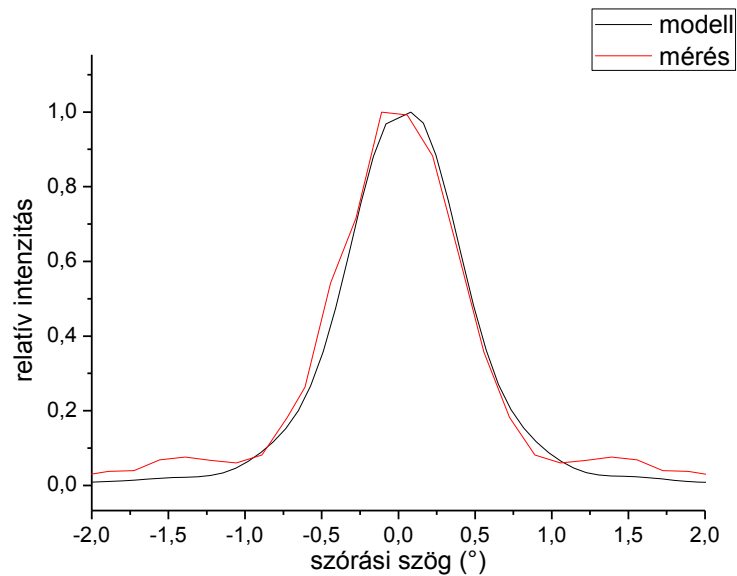
22. ábra: A nem sorrendi modellben készített elrendezés

A ZEMAX nem sorrendi modellje geometriai optikai közelítésen alapul, vagyis a kapott intenzitás profil csak közelítőleg írja le a valóságot, mert nem tartalmaz diffrakciót.

Jól ismert, hogy kör alakú apertúrán a távoltéri diffrakció intenzitása a szög függvényében a következő:

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{2J_1(k \cdot a \cdot \sin\theta)}{k \cdot a \cdot \sin\theta} \right)^2 \quad (3)$$

ahol k a hullámszám, a az apertúra sugara és J_1 az elsőrendű Bessel-függvény [12][13]. Ekkor az $I(\theta)$ függvény és a geometriai modell konvolúciója adja az intenzitás eloszlást, mely a 23. ábrán látható.

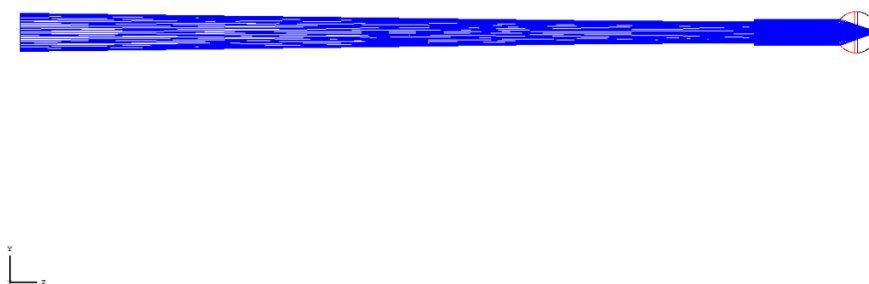


23. ábra: A nem sorrendi modell és a mérési eredmény összehasonlítása

Megállapítható, hogy 1° -ig a modell és a mérés lefutása és a félretékszélessége is egyezik, azonban konvolúciós modellben nem látható sem a lokális minimum 1° -nál, sem az ezt követő lokális maximum, tehát ezzel a modell elrendezéssel nem lehetséges a diffrakció pontos figyelembe vétele.

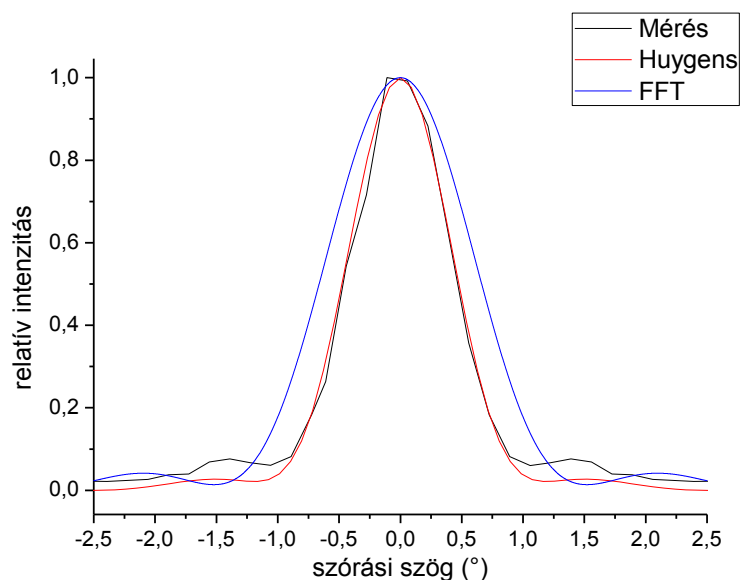
4.2. Modell a ZEMAX sorrendi módjában

A ZEMAX alapvetően geometriai optikai számításokra használható, de a sorrendi módjában lehetséges a rendszer kilépő pupilláján megjelenő hullámfront elemzése és annak vizsgálata diffrakciós modellekkel segítségével. Ebben a modellben a fény által bejárt útvonal szerint vettem fel a felületeket, mely egyetlen $50\ \mu\text{m}$ -es gömböt tartalmaz, $532\ \text{nm}$ -es fényforrással (24. ábra).



