

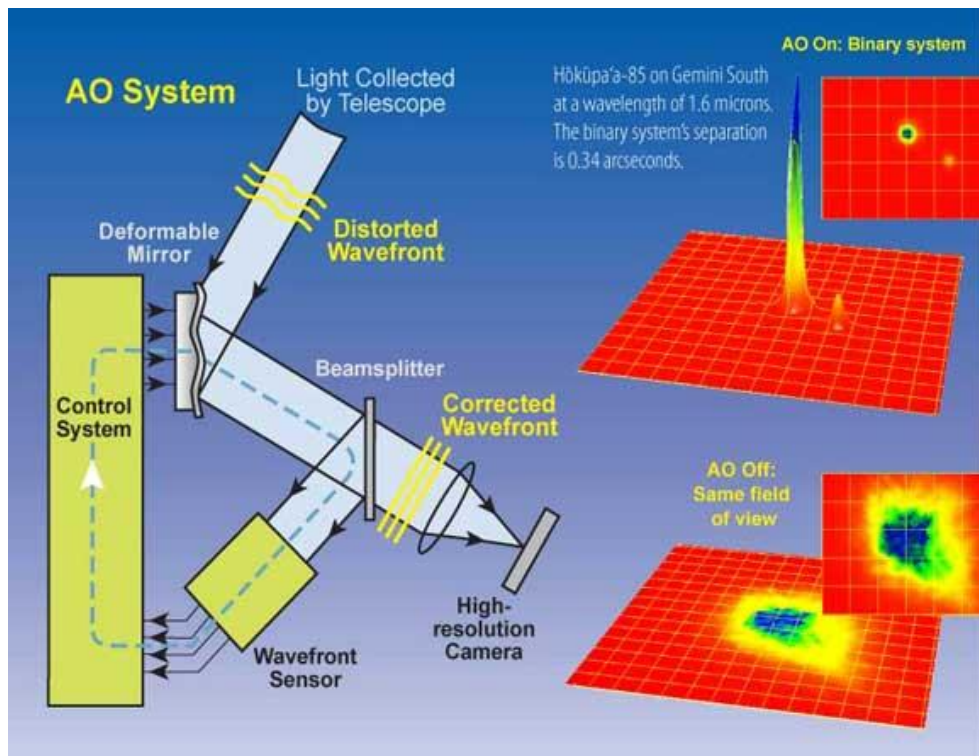
Lézernyaláb vizsgálata Shack-Hartmann hullámfrontszennozorral

2016.09.20, BME AFT, Barócsi Attila, Erdei Gábor

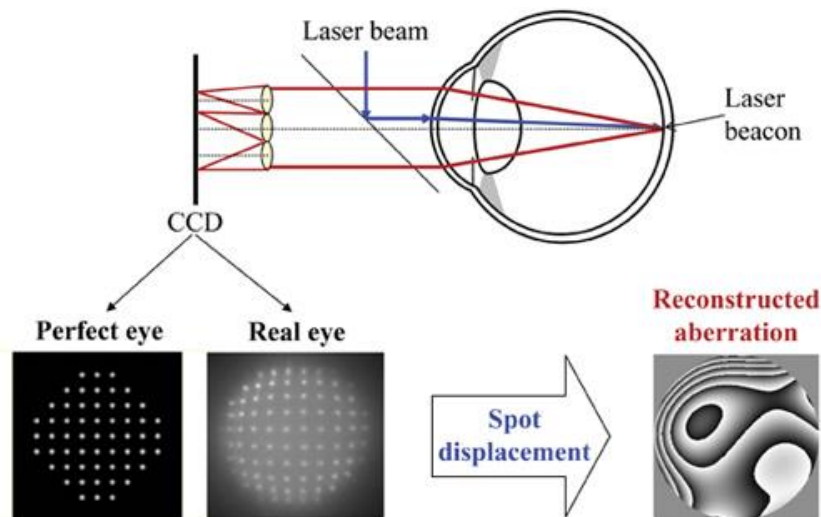
Bevezetés

Elektrodinamikából jól ismert fényterjedési formák a sík- és gömbhullám (vagy más szóval pontforrás). További fontos hullámoptikai modell a lézerrezonátorok leggyakoribb (TEM_{00}) módusa terjedésének leírására kiválóan használható ún. Gauss-nyaláb, amely az előbbiekkal együtt szintén megoldása a hullámegyenletnek. Optikai műszereken (ld. távcső, mikroszkóp stb.), vagy természetes törésmutató-eloszlásokon (pl. földi légkör vagy az emberi szem) keresztülbocsájtva ezen idealizált sugárzások fázisfelületei általában eltorzulnak. Ezt a jelenséget hullámfront-aberrációnak nevezzük, amely megzavarja a nyalábterjedést (pl. növekszik a divergencia), illetve elrontja a képalkotás minőségét.

