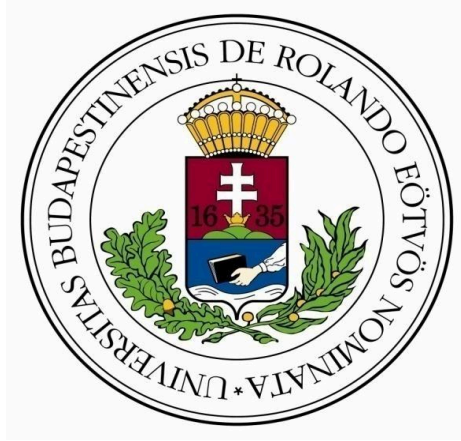

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar



A MICHELSON-INTERFEROMÉTER HASZNÁLATA A HAZAI OKTATÁS FEJLESZTÉSÉRE, ÉS A FIZIKAOKTATÁS MEGSZERETTETÉSÉRE

Készítette:

Dunca-Stadler Zoltán

Czuczor Gergely Bencés Gimnázium

12. évfolyam

Témavezető:

Tóth Kristóf

Középiskolai fizika- és matematikatanár, egyetemi oktató

Czuczor Gergely Bencés Gimnázium,

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Fizikai és Csillagászati Intézet

2024.

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	3.
2. ELMÉLETI ALAPOK	4.
2.1. A FÉNY ELEKTROMÁGNESES HULLÁM	4.
2.2. A MICHELSON-INTERFEROMÉTER	5.
3. ÚTMUTATÓ AZ ESZKÖZ MEGÉPÍTÉSÉRE	7.
3.1 SZÜKSÉGES ESZKÖZÖK	8.
3.2 MEGÉPÍTÉS MENETE	9.
3.3 TAPASZTALT NEHÉZSÉGEK, ÉSZREVÉTELEK	12.
4. ÖSSZEGZÉS	14.
5. IRODALOMJEGYZÉK	14.
6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	16.

1. BEVEZETÉS

A Michelson-interferométer feltalálója Albert A. Michelson. Az eszköz célja a nagyon pontos távolság- és hullámhosszmérés. A Michelson-interferométer számos fontos alkalmazással rendelkezik a tudományban és a technológiában. Kiemelkedő jelentőségű a híres Michelson-Morley-kísérlet, amely kimutatta, hogy a fény sebessége független a Föld mozgásától a feltételezett éterhez képest, és ez alapvető fontosságú volt az általános relativitáselmélethez. Mindezt 1907-ben Nobel-díjat vehettek át. Az interferométerek másik jelentős kísérleti alkalmazása a szintén Nobel-díjat érő gravitációs hullámok detektálása. Kiemelkedőnek érzem a jelenséget abból a szempontból is, hogy lenyűgöző módon mutatja be, hogy a fény elektromágneses hullám [1-2]. Sőt, az utóbbi években megjelentek középiskolai kvantummechanika anyagok is, ahol Michelson-interferométerek egyfoton-forrással végrehajtott mérései során jutnak el a diákok a témakör mélységéig [3-5]. Úgy gondolom ezért, hogy ezen jelenség oktatása sok szempontból előnyös és kulturális jelentőségű, így ennek oktatási vizsgálata előre lendítheti a fizikaoktatást.

Habár a Michelson-interferométer iskolai használata nem teljesen új dolog, mégis az iskolai gyakorlatban ritkán jelenik meg. Ennek oka feltehetően az, hogy egy ilyen taneszköz beszerzése sajnos meglehetősen drága. Egy taneszköz ára akár 2 - 6 millió forint is lehet, lásd például [6]. Véleményem szerint teljese érthető, ha egy iskola nem akar egy demonstrációs eszközért ennyi pénzt kifizetni. További hátránya ezen iskolai taneszközöknek, hogy azok nem szerelhetők szét darabokra, így a diákok nem tudják az egyes összetevőket külön-külön megvizsgálni, tehát a jelenség jóval kevésbé érthető.

Kutatómunkámban azt tűztem ki célul, hogy minden iskolában elérhetővé tegyem a taneszközt. Témavezetőmmel találtam egy pár éve létrejövő német honlapot [7] és ehhez tartozó cikket [8], ahol 3D nyomtatott eszközökkel és online rendelt alkatrészekkel kb. 40 000 forint értékben, saját kézzel meg lehet építeni egy teljesen működőképes interferométert. Véleményem szerint kutatásommal hozzájárul ahhoz, hogy a fizikatanárok a fény hullámtermészetét újszerű, látványos módon mutassák be.

Feynman szavait követve, a természettudományos igazság kizárólagos kritériuma a kísérlet. Ma már nyilvánvalónak számít, hogy nem csak a természettudományos gondolkodás kialakulásában segítenek a kísérletek, de a diákok tanulását is nagymértékben segítik. Mivel az általam meghonosított taneszközüépítési módszer alapvetően olcsó, akár az önálló tanulói kísérletekre is lehetőséget teremthet. Úgy gondolom, hogy a diákok így sokkal könnyebben

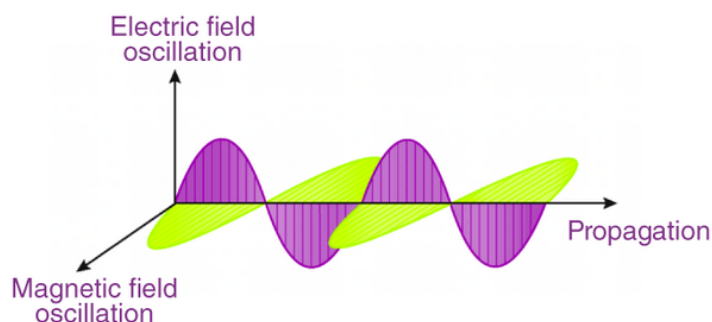
megérthetik az elektromágneses hullámokat, valamint az interferencia jelenségét, amelyek a középiskolás tananyagnak kifejezetten nehéz részei.

