

Robert  
**REPNIK**

Robert  
**HAUKO**



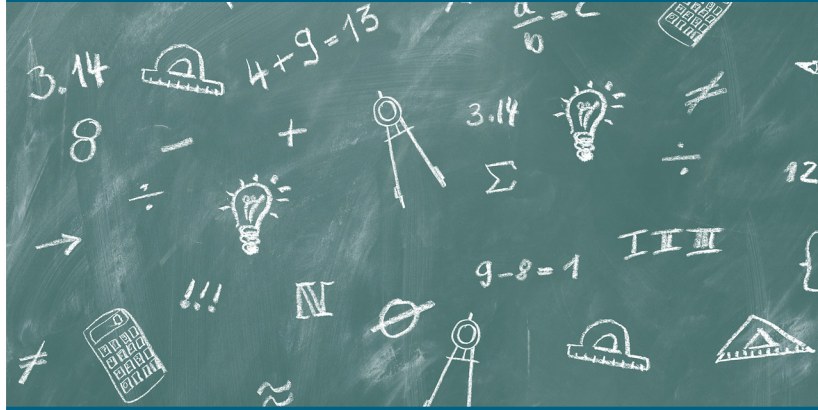
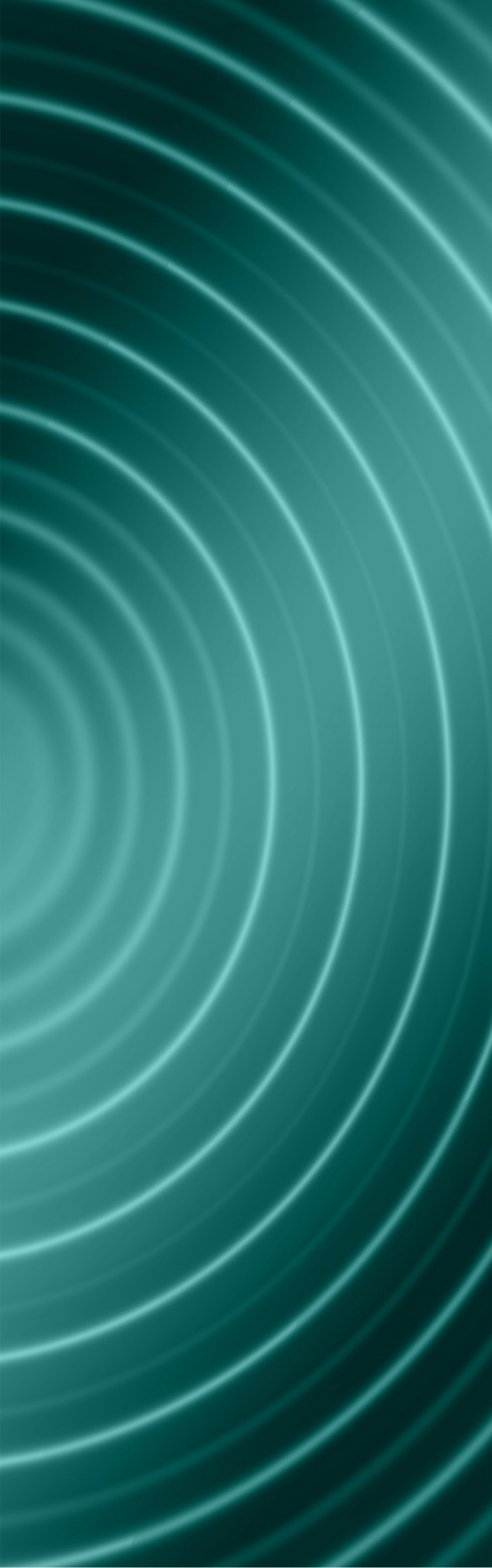
# Fizikalni eksperimenti

