



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Vetítő ernyő fejlesztése mobil 3D kivetítő rendszerhez

Héricsz Dalma

Fizikus MSc II. évfolyam

Témavezetők: Dr. Koppa Pál, Sarkadi Tamás

BME Fizikai Intézet,

Atomfizika Tanszék

BME 2013

A kutatás az Európai Unió és Magyarország támogatásával a TÁMOP 4.2.4.A/1-11-1- 2012-0001 azonosító számú „Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése országos program” című kiemelt projekt keretei között valósult meg.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Háromdimenziós megjelenítő rendszer	5
3. A retroreflektív ernyő modellezése	9
3.1. A modellezéshez felhasznált ismeretek	9
3.2. A modellalkotás lépései	11
4. Hengerszimmetrikus elemekből álló struktúra	17
4.1. A keresett szórási profil	17
4.2. Általános érvényű megfontolások a modell fejlesztéséhez.....	21
4.3. Optimalizáció	24
5. Asztigmatikus elemekből álló struktúra	33
5.1. A keresett szórási profil	33
5.2. Optimalizáció	35
6. Kitekintés	39
7. Összefoglalás	41
Köszönetnyilvánítás	43
Hivatkozások.....	44

1. Bevezetés

A háromdimenziós megjelenítés napjainkban igen sok figyelmet kap, hiszen az emberiséget mindig is foglalkoztatta a valóság legtökéletesebb rögzítésének és reprodukálásának kérdése. A technológia rohamos fejlődésének köszönhetően egyre több lehetőség áll rendelkezésünkre az elképzeléseink megvalósítására.

Számos megoldás született, melyekkel lehetséges 3D tartalmat megjeleníteni, mint például az időbeli multiplexelésen alapuló technikák, a volumetrikus megjelenítők, a polarizációs elvű rendszerek. [1][2][3]

Ennek ellenére mégsem tapasztalhatjuk, hogy életünknek szerves részét képezné bármelyik alkalmazás. A 3D térhódítását a rendelkezésünkre álló termékek kényelmetlen, nem praktikus tulajdonságai okozzák. A látott megoldások alapján a következő megállapításokat tehetjük egy széleskörű használatra szánt 3D megjelenítő tervezéséhez.

Praktikus szempontból kiemelkedően fontos, hogy a rendszer ne legyen túl összetett, kényelmes és könnyen kezelhető legyen a felhasználó számára. Természetesen a szokásos, megjelenítő rendszerekkel szemben támasztott elvárásoknak is meg kell felelnie, hogy azokkal felvehesse a versenyt, tehát megfelelő felbontással, fényerővel is kell bírjon, mindezeket elérhető ár mellett! Ezen elvárásokon túl egy 3D megjelenítőnek kielégítő térélményt kell nyújtania.

A térérzékelés a két szemünkkel látott, két kissé különböző képnek, az ún. sztereo képpárnak köszönhető, így a háromdimenziós kivetítők célja az, hogy az egyes szemekbe az adott nézetnek megfelelő képeket juttassák. Azonban a legtöbb kereskedelmi forgalomba szánt rendszer – mint például a 3D mozi is – ezen a ponton megáll: mindössze egyetlen sztereo képpárt biztosít a nézőnek. Természetesen születtek ezen túlmutató alkalmazások is – a parallaxis korlátozó [2], a több projektoros [4] és a holografikus elemeket tartalmazó megjelenítők [5] – melyek képesek a néző pozíciójától függően akár több nézetet is biztosítani, azonban a nézetek alacsony száma, a rendkívül nagy méret, vagy a magas ár nem teszi alkalmassá őket az elterjedt használatra. Ez rávilágít arra a tényre, hogy mennyire átütő különbség az, hogy a valóságban a megfigyelő minden pozíciójához és látószögéhez különböző sztereo képpár tartozik, ún. teljes parallaxis áll rendelkezésére. Vagyis a valós térérzékelést a legjobban a teljes parallaxis közelíti meg: ekkor akár vízszintes, akár függőleges irányba végzünk mozgást, az elmozdulásunk irányának megfelelő nézetet kapunk.

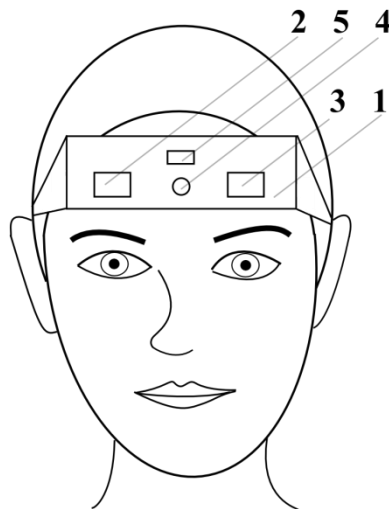
Mindezeket figyelembe véve célunk olyan 3D rendszer létrehozása, mely a fenti szempontok szerint előnyös, és akár azokon túlmutató tulajdonságokkal bír: teljes parallaxist nyújt, jó felbontású, több néző használhatja egyszerre, nem túl nagy méretű és könnyen kezelhető.

2. Háromdimenziós megjelenítő rendszer

Jelen TDK munkám a 2012. évi TDK konferenciáig elkészült munkám folytatása, mely során a három dimenziós, teljes parallaxist nyújtó rendszerhez alkalmas kivetítő ernyőket vizsgáltam. [6] Először szeretném röviden bemutatni az általam kutatott témát, mely az előző fejezetben leírt követelményeknek megfelelni kívánó 3D kivetítő rendszer. Az általam kutatott szűkebb problémakör az említett rendszerhez tartozó kivetítő ernyő vizsgálata.

Az első fejezetben felsorolt igényeknek a következő rendszer tesz eleget. A kivetítéshez szükséges projektorok (1. ábra (2) és (3)) egy kis méretű, fejre szerelhető eszközön (1. ábra (1)) [7] találhatóak, mely eszközön továbbá a képernyőkövető szenzor (1. ábra (4)) és a feldolgozó egység (1. ábra (5)) helyezkedik el, illetve a rendszer részét képezi egy kivetítő ernyő (3. ábra (6)).

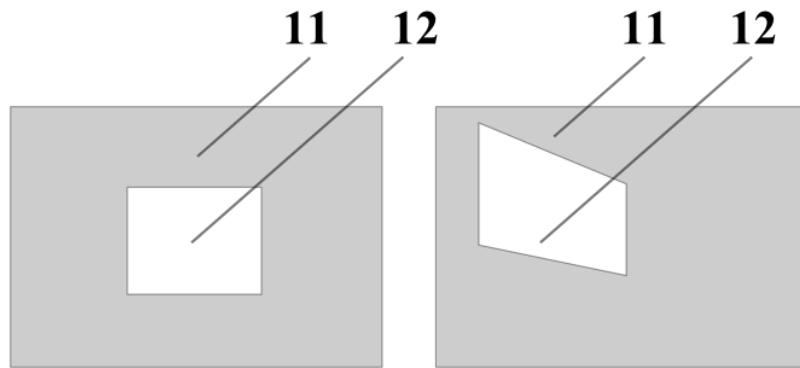
A projektorok feladata a megfelelő szemek számára a megfelelő perspektívájú képek vetítése egy adott három dimenziós tárgyról. A korábban megfogalmazott praktikus szempontok miatt a projektorok kis méretűek és kis teljesítményűek kell legyenek. E célnak az ún. nanoprojektorok felelnek meg [8], melyek nagysága összemérhető egy pénzérme átmérőjével, így kényelmesen viselhetőek. A mobil alkalmazások dinamikus fejlődése maga után vonja a projektorok méretének csökkenését kiváló felbontás és teljesítmény mellett [9], így ezen paraméterek is várhatóan megfelelőek a rendszerbe való integráláshoz.



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 képernyőkövető szenzor és a feldolgozó egység felel a tervezett három dimenziós kivetítő rendszer által létrehozott teljes parallaxis megvalósításáért. A képernyőkövető

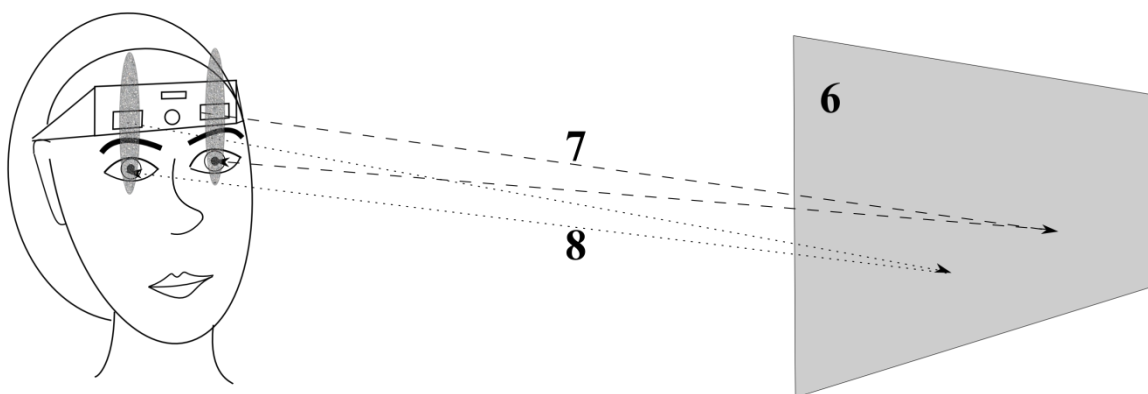
szenzor az ernyőre vetített, szemmel nem látható jelet (pl. közeli infravörös fényt) bocsát ki, és az ernyőről visszaverődött jel detektálásával állapítja meg a néző ernyőtől való pillanatnyi távolságát, illetve az aktuális látószögét. E két információ alapján a feldolgozó egység kiszámolja a perspektívának megfelelő képpárt. Ezt demonstrálja a 2. ábrán látható két kép, melyek a vetítő ernyőt mutatják, két lényegesen eltérő perspektívában.



2. 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.

A feldolgozó egység továbbá a fejmozgásból adódó kismértékű vibrációkat is korrigálja.

A rendszer részét képezni még a kivetítő ernyő, melynek feladata a rá kivetített képek megfelelő szemekbe juttatása, úgy hogy a fény csupán visszaverődik és kis mértékben szóródik az ernyőn. Ezzel kiküszöbölhető a különböző, rendszert bonyolító optikai elemek használata, mint például a tükrök vagy a félig-áteresztő lemezek, szemüvegek [10][11], hiszen a rendszerek mobilitását és könnyen használhatóságát a különböző, képeket szétválasztó szűrők, multiplexelési technikák csökkentik (lásd 3. ábra).



3. 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

Az általunk tervezett rendszer arra az alapfeltevésre épül, hogy a projektorok a néző szeméhez közel helyezkednek el. Így a kivetített képet az ernyőnek közelítőleg a

projektorokba kell visszavernie. A legegyszerűbb felületi struktúra, mely definíció szerint nagyon kis szórási szöggel a fényforrás irányába veri vissza a róla érkező fényt, a retroreflektív struktúra (3. ábra (6)). A kivetítéshez retroreflektort használva a projektorhoz közelebbi szembe nagy fényteljesítmény jut, azaz annak képe jól látható, míg a projektortól távolabbi szembe jutó teljesítmény sokkal kevesebb. Azaz az egyik nanoprojektor reflektált képét csak az egyik, a másik nanoprojektor reflektált képét lényegében csak a másik szem látja (3. ábra). Ha a tökéletes retroreflektor helyett függőleges irányban elnyújtott fényeloszlást hozunk létre, tovább növelhetjük a közelebbi szembe jutó fény mennyiségét [6]. Ugyanezen tulajdonsága miatt több néző is használhatja ugyanazt a vetítőkészletet egyszerre. Ugyanakkor a retroreflexió jó hatásfoka miatt a kis területre koncentrált nyalábok (3. ábra) nagy fényteljesítménnyel bírnak, ezért lehetséges a kis fényerejű nanoprojektorok használata.

Korábbi munkám során a retroreflektív struktúrák vizsgálatával foglalkoztam, melynek első fázisában megállapítottam, hogy a rendelkezésemre álló struktúrák közül melyik a legmegfelelőbb a 3D kivetítéshez. Ehhez kvalitatív módszert, illetve az általam fejlesztett goniofotométeres mérési elrendezést használtam. A két létező struktúra típus közül az üveggömböket tartalmazóval foglalkoztam, mivel megvilágítva jóval homogénabb képet ad, míg a piramis struktúra zavaróan inhomogén.

A kiválasztott ernyőt felhasználtuk egy kisméretű projektorokból és egy retroreflektív ernyőből álló demonstrációs modell elkészítéséhez (4. ábra), mellyel tapasztalati úton megállapítottuk, hogy az általunk javasolt rendszer valóban alkalmas kivetítésre és 3D tartalom megjelenítésére. A látottak biztatóak voltak, ám nem elhanyagolható mértékű áthallás (szellemkép) volt látható, melyet célunk kiküszöbölni az ernyő továbbfejlesztésével.



4. ábra: A kivetítő rendszer kísérleti példánya

A demonstrációt követően kiszámoltam a felépített rendszerre jellemző tulajdonságokat: az áthallást a néző-ernyő távolság függvényében, illetve az ernyő fénysűrűségét. A számolások a tapasztalattal egybevágó eredményt adtak: a kivetített kép fénysűrűsége kellően nagyra adódott, azonban az áthallásról megállapítható, hogy meghaladja az emberi szem logaritmikus érzékelése miatt kívánatos 10^{-2} értéket, az ernyőtávolság függvényében 0,03 és 0,2 között változik.

