

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki
Kar
Elektrofizika Intézet (EFI)



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

LÉZERNYALÁB OPTIKAI MINŐSÉGÉNEK VIZSGÁLATA A LÉZER FÓKUSZFOLTJÁNAK SZOFTVERES ELEMZÉSE SEGÍTSÉGÉVEL

Szerző(k): Benkő-Hadaró Márton
mérnökinformatikus BSc. szak, II. évf.

Lovász Balázs
villamosmérnök BSc. szak, II. évf.

Kvala Dávid
villamosmérnök BSc. szak, II. évf.

Konzulens: Dr. habil. Rácz Ervin PhD.

Egyetemi docens

Budapest 2023

**Lézernyaláb optikai minőségének vizsgálata a lézer
fókuszfoltjának szoftveres elemzése segítségével**

**Examination of the optical quality of a laser beam using
software analysis of the laser's focal spot**

Budapest, 2024.05.25.

Tartalomjegyzék:

1. Motivációs Bevezető.....	3.
2. Bevezetés.....	4.
2.1. Lézertechnológia kialakulásának története.....	4.
2.2. Lézertechnika elméleti háttere és lézerek osztályozása.....	6.
2.3. Lézerek gyakorlati alkalmazásai.....	11.
3. Szoftver leírása	
3.1. A program célja, funkciója, feladata.....	13.
3.2. A felhasznált eszközök bemutatása.....	14.
3.3. Részletes programleírás.....	17.
3.3.1. A képfeldolgozás menete.....	18.
3.3.2. Fókuszba eső energiatartalom meghatározása.....	20.
4. Összesítés és konklúzió.....	21.
5. Függelék, nyilatkozat a saját eredményről.....	22.
6. Hivatkozásjegyzék.....	24.

1. Motivációs bevezető

A lézertechnológia egy rendkívül színes és szerteágazó alkalmazott tudományág, amely az utóbbi néhány évtizedben látványos fejlődésen ment keresztül. Eme fejlődés ajtót nyitott a felhasználási lehetőségek garmadájának. Csapatunkat mindez megihlette, és olybá tűnt, hogy gyermekkori ábrándjaink és tudományos-fantasztikus olvasmányélményeink elevenednek meg a szemünk előtt. Ily módon vált a hobbinkká a lézertechnika területén megjelenő ismeretterjesztő igényvel megírt cikkek olvasása. Mivel egészséges érdeklődésünket hamar kimerítették a hírportálok és magazinok hasábjai, ezért úgy gondoltuk, hogy ildomos volna szakcikkeket és tanulmányokat olvasni a témában.

Mint említettük, eme alkalmazott tudománynak széles felhasználási lehetőségei vannak. Ezek az alkalmazási lehetőségek számos más tudományterületet érintenek, ezért olvasmányélményeink gyarapodásával egyre inkább arra a következtetésre jutottunk, hogy valamilyen formában fel kellene dolgozni ezt a hatalmas ismeretanyagot. Miután tüzetesen megvizsgáltuk a lehetőségeinket, tapasztaltuk, hogy meglehetősen nagy fába vágtuk a fejszénket.

Ennek tudatában választottuk a megosztott munkát, és a projektszemléletet, hiszen a kutatómunkák döntő többsége is csapatmunka. Az egyetem keretrendszerében lehetőségünk nyílt a hobbinkat szakcikké konvertálni, ezért döntöttünk úgy, hogy konzulenszt keresve nekilátunk a munkának. Fél év adatgyűjtés és különórák előzték meg munkánkat, mielőtt eljutottunk arra a szintre, hogy kísérleteinket és szimulációinkat virtuális papírra vessük.

A mostani TDK-dolgozatunkat afféle bevezetőként tudjuk aposztrofálni, amely egy fél éveken átívelő kutatómunka első lépcsőfokaként értelmezhető.

2. Bevezetés

2.1. Lézertechnológia kialakulásának története

Mint azt a motivációs bevezetőnkben is említettük, dolgozatunk egy nagyobb témát fed le, ezért a bevezetőnk is több egységre bontottuk.

Ebben a fejezetben egy tudománytörténeti kitekintést teszünk, melynek keretében bemutatjuk azt a rögzös utat, amely a kvantummechanika bölcsőjétől elvezetett a lézertechnológia megszületéséhez.

A századfordulóig (XIX. vége és XX. kezdete) a fény tanulmányozása a fény viselkedésének vizsgálatára korlátozódott. Ekkortájt már ismeretesek voltak a minket körülvevő természetes fényforrások – sőt, a fáklyák és gyertyák mellett már gázlámpákat és villanykörtéket is alkalmaztak a gyakorlatban, vagyis a mesterséges eredetű fényforrások egész garmadája állt az emberiség szolgálatára –, de nem tudták, hogyan keletkezik a fény. [1]

1900-ban Max Planck a cavity radiator-okat tanulmányozta, amikor megfigyelései alapján összefüggést fedezett fel a fény frekvenciája, a hőmérséklet és az egy „fényfrekvencia sugárzása” között. [3] A lézerfizika bölcsőjének tekinthető Albert Einstein 1916-os sejtése, amely szerint a fotonok serkentik a gerjesztett atomok saját fotonkibocsátását. [4] Majd 1917-ben Einstein tovább merészkedett, és a kvantumelméletéről szóló publikációjában az intenzíven fókuszált fénysugarak jelenségét boncolgatta. [5] Rudolf Ladenburg a stimulált kibocsátás közvetett bizonyítékáról számolt be 1928-ban. [6] A kortárs fizikusok, azonban ezt a hatást negatív elnyelésnek nevezték, és csekély gyakorlati hasznót tulajdonítottak neki, ezért nem tartották fontosnak a felfedezést. [1] Mindeközben, ezzel párhuzamosan Einstein is leírta a stimulált emissziót, mint az abszorpció inverzét, majd később azt vizsgálta, hogy ez a hatás fölhasználható-e a fényező fokozására. Első számítása a sugárzás „stabilitását” bizonyította a mikrohullámú tartományban. [2]

A második világháború alatt, 1940-ben Valentin Alekszandrovics Fabrikant szovjet fizikus azt feltételezte, hogy a gázkisülésben a stimulált emisszió megfelelő körülmények között erősíti a fényt. [7] Néhány fizikus a stimulált kibocsátás felerősítésének lehetőségeit vizsgálta a mikrohullámúnál sokkal rövidebb hullámhosszokon. 1951 nyarán Fabrikant tanítványaival közösen egy szabadalmat nyújtott be az ultraibolya elektromágneses sugárzás rádióspektrumon keresztül történő felerősítéséről, de ötletüknek meglehetősen csekély volt közvetlen hatása a lézerkutatás fejlődésére, még a Szovjetunióban is. [8] 1951-ben Charles H.

Townes ezzel párhuzamosan a tengerentúl felfedezte, hogy a stimulált emisszió mikrohullámú frekvenciákon oszcillálhat egy rezonáns üregben, koherens kimenetet eredményezve.

