

Univerzita Karlova v Praze  
Matematicko-fyzikální fakulta

## DIPLOMOVÁ PRÁCE



**Petr Káčovský**

**Využívání dataloggerů ve výuce fyziky  
(se zaměřením na systém Vernier)**

Katedra didaktiky fyziky

Vedoucí diplomové práce:

**Mgr. Pavel Böhm**

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Učitelství fyziky-matematiky pro SŠ

Praha 2012

Děkuji vedoucímu této práce **Mgr. Pavlu Böhmovi** za cenné rady a za ochotu, se kterou neváhal konzultovat nové otázky, jež při vzniku práce postupně vyvstávaly.

Děkuji konzultantovi této práce **RNDr. Vojtěchu Žákovi, Ph.D.**, za pomoc při zpracovávání didaktické části práce a inspirativní připomínky k odborným pasážím.

Další poděkování patří lidem, kteří se na vzniku práce podíleli svými zkušenostmi, zajišťováním pomůcek potřebných k provádění experimentů či jazykovou kontrolou práce. Jsou to:

Mgr. Jakub Jermář  
RNDr. Eva Závětová  
Bc. Pavla Jandová

Závěrem chci poděkovat slečně Ivaně Višové, sama nejlépe ví, za co.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne

Petr Kácovský

Název práce: Využívání dataloggerů ve výuce fyziky (se zaměřením na systém Vernier)  
Autor: Petr Kácovský  
Katedra (ústav): Katedra didaktiky fyziky  
Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Pavel Böhm  
e-mail vedoucího: pavel.bohm@mff.cuni.cz

**Abstrakt:** Modernizující se vybavení škol umožňuje do experimentální výuky fyziky stále častěji zapojovat moderní počítačem podporované systémy schopné záznamu a ukládání naměřených dat pro pozdější vyhodnocení – tzv. datalogery.

Úvod této práce je věnován průzkumu, který měl mezi vyučujícími fyziky zjišťovat, jakou formu návodů preferují, následuje stručná rešerše již existujících materiálů. Hlavní částí práce jsou pak nově vytvořené návody na experimenty s datalogery školního experimentálního systému Vernier, jež mají primárně sloužit vyučujícím fyziky při zapojení experimentů do jejich výuky. Návody zahrnují vždy popis jak měření provést, jakým způsobem lze naměřená data zpracovat a jaké otázky a úkoly pro studenty s nimi lze spojit. Tyto experimenty se zaměřují na oblast středoškolské termodynamiky (resp. molekulové fyziky a termiky) a jejich tematickým průnikem je pojem energie, jejich forem, přenosu a zachování.

**Klíčová slova:** Experimentální systém Vernier, experimenty ve výuce fyziky, energie, experimenty ze středoškolské termodynamiky.

Title: Using dataloggers in physics teaching (focused on Vernier experimental system)  
Author: Petr Kácovský  
Department: Department of Physics Education  
Supervisor: Mgr. Pavel Böhm  
Supervisor's e-mail address: pavel.bohm@mff.cuni.cz

**Abstract:** Modernizing equipment enables schools to involve advanced computer-aided systems in physics teaching. This work especially focuses on systems capable of recording and storing measured data for later evaluation - the dataloggers. The introduction of this work is devoted to a survey among physics teachers that should investigate what form of instructions they prefer; then a brief search of existing materials follows.

The main part of the work consists of newly created instructions for experiments with dataloggers of the Vernier experimental system, primarily designed to serve teachers to implement physics experiments in their teaching. The instructions always include a description how to prepare and undertake the measurement, how to process the measured data and what questions and tasks for students can be connected with this part of physics. Experiments described in this work mainly focus on secondary school thermodynamics (or more precisely on molecular physics and thermals) and their thematic intersection is energy, its forms, transmission and conservation.

**Keywords:** The Vernier experimental system, experiments in physics teaching, energy, experiments related to secondary school thermodynamics



# Obsah

<b>1 Seznámení s obsahem práce</b>	<b>1</b>
1.1 Úvodem . . . . .	1
1.2 Cíle této práce . . . . .	1
1.3 Opora v RVP G [1] . . . . .	2
1.4 Zaměření návodů, cílová skupina studentů . . . . .	2
1.5 Struktura práce . . . . .	3
<b>2 Návodů na experimenty s datalogery (preference učitelů)</b>	<b>4</b>
2.1 O průzkumu mezi vyučujícími fyziky . . . . .	4
2.2 Výsledky průzkumu . . . . .	5
<b>3 Přehled již publikovaných návodů</b>	<b>10</b>
3.1 Obecně k již existujícím materiálům . . . . .	10
3.2 Materiály v anglickém jazyce . . . . .	10
3.3 Materiály v češtině – elektronická podoba . . . . .	11
3.4 Materiály v češtině – tištěná podoba . . . . .	12
<b>4 Program Logger Pro 3</b>	<b>13</b>
<b>5 Experimenty</b>	<b>15</b>
5.1 Kam se ztrácí energie? . . . . .	15
5.1.1 Provedení a zpracování měření . . . . .	15
5.1.2 Poznámky, otázky a úkoly . . . . .	21
5.1.3 Rozšíření úlohy . . . . .	22
5.2 Izotermický děj . . . . .	26
5.2.1 Provedení a zpracování měření . . . . .	26
5.2.2 Poznámky, otázky a úkoly . . . . .	31
5.2.3 Rozšíření úlohy 1: Práce IP . . . . .	32
5.2.4 Rozšíření úlohy 2: Van der Waalsův plyn . . . . .	33
5.3 Tuhost pružiny . . . . .	35
5.3.1 Provedení a zpracování měření . . . . .	35
5.3.2 Poznámky, otázky a úkoly . . . . .	41
5.3.3 Kontrola výsledku: . . . . .	42
5.4 Jak funguje tepelná izolace . . . . .	43
5.4.1 Provedení a zpracování měření . . . . .	43
5.4.2 Poznámky, otázky a úkoly . . . . .	47

5.5	Podchlazená kapalina . . . . .	49
5.5.1	Provedení a zpracování měření . . . . .	49
5.5.2	Poznámky, otázky a úkoly . . . . .	53
5.6	Tuhnutí vody . . . . .	55
5.6.1	Provedení a zpracování měření . . . . .	55
5.6.2	Poznámky, otázky a úkoly . . . . .	60
5.6.3	Rozšíření úlohy: Podchlazení vody . . . . .	61
5.7	Fotometrické veličiny . . . . .	62
5.7.1	Provedení a zpracování měření . . . . .	62
5.7.2	Poznámky, otázky a úkoly . . . . .	67
5.7.3	Rozšíření úlohy: Jiné určení svítivosti . . . . .	68
5.7.4	Rozšíření úlohy: Jaké světelné zdroje lze při měření použít? . .	72
<b>6</b>	<b>Provedené experimenty a požadavky k maturitní zkoušce</b>	<b>76</b>
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>78</b>
	<b>Literatura</b>	<b>79</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>82</b>

**Příloha č.1:** Průzkum *Návody na experimenty s datalogery (preference učitelů):*  
Dotazník

**Příloha č.2:** Průzkum *Návody na experimenty s datalogery (preference učitelů):*  
Úplné odpovědi respondentů

# Kapitola 1

## Seznámení s obsahem práce

### 1.1 Úvodem

*„Nevěřte všemu, co se vám k věření předkládá: Zkoumejte vše a přesvědčujte se o všem sami.“*  
Jan Amos Komenský

Mnoho věcí se změnilo od doby, kdy Učitel národů směřoval tato slova k žákům první poloviny 17. století. V době, ve které dnešní žáci i my samotní žijeme, už stěží můžeme toto jeho poselství zcela naplňovat. Množství, ve kterém k nám informace přicházejí, je činí téměř neověřitelnými, a tak nám velice často nezbývá než jejich zdrojům poslušně a poněkud rezignovaně důvěřovat.

Tím naléhavěji vystupuje do popředí škola coby instituce, která pomáhá žákům hromadící se informace třídit a zejména v přírodních vědách poskytuje také zázemí, prostor a čas pro ověřování některých z nich. Takto vidí poslání přírodovědného vzdělávání Rámcový vzdělávací program pro gymnázia (viz [1]): *„Základní prioritou každé oblasti přírodovědného poznávání je odkrývat metodami vědeckého výzkumu zákonitosti, jimiž se řídí přírodní procesy.“* Ve fyzice i její výuce představuje přímočarou cestu k tomuto odkrývání zákonitostí („poznání pravdy“) experiment.

### 1.2 Cíle této práce

Tato diplomová práce se proto zaměřila na tvorbu návodů na experimenty určené pro vyučující fyziky na vyšších stupních gymnázií a středních školách. Jejím cílem bylo vytvoření sady podrobně rozpracovaných návodů k experimentování tak, aby tyto splňovaly co nejvíce z následujících podmínek, které jsem si vytyčil:

- Forma návodů by měla vyhovovat co největší části vyučujících.
- Návod by mělo být možné použít při frontálním předvádění experimentu i jako výchozí materiál pro laboratorní práce žáků.
- Zpracování naměřených dat by svými přesahy mělo využívat znalostí z ostatních předmětů (zejména matematiky, chemie a IKT).
- Ke zpracování měření by měla existovat rozšíření, stupňující obtížnost úlohy.

Experimenty mají nejen kvalitativní, ale také kvantitativní charakter a jsou uzpůsobeny k provádění se **školním experimentálním systémem Vernier**.

### 1.3 Opora v RVP G [1]

Měření a jejich zpracování prováděná podle návodů v této práci mají za cíl rozvíjet u žáků tyto klíčové kompetence:

*Kompetence k učení - žák:*

- kriticky přistupuje ke zdrojům informací, informace tvořivě zpracovává a využívá při svém studiu a praxi

*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
- je otevřený k využití různých postupů při řešení problémů, nahlíží problém z různých stran

*Kompetence komunikativní - žák:*

- s ohledem na situaci a účastníky komunikace efektivně využívá dostupné prostředky komunikace, verbální i neverbální, včetně symbolických a grafických vyjádření informací různého typu
- efektivně využívá moderní informační technologie
- správně interpretuje přijímaná sdělení a věcně argumentuje

Konkrétní očekávané výstupy jsou uvedeny vždy v úvodu každého jednotlivého návodu.

### 1.4 Zaměření návodů, cílová skupina studentů

Tematicky jsem se zaměřil na oblast fyziky, která je jazykem střední školy označována jako **Molekulová fyzika a termika**, těžiště většiny experimentů leží právě v této oblasti, byť některé úlohy se dají velmi dobře zasadit do učiva mechaniky. Pojítkem experimentů je totiž zejména vazba na výpočty spojené s prací a energií, popř. na zákon zachování energie coby jeden ze základních fyzikálních principů v mnoha různých podobách. Motivace, která mě vedla k výběru této oblasti fyziky, je v zásadě trojí:

1. Běžně dostupná čidla systému Vernier nabízejí právě v této oblasti velmi různorodá použití, rozšířená navíc k těmto čidlům dodávanými doplňky.
2. Téma energie, jejích forem, jejího přenosu a zachování zasahuje do všech partií fyziky a je vhodným můstkem mezi nimi, pomáhá ukazovat a zdůrazňovat logickou propojenost středoškolské teorie.
3. Výzkum provedený mezi studenty víceletých gymnázií a SOŠ (jeho výsledky jsou uvedeny ve [2]) ukázal, že molekulová fyzika a termika je mezi žáky vůbec nejméně oblíbenou partií fyziky. Má tedy smysl rozvíjet možnosti, kterými ji žákům přiblížit - mezi takové možnosti jistě patří experimenty.

Experimenty a jejich zpracování jsou zaměřeny na studenty s výraznějším zájmem o fyziku, obsahují otázky problémového charakteru a jako takové mohou být vhodnou náplní výběrových seminářů z fyziky. (Motivací zaměřit je tímto směrem pro mě byl subjektivní pocit založený na osobní zkušenosti, totiž ten, že ve výběrových seminářích se velice často zaměřuje výuka na řešení úloh a prostoru k experimentování není mnoho.)

## 1.5 Struktura práce

Ještě před vlastní tvorbou experimentů jsem dle zadání práce provedl mezi vyučujícími fyziky orientační průzkum, kterým jsem zjišťoval jejich preference ohledně forem návodů na experimenty prováděné s datalogery (do jejichž „rodiny“ systém Vernier patří). Následovala rešerše již existujících návodů k experimentům tohoto druhu a několik slov o podobě a obsluze programu Logger Pro, který jsem při měřeních s experimentálním systémem Vernier používal. Hlavní částí práce jsou pak vlastní návody na experimenty zahrnující popis naměření dat, možnosti jejich zpracování včetně výše zmíněných rozšíření, výčet věcí, na které si dát při provádění experimentu pozor a v neposlední řadě otázky a úlohy pro studenty.

# Kapitola 2

## Návody na experimenty s dataloggery (preference učitelů)

### 2.1 O průzkumu mezi vyučujícími fyziky

Vhodným vstupem do problematiky tvorby nových návodů na experimenty s dataloggery se stal orientační průzkum mezi učiteli fyziky. Cílem průzkumu bylo:

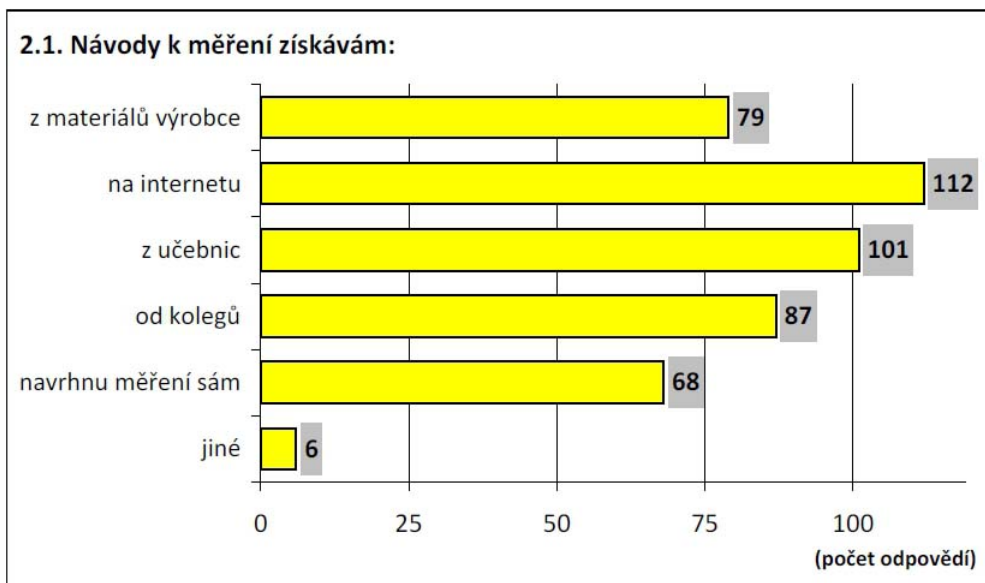
- zjistit, zda existuje poptávka po nových návodech na experimenty s dataloggery
- zjistit, jakou podobu by event. tyto návody měly mít (podrobnost, tematické zaměření, forma - video, fotonávod, strohý text,...)

V termínu 3. října - 12. listopadu 2011 jsem prostřednictvím internetového dotazníku oslovil více než 500 fyzikářů na českých základních a středních školách, vrátilo se mi 162 odpovědí (byť ne všichni dotazovaní zodpověděli všechny otázky). Dotazník je k této práci přiložen jako příloha č. 1, úplné odpovědi respondentů jako příloha č. 2.

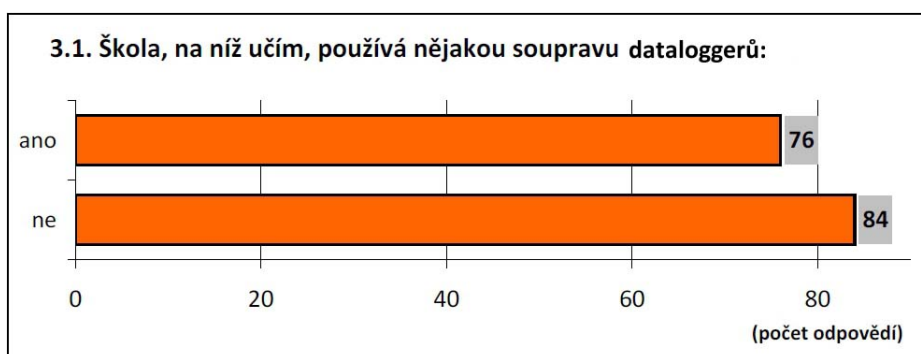
**Výběrový efekt:** Velkou část respondentů tohoto průzkumu tvoří učitelé, na které jsem získal kontakt na základě jejich účasti v různých projektech, vzdělávacích iniciativách apod. (Například Projekt Heuréka, Klub Světa energie ČEZu, Společnost Česká hlava, kurzy CŽV na univerzitách,...) Tímto způsobem se do průzkumu dostal velký počet aktivních, činorodých pedagogů, kteří mají zájem své schopnosti a svůj styl výuky rozvíjet a obohacovat. Stejně tak lze vyslovit domněnku, že ti, kteří na moji prosbu reagovali, mají spíše zájem na vzniku nových materiálů než ti, kteří ji nechali odeznít do ztracena. Lze tak předpokládat, že v průzkumu dochází k výběrovým efektům, kdy odpovědi aktivnějších pedagogů posouvají výsledky mimo globální průměr. V některých komentářích tento možný efekt ještě připomenu.

**Zpracování výsledků průzkumu:** Údaje získané v průzkumu jsem graficky zpracoval a na následujících stránkách jednotlivé výsledky stručně okomentuji. (Jednotlivé otázky jsou uvedeny přímo u grafů s výsledky, pod nimi následují krátké komentáře.) Nebudu rozebírat odpovědi na otázky 1.1 a 1.2, protože přímo nesměřují k cílům tohoto výzkumu.

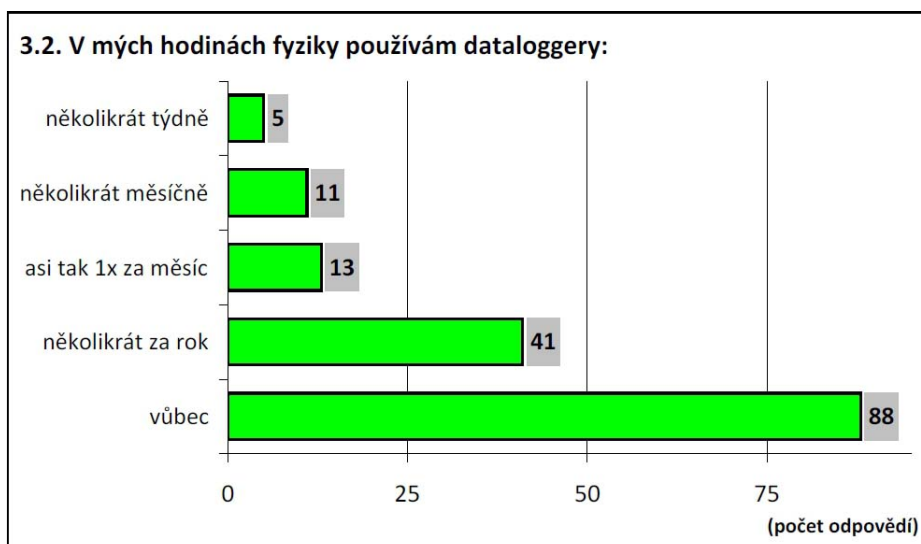
## 2.2 Výsledky průzkumu



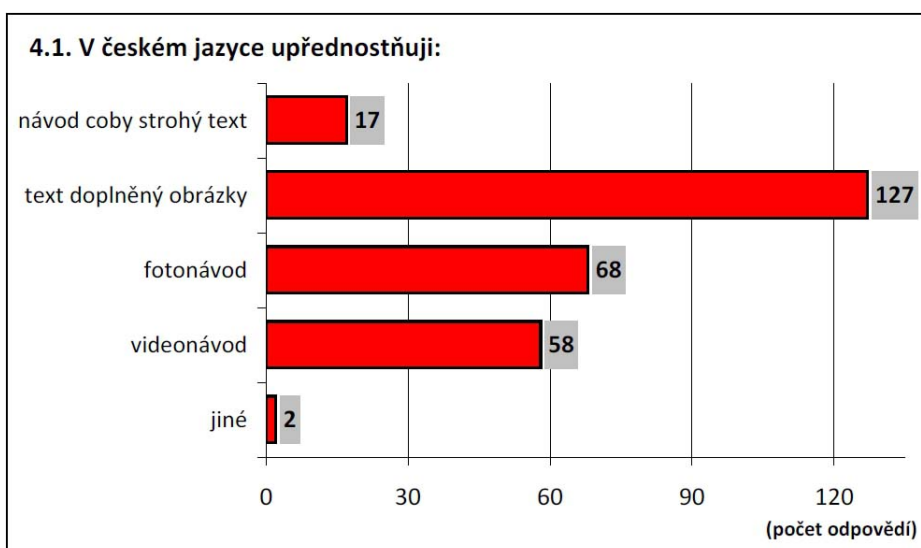
**Otázka 2.1.** (*možnost volby více odpovědí*): Jako nejoblíbenější zdroj inspirace k měření vyšel z průzkumu internet, s rostoucím množstvím česky psaných materiálů se dá zřejmě očekávat, že jeho vliv bude spíše stoupat. Následují tradiční zdroje, učebnice a zkušenosti kolegů a materiály výrobců měřících zařízení. Možným vysvětlením ne úplně vysokého zájmu o oficiální materiály může být skutečnost, že mnoho z nich obsahuje větší množství textu, jenž není přeložen do češtiny (viz otázka 4.2).



**Otázka 3.1.:** Z tohoto výzkumu vyplývá, že téměř polovina škol disponuje nějakým systémem dataloggerů, právě zde ale lze předpokládat významný výběrový efekt - opět znovu platí, že právě aktivní vyučující jsou spíše schopni zajistit finanční prostředky na nákup podobných pomůcek (projekty, granty apod.). Reálně lze spíše očekávat, že větší část českých základních a středních škol zatím nemá možnost s dataloggerem pracovat.

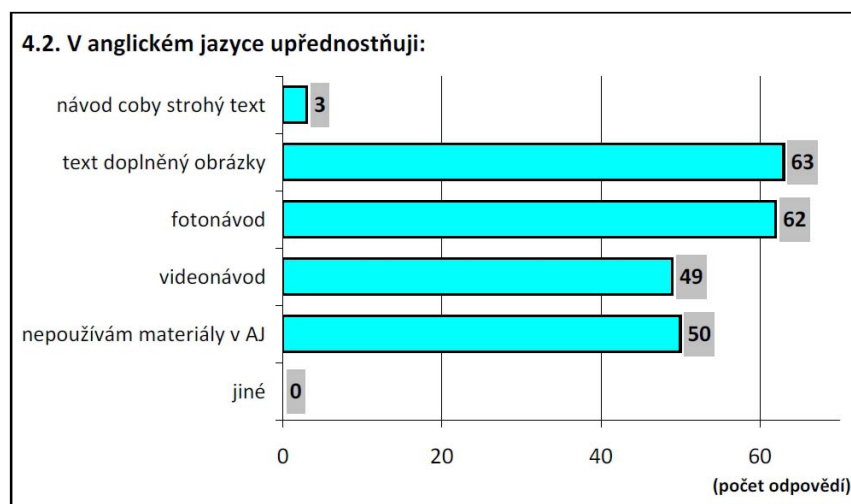


**Otázka 3.2.:** Zajímavé je srovnání s odpověďmi na otázku 3.1. V ní 84 dotázaných uvedlo, že jejich škola žádný systém dataloggerů nepoužívá, zde 88 pedagogů uvádí, že s datalogery vůbec nepracuje. Pokud bychom předpokládali, že skutečnost, že vyučující nemají přístup k takovému měřicímu systému, implikuje fakt, že jej tím pádem logicky nepoužívají, dostáváme až dokonalou efektivitu - téměř každý, kdo má k dataloggerům přístup, je využívá. Opět může takto ideální závěr vyplývat z dříve zmíněných výběrových efektů. Tak jako tak je patrné, že pouze 18 % dotázaných používá datalogery ve výuce pravidelně (odpověď „asi tak 1x za měsíc“ a častější).

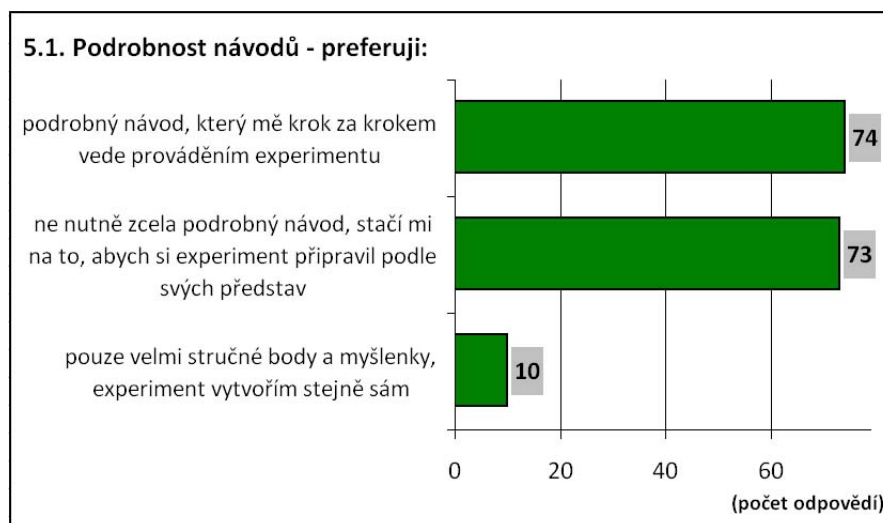


**Otázka 4.1. (možnost volby více odpovědí):** Nejoblíbenější formou česky psaných návodů na experimenty se s obrovskou převahou staly klasické textové návody doplněné obrázky, převládá zřejmě určitý konzervatismus. Obliba fotonávodů či videonávodů výrazně zaostává, strohý text pedagogů neuspokojuje.

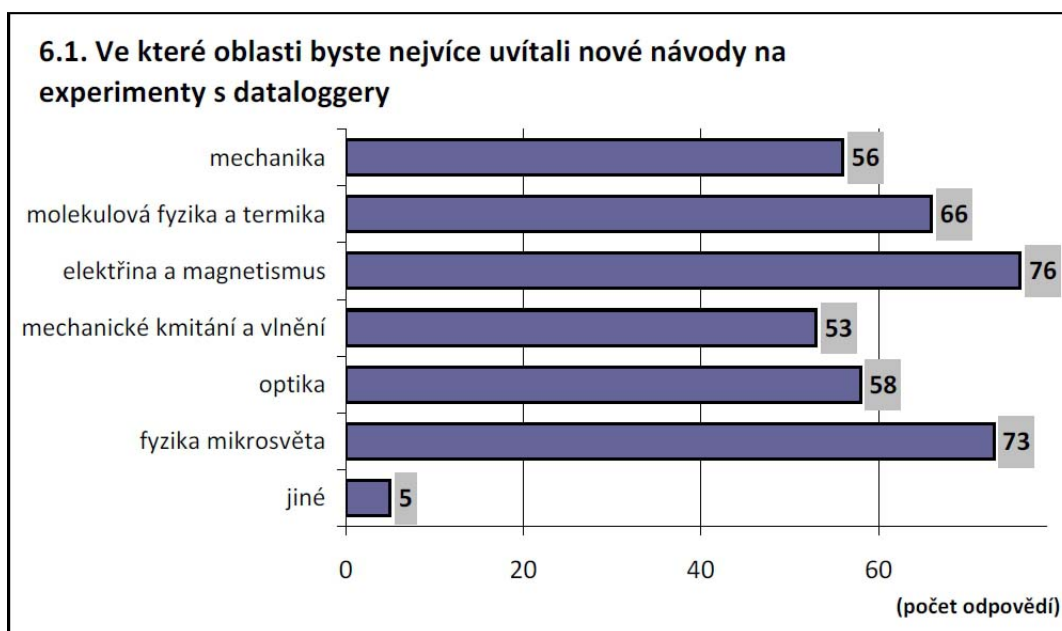




**Otázka 4.2.** (*možnost volby více odpovědí*): Oproti návodům v češtině vzrostl v případě anglicky psaných materiálů relativní význam fotonávodů a videonávodů - což lze považovat za zcela přirozený jev, protože tyto formy návodů snižují nepříjemný vliv jazykové bariéry. Přesto se ovšem klasický text doplněný obrázky stal i zde nejpopulárnější formou návodu. Padesát pedagogů (ze 162 dotázaných, tj. přibližně 30 %) přiznává, že anglicky psané materiály vůbec nepoužívá.