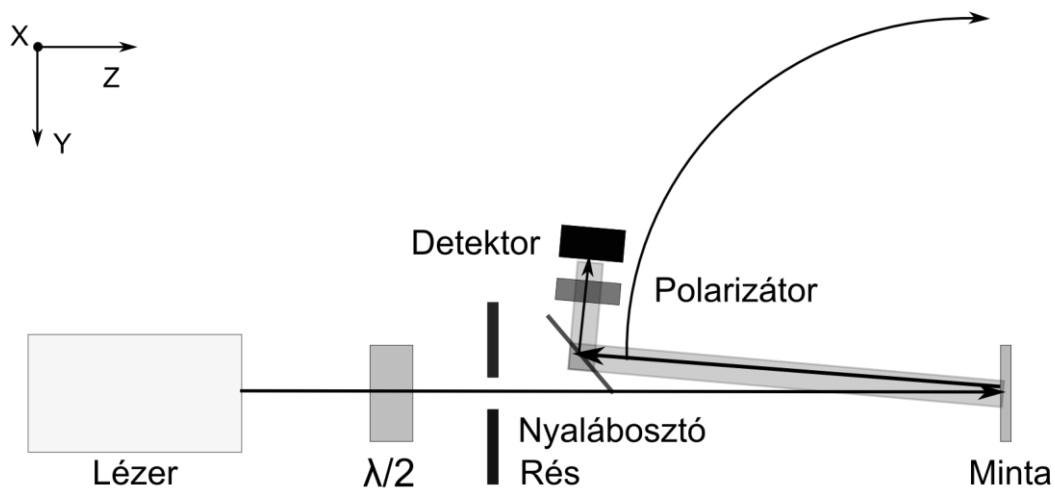
Munkám során a fejezetben bemutatott több néző által használható háromdimenziós, mobil, teljes parallaxist nyújtó kivetítő rendszerhez tartozó vetítő ernyők további vizsgálatával foglalkoztam. A kutatásom célja a létező ernyő továbbfejlesztése. Első lépésben a már ismert ernyőt modelleztem, mellyel a valóság legprecízebb leírása a cél. Ezt követően a modell továbbfejlesztésével célt az áthallás csökkentése a magas hatásfok megtartása mellett, hengerszimmetrikus és asztigmatikus elemeket tartalmazó struktúrák esetén. A hengerszimmetrikus lencsék szórási profilja az optikai tengellyel párhuzamos fénynyaláb esetén bármely, az eloszlás középpontján átmenő metszetre ugyanolyan, míg az asztigmatikus struktúrával lehetséges valamely irányban elnyújtott szóródási folt létrehozása, ezzel több fényt juttatva a megfelelő szembe és kevesebbet a távolabbi szembe.

3. A retroreflektív ernyő modellezése

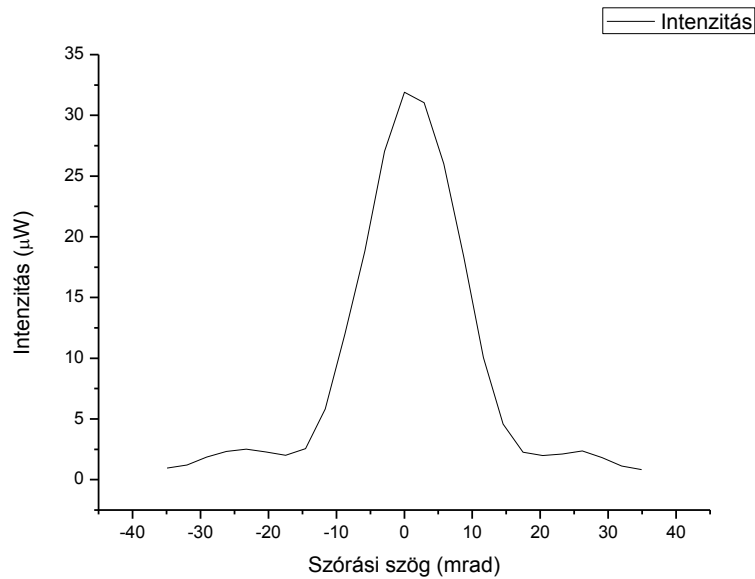
Munkám ezen fázisának célja olyan elméleti modell alkotása volt, mellyel az ernyő valóságos működése az elvárásainknak megfelelően leírható, hogy a későbbiekben a modell fejlesztésével a lehető legjobb vetítő ernyő tulajdonságait meg tudjam állapítani.

3.1. A modellezéshez felhasznált ismeretek

Az ernyő az általa visszavert fény szög szerinti eloszlásával jellemezhető. A modell eredményeit ellenőrzésképpen összehasonlítottam az általam legjobbnak ítélt ernyő mért szórási karakterisztikájával. A legjobb ernyőt korábbi munkám során választottam ki. Mérési elrendezést építettem, mellyel a mintára merőleges beesés mellett a beesési síktól mért szög függvényében detektáltam a szórt fény teljesítményét goniofotométeres elrendezéssel (5. ábra) [6][12][13]. Ezzel a módszerrel összehasonlítottam a különböző minták szórási karakterisztikáit.

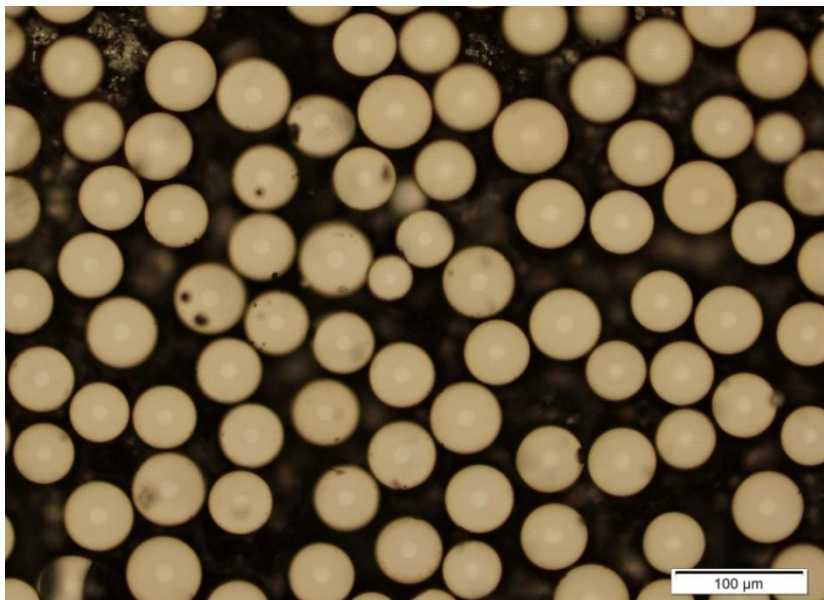


5. ábra: Goniofotométeres mérési összeállítás



6. ábra: A mérési elrendezéssel kapott fényszórási karakterisztika

Az összehasonlítás alapján a REFS_PEE20 jelű ernyő bizonyult a legjobbnak, a modellalkotásnál ezen ernyő adatiból indultam ki: az üveggyöngyök átlagos átmérője 50 µm, névleges törésmutatójuk 1,93. A minta mikroszkópos vizsgálata alapján (ld. 7. ábra) egy egyszerű képfeldolgozó programmal megállapítottam, hogy az üveggyöngyök átlagosan a felület 60%-át töltik ki.



7. ábra: A REFS_PEE20 minta fénymikroszkópos képe

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 képsíkig.

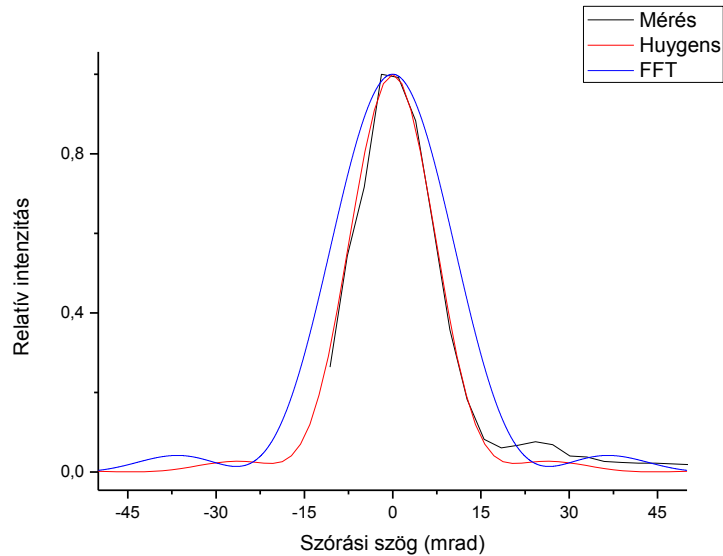
A fénysugarakkal a következők történhetnek a struktúra felületet elérve: egy részük valamely gömb felületén megtörik, lefókuszálódik annak hátsó felületére, onnan visszaverődik és ismét megtörik, egy része visszaverődik a golyó felületéről, a maradék rész pedig az ernyő golyóval fedett és nem fedett felületéről visszaszóródik, illetve áthalad a mintán. A mért karakterisztika (6. ábra) alapján megállapítható, hogy jelentős effektus a golyók apertúráján történő diffrakció, mely vizsgálatára a ZEMAX sorrendi módja alkalmasabb, ezért ebben a módban végeztem számolásaimat.

A sorrendi módban definiálhatóak különböző felületek, melyeket azok görbületi sugarával, az őket követő közeg törésmutatójával és vastagságával, és egyéb további, a felület típusától függő paraméterekkel lehet megadni. Beállítható a megvilágító fénynyaláb átmérője, optikai tengellyel bezárt szöge és hullámhossza is.

3.2. A modellalkotás lépései

A valóság legegyszerűbb közelítéseként a sorrendi módban felépített modell egyetlen 50 µm-es szférikus („Standard”) felületekből álló, $n = 1,93$ törésmutatójú gömböt tartalmaz, melynek hátsó felületén tükröző réteg (alumínium) van, s 532 nm-es fényforrással megvilágítom meg.

A diffrakciós számítás egy módja a pontválaszfüggvény számítása gyors Fourier-transzformációval (FFT PSF), mely során feltételezzük, hogy a képsík a távotérben található. Ez esetben akkor pontos a számítás, ha a transzverzális sugáraberrációk nem túl nagyok.[14] A diffrakció számításának egy másik módja, ha a hullámfront minden pontját egy tökéletes pontforrásként kezeljük, s ezt alkalmazva a fénysugarakra a Huygens-integrállal számoljuk ki a diffrakciós képet, ám ez időigényesebb számítás, mint a Fourier-transzformáció. [15]



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

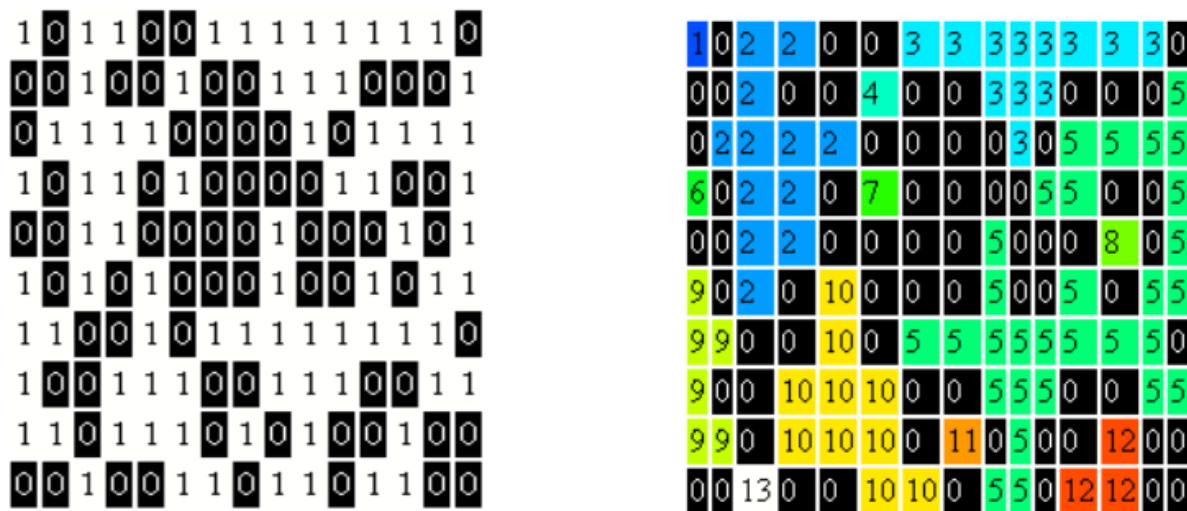
Összehasonlításképp a 8. ábrán ábrázoltam a maximumra normált mérési eredményeket és a modell eredményeket. A Huygens-integrál a Fourier-transzformációnál pontosabban írja le a karakterisztikát: a félértékszélessége és a lefutása azonos a mérésével 15 mrad-ig, majd különbség lép fel az intenzitásértékek között, de azonos szögeknél található meg a lokális minimum és a lokális maximum is. Az Fourier-transzformáció és a mérés közti nagyobb eltérés az aberrációkból adódhat, ezért a továbbiakban a Huygens-integrállal végeztem el a pontosabb számításokat. Mindezen megállapításokat korábbi munkám során tettem, azonban jelen dolgozatban közölt eredményeimet ezen megfigyelésekre alapozva értem el, mely új eredmények alább olvashatóak.

A 6. ábrán jól látható, hogy az ernyőn található golyók mérete nem egyforma, tehát egyetlen 50 μm -es golyón végzett számolás durva közelítés. A következő lépésben a modell finomításához a golyóátmérők eloszlását szerettem volna megállapítani. Több mikroszkópos felvételt készítettem, melyeket MATLAB-ban írt rutinokkal dolgoztam fel az alábbi módon.

A képeket beolvastam, majd az RGB képeket szürke skálára transzformáltam, és „binarizáltam” azokat: egy megadott érték felett a képpont „világos”, alatta „sötét”. Ezután meg kellett állapítani, hogy mely „világos” azaz fényes képpontok alkotnak összefüggő halmazt – egy-egy golyót –, és mekkora azok területe, melyből a golyók átmérője adódik. Ennek elvégzésére a Hoshen-Kopelman-algoritmust használtam [16].

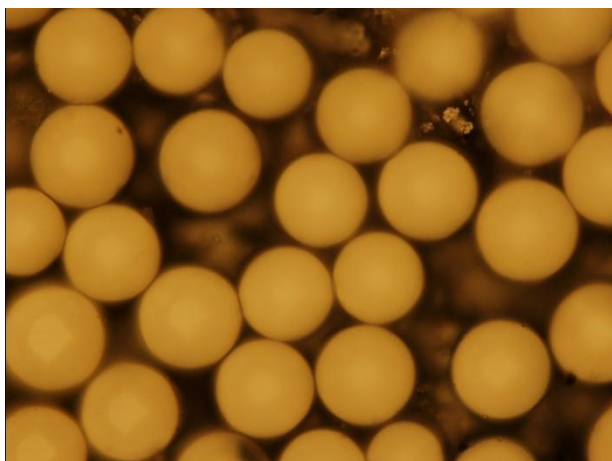
Az algoritmus a következőképpen működik. A képekre, mint 0 és 1 értékű elemeket tartalmazó mátrixokra tekintünk. Az algoritmus „írógépszerűen”, tehát az első sortól az utolsóig, balról jobbra haladva lépeget végig a mátrixon. Minden elem értékét megvizsgálja,

ha az 0, továbblép a következőre. Ha 1, megvizsgálja a bal oldali és a felső szomszédok értékét is. Ha mindkét szomszédos érték 0, akkor új „címkét” nyit, mely címke az adott összefüggő halmazra – melyet a továbbiakban cellának nevezek –, lesz jellemző. A címkék az esetben a cellák sorszámai. Az adott elem értéke az aktuális cella sorszáma lesz. Ha valamelyik szomszéd értéke nagyobb, mint nulla, tehát már címkét tartalmaz, akkor szomszédok lévén a vizsgált elem is ehhez a cellához tartozik, ez lesz az értéke. Ha mindkét szomszéd nullánál nagyobb, akkor vizsgálat történik, hogy melyik a kisebb cellaérték, s ezt kapja meg az aktuális elem és az összes, nagyobbik számot tartalmazó mátrixelem is. Egyenlőség esetén az elem megkapja a szomszédok értékét. Végül az egyes cella sorszámokat megszámlálva adódik azok mérete. Egy kis méretű mátrixon lefuttatott algoritmus látható a 9. ábrán.