1954-ben Townes és tanítványa, James Gordon bemutatták az első mikrohullámú mézert. [9] A mikrohullámú mézer továbbfejlesztése mellett néhány fizikus a mézer-elv magasabb frekvenciákra történő kiterjesztésén kezdett elmélkedni, jelesül a milliméteres hullámokra, a terahertz sávra és az infravörös tartományra – mindez három-négy nagyságrendnyi frekvenciaugrást jelent az optikai tartományban. Townes először elutasította az ötletet, de 1957 nyarára meggondolta magát, és vizsgálni kezdte a mézer-elv kiterjesztésének lehetőségeit.

Röviddel az október 4-i Szputnyik kilövése után Townes a Columbia Egyetem egyik doktoranduszával, Gordon Goulddal beszélgetett, akit, mint kiderült, ugyanazok a kérdések foglalkoztatják. A második találkozást követően egymástól független módon találtak rá a megoldásra mindketten. Gould alkotta meg a lézer kifejezést, ahogy egy tervet is a Fabry-Pérot-rezonátor megvalósítására, amit egy jegyzetfüzetben dokumentált, majd ezt a jegyzetet közjegyzői okiratba foglaltatta 1957. november 13-án. Ez a jegyzetfüzet alapozta meg a szabadalom körüli csatát. [1]

Townes összeállt Arthur Schawlow-val, egy korábbi munkatársával, aki optikai spektroszkópiával foglalkozott. Együtt írtak egy részletes értekezést az úgynevezett „optikai mézer”-ről, ami 1958. december 12-én jelent meg a Physical Review hasábjain. [10] Schawlow és Townes egy elpárolgott alkálifém, például kálium, optikai pumpálására összpontosított. Írásukban említést tesznek egy átlátszó, szilárd anyagban lévő szennyező atom optikai pumpálásáról is, de úgy gondolták, hogy eme kísérlet kivitelezéséhez olyan fényforrásra van szükség, amely pontosan illeszkedik az abszorpciós vonalhoz. [1]

Ali Javan a Bell Labs-nál elektromos kisüléssel gerjesztett gáz alkalmazását javasolta, és olyan rendszert álmodott meg, amelyben a kisülés gerjesztette a héliumatomokat, amik energiát adtak át a neonatomoknak, és a neonatomok ennek hatására fényt bocsátottak ki. [11]

Mindeközben Theodore Maiman figyelmének epicentrumába kerültek a rubinkristályok, amelyek felhasználásával egy kompakt mikrohullámú mézert szeretett volna kivitelezni. Ennek a megvalósítását saját méréseivel alá is támasztotta, és megállapította, hogy a rubin fluoreszcencia meglehetősen hatékony. [12] Maiman lézere a következőképpen nézett ki: egy fényvisszaverő henger által lezárt vakulámpa-tekercsbe csúsztatott (kis méretű) rubinrúd alkotta a készülék lelkét. A rubin-alapú lézerét 1960. május 16-án tesztelte, mégpedig oly módon, hogy addig növelte a villanólámpára adott feszültséget, amíg a vörös fény impulzusai élesen világosabbak lettek, és idejük, valamint spektrális profiljuk mutatták a

lézertől várható változásokat. Maiman a Nature-ben publikálta kísérletének nagyon rövid leírását; a teljes leírást csak 1961-ben jelentette meg. [13] [14]

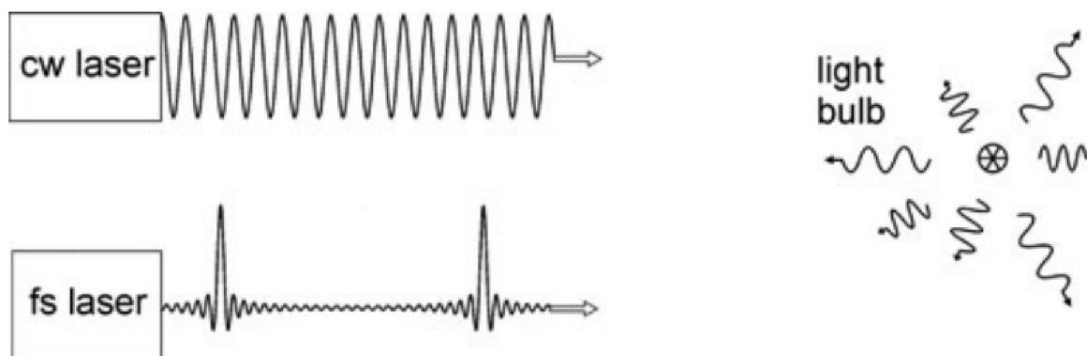
1964-ben megosztott fizikai Nobel-díjjal tüntették ki Charles H. Townes-t, Nyikolaj Gennagyijevics Baszovot és Alexander Prohorovot a kvantumelektronikai kutatásaikért, a lézer-mézer-elven működő oszcillátorok és erősítők megvalósításáért. [2]

A lézer 1960-as évekbeli feltalálása óta nagy fejlődésen ment keresztül [15], de ezeket a fejlődési lépcsőfokokat nem tárgyaljuk tovább ebben a fejezetben, mivel a későbbiekben ismertetésre kerül a lézerek gyakorlatban való alkalmazása, ahol kitérünk számos olyan lézertechnológiára, amelyeket nem ismertettünk most.

2.2. Lézertechnika elméleti háttere és lézerek osztályozása

A történelmi kitekintés után vizsgáljuk meg, hogy mi különbözteti meg a lézert más fényforrásoktól. A lézerek sugárzása eltér a hagyományos optikai fénytől, mivel, mint a mikrohullámú sugárzás, megközelítőleg monokromatikus. [16] Míg egy lámpa korrelálatlan hullámsorozatot bocsát ki a tér minden irányába, addig a lézer koherens, folytonos hullámot vagy koherens impulzussorozatot tud előállítani. [17]

Mindezt remekül szemlélteti az alábbi sematikus ábra:



1. ábra: koncentrált és konvencionális fényforrások közötti különbség [17]

A szemléletes összehasonlítás után – melyben különbséget tettünk a konvencionális fényforrások és a koncentrált fényforrások között – minden adott a lézer fogalmának tisztázásához. A lézerfény nem más, mint stimulált sugár-kibocsátás általi fényerősítés, másképp megfogalmazva, fénykibocsátás indukált emisszióval; erre utal az angol LASER mozaikszó is, aminek feloldása a következő: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. [17]

A lézerfény fogalmának definiálása után vizsgáljuk meg, hogy hogyan állítható elő indukált emisszióval a koncentrált fénysugár, de ehhez elengedhetetlen a folyamat háttérében álló három jelenség ismertetése, nevezetesen a spontán emisszió, az indukált emisszió és az abszorpció.

