

A PLANCK-ÁLLANDÓ SZÁMÍTÓGÉPPLEL 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 kiértékelte mérőkísérletek akár a tan-

órán is gyorsan és látványosan elvégezhető. 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 diódot 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:



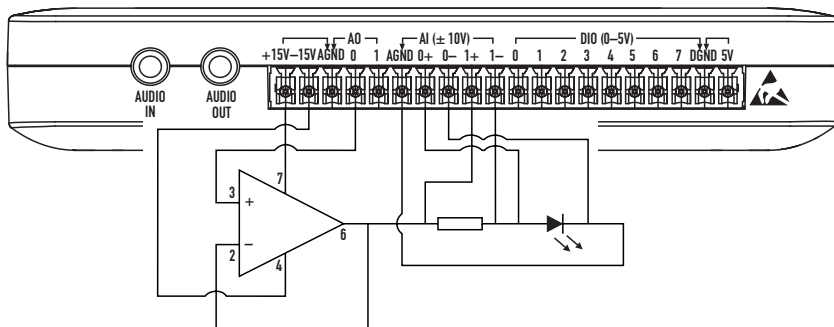
Balog Katalin 11. osztályos kémia tagozatos tanuló, a Szegedi Radnóti Miklós Kísérleti Gimnázium diákja.



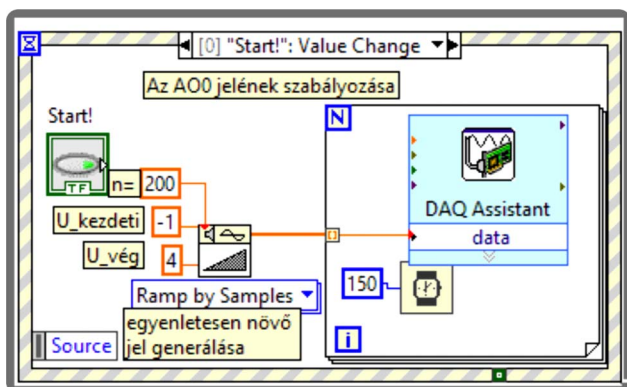
Kovács Kornél 11. osztályos kémia tagozatos tanuló, a Szegedi Radnóti Miklós Kísérleti Gimnázium diákja.



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 tiltószög-szélesség 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.)

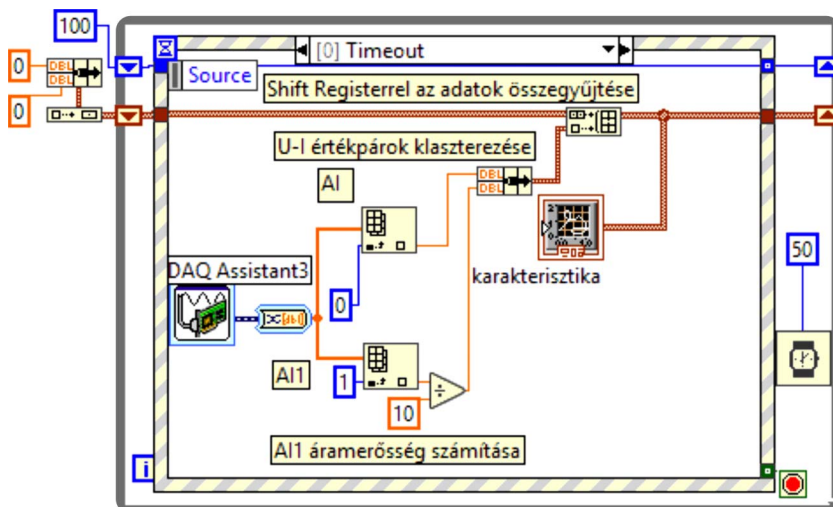
Mint ahogy korábban már utaltunk rá, a myDAQ eszköz ki- és bemeneti csatornákkal is rendelkezik. A karakterisztika felvételekor így mind a vezérlés, mind a mérés a számítógépről irányítva megvalósítható. Az eszköz két analóg kimeneti csatornája közül az AO0 csatlakozón keresztül -1 V-tól 4 V-ig lineárisan 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.

