

# A PLANCK-ÁLLANDÓ SZÁMÍTÓGÉPPSEL SEGÍTETT MÉRÉSE – a myDAQ és a LabVIEW alkalmazása a modern fizika tanításában

Balog Katalin, Kovács Kornél, Somogyi Anikó  
Szegedi Radnóti Miklós Kísérleti Gimnázium

A fizika tanításával kapcsolatban nagyon sokan tűznek ki zászlajukra hangzatos jelszavakat, mint *kutatás alapú oktatás*, *problémamegoldó gondolkodás* fejlesztése, *aktív tanulói munka* stb. Azonban mindenki tudja, hogy addig, amíg a heti maximum két fizikaórán 30-35 tanuló ül a teremben, amíg sok fizikaszer-tárból még az alapkísérletekhez szükséges eszközök is hiányoznak, amíg a tanárnak a magas kötelező óraszám mellett nincs ideje tanári vagy tanulói kísérletek, mérések előkészítésére, addig a középiskolai fizikatanításban a fent említett jelszavak nem telnek meg valódi tartalommal. Marad a direkt közlés, a tankönyv grafikonjainak elemzése, a vásznon megjelenített képek, videók megtekintése.

A National Instruments myDAQ oktatási terméke és a LabVIEW programozási környezet nagy segítséget nyújt a fizikatanároknak. A LabVIEW grafikus programnyelven írt .vi (*virtual instrument*) kiterjesztésű programok (a továbbiakban *virtuális műszerek*) által vezérelt, illetve kiértékelt mérőkísérletek akár a tan-

órán is gyorsan és látványosan elvégezhetőek. A Szegedi Radnóti Miklós Kísérleti Gimnáziumban nyitottak vagyunk új módszerekre, amennyiben azok tényleg segítik a pedagógus munkáját, illetve a tananyag hatékonyabb tanórai feldolgozását, ezért csatlakoztunk – egyelőre szakköri műhelymunka formájában – a myDAQ-felhasználók egyre bővülő táborához.

## A Planck-állandó meghatározása LED-ekkel

Viszonylag sok történelmi jelentőségű mérési kísérletet ismertetünk meg a diákokkal a modern fizika tanítása során, de a megfelelő eszközök és elegendő idő hiányában csak néhányat tudunk ténylegesen megvalósítani.

A Planck-állandót több – a középiskolai tananyagban szereplő – fizikai jelenséghez kapcsolódóan is meg lehet mérni (például külső fényelektromos hatás, elektron-diffrakció). Mi egy viszonylag ismert (de középiskolai tankönyvekben nem elterjedt) modern fizikai mérési eljárást választottunk: LED-ek elektromos és optikai tulajdonságait vizsgálva mértük meg a  $h$  értékét.

A választásunk azért esett erre a módszerre, mert egyrészt a myDAQ és a LabVIEW kezdő felhasználójaként is sikeresen kivitelezhetjük, másrészt kísérleteinkhez mindössze néhány, elérhető áron beszerezhető kiegészítő kellék szükséges, így az eljárás a modern fizika tanításában hiánypótló szerepet tölthet be.

A LED (Light Emitting Diode) mozaikszó fénykibocsátó diódtól jelent. Külső feszültség nélkül a  $p$ - $n$  átmenet határán az  $n$ -típusú félvezető réteg vezetési sávjából a  $p$ -típusú réteg üres vezetési sávjába elektronok diffundálnak, míg a  $p$ -réteg vegyértéksávjába az  $n$ -ből szintén elektronok juthatnak át, ami látszólag a pozitív lyukak  $p$ -ből  $n$ -be történő mozgását eredményezi. A diffúzió addig tart, amíg az így keletkező elektromos tér (potenciálgát) a további átjutást meg nem akadályozza. Azt mondjuk, hogy a LED-et nyitóirányban feszítjük elő, ha a feszültségforrás negatív pólusát az  $n$ -, míg a pozitív pólust a  $p$ -rétegre kapcsoljuk, azaz a határon kialakult mezővel ellentétes irányú elektromos mezőt hozunk létre. Egy kritikus feszültségérték ( $U_0$  nyitófeszültség) fölött, a potenciálgát legyőzésével, a töltéshordozók áramlása megindul. A  $p$ -típusú rétegben az elektronok rekombinációja során felszabadul a (félvezető vezetési és vegyérték sávja közötti) tiltott sáv szélességével közel megegyező  $U_0 e$  energia, amelyet a LED elektromágneses sugárzás (foton) formájában kibocsát(hat). Ezt az energiamérleget kifejezhetjük a következőképpen:



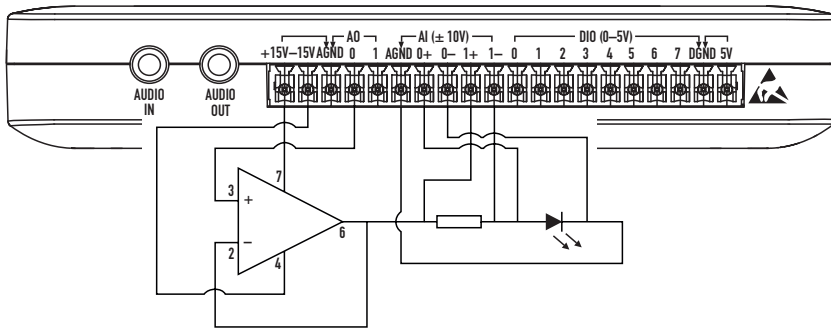
Balog Katalin 11. osztályos kémia tagozatos tanuló, a Szegedi Radnóti Miklós Kísérleti Gimnázium diákja.