A korszerű optikai műszerektől elvárt mérési pontosság megköveteli a szinte tökéletes, aberráció-mentes működést, amelyhez nélkülözhetetlen, hogy az eszközökön áthaladó fény hullámfrontját precízen, gyakran valós időben lehessen kvantitatíve vizsgálni. Laborkörülmények között erre alkalmazhatók különböző interferométerek (pl. nyíró, Fizeau, Michelson stb.), de ezek működése erősen rezgésérzékeny és relatíve lassú. Ipari, vagy bármely egyéb, kevésbé kontrollálható környezetben történő hullámfront aberráció mérésére alkalmas eszköz az ún. hullámfrontszennozor. Alkalmazási területe széleskörű: távcsőtükörök adaptív/aktív beállításától kezdve az emberi szem képalkotási hibáinak vizsgálatáig terjed (1. és 2. ábra). Mivel az eszköz nem tartalmaz saját fényforrást, ezért lézerek finomhangolására is kiválóan alkalmas (ezt a legtöbb interferométerrel nem lehet megtenni).



1. ábra. Hullámfrontszennozor alkalmazása csillagászati távcső adaptív tükreinek vezérléséhez. (Inst. of Astronomy, Univ. of Hawaii, Luise Good)

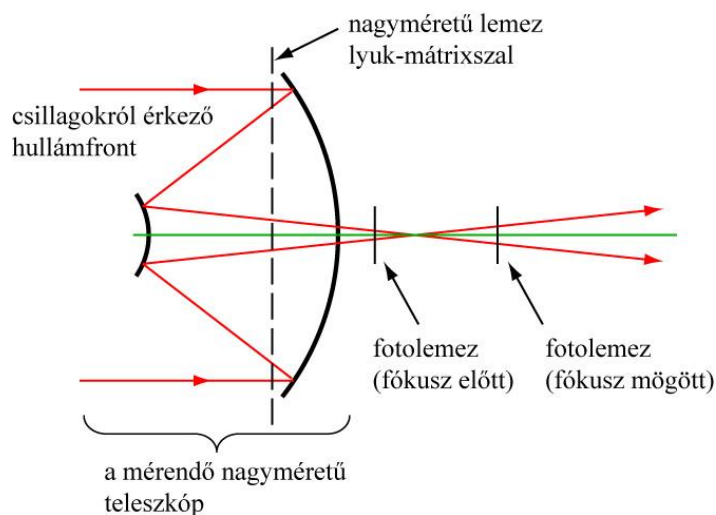


2. ábra. Emberi szem hullámfront-aberrációjának mérése hullámfrontszennorral. (Advanced Physiological Optics Lab., Univ. of Rochester)