Ha egy folyékony, szilárd vagy gáznemű halmazállapotban lévő anyag energiabefektetéssel gerjesztett állapotba kerül, ami fotonkibocsátást eredményez, akkor a jelenséget a spontán emisszió fogalma írja le. Eme állapot elérhető fénnyel, melegítéssel, elektromágneses hullámokkal és elektromossággal. Egyatomos gázoknál relatíve egyszerűen szemléltethető a jelenség: az energiabefektetés hatására az atommagoktól jól meghatározott távolságban keringő elektronok eltávolodnak az atommagtól. Említésre méltó, hogy ez nem egy stabil állapot, mivel az energiaminimum elvének megfelelően az atom a legkisebb energiájú állapotra törekszik, vagyis igyekszik visszakerülni az alapállapotba – az alapállapotba való visszakerülés bekövetkezhet spontán módon, akár a gerjesztést előidéző hatás folyamata alatt is. A gerjesztendő anyagra jellemző tulajdonságok függvénye az adott anyag atomjainak, molekuláinak gerjesztett állapotának stabilitása, például bizonyos anyagok gerjesztés hatására a rájuk jellemző hullámhosszokon emittálnak fotonokat. Miután egy gerjesztett atom visszatért az alapállapotába, az atomból egy foton távozik, amely foton energiája ekvivalens a gerjesztett és az alapállapotú atom energiakülönbségével. Mivel az atom energiaváltozása az atommagtól távolodó, majd visszatérő elektronokban mutatkozik meg, ezért a fent megfogalmazott egyenlőség tovább finomítható: a kilépő foton energiája megegyezik a gerjesztett pályára került elektron és alapállapotú pályán lévő elektron potenciális energiakülönbségével. Matematikai formában felírva: $E_2 - E_1 = h \cdot f$, ahol E_2 a gerjesztett, E_1 pedig az alapállapotban lévő elektron energiája, h a Planck-állandó és f az atomból távozó foton frekvenciája. [18]

Ha egy $h \cdot f$ energiájú foton elhalad a gerjesztett állapotban lévő atom mellett, majd az atom ennek hatására visszatér alapállapotába, és eközben azonos tulajdonságokkal bíró fotont emittál az alapállapotba visszatérő atom, mint amilyen tulajdonsággal a folyamatot létrehozó foton rendelkezett, akkor indukált emisszióról beszélünk. Az azonos tulajdonságok alatt pedig azt értjük, hogy a keletkezett foton a terjedési irányában, polarizációjában, fázisában és hullámhosszában megegyezik az őt indukáló fotonnal. [19]

Az atom gerjesztett állapotba kerül, ha egy fotonnal oly módon ütközik, hogy a foton elnyelődik, ekkor a foton az elektronok potenciális energiájává konvertálódik, ezt a jelenséget abszorpciónak nevezzük. [18]

A fentiekben ismertetett jelenségek teszik lehetővé a lézer gyakorlatban történő megvalósítását, és így módon a lézerfény előállítását. Mindezek után minden adott a lézer működési elvének ismertetéséhez.

Egy adott térfogatnyi, gerjesztett gázban kialakulhat a spontán emisszió, és a folyamat során keletkezett fotonok elnyelődnek vagy indukált emissziót hoznak létre. Ha az adott térfogatú gázban a gerjesztett atomok aránya jóval nagyobb, mint az alapállapotban lévőké, akkor a spontán emisszióban keletkezett fotonok hatására nagyobb eséllyel valósul meg az indukált emisszió, és az indukált emisszióban létrejött fotonok pedig nagyobb valószínűséggel eredményeznek újabb indukált emissziót, ekkor jön létre a populáció inverzió. Az imént leírt folyamat által megvalósuló közeget, erősítő vagy aktív közegnek nevezzük – csak ebben valósulhat meg a kívánt fényerősítés. Amennyiben nem tudjuk elérni és fenntartani ezt az állapotot, a lézer gyakorlati megvalósítása nem lehetséges. [18]

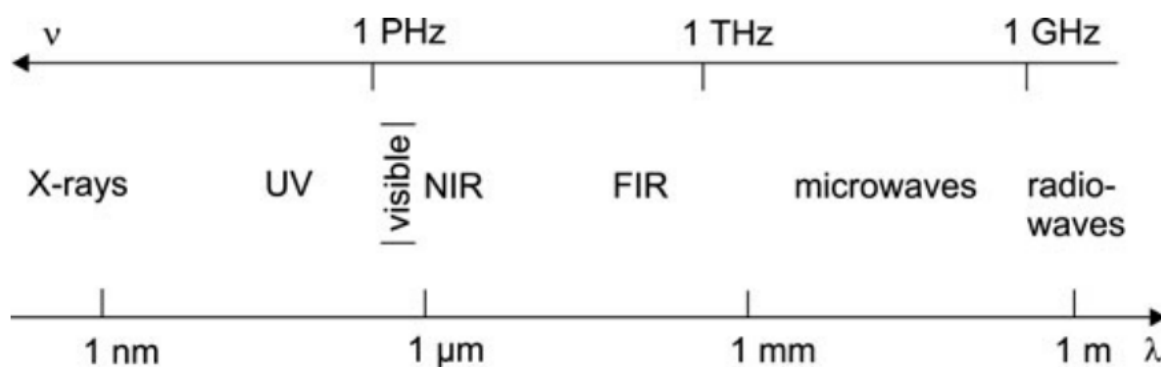
A lézer kivitelezéséhez elengedhetetlen egy optikai rezonátor, ami gondoskodik a fotonok aktív közegbe történő visszavezetéséről, valamint a teljesítmény kicsatolásáról. Két teljesen párhuzamos tükör alkotja az optikai rezonátort: az egyik tükör reflexiója a 100%-hoz konvergál, míg a másiké alacsonyabb. Az eltérő fényvisszaverőképességű tükrök között helyezkedik el az előző bekezdésben ismertetett aktív közeg, mely különböző hosszúsággal bírhat. [19]

Ha egy monokromatikus fénysugár I_0 intenzitással áthalad az aktív közeg x hosszán, akkor a kapott intenzitás $I(x)=I_0 \cdot e^{-\alpha x}$ összefüggéssel számítható, melyben α a közeg abszorpciós együtthatója. Az elektron aktív közegben megtett útja és a fénysugár erőssége között összefüggés van, amelyből az következik, hogy minél nagyobb az elektron által megtett út az aktív közegben, annál jobban erősödik a fénysugár. Ez az úthossz növelhető, de elsősorban nem az aktív közeg hosszának megnövelésével, hanem az optikai rezonátor alkalmazásával. A rezonátor kisebb fényvisszaverőképességgel rendelkező tükre a kimeneti csatoló, mivel ott távozik a lézersugár. Az optikai pumpáláshoz egy másik lézer vagy villanó fényforrás szükséges. [19]

A lézerek működési elvének ismeretében lehetőségünk nyílik a lézerek különféle szempontok, tulajdonságok mentén való csoportosítására. Ahogy a fejezet elején, a lézer és a konvencionális fényforrások szemléletes összehasonlításánál tettünk utalást rá, alapvetően két nagy csoportra oszthatók a lézerek: CW- és IPM-lézer. Ez a csoportfelosztás működési mód

szerinti, és a kettő lézer között az általuk előállított lézersugár folytonossága tesz különbséget. A CW-lézer (continuous wave) permanens lézersugarat állít elő, míg az IMP-lézer csomagokban (impulzussorozatban) bocsátja ki a koherens lézersugarat, ezért nevezik impulzuslézernek [19]. Az 1. ábra nem csupán a konvencionális fényforrások és a lézerek, hanem a működési módjuk szerint megkülönböztetett lézerek által előállított fénysugár közötti különbséget is illusztrálja. A képen az impulzuslézert FS-el jelölték IMP helyett, ami az IMP-lézerek egy speciális fajtája, amit femtoszekundumos impulzuslézernek hívnak. Ahogy a lézerberendezés neve is utal rá, az FS-lézer által előállított impulzussorozatban egyetlen impulzus időtartama femtoszekundumos nagyságrendű ($1\text{fs}=10^{-15}\text{s}$). [17]

