

BAKI MIHÁLY DEZSŐ
DIPLOMATERV

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
MECHATRONIKA, OPTIKA, GÉPÉSZETI INFORMATIKA TANSZÉK

DIPLOMATERV

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
MECHATRONIKA, OPTIKA, GÉPÉSZETI INFORMATIKA TANSZÉK

BAKI MIHÁLY DEZSŐ

DIPLOMATERV

LED-es ábravetítő rendszer fejlesztése
ipari képfeldolgozási célú alkalmazásra

Konzulens:

G. Szabó István

ügyvezető

OMI OPTIKA Mérnökiroda Kft.

Témavezető:

Antal Ákos

docens

BME MOGI Tanszék

Budapest, 2016

NYILATKOZATOK

Beadhatósági nyilatkozat

A jelen szakdolgozat/diplomaterv az üzem/intézmény által elvárt szakmai színvonalnak mind tartalmilag, mind formailag megfelel, beadható.

Kelt,

Az üzem részéről:

üzemi konzulens

Elfogadási nyilatkozat

Ezen diplomaterv a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara által a Diplomatervezési és Szakdolgozat feladatokra előírt valamennyi tartalmi és formai követelménynek, továbbá a feladatkiírásban előírtaknak maradéktalanul eleget tesz. E diplomatervet a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja:

témavezető

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Baki Mihály Dezső* (YHKODC), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírásommal igazolom, hogy ezt a diplomatervet meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 20...

szigorló hallgató

TARTALOMJEGYZÉK

Köszönetnyilvánítás	iv
1. Bevezetés	1
1.1. A dolgozat témája	1
1.2. A diplomadolgozat felépítése, célkitűzés	1
1.3. Ipari képfeldolgozás	2
1.3.1. Az ipari képfeldolgozás megvilágítási lehetőségei	3
1.3.2. LED-es ábravetítők szerepe az ipari képfeldolgozásban	4
2. Elméleti és gyakorlati áttekintés	7
2.1. Vetítőrendszerek működése; fényforrás, kondenzor és vetítőoptika	7
2.2. Az ábravetítő rendszerrel szemben támasztott optikai követelmények	8
2.3. Fényforrások áttekintése (– miért LED?).....	9
2.3.1. A LED	10
2.3.1.1. A LED-ek rövid története és működésük ismertetése	10
2.3.2. A LED működése	12
2.3.3. LED-ek típusai.....	15
2.3.3.1. Normál LED	15
2.3.3.2. High-power (nagy fényerejű) LED	16
2.3.3.3. COB LED	16
2.3.4. A kereskedelmi forgalomban kapható legelterjedtebb Power LED-ek ...	17
2.4. A termék létjogosultsága – digitális projektoros, fix ábrájú lézeres és LED-es ábravetítők összevetése az alkalmazás szempontjából	18
2.5. Kereskedelmi forgalomban kapható ábravetítők és jellemzőik	21
3. Az ábravetítő rendszer tervezése	25
3.1. A szerkezet elvi felépítése	25
3.1.1. Kritikus megvilágítás.....	25
3.1.2. Köhler-megvilágítás.....	26
3.1.3. Tervezés és szimuláció ZEMAX-szal	32
3.1.3.1. Fényforrás	32
3.1.3.2. Kondenzor	33
3.1.4. A kivetítendő ábra	34
3.1.5. Objektívek	35
3.1.6. Az optikai szimuláció eredménye.....	37
3.2. Mechanikai felépítés	39
3.2.1. Tervezési szempontok	39
3.2.1.1. Felhasználói követelmények, konkurencia.....	39

3.2.1.2. Optikai elrendezés	39
3.2.2. Hűtéstervezés	40
3.3. Optimalizálás	42
4. A termék gyártása és szerelése	45
5. Tesztelés	49
5.1. A tesztelés célja	49
5.2. Tesztfelépítés.....	49
5.2.1. Homogenitás.....	49
5.2.2. Fényáram.....	54
5.2.3. Hőmérséklet.....	56
6. Összefoglalás.....	59
6.1. Tanulságok, következtetések, javaslatok	60
7. Felhasznált Források.....	61
8. Summary	63

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni G. Szabó Istvánnak, hogy a dolgozat megírásához szükséges minden segédeszközt rendelkezésemre bocsátott az OPTIKA Mérnökiroda Kft. telephelyén, illetve minden munkatársamnak a hasznos tanácsokat, illetve segítőkészséget, amivel hozzájárultak a diplomaterv elkészültéhez.

Budapest, 2016.06.01.

Baki Mihály Dezső

1. Bevezetés

1.1. A dolgozat témája

Az ipari képfeldolgozási feladatok terjedésével a feladat-specifikus világítók iránti igény is fokozatosan nő. A feladatok sokfélesége miatt a megvilágítási igények is igen különbözőek, a gyártók pedig próbálnak eleget tenni a vevői elvárásoknak, és ma már igen sokféle megvilágítóval találkozhatunk a gyártósorok mellett.

A diplomatervem célja egy ipari képfeldolgozásban használt strukturált fényű LED kondenzor rendszer vagy más néven ábravetítő rendszer tervezése. A feladatom, hogy egy olyan terméket tervezzek, mely piaci körülmények között is versenyképes. Az eszköz a vizsgálandó munkadarabra egy ábrát vetít ki, melyet egy kamerás rendszer dolgoz fel. Az ábra és a fény hullámhossza többféle lehet, a felhasználói igényektől függően.

Az ábravetítő rendszernek ipari képfeldolgozáshoz, azon belül is elsősorban háromdimenziós felületrekonstrukcióhoz kiválóan alkalmazhatónak kell lennie. [1] A versenyképességhez szükséges a hosszú élettartam, kis méret, nagy fényerő és egyszerű, de üzembiztos működés. Az ipari felhasználásból adódóan a vetítőnek robusztus kivitelűnek kell lennie, a pornak és mechanikai behatásoknak lehetőség szerint ellen kell állnia; akár folyamatos üzemmódban is problémamentesen kell üzemelnie.

Ahhoz, hogy a számítógépes képfeldolgozás nagy pontossággal tudjon dolgozni, az ábravetítőnek is megfelelő felbontású vetített ábrát kell biztosítania. A különböző színű vizsgált felületek miatt többféle hullámhosszban elérhetőnek kell lennie.

Az ábrát egy primer, ún. LED-kondenzor rendszer világítja meg, a kivetítést pedig a szekunder, ún. vetítőrendszer végzi. A vetítőrendszer része a vetítőobjektív, a cél pedig, hogy minél több, az iparban elterjedt C-menetes objektívvel működőképes legyen a termék. Így a vetítési távolság illetve ábraméret könnyedén változtatható, hiszen igen széles a választék ezekből a termékekből. A felhasználó így saját igényei alapján választhatja ki a számára legmegfelelőbb objektívet.

1.2. A diplomadolgozat felépítése, célkitűzés

A dolgozatban áttekintem az ipari képfeldolgozás megvilágítási lehetőségeit, valamint a LED-es ábravetítő rendszer lehetséges felhasználási módjait, és összehasonlítom az alternatív megoldásokkal. A fényforrások áttekintése után kereskedelmi forgalomban kapható terméket választok.

Áttekintem a konkurens termékeket, valamint a felhasználó várható követelményeit, ez alapján specifikálom a saját LED-es ábravetítő rendszerrel szemben támasztott elvárásokat.

Megvizsgálom az ábravetítőrendszer optikai jellemzőit, majd olyan analóg működésű optikai rendszert keresek, mely alapján a rendszer felépítése megközelíthető. A rendszer alkotóeleimet külön-külön megvizsgálom, azok típusát, kialakítását kiválasztom, és a teljes optikai rendszer felépítését meghatározom.

Az ábravetítő rendszer optikai tervezését Zemax optikai tervezőpogrammal végzem. A szimuláció eredménye alapján optikai tesztpadon további méréseket végzek, hogy a végleges mechanikai kialakítást valós mérések alapján tudjam megtervezni.

A mechanikai tervezés után szimulációt végzek a hőmérsékletre vonatkozóan, a gyártási rajzokat elkészítem, a szabványos, kereskedelmi forgalomban kapható termékeket kiválasztom.

A terveim alapján elkészült terméken méréseket végzek a fényáramra, homogenitásra, hőmérsékletre vonatkozóan. A mérési eredmények alapján értékelem a dolgozat sikerességét, javaslatot teszek a további előrelépési lehetőségekre.

A dolgozat célja, hogy egy olyan terméket tervezzek, mely kielégíti a felhasználó igényeit, továbbá az OMI OPTIKA Mérnökiroda Kft. által támasztott követelményeket is teljesíti, mind gyártástechnológia, mind versenyképesség, mind költségek szempontjából.

1.3. Ipari képfeldolgozás

A kétezres évek elejére a digitális fényérzékelő szenzorok széleskörű megjelenésével és a képfeldolgozó egységek folyamatos fejlődésével a kamerás vizsgálatok egyre elterjedtebbé váltak az iparban. [2] Ipari képfeldolgozás alatt értjük többek közt a kamerás gyártósori automatizált ellenőrzést, folyamattírányítást vagy robotok tájékozódását segítő rendszereket is. [3]

A fogalom magában foglalja a megvilágítást, képalkotást, képfeldolgozást és kiértékelést is. A hagyományos látható fényű, két dimenziós képfeldolgozási megoldások mellett találkozhatunk infravörös, fekete-fehér vagy vonalkamerás megoldásokkal, illetve három dimenziós felületrekonstrukcióval vagy akár röntgensugaras vizsgálatokkal is.

Az ipari képfeldolgozás során a legfontosabb lépés a feladat pontos meghatározása. A specifikációhoz tartozik a vizsgált terület mérete, a rendelkezésre álló tér nagysága, azaz a munkatávolság, a hullámhossztartomány, illetve az a jellemző, amit vizsgálni szeretnék a rendszer segítségével. Ezek alapján meghatározható a kamera szükséges felbontása és sebessége, illetve spektrális érzékenysége. A kamera és a munkatávolság, valamint a látószög alapján kiválasztható a szükséges objektív.

A képfeldolgozás minden esetben a kamerában kezdődik, és az ún. okos kamerák esetében abban is folytatódik. Ezekbe a termékekbe egy összetett képfeldolgozó egység van beépítve, ami programozható, így a kiértékelést is el tudja végezni, a kimeneten a vizsgálat eredménye jelenik meg. A klasszikus kamerák esetében a kimeneten

egy képpontállomány jelenik meg (analóg vagy digitális), amit egy külön eszköz dolgoz fel és értékel. [4]

A képfeldolgozás igen sokféle lehet:

- összefűzés (képek illesztése, ezáltal egy nagyobb felbontású kép összeállítás a klasszikus „panoráma” fotókhoz hasonlóan),
- szűrés (csak adott értékű pixelek figyelembevétele),
- küszöbölés,
- élfelismerés,
- szegmentálás,
- mintázat felismerés,
- vonalkód, adatomátrix olvasás,
- optikai karakterfelismerés,
- mérés.

A feldolgozás és kiértékelés után a rendszer kimenetén megjelenik a képfeldolgozás eredménye, ami többnyire az alábbi lehet:

- megfelelt/nem felelt meg,
- munkadarab pozíciója és orientációja (pl. robotkar számára),
- méret,
- adatsor (kódok, karakterek beolvasása),
- két dimenziós adathalmaz (pl. kép) ,
- jelzés a folyamatirányító rendszer számára stb.

1.3.1. Az ipari képfeldolgozás megvilágítási lehetőségei

A megvilágítás alapvetően meghatározza a képfeldolgozás sikerességét, így – bár gyakran előforduló képfeldolgozási hiba – nem szabad átsiklani felette. A világítás jellegét a rendszer által vizsgált jellemző határozza meg elsősorban, azonban fontos kritérium a rendelkezésre álló hely, a környezet (hőmérséklet, páratartalom, közeg, stb.), illetve a költségvetési keret is.

A megfelelő felbontású, spektrális érzékenységű, méretű, csatolófelületű stb. kamera mellett elengedhetetlen a megfelelő megvilágítás kiválasztása. A klasszikus halogén vagy fluoreszcens általános fényforrások mellett egyre nagyobb a kereslet a feladatspecifikus, hosszú élettartamú, ipari kivitelű megvilágítók iránt. A megfelelő megvilágítás kiválasztásával a képfeldolgozási feladat egyszerűsödik, kevesebb számítás igényel, így a ciklusidő rövidíthető, ami a gyártás gyorsulásához vezet. Az iparban

bármely gyártási területen a legfontosabb feladatok közé tartozik a gyártási idő rövidítése. A megfelelő világítást kiválasztva viszonylag kis befektetéssel jelentős idő nyerhető.

Az OMI OPTIKA Mérnökiroda Kft.-nél korábban, egy szakdolgozat keretében, a megrendelők között végzett piackutatás megállapította, hogy a leggyakrabban méret- és felületi minőség ellenőrzésére használják a cég LED-es megvilágítóit, sorban követi ezeket a munkadarab meglétének vizsgálata. [5] A dolgozatból kiderül továbbá, hogy leggyakrabban természetes fehér fényforrást használnak a megrendelők, ezt követik a vörös és közeli infravörös tartományú megvilágítók. A felhasznált hullámhosszt meghatározzák a körülmények: amennyiben a cella sötétítésére nincs lehetőség, úgy általában infravörös megvilágítás javasolt, hiszen így a kamerán megfelelő felüláteresztő szűrőt használva a környezeti fények kizárhatóak. Egyéb esetben többnyire a vizsgált tulajdonság, a munkadarab felületi minősége, anyaga határozza meg a világítás színét.

További, a megvilágítás típusát meghatározó körülmények közé tartozik a rendelkezésre álló hely, így a munkadarab távolsága a fényforrástól, a várható szennyeződések mértéke (fémforgács, olaj, víz, por stb.), valamint a vizsgálandó tulajdonság jellege. A leggyakrabban használt megvilágító típusok a háttér, felületi, axiális, árnyékmentes, súrlófényű, sötét látóterű, kör, vonal vagy strukturált fényű világítók. [6]

1.3.2. LED-es ábravetítők szerepe az ipari képfeldolgozásban

Az ábravetítőket, vagy más néven strukturált fényű megvilágítókat leggyakrabban érintésmentes 3D-s felültrekonstrukció során alkalmazzák. A vizsgált felületre megfelelő mintázatot vetítve, különféle képfeldolgozási eljárások segítségével a felület méretei három dimenzióban meghatározhatóak, így a munkadarab digitális másolata létrehozható.

Az ábra jellege a feldolgozási módszertől függ, amit többnyire a kívánt pontosság, a munkadarab mérete, alakja, spektrális tulajdonságai határoznak meg: a Microsoft Kinect pszeudo-random elhelyezkedésű infravörös pontokat vetít; a klasszikus Moiré módszerre épülő eljárások sávokat vetítenek, szinuszosan vagy lépcsősen, akár változó frekvenciával. Az Intel Realsense technológiája a Kinecthez hasonló mintázattal átlagos laptopokba juttatja el a 3D-s arcfelismerés és kézmozdulatokkal történő vezérlés lehetőségét. A vizsgálandó felület jellegét ismerve, különféle speciális mintázatok is kialakíthatóak, melyek egy-egy specifikus képfeldolgozási feladathoz optimalizáltak.

További lehetséges felhasználási lehetőségek közé tartoznak a gyártósori folyamatos, vagy mintavételes alaksajátosság-ellenőrzések, illetve különböző jelölések vetítése az operátor számára: kézi összeszerelés esetén ragasztási pontok, csavarok, csat-

lakozási pontok pozíciójának jelölése; vizuális ellenőrzés során referenciaméret vetítése, melyhez viszonyítva a megfelelőségi vizsgálat elvégezhető; valamint akár tájékozódást segítő ábrák (nyilak, feliratok) vetítésére is felhasználható a berendezés.

Továbbá minden olyan esetben, ahol a megvilágított területnek jól körülhatárolhatónak kell lennie, vagy strukturált jellegű megvilágításra van szükség.

2. Elméleti és gyakorlati áttekintés

2.1. Vetítőrendszerek működése; fényforrás, kondenzor és vetítőoptika

Ahhoz, hogy a követelményeket megfelelően elemezni tudjuk, fontos megérteni az alapvető optikai jelenséget. Az ábravetítő egy néhány centiméteres nagyságrendű ábrát vetít ki akár méteres távolságra. A vetítő eszköz célszerűen minél rövidebb, maximum 100 mm-es nagyságrendbe esik.

A tárgyméret tehát 10-20 mm, míg a képméret 1000-2000 mm is lehet. Egy optikai rendszer nagyítása a képméret és tárgyméret arányából adódik:

$$N = K/T \sim = 100 [-] \quad (2.1)$$

Ilyen nagyságrendű nagyítással fénymikroszkópokban találkozhatunk. Célszerű tehát megvizsgálni ezeket az eszközöket, és analógiát keresni, azaz olyan műszaki megoldást, vagy elvet, amit az ábravetítő rendszerben is alkalmazhatunk.

A mikroszkóp primer, ún. kondenzor része a tárgyasztalra helyezett tárgyat át- vagy megvilágítja, annak természetétől függően. Az átvilágítható tárgyak esetében alsó, míg a fénysugarakat át nem eresztő tárgyak esetében felső megvilágítást alkalmazunk. [7] A tárgyat nem elég csupán rengeteg fénnel megvilágítani, mindezt úgy kell tenni, hogy a mikroszkóp következő egysége, az objektív által „befoghatóak” legyenek a fénysugarak, azaz a fényforrás fényét minél nagyobb százalékban hasznosítsuk. A dolgozatban tervezendő projektor esetében ez azt jelenti, hogy a LED által kibocsátott fény minél nagyobb százaléka kerüljön kivetítésre.

A nagyítást maga az objektív végzi. Az előző bekezdésben tulajdonképpen az optikai rendszer célját is meghatároztuk: olyan optikai rendszert létrehozni, mely egy LED fényforrás által megvilágított ábrát ~100-szoros nagyítással egy ernyőre vetít.

A komplett rendszer tehát egy mikroszkóphoz hasonló elemekből épülhet fel. A hasonló nagyságrendű nagyítás mellett azonban fontos figyelembe venni, hogy a képméret és tárgyméret jelentősen különböző nagyságrendű, míg mikroszkópnál a teljes vizsgált képmező is a milliméter alatti tartományba eshet, addig a LED ábravetítő rendszer esetében ez 10 milliméteres nagyságrendű. Így a rendszer megkövetelt felbontóképessége is kisebb, a rendszer vetítő oldala egy klasszikus kamera fordított változataként értelmezhető.

Ahhoz, hogy az objektív teljes látómezőjét kihasználjuk, és a fényforrásból érkező minél több fény az objektívben felhasználásra kerüljön, a megvilágító sugárkúp apertúrájának lehetőleg meg kell egyeznie az objektív apertúrájával. A megvilágítás apertúrája kondenzorral növelhető, amit úgy kell elhelyezni, hogy a fényforrás nagyított képe a legtávolabb essen a tárgytól. Ez megvalósítható, ha a fényforrás a kondenzor fókuszsíkjában van, mert így nagyított képe a végtelenben jelenik meg, ezáltal elérhető, hogy a fényforrás fénysugarai merőlegesen érijék a tárgysíkot. Egy olyan fényfor-

rást, melynek felülete megfelelő kiterjedésű, és homogén fényforrást ad, bárhol elhelyezhetünk a sugárútban. Ekkor a fényforrás a tárgysíkba leképezhető, nincs szükség kondenzorra. Ezt a megvilágítást kritikus megvilágításnak nevezik. Az ilyen jellegű megvilágítás ritka, de az úgynevezett fly's eye (tükörfordításban légy szem) lencsével, pontosabban lencserendszerrel megvalósítható. Az ilyen jellegű rendszerek azonban túlmutatnak a projekt keretein, így a jövőben ezzel a megoldással nem foglalkozunk.

Cél, hogy vetítőobjektívként iparban elterjedt, szabványos objektívek használhatóak legyenek. Ilyen szabvány a C-menetes objektíveké. A leggyakoribb érzékelőméret 2/3", tehát ekkora képet rajzol az objektív. Ennek az érzékelőnek a mérete 8,8 x 6,6 mm, átmérője 11 mm. Tehát ilyen objektívet használva a maximális méretű ábra, amit a rendszer ki tud vetíteni 11 mm átmérőjű. (Természetesen ennél nagyobb érzékelőre tervezett objektívekkel is működőképes a rendszer.)

2.2. Az ábravetítő rendszerrel szemben támasztott optikai követelmények

Az ábravetítőt úgy kell megtervezni, hogy digitális képfeldolgozás során olyan képet alkosson, amelynek feldolgozása a legkevesbé erőforrás igényes, emellett ipari környezetben jól alkalmazható, a vásárlói igényeket kielégíti.

Az optikai rendszerek alapvető tulajdonsága, hogy minél több fényre van szükségünk a hatékony működéshez. Több fény esetén kisebb érzékenységre van szükség, szűkebb apertúrarekesztő objektívet lehet használni, mindezzel növelve a jel/zaj viszonyt. (Az objektívek általános jellemzője, hogy átviteli függvényük nem a maximális rekesztértékükön a legjobb, hanem néhány fényértékkel alacsonyabb értéken.) A már említett két követelmény a megfelelő fényerőt biztosítja tehát.