Történeti áttekintés

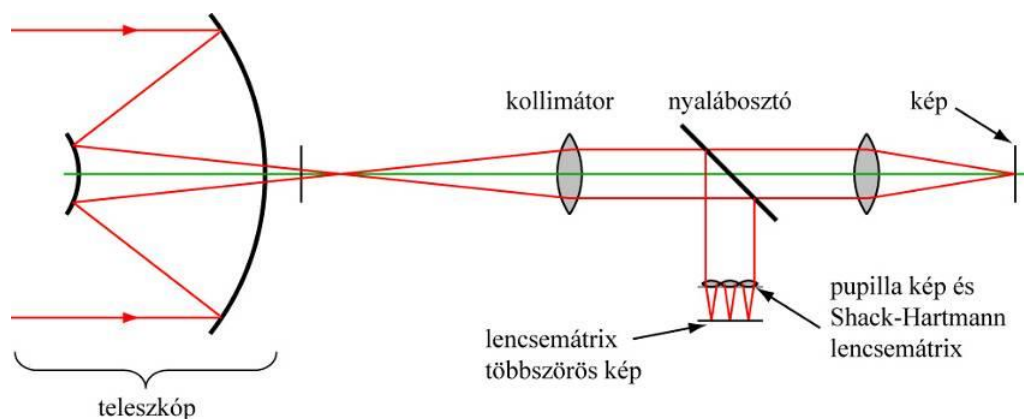
A Shack-Hartmann hullámfrontszennor egy konkrét probléma megoldásából fejlődött ki. Az 1960-as években az amerikai légierő a következő feladat elé állította az Arizonai Egyetemhez tartozó Optikai Tudományos Központot (Optical Sciences Center, OSC): hogyan javíthatóak a műholdak által a Föld felszínéről készített képek? Az atmoszféra ugyanis jelentősen korlátozza mind a képminőséget, mind az expozíciós időt. Dr. Aden Mienel az OSC akkori igazgatója a következőt javasolta: mérjék meg mind az atmoszféra, mind a rögzítendő kép optikai átviteli függvényét (Optical Transfer Function, OTF) majd osszák el a kép OTF-et az atmoszféráéval. A megoldáshoz az kellett, hogy a két OTF-et egyidejűleg lehessen felvenni az expozíciós idő alkalmas megválasztásával, úgy, hogy időbeli átlagolás helyett rögzíteni tudják a pillanatnyi atmoszferikus aberrációkat. A mért hullámfronthiba az expozíciós idő alatt $\lambda/10$ alatt kellett maradjon (λ jelöli a hullámhosszat vákuumban), ami $\sim 1/60$ s expozíciós időt adott. Mienel csillagász volt és a standard Hartmann-eljárást alkalmazta (3. ábra), amelyben nagyméretű mérendő csillagászati teleszkóp apertúrájában lyukmátrixot tartalmazó panel helyezkedett el. Ez a teleszkóprendszeren a csillagokról érkező, lyukméretű nyalábokat engedett át. A fókuszon belül és kívül fotólemez helyezkedett el úgy, hogy az egyes nyalábok egymástól jól elváljanak. A panel minden egyes nyílása létrehozta a maga képét a csillagokról. Két képet készítve egymástól ismert távolságra lévő lemezekre és megmérve a képek középpontját („súlypontját”), az egyes nyalábok követhetőek. Ezekből Hartmann a teleszkópok jóságát tényezőjét számolta ki, de más adatok is megkaphatók.

Mienel nem tudta az apertúrát a fenti módon kitakarni, ezért azt javasolta, hogy a távcső kimenő nyalábját az okulár mögött kollimálják és ide helyezzenek nyalábosztót, majd az osztott nyaládba helyezték a lyukmátrixot a pupilla képének helyén. A képet vidikon cső jelenítette meg (ez egy a CCD és a képerősítők előtti időkből használatos kamera). Két probléma adódott: egyrészt az nyalábok intenzitása kicsi volt, másrészt az elmosódott folt középpontjának meghatározása nem volt elegendően pontos



3. ábra. Korai Hartmann teszt optikai sémája.

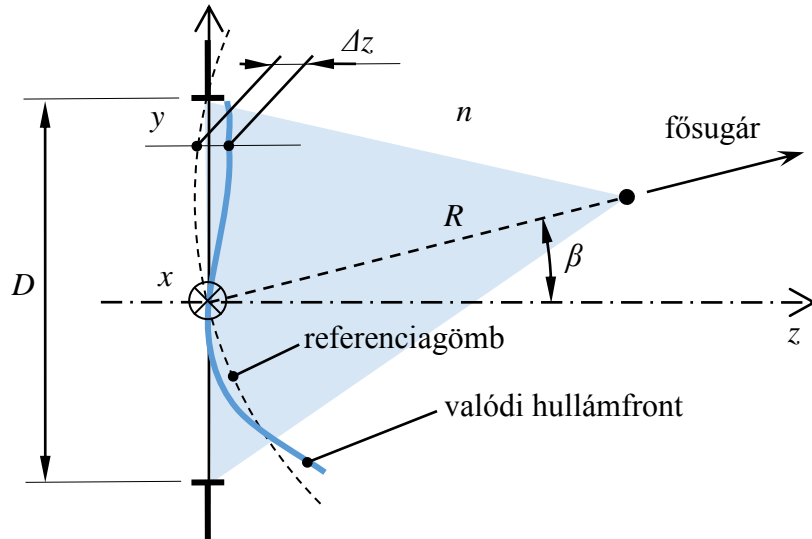
Az optimális paraméterek (lyukméret, képtávolság, szögmérési pontosság) meghatározásához tanulmány készült, amelyben Dr. Roland Shack is részt vett, és arra a következtetésre jutott, hogy az egyetlen működőképes megoldás, ha a nyílásokat lencsékre cserélik. Ezzel először adódott lehetőség a hullámfronthiba mérésére. Az első Shack-Hartmann szenzor elrendezése a 4. ábrán látható.