**Otázka 5.1.:** Dotázaní se rovnoměrně rozdělili mezi ty, kteří vyžadují opravdu podrobné návody, a ty, kterým stačí návod spíše stručnější. Pouze 6 % pedagogů se bez návodů obejde téměř úplně. Jednoznačným závěrem této otázky je skutečnost, že rozhodně má smysl dále pracovat na nových návodech, neboť jen velmi malá část fyzikářů postaví svoji výuku pouze na vlastních experimentech.



**Otázka 6.1.** (*možnost volby více odpovědí*): Nejvíce nových návodů by respondenti uvítali v kapitole o elektřině a magnetismu, následuje fyzika mikrosvěta. Dovolím si vyslovit domněnku, že v případě elektřiny a magnetismu nejde ani tak o nedostatek stávajících materiálů, ale spíše obecně o skutečnost, že tato kapitola je pro žáky i učitele poměrně náročná, tedy každý nástroj jak ji přiblížit je velmi cenný. Naproti tomu fyzika mikrosvěta se může potýkat s faktem, že její samotný obsah je někdy téměř vyloučené převést do prostředí školních měření (STR, základy kvantového přístupu). Třetí nejžádanější kapitolou se stala molekulová fyzika a termika.

**Nevyužitý potenciál průzkumu:** Bylo by jistě zajímavé dále pracovat se zjištěnými daty a vyhodnotit otázky 2.1 až 6.1. například:

- pouze pro vzorek začínajících učitelů do 5 let praxe
- pouze pro vzorek vyučujících na vyšším stupni VG, SŠ a SOU (bez vlivu ZŠ)

Takto podrobný rozbor ale přesahuje zadání této práce, v jejímž rámci měl průzkum pouze orientační význam.

**Shrnutí výsledků průzkumu vzhledem k této práci:** Orientační průzkum ukázal, že má smysl se zabývat vývojem dalších návodů na experimenty s datalogery, velká část oslovených vyučujících je více či méně využívá. Kromě toho bude zřejmě přibývat škol, které budou nějakým systémem dataloggerů disponovat, zatím je jejich podíl méně než poloviční (dle tohoto průzkumu 48 %, vzhledem k výběrovému efektu ale zřejmě ještě výrazně nižší.)

Vhodnou formou zpracování návodů je souvislý text doplněný ilustračními obrázky, který provedení daného experimentu popisuje poměrně podrobně, zkušenější

vyučující si z něj pak vyberou to, co je pro ně podstatné. Tato práce si dala za cíl zaměřit se na experimenty nahlížené z hlediska (přeměn) energie, jejichž těžiště leží na SŠ v kapitole o molekulové fyzice a termice. Ta patří mezi tři kapitoly, ve kterých by vyučující nové návody na experimenty uvítali nejvíce.

*Poznámka:* Tento průzkum nemá ambice být hloubkovým pedagogickým výzkumem, jeho funkce je orientační. Průzkum má sloužit jako východisko k hlavnímu tématu této práce.

# Kapitola 3

## Přehled již publikovaných návodů

### 3.1 Obecně k již existujícím materiálům

Po provedení průzkumu mezi fyzikáři jsem považoval za nezbytné seznámit se s již existujícími publikovanými návody. Zaměřil jsem se přitom na návody pro datalogery šesti nejvýznamnějších hráčů na českém trhu v tomto oboru:

- datalogery školního experimentálního systému ISES
- datalogery společnosti Vernier
- datalogery společnosti PASCO
- datalogery společnosti LogIT
- datalogery měřicího systému IP Coach
- datalogery společnosti Pierron - v tomto případě se mi nepodařilo dohledat relevantní zdroje popisující práci se systémem ani navrhované experimenty, proto se dále nebudu tomuto systému věnovat

Následující stránky přinášejí stručný popis běžně dostupných zdrojů, z kterých mohou vyučující fyziky čerpat návody pro měření s těmito datalogery (zaměřuji se výhradně na užití dataloggerů ve fyzice). Dostupné zdroje jsem rozdělil do tří skupin:

- materiály v anglickém jazyce
- materiály v češtině – elektronická podoba
- materiály v češtině – tištěná podoba

### 3.2 Materiály v anglickém jazyce

Není cílem této práce zaměřovat se na anglicky psané materiály, ostatně také průzkum ukázal, že nejméně 30 % vyučujících s nimi vůbec nepracuje. Spokojím se tedy s konstatováním, že zejména v případech systémů Vernier a PASCO jsou anglicky psané materiály velmi bohaté, zatímco systém ISES, vyvinutý v tehdejší Československu, má těžiště v česky psaných materiálech.

### 3.3 Materiály v češtině – elektronická podoba

Dle úvodního průzkumu je internet pro pedagogy nejpoužívanějším zdrojem návodů na experimenty, přehled relevantních elektronických zdrojů je tedy zcela na místě. Tento přehled nelze považovat za kompletní, ale zahrnuje velkou většinu materiálů, které běžný uživatel nalezne při zadání klíčových slov (*datalogger*, *experimenty*, *pokusy*, *školní měřicí systém*, *ISES*, *Vernier*, *PASCO* atd.) do internetového vyhledávače. Níže popsané možnosti odpovídají stavu ze dne 26. listopadu 2011.

Vzhledem k jejich počtu dělím zdroje návodů na dvě skupiny: první z nich jsou **webové stránky výrobců a prodejců dataloggerů**, druhou **ostatní internetové zdroje**.

#### Webové stránky výrobců a prodejců dataloggerů:

- **ISES** (Webové stránky [3], záložka *Experimenty*.)

Sekce *Zkušební experimenty* obsahuje přibližně 65 stručných návodů, každý návod se skládá z těchto částí: cíl, pomůcky, provedení, vysvětlení. Provedení experimentu je popsáno slovně, obrázky - jsou-li přiloženy - zachycují vždy vzorově naměřenou závislost.

Stejným způsobem je v sekci *Fyzikální experimenty* zpracováno dalších přibližně 50 návodů, téměř polovina z nich na experimenty z elektřiny a magnetismu. Inspiraci lze najít také v sekci *Laboratorní práce*, přizpůsobit výuce na SŠ lze některé experimenty vysokoškolské.

- **Vernier** (Webové stránky [4], záložka *Experimenty*.)

Stránky umožňují k danému čidlu dohledat experimenty, které je možné s tímto čidlem provést. Velké části čidel nicméně nejsou žádné česky psané experimenty přiřazeny.

Sekce *Videonávody* [5] obsahuje 10 krátkých filmů (do 5 minut délky), popisujících experimenty s nejčastěji používanými čidly (teploměr, čidlo tlaku, ampérmetr + voltmetr...). V sekci *Fyzikální experimenty* najdeme odkazy na experimenty Mgr. Václava Pazdery [6] a Mgr. Jaroslava Reichla [7], které dohromady obsahují přibližně 70 návodů. Oba tyto zdroje jsou bohatě ilustrované a nabízejí vzorová řešení, stránky [6] jsou navíc zpracovány formou laboratorních prací a obsahují tak kromě vzorového řešení také pracovní list pro žáky, připravený protokol a krátkou prezentaci.

Nabídku experimentů doplňuje pět fotonávodů a dalších několik bloků námětů na experimenty, které jsou již méně podrobné a nejsou už vždy doprovázeny obrazovou dokumentací nebo naměřenými závislostmi. Zajímavou inspirací může být přibližně 15 kvalitně popsaných experimentů na FyzWebu.

- **PASCO** (Webové stránky [8], záložka *Výukový obsah*.)

Sekce *Tištěné sbírky experimentů* [9] obsahuje jeden kompletní návod a čtyři studentské pracovní listy. Sekce *Experimenty - burza* [10] obsahuje 19 fyzikálních experimentů, pro jejich zobrazení je ale nutné se přihlásit.

- **LogIT** (Příručka ve formátu .pdf [11]:) Metodická příručka obsahující 7 dobře popsaných experimentů.
- **IP Coach**: Funkční webové stránky se nepodařilo nalézt.

### Ostatní internetové zdroje:

- **ISES:**

Katedra fyziky Přf OU: [12] Tři úlohy z fyzikálního praktika z elektřiny a magnetismu, primárně vysokoškolské, ale převeditelné do středoškolské podoby.

Gymnázium Pardubice: [13] Více jak deset pokusů zpracovaných ve formě laboratorních měření, doplněno obrázky, kromě toho podrobný manuál, jak obecně se systémem ISES pracovat.

- **Vernier:**

Zdroje [6] a [7], zmíněné výše.

- **LogIT:**

ZŠ Jihlava: [14] V rámci závěrečné zprávy projektu cca 10 fyzikálních úloh zpracovaných ve formě laboratorního měření a doplněných obrázky.

- **IP Coach:**

Univerzita Pavla Jozefa Šafárika: [15] Pro české učitele snadno použitelný kvalitní slovenský zdroj, celkem 12 laboratorních měření ve formě pracovních listů, primárně pro vysoké školy, ale lze přizpůsobit jako úlohy středoškolské.

Slovenské gymnázium Olomouc: [16] Celkem 11 návodů doplněných obrázky, každý vždy ve formě metodického a pracovního listu.

SPŠ Karviná: [17] Tři podrobně popsané laboratorní práce.

## 3.4 Materiály v češtině – tištěná podoba

V česky vydávaných časopisech s fyzikálním či pedagogickým zaměřením se měření s datalogery v podstatě nevyskytují. Prošel jsem všechna čísla časopisů *Rozhledy matematicko-fyzikální*, *Pokroky matematiky, fyziky & astronomie* a *Matematika - fyzika - informatika* počínaje lednem roku 2006 do současnosti. V časopise *Matematika - fyzika - informatika* jsem objevil tři s tématem související články:

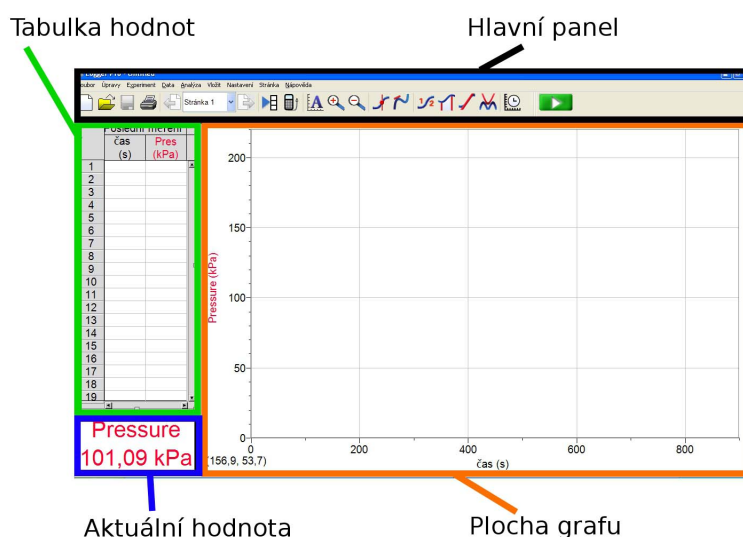
- *Měření fyzikálních veličin pomocí Go!Link*. [18] - k systému Vernier
- *Užití systému PASCO ve výuce fyziky*. [19] - k systému PASCO
- *LabQuest - měření v terénu*. [20] - k systému Vernier

# Kapitola 4

## Program Logger Pro 3

Ve všech následujících popsanych měřeních se senzory Vernier je využíván program **Logger Pro 3**. Považuji za vhodné stručně některé jeho základní možnosti, na které se později budu v jednotlivých návodech odkazovat.

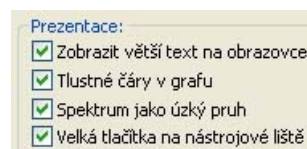
Po spuštění programu a připojení příslušného senzoru se objeví měřicí okno programu, jehož čtyři hlavní části představuje obrázek 4.1.



Obrázek 4.1: Prostředí programu Logger Pro 3

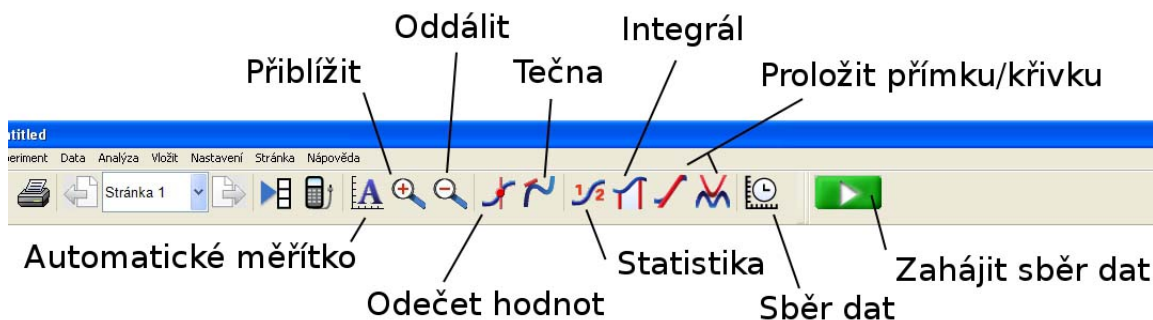
Grafickou podobu měřicího okna je možné lehce drobně upravovat pomocí nabídky *Soubor - Nastavení*. V této práci je pro přehlednost používáno nastavení, při kterém jsou zaškrtnuty tyto volby (obr. 4.2):

- Zobrazit větší text na obrazovce
- Tlusté čáry v grafu
- Velká tlačítka na nástrojové liště



Obrázek 4.2: Předvolby

Nejpoužívanější příkazy jsou ikonami zastoupeny na hlavním panelu (obr. 4.3). Okno pro nastavení parametrů konkrétního měření (obr. 4.4) lze vyvolat klávesovou zkratkou CTRL+D, příkazem *Experiment - Sběr dat* nebo příslušnou ikonou na hlavním panelu. Měření se spouští tlačítkem *Zahájit sběr dat*. Užitečnou klávesovou zkratkou je kombinace kláves CTRL+R, která automaticky uspořádá grafy a tabulky na ploše programu.



Obrázek 4.3: Hlavní panel příkazů programu Logger Pro 3



Obrázek 4.4: Okno pro nastavení parametrů měření

Program funguje intuitivně, chcete-li pracovat s grafem, klikněte pravým tlačítkem na graf a vyberte *Nastavení grafu*, chcete-li pracovat s daným sloupcem hodnot, klikněte pravým tlačítkem na sloupec a vyberte *Nastavení sloupce* atd.

*Poznámka:* Všechna dále uvedená měření lze provádět i s rozhraním Vernier Lab-Quest, některá také na počítači s programem Logger Lite (tato možnost je v takovém případě zmíněna v části „Potřebné měřicí vybavení“).



# Kapitola 5

## Experimenty

### 5.1 Kam se ztrácí energie?

#### 5.1.1 Provedení a zpracování měření

**Anotace:** Cílem experimentu je proměřit úbytek celkové mechanické energie skákajícího míčku v čase.

**Klíčové kompetence ([1]):**

*Gymnaziální vzdělávání – Kompetence k řešení problémů – žák:*

- 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

**Očekávané výstupy ([1]):**

*Gymn. vzdělávání – Člověk a příroda – Fyzika – Pohyb těles a jejich vzájn. působení:* Žák využívá zákony zachování některých důležitých fyzikálních veličin při řešení problémů a úloh.

*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:**

Mechanická energie tělesa se tak, jak se s ní studenti seznamují v učivu mechaniky, skládá z kinetické energie  $E_k$  a potenciální energie  $E_p$ . Pohybuje-li se míček o hmotnosti  $m$  rychlostí  $v$ , je jeho kinetická energie:  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ . Potenciální energie tohoto míčku je pak:  $E_p = mgh$ , kde  $m$  je jeho hmotnost,  $g$  je tíhové zrychlení a  $h$  je vertikální vzdálenost (výška) nad zvolenou nulovou hladinou. Zanedbáváme rotační kinetickou energii míčku, která souvisí s otáčením míčku kolem jeho osy.

Zákon zachování mechanické energie říká, že součet kinetické a potenciální energie je v izolované soustavě konstantní, v reálných situacích má ale tento zákon velmi omezenou platnost. Odpořem vzduchu, deformacemi míčku i podložky při dopadu apod. jsou způsobeny přeměny mechanické energie míčku na tzv. vnitřní energii (značka  $U$ ). Ta je tvořena zejména kinetickou a potenciální energií částic (částic míčku,

podložky i okolního vzduchu); existence těchto energií vyplývá z kinetické teorie látek.

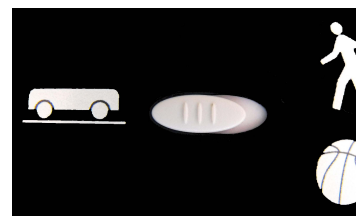
V našem experimentu určíme závislost polohy a rychlosti skákajícího míčku na čase, ze známé hmotnosti míčku pak v každém okamžiku snadno určíme jeho kinetickou a potenciální energii. Vynesením závislosti jejich součtu na čase se přesvědčíme o postupné přeměně mechanické energie míčku na energii vnitřní.

**Potřebné měřicí vybavení:** Návod byl zpracován s čidlem pohybu Vernier Go!Motion a programem Logger Pro. Alternativně lze užít tyto kombinace:

- program Logger Pro + čidlo Vernier MD-BTD
- rozhraní Vernier LabQuest + čidlo Vernier MD-BTD / Vernier Go!Motion

**Další pomůcky:** pingpongový míček, tenisový míček, posuvné měřítko, laboratorní váhy – vhodné s přesností alespoň 0,1 g

**O čidle pohybu Vernier Go!Motion:** Čidlo měří pomocí odrazu ultrazvukových vln od předmětu jeho vzdálenost a dopočítává také rychlost a zrychlení předmětu. Dokáže zachytit předměty ve vzdálenosti 20 cm až 6 m od měřicí hlavy. Pod touto výklopnou hlavou je umístěn přepínač, který reguluje šířku kužele ultrazvukových vln - pro naše měření použijeme polohu vlevo (poloha „voziček“, obr. 5.1). K počítači se čidlo připojuje pomocí USB portu.



Obrázek 5.1: Přepínač

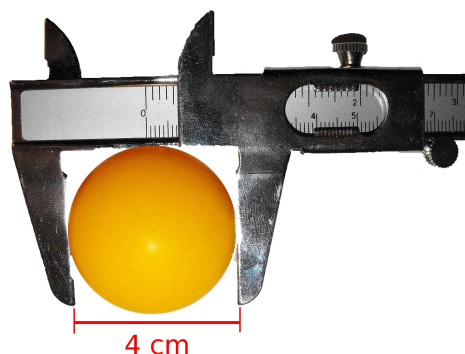
### **Provedení měření:**

1. Pomocí laboratorních vah určete hmotnost  $m$  pingpongového míčku (obr. 5.2). V tomto experimentu  $m = 2,3$  g.

2. Pomocí posuvného měřítka určete průměr  $d$  pingpongového míčku (obr. 5.3). Standardizovaný průměr je 40 mm. V tomto experimentu skutečně  $d = 4,0$  cm.



Obrázek 5.2: Vážení míčku



Obrázek 5.3: Měření průměru míčku

3. Prostřednictvím USB portu připojte k počítači čidlo pohybu. Spusťte program Logger Pro a vyčkejte, až dojde k automatickému rozpoznání čidla. Čidlo umístěte tak, aby měřilo kolmou vzdálenost k podlaze (lze jej upevnit například do stativu nebo prostě jen položit na stůl a vyklopit měřící hlavu o 180°, viz obr. 5.4). Nyní nechte proběhnout zkušební měření, které spustíte tlačítkem *Zahájit sběr dat* (obr. 4.3).



Obrázek 5.4: Umístění čidla

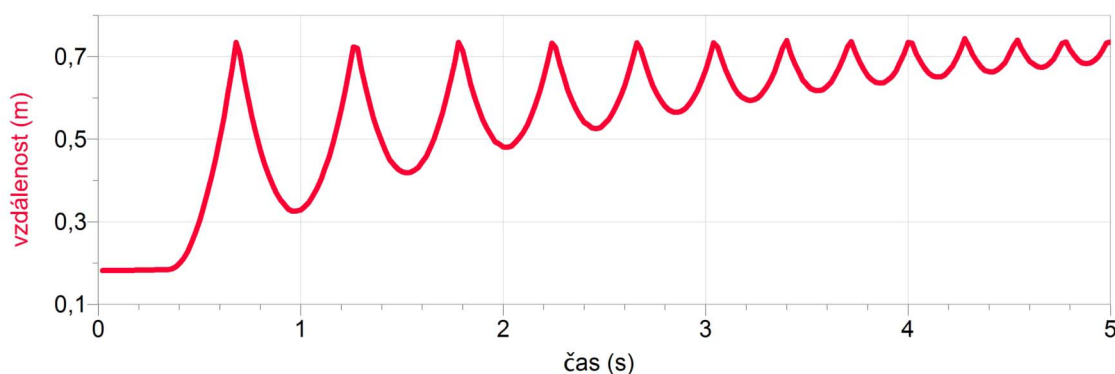
vzdálenost  
0,772 m

Obrázek 5.5:  $h_0 = 0,772$  m

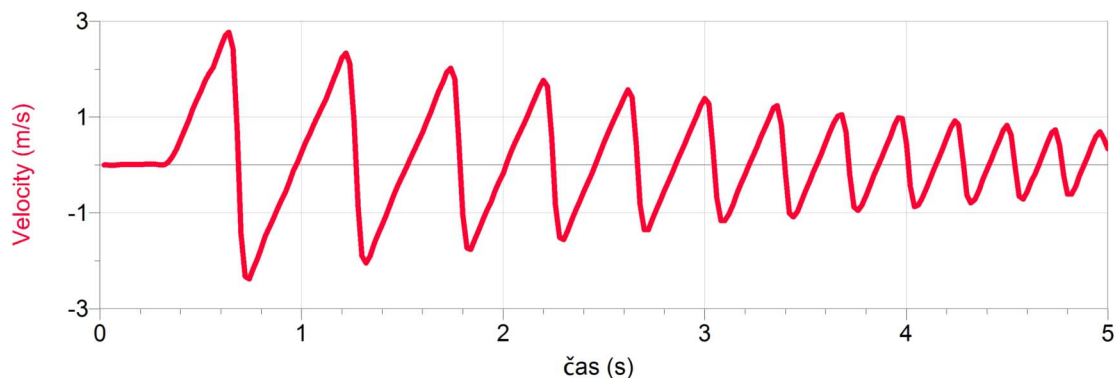
V levém dolním rohu se ukáže hodnota aktuální naměřené vzdálenosti k podlaze (obr. 5.5), označme ji např.  $h_0$ . Tuto hodnotu si poznamenejte. (Pokud během tohoto měření docházelo k dramatickým výkyvům hodnot, dochází nejspíš někde k parazitním odrazům - zkontrolujte, že mezi čidlem a míčkem není překážka - roh ubrusu apod.)

4. Klávesovou zkratkou CTRL+D (nebo tlačítkem *Sběr dat*, obr. 4.3) vyvolejte okno *Sběr dat* a zadejte délku měření **5 sekund** a vzorkovací frekvenci **50 vzorků za sekundu**. Potvrďte tlačítkem *Hotovo*.

5. Uchopte míček a podržte jej asi 15-20 cm pod měřící hlavou čidla (menší vzdálenost čidlo pohybu nezaznamená). Tlačítkem *Zahájit sběr dat* spusťte měření a vzápětí pusťte míček na zem. Po 5 sekundách se měření automaticky ukončí. Program nyní zobrazuje závislost polohy míčku a jeho rychlosti na čase, které mohou vypadat například jako na obrázku 5.6 a 5.7. Jejich velikost můžete přizpůsobit tlačítkem *Automatické měřítko* (obr. 4.3).



Obrázek 5.6: Závislost polohy míčku na čase



Obrázek 5.7: Závislost rychlosti míčku na čase

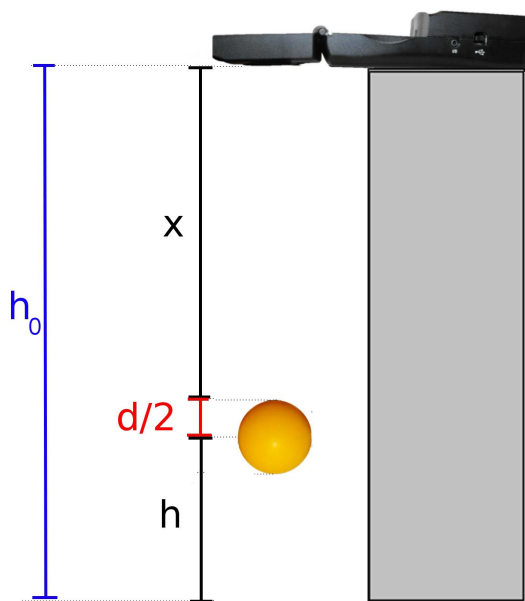
### Zpracovaných naměřených dat:

1. Program zaznamenal v každém okamžiku vzdálenost  $x$  míčku od čidla, rychlost  $v$  a zrychlení  $a$  míčku. V každém okamžiku jsme tedy schopni určit kinetickou a potenciální energii míčku. Výpočty provedeme přímo v programu Logger Pro.

2. Pro určení potenciální energie definujeme její nulovou hladinu v úrovni podlahy. Uvědomme si, že čidlo pohybu měří vždy vzdálenost horního okraje míčku od čidla (od horního okraje se ultrazvukové vlny odrazí nejdříve). Aktuální výšku těžiště míčku nad podlahou  $h$  tak určíme jako:  $h = h_0 - \frac{d}{2} - x$  (obr. 5.8).

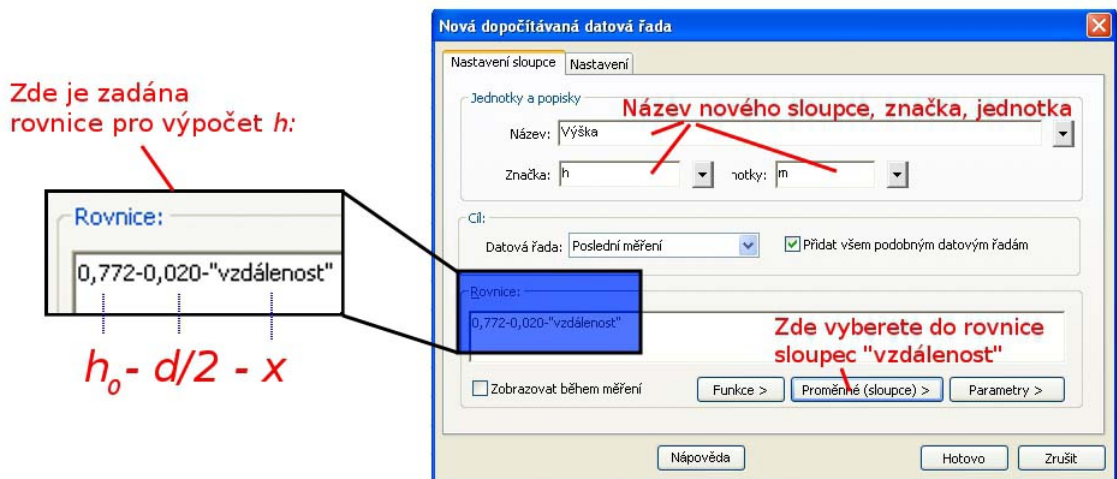
Na hlavním panelu vybereme *Data - Nový dopočítávaný sloupec* a nové okno vyplníme podle obrázku 5.9. Program Logger Pro nyní pracuje s naměřenými hodnotami podobně jako např. se sloupci v Excelu a vytvoří nový sloupec, který bude obsahovat výšku těžiště míčku nad zvolenou nulovou hladinou v každém okamžiku.

(Pozn.: Je zjevné, že tato výška by měla být větší než poloměr míčku, tedy 2 cm. Přesto je ale pravděpodobné, že vlivem chyb měření, deformací míčku a omezené vzorkovací frekvence čidla bude několik hodnot menších než 2 cm, tj. jako by se míček „zarýval“ do podložky.)



Obrázek 5.8: Geometrie měření

3. Příkazem *Data - Nový dopočítávaný sloupec* vytvoříme další sloupec, nazveme jej „Potenciální energie“ a do výpočetní formule dosadíme  $E_p = mgh$  (obr. 5.10), kde  $m$  i  $g$  známe a  $h$  v každém okamžiku jsme si připravili v předchozím sloupci. Výsledný sloupec obsahuje hodnoty potenciální energie míčku v každém okamžiku.