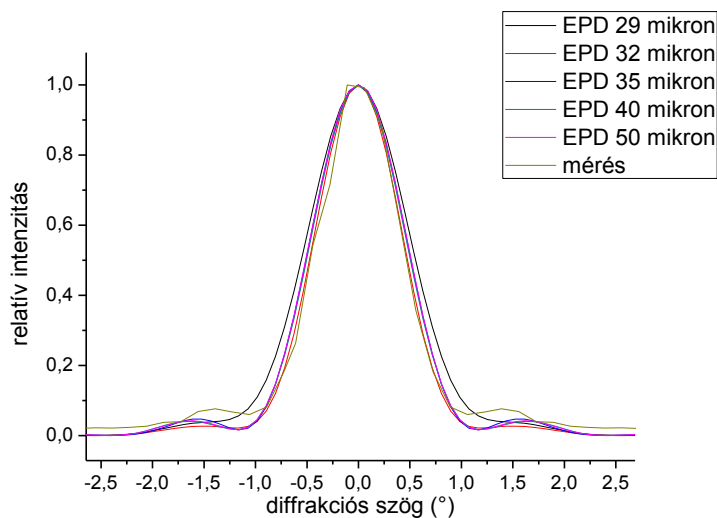
24. ábra: A sorrendi modellben készített elrendezés

A sorrendi modell a diffrakciós eloszlást nem konvolúcióval számolja, hanem a távoltéri esetre érvényes Fourier-transzformációs pontválasz függvénnyel (FFT PSF-fel), illetve a Huygens-integrállal [12]. Mindkét számolást elvégeztem több belépő apertúra átmérőre (EPD) is.



25. ábra: A mérés, a Huygens és az FFT számolások összehasonlítása

A 25. ábrán ábrázoltam a maximumra normált mérési eredményeket és a modell eredményeket. Az FFT-nél jóval pontosabb a Huygens-integrál, mely a nem sorrendi modellnél jobban írja le a karakterisztikát: a félértékszélesség és a lefutás azonos 1° -ig, majd némi differencia lép el az intenzitásértékek között, de azonos szögeknél megtalálható a lokális minimum és a lokális maximum is.



26. ábra: Huygens-integrállal kapott diffrakciós görbék különböző EPD esetén

A szimulációt lefuttattam különböző belépő apertúra méretekre (26. ábra). A görbék jellege megegyezik, kismértékű eltérés tapasztalható a félértékszélességben: a mérés félértéke $0,917^\circ$, a modellé $0,985^\circ$. A minimum és a maximumhelyek is a mérés hibahatárán belül azonos intervallumba esnek. A kismértékű eltérés pontos okára sűrűbb mintavételezéssel lehetne rájönni. Abban is mindegyik görbe egyezik, hogy az 1° -nál nagyobb szögeknél az intenzitás kisebb, mint a mérésnél, mivel ez a modell nem tartalmazza a szórást.

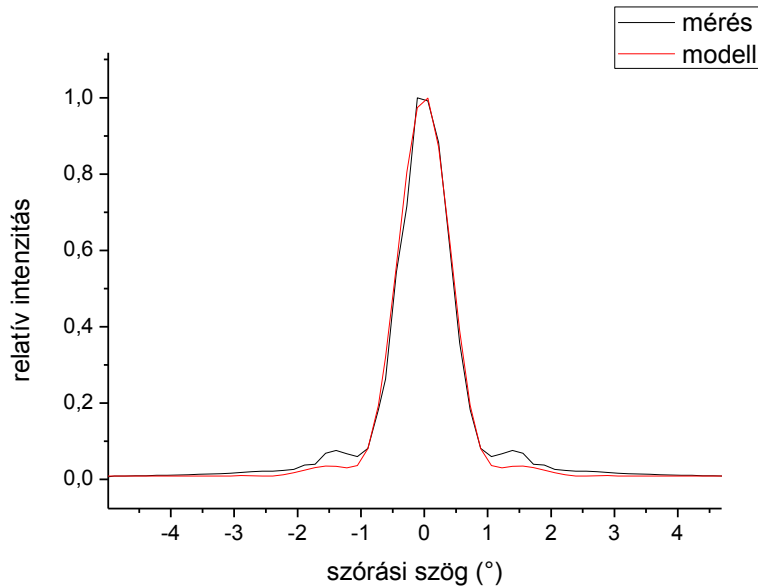
Megállapítom, hogy a modellek közül a mérési eredményekhez a Huygens-integrállal kapott karakterisztika illeszkedik a legjobban, vagyis a diffrakció a legdominánsabb jelenség. Sajnos a diffúz szórás ezzel a modellel nem írható le.

