

Diffraktív optikai elemek számítógépes tervezése, szimulálása és kisszériás előállítása kvázi-litográfias módszerrel

Computer-aided design, simulation, and small-batch fabrication of Diffractive Optical Elements using a quasi-lithographic method

OROSZ Bálint Marcell hallgató

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar,
Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.
oroszbme@gmail.com

Abstract

The fabrication of diffractive optical elements (DOEs) is typically cost-effective only in mass production, as processes such as injection molding, imprinting, and lithography require high initial investment. Small-series or custom elements are therefore economically inefficient. This research aimed to develop a streamlined process for the rapid design and fabrication of DOEs for small-batch applications.

The proposed workflow extends from computer-aided design to physical realization. A graphical user interface was developed to support the design process, capable of simulating diffraction patterns of planar surfaces defined by amplitude or phase modulation, and of generating approximate numerical solutions for general interference patterns in the Fraunhofer regime. After generation and simulation-based verification, the pattern is realized using a quasi-lithographic method. The structure is recorded onto fine-grain photographic film with an analog camera, producing a DOE that exhibits both transmissive and reflective amplitude modulation. The feasibility of converting this film-based element into a phase-modulating structure was also examined. Finally, the fabricated elements were experimentally characterized, and their qualitative and quantitative properties were documented.

Keywords: diffractive optical element, DOE, diffraction, interference, computer-generated hologram, CGH, quasi-lithography, analog film

Kivonat

A diffraktív elemek előállítása rendszerint tömeggyártás mellett megtérülő, hiszen a fröccsöntéssel, préssel, vagy litográfiával készített elemek gyártásához nagy kezdeti befektetésre van szükség, és csak nagy darabszám mellett csökken az egy elemre jutó költség ésszerű összegre. Ezért kutatási, fejlesztési és egyedi igényeknek megfelelő, jellemzően kis szériájú elemek előállítása anyagilag nem túl megtérülő. A kutatásom célja ezért egy olyan folyamat / eljárásorozat felállítása volt, amely megkönnyíti és felgyorsítja ezen diffraktív optikai elemek (DOE-k) tervezését és előállítását kisszériás, egyedi célokra.

A folyamat a számítógépes tervezéstől indulva egészen a fizikai megvalósításig terjed. A tervezéshez készült egy grafikus felhasználói felület, ami egy síkfelület diffrakciós mintáját – legyen az amplitúdó-, vagy fázismodulációs minta – szimulálja, valamint numerikus módszerrel közelítő megoldást is tud generálni általános Fraunhofer-tartománybeli interferenciamintára. A generálás és szimulációs ellenőrzés után a minta előhívásra kerül egy kvázi-litográfias módszerrel. Analóg fényképezőgép segítségével finomszemcsés filmszalagra rögzítve a mintát egy egyszerre tranzmissziós és reflexiós amplitúdómodulációs diffrakciós elemet kapunk. Emellett a kutatás kísérletet tett a szalag fázismodulációs átalakítására. Végül a tárgyalt eljárás segítségével elkészült elemeket megvizsgálva jellegzerű és számszerű tulajdonságok kerültek feljegyzésre.

Kulcsszavak: diffraktív optikai elem, DOE, diffrakció, interferencia, számítógép-generált hologram, CGH, kvázi-litográfia, analóg film

1. BEVEZETÉS

A diffrakció mint optikai jelenség leírása rendkívül érdekes múlttal rendelkezik. Alkalmazása vitathatatlanul hasznos mind ipari, mind kutatási környezetekben [1]. Ehhez elengedhetetlen, hogy a célt kiszolgáló diffrakciós mintázatot megtervezzék, majd előállítsák. Ezek a lépések azonban nem könnyen elérhetők, és gyakran speciális szoftverre, tudásra és felszerelésre van szükség. Így a diffraktív elemekkel való munka egy magas belépési szintet követel meg, még akkor is, ha a feladat nem igényel rendkívül szigorú elvárásokat. Ezen akadály csökkentése a kutatás kitűzött célja mind a tervezési, mind az előállítási fázist illetően. Kidolgozásra került egy egyértelmű és intuitív grafikus felhasználói felület, ami a tervezési lépéseket (generálás, szimuláció) egyszerűsíti, valamint egy kvázi-litográfias módszer kísérleti diffraktív elemek előállítására. Ezen cikk egy hosszabb kutatás eredménye, amelynek részeredményeit tartalmazza egy korábbi tudományos diákköri konferencia munkám, valamint a szakdolgozatom [2].