Obrázek 5.9: Okno nového sloupce „Výška“

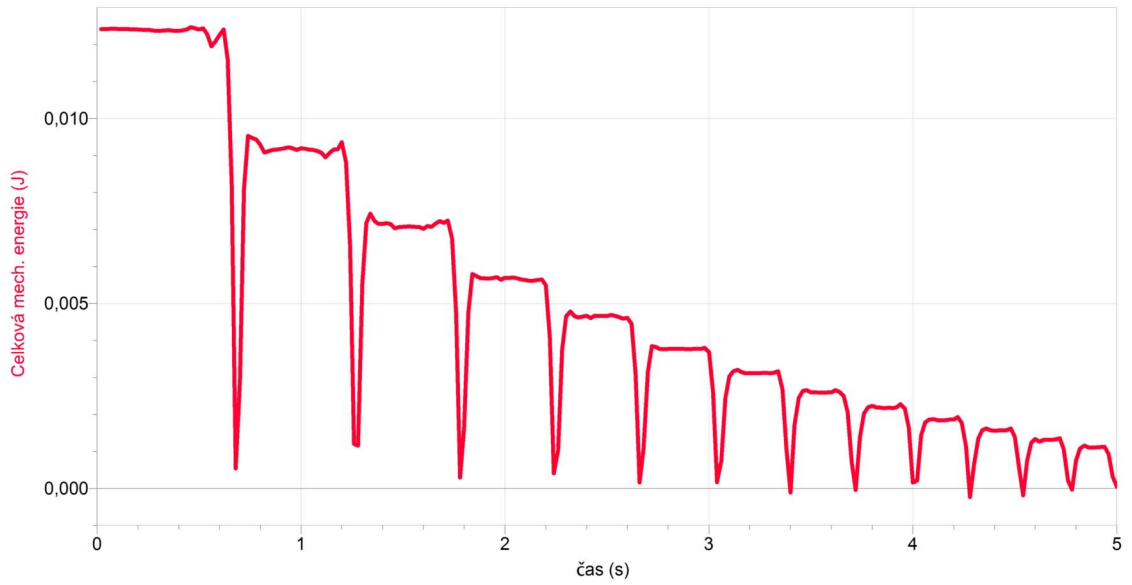


Obrázek 5.10: Zadání rovnic pro potenciální a kinetickou energii

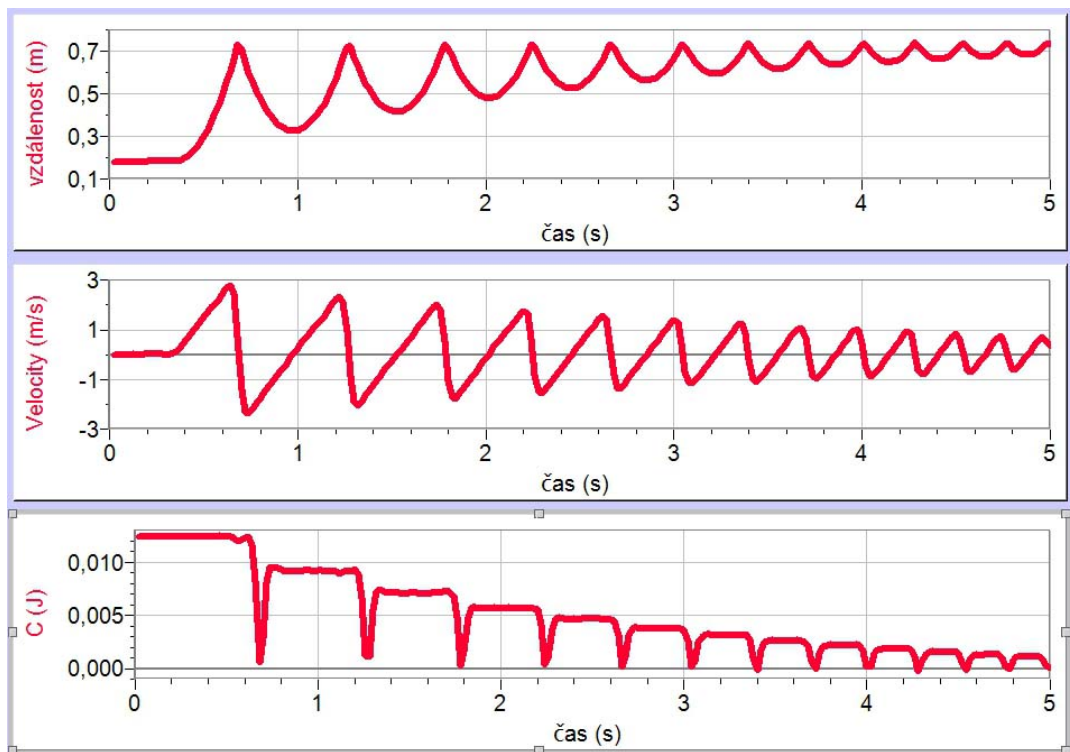
4. Také pro výpočet kinetické energie použijeme příkaz *Data - Nový dopočítávaný sloupec*. Nový sloupec nazveme „Kinetická energie“ a do výpočetní formule dosadíme vztah  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$  (obr. 5.10), kde  $m$  známe a  $v$  v každém okamžiku jsme naměřili čidlem pohybu. Výsledný sloupec obsahuje hodnoty kinetické energie míčku v každém okamžiku.

5. Nakonec sestrojíme naposledy nový sloupec, ve kterém kinetickou a potenciální energii v každém okamžiku sečteme (tedy sečteme odpovídající sloupce). Tento sloupec nazveme „Celková mechanická energie míčku“.

6. Abychom se podívali na závislost celkové mechanické energie v čase, vybereme na hlavním panelu *Vložit - Graf*. Není-li závislou proměnnou celková mechanická energie, nastavíme ji na ose  $y$  po klepnutí na popisek osy. Po roztažení grafu na plochu obrazovky může výsledná závislost vypadat např. jako na obrázku 5.11. Překvapením mohou být periodicky se objevující píky, ve kterých klesá celková mechanická energie míčku téměř na nulu. Ze srovnání s grafy polohy a rychlosti (obr. 5.12) je patrné, že píky odpovídají okamžikům dopadu míčku na podlahu a následného odrazu. V těchto okamžicích má míček nulovou potenciální energii a jeho rychlost právě mění směr - velikost kinetické energie je tedy na krátkou dobu blízka nule. Veškerá mechanická energie míčku je v tu chvíli přeměněna na energii pružnosti podložky (= podlahy) a energii pružnosti míčku.



Obrázek 5.11: Výsledná závislost celkové mechanické energie míčku na čase



Obrázek 5.12: Srovnání závislostí polohy, rychlosti a celk. mech. energie na čase

## 5.1.2 Poznámky, otázky a úkoly

### Příprava experimentu

- Před měřením zkontrolujte, že čidlo pohybu neměří parazitní odrazy od překážek, které se nechtěně dostávají do kužele ultrazvukových vln - typicky překáží přímo vlastní kabel čidla nebo ruka, která při spuštění měření drží míček.
- Je třeba, aby podlaha v místě skákání byla zcela rovná. V opačném případě míček během sledovaných pěti sekund snadno „odskáče“ mimo dosah čidla. Jiný problém představuje vyduť linoleum, na kterém se skákání téměř okamžitě utlumí. Vhodnou podložku je třeba před měřením vyzkoušet.

### Během měření

- Přes veškerou snahu se měření nemusí zdařit na první pokus, velice záleží na způsobu, jakým míček pustíte. Doporučuji vyzkoušet správný „styl pouštění“.

### Při zpracování naměřených dat

- Dupočítávané energie jsou vzhledem k malé hmotnosti míčku velmi malá čísla, typicky setiny joulu. Program automaticky zaokrouhluje na dvě desetinná místa, což v tomto případě není dostačující. Pravým tlačítkem klikněte na tabulku hodnot, vyberte *Nastavení sloupce*, zvolte sloupec s kinetickou nebo potenciální energií a v záložce *Nastavení - Přesnost* nastavte 5 desetinných míst. Potvrďte tlačítkem *Hotovo*.

### Otázky pro studenty

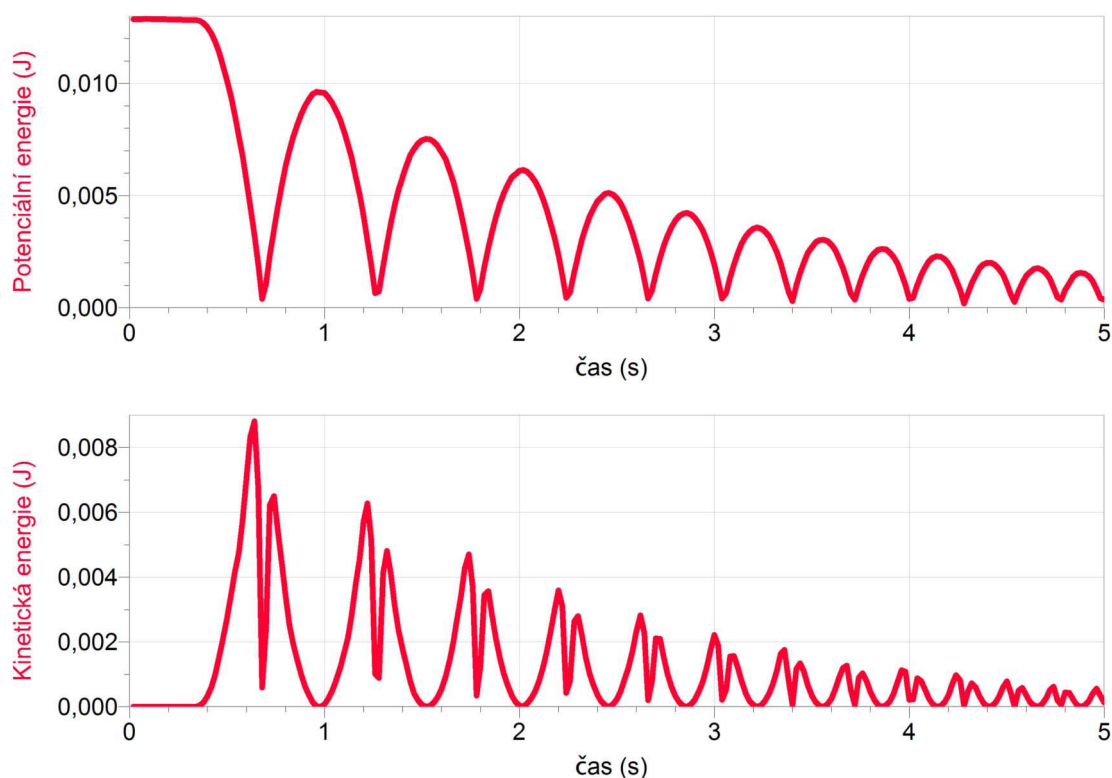
1. Co je to vnitřní energie tělesa? Jaké druhy energie do ní zahrnujeme?  
⇒ Vnitřní energií rozumíme energii částic, které těleso tvoří. Tato energie souvisí s vnitřní částicovou stavbou tělesa a zahrnuje kinetickou, potenciální, chemickou či jadernou energii částic, energii elektronů v obalech atomů apod. (Zahrnované formy energie se někdy liší.)
2. V úloze pracujeme s kinetickou a potenciální energií míčku. Přesto jednu makroskopickou složku mechanické energie zanedbáváme - kterou?  
⇒ Ve skutečnosti se nezabýváme celkovou kinetickou energií, ale pouze kinetickou energií posuvného pohybu. Zcela zanedbáváme kinetickou energii rotačního pohybu.
3. Jaké další nepřesnosti při měření jistě vznikají?  
⇒ V ideálním případě by míček opakovaně dopadal do téhož místa kolmo pod bodem vypuštění. Reálně se takového stavu spíše nepodaří dosáhnout, vlivem nestejných odrazů se místo dopadu mění, což ovlivňuje také vzdálenost měřenou pohybovým čidlem.
4. Který vliv víc přispívá k přeměnám mechanické energie na energii vnitřní („ztrátám“) - odpor vzduchu, nebo nárazy míčku na podložku?  
⇒ Zcela jednoznačně mají větší vliv nárazy. Zatímco během letu vzhůru i dolů se celková mech. energie míčku zmenšuje takřka neznatelně, po každém odrazu se skokově sníží.
5. Interpretujte graf závislosti celkové mechanické energie na čase. Jak vysvětlíme píky nízkých hodnot? Co se v tu chvíli děje s „chybějící“ energií?  
⇒ Viz text.



### 5.1.3 Rozšíření úlohy

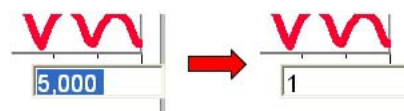
Ukázali jsme závislost celkové mechanické energie skákajícího míčku na čase a úvahou jsme zdůvodnili, proč se v ní objevují v pravidelných intervalech píky s nízkými hodnotami. Abychom si správnost této úvahy ověřili, podíváme se nyní na vývoj potenciální a kinetické energie v čase:

1. Označením a stiskutím klávesy *Delete* smažeme všechny zobrazené grafy. Na hlavním panelu zvolíme dvakrát za sebou *Vložit - Graf*. Po kliknutí na popisek osy *y* nastavíme jako závislou proměnnou v případě prvního grafu potenciální, v případě druhého grafu kinetickou energii. Obě závislosti ukazuje obrázek 5.13:



Obrázek 5.13: Závislost potenciální (nahore) a kinetické (dole) energie na čase

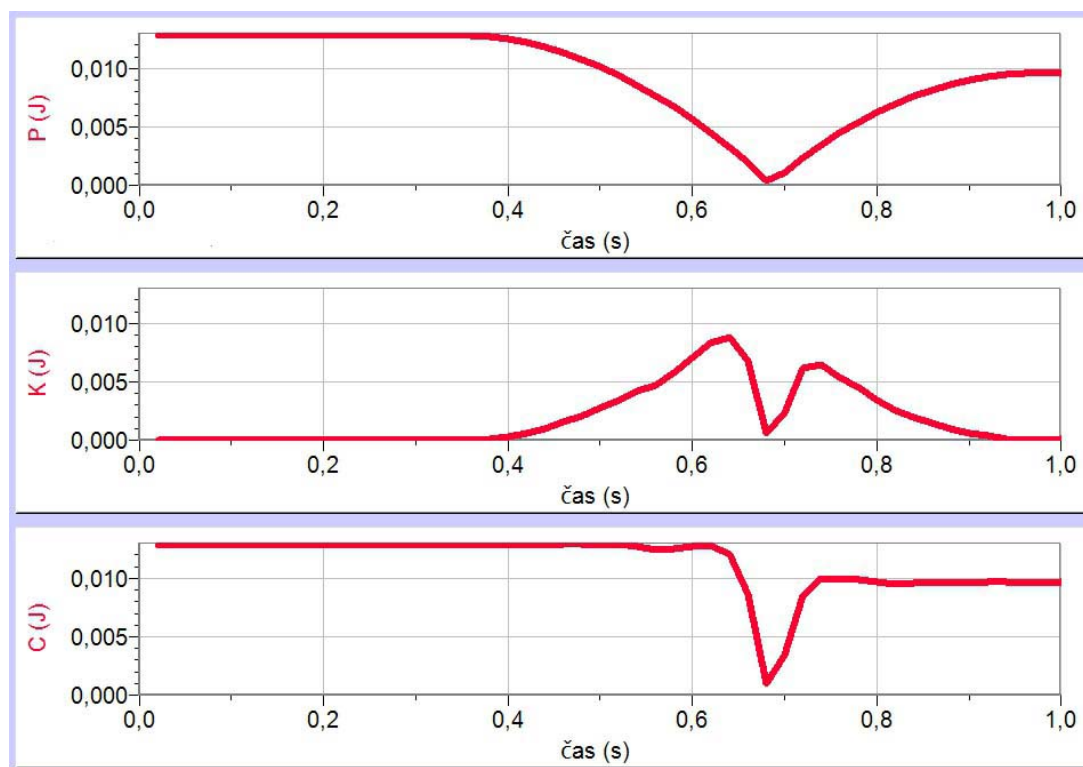
2. Grafy potvrzují naši domněnku, že píky v grafu celkové mechanické energie jsou způsobeny pravidelným prudkým poklesem kinetické energie při změně směru rychlosti míčku. Podívejme se detailněji na přeměnu potenciální energie v kinetickou před prvním nárazem míčku. Klikněte na pravou značku vodorovné osy a hodnotu 5 sekund přepište na 1 sekundu (obr. 5.14).



Obrázek 5.14: Změna rozsahu osy



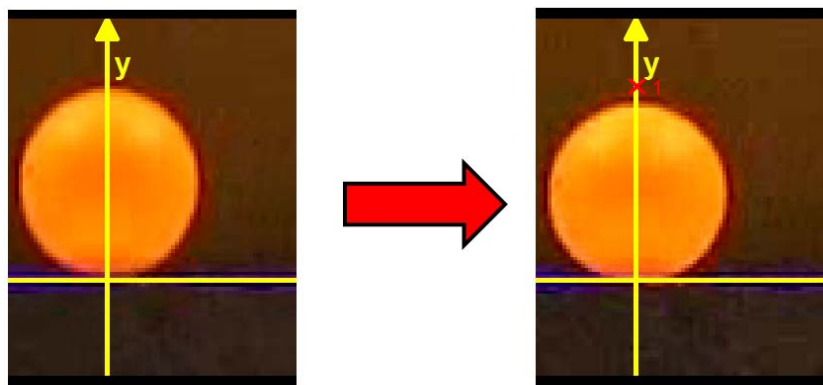
3. V přiblížení si nyní můžeme prohlédnout první sekundu děje. Vidíme, že v okamžiku, kdy je nulová potenciální energie, se nule blíží také energie kinetická (změna směru rychlosti) - maximum kinetické energie tedy reálně předchází minimu energie potenciální. Srovnání vývoje kinetické, potenciální a celkové mechanické energie v první sekundě nabízí obr. 5.15.



Obrázek 5.15: Vývoj potenciální, kinetické a celkové mechanické energie v první sekundě

Skutečnost, že maximum kinetické energie předchází minimu energie potenciální, je vhodné vysvětlit. Za tuto nesymetrii zodpovídá deformace míčku během dopadu na podložku. V okamžiku dopadu na podložku se míček začíná deformovat, dochází k jeho zplošťování ve vertikálním směru. Horní okraj míčku tedy ještě několik okamžiků po nárazu pokračuje v pohybu směrem svisle dolů (proto nadále klesá potenciální energie, právě polohu horního okraje čidlo registruje), na druhou stranu je již tento pohyb pomalejší než během volného pádu, proto kinetická energie rychle klesá.

Tuto úvahu můžete se studenty snadno provést, pro její potvrzení byl ve vzorovém měření použit rychloběžný fotoaparát. Na obrázku 5.16 je patrné, jak se mění tvar míčku mezi okamžikem dopadu na podložku a okamžikem, kdy je deformace míčku největší (tj. horní okraj se nepohybuje). Je patrné, že časový interval mezi těmito dvěma okamžiky, tj. přibližně 0,04 sekundy, velmi dobře koresponduje s dobou, za kterou poklesne kinetická energie z maximální hodnoty na nulovou (obr. 5.15).

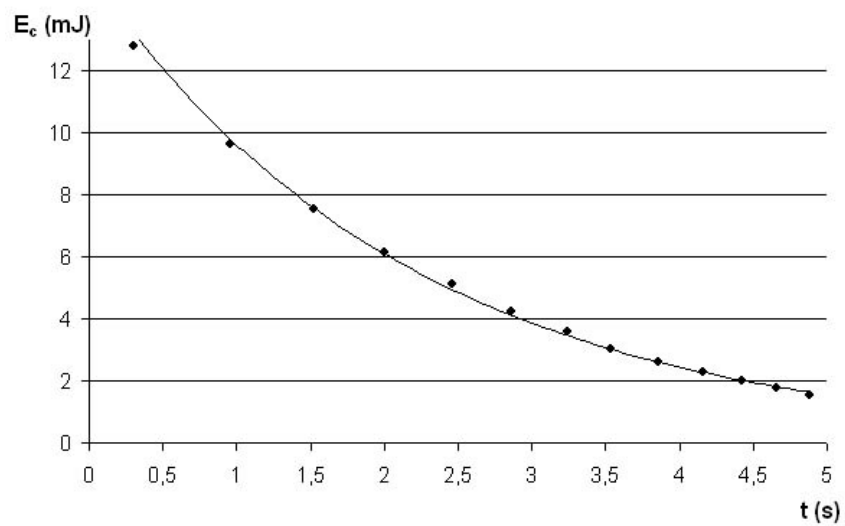


Snímek nalevo zachycuje míček v okamžiku dopadu, snímek napravo pak v okamžiku, kdy je míček nejvíce zdeformován. (Červená značka ukazuje polohu horního okraje míčku na předchozím snímku.) Oba snímky od sebe dělí časový úsek přibližně 0,04 s; zploštění míčku ve vertikálním směru činí asi 2 mm.

Obrázek 5.16: Deformace míčku při dopadu (použití programu Avistep)

### Otázky pro studenty - k rozšíření

1. V některých okamžicích jste pravděpodobně získali zápornou hodnotu potenciální energie. Znamená to, že míček se „zarývá“ do podlahy?  
 ↳ V těchto případech narážíme na hranice přesnosti našeho měření. Přesnost, se kterou čidlo pohybu měří vzdálenost, je  $\pm 1$  mm, velmi snadno tedy v okamžiku dopadu míčku naměříme „zápornou“ výšku nad nulovou hladinou.
2. Díváme-li se na přiblížení přeměn energie během první sekundy děje, vidíme v čase mezi 0,5 a 0,6 sekundy nejdříve pokles, ale poté opět nárůst celkové mechanické energie. Co mohlo tento výkyv způsobit?  
 ↳ Opět se pohybujeme na hranici naší přesnosti, může jít o náhodnou chybu, svoji roli může hrát také zanedbání rotační kinetické energie míčku.
3. Píky v grafu celkové mechanické energie na čase dost dobře neumožňují proložit grafem křivku, která by pokles energie analyticky popisovala. Navrhněte způsob, kterým to lze udělat. Má rozumný smysl takovou křivku konstruovat?  
 ↳ Například můžeme vždy v polovině časového intervalu mezi dvěma dopady odečíst aktuální hodnotu celkové mechanické energie a sestavit závislost pouze z těchto hodnot. V případě vzorového řešení dostaneme závislost na obrázku 5.17. Takovou závislost lze proložit velmi dobře exponenciálou. Vidíme ale, že naše snaha aproximovat naměřená data neodpovídá realitě - v reálu docházelo ke ztrátám energie vždy skokově, mezi dvěma nárazy, nikoliv plynulým poklesem.



Obrázek 5.17: Exponenciální závislost se nejvíce blíží matematickému popisu úbytku celkové mechanické energie v čase, nevystihuje ale skokové ztráty energie během nárazů.

## 5.2 Izotermický děj

### 5.2.1 Provedení a zpracování měření

**Anotace:** Cílem experimentu je naměřit závislost tlaku plynu na objemu při konstantní teplotě.

**Klíčové kompetence ([1]):**

*Gymnaziální vzdělávání – Kompetence k řešení problémů – žák:*

- kriticky interpretuje získané poznatky a zjištění a ověřuje je, pro své tvrzení nachází argumenty a důkazy, formuluje a obhájí podložené závěry
- vytváří hypotézy, navrhuje postupné kroky, zvažuje využití různých postupů při řešení problému nebo ověřování hypotézy

**Očekávané výstupy ([1]):**

*Gymn. vzdělávání – Člověk a příroda – Fyzika – Stavba a vlastnosti látek:* Žák využívá stavovou rovnici ideálního plynu stálé hmotnosti při předvídání stavových změn plynu.

*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:**

Při popisu termodynamických vlastností plynného skupenství využíváme často modelu tzv. **ideálního plynu**. Ve [21] je ideální plyn (dále IP) vymezen následovně:

- Rozměry molekul IP jsou ve srovnání se střední vzdáleností molekul od sebe zanedbatelně malé.
- Molekuly IP na sebe mimo vzájemné srážky navzájem silově nepůsobí.
- Vzájemné srážky molekul IP a srážky těchto molekul se stěnou nádoby jsou dokonale pružné.

Stojí za povšimnutí, že tento model pro plyny omezuje platnost kinetické teorie látek, která počítá se vzájemným silovým působením částic (a tedy existencí potenciální energie systému). IP je sice pouze fyzikální abstrakcí, nicméně většina plynů se za běžných teplot a tlaků (0 °C, 10<sup>5</sup> Pa) tomuto modelu s určitým stupněm nepřesnosti blíží.

Pro makroskopický popis IP používáme stavové veličiny - tlak  $p$ , objem  $V$  a termodynamickou teplotu  $T$ . Lze ukázat, že pro IP stálé hmotnosti (resp. stálého látkového množství) platí:

$$\frac{pV}{T} = konst. \quad (5.1)$$

Velikost konstanty na pravé straně rovnosti je dána počtem částic  $N$  (resp. látkovým množstvím  $n$ ) a jejím dosazením do vztahu výše a úpravou dostáváme tzv. stavovou rovnici IP:

$$pV = NkT = nN_A kT = nRT \quad (5.2)$$

kde  $k$  je Boltzmannova konstanta ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $N_A$  Avogadrova konstanta ( $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ) a  $R$  molární plynová konstanta, jež je součinem obou konstant předešlých ( $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ ).

**Izotermický děj**, na který se nyní zaměříme, je takový děj s IP, při kterém zůstává teplota plynu konstantní. Vztah, který takový děj popisuje, se pak redukuje na výraz:

$$pV = \text{konst.} \quad (5.3)$$

Součin tlaku a objemu IP je za stálé teploty neměnný (Boylův - Mariottův zákon).

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

- počítač s programem Logger Lite + čidlo tlaku Vernier GPS-BTA + rozhraní Go!Link (použití programu Logger Lite neumožňuje zpracování naměřených dat, popsané v tomto návodu).
- rozhraní Vernier LabQuest + čidlo tlaku Vernier GPS-BTA

Namísto rozhraní Go!Link lze vždy použít rozhraní LabQuest nebo LabQuest Mini.

**Další pomůcky:** stříkačka 20 ml (je součástí dodávky tlakového čidla)

#### **O tlakovém čidle Vernier GPS-BTA:**

Čidlo měří absolutní tlak (nepřepočtený na hladinu moře) pomocí prohýbání blány, která reaguje na změny tlaku. Rozsah měřených hodnot je 0 až 210 kPa. Spolu s čidlem se dodává stříkačka a hadička, které je možné přišroubovat k závitům čidla (obr. 5.18) a rozšířit tak možnosti měření.



Obrázek 5.18: Tlakové čidlo

#### **Provedení měření:**

Pomocí tlakového čidla měříme tlak vzduchu uzavřeného v ocejchované plastové stříkačce. Pístem stříkačky měníme objem tohoto plynu. Měření probíhá tak, že do programu Logger Pro manuálně zadáváme aktuální objem vzduchu a čidlo k této zadané hodnotě přiřadí aktuálně měřený tlak. Přitom předpokládáme, že teplota vzduchu ve stříkačce je neměnná (jsou-li změny objemu dostatečně pomalé, lze předpokládat, že teplota vzduchu ve stříkačce se blíží teplotě v místnosti).

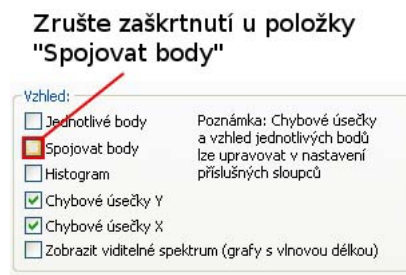
Zde je postup našeho měření:

1. Nastavte prostřední ukazatel na stříkačce na objem 10 ml a stříkačku přišroubujte k tlakovému čidlu (obr. 5.19).



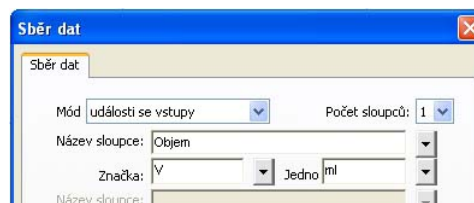
Obrázek 5.19: Příprava čidla k měření

2. Pomocí rozhraní Vernier Go!Link připojte čidlo k počítači a vyčkejte na 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.



Obrázek 5.20: Nastavení grafu

3. Klávesovou zkratkou CTRL+D vyvolejte okno *Sběr dat*, zvolte mód *Události se vstupy* a vyplňte nové okno dle obr. 5.21 (Název sloupce: *Objem*; značka: *V*; jednotky: *ml*). Potvrďte tlačítkem *Hotovo*.



Obrázek 5.21: Okno *Události se vstupy*

4. Připravený graf závislosti tlaku na objemu je na vodorovné ose škálován až do objemu 900 ml. Protože naše stříkačka má objem pouze 20 ml, změňte na tuto hodnotu také rozsah této osy. Klikněte na hodnotu 900 a přepište ji na hodnotu 20 (obr. 5.22).