Kutatásom során röviden átvesszem a szükséges alapfogalmakat, majd részletesen bemutatom a Michelson-interferométert, elmagyarázva működését. A megépítésének folyamatát pontokba szedtem, rendszereztem. A TDK során az általam tapasztalt lehetséges hibákra is felhívom a figyelmet, például bemutatom a használt német honlap hibáit, valamint tippeket és segédleteket is biztosítok, hogy a megépítésre vállalkozó emberek dolgát megkönnyítsem a jövőben.

2. ELMÉLETI ALAPOK

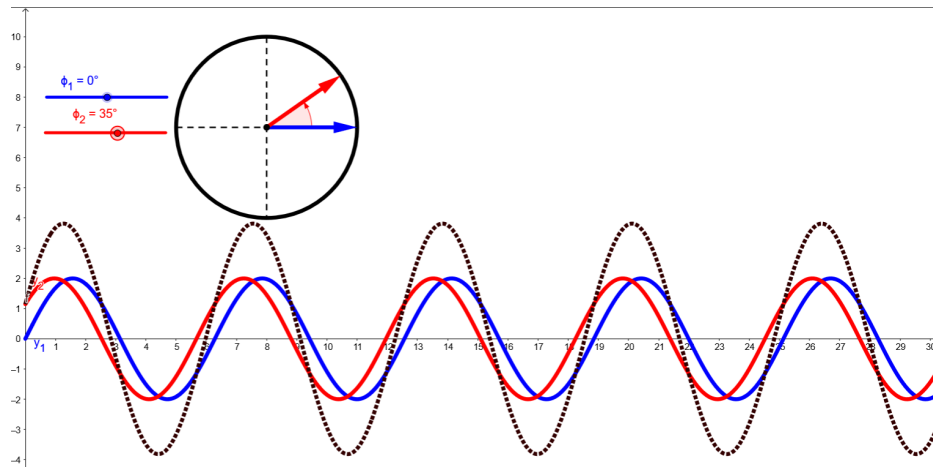
2.1 A FÉNY ELEKTROMÁGNESES HULLÁM

Számos kísérlet alátámasztja, hogy a fény elektromágneses hullám, így a fény egymásra merőleges, periodikusan változó elektromos és mágneses tér együttese (*1. ábra*). Az elektromágneses hullámok transzverzálisak, azaz az elektromos és mágneses térerősség vektorai merőlegesek a hullám terjedési irányára (lásd *1. ábra*). Az amplitúdó négyzete arányos a fényintenzitással, amely egyszerűen megfogalmazva a fény erősségét számszerűsíti.



1. ábra. A képen egy monokromatikus elektromágneses hullámot látunk. (Electric field oscillation = Az elektromos mező rezgése; Magnetic field oscillation = A mágneses mező rezgése; Propagation = A hullám terjedési iránya.) [9]

Véleményem szerint a fény hullámtermészetét legelegánsabban a polarizáció és interferencia jelenségei mutatják be [1-2]. Az interferencia képessége azt jelenti, hogy a hullámok képesek egymással kölcsönhatásba lépni, így erősítve vagy gyengítve egymást. Első körben fontosnak tartom a fázis fogalmának tisztázását, amely a Michelson-interferométer megértésének egy előfeltétele. Ahogy egy GeoGebra szimuláció [3, 10] is mutatja, ha két hasonló hullám találkozik, akkor azok interferálnak.



2. ábra. Egy-egy hasonló, piros és egy kék hullám interferenciája a szaggatott hullámot adja ki. Az interferencia függ a két hullám egymáshoz való helyzetétől, amelyet egy fáziskörön jól szemléltethetünk. Ha a két hullám éppen egybe esik, akkor azok fázisa megegyezik, azaz a fáziskörön lévő megfelelő nyilak egybe esnek. Ha a két hullám kioltja egymást, akkor a megfelelő fázisnyilak egymással ellentétes irányúak. Egyéb esetben a két fázisnyíl függőleges komponensét kell előjelesen összeadni. [3, 10]