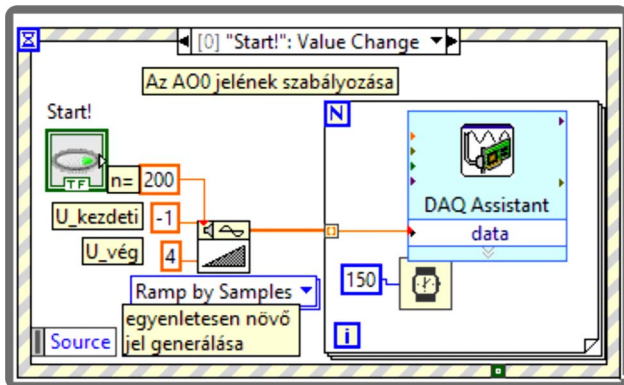
Kovács Kornél 11. osztályos kémia tagozatos tanuló, a Szegedi Radnóti Miklós Kísérleti Gimnázium diákja.



Somogyi Anikó matematika-fizika szakos tanár. 2016-ban végzett a Szegedi Tudományegyetemen. 2015 óta tanít a Szegedi Radnóti Miklós Kísérleti Gimnáziumban (gyakornokként, majd tanárként). Munkája során törekszik a „felfedezést”, tanulást az IKT eszközök széles körű felhasználásával segíteni. A három fős csapat 2017-ben megnyerte az Eötvös Loránd Fizikai Társulat és a National Instruments Hungary Kft. által kiírt myDAQ pályázatot.



1. ábra. Kapcsolási rajz a LED áramerősség-feszültség karakterisztikájának felvételéhez (kellékek: OP37 műveleti erősítő, 10 Ω-os ellenállás).



2. ábra. A myDAQ kimeneti (AO0) feszültségének szabályozása a virtuális műszer blokkdiagramjában.

$$\epsilon_{\text{foton}} = hf = U_0 e,$$

ahol  $h$  a Planck-állandó,  $f$  a foton frekvenciája,  $U_0$  a nyitófeszültség és  $e$  az elemi töltés. A LED-ek nyitófeszültségének és hullámhosszának (frekvenciájának) mérése után a fenti egyenlet segítségével meghatározhatjuk a Planck-állandót [1, 2].

HB5-436HOR-C (piros), HB5-434HY-C (sárga), HB5-433EAGD-C (zöld) és HB5-438ABD-C (kék) típusú, magas fényerejű LED-eket használtunk a mérésekhez [3].

## A LED-ek nyitófeszültségének mérése

A LED-ek áramerősség-feszültség karakterisztikájának felvételét tűztük ki első célul. A LED anódja és katódja közé kapcsolt feszültség növelésének hatására nyitóirányban az áram zérusról történő növekedése kezdetben exponenciális jellegű, később lineárisra válik. E lineáris szakasz zérushelyét tekintjük az  $U_0$  nyitófeszültségnek. Mivel a különböző félvezető anyagokból készült LED-ekre különböző tiltószélesség jellemző, ezért eltérő a LED-ek  $U_0$  nyitófeszültsége, tehát ez az érték az adott LED egy karakterisztikus elektromos tulajdonsága.

A karakterisztika felvételéhez az *NI Starter Accessory Kitben* megtalálható kiegészítőket csatlakoztattuk a myDAQ-hoz [4].

Az 1. ábrán látható áramkört állítottuk össze, amelyben egy OP37-es műveleti erősítőt használtunk feszültségkövető kapcsolásban. Ennek az a szerepe, hogy nem terhelhető feszültségforrások feszültségét terhelhetővé alakítja át [5]. (A negatív visszacsatolás miatt a rákapcsolt bemeneti és kimeneti feszültség értéke megegyezik.)