4.3. A diffúz szórás becslése

Az ernyőről alkotott modellemmel szeretném leírni az ernyőről nem retroreflexióval történő szórást is.

A „tökéletes” retroreflexión kívül a detektálható fénysugarakkal a következő jelenségek játszódhatnak le - melyekre már a 4. fejezet bevezetésében is utaltam - a fény visszaverődik a golyók közti teret kitöltő fémes jellegű felületről, kis mértékben visszaszóródik a gömbök felszínéről, illetve aberrációk miatt kiszóródik nagyobb szögekben. A retroreflexióval visszavert fény jellemzően az 1° -os szórási szögön belül koncentrálódik, 1° és 2° között az első diffrakciós gyűrű és a szórt fény figyelhető meg, míg 2° -tól pedig legnagyobb részt a szórt fény látható.

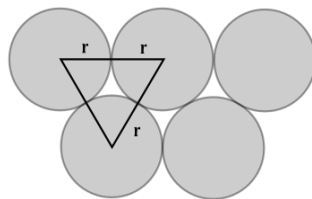
A golyókat hordozó fémes felület szórását Lambert-sugárzással közelítettem. Annak érdekében, hogy a diffúz szórási profil maximumát meghatározzam, kiválasztottam a mért görbe egy olyan pontját, mely esetében a szóródás a domináns jelenség. Ekkor az adott szöghöz tartozó $\cos(\alpha)$ érték alapján meg tudtam határozni a szórt fény eloszlását, melyet hozzáadtam a diffrakciós számolásból kapott karakterisztikához (27. ábra).



27. ábra: A mérés és a modell összehasonlítása, melyben szerepel a diffrakció és a diffúz szórás is

Az így kapott modell tartalmazza a retroreflektált és a diffúz visszaszórást is, ezért jobban közelíti a mérési eredményeket. Azonban az $1,5^\circ$ -nál tapasztalható első diffrakciós gyűrű intenzitása még mindig különbözik a mértől. Az eltérés a gömb jelentős szférikus aberrációja miatt adódhat, melyet a diffrakciós integrál nem képes pontosan kiszámítani Huygens-közelítéssel. A különbségeket okozó jelenségeket a későbbi munka során fogom pontosabb számítási modellel megvizsgálni.

Mivel nagyobb szögeknél meghatározó, a szórás a távolabbi szembe jutó fényt befolyásolja, s mint megállapítható, a fény jelentős hányada szóródik, ezért fontos, hogy valamilyen módon csökkentsük, vagy egy jobb megoldás esetén retroreflektáljuk. Ennek elméleti korlátai vannak – ha egy réteg üveggömbből készítjük a struktúrát, akkor a legnagyobb arányú kitöltés a 28. ábrán mutatott módon lehetséges.



28. ábra: A „legsorosabb” egyrétegű elrendezés

Ebben az esetben egységnyi felületnek a $2r$ oldalú szabályos háromszöget választjuk. A szabályos háromszög tulajdonságai alapján tudjuk, hogy a háromszögbe beírt három körikk területe egy r sugarú félkör területével egyezik meg, illetve a háromszög területe alapján a nem gömbbel kitöltött terület:

$$T_{szóró} = \sqrt{3}r^2 - \frac{r^2\pi}{2} \quad (4)$$

Mely terület az összterülethez r^2 -tel való egyszerűsítés után

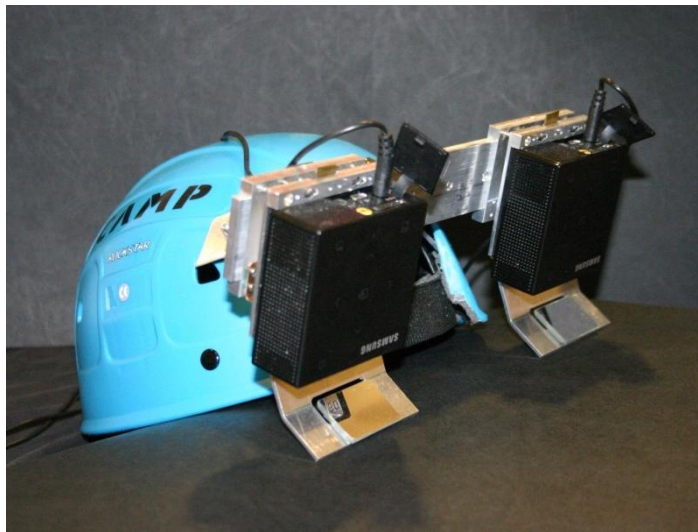
$$\text{területatány} = \frac{T_{szóró}}{T_{összes}} = \frac{\sqrt{3}-\frac{\pi}{2}}{\sqrt{3}} = 0,093 \quad (5)$$

ami 40%-ról 9,3%-ra csökkentené a szórófelület nagyságát.