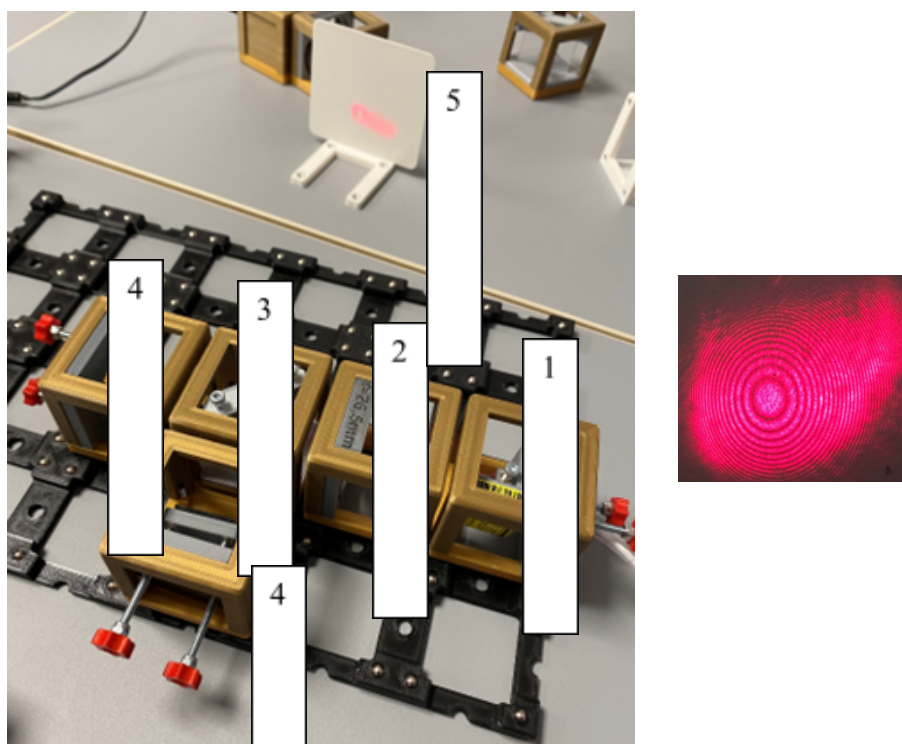
Ha két hullám a tér ugyanazon irányában terjed, a létrejövő elektromos tér az egyes hullámok vektori összegével egyenlő. Mindkét hullám a másiktól függetlenül létrehozza a saját elektromos terét, és ezek térerősségeinek vektori összege adja az eredő térerősséget. Ha két hullám azonos forrásból származik, de más-más útvonalon jut el a detektorhoz, ebben az esetben ez utóbbinál a térerősség nagysága arányos az útvonalak közti különbségből származó fáziskülönbséggel. Amikor a két visszavert fényhullám újra találkozik a félig áteresztő tükrön, interferencia lép fel köztük. Az interferencia mintázatot a két hullám relatív fázisa határozza meg, amely attól függ, hogy a fény milyen hosszú utat tett meg a tükröktől való visszaverődés során. Ha a két hullám fázisa azonos, akkor konstruktív interferencia lép fel, és a fény erősödik. Ha a fázisuk ellentétes akkor destruktív interferencia lép fel, és a fény kioltódik. Amikor a két hullám valamilyen tetszőleges fázist zár be, akkor részleges erősítés vagy gyengítés lép fel.

2.2 A MICHELSON-INTERFEROMÉTER

Az interferenciajelenség bemutatására Michelson-interferométert használunk. A saját interferométerünket a 3. ábra mutatja be. Az interferométer egy koherens, monokromatikus fényforrásból (lézer), egy lencséből, egy nyalábosztóból, két tükröből és egy ernyőből áll.

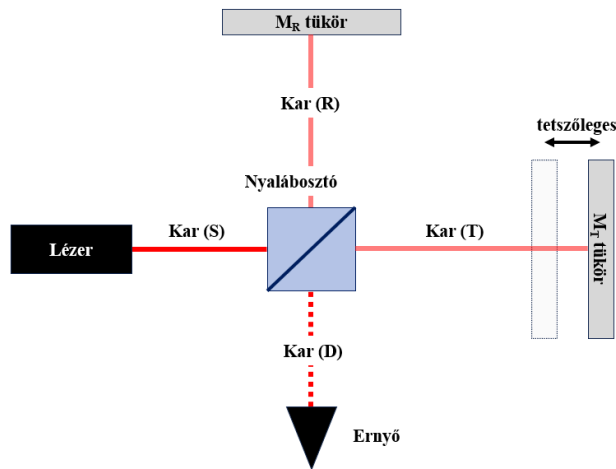
A Michelson-interferométerben a kibocsátott fényt két egymásra merőleges irányba osztjuk szét egy nyalábosztóval. A két része a fénynek egy-egy tükröre esik. A tükrök a fénynyalábokat visszaverik a nyalábosztóra. Ekkor a két fénynyaláb egyesül, és annak egy

része visszajut a fényforráshoz, másik része az ernyőre vetül. Az ernyőn fényinterferencia-képet figyelhetünk meg: világos és sötét gyűrűk váltják egymást. Ha az egyik tükör nyalábosztótól vett távolságát megnöveljük, akkor az interferenciamintázat megváltozik. Ennek oka, hogy az ernyőre eső két lézerfény egymásra esve interferál a 2. ábra alapján. Ha az egyik tükör távolsága megnő a nyalábosztóhoz képest, akkor annak fázisa elcsúszik, az interferenciakép változik.

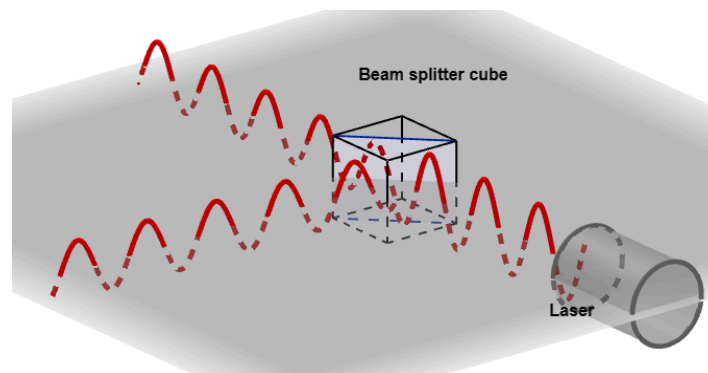


3. ábra. Egy saját kézzel megépíthető, olcsó, 3D nyomtatóval készített Michelson-interferométer fénykép. Az (1) lézerforrásból kilépő fénynyalábot egy (2) lencse kitágítja, amelyet azután egy (3) nyalábosztó két részre bont, mely részek egy-egy (4) tükörrre esnek. Az interferenciamintázatot az (5) ernyőn láthatjuk. Az interferométer különböző részeit mágnesek rögzítik az alaplaphoz.