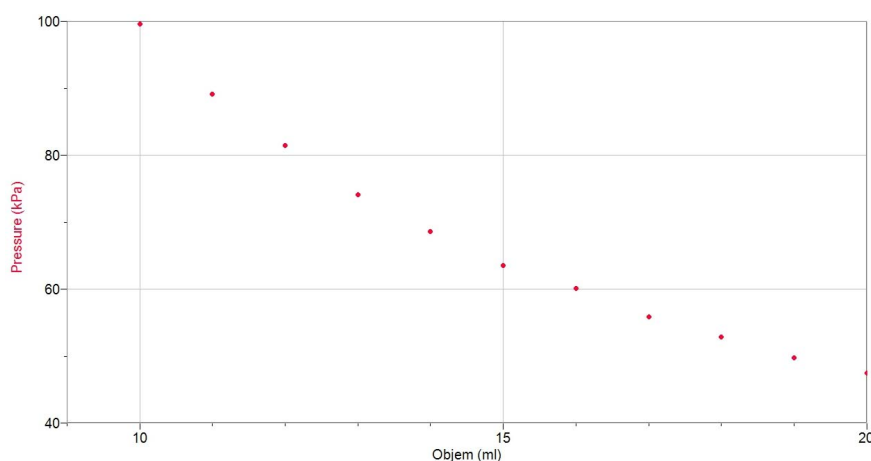
Obrázek 5.22: Změna rozsahu vodorovné osy

5. V tuto chvíli jste připraveni měřit. Spusťte měření tlačítkem *Zahájit sběr dat* (obr. 4.3). Klikněte na modré kolečko, které se objeví v pravé části hlavního panelu, a do okna, které se objeví, zadejte číselně aktuální objem vzduchu ve stříkačce (tj. v našem případě 10 ml, viz obr. 5.23). Do grafu se k tomuto zadanému objemu přiřadí aktuálně naměřený tlak.



Obrázek 5.23: Zadávání hodnot

6. Pohybem pístu stříkačky nastavte objem vzduchu na 11 ml a postup s modrým kolečkem opakujte. Stejným způsobem proměřte tlak také pro objem 12 ml, 13 ml a takto pokračujte až do 20 ml. Měření ukončete stiskem červeného tlačítka *Ukončit sběr dat*, které najdete na hlavním panelu vlevo od modrého kolečka. Ve výsledném grafu (obr. 5.24) je zobrazeno 11 naměřených dvojic objem-tlak. Není-li plocha grafu optimálně využita, použijte nástroj *Automatické měřítko* (obr. 4.3).



Obrázek 5.24: Naměřené hodnoty pro izotermický děj

### Zpracovaných naměřených dat:

1. Zkuste proložit naměřenými body vhodnou křivku popsanou funkcí  $p = p(V)$ . Z teoretického úvodu plyne:

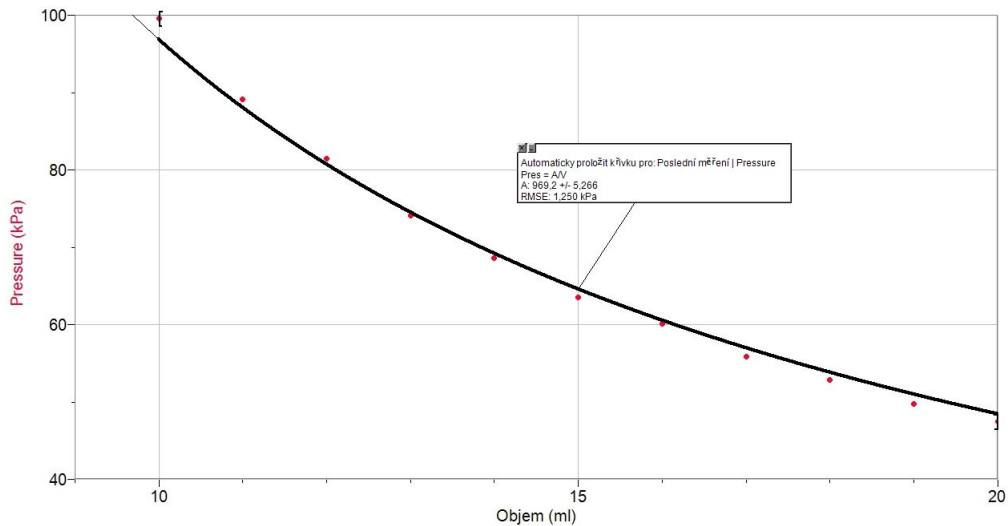
$$pV = konst. \Rightarrow p = \frac{konst.}{V} \quad (5.4)$$

Vhodnou funkcí je tedy nepřímá úměrnost, vhodnou křivkou pak větev hyperboly. 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/V - Převrácená hodnota“ (obr. 5.25), vyberte *Aproximovat* a potvrďte OK. Do grafu se zakreslí křivka popsaná funkcí  $p(V) = \frac{A}{V}$ , kde  $A$  je konstanta na pravé straně rovnice 5.4. Program zobrazuje předpis proložené závislosti, dopočtenou hodnotu konstanty  $A$  a chybu aproximace (RMSE = *root-mean-square error*). Je patrné, že proložená větev hyperboly poměrně dobře aproximuje naměřenou závislost (obr. 5.26).



Obrázek 5.25: Výběr aproximující křivky



Obrázek 5.26: Aproximace naměřených hodnot hyperbolou  $p(V) = \frac{A}{V}$

3. Pomocí konstanty  $A$  nyní odhadneme látkové množství vzduchu ve stříkačce. Konstanta  $A$  je vypočítána v takových jednotkách, ve kterých jsou škálovány osy grafu, tedy např. ve vzorovém měření:

$$A \doteq 969 \text{ ml} \cdot \text{kPa} = 969 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{Pa} = 0,969 \text{ J} \quad (5.5)$$

(Povšimněte si, že součin  $pV$  má jednotku joule - stavová rovnice IP je tedy vlastně určitou formou zákona zachování energie.) Z rovnic 5.2 a 5.3 plyne:

$$A = nRT \Rightarrow n = \frac{A}{RT} \quad (5.6)$$

Použijeme-li předpoklad, že pro dostatečně pomalé změny objemu je teplota vzduchu ve stříkačce rovna teplotě místnosti, stačí nyní již jen změřit teplotu místnosti a dosadit do vztahu 5.6. V našem případě:

$$t \doteq 22 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow T \doteq 295 \text{ K} \quad (5.7)$$



$$n \doteq \frac{0,969}{8,31 \cdot 295} \text{ mol} \doteq 395 \mu\text{mol} \quad (5.8)$$

4. Pomocí proložení grafu nepřímé úměrnosti naměřenými body jsme z matematického vyjádření této křivky určili látkové množství vzduchu ve stříkačce. Stejným způsobem můžeme z konstanty  $A$  určit také počet částic  $N$  ve stříkačce.

## 5.2.2 Poznámky, otázky a úkoly

### Příprava experimentu

- Důkladně přišroubujte stříkačku k čidlu, aby nedošlo k jejímu uvolnění.

### Během měření

- Při manipulaci s pístem stříkačky je vhodné dotýkat se těla stříkačky co nejméně - v opačném případě může teplem dlaní docházet k zahřívání plynu uvnitř.
- Pístem pohybujte pozvolna, lépe se tak přiblížíte modelu izotermického děje.

### Otázky a úkoly pro studenty

1. Má model IP nějaká logická omezení, za jejichž hranicí přestává dávat fyzikální smysl? (Jak je to s platností modelu například pro teploty blízké se 0 K?) Pro ověření vašich odpovědí vyhledejte, v jakém rozmezí tlaků a teplot je model IP s rozumnou přesností použitelný.

→ Model platí v poměrně úzkém rozmezí v okolí tzv. normálních podmínek, tj. 0 °C, 10<sup>5</sup> Pa. Pro teploty blízké 0 K předpovídá model IP (např. pro stálý tlak) téměř nulový objem plynu - model tedy zanedbává rozměry atomů a molekul.

2. Bylo by možné určit látkové množství vzduchu ve stříkačce ještě jiným způsobem (event. způsoby) než ze stavové rovnice IP? Jaké údaje je k tomu třeba znát? Proveďte alternativní výpočet látkového množství a porovnejte ho s výsledkem získaným ze stavové rovnice.

→ Pro výpočet látkového množství vzduchu lze užít vztah

$$n = \frac{m}{M_m}, \quad (5.9)$$

kde  $m$  je hmotnost vzduchu ve stříkačce a  $M_m$  jeho molární hmotnost. Známe-li při dané teplotě hustotu  $\rho$  vzduchu o objemu  $V$ , určíme pak látkové množství jako:

$$n = \frac{\rho V}{M_m}. \quad (5.10)$$

Konkrétně: Hustotu  $\rho$  ve vztahu 5.10 určíme ze vztahu uvedeného ve [22] (vzduch ve stříkačce budeme považovat za suchý), objem  $V = 10$  ml a molární hmotnost vzduchu je dle [22]  $M_m = 28,96 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ . V případě našeho vzorového měření dostáváme:

$$n = \frac{\rho V}{M_m} \doteq \frac{1,18 \cdot 10^{-5}}{28,96 \cdot 10^{-3}} \text{ mol} \doteq 407 \mu\text{mol} \quad (5.11)$$

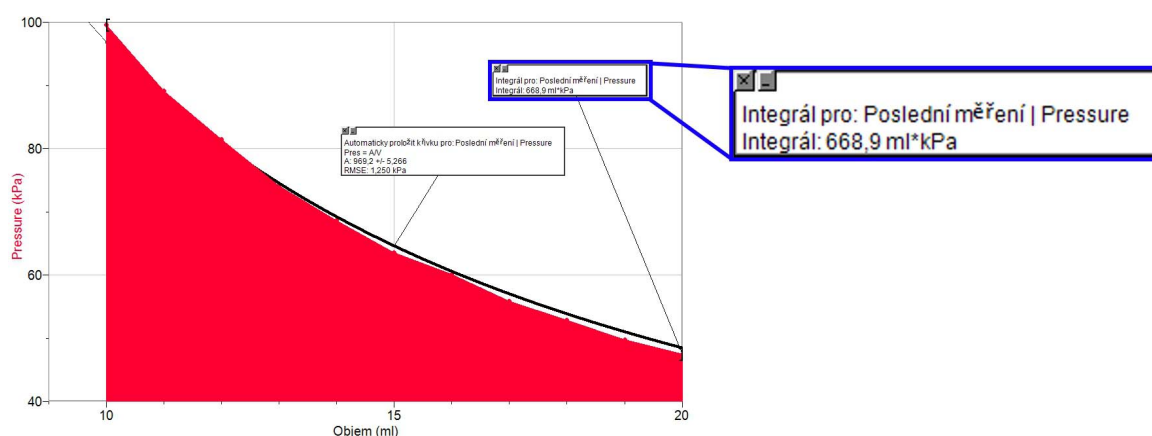
Dostali jsme tedy výsledek blízký hodnotě zjištěné z aproximace grafem nepřímé úměrnosti. Další alternativnou by bylo určení látkového množství za pomoci znalosti, že objem 1 molu libovolného plynu je za standardních podmínek konstantní. (Kdybychom naše podmínky považovali za standardní, dává tento postup výsledek  $n = 446 \mu\text{mol}$ .) Nyní můžete vyzvat žáky, aby porovnali přesnost těchto metod.

- Látkové množství tak, jak s ním pracujeme, je definováno pro chemicky stejnorodou (homogenní) látku. Co tento pojem znamená? Splňuje vzduch podmínku chemické stejnorodosti?  
 ↳ Chemicky stejnorodé látky mají v každé části svého objemu stejné vlastnosti. Z hlediska našich makroskopických termodynamických měření lze vzduch považovat za chemicky stejnorodou látku.
- Pomocí provedené aproximace nepřímou úměrností a stavové rovnice IP určete počet částic vzduchu ve stříkačce.  
 ↳ Ze vztahů 5.4 a 5.2 dostáváme:  $N = \frac{A}{kT}$ .
- Je hyperbola jedinou křivkou, která vhodně aproximuje naměřená data? Zkuste v programu Logger Pro proložit získanými body například exponenciální závislost. Mohli bychom bez teoretického základu jen na základě aproximace rozhodnout, která křivka naměřeným hodnotám odpovídá?  
 ↳ Pravděpodobně se vám stane, že exponenciální funkce ve tvaru  $p(V) = Ae^{-B \cdot V} + C$  ( $A, B, C$  jsou konstanty) proloží naměřené hodnoty ještě přesněji než hyperbola  $p(V) = \frac{A}{V}$ . Ne vždy nám tedy fyzikální měření dávají jednoznačně interpretovatelné výsledky.

### 5.2.3 Rozšíření úlohy 1: Práce IP

1. S naměřenou  $pV$  závislostí budeme dále pracovat. Ve [21] je ukázáno, že plocha pod grafem funkce  $p = p(V)$  má význam práce vykonané IP při izotermické změně objemu. (To koresponduje s tím, že  $[pV] = \text{J}$ .) K určení plochy pod grafem nepřímé úměrnosti uijeme nástroje programu Logger Pro.

2. Na hlavním panelu klikněte na ikonu *Integrál* (obr. 4.3). Plocha pod grafem se vybarví a program spočítá její obsah, který odpovídá práci  $W$  vykonané IP při izotermickém zvětšení objemu z 10 ml na 20 ml (obr. 5.27). V případě vzorového měření  $W \doteq 670 \text{ ml} \cdot \text{kPa} = 670 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{Pa} = 0,670 \text{ J}$ .



Obrázek 5.27: Výpočet práce vykonané IP při izoterm. změně objemu z 10 na 20 ml

## Otázky a úkoly pro studenty

1. Povšimněte si, jakým způsobem program plochu vybarvil. Jde opravdu o plochu pod proloženou křivkou? Byli byste schopni navrhnout, jakým způsobem program plochu nejspíše počítá? Jak by se dal takový postup zpřesnit?  
↳ Program Logger Pro nevybírá plochu pod proloženou křivkou, ale vždy plochu pod spojnici dvou následujících bodů. Obsah této jedné plochy je vlastně obsahem pravoúhlého lichoběžníka, sčítání obsahů takových lichoběžníků pak aproximuje obsah celé plochy pod naměřenou závislostí. Jde o ukázkou numerické integrace, kterou počítače využívají při výpočtu obsahu složitých geometrických obrazců. Kdybychom v našem experimentu měnili objem například po 0,5 ml, dostali bychom touto metodou přesnější výsledek než při postupu po 1 ml.

### 5.2.4 Rozšíření úlohy 2: Van der Waalsův plyn

1. Ideální plyn je pouze jedním z mnoha modelů popisujících termodynamické vlastnosti plynného skupenství. O něco složitější popis pomocí stavových veličin nabízí tzv. **van der Waalsova stavová rovnice**, která na rozdíl od modelu IP zohledňuje vlastní objem molekul plynu (tj. nepracuje s neomezenou stlačitelností) a předpokládá přitažlivé síly mezi molekulami. Van der Waalsova rovnice má tuto podobu (viz např. [21]):

$$\left(p + \frac{n^2 a}{V^2}\right) \left(\frac{V}{n} - b\right) = RT, \quad (5.12)$$

kde  $p$  je tlak plynu,  $V$  jeho objem,  $n$  látkové množství,  $R$  molární plynová konstanta,  $T$  termodynamická teplota a  $a$ ,  $b$  konstanty vyjadřující „neideálnost“ plynu (závislé na druhu plynu).

2. Chceme-li aproximovat naměřenou závislost tímto modelem, musíme nejdřív vyjádřit tlak jako funkci objemu  $p = p(V)$ . Z rovnice 5.12 plyne:

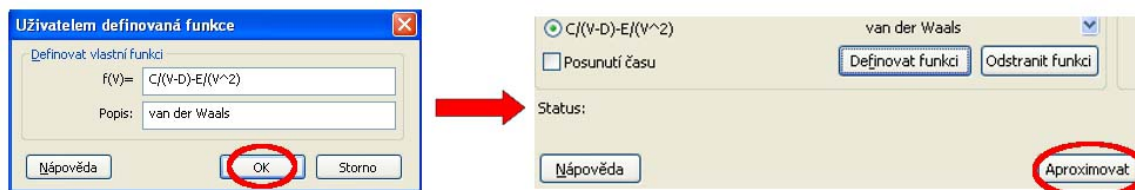
$$p(V) = \frac{nRT}{V - bn} - \frac{n^2 a}{V^2} \quad (5.13)$$

Protože látkové množství ani teplota se při našem experimentu nemění, definujeme nové konstanty  $C$ ,  $D$ ,  $E$  takto:  $nRT = C$ ;  $bn = D$ ;  $n^2 a = E$ . Tím dostáváme vztah:

$$p(V) = \frac{C}{V - D} - \frac{E}{V^2} \quad (5.14)$$

3. Pojdme touto závislostí  $p = p(V)$  proložit naměřené hodnoty. V grafu naměřených hodnot ponechte pouze proloženou hyperbolu, ostatní úpravy (např. integrál) smažte. Na hlavním panelu klikněte na ikonu *Proložit křivku* a vyberte *Definovat funkci*. Do okna, které se objeví, zadejte předpis z rovnice 5.14 (obr. 5.28), potvrďte *OK*, zvolte *Aproximovat* a znovu *OK*. Naměřenými body se proloží křivka, která

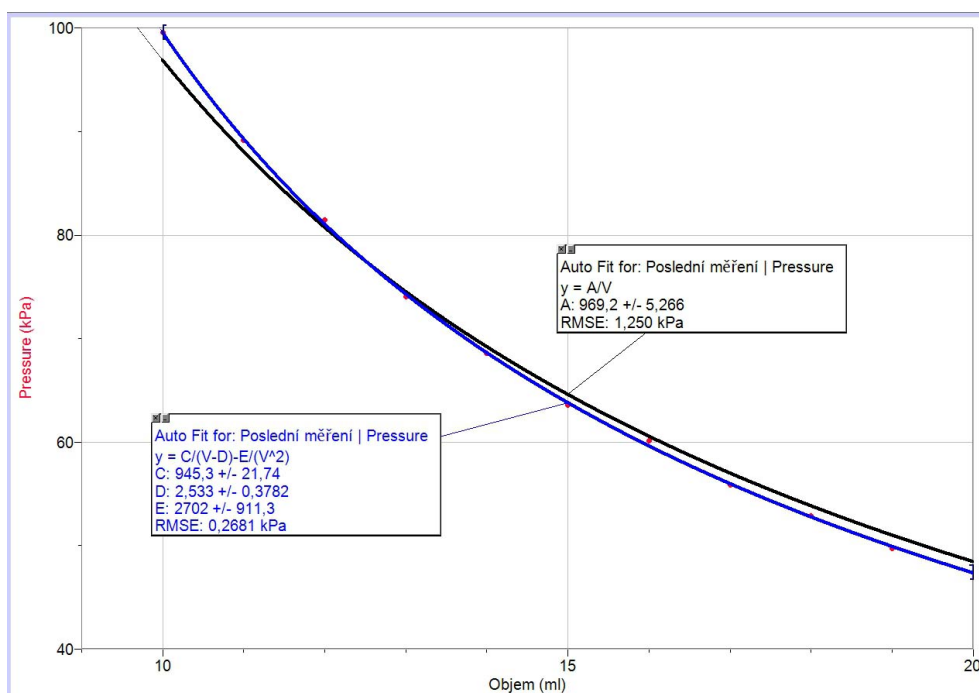
je aproximuje výrazně přesněji než hyperbola (srovnání obou křivek ukazuje obrázek 5.29).



Obrázek 5.28: Zadání předpisu  $p = p(V)$  z van der Waalsovy stavové rovnice

### Otázky a úkoly pro studenty

1. Program Logger Pro určil čísla  $C$ ,  $D$ ,  $E$ . Interpretujte význam konstanty  $C$ .  
 ↳ Konstanta  $C$  má stejný význam jako konstanta  $A$  při prokládání hyperbolou, jde o součin  $nRT$ . V našem měření se konstanty  $A$  a  $C$  liší asi o 2,5 % větší z nich.
2. Je překvapující, že předpis 5.14 aproximuje naměřená data lépe než hyperbola?  
 ↳ Zatímco v předpisu hyperboly byl jediný volný parametr  $A$ , v tomto předpisu jsou hned tři volné parametry. Více volných parametrů zde dává více možností, jak nafitovat vhodnou křivku. První člen předpisu je vlastně opět větev hyperboly (ovšem tentokrát s možností posunutí po vodorové ose), druhý odečítaný člen umožňuje další korekce. (Můžete před žáky zmínit možnost přesnějších a přesnějších aproximací polynomy - intuitivní Taylorův rozvoj.)



Obrázek 5.29: Černá křivka ukazuje aproximaci naměřených hodnot pro model IP, modrá pro model van der Waalsova plynu

## 5.3 Tuhost pružiny

### 5.3.1 Provedení a zpracování měření

**Anotace:** Cílem experimentu je určit tuhost pružiny pomocí siloměru a čidla pohybu a porovnat s výsledkem získaným výpočtem.

**Klíčové kompetence ([1]):**

*Gymnaziální vzdělávání – Kompetence k řešení problémů – žák:*

- vytváří hypotézy, navrhuje postupné kroky, zvažuje využití různých postupů při řešení problému nebo ověřování hypotézy
- 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 ([1]):**

*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: (částečně převzato z [23])

Závaží zavěšené na pružině je ve výuce fyziky nejběžnější realizací mechanického oscilátoru. Zavěsíme-li na pružinu o počáteční délce  $l$  závaží o hmotnosti  $m$ , začne na tuto pružinu působit síla pružnosti  $F_p = k\Delta l$ , kde  $\Delta l$  je prodloužení pružiny po zavěšení závaží a  $k$  **tuhost pružiny**, konstanta popisující vlastnost konkrétní pružiny. V rovnovážné poloze se velikost síly  $F_p$  vyrovná velikosti tíhové síly, působící opačným směrem, závaží je tedy v klidu a platí:

$$mg = k\Delta l \Rightarrow k\Delta l - mg = 0 \quad (5.15)$$

kde  $g$  je tíhové zrychlení. Zanedbáváme vlastní hmotnost pružiny.

Vychýlíme-li nyní závaží ve vertikálním směru a pustíme ho, uvedeme jej do kmitavého pohybu. Zatímco tíhová síla působící na závaží se nemění, mění se velikost síly pružnosti - nyní platí:  $F_p = k(\Delta l - y)$ , kde  $y$  je aktuální výchylka závaží z rovnovážné polohy (pod rovnovážnou polohou uvažujeme záporné hodnoty  $y$ , nad ní kladné). Pro velikost výsledné síly působící na závaží pak lze psát:

$$F = F_p - F_G = k(\Delta l - y) - mg \quad (5.16)$$

Protože podle vztahu 5.15 je  $k\Delta l - mg = 0$ , platí:

$$F = -ky \quad (5.17)$$

Velikost síly působící na kmitající těleso je tedy přímo úměrná jeho výchylce z rovnovážné polohy. Nachází-li se závaží pod rovnovážnou polohou, míří síla vzhůru a naopak, v rovnovážné poloze je nulová.

Každé reálné kmitání je tlumené, nicméně délka našeho měření bude dostatečně krátká, abychom mohli kmitání závaží považovat za netlumené. Takové kmitání mechanického oscilátoru je pak harmonické a lze jej popsat úhlovou frekvencí  $\omega$ . Lze ukázat, že úhlová frekvence vlastního kmitání závaží souvisí s parametry pružiny a závaží vztahem:

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (5.18)$$

Odtud pro periodu kmitání  $T$  platí:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \Rightarrow k = \frac{4\pi^2 m}{T^2} \quad (5.19)$$

**Potřebné měřicí vybavení:** Návod byl zpracován se senzory Vernier Go!Motion a Vernier DFS-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
- pro připojení k počítači lze namísto rozhraní Go!Link vždy použít rozhraní LabQuest nebo LabQuest Mini (v takovém případě lze namísto čidla Go!Motion použít čidlo Vernier MD-BTA)

**Další pomůcky:** laboratorní stojan, pružiny různé tuhosti, závaží, laboratorní váhy

#### **O čidle Vernier Go!Motion:**

Viz experiment *Kam se ztrácí energie*.

#### **O čidle Vernier DFS-BTA:**

Čidlo umožňuje měřit sílu v tahu či tlaku v rozsazích  $\pm 10$  N a  $\pm 50$  N (nejmenší měřitelná síla je 0,01 N). Protože běžně používané závaží bude mít hmotnost do cca 150 g, budeme v našem měření pracovat výhradně s rozsahem  $\pm 10$  N.



Obrázek 5.30: Přepínač rozsahů

#### **Provedení měření:**

Pomocí dvojice čidel budeme současně snímat aktuální výchylku závaží z rovnovážné polohy a velikost síly pružnosti, která deformuje pružinu.

**1.** Pomocí rozhraní Vernier Go!Link připojte k počítači siloměr Vernier DFS-BTA, pomocí USB vstupu připojte čidlo Vernier Go!Motion a vyčkejte na automatickou detekci. Po úspěšné detekci obou čidel zobrazí program Logger Pro tři připravené grafy časových závislostí, svislé osy jsou postupně popsány veličinami *Force*, *Vzdálenost* a *Velocity*.

**2.** Graf závislosti rychlosti kmitajícího závaží na čase nebudeme pro další úvahy potřebovat - klikněte na plochu tohoto grafu a klávesou *Delete* jej odstraňte. Zkratkou CTRL+R zvětšíte zbylé dva grafy tak, aby byla obrazovka optimálně využita.

Určete hmotnost závaží



Možné způsoby uchycení siloměru

Celkové uspořádání

Obrázek 5.31: Uspořádání experimentu

3. Klávesovou zkratkou CTRL+D vyvolejte okno *Sběr dat*, nastavte délku měření 5 sekund a vzorkovací frekvenci 50 Hz. Potvrďte tlačítkem *Hotovo*.

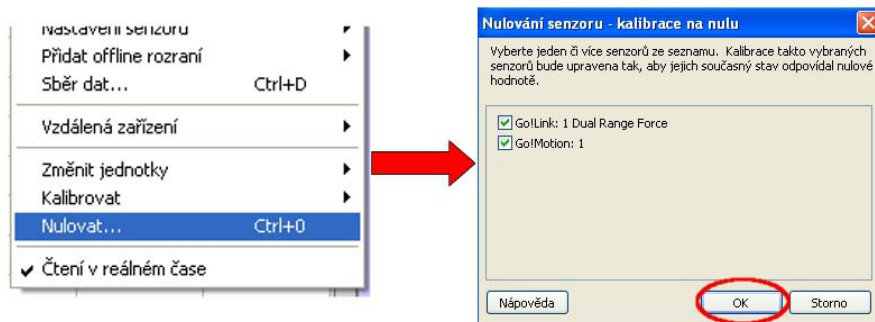
4. Pomocí laboratorních vah (nebo přímo pomocí připojeného siloměru) určete hmotnost závaží, které bude představovat mechanický oscilátor kmitající na pružině (obr. 5.31). Tuto hmotnost si zapište, při vyhodnocování měření ji budeme potřebovat. Ve vzorovém měření je  $m = 73,9$  g.

5. Jedním ze dvou způsobů zobrazených na obr. 5.31 připevněte siloměr k laboratornímu stojanu. Svisle pod kovový háček umístěte měřící hlavu čidla pohybu, rozkmitajte závaží a posunem čidla ve vertikálním směru zajistěte, aby ani ve své nejnižší poloze nebyla vzdálenost závaží od čidla menší než 20 centimetrů. (Menší vzdálenosti čidlo pohybu neregistruje.)

6. Nechte závaží opět ustálit, poté vyberte *Experiment - Nulovat* a v okně, které se otevře, ponechte zaškrtnuté nulování obou čidel. Potvrďte OK (viz obr. 5.32).

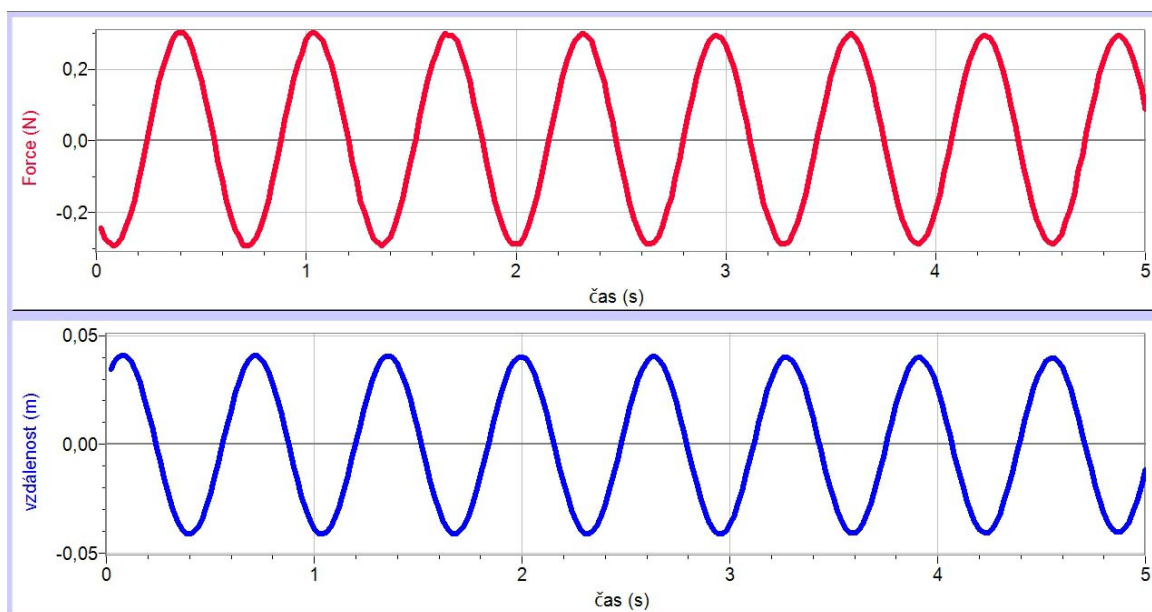
7. Nyní jste připraveni měřit. Rozkmitajte závaží ve vertikálním směru a tlačítkem *Zahájit sběr dat* (obr. 4.3) spusťte měření.