Egy másik mód lenne a teljes felület kitöltése üveggömbökkel, úgy, hogy több, legalább két réteget helyezünk el belőlük egymás felett, ám e megoldás gyakorlati kivitelezése nem könnyű feladat.

5. Rendszer specifikáció számolása

A kiválasztott ernyőből és két kisebb méretű projektorból szereltük össze a fejre szerelhető kivetítő rendszer egy kezdetleges prototípusát, ezzel tesztelve, milyen mértékben valósítható meg a 3D kivetítés. Az általunk vásárolt projektorok mérete miatt azokat a 29. ábrán látható módon helyeztük el, s a kivetítéshez tükröket használtunk. E rendszer paramétereinek ismeretében határoztam meg a 3D vetítést számszerűen specifikáló áthallást és fénysűrűséget.



29. ábra: A kivetítő rendszer prototípusa

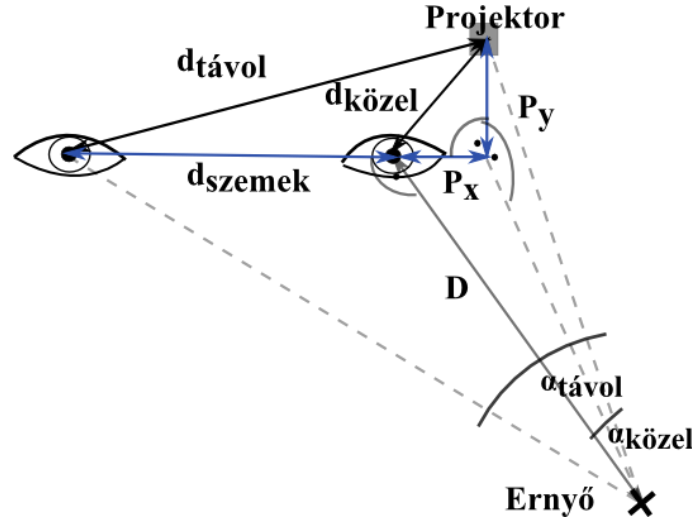
5.1. A számolás bemutatása

A 3D látvány minőségét a projektor, a kivetítő ernyő és a kivetítés paramétere határozzák meg. Az ernyő minőségét a 3D szempontjából a két szem közötti áthallás jellemzi, továbbá a kivetítés szempontjából a fényesség és a homogenitás jellemzik. Az érzékelt fényesség ezen kívül kapcsolatban van a projektor és a szemek, a szemek és az ernyő távolságával, hiszen más-más pozíciók esetén más szög alatt fog beérkezni a fény a szemünkbe, vagyis esetenként a mért karakterisztika különböző értékeit kell figyelembe venni. Tehát a szembe jutó fényteljesítményt kell vizsgálni a mérési eredmények alapján a projektor helyzetének és az ernyő távolságának függvényében.

Az áthallás (CT, cross-talk) a távolabbi szembe és a közelebbi szembe jutó fény teljesítményének aránya:

$$CT = \frac{P_{távol}}{P_{közel}} \quad (6)$$

Érthető, hogy ennek a számnak egynél kisebbnek kell lennie, hogy a megfelelő képet sokkal jobban lássuk a megfelelő szemmel, azaz a másik kép elhanyagolható legyen hozzá képest. Ennek kiszámításához tudni kell, hogy a projektor és az adott szem mekkora pozíciója szöget zár be az ernyő egy bizonyos pontjával, hiszen az ernyő szögkarakterisztikája ismert. A számolás magyarázatához nyújt segítséget a 30. ábra.



30. ábra: A számoláshoz használt távolságok

A közelebbi szemhez tartozó szög a projektor - közelebbi szem - képernyő derékszögű háromszög alapján

$$\alpha_{közel} = \arctan\left(\frac{d_{közel}}{D}\right) \quad (7)$$

ahol $d_{közel}$ a közelebbi szem és a projektor távolsága, D az ernyő és a szem távolsága. A távolabbi szemhez tartozó szög a projektor - távolabbi szem - képernyő háromszög $d_{távol}$ -al szemközti szöge, mely a koszinusz-tétel alapján számítható:

$$\alpha_{távol} = \arccos\left(\frac{d_{szemek}^2 + D^2 + d_{közel}^2 + D^2 - d_{távol}^2}{2\sqrt{(d_{szemek}^2 + D^2)(d_{közel}^2 + D^2)}}\right) \quad (8)$$

ahol d_{szemek} a két szem távolsága, $d_{távol}$ a távolabbi szem és a projektor távolsága, $d_{szemek}^2 + D^2$ a távolabbi szem és az ernyő távolságának négyzete, $d_{közel}^2 + D^2$ pedig a projektor és az ernyő távolsága, mely összefüggéseket a Pitagorasz-tétel alapján kaptam. A számoláshoz tehát elegendő megadni a projektor (P_x , P_y) x és y irányú koordinátáit, a két szem távolságát [13] és a D ernyőtávolságot.

