

Experimenty se systémem Vernier

Fotometrické veličiny



Petr Kácovský, KDF MFF UK

Tyto experimenty vznikly v rámci diplomové práce „Využívání dataloggerů ve výuce fyziky“, obhájené v květnu 2012 na MFF UK v Praze.

Materiály je možné volně používat pro výukové účely.

5.7 Fotometrické veličiny

5.7.1 Provedení a zpracování měření

Anotace: Cílem experimentu je ukázat závislost intenzity osvětlení v daném bodě na poloze světelného zdroje.

Klíčové kompetence:

Gymnaziální vzdělávání – Kompetence k řešení problémů – žák:

- vytváří hypotézy, navrhuje postupné kroky, zvažuje využití různých postupů při řešení problému nebo ověřování hypotézy
- uplatňuje při řešení problémů vhodné metody a dříve získané vědomosti a dovednosti, kromě analytického a kritického myšlení využívá i myšlení tvořivé s použitím představivosti a intuice
- kriticky interpretuje získané poznatky a zjištění a ověřuje je, pro své tvrzení nachází argumenty a důkazy, formuluje a obhajuje podložené závěry

Gymnaziální vzdělávání – Kompetence komunikativní – žák:

- efektivně využívá moderní informační technologie

Očekávané výstupy:

Gymn. vzdělávání – Člověk a příroda – Fyzika – Fyzikální veličiny a jejich měření: Žák měří vybrané fyzikální veličiny vhodnými metodami, zpracuje a vyhodnotí výsledky měření.

Teoretický úvod:

Veličiny, které popisují vlastnosti zdrojů světla, přenos světla prostorem a děje spojené s dopadem světla na předměty, se označují jako veličiny fotometrické. Třemi základními jsou svítivost, světelný tok a intenzita osvětlení.

Svítivost I je vlastností zdroje světla, její jednotkou je kandela (cd), jedna ze základních jednotek SI. (Svítivost 1 cd – jak název napovídá – přibližně odpovídá svítivosti obyčejné svíčky, žárovka o příkonu 100 W má svítivost asi 200 cd.)

Světelný tok Φ popisuje šíření světla prostorem. Označuje světelnou energii, kterou zdroj vyzáří za jednu sekundu – jde tedy vlastně o formu výkonu, výkon a světelný tok mají stejný fyzikální rozměr. Jednotkou je lumen (lm) definovaný jako světelný tok vyzářený zdrojem o svítivosti 1 kandela do prostorového úhlu 1 steradián (což odpovídá $\frac{1}{4\pi}$ plného prostorového úhlu). Platí, že $1 \text{ W} \approx 680 \text{ lm}$.

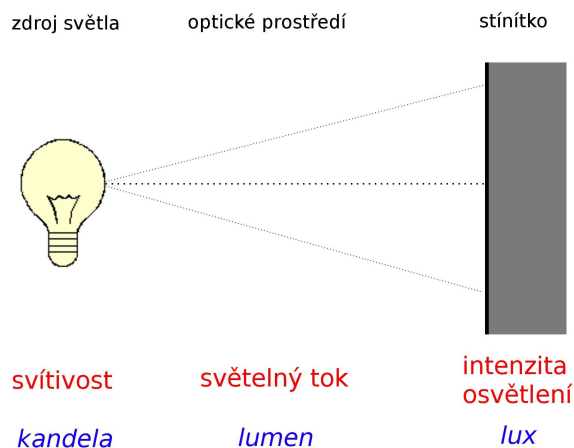
Intenzita osvětlení E (ve starších učebnicích „osvětlení“) je definována jako:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}, \quad (5.29)$$

kde $\Delta\Phi$ je část světelného toku dopadající na plochu o obsahu ΔS . Z tohoto vztahu plyne jednotka intenzity osvětlení: $[E] = \text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$, zkráceně lux (lx). Z převodního vztahu mezi lumenem a watterem plyne, že $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} = 680 \text{ lx}$.

Schematicky jsou fotometrické veličiny znázorněny na obrázku 5.53. Považujeme-li zdroj světla za bodový, platí mezi intenzitou osvětlení a svítivostí následující vztah:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos\alpha, \quad (5.30)$$



Obrázek 5.53: Schéma k výkladu o fotometrických veličinách

kde r je vzdálenost zdroje světla od osvětlené plochy a α úhel, pod kterým světlo na danou plochu dopadá (měříme jej od normály plochy, při kolmém dopadu je tedy osvětlení maximální). Při celém našem měření budeme předpokládat, že světlo se ze zdroje šíří izotropně, bez preferovaného směru.

Potřebné měřicí vybavení: Návod byl zpracován s čidlem osvětlení Vernier LS-BTA, rozhraním Vernier Go!Link a programem Logger Pro. Alternativně lze užít tyto kombinace:

- místo programu Logger Pro program Logger Lite či rozhraní Vernier LabQuest (použití programu Logger Lite neumožňuje zpracování naměřených dat, popsané v tomto návodu)
- pro připojení k počítači lze namísto rozhraní Go!Link vždy použít rozhraní LabQuest nebo LabQuest Mini

Namísto čidla Vernier LS-BTA lze použít jednodušší čidlo Vernier TILT-BTA, které ale neudává hodnoty osvětlení v luxech, ale pouze na relativní stupnici 0-1, což brání provést kvantitativní úvahy v části *Zpracování naměřených dat*.