2. DIFFRAKCIÓELMÉLET

A geometriai fénymodellel ellentétben a diffrakció a fény hullámtermészetére épül. Huygens elmélete szerint a hullámfront minden elei pontja másodlagos pontszerű elemi forrásként viselkedik, és ezek összegződése határozza meg a hullámfront további terjedését [3]. Ebből adódóan, hogyha a fény útjába akadályt, vagy közeghatárt állítunk, az elemi pontforrások által leírt viselkedés akkor lesz jelentős, ha az akadály mérete összemérhető a hullámhosszal. A hullámfrontterjedés kiszámolásának egy lehetséges módja a szög spektrum-módszer („angular spectrum method”) [4]. Ez a módszer terjedésre merőleges síkokra bontja a teret, majd a síkot térfrekvencia-komponensekre bontja kétdimenziós Fourier-transzformáció segítségével [5].

$$\begin{aligned}\tilde{U}(f_x, f_y, 0) &= \iint U(x, y, 0) e^{-2\pi i(f_x x + f_y y)} dx dy \\ &= \mathcal{F}\{U(x, y, 0)\} \\ &= \tilde{U}\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, 0\right)\end{aligned}\quad (1)$$

Ezután a komponenseket rendre továbbterjesztjük, majd a vizsgálandó síkban újra összegezzük, és inverz Fourier-transzformáció segítségével visszatérünk a frekvencia dimenzióból.

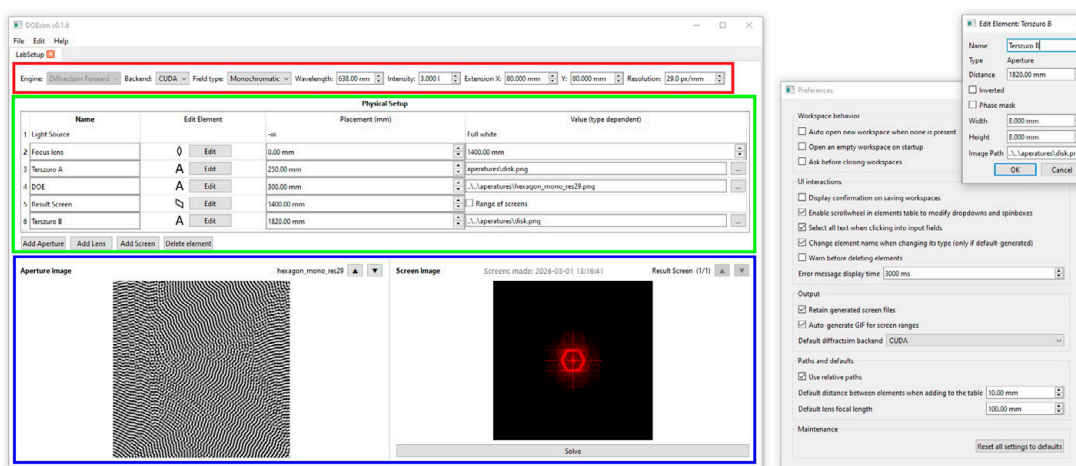
$$\begin{aligned}U(x, y, z) &= \iint \tilde{U}(f_x, f_y, 0) e^{2\pi i(f_x x + f_y y) + \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2} z} df_x df_y \\ &= \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}\{U(x, y, 0)\} \cdot e^{\sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2} z}\right\}\end{aligned}\quad (2)$$

Ez a skalár hullámegyenlet egzakt megoldása, így nem csak a Fraunhofer-régióban alkalmazható, hanem a diffrakciós síkhoz közel is pontos eredményhez vezet.