Igen fontos optikai követelmény továbbá, hogy az ábra kivilágítása homogén, egyenletes legyen. Amennyiben ez a feltétel nem teljesül, a kamera által látott kép jelentős digitális korrekciót igényel egy megfelelő pontosságú méréshez, mivel a képfeldolgozásban elengedhetetlen követelmény, hogy az intenzitás ingadozása minél alacsonyabb legyen. Tökéletes homogenitás természetesen nem érhető el, azonban törekedni kell rá. A homogenitást akkor tekinthetjük megfelelőnek, ha eléri, de legalábbis megközelíti a konkurens termékek értékeit, mely tipikusan ~80% vagy az alatti érték.

Az optikai követelmények megfelelő elrendezéssel, a rendszer számítógépes optimalizálásával lehetséges. Az OMI OPTIKA Mérnökiroda Kft-nél rendelkezésre álló optikai tervezőprogram a Zemax. A megfelelő fényerő eléréséhez megfelelő fényáramú LED-re is szükség van, a megfelelő minőségű kivetített ábrához pedig megfelelő felbontású mintára van szükség.

A vetítés célja, hogy különféle távolságokra, különböző méretű, és optikailag megfelelő ábrát vetítsünk. A megfelelő fényerő és homogén megvilágítás mellett tehát olyan objektívre van szükség, amely teljesíti a várható vevői igényeket. Ezen igények

közé tartozik a torzításmentesség és a megfelelő felbontóképesség. Az optikai rendszerekre gyakran jellemző a hordó- vagy párnatorzítás, a felbontóképesség pedig magától értetődő, hiszen ipari képfeldolgozásban akár 5 vagy 10 megapixeles kamerákkal is dolgozhatnak, így olyan ábrát kell vetíteni, melynek élei könnyen azonosíthatóak, az átmenet nem nagyobb néhány pixelnél.

Egy ilyen objektívet tervezni igen összetett feladat. Több mérnök számára is igen hosszú ideig tartó feladat lehet, így e diplomamunkának nem célja az objektív tervezése. A megfelelő objektívcsoport kiválasztása, illetve a rendszer többi tagjának illesztése azonban az.

2.3. Fényforrások áttekintése

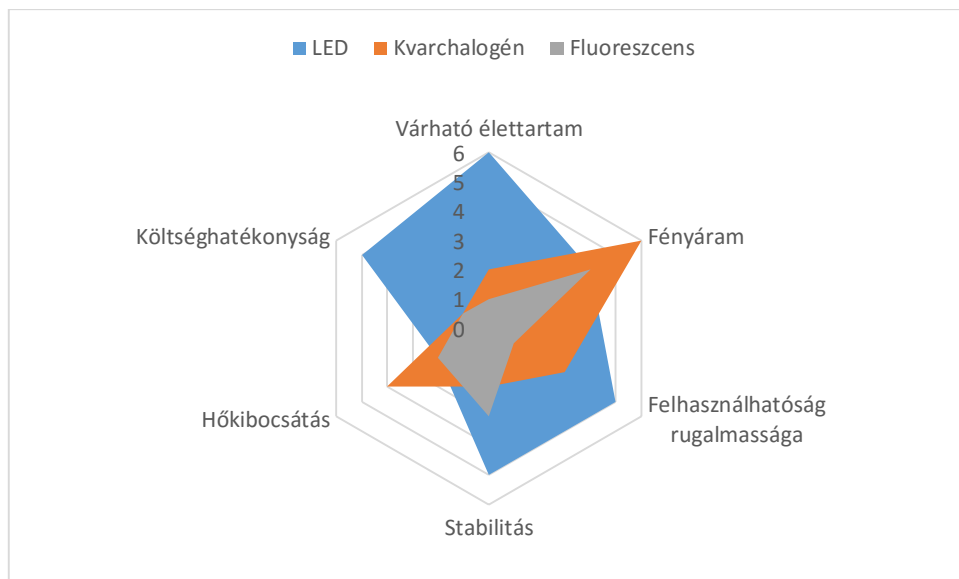
A dolgozat célja egy LED-es kondenzor rendszer tervezése, azonban érdemes megvizsgálni, hogy a választás miért erre a fényforrásra esett. A leggyakrabban ipari képfeldolgozási célokra használt fényforrások a fluoreszcens, a halogén és nagyütemű fejlődésének köszönhetően a LED.

Korábban a fluoreszcens és a halogén világítók uralták a piacok. Előbbi megbízható működése, hosszú élettartama, kielégítő fényereje és olcsó árának köszönhetően kiváló megoldást nyújtott általános feladatok. Fényhasznosításuk 50-100 lm/W körüli, élettartamuk 5000-10000 óra közötti. Spektrumuk azonban sávós, méretük nagy, valamint jellemző rájuk a villogás, az áramforrás frekvenciájának kétszeresével. Olyan alkalmazásoknál, ahol a világítást gyakran kell kapcsolni nem használható, mivel a ki-be kapcsolások igen nagy mértékben csökkentik az élettartamát. Sugárzásuk nem irányított

A halogén lámpák spektruma a klasszikus izzókhoz hasonlóan folytonos, és igen nagy fényerő érhető el velük. Fényhasznosításuk 25 lm/W körüli, élettartamuk ~1000 óra. Sugárzásuk alapvetően nem irányított, de különféle optikai és mechanikai megoldásokkal azzá tehető. A mechanikai behatásokra érzékenyek, működésük során igen sok hőt termelnek.

A LED-ek fényhasznosítás 100 lm/w fölötti. Kis méretüknek és kis fogyasztásuknak köszönhetően felhasználási körük igen széleskörű, spektrumuk igen sokféle lehet, de nem folytonos. Élettartamuk akár 100000 óra is lehet, fénykibocsátásuk irányított, így célzott megvilágításhoz kiválóan alkalmazhatóak.

Az egyes tulajdonságok az 1. ábra alapján könnyen összevethetőek.



1. ábra: a három leggyakoribb fényforrás osztályozása legfőbb tulajdonságaik alapján [8]

Látható, hogy a LED a fluoreszcens fényforrást gyakorlatilag minden tulajdonságban felülmúlja. A hőkibocsátása nagyobb a LED-nek, azonban megfelelő mechanikai kialakítással ez javítható. A halogén fényforrások olyan speciális alkalmazásokban előnyösebbek a LED-nél, ahol fontos a folytonos spektrum, vagy az igen nagy fényerő.

Megállapítható tehát, hogy általános képfeldolgozási feladatokhoz, így az ábravetítéshez is a legcélszerűbb LED fényforrást alkalmazni. Ezekben a feladatokban nem szükséges a folytonos spektrum sem, illetve a mai érzékelők mellett egy nagy teljesítményű LED fényárama (400-500 lm) megfelelő megvilágítást eredményez.

2.3.1. A LED

2.3.1.1. A LED-ek rövid története és működésük ismertetése

A LED egy angol szó rövidítése: light-emitting diode, azaz fénykibocsátó dióda. Az elektroluminancia jelenségét Henry Round, a Marconi Labs szakembere fedezte fel az 1900-as évek elején. Az 1920-as években Oleg Vlagyimirovich Losev, orosz rádiótechnikus készítette el az első LED-et. Észrevette, hogy a rádióvevőjéhez használt diódák fényt bocsátanak ki, amikor áram folyik át rajtuk. 1927-ben publikálta tapasztalatait Oroszországban; a diódát, mint elektronikai alkatrészt azonban csak 1962-ben mutatták be Amerikában. Nick Holonyak Jr., a General Electric szakembere fejlesztette ki az első látható tartományban sugárzó LED-et. [9] Az általa kifejlesztett GaAsP alapokon nyugvó vörös lézervedióákat ma is alkalmazzák CD és DVD lejátszóknál. Fényerőben és a hullámhossz skálán is fokozatosan felfelé haladtak a kutatók. Fehér LED-et azonban kék komponens hiányában nem tudtak előállítani.

A kibocsátott fény hullámhossza a félvezetőhöz felhasznált anyagoktól függ.

Anyag	Szín	Hullámhossz
Gallium-arzenid (GaAs)	infravörös	940 nm
Gallium-alumínium-arzenid (AlGaAs)	vörös és infravörös	890 nm
Gallium-arzenid-foszfid (GaAsP)	vörös, narancs és sárga	630 nm
Gallium-foszfid (GaP)	zöld	555 nm
Gallium-nitrid (GaN)	zöld	525 nm
Cink-szelenid (ZnSe)	kék	500 nm
Szilícium-karbid (SiC)	kék	480 nm
Indium-gallium-nitrid (InGaN)	kék	450 nm
Gyémánt (C)	ultraibolya	400 nm

1. táblázat: a félvezetőhöz használt anyaghoz kapcsolódó szín és hullámhossz

1972-ben már Jacques Pankove felfedezte a kék fényt kibocsátó LED-et, majd 1994-ben megdöbbenően nagy fényerő növekedést ért el Shuji Nakamura, Isamu Akasaki és Hiroshi Amano. A gallium-nitrid-alapú félvezetővel a korábbinál nagyobb fényerőt tudtak előállítani. [10] A legtöbb nagyvállalat az ő alapelveik alapján gyárt ma is LED-eket. Találmányukért 2014-ben fizikai Nobel-díjat kaptak. [11]

1999-ben a Philips Lumileds legyártotta az első folyamatos üzemű, 1 wattos Power LED-et. (A továbbiakban PLED.) A korábbiaknál méretben is sokkal nagyobb volt, és már csak megfelelő hűtéssel lehetett használni. Ekkor vette kezdetét a LED-ek világítási célú felhasználása. A LED-es világítás egyik legfontosabb előnye a kiváló fényhasznosítás. A fényhasznosítás az alábbi képlettel definiálható:

$$\eta = \frac{\Phi_v}{P}, \text{ ahol} \quad (2.2)$$

Φ_v [lm] a fényáram,

P [W] pedig a felvett villamos teljesítmény.

A 2002-ben elérhető 5 wattos fényforrás 18-22 lumen/Watt-os volt, ez a szám 2012-re elérte a 254 lm/W, 2014. márciusára pedig 303 lm/W értéket. [12] [13] Mindezt természetesen laboratóriumi körülmények között tudták megvalósítani, intenzív folyamatos hűtéssel, rövid ideig működtetve a LED-et. A jelenleg kereskedelmi forgalomban kapható PLED-ek kb. 100 lm/W fényhasznosítással bírnak. Ezek az értékek azonban folyamatosan növekednek, évről évre hatékonyabb LED-ek érhetőek el az egyes gyártók kínálatában. Összehasonlításképp a kompakt fénycsövek tipikus fényhasznosítása 50-80 lm/W közötti. A 2. táblázat alapján az egyes értékek összevethetőek.

Fényforrás	Fényhasznosítás
Normál izzólámpa	10-15 lm/W
Halogénlámpa	18-25 lm/W
Fénycső	80-90 lm/W
Higanylámpa	40-52 lm/W
Fémhalogén lámpa	60-90 lm/W
Nagynyomású nátriumlámpa	80-120 lm/W
Power LED	80-120 lm/W
Kisnyomású nátriumlámpa	160-200 lm/W

2. táblázat: a legelterjedtebb fényforrások és fényhasznosításuk

2.3.2. A LED működése

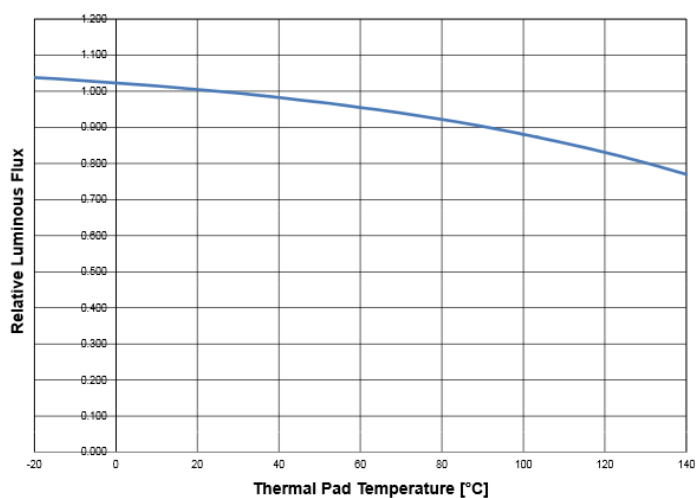
A LED (Light Emitting Diode, azaz fénykibocsátó dióda) egy olyan speciális dióda, melyre ha nyitóirányú feszültséget kapcsolunk, fényt bocsát ki. A fény egy atom által kibocsátott energiamennyiség, mely hullám- és részecsketulajdonságokkal is rendelkezik, van energiája, de nincs tömege. A fény az elektromágneses sugárzás emberi szemmel érzékelhető tartománya.

A diódákban p-n átmenet található. Ez egy N és egy P-típusú félvezető találkozásánál alakul ki. Az N-típus elektrontöblettel rendelkező anyaggal, a P-típust pedig elektronhiánnyal rendelkező anyaggal adalékolta. Az adalékolás nem túl szerencsés megnevezése köznyelvben a szennyezés. A két réteg között úgynevezett kiürített réteg található, itt a többségi többlethordozók átáramlanak a másik rétegbe, így egy olyan réteg alakul ki, melyben nincsenek töltethordozók.

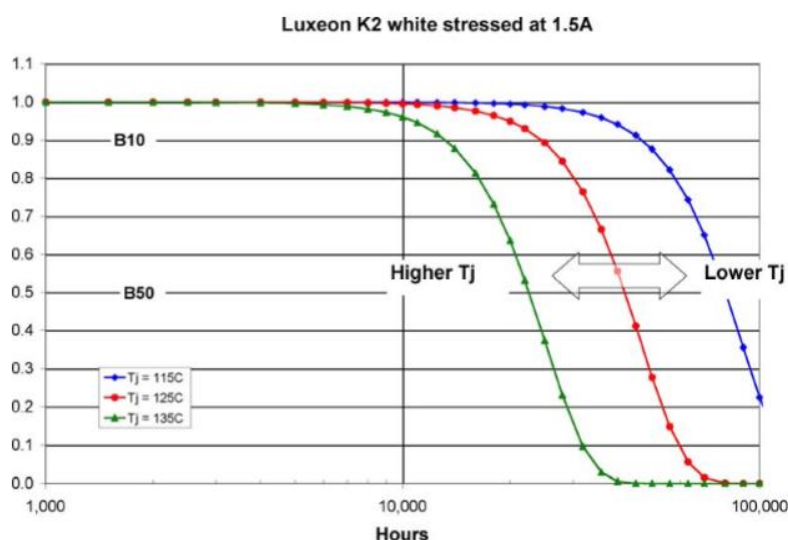
Nyitóirányú előfeszítés esetén a P-rétegre kapcsolt feszültség nagyobb, mint az N-rétegre kapcsolt. Ennek hatására az N-rétegből szabad elektronok haladnak a P-rétegbe, ahol rekombinálódnak a lyukakkal, a P-rétegből pedig lyukak haladnak az N-rétegbe, ahol rekombinálódnak a többlet elektronokkal. A rekombinációs folyamat során energia szabadul fel, mely foton formájában kisugárzódik. A sugárzás annak köszönhető, hogy az elektronok nagyobb energiájú elektronsávba kerülnek, amely azonban nem stabil, így egy idő elteltével visszatérnek az eredeti energiaszintjüknek megfelelő energiapályára.

A rekombinációs folyamat kis része jár foton kibocsátással, nagyobb részben hő termelődik. A mai LED-ek hatásfoka már eléri a 20%-ot. A hatásfok függ a hullámhossztól, azaz a félvezető anyagától is. Nagyobb áram hatására nő a kibocsátott fotonok mennyisége, azonban egy bizonyos érték után nem változik számottevően. Az áram növelésével ugyanakkor a hatásfok csökken, és nagyobb hőtermelődést is jelent. A nagyobb üzemi hőmérséklet jelentősen rövidíti a LED élettartamát. A LED-ek hatásfoka igen kis áram esetén a legjobb, például telefonunk néhány milliamperes áramerősségű

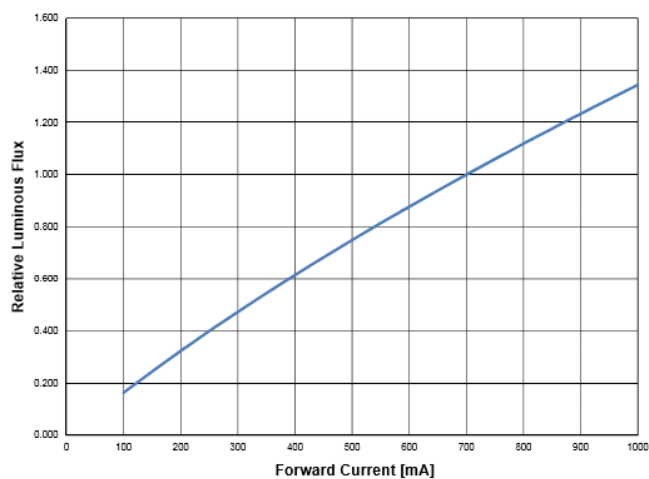
háttérvilágítása igen jó hatékonysággal bír, ahhoz azonban, hogy általánosan használható fényforrást kapjunk, emelni kell az áramot, és már bőven 100 lm/W alá csökkenhet a fényhasznosítás. Szabványosan elterjedt, hogy az iparban használatos PLED-ek 350, vagy maximum 700 mA-rel vannak hajtva, ami a tapasztalatok alapján megfelelő kompromisszumot jelent a fénykibocsátás, hatásfok és az élettartam között. Az átfolyó áram növelésével arányosan, közel lineárisan nő a kibocsátott fényáram (2. ábra). Az áram növelésével járó nagyobb működési hőmérséklet azonban befolyásolja az élettartamot (3. ábra), a fénykibocsátást, így a fényhasznosítást is (4. ábra, 5. ábra).



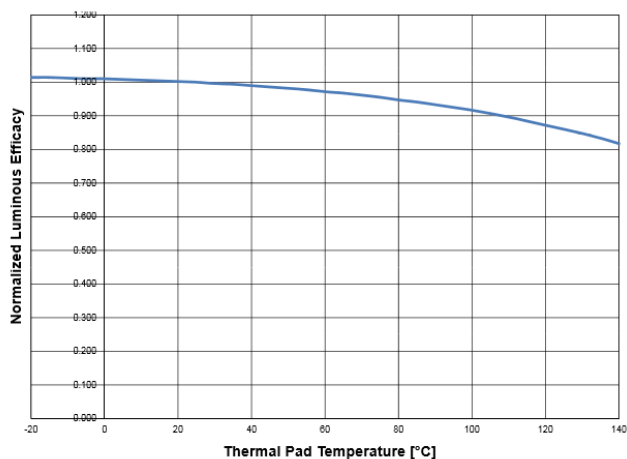
2. ábra: a relatív fényáram a hőmérséklet függvényében Luxeon Rebel ES LED esetén



3. ábra: a LED fényárama különböző működési hőmérsékletek esetén, hosszútávú tesztek során



4. ábra: a relatív fényáram a LED-en folyó áram függvényében Luxeon Rebel ES LED esetén



5. ábra: a fényhasznosítás a hőmérséklet függvényében Luxeon Rebel ES LED esetén

A fényhasznosítás a félvezető készítéséhez felhasznált anyagtól is függ, így a különböző színű LED-ekre más-más hatásfok jellemző, átlagos értékük a 3. táblázatban látható.

Színérzet	Hullámhossz tartomány	Hatásfok (W/W)
Vörös	$620 < \lambda < 645$	0,39
Narancs	$610 < \lambda < 620$	0,29
Zöld	$520 < \lambda < 550$	0,15
Cián	$490 < \lambda < 520$	0,26
Kék	$460 < \lambda < 490$	0,35

3. táblázat: különböző színű LED-ekre jellemző fényhasznosítás

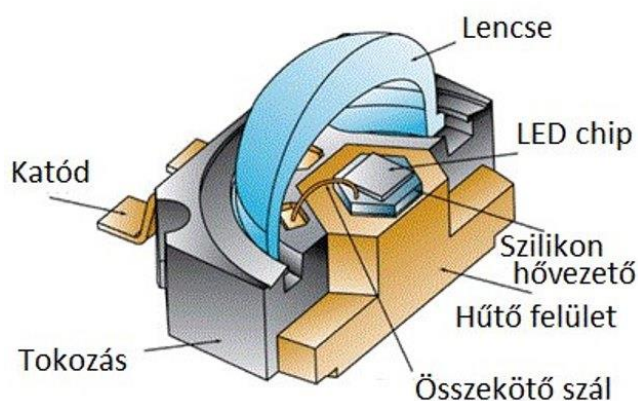
2.3.3. LED-ek típusai

Ahhoz, hogy egy képfeldolgozó rendszer megfelelően tudjon dolgozni a diplomamunkámban tervezett LED projektor által vetített képpel, többek közt elégséges intenzitással is kell bírnia a kivetített ábrának.