9. ábra: Kétértékű mátrix és összefüggő cellái

Az általam írt algoritmust kiegészítettem azzal a határfeltétellel, hogy az olyan cellák, melyek a kép szélével érintkeznek, törlődjenek, ugyanis az ilyen golyók által adott területjárulék meghamisítja az eredményt, hiszen ismeretlen méretű rész hiányzik belőlük. Az egyik mikroszkópos felvétel (10. ábra) feldolgozása után a 11. ábra adódott, mely illusztrálja a teljes folyamat után kapott mátrixot:

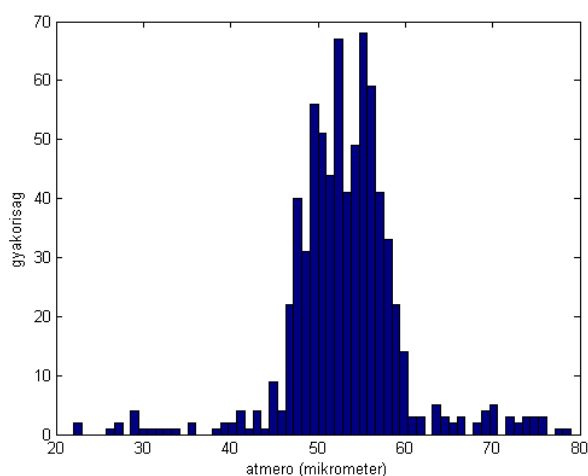


10. ábra: Az ernyő fénymikroszkópos felvétele

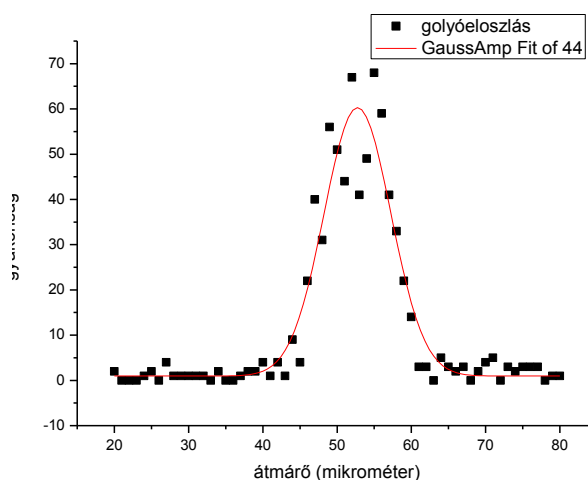


11. ábra: A Hoshen-Kopelman algoritmussal feldolgozott kép

A rutin eredményeképp megkaptam az összes kép összes összefüggő területének méreteit pixelben, melyekből a nagyítás alapján kiszámoltam minden ilyen terület átmérőjét. A 11. ábrán is látható, hogy a hordozó becsillanása zajt ad az eredményhez, illetve az is lehetséges, hogy két golyó összeér. Ezen zajok szűrésére beállítottam egy alsó 20 μm – es és egy felső 80 μm – es korlátot a lehetséges golyóméretre, így kaptam a végleges golyóátmérő eloszlást (12. ábra).



12. ábra: Golyóátmérő eloszlás hisztogramja



13. ábra: Golyóátmérő eloszlásra illesztett Gauss-görbe

A 12. ábra hisztogramján ábrázolt eredményekre a következő alakú

$$y = y_0 + A \cdot \exp\left(-\frac{(x-x_c)^2}{2w^2}\right) \quad (1)$$

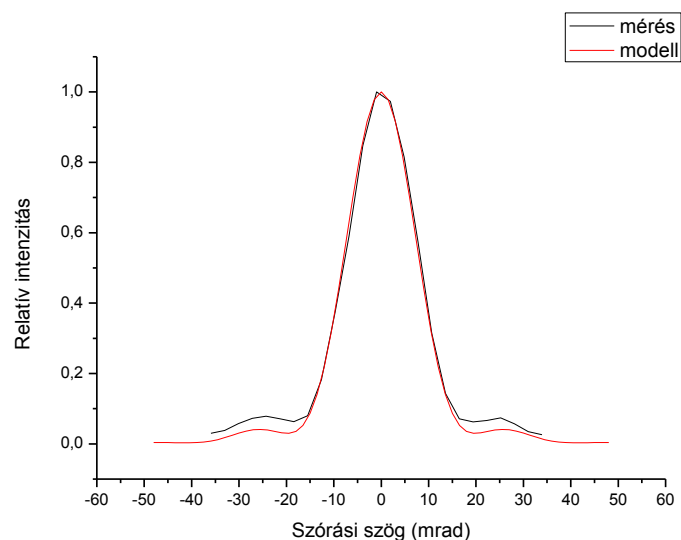
Gauss-függvényt illeszttem az adatokra, mely illesztés eredménye a 13. ábrán és az 1. táblázatban látható.

Paraméter	Név	Érték	Hiba
y0	offset	0,968	0,910
xc	átlag	52,747	0,210 μm
w	szórás	4,497	0,232 μm
A	amplitúdó	59,335	2,489

1. táblázat: A Gauss-görbe illesztésének eredménye

Az eredményt befolyásolhatja a feldolgozásához használt „világos-sötét” limit értéke, azonban az elvégzett számítások azt mutatták, hogy az illesztett Gauss-függvény értéke egy tartományon több limitre is hibahatáron belül egyezik.

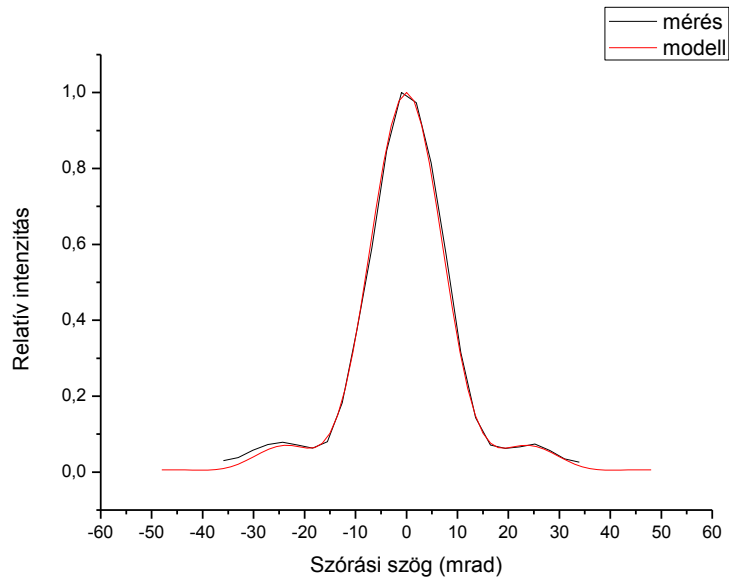
A golyók szórási karakterisztikáját a ZEMAX segítségével 20 μm és 80 μm közötti átmérőtartományon vizsgáltam μm -es felbontással. A kapott eredményeket a golyóátmérő-eloszlással súlyozva adtam össze, melyet a 14. ábrán hasonlítok össze a mérési eredménnyel.



14. ábra: A mérés és a golyóátmérő eloszlást tartalmazó modell összehasonlítása

A két görbe lefutása az első Airy-minimumon belül nagy pontossággal egyezik, azonban nagyobb szögekre a modellel kapott értékek a minimum és maximum helyét leszámítva eltérnek. Ennek az oka az lehet, hogy a gömbök defókuszáltak: a beeső fény nem fókuszálódik le tökéletesen a gömb hátsó felületére, így nagyobb mennyiség szóródik ki, mint az általam feltételezett modellben. A defókusz abból adódhat, hogy az ernyőn lévő gömbök törésmutatója nem egyezik meg a névlegesével, melyet a modellben felhasználtam, illetve abból is adódhat, hogy az üveggolyók nem tökéletesen gömb alakúak.

A magyarázat helyességét a törésmutató elhangolásával ellenőriztem. Megkerestem azt a törésmutatót, amelyre a mérés és a modell a lehető legjobban egyeznek. Erre $n = 1,955$ adódott, ami 0,025 eltérés a névlegeshez képest.



15. ábra: A mérés és defókuszkorrekción tartalmazó modell összehasonlítása

A defókuszt is tartalmazó, a 15. ábrán feltüntetett modell már jól leírja az első Airy-gyűrűt is. A mérési eredmények aszimmetriája ad kismértékű eltérést, melynek oka a féligáteresztő lemeztől detektorra szóródó fény.

Annak megállapítása nehéz feladat, hogy a gömb alakú eltérése vagy a törésmutató eltérése a defókuszt okozza. A gyártó adatai szerint a törésmutató 0,01 tőrésel, a gömb alakja 5%-os tőrésel rendelkezik. A törésmutató eltérését például nagy pontosságú (kb. 0,001) immerziós olaj sorozatba öntött golyók szórás mérésével lehetne meghatározni, melyet az ernyő technikai megvalósításának kérdéseivel szeretnék megvizsgálni.

A modell még nem tartalmazza a legkisebb intenzitású jelenség vizsgálatát, a golyókról történő többszörös szórás. A jövőben erre is szeretnék modellt alkotni, azonban erre a vizsgálatra alkalmasabb a ZEMAX nem sorrendi módja, ahol lehetséges a többszörös szórás vizsgálata. Kísérletileg is szeretném a kiszóródó fény arányát meghatározni úgy, hogy az ernyőről visszaverődő retroreflektív és szórt nyalábot szétválasztom. Ez nagy megvilágítási szöggel lehetséges, hiszen ekkor a forrás irányába visszaverődő retroreflektált nyaláb és a direkt szórt nyaláb közti szögeltérés a beesési szög kétszerese lesz.

Megállapítom, hogy az általam alkotott defókuszt is tartalmazó modell jól leírja a diffrakciót, a kiválasztott ernyő fény szórás karakterisztikáját, és közben tarthatóak az aberrációt okozó paraméterek is.

A retroreflexió validált modelljét arra használom fel a továbbiakban, hogy segítségével új ernyő-konstrukciókat dolgozzak ki, és azok paramétereit optimalizáljam.

4. Hengerszimmetrikus elemekből álló struktúra

Munkámat az egyszerűbb modellek fejlesztésével kezdtem, így először a hengerszimmetrikus elemekből álló struktúrát vizsgáltam meg. Az ernyő fejlesztéséhez mindenekelőtt érdemes meghatározni azt a szórási profilt, mellyel annak ideális esetben rendelkeznie kell, ezért meghatároztam a visszaszórt fény megfelelő karakterisztikáját, majd ezután kezdtem el a modell változtatását az optimális megoldást keresve.

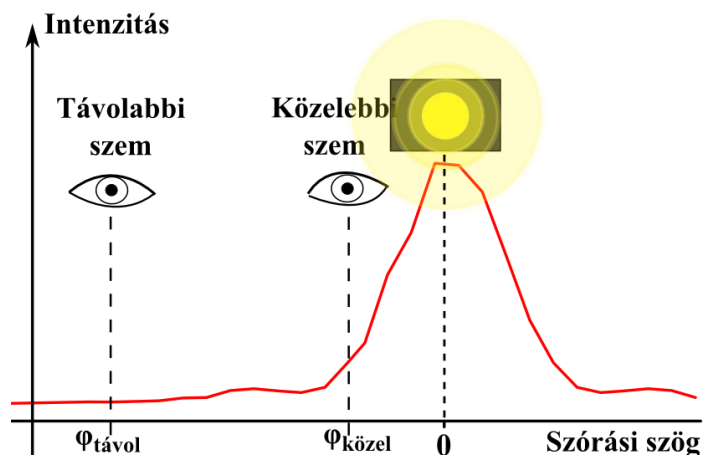
4.1. A keresett szórási profil

Az ernyőt jellemző egyik legfontosabb mennyiség az áthallás. Az áthallás értéke megmutatja, hogy mekkora a vizsgált szembe jutó jel és zaj aránya. Az adott szembe a közelebbi projektorból jutó intenzitás a jel, a tőle távolabbi projektorból jutó intenzitás pedig a zaj. Az emberi szem logaritmikus érzékelése miatt a jel és a zaj teljesítménye között több, azaz legalább két nagyságrendnyi különbségnek kell lennie, hogy a néző ne érzékelje egyszerre mindkét kivetített képet. Ideális esetben tehát az áthallás (CT, cross-talk, 16. ábra) értéke

$$CT = \frac{I_{zaj}}{I_{jel}} = \frac{I_{távol}}{I_{közel}} \leq 0,01 \quad (2)$$

ahol a zaj értékét az adott projektortól távolabbi szem intenzitása, a jel értékét pedig a projektorhoz közelebbi szem intenzitása adja meg.

Feladatom ezek alapján olyan struktúra keresése, amely visszaszórt profiljára igaz lesz, hogy az áthallás értéke az ernyőtől a kijelölt távolságtartományon végig legfeljebb $CT \leq 0,01$. Határozzuk meg azt a szórási profilt, azaz intenzitás eloszlást a szórási szög függvényében, melyre igaz, hogy a belőle számolt áthallás a néző-ernyő távolságtól függetlenül állandó!



16. ábra: A közelebbi és a távolabbi szemekbe jutó intenzitás a szemek, a kivetítő és az ernyő által bezárt szögtől függ. A távolabbi és a közelebbi szem intenzitásának aránya adja meg az áthallás mértékét

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

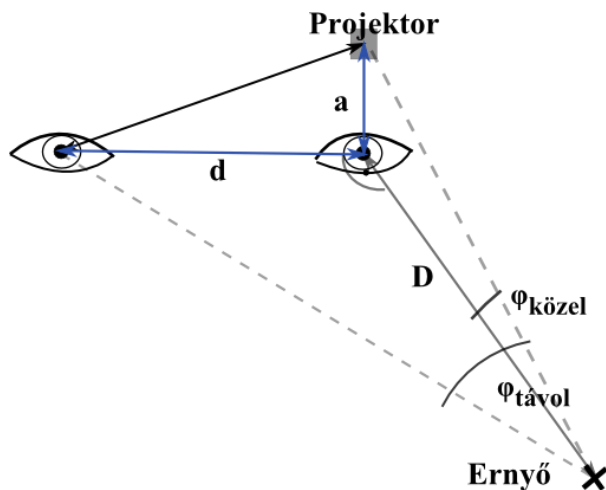
$$CT = \frac{f_{távol}}{f_{közel}}, \quad (3)$$

ahol f a keresett intenzitás a szórási szög függvényében.