O světelném čidle Vernier LS-BTA:

Funkční součástí čidla je křemíková fotodioda, na které vzniká napětí úměrné intenzitě dopadajícího světla. Čidlo měří intenzitu osvětlení v intervalu 0 až 150 klux a na boku je opatřeno přepínačem mezi třemi různě citlivými měřicími rozsahy (obr. 5.54). V našem měření budeme pracovat výhradně s rozsahem 0 - 6000 lux.

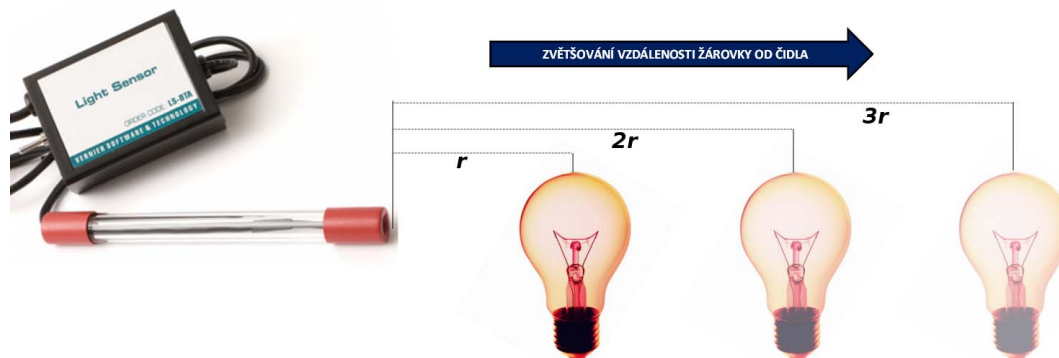


Obrázek 5.54: Přepínač rozsahů

Další pomůcky: délkové měřidlo (pravítko, svinovací metr), lampička s nezakrytou žárovkou (ideálně taková, u které lze sejmout kryt, aby žárovka mohla svítit do všech směrů - viz obr. 5.69; proměřeno se žárovkou 25 W), izolepa

Provedení měření:

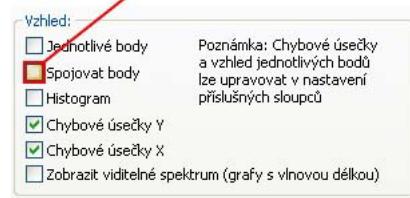
Měření probíhá tak, že do programu Logger Pro manuálně zadáváme aktuální vzdálenost světelného čidla od žárovky a čidlo k této zadané hodnotě přiřadí aktuálně měřenou hodnotu intenzity osvětlení (ilustrace na obr. 5.55). Zde je postup našeho měření:



Obrázek 5.55: Schématicky znázorněný postup při experimentu

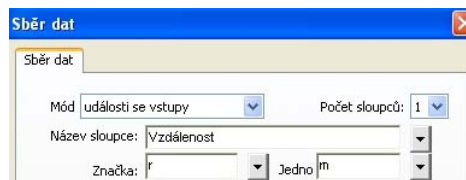
1. Pomocí rozhraní Vernier Go!Link připojte k počítači světelné čidlo Vernier LS-BTA a vyčkejte na jeho automatickou detekci. Na plochu grafu, který se objeví, klikněte pravým tlačítkem myši, vyberte *Nastavení grafu* a v novém okně zrušte zaškrtnutí položky *Spojovat body*. Potvrďte OK.

Zrušte zaškrtnutí u položky "Spojovat body"



Obrázek 5.56: Nastavení grafu

2. Klávesovou zkratkou CTRL+D vyvolejte okno *Sběr dat*, zvolte mód *Události se vstupy* a vyplňte nové okno dle obr. 5.57 (Název sloupce: *Vzdálenost*; značka: *r*; jednotky: *m*). Potvrďte: *Hotovo*.



Obrázek 5.57: Okno *Události se vstupy*

3. Připravený graf závislosti intenzity osvětlení na vzdálenosti je na vodorovné ose škálován až do vzdálenosti 10 m. Protože typicky budeme pracovat se vzdálenostmi menšími než 1 m, změňte na tuto hodnotu také rozsah této osy. Klikněte na hodnotu 10 a přepište ji na hodnotu 1 (obr. 5.58).



Obrázek 5.58: Změna rozsahu vodorovné osy

4. Zafixujte polohu světelného čidla (upevněte izolepou apod.), rozsviďte žárovku a tlačítkem *Zahájit sběr dat* (obr. 4.3) spusťte měření.

5. Žárovku umístěte do takové vzdálenosti od čidla, aby se hodnota intenzity osvětlení pohybovala pod horní hranicí nastaveného rozsahu (tj. například 5000 luxů). Klikněte na modré kolečko v pravé části hlavního panelu, a do okna, které se objeví, zadejte číselně aktuální vzdálenost čidla od žárovky (v případě vzorového měření 0,07 m; viz obr. 5.59). Do grafu se k této zadané vzdálenosti přiřadí aktuálně naměřená intenzita osvětlení.