A lézereket az általuk előállított fénysugarak hullámhossza szerint is megkülönböztetjük. Számos lézerrendszer ismeretes napjainkban, amelyek hullámhossztartománya 10nm és 500 μm közé esik [18], vagyis ultraviola (UV), látható tartományú, infravörös (IR) és röntgen lézerekről beszélhetünk. [17]



2. ábra [17]

Irányítottság szerint is feloszthatjuk a lézereket. A megfelelő nyílásátmérőknek és a minőségi rezonátoroknak köszönhetően a lézerfény párhuzamos nyalábként terjed az éterben, viszont ez a gyakorlatban csak némi szögeltéréssel valósítható meg, ami a következő összefüggéssel meghatározható: $\delta\theta=\lambda/d$, ahol $\delta\theta$ a szögeltérés, λ a lézer hullámhossza, d a sugárátmérő. Jellemzően $\delta\theta$ értéke az 1mrad-1 μ rad tartományon belül mozog. [19]

A lézerek típusaik és alkalmazásaik szerint is megkülönböztetendők: vannak szilárdtest, félvezető, vegyi lézerek, továbbá folyadék- és gázlézerek.

A szilárdtest lézerek aktív közegét valamilyen kristályos anyag alkotja. Ezen lézerek működhetnek folytonosan és impulzusüzemben is. Utóbbiakra jellemző a nagy energiájú impulzus és a nagy intenzitás. Alkalmazásaik: anyagmegmunkálás, célmegjelölés, holográfia, LIDAR. [19]

A félvezető lézerek képesek a látható fény spektrumában, a közeli UV és a közeli IR tartományokban fénysugarat előállítani, és jellemzően a teljesítményük a nW-mW tartományban mozog. Néhány különleges félvezető lézer képes akár kW-os nagyságrendű kimeneti teljesítményt elérni. [17] Alkalmazásaik: Gyógyászat, CD-, DVD- és Blu-Ray-lejátszók, lézermutatók [19].

A vegyi lézerek energiájukat kémiai reakcióból nyerik. Jellemzően meglehetősen nagy teljesítményű berendezések, melyek roppant komplex felépítésűek: magukban foglalják a kémiai szállító és egy szuperszonikus áramoltató rendszert, valamint egy optikai rezonátort. Ha a kémiai reakció során nagyobb belső energia produkálható az állapotok fölött, mint amekkora a külső energia, akkor a populáció inverzió megvalósítható. [20] Alkalmazásaik: anyagkutató, fegyverkutató [19].

A festéklézerek különlegessége, hogy az aktív közegük folyékony halmazállapotú, ahol jellemzően optikai gerjesztéssel valósítják meg a populáció inverziót. A festéklézer egy másik szempontból is különlegesnek bizonyul, jelesül a lézer hullámhossza hangolható, mivel ki lehet választani a rezonátorban az erősített hullámhosszt. Alkalmazásai: spektroszkópia. [19]

Gázlézereknél a populáció inverzió nagyfeszültségű generátor és vákuumforrás segítségével hozható létre, mégpedig alacsony nyomású gázban, ahol jellemzően rádiófrekvenciás vagy elektromos úton valósul meg a gerjesztés. Alkalmazásaik: szinképelemzés, holográfia, gyógyászat, anyagmegmunkálás. [19]

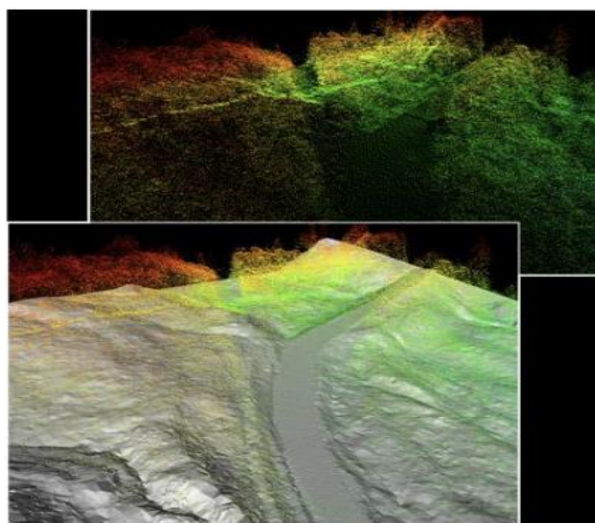
Utóbbi csoportosításunkban a különféle lézer típusok tovább bonthatók altípusokra [17], de ezek nem kerülnek ismertetésre a továbbiakban, viszont eme osztályozásnál említés szintjén kitértünk a lézerek gyakorlatban való alkalmazására is, ami a következő fejezetünkben nagyobb részletességgel kerül boncolásra.

2.3. Lézerek gyakorlati alkalmazásai

Ebben a fejezetben néhány hétköznapi és ipari példát ismertetünk a lézerek gyakorlatban való alkalmazására.

Lézerekkel vagy lézer-alapú technológiákkal rendszeresen találkozhatunk a mindennapokban. Vegyük sorra, hogy mely területeken lehet őket effektíven alkalmazni. Az egyik ilyen példa a CD-lemezek írása-olvasása. Ezek a lemezek mélyedésekkel vannak ellátva, melyek az információt hordozzák. Egy lézerdióda alkalmazásával tudjuk ezt az adatot kiolvasni belőlük, vagy éppen ennek segítségével tudunk adatot írni rá. A visszavert lézerfény akkor detektálható, amikor egy mélyedés kerül a fókuszpontba – ekkor a fénynek az intenzitása csökken, így az információ kiolvasható. [21]

Egy ennél hétköznapiabb példa, a boltokban megtalálható vonalkódolvasó. Itt egy rezgő tükör segítségével a lézer vonal mentén végig pásztázza a vonalkódot. [21] A 655 nm-es hullámhosszon, 5mW-os teljesítményen üzemelő lézer itt is, a CD-olvasóhoz hasonlóan, intenzitás változás hatására kiolvassa az adatokat. [22] Ha már szkennelésnél tartunk, érdemes megemlíteni egy jóval komolyabb rendszert, a LIDAR-t. Ez a rendszer a környezet felszínének felderítésére szolgál, melynek nagy előnye, hogy a tereptől függetlenül, viszonylag nagy pontossággal működik. Nem okoz érdemben kihívást az egyenetlen terep, legyen az őserdő, vagy éppen sűrűn lakott terület. Főként légi felderítésnél használják, de földmérő kollégáink is gyakran alkalmazzák a felszín „szkennelésére”. Gyakorlatban az eszköz egy háromdimenziós pontsűrűséget ad nekünk (3. ábra), amely egy teljes felszintérképet alkot.