A szimulációs motor lényegében a hullámfront alakulásának számolása a terjedés irányában. Ennek megfordítása azonban – mint oly sok esetben – bonyolultabb feladatnak ígérkezik. Analitikai megoldást egy Fraunhofer-interferenciaminta előállításához csak speciális esetekben tudunk meghatározni, így a hullámfrontot előidéző diffraktív felület kiszámolásához praktikus numerikus módszereket alkalmazunk. Egy lehetséges algoritmus a diffraktív mintázatok generálásához a Gerchberg-Saxton algoritmus [6]. Ez egy iteratív eljárás, mely végeredményül egy közelítő megoldást ad. A Fraunhofer interferenciakép megoldása nem csak számolási egyszerűsége miatt praktikus, hanem mert azt a végtelen távol elhelyezkedő síkot, ahol felveszi az interferenciamintázatot egy egyszerű gyűjtőlencse segítségével a lencse fókusz távolságába hozhatjuk. A felhasználói felület az inverz feladatra ezen felül egy generikus konjugált gradiens módszeren alapuló lokális optimumkeresést is támogat.

3. DOESIM SZIMULÁCIÓS PROGRAM

A szakirodalomra épült *DOESim* alkalmazás a hullámfront szimulációjához a fent említett szög spektrum-módszert használja. Az implementáció lehetővé teszi, hogy a szimuláció tartalmazhasson tetszőleges mennyiségű és mintázatu fényrekeszt (apertúrát) ami síkjának áttetszőségét és fáziseltolását is befolyásolhatja. Emellett egyszerű gyűjtő-, és szórólencse elemekkel lehet módosítani a fényúton. A vizsgált térrészben, ahol a fény halad tetszőleges helyeken elhelyezhetők megfigyelő síkok, amik az adott távolságban felvett interferenciamintát ábrázolják. Munkaterület betöltését vagy létrehozását követően a felhasználói felület három fő részre bontható: A **pirossal** kiemelt rendszerparaméterek (*System Parameters*) a szimulációs környezet általános beállításai. A **zölddel** körbevett fizikai elrendezés (*Physical Setup*) mutatja az optikai elemek elhelyezkedését és pár főbb tulajdonságát. A **kékkel** jelölt megfigyelőablakok (*Viewports*) pedig az egyes elemek előnézetét és a számolt



1. ábra. DOESim felhasználói felülete, beállításablaka, és a „Térszűrő B” elem paraméterablaka.

végeredmény képét mutatja. A teljes munkamenet elmenthető lemezre, valamint több munkaterület is szimultán aktív lehet. A számolás nagy felbontás és kiterjedés esetén időigényes lehet, ezért a program felkínál videokártyás gyorsítást is „CUDA”, vagy „JAX” elnevezéssel. Ezek használatához külső könyvtárak megszerzése szükséges.

4. KVÁZI-LITOGRAFÍÁS ELŐÁLLÍTÁS

E kisszeriás gyártás egy analóg kamerára épülő eljárás, amely radikális egyszerűsége ellenére is jól alkalmazható, funkcionális végterméket eredményez. A litográfia (levetítés) alapelve egy nagyméretű maszk optikai úton történő, nagy kicsinyítés melletti, torzításmentes leképezése egy meghatározott síkra. Az eljárást széles körben alkalmazzák integrált áramkörök gyártásánál, ahol a mintázat fényérzékeny rétegen rögzül. Ehhez hasonlóan a fényképezőgép is értelmezhető egyfajta litográfiai rendszerként, mivel az objektív a látómezőben elhelyezkedő valós térbeli jelenetet kicsinyítve képezi le az érzékelő síkjára. Digitális képalkotó rendszer alkalmazása esetén a leképezés tipikusan CMOS- vagy CCD-érzékelőn történik, míg analóg fényképezőgép esetén a rögzítés médiuma maga a fényérzékeny filmszalag. Ez utóbbi egy olyan fizikai médium, amely alkalmas a tervezett diffrakciós mintázat rögzítésére, és hordozására. A DOESim szoftverrel megtervezett struktúra fizikai előállításához nagy felbontású kijelző, stabil rögzítést biztosító háromlábú állvány, valamint – a mechanikai rezgések minimalizálása érdekében – távkioldó alkalmazása indokolt. A megvalósítható mintafelbontást nem kizárólag a kijelző pixelsűrűsége korlátozza, hanem a rögzítő közeg – analóg rendszer esetén a filmszalag – tényleges felbontóképessége is.

$$\frac{1}{f_{\text{film}}} = d_{\text{film}} \leq \eta \cdot M_{\text{kamera}} \cdot d_{\text{kijelző}} \quad (3)$$