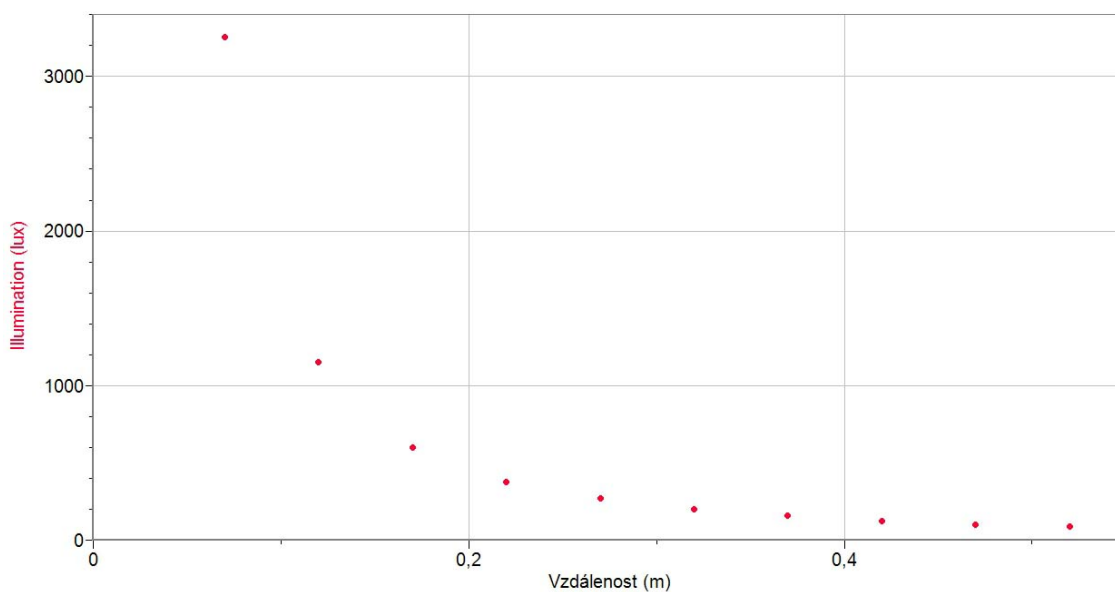
Obrázek 5.59: Zadávání hodnot

6. Změňte vzdálenost světelného zdroje (ve vzorovém měření na 0,12 m) a postup s modrým kolečkem opakujte. Postupně tak proměřte hodnoty osvětlení pro minimálně deset různých vzdáleností. Měření ukončete stiskem červeného tlačítka *Ukončit sběr dat*, které najdete na hlavním panelu vlevo od modrého kolečka. Během měření se snažte, aby světlo ze zdroje dopadalo na měřicí plochu čidla stále přibližně kolmo. Ve výsledném grafu (obr. 5.60) je v případě vzorového měření zobrazeno 10 naměřených dvojic vzdálenost-intenzita osvětlení. Není-li plocha grafu optimálně využita, použijte nástroj *Automatické měřítko* (obr. 4.3).

Zpracovaných naměřených dat:

1. Naším cílem bude nyní určit svítivost použité žárovky. Svítivost představuje konstantu úměrnosti ve vztahu 5.30, který navíc můžeme zjednodušit - během celého měření jsme se snažili zajistit, aby světlo dopadalo na měřicí plochu čidla kolmo, tedy $\cos \alpha = 1$. Dostáváme tedy vztah:

$$E = \frac{I}{r^2} \quad (5.31)$$



Obrázek 5.60: Vzorově naměřená závislost

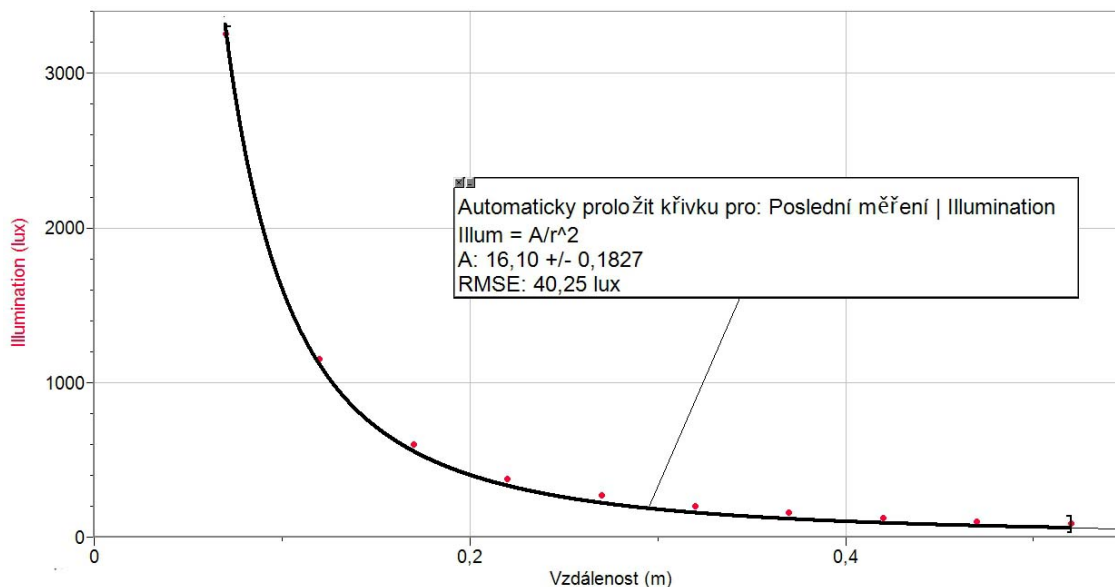
Svítivost odtud určíme tak, že naměřenými body proložíme vhodnou křivku popsanou funkcí $E = E(r)$. Ze vztahu 5.31 plyne, že vhodnou funkcí je funkce typu $\sim \frac{\text{konst.}}{r^2}$. K proložení využijeme nástrojů programu Logger Pro, který konstantu v čitateli automaticky označí písmenem A .