Ha feltesszük, hogy a két szem közti távolság ($\Delta\varphi$) radiánban mérve kellően kicsi, akkor a két függvényérték között a következő kapcsolat írható fel:

$$f(\varphi_{távol}) = f(\varphi_{közel}) - f(\varphi_{közel})' \Delta\varphi, \quad (4)$$

ahol a szemek közti szögeltérés megadható az ernyőtől mért távolság (D), a két szem közti távolság (d) és a projektor közelebbi szemtől mért távolságához (a) képest, hiszen a két szem látószöge közti különbség 17. ábra alapján a következőképpen kapható:



17. ábra: Az elrendezés sematikus ábrája, rajta a közelebbi és a távolabbi szemekhez tartozó szórási szögek

$$\Delta\varphi = \varphi_{távol} - \varphi_{közel} = \frac{\sqrt{d^2+a^2}-a}{D} \approx \sqrt{\frac{d^2+a^2}{D^2}} - \varphi \approx \sqrt{\frac{d^2}{D^2} + \varphi^2} - \varphi, \quad (5)$$

ahol felhasználtam, hogy a szórási szögek kicsik, és a közelebbi szem szórási szöge

$$\varphi = \operatorname{atan} \frac{a}{D} \approx \frac{a}{D}. \quad (6)$$

Mivel a két szem közti távolság és a közelebbi szem – projektor távolság állandó, a következő jelölést vezetem be:

$$d = \gamma a, \quad (7)$$

így továbbírva a (7) egyenletet:

$$\sqrt{\frac{d^2}{D^2} + \varphi^2} - \varphi = \sqrt{\frac{\gamma^2 a^2}{D^2} + \varphi^2} - \varphi = \sqrt{(\gamma^2 + 1)\varphi^2} - \varphi = \varphi[\sqrt{(\gamma^2 + 1)} - 1] \quad (8)$$

A zárójelben látható mennyiség is állandó, így a

$$\beta = \sqrt{(\gamma^2 + 1)} - 1 \quad (9)$$

jelölést használva

$$\Delta\varphi = \beta\varphi. \quad (10)$$

A (4)-t felhasználva az áthallás:

$$CT = \frac{f_{távolság}}{f_{közel}} = \frac{f(\varphi_{közel}) - f(\varphi_{közel})' \Delta\varphi}{f(\varphi_{közel})} = 1 - \frac{f(\varphi)' \Delta\varphi}{f(\varphi)}, \quad (11)$$

amibe (10) alapján $\Delta\varphi$ -t helyettesítve és átrendezve:

$$CT - 1 = -\frac{f(\varphi)' \beta\varphi}{f(\varphi)}, \quad (12)$$

ahol a φ -tól független tag legyen

$$\xi = -\frac{CT-1}{\beta} = \frac{1-CT}{\sqrt{(\gamma^2+1)}-1}, \quad (13)$$

akkor a

$$\xi f(\varphi) = \varphi f(\varphi)' \quad (14)$$

egyenlet adódik, melynek általános megoldása a $A\varphi^z$ hatványfüggvény.

A z kitevő értékének meghatározásához helyettesítsük be a kapott függvényt az áthallást definiáló (3) egyenletbe! Mivel a valóságban a nagyobb szögek felé csökkenő intenzitású szórási profilt tudunk értelmezni, negatív hatványkitevőt keresünk. Ezért z helyére z abszolútértékét írva:

$$\frac{1}{CT} = \frac{f_{közel}}{f_{távolság}} = \frac{\varphi^{-z}}{(\varphi + \Delta\varphi)^{-z}} = \frac{\varphi^{-z}}{(\varphi + \beta\varphi)^{-z}} = \frac{\varphi^{-z}}{(1+\beta)^{-z}\varphi^{-z}} = \frac{1}{(1+\beta)^{-z}} \quad (15)$$

azaz

$$CT = (1 + \beta)^{-z} \quad (16)$$

$$\log(CT) = -z \cdot \log(1 + \beta), \quad (17)$$

amiből

$$z = -\frac{\log(CT)}{\log(1+\beta)} \quad (18)$$

adódik.

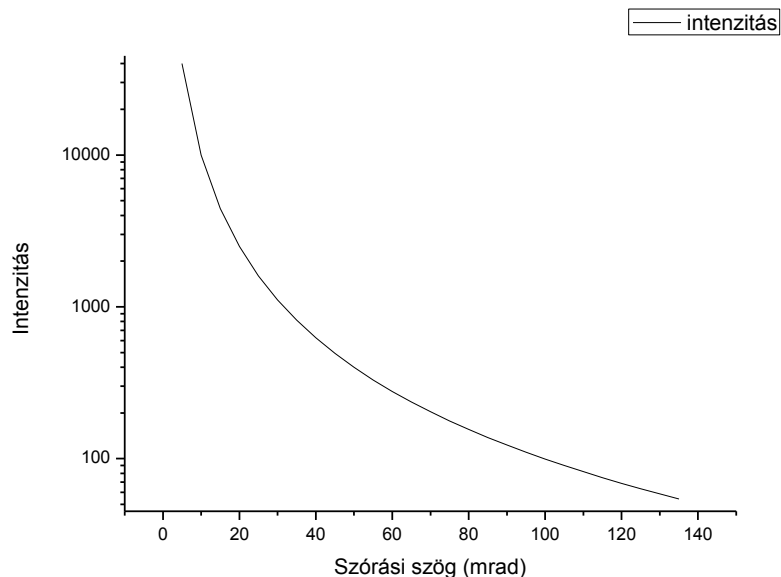
Az így kapott görbe megadja a keresett függvény alakját. Az A skálafaktor értékét a megvilágító fény intenzitása határozza meg.

Az ernyő szórási karakterisztikájára jelenleg az 50-400 cm tartományon vagyunk kíváncsiak. A szemek távolságát $d = 6,5$ cm-nek vettem, a projektor és a közelebbi szem távolságának $a = 2$ cm-t, melyek ismeretében megadható az adott ernyő-kivetítő távolsághoz tartozó szórási szög mind a közelebbi, mind a távolabbi szemre. Ezek alapján megállapítható, hogy mekkora szögtartományon szükséges a szimuláció számolásának elvégzése.

	Közelebbi szem szórási szöge (mrad)	Távolabbi szem szórási szöge (mrad)
50 cm	39,98	135,19
400 cm	5,00	17,00

2. táblázat: Az egyes szemekhez és távolságokhoz tartozó szórási szögek

A 2. táblázatból kiolvasható, hogy a számunkra érdemes tartomány tehát 5 mrad és 135 mrad közé esik, és mindkét szemet érinti a 17-40 mrad, mely a közelebbi szem esetében az 50-115 cm közötti vetítő-ernyő távolságtartománynak felel meg, a távolabbi szem esetében pedig a 170-400 cm közötti tartománynak.



18. ábra: A 0,01 áthalláshoz tartozó szórási profil 5 mrad és 135 mrad között, önkényesen választott skálán

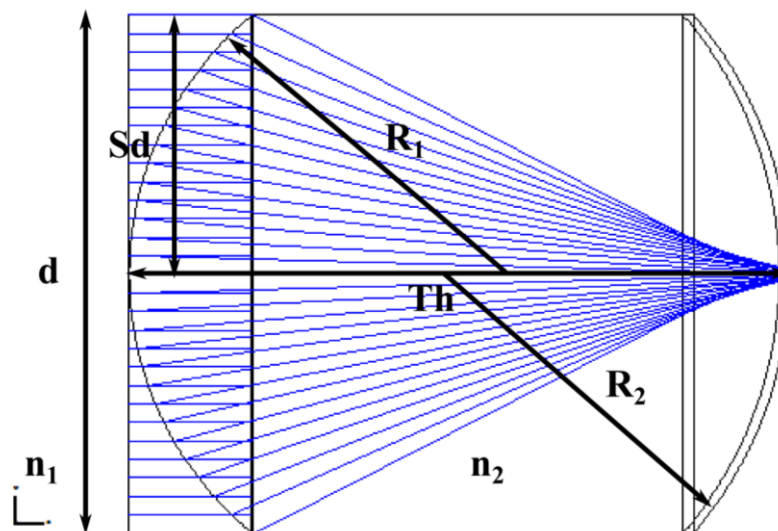
A 18. ábrán látható a $CT = 0,01$ -hez tartozó áthallás görbe a vizsgált tartományon. A 0-5 mrad tartományon belül a függvény tetszőleges értéket vehet fel, míg 135 mrad-nál nagyobb szórási szögek esetén preferált a lehető legkisebb érték, hiszen a többnézős alkalmazáshoz nem szeretnénk a megcélzott nézőn kívüli néző szemébe zavaró fényt juttatni. Az áthallás

célértékének változtatásával a görbe meredeksége változik. Ha növeljük az áthallást, akkor a szórási profil meredeksége csökken – gondoljunk például a konstans szórási profilra, ahol az áthallás mindig 1! Tehát a minél kisebb áthallás, azaz a minél meredekebb függvény létrehozása a feladat.

4.2. Általános érvényű megfontolások a modell fejlesztéséhez

Célom a megállapított szórási karakterisztika előállítása. Ehhez a korábbi modellt vettem alapul, azaz egyetlen üvegből (vagy műanyagból) álló optikai elemet modelleztem, melyből valamilyen periodikus struktúra készíthető. Feltételeztem, hogy az elemből a fény nem lép át egy másikba. Ezt a gyakorlatban kellően mély hordozóba ágyazással lehetséges elérni. A hordozó fémes anyagú, mely biztosítja az elemek hátuljáról történő jó hatásfokú reflexiót.

A 3. fejezetben leírt gömböket tartalmazó modellből indultam ki a fejlesztés során úgy, hogy a lehető legegyszerűbb rendszertől kezdve haladtam a bonyolultabbak felé. Először minden esetben monokromatikus síkhullámmal világítottam meg a ZEMAX sorrendi módjában felvett optikai elemet, egyetlen, az optikai tengelyen lévő tárgypontról. Az optikai elemet alkotó felületek változtatható paraméterei, melyek a 19. ábrán láthatóak: a felület görbületi sugara (R_1), a felületet követő térrész törésmutatója (n_2) és vastagsága (Th), illetve a felület félátmérője (Sd) és kúpszelet együtthatója.



19. ábra: A ZEMAX-ban definiálható felületek jellemző paraméterei

Mivel a meghatározott görbe nagyon nagy meredekséggel csökken, első közelítésben a lehető legélesebb fókuszfoltot érdemes létrehozni, hiszen annak a legnagyobb a meredeksége, illetve kellően kicsi a félértékszélessége. (10-20 mrad). Így a fókuszfolt méretére érdemes

optimalizálni. Ha a karakterisztika túl gyorsan cseng le, még mindig van lehetőség szélesíteni azt diffúzorral, egyéb szórási technikákkal.

A modell továbbfejlesztésekor, módosításakor, optimalizálásakor figyelembe kell venni a következő, megvalósíthatóság szempontjából elengedhetetlen megkötéseket.

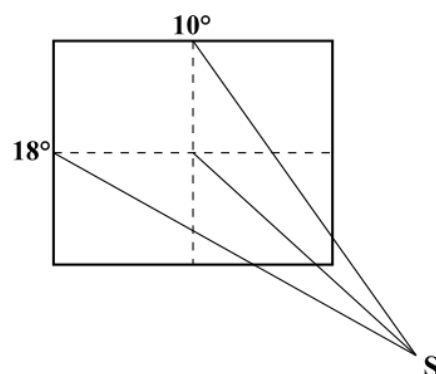
A struktúra alapeleme nem okozhat látható inhomogenitást, azaz a mérete kellően kicsi kell legyen. Ugyanakkor mivel a diffrakciós folt mérete fordítottan arányos az apertúra méretével, nagyobb átmérő választásával a szóródási folt csökkenthető. Ezért a struktúra méretét tekintve kompromisszumos megoldást kell találni, melyhez a kivetítők pixelmérete ad útmutatást. Az általunk használt projektor egy pixele a képernyőtől 1 m kivetítési távolságban 0,74 mm, így a struktúra átmérőjének felső korlátjának ennél kicsit kisebb értéket, 0,6 mm-t választottam.

A fókuszfolt mérete nem csökkenthető a diffrakciós korlát alá, melyet az Airy-sugárral szokás megadni [17]:

$$\sin\theta \approx \theta \approx 1,22 \frac{\lambda}{2sd} = 1,22 \frac{550 \text{ nm}}{0,6 \text{ mm}} = 1,12 \text{ mrad}, \quad (19)$$

ahol λ a megvilágító fény hullámhossza, Sd pedig az apertúra félátmérője.

Kezdetben az optikai tengellyel 0° -os szöget bezáró megvilágítás mellett érdemes optimalizálni a modellt, azonban figyelembe kell venni, hogy a megvilágító fény a képernyőt különböző pontjaiban különböző szögben éri, mivel a forrásunk divergens. Ha a megfigyelő merőlegesen nézi a kivetítő ernyőt, akkor a 20. ábrán látható pontok a legfontosabbak, melyek közül a kivetített kép legtávolabbi pontja, az ernyő csúcsa látható a legnagyobb szög alatt, melynek vízszintes és függőleges irányú szögkoordinátái 18° és 10° .



20. ábra: A megfigyelő az ernyő középpontjára merőlegesen egyenesen helyezkedik el, akkor az ernyőről vízszintes irányban maximum 18° -os, függőleges irányban 10° -os szög alatt kell visszaszóródjon a fény

Ezeknél nagyobb szögek alatt is látszódhat az ernyő. A néző fejmozgása miatt a nézőpont és a kivetített kép középpontja közé húzott egyenes nem mindig lesz merőleges az ernyő síkjára.

Mivel nemcsak az optikai tengellyel párhuzamos nyalábokkal világítjuk meg az ernyőt, a párhuzamostól nagyobb mértékben eltérő nyalábok kisebb része fogja csak elérni az ernyő fémes borítású oldalát, tehát a struktúra vastagsága minél kisebb, annál nagyobb beesési szögekre fog még reflektálni.