Az ernyő fényességét a fénysűrűség nevű, B -vel (brightness) jelölt mennyiséggel jellemezzük [14], melyre igaz lesz, hogy

$$L = \iint B(x, y, \varphi, \vartheta) d\Omega dA \quad (9)$$

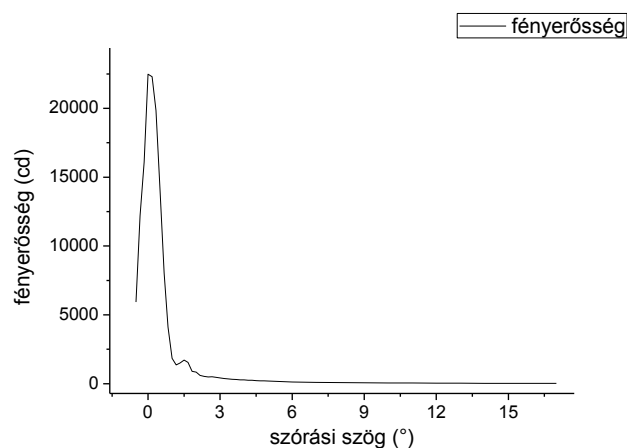
ahol L -t, a megvilágító fénytelsítményt megkapjuk a fénysűrűségből a megvilágított területre és a térszögre integrálva. Ezért a fénysűrűség számolásához a mérési eredményeket a detektor térszögével kell normálni, figyelembe kell venni az ernyő hatásfokát és területét, melyet a következő módon kapunk:

$$B = \frac{m}{\frac{T}{R^2}} \frac{L}{P} \frac{1}{A} = \frac{m \cdot R^2}{T \cdot P} \frac{L}{\gamma} \cdot \frac{1}{D^2} \quad (10)$$

ahol B a fénysűrűség, $m(\alpha)$ a mért karakterisztika, $T = 7,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ a detektor területe, $R = 0,25 \text{ m}$ az ernyő-detektor távolság, $L = 30 \text{ lumen}$ a rendelkezésünkre álló vetítő teljesítménye, $P = 25 \text{ mW}$ a lézer teljesítménye, $A = \gamma \cdot D^2$ a megvilágított terület, ami a D ernyő-vetítő távolsággal arányos.

A számolás alkalmazásának feltétele, hogy az ernyő minden spektrális komponensre hasonlóan működjön, ami teljesül, hiszen a 9. ábrán megfigyelhető, hogy fehér fény verődik vissza.

A 10. egyenlet által leírt képletben R , T , P a mérésre jellemző állandók, L és γ a projektort jellemző állandók, vagyis ha a kivetítő rendszer adott, meghatározható egy bármely méréstől független, a kivetítő paramétereit tartalmazó, csak a szórási szögtől függő karakterisztika, mely az adott összeállításra lesz jellemző. Így a kapott mennyiség fényerősség, azaz candela (cd) dimenziójú lesz [14], mely a 31. ábrán látható, s a mérési eredményeknek megfelelő karakterisztikájú, átskálázott görbe.



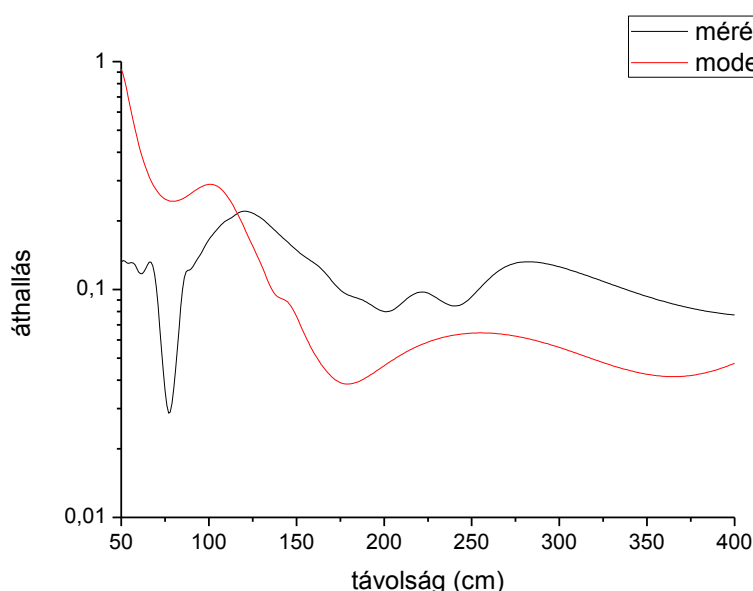
31. ábra: A fényerősség a szórási szög függvényében