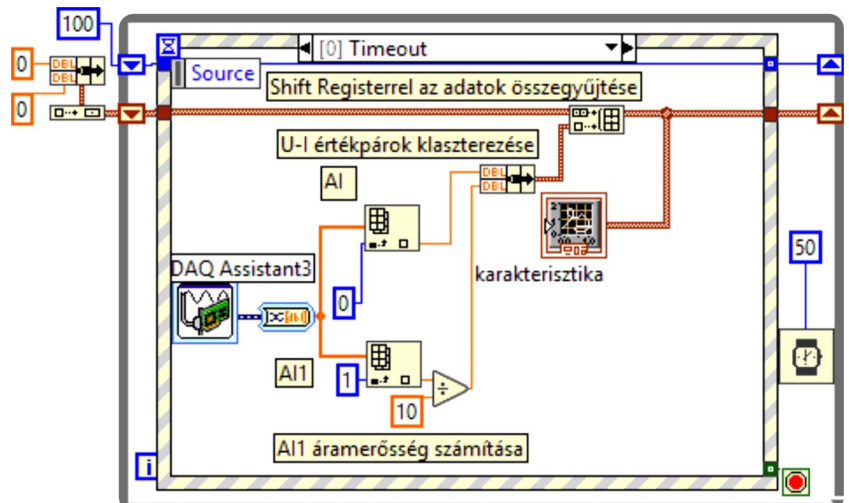
Mint ahogy korábban már utaltunk rá, a myDAQ eszköz ki- és bemeneti csatornákkal is rendelkezik. A karakterisztika felvételekor így mind a vezérlés, mind a mérés a számítógépről irányítva megvalósítható. Az eszköz két analóg kimeneti csatornája közül az AO0 csatlakozón keresztül  $-1$  V-tól  $4$  V-ig lineárisan növekvő feszültséget kapcsoltunk az áramkörbe. 200 lépésben végeztük a feszültség változtatását, közöttük  $150$  ms telik el. A 2. ábrán található az a blokk, amely ezt a szabályozást végzi a LabVIEW programban.

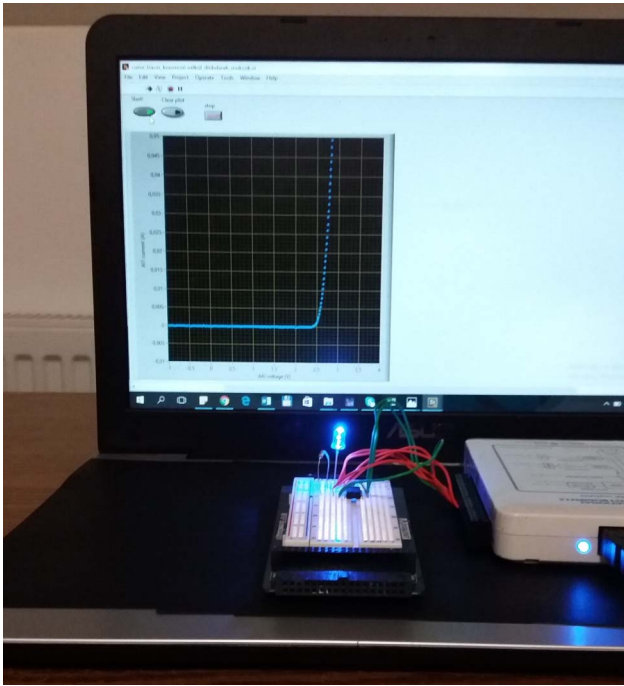
Ugyanezen virtuális műszer másik ciklusában  $50$  ms-onként mérjük a LED-ek áramerősség-feszültség karakterisztikájának egy-egy pontját. A myDAQ két input-csatornája segítségével mérjük a LED kivezetései közötti feszültséget (AI0 csatorna), illetve a vele sorba kapcsolt  $10 \Omega$ -os ellenálláson eső feszültséget (AI1 csatorna), amelyet az Ohm-törvény segítségével a LED-en átfolyó áram áramerősségévé alakítottunk (3. és 4. ábra).

## A LED-ek hullámhosszának mérése

Mérésünk második részében a LED-ek optikai tulajdonságát vizsgáltuk. A LED működésekor az elektronok rekombinálódásának hozzávetőlegesen 1%-a jár fénykibocsátással. A közel monokromatikusnak te-

3. ábra. Az áramerősség (AI1) és a feszültség (AI0) egyidejű mérése a virtuális műszerben.





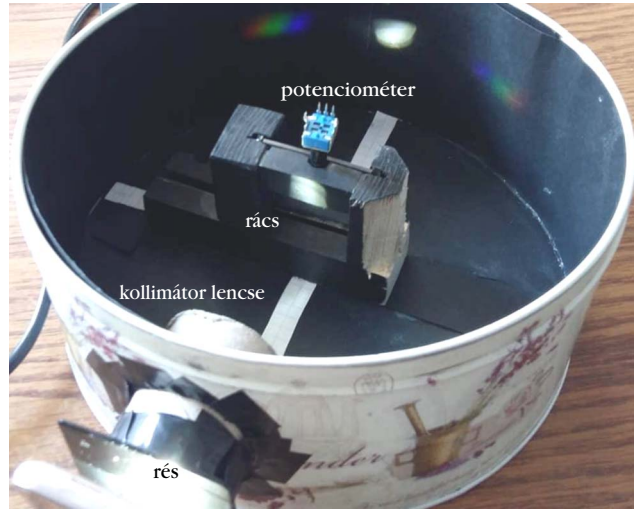
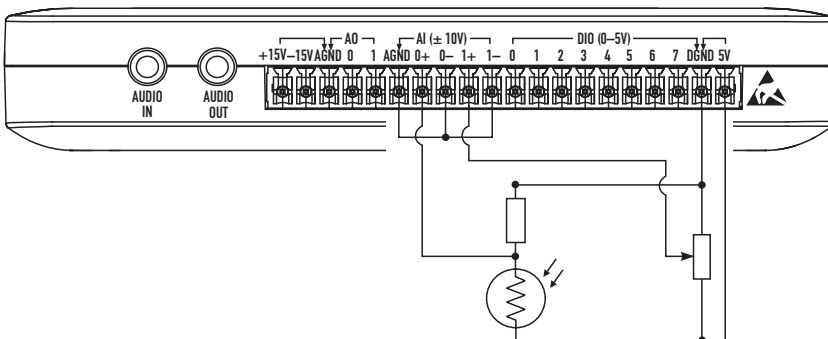
4. ábra. A LED-ek áramerősség-feszültség karakterisztikájának felvétele a myDAQ-kal.