3.ábra: LIDAR 3D pontsűrűségéből összetett kép [22]

A technológia fejlődésével már sokkal kisebb tömegűvé váltak ezek az eszközök, így hordozásuk is egyszerűbb. Ennek köszönhetően drónokra is felszerelhetők ezek az eszközök, így akár olyan helyek is feltérképezhetők melyek nem, vagy csak nehezen megközelíthetők. [22] Erre ékes példa az Amazonas-őserdő feltérképezése. A sűrű erdőség miatt nagy nehézségekbe ütközik a feltérképezés, de a LIDAR-rendszer alkalmazásával könnyebben abszolválható a feladat, mint az eddig ismeretes, konvencionális módszerekkel.

Említésre méltó még a CO₂ lézer, amellyel ipari környezetben találkozhatunk. Ez alkalmazás függvényében módfelett nagy teljesítményű, akár 20 kW-os lézerberendezést is jelenthet, amely 10,6μm hullámhosszú lézersugarat képes előállítani. [22] Ezeknek a lézereknek a fókuszfoltja 0,1 és 0,2 mm közé esik, amely meglehetősen nagy, akár 1000kW/cm² felületi teljesítményt jelenthet a gyakorlatban. [22] A CO₂ lézerek alkalmazására remek példa egy zárt kamrában üzemelő robot, amely anyagmegmunkálás feladatkörben végez munkát ezzel a rendszerrel. A nagy szabadsági fokoknak köszönhetően, egy háromdimenzióban könnyen mozgó, pontos gépezetet kapunk, ami régen még csak tudományos-fantasztikum volt, most egy valós és szélesben elterjedt alkalmazás, ami főként az autóiparban és a fémiparban terjedt el.

Kiemelendő, hogy a lézerek alkalmazása több előnnyel jár bizonyos területeken, mint a már meglévő, konvencionális technológiáknak. Például az utóbbi bekezdésben tárgyalt alkalmazás is rávilágít arra, hogy a lézer-alapú megoldásokkal érintkezésmentesen lehet dolgozni, ellentétben a mechanikus eljárásokkal szemben, vagyis szinte anyagtól függetlenül alkalmazhatóak. Ugyanakkor említést kell tennünk a lézertechnológia legnagyobb hátrányáról, mégpedig arról, hogy a lézernyaláb minősége és intenzitása nagyban függ attól a közegtől, amiben halad. [23]

Többek között emiatt is van szükség a lézernyaláb optikai minőségének vizsgálatára. Csatatunk erre dolgozott ki egy módszert, amely keretében a lézer fókuszfoltjának szoftveres elemzése segítségével állapítjuk meg a lézersugár optikai minőségét. Mindez a következő fejezetben kerül ismertetésre.

3. Szoftver leírása

3.1. A program célja, funkciója, feladata

Mindenekelőtt egy megkerülhetetlen fogalom ismertetésre kerül az alábbiakban, amely a továbbiakban kulcsszerepet játszik.

Az ISO 11146 nemzetközi szabvány a lézersugarak méretének és alakjának a mérési módszereit foglalja össze. Ezzel a szabvánnyal pontosan meg lehet határozni azokat a lézer paramétereket, amelyek nekünk fog kelleni. [24]



4.ábra: Folyamatábra a program főbb lépéseiről. [32]

A program funkciója egy lézernyaláb intenzitás-eloszlás görbéjének megrajzolása, valamint a fókuszba eső energiatartalom meghatározása. A bemenet egy képfájl, ami egy lézerfotról készített nyers kép.

A kép beolvasása után az egy kétdimenziós tömbben kerül tárolásra, mert így roppant egyszerű lesz kezelése a továbbiakban. Ezután kezdődik el a képfeldolgozás, mely több lépésre bontható.

Első lépésben a háttér zaj kerül kiküszöbölésre, majd a tisztított képből az ISO 11146 szabványnak megfelelően egy függvény meghatározza a lézer fókuszfoltjának középpontját, vertikális és horizontális átmérőjét. A képfeldolgozási folyamat itt ér véget. Ezek az eljárások a későbbiekben nagyobb részletességgel kifejtésünk tárgyát fogják képezni.

A kép processzálása után meghatározható a középponton átmenő horizontális és vertikális metszet. Ezzel a két vektorral dolgozunk tovább. A vektorok grafikonba rajzolva egy haranggörbét jól közelítő függvényt írnak le, és eme függvény alá eső terület valamint a félértékszélesség alá eső terület hányadosa kerül meghatározásra.

3.2. A felhasznált eszközök bemutatása

A programot a Python nevű, nagy népszerűségnek örvendő programozási nyelvben írtuk. Választásunkat a programnyelv ismerete, valamint még számos előny és hasznos tulajdonság indokolja, ezeket az előnyök kerülnek ismertetésre az alábbiakban.

A nyelv szintaktikája nagyon egyszerű és dinamikusan írott. Ez azt eredményezheti, hogy fejlesztés közben a gépelléssel töltött idő lerövidül. A változók definiálásakor a fordító futási időben automatikusan típust rendel hozzá, és a tömböket is dinamikusan bővíti, ha szükség van rá. A memóriakezelésre sem szükséges időt áldoznunk, hiszen ez is automatikus.

Valamint egy hatalmas előny még a nyelvhez tartozó modulok megléte. A modulok gyakorlatilag egy fájlból állnak, amik Python-metódusokat és -osztályokat tartalmaznak. Egy modul általában egy specifikus feladat végrehajtására lett írva. Modulokat bárki írhat és publikálhat, a legnépszerűbbeket, melyek a programomban is szerepelnek, vagy a felhasználók, vagy egy szervezet által lettek fejlesztve és karbantartva. Ezek természetesen nyílt forráskódúak.

A modulok elérhetőek letöltésre a pip nevű csomagkezelő szoftverrel. Ide bárki feltölthet bármit, úgyhogy használata rejt magában némi kockázatot, de a nagyobb modulok nem tartalmaznak vírust, mivel mindig naprakészek, vagyis frissítve vannak. [25]

A modul az import paranccsal beemelhető a saját kódunkba, és a benne található függvényeket és osztályokat korlátok nélkül példányosíthatjuk, meghívhatjuk és még módosíthatjuk is.

A következő bekezdésekben ismertetjük a kódunkhoz felhasznált csomagokat.