A megfelelő fényforrás kiválasztásához először érdemes áttekinteni az elérhető típusokat. Alapvetően az alábbi csoportokra bontható a kínálat: normál, nagy teljesítményű és COB LED-ek. [14]

2.3.3.1. Normál LED

A normál LED-ek közé tartoznak a klasszikus furatszerelt (THT) és felületszerelt típusok. Ezen LED-eket miniatűr diódáknak is nevezik. A felépítés megértéséhez segítséget nyújt az 1. ábra, amin egy normál THT LED szerkezete látható.



6. ábra: LED felépítése

Ezek a típusok általában jelzőfényként használatosak, vagy olyan helyeken, ahol van hely több diódát egymás mellé helyezve megfelelő fényerőt elérni. Az átlagos áram 1 és 20 mA közötti, így hűtőborda alkalmazása nem jellemző.

Az átfolyó áram alapján az alábbi három kategóriába sorolhatóak:

- kis áramú: 2 V-on kb. 2 mA áramot vesznek fel
- standard: 20 mA áramfelvételű LED-ek:
 - 1,9-2,1 V narancs, vörös és sárga,
 - 3,0-3,4 V zöld és kék,
 - 2,9-4,2 V feszültség lila és fehér LED-ek esetén.
- igen nagy fényerejű: 20 mA áramfelvétel 4-5V feszültség esetén.

2.3.3.2. High-power (nagy fényerejű) LED

A High-power, vagy Power LED-ek (a továbbiakban: PLED) akár több amper áramerősséggel is meghajthatóak, elérve így az akár 1000 lm-es fénykibocsátást. [15] A teljesítménysűrűség így eléri a 300 W/cm²-es értéket. A túlmelegedés negatív hatásait már megismertük, így értelemszerűen szükség van hűtőbordára a megfelelő hőleadás biztosításához.

A nagy teljesítményű LED dióda működése közben folyamatosan melegedve egyre nagyobb áramot vesz fel, így teljesítménye folyamatosan nő. Ezáltal fix feszültségről üzemeltetve önmagát gerjesztve könnyen túlmelegedhet. Fontos ezért, hogy az áram stabilizált értékű legyen, tehát olyan tápegységet kell alkalmazni, mely ezt a követelményt teljesíteni tudja. Ilyen berendezések az áramgenerátoros tápegységek.



7. ábra: nagy teljesítményű LED

Általánosságban kijelenthető, hogy ezek a LED-ek a célfelhasználáshoz elegendő fényáramot biztosítanak önmagukban is, nem feltétlenül van szükség több chip sorba-kapcsolására, emellett pozitív tulajdonságai közé tartozik az alacsony fogyasztás, hosszú élettartam és kis méret is.

A LED-technológia napjainkban is folyamatosan fejlődik, az eddigi tapasztalatok alapján a folyamatot kiválóan előrejelzi Haitz törvénye, amit a LED-ekre vonatkoztatott Moore-törvénynek is nevezhetünk. [16] A törvény kimondja, hogy a LED-ek által kibocsátott fény minden évtizedben húszszorosával növekszik, a lumenre vonatkoztatott ár pedig tízszeresével csökken. Haitz 2000-es előrejelzése szerint a fényhasznosítás 2020-ra eléri a 200 lm/W-ot.

2.3.3.3. COB LED

A COB megnevezés az angol Chips on Board szavakból ered. Több Power LED chip kerül egy tokba, így alkotva egy modult. A modul általában egy alumínium hordozóra van szerelve, melyen a hőelosztás viszonylag egyenletes, így egy ugyanakkora teljesítményű Power LED-hez hasonlítva hatékonyabb hőátadás valósítható meg; továbbá a

nagyobb világítófelület miatt belenézve kevésbé vakít, ami építészeti felhasználás során előnyös.

Fényereje, fényhasznosítása a normál kivitelű Power LED-ek hasonló, ára azonban többszöröse, valamint a nagy felületű fényforrás hátrányos is lehet optikai rendszerek tervezése során.

2.3.4. A kereskedelmi forgalomban kapható legelterjedtebb Power LED-ek

A LED technológiára igen nagy ütemű fejlődés jellemző, és nincs ez másként a PLED-ek esetében sem. Bár az OMI OPTIKA Mérnökiroda Kft. egyazon gyártó termékeit használja egyéb termékeihez évek óta, a piac folytonos változása miatt azonban érdemes áttekinteni a jelenleg kapható LED-eket, és azok tulajdonságait összevetve kiválasztani a vetítő rendszerhez legmegfelelőbbet. Mivel ipari körülmények között működtetett termékről van szó, és a megbízhatóság kiemelt fontosságú, így ismert gyártók termékeit tekintettem át.

Az élettartam mellett kiemelt fontosságú tulajdonság a megfelelő fényerő illetve fényhasznosítás. Nagy teljesítményű LED-eket chip formában igen sokfélét találhatunk. Ezekhez szükség lenne nyomtatott áramkör tervezésére és gyártására, valamint a chip beültetésére. A dolgozat keretében azonban olyan terméket kell tervezni, ami kis szériában is költséghatékonyan gyártható, így kereskedelmi forgalomban kapható, nyomtatott áramkörbe ültetett LED-et kell keresni.



8. ábra: COB LED

A vetítőrendszer korábban meghatározott átmérője 30 mm, így a PLED-nek is bele kell férnie ebbe a méretbe. A mechanikai szerkezet és az optikai modell változása nélkül szeretnénk többféle hullámhosszú terméket gyártani, így a keresett fényforrásnak egységes fizikai elrendezés mellett többféle hullámhosszú kivitelben kell elérhetőnek lennie. Az alábbi gyártók kínálnak az elvárásoknak megfelelő terméket:

- Luxeon,
- Cree,

- Nichia.

Az összehasonlíthatóság érdekében semleges fehér fényű (~4100 K korrelált színhőmérsékletű) változatok tulajdonságait vetettem össze, azonban mindegyik vizsgált termékből léteznek egyéb hullámhosszú kivitelek is. Az adatlapokon többféle meghajtó áram mellett jellemző érték is megtalálható, én a 700 mA-en mért adatokat vetem össze. (4. táblázat) Az Optika Mérnökiroda Kft. egyéb LED Spot családba tartozó termékei, illetve a cég által gyártott LED Spot tápegységek is 700 mA-esek, a dolgozat célja pedig egy ebbe a portfólióba illeszkedő termék tervezése, így kritérium, hogy a kiválasztott termék 700 mA-es áramgenerátoros tápegységről működtethető legyen.

	Lumileds Luxeon Rebel ES	Cree XLamp XB-D	Nichia NVSL219
Fényhasznosítás	77	70	94
Elérhető hullámhosszok	8 féle	5 féle	2 féle
Ár	1200 Ft/db	1,5 eur/db	5 eur/db
Elérhetőség	Magyarországon kapható darabonként	külföldi forrásból elérhető min. 10 db esetén	külföldi forrásból elérhető min. 10 db esetén

4. táblázat: néhány elterjedt LED típus és jellemzőik

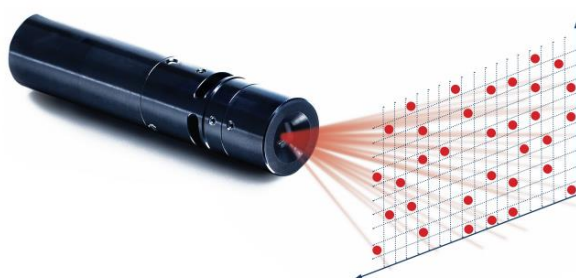
Az OMI OPTIKA Mérnökiroda Kft. várhatóan kis tételben fogja gyártani a LED-es ábravetítőt. Ezért igen fontos kritérium, hogy a kiválasztott fényforrás kis darabszámában is rendelhető legyen, lehetőleg minél rövidebb szállítási idővel, hiszen a megrendelő elvárja, hogy a termék legfeljebb néhány héten belül megérkezzen hozzá. A táblázat elérhetőség sorában ezt a feltételt értékelem.

2.4. A termék létjogosultsága – digitális projektoros, fix ábrájú lézeres és LED-es ábravetítők összevetése az alkalmazás szempontjából

Felmerülhet a kérdés, hogy a digitális DLP projektorok egyre javuló felbontása, és a lézerek folyamatosan csökkenő mérete és ára mellett miért van szükség a dolgozatban tervezendő LED-es ábravetítő rendszerre.

A digitális projektorok legelőnyösebb tulajdonsága, hogy dinamikusan változó, színes ábra kivetítésére képesek.

Rendszeres karbantartásra szorulnak, ipari környezetben az otthoni felhasználásra szánt termékek nem alkalmazhatóak, a folyamatos üzemelés és porosodás miatt. Az ipari projektorok ára pedig igen magas, 3-4 ezer eurós nagyságrendbe esik. Fényerejük a világítóegység típusától függ: a xenon ívlámpák akár 10000 lumenesek is lehetnek, élettartamuk azonban kb. 500-1000 óra. Ezzel szemben a LED-es fényforrással szerelt projektorok élettartama akár 10000 óra lehet, fényerejük azonban kisebb, kb. 1000-2000 lm. A világítóegység cseréje jelentős költségekkel jár mindegyik fényforrás esetében. Méretük és súlyuk miatt rögzítésük bonyolult. Az említett árkategóriában a felbontásuk maximum 1920x1080 pixel, ami a ma már gyakran használatos 5 vagy akár 10 megapixeles kamerák mellett nem mindig elegendő.



9. ábra: lézeres ábravetítő

A lézeres ábravetítők kis méretük ellenére igen nagy fényerővel bírnak, élettartamuk a LED-es vetítőkhez hasonló, akár 10000-20000 óra is lehet. Fényforrásuk egy félvezető lézer. Statikus ábra kivetítésére alkalmasak. Az ábra forrása egy diffrakciós rács. Ennek szerszámköltsége igen magas, így bár a szabványos minták olcsón elérhetőek, az egyedi kis szériás előállításuk jelentős költségekkel járhat. A lézer szabályozása, ezáltal a túlmelegedés elkerülése a kimenő fénymennyiség alapján történik. Többnyire egy fotodióda található az eszközben a lézerdióda mellett, melynek jele alapján a megfelelő áramkörrel állandó értéken tartható a kimeneti teljesítmény.

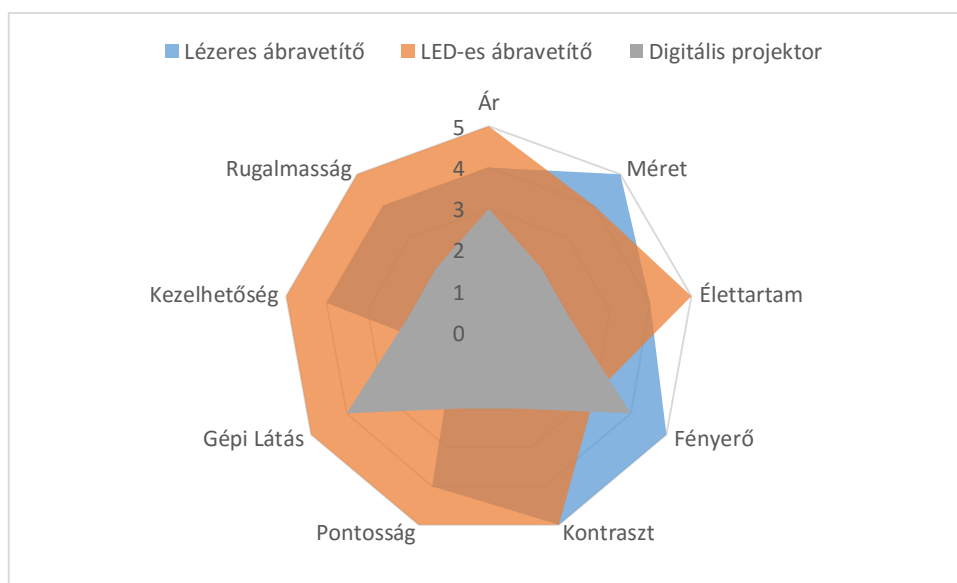
Az általuk kibocsátott fény monokromatikus, ebből adódó jelenség a szemcsésedés (speckling). A több azonos frekvenciájú, de különböző fázisú és amplitúdójú hullámfront interferenciájából adódó jelenség egy képen olyan foltot képez, melynek az intenzitása pixelről pixelre változó, nagyban megnehezítve a vetített sávok felismerését, így digitális képfeldolgozásra nem célszerű az alkalmazásuk. Az ipari kivitelű termékek ára 300-600 EUR/db körüli.

A LED fényforrással szerelt ábravetítők élettartama a lézerekhez hasonlóan igen hosszú, akár több tízezer óra. Többnyire nagy teljesítményű LED található ezekben a termékekben, melyek nyitóárama 500 – 1000 mA körüli. Az áramot az 2.3.3.2 fejezetben leírtak alapján állandó értéken kell tartani, ehhez egy külön elektronikára van szükség, mely vagy be van építve és 12-24 VDC bemenetről működtethető így az ábravetítő; vagy külső tápegységként megvásárolható, és a termék áramgenerátoros bemenetet igényel.

A LED-es ábravetítők különösebb karbantartást nem igényelnek. Méretük a lézerekhez hasonló nagyságrendű, a digitális projektoroknál jelentősen kisebbek, átlagosan átm. 70 x 200 mm alatti tartományba esnek. A vetített ábra többnyire fotolitográfiával készül. Ezzel az eljárással akár mikrométeres pontosságú ábra is gyártható, így a vetítés akár több százszoros nagyítása esetén is igen pontos, a vetített kép távolságától függően tized milliméteres élátmenet is elérhető, mely jelentősen javítja a digitális képfeldolgozás pontosságát. A kibocsátott fény sem monokromatikus, így szemcsésedés sem lép fel. Felépítésük robusztus, az ipari körülményeknek ellenálló. A viszonylag olcsón cserélhető C-menetes objektívek segítségével a nagyítás könnyen változtatható, így a munkatávolság és a vetített ábra nagysága néhány centimétertől több méterig alakítható, a határt a vetítőobjektívek tulajdonságai szabják meg.

A LED-es ábravetítők fogyasztói ára 500-1000 EUR/db körüli, a következő fejezetben néhány konkrét gyártó termékeit vetem össze.

Az előnyöket és hátrányokat a könnyű áttekinthetőség érdekében a 10. ábra összefoglalom. A kontrasztot az ábra mintázattal rendelkező, illetve mintázat nélküli részei világosságának aránya határozza meg. A vetített ábra kamerás vizsgálatokhoz történő felhasználhatóságát a „Gépi látás” sor mutatja, összegezve a felbontást, fényerőt és szemcsésedést. A „Rugalmasság” sorban az ábra cserélhetőségét és a vetítési tulajdonságok változtathatóságát vetem össze. Az egyes tényezőket 1-5-ig terjedő skálán értékelem, az egyes tulajdonságokban a felhasználás céljából legelőnyösebb termékek kapnak 5-ös értékelést (10. ábra).



10. ábra: az egyes vetítők összehasonlítása legfontosabb tulajdonságaik alapján

Az összevetés alapján megállapítható, hogy bár fényerejük a LED-es ábravetítőknek a legkisebb, pontosságuk és kontrasztjuk jobb, mint a lézeres és digitális projektoroknak. Robusztus kivitelüknek, hosszú élettartamuknak és egyszerű kezelhetőségüknek

köszönhetően kiváló alternatívát nyújtanak a digitális projektorokhoz képest, a szemcsementes vetített ábrának köszönhetően pedig sokkal jobban használhatóak kamerás vizsgálatokhoz, mint a lézeres ábravetítők.

2.5. Kereskedelmi forgalomban kapható ábravetítők és jellemzőik

A dolgozatban tervezendő terméknek léteznek alternatívái, azonban a kereslet nagy a kínálathoz képest, az OMI OPTIKA Kft. is több megkeresést kapott az utóbbi években a témában. Érdekes a konkurens termékek tulajdonságait megvizsgálni, és saját termékünket úgy alakítani, hogy versenyképes legyen. A külföldi gyártók egyéb termékeit összevetve a saját termékeinkkel megállapítható, hogy valószínűleg a fogyasztói árban tudunk jóval kedvezőbbet nyújtani.

Az egyik legismertebb ipari megvilágítót gyártó cég a rochesteri székhelyű Advanced Illumination. Termékpalettájukon található LED-es ábravetítő, cserélhető objektíves kivitelben.

A vetített ábra és az objektív katalógusból választható, 5 fajta szálkeresztet és 4 objektívet kínálnak, azonban bármely legalább 2/3"-es, C-menetes objektívvel működőképes a termék. Négy féle hullámhosszal érhető el: 455 nm, 530 nm, 625 nm és fehér színben. A vetítő átm. 30 mm x 73 mm méretű, rögzítéséhez egy külön gyűrűre van szükség, ami a mechanikai méretet jelentősen növeli. A meghajtó elektronika azonban a házba van építve, így nincs szükség különálló áramgenerátoros tápegységre. A beépített egység többféle lehet: létezik szabályozható, triggerelhető, illetve fix kivitel is.

A különféle tulajdonságok kombinálhatóak, katalógusból választhatóak. Az élettartam az adatlap alapján 50 000 óra, folyamatos üzemben működtetve. Vetítőobjektív nélküli fogyasztói ára 695 USD/db.

Az olasz Opto Engineering is kínál LED-es ábravetítőket LTPRHP3W típusjelöléssel, 460 nm, 520 nm, 630 nm hullámhosszal, illetve fehér színnel is. Az általuk használt LED nyitóárama 700 mA, a termék azonban 12-24 V közötti feszültséggel üzemeltethető, tehát az áramgenerátor ebbe a termékbe is be van építve. Az elektronika szabályozható, a világító hátlapján található potméter segítségével beállítható a kívánt fényerő. A cég ajánl saját C-menetes objektíveket a vetítéshez, azonban elvileg bármely legalább 2/3"-es objektívvel használható.



11. ábra: Opto Engineering LED-es ábravetítő

Ebben a termékben a vetített ábra a felhasználó által változtatható, az ábrák cseréjéhez részletes leírást mellékel a gyártó. Az egyes ábrák katalógusból utánrendelhetők, mintegy 20 közül lehet választani, melyek fotolitográfiával vagy lézergravírozással készülnek. A gyártó továbbá a fényforrások cseréjét is lehetővé tette, a már említett hullámhosszakkal kínál LED modulokat, melyek a felhasználó által cserélhetők, a termék tehát könnyen feladatra szabható, vagy adott esetben a vásárlás után könnyen változtatható.

A termék dönthető ábrával és fókuszálható kondenzor lencsével rendelkező kivitelben is elérhető. A dönthető ábra segítségével akkor is geometriailag helyes vetített képet lehet elérni, ha a vetítő nem merőleges a vetítőfelületre. A fókuszálható kondenzorlencse segítségével a kivetített ábra minősége javítható. A különféle C-menetes objektívek egyes tulajdonságaikban különböznek, így - bár fix kondenzoroptikával is jó minőségű kép érhető el – fókuszálással tovább növelhető a homogenitás és a fényerő.

A fix lencsés kivitel fogyasztói ára 360 EUR/db, a dönthető és fókuszálható verzió pedig 993 EUR/db. Az ábra ára 90 EUR/db.

A Metaphase Lighting Technologies is Egyesült Államokbeli székhelyű cég, HP-LPP LED ábravetítőjük 24 V-os tápegységgel üzemeltethető, a fényerő 0-10 V közötti jellel. Opcionálisan potméteres kivitelben is rendelhető. 9-féle hullámhosszt kínál a gyártó, köztük ultraibolya (365 nm, 395 nm) és infravörös (850 nm, 880 nm) tartományba esőkkel is.

Az adatlap 75000 óra élettartamot, és 350 lm fényáramot ígér. Ez azonban nagyban függ a LED hullámhosszától, így ezt az általános információt feltétellel kell kezelni. A termékről igen részletes műszaki rajz található a cég honlapján, melyből kiderül, hogy az ábra kivilágításához egy kéttagú lencserendszert használnak. A termék 102 mm x átm. 51 mm méretű, rögzítése M30 menettel és két anyával lehetséges. Az ábra a felhasználó által is cserélhető, a leírás alapján pedig minden legalább 2/3"-es érzékelőt kirajzoló objektívvel használható.

A Smart Vision Lights cég SXP30 ábravetítője 100000 óra élettartamot ígér. Az áramgenerátor ebbe a termékbe is be van építve, így nincs szükség külső tápegységre, 24 V-ról közvetlenül üzemeltethető. A fényerőszabályzás a Metaphase világítóhoz ha-

sonlóan 0-10 V analóg bemenettel lehetséges. A vetítő villogó üzemmódba is kapcsolható, a megfelelő bementre 3 V vagy nagyobb feszültséget kapcsolva. A bekapcsolt állapotról, illetve az üzemmódról a hátoldalon található LED ad visszajelzést.

A termék érdekessége, hogy a fényforrás egy 9 mm² területű LED, a gyártó állítása szerint így 9x nagyobb fényerőt érnek el a megszokott 1 mm² világítófelületű LED-ekkel gyártott ábravetítőkhöz képest. A fényáramra vonatkozó adatot azonban nem tüntet fel a gyártó.