# 3

Zbirka laboratorijskih vaj



Univerzitetna založba  
Univerze v Mariboru





Univerza v Mariboru

---

Fakulteta za naravoslovje  
in matematiko

# Fizikalni eksperimenti 3

Zbirka laboratorijskih vaj

Avtorja

**Robert Repnik**

**Robert Hauko**

Julij 2022



<b>Naslov</b> <i>Title</i>	<b>Fizikalni eksperimenti 3</b> <i>Physics Experiments 3</i>		
<b>Podnaslov</b> <i>Subtitle</i>	<b>Zbirka laboratorijskih vaj</b> <i>Collection of Laboratory Exercises</i>		
<b>Avtorja</b> <i>Authors</i>	Robert Repnik (Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko)		
	Robert Hauko (Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo)		
<b>Recenzija</b> <i>Review</i>	Nataša Vaupotič (Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko)		
	Eva Klemenčič (Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko)		
<b>Jezikovni pregled</b> <i>Language editing</i>	Valerija Šuligoj		
<b>Tehnični urednik</b> <i>Technical editor</i>	Jan Perša (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)		
<b>Oblikovanje ovitka</b> <i>Cover designer</i>	Jan Perša (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)		
<b>Grafične priloge</b> <i>Graphic material</i>	Avtorja, 2022	<b>Grafika na ovitku</b> <i>Cover graphics</i>	Banner 90488, avor: geralt, pixabay.com, CC0, 2022 Board 6174815, avor: geralt, pixabay.com, CC0, 2022

**Založnik** **Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba**  
*Published by* Slomškovo trg 15, 2000 Maribor, Slovenija  
<https://press.um.si>, [zalozba@um.si](mailto:zalozba@um.si)

**Izdajatelj** **Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko**  
*Issued by* Koroška cesta 160, 2000 Maribor, Slovenija  
<https://www.fnm.um.si>, [fnm@um.si](mailto:fnm@um.si)

**Izdaja**  
*Edition* Prva izdaja

**Izdano**  
*Published at* Maribor, julij 2022

**Vrsta publikacije**  
*Publication type* E-knjiga

**Dostopno na**  
*Available at* <https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/697>

CIP - Kataložni zapis o publikaciji  
Univerzitetna knjižnica Maribor

53 (075.8) (076.5) (0.034.2)

REPNIK, Robert  
Fizikalni eksperimenti 3 [Elektronski vir] : zbirka laboratorijskih vaj / avtorja Robert Repnik, Robert Hauko. - 1. izd. - E-knjiga. - Maribor : Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba, 2022

Način dostopa (URL) :  
<https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/697>  
ISBN 978-961-286-624-2 (PDF)  
doi: 10.18690/um.fnm.6.2022  
COBISS.SI-ID 114276355



© Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba  
/ University of Maribor, University Press

**Besedilo** / *Text* © Repnik, Hauko, 2022

To delo je objavljeno pod licenco Creative Commons Priznanje avtorstva-Deljenje pod enakimi pogoji 4.0 Mednarodna. / *This work is licensed under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.*

Uporabnikom se dovoli reproduciranje, distribuiranje, dajanje v najem, javno priobčitev in predelavo avtorskega dela, če navedejo avtorja in širijo avtorsko delo/predelavo naprej pod istimi pogoji. Za nova dela, ki bodo nastala s predelavo, je tudi dovoljena komercialna uporaba.

Vsa gradiva tretjih oseb v tej knjigi so objavljena pod licenco Creative Commons, razen če to ni navedeno drugače. Če želite ponovno uporabiti gradivo tretjih oseb, ki ni zajeto v licenci Creative Commons, boste morali pridobiti dovoljenje neposredno od imetnika avtorskih pravic.