kinthető LED-fény hullámhossza szintén az adott félvezető anyag minőségétől függ.

A hullámhossz méréséhez egy myDAQ-hoz csatkozott rácsos spektroszkópot [6] építettünk egy fekete kartonnal kibélelt henger alakú fém dobozból [7]. Az 1000 vonal/mm-es optikai rácsot [8] úgy rögzítettük a fémdoboz aljába, hogy középvonala egybeessen a doboz forgásszimmetria-tengelyével. A fény útját úgy terveztük meg, hogy egy borotvapengéből készített rést világítottunk meg a LED-ekkel, majd a spektroszkópba jutó fénysugarakat egy 45 mm fókusztávolságú, 37 mm átmérőjű gyűjtőlencsével [9] kollimáltuk. Így a doboz oldalán kivágott 4 cm átmérőjű, kör alakú nyíláson keresztül párhuzamos fénysugarak érik el az optikai rácsot 0°-os beesési szöggel (5. ábra).

A bontóelemen elhajlott fénysugarak érzékeléséhez egy 16 mm fókusztávolságú panelkamera-objektív [10] és annak fókuszsíkjában elhelyezett FW 150 típusú fotoellenállásból [11] „detektort” készítettünk, ame-

6. ábra. Kapcsolási rajz a LED hullámhosszának méréséhez (kellékek: forgó potenciométer, fotoellenállás, 10 kΩ-os ellenállás).



5. ábra. A fény útja a spektroszkópban.

lyet a doboztető belsejének széléhez rögzítve a fényútba forgathatunk.

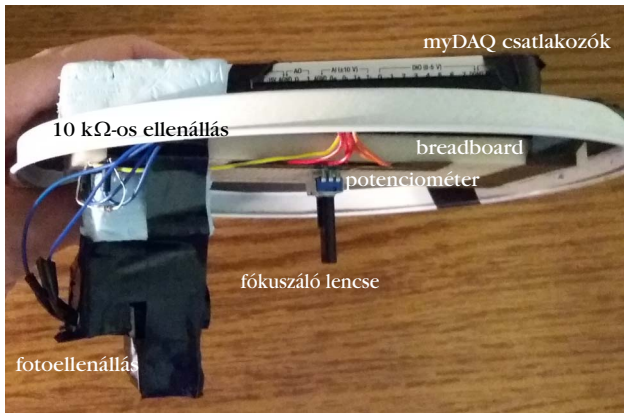
A fotoellenállás a fény érzékelésére alkalmas szenzor: egy záróréteg nélküli passzív félvezető elem, amelynek ellenállása a ráeső fény intenzitásától függően változik. A beeső fotonok növelik a delokalizált töltéshordozók számát, ez okozza az ellenállásérték csökkenését. A myDAQ +5 V-os kimeneti feszültségét a fotoellenállás egyik kivezetésére csatoltuk, majd sorba kötöttünk vele egy 10 kΩ-os ellenállást, amelyet a DGND csatlakozón keresztül földeltük. Megvilágítás nélkül a fotoellenállás értéke 560 kΩ, ezért az ohmos ellenálláson eső feszültség közelít a 0 V-hoz. Ahogy azonban a fény hatására a fotoellenállás értéke lecsökken, a sorba kapcsolt ohmos ellenálláson egyre nagyobb feszültség esik. Ez utóbbi értéket mértük a myDAQ A10 csatornáján keresztül (6. ábra).

Fényérzékelőnk elfordulási szögének méréséhez az NI Starter Kitben található R-0904N-típusú potenciométert használtuk. A doboztető belsejébe ragasztottuk a prototípus próbapanelt (breadboardot) [12], csatkoztattuk és fixáltuk a potenciométert, valamint a detektort. A myDAQ-ot a dobozon kívül rögzítettük a fődémhez (7. ábra).

A változtatható ellenállásnak a doboz forgásszimmetria-tengelyéhez történő illesztését és fixálását egy fából készült tartószerkezettel oldottuk meg, amelybe egy megfelelő méretű, félkör keresztmetszetű lyukat fűrtünk, a doboz lezárásakor ebbe illesztettük a potenciométer forgórészét. Ezzel a mechanikai kivitelezéssel a doboztető forgatásával a detektor és a potenciométer együtt forog el a közös forgástengely körül.