A film felbontóképességének (f_{film}) nagyobbak, avagy a film minimális felbontási távolságának (d_{film}) kisebbnek kell lennie, mint a képernyőn megjelenített legkisebb részlet méretének ($d_{\text{kijelző}}$) és a kamera nagyításának (M_{kamera}) szorzata. A biztonság irányába térve egy $\eta > 1$ biztonsági tényezőt is érdemes felvenni. A szimulációban meghatározott fizikai mintaméret eléréséhez ismerni kell a kijelzőn megjelenített kép geometriai méreteit, a leképezési nagyítást, továbbá a használt film fényérzékeny területének határát. A kereskedelmi forgalomban elérhető *Fujifilm Neopan Acros 100 II* névleges, adatlap szerinti maximális felbontása 100 vonalpár/mm, azonban ez az érték gyakorlati körülmények között jellemzően nem érhető el. Amatőr kategóriájú fényképezőgép és optika alkalmazásával reálisan 30 – 35 vonalpár/mm felbontás valósítható meg. A számtalan előhívási folyamat közül a „stand development” bizonyult a legmegbízhatóbbnak, és a legjobb eredményeket szolgáltatónak.

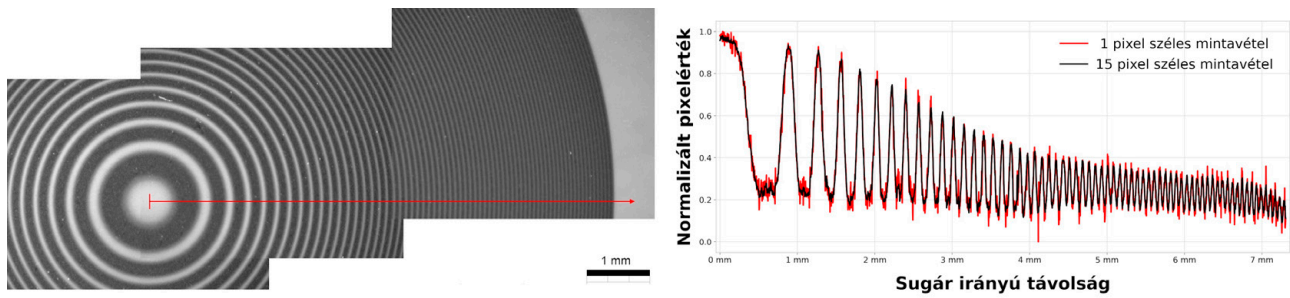
5. DIFFRAKTÍV LEMEZEK KIÉRTÉKELÉSE

Az előállítási folyamat pontosságának kiértékeléséhez egy Gábor zónalemez fókusz-távolságát használtam fel, ugyanis a nulladik rendű fókuszpont távolsága a lemeztől meghatározható a lemez transzmisszióját leíró összefüggés segítségével [5]:

$$T(r) = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{f^2 + r^2} - f\right)\right) \right] \quad (4)$$

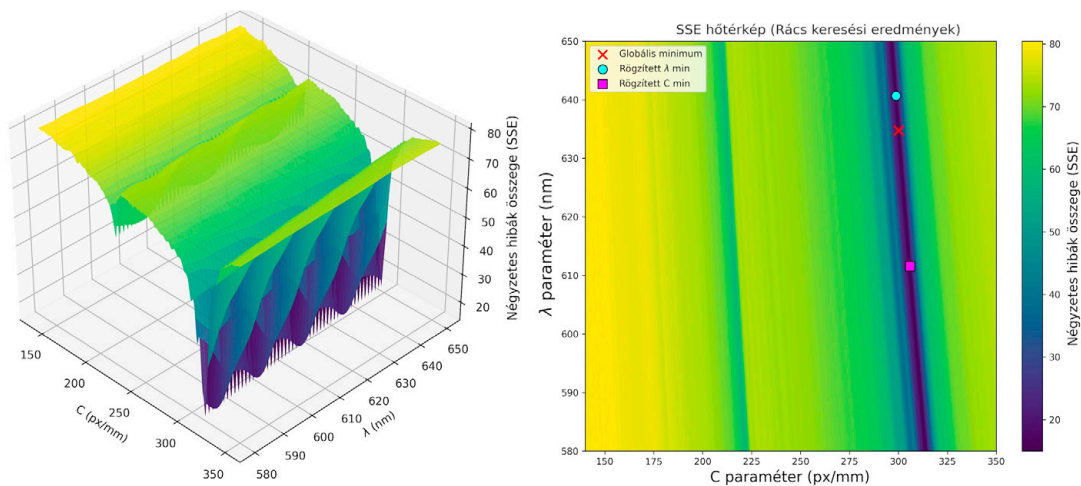
Ahol r a sugárirányú távolság, λ a fény hullámhossza, és f a lemez főfókusz-távolsága – mind (milli)méterben. A transzmisszivitást vezérlő függvény $[0 - 1]$ tartományban vesz fel értékeket, a mikroszkópos felvételek azonban