4. ábra. Az első Shack-Hartmann szenzor optikai sémája.

Elméleti alapok

A torzult (aberrációkkal terhelt) hullámfrontok kvantitatív minősítését a gyakorlatban statisztikai módszerekkel és speciális polinomokkal végzik. A hullámfront alakját jellemző mérőszámokat (hibákat) egy referencia-felülethez képest adják meg, ld. 5. ábra, ami az ideális hullámfrontot reprezentálja. A referencia-felület lehet gömb vagy sík, melynek meghatározásakor általában a valódi, aberrált hullámfrontra legjobban illeszkedő (best-fit) alakot választják. Könnyen belátható, hogy az aberráció mértéke függ még a fénynyaláb átmérőjétől (D) is. Bármilyen mérőszámot használunk tehát a hullámfront jellemzésére, annak megállapítása mellett szükség van még a referencia-felület görbületi sugarának (R), dőlésszögének (α , β), a nyalábot átbocsátó nyílás (apertúra) átmérőjének (D), valamint a vizsgálati hullámhossznak (λ vákuumban) a megadására is.



5. ábra. Torzult hullámfront alakjának viszonyítása egy referencia-felülethez.

A hullámfront-aberráció mérőszáma az optikai úthosszkülönbség (Optical Path Difference, *OPD*), amely (némi leegyszerűsítve a számolást) az alábbi képlettel kapható meg:

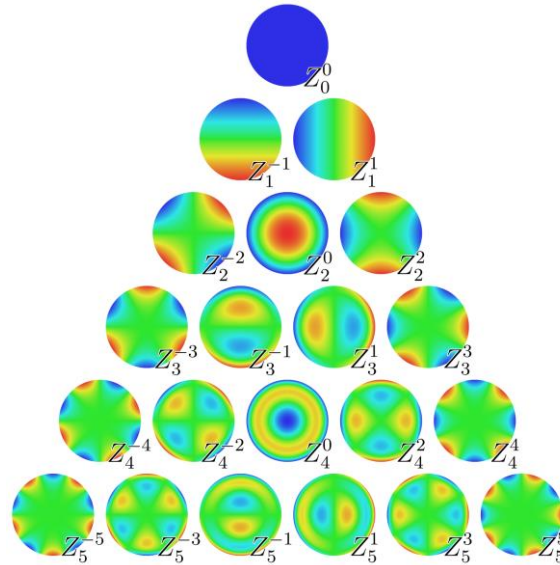
$$OPD(x, y) = n \cdot \Delta z(x, y) \quad (1)$$

Az *OPD* akkor pozitív, ha egy adott (x, y) pontban nagyobb a z -koordinátája mint a referenciafelületnek (a z -irány általában a fényterjedést jelenti), ideális (aberráció-mentes esetben) pedig $OPD = 0$. Miután jól definiált hullámfrontjai általában csak (de nem mindig, ld. pl. csillagfény) monokromatikus fényforrásoknak vannak, az *OPD* mérőszáma rendszerint az adott sugárzás hullámhossza (λ), vagy néha a mikrométer (μm). Amennyiben az aberráció kismértékű, elegendő a második momentumával jellemezni, azaz a négyzetes középértékkel (root-mean-square RMS):

$$RMS\ OPD = \sqrt{\frac{1}{W} \sum_{i=1}^n w_i \cdot OPD_i^2} \quad ; \quad W = \sum_{i=1}^n w_i \quad (2)$$

ahol i végigfut a hullámfront összes megmért (x, y) pontján, w pedig ezen pontokban mérhető fényintenzitásnak megfelelő súlyozó tényező (homogén nyalábnál konstans az értéke). Az *RMS OPD* addig használható a hullámfront minősítésére, amíg értéke kicsi, jellemzően kisebb mint $0,14\lambda$. $RMS\ OPD < 0,07\lambda$ alatt azt mondjuk, hogy a nyaláb diffrakció-korlátozott, azaz a hullámfront hibáinak már nincs érzékelhető hatása a fényterjedésre, azt teljes mértékben a nyaláb szélét meghatározó apertúrán fellépő diffrakció határozza meg.