A lencse alapvetően egy gyűjtőlencse, melyen a fény kétszer halad át. Az első felületnek a lehető legnagyobb törőerejűnek kell lennie, hogy a hátsó felületen kialakuló fókuszfolt még nagy beesési szögek mellett is a félátmérőn belüli tartományba essen. Adott törésmutató mellett ez az első felület kis görbületi sugarával valósítható meg. Azonban a görbületi sugárnak nagyobbak kell lennie a félátmérő értékénél, hogy ne tartalmazzon sík felületrészt! A hátsó felület görbületének az oda lefokuszálódó foltok helyét kell követnie, hogy a képmezőhajlást minimalizálja. A fókuszfoltok helyét a Petzvál-féle képmező hajlás adja meg, mely általános alakja [17]:

$$\frac{1}{r_p} = - \sum_{j=1}^k \frac{1}{f_j n_j}, \quad (20)$$

ahol r_p a Petzvál-görbület, f_j és n_j a j . lencse effektív fókusz távolsága és törésmutatója. Esetünkben csupán egyetlen törésmutatót és effektív fókusz távolságot kell figyelembe venni.

A felsorolt feltételek alapján határoztam meg az optimalizáció előtti rendszer kiindulási paramétereit.

Az optimalizálást egyetlen, a látható tartományban közepes hullámhosszon, 550 nm-en indítottam, mert a hullámhosszak számának növelésével arányosan nő a számolás futási ideje is. Az első lépésben egyetlen tárgy pontot vettem fel, mely a merőleges megvilágításnak felelt meg, majd kellő optimalizáció után kiegészítettem a rendszert a $(18^\circ, 10^\circ)$ és a $(35^\circ, 0^\circ)$ tárgy pontokkal is. Előbbi az ernyő legnagyobb szórás szögű pontjának felelt meg, míg 35° -nak a vízszintes irányú fejmozgással a kép szélének szórás szögéhez hozzáadott járulékát becsülöm. Ezt követően az egy hullámhosszra történő kellő mértékű optimalizáció után számítottam ki a több hullámhosszra adódó szórás profilt. A több hullámhosszú számolásra azért van szükség, mert a tervezett alkalmazás a teljes látható spektrumot lefedi.

Mint azt az előző alfejezetben említettem, az ernyő szórás karakterisztikájára jelenleg az 50-400 cm tartományon vagyunk kíváncsiak, melyből következik a számolni kívánt szögtartomány, melynek felső határa 135 mrad.

4.3. Optimalizáció

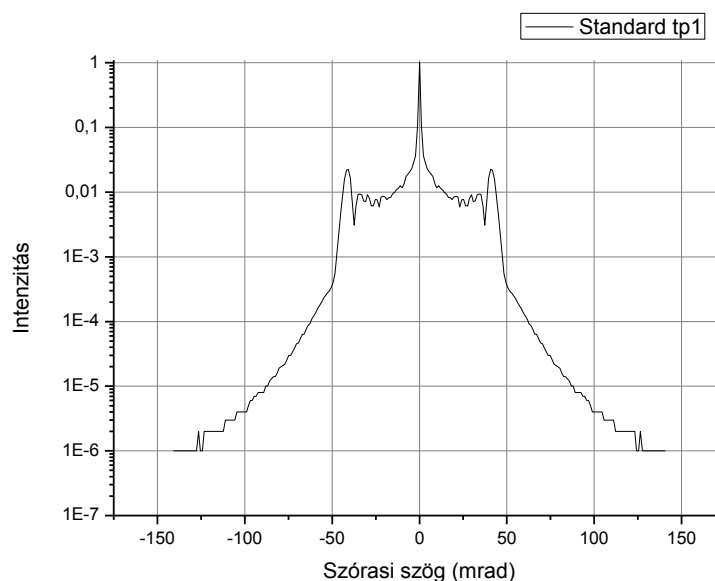
A fenti ismereteket felhasználva változtattam meg a korábbi modellem paramétereit. Először a csak szférikus felületeket tartalmazó modellt optimalizáltam, melyben a már felsorolt együtthatók változtatására van lehetőség: az első és a hátsó felület görbületi sugara, a törésmutató, a vastagság. A szférikus felületek egyenlete általános esetben a következőképp adható meg a ZEMAX Manual [14] szerint:

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}}, \quad (21)$$

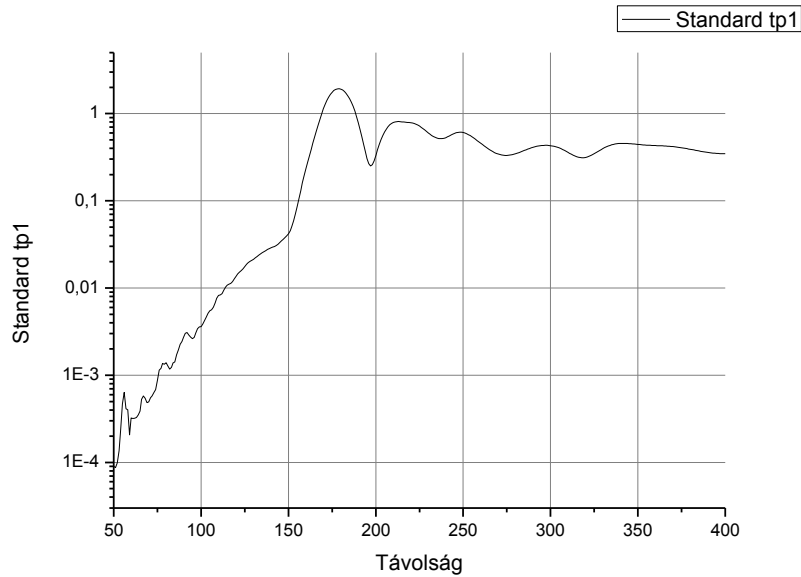
ahol c a görbület (a görbületi sugár reciproka), r a radiális koordináta lencseegységekben, és k a kúpszelet együttható. Az említettek közül a kúpszelet együtthatót nem változtattam, mert a modell optimalizálását követően ennek változtatása már nem javított a kapott eredményeken. A félátmérőt fixen, 0,6 mm-en tartottam. Az egy hullámhosszra történő optimalizáció után bekapcsoltam a teljes látható tartományt egyenletesen felosztó 24 hullámhosszt, és az optimalizált rendszer szórási profiljára végeztem futtatásokat polikromatikus fénynél a $(0^\circ, 0^\circ)$, a $(18^\circ, 10^\circ)$ és a $(35^\circ, 0^\circ)$ tárgypontra.

Az optikai tengellyel párhuzamos megvilágításakor kapott szórási profil a 21. ábrán láthatóak, illetve a profil alapján kapott áthallás a 22. ábrán. A szórási folt RMS sugara 34,54 mrad. A szórási profilon a fókuszfolt éles csúcsa körül jól megfigyelhető a szférikus aberrációból adódó „váll”, melyet követően a jól fókuszáltságnak köszönhetően nagy meredekséggel csökken az intenzitás.

Az intenzitásra és az áthallásra kapott eredményeket logaritmikus skálán ábrázoltam.



21. ábra: Szférikus felületekből álló elem szórási profilja az optikai tengellyel párhuzamos megvilágításnál



22. ábra: Szférikus felületekből álló elem áthallása a vetítő-ernyő távolság függvényében az optikai tengellyel párhuzamos megvilágításnál

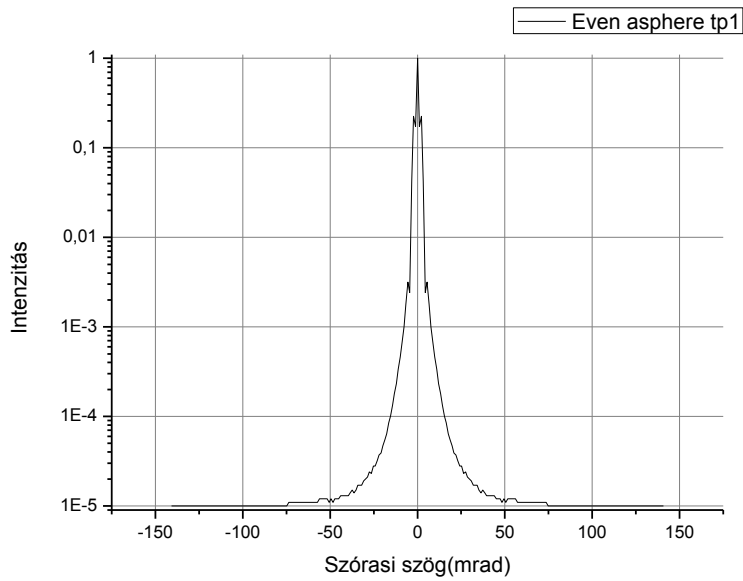
Jelen esetben sikerült elérni, hogy az áthallás az 50-120 cm szakaszon kisebb legyen 0,01-nél, azonban a további távolságoknál ennek közelébe sem ér, ami nem elégséges a vetítés szempontjából. Ennek az az oka, hogy a szórási karakterisztika a [10 mrad, 50 mrad] intervallumon lényesen eltér az „ideális”-tól, jó közelítéssel konstansnak tekinthető. Ebbe a szögtartományba esik azonban a távolabbi szem 135 cm és 400 cm között, ami magyarázza, hogy e távolságok között miért nem közelítjük meg a kívánt áthallást.

A legfontosabb a merőleges beesés mellett elért eredmény, hiszen a néző a képernyő közepére koncentrálni leginkább, tehát ha ez nem megfelelő, akkor irrelevánsak a kép távolabbi részei, vagyis a további 2 tárgypontra vonatkozó számolás.

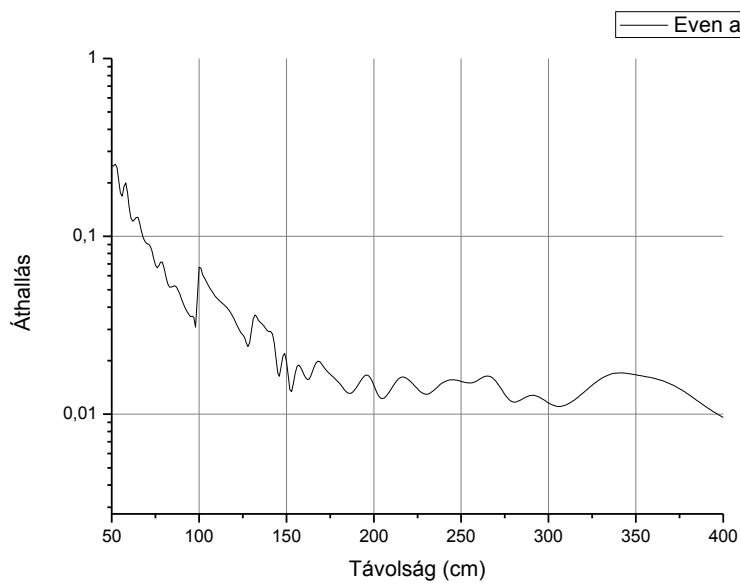
A közelítőleg állandó szórású részt a szférikus aberráció okozza. Ennek eliminálása aszférikus felülettel lehetséges, ezért a szférikus felületet „Even asphere”-re állítottam, melyben a szférikustól való eltérést páros polinomiális együtthatókkal lehetséges megadni a görbületi sugár függvényében:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^8 \alpha_i r^{2i} . \quad (22)$$

A szférikus felületnél használt együtthatókat megtartva tovább optimalizáltam a modellt. Először a másodrendű együtthatókat engedtem megváltozni, majd sorban a magasabb rendűeket. A szférikus aberráció eltűnésével a szórási folt mérete jelentősen csökkent, melyhez tartozó eloszlás a 23. ábrán látható. A szóródási folt RMS sugara 2,89 mrad, ami jelentősen kisebb, mint a szférikus esetben.

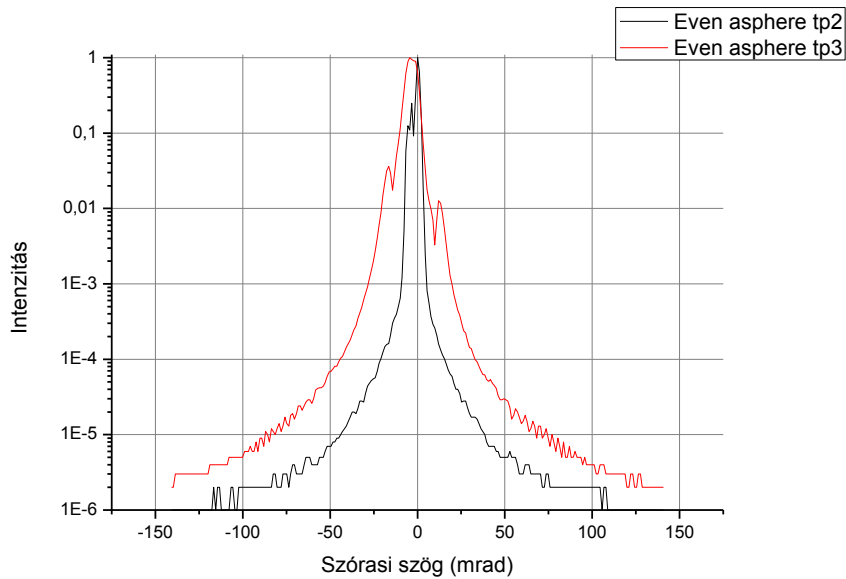


23. ábra: Aszférikus felületekből álló elem szórasi profilja az optikai tengellyel párhuzamos megvilágításnál

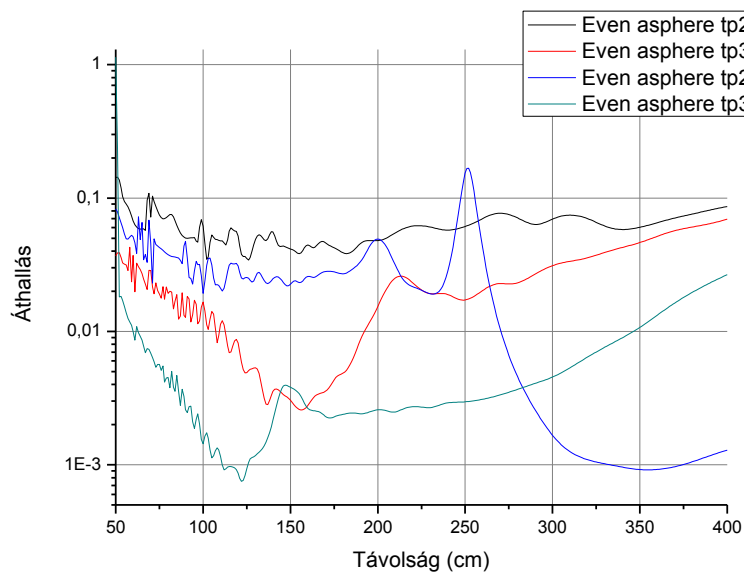


24. ábra: Aszférikus felületekből álló elem áthallása a vetítő-ernyő távolság függvényében az optikai tengellyel párhuzamos megvilágításnál

Ez esetben a 24. ábrán látható áthallás lényegesen jobb, mint a szférikus rendszeré. Bár értéke nem éri el az 0,01-et, 150 cm és 400 cm között nem nagyobb, mint 0,02. Mivel az eredményeket biztatóknak találtam, érdemesnek ítéltam a további tárgyponatok vizsgálatát is, így a következő szórasi profilokat (25. ábra) illetve áthallás görbéket (26. ábra) kaptam a 2. és a 3. tárgyponatokra, melyek RMS sugarai rendre 6,00 mrad és 10,04 mrad.