5.2. Eredmények

A tervezett rendszerben a projektokat a szemek felett 2 cm-re húzódó, homlokkal párhuzamos, vízszintes tengelyen helyeztük el. A modellszámolásomat a projektor több vízszintes helyzetére is lefuttattam, mert vízszintesen távolodva nem csak a közelebbi szem

által látott visszaszórt intenzitás csökken, hanem a távolabbié is, nem egyenlő mértékben. A projektor optimális elhelyezkedését a szemtől mérve vízszintesen 0,5 cm-nek találtam.

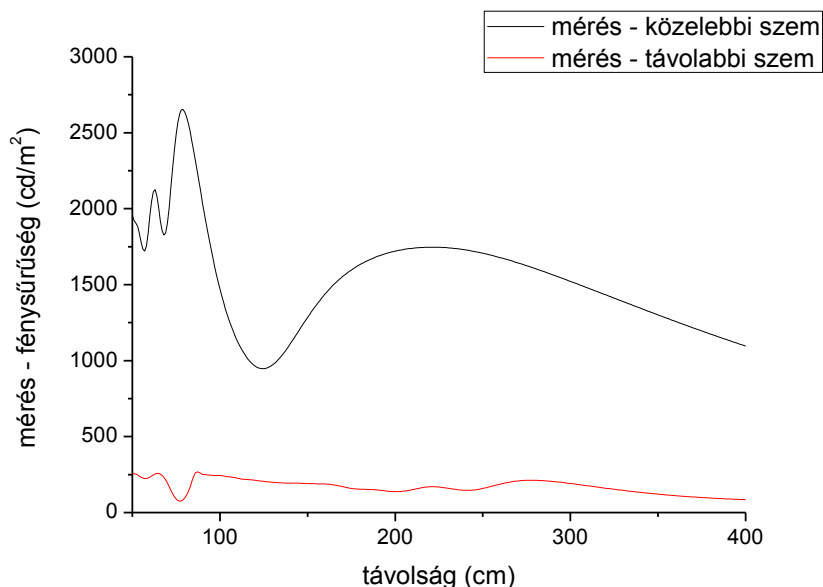
Az áthallásra vonatkozó számolásokat elvégeztem a mérési eredményekkel és a 4. fejezetben bemutatott modellből kapott szórási karakterisztikákkal az ernyő-vetítő távolság függvényében.



32. ábra: Az áthallás a mért és modellezett szórási karakterisztikák alapján

Az eredmények a 32. ábrán láthatóak. A mérés és a modell alapján számolt áthallási görbék között eltérés tapasztalható, melyet a modell és a mérés szórási karakterisztikái közötti különbség okoz. Lényeges eltérés a 100 cm-nél kisebb távolságoknál adódik, ugyanis ez esetben a közelebbi szem az ernyő 1° és 2° közötti szórási szögtartományba esik. A 4. fejezetben tárgyalt szórási karakterisztika modell ebben a szögtartományban mutatja a legnagyobb eltérést a mért értékektől.

Nagyobb távolságoknál a két görbe futása hasonló: nincsenek rövid távolságon bekövetkező nagy megváltozásai az áthallásnak, mely mindkét esetben 0,1 körüli érték. Azért közelíti ezen a tartományon a modell karakterisztikájából számolt áthallás függvény a mérést, mert ekkor az 1° -nál kisebb szórási szögekhez tartozó értékeket kellett elosztani egymással. A 4. fejezetben láttuk, hogy a modell jól közelíti a mérést 1° -os szórási szögig. Az eltérést ezúttal is a szórás adja, mely a távolabbi szemnél meghatározóbb jelenség. Az eredmények alapján látható, hogy a szórás pontosabb modellezése még jobban leírná az áthallás távolságfüggését is, s csökkentésével javítani lehetne az áthallás mértékén.



33. ábra: A fénysűrűség a mérés alapján

A 33. ábrán feltüntetett fénysűrűséget a távolság függvényében a mérési eredmények alapján kaptam. Megállapítható, hogy a közelebbi szembe kellően sok fény jut a vizsgált tartományon – egy napjainkban használatos kijelző fénysűrűsége 100 cd/m^2 -nél kezdődik, tehát az ernyő mindenképpen megfelel a szokásos megjelenítők ezen követelményének.