szürkeárnyaltos képek, amik a szenzor megvilágítását rögzítik adott ponton, [0-255] tartományon. Számunkra az egyes képpontok relatív világossága tartalmaz értékes információt, így egy egyszerű normalás segítségével áttérhetünk a megfelelő intervallumra.



2. ábra. Gábor zónalap mikroszkópos felvétele és egy sugármenti egyenes pixelérték-profilja.

Ha ebből a három független változóból kettőt ismertnek tekintünk, a harmadik egyértelműen kiadódik a mikroszkópos felvételre illesztett függvényből. Az illesztéshez egy háromdimenziós paramétertérben legkisebb négyzetek összege alapján „grid search” kereséssel találtam meg a minimális illesztési hibával rendelkező változó-kombinációk halmazát. A négyzetes hibák összegének (SSE) mértékegysége arbitráris. Ha ismertnek tekintem a félvezetőlézer hullámhosszát ($\lambda = 640.7 \text{ nm}$) és a mikroszkópos felvétel kalibrációs tényezőjét – amiből az r távolság adódik – ($C = 306 \text{ px/mm}$), akkor a lemez fókusz távolsága – aminek mérésel meghatározott értéke $f = 680 \text{ mm}$ – a függvényillesztésből kiadódik.



3. ábra. Háromdimenziós paramétertér egy ($C - \lambda$) síkszeletének ábrázolása felületként (bal) és hő térkép formájában (jobb).

Az (1.) táblázat címsorában és oszlopában rendre egy-egy paraméter szerepel, amik az adott oszlopban / sorban egy ismertnek tekintett változót jelentenek. Így az egyes cellákban a harmadik, kiadódó paraméter értéke szerepel, valamint a ismertnek tekintett értékéhez számított relatív hibája. A főátló celláiban csak egy változó tekintett ismertnek, így azok tartalma nem meghatározott.

Ismert változók függvényében a kiadódó paraméter értéke és relatív hibája.

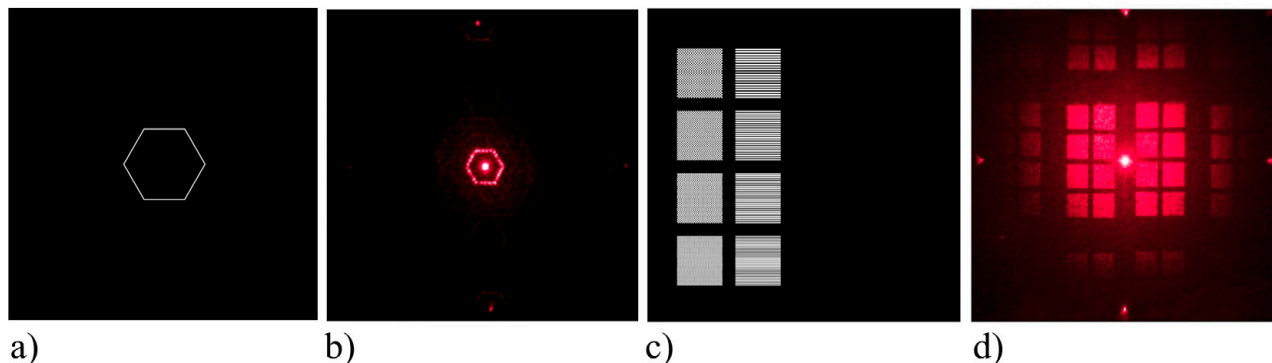
1. táblázat

ismert változók	λ [nm]	f [mm]	C [px/mm]
λ [nm]	–	298.73 px/mm (–2.4%)	644.98 mm (–5.1%)
f [mm]	298.73 px/mm (–2.4%)	–	608.86 nm (–5.0%)
C [px/mm]	644.98 mm (–5.1%)	608.86 nm (–5.0%)	–

Az eredmények arra utalnak, hogy a három változó közül a mikroszkóp ismertnek tekintett kalibrációs tényezője a legpontatlanabb.