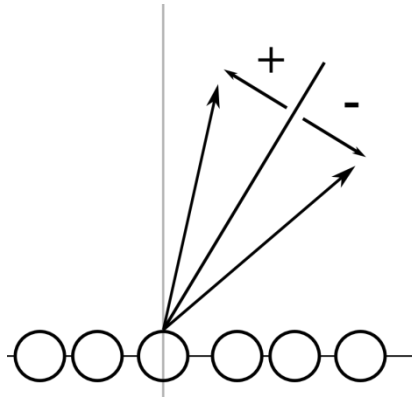


25. ábra: Aszférikus felületekből álló elem szórasi profilja az optikai tengellyel 20°-os és 35°-os szöget bezáró megvilágításnál



26. ábra: Aszférikus felületekből álló elem áthallása a vetítő-ernyő távolság függvényében az optikai tengellyel 20°-os és 35°-os szöget bezáró megvilágításnál

Az eloszlások ezúttal enyhén aszimmetrikusak, hiszen a tárgyponthokkal kimozdultunk az optikai tengelyből. Az aszimmetria miatt különböző áthallás adódik a pozitív és a negatív szórasi szögekre, ezért mindkét esetet kiszámoltam. „+”-szal jelöltem a pozitív esetet, „-”-szal a negatív esetet (27. ábra).



27. ábra: Pozitív és negatív szórési szögek az optikai tengellyel nem párhuzamos megvilágítás esetén

A 2. tárgyponthoz a pozitív szórési szögekre vett áthallás egyáltalán nem felel meg az elvárásoknak: a teljes tartományon 0,1-hez közeli értékű. A negatív szórési szögeknél 250 cm-ig végig jobb értékű, ám 0,01-et el nem érő az áthallás, majd a 250 cm-nél található kiugróan magas értéket követően 0,001-re esik az áthallás, ami megfelelő. A két görbe közti eltérés az aszimmetriával magyarázható, ugyanis a negatív tartományban – bár alig észrevehetően, de – rendre nagyobb értéket vesz fel a szórési függvény ugyanazon abszolútértékű szórési szögeknél, így több nagyobb intenzitású részt tartalmaz a vizsgált szögterület.

A 250 cm-nél lévő csúcstól és az átlagos értéktől eltekintve hasonlóan jellemezhető a 3. számú tárgyponthoz az áthallás is: nem láthatunk csúcsot, az átlagérték pedig az összetartozó görbék esetén a negatív szórési szögekre a 250 cm és a 400 cm közötti intervallumon kívül végig jobb. A 3. tárgyponthoz a negatív szórési szögeknél számolt áthallás 65 cm és 350 cm között kisebb, mint 0,01, ami kifejezetten jónak tekinthető.

Az eredmények két okból tekinthetők pozitívnak. Az egyik ok, hogy sikerült jól lefókuszálni, ezután a görbét különböző eszközökkel lehetséges tovább formálni – pl. diffúz szórással. A másik ok az áthallás javulása. Továbbá az eredmények rámutatnak arra, hogy mennyire kritikus a szórési profil lecsengése, ezt jól illusztrálja a 3. tárgyponthoz két különböző áthallás görbéje.

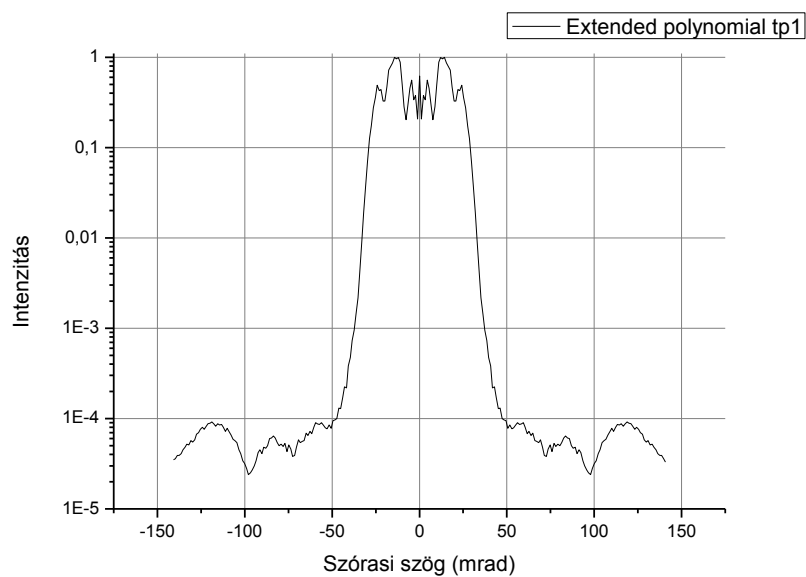
Mivel terveim szerint a munka következő szakaszában szeretném megvizsgálni az asztigmatizmust létrehozó struktúrát is, érdemes már a hengerszimmetrikus esetben is olyan felületeket vizsgálni, melyek könnyen módosíthatóak asztigmatikussá. Sajnos az „Even apshere”-rel ez nem lehetséges, ezért a következő lépésben az „Extended polynomial” típusú optimalizáltam.

Az „Extended polynomial” típusú felület egyenlete:

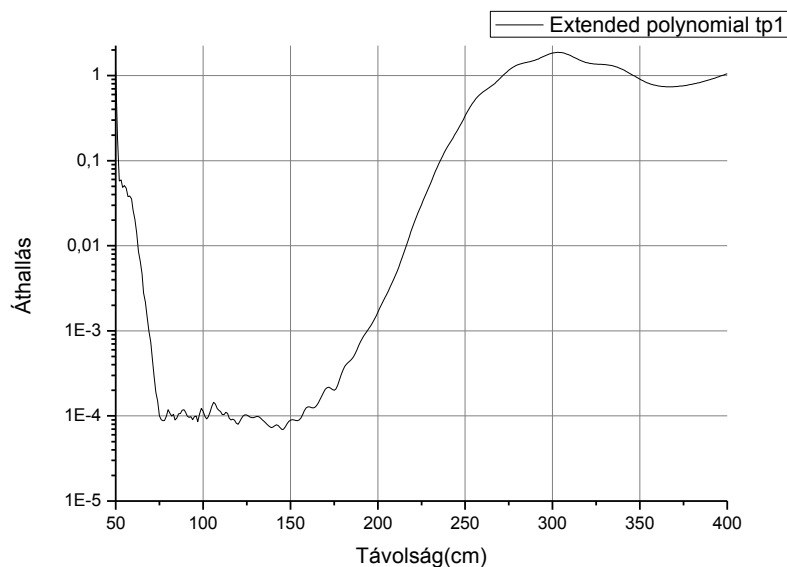
$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^N A_i E_i(x, y), \quad (23)$$

mely teljesen hasonló az „Even asphere”-hez, de magasabbrendű együtthatók megadása is lehetséges, illetve az együtthatók nem radiálisak, hanem a x, y és xy tetszőleges hatványaiból tevődnek össze.

Ez esetben is a korábbi modell paramétereiből, az „Even asphere” felületet tartalmazó értékekből indultam ki, a radiális komponensek helyett azonban a hengersizimetriát megőrzendő x és y irányban is ugyanakkora értékeket adtam meg. Az optimalizációkor nem engedtem meg változónak páratlan és vegyes szorzatot tartalmazó tagokat, szintén azért, hogy a lencse hengersizimetrikus maradjon. Az 1. tárgypontra így a 28. és 29. ábrákon látható eredmények adódtak, az RMS sugár 36,18 mrad.

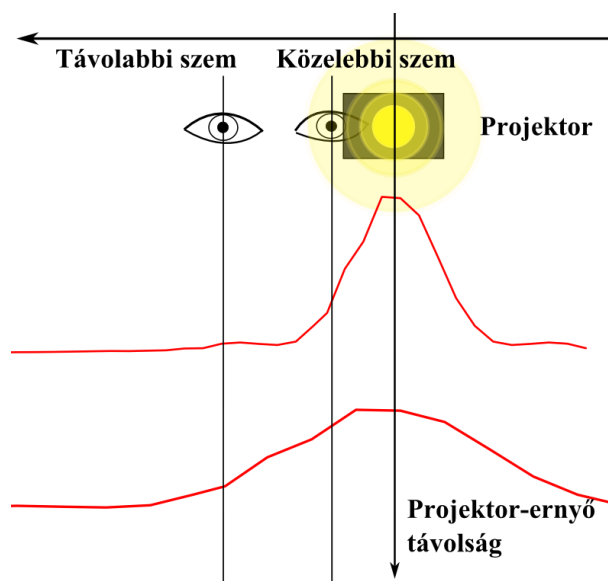


28. ábra: Polinomiális felületekből álló elem szórasi profilja az optikai tengellyel párhuzamos megvilágításnál

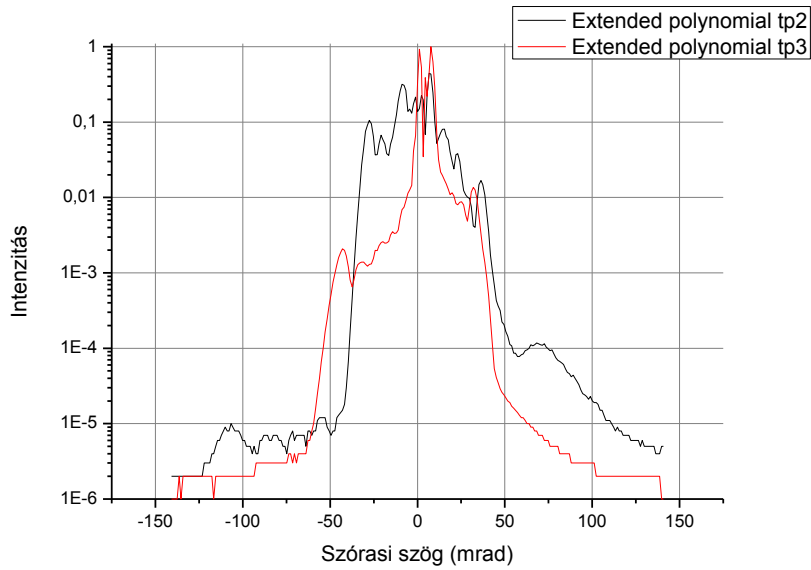


29. ábra: Polinomiális felületekből álló elem áthallása a vetítő-ernyő távolság függvényében az optikai tengellyel párhuzamos megvilágításnál

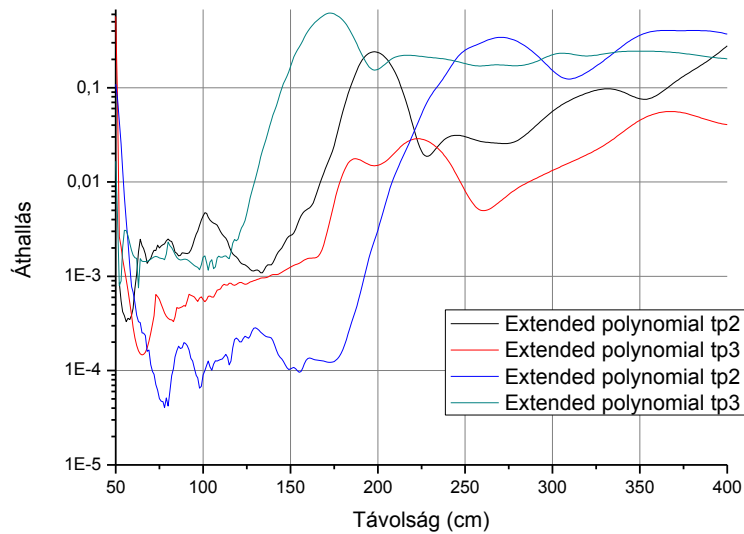
Az áthallás 65-220 cm között kiváló, 10^{-4} értékű, azonban 150-250 cm között meredeken nő. A növekedés az első esethez hasonlóan magyarázható, ugyanis ahogy távolodik a néző az ernyőtől, egyre kisebb szögek alatt látja azt, vagyis a szórási profilon mindkét szem egyre közelebb kerül a 0° -os szóráshoz. Az első fázisban az ernyőhöz közel, amikor az áthallás 0,01-nél jóval alacsonyabb, akkor a közelebbi szem a profil felfutó élén helyezkedik el, míg a távolabbi az alacsony intenzitású részen. Ezt illusztrálja a 30. ábra felső görbéje. Az áthallás akkor kezd el romlani, amikor a távolság növelésével a távolabbi szem is a felfutó élre kerül, azaz egyre nagyobb intenzitásokat lát, míg a projektorhoz közelebbi szembe jutó intenzitás nem nő ugyanilyen mértékben, mint a 30. ábra alsó görbéjén.



30. ábra: A közelebbi és távolabbi szemekbe jutó intenzitás a távolság függvényében



31. ábra: Polinomiális felületekből álló elem szórasi profilja az optikai tengellyel 20°-os és 35°-os szöget bezáró megvilágításnál



32. ábra: Polinomiális felületekből álló elem áthallása a vetítő-ernyő távolság függvényében az optikai tengellyel 20°-os és 35°-os szöget bezáró megvilágításnál

A már leírtakhoz hasonló jelenségek tapasztalhatóak a további két tárgypontra is, melyek szóródási foltjainak RMS sugara a 2. tárgypontra 32,08 mrad, a 3. tárgypontra 30,92 mrad. Az optikai tengellyel szöget bezáró megvilágítás miatt a szórasi profilok aszimmetrikusak (31. ábra), és az áthallás (32. ábra) minden esetben egy alacsony, az elvárásainknak megfelelő platóval kezdődik, majd a szórasi görbék szélességétől függően növekedni kezd 0,01 fölé. A legjobb a 3. tárgypontra pozitív részének áthallása, mivel ennek a szórasi profiljában látható a legkisebb, nem 0 mrad körüli csúcs, és a nagyobb szórasi

szögektől a kisebbek felé haladva görbe közel szigorú monoton növekvő, mely növekedés nem áll meg 10-15 mrad-ig. Ennek következtében az ő áthallása megfelelő a legnagyobb tartományon.