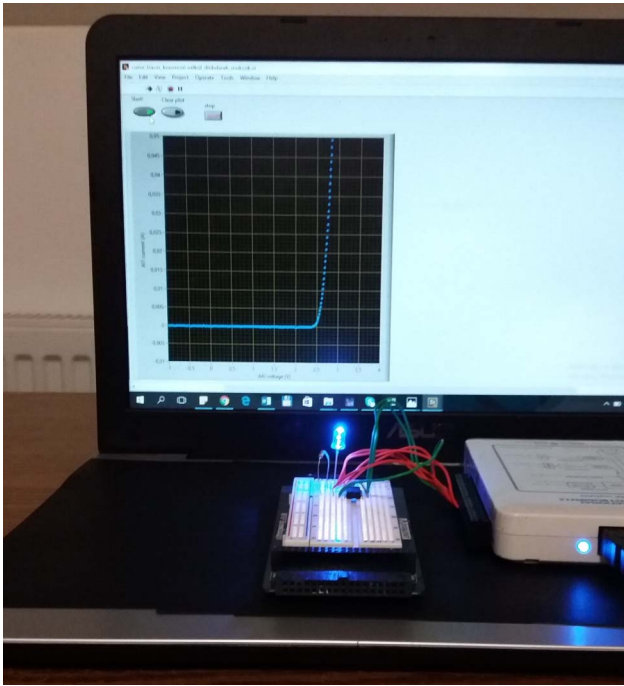
Ugyanezen virtuális műszer másik ciklusában 50 ms-onként mérjük a LED-ek áramerősség-feszültség karakterisztikájának egy-egy pontját. A myDAQ két input-csatornája segítségével mérjük a LED kivezetései közötti feszültséget (AI0 csatorna), illetve a vele sorba kapcsolt 10Ω -os ellenálláson eső feszültséget (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.





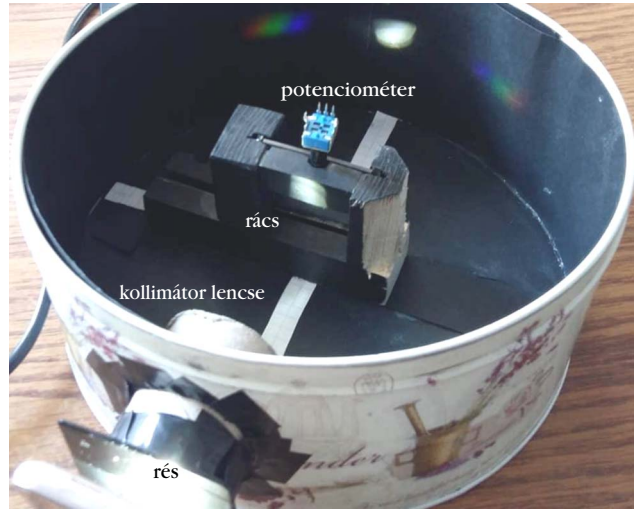
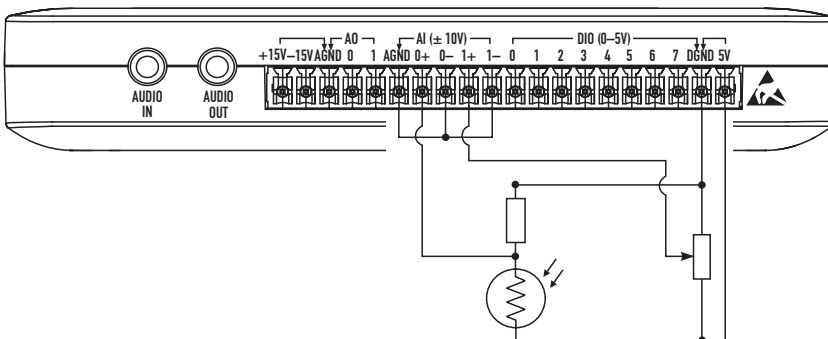
4. ábra. A LED-ek áramerősség-feszültség karakterisztikájának felvétele a myDAQ-kal.

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 fém doboz 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.

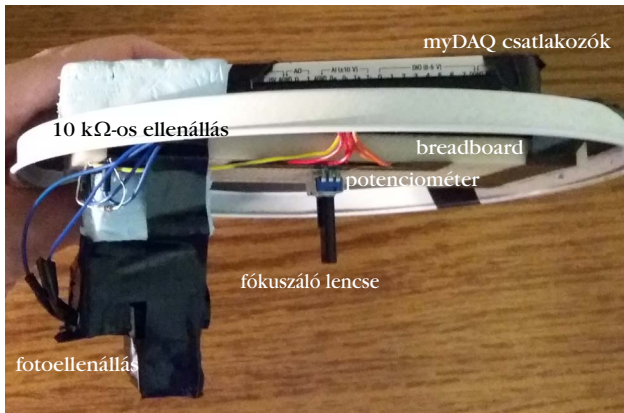
lyet a doboztető belsejének széléhez rögzítve a fényútba forgathatunk.