A potenciométert feszültségosztó kapcsolásban csatkoztattuk a myDAQ-hoz: a 0–5 V között változtatható feszültséget az A11 csatornán keresztül mértük (6. ábra). Ahhoz,





7. ábra. A potencionméter és a detektor csatlakoztatása a myDAQ-hoz és a díszdobozhoz.

hogya a forgó potencionméterrel szög mérhessünk, kalibrálnunk kellett, azaz meg kellett határoznunk a potencionméter  $\alpha$  szögelfordulása és a mérhető  $U$  feszültség közötti lineáris függvénykapcsolat ( $\alpha = mU + b$ ) paramétereit.  $U_1$  és  $U_2$  jelölje rendre a  $180^\circ$ -os és a  $0^\circ$ -os elfordulásnál mért feszültséget! Ezekkel a keresett paraméterek

$$m = \frac{180^\circ}{U_1 - U_2} \quad \text{és} \quad b = -\frac{180^\circ}{U_1 - U_2} U_2.$$

Miután kalibráltuk a szögmérőnket, detektáltuk a LED-fény elhajlási képét.

A doboz alját fixáltuk, és a doboz tetejét ehhez képest forgattuk el nagyon lassan, mintegy  $50^\circ$ -kal, miközben az elfordulási szög függvényében mérhetjük a fényintenzitással összefüggő feszültségértéket (8. ábra).

Az így mért adatpárok grafikus megjelenítésével (9. ábra) tulajdonképpen a LED-ek első rendben elhajlott képének intenzitásdiagramját kaptuk.

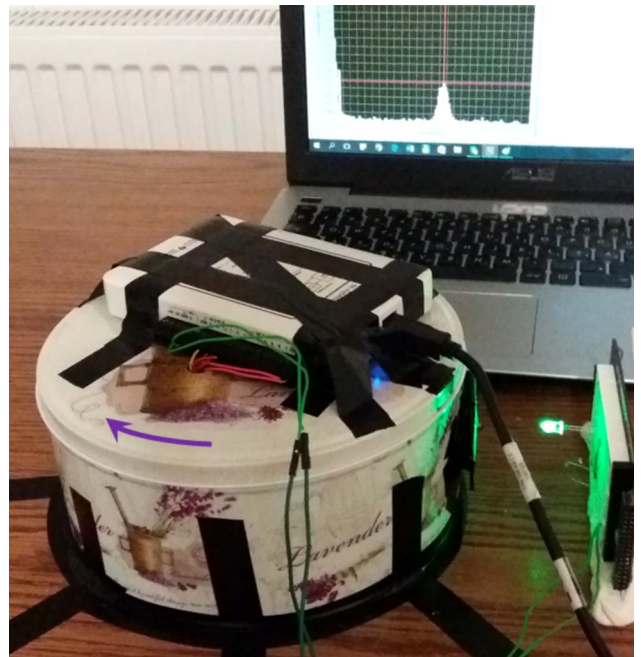
## A mérési eredmények kiértékelése

A mérés kiértékelését is LabVIEW-val végeztük. Elsőként LED-ek nyitófeszültségét határoztuk meg. Mivel 20 mA felett a LED-karakteristikák lineárisnak tekinthetők, ezeket az adatpárokat különválogattuk, és lineáris regressziót alkalmaztunk.

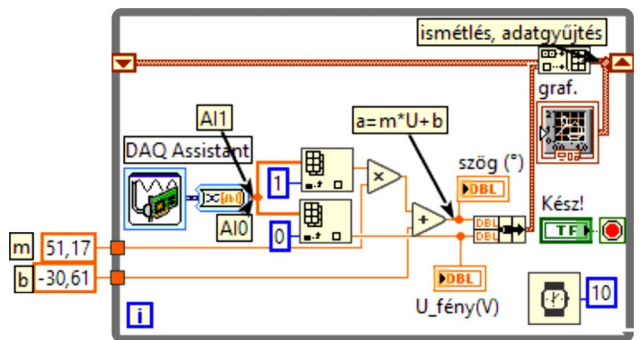
Az így kapott egyenes szakasz paramétereit (meredekség, értékteneggellyel való metszéspont) alapján meghatároztuk a zérushelyét, vagyis a nyitófeszültséget (10. ábra).

A 11. ábrán a 4 különböző LED áramerősség-feszültség karakterisztikáját ábrázoltuk a lineáris szakaszokkal együtt.

Második lépésben a spektroszkóppal végzett mérést értékeltük ki. Először meghatároztuk az elhajlási kép maximumhelyét (12. ábra). Megjegyezzük, hogy a grafikonhoz tartozó kurzor megjelenítésével le-



8. ábra. A spektroszkóp és a hozzá rögzített myDAQ működés közben.