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

**ISBN** 978-961-286-624-2 (pdf)

**DOI** <https://doi.org/10.18690/um.fnm.6.2022>

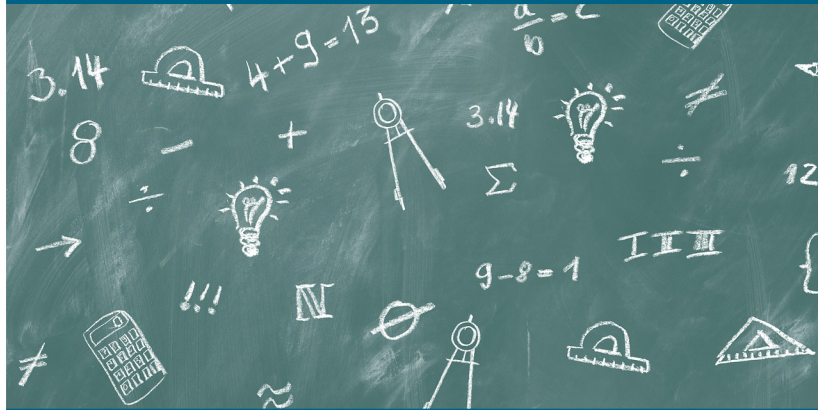
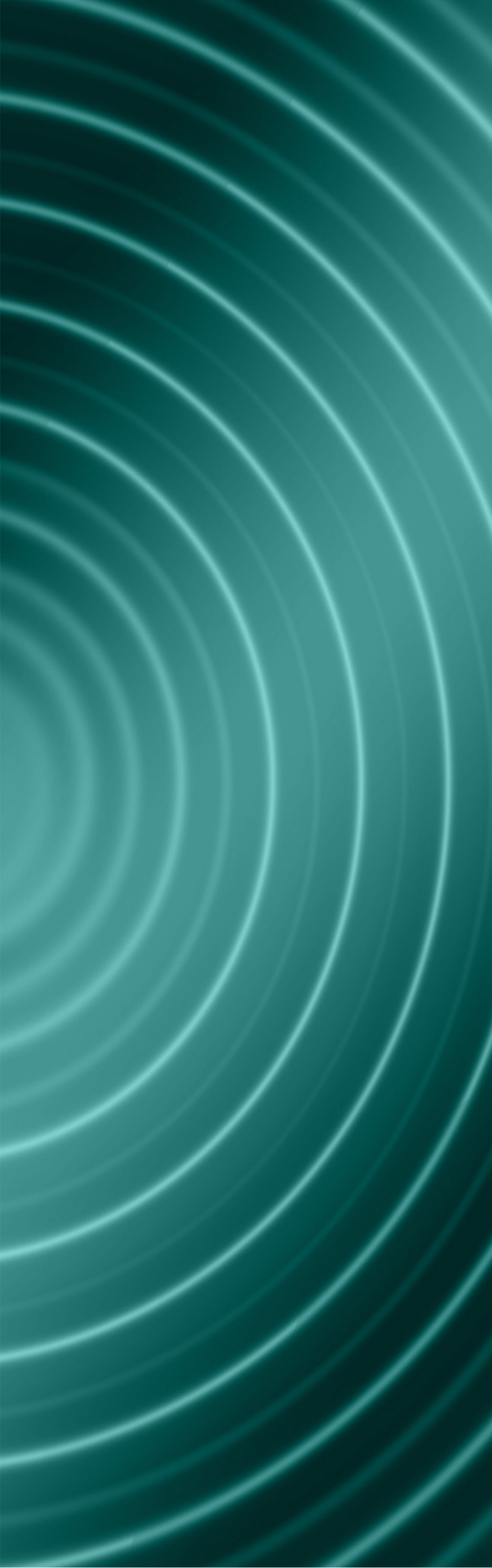
**Cena**  
*Price* Brezplačni izvod

**Odgovorna oseba založnika**  
*For publisher* prof. dr. Zdravko Kačič,  
rektor Univerze v Mariboru

**Citiranje** Repnik, R., Hauko, R. (2022). *Fizikalni eksperimenti 3: zbirka laboratorijskih vaj*. Maribor: Univerzitetna založba. doi:  
*Attribution* 10.18690/um.fnm.6.2022