A többi konkurens termékhez hasonlóan legalább 2/3"-et kirajzoló objektívekkel használható, a gyártónak saját objektívjei nincsenek. A vetítő mérete átm. 71 mm x 127 mm, a rögzítés M30 meneten található két anyával lehetséges, valamint a gyártó külön megvásárolható alkatrészeket is kínál a rögzítéshez, többféle anyagból és kivitelben. A gyártó honlapjától .step formátumú 3D modell is elérhető. A termék fogyasztói ára 950 EUR/db.

3. Az ábravetítő rendszer tervezése

3.1. A szerkezet elvi felépítése

A korábban specifikáltak alapján (2.1 fejezet) az alábbi részekre bontható tehát szét az ábravetítő rendszer:

- fényforrás,
- a fényforrás fényét begyűjtő elem, amely az ábra megfelelő megvilágítását biztosítja,
- vetítendő ábra,
- az ábra kivetítését, azaz nagyítását végző elem.

A cél, hogy a fényforrás fényáramának minél nagyobb részét hasznosítsa a rendszer, azaz a LED vetítőrendszer kimenő fényárama közelítse a fényforrásét. Mindezt úgy kell megvalósítani, hogy a fényforrás sugárzási karakterisztikája ne jelenjen meg a kivetített ábrán, azaz a kapott kép homogén, foltmentes, torzításmentes, valamint éles is legyen.

A 2.1. fejezben már tárgyalt analógia alapján érdemes megvizsgálni a mikroszkópokban alkalmazott konkrét műszaki megoldásokat. Az ábra (mikroszkópok esetében a tárgylemez) megvilágítása terén alapvetően két elvről beszélhetünk: kritikus (Nelsoni) és Köhler. [7]

3.1.1. Kritikus megvilágítás

A kritikus megvilágítást Edward Nelson alkalmazta először a 19. században, és még napjainkban is alkalmazott megoldás olyan esetekben, ahol csak szabad szemmel történik a vizsgálat, illetve fontos az alacsony ár. Fénykorát az 1930-as, '40-es években élte. A fényforrást egy kondenzor képezi le a tárgysíkra, annak a képe tehát megjelenik a vizsgált tárgyon, ebből adódóan a látómező kivilágítása nem egyenletes, inhomogén. A homogenitás javítása érdekében egy diffúz elemet szoktak a fényútba helyezni, ami lehet egy opál síküveg, vagy akár a kondenzorlencse felülete is lehet matt. Ez a megoldás azonban jelentős fényerő csökkenéssel jár, ezért célszerű inkább olyan fényforrást választani, mely világítófelülete homogén. Ilyen lehet egy olajlámpa lángja, vagy a természetes napfény. További hátrány, hogy a tárgyat egy erősen konvergens nyaláb világítja meg, ami csillogást (glare) eredményezhet, csökkentve ezáltal a kontrasztot. Saját rendszerünkben ez a megvilágítás nem használható fel, hiszen nem létezik jelenleg olyan fényforrás, mely megfelelő mérettel és homogenitással rendelkezik ahhoz, hogy egy 2/3"-es érzékelővel megegyező méretű ábrát az előzetes elvárásainknak megfelelően ki tudjon világítani. A COB LED-ek bár megfelelőnek tűnhetnek, a sok elemi LED chip azonban ebben az esetben is jelentős inhomogenitást okozhat. [17]

3.1.2. Köhler-megvilágítás

A Köhler megvilágítást 1893-ban dolgozta ki August Köhler, német fizikus, és a Zeitschrift für Wissenschaftliche Mikroskopie folyóiratban publikálta, a nelsoni világítás alternatívájaként. A megvilágítási módszer jelentőségét csak néhány évvel később fedezték fel, amikor találmánya alapján Köhlernek állást ajánlott a Carl Zeiss cég. A megvilágítás igen sok pozitív tulajdonsággal rendelkezik a kritikus megvilágítással szemben.:

- homogén megvilágítást eredményez,
- a látómező mérete és a fényerő külön szabályozható,
- a megvilágított felület mérete szabályozhatóságának köszönhetően a kép csillogásmentes, kontrasztosabb,
- a tárgy minden egyes pontján áthalad a fényforrásnak a kondenzor által leképezett minden egyes sugara.

A rendszer közelíti továbbá az ideális megvilágításra vonatkozó, 2.2 fejezetben már leírt elvi feltételeket.

Az ábravetítő rendszerben a tárgy mérete fixnek tekinthető, így a csillogásra és kontrasztra vonatkozó előnyök, illetve szabályozhatóság nem releváns, hiszen a megvilágító sugárkúp mérete az adott méretre korrigálható, szabályozásra nincs szükség, viszont a nagyfokú homogenitás elengedhetetlen.

A klasszikus Köhler-féle mikroszkóp megvilágítás elemei:

- fényforrás,
- kollektor lencse,
- kondenzor lencse.

A fényforrást a kollektor lencse fókuszálja a kondenzorlencse első fókuszsíkjába képezi le. Közvetlenül a kollektor lencse előtt helyezkedik el a mezőrekesz, ami a látómező átmérőjét határoolja. A kondenzor első fókuszsíkjában helyezkedik el az apertúra rekesz, amivel a fényerő szabályozása lehetséges a látómező méretének változtatása nélkül. Az apertúrarekesz változtatásával a megvilágító sugarak apertúrája is változik. Az által, hogy a kondenzor első fókuszsíkjában kerül a fényforrás képe, a kondenzor végtelenbe képezi le azt, így, mivel az objektív belépőpupillája is a végtelenben van, a fényforrás képe nem jelenik meg a képsíkban ezáltal a homogenitást a tárgysíkban kevésbé befolyásolja.

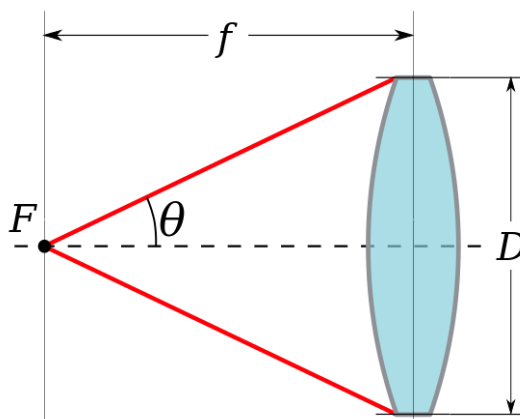
Célszerű áttekinteni, hogy a mai technológia mellett, kereskedelmi forgalomban kapható alkatrészekből felépítve, hogy lehet megvalósítani a tervezendő LED vetítő-rendszerben Köhler-megvilágítást. Ahhoz, hogy az optikai tervezőprogramban optimalizálni tudjunk, szükséges valamilyen kezdeti állapotot meghatározni.

A LED fényforrás átmérője 2,5 mm. Sugárzási karakterisztikája az 13. ábrán látható. A kondenzorral ennek a LED-nek a fényét kell úgy begyűjteni, hogy az objektívbe minél több hasznos fény jusson, azaz a vetített ábra intenzitása az képsíkban minél nagyobb legyen. Mindezt úgy kell megtenni, hogy a kép igen homogén legyen. Amennyiben a vetítőrendszer numerikus apertúrája megegyező az objektív numerikus apertúrájával, úgy a kondenzor által begyűjtött összes fény felhasználásra kerül, az objektívnek pedig a teljes látómezeje ki lesz világítva. Az ábravetítőrendszer különféle objektívekhez tervezem, az egyes objektívek numerikus apertúrája pedig nem azonos. A numerikus apertúra definíciója az alábbi: [18]

$$NA = n' \cdot \sin \theta, \quad (3.1)$$

ahol n' a közeg törésmutatója,

θ pedig a 12. ábra szerint értelmezhető.



12. ábra: egy lencse numerikus apertúrájának értelmezése. D a lencse átmérője, f a fókusz távolsága, F a lencse fókuszpontja.

Azaz a numerikus apertúra egy optikai rendszer fénygyűjtő képességének tekinthető. A numerikus apertúra alapján egy optikai rendszer felbontóképességét az Abbe-törvény írja le:

$$d = \frac{0,61 \cdot \lambda}{NA}. \quad (3.2)$$

Ennek a fénymikroszkópok esetében kiemelt szerepe van, hiszen diffrakcióhatárolt, elméleti felbontóképességük 0,2 mikrométer, ehhez pedig igen nagy NA-ra van szükség. Az általam tervezendő LED-es ábravetítőrendszer esetében ennél jóval kisebb felbontás elegendő, és azt a használt objektív numerikus apertúrája határozza meg, így a kondenzor rendszer numerikus apertúráját a várható legnagyobb értékhez célszerű illeszteni.

A kereskedelmi forgalomban kapható C-menetes objektívek numerikus apertúrája nem ismert, ezért értéküket közelítő méréssel határoztam meg. Összesen 6 darab, a vetítőrendszerben potenciálisan használható objektívet vizsgáltam meg, a mért értékeket és az (3.1) képlet alapján számított numerikus apertúra értékeket a 5. táblázat tartalmazza. A tárgy távolsága és az objektív hátsó lencsetagja közötti méret mérhető,

hiszen a C-menetes objektív vállának az érzékelőhöz képesti távolsága fix, így a keresett távolság közvetetten mérhető. A hátsó lencsetag végtelenre állított fókusz esetén helyezkedik el legközelebb az érzékelőhöz, így a méréseket az objektív ezen állapotában végeztem.

Objektív fókusz távolsága	Objektív fényereje [-]	d [mm]	D [mm]	NA [-]
12 mm	1,4	13,8	13,2	0,091
25 mm	1,8	13,8	13,4	0,092
35 mm	1,6	15,4	12,8	0,099
50 mm	1,8	13,3	9,6	0,064
50 mm	2	17,5	14,8	0,130
75 mm	2,5	16,8	12,5	0,105

5. táblázat: különböző fókusz távolságú objektívek numerikus apertúrájának összehasonlítása

Amellett, hogy a fényhasznosítást maximalizáljuk, a kivetített ábrának homogénnek is kell lennie. A klasszikus Köhler megvilágításban a kondenzor a fényforrás kollektor által leképezett képét az objektív belépő pupillájába képezi le, így a fényforrás karakterisztikájától függetlenül igen nagyfokú homogenitás érhető el. [19]

A belépő pupilla az apertúra rekeszről a rekesz és a megfigyelő közt elhelyezkedő lencsetagok által alkotott kép. Az apertúra rekesz a kamera objektívek esetében általában a természetes rekeszhelyen van. Így az apertúra méretének változtatásával a képméret nem változik, csak a fényerő. Értelemszerűen, amennyiben a fényforrást a belépő pupillába képezi le a kondenzor, úgy annak a képe a természetes rekeszhelyre kerül, így az objektív által vetített képen nem jelenik meg. (A belépő pupilla, az apertúra rekesz és a kilépő pupilla egymás konjugáltjai.) [7]

A LED vetítő rendszernek többféle objektívvel is használhatónak kell lennie, így meg kell vizsgálni, hogy azok belépő pupillái hol helyezkednek el. Ezeket az adatokat azonban a gyártók honlapján, vagy adatlapokban nem lehet megtalálni. Több gyártót is megkerestem a kérdéssel, egyedül a kínai Azure válaszolt: három objektívük ún. black box modelljét küldték el. Ezeket a fájlokat Zemax optikai tervezőprogrammal megnyitva kiolvashatóak a rendszer főbb jellemzői, így a kilépő pupilla pozíciója és mérete is. A 6. táblázat az objektív vállától mérve tartalmazza a black box modellekben szereplő belépő pupilla pozíciókat.

Megnevezés	Belépő pupilla pozíció [mm]
Azure 16mm	10
Azure 35mm	43
Azure 50mm	51

6. táblázat: Azure objektív belépő pupillájának pozíciója

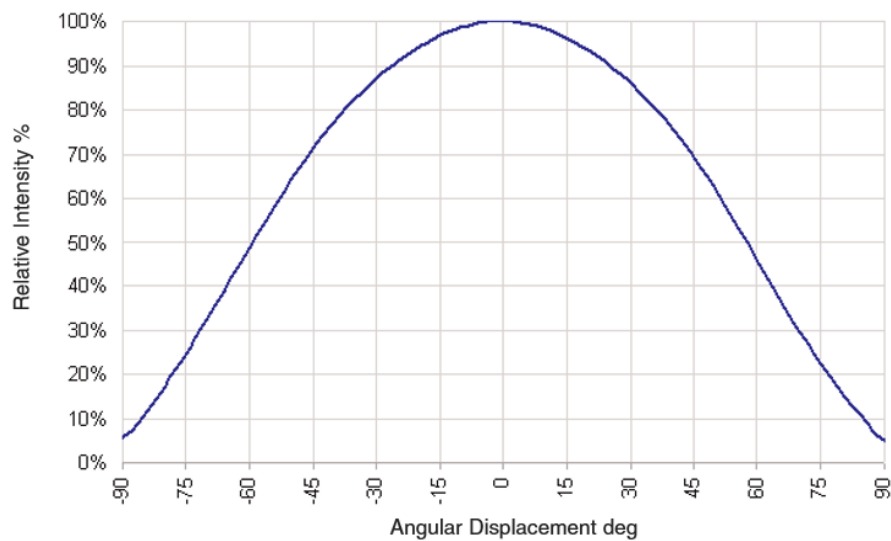
A LED vetítőrendszernek azonban más gyártók objektíveivel is használhatónak kell lennie, azok KP-jának pozícióját méréssel határoztam meg. Az objektívbe belenézve, rekeszértékét f5.6-ra csökkentve, jól láthatóvá válik belépőpupilla. A mért értékeket az 7. táblázat tartalmazza, a BP érték a belépő pupillának (azaz a rekesz képének) az objektív vállától mért távolsága.

Objektív típusa	Mért BP [mm]
Computar 12 mm	38
Computar 25 mm	27
Pictron 35 mm	33
Computar 50 mm	18
Pictron 50 mm	28
Pictron 75 mm	18

7. táblázat: különböző objektívek belépőpupilláinak pozíciója

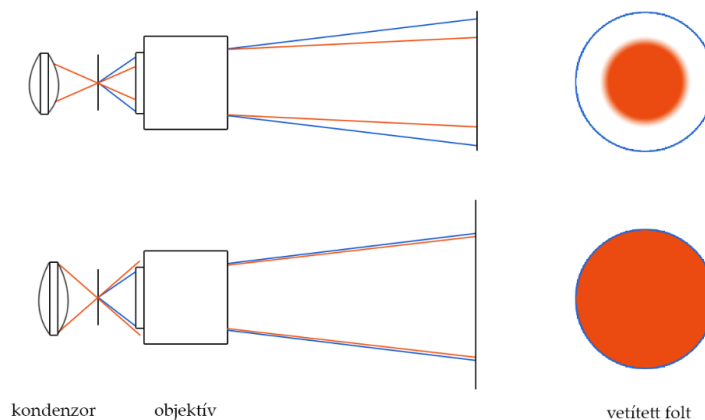
A mért értékekből látható, hogy a pupilla pozíciók igen változatosak a különböző gyártók különböző fókustávolságú objektívjei esetében. Olyan rendszert tervezni nem lehet, amely egyszerre mindegyik objektív belépő pupillájába leképezi a fényforrást. Látható, hogy kompromisszumos megoldást kell keresni. Nem tökéletes, de megfelelő megoldást adhat, ha a kondenzor a fényforrást kvázi végtelenbe képezi le, így bármely objektív esetében a képsíktól igen távol lesz a fényforrás képe. Így várhatóan elégséges homogenitás érhető el, azonban optikai tervezőprogrammal optimalizálható az eredmény.

A homogenitás mellett cél, hogy a LED fényárama minél nagyobb százalékban hasznosuljon. A LED fényforrás sugárzási karakterisztikája az 13. ábra látható. Ahhoz, hogy a kollektor minél több fényt tudjon begyűjteni, a LED-hez minél közelebb kell helyezni, és minél nagyobb átmérővel kell bírnia, „lefedve” így a sugárzási tartományt. A dolgozat célja, hogy a kollektor és kondenzor feladatát egy lencsetag lássa el, meg kell tehát vizsgálni, hogy az így elhelyezett lencse numerikus apertúrája hogy viszonyul az objektív numerikus apertúrájához.



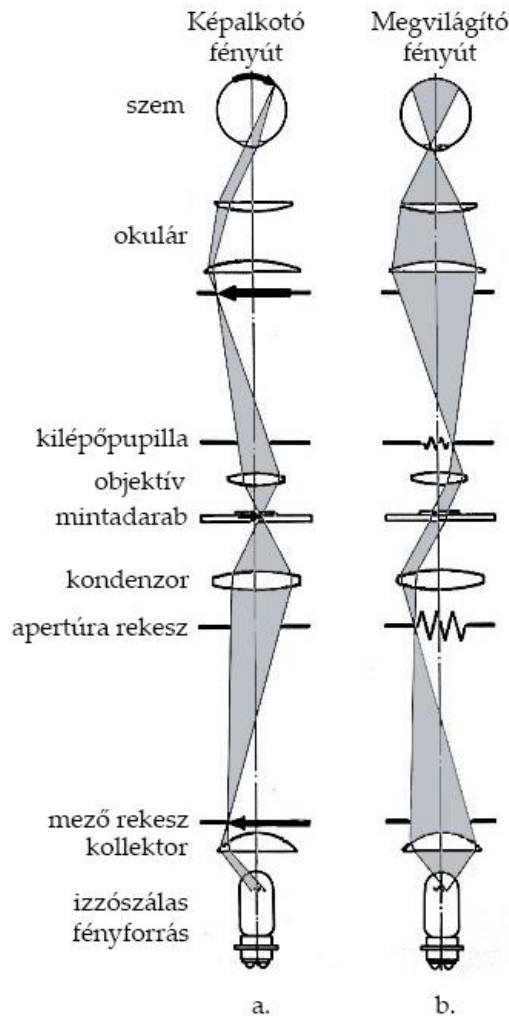
13. ábra: Luxeon Rebel ES LED sugárzási karakterisztikája

Amennyiben a NA-k megegyeznek, úgy a kondenzor által gyűjtött fény teljes egészében hasznosul az objektív által történő vetítés során, és a teljes képmező ki lesz világítva. Ha a fényforrás numerikus apertúrája nagyobb, mint az objektívé, úgy a fény egy része elvesz, de a képmező továbbra is ki lesz világítva. Amennyiben az objektív numerikus apertúrája nagyobb a kondenzor apertúrájánál, abban az esetben a fény hasznosul, azonban a képmező nem lesz kivilágítva, peremsötétedés lesz tapasztalható. Az egyes eseteket az 14. ábra szemlélteti. Kék színnel jelölve az objektív által rajzolható kép nagysága, narancssárgával a kivilágítottság. A felső ábrán látható a peremsötétedés, az alsó ábrán látható, hogy a fény egy része nem jut be az objektívbe, így bár a folt teljes mértékben ki van világítva, veszteséggel jár.



14. ábra: a kondenzor numerikus apertúrája kisebb, mint az objektív numerikus apertúrája (felül); a kondenzor numerikus apertúrája nagyobb, mint az objektív numerikus apertúrája (alul)

Az egyes objektívek numerikus apertúrája különböző. A rendszert úgy kell megtervezni, hogy a legnagyobb NA-val rendelkező objektív esetén se lehessen peremsötétedést tapasztalni. Így a kisebb NA-val rendelkező objektívek is ki lesznek világítva, azonban hatékonyságuk csökkeni fog, azaz fényáramuk kisebb lesz. Ez a hiányosság nagyobb érzékenységű kamerát használva kompenzálható, a peremsötétedés viszont nem megengedhető.



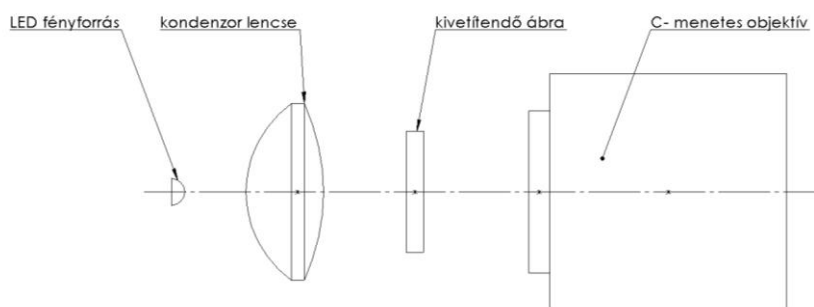
15. a. b. ábra: Köhler-féle megvilágítás sugármenete

Egy mikroszkópban alkalmazott klasszikus Köhler megvilágítás elrendezése látható az 15. a. b. ábra. Megfigyelhető a rendszer kettőssége, a 15.a ábrán mint képkötő rendszer látható a sugármenet, a 15.b ábrán pedig a megvilágító rendszer sugármenete látható. A fényforrás képe láthatóan a kondenzor apertúrájába, így a kilépő pupillába van leképezve, a mintán pedig közel párhuzamosan haladnak át a sugarak.