A számolásokból kapott eredmények a prototípus tesztelésével összhangban azt mutatják, hogy a 3D érzékelés lehetséges, a retroreflexió az általunk várt módon képes szelektíven visszaverni az adott szembe a hozzá közelebbi projektor fényét, de nem kielégítő mértékben. A szem logaritmikus érzékelése miatt az az ökölszabály érvényesül, miszerint kb. 2 nagyságrendi különbségeket várunk az áthallás értékére, ezért a mérési eredmény alapján kapott görbe nem elég jó – ennél legalább egy nagyságrenddel jobbat szeretnénk elérni. Az érzékelt áthallás erősen függ attól is, hogy milyen képeket vetítünk ki: ha kis távolságon nagy kontrasztot tartalmaz, akkor az áthallás sokkal zavaróbb, mintha homogén, nagyméretű felület lenne a fókuszban. A tervezett rendszer előnyét a mobilitása adja, hiszen az optimális kivetítési távolság alkalmazásfüggő, ezért olyan áthallási karakterisztikát szeretnénk kapni, mely a felhasználónak kényelmes 100-300 cm-es távolságtartományon megfelelően kis áthallású. Éppen ezért szeretnénk az áthallásra ennél jobb arányt adó ernyőt tervezni, mely esetén hosszabb tartományon kisebb az áthallott kép intenzitásának aránya a látni kívántéhoz képest. A fénysűrűség elegendően nagy a kivetítéshez.

Tehát a leírt számolási módszerrel bármely adott karakterisztikájú ernyő tulajdonságai összehasonlíthatóak lesznek a jelenleg rendelkezésre álló ernyőével, melynél jobb áthallásút szeretnénk készíteni.

5.3. Kitekintés

Munkám folytatásaként szeretném megvizsgálni a dolgozat írása során felmerült, illetve idő hiányában nem tárgyalt kérdéseket.

Az eddigi eredményeimből kiindulva szeretném tökéletesíteni a már meglévő ernyőt. A mérés és a modell jobb összehasonlíthatósága miatt szeretném a kis intenzitású, nem monoton változó részeket sűrűbb mintavételezéssel újra mérni, hogy pontosabban ki tudjam mutatni, mennyire egyezik a két eredmény. A szórás mélyebb megértéséhez megvizsgálnám közelebbről az üveg-levegő, az üveg-fémréteg és levegő-ezüst határfelületeken lejátszódó jelenségeket, a fellépő aberrációk mértékét. Másrészt a modell fejlesztéséhez a szórás tárgyalt hatásait csökkenteném másfajta elrendezéssel: csökkenteném az üveggolyókon kívüli szóró felület méretét az üvegyöngyök szorosabb elhelyezésével, több réteg felvitelével.

Az 5. fejezetben bemutatott számolásokat igazolandó, szeretnék mérési eljárást készíteni az áthallás megállapítására a projektorok használata közben a projektor és a detektor megfelelő helyzeteinél.

Célom az általam felépített modell és a számolások alapján meghatározni a vetítésre legmegfelelőbb szórási karakterisztikát, s ezek alapján szeretnék saját magam elkészíteni egy ernyőt, mely működését méréssel és a kivetítéssel ellenőrizném.

Szeretném megvizsgálni azt a kérdést is, hogy létezik-e olyan struktúra, ami a rá eső fényt nem retroreflektálja, hanem a beesési szögtől adott szöggel eltérítve veri vissza – mely jelenség megoldaná az áthallás problémáját és lehetővé tenné a még kisebb teljesítményű projektorok használatát. A rendszerről szóló bevezetésben említett diffúz-retroreflektív ernyő a fenti kérdésre részben válasz lehet, mert egy retroreflektort kis szórási szögű elliptikus diffúzorral kombinálva a visszavert nyaláb a kívánt irányban kiszélesedik – ezáltal több fényt lehetne a megfelelő szembe juttatni, vagyis arányaiban többet, mint a nem megfelelőbe, így növelve a 3D minőségét.

6. Összefoglalás

TDK-munkám során egy mobil, teljes parallaxist nyújtó háromdimenziós kivetítő rendszer megépítésében vettem részt, mely részeként a kivetítő ernyő vizsgálatával foglalkoztam alaposabban.

Munkám első részében a rendelkezésemre álló minták közül kiválasztottam a legalkalmasabbat a kivetítésre, melyhez szükség volt az ernyők szórási tulajdonságainak megállapítására. Ennek megállapítására egy, általában korábban épített goniofotométeres mérési elrendezésemet fejlesztettem tovább. Az új elrendezéssel lehetségessé vált a reflektált fény teljesítményének mérése abszolút skálán, a merőleges beeséstől való elfordulás függvényében kis és nagy szórási szögek esetében egyaránt. A mérést kiegészítettem egy xy-mozgatóval, ezzel lehetővé téve a minta különböző pontjain történő mintavételezést, amivel lecsökkentettem a mérési bizonytalanságot. Ilyen módon kaptam meg a mintára jellemző szórási karakterisztikát.