# Kazalo

<b>Predgovor.....</b>	<b>1</b>
1 Goriščne razdalje leč.....	3
2 Uklon in interferenca.....	13
3 Stefanov zakon.....	23
4 Sklopljeno nihanje.....	31
5 Hitrost ultrazvoka.....	37
6 Nihanje s trenjem.....	45
7 Resonanca.....	55
8 Stojče valovanje.....	61
9 Frekvenca in hitrost zvok.....	69
10 Prekinjeno nihalo.....	77
11 Spektrometer.....	91
<b>Dodatek: Samostojni projekti.....</b>	<b>97</b>
<b>Literatura.....</b>	<b>99</b>



## Predgovor

Fizikalni eksperimenti 3 – zbirka laboratorijskih vaj – so namenjeni študentom drugega letnika 1. stopnje študija v programih Fizika in Predmetni učitelj na Fakulteti za naravoslovje in matematiko Univerze v Mariboru.

V okviru predmeta Fizikalni eksperimenti 3 študentje opravijo, analizirajo in zagovorijo laboratorijske vaje s področja nihanja in valovanja. Vaje podpirajo in dopolnjujejo vsebino predmeta Nihanje in valovanje, ki ga študentje poslušajo v zimskem semestru istega letnika [1, 2]. Vaje opravijo samostojno ali v skupinah po dva študenta, zagovori in izdelava dnevnika vaj pa potekajo individualno. Vsebina vaj se je z leti spreminjala, nastajale so nove vaje in posledično nekatere izginjale. V okviru predvidenih 55 kontaktih ur smo se v programu Fizika v zadnjih letih ustalili pri 11 vajah, v programu Predmetni učitelj pa ob 40 kontaktnih urah pri 6 vajah.

Fizikalni eksperimenti 3 – zbirka laboratorijskih vaj – so delno povzeti po starih navodilih vaj, pri čemer so bila ta pregledana, dopolnjena in osvežena, nekatere vaje pa so napisane popolnoma na novo. Tudi vse slike so narisane na novo. Avtorja sva poskušala poenotiti slog navodil na način, iz katerega bo razviden zastavljeni koncept vaj. Poleg uspešno izvedenih meritev so pomembne tudi predhodna priprava na vaje, uporaba čim bolj širokega nabora analitičnih orodij ter lastna ustvarjalnost, tako v fazi meritev kakor v fazi analize, interpretacije in vrednotenja merskih rezultatov.

Z zbirko laboratorijskih vaj izdajava pregledno gradivo, ki bo študentom fizike na Fakulteti za naravoslovje in matematiko v oporo pri izvedbi meritev ter dodatna pomoč pri reševanju drugih eksperimentalnih problemov. Ob tem lahko zbirka vaj študentom v študijskem programu Predmetni učitelj služi kot izhodišče pri načrtovanju lastnega šolskega eksperimentalnega dela na nižjih stopnjah pouka fizike.

Pri predmetu Fizikalni eksperimenti 3 izvedejo študentje poleg vseh opravljenih vaj tudi samostojni projekt s področja nihanja in valovanja. Manjše skupine študentov izberejo eno od predlaganih tem, načrtujejo izvedbo poskusa, poskus izvedejo in predstavijo rezultate meritev na skupni predstavitvi. Na koncu zbirke vaj so naštetih naslovi izvedenih samostojnih projektov v zadnjih letih. Vsebine nekaterih najbolj izvirnih projektov so bile preoblikovane v znanstvene in strokovne članke v tujih in domačih revijah. Naslovi že izvedenih projektov lahko služijo novim idejam, lahko pa so izziv za nadgradnjo že predstavljenih projektov.