Amennyiben $RMS\ OPD > 0,14\lambda$, akkor már figyelembe kell venni a hullámfront alakját is, amit egy speciális sorfejtéssel valósítanak meg: a hullámfrontot mint háromdimenziós felületet ún. Zernike-polinom formájában sorba fejtik (ld. 6. ábra), és az egyes aberrációkat a polinom-együtthatókkal jellemzik. A módszer bonyolultsága miatt ennek tárgyalásától itt eltekintünk.

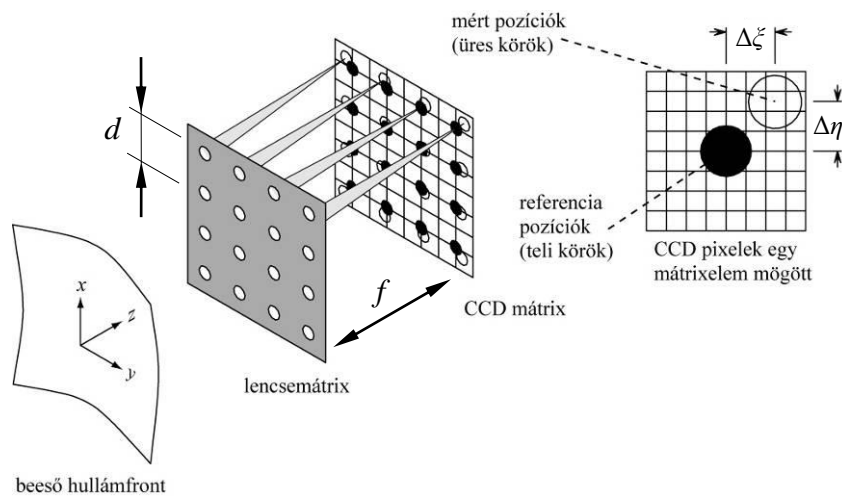


6. ábra. A Zernike-polinom első 21 rendje (wikipedia). Z_{00} felel meg az eltolásnak, Z_{11} a dőlésnek, Z_{02} a defókusznak, Z_{22} az asztigmatizmusnak, Z_{13} a kómának, Z_{04} a szférikus aberrációnak stb.

Az 5. ábrán látható x - y sík a mérés kivitelezésének helye. Ide kell tennünk műszerünket, ami a továbbiakban egy Shack-Hartmann hullámfrontszenzor lesz.

A Shack-Hartmann hullámfrontszenzor működési elve

A Shack-Hartmann hullámfrontszenzor működése a 7. ábrán követhető. (A fény a z -tengely irányában terjed.) A szenzor mikrolencséből álló mátrixot tartalmaz, melynek fókusz síkjában pixelezett CCD (vagy CMOS) képérzékelő helyezkedik el. Mivel a lencsék mérete nagyon kicsi (esetünkben $d = 153 \mu\text{m}$) a fókusz távolságukhoz képest ($f = 5,0 \text{ mm}$) a lencsék paraxiális tartományban működnek. Ennek köszönhetően nem okoznak további hullámfronttorzulást (azaz aberrációt), mélységélességük igen nagy (vagyis nem érzékenyek a hullámfront lokális görbületére), valamint fókuszfoltjuk ideális diffrakciókorlátozott Airy-folt. Ez a fókuszfolt akkor esik a mikrolencsék optikai tengelyére, ha a lencsét érő hullámfront pont merőleges a tengelyre. A hullámfront lokális dőlésszöge eltolja a lencsészek fókuszfoltját ebből a középhezletből, a kapott elmozdulásokból pedig a hullámfront meredeksége kiszámolható.



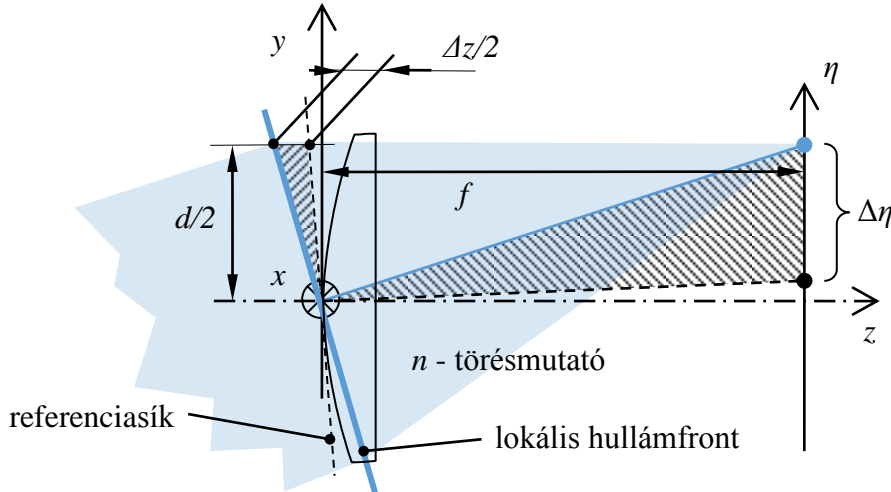
7. ábra. A Shack-Hartmann szenzor működési elve.