2. Na hlavním panelu klikněte na ikonu *Proložit křivku*. V nabídce *Rovnice* vyberte předpis „ A/r^2 - Převrácená druhá mocnina“ (obr. 5.61), vyberte *Aproximovat* a potvrďte OK. Do grafu se zakreslí křivka popsaná funkcí $E(r) = \frac{A}{r^2}$, program zobrazuje předpis proložené závislosti, dopočtenou hodnotu konstanty A a chybu aproximace (RMSE = *root-mean-square error*). Srovnáním se vztahem 5.31 je patrné, že konstanta A má přímo význam svítivosti I . V případě vzorového měření jsme tedy určili svítivost žárovky jako přibližně 16 cd.



Obrázek 5.61: Výběr aproximující křivky

3. Podobným způsobem můžete proměřit svítivost žárovek o různém příkonu.



Obrázek 5.62: Aproximace naměřených hodnot funkcí $E(r) = \frac{A}{r^2}$

5.7.2 Poznámky, otázky a úkoly

Příprava experimentu

- Je vhodné v učebně částečně zatemnit, zejména okna blízka místu měření. (Nezatemňujte učebnu úplně, přesnost měření tím příliš neutrpí a neztratíte přehled o dění ve třídě.)
- Pro další redukci přirozeného osvětlení orientujte experiment tak, aby měřicí hlava čidla mířila ke dveřím učebny (nikoli k oknům).
- Zafixujte světelné čidlo například izolepou tak, aby se během experimentu nehýbalo.
- Cvičně projedte zdrojem celou vzdálenost na které chcete měřit a zkontrolujte, že se nedostáváte mimo nastavený rozsah čidla.
- Chcete-li se se studenty pustit do diskuse o tom, jaké světelné zdroje by se daly v tomto měření použít, věnujte pozornost části „Rozšíření úlohy: Jaké světelné zdroje lze při měření použít?“.

Během měření

- Zajistěte, aby během měření nebyly čidlo ani zdroj světla nechtěně stíněny.
- Chcete-li při měření použít úspornou žárovku/zářivku, začněte měřit až několik minut po jejím rozsvícení - během „nabíhání“ žárovky se její svítivost postupně zvětšuje, což by měření znehodnotilo. Více o nabíhání úsporné žárovky viz [32].

Po skončení měření

- Pozor! Používáte-li nechráněnou žárovku, nechte ji nejdříve vychladnout.

Otázky a úkoly pro studenty

1. Odlišujte od sebe vlastnosti světelného zdroje (svítivost), přenos světla prostředím (světelný tok) a vjem způsobený dopadem světla na stínítko (intenzita osvětlení).
⇒ Viz část *Teoretický úvod*.
2. Bylo by možné uspořádat měření tak, aby se vztah 5.30 nějak zjednodušil?
⇒ Budeme-li zcela přirozeně požadovat, aby světlo ze zdroje dopadalo na měřící prvek čidla kolmo (tj. „přímo“ a nikoliv „ze strany“), přejde vztah 5.30 ve vztah 5.31.
3. Za tohoto uspořádání nyní proměřte závislost osvětlení na vzdálenosti zdroje. Jakým způsobem lze určit svítivost tohoto zdroje?
⇒ Je samozřejmě možné pro každou naměřenou dvojici vzdálenost-intenzita osvětlení vypočítat svítivost a pak pracovat s jakýmsi průměrem; je však fyzikálně korektnější provést aproximaci popsanou v části *Zpracování naměřených dat*.
4. Jakých zanedbání a idealizací se při našem měření dopouštíme?
⇒ Náš zdroj světla jistě není bodový. Měření vzdálenosti žárovky (přesněji spíše vlákna žárovky) od čidla může být technicky obtížné, z čehož plynou další nepřesnosti, podobně nejsme schopni garantovat kolmý dopad na měřící plochu čidla. Při kvantitativním určování svítivosti žárovky lze diskutovat také o tom, jak velká část světla se pohltí při průchodu skleněným tělem žárovky. Aproximace použitou křivkou je ale i přes tyto vlivy vyhovující.

5.7.3 Rozšíření úlohy: Jiné určení svítivosti

1. V předcházející úloze jsme určili svítivost žárovky ze závislosti intenzity osvětlení na vzdálenosti od zdroje. Zkusme nyní svítivost určit aproximací jiné závislosti. Světelné čidlo opět zafixujeme a pohybovat budeme výhradně světelným zdrojem - tentokrát ale ve směru kolmém na počáteční spojnici čidlo-zdroj. Uspořádání ukazuje obr. 5.63. Veličina, kterou budeme měnit, je vzdálenost označená písmeny s , konstantní bude zůstat vzdálenost označená jako d . Na obrázku je naznačeno vzdalování světelného zdroje směrem „nahoru“, stejně tak lze ale zdroj posouvat směrem „dolů“. (Reálně probíhá měření samozřejmě v rovině.) V obou případech dochází k současné změně r i α ze vztahu 5.30.