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], csatloztattuk 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 csatloztattuk 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 határozunk a potencionméter α szögelfordulása és a mérhető U feszültség közötti lineáris függvénykapcsolat ($\alpha = mU + b$) paramétereit. U_1 és U_2 jelölje rendre a 180° -os és a 0° -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° -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.

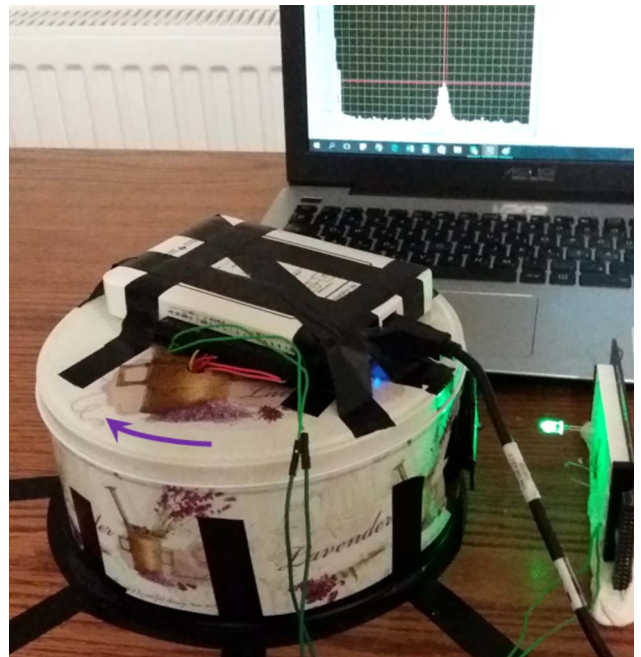
A mérési eredmények kiértékelése

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.

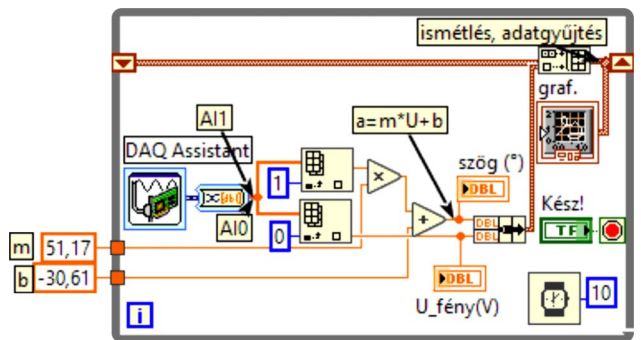
Az így kapott egyenes szakasz paramétereit (meredekség, értéktengellyel való metszéspont) alapján meghatároztuk a zérushelyét, vagyis a nyitófeszültséget (10. ábra).

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.

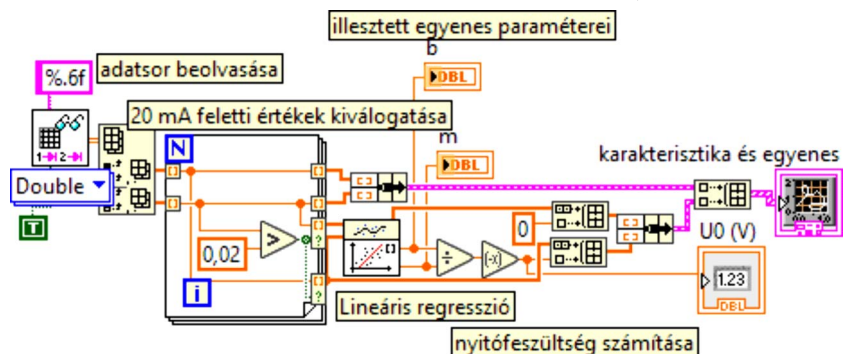


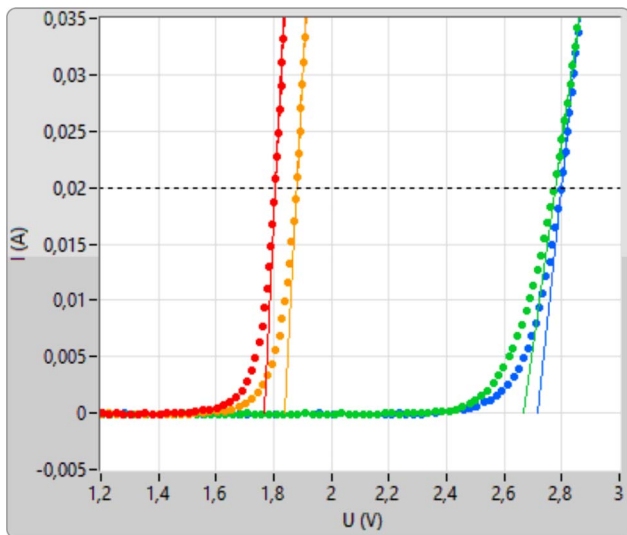
9. ábra. A LED-ek 1. rendbeli elhajlási képéhez tartozó szögek mérése alkalmas virtuális műszer blokkdiagramja.

hetőség van a maximumhelyek manuális megkeresésére is. Ha adatsorunkat az első rend szögtartományára szűkítjük (körülbelül 20° – 45°), 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.