Obrázek 5.32: Nulování čidel

8. Po uplynutí 5 sekund se měření ukončí. Program zobrazuje časové průběhy aktuální výchylky závaží a síly působící na závaží. Pro optimální využití plochy grafu využijte tlačítko *Automatické měřítko* (obr. 4.3). Ukázku vzorového měření najdete na obr. 5.33. Nyní lze snadno ukázat, že v rovnovážné poloze je výslednice sil působících na závaží nulová, zatímco největší velikost má při největší výchylce závaží (v obou směrech).



Obrázek 5.33: Vzorově naměřená závislost

### Zpracování naměřených dat:

1. Ještě než začneme měření vyhodnocovat, je vhodné si zkontrolovat, že naměřená data odpovídají zavedení v *Teoretickém úvodu* - výchylkám z rovnovážné polohy směrem dolů jsou vzhledem k uspořádání měření skutečně přiřazeny záporné hodnoty a naopak. Protože tuhost je kladná konstanta, mělo by také platit, že ke kladným výchylkám přísluší záporné hodnoty síly a naopak - i tento požadavek námi naměřená data splňují.

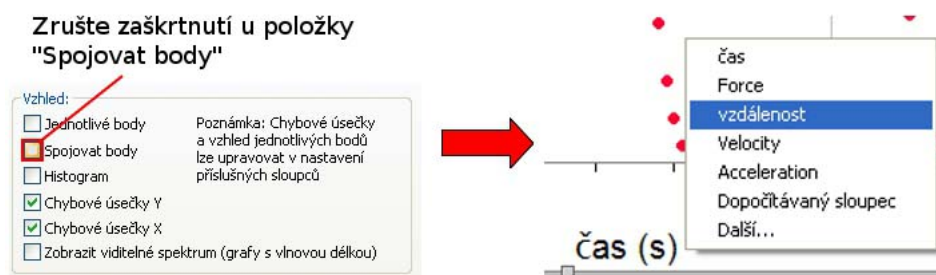
2. Tuhost pružiny určíme pomocí nástrojů programu Logger Pro ze vztahu 5.17,



kde tato fyzikální veličina představuje konstantu úměrnosti v lineárním vztahu mezi výslednou silou a výchylkou závaží. Nejdříve si ale tuto lineární závislost zobrazíme (viz následující body 3 až 5).

3. Označte myší graf závislosti vzdálenosti na čase a klávesou *Delete* tento graf odstraňte. Klávesovou zkratkou CTRL+R roztáhněte graf do celého měřicího okna.

4. Klikněte pravým tlačítkem na plochu zbylého grafu, vyberte *Nastavení grafu* a zrušte zaškrtnutí u položky *Spojovat body* (obr. 5.34). Potvrďte poklepáním na *Hotovo*.



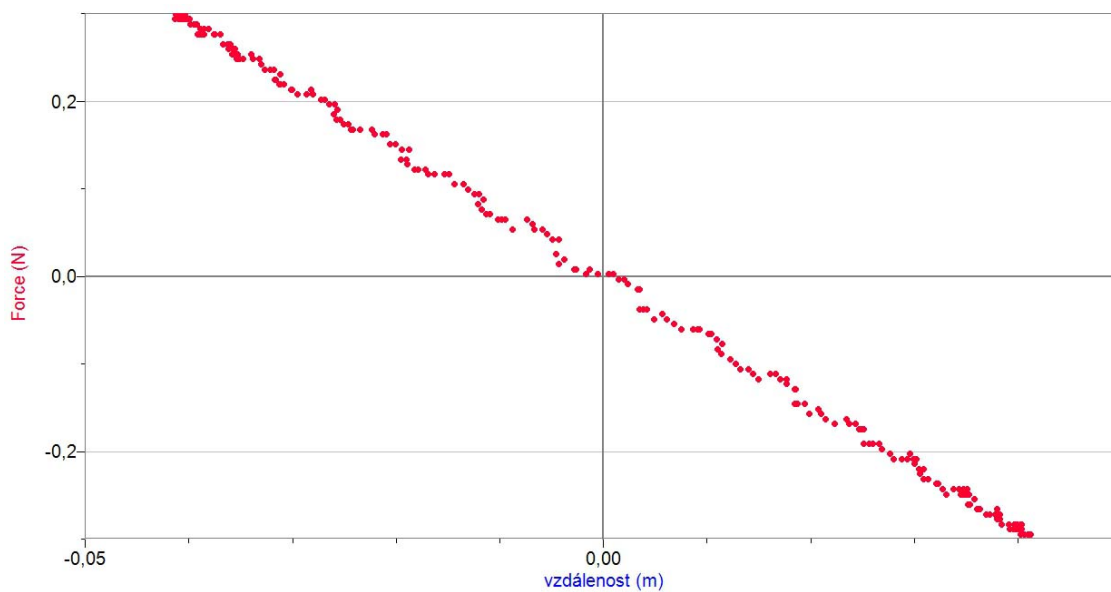
Obrázek 5.34: Změny v grafu

5. Nyní klikněte na popisek vodorovné osy („čas“) a vyberte namísto času „vzdálenost“ (obr. 5.34). Protože body se seskupí do levé části obrazovky, uzpůsobte velikost grafu příkazem *Automatické měřítko* (viz. 4.3).

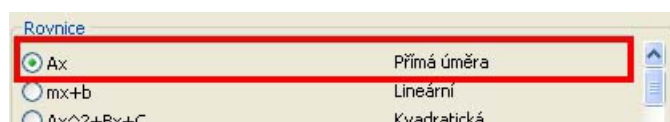
6. Máte před sebou kýženou závislost výsledné síly na aktuální výchylce závaží (obr. 5.35). Jak jsme již řekli, tuhost je kladná konstanta, proto jsme dle vztahu 5.17 mohli očekávat klesající lineární závislost - tu jsme nyní skutečně získali. (Je vhodné zde studenty upozornit, že před sebou mají všechny naměřené dvojice síla-výchylka, které čidla během měření zaznamenala, zdůraznit, že časová závislost nás již nezajímá.)

7. Ze vztahu 5.17 je patrné, že tuhost pružiny určíme jako směrnici přímky, proložené získanou závislostí síly na výchylce; nejdříve je tedy nutné proložit naměřenými hodnotami příslušnou přímku. Na hlavním panelu klikněte na ikonu *Proložit křivku*. V nabídce *Rovnice* vyberte předpis „Ax - Přímá úměra“ (obr. 5.36), vyberte *Aproximovat* a potvrďte OK. Do grafu se zakreslí křivka popsaná funkcí  $F(x) = Ax$ , kde  $x$  hraje roli výchylky  $y$ . Program zobrazuje předpis proložené závislosti, dopočtenou hodnotu konstanty  $A$  a chybu aproximace (RMSE = *root-mean-square error*). Srovnáním se vztahem 5.17 je patrné, že konstanta  $A$  má význam záporně vzaté tuhosti  $-k$ . V případě vzorového měření jsme tedy určili tuhost pružiny jako přibližně  $7,2 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ .

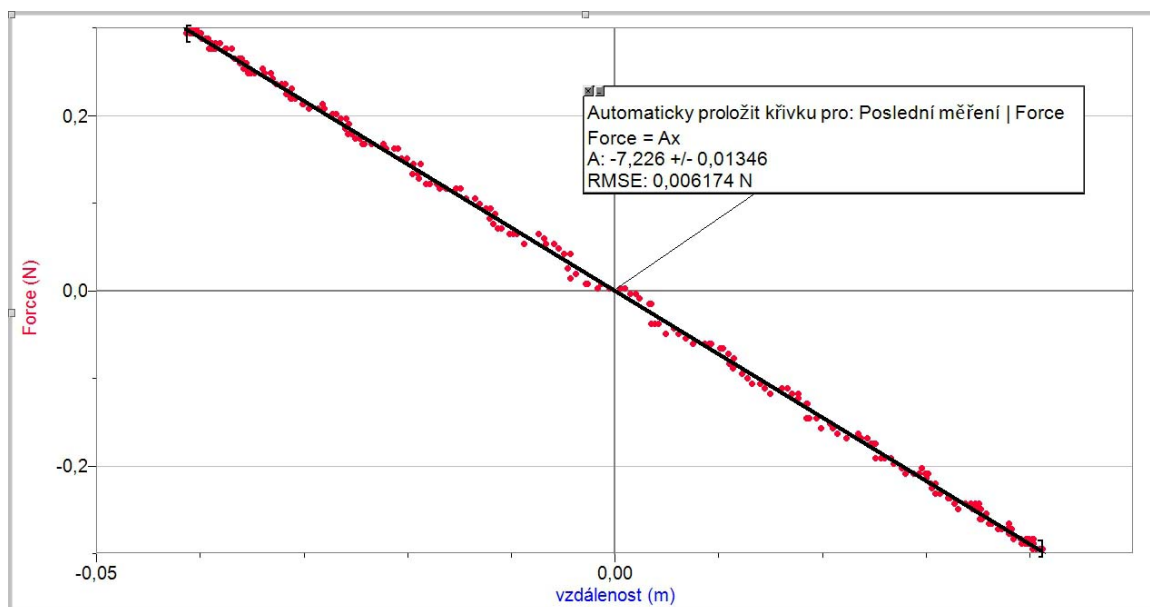
8. Podobným způsobem můžete proměřit tuhost dalších pružin.



Obrázek 5.35: Graf závislosti výsledné síly na výchylce z rovnovážné polohy



Obrázek 5.36: Výběr aproximující křivky



Obrázek 5.37: Aproximace naměřených hodnot funkcí  $F(x) = Ax$

## 5.3.2 Poznámky, otázky a úkoly

### Příprava experimentu

- Zajistěte, aby se mezi zkoumané závaží a měřicí hlavu sonaru nedostala žádná překážka, jež by mohla být zdrojem parazitních odrazů (typicky kabel siloměru).
- Ověřte, že ani ve své nejnižší poloze se závaží nepřibližuje sonaru na menší vzdálenost než 20 cm.
- Je v zásadě jedno, jaký pracovní režim čidla pohybu (viz experiment *Kam se ztrácí energie*) použijete.

### Během měření

- Rozkmitajte závaží tak, aby pohyb probíhal výhradně nahoru-dolů, minimalizujte kývání závaží do stran.
- Není třeba udělit závaží velkou počáteční výchylku, již při výchylce kolem 1 cm je měření poměrně přesné.

### Otázky a úkoly pro studenty

1. Vysvětlete pojmy pružinový oscilátor, harmonické kmitání, tlumené kmitání.
2. Jakých zanedbání se při měření dopouštíme?  
⇒ Kmitání závaží je tlumené, postupně klesá jeho amplituda. Navíc jen velmi těžko zajistíme, aby závaží kmitalo pouze ve vertikálním směru, dochází i k výchylkám do stran. Po celou dobu měření zanedbáváme hmotnost pružiny.
3. Jaký význam má nulování čidel? Jak by výsledky měření vypadaly bez něj?  
⇒ Nastavíme-li rovnovážnou polohu jako nulovou hodnotu pro sílu i výchylku, stává se měření přehlednějším, nemusíme uvažovat neměnicí se tíhovou sílu, resp. neměnicí se vzdálenost rovnovážné polohy závaží od měřicí hlavy čidla.
4. Jakým způsobem je vhodné z naměřených dat získat tuhost pružiny?  
⇒ Jistě by bylo možné z několika dvojic hodnot vypočítat podle vztahu 5.17 tuhost, fyzikálně správnější je ale postup popsáný výše, který využívá aproximace funkcí přímá úměrnost.
5. Povšimněte si, že v grafu na obrázku 5.35 je nejvíce naměřených bodů koncentrováno v oblasti maximální a minimální výchylky (tj. v krajních polohách závaží), naproti tomu v okolí rovnovážné polohy (střední část grafu) je naměřených hodnot nejméně. Umíte vysvětlit, proč?  
⇒ V rovnovážné poloze má kmitající závaží maximální rychlost a pobývá tedy v jejím okolí pouze krátký čas. Naproti tomu v krajních polohách, kdy dochází ke změně směru rychlosti, se závaží na okamžik zastavuje, vyskytuje se zde poměrně dlouhý časový úsek, za který se zaznamená hned několik bodů.

### 5.3.3 Kontrola výsledku:

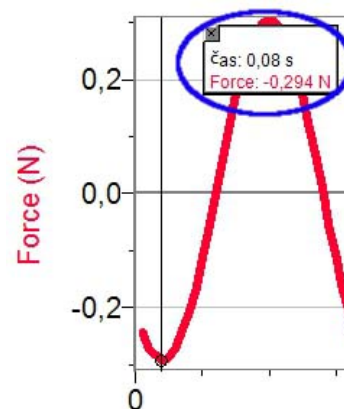
1. Nyní se pokusíme získaný výsledek potvrdit pomocí vztahu 5.19. Hmotnost závaží jsme již zjistili, zbývá určit příslušnou periodu kmitů.

2. Vraťte se k původní podobě naměřených závislostí, jak je ukazuje obr. 5.33 (pokud jste již v dosud upravovaném souboru uložili změny, naměřte se stejnou pružinou i závažím novou závislost). Vyberte nástroj *Odečet hodnot* (obr. 4.3) a pomocí okna, které se objeví, odečtěte dobu trvání několika period (obr. 5.38).

3. Ve vzorovém měření byly odečteny časy  $t_1 = 0,08$  s a  $t_2 = 4,56$  s, vymežující 7 period, odtud doba rovná jedné periodě je přibližně  $T \doteq 0,64$  s; připomeňme si hmotnost závaží  $m = 73,9$  g.

4. Dosadíme nyní tyto hodnoty do vztahu 5.19:

$$k = \frac{4\pi^2 m}{T^2} \doteq \frac{4\pi^2 \cdot 73,9 \cdot 10^{-3}}{0,64^2} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1} \doteq 7,1 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1} \quad (5.20)$$



Obrázek 5.38: Odečet hodnot

#### Otázky a úkoly pro studenty

1. Bylo by možné nějak zkontrolovat, zda je výsledek získaný v první části měření správný?  
→ Ano, ze vztahu 5.19, tj. určením z hmotnosti závaží a periody jeho kmitů.
2. Je podstatné, zda budeme periodu odečítat z časového průběhu síly nebo z časového průběhu výchylky?  
→ Již jsme prokázali mezi těmito veličinami lineární vztah, periodu tedy můžeme určovat stejně dobře z obou grafů.

## 5.4 Jak funguje tepelná izolace

### 5.4.1 Provedení a zpracování měření

**Anotace:** Cílem experimentu je měřením demonstrovat rozdíly v tepelné vodivosti různých materiálů.

**Klíčové kompetence ([1]):**

*Gymnaziální vzdělávání – Kompetence k řešení problémů – žák:*

- kriticky interpretuje získané poznatky a zjištění a ověřuje je, pro své tvrzení nachází argumenty a důkazy, formuluje a obhajuje podložené závěry
- vytváří hypotézy, navrhuje postupné kroky, zvažuje využití různých postupů při řešení problému nebo ověřování hypotézy

*Gymnaziální vzdělávání – Kompetence komunikativní – žák:*

- efektivně využívá moderní informační technologie

**Očekávané výstupy ([1]):**

*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:**

Jedním z mechanismů přenosu vnitřní energie z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou je tepelná výměna vedením. Každý materiál vede teplo (neexistuje tedy „ideální“ tepelný izolant), můžeme ale rozlišovat dobré a špatné vodiče tepla.

V pevných elektricky nevodivých látkách vysvětlujeme tepelnou vodivost tak, že rozkmitané částice v zahřívané části tělesa předávají svoji kinetickou energii sousedním částicím. V kovech zprostředkovávají tepelnou výměnu zejména volné elektrony, což z kovů dělá velmi dobré vodiče tepla.

Fyzikální veličina, která popisuje schopnost materiálu zprostředkovávat tepelnou výměnu vedením, se nazývá součinitel tepelné vodivosti, značka:  $\lambda$ ,  $[\lambda] = \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Představíme-li si tyč délky  $d$  s kolmým průřezem o obsahu  $S$  (stejně tak lze pracovat s blokem materiálu s těmito parametry), platí:

$$Q = \lambda S \frac{\Delta T}{d} \tau, \quad (5.21)$$

kde  $\Delta T$  je teplotní rozdíl mezi konci tyče (předpokládáme, že je udržován konstantní) a  $Q$  je teplo prošlé libovolným kolmým průřezem o obsahu  $S$  za čas  $\tau$  (viz [24]). Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pak odpovídá teplu, které projde za 1 s libovolným kolmým průřezem tyče dlouhé 1 m, je-li mezi jejími konci udržován teplotní rozdíl 1 K (předpokládáme, že teplota klesá rovnoměrně od teplejšího konce ke chladnějšímu). Typické hodnoty součinitele tepelné vodivosti naleznete například v [25], pro orientaci zmiňme, že pro kovy jsou jeho hodnoty o dva řády vyšší než pro vodu a o tři řády vyšší než pro vzduch, který je velmi dobrým tepelným izolantem.

**Poznámka:** V naší úloze se zaměříme spíše na kvalitativní stránku tepelné vodivosti, vztah je tedy uveden zejména jako inspirace pro eventuální samostudium.

**Potřebné měřicí vybavení:** Při měření byla použita dvě bodová teplotní čidla Vernier STS-BTA, dvě rozhraní Vernier Go!Link a program Logger Pro. Alternativně lze užít tyto kombinace:

- počítač s programem Logger Lite + 2× bodové teplotní čidlo Vernier STS-BTA + 2× rozhraní Vernier Go!Link
- rozhraní Vernier LabQuest + 2× bodové teplotní čidlo Vernier STS-BTA

Obě rozhraní Vernier Go!Link lze současně nahradit buď jedním rozhraním LabQuest nebo jedním rozhraním LabQuest Mini.

### **Další pomůcky:**

- Mělká polystyrenová nádobka (v tomto experimentu byla použita nádobka o rozměrech 18 cm×13 cm×2 cm, výřez na obr. 5.39).
- Destičky stejné tloušťky z různých materiálů - sklo, plast, polystyren, kov,... Destičky by měly sloužit jako „víčko“ nádoby, je tedy vhodné je upravit na takový rozměr, aby odpovídaly dvěma větším rozměrům nádoby (v našem případě 18 cm×13 cm, výřez na obr. 5.39).
- Rychlovarná konvice
- Izolepa + nůžky

**O bodovém teplotním čidle Vernier STS-BTA:** Čidlo měří teplotu v rozsahu  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$  s přesností nejhůře  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (při teplotách kolem  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  udává výrobce přesnost  $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Jeho provedení v podobě termistoru zabudovaného do malé měřicí pecičky minimalizuje tepelnou kapacitu čidla a umožňuje měřit teplotu povrchů, což právě v této úloze využijeme.

### **Provedení měření:**

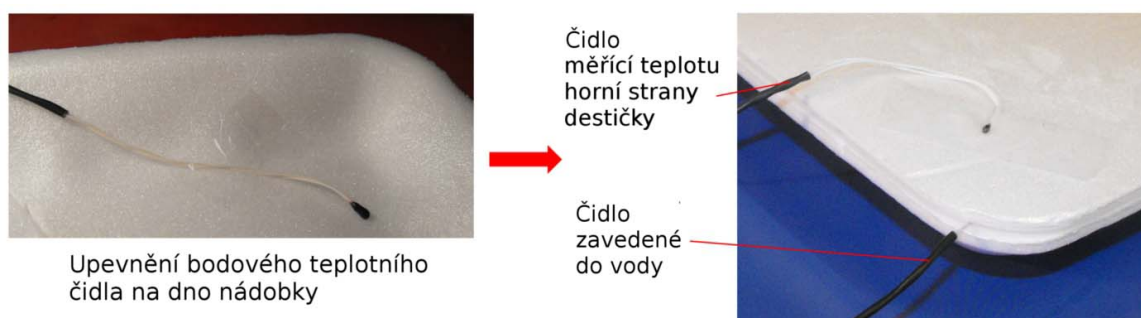
Do polystyrenové nádoby nalejeme horkou vodu a přikryjeme nádobku skleněnou destičkou. Přitom měříme jedním čidlem teplotu vody uvnitř a druhým čidlem teplotu povrchu na vnější straně destičky, obojí po dobu deseti minut. Stejně měření pak zopakujeme pro polystyrenovou destičku. Zajímat nás bude zejména srovnání, v jakém případě se bude voda rychleji ochlazovat, event. jaké budou teplotní rozdíly mezi teplotou vody a teplotou vnější strany destičky.

Zde je postup našeho měření:

**1.** Pomocí dvou rozhraní Vernier Go!Link (nebo jiným výše popsáním způsobem) připojte k počítači dvě bodová teplotní čidla a vyčkejte na automatickou detekci. Úspěšné přihlášení obou čidel poznáte tak, že na svislé ose grafu, který se objeví popisky *Teplota 1* a *Teplota 2*.

2. Klávesovou zkratkou CTRL+D vyvolejte okno *Sběr dat*, nastavte délku měření 600 sekund a ponechte vzorkovací frekvenci 2 Hz. Potvrďte tlačítkem *Hotovo*.

3. Například pomocí izolepy upevněte jedno bodové teplotní čidlo do polystyrenové nádoby tak, aby po zalití vodou mohlo být celé ponořené (obr. 5.39). Druhé čidlo upevněte na tu stranu skleněné destičky, která zůstane při experimentu nahoře. Uspořádání během měření s polystyrenovou destičkou ukazuje obrázek 5.39.



Obrázek 5.39: Umístění teplotních čidel při experimentu

4. Přiveďte vodu v konvici k varu a nalejte ji do polystyrenové nádoby. Rychle přiklopte skleněnou destičku (teploměr zůstává na její horní straně) a současně tlačítkem *Zahájit sběr dat* (obr. 4.3) spusťte měření.

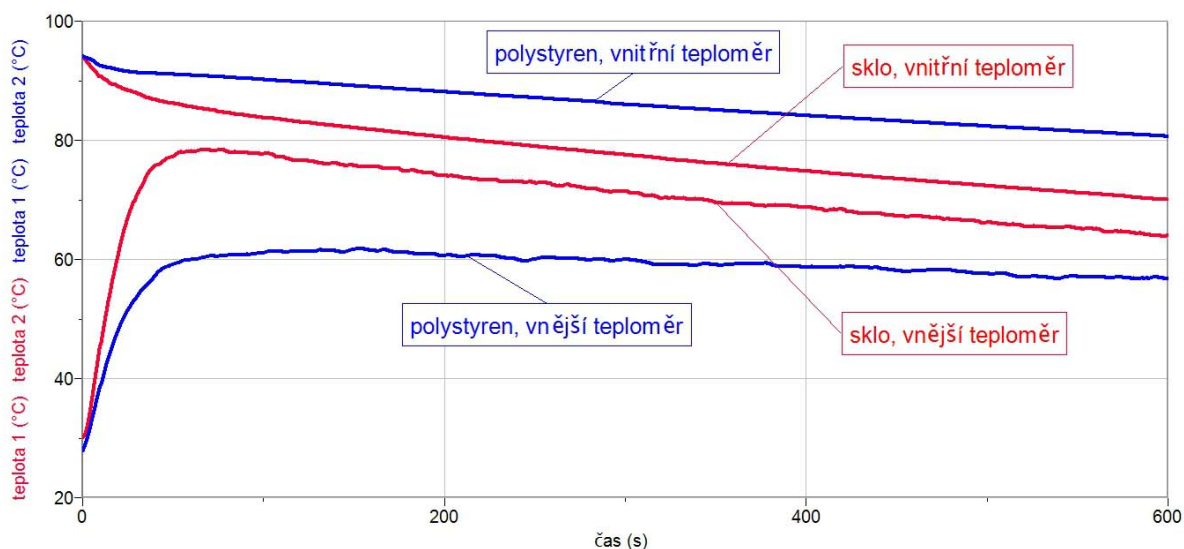
5. Po deseti minutách bez vašeho zásahu se měření automaticky ukončí. Pomocí klávesové zkratky CTRL+L uchovejte měření a použitou vodu vylejte. Čidlo upevněné na dně nádoby ponechte na jeho místě, druhé čidlo přemístěte ze skleněné destičky na polystyrenovou. Znovu ohřejte vodu v konvici, nalijte ji do nádoby, spusťte měření a zakryjte tentokrát polystyrenovou destičkou. Do grafu se začnou vedle dříve naměřených grafů vykreslovat další barevně odlišené závislosti.

6. Po dalších deseti minutách se měření automaticky ukončí. Graf nyní obsahuje celkem čtyři závislosti teploty na čase - dvě pro první a dvě pro druhé měření. Pro větší přehlednost můžete pomocí příkazu *Vložit - Textová poznámka* opatřit grafy stručnými textovými poznámkami. Vzorové závislosti ukazuje obrázek 5.40.

### Zpracovaných naměřených dat:

Kvalitativně vyhodnoťte měření. Na získaných závislostech lze pozorovat dva jevy:

- Pokles teploty je po zakrytí různými materiály různě rychlý.
- Rozdíl mezi teplotou měřenou vnějším a vnitřním teploměrem se pro různé materiály ustálí na různých hodnotách.

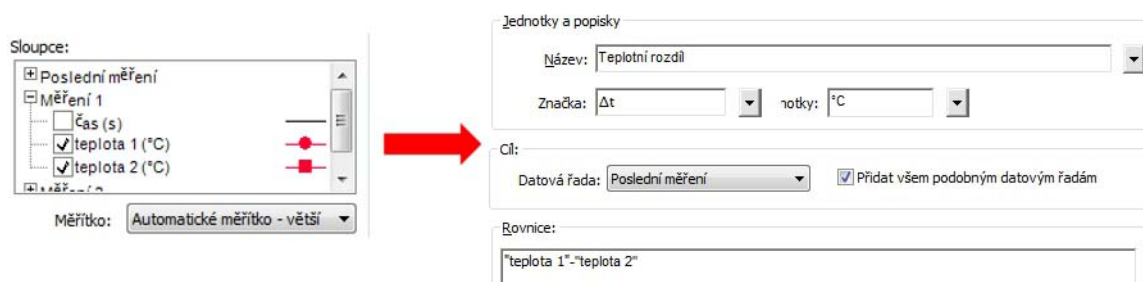


Obrázek 5.40: Vzorově naměřená závislost pro polystyrenovou a skleněnou destičku

Dále tyto jevy rozeberme:

1. Je patrné, že pokles teploty je v případě vnějšího teploměru (umístěného na horní straně destiček) i vnitřního teploměru (ponořeného ve vodě) rychlejší při zakrytí skleněnou destičkou, pomalejší při zakrytí destičkou z polystyrenu. Odpovídá to skutečnosti, že sklo má výrazně lepší tepelnou vodivost a rychleji tedy odvádí teplo do okolí.

2. V případě obou materiálů také došlo po prvních přibližně 3 minutách měření k ustálení teplotního rozdílu mezi měřenými teplotami. Průběh teplotního rozdílu si můžeme znázornit graficky - nejdříve například pro sklo. Aby nám v grafu nepřekážely závislosti naměřené pro polystyren, skryjeme je: Klikněte pravým tlačítkem na plochu grafu, vyberte *Nastavení grafu - Nastavení souřadnicových os* a v okně *Sloupce* nechte zaškrtnuté pouze položky *teplota 1* a *teplota 2* v části *Měření 1* (obr. 5.41); všechny ostatní volby zrušte a potvrďte tlačítkem *Hotovo*.