A Numpy csomag egy kötelező bővítmény a programunkba, ha többdimenziós tömböket és mátrixokat akarunk hatékonyan kezelni tudományos és adatelemzési szempontból. A modul saját tömb adattípust tartalmaz, amelyhez még társul egy matematikai függvényekből álló kiegészítés is, amik meghívhatók az előbb említett tömbre. Ezek a matematikai függvények remekül vannak optimalizálva. Tartalmazza az alap mátrixműveleteket (mátrix és skalárszorzat), statisztikai műveleteket (átlag, szórás), Fourier-transzformációt, rendezéseket és kiválasztásokat (maximum kiválasztás) – amik a programunkban is alkalmazásra kerültek – de ezen felül mást is tartalmaz a modul, ami nem kerül ismertetésre. [26]

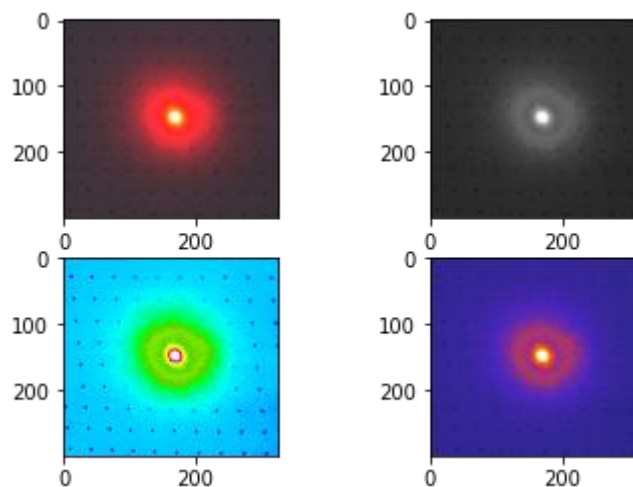
```
array([[56, 56, 56, ..., 56, 55, 55],
       [56, 56, 56, ..., 56, 56, 55],
       [56, 56, 56, ..., 56, 56, 55],
       ...,
       [55, 56, 57, ..., 53, 53, 53],
       [55, 56, 57, ..., 53, 53, 53],
       [55, 56, 57, ..., 54, 53, 53]], dtype=uint8)
```

5.ábra: A bemeneti kép eltárolása egy Numpy kétdimenziós tömbben. Egy elem egy pixelt reprezentál.

[33]

A Matplotlib egy rendkívül fontos csomag a vizualizáció szempontjából. Készíthetünk vele különböző grafikonokat, vonaldiagrammokat, hisztogramokat, háromdimenziós grafikonokat és még képeket is meg tudunk jeleníteni a segítségével. Ezek a kirajzolások lehetnek statikusak vagy interaktívak. Ha interaktív, akkor a grafikonba tetszés szerint beleközelíthetünk, mozgathatjuk és frissíthetjük. Magas szintű testreszabás is lehetséges, a pontok és vonalak stílusától, a tengely feliratokig, sőt a kép manipulációjára (forgatás, körülvágás) is ad lehetőséget. A modul által készített képek és grafikonok egy gombnyomással letölthetők. A Matplotlib kompatibilis a Numpy tömbökkel, ami igen kézenfekvő számunkra, ugyanis emiatt egyszerűen lehet többdimenziós tömbökből információt kinyerni, majd azokat értelmezni. [27]

A bemeneti kép kirajzoltatása Matplotlib segítségével. A modullal még színpalettát is definiálhatunk, amikkel egyszerűen értelmezhetjük a képet. A bal felső kép még a feldolgozás előtti bemeneti kép, a többi már fekete-fehérré lett alakítva, majd applikálva lett rá valamilyen színpaletta. Ezt a 6. ábra jól szemlélteti.



6.ábra [34]

A Pillow egy Python képalkotási modul. Lehetővé teszi a különböző képmanipulációs és képfeldolgozási eljárásokat. Ez a modul csak a program elején került alkalmazásra. A kép beolvasására használtuk, illetve, az RGB színcsatornát használó képek fekete-fehérré való átalakításánál. Ez azért fontos, mert így egy pixel nem egy [R,G,B] vektor, hanem egy skalár lesz. A valós feldolgozást más metódusokkal oldottuk meg. [28]

Vitathatatlanul a legfontosabb csomag a projektben a laserbeamsize modul. Ez a modul kifejezetten a lézernyaláb elemzésére lett létrehozva. Valamint igen megbízható, ugyanis mindent a szabvány szerint csinál és MIT licenz alatt áll. [29]

Fejlesztői környezetnek a Visual Studio Code-ba integrált Jupyter Notebookot használtuk. A Notebook használata előnyös a számunkra, mert a kódot különálló, interaktív cellákra lehet szeparálni. A blokkok önmagukban is futtathatók, a bennük levő változók értékei kiirathatók, és a kimenetük eredménye elmenthető. Ez a tulajdonság jelentősen leegyszerűsíti a hibakeresést és a debugolást is. A kódot tartalmazó cellák közé még tehetünk sima szöveget tartalmazó cellákat is, ide tetszés szerint írhatunk megjegyzéseket, vagy akár dokumentációt is.

A Jupyter Notebooknak van online fejlesztői környezete is, aminek a segítségével az interneten keresztül is lehetőség van programozni. A program egy felhő szerveren fut, ahova biztosítva vannak a szükséges erőforrások, mint a memória és a GPU. [30]

A Googlenek is van saját felülete, ami a Jupyter technológiára épül. Itt már alapértelmezetten telepítve van a legtöbb modul, ami szükséges a számunkra. [31]



```
Modulok importálása

import numpy as np
from PIL import Image
import matplotlib.pyplot as plt
import laserbeamsize as lbs

Kép beolvasása

file = "laserSpot.jpg"
path = r"C:\Users\Márton\Desktop\lézerek" + "\\" + file

image = np.array(
    Image.open(path).convert("L")
)
```

7.ábra: Képernyőkép a programról, a VS Code-ba integrált Notebookban [33]

Mint említettük, választásunk azért esett a Pythonra és a modulokra, mert a korábbi tapasztalataink erre predesztinálnak minket, valamint stabilitási és megbízhatósági szempontból is megfelelőek a feladat abszolválására. A Jupyter Notebookot pedig munkánk megkönnyítése miatt használtuk, hogy jobban áttekinthető és nyomon követhető legyen a teljes folyamat.

3.3. Részletes programleírás

Az alábbiakban a program részletesebb működését kerül kifejtésre. Első lépésként a szükséges modulokat és függvényeket importáltuk. Ezt követően a PIL modulból importált Image osztály függvénye megnyitja a felhasználó által előre definiált útvonalú és nevű fájlt. Majd azonnal meghívásra kerül egy másik függvény, ami szürkeárnyalatossá konvertálja. Ez azért lényeges, mert így egy pixelt tudunk számértékkel reprezentálni egy [R,G,B] vektor helyett, így könnyebb lesz kétdimenziós tömbbé alakítani a képünket, és még memória aspektusából nézve is kevesebb tárhelyet igényel. Azért működőképes a modul ebben a szituációban, mert akkor sem küld hibaüzenetet, ha a kép eleve egy színcsatornából áll. Az eredményül kapott Image típusú példány egyből betöltésre kerül a Numpy tömbbe, ez az image nevezetű változó a kódban. A programban fellelhetők olyan cellák, melyek csak a folyamatok nyomkövetése céljából szerepelnek a kódban, például gyakran rajzoltattuk ki a gráfokat, és íratattuk ki a változók értékeit.

```
✓ print(f"""A folt középpontja(indexek): x:{int(x)}, y:{int(y)},
A folt átmérője:
    -horizontális(x): {dx:.2f},
    -vertikális(y): {dy:.2f},
""")
0.8s
A folt középpontja(indexek): x:166, y:143,
A folt átmérője:
    -horizontális(x): 165.32,
    -vertikális(y): 154.71,
```