A rendszernek az így kialakult elvi optikai elrendezése az 16. ábra látható. A fényforrás fényét egy darab kondenzor lencse gyűjti be, illetve világítja meg az ahhoz közel elhelyezkedő ábrát úgy, hogy a fényforrás képe közel a végtelenbe kerüljön, a vetítés pedig az objektív segítségével történik.

3.1.3. Tervezés és szimuláció ZEMAX-szal

Az ábravetítő rendszerben a kollektor és kondenzor lencsét egy lencsével helyettesítem. Mezőrekeszre nincs szükség a rendszerben, mivel az ábra mérete fix, nem kell a megvilágító nyaláb méretét változtatni. Egy kondenzorlencsét alkalmazva, a fényforrást annak fókuszába helyezve közel párhuzamos nyalábokkal világítható meg az ábra, a fényforrás képe pedig közel végtelenben jelenik meg. Az optikai elemek elrendezése a 16. ábra látható.



16. ábra: LED-es ábravetítő elrendezése

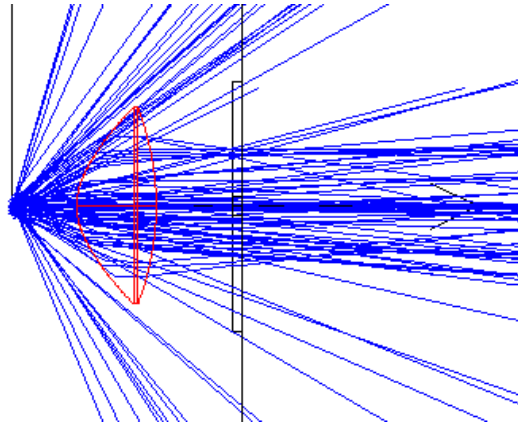
A Zemax egy amerikai optikai tervezőprogram, mely 1990-ben jelent meg először. Egyaránt alkalmas képalkotó és megvilágító rendszerek modellezésére. Az optikai modellezés sugárátvezetés segítségével történik. Egy fényforrásból kiinduló sugarakat az optikai rendszer elemein átvezetve, a fényforrás, illetve az egyes közegek tulajdonságainak ismeretében a rendszer kimenete számítható. Két működési módban használható a szoftver: szekvenciális és nem szekvenciális mód. Szekvenciális módban az egyes elemeken csak az előre meghatározott sorrendben haladhatnak át a fénysugarak, és azoknak minden elemen át is kell haladniuk. A geometriai pozíciót ekkor a szimuláció nem veszi figyelembe. Nem szekvenciális módban nem számít a felületek előre definiált sorrendje, a sugárátvezetés úgy történik, hogy a fénysugár minden olyan felületen megtörik, amelyiken fizikailag áthalad.

Mivel nem szekvenciális módban a szoftver azonban hibaüzenetet ad, amennyiben egy fénysugár irányultsága olyan, hogy az akár csak egy felületen nem haladna át, így az ábravetítő rendszer tervezése csak nem szekvenciális módban történhet. Így a rendszer hatásfoka is modellezhető.

3.1.3.1. Fényforrás

A fényforrás kiválasztását a LED-es ábravetítő rendszerhez elsősorban az elérhetőség határozta meg. Belátható, hogy a Lumileds Luxeon Rebel ES nem minden tulajdonságában a legkiválóbb, azonban az OMI Optika Mérnökiroda Kft. követelményei miatt elengedhetetlen, hogy a fényforrás kis tételben is rövid időn belül beszerezhető legyen.

A fényforrás egy sugárgyűjteménnyel modellezhető, mely sugarak kiindulási pontja, iránya és eloszlása közelít a valós fényforráshoz. A modell pontossága a sugarak számától függ, a pontosság növelésével azonban a számítási kapacitásigény is nő. A kiválasztott Lumileds Luxeon Rebel ES LED modellje a gyártó honlapjáról elérhető, Zemaxba mint fényforrás adatfájl betölthető. Fontos tulajdonsága a modellnek, hogy a fényforrás nem pontszerű, hanem térbeli kiterjedéssel bír. (Azaz a nyalábok más-más pontokból indulnak ki, a LED chip-re öntött optika felületéről kiinduló fénysugarakhoz hasonlóan.) A fényforrás modellje a kondenzorral és az ábrával a 17. ábrán látható.



17. ábra: a fényforrás, a kondenzor (piros színnel), és az ábra az optikai tervezőprogramban, a fényforrásból kiinduló sugarakkal

3.1.3.2. Kondenzor

Kondenzorként egy aszférikus lencsét használunk. Az aszférikus lencse felülete elvileg bármilyen nem gömbi vagy hengeres felület lehet, alakját azonban többnyire az alábbi képlet írja le:

$$z(r) = \frac{r^2}{R(1 + \sqrt{1 - (1 + K)\frac{r^2}{R^2}})} + \alpha_1 r^2 + \alpha_3 r^4 + \alpha_5 r^6 + \dots, \quad (3.3)$$

ahol

z az optikai tengellyel párhuzamos elmozdulás,

az optikai tengelytől mért r távolságban,

az α együtthatók az R és K paraméterekkel meghatározott felületről való eltérést jelentik.

A szoftverben ezek a paraméterek megadhatóak. Érdekes azonban a kereskedelmi forgalomban elérhető lencsék paramétereivel dolgozni, mivel anyagi okok miatt csak szabványos lencsék használhatóak fel. (Egy egyedi gyártású aszférikus lencse szerszámozása nagyságrendekkel meghaladja a projekt költségkeretét.) Az OMI OPTIKA Mérnökiroda Kft. által előnyben részesített cég aszférikus lencséinek adatbázisa honlapjukról elérhető, a szimuláció során tehát ezekkel az értékekkel célszerű dolgozni.

Ezek a katalóguslencsék többnyire rendelkeznek antireflexiós réteggel is. Egy általános üveg-levegő határfelületről átlagosan a fény mintegy 4%-a visszaverődik. (Ez az érték függ többek közt az üveg anyagától, a fény hullámhosszától, a réteg anyagától és a beesési szögtől is.) Megfelelő anyagú és vastagságú bevonattal ez az érték azonban csökkenthető, akár 1% alá.

Egyrétegű bevonat esetében, mennyiben a réteg vastagsága pontosan a fény hullámhosszának $\frac{1}{4}$ -e, a réteg első felületéről illetve hátsó felületéről visszaverődő sugarak kioltják egymást. A rétegvastagság mellett a réteg anyaga is befolyásolja a reflexió mértékét, az ideális törésmutató a közeg és az üveg törésmutatójának mértani közepe:

$$n_1 = \sqrt{n_0 \cdot n_s} \quad (3.4)$$

ahol

n_0 a réteg törésmutatója,

n_s a közeg (általában levegő), n_s az üveg törésmutatója.

3.1.4. A kivetítendő ábra

Az ábra, azaz a tárgy minősége alapvetően meghatározza a kép minőségét. A rajzolatnak élesnek, pontosnak, torzításmentesnek kell lennie. További fontos tényező az ábra ára. A dolgozat célja, hogy az objektív cserélhetősége mellett az ábra is könnyen cserélhető legyen.

Az ábra gyártására több technológia is elterjedt. Ezeket elsősorban áruk és pontosságuk különbözteti meg egymástól.

Az egyik legegyszerűbb eljárás a lézervágás. Egy néhány tizedmilliméter vastagságú lemezből lézer segítségével vágják ki a kívánt ábrát. A megfelelő távtartó segítségével a megfelelő pozícióba helyezhető a lemez. A technológia fő hátránya, hogy nem minden ábra valósítható meg vele, hiszen a lemez szétesne. További hátrány az alapanyag vastagságából adódó kevésbé határozott kontúrvonalak, amik a kivetített ábra pontosságát csökkentik. Előnyei közé tartozik viszont, hogy üveg hordozó nélkül is megvalósítható, így a reflexiós veszteségek elkerülhetőek, továbbá ára igen kedvező, néhány darab esetén is olcsón gyártható.

Precízebb technológia, ha lézerrel vágott stencilt vákumgőzölés során maszkként használják, és ezen a kitakarásen keresztül alumíniumot gőzölnek üveg felületre. A technológiát elsősorban tükrök és optikai vékonyrétegek létrehozásához használják, a tükrőfelület azonban kiváló kitakarásként is szolgál, létrehozva így az ábrát. A kialakítható ábra jellege ebben az esetben is korlátozott, hiszen a lézervágott stencil széteshet, ha struktúrája nem megfelelő kialakítású. Az üveg hordozónak köszönhetően azonban könnyebben kezelhető az ábra, nem deformálódik. A vékonyabb rétegvastagságnak köszönhetően a kontúrvonalak precízebbek.

A legpontosabb eljárás a fotolitográfiával készült ábra. Ekkor az üvegfelületre gőzölt króm réteget fotolitográfiai eljárás segítségével eltávolítják a rajzolatnak megfelelően. Az eljárás pontossága mikrométeres nagyságrendű. Az általánosan elterjedt üvegvastagság, melyet a technológiában alkalmaznak 1,6 mm, így az optikai rendszer tervezése során ezzel az értékkel fogok dolgozni.

Mint minden optikai elem esetében, így az ábra üveg hordozója esetében is jelentősen növelhető a transzmisszió, ha a felületek antireflexiós réteggel vannak ellátva. Azonban még az antireflexiós réteggel ellátott felület is rendelkezik ~1% reflexióval, ami szellemképességet okozhat, ha az ábra az üveg hordozón nem megfelelően van elhelyezve. Amennyiben az objektívtól távolabbi felületen van a mintázat, úgy az objektívhez közelebbi felületen megtörhet, vagy visszaverődhet és a képalkotást negatívan befolyásolhatja. Fontos tehát hogy az ábra mindig az üveg hordozó objektívhez közelebbi felületére kerüljön.

A LED ábravetítőrendszerben használt ábra még fotolitográfiai technológiát használva is jelentősen olcsóbb megoldás, mint például egy lézeres ábravetítőben használt optikai rács előállítási költségei, ami általában több ezer eurós nagyságrendű, szemben a LED-es rendszer ábrájának száz euró alatti költségével.

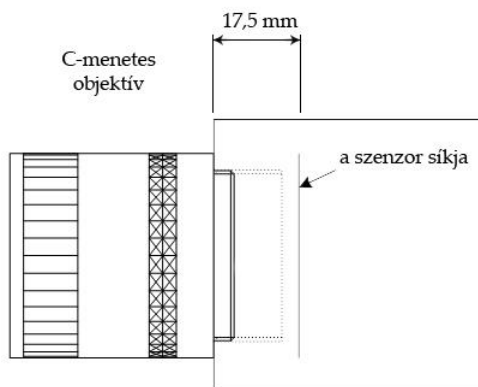
3.1.5. Objektívek

A dolgozat célja, hogy a rendszer bármilyen, 2/3"-es szenzormérethez tervezett C-menetes ipari objektívvel használható legyen. Így igen nagyfokú rugalmasságot ad a felhasználónak, könnyedén feladat-specifikusan beállítható a megvilágítás, továbbá a körülmények változása esetén a fókusztávolság egyszerűen változtatható.

A kínai Azure cégtől hosszú levélváltás után 3 objektív fordított irányultságú modelljét kaptam meg. Azért van szükség fordított modellre, mert a black box modelleket módosítani nem lehet, így megfordítani sem, ami az első lépés a vetítőrendszer felépítésekor, hiszen a fénysugár a kamerák esetében megszokotthoz képest az ellenkező irányból halad át az objektíven, a modellek csak a rendszer (itt: objektív) bemenete és kimenet közti kapcsolatot tartalmazzák, az objektív belső felépítéséről nem árulnak el részleteket.

Nem szekvenciális módba sem lehet áthelyezni a black box modelleket, így a szimulációs felépítésben nem tudtam használni őket, azonban szekvenciális módban megnyitva a pupillákra vonatkozóan több hasznos információt is kaptam, megerősítve azok elhelyezkedésének változatosságát.

Az objektív pozíciója az ábrához képest fix, hiszen a vállnak az érzékelőtől vett távolsága állandó minden C-menetes objektív esetében, így biztosítva, hogy a teljes fókuszálási tartomány kihasználható, azaz éles képet rajzol. A szakirodalom ezt a jellemzőt Flange Distance-nek nevezi, értéke 17,5 mm. (18. ábra)



18. ábra: a Flange Distance értelmezése

Az objektívek cserélhetőségének az tehát a célja, hogy különböző munkatávolságokra különböző méretű mintát vetítsen a rendszer, ugyanazt az ábrát felhasználva. A leggyakoribb fókusz távolságokhoz tartozó vetítési kúpszögeket az 8. táblázat tartalmazza.

Az objektív fókusz távolsága	Vetítési kúpszög
12 mm	49,2°
25 mm	24,8°
35 mm	17,9°
50 mm	12,6°
75 mm	8,4°

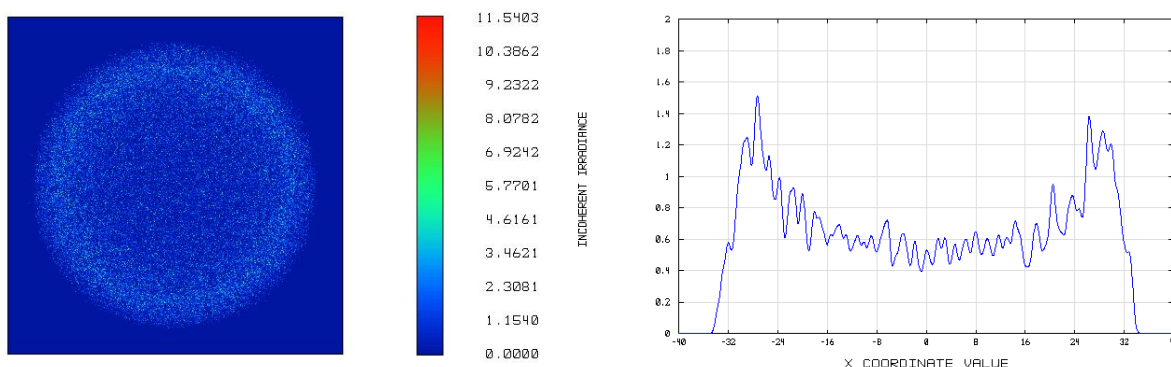
8. táblázat: objektív gyújtótávolságokhoz tartozó vetítési szögek

Az objektívekre, mint minden képalkotó rendszerre különböző leképzési hibák jellemzőek. Az ábravetítő rendszer szempontjából a legjelentősebbek a torzítások, hiszen például 3D-s felületrekonstrukció esetén ez jelentős hibát vihet a rendszerbe. Ez a jelenség azonban kizárólag az objektív hibájából adódik, így a dolgozat keretein belül korrekciójával nem foglalkozom. A felhasználó feladata, hogy saját követelményeit kielégítő objektívet válasszon, vagy korrigálja annak képalkotási hibáját. Látható, hogy a munkatávolságot is az objektív határozza meg.

3.1.6. Az optikai szimuláció eredménye

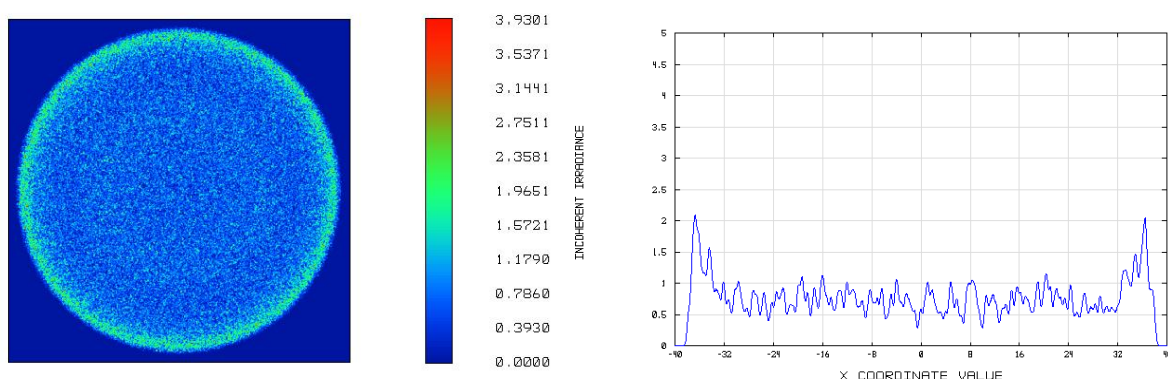
A teljes rendszert Zemaxban felépítve, az egyes elemek tulajdonságait beállítva, az ábravetítő rendszer szimulációja elvégezhető. A hatékonyság mellett elsődleges cél a homogenitás vizsgálata. A szimulációhoz 1 millió sugárral rendelkező LED modellt használtam, a fényforrás névleges teljesítményét 100 W-ra állítottam, a könnyebb számítás érdekében.

Első lépésben egy normál, szférikus lencsét alkalmaztam, melynek fókuszába helyeztem a fényforrást, az ábrát pedig a lencséhez igen közel, így a fényforrás képe egészen biztosan nem jelenik meg az ábrán, a pontos elhelyezkedés pedig az optimalizálással meghatározható. Ezzel a lencsével kapott legjobb eredmény az 19. ábra látható. A rendszer hatásfoka így 28%, homogenitása 38%.

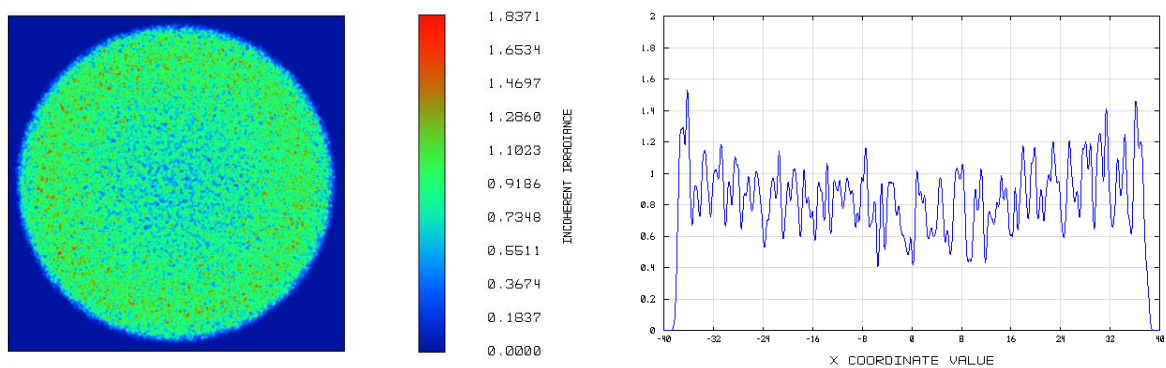


19. ábra: szférikus lencsét felhasználva kapott legjobb eredménye

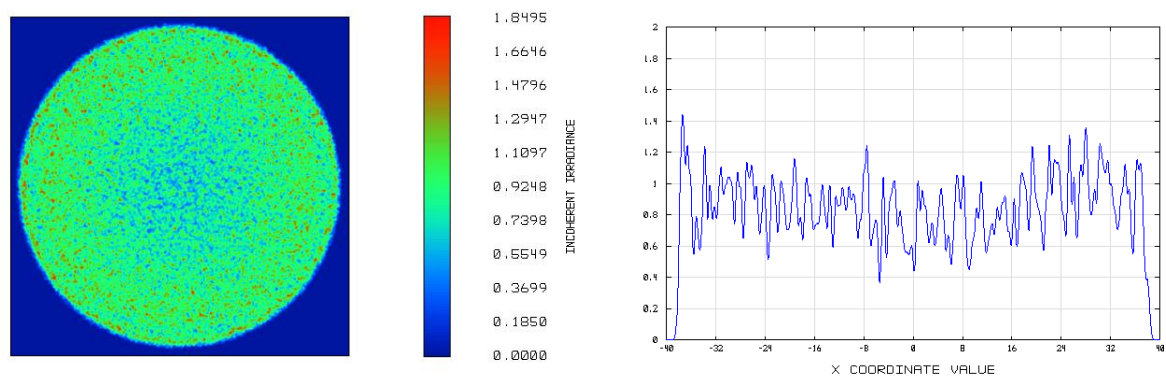
Aszférikus lencsét alkalmazva, optimalizálás után a hatásfok 41%-ra, a homogenitás pedig 62%-ra növelhető. A optimalizálás 3 lépése a 11-13. ábrán látható.