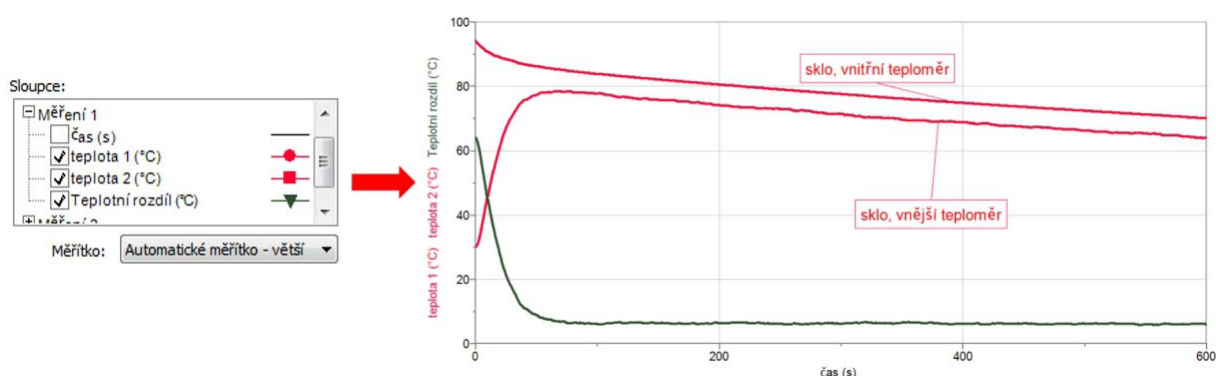
Obrázek 5.41: Skrytí závislosti pro polystyren a dopočítávání nového sloupce



3. Vyberte na hlavním panelu nástroj *Data - Nový dopočítávaný sloupec*, nové okno vyplňte dle obrázku 5.41 (podrobnější informace k vyplňování dopočítávaných sloupců naleznete v návodu „Kam se ztrácí energie“) a potvrďte kliknutím na *Hotovo*. Do tabulky přibude sloupec *Teplotní rozdíl*.

4. Aby se hodnoty z tohoto sloupce zobrazily do grafu, postupujte dle bodu 2 do nabídky *Nastavení souřadnicových os* a v okně *Sloupce* zaškrtněte v části *Měření 1* také položku *Teplotní rozdíl* (obr. 5.42). Do grafu se vykreslí závislost teplotního rozdílu na čase (obr. 5.42). Stejným způsobem můžeme zopakovat pro polystyren.

Ve vzorovém měření se v případě skla ustálil teplotní rozdíl na hodnotě přibližně 6 °C, v případě polystyrenu na hodnotě cca 24 °C. Funkci tepelného izolantu můžeme tedy popsat mj. jako schopnost udržovat velké teplotní rozdíly mezi prostředími, která izolant odděluje.



Obrázek 5.42: Zobrazení závislosti teplotního rozdílu  $\Delta t$  na čase pro sklo

## 5.4.2 Poznámky, otázky a úkoly

### Příprava experimentu

- Jako vhodné polystyrenové nádoby se osvědčily tácky, na kterých se v obchodních řetězcích prodává chlazené maso. V našem případě byla použita nádobka s rozměry 18 cm × 13 cm × 2 cm.
- Destičky by měly být velikostí blízké větším dvěma rozměrům nádoby, přitom by měly být (v rámci chyby měření) stejné tloušťky.
- Polystyrenová destička, použitá ve vzorovém měření, se používá jako tácek pod balené krájené sýry.
- Skleněná destička, použitá ve vzorovém měření, se používá jako krycí sklo v rámečcích na fotografie 18 cm × 13 cm.
- Velký vliv na měření má způsob upevnění teplotního čidla na příslušnou destičku. Pro maximální kontakt měřicí pecičky s povrchem je vhodné použít dva zkřížené pruhy izolepy.

## Během měření

- Při výměně polystyrenové destičky za skleněnou se přesvědčte, že čidlo upevněné na dně nádobky se působením horké vody neodlepí.
- Aby bylo možné hodnoty naměřené jednou pro polystyren a podruhé pro sklo porovnat, je vhodné, aby výchozí teplota vody na začátku měření byla v obou případech co nejbližší. Toho lze docílit rychlým spuštěním měření ihned po nalití horké vody.
- Protože měření se systémem Vernier probíhá automatizovaně, není doba trvání měření ( $2 \times 10$  minut) ztraceným časem - je vhodné tuto dobu vyplnit výkladem či diskusí o tom, jak využíváme různé tepelné vodivosti materiálů v praxi - například v případě tepelných izolantů zmínit zateplování budov v rámci úspory energie (jak z ekonomických, tak z ekologických důvodů).
- Kromě skla a polystyrenu lze samozřejmě použít i další materiály, v případě použití kovu a polystyrenu je naměřený rozdíl ještě markantnější. Pozor pouze v případě kovů na to, že kovové destičky bývají výrazně tenčí než například použitá polystyrenová destička (tloušťka cca 2 mm), takže přirozená úvaha studentů může být taková, že větší množství tepla „propouští“ kovová destička ne proto, že je to vlastnost jejího materiálu, ale pouze proto, že je tenčí.
- U čidla ponořeného do vody zanedbáváme skutečnost, že v různých částech kapaliny (tj. u dna, při hladině...) může být její teplota různá. Opakovaným provedením měření při různých hloubkách ponoření čidla lze výraznější vliv této skutečnosti vyloučit, výsledky měření výrazně více závisí například na upevnění čidla ke krycí destičce.

## Po skončení měření

- Zejména při měření s polystyrenem může být voda v nádobce i po uplynutí deseti minut na konci měření velmi horká, proto s ní i nadále pracujte opatrně!

## Otázky a úkoly pro studenty

1. Snažte se studenty dovést k tomu, aby vlastními slovy shrnuli poznatky získané měřením.  
→ Očekávaná odpověď by měla zahrnovat zjištění, že oddělíme-li dvě prostředí různé teploty tepelným izolantem, bude se teplotní rozdíl nadále udržovat, zatímco bude-li oddělující „překážka“ z materiálu s dobrou tepelnou vodivostí, budou mít teploty tendenci se vyrovnávat.
2. Je toto měření vhodné pro získávání rozumně přesných kvantitativních údajů? Argumentujte.  
→ Aby bylo měření dostatečně přesné, bylo by nutné zabránit tepelným ztrátám, ke kterým dochází na rozhraní nádobky a destiček - okraje nádobky nejsou zcela hladké a na styku s hladkou destičkou vznikají mezery, kterými se do okolí odevzdává teplo. (U skleněné destičky jsou ztráty menší, vlivem její větší hmotnosti destička lépe „přiléhá“.) Stejným způsobem se teplo ztrácí v místě, kde do nádobky vstupuje kabel bodového teplotního čidla.

## 5.5 Podchlazená kapalina

### 5.5.1 Provedení a zpracování měření

**Anotace:** Cílem experimentu je ukázat závislost teploty na čase při tuhnutí penta-hydrátu thiosíranu sodného.

**Klíčové kompetence ([1]):**

*Gymnaziální vzdělávání – Kompetence komunikativní:*

- efektivně využívá moderní informační technologie

**Očekávané výstupy ([1]):**

*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:**

Podchlazená kapalina je kapalina, která existuje v kapalném skupenství i při teplotě nižší než je její teplota tuhnutí (odtud přímo plyne, že tento jev nemohou vykazovat amorfní látky, které přesnou teplotu tuhnutí nemají). Tento stav je metastabilní a při působení rušivých podnětů (otřesy, nečistoty) se zvyšuje pravděpodobnost, že látka spontánně přejde do stabilnějšího stavu, tj. zkrystalizuje do pevného skupenství [26]. Při tomto přechodu se uvolňuje skupenské teplo, které látku ohřeje na její teplotu tuhnutí.

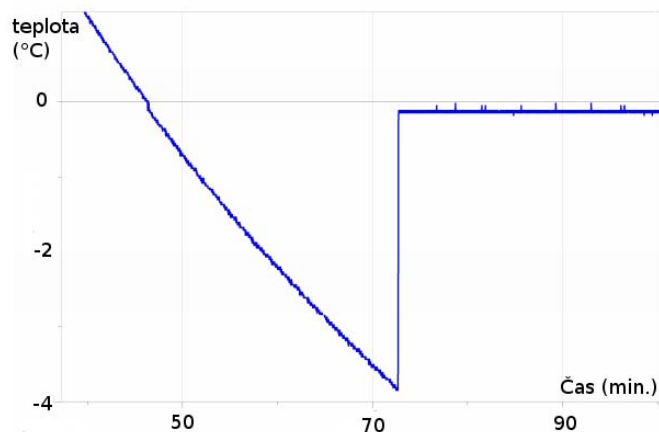
U většiny kapalin, vodu nevyjímaje, je běžně dosahované podchlazení nevýrazné. Přesto právě kapičky vody vyskytující se v mracích existují v kapalném skupenství i při teplotách hluboko (několik desítek stupňů Celsia) pod bodem mrazu [26]. U větších objemů je podchlazení méně hluboké, pouze v jednotkách stupňů. Takové podchlazení ukazuje graf na obr. 5.43 převzatý z práce účastníků Soustředění mladých fyziků a matematiků [27]. Experiment byl proveden s obyčejnou vodou, hlubšího podchlazení by se dalo dosáhnout s vodou destilovanou. Pro účely našeho měření použijeme namísto vody pentahydrát thiosíranu sodného, u něhož je podchlazení podstatně výraznější.

Další rozdíl oproti vodě je kvalitativní - necháme-li rozehřátý thiosíran přirozeně chladnout pod teplotu tuhnutí, nebývá návrat na tuto teplotu tak prudký a rychlý jako v případě vody. Zatímco z obrázku 5.43 je patrné, že voda se ohřála o 4 °C v řádu maximálně jednotek sekund, u thiosíranu může tento proces trvat i několik minut, není-li uměle urychlen například vhozením krystalu pevného thiosíranu.

**Potřebné měřicí vybavení:** Návod byl zpracován s čidlem teploty Vernier Go!Temp a programem Logger Pro. Alternativně lze užít tyto kombinace:

- místo programu Logger Pro program Logger Lite či rozhraní Vernier LabQuest
- místo čidla Go!Temp teplotní čidlo Vernier TMP-BTA s rozhraním Vernier Go!Link

Namísto rozhraní Go!Link lze vždy použít rozhraní LabQuest nebo LabQuest Mini.



Obrázek 5.43: Podchlazení vody o cca 4 °C.

**Další pomůcky:** pentahydrát thiosíranu sodného ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , dále často už je „thiosíran“; běžně dostupná chemikálie, orientační cena 100 Kč/kg, např. společnosti FICHEMA, Lach-Ner), laboratorní váhy, laboratorní stojan, tyčinka, lihový nebo plynový kahan, trojnožka, chemická síťka, dvě kádinky různých velikostí (cca 50 ml a 200 ml)

**O teplotním čidle Vernier Go!Temp:** Odolné čidlo se připojuje pomocí USB portu přímo k počítači a umožňuje měřit v teplotním rozsahu  $-20\text{ °C}$  až  $110\text{ °C}$ . Přesnost měření je nejhůře  $\pm 0,5\text{ °C}$ . Vzhledem k chemické odolnosti ocelového těla umožňuje čidlo i měření teploty silně koncentrovaných kyselin a zásad.

### **Provedení měření:**

Pomocí teplotního čidla proměříme vývoj teploty při tuhnutí roztaveného pentahydrátu thiosíranu sodného. (Experiment je inspirován podobným měřením v [28].)

1. Pomocí USB rozhraní připojte k počítači teplotní čidlo Vernier Go!Temp a vyčkejte na jeho automatickou detekci.
2. Klávesovou zkratkou CTRL+D vyvolejte okno *Sběr dat*, nastavte délku měření 1800 sekund a ponechte vzorkovací frekvenci 2 Hz. Potvrďte tlačítkem *Hotovo*.
3. Nyní odvažte na laboratorních vahách přibližně 20 g thiosíranu a nasypete jej do menší kádinky. Uspořádejte měření podle obrázku 5.44 - malá kádinka s pentahydrátem je umístěna do kahanem zahříváné vodní lázně a je do ní zavedeno teplotní čidlo Go!Temp.
4. Ve vodní lázni nechte v malé kádince roztavit pevný pentahydrát thiosíranu sodného. Jeho teplota tání je při normálním atmosférickém tlaku  $48,3\text{ °C}$  (viz [29]).



Obrázek 5.44: Vážení pentahydrátu thiosíranu sodného, uspořádání při měření

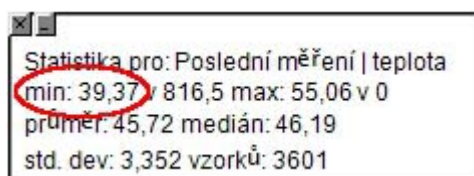
5. Je-li veškerý pevný thiosíran roztavený, ukončete zahřívání. Vodní lázeň bude ještě chvíli kapalným thiosíranem zahřívát, proto vyčkejte, až se jeho teplota začne postupně samovolně snižovat. Při poklesu teploty na přibližně  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  spusťte tlačítkem *Zahájit sběr dat* měření.

6. Teplota postupně klesne pod teplotu tuhnutí thiosíranu, přestože ten zůstává stále kapalným. Prvním signálem tvorby krystalků pevného skupenství (obr. 5.46) je náhlý vzestup teploty v malé kádince. Tento vzestup je různě strmý (v závislosti na čistotě thiosíranu, čistotě zkumavky apod.), chcete-li jej urychlit, vhodte při prvních příznacích tuhnutí do malé kádinky několik krystalků pevného thiosíranu.

7. Po uplynutí nastaveného času se měření automaticky ukončí. Chcete-li při zobrazení grafu optimálně využít plochy obrazovky, klikněte na hlavním panelu na ikonu *Automatické měřítko*. Vzorová závislost byla naměřena bez vhození krystalků pevného thiosíranu a můžete si ji prohlédnout na obr. 5.47.

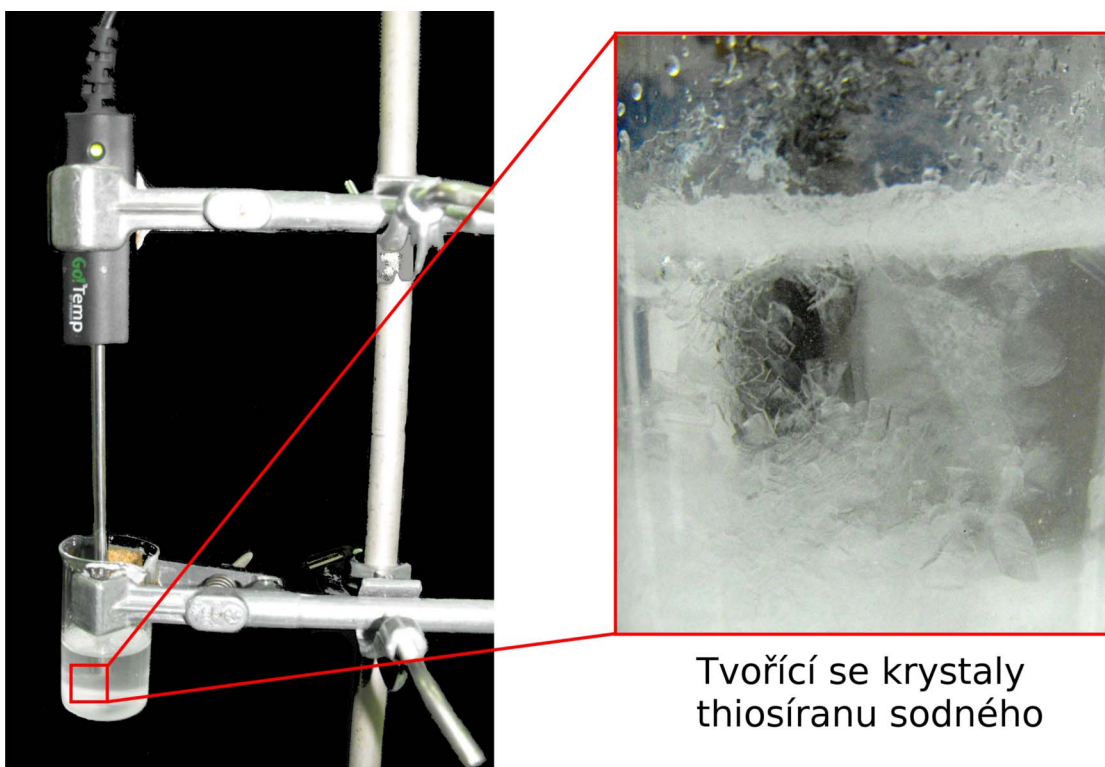
### Zpracovaných naměřených dat:

1. Přirozeným výstupem měření je zjistit teplotu, na kterou se podařilo thiosíran podchladiť. K tomu využijeme nástroj *Statistika* na hlavním panelu (obr. 4.3).

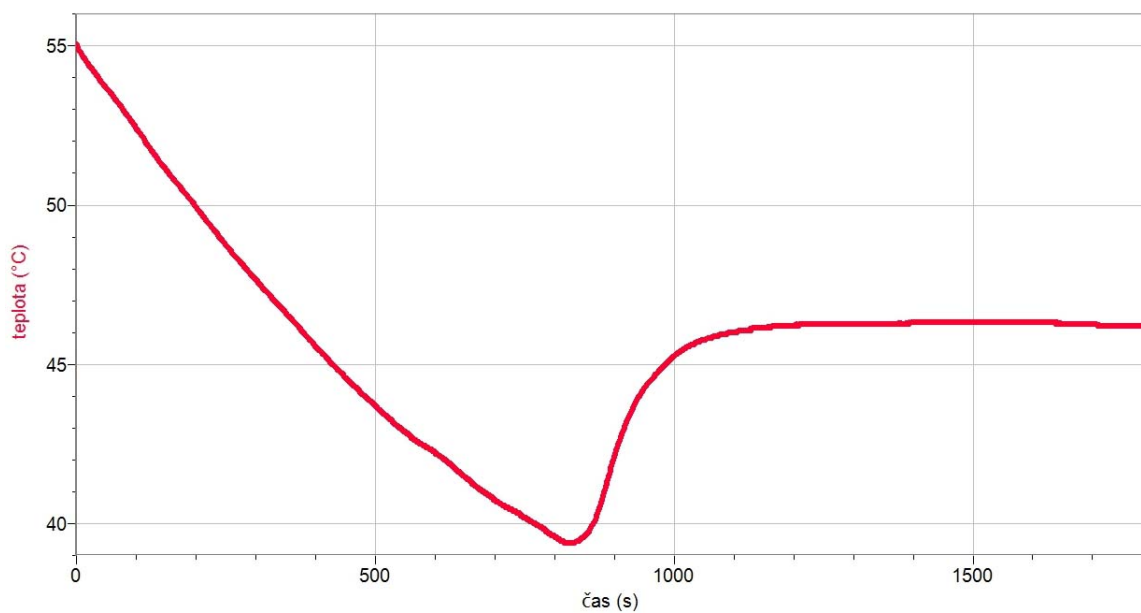


Po kliknutí na jeho ikonu se objeví okénko se základními statistickými údaji z měření (obr. 5.45), zajímá nás minimum. V případě vzorového měření byla minimální dosažená teplota  $39,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Obrázek 5.45: Min. teplota:  $39,4\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obrázek 5.46: Samovolné chladnutí thiosíranu, vznikající krystalky



Obrázek 5.47: Ukázka naměřené závislosti

2. Stejně tak můžeme odečíst teplotu, kterou dosáhla látka po krystalizaci - vyberte na hlavním panelu nástroj *Odečít hodnot* a najedte kurzorem na příslušnou teplotu. V novém okénku vlevo nahoře odečtete hodnotu.

## 5.5.2 Poznámky, otázky a úkoly

### Příprava experimentu

- Je vhodné použít při měření skutečně čisté kádinky.

### Během měření

- Dosažená hloubka podchlazení thiosíranu velice závisí na jeho čistotě a také na čistotě kádinky, event. samotného teplotního čidla. Libovolné nečistoty mohou sloužit jako krystalizační jádra a vliv podchlazení tak výrazně snížit. Pravdou ale je, že pro pentyhydrát thiosíranu sodného je tento jev tak silný, že měřitelné podchlazení zaznamenáte i za ne zcela ideálních podmínek.
- Klesá-li teplota pod 30 °C a látka stále nejeví známky tuhnutí, je vhodné přibližně 5 minut před nastaveným koncem měření tuhnutí uměle iniciovat vhozením krystalků pevného thiosíranu. V opačném případě by čas nastavený na vodorovné ose nemusel stačit k tomu, abychom děj, který chceme zkoumat, zaznamenali. (Nechcete-li být nastavenou dobou měření vázání, můžete v okně *Sběr dat* zaškrtnout možnost *Nepřerušovaný sběr dat*, která vám umožní měřit bez pevně nastavené doby měření až do chvíle, kdy měření sami ukončíte. Stále jste ale limitováni délkou vyučovací hodiny.)

### Po skončení měření

- Po skončení měření zůstává v malé kádince ztuhlý pevný thiosíran. Vzhledem k jeho poměrně nízké teplotě tuhnutí stačí takovou zkumavku vymýt horkou vodou z kohoutku a vylít do umyvadla. Stejně tak lze kádinku znovu zahřát, nicméně jednou použitý thiosíran se již pro další měření ukázal jako bezcenný - ani při vyšších teplotách z něj po roztavení nevymizela pevná „vlákna“, představující výrazné nehomogenity.

### Otázky a úkoly pro studenty

1. Určete minimální teplotu, na kterou se vám podařilo thiosíran podchládit.  
⇒ Viz část *Zpracování naměřených dat*.
2. Určete teplotu tuhnutí použitého vzorku thiosíranu.  
⇒ Viz část *Zpracování naměřených dat*, získaná hodnota 46,3 °C je o dva stupně nižší než tabulkový údaj. Tento poměrně výrazný rozdíl vedl k opakovanému proměření závislosti a těmto závěrům:

- Při iniciaci krystalizace vhozením krystalku pevného thiosíranu teplota látky za 10 až 15 sekund vystoupila vždy na přibližně 48 °C, tedy na teplotu, jež se v rámci chyby shoduje s udávanou teplotou tuhnutí použitého penta hydrátu.
- Bez iniciace krystalkem pevného thiosíranu (tj. i v případě vzorově naměřené závislosti) docházelo k růstu teploty velmi pozvolna, řádově několik minut; v některých částech zkumavky se již vytvořila pevná fáze, v jiných zůstávala látka dlouho kapalná. Z devíti provedených měření teplota nikdy nevystoupila nad 46,5 °C, pouze dvakrát se dostala nad hranici 46 °C, jedenkrát zůstala dokonce pod hranicí 42 °C. Tyto průběhy tedy neodpovídají ději velmi rychlé krystalizace, jak ji popisují učebnice, látka uvolňuje skupenské teplo tuhnutí pozvolna. Toto teplo je pak okamžitě odebráno okolním vzduchem, proto teplota látky nikdy nevystoupí na očekávaných 48,3 °C. Ve vzorovém měření navíc vidíme, že ani po dosažení zmíněné teploty 46,3 °C nedochází k jejímu poklesu, který bychom očekávali v důsledku tepelné výměny s chladnějším okolím - látka musí tedy i nadále uvolňovat skupenské teplo tuhnutí, které ochlazování brání.

Tato práce si dala za cíl popsat způsob, jak podchlazení kapaliny předvést a didakticky využít, vysvětlení skutečnosti, že látka se chová při „rychlé“ krystalizaci jinak než při krystalizaci „pomalé“, přesahuje její rozsah.

3. Lze na základě naměřené závislosti rozhodnout, zda byl na konci měření (tj. v čase 30 minut) veškerý kapalný thiosíran přeměněn na pevnou látku?

⇒ Tuto otázku lze samozřejmě použít pouze tehdy, má-li závěr naměřené závislosti charakter závěru grafu na obr. 5.47. Přihlédneme-li k odpovědi na předcházející otázku, lze v takovém případě velmi spolehlivě tvrdit, že nějaká část thiosíranu ještě zůstala i po třiceti minutách měření kapalná a její tuhnutí doprovázené odevzdáváním skupenského tepla způsobuje udržování teploty na hodnotách kolem 46 °C. Kdyby tomu tak nebylo, začala by látka poměrně rychle chladnout (v duchu poklesu během prvních přibližně 13 minut měření).

4. Znáte nějaké praktické využití podchlazených kapalin?

⇒ Hřejivé polštářky, jejichž přikládání na tělo má zklidňující a uvolňující účinky zejména při bolestech hlavy, krku a šíjového svalstva, jsou naplněny octanem sodným, který má teplotu tání 58 °C. Díky výraznému podchlazení je ale tato látka i za pokojové teploty kapalinou. Polštářky obsahují ohebný plíšek, jehož deformace vyvolá rychlou krystalizaci, uvolnění skupenského tepla tuhnutí a zahřátí polštářku na teplotu 58 °C. Polštářky lze opakovaně používat, opětovné zkapalnění octanu lehce zařídíte ponořením polštářku do horké vody.



## 5.6 Tuhnutí vody

### 5.6.1 Provedení a zpracování měření

**Anotace:** Cílem experimentu je ukázat závislost teploty na čase při ochlazování a tuhnutí vody v mrazničce.

**Klíčové kompetence ([1]):**

*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 ([1]):**

*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:

Předmětem našeho zkoumání bude děj, při kterém budeme látce - v tomto případě vodě - odebírat teplo. (Analogicky bychom mohli popisovat děj, při kterém by se teplo dodávalo.) Obecně lze průběh takového děje rozdělit do dvou fází:

1. **Nedochází ke změně skupenství.** Látka odevzdává svému okolí teplo  $Q$ , které lze vypočítat jako:

$$Q = cm\Delta t, \quad (5.22)$$

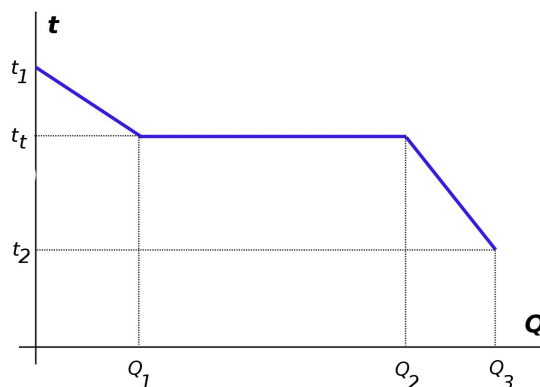
kde  $m$  je hmotnost ochlazované látky,  $\Delta t$  pokles teploty a  $c$  **měrná tepelná kapacita**, materiálová konstanta vyjadřující „ochotu“ látek přijímat či odevzdávat teplo. Pro vodu je hodnota měrné tepelné kapacity (při 25 °C) rovna  $c_1 = 4180 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  - abychom ochladili jeden kilogram vody o jeden kelvin, musíme mu odebrat teplo 4180 J. Měrná tepelná kapacita mírně závisí na teplotě, v našem rozmezí teplot ji ale lze považovat za konstantu. Měrná tepelná kapacita není vlastností chemického složení, ale struktury látky - led má stejné chemické složení jako voda, ale jeho měrná tepelná kapacita je  $c_2 = 2090 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

2. **Dochází ke změně skupenství.** Dochází-li ke změně skupenství, teplota látky se ustálí na teplotě skupenského přechodu (v našem případě na teplotě tuhnutí) a veškeré teplo  $L_t$ , které látce odebíráme, pochází z přeměn chemických vazeb, které nemění teplotu látky. Toto teplo se nazývá skupenské teplo tuhnutí a určíme jej jako:

$$L_t = ml_t \quad (5.23)$$

kde  $m$  je hmotnost tuhnoucí látky a  $l_t$  **měrné skupenské teplo tuhnutí**, materiálová konstanta. Pro skupenskou přeměnu voda-led je hodnota měrného skupenského tepla tuhnutí rovna  $l_t = 334\,000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$  - abychom 1 kg vody o teplotě  $0\text{ °C}$  přeměnili na led o téže teplotě, musíme mu odebrat teplo 334 kJ.

Graf na obrázku 5.48 ukazuje závislost teploty na odebíraném teple pro látku s teplotou tuhnutí  $t_t$ . Během odebírání tepla  $Q_1$  dochází k postupnému ochlazení kapaliny na teplotu tuhnutí, teplo  $Q_2 - Q_1$ , odebrané při změně skupenství, je rovno skupenskému teplu tuhnutí  $L_t$ . Další odebírání tepla způsobuje ochlazení nyní již pevné látky.



Obrázek 5.48: Průběh teploty - odebírání tepla  $Q$

**Potřebné měřicí vybavení:** Návod byl zpracován s bodovým teplotním čidlem Vernier STS-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 coby samostatný měřicí nástroj
- pro připojení k počítači lze namísto rozhraní Go!Link vždy použít rozhraní LabQuest nebo LabQuest Mini

**Další pomůcky:** laboratorní váhy, polystyrenová podložka, víčko od PET lahve, izolepa

**O bodovém teplotním čidle Vernier STS-BTA:** Čidlo měří teplotu v rozsahu  $-25\text{ °C}$  až  $125\text{ °C}$  s přesností nejhůře  $\pm 0,5\text{ °C}$  (při teplotách kolem  $0\text{ °C}$  udává výrobce přesnost  $\pm 0,2\text{ °C}$ ). Jeho provedení v podobě termistoru zabudovaného do malé měřicí pecičky minimalizuje tepelnou kapacitu čidla.