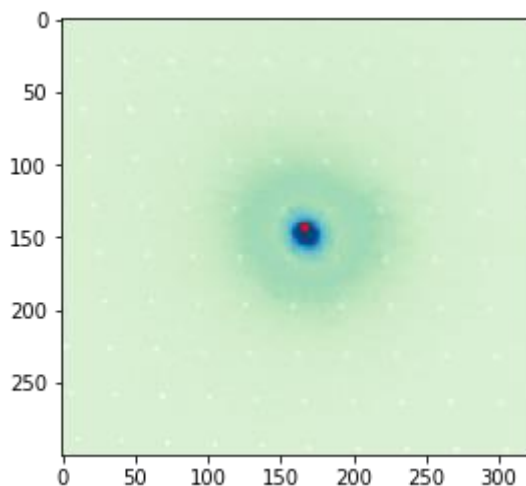
8.ábra: Képernyőkép a programról ahogyan futásidőben kiírja a változók értékeit. [33]

3.3.1. A képfeldolgozás menete

A Laserbeamsize modulból meghívtunk néhány függvényt. Ezek segítségével megkaptuk a lézernyaláb fontosabb paramétereit, mint a fókuszolt középpontjának az elhelyezkedését a képen, valamint a vertikális és horizontális átmérőit. Ez a modul teljesen az ISO 11146 szabványon alapszik, tehát nyugodtan feltételezhetjük, hogy a kapott értékek pontosak lesznek.

Az első lépésben a háttérzajt elimináltuk. Ez azért fontos, mert a kiugró értékek és magas pixelintenzitással rendelkező, nem statikus háttérzaj nagy eséllyel befolyásolni fogja a fókuszolt körvonalának detektálását. A háttér levonása is szabvány szerint történik. A kép négy sarkán kijelöltünk meghatározott méretű négyzeteket, amik szabvány szerint egyenként a teljes kép 3,5%-át fedik le. Eme négyzetek pixeleinek vesszük az átlagát és az eloszlását. A teljes képet vizsgálva, annak a pixelnek az értékét 0-ra állítjuk, ami kisebb, mint az átlag + nT * eloszlás értéke, ahol nT a szabvány szerint 2 és 4 közötti értéket vehet fel; a mi esetünkben ez marad az alapértelmezett érték, ami 3.

A háttérzajtól megtisztított képből a laserbeamsize modul egyszerűen elő tudja állítani a lézer fókuszoltjának paramétereit. A bemenetként kapott képen a Numpy matematikai függvényeivel megkeresi a lézer folt középpontjának a tömbön belüli pozícióját. Ez két indexet jelent, amivel már tudunk tovább dolgozni.



9. ábra: Bemeneti kép kirajzoltatása a középponttal együtt feltüntetve. Ezt színpalettát láthatósági okokból választottam. Különösebb jelentősége nincs. [34]

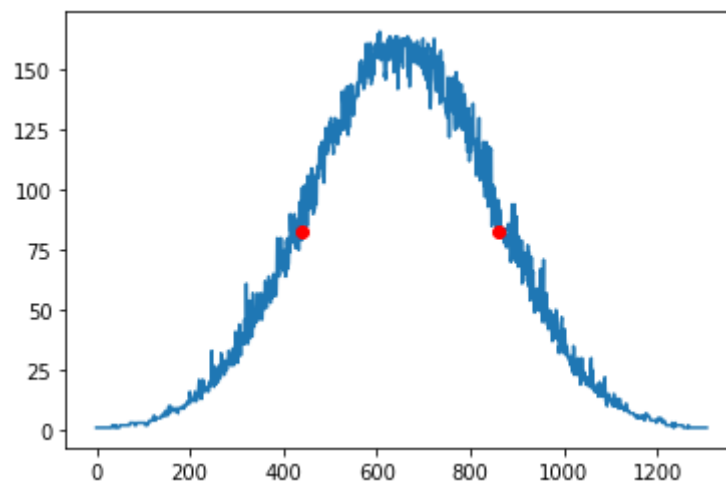
A következő lépés az előbb megtalált pixelt metsző sor és oszlop elmentése külön-külön tömbökbe. Ez a Numpy segítségével ismét roppant egyszerű. Ha ezeket a tömböket kirajzoltatjuk Matplotlib-bel, akkor a lézernyaláb optikai minőségétől függően, egy haranggörbére emlékeztető grafikont fogunk eredményül kapni. Ezután erre a két tömbre hívjuk meg a következő függvényünket.

```
vert = image[y] #vertiaklis metszet  
hor = image[:,x] # horizontalis metszet
```

10. ábra: Metszetek kimentése két külön tömbbe. [33]

3.3.2. Fókuszba eső energiatartalom meghatározása

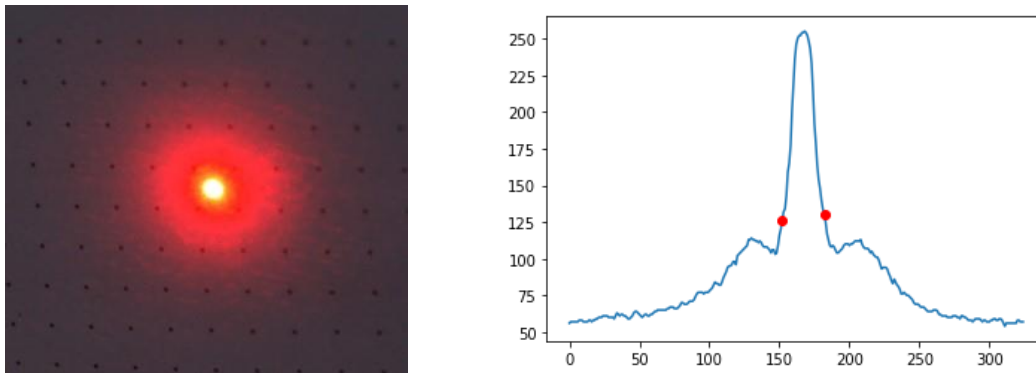
A programban létrehoztunk egy `felErtekMetszet2` nevezetű függvényt, ez a függvény hivatott meghatározni a félértékszélességet. Bemenetként egy tömböt kapott, aminek megkeresi a legnagyobb értékét és indexét is. Ebből az értékből megkapjuk a félértéket, amivel ezután meg lehet közelíteni a pontnak a függvény metszeteit. Ez egy egyszerű lineáris kereséssel megoldható. A függvény visszatérési értéke két egész szám lesz, ami a metszetek indexét jelöli a bemenetként kapott tömbben. Ez a két index a félértékszélesség két szélső pontjának felel meg, amely pontok egy intervallumot alkotnak, nevezzük ezt AB intervallumnak.



11. ábra [34]

Ez a kép az egyik metszetet ábrázolja, ahol az x tengely a pixel indexe, vagy sorszáma, az y tengely pedig a pixel értékét jelöli. A pixelintenzitás-eloszlás egy haranggörbét jól közelítő függvényt ír le. A piros pontok pedig a félértékszélesség szélső pontjait jelölik. Szemléletesebben a 11. ábrán látható mindez.

Majd ezt követően AB intervallumon integráljuk a függvényt, majd a teljes függvény alatti területet is meghatározzuk, és a két kapott érték hányadosát vesszük.