20. ábra: az aszférikus lencsével történő optimalizálás első lépésének eredménye

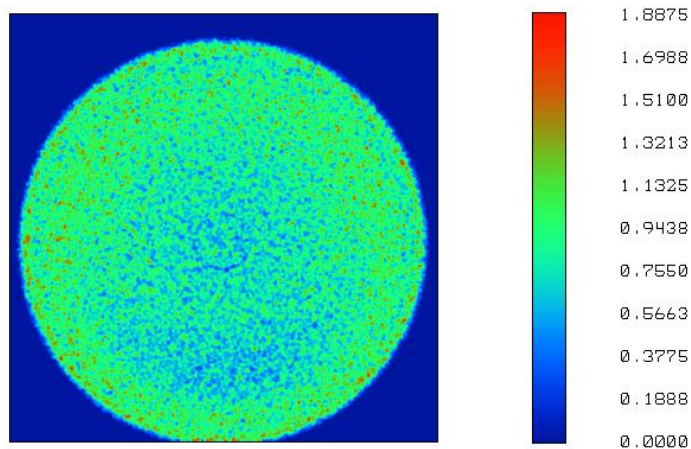


21. ábra: az aszférikus lencsével történő optimalizálás második lépésének eredménye

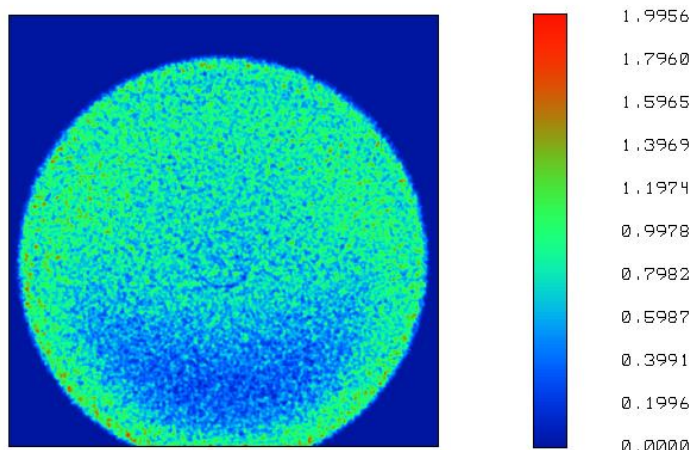


22. ábra: az aszférikus lencsével történő optimalizálás harmadik lépésének eredménye

Megvizsgáltam továbbá, hogy a fényforrás elmozdulása milyen hatással van az optikai rendszerre. Az 23-24. ábrák alapján megállapítható, hogy a rendszer centrikuságára vonatkozóan akár $\pm 0,2$ mm-es tűrés meghatározható, hiszen a homogenitás és hatásfok változása ekkor sem több, mint 5%, a vetítési tengely elmozdulása pedig a felhasználás szempontjából nem jelent problémát.



23. ábra: a fényforrás 0,5 mm-es elmozdulásának várható hatása a vetített ábrán



24. ábra: a fényforrás 0,5 mm-es elmozdulásának várható hatása a vetített ábrán

3.2. Mechanikai felépítés

3.2.1. Tervezési szempontok

3.2.1.1. Felhasználói követelmények, konkurencia

Ipari körülmények közé tervezett eszközök esetén az egyik legfontosabb követelménye a robusztusság, azaz a környezeti hatásoknak való nagyfokú ellenállás. Általánosan elterjedt 0 °C és 85 °C közötti folyamatos működésre alkalmasnak kell lennie a LED-es ábravetítőrendszernek; a fizikai behatásokat, mint leejtést, megütést, karcosítást jobban kell bírnia, mint az otthoni körülmények közé tervezett eszközöknek, továbbá a használatától függő, akár 8-10 éves élettartam során hibamentes működést kell biztosítani. A felhasználó elvárása, hogy a termék univerzálisan és könnyen rögzíthető legyen, a felszerelést követően pedig semmilyen karbantartást ne igényeljen.

A konkurens termékek az 2.5 fejezetben leírtak alapján teljesítik e követelményeket, anyaguk alumínium, rögzítésükhöz többnyire gyűrű-szerű felfogatóelemeket alkalmaznak, élettartamuk több tízezer óra.

3.2.1.2. Optikai elrendezés

A LED chip gyárilag egy kör alakú, 1,5mm vastag alumínium hordozójú nyomtatott áramkörre (továbbiakban: PCB) van ültetve. A szimuláció alapján a fényforrástól 7,2 mm-re helyezkedik el a kondenzorlencse, mely előtt 0,6 mm-re a vetítendő ábra üveg hordozón. Az ábrától 17,5 mm-re helyezkedik el a C-menetes objektív válla.

A cél, hogy a fényforrást tartalmazó alkatrész az OMI OPTIKA Mérnökiroda Kft. korábbi termékeivel kompatibilis legyen, azaz az egyszerűbb ún. OMI LED Spot fényforrás optikai egysége, valamint a LED-es ábravetítő optikai elemei csereszabatosak

legyenek. Így a felhasználó a különböző hullámhosszú fényforrásokat és optikákat, ill. vetítőegységeket egyszerűen cserélni tudja.

Fontos feltétel továbbá, hogy az ábra könnyen hozzáférhető legyen a felhasználó számára. Ezért a mechanikai kialakítást úgy kell megtervezni, hogy minél kevesebb alkatrész eltávolításával, lehetőleg speciális szerszám nélkül ki lehessen cserélni az ábrát.

3.2.2. Hűtéstervezés

A szimuláció célja, hogy az OMI OPTIKA Mérnökiroda által felhasználásra javasolt, korábban már egyszerűbb világítókban alkalmazott alkatrész hőmérsékletviszonyait ellenőrizsem, mivel korábbi számítások, vagy szimulációk nem történtek ezzel a termékkel kapcsolatban.

Ahhoz, hogy a szimuláció helyes eredményt adjon, célszerű áttekinteni a hőcsere folyamatát, mely során egy rendszer belső energiája hő leadása közben csökken, és ezt a hőt egy másik rendszer veszi fel belső energiájának növekedése mellett. A hőátadás három fizikai jelenség útján történik:

- hővezetés
- hőáramlás
- hőszugárzás

Hővezetés szilárd, vagy nyugalomban lévő folyékony vagy légnemű halmazállapotú rendszerek között jön létre, hőmérsékletkülönbség hatására. A hőátadás a belső energia részecskéről részecskére való átadásával történik.

Hőáramlás során a hő közlése a hőt hordozó anyag helyének megváltozásából adódik. Többnyire légnemű és folyékony közegekre jellemző, de hosszútávon a szilárd anyag is hasonlóan viselkedik.

Hőszugárzás az anyag hőmozgása miatt kibocsátott elektromágneses sugárzás. A hővezetés és hőáramlás mellett elhanyagolható nagyságrendű.

Az alkatrészek és a közeg közötti hőátadás felírható a Fourier-törvény síkfalra vonatkozó egyenlete alapján:

$$\dot{Q} = \lambda \cdot F \cdot \frac{t_1 - t_2}{\delta}, \quad (3.5)$$

ahol δ a rétegek között fellépő rész átlagos vastagsága

F az érintkező felület területe

λ a rést kitöltő anyag hővezetési tényezője. [20]

Átrendezve úgy, hogy a hőmérsékletkülönbség kerüljön az egyik oldalra:

$$\dot{Q} \cdot \frac{\delta}{\lambda \cdot F} = t_1 - t_2 \quad (3.6)$$

Az $R = \frac{\delta}{\lambda \cdot F}$ hőellenállás fogalmának bevezetésével a LED-es ábravetítő rendszer egyszerűsített hőtani modellje az Ohm törvény analógiájára felírható:

$$P \cdot R = T_j - T_k, \quad (3.7)$$

ahol P a LED teljesítménye,

T_j és T_k a p-n átmenet valamint a környezet hőmérséklete.

Továbbá

$$R = R_{j-t} + R_{t-PCB} + R_{PCB-h} + R_{h-k}, \quad (3.8)$$

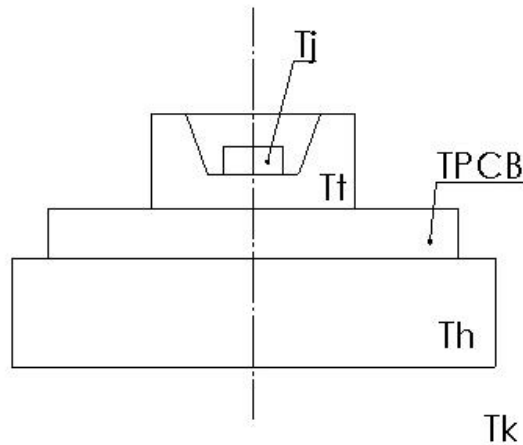
ahol R_{j-t} a p-n átmenet és a tokozás közötti,

R_{t-PCB} a tokozás és PCB közötti,

R_{PCB-h} a PCB és a ház közötti,

R_{h-k} pedig a ház és a környezet közötti hőellenállás értéke.

Az elnevezéseket az 25. ábra egyértelműsíti.



25. ábra A hőtani modellben figyelembe vett komponensek jelölése

A szimulációt egy egyszerűsített modellen végeztem. A chip és a PCB közötti hőellenállás értéke a LED adatlap alapján 10 K/W. A LED teljesítménye 3 W. A PCB és a ház között a jobb hőátvitel érdekében hővezető paszta van, melynek hővezetési tényezője 3 W/mK. A hőellenállás így a PCB és a ház között számítható:

$$R = \frac{L}{k}, \quad (3.9)$$

ahol L a hővezető réteg vastagsága,

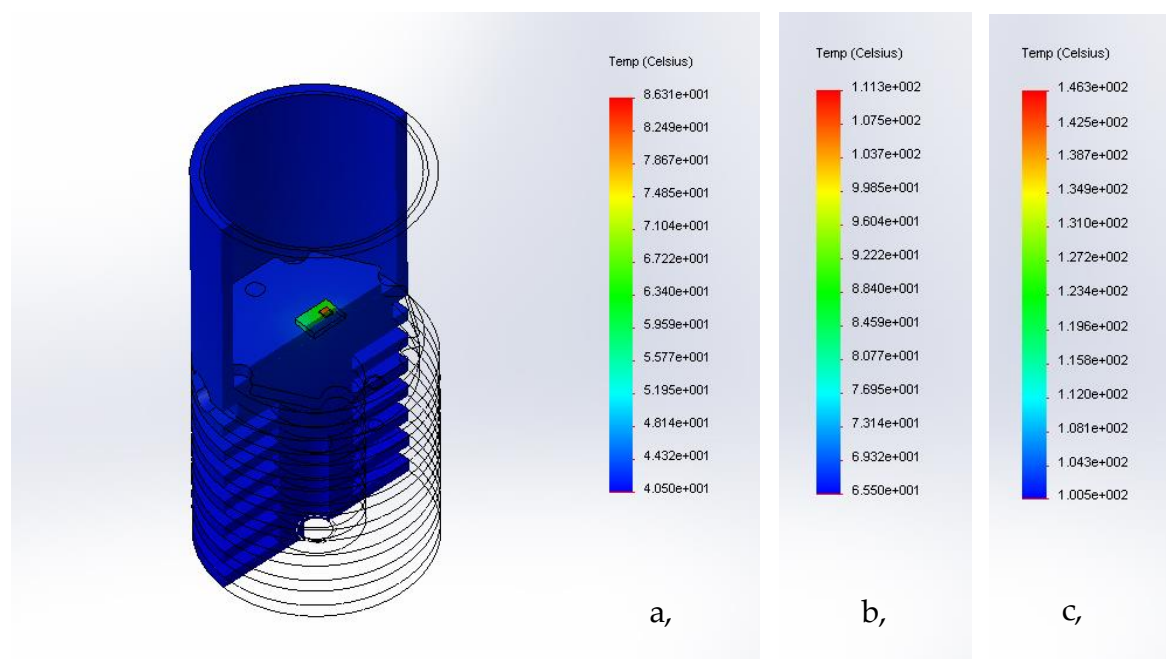
k az anyag hővezető képessége.

A kontaktus hőellenállása így:

$$R = \frac{0,0001 \text{ m}}{3 \text{ W/mK}} = 0,000033 \text{ K/W} \quad (3.10)$$

Az egyszerűsített modell a 26. a, b, c, ábra látható. A szimulációt 25 °C (26. a, b, c, ábra), 50 °C (26. a, b, c, ábra) valamint 85 °C (26. a, b, c, ábra), környezeti hőmérséklet mellett végeztem. A hőátadási tényező a ház és átlagos áramlású levegő között 20 W/m²K.

A chip adatlap szerint megengedett maximális hőmérséklete 150°C. Az ábrák alapján látható, hogy a maximális hőmérséklet 86 °C, 111 °C, valamint 146 °C a különböző környezeti hőmérsékletek esetén. Így elméletileg az autóiipari szabvány szerinti 85 °C környezeti hőmérséklet mellett is tartósan üzemeltethető a LED-es ábravetítő rendszer. A szimulációk alapján megállapítható, hogy az Optika Mérnökiroda Kft. által eddig is alkalmazott konstrukció elegendő hűtőképességgel bír.



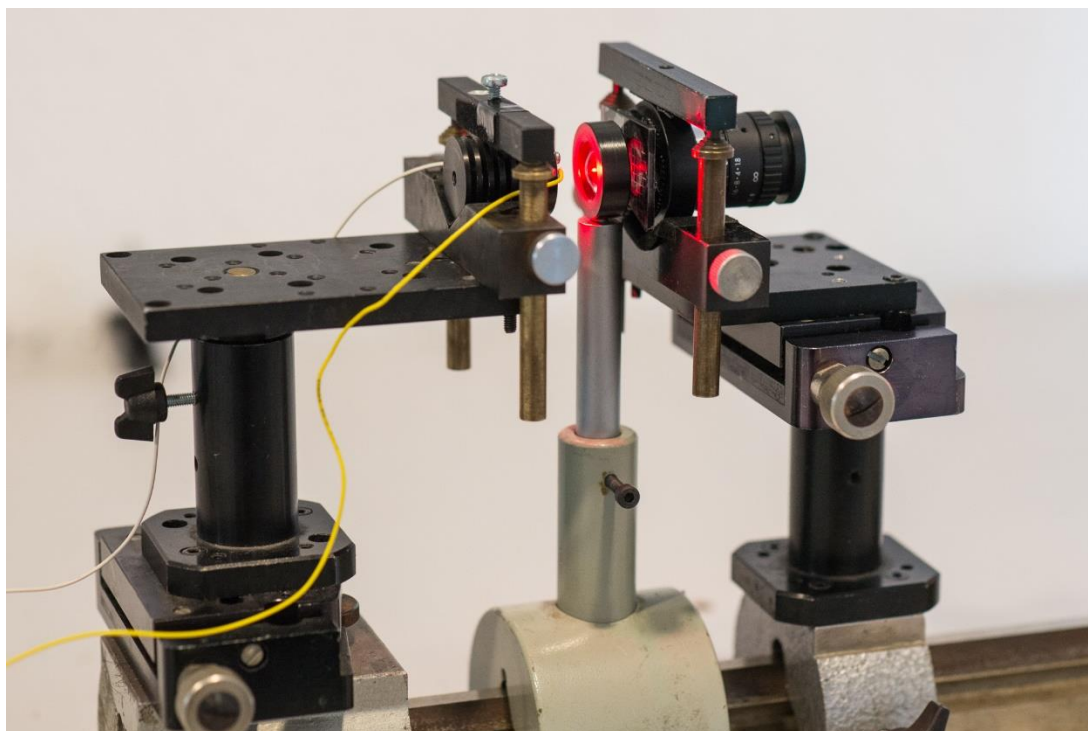
26. a, b, c, ábra: A szimuláció eredménye

3.3. Optimalizálás

Mivel az optikai tervezőprogramban a különféle C-menetes objektívekkel optimalizálásra nincs lehetőség, az ábravetítőrendszer optikai elemeit kézi optimalizálás céljából optikai tesztpadra helyeztem. A LED PCB-t hűtőbordára szerelve, a kondenzorlencsét és az ábrát, valamint a hozzá megfelelő távolságban rögzített objektívet külön-külön állítható orsókra rögzítettem, így pozícionálásuk tizedmilliméteres pontossággal lehetséges. Az elrendezés az 27. ábrán látható.

Az egyes elemek kiindulási állapotaként a Zemaxból kapott eredményeket vettem fel. Az optimalizálást az alkatrészek pozícióját változtatva, az elmozdulás hatását, azaz a vetített ábrát folyamatosan figyelve végeztem. Megállapítható, hogy nincs olyan pozíció, melyen minden objektív minden rekeszérték mellett elégséges homogenitású ábrát vetítsen. Azonban kondenzor, az ábra és az objektív egymáshoz képesti pozícióját rögzítve, a fényforrást ± 2 mm-es tartományban mozgatva azonban az előzetes követelmények teljesíthetők, 12...75 mm-es fókuszú objektívekkel minden rekeszérték

mellett elégséges homogenitású kép kapható. A végleges mechanikai terveket a kézi optimalizálás eredményével egészítettem ki.



27. ábra: A rendszer elemeinek mozgathatóságát biztosító elrendezés

4. A termék gyártása és szerelése

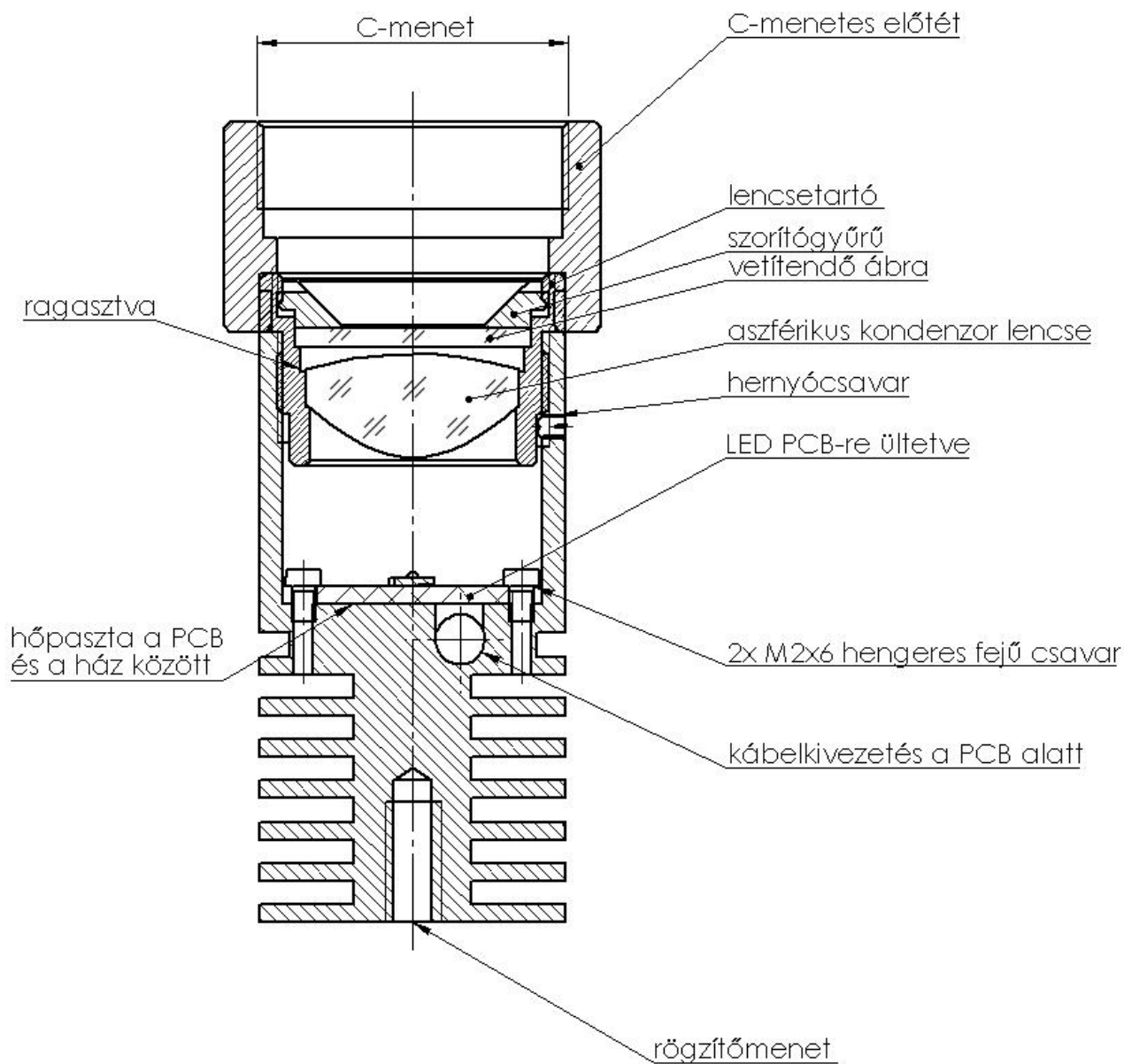
A LED PCB rögzítése két csavarral történik. Fontos, hogy a PCB és a ház közé hővezető paszta kerüljön, ami a megfelelő hővezetést biztosítja. A LED-et tartalmazó házhoz egy köztes alkatrész csatlakozik menetes kapcsolattal, ami a kondenzorlencsét és az ábrát tartalmazza. Így a C-menetes előtét alkatrészt eltávolítva az ábra könnyen hozzáférhető, cserélhető. Az ábra rögzítése szorítógyűrűvel lehetséges, melynek szereléséhez szükséges szerszámot a felhasználó számára mellékeljük, annak segítségével a gyűrű kitekerhető, így az ábra hozzáférhető. A kábel rögzítése ragasztással történik a PCB alatti horonyban.