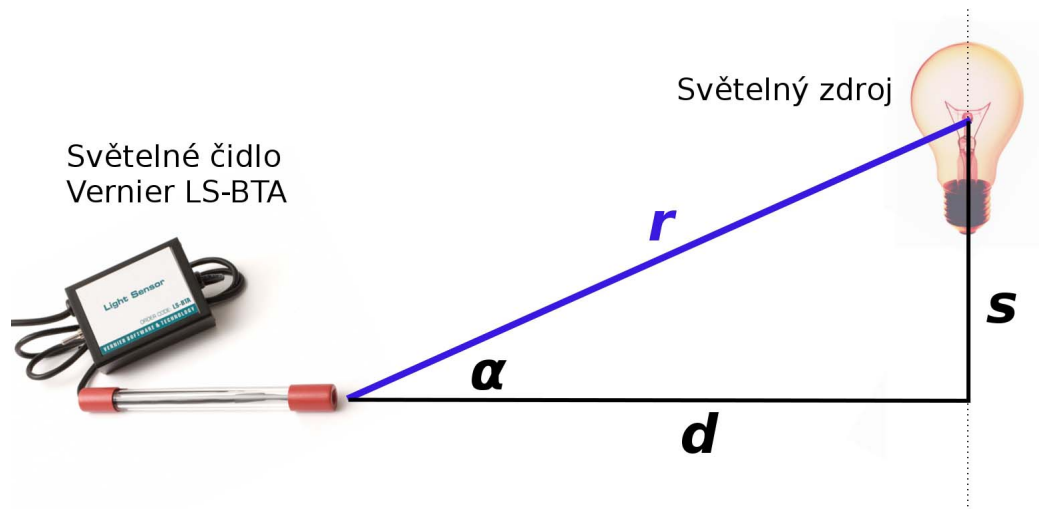
2. Pojdme situaci výše popsat matematicky. Pro konkrétní vzájemnou polohu zafixovaného čidla a světelného zdroje platí (viz obr. 5.64):

$$\cos \alpha = \frac{d}{r} \quad (5.32)$$

$$r^2 = d^2 + s^2 \quad (5.33)$$



Obrázek 5.63: Schématicky znázorněný postup při experimentu



Obrázek 5.64: K matematickému popisu situace

3. Spojením se vztahem 5.30 dostáváme:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha = \frac{I}{d^2 + s^2} \cdot \frac{d}{\sqrt{d^2 + s^2}} = \frac{Id}{\sqrt{(d^2 + s^2)^3}} \quad (5.34)$$

Při konstantním d tedy budeme měnit vzdálenost s a získanou závislost pak budeme aproximovat funkcí ve tvaru $E = E(s)$ podle vztahu 5.34.

4. Body 1 až 4 měření probíhají stejně jako ve výše popsaném měření úbytku intenzity osvětlení se vzdáleností, a to až na tyto změny:

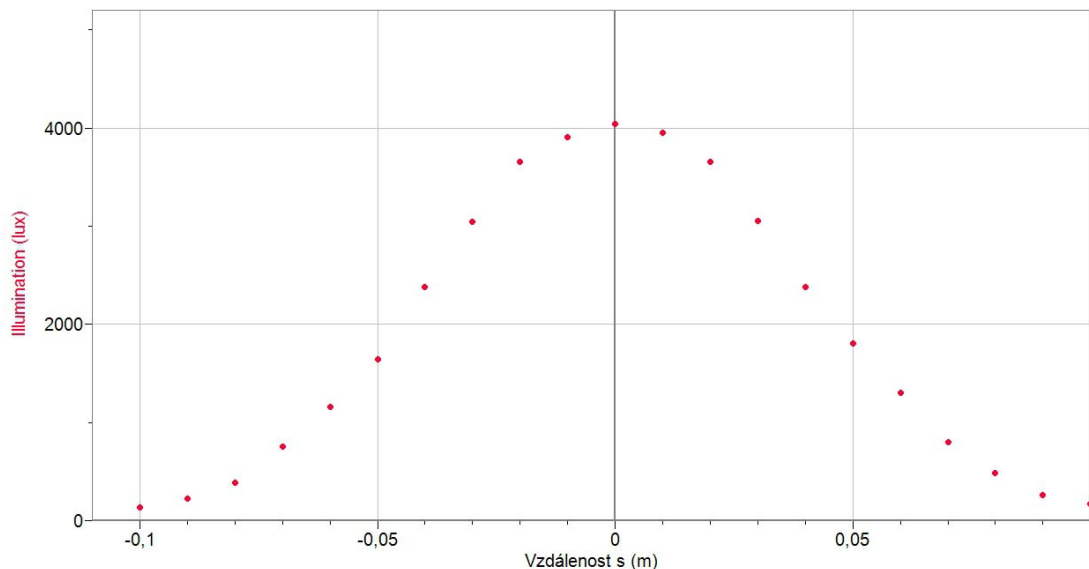
- Proměnnou vzdálenost neznačíme r , ale s .
- Vodorovnou osu stačí škálovat do vzdálenosti 0,1 m.

5. Žárovku umístěte do takové vzdálenosti od čidla, aby se hodnota intenzity osvětlení pohybovala pod horní hranicí nastaveného rozsahu (tj. například 5000 luxů). Zaznamenejte si vzdálenost žárovky od čidla - to je konstantní parametr d . V případě našeho měření $d = 0,063$ m.

6. Nyní klikněte na modré kolečko v pravé části hlavního panelu, a do okna, které se objeví, zadejte číselně aktuální velikost posunu s - v případě první hodnoty tedy 0 m. Do grafu se k této zadané veličině přiřadí aktuálně naměřená intenzita osvětlení.