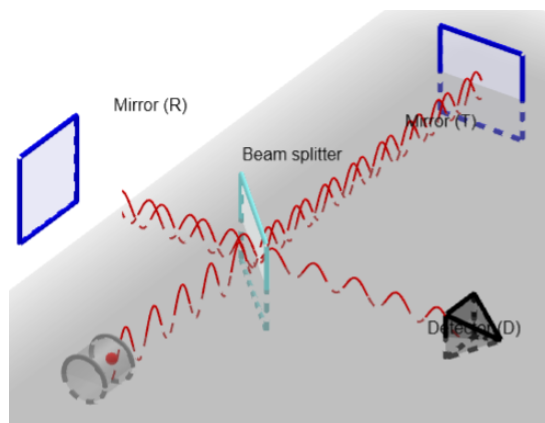
A jobb megértés érdekében egy sematikus ábrát és két elérhető GeoGebra szimulációt is bemutatok, lásd 4-6. ábrák [3, 11-12].



4. ábra. A Michelson-interferométer sematikus ábrája [3].



5. ábra. A nyalábosztó (beam splitter cube) működését szemléletesen bemutató GeoGebra animáció, ahol az elektromágneses hullámok időbeli rezgését is megfigyelhetjük (immár csak az elektromos teret ábrázolva). [3, 11]



6. ábra. A Michelson-interferométer működését szemléletesen bemutató GeoGebra animáció, ahol az elektromágneses hullámok időbeli rezgését is megfigyelhetjük (immár csak az elektromos teret ábrázolva). [3, 12] Az animációban a tükrök helyzete változtatható, és megfigyelhető az ernyőre (Detector) eső fény interferenciája (jelen esetben erősítési kép).

3. ÚTMUTATÓ AZ ESZKÖZ MEGÉPÍTÉSÉRE

A német honlap, ahonnan a fájlok letölthetők a [7-8] hivatkozáson keresztül érhetőek el. Az interferométer megépítését javasolt előtte alapos felkészüléssel kezdeni. A legfontosabb eszköz egy 3D nyomtató. A német honlapról letölthető egy fájlmappa, ami a 3D nyomtatók számára megfelelő formátumban van, valamint külső 3D appokkal az ábrákat akár telefonon is meg lehet nézni. Ez a mappa 'Materialpaket' néven kerül mentésre. Az alkatrészekhez tartozó fájloknak német nevük van pl. Grundplatte, jelentése alaplap. A honlap a Michelson-interferométer megépítésében is segít, leírja a szükséges alkatrészeket, a csavarokat, valamint a 3D nyomtatott alkatrészeknek a fájlnevét (pl. 10A_Si_V1_Einsatz 90°). Fontos figyelni, mivel sok hasonló nevű fájl van és gyakran csak egy szám a különbség. A honlap a megépítést 6 részre bontja:

- Laser diode(USB) or laser diode+battery box (lézer dióda és elemdoboz).
- Lens (lencsék).
- Beam splitter (nyalábosztó).
- 2x mirrors (90°) (két darab tükör).
- Screen (ernyő).
- Base plate (min. 4x4) (alaplap).

Az alaplapot, mint nehézséget külön említi a honlap. A 'Materialpaket' mappában 2 db Grundplatte fájl létezik. Míg az egyik 4×6-os méretet nyomtat ki, a másik 4×3-as méretet. Az előbbit csak lényegesen nagyobb 3D nyomtatók képesek kinyomtatni, ezért az utóbbit kinyomtatva 2db 4x3-as alaplapot kapunk, majd összeragasztjuk. Ez az interferométer működését semmiben sem rontja, lényegében nincs rá hatással, azonban, ha nem vagyunk vele tisztában sok gondot okozhat későbbiekben.

3.1 SZÜKSÉGES ESZKÖZÖK

A 3D nyomtatón kívül sok más, könnyen beszerezhető alkatrészre is szükségünk lesz, amelyet az 1. táblázat foglal össze.

Név	Darabszám	Internetes honlap a rendeléshez	Megjegyzések
3D nyomtató	1	-	Ez bérelhető, vagy egyetemekről kölcsönkérhető.
Ragasztó	1	-	Ragasztóra a német honlap szerint nincs szükség, azonban pár hiba miatt használata előnyös lehet.
Nyalábosztó (40×30 mm)	1 (biztonsági okokból javasolt 2-3).	[13]	A lencsék és a tükrök azonos weboldaltól származnak, így egyszerre jönnek meg valamint árendemény van bizonyos db fölött.