6. HOLOGRAFIKUS LEMEZEK MINTAALKOTÁSA

A következőkben a Gerchberg-Saxton módszer, és a konjugált gradiens módszer által generált diffrakciós mintázatok Fraunhofer interferenciaképei láthatóak. Az előhívott filmszalagok fémezüst kristályai a réeső fényt nagyrészt visszaverik, az ezüstmentes mátrix régió pedig nagyrészt átengedi a fényt. Így a lemez egyszerre használható reflexiós és tranzmissziós diffrakciós elemként is. A kutatás az egyszerűbb sugárvezetés érdekében a tranzmissziós aspektussal foglalkozott.



4. ábra. Kívánt intenzitásmintázatok a) és c), valamint valós lemezek által alkotott képük b) és d).

A lemez amplitúdómodulációs jellegéből következően a kirajzolódó interferenciakép óhatatlanul tartalmazza az 1-es és -1 -es diffrakciós rendet is, ami egy középpontos tükrözés formájában jelenik meg. Ez a nulladik rend (geometriai sugárvezetés) körül szintúgy szimmetrikus képek esetében nem zavaró, általános esetben azonban nem kívánatos. Ezt fázismodulációs lemezekkel lehetséges elkerülni. Habár kísérletek történtek a filmszalag fázismodulációs átalakítására, a filmszalag intrinzikus tulajdonsága – a mátrixszuszpenziós jelleg – miatt az áttetsző fémkomplexek átérésztés helyett ugyancsak szórják a fényt.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A grafikus DOESim program segítségével könnyen, programozási tudás nélkül generálhatók és validálhatók amplitúdó-, és fázismodulációs diffrakciós elemek. Ezek segítségével tetszőleges hullámfront állítható elő a végtelen távol felvett síkban, és a hullámfront alakulása a terjedés során egzakt megoldások képében végigkövethető. Az analóg fényképezésen alapuló kvázi-fotolitográfias előhívás segítségével amplitúdómodulációs diffraktív optikai elemek rendkívüli egyszerűséggel előállíthatóak meglepő funkcionalitás és pontosság mellett. A módszer egyszerűsége és gyorsasága révén „rapid-prototyping” feladatokra is alkalmas.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Kitartó és magasvonalú támogatásáért, valamint mélyremenő szakmai meglátásaiért köszönöm Dr. Antal Ákosnak, a MOGI tanszék egyetemi adjunktusának. Szakmai tudásáért és tapasztalainak megosztásáért köszönetet szeretnék mondani Dr. Bokor Nándornak, a Fizika tanszék egyetemi docensének. Szintén köszönettel tartozom Dr. Lázár Armand és Dr. Szilágyiné Dr. Kertész Júlia felé kémiai tudásuk és felszerelésük megosztásáért.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Turunen J., Wyrowski F. *Diffractive optics for industrial and commercial applications*. 1997
- [2] Orosz B. *Diffraktív optikai elemek modellezése és kísérleti vizsgálata kézzegyzet*. 2025
- [3] Huygens C. *Traité de la lumière*, Dunod, 1992. ISBN 9782100014002
- [4] Khare K. *The Angular Spectrum Method*. Fourier Optics and Computational Imaging. Szerk. Khare K., Butola M., Rajora S. Chapter on angular spectrum and diffraction theory. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd., 2015, 145–151. ISBN 9781118900345
- [5] O’Shea D. C., Suleski T. J., Kathman A. D., Prather D. W. *Diffractive Optics: Design, Fabrication, and Test*, SPIE Press, 2004.
- [6] Gerchberg R. W. *A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures*. Optik, 1972, 35, 237–246.