A munka második részében az ernyő működésének jobb megértéséhez, annak tulajdonságai javítása érdekében modelleztem a struktúráját a ZEMAX optikai tervező programmal, mely jó közelítéssel visszaadta a mérési eredményeket. Az ernyőről alkotott modellemben megbecsültem az ernyő szórását, mely nem tartalmazza az aberrációkból származó hatásokat.

A munka harmadik részében a rendszer prototípusához rendelkezésre álló projektorok és az ernyőről megállapított szórásai karakterisztika alapján kiszámítottam a rendszerre jellemző, a 3D képképzés minőségét leíró paramétereket a kivetítő-ernyő távolságának függvényében: az áthallást és a fénysűrűséget. A számolások azt mutatták, hogy a jelenlegi összeállításban mindkét érték elégséges egy bizonyos távolságtartományon a kivetített képek által kívánt 3D élmény eléréséhez. A számolást alkalmaztam a modellből kapott karakterisztikára is, s azt a következtetést vontam le, hogy a mintáról szóródó fény csökkentésével lehetséges volna nagyobb hatásfok és kisebb áthallás elérése.

Munkám folytatásaként szeretném jobban megvizsgálni az ernyő áthallását befolyásoló szórás és aberrációk okait, melyet a jobb működés érdekében szeretnék csökkenteni, ezáltal egy jobb ernyőt létrehozni. A számolásaim alátámasztására tervezem egy, az áthallás megállapítására szolgáló mérési elrendezés építését. A jövőben szeretném további ernyők, például diffúz-retroreflektor vagy adott szögben visszaszóró ernyők használatának lehetőségét is megvizsgálni.

Köszönetnyilvánítás

Hálásan köszönöm témavezetőmnek, Dr. Koppa Pálnak, hogy idejét szánta munkám segítésére, a velem való konzultációra, és hogy útmutatást adott kutatási tevékenységem során.

Szeretnék köszönetet mondani Sarkadi Tamásnak a rengeteg észrevételért és tanácsért, mellyel a kísérleti munkámat és a dolgozat elkészültét segítette.

Köszönettel tartozom Dr. Erdei Gábornak a ZEMAX optikai tervező program kezelésében nyújtott segítségéért.

Szeretném megköszönni Dr. Ujhelyi Ferencnek, hogy segített az xy-mozgató beüzemelésében, és hogy rengeteg hasznos gyakorlati tanáccsal látott el.

Hivatkozások

- [1] Benton, Stephen – *Selected Papers on Three-Dimensional Displays*, SPIE Press, 2001, ISBN 978-0819438935
- [2] Javidi, Bahram et al. – *Three-Dimensional Imaging, Visualization and Imaging*, Springer, 2009, ISBN 978-0-387-79334-4
- [3] Balogh, Tibor “*The Holovizio system*”, *Stereoscopic Displays VirtualReality Syst.* XIII, p. 60550U, SPIE.
- [4] Blundell, Schwarz – *Volumetric Three-Dimensional Display Systems*, Wiley, 2000, ISBN 978-0471239284
- [5] Holliman, Nicolas S. et al., „*Three-Dimensional Displays: A Review and Applications Analysis*”, *IEEE TRANSACTIONSON BROADCASTING*57(2), PP. 362-371 (2011)
- [6] Rennilson, J. J. „*Retroreflection measurements: a review*”, *Applied Optics*, Vol. 19 Issue 8, pp.1234-1234, 1980
- [7] 3M, *Engineer Grade and Utility Grade Reflective Sheeting Series 3200, 3260 and 5200*, Product Bulletin, 2011
- [8] <http://www.projectorcentral.com/popular-pico-projectors.htm>
- [9] Á. Kerekes, E. Lőrincz, P.S. Ramanujam, S. Hvilsted „*Light scattering of thin azobenzene side-chain polyester layer*” *Optics Communications*, 206 57-65 (2002)
- [10] Héricsz, Dalma „*Vetítő ernyő optikai tulajdonságainak vizsgálata 3D képalkotáshoz*”, 2011
- [11] Egan, W. G. and Hilgeman, T. „*Retroreflectance measurements of photometric standards and coatings*”, *APPLIED OPTICS*, Vol. 15, No. 7, pp 1849-1849, July, 1976
- [12] Goodman, J. W. – *Introduction to Fourier optics*, Roberts & Company Publishers, 2005, ISBN 0-07-024254-2
- [13] Dodgson, Neil A. „*Variation and extrema of humaninterpupillary distance*”, *Proc. SPIE* vol. 5291, 2004, pages 36-46
- [14] Smith, Warren J. – *Modern Optical Engineering*, SPIE Press, 2007, ISBN 978-0071476874