Allen M3x12mm csavar	15 (biztonsági okokból javasolt 20)	[14]	
Csavarhúzó Allen key (2.5 mm)	1	-	
Mágneses golyó 5 mm	50-60	[15]	Ezeket az alaplapra kell bepattintani, így az interferométer egyes kockái a csavarok mentén rögzülnek a padon.
Lézer dióda (3V-5V)	1	[16-17]	Ez kihagyható, ha az ember rendelkezik megfelelő lézerrel.
Threaded insert	11 (biztonság okokból 20 javasolt)	[18]	
M4x30mm hatszögű csavar	4 (biztonság okokból 8 javasolt)	[19]	
Front surface glass mirror 22x22 mm	2 (biztonsági okból 4 javasolt)	[20]	A lencsék és a tükrök azonos weboldalról származnak, így egyszerre jönnek meg valamint árendemény van bizonyos db fölött.
Adhesive pad (kétoldalú ragasztószalag)	4-6	[21]	
AA elem	2	-	Ha lemerül, lehet később venni
Nut M3 DIN934	12	[22]	
1 csomag hollow plug	1db csomag(8db)	[23]	
DC Hollow Connector socket 5.5 x 2.5mm	4 (biztonság okokból 8 javasolt)	[24]	
DC Hollow Connector plug 5.5 x 2.5mm	4 (biztonság okokból 8 javasolt)	[25]	
Elemtartó kapcsolóval	1	[26]	Emiatt nem lesz szükség külön kapcsolót forrasztani. Habár a honlap másképp építi, így lényegesen egyszerűbb. Részletesebben a továbbiakban.
Achromat lencse(lens) $f = 26.5\text{mm}$ vagy Acrylic lencse(lens) $f = 15\text{mm}$	1 (biztonság okokból 2 javasolt)	[27] vagy [28]	A lencsék és a tükrök azonos weboldalról származnak, így egyszerre jönnek meg valamint árendemény van bizonyos db fölött. Akrylic(akrilüveg) lencse 15 mm-es gyújtótávolsággal: Ennek az objektívnek a gyújtótávolsága jó kontrasztú és méretű interferencia-mintázat létrehozásához. A lencse felületi minősége meglehetősen gyenge, ami szennyeződések eredményez az interferenciamintázatban. Achromat 26,5 mm-es gyújtótávolsággal: A hosszabb fókuszávolság valamivel kisebb interferenciamintát eredményez kevesebb gyűrűvel. A lencse felületi minősége azonban jobb, és kevesebb a szennyeződés a mintában.

1. táblázat. A szükséges eszközök.

3.2 MEGÉPÍTÉS MENETE

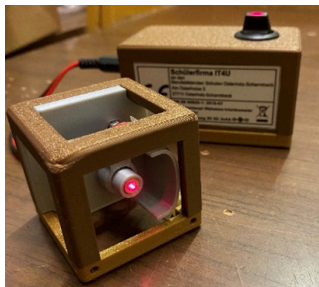
Elemdoboz

A honlap az elemdoboznál külön kapcsolót használ, valamint az elemek csatlakozóját forrasztja (videó is található az oldalon). Én nem találtam kapcsolót, másrészt fölöslegesen bonyolítja a munkát. A fenti elemdoboz linkjénél tisztán látszódik a dobozból kiálló két kábel, ezeket a hollow connectorba kell behelyezni csavarozni, ezzel megoldva a forrasztás problémáját. Az elemdobozba épített kapcsoló miatt már nem szükséges külön kapcsolót tenni a doboz tetejére és összekötni az áramköröket. Valóban nem lesz olyan esztétikus, de nem is ez a cél.

Lézer

Az elemdoboz kábeleit összekötjük a Hollow Connector fogadó részével, majd a csavarokat csavarhúzóval rögzítjük. A connectort a 'Hollow plug' részbe kapcsoljuk majd azt a hollow connector fogadó részébe(socket). A 'Hollow Connector socket' részbe beleillesztjük a lézer dióda két kábelét a megfelelő szín szerint és Voilà van egy működő lézerünk. A továbbiakban, ha egy bizonyos alkatrészről lesz szó, zárójelben be lesz illesztve a fájl eredeti német neve, ahogy lementve megtalálható, javaslom, hogy amikor az alkatrészeket válogatjuk hozzá, a német oldalt fordítsuk vissza angol nyelvről németre, hisz így könnyebb megtalálni a mappában a fájlnevet beillesztve egy 3D programba megtudhatjuk, melyik alkatrésze van szükségünk.

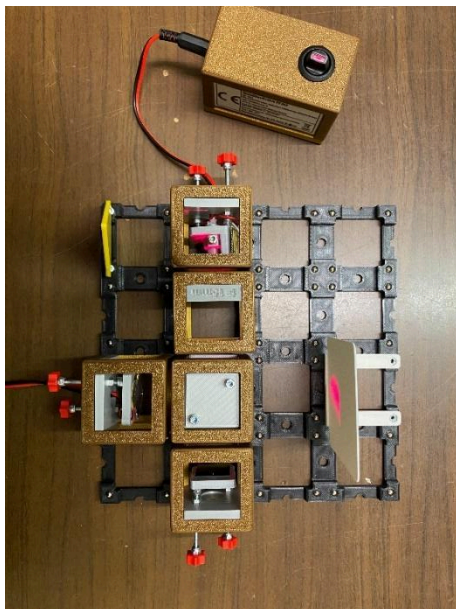
A lézert a csőbe (11A_Si_V1_Laser_Zugentlastung) kell behelyezni, amit a '10A_Si_V1_Einsatz 90°' lapon keresztül beleillesztünk a lézert tartó alkatrészbe (11A_Si_V1_Laserplatte). Az alkatrészek alapja mindig a kockarács, amik alapjába csavarokat kell helyezni az esetek 90%-ban kivéve, ha a honlap ábrája mást mutat.



7. ábra. A lézer bekapcsolt állapotban, az eredeti elemdoboz dizájnnal.

Az alaplapp

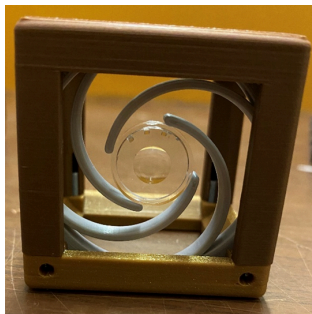
A mágneses golyókat az alaplapok lyukacsaiba kell belehelyezni. A lyukak kicsik, fizikai erő szükséges a behelyezéshez. Szabad kézzel majdnem, hogy lehetetlen. Egy kisebb, keményebb tárgyat javaslok, én például kulcsot használtam.