### **Provedení měření:**

1. Pomocí rozhraní Vernier Go!Link připojte k počítači bodové teplotní čidlo Vernier STS-BTA a vyčkejte na jeho automatickou detekci.

2. Klávesovou zkratkou CTRL+D vyvolejte okno *Sběr dat*, nastavte délku měření 90 minut a vzorkovací frekvenci 1 Hz. Potvrďte tlačítkem *Hotovo*.

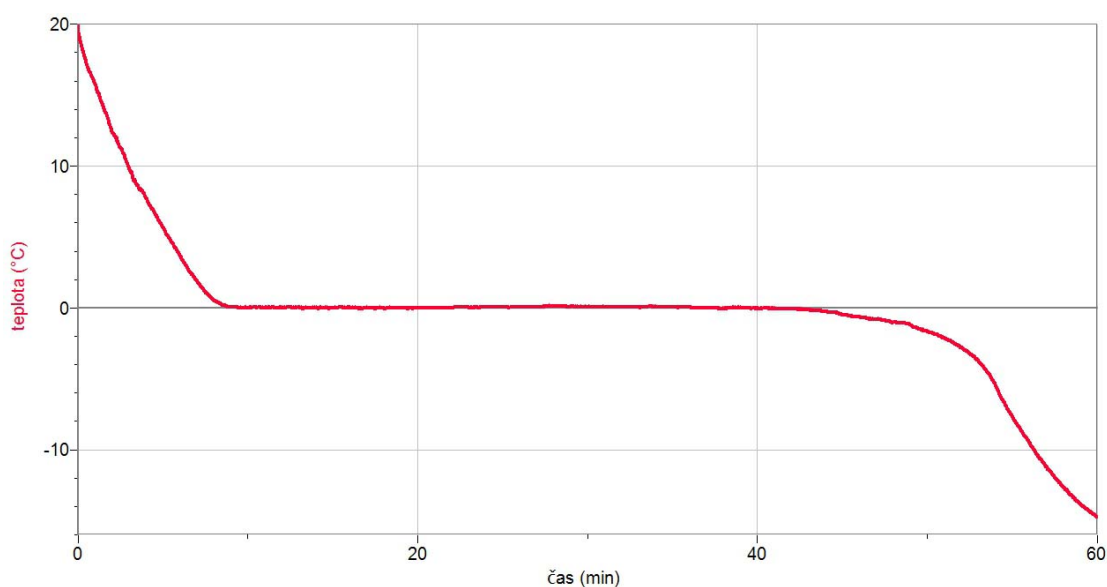
3. Nyní položte na laboratorní váhy víčko od PET lahve, vynulujte váhy a nalijte do víčka vodu asi do tří čtvrtin jeho výšky. Zapište si naměřenou hmotnost vody. Typické hodnoty se budou pohybovat mezi 3 až 4 gramy, jsou-li nižší, můžete přenastavit dobu měření na pouhých 60 minut.

4. Umístěte víčko na polystyrenovou podložku a zaveďte do něj bodové teplotní čidlo tak, aby se nedotýkalo dna ani stěn víčka (obr. 5.49). Je vhodné kabel čidla přilepit izolepou k polystyrenové podložce, čímž se jeho poloha ve vodě zafixuje.



Obrázek 5.49: Vážení vody ve víčku, zavedení teplotního čidla do vody

5. Vložte podložku s víčkem i teploměrem do mrazničky, tlačítkem *Zahájit sběr dat* (obr. 4.3) spusťte měření a přivřete mrazničku. Po uplynutí nastavené doby měření se záznam dat automaticky ukončí, vzorově naměřenou závislost ukazuje obrázek 5.50.



Obrázek 5.50: Vzorová závislost teploty na čase, doba měření: 60 minut

## Zpracování naměřených dat:

Pokusíme se odpovědět na otázku, zda lze z naměřené závislosti nějak vyčíst vztah mezi měrnou tepelnou kapacitou vody a měrným skupenským teplem tuhnutí skupenské přeměny voda-led. Provedeme některé zjednodušující předpoklady, které nám dovolí pomocí jedné z těchto veličin odhadnout druhou, byť o přesný kvantitativní popis se rozhodně nejedná - spíše než v dopočtení číselného výsledku tkví přínos úlohy v některých úvahách.

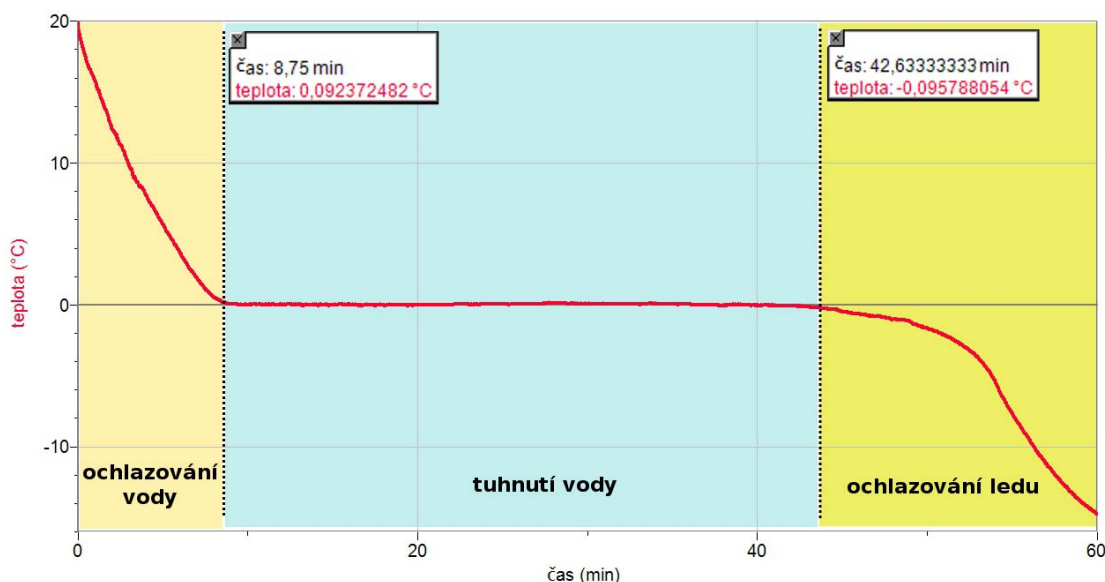
### 1. Rozdělte závislost na tři části:

- ochlazování vody
- tuhnutí vody
- ochlazování ledu

2. Odhadněte časové údaje, které tyto tři části zhruba oddělují, a označte je  $\tau_1$  a  $\tau_2$ . Rozdělení ukazuje obrázek 5.51 (použitá grafická úprava není v možnostech programu Logger Pro). V případě vzorového měření je  $\tau_1 = 8,8$  min a  $\tau_2 = 42,6$  min. Zaměříme se nyní na první dvě části závislosti (tj. od počátku měření do času  $\tau_2$ ).

Poloha časové značky  $\tau_2$  je do značné míry diskutabilní - voda mění své skupenství postupně (nikoliv v celém objemu naráz), některé části vzniklého ledu se tedy mohou začít prochlazovat dříve, než kapalina v celém svém objemu ztuhne (záleží tedy na konkrétním umístění teplotního čidla v kapalině).

Dle [30] lze pro tuhnutí malých objemů vody z vývoje teplotní závislosti určit okamžik úplného ztuhnutí celého objemu kapaliny podle polohy inflexního bodu na teplotní závislosti. To by náš údaj časový údaj  $\tau_2$  posunulo na cca 55 minut. Uvedený způsob však dle autora [30] platí pro objemy menší než 1 ml, zatímco v našem vzorovém měření jsme pracovali s objemem trojnásobným.



Obrázek 5.51: Průběh ochlazování a tuhnutí vody (resp. ledu)

**3.** Provedme nyní tento předpoklad: Látce je za stejné časové úseky odebráno stejné teplo, mraznička tedy pracuje s konstantním průměrným výkonem. Řečeno jiným způsobem - předpokládáme, že ochlazování vody na teplotu tuhnutí je rovnoměrné, tedy závislost teploty na čase lineární.

Při pohledu na graf výsledné závislosti na obr. 5.51 je patrné, že při teplotách nad cca 5 °C je grafem závislosti teploty na čase skutečně přibližně přímka; s tím, jak teplota klesá k teplotě tuhnutí, se její tvar od lineárního průběhu více odchyľuje. Rychlost ochlazování při tepelné výměně totiž závisí na teplotním rozdílu mezi teplejším a chladnějším tělesem, který se během celého děje zmenšuje. O tom svědčí i argument, který může bystrý student použít proti našemu předpokladu - podle něj by se led měl po svém vzniku začít ochlazovat dvojnásobně rychleji než předtím voda, neboť má poloviční měrnou tepelnou kapacitu, přesto měření ukázalo, že tomu tak není.

Dále může předpoklad rovnoměrného chladnutí narušovat fakt, že mraznička během svého chodu „vypíná“ a „zapíná“ (více viz [31]), proto povede naše úvaha pouze k odhadu pro jakousi průměrnou hodnotu výkonu, která cyklus mrazničky zahrnuje.

Cítíme tedy, že náš předpoklad je poměrně odvážný.

**4.** Za výše uvedeného předpokladu lze výkon během ochlazování kapaliny vyjádřit jako:

$$P_1 = \frac{Q}{\tau_1} = \frac{cm\Delta t}{\tau_1}, \quad (5.24)$$

kde  $c$  je měrná tepelná kapacita vody,  $m$  její hmotnost a  $\Delta t$  pokles teploty během času  $\tau_1$ . Stejně jak lze vyjádřit výkon v průběhu skupenské přeměny:

$$P_2 = \frac{L_t}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{ml_t}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (5.25)$$

kde  $l_t$  je měrné skupenské teplo tuhnutí přeměny voda-led a  $m$  hmotnost látky.

**5.** Z bodu 3 plyne  $P_1 \approx P_2$ . Po dosazení z rovnic 5.24 a 5.25 a úpravě dostáváme:

$$\frac{c\Delta t}{\tau_1} \approx \frac{l_t}{\tau_2 - \tau_1} \quad (5.26)$$

Známe-li tedy teplotní rozdíl  $\Delta t$ , časy  $\tau_1$  a  $\tau_2$  a jednu z tepelných materiálových konstant, můžeme druhou konstantu odhadnout. Např. pro měrnou tepelnou kapacitu platí:

$$c \approx \frac{l_t \tau_1}{(\tau_2 - \tau_1) \Delta t} \quad (5.27)$$

**6.** Hodnoty naměřené ve vzorové závislosti dosadíme do rovnice 5.27 (z grafu určíme hodnotu  $\Delta t \doteq 20$  °C):

$$c \doteq \frac{334\,000 \cdot 8}{(42,6 - 8,8) \cdot 20} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \doteq 4300 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.28)$$

Od tabulkové hodnoty  $4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  se tedy odchyľujeme o přibližně 3% tabulkové hodnoty. Známe-li naopak hodnotu měrné tepelné kapacity vody, lze z rovnice 5.26 dopočítat měrné skupenské teplo tuhnutí.

## 5.6.2 Poznámky, otázky a úkoly

### Příprava experimentu

- Zafixujte čidlo tak, aby se nedotýkalo stěn ani dna víčka.
- Vzhledem k délce měření je vhodné nechat měření probíhat například na pozadí dvouhodinové laboratorní práce či jiné činnosti, která tématu skupenských přeměn předchází. Na závěr takové hodiny (či dvouhodinovky) můžete žákům naměřenou závislost předvést a motivovat tak hodinu příští.

### Během měření

- Kabel bodového teplotního čidla je dostatečně tenký, aby bylo možné mrazničku zcela přivřít.
- Pozor! Upozorněte studenty, že naměřená závislost má jiný fyzikální význam než v učebnicích obvykle znázorňovaná závislost teploty látky na přijatém či odevzdaném teple! V našem případě nevynášíme na vodorovnou osu teplo, ale čas.

### Po skončení měření

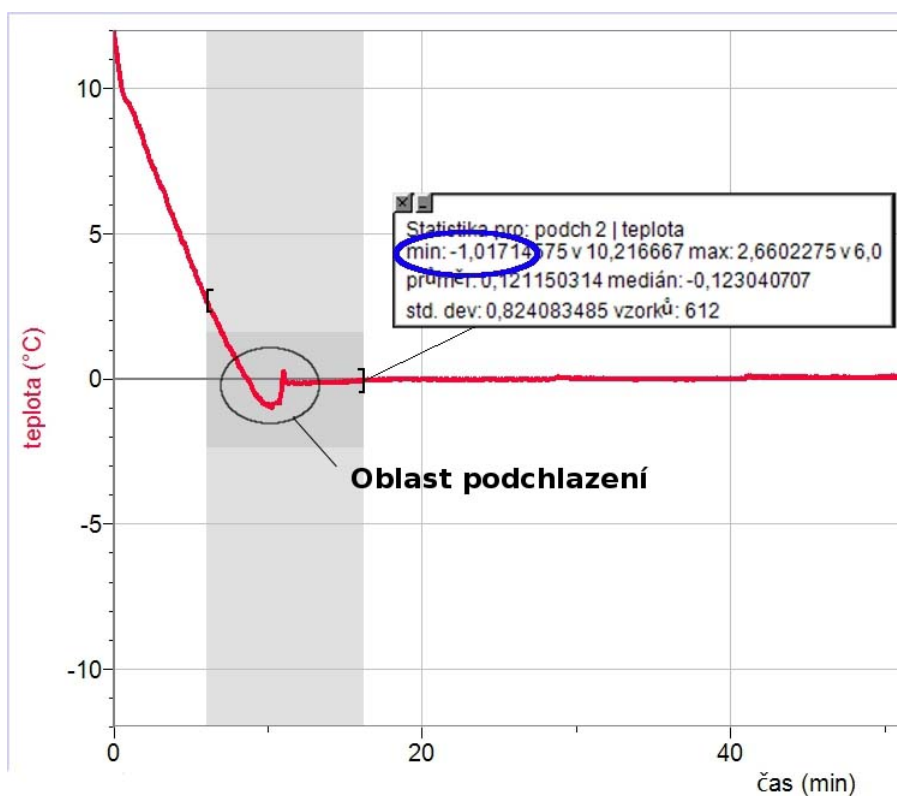
- Omývejte vzniklý led proudem teplé vody, dokud se zcela nerozpustí. V žádném případě se nepokoušejte vyjmout měřicí pecičku čidla přímo z ledu, mohla by se odtrhnout!!
- V části *Zpracování naměřených dat* jsme se odhadem měrné tepelné kapacity vody ze vzorového měření přiblížili tabulkové hodnotě této veličiny s nepřesností několika málo procent. Ze série zkušebně provedených měření vyplynulo, že typicky tato nepřesnost není větší než 20 %.

### Otázky a úkoly pro studenty

1. Vlastními slovy interpretujte fyzikální význam měrné tepelné kapacity a měrného skupenského tepla tuhnutí.  
→ Viz část *Teoretický úvod*.
2. Pokuste se pomocí měrné tepelné kapacity vody odhadnout měrné skupenské teplo tuhnutí přeměny voda-led (nebo naopak).  
→ Viz část *Zpracování naměřených dat*.
3. Jakých zanedbání a idealizací se při tomto odhadu dopoušíme? Kriticky rozeberte náš předpoklad o konstantním průměrném výkonu.  
→ Předpoklad rovnoměrného výkonu chlazení je rozebrán v části *Zpracování naměřených dat*. Kromě již zmíněných nepřesností navíc po celou dobu měření zanedbáváme vliv plastového víčka - v jeho případě nedochází ke změně skupenství, víčko se tedy prochlazuje na teplotu v mrazničce a také odnímá vodě teplo.

### 5.6.3 Rozšíření úlohy: Podchlazení vody

1. Práce s malým objemem vody zvyšuje šanci, se během ochlazování vody klesne její teplota krátkodobě pod teplotu tuhnutí  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , aniž by došlo ke změně skupenství. Tento metastabilní stav označujeme jako podchlazení a podrobněji se jím zabývá úloha *Podchlazená kapalina*. Pro ilustraci je přiložen obrázek 5.52, na kterém byla pomocí nástroje *Statistika* na hlavním panelu (obr. 4.3) určena teplota nejhlubšího podchlazení vody jako přibližně  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Obrázek 5.52: Podchlazení vody o cca  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$

## 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  $\Phi$**  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:

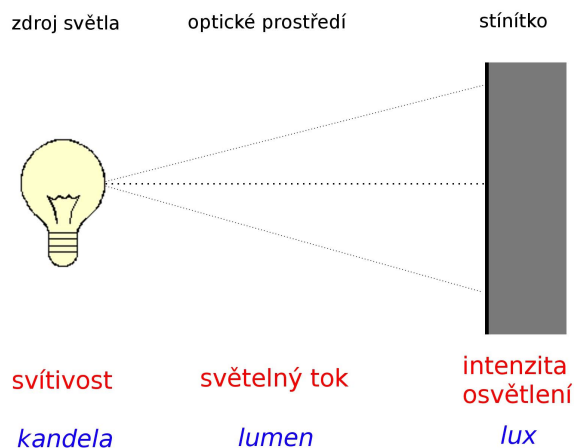
$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}, \quad (5.29)$$

kde  $\Delta\Phi$  je část světelného toku dopadající na plochu o obsahu  $\Delta S$ . 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  $\alpha$  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.

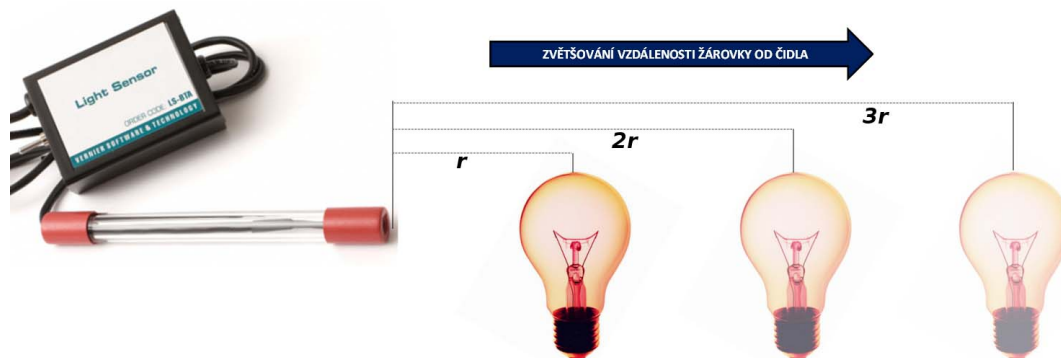


Obrázek 5.54: Přepínač rozsahů

**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:**

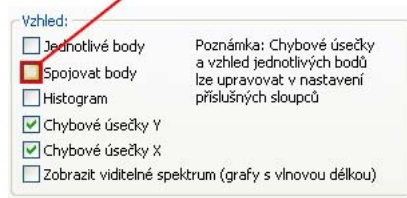
Měření probíhá tak, že do programu Logger Pro manuálně zadáváme aktuální vzdálenost světelného čidla od žárovky a čidlo k této zadané hodnotě přiřadí aktuálně měřenou hodnotu intenzity osvětlení (ilustrace na obr. 5.55). Zde je postup našeho měření:



Obrázek 5.55: Schématicky znázorněný postup při experimentu

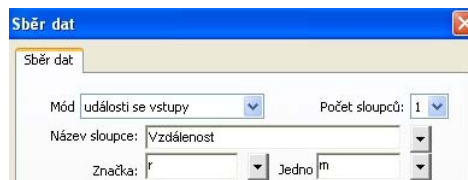
1. Pomocí rozhraní Vernier Go!Link připojte k počítači světelné čidlo Vernier LS-BTA a vyčkejte na jeho automatickou detekci. Na plochu grafu, který se objeví, klikněte pravým tlačítkem myši, vyberte *Nastavení grafu* a v novém okně zrušte zaškrtnutí položky *Spojovat body*. Potvrďte OK.

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.



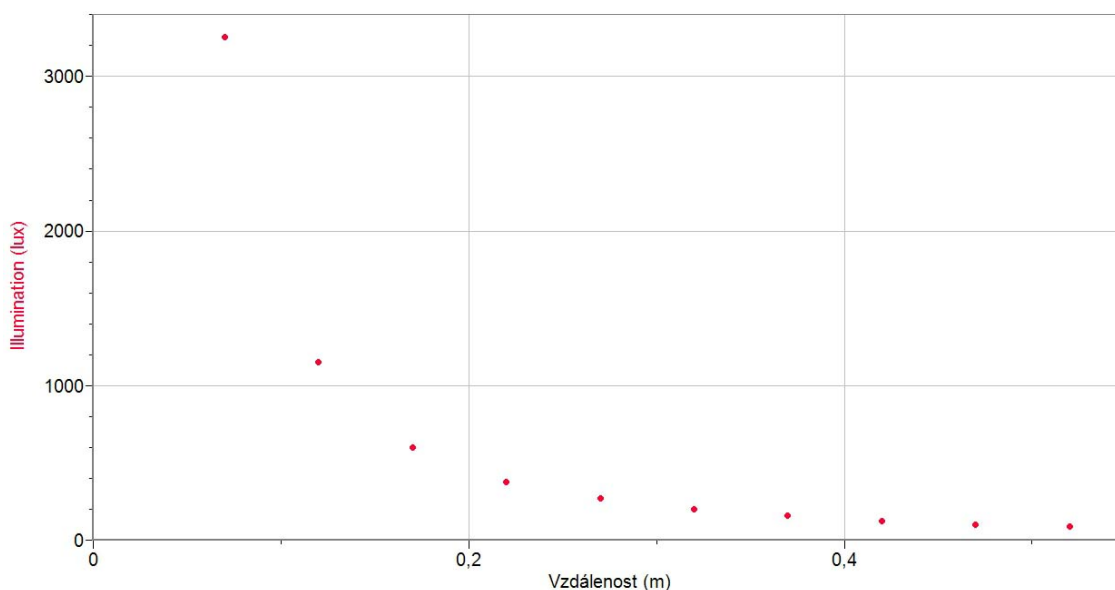
Obrázek 5.59: Zadávání hodnot

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

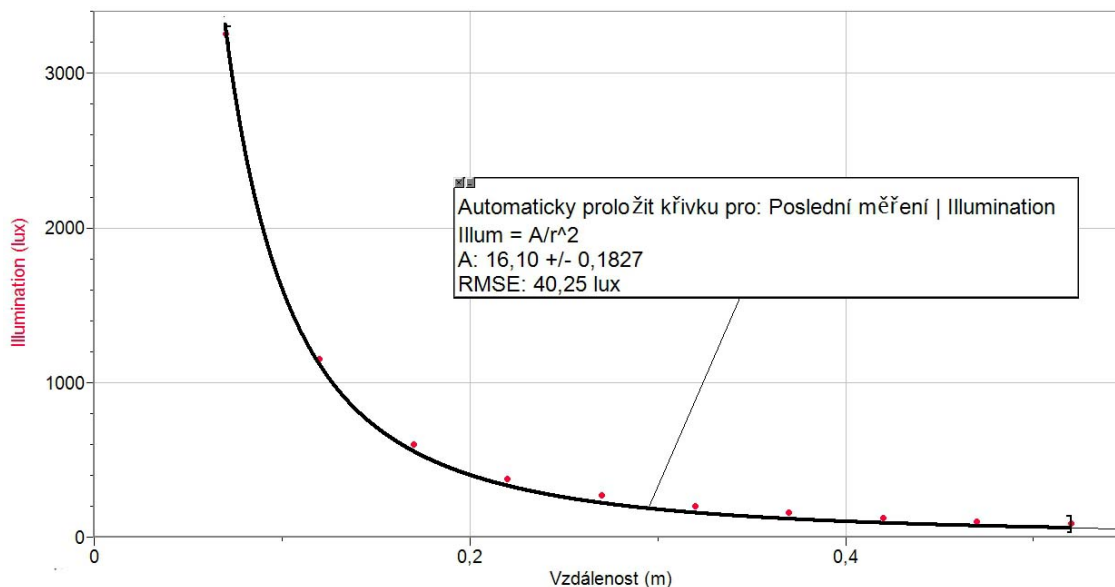
Svítivost odtud určíme tak, že naměřenými body proložíme vhodnou křivku popsanou funkcí  $E = E(r)$ . Ze vztahu 5.31 plyne, že vhodnou funkcí je funkce typu  $\sim \frac{\text{konst.}}{r^2}$ . K proložení využijeme nástrojů programu Logger Pro, který konstantu v čitateli automaticky označí písmenem 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

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 měřicí 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 měřicí 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  $\alpha$  ze vztahu 5.30.

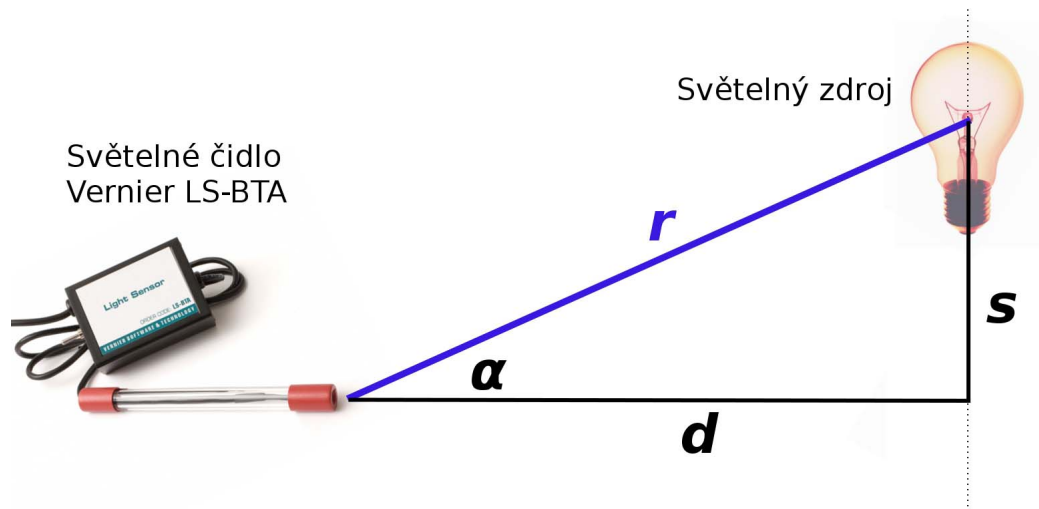
2. Pojdme situaci výše popsat matematicky. Pro konkrétní vzájemnou polohu zafixovaného čidla a světelného zdroje platí (viz obr. 5.64):

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

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



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:

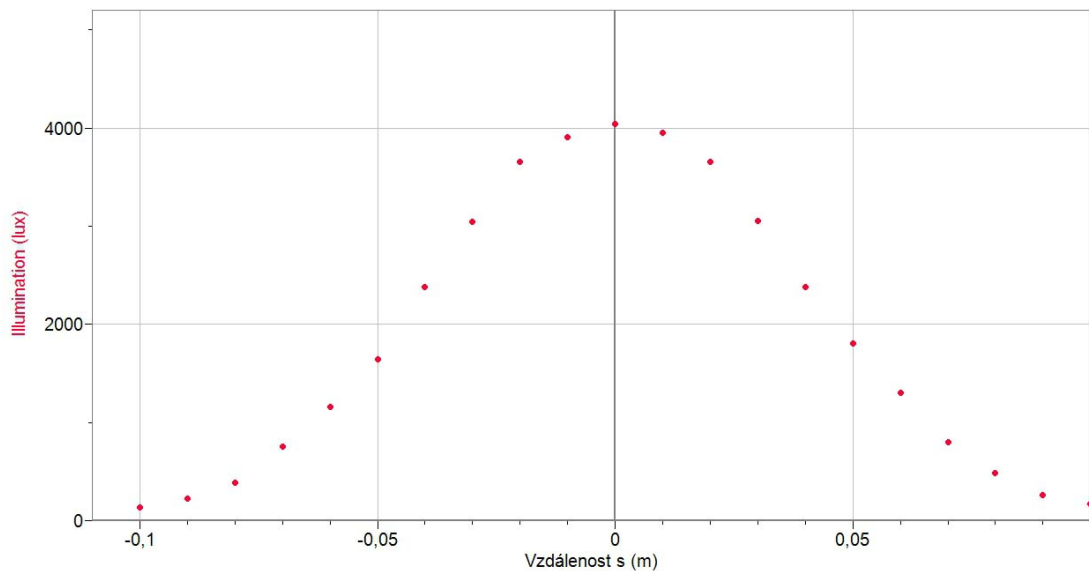
- Proměnnou vzdálenost neznačíme  $r$ , ale  $s$ .
- Vodorovnou osu stačí škálovat do vzdálenosti 0,1 m.