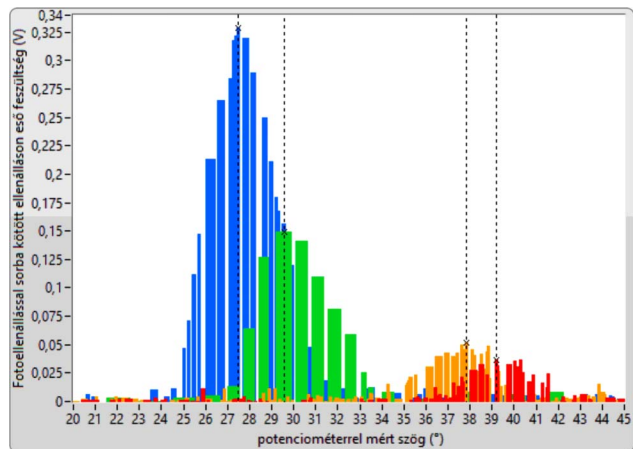
A hullámhossz meghatározására az optikai rácson történő fényelhajlást leíró $d \sin \alpha = n \lambda$ egyenletet használtuk, ahol $d = 10^{-6}$ m az optikai rács rácsállandója. Az $n = 1$. rendű elhajlási képnél mért maximális fényintenzitáshoz tartozó α szögértékből meghatároztuk a különböző LED-ek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

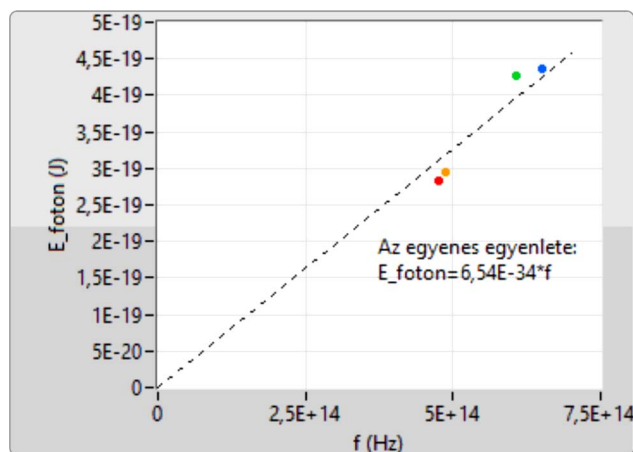
Az egyes LED-ek esetében a Planck-állandó számolt értéke legfeljebb 10%-os relatív hibával tér el a $h_{\text{irod}} = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js irodalmi értéktől.

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.

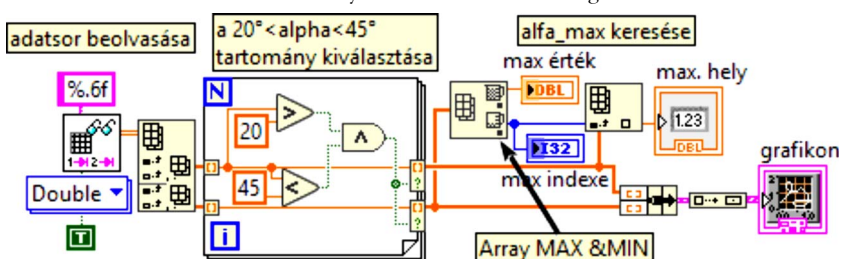
egyenesre illeszkedik, amivel tulajdonképpen igazoltuk a Planck-hipotézist. Az origón átmenő regressziós egyenes meredeksége a Planck-állandó értékét adja. A $h_{\text{mért}} = 6,54 \cdot 10^{-34}$ Js érték 1,33%-os hibával közelíti az irodalmi értéket (14. ábra).

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
α (°)	39,2	37,9	29,6	27,5
λ (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)	$5,96 \cdot 10^{-34}$	$6,02 \cdot 10^{-34}$	$7,04 \cdot 10^{-34}$	$6,70 \cdot 10^{-34}$
δ_{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 bevonnai 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-Linear-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
- <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>