A cél, hogy összeszerelés után a ház és lencsetartó közti menet ragasztással rögzíthető legyen. Az Araldite-tal történő ragasztás megakadályozza, hogy az objektív, vagy az ábra cseréje során az alkatrész kitekeredjen, ugyanakkor szükség esetén 70 °C fölé hevítve a kötés oldható. Az optimalizálás során azonban kiderült, hogy szükség van mintegy 4 mm finombeállítási lehetőségre, hogy a rendszer minél több kereskedelmi forgalomban kapható objektívvel kompatibilis legyen. A kondenzort és ábrát tartalmazó alkatrésznek tehát mozgathatónak, de rögzíthetőnek is kell lennie, ezt a menetes kapcsolatot meghagyva, világítóház falában hernyócsavart elhelyezve biztosítottam. A hernyócsavar a lencsetartó menet nélküli részét szorítja, így óvva a menetet a csavar által okozott sérüléstől.

A kondenzor lencse rögzítése ragasztással történik. Tisztaszobában, forgóasztalon egyszerűen és olcsón kivitelezhető, kis szériás gyártásban gyakran elterjedt megoldás. A C-menetes előtét az ábra és az objektív megfelelő távolságát, valamint az objektív rögzítését biztosítja.

A kopás és karcolódás, valamint korrózió elkerülése érdekében a termék anodizált bevonattal lett ellátva. Az anodizálás vagy anódos oxidáció (köznyelven: eloxálás) során a megtisztított alumínium ötvözetet anódként híg savba kapcsolják, ekkor vízbontás játszódik le, a fejlődő oxigén reagál az anódként használt fémmel, és felületén porózus réteget hoz létre. Ez a 10-20 µm vastag réteg az előnyös mechanikai tulajdonságok mellett porózus szerkezetének köszönhetően könnyen színezhető, így esztétikai célokat is szolgál.

A terveket SolidWorks 2012-ben készítettem, amik alapján technikus kollégáim gyártották a terméket esztergán, az anodizálást egy külsős cég végezte. A Power LED elhelyezését valamint forrasztását a világítóházban én végeztem.



28. ábra: A LED-es ábravetítő mechanikai felépítése

Mint minden elektromos készülék esetében, a LED-ek esetében is fontos a megfelelő ESD (Electrostatic Discharge, azaz elektrosztatikus kisülés) védelem. A Luxeon Rebel Star LED-ek class 2-es védelemmel vannak ellátva, azaz mintegy 2 kV kisülésig védettek. (A JESD22-A114-E Human Body Model alapján.) Ezeknek a károsodásoknak az a fő veszélye, hogy nem feltétlenül teszik tönkre azonnal a chipet, gyakran csak néhány ezer 1000 óra működés után tapasztalható a hatásuk. Javasolt ezért ESD karkötőt viselve végezni a LED szerelését, forrasztása pedig ESD védelemmel ellátott pákával célszerű. [21]



29. ábra: a LED-es ábrvátító 35 mm-es objektívvel szerelve

A lencse ragasztását célszerű tisztaszobában végezni. Mivel az ábra távolsága csupán néhány milliméter a kondenzor felületétől, ezért a kosz, vagy porszemek szűkebb rekesz (azaz nagyobb mélységelesség) esetén könnyen láthatóvá válhatnak akár a kivetített ábrán is. Értelmszerűen az ábra elhelyezését is úgy kell végezni, hogy közben annak felülete ne szennyeződjön be.



30. ábra: C-előtét (balra) és lencsetartó (jobbra) lézervágott ábrával szerelve

5. Tesztelés

5.1. A tesztelés célja

A tesztelés során megvizsgáltam, hogy az előzetesen definiált követelményeket teljesíti-e a rendszer, illetve van-e szükség optimalizálásra, azaz a konstrukció, vagy az optikai rendszer további változtatására, ideális eredmények elérése érdekében.

A rendszer szempontjából vett kimenet, azaz a kivetített ábra optikai tulajdonságai mellett a hőmérsékletviszonyokat ellenőriztem.

5.2. Tesztfelépítés

A vetített ábra tesztelését optikai tesztpadon végeztem. A teszteket 12, 25, 50 és 75 milliméteres fókusztávolságú objektívekkel végeztem, a képet egy homogén fehér tesztfelületre vetítettem. A kivetített ábra homogenitását, valamint fényerejét értékeltem.

A különböző objektívekkel végzett tesztek mellett a LED fényforrás elmozdulásának hatását is vizsgáltam. A kivetített ábráról egy állványra helyezett Nikon D600 tükörreflexes fényképezőgép segítségével készítettem fotókat, melyeket számítógéppel dolgoztam fel és elemeztem. A fényképezőgépen használt objektív fókusztávolságát a kivetített ábra méretének megfelelően választottam ki úgy, hogy az lehetőleg a képmező minél nagyobb részét kitöltse.

A fényképezéshez használt objektívek sem hibátlan képalkotó eszközök, ezért a pontos mérések érdekében ezeket a hibákat ki kell küszöbölni. A mérés szempontjából elsődleges probléma a geometria torzítás, valamint a peremsötétedés. Nikon objektívek esetén ezek ismert mértékűek, a gyár által hivatalosan definiáltak az értékek. Adobe Lightroom képfeldolgozó szoftver segítségével a beépített adatbázisnak köszönhetően az objektív korrekciója elvégezhető.

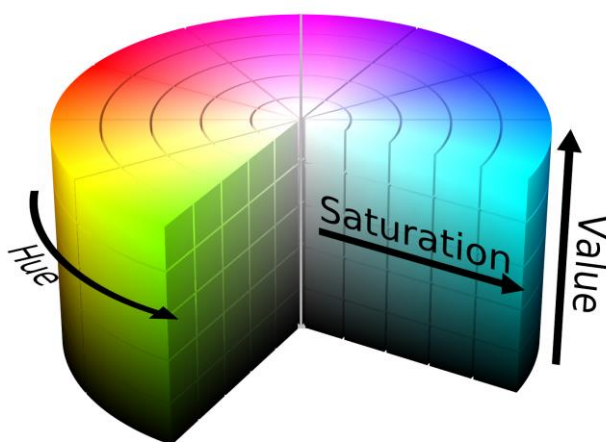
5.2.1. Homogenitás

A korrigált képeken a homogenitás vizsgálatához Image J szoftvert használtam. A homogenitás a képnek azon területén értelmezett, ahol a kivetített ábra látható. Általános ipari szabányként a homogenitás a legfényesebb és legsötétebb területek aránya, tehát minél közelebb van ez az érték 100%-hoz, az ábra homogenitása annál nagyobb:

$$H = \frac{P_{min}}{P_{max}}, \quad (5.1)$$

ahol P_{max} a legfényesebb pixel intenzitásértéke,
 P_{min} a legsötétebbé.

Ahhoz tehát, hogy a homogenitás mérhető legyen, szükség van a maximális és minimális intenzitású részek számszerű fényerejére. Az elkészített kép a képezékelők és megjelenítők működési módja miatt RGB színtérben értelmezett. A képet azonban érdemes olyan színtérben vizsgálni, amiben az intenzitás érték egyszerűen kiolvasható. Ezért a képeket HSV színtérbe konvertáltam, ahol H=Hue (árnyalat), S=Saturation (telítettség), V=Value (érték, azaz intenzitás). A HSV színtér értelmezése 31. ábra látható. Az egyes színtereken nem ugyanazon színek jeleníthetők meg, ez azonban a vetített ábra homogenitásának vizsgálatában nem okoz problémát. A HSV színtér az intenzitást „technikai” értelemben veszi, azaz nincs korrigálva V-Lambda szerint. Mivel az ábravetítő rendszert ipari képfeldolgozási célokhoz fejleszttem, ahol a vizsgálat kamerákkal történik, így nincs is szükség erre a korrekcióra.



31. ábra: a HSV színtér értelmezése

A homogenitás mérését nagyban befolyásolhatja a digitális zaj, hisz egy-egy pixel értéke könnyen kiugró lehet. Ezért érdemes első lépésben szűrőzést végezni a képen. Az ipari képfeldolgozás során igen gyakran Gauss-szűrést alkalmaznak a folyamat első lépéseként, ezért megengedhető, hogy a mérés kiértékelése is ezzel a lépéssel kezdődjön.

A Gauss-szűrés során egy pixelt önmaga és környezete alapján számított értékkel helyettesítünk. Az egyes szomszédos pixeleket nem egyforma súllyal számítjuk, hanem a súlyeloszlás Gauss-függvénnyel írható le. A felírt súlyeloszlást nevezzük konvolúciós mátrixnak. Általában az eredeti pixel súlya a legnagyobb, távolodva a súlyok egyre kisebbek. A Gauss-függvény egy dimenzióban az alábbi:

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (5.2)$$

ahol x az origótól vett távolság,

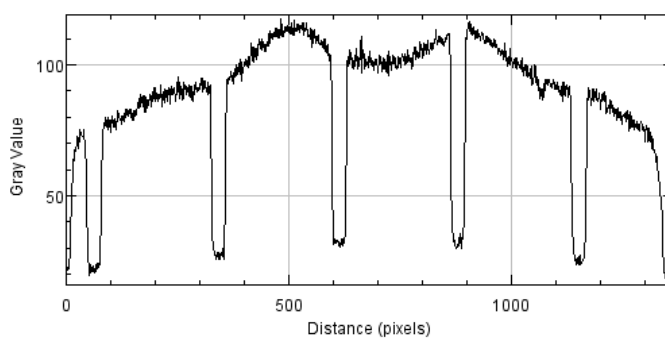
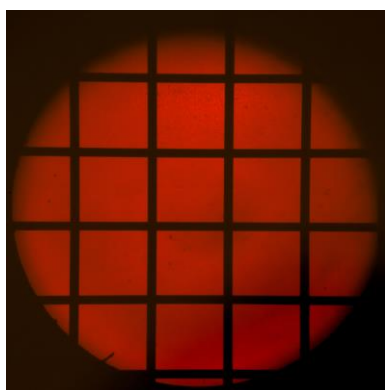
σ pedig a Gauss-függvény szórása, ami megadja, hogy a középponttól távolodva mennyire csökkenek a súlyok.

A 9. táblázat példa a konvolúciós mátrixra $\sigma=0,84$ esetén.

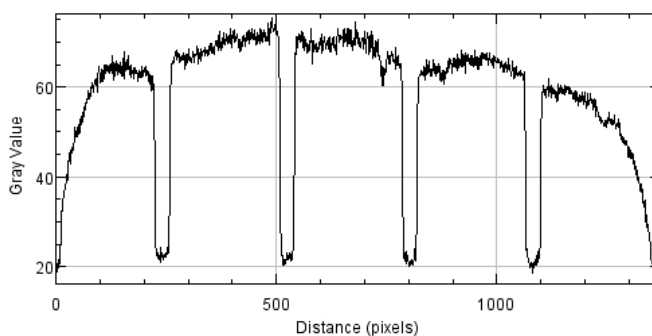
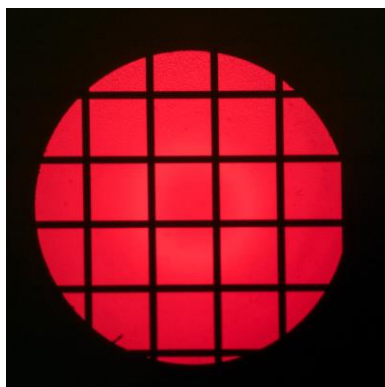
0,001	0,007	0,013	0,007	0,001
0,007	0,055	0,111	0,055	0,007
0,013	0,111	0,225	0,111	0,013
0,007	0,055	0,111	0,055	0,007
0,001	0,007	0,013	0,007	0,001

9. táblázat: a konvolúciós mátrix elemei $\sigma=0,84$ esetén

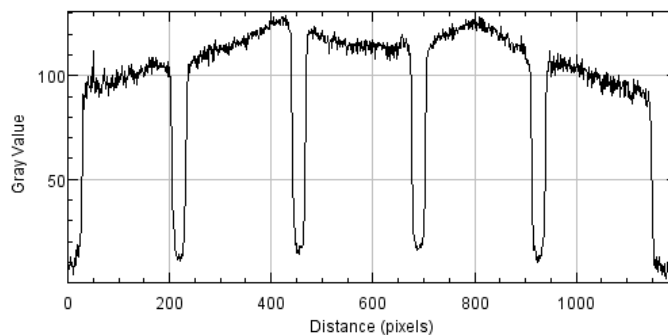
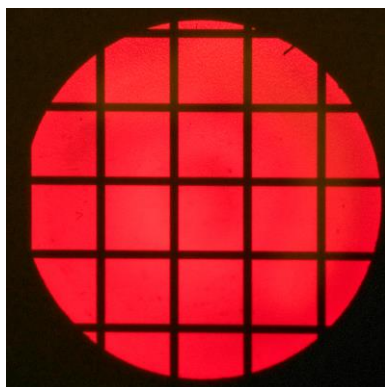
A szűrést elvégezve a képen a homogenitás megbízhatóbban számítható. Az egyszerűbb áttekinthetőség érdekében az egyes mérések keresztirányú intenzitáseloszlása, valamint a vetített kép a 32. ábra 39. ábra látható. A különböző objektívekkel számított homogenitás értékek a 10. táblázatban láthatóak.



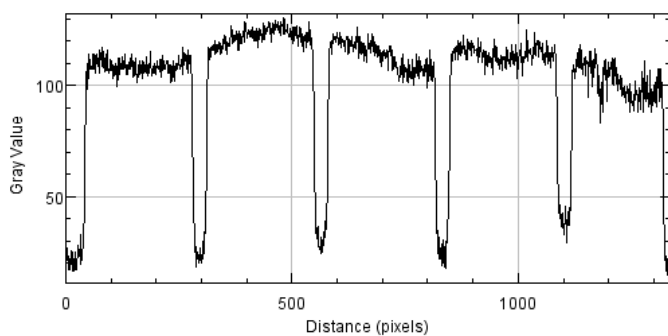
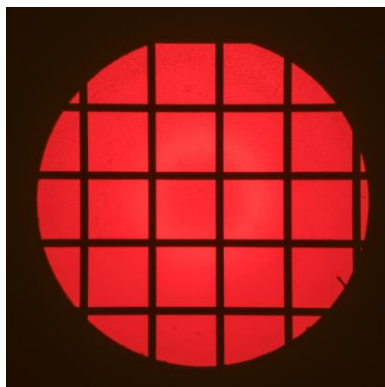
32. ábra: 12 mm-es objektív által vetített kép és homogenitása f1,8 rekeszértéken



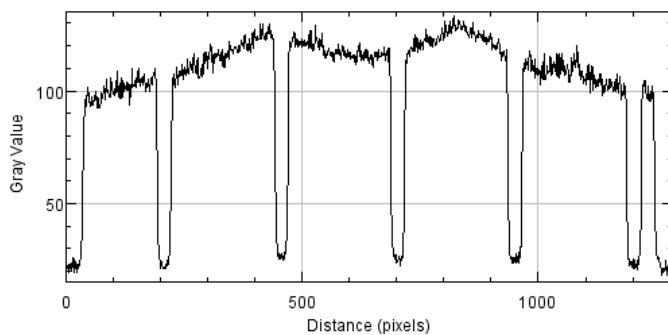
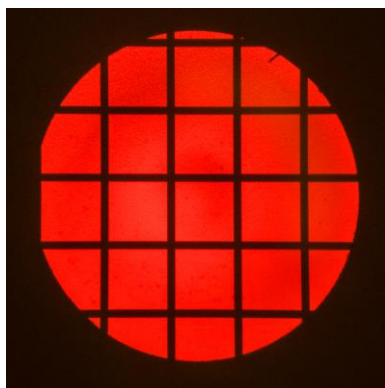
33. ábra: 12 mm-es objektív által vetített kép és homogenitása f16 rekeszértéken



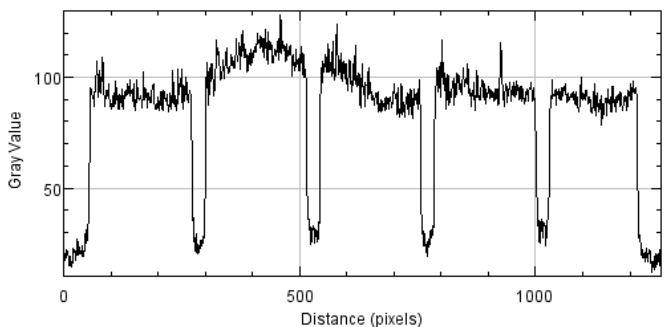
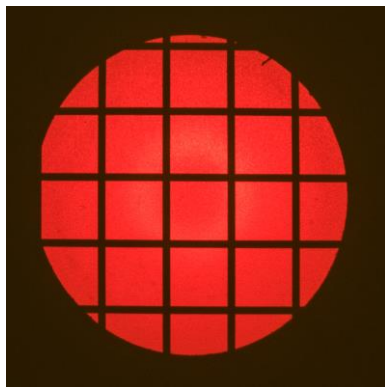
34. ábra: 25 mm-es objektív által vetített kép és homogenitása f1,4 rekeszértéken



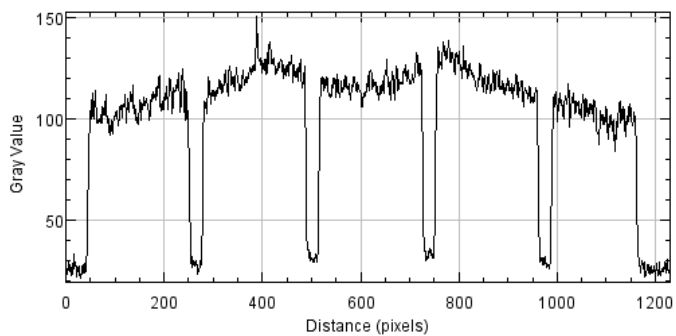
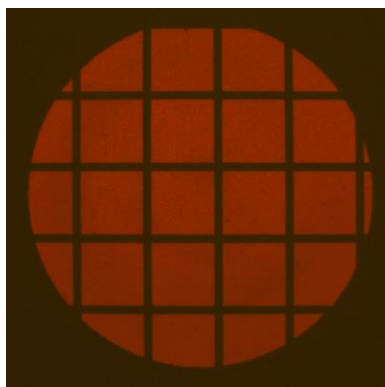
35. ábra: 25 mm-es objektív által vetített kép és homogenitása f22 rekeszértéken



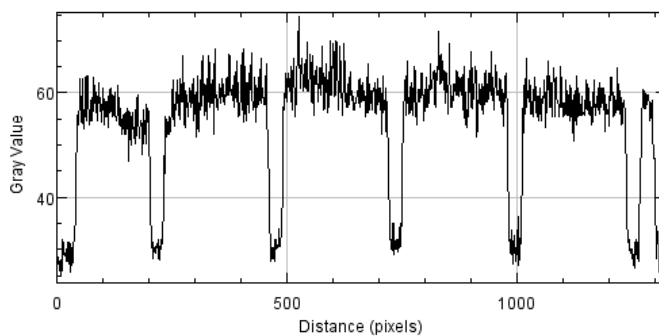
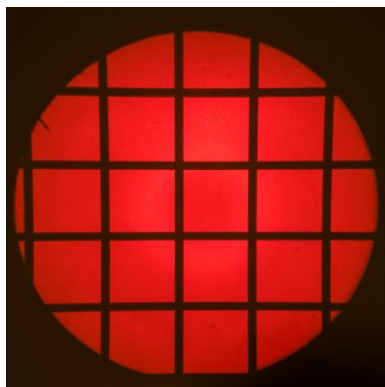
36. ábra: 50 mm-es objektív által vetített kép és homogenitása f1,8 rekeszértéken



37. ábra: 50 mm-es objektív által vetített kép és homogenitása f22 rekeszértéken



38. ábra: 75 mm-es objektív által vetített kép és homogenitása f2,5 rekeszértéken



39. ábra: 75 mm-es objektív által vetített kép és homogenitása f16 rekeszértéken

A mért értékek alapján megállapítható, hogy a vetített kép homogenitása a specifikációnak megfelelő.

Fókusz távolság	Rekeszérték	Homogenitás
12 mm	f 1.8	58%
	f 16	72%
25 mm	f 1.4	84%
	f 16	78%
50 mm	f 1.8	68%
	f 22	70%
75 mm	f 2.5	65%
	f 16	72%

10. táblázat: különböző fókusz távolságú objektívekkel azok legkisebb és legnagyobb rekeszértéke mellett mért homogenitás értékek

5.2.2. Fényáram

A rendszer hatékonyságának mérése érdekében a rendszer fényáramát össze kell vetni a fényforrás fényáramával. A fényáram a fényerősség és a besugárzott térszög szorzata. SI-mértékegysége lumen. *1 lumen* egy *1 candela* fényerősségű, pontszerű fényforrás *1 sr* térszögben kisugárzott fényárama.

$$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr} \quad (5.3)$$

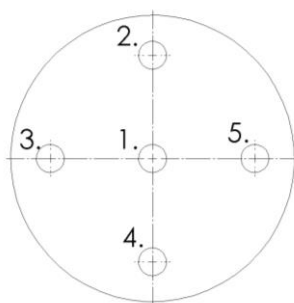
Ahhoz, hogy egy fényforrás fényáramát közvetlenül, pontosan mérni tudjuk, egy integráló gömbre lenne szükség. Ilyen eszköz azonban nem állt rendelkezésre az Optika Mérnökiroda Kft. telephelyén, így a mérést közvetett módszerrel végeztem.