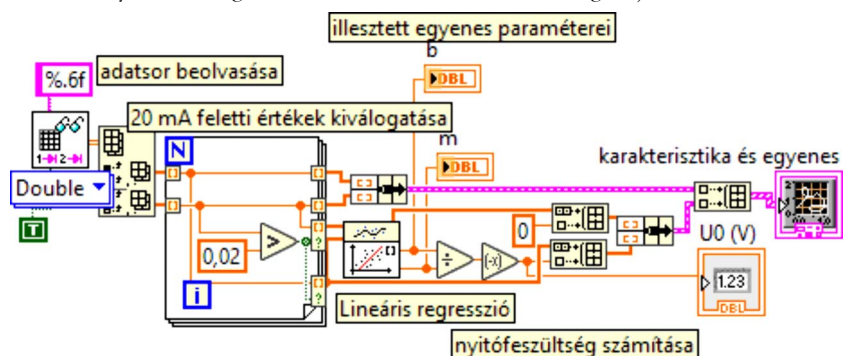


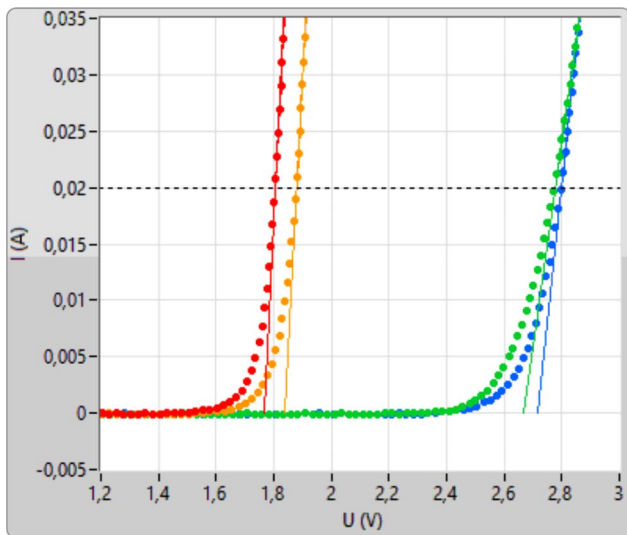
9. ábra. A LED-ek 1. rendbeli elhajlási képéhez tartozó szögek mérése alkalmas virtuális műszer blokkdiagramja.

hetőség van a maximumhelyek manuális megkeresésére is. Ha adatsorunkat az első rend szögtartományára szűkítjük (körülbelül  $20^\circ$ – $45^\circ$ ), akkor ezt a LabVIEW-beépített *Array max & min* szélsőérték-kereső funkciójával elegánsabban oldhatjuk meg.

A 13. ábrán a 4 különböző színű LED elhajlási képének intenzitásdiagramját ábrázoltuk, azaz az elhaj-

10. ábra. A LED-ek áramerősség-feszültség karakterisztikájának kiértékelése (lineáris regresszió és nyitófeszültség-számítás) a virtuális műszer blokkdiagramjában.





11. ábra. Különböző (piros, sárga, zöld, kék) színű LED-ek áramerősség-feszültség karakterisztikái.

lás szögének függvényében ábrázoltuk a fényintenzitással arányos feszültségértékeket. Megjegyezzük, ha a LED-ek valódi spektrumát szeretnénk kinyerni az eredményekből, akkor a fotoellenállás relatív spektrális érzékenységet is figyelembe kellene venni.

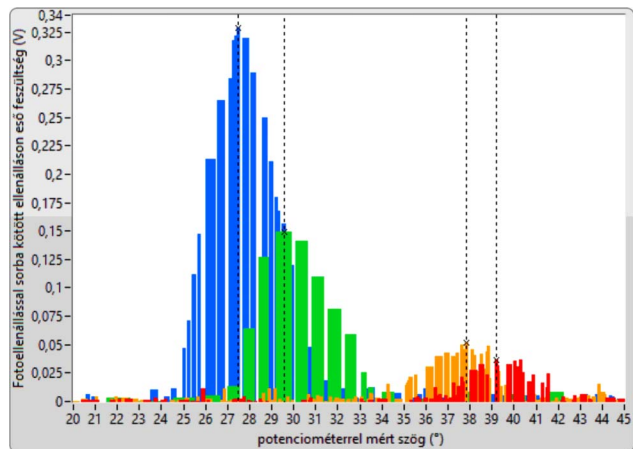
A hullámhossz meghatározására az optikai rácson történő fényelhajlást leíró  $d \sin \alpha = n \lambda$  egyenletet használtuk, ahol  $d = 10^{-6}$  m az optikai rács rácsállandója. Az  $n = 1$ . rendű elhajlási képnél mért maximális fényintenzitáshoz tartozó  $\alpha$  szögértékből meghatároztuk a különböző LED-ek fényének  $\lambda$  hullámhosszát, illetve  $f$  frekvenciáját.

A két mérési lépés eredményeit az 1. táblázatban foglaltuk össze. (Számításaink során az elemi töltés és a vákuumbeli fénysebességet ismertnek feltételeztük.)