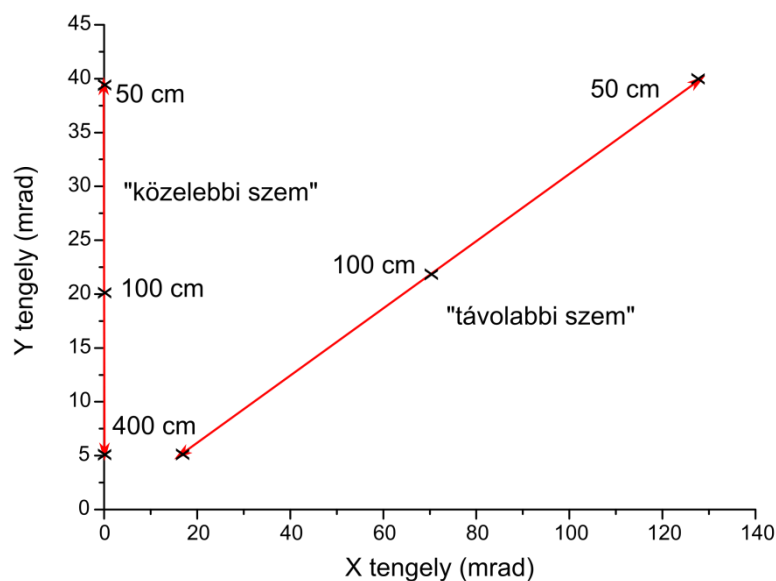
Megállapítható továbbá, hogy bár az RMS foltmérete a szférikus („Standard”) és a polinomiális („Extended polynomial”) felületekkel optimalizált rendszereknek hasonló nagyságú, a szóródási profilban tapasztalható kis eltérések kritikusak – hasonlóan az „Even Asphere” 3. tárgypontjának két különböző áthallás görbéjének esetéhez. Az optimalizációkor a foltméret csökkentése volt a cél, azonban az látható, hogy ez nem eléggé pontos feltétel, mert a lefutás nagyon lényeges, illetve maga a foltméret nem ad információt a görbe alakjáról. Ugyanakkor nehéz feladat a görbe alakjára optimalizálni, mert a nagyon szűk 17-50 mrad (kb. 2°-os!) szórási tartomány lényegében az egész áthallás görbére hatással van.

A hengerszimmetrikus optikai elemek szóródási foltjának minimalizálásával a fenti eredményeket értem el. A jövőben lehetségesnek tartom az alkalmazás szempontjából kedvezőbb szórási karakterisztikák létrehozását az optimalizáció pontosításával. Azonban mielőtt ezt a nagy számításigényű feladatot elvégezném, célszerűnek tartom az asztigmatikus optikai elemekben rejlő lehetőségek vizsgálatát.

5. Asztigmatikus elemekből álló struktúra

Az asztigmatikus rendszerek újabb szabadsági fokokat biztosítanak, melyeket kihasználhatunk az optimalizáció során. Ugyanis ha a rendszer asztigmatikus, akkor két, x és y irányban eltérő szórási profil adódik, melyek csupán az összetartozó szórási szögpárok hányadosait tekintve csatolódnak össze. Ugyanis az áthallás nem ugyanazon szórási profil két eltérő pontban felvett intenzitásértékének hányadosa, mint a hengersizmetrikus esetben, hanem két eltérő szórási profil megfelelő pontjai határozzák meg. Az asztigmatizmus kedvező megválasztásával a két szórási profilt úgy hangolhatjuk, hogy az áthallás teljesítse az általunk támasztott feltételt.

Ha a két szem pozícióját ábrázoljuk a kétdimenziós szórás terében, akkor a projektorhoz közelebbi szem szórási szöge a vetítő-ernyő távolság függvényében az y-tengely mentén mozog. A projektortól távolabbi szem szórási szöge az x-y síkban kijelölt egyenesen mozog. A szóródási folt optimalizációjához tehát a kétdimenziós eloszlás ezen általános egyenes mentén vett metszetét kellene kiszámítani. Mivel ez körülményes lett volna, ezért az x tengelyre vett vetületével közelítjük azt.



33. ábra: A projektorhoz közelebbi és távolabbi szemek szórási szögei

5.1. A keresett szórási profil

A közelebbi és a távolabbi szem szórási karakterisztikáinak szétválasztása a függvény alakját tekintve új szabadsági fokot ad. Az alkalmazás szempontjából fontos, hogy tetszőleges

távolságból azonosan fényesnek lássuk az ernyőt. E feltételből kiindulva határozhatjuk meg a közelebbi szem szórási profilját.

A kivilágított területre eső teljesítmény (P) állandó:

$$P = \text{áll.} \quad (24)$$

Maga a megvilágított terület (A) a projektor-ernyő távolsággal (d) négyzetesen arányos:

$$A = y \cdot d^2 \sim d^2, \quad (25)$$

ahol y az egyes oldalak távolsághoz viszonyított arányainak szorzata. Így az adott θ szórási szöghöz tartozó fényesség (B):

$$B = \frac{P}{A} \cdot m(\theta), \quad (26)$$

ahol $m(\theta)$ a szórt intenzitás a szórási szög függvényében. Azt szeretnénk, hogy a fénysűrűség állandó legyen a távolság függvényében:

$$B(d) = \text{áll.} = \frac{P \cdot m(\theta)}{y \cdot d^2} \sim \frac{m(\theta)}{d^2}. \quad (27)$$

Így a szórt fény eloszlása a vetítő-ernyő távolság és a szórási szög függvényének összefüggését felhasználva:

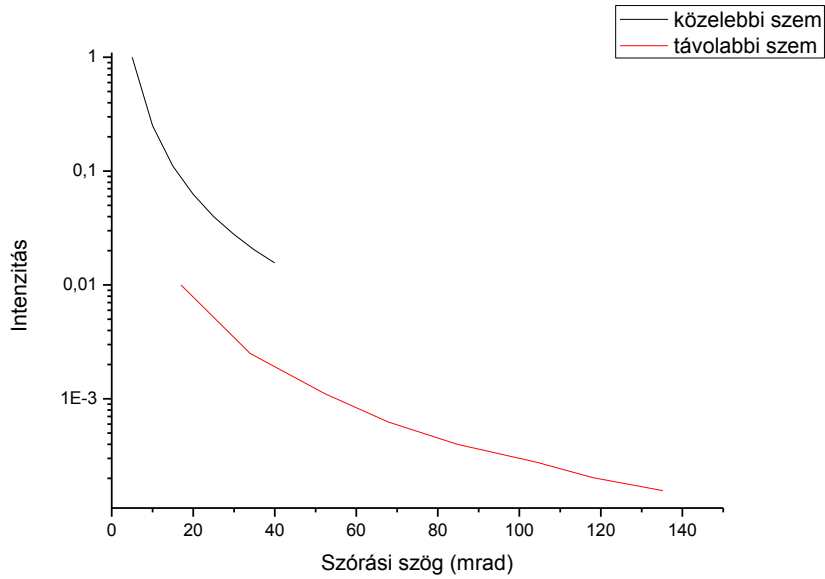
$$m(\theta) = B \cdot d(\theta)^2 = B \left(\frac{a}{\text{tg}\theta} \right)^2, \quad (28)$$

ahol a és B állandó, vagyis

$$m(\theta) \sim \left(\frac{1}{\text{tg}\theta} \right)^2. \quad (29)$$

Azaz a szórási szög tangensnégyzetével fordítottan arányos kell legyen a szórt intenzitás. Ez egy monoton csökkenő függvény, ami a fizikai érzékünk szerint is helyes, hiszen a szórási szög növekedésével egyre közelebb kerülünk az ernyőhöz, vagyis egyre kisebb intenzitású szórásra van szükségünk ugyanakkora fényerő eléréséhez.

A közelebbi szem 5 mrad és 40 mrad között kell, hogy teljesítse a fenti összefüggést, míg a távolabbi szem szempontjából a 17 mrad és 135 mrad közé eső tartomány az érdekes, melynél a megfelelő szögekhez tartozó érték százada a közelebbi szemének. Ez utóbbira csupán felső korlátot szab a megadott szórási profil, hiszen értéke annál kedvezőbb, minél kisebb. A szórási profil a két különböző szemre ekkor a 34. ábrán látható.



34. ábra: A közelebbi és a távolabbi szem szórási profilja állandó fényesség esetén

Az asztigmatikus eloszlásokra szabott feltételek közül a legszigorúbb értelemszerűen az áthallásra vonatkozó. Jelenlegi kísérleti tapasztalataink alapján elmondható, hogy bár nem ideális a teszt-ernyő szórási profilja, a fényessége nem változik észrevehetően a néző mozgási tartományában, így a fenti tangensnégyzetes lecsengés kevésbé szigorú.

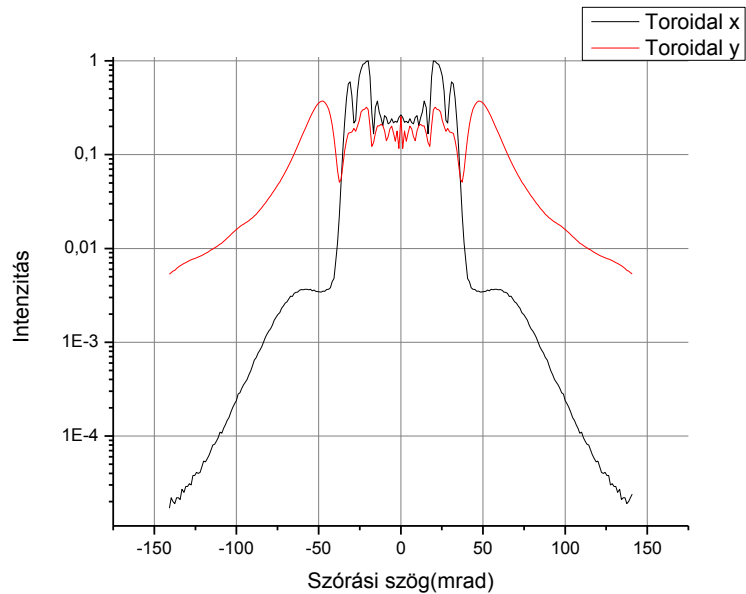
5.2. Optimalizáció

Asztigmatizmust tartalmazó modelljeimet az hengersizmetrikus modellekből kiindulva készítettem, tehát az eddig leírt feltételek igazak jelen esetben is.

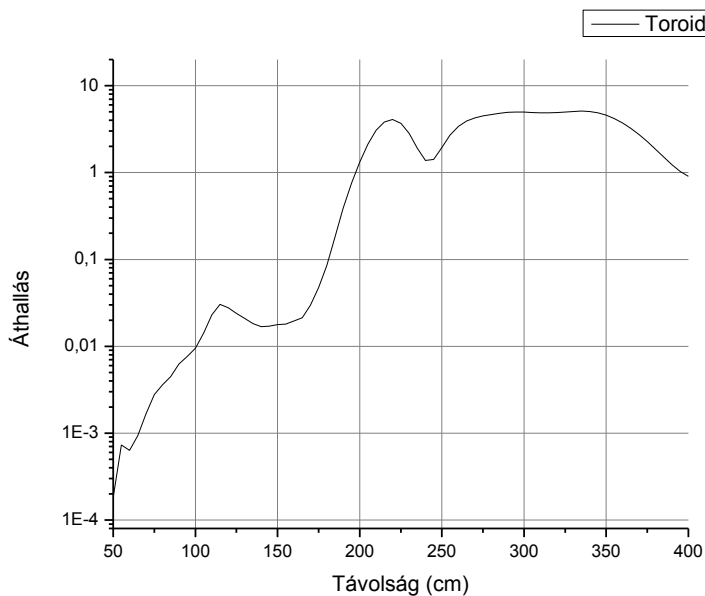
Először a szférikus elemeket tartalmazó lencsét alakítottam át olyan módon, hogy a szférikus felületnek x és y irányokban különböző görbület legyen megadható, így téve asztigmatikussá a szórási profilt. Erre a tórikus („Toroidal”) felület ad lehetőséget:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^7 \alpha_i y^{2i}, \quad (30)$$

z függvényében vett görbe az y - z síkban, melyet a forgatási sugárral (R) forgatunk meg az y tengely körül. A kiinduláshoz a korábbi optimális hengersizmetrikus vettem fel, mely esetében R és r egyenlő. Ekkor a szóródási foltot csupán az x irányban szerettem volna minimalizálni, így csökkenteni a távolabbi szem irányában kiszóródó fényt. Ugyanakkor nem cél lényegesen növelni az y irányába szóródó fényt, hiszen az eddigi kis RMS átmérőjű szóródási foltok közelítőleg a megfelelő tartományba estek. Az eredmény a polikromatikus, az optikai tengellyel 0° -os szöget bezáró megvilágítás mellett a 35. és a 36. ábrákon látható.



35. ábra: Tórikus felületekből álló elem vízszintes (x) és függőleges (y) irányú szórási profiljai az optikai tengellyel párhuzamos megvilágításnál



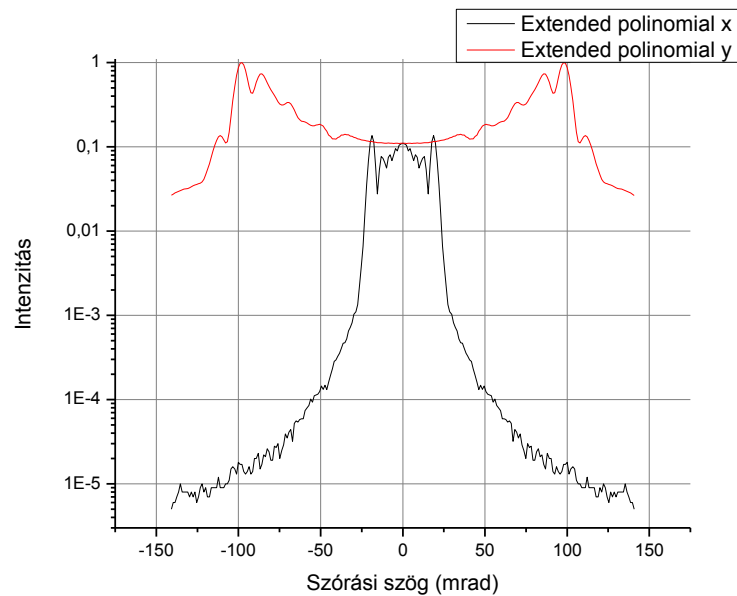
36. ábra: Tórikus felületekből álló elem áthallása a vetítő-ernyő távolság függvényében az optikai tengellyel párhuzamos megvilágításnál

A 35. ábrán látható, hogy y irányban, a projektorhoz közelebbi szem irányában sikerült a fény jelentős részét a 0-40 mrad tartományban tartani, az x irányt pedig nem szélesíteni, azonban az áthallás görbéje kevésbé előnyös, mivel csupán az 50 cm és a 100 cm közé eső szakaszon kisebb 0,01-nél, és 175 cm felett pedig a 0,1-et is meghaladja. Ez a projektortól távolabbi szemhez tartozó görbe nagy félértékszélességének a következménye.