A kibocsátott fényáram helyett a besugárzott fénymennyiséget mértem, azaz annak a felületnek a megvilágítását, melyre a vetítés történik. A megvilágítás egy *A* felületre eső φ fényáram, és az *A* felület hányadosa. SI-mértékegysége *lux*.

$$1 \text{ lx} = 1 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \quad (5.4)$$

A kivetített ábra közel homogénnek tekinthető, így a megvilágítást több ponton, sötét-szobában megmérve, a mért értékeket átlagolva meghatározható a felület átlagos megvilágítása. A vetített folt méretét méréssel meghatározva a megvilágított felület területe kiszámítható, így a LED-es ábravetítő rendszer fényárama a vetítőfelület átlagos megvilágítása és a megvilágított felület szorzataként számítható.

A méréshez egy Sekonic L358, fényképészetben használatos fénymérőt használtam. A fénymérő EV (Exposure Value) értéket ad eredményül, amiből a gyári adatlapon szereplő táblázat segítségével számítható a megvilágítás. A fénymérő karakterisztikája nem lineáris, a gyári táblázatban egész értékre vonatkoztatva vannak megadva a megvilágítás értékek luxban. Nem egész mért EV érték esetén a megvilágítás lineáris interpolációval közelíthető. A mérést összesen öt ponton végeztem az 40. ábra látható elrendezésnek megfelelően, három objektívvel.



40. ábra: a mérési pontok elhelyezkedése a vetített képen

A mért megvilágítás értékeket és a számított átlagos megvilágítást a 11. táblázat tartalmazza. A mért megvilágítás értékekből a vetített folt átmérőjének ismeretében a fényáram közelítőleg kiszámítható. Az ernyőt, melyen a foltátmérőt mértem, a fényforrástól különböző távolságokra helyeztem el, hiszen a különböző fókusztávolságú

objektívek esetében eltérő az a távolság, amelyen a mérés pontosan elvégezhető. (Tehát az ábra akkora, hogy nem lóg le az ernyőről, ugyanakkor elégséges méretű ahhoz, hogy az egyes mérési pontok megfelelően elkülöníthetők legyenek.)

Objektív megnevezése	Megvilágítás [lux]					Átlag [lux]	Foltátmérő [mm]	Számított fényáram [lm]
	1. pozíció	2. pozíció	3. pozíció	4. pozíció	5. pozíció			
Computar 25mm f1.8	23	26	23	25	23	24	320	16,6
Computar 50mm f1.8	36	56	56	62	63	54,6	280	16,8
Computar 12mm f1.4	49	45	49	42	48	46,6	320	18,7

11. táblázat: különböző objektívekkel mért átlagos megvilágítás, valamint a foltátmérő függvényében ebből számított megvilágítás

A megvilágítást azonban a különböző fényerőségű C-menetes objektívek is befolyásolják. Az objektívek fényáteresztő képességét azok rekeszértéke határozza meg. A rekeszértéket a fókusztávolság és belépő pupilla átmérőjének hányadosa:

$$N = \frac{f}{BP}, \quad (5.5)$$

ahol N az objektív rekeszértéke,

f az objektív fókusztávolsága,

BP pedig az objektív belépő pupillájának átmérője.

Az egyes objektívek fényáteresztő képessége ezzel a számmal jól jellemezhető, méreim alapján bármilyen rekeszértékre számítható. Minden modern, ipari objektíven fel van tüntetve ez az érték, általában az alábbi mértani sorozat elemeiként: 1,0; 1,4; 2,0; 2,8; 4,0; 5,6; 8; stb.

Egy fényérték kétszer akkora transzmissziót jelent. A mértani sorozat n -edik eleme $\sqrt{2}$ n -edik hatványa, tehát a hatványkitevő tekinthető fényértékként. A sorozatot az általánosan elterjedt, 1/3 fényértékenként felépítve, az általam 1,8 rekeszértékkel rendelkező objektívvel meghatározott fényáram alapján a várható fényáram bármilyen szabványos rekeszértékre számítható. Ahhoz, hogy átlagos fényáramot számítsak 1,8 rekeszérték mellett, az 1,4 rekeszértékű objektív fényáramát át kell számítani, mintha 1,8 rekeszértékű lenne. Mivel ismert, hogy 1,4 és 1,8 értékek között 2/3 fényérték lépés van, így belátható, hogy

$$\varphi_{f1,8} = \frac{\varphi_{f1,4}}{1 \frac{2}{3}} = \frac{18,7}{1 \frac{2}{3}} = 11,22 \text{ lm} \quad (5.6)$$

Az átlagos fényáram így: 14,9 lm. A különböző rekeszértékekhez kiszámított várható közelítő fényáram értékeket a 12. táblázat tartalmazza.

EV	N	φ [lm]
0	1	29,92
0,33	1,1	26,18
0,67	1,2	22,44
1,00	1,4	18,70
1,33	1,6	14,96
1,67	1,8	11,22
2,00	2	8,42
2,33	2,2	6,73
2,67	2,5	5,61
3,00	2,8	4,81
3,33	3,2	4,21
3,67	3,5	3,74
4,00	4	3,37
4,33	4,5	3,06
4,67	5	2,81
5,00	5,6	2,59
5,33	6,3	2,40
5,67	7,1	2,24
6,00	8	2,10

12. táblázat: a fényérték valamint a rekeszérték kapcsolata, valamint a várható fényáram

5.2.3. Hőmérséklet

A Lumileds Luxeon Rebel Star ES LED fényforrás adatlapján látható élettartam csak akkor érhető el, ha működés közben a hőmérséklet nem lépi át a megengedett szintet, folyamatos működés során sem. A hőmérsékletet teljesen összeszerelt állapotban mértem.

A chip és a thermal pad közötti hőellenállás értéke $R_{c-tp} = 10 \text{ K/W}$. Így a 3.2.2 pontban ismertetett képlet alapján, ha a LED chip hőmérsékletét (T_c) a thermal pad hőmérséklete (T_{tp}) alapján számítható az alábbi módon:

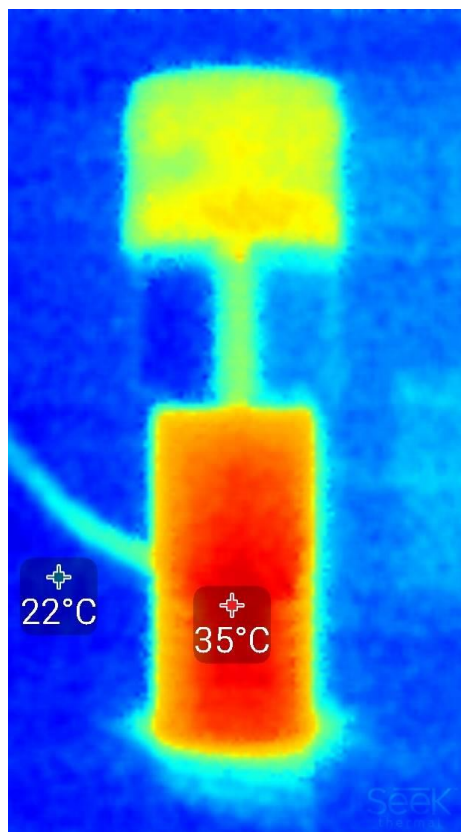
$$T_c = T_{tp} + R_{c-tp} \cdot P \quad (5.7)$$

A mérést Maxwell MX25-201 multiméterrel, K-típusú hőelemmel, szobahőmérsékleten, LED chip mérőpontján végeztem, 700 mA árammal hajtva a diódát. A thermal padon azonban összeszerelt állapotban nem végezhető a mérés, így ahhoz a lehető legközelebb helyeztem el a hőelemet. A mérés eredményeit az 13. táblázat tartalmazza. A 20. perctől jelentős változás nem tapasztalható a hőmérsékletben.

Eltelt idő [perc]	T_{tp} [°C]	T_c [°C]
5	44	74
10	55	85
15	58	88
20	62	92
25	60	90

13. táblázat: a thermal padnél mért hőmérséklet értékek a bekapcsolás óta eltelt idő függvényében

A hőeloszlás szemléltetése érdekében hőkamerás felvételt készítettem, Seek Thermal Compact, okostelefonhoz csatlakoztatható, 206x156 pixel felbontású mini hőkamera segítségével. (41. ábra) A szobahőmérsékleten történt mérések eredménye a szimulációhoz igen hasonló, így arra lehet következtetni, hogy a 85°C környezeti hőmérséklethez tartozó szimuláció is kellően pontos eredményt adott a maximális hőmérsékletre vonatkozóan, tehát a LED nem fog túlmelegedni a 3.2.1.1 fejezetben specifikált 0 .. 85 °C hőmérséklettartományban.



41. ábra: a LED-es ábravetítőről készült hőkamerás kép, látható hogy a ház hőmérséklete egységesen 35°C

6. Összefoglalás

A diplomamunkámban áttekintettem a LED-ek szerepét az ipari megvilágítók között, majd a LED-es ábravetítőrendszer felhasználási lehetőségeit vizsgáltam meg. Összehasonlítottam az alternatív megoldásokkal, valamint megvizsgáltam a konkurens termékeket. A lehetséges felhasználási kör, a versenytársak, valamint az OMI OPTIKA Mérnökiroda javaslatai alapján megfogalmaztam a tervezendő ábravetítő rendszerrel szemben támasztott követelményeket.

Áttekintettem a vetítőrendszerek működését, majd analóg, már létező mérnöki megoldást kerestem. A szakirodalom áttanulmányozása alapján a rendszer felépítését a mikroszkópok működési elve alapján kezdtem meg. Ezen berendezések megvilágítási lehetőségeit megvizsgálva a klasszikus Köhler-megvilágítást az ábravetítő rendszerben alkalmazhatónak ítéltam, működését részletesen áttekintettem, a LED-es ábravetítő rendszer elvi felépítést a korábban megfogalmazott specifikációk alapján meghatároztam.

Az optikai rendszer elemeit: a fényforrást, kondenzorlencsét, ábrát és objektívet külön-külön vizsgáltam. Releváns tulajdonságai alapján kiválasztottam a megfelelő, kereskedelmi forgalomban kapható fényforrást; a kondenzorlencse meghatározó tulajdonságait áttekintettem; a vetítendő ábra gyártástechnológiai lehetőségeit összehasonlítottam; a rendszerrel használható objektívek jellemző tulajdonságait megvizsgáltam.

Több ipari, C-menetes objektív gyártójával is felvettem a kapcsolatot, hogy az adatlapon nem ismertetett, de a tervezés szempontjából fontos értékeket megismerjem, azonban releváns információt csak egy cégtől kaptam. Így méréseket végeztem, hogy minél több objektív releváns értékeit meghatározzam, hiszen a célom az volt, hogy a rendszer bármilyen, legalább 2/3"-es C-menetes objektívvel használható legyen.

Az optikai szimulációt Zemaxban végeztem. A pontos szimuláció érdekében több gyártótól black box modellt kértem, azonban nem szekvenciális módban alkalmazható fájlokat nem tudtak rendelkezésemre bocsátani, így tulajdonságaiban hasonló Zemax mintaobjektívet használva, több lépésben optimalizáltam, végül kondenzorként aszférikus lencsét használva a további kézi optimalizáció kiindulópontjaként alkalmazható optikai elrendezést meghatároztam.

Mivel az objektívgyártóktól megfelelően alkalmazható modellt nem kaptam, a szimuláció alapján összeállított rendszert a kiválasztott fényforrással és kondenzorlencsével optikai tesztpadra helyeztem, ahol az optikai rendszert több objektívvel végzett teszt alapján optimalizáltam, majd a végleges optikai elrendezést meghatároztam.

A mechanikai alkatrészeket úgy terveztem meg, hogy a mérnökiroda korábbi termékeivel kompatibilisek legyenek, hiszen a kis sorozat gyártásból adódóan csak így lehet költséghatékonyan előállítani a terméket, és versenyképes végfelhasználói árat elérni. Célom volt továbbá, hogy az objektív mellett a vetítendő ábra is könnyen cserélhető legyen, továbbá strapabíró, mostoha ipari körülményeknek ellenálló, és az

OMI OPTIKA Mérnökiroda Kft-nél elérhető technológia segítségével gyártható legyen.

A mechanikai konstrukció hőátadó képességének ellenőrzéséhez termikus szimulációt végeztem SolidWorksben. A hőtani jellemzők áttekintése után a paramétereket meghatároztam, a szimuláció eredménye és a LED chip adatlap szerinti maximális megengedett hőmérséklete alapján a konstrukciót jóváhagytam.

A terveim alapján elkészült LED-es ábravetítő rendszerrel több objektívet felhasználva méréseket végeztem. Különböző objektívvel különböző rekeszértékeken mértem, ami alapján a homogenitást értékét az egyes esetekben kiszámoltam. A fényerőre vonatkozóan – integráló gömb hiányában – közvetett méréseket végeztem, közelítő értékét meghatároztam, a fényérték definíciója alapján a különböző rekeszértékeken várható fényáramot számszerűen megadtam. A hőmérséklet mérését hőelemmel, illetve hőkamerával végeztem.

A mért fényerő és homogenitás értékek alapján megállapítható, hogy a LED-es ábravetítő többféle, legalább 2/3"-es C-menetes objektívvel is alkalmazható ipari képfeldolgozási célú alkalmazásokhoz. A mért hőmérséklet értékek alapján a LED adatlapjában meghatározott élettartam elérhető.

6.1. Tanulságok, következtetések, javaslatok

A LED-es ábravetítő optikai modellje továbbfejleszthető a gyártóktól kapott megfelelő modellekkel, így az aszférikus kondenzorlencse optimalizálásával nagyobb hatásfok is elérése is lehetséges; valamint többféle objektív segítségével történő optimalizálással a jelenleg szükséges néhány milliméteres finombeállítási lehetőség is kiküszöbölhető lehet.

A tárgyra ferde szögben történő vetítés esetén probléma lehet a vetített kép torzulása. A vetítendő minta elforgatásával, a Scheimpflug-elv alapján ez a torzítás korrigálható. Ehhez új optikai modell mellett mechanikai átalakításra is szükség van.

Távolra történő vetítés esetén a nagyobb fókusztávolságú és az általában ezzel járó kisebb fényerejű objektívek esetén, valamint olyan helyeken, ahol a környezeti fény nem zárható ki teljesen, fontos lehet a jelenleginél nagyobb fényerő elérése. Ehhez a többféle objektívvel történő szoftveres optimalizálás mellett nagyobb teljesítményű, így nagyobb fényárammal bíró LED fényforrás alkalmazása is lehetséges. A nagyobb teljesítmény miatt nagyobb hűtőteltjesítményre is szükség van, ehhez új mechanikát kell tervezni, valamint újabb hőtani szimulációkat végezni.

7. Felhasznált Források

- [1.] GENG, J. (2011) *Structured-light 3D surface imaging: a tutorial*. Adv. Opt. Photon. 3, 128-160, 2011.
- [2.] WANG, LIANG (2011): *Machine learning for vision-based motion analysis*, Springer, 2011. 978-0-85729-056-4.
- [3.] TUREK, FRED D. (2011): *Machine Vision Fundamentals: How to Make Robots 'See'*. NASA Tech Briefs. [Online] <http://www.techbriefs.com/privacy-footer-69/10531>. 2015. 08. 25.
- [4.] DAVIES, E.R. (2005): *Machine Vision - Theory Algorithms Practicalities* (3. kiadás). Elsevier, 2005. 0-12-206193-8.
- [5.] RÁCZ GÁBOR (2015): *Szakdolgozat: Ipari képfeldolgozási célú LED megvilágítások alkalmazástechnikája*. BME MOGI, 2015.
- [6.] NATIONAL INSTRUMENTS (2015): *A Practical Guide to Machine Vision Lighting - Part III*. [Online] 2015. október 14. <http://www.ni.com/white-paper/6903/en/>.
- [7.] DR. BERNOLÁK, DR. SZABÓ ÉS SZILAS (1979): *A mikroszkóp - zsebkönyv*. Budapest : Műszaki könyvkiadó, 1979. 9631024555.
- [8.] NATIONAL INSTRUMENTS (2015): *A Practical Guide to Machine Vision Lighting - Part I*. [Online] 2015. október 14. <http://www.ni.com/white-paper/6901/en/>.
- [9.] NIKOLAY, ZHELUDEV (2007): *The life and times of the LED: a 100-year history*. , 1. kötet. 10.1038/nphoton.2007.34.
- [10.] SCHUBERT, E. FRED. (2006): *Light-Emitting Diodes*. Cambridge : Cambridge University Press, 2006. 0-521-86538-7.
- [11.] THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES (2014): *Press Release*. 2014. október 7.
- [12.] KUME, HIDEYOSHI. (2012): *Cree Sets New Record for White LED Efficiency*. [Online] http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20120423/214494/. 2015.11.24.
- [13.] CREE, INC. (2014): *Cree First to Break 300 Lumens-Per-Watt Barrier*. [Online] 2014. március 26. <http://www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2014/March/300LPW-LED-barrier>. 2015. 11. 24.
- [14.] DR. ÁBRAHÁM GYÖRGY; DR. KOVÁCS GÁBOR; DR. ANTAL ÁKOS; NÉMETH ZOLTÁN; VERES ÁDÁM LÁSZLÓ (2014): *Jármű optika*. Budapest : BME MOGI, 2014. 978-963-313-144-2.
- [15.] PHLATLIGHT (2009): *PhlatLight® White LED Illumination Products CST-90 series datasheet* [Online] 2009.05.13. http://web.archive.org/web/20100331100545/http://www.luminus.com/stuff/contentmgr/files/0/7c8547b3575bcecc577525b80d210ac7/misc/pds_001314_rev_03__cst_90_w_product_datasheet_illumination.pdf. 2015.11.25.
- [16.] HAITZ, ROLAND (2010): *Solid-state lighting: 'The case' 10 years after and future prospects*. Phys. Status Solidi, 208. kötet. 10.1002/pssa.201026349.

- [17.] ABRAMOWITZ, MORTIMER (2012): *Microscope Illumination. Microscopy Resource Center*. [Online] 2012.03.24. <http://olympus.magnet.fsu.edu/primer/anatomy/illumination.html>. 2015. 11. 30.
- [18.] DR. ÁBRAHÁM GYÖRGY (szerk.) (1998): *Optika (Panem-McGraw-Hill)*. Budapest: Panem, 963545144X.
- [19.] BRUCE W. SMITH, KAZUAKI SUZUKI, JAMES R. SHEATS (1998): *Microlithography: Science and Technology, Second Edition*. Boca Raton : CRC Press, 9780824790240.
- [20.] GRÓF GYULA (1999): *Hőközlés Jegyzet*. Budapest : BME EGT
- [21.] CREE, INC. (2016) *Electrical Overstress Application Note*. [Online] http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/XLamp%20Application%20Notes/XLamp_Elec_Overstress.pdf. 2016. 02. 13.
- [22.] LOSEV, VLAGYIMIROVICH. (1928): *Luminous carborundum detector and detection effect and oscillations with crystals*. Philosophical Magazine. 6

8. Summary

Due to the spread of industrial image processing tasks, the demand for task specific illuminators grows continuously. Because of the variation of the tasks, the illumination needs are very diversified. The aim of my thesis was to design a structured light LED condensor system, used in a LED pattern projector system.

In my thesis I reviewed the role of LEDs among industrial illuminators, and compared them to the alternative solutions and competing products. Based on the conditions of use, competitors and the proposals of OMI OPTIKA Engineering Ltd., I formulated the requirements of the condensor system.

I reviewed the operation of classical projection systems, and I found Köhler illumination (used in microscopes) applicable in my system. Based on the already outlined specifications, I defined the theoretical structure of the system.

I examined the elements of the optical system part by part, and I chose a commercially available LED light source. I contacted multiple C-mount lens manufacturers, but only one company answered, so I carried out measurements to determine the values I need for optical design and simulation.

I performed optical simulations in Zemax, and due to the lack of black box models I could have used in non-sequential simulation mode, I used a sample lens available in the Zemax catalog. With an aspheric lens as a condenser, I defined the arrangement of the optical system, as a starting point of manual optimization.

With the LED light source, aspheric lens chosen from catalog and multiple C-mount lenses I carried out measurements on an optical bench to define the final optical design.

I designed the mechanical parts to be compatible with earlier products of OMI OPTIKA Engineering Ltd. Due to small series production, this is a good way to save manufacturing costs. I performed thermal simulations in SolidWorks to inspect the heat transfer capability of the already used housing, and I approved the design.

I carried out measurements with the manufactured LED pattern projector system. I measured homogeneity, luminous intensity and temperature. Based on the results it can be stated, that the LED condensor system can be used for industrial image processing applications with multiple C-mount lenses with different focal lengths.