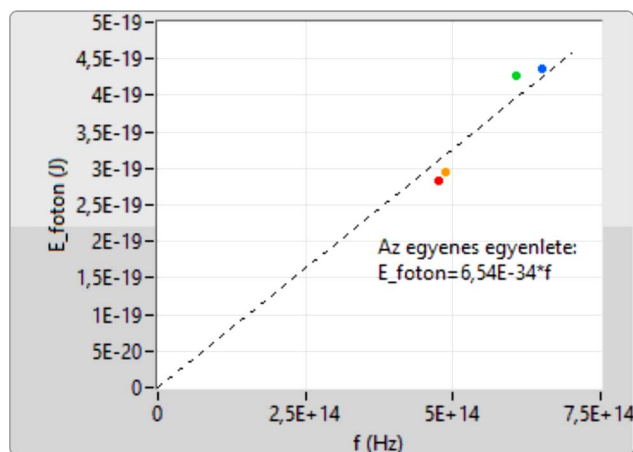
Az egyes LED-ek esetében a Planck-állandó számolt értéke legfeljebb 10%-os relatív hibával tér el a  $h_{\text{irod}} = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Js irodalmi értéktől.

Valamennyi LED-re a számolt érték nagyságrendileg jól közelíti az irodalmi értéket, ezért akár egy-egy LED-del történő bemutató mérés (például tanóra keretén belül) is alkalmas lehet a fizikai állandó becslésére. (Akár 5 perc alatt is elvégezhető a tényleges mérés, amennyiben – az átszerelést elkerülendő – rendelkezésre áll két különböző myDAQ.)

Ha a nyitófeszültségből származtatott fotonenergiát a fény frekvenciájának függvényében ábrázoljuk, a négy mérési pont jó közelítéssel egy origón átmenő



13. ábra. Különböző (piros, sárga, zöld, kék) LED-ek elhajlási képeinek intenzitásdiagramja.



14. ábra. A LED-fotonok energiája a nyitófeszültség függvényében.

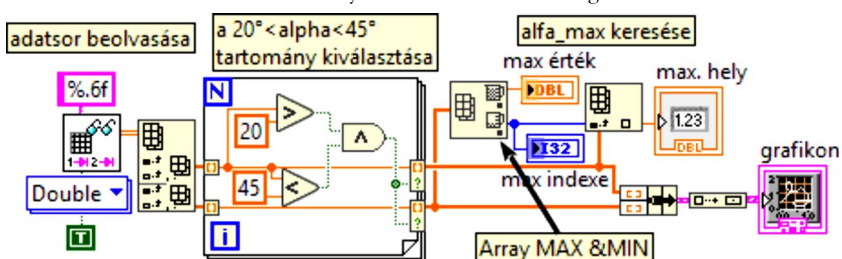
egyenesre illeszkedik, amivel tulajdonképpen igazoltuk a Planck-hipotézist. Az origón átmenő regressziós egyenes meredeksége a Planck-állandó értékét adja. A  $h_{\text{mért}} = 6,54 \cdot 10^{-34}$  Js érték 1,33%-os hibával közelíti az irodalmi értéket (14. ábra).

## Gondolatok a myDAQ és a LabVIEW használatáról

Mérési elrendezésünk, eljárásunk és eredményeink bemutatása egyetlen célt szolgált: szemléltetni, hogy a myDAQ és a LabVIEW használatával, illetve néhány egyszerű kiegészítéssel mennyire kinyílhat a világ a középiskolai mérési kísérletek, illetve kiértékelésük terén.

Tudjuk, az ilyen jellegű eszközbeszerzések a legtöbb iskolában nem mindennaposak, de pályázatok révén is hozzá lehet jutni egy-egy műszerhez. A semminél ez is sokkal több, hiszen a tanár így megtanulhatja az eszköz és a szoftver használatának alapjait. Az interneten számos ingyenesen letölthető virtuális műszer feltehető, amelyek a tanulás és az első sikeres kísérletek alapjául szolgálhat-

12. ábra. A maximális fényintenzitáshoz tartozó szögérték keresése.



1. táblázat

## A 4 különböző színű LED-del végzett mérés eredményei

szín	piros	sárga	zöld	kék
$\alpha$ (°)	39,2	37,9	29,6	27,5
$\lambda$ (nm)	632	614	494	461
$f$ (Hz)	$4,75 \cdot 10^{14}$	$4,89 \cdot 10^{14}$	$6,07 \cdot 10^{14}$	$6,50 \cdot 10^{14}$
$U_0$ (V)	1,77	1,84	2,67	2,72
$U_0 e$ (J)	$2,83 \cdot 10^{-19}$	$2,94 \cdot 10^{-19}$	$4,27 \cdot 10^{-19}$	$4,35 \cdot 10^{-19}$
$h_{\text{számolt}}$ (Js)	$5,96 \cdot 10^{-34}$	$6,02 \cdot 10^{-34}$	$7,04 \cdot 10^{-34}$	$6,70 \cdot 10^{-34}$
$\delta_{\text{rel}}$ (%)	-10,0	-9,2	6,2	1,1

nak. A különböző szenzorok lehetséges felhasználásához javasoljuk az *NI myRIO Project Essentials Guide*-ot [13], amelyben a leírások mellett sok külső hivatkozást találhatunk különböző mérési kísérletekre.