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.

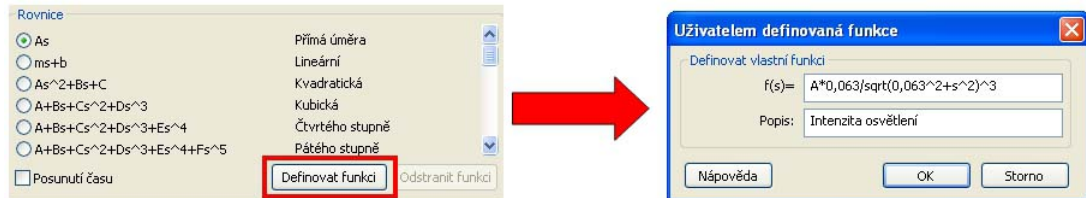


Obrázek 5.65: Ukázka naměřené závislosti

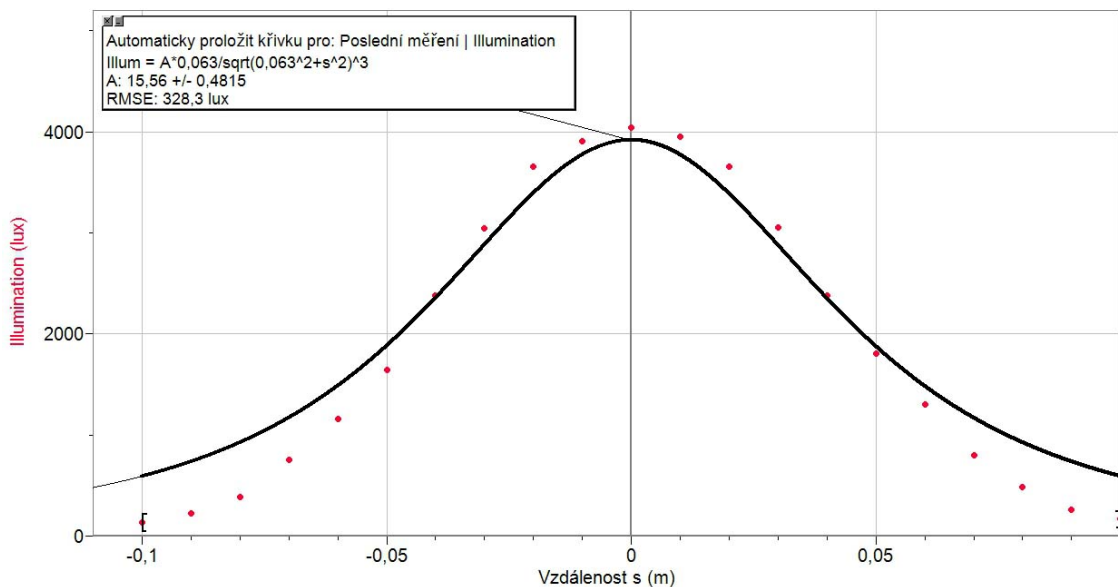
9. Svítivost získáme opět aproximací naměřených dat. Na hlavním panelu klikněte na ikonu *Proložit křivku*. V nabídce *Rovnice* klikněte na *Definovat předpis* a zadejte funkci  $E = E(s)$ , určenou vztahem 5.34. Hodnotu  $d$  dosazujeme číselně v metrech, zadání předpisu ukazuje obrázek 5.66. Postupně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

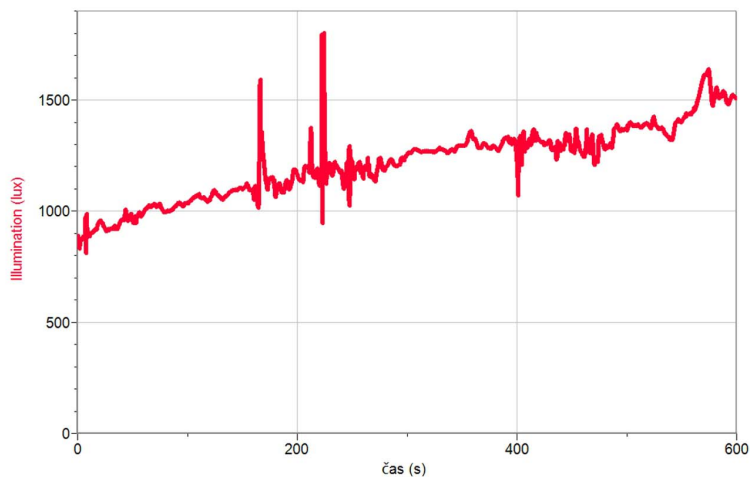
3. Přehled na obrázcích 5.68 a 5.69 ukazuje vzorově naměřené výsledky pro pět vybraných zdrojů, jistě je možné proměřit některé další. Všechny závislosti s výjimkou měření pro žárovku byly naměřeny pro vzorkovací frekvenci 20 Hz, měření pro žárovku se vzorkovací frekvencí 1000 Hz.

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

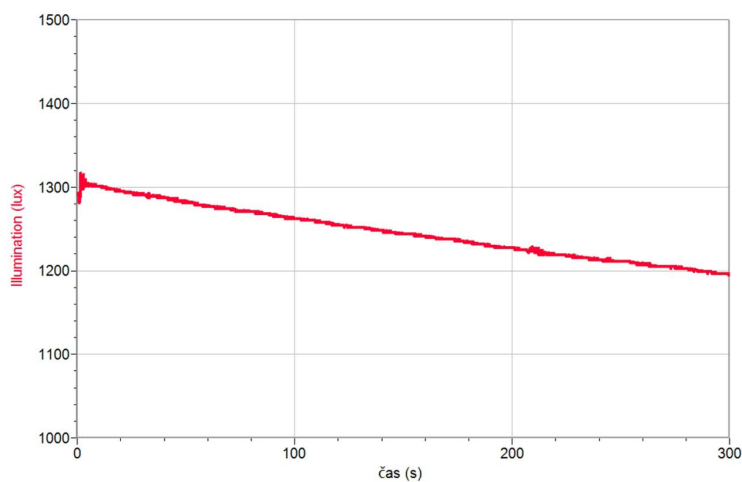
- *Svíčka*: Svítivost se mění dle aktuální velikosti plamene, libovolný závan vzduchu (i v klidné místnosti) vnáší do měření podstatnou nepřesnost.
- *Baterka bez krytu*: Nejlépe se blíží bodovému zdroji, svítivost ale v čase klesá, navíc jde o příliš slabý zdroj, pro vzdálenosti větší než 10 cm nepoužitelný.
- *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.



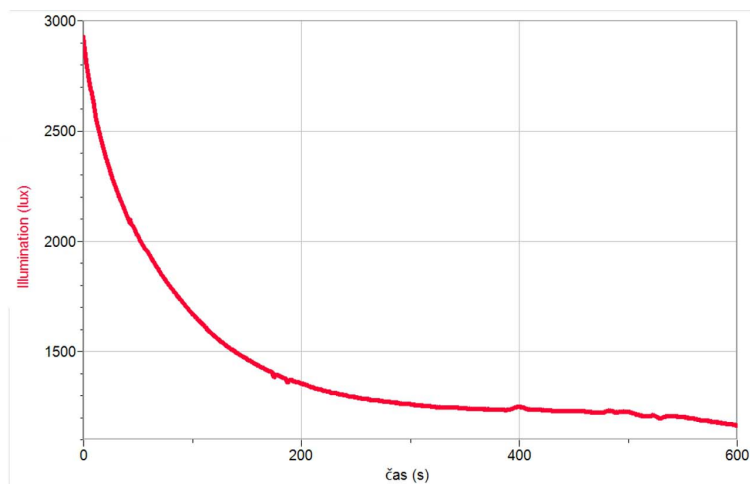
Svíčka  
Délka měření: 10 minut  
Vzdálenost od čidla: 4 cm



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



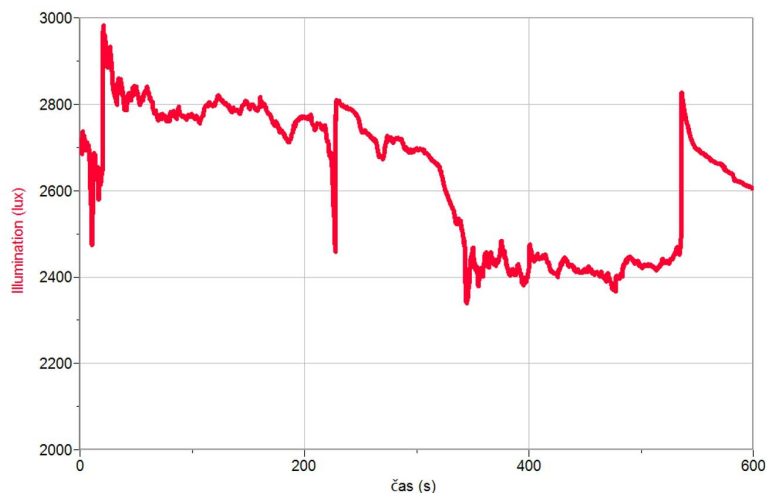
Svítilna na kolo s  
parabolickým zrcadlem,  
napájení 4xAA  
Délka měření: 10 minut  
Vzdálenost od čidla: 7 cm



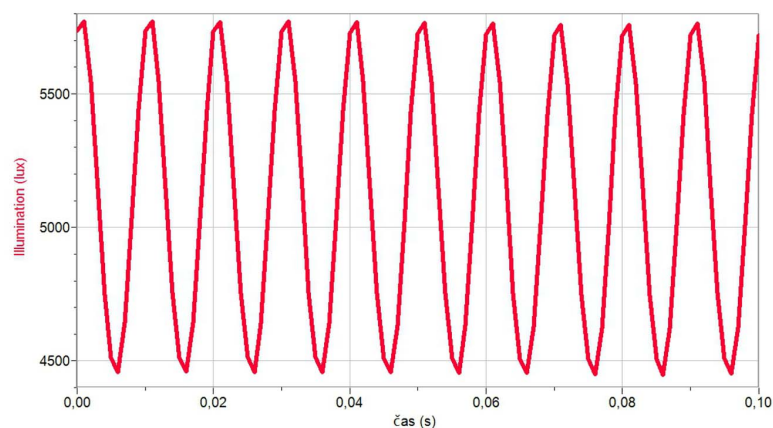
Obrázek 5.68: Svítivost některých světelných zdrojů



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].

# Kapitola 6

## Provedené experimenty a požadavky k maturitní zkoušce

Závěrem této práce stručně uvádím vztah navržených úloh k aktuálním požadavkům na znalosti a dovednosti maturantů. Následující přehled vychází z **Katalogu požadavků ke zkouškám společné části maturitní zkoušky** pro rok 2011 a 2012 [33].

Všechny navržené experimenty v sobě zahrnují tyto požadavky týkající se fyzikálních veličin a jejich měření:

Žák dovede:

- odhadnout v konkrétním popsaném měření, čím jsou způsobeny jednotlivé chyby měření
- odhadnout chybu měření daným měřidlem
- rozhodnout, zda daný výsledek měření nebo výpočtu je fyzikálně možný

Požadavky na znalosti a dovednosti v konkrétních partiích fyziky jsou pak pro každý experiment rozepsány níže (stále dle [33]):

- Experiment **Kam se ztrácí energie?**: Žák dovede:
  - řešit úlohy na výpočet práce vykonané konstantní silou, na změnu polohové (potenciální) tíhové energie a na výpočet pohybové (kinetické) energie tělesa
  - vypočítat celkovou mechanickou energii tělesa
  - řešit jednoduché úlohy s užitím zákona zachování mechanické energie
  - popsat kvantitativně či kvalitativně změny polohové a pohybové energie v praktických příkladech
  - vypočítat v jednoduchých případech změnu vnitřní energie tělesa konáním práce a tepelnou výměnou

- Experiment **Izotermický děj**: Žák dovede:
  - řešit jednoduché úlohy na změnu stavu ideálního plynu pomocí stavové rovnice (vypočítat látkové množství, hmotnost, objem, hustotu, tlak a termodynamickou teplotu tohoto plynu)
  - znázornit průběh izotermického, izobarického, izochorického a adiabatického děje v  $p$ - $V$  diagramu, v  $p$ - $T$  diagramu a ve  $V$ - $T$  diagramu
  - vyjádřit graficky práci vykonanou plynem při stálém a proměnném tlaku
- Experiment **Tuhost pružiny**: Žák dovede:
  - popsat kvantitativně či kvalitativně změny polohové a pohybové energie v praktických příkladech: vrhy, pohyb kyvadla, těleso kmitající na pružině, voda pohánějící turbíny hydroelektrárny
  - vypočítat periodu a frekvenci pružinového oscilátoru a kyvadla
  - řešit jednoduché praktické problémy týkající se harmonického kmitání
- Experiment **Jak funguje tepelná izolace**: Obsah úlohy přímo neodpovídá požadavkům ke společné části maturitní zkoušky.
- Experiment **Podchlazená kapalina**: Obsah úlohy přímo neodpovídá požadavkům ke společné části maturitní zkoušky.
- Experiment **Tuhnutí vody**: Žák dovede:
  - vypočítat s použitím údajů v tabulkách celkové teplo, které přijme pevné těleso dané hmotnosti a dané teploty, aby se změnilo v kapalinu o teplotě vyšší, než je teplota tání (úloha pracuje s opačnou změnou skupenství)
- Experiment **Fotometrické veličiny**: Obsah úlohy přímo neodpovídá požadavkům ke společné části maturitní zkoušky.

# Kapitola 7

## Závěr

Hlavním cílem této práce bylo vytvoření sady návodů pro vyučující fyziky, které by měly popisovat středoškolské experimenty využívající pro naměření i zpracování dat školní experimentální systém Vernier.

V úvodu práce jsem provedl orientační průzkum mezi přibližně 160 vyučujícími fyziky, který měl za úkol zjistit, jaká forma návodů je pro tuto cílovou skupinu uživatelů nejpreferovanější. S ohledem na výsledky tohoto výzkumu a obsah již existujících materiálů jsem se poté již zaměřil na vlastní vývoj nových experimentů a návodů.

V rámci této diplomové práce jsem vytvořil celkem sedm podrobně popsaných návodů na experimenty se systémem Vernier, které tematicky směřují do oblasti termodynamiky a zákona zachování energie. Experimenty jsou koncipovány tak, aby se daly použít jak pro frontální demonstraci příslušných závislostí, tak také pro jejich kvantitativní zpracování. Zpracování naměřených dat typicky obsahuje práci s grafem a využívání aproximací, které je vhodné rozvíjet zejména u zájemců o fyziku, seminaristů či budoucích studentů fyzikálních oborů. Každý experiment je doplněn sadou otázek, které učitel může s daným měřením spojit, a samozřejmě také výčtem úskalí, která je třeba vnímat, chce-li se demonstrátor při měření vyvarovat problémů.

V průběhu měsíců dubna a května budou jednotlivé návody zveřejněny na Fyz-Webu. Bude úspěchem této práce, jestliže si některé náměty a tipy, které obsahuje, najdou cestu do hodin fyziky na středních školách a gymnáziích.



# Literatura

- [1] Výzkumný ústav pedagogický Praha. *Rámcový vzdělávací program pro gymnázia*. [on-line] Dostupné z URL <[http://www.vuppraha.cz/wp-content/uploads/2009/12/RVPG-2007-07\\_final.pdf](http://www.vuppraha.cz/wp-content/uploads/2009/12/RVPG-2007-07_final.pdf)>. (Cit. 12.12.2011.)
- [2] DVOŘÁK, L. (editor) a kol. *Lze učit fyziku zajímavěji a lépe?* MATFYZPRESS, Praha 2008.
- [3] *Školní experimentální systém ISES*. [on-line] Dostupné z URL: <<http://www.ises.info/old-site/index1.html>>. (Cit. 27.11.2011.)
- [4] Edufor s.r.o. *Experimenty se systémem Vernier*. [on-line] Dostupné z URL: <<http://www.vernier.cz/experimenty/prehled>>. (Cit. 27.11.2011.)
- [5] Edufor s.r.o. *Videonávody pro učitele*. [on-line] Dostupné z URL: <<http://www.vernier.cz/video/prehled>>. (Cit. 27.11.2011.)
- [6] PAZDERA, V.; NOHÝL, J.; DIVIŠ, J. *Fyzikální experimenty se systémem Vernier*. [on-line] Dostupné z URL: <<http://www.vernier.cz/experimenty/pazdera/index.php>>. (Cit. 27.11.2011.)
- [7] REICHL, J. *Vernier - experimenty*. [on-line] Dostupné z URL: <<http://www.jreichl.com/fyzika/vernier/vernier.htm>>. (Cit. 27.11.2011.)
- [8] PROFIMEDIA s.r.o. *PASCO science education*. [on-line] Dostupné z URL: <<http://www.pasco.cz/>>. (Cit. 27.11.2011.)
- [9] PROFIMEDIA s.r.o. *PASCO science education - sbírky experimentů*. [on-line] Dostupné z URL: <[http://www.pasco.cz/index.php?option=com\\_content&task=view&id=167&Itemid=117](http://www.pasco.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=167&Itemid=117)>. (Cit. 27.11.2011.)
- [10] PROFIMEDIA s.r.o. *PASCO science education - burza experimentů*. [on-line] Dostupné z URL: <[http://www.pasco.cz/index.php?option=com\\_docman&Itemid=125](http://www.pasco.cz/index.php?option=com_docman&Itemid=125)> (Cit. 27.11.2011.)
- [11] EDUXE s.r.o. *LogIT - Podpora ICT ve vzdělávání*. [on-line] Dostupné z URL: <<http://www.muypokojicek.unas.cz/www.eduxe.cz/logitworld/index.php>> (Cit. 27.11.2011.)

- [12] Přírodovědecká fakulta Ostravské univerzity v Ostravě. *Katedra fyziky PŘF OU - informace studentům* [on-line] Dostupné z URL: <<http://artemis.osu.cz:8080/artemis/view.php?ids=10&idr=46&idc=240>> (Cit. 27.11.2011.)
- [13] Gymnázium Pardubice. *Kabinet Fyziky - Laboratorní práce* [on-line] Dostupné z URL: <[http://www.gypce.cz/files/podweb.php?kabinet\\_FY&Tue,\\_05\\_Jun\\_2007\\_10\\_46\\_05\\_GMT](http://www.gypce.cz/files/podweb.php?kabinet_FY&Tue,_05_Jun_2007_10_46_05_GMT)> (Cit. 27.11.2011.)
- [14] Základní škola Jihlava. *Počítačová podpora experimentů v přírodovědných předmětech* [on-line] Dostupné z URL: <<http://www.zskol.ji.cz/dokumenty/projekt.pdf>> (Cit. 27.11.2011.)
- [15] Řešitelé projektu KEGA. *Aktualizácia a skvalitnenie výučby fyziky na stredných školách s využitím informačných technológií s dôrazom na ďalšie vzdelávanie učiteľov.* [on-line] Dostupné z URL: <[http://physedu.science.upjs.sk/ipcoach\\_webstranka/stiahnutie.htm](http://physedu.science.upjs.sk/ipcoach_webstranka/stiahnutie.htm)> (Cit. 27.11.2011.)
- [16] Slovanské gymnázium Olomouc. *Rozvoj profesních kompetencí učitelů fyziky základních a středních škol v Olomouckém kraji* [on-line] Dostupné z URL: <<http://ufyz.sgo.cz/Ke-stazeni/>> (Cit. 27.11.2011.)
- [17] Střední průmyslová škola Karviná. *Využití počítačového systému IP-Coach a karty AUR 12 v laboratorních cvičeních ve výuce fyziky na SPŠ Karviná.* [on-line] Dostupné z URL: <[http://www.sps-karvina.cz/www/Ict2005/soubory/fyzika/laboratorni\\_prace\\_v\\_IP-COACH\\_1cast.pdf](http://www.sps-karvina.cz/www/Ict2005/soubory/fyzika/laboratorni_prace_v_IP-COACH_1cast.pdf)> (Cit. 27.11.2011.)
- [18] PAZDERA, V. Měření fyzikálních veličin pomocí Go!Link. *Matematika - fyzika - informatika*, duben 2006. Prométheus, Praha 2006.
- [19] MAZUREK, J.; KUNČICKÝ, D.; KRPEC, R. Užití systému PASCO ve výuce fyziky. *Matematika - fyzika - informatika*, červen 2009. Prométheus, Praha 2009.
- [20] PAZDERA, V. LabQuest - měření v terénu. *Matematika - fyzika - informatika*, květen 2009. Prométheus, Praha 2009.
- [21] BARTUŠKA, K.; SVOBODA, E. *Fyzika pro gymnázia - Molekulová fyzika a termika*. Prometheus, 3. vydání. Praha 1996.
- [22] MIKULČÁK, J.; KLIMEŠ, B.; ŠIROKÝ, J.; ŠŮLA, V.; ZEMÁNEK, F. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Prometheus, dotisk 3. vydání. Praha 1988.
- [23] LEPIL, O. *Fyzika pro gymnázia - Mechanické kmitání a vlnění*. Prometheus, 4. vydání. Praha 2007.
- [24] Encyklopedie fyziky Jaroslava Reichla. *Přenos vnitřní energie*. [on-line] Dostupné z URL: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/582-prenos-vnittrni-energie>> (Cit. 25.12.2011.)

- [25] Příspěvatelé Wikipedie. *Tepelná vodivost*. [on-line] Dostupné z URL: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Tepeln%C3%A1\\_vodivost](http://cs.wikipedia.org/wiki/Tepeln%C3%A1_vodivost)> (Cit. 25.12.2011.)
- [26] BÖHM, P. *Přechlazená voda*. [on-line] Převzato z Fyzwebu. Dostupné z URL: <<http://fyzweb.cz/odpovedna/index.php?id=4322>> (Cit. 19.12.2011.)
- [27] VALEŠOVÁ, V.; SKALA, J.; ŠVÁB, F. *Přechlazené kapaliny*. [on-line] Dostupné z URL: <<http://kdf.mff.cuni.cz/tabor/2011/odborny/prechlazene-kapaliny.pdf>> (Cit. 19.12.2011.)
- [28] BÍLEK, M. *Chemické experimenty se systémem ISES*. Katedra chemie PdF VŠP v Hradci Králové, Hradec Králové 1995.
- [29] Příspěvatelé Wikipedie. *Sodium thiosulfate*. [on-line] Dostupné z URL: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium\\_thiosulfate](http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_thiosulfate)> (Cit. 19.12.2011.)
- [30] BÖHM, P. *Mpembův jev - skutečnost nebo fikce?* [on-line] Diplomová práce. Dostupné z URL: <[mpemba.pavelbohm.cz/diplomka.pdf](http://mpemba.pavelbohm.cz/diplomka.pdf)> (Cit. 6.3.2012.)
- [31] BÖHM, P. *Zkoumání teploty v chladničce*. [on-line] Převzato z Fyzwebu. Dostupné z URL: <<http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=137>> (Cit. 27.12.2011.)
- [32] VOGALOVÁ, N. *Podpora využívání experimentálního systému Vernier na českých školách*. Diplomová práce. Praha 2011.
- [33] Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy. *Katalog požadavků zkoušek společné části maturitní zkoušky platný od školního roku 2009/2010* [on-line] Dostupné z URL: <<http://www.novamaturita.cz/katalogy-pozadavku-1404033138.html>> (Cit. 7.3.2012.)

# Seznam obrázků

4.1	Prostředí programu Logger Pro 3 . . . . .	13
4.2	Předvolby . . . . .	13
4.3	Hlavní panel příkazů programu Logger Pro 3 . . . . .	14
4.4	Okno pro nastavení parametrů měření . . . . .	14
5.1	Přepínač . . . . .	16
5.2	Vážení míčku . . . . .	16
5.3	Měření průměru míčku . . . . .	16
5.4	Umístění čidla . . . . .	17
5.5	$h_0 = 0,772$ m . . . . .	17
5.6	Závislost polohy míčku na čase . . . . .	17
5.7	Závislost rychlosti míčku na čase . . . . .	18
5.8	Geometrie měření . . . . .	18
5.9	Okno nového sloupce „Výška“ . . . . .	19
5.10	Zadání rovnic pro potenciální a kinetickou energii . . . . .	19
5.11	Výsledná závislost celkové mechanické energie míčku na čase . . . . .	20
5.12	Srovnání závislostí polohy, rychlosti a celk. mech. energie na čase . . . . .	20
5.13	Závislost potenciální (nahore) a kinetické (dole) energie na čase . . . . .	22
5.14	Změna rozsahu osy . . . . .	22
5.15	Vývoj potenciální, kinetické a celkové mechanické energie v první sekundě . . . . .	23
5.16	Deformace míčku při dopadu (použití programu Avistep) . . . . .	24
5.17	Exponenciální závislost se nejvíce blíží matematickému popisu úbytku celkové mechanické energie v čase, nevystihuje ale skokové ztráty energie během nárazů. . . . .	25
5.18	Tlakové čidlo . . . . .	27
5.19	Příprava čidla k měření . . . . .	28
5.20	Nastavení grafu . . . . .	28
5.21	Okno <i>Události se vstupy</i> . . . . .	28
5.22	Změna rozsahu vodorovné osy . . . . .	28
5.23	Zadávání hodnot . . . . .	29
5.24	Naměřené hodnoty pro izotermický děj . . . . .	29
5.25	Výběr aproximující křivky . . . . .	30
5.26	Aproximace naměřených hodnot hyperbolou $p(V) = \frac{A}{V}$ . . . . .	30
5.27	Výpočet práce vykonané IP při izoterm. změně objemu z 10 na 20 ml . . . . .	32
5.28	Zadání předpisu $p = p(V)$ z van der Waalsovy stavové rovnice . . . . .	34

5.29 Černá křivka ukazuje aproximaci naměřených hodnot pro model IP, modrá pro model van der Waalsova plynu . . . . .	34
5.30 Přepínač rozsahů . . . . .	36
5.31 Uspořádání experimentu . . . . .	37
5.32 Nulování čidel . . . . .	38
5.33 Vzorově naměřená závislost . . . . .	38
5.34 Změny v grafu . . . . .	39
5.35 Graf závislosti výsledné síly na výchylce z rovnovážné polohy . . . . .	40
5.36 Výběr aproximující křivky . . . . .	40
5.37 Aproximace naměřených hodnot funkcí $F(x) = Ax$ . . . . .	40
5.38 Odečet hodnot . . . . .	42
5.39 Umístění teplotních čidel při experimentu . . . . .	45
5.40 Vzorově naměřená závislost pro polystyrenovou a skleněnou destičku . . . . .	46
5.41 Skrytí závislosti pro polystyren a dopočítávání nového sloupce . . . . .	46
5.42 Zobrazení závislosti teplotního rozdílu $\Delta t$ na čase pro sklo . . . . .	47
5.43 Podchlazení vody o cca 4 °C. . . . .	50
5.44 Vážení pentahydrátu thiosíranu sodného, uspořádání při měření . . . . .	51
5.45 Min. teplota: 39,4 °C . . . . .	51
5.46 Samovolné chladnutí thiosíranu, vznikající krystalky . . . . .	52
5.47 Ukázka naměřené závislosti . . . . .	52
5.48 Průběh teploty - odebrání tepla $Q$ . . . . .	56
5.49 Vážení vody ve víčku, zavedení teplotního čidla do vody . . . . .	57
5.50 Vzorová závislost teploty na čase, doba měření: 60 minut . . . . .	57
5.51 Průběh ochlazování a tuhnutí vody (resp. ledu) . . . . .	58
5.52 Podchlazení vody o cca 1 °C . . . . .	61
5.53 Schéma k výkladu o fotometrických veličinách . . . . .	63
5.54 Přepínač rozsahů . . . . .	63
5.55 Schématicky znázorněný postup při experimentu . . . . .	64
5.56 Nastavení grafu . . . . .	64
5.57 Okno <i>Události se vstupy</i> . . . . .	64
5.58 Změna rozsahu vodorovné osy . . . . .	65
5.59 Zadávání hodnot . . . . .	65
5.60 Vzorově naměřená závislost . . . . .	66
5.61 Výběr aproximující křivky . . . . .	66
5.62 Aproximace naměřených hodnot funkcí $E(r) = \frac{A}{r^2}$ . . . . .	67
5.63 Schématicky znázorněný postup při experimentu . . . . .	69
5.64 K matematickému popisu situace . . . . .	69
5.65 Ukázka naměřené závislosti . . . . .	70
5.66 Předpis nově definované funkce . . . . .	71
5.67 Aproximace naměřených hodnot funkcí $E(s) = \frac{A \cdot d}{\sqrt{(d^2 + s^2)^3}}$ . . . . .	71
5.68 Svítivost některých světelných zdrojů . . . . .	73
5.69 Svítivost některých světelných zdrojů . . . . .	74