7. Ve směru kolmém na počáteční spojnici čidlo-zdroj (která má délku d) posouvejte zdroj vždy o vzdálenost 1 cm a opakováním postupu s modrým kolečkem zaznamenávejte hodnoty příslušející posunům $s = 0,01$ m, $s = 0,02$ m, ... až $s = 0,10$ m. Postup zopakujte na obě strany od hodnoty $s = 0$ m (hodnoty s v jednom ze směrů zadávejte záporně).

8. Závislost, kterou získáte, se bude podobat vzorově naměřené závislosti na obrázku 5.65.



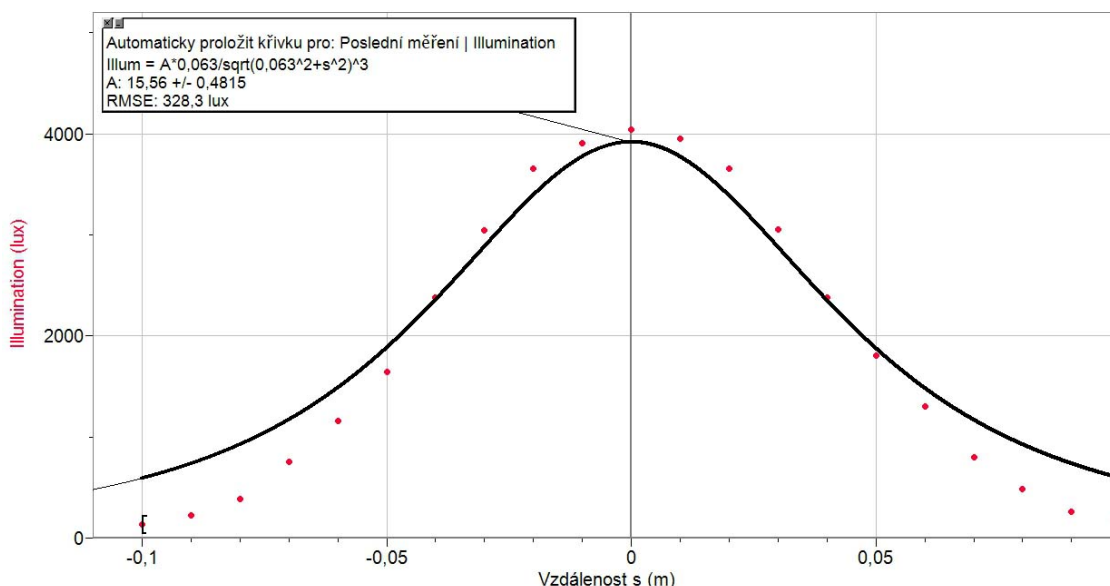
Obrázek 5.65: Ukázka naměřené závislosti

9. Svítivost získáme opět aproximací naměřených dat. Na hlavním panelu klikněte na ikonu *Proložit křivku*. V nabídce *Rovnice* klikněte na *Definovat předpis* a zadejte funkci $E = E(s)$, určenou vztahem 5.34. Hodnotu d dosazujeme číselně v metrech, zadání předpisu ukazuje obrázek 5.66. Postupně potvrďte OK, *Aproximovat*

a opět OK. Do grafu se zakreslí křivka popsaná funkcí $E(s) = \frac{A \cdot d}{\sqrt{(d^2 + s^2)^3}}$, program zobrazuje předpis proložené závislosti, dopočtenou hodnotu konstanty A a chybu aproximace (RMSE = *root-mean-square error*). Srovnáním se vztahem 5.34 je patrné, že konstanta A má přímo význam svítivosti I . V případě vzorového měření jsme tedy určili svítivost žárovky jako přibližně 16 cd.



Obrázek 5.66: Předpis nově definované funkce



Obrázek 5.67: Aproximace naměřených hodnot funkcí $E(s) = \frac{A \cdot d}{\sqrt{(d^2 + s^2)^3}}$

Otázky a úkoly pro studenty

1. Porovnejte přesnost této metody určování svítivosti s metodou použitou v základní verzi úlohy.

→ První metoda je výrazně přesnější z několika důvodů. Nezávislou proměnnou prvního měření r měříme na poměrně velkých vzdálenostech (řádově desítky centimetrů), zatímco posun s určujeme v řádu centimetrů - přitom stejnými měřidly; relativní chyba druhého měření je tedy výrazně větší. Při práci s malými vzdálenostmi (jednotky centimetrů) se do měření dále výrazně více promítají chyby dané uspořádáním experimentu - náš zdroj není bodový, vlákno žárovky má samo rozměry v řádech centimetrů a je otázkou, ke které jeho části vzdálenosti vztahovat. Kromě toho je nutné zajistit pohyb zdroje ve směru skutečně kolmém na počáteční spojnici čidlo-zdroj. I z těchto důvodů je pak provedená aproximace viditelně nepřesná a získaná hodnota svítivosti je zatížena velkou chybou.

5.7.4 Rozšíření úlohy: Jaké světelné zdroje lze při měření použít?

Chcete-li se se studenty věnovat této úloze podrobněji, je vhodné s nimi na úvod rozvést diskusi, s jakými pomůckami lze experiment provádět.