Természetesen már a kezdeti próbálkozásokba is érdemes bevonni az érdeklődő, a fizikára fogékony diákokat. Egy ilyen műhelymunka számos szituációjában igen gyorsan felcserélődhet a szakértő és a laikus szerep. Rengeteget tanulhatunk a tanulóktól, a tanulókról.

## Irodalom

- Juhász András, Görbe László: *A 2007. évi emelt szintű fizika érettségi új kísérleti feladatai*. Öveges József Tanáregylet, Budapest (2007).
- A. Checchetti, A. Fantini: Experimental Determination of Planck's constant using Light Emitting Diodes (LEDs) and Photoelectric Effect. *World Journal of Chemical Education* 3/4 (2015) 87–92., <http://pubs.sciepub.com/wjce/3/4/2/>
- <https://www.ret.hu/media/product/13954/483974/HB5-436HOR-C.pdf>
- <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/hu/nid/211721>
- <http://forums.ni.com/t5/Educators/myDAQ-mini-lab-V-I-Characteristic-II-Nonlinear-devices/ta-p/3519564>
- Piláth Károly: Rácsos spektroszkóp illesztése webkamerához. *Fizikai Szemle* 62/4 (2012) 126–128., <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1204/PilathKaroly.pdf>
- <http://www.printker.hu/-22937/>
- <http://www.ebay.com/itm/Diffraction-Grating-Roll-Sheet-Li-near-1000-lines-mm-Laser-Holographic-Spectrum/>
- <http://www.ebay.com/itm/Diameter-37mm-Convex-Lens-Glass-for-Google-Cardboard-Virtual-Reality-VR-XL-/>
- <http://www.ebay.com/itm/16MM-CCTV-Security-Camera-Focal-Length-Lens-IR-Board-Brand-New-/>
- [https://www.ret.hu/shop/product/perkinelmer/fw-150\\_48-00-66](https://www.ret.hu/shop/product/perkinelmer/fw-150_48-00-66)
- <http://www.ebay.com/itm/Breadboard-830-holes-PCB-Bread-Board-Test-DIY-830-Points-Solderless-MB102-MB-102-/>
- <https://learn.ni.com/teach/resources/92/ni-myrio-project-essentials-guide>

## INTERFERENCIA ÉS DIFFRAKCIÓ A 21. SZÁZADBAN OLCSÓ, ILLETVE MINDENNAP HASZNÁLATOS ESZKÖZÖKKEL

Borbély Venczel

Piarista Gimnázium és Kollégium, Vác

*A fényjelenségek segítségével környezetünkben sok információhoz jutunk. A 19. század elején a fény hullámtermészetét nem volt egyszerű bizonyítani. A ma rendelkezésünkre álló eszközökkel sokkal egyszerűbben bemutatathatók az interferencia és az elhajlás jelenségei, mint Thomas Young, Augustin-Jean Fresnel és társaik idejében. Jelen cikkben néhány ilyen megoldást javaslok.*

A fizika tantárgy oktatásakor, Öveges József utódaként számos olyan eszközt felhasználunk, amelyek olcsón megvásárolhatók, házilag előállíthatók, vagy más okból rendelkezésünkre állnak.



Borbély Venczel 2000-ben végzett a kolozsvári Babeş-Bolyai Tudományegyetemen, okleveles fizikus, fizikatanár. Fizikát tanít a váci Piarista Gimnázium és Kollégiumban, mestertanár. Kutatóként dolgozott a BME Fizika Tanszék Holográfia Csoportjában. 2011-ben PhD fokozatot szerzett, témája a holográfia mérés technikai alkalmazása. Részt vett a Lézer-Sólyomszem holografikus mérőkamera fejlesztésében.

Az elektronikai eszközök nagy része ma már filléres tétel, egy CD vagy DVD lemez nem drága, a keleti webáruházakból sok eszköz alacsony áron, postaköltség nélkül kerül otthonunkba.

A mobiltelefon szinte minden gyereknél ott van, és bevonása az oktatásba nem újdonság [1, 2], de általában valamilyen szenzorát használják különböző programok segítségével. Fénytanban a mobil eszköz vakuját, illetve képernyőjét fényforrásként használhatjuk.

A fény hullámtermészetét igazoló interferencia és fényelhajlás iskolai bemutatása ma már talán nem is nagy kihívás. A jelenségek bemutatásához szükség van monokromatikus fényforrásra, kis méretű, tizedmilliméteres lyukakra, résekre, illetve rácsoakra.

Lyukakat könnyedén fúrhatunk alkalmas anyagba (például vékony műanyag élelmiszeres dobozból kivágott lapkába) gombostű, vagy néhány tizedmilliméteres fúrószár segítségével, réseket vágathatunk pengés késsel (snitzerrel). Ha nem áll rendelkezésre demonstrációs rács, akkor CD lemez „meghántásával”, vagy DVD lemez szétválasztásával és „meghántásával” készíthetünk rácsokat. Az ilyen rács hátránya az, hogy a rések nem egyenesek, hanem görbe vonalúak, így az elhajlási kép sem lesz szimmetrikus. Ha mégis