8. ábra. A Michelson-interferométerünk felülnézetből. Jól láthatóak az alkatrészek elhelyezkedései, valamint a mágnesgolyók az alaplapban, amivel az alkatrészeket rögzíteni lehet. Az alkatrészek csavarai tapadnak hozzá a mágnesekhez.

Lencse

A lencsekocka megépítése viszonylag könnyű feladat. Az eredeti kocka alapba (01A_Go_Vx_Würfelboden 1×1) belehelyezzük a lencsetartót (13X_Si_V1_Linsenhalter_f=XXmm), majd a kocka alaphoz csavarokkal hozzárögzítjük a kocka fedelet (02A_Br_Vx_Würfeldeckel 1×1) a honlap ábrája szerint. Innentől kezdve már csak a lencsét kell behelyezni a lencsetartóba úgy, hogy a domború oldalon lépjen be a lézerfény.

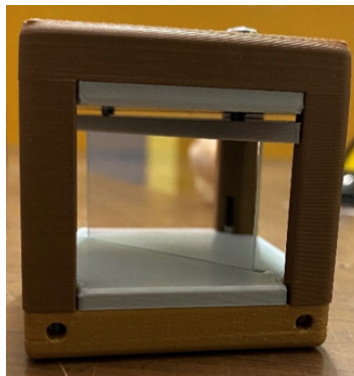


9. ábra. A képen látható lencsetartón jól kivehető a a sötétebb színű kocka alap, valamint a világos barna kocka fedél. Az ábrán látható lencse más a link szerinti honlapon, azonban működése semmiben sem változik.

Nyalábosztó

A nyalábosztóhoz szintén szükséges a kocka alap, azonban a kocka fedéllel érdemes kezdeni a megépítést. A honlap majdnem minden alkatrészhez biztosít videót a megépítésre. A nyalábosztó megépítésénél az óvatosság a legfontosabb, ugyanis az üveg eltörhet, ha túlságosan megszorítjuk a csavarokkal. A nyalábosztó szöge néha befolyásolhatja a Michelson-interferométer interferenciamintázatának alakját. Például a 45° -os szögtől való enyhe eltérés (pl. 44°) nagyobb valószínűséggel gyűrűmintát hoz létre, a 45° pedig általában hiperbolikus mintát. A készlet 45° -os és $44,2^\circ$ -os fájlokat tartalmaz.

A fedélbe belehelyezzük az üveg tartóját (12A_Si_Vx_Strahlteiler_Unten), majd az üveget. Kis kezűgyességgel az üveg felső részét beletesszük az üvegtartó felső részébe (12A_Si_Vx_Strahlteiler_Klemme), majd az ábra alapján leírva a threaded insert segítségével a felső részt, valamint a kocka alapot csavarokkal rögzítjük.



10. ábra. A nyalábosztó.

Tükrök

A tükrök megépítése nem sokban tér el a többi alkatrésztől. Lényegében az összes alkatrész alapja a kocka alap és a kocka fedél, valamint az adott alkatrészekhez tartozó speciális tartozékok. Itt olyan tükröket használunk, amelyek elülső részén fényvisszaverő réteg található. Ez megakadályozza, hogy az üveglap elülső és hátoldalán visszaverődések keletkezzenek. A készlet két lehetőséget tartalmaz a tükrök felakasztására:

1. A Michelson-interferométer és 2.a, a Mach-Zehnder interferometer 2.b, kvantumradír-analógia kísérlet és egyebek.

A kocka alapba (01A_Go_Vx_Würfelboden 1×1), majd beillesztjük a csavartartót (10A_Si_Vx_Einsatz 90°), végül a kockát a kocka fedéllel (02A_Br_Vx_Würfeldeckel 1×1) rögzítjük le csavarokkal. A két oldalú ragasztóval a mágnesstartón rögzítjük a tükröt. A mágneses golyók a csavarokat vonzza, így a mágnesstartó és ezáltal a tükör nem esik le. A hosszú csavarok végén lévő csavarfej-állító (03A_Ro_Vx_Stellschraube_Kopf) segítségével a tükör állásszögét lehet állítani.

Megjegyzés: A lézer is rendelkezik ilyen fajta csavar-állítókkal, ezáltal a lézer állásszögét is lehet változtatni.

Ernyő és lyuk

A képernyő az interferenciaminta megjelenítésére szolgál. Az alaplap mellé is elhelyezhető, ha nincs elég hely, vagy nagyobb mintát kell kialakítani. Megépítése lényegében két műanyag alkatrész összepasszítása. Ez a részlépés ki is hagyható, hiszen ernyőt könnyűszerrel helyettesíthetünk.