1. Položte studentům otázku, jaké požadavky bychom měli mít na používaný zdroj světla, abychom co nejpřesněji naměřili požadovanou závislost intenzity osvětlení na vzdálenosti od tohoto zdroje. Vhodné odpovědi mohou být například:

- „Zdroj by měl být dostatečně silný, abychom mohli zanedbat přirozené osvětlení z okolí, ale zase ne příliš silný, abychom se nedostali mimo měřicí rozsah čidla.“
- „Je-li čidlo upevněné, zdrojem by se mělo dát snadno manipulovat, abychom mohli lehce měnit vzdálenost k čidlu.“
- „Chceme-li potvrdit vztah 5.30, měl by se zdroj co nejvíce blížit bodovému zdroji, pro který tento vztah ideálně platí.“
- „Během měření by měl zdroj mít konstantní svítivost - pouze za tohoto předpokladu má smysl proměřovat závislost intenzity osvětlení na vzdálenosti.“ apod.

2. Poslední myšlenku je nyní vhodné rozvinout. Pomocí světelného čidla se svými studenty snadno ověříte, které světelné zdroje vykazují stále stejnou svítivost a které naopak nikoliv - stačí čidlo a zdroj vůči sobě zafixovat a nechat proběhnout měření. Naměříme-li konstantní hodnotu osvětlení, potvrdili jsme tím podle vztahu 5.30 také konstantní svítivost zdroje (protože vzájemná poloha čidla a zdroje se nemění).

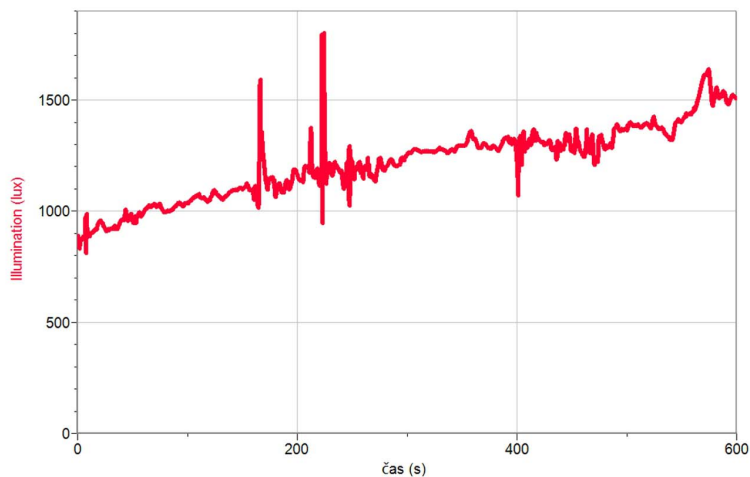
3. Přehled na obrázcích 5.68 a 5.69 ukazuje vzorově naměřené výsledky pro pět vybraných zdrojů, jistě je možné proměřit některé další. Všechny závislosti s výjimkou měření pro žárovku byly naměřeny pro vzorkovací frekvenci 20 Hz, měření pro žárovku se vzorkovací frekvencí 1000 Hz.

4. Z grafů je patrné, že „opatřit si“ zdroj se skutečně konstantní svítivostí není snadné. Stručný komentář k proměřeným zdrojům:

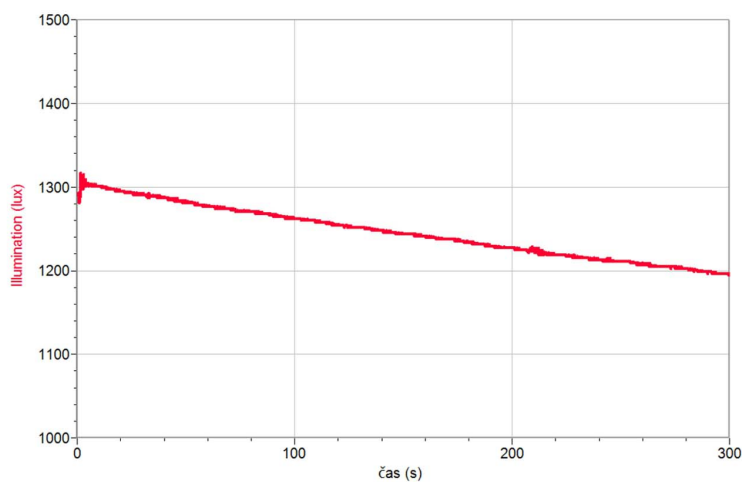
- *Svíčka*: Svítivost se mění dle aktuální velikosti plamene, libovolný závan vzduchu (i v klidné místnosti) vnáší do měření podstatnou nepřesnost.
- *Baterka bez krytu*: Nejlépe se blíží bodovému zdroji, svítivost ale v čase klesá, navíc jde o příliš slabý zdroj, pro vzdálenosti větší než 10 cm nepoužitelný.
- *Svítilna na kolo s parabolickým zrcadlem*: Kvůli zrcadlu neodpovídá bodovému zdroji, navíc svítivost po zapnutí rychle klesá.
- *Baterka s parabolickým zrcadlem*: Kvůli zrcadlu neodpovídá bodovému zdroji, průběh svítivosti roztřesený.