A hullámfrontszenzor a hullámfrontdőlést úgy határozza meg, hogy minden egyes lencsére megméri a fókuszfolt aktuális pozícióját $(\Delta\xi, \Delta\eta)$ egy kvázi tökéletes referencia-hullámfronttal (általában síkhullám) felvett fókuszfolt-pozíciókhoz képest (ξ_0, η_0) . Az általunk alkalmazott szenzor gyárilag kalibrált ilyen módon, azaz a hullámfrontméréshez nem szükséges referencianyalábot is mérni; úgy tekinthetjük, mintha a referencia-felületünk a szenzor síkjába eső hullámfront lenne (ez az ún. abszolút fázis mérés).

A hullámfrontdőlés mérésekből előáll a hullámfront 2D deriváltja (gradiens-térkép), amiből integrálással megkapjuk a valódi hullámfrontot (hullámfront-rekonstrukció). Ennek menete a következő. Első lépésben súlypontkereséssel meghatározzuk a fókuszfoltok helyzetét. A 8. ábra koordináta-rendszerében x, y jelöli a laterális koordinátákat a mikrolencsék síkjában, míg ξ, η a lencsék fókuszsíkjában. Az intenzitás-eloszlás középpontja (súlypont) tehát:

$$\Delta\xi = \frac{\sum_{i_{\min}}^{i_{\max}} \sum_{j_{\min}}^{j_{\max}} I(\xi_i, \eta_j) \cdot \xi_i}{\sum_{i_{\min}}^{i_{\max}} \sum_{j_{\min}}^{j_{\max}} I(\xi_i, \eta_j)} - \xi_0 \quad \text{és} \quad \Delta\eta = \frac{\sum_{i_{\min}}^{i_{\max}} \sum_{j_{\min}}^{j_{\max}} I(\xi_i, \eta_j) \cdot \eta_j}{\sum_{i_{\min}}^{i_{\max}} \sum_{j_{\min}}^{j_{\max}} I(\xi_i, \eta_j)} - \eta_0, \quad (2)$$

ahol i, j végigfut az egy lencse alatt elhelyezkedő képdetektor-pixelesen.



8. ábra. A hullámfront-meredekség értelmezése egy mikrolencse esetén.

Ezután a hullámfront meredeksége hasonló háromszögek alapján megkapható (ld. sraffozott területek a 8. ábrán):

$$\frac{\Delta OPD_x(x, y)/n}{d} = \frac{\Delta\xi}{f} \quad \text{és} \quad \frac{\Delta OPD_y(x, y)/n}{d} = \frac{\Delta\eta}{f} \quad (3)$$