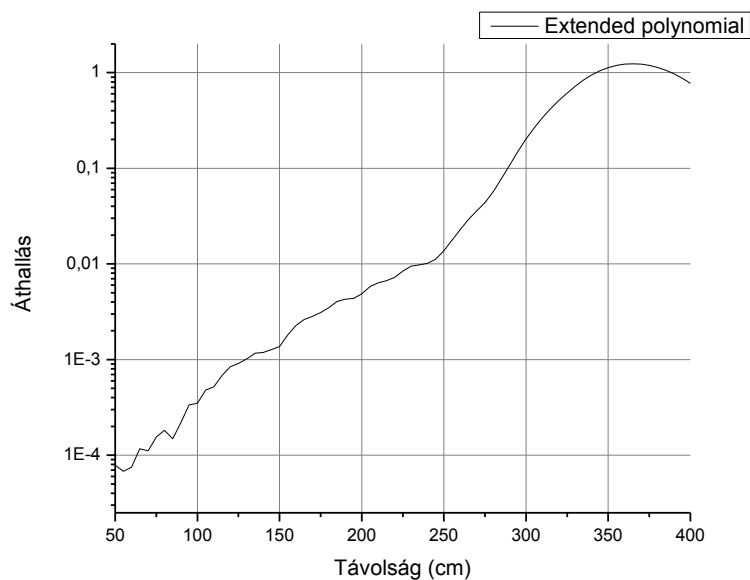
A „Toroidal” típusú felületeken lehetséges aszfériát létrehozni, azonban csak egy paraméterrel adható meg az értéke, nem lehetséges x és y irányban különbözöt definiálni, ami

csökkenti a függetlenség mértékét. Idő hiányában még nem vizsgáltam meg a tórikus-aszférikus felületeket.

Az „Extended polynomial” felületen azonban lehetséges x és y irányban különböző polinomok megadása, tehát a már leírt módon a korábbi modelltől kiindulva, ezúttal az x irányú foltméretre optimalizáltam, és kaptam a 37. és a 38. ábrákon látható eredményeket.



37. ábra: Polinomiális felületekből álló elem vízszintes (x) és függőleges (y) irányú szórási profiljai az optikai tengellyel párhuzamos megvilágításnál



38. ábra: Polinomiális felületekből álló elem áthallása a vetítő-ernyő távolság függvényében az optikai tengellyel párhuzamos megvilágításnál

Az így kapott áthallás-távolság függvény az eddigi legjobb az 1. számú tárgypontot tekintve, mivel az 50 cm és 245 cm közé eső tartományon végig 0,01-nél kisebb az áthallás. Az áthallás monoton növekedését a távolság függvényében az okozza, hogy a kisebb szórási szögeknél csökken a projektorhoz közelebbi szembe jutó intenzitás, egyúttal a távolabbi szembe jutó nő. Ezen kétféle módosítással lehetséges javítani: az y irányban szóródó fény kisebb szögek felé irányításával, illetve az x irányban a foltméret csökkentésével. Ezek kisebb mértékű változtatások, azonban jelentősen megjavítanák a 245 cm feletti távolságokon az áthallást. Szintén idő hiányában a 2. és 3. tárgypontra még nem végeztem el a szükséges számolásokat.

6. Kitekintés

Az ernyőmodellek vizsgálata során a hengersizmetrikus és az asztigmatikus optikai elemek között is sikerült olyan modellek fejlesztése, melyek esetében az áthallás a nézővetítőernyő távolság széles tartományán a kritikus 0,01-nél kevesebb. A hengersizmetrikus és az asztigmatikus esetben is a polinomiális felület (Extended polynomial) bizonyult a legalkalmasabbnak.

Szükséges mindemellett a modellek továbbfejlesztése, mely segítségével a teljes távolságintervallumon lehetségesnek látszik a legalább két nagyságrendnyi különbség létrehozása a projektorhoz közelebbi és a távolabbi szem intenzitása között. Ezt az optimalizáció beállításainak pontosításával tervezem elvégezni, hiszen látható volt, hogy a szórási profil igen kis, 17-40 mrad közötti lefutása nagy mértékben meghatározó, tehát valamilyen módon erre érzékeny optimalizációt szeretnék létrehozni. Egy másik lehetőség jelenlegi módszerekkel optimálisnak minősített modellek különbözőféle peturbációkkal ellátása. Ez sajnos egy körülményes vizsgálat, mivel sok az optikai rendszer szabad paramétereinek száma, illetve a számolások futási ideje is hosszú.

A legjobb modell kiválasztásakor az optikai tengellyel szöget bezáró megvilágítást, a különböző optikai tengelyen kívül fekvő tárgyponokat is figyelembe kell venni, hiszen nem elégséges, ha csak az ernyő közvetlen közepén látunk 3D képet. Azonban az eddigi eredmények alapján feltételezhető, hogy a különböző megvilágítások különböző módon lecsengő, aszimmetrikus szórási profilokat fognak adni, ami egy újabb problémakört jelöl ki az optimalizáció szempontjából.

Amennyiben lehetséges, a továbbiakban a távolabbi szem szórását pontosabban szeretném kiszámolni az (x, y) szórási szögkoordinátákkal megadott pontokban, így téve hitelessé a kapott áthallás-függvényeket.

Ahogy az a 3. fejezet végén is írtam, a modell nem tartalmaz szórást, mellyel munkám eddigi részében nem foglalkoztam. Szeretnék az általam tervezett elemről történő diffúz szórás eloszlására modellt alkotni, illetve azt kísérleti úton ellenőrizni, s ezekkel az eredményekkel kiegészítve pontosítani a modellt, ezáltal az áthallásra kapott értékeket is. Feltételezhető, hogy a szórás nagyságrendekkel kisebb, mint a visszaszórt fény maximális intenzitása, és jóval nagyobb félértékszélességű, mint az általunk vizsgált tartomány, vagyis közelítőleg egy konstans járulékot ad a jelenlegi profilokhoz. Ez a járulék arányaiban nagyobb a nagyobb szögeknél, és elhanyagolható a kisebbeknél. Így a szórás hatása annál kevésbé

jelentős, minél távolabb vagyunk az ernyőtől, az ernyő közelében pedig akár jelentősen is megemelheti az áthallás értékét.

Munkámat tehát jelen felsorolt feladatok megoldásával szeretném folytatni, hogy a lehető legjobb struktúrát megtaláljam, s a szórással együtt is biztosítson kellően kis áthallás értéket a megadott ernyő-vetítő távolságon.

Az elméleti vizsgálatok után a megvalósítás következik. Kisméretű lencsét vagy lencsemátrixot lehetséges 3D nyomtatással [18], prézeléssel vagy speciális fröccsöntéssel gyártani. Egy új fejlesztéssel lehetséges térfogati szórást is vinni a rendszerbe, amennyiben szükségessé válna [19].

Munkám befejezéseként az elkészített ernyő, ernyők működését méréssel és kivetítéssel ellenőrizném.

7. Összefoglalás

A TDK munkámat az egy évvel ezelőtti TDK-m folytatásaként végeztem. A munka során mobil, teljes parallaxist nyújtó háromdimenziós kivetítő rendszer megalkotásával foglalkoztam, ezen belül feladatom a megfelelő kivetítő ernyő vizsgálata és létrehozása.

Korábbi munkámból kiindulva a jelenleg használt gömbös struktúrájú vetítő ernyőről alkottam elméleti modellt. A modell legegyszerűbb változata egyetlen, az átlagos golyóméretnek megfelelő golyót tartalmaz a megfelelő számolási módszer kiválasztásához, melynek a Huygens-integrál bizonyult. Ezt követően a modellt továbbfejlesztettem olyan módon, hogy figyelembe vettem az ernyőn lévő golyók átmérőinek eloszlását. Ehhez egy képfeldolgozó algoritmust írtam, mely tartalmazza az ernyőről készült mikroszkópos felvételek beolvasását, majd a Hoshen-Kopelman-algoritmus segítségével megállapítottam egyesével a golyók méretét. Az így kapott golyóátmérő eloszlással súlyoztam az egyes átmérőkre kapott számolási eredményeket. A modell harmadik fejlesztési lépésében figyelembe vettem a golyók defókuszáltságából adódó aberrációkat, s a modell ezzel már a ± 30 mrad tartományban kiválóan közelíti a mérési eredményt.

A munkám második részében olyan módon foglalkoztam a modell továbbfejlesztésével, hogy az ernyő tulajdonságain javítsak. Létrehoztam, és a rendszer szóródási feltéreteire optimalizáltam három, hengersizmetrikus elrendezést, melyek közül az egyik szférikus, a második páros együtthatókkal leírható aszférikus és a harmadik páros, de magasabbrendű polinomiális felületekből áll. Minden esetben kiszámoltam a 3D kivetítés minőségét jellemző áthallást. A célom az áthallás 0,01 érték alá csökkentése volt az ernyőtől mért adott távolságtartományon belül. A szférikus esetben 70 cm-es tartományon, a polinomiális esetben 155 cm-es tartományon kisebb, mint az áthallás 0,01-nál, az aszférikus esetben pedig nem éri el, ám 250 cm-es szakaszon 0,02 érték körüli. Hasonlóan jártam el két asztigmatikus felületekből álló rendszer esetében is: az egyiket tórikus, a másikat polinomiális felületekből építettem fel, majd kiszámítottam az áthallást. A tórikus esetben 50 cm-es, a polinomiális esetben pedig 195 cm-es tartományon teljesül az áthallásra szabott feltétel. Tehát a feladatot részben sikerült teljesítenem: bár nem a teljes tartományban, de minden esetben sikerült a 0,01 értéknél alacsonyabb áthallást elérnem, vagy megközelítenem azt egy széles távolságtartományban. A legjobbnak mindkét esetben a polinomiális felületek bizonyultak, közülük is az asztigmatikus felülettel értem el jobb eredményt.

Munkám folytatásaként szeretném pontosítani a modell-optimalizáció menetét, hogy az ilyen módon optimalizált modell áthallása az általam megszabott korlát alatt maradjon a

kívánt vetítő-ernyő távolságon belül. Szeretném továbbá kiegészíteni a modellt az áthallást befolyásoló szórással is. A teljes és optimalizált modell alapján szeretném megalkotni és kísérletileg is megvizsgálni a vetítés számára legalkalmasabb kivetítő ernyőt.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni témavezetőimnek, Dr. Koppa Pálnak és Sarkadi Tamásnak a munkám során nyújtott segítségüket, útmutatásaikat és a konzultációkat. Köszönöm szépen a dolgozattal kapcsolatos észrevételeiket is.

Szeretnék köszönetet mondani Dr. Erdei Gábornak, aki időt szánt rá, hogy segítsen a ZEMAX program használatának megismerésében.

Hivatkozások

- [1] Javidi, Bahram et al. – *Three-Dimensional Imaging, Visulation and Imaging*, Springer, 2009, ISBN 978-0-387-79334-4
- [2] Benton, Stephen – *Selected Papers on Three-Dimensional Displays*, SPIE Press, 2001, ISBN 978-0819438935
- [3] Holliman, Nicolas S. et al., „*Three-Dimensional Displays: A Review and Applications Analysis*”, IEEE TRANSACTIONSON BROADCASTING57(2), PP. 362-371 (2011)
- [4] Balogh, Tibor “*The Holovizio system*”, Stereoscopic Displays VirtualReality Syst. XIII, p. 60550U, SPIE.
- [5] H. Mukawa et al. “*A full-color eyewear display using planar waveguides with reflection volume holograms*,” J. SID, vol. 17, no. 3,pp. 185–9193, 2009
- [6] Héricsz, Dalma „*Vetítő ernyő vizsgálata mobil 3D kivetítő rendszerhez*”, 2012
- [7] J. Rolland and O. Cakmakci, “*The past, present and future of head-mounted display designs*,” in Display Systems, WA: SPIE, 2005, pp. 368–377, no. 1.
- [8] <http://www.projectorcentral.com/popular-pico-projectors.htm>
- [9] <http://adivstore.com/hu/termek/66/3m-ps-4100-iphone-sleeve>
- [10] Ralph W. Fisher, “*Head-mounted projection display system featuring beam splitter and method of making same*”, US Patent 5572229, 1996
- [11] J. Nelson and R. L. Brott, “*Autostereoscopic display with fresnel lens element and double sided prism film adjacent a backlight having a light transmission surface with left and right eye sourcesat opposing ends modulated at a rate of at least 90 Hz*,” US 77 50 982, Jul. 6, 2010.
- [12] Á. Kerekes, E. Lőrincz, P.S. Ramanujam, S. Hvilsted „*Light scattering of thin azobenzene side-chain polyester layer*” Optics Communications, 206 57-65 (2002)
- [13] Egan, W. G. and Hilgeman, T. „*Retroreflectance measurements of photometric standards and coatings*”, APPLIED OPTICS, Vol. 15, No. 7, pp 1849-1849, July, 1976
- [14] ZEMAX 13, Optical Design Program, User’s Manual, 2013, www.radiantzemax.com
- [15] Goodman, J. W. – *Introduction to Fourier optics*, Roberts & Company Publishers, 2005, ISBN 0-07-024254-2
- [16] Kertész, J. – *Számítógépes szimulációk a statisztikus fizikában*, Előadás jegyzet 2012, <http://newton.phy.bme.hu/~kertesze/Ea4.pdf>

- [17] Smith, W. J. – *Modern Optical Engineering*, McGraw-Hill, 2000, ISBN 0-07-136360-2,
- [18] <http://www.rpc Photonics.com/microlens.asp>
- [19] Fusion Optics, Standard Product Guide, www.fusionoptics.com