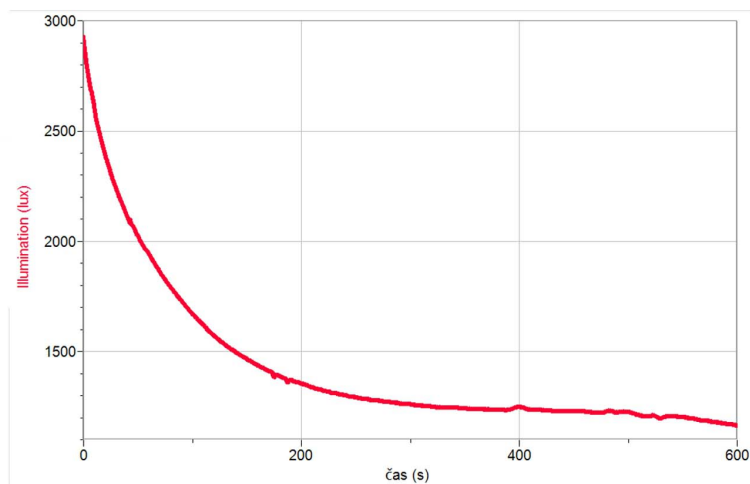
Svíčka
 Délka měření: 10 minut
 Vzdálenost od čidla: 4 cm



Baterka bez krytu
 Délka měření: 5 minut
 Vzdálenost od čidla: 2 cm



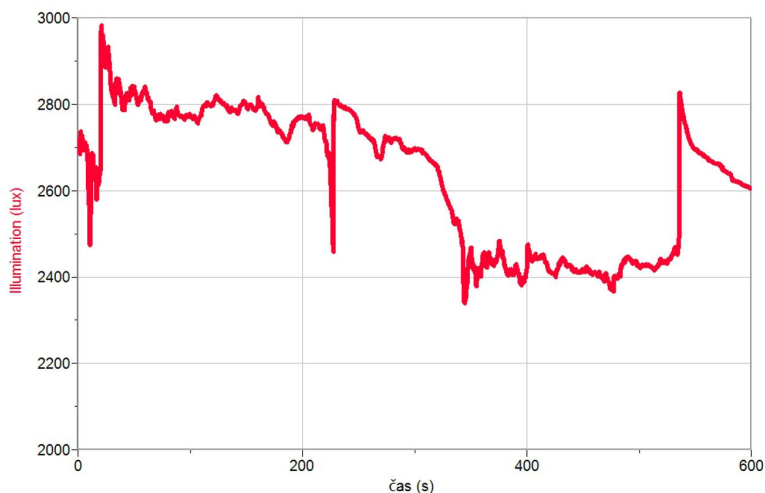
Svítilna na kolo s
 parabolickým zrcadlem,
 napájení 4xAA
 Délka měření: 10 minut
 Vzdálenost od čidla: 7 cm



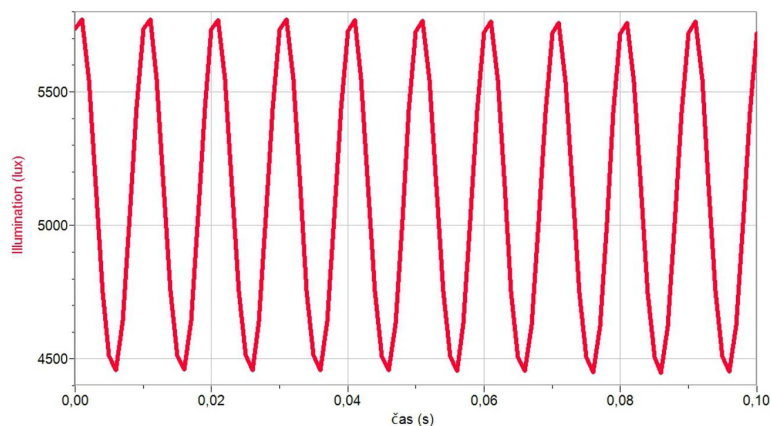
Obrázek 5.68: Svítivost některých světelných zdrojů



Baterka s parabolickým zrcadlem
Délka měření: 10 minut
Vzdálenost od čidla: 8 cm



Žárovka 25 W
Délka měření: 0,1 s
Vzdálenost od čidla:
cca 5,5 cm



Obrázek 5.69: Svítivost některých světelných zdrojů

- *Žárovka 25 W*: Jediný střídavě napájený zdroj, více viz níže. Toto měření nelze provést s rozhraním Vernier Go!Link, vzhledem k potřebě vysoké vzorkovací frekvence (typicky 1000 Hz) bylo použito rozhraní Vernier LabQuest.

5. V případě žárovky napájené ze sítě je za rozkmitaný průběh závislosti zodpovědné připojení ke zdroji střídavého napětí. Jas žárovky, pro oko neměnný, ve skutečnosti osciluje s frekvencí 100 Hz, dvojnásobkem síťové frekvence, o čemž se můžeme pomocí čidla LS-BTA snadno přesvědčit (více o studiu „blikání žárovky“ se systémem Vernier v [32]). Přesto je možné tento zdroj pro naše měření použít - světelné čidlo LS-BTA při popsaném způsobu měření oscilující hodnoty automaticky střeďuje.

Otázky a úkoly pro studenty

1. Jaké požadavky bychom měli mít na vlastnosti používaného světelného zdroje?
⇒ Viz výše.
2. Navrhněte několik možných světelných zdrojů a rozhodněte, zda výše uvedené požadavky splňují.
⇒ Viz výše.
3. Vysvětlete, čím je dán časový průběh svítivosti žárovky připojené ke zdroji stejnosměrného napětí.
⇒ Viz [32].