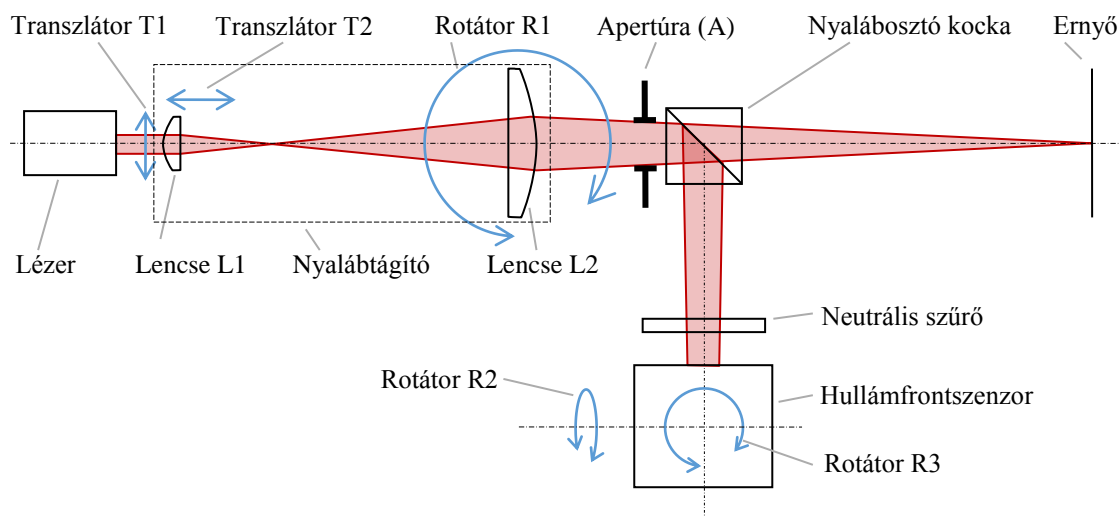
Végül a hullámfront rekonstruálása a legegyszerűbb esetben az elemi (zóna) meredekségek lineáris integrálásával történik. Ha a beeső hullámfront „A” pontját választjuk referenciának ($OPD = 0$), akkor a hullámfront tetszőleges „B” pontjában az OPD értéke:

$$OPD(x, y) = \int_A^B grad(OPD) dr \approx \sum_{p,q} [\Delta OPD_x(x, y)_{p,q} + \Delta OPD_y(x, y)_{p,q}] = n \cdot \frac{d}{f} \sum_{p,q} [\Delta\xi_{p,q} + \Delta\eta_{p,q}], \quad (4)$$

ahol \mathbf{r} helyvektort jelöl, az integrálás (szummázás) pedig A és B közötti tetszőleges görbén történik. Valójában a szenzor ennél bonyolultabb (iterációs) algoritmust használ, ugyanis a fenti eljárás némileg zajos eredményt ad. A másik (választható) megközelítés, hogy nem zónánkénti rekonstrukciót végzünk, hanem az adatokra közvetlenül Zernike-polinomot illeszt.

A mérési elrendezés

A hullámfrontszenzoros mérés elrendezése a 9. ábrán látható. A He-Ne lézer ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$) nyalábjá után alkalmazott Kepler-távcső nyalábtágítóként funkcionál annak érdekében, hogy homogén módon tudjuk kivilágítani a szenzor felületét. A T1, T2 transzlátorokkal és R1 rotátorral különböző egyszerű aberrációk szimulálhatók. Mivel esetünkben a kalibrált szenzor referencia-felülete maga a szenzorsík, a következők tekinthetők aberrációnak, azaz hullámfront hibának: dőlés (T1), defókusz (T2), asztigmatizmus (R1). A nyalábosztó kocka azért szükséges, hogy a beállított aberrációk fókuszfoltra gyakorolt hatását nyomon tudjuk követni az ernyőn (praktikusan a labor falán). A neutrális szűrő a lézer fényét gyengíti le annyira, hogy a szenzort ne vigyük telítésbe. A szűrő nélkül ne világítsunk a mérőműszerbe! Az R2, R3 rotátorok pedig azért szükségesek, hogy a hullámfrontszenzort (ezzel együtt a referencia-felületet) a fénynyalábra merőlegesre tudjuk állítani.



9. ábra. A mérési elrendezés vázlatja.

Mérési feladatok

1. Szoftver használatának megismerése

.

2. Ideális síkhullám beállítása

.

3. Dőlés beállítása, mérése, ellenőrzése, méréstartomány/pontosság meghatározása

.

4. Lencse (L2) fókusztávolságának megmérése dőlés alapján

.
5. Defókuszt beállítása, hullámfront görbület megmérése

.
6. Hullámfrontmérés kisebb apertúrával

.
7. PSF vizsgálata ideális és defókuszált esetben

.
8. Asztigmatikus hullámfront beállítása, fókuszfoltok vizsgálata, távolságuk meghatározása

.

Ellenőrző kérdések

Váolja a Shack-Hartmann hullámfrontszensor működését ábrával és rövid magyarázattal.

Mik az előnyei a hullámfrontszensoros mérésnek az interferometrikus módszerekkel szemben?

Lehet-e olyan hullámfrontot mérni hullámfrontszennorral, amelyben fázisugrás (lépcső) van?

Hogyan definiáljuk a hullámfront aberráció mérőszámát (*OPD*) és ezt statisztikailag mivel jellemezzük?

Mi a szerepe a referencia-felületnek hullámfrontméréskor?