12. ábra: A bal oldali kép a program bemenete, a jobb oldali kép pedig már az egyik metszetének a pixelintenzitás-eloszlása, félértékekkel megjelölve.

Az így kapott érték a folt félértékszélességén belüli teljes lézereenergia tartomány [35], amely százalékban kifejezve: 20,92%.

4. Összesítés és konklúzió

Célkitűzésünkben megfogalmaztuk, hogy egy olyan szoftvert szeretnénk realizálni, ami képes egy lézernyaláb optikai minőségét a lézer fókuszfoltjának vizsgálatával meghatározni. Ahogy az előző fejezetben ismertettük, mindezt oly módon tesszük meg, hogy a lézer fókuszfoltját megkeressük, majd abból kinyerjük az intenzitás-eloszlás függvényt. A félértékszélesség tartománya és a függvény alatti teljes terület hányadosa megadja a félértékszélességén belüli teljes lézerenergiatartományt [35].

A referencia értékünket 36%-ban határoztuk meg a rendelkezésünkre álló források alapján. Ez azt jelenti, hogy egy jól fókuszált, közel diffrakció-limitált fókuszfoltot vettünk alapul. [35] A kapott értékünk 20,92%, ami jól láthatóan kisebb, mint a referenciánk, tehát egy rosszabb minőségű fókuszálásnak lehetünk tanúi, ugyanis silányabb színvonalú lézernyalábbal dolgoztunk.

Elemmezve az eredményeket arra a megállapításra jutottunk, hogy a szoftverünk képes a lézernyaláb optikai minőségének meghatározására a lézer fókuszfoltjának vizsgálatával. A program további tesztelésekre szorul, de az alapkoncepció megállja a helyét a vele szemben, általunk támasztott követelményeknek. A programot és a most szerzett tapasztalatokat a jövőben csapatunk a következő lépcsőfokok elérésére fogja felhasználni.

5. Függelék, nyilatkozat a saját eredményről

Dolgozatunkban azt tűztük ki célul, hogy alkotunk egy olyan szoftvert, amely segítségével információkat nyerhetünk valamely lézernyaláb optikai nyalábminőségét jellemző bizonyos fizikai paramétereiről. Céljaink felsorolva pedig az alábbiak pontokba szedve:

- Lézernyaláb fókuszoltja fizikai tulajdonságainak elméleti és szoftveres vizsgálatának problémafelvetése és megoldás keresése.
- A megírandó szoftver céljának behatárolása és funkcióinak meghatározása elméleti síkon, ennek megvalósítási terve.
- Szoftver megalkotása, amely bizonyos bemeneti paraméterek megadásával - a fókuszfoltról készült kép feltöltésével - képfeldolgozás módszertanának alkalmazásával meghatározza a képen szereplő lézerfókusz foltjának méretét és néhány fontosabb paraméter mennyiségét. Pl. fényintenzitás-eloszlás meghatározása a méret koordináták szerint.
- A feltöltendő kép optimalizálása a legjobb eredmény elérésére.
- A fókuszolt energiatartalmának meghatározása a lézer intenzitáseloszlás-görbéjéből. Az eredmény összevetése egy megbízható referenciaértékkel, és az összevetés alapján a lézernyaláb optikai minőségének meghatározása.

5. Hivatkozásjegyzék:

- [1] Jeff Hecht, Short history of laser development, Optical Engineering 49 (9), 091002, September 2010
- [2] Andreas J. Gross, Thomas R. W. Herrmann, History of lasers, DOI 10.1007/s00345-007-0173-8, World J Urol (2007) 25:217–220
- [3] 5. Dicke RH (1954) Phys Rev 93:99
- [4] Albert Einstein, On the quantum theory of radiation, in Laser Theory, F. A. Barnes, ed., pp. 5–21, IEEE Press, New York, 1972
- [5] Albert Einstein, Zur Quantentheorie der Strahlung. Phys Z 18:121–128, 1917
- [6] Rudolf Ladenburg, Research on the anomalous dispersion of gases, Z. Phys. 48, 15–25, 1928
- [7] V. A. Fabrikant, Emission mechanism of a gas discharge, Trudy VEL 41, 236 1940; reprinted in English in V. A. Fabrikant, Selected Works p. 133, privately printed, Moscow, 2007
- [8] Halliday D, Resnick R, Walker J, Fundamentals of Physics, 8th edn. Halsted Press, New York, 2007
- [9] J. P. Gordon, H. J. Zeiger, and C. H. Townes, Molecular microwave oscillator and new hyperfine structure in the microwave spectrum of NH₃, Phys. Rev. 95, 282–284, 1954.
- [10] A. L. Schawlow and C. H. Townes, Infrared and optical masers, Phys. Rev. 112, 1940–1949 (1958).
- [11] A. Javan, Possibility of production of negative temperature in gas discharges, Phys. Rev. Lett. 3(2), 87–89 (1959).
- [12] T. H. Maiman, Optical and microwave-optical experiments in ruby, Phys. Rev. Lett. 4(11), 564–566 (1960).
- [13] T. H. Maiman, Stimulated optical radiation in ruby, Nature 187, 493 (1960).

- [14] T. H. Maiman, Stimulated optical emission in fluorescent solids, Part I. Theoretical considerations, Phys. Rev. 125, 1145–1150 (1961).
- [15] Magyar Tudomány – 176. évfolyam 10. szám (2015 október)
- [16] William S. C. Chang, Principles of Lasers and Optics, ISBN 9780521642293, Cambridge University Press, Cambridge, 2005
- [17] K.F. Renk, Basics of Laser Physics, Graduate Texts in Physics, DOI 10.1007/978-3-642-23565-8 1, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012
- [18] Subhash Chandra Singh, Haibo Zeng, Chunlei Guo, and Weiping Cai: Lasers: Fundamentals, Types, and Operations pp.1-3, 2012
- [19] Hadmérnök - IX. évfolyam 1. szám, 2014
- [20] Glen P. Perram: Chemical lasers pp.1-7
- [21] Bor Zsolt – A mindent tudó fénysugár, a lézer
- [22] Kurilla Boldizsár – Lézerfizikai eszközök alkalmazása robotokon, Hadmérnök 2015, X. évfolyam 4. szám
- [23] Markovits Tamás – Alumíniumötvözetek CO₂ lézeres forrasztása
- [24] <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/77769/8c3dd35c9da844e0b712dec7df96c53d/ISO-11146-1-2021.pdf>
- [25] <https://pypi.org/project/pip/>
- [26] <https://numpy.org/>
- [27] <https://matplotlib.org/>
- [28] <https://pypi.org/project/Pillow/>
- [29] <https://laserbeamsize.readthedocs.io/en/latest/index.html>
- [30] <https://jupyter.org/>
- [31] <https://colab.google/>
- [32] Saját készítésű ábra a program felépítéséről

[33] Saját ábra, a saját programunkból származó részletekről

[34] Saját ábra, a program lefutása után kapott képek

[35] Rác Ervin - Nemlineáris Jelenségek Vizsgálata Lézerplazmákban nagy lézerintenzitásokon, PhD értekezés, Szegedi Tudományegyetem Fizika Doktori Iskola, 2005.