3.3 TAPASZTALT NEHÉZSÉGEK, ÉSZREVÉTELEK

1. Vannak kisebb pontatlanságok az alkatrészek méreteiben. Például a nyalábosztó üvegének felső tartója (12A_Si_Vx_Strahlteiler_Klemme) kicsit hosszabb és meghajlik kicsit, amikor beillesztjük a kockába.
2. Fontos, hogy a 3D nyomtatott alkatrészek jó minőségűek legyenek. Ha van rá lehetőség, lehet különböző színbe is nyomtatni a különböző alkatrészeket. Minden fájlnak már megfelelően igazítottnak kell lennie, és a szabványos FDM 3D nyomtatók támogatása nélkül kinyomtathatók. A megfelelő színekhez a BASF Ultrafuse PLA-t ajánlja a honlap a következő színekben: arany, bronz, ezüst, piros, fekete, fehér. Nincs szükség speciális nyomtatási beállításokra. A lehetséges beállítások a következők: rétegvastagság: 0,2 mm; mennyezet és padló: 0,8 mm; falak: 1,2 mm; kitöltés: 16%.
3. A honlap tartalmaz különböző hibákat. Ezek közül a legjelentősebbek az ábrázolási hibák. A lézernél és a tükröknél található az általam csavartartónak nevezett alkatrész (10A_Si_V1_Einsatz 90°). A honlap a csavar bemeneteinek lyukát kör alakúnak ábrázolja. A valóságban ez nehézséget jelent, hogy a honlap alapján ábrázolt módon a threaded insert-et és a csavart betegyük a lyukba, ezáltal rögzítve azokat, hogy a mágneses golyók vonzani tudják a csavart és ne essen le az alkatrészdarab, valamint a hozzá ragasztott tükrök. Én megrendeltem a tőlük beszerezhető kész interferométert, ahol észrevettem, hogy az ő alkatrészük bemenete hexagonális formájú, és kicsit nagyobb. A bemenetben is másképp van rögzítve a csavar. Megoldásként én faragtam kicsit a lyukak átmérőjén egy hegyes tárggyal majd óvatosan, de ugyanakkor valamelyest fizikai erőt kifejtve belekalapáltam a threaded insert-et.
4. Tükröknél nem árt vigyázni. Fontos, hogy a tükröknek csak az egyik oldala verje vissza a fényt, mint korábban említettem. Javaslom a tükrökhöz ajánlott linket használni, mivel

minőségük megfelelő. Első rendelésem során az üvegről a visszaverő réteg elkezdett lekopni.

5. Nehéz találni a piacon az elemhez kapcsolót. A honlap nem említ oldalt, ahonnan be lehet szerezni, én pedig hosszas próbálkozások után sem sikerült találgak. Egyébként is csak bonyolítja az összeszerelést a szükségtelen munka az áramkörök forrasztásával. Én ezt a problémát úgy küszöböltem ki, hogy vettem egy elemtartót, amelyben beépített kapcsoló van, a táblázatban linket is csatoltam hozzá.
6. A lézerdióda meghajtókártyája könnyen leválik a tényleges diódáról, ha feszültségnek van kitéve, és nehéz visszaforrasztani. A tábla védelme érdekében a teljes lézerdiódát forró ragasztóval a „11A_Si_V1_Laser_Zugentlastung” -be javaslatos beragasztani, mondjuk pillanatragasztóval. Azért is fontos beragasztani, mivel a lézer a csőből könnyedén kiesik. Fontos figyelni, hogy a ragasztáskor a lézer dióda azon részét (lézer üvege), ahol a fény távozik a nyalábosztó irányába véletlenül se érje ragasztó, mert ekkor a fényt szórni kezdi, ami a későbbi végeredményt és látványt torzítja. Természetesen balesetek előfordulnak, épp ezért javasolt, hogy legyen pót alkatrész mind a lézer diódából, mind a 3D nyomtatott csőből.
7. Habár a honlap ábráján egy threaded insert és egy csavar rögzíti a lézer csövet és ezáltal magát a lézer diódát a „11A_Si_V1_Laserplatte”-ba, azonban ez a rögzítés nem nevezhető mindig kielégítőnek. Megoldásként azt javaslom, hogy a csövet (11A_Si_V1_Laser_Zugentlastung) és a lézertartó lapot (11A_Si_V1_Laserplatte) is ragasszuk össze.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásom során meghonosítottam egy innovatív német módszert egy taneszköz megépítéséhez, és azt részletes, kiegészítő gondolatokkal mutattam be. Úgy gondolom munkám hozzájárul a kulturálisan is jelentős Michelson-interferométer középiskolai oktatásához, és ezáltal annak csodálatos bemutatásához, hogy a fény elektromágneses hullám. Úgy gondolom piaci szempontból is jelentős, hogy egy sokmilliós taneszközt kiválthatunk annak töredékárán (100-szor olcsóbban).

A bemutatott taneszköz azért is jelentős, mert szerelhető, javítható, és az összetevőket a diákok egyenként megérthetik. Például egy kulcsrésze a jelenségnek a nyalábosztó, amely működése nem magától értetődő. Jónak tartom, hogy ezt a diákok kézbevehetik, kipróbálhatják.

Ötleteink Piláth Károly tanár urat is megihlette, akik a TDK beküldésének napjára készítette el saját, kimagasló, saját munkáját [29]. Úgy gondolom törekvéseink sokat segíthetnek hazánk fizikaoktatásán, és a témakör megszerettetésén.

5. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Holics L. (2009). *Elektrodinamika és optika*. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- [2] Tóth, K.; Michelini, M.; & Bitzenbauer, P. (2024). [Exploring the effect of a phenomenological teaching-learning sequence on lower secondary school students' views of light polarisation](#). *Phys. Educ.* **59**, 035009.
- [3] Hennig, F.; Tóth, K.; Förster, M.; & Bitzenbauer, P. (2024). [A new teaching-learning sequence to promote secondary school students' learning of quantum physics using Dirac notation](#). *Phys. Educ.* **59**, 045007.
- [4] Hennig, F.; Tóth, K.; Veith, J.; & Bitzenbauer, P. (2024). [P. Mathematical sense making of quantum phenomena using Dirac notation: its effect on secondary school students' functional thinking about photons](#). *EPJ Quantum Technol.* **11**(61).
- [5] Hennig, F.; Tóth, K.; Veith, J.; & Bitzenbauer, P. (2024). Introducing quantum physics concepts and Dirac notation at the secondary school level: Insights into student reasoning from an acceptance survey. *Phys. Rev. Phys. Educ.* [Accepted for publication](#).
- [6] Iskolaellátó Stiefel: PASCO Interferométer rendszer. Internetes elérés: <https://iskolaellato.hu/Interferometer---teljes-szett> (Utolsó letöltés: 2024.11.17.)
- [7] Low-Cost Experimente zur Wellen- und Quantenoptik <https://o3q.de/>
- [8] Haverkamp, N.; Pusch, A.; Heusler, S.; & Gregor, M. (2022). [A simple modular kit for various wave optic experiments using 3D printed cubes for education](#). *Phys. Educ.* **57**(2), 025019.
- [9] Electromagnetic Waves <https://byjus.com/physics/electromagnetic-waves/>
- [10] <https://www.geogebra.org/m/ppbgcmee>
- [11] <https://www.geogebra.org/m/jmxhck52>
- [12] <https://www.geogebra.org/m/z7qfrqzv>
- [13] <https://pgi-shop.de/en/semi-transparent-front-surface-glass-mirror-30-x-40-mm/>
- [14] <https://www.amazon.com/Socket-Screws-Metric-Stainless-Machine/dp/B07KRRNDGC?th=1>
- [15] <https://www.euromagnet.hu/neodymium-magnetic-ball-5mm-n35>

- [16] https://www.hestore.hu/prod_10035542.html?gross_price_view=1&source=gads&lang=hu&gad_source=1&gclid=CjwKCAiAudG5BhAREiwAWMISjGIHlfXJUrHE9AHpS1Pr0W7bVMM3qU836Cc0zB7FLbUOMjJvHSMjhoCcBUQAvD_BwE
- [17] <https://www.amazon.com/farhop-650nm-Laser-Diode-Module/dp/B00VCR036Q>
- [18] <https://www.kiwi-electronics.com/en/lock-nut-m3-30-pack-10661?country=&srsltid=AfmBOorw2Rhpalkb6L5fk4tfX9CcD5QmyoGkZy3FlGtPivWQbL0EzJTEk4>
- [19] https://csavardiszkont.hu/hatlapfeju-tovig-menetes-csavar-88-horganyzott-m-4x30-4852?utm_source=google_shopping&utm_medium=cpp&utm_campaign=direct_link&gad_source=1&gclid=CjwKCAiAudG5BhAREiwAWMISjC1ZsJShuH_bQgAm0RL8kgUgwcF4_nh-BL_IT9wqEwHM81bVC1-KDxoCINcQAvD_BwE
- [20] <https://pgi-shop.de/en/front-surface-glass-mirror-22-x-22-mm/>
- [21] https://www.ebay.co.uk/itm/285495608646?chn=ps&_ul=GB&mkevt=1&mkeid=28&google_free_listing_action=view_item
- [22] https://www.svx.hu/koto-es-rogzitoelemek-anyak-din-934/anya-din-934-8-zn-m3_9320/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=18700137262utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=18700137262&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA3Na5BhAZEiwAzrfagHeugxC39lS7evjMvbAzq8P4wf63NWaWRKtLE4A3TS76r-C48UiGvhoC54gQAvD_BwE
- [23] <https://www.amazon.de/-/en/Lewttier-Hollow-Adapter-Voltage-Connector/dp/B093FTFZ8Q>
- [24] https://www.amazon.de/-/en/adaptare-Adapter-Barrel-Terminal-93522/dp/B01LWOD33I/ref=pd_bxgy_d_sccl_1/260-9774562-1122711?pd_rd_w=YbQnz&content-id=amzn1.sym.5eda1a26-aae5-46aa-95ea-198f43dc011e&pf_rd_p=5eda1a26-aae5-46aa-95ea-198f43dc011e&pf_rd_r=AA18KE9J6ERX9VSC6RTX&pd_rd_wg=9Fa0P&pd_rd_r=2785016a-2e79-491f-ae60-3e6d57a08eaf&pd_rd_i=B01LWOD33I&psc=1
- [25] <https://www.amazon.de/-/en/Hollow-Connector-Double-Terminal-Adapter/dp/B07D61NF7T?th=1>

[26]

https://techfun.hu/termek/box-pre-aaa-batterie-3v-s-prepinacom/?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAudG5BhAREiwAWMLsJkGe0pH-w1CyGCJnX8MqY7v8Zx7h52_PVdMJ9BZk_iD1ER1re99qqBoCDm8QAvD_BwE

[27] <https://pgi-shop.de/achromat-2-linser-oe-15-mm-f-26-5-mm/>

[28] <https://pgi-shop.de/en/acrylic-glass-lens-oe-16.5-mm-f-15-mm/>

[29] <https://pilath.wordpress.com/2024/11/17/michelson-interferometer-fillerekbol/>

Továbbá a TDK megírásában sokat segített még az alábbi két irodalom.

[30] Öveges, J. (1963). *Érdekes fizika*. Budapest: Táncsics Könyvkiadó.

[31] Scollen, C.; Wright, S.; Berry, R.; & Lugosi, E. (1996). *Park-Usborne: Fizika enciklopédia*. Budapest: Park Könyvkiadó.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom Tóth Kristóf tanár úrnak, témavezetőmnek, aki bemutatta nekem ezt az izgalmas témakört és jelenséget, és megbízott a kutatás önállóan történő elvégzésével. Köszönöm, hogy hozzájárult a [3-5, 10-12] képekhez és animációkhoz történő felhasználáshoz.