Avtorja gradiva Fizikalni eksperimenti 3 – zbirka laboratorijskih vaj – se za skrben pregled iskreno zahvaljujeva obema recenzentkama prof. dr. Nataši Vaupotič in doc. dr. Evi Klemenčič ter vsem, ki so kakorkoli v preteklosti prispevali k nastajanju vaj in samostojnih projektov s področja nihanja in valovanja. V mislih imava predvsem najina predhodnika prof. dr. Natašo Vaupotič in zasl. prof. dr. Zlatka Bradača, študente generacije 2014/2015 ter prof. dr. Jano Padežnik Gomilšek s Fakultete za strojništvo Univerze v Mariboru.



# 1 Goriščne razdalje leč

**Naloga:** Z uporabo različnih metod določite goriščne razdalje leč in zrcala.

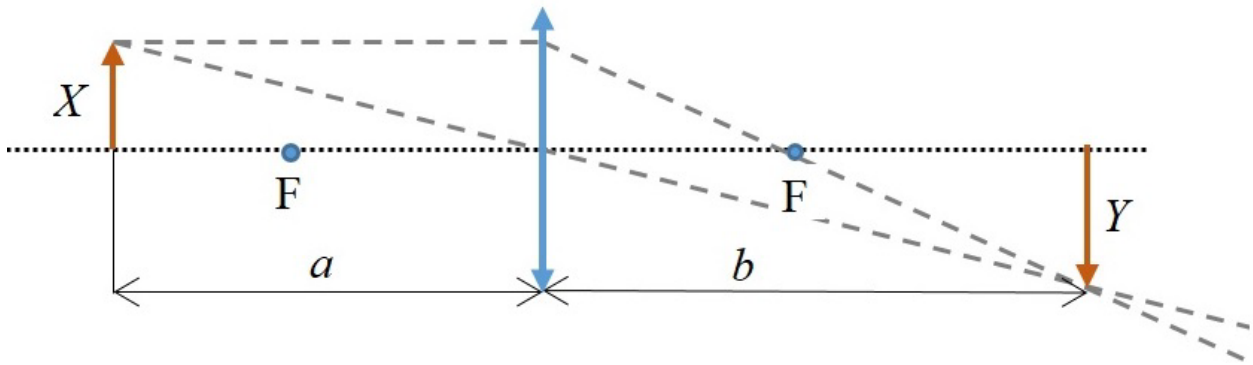
**Teorija:** Za upodabljanje s tankimi lečami, postavljenimi v homogeno, izotropno sredstvo, veljajo preproste geometrijske zveze (slika 1). Velja:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f},$$

kjer je  $a$  oddaljenost predmeta od leče,  $b$  oddaljenost slike od leče in  $f$  goriščna razdalja leče. Iz slike 1 je razvidna tudi povečava leče:

$$\frac{Y}{X} = -\frac{b}{a},$$

kjer je  $Y$  višina slike,  $X$  pa višina predmeta.



Slika 1: Preslikava s tanko konveksno lečo;  $X$  – višina predmeta,  $Y$  – višina slike,  $F$  – gorišče leče,  $a$  – razdalja med predmetom in lečo,  $b$  – razdalja med sliko in lečo

Navedeno velja tudi za konkavne leče, a je pri njih goriščna razdalja negativna. Goriščna razdalja  $f$  je odvisna od lomnega količnika stekla  $n$  in od obeh krivinskih radijev  $r_1$  in  $r_2$ :

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right),$$

pri čemer se  $r_1$  nanaša na ukrivljenost površine leče na strani, ki je bližje predmetu,  $r_2$  pa na ukrivljenost nasprotne strani. Za vpad svetlobe na izbočeno površino velja  $r > 0$ , na vbočeno površino pa  $r < 0$ . V primeru, da leča ni v zraku, ampak je obdana s snovjo, ki ima lomni količnik  $n'$ , nadomestimo v enačbi lomni količnik stekla  $n$  z razmerjem lomnih količnikov  $n/n'$ .

Obratno vrednost goriščne razdalje imenujemo lomljivost leče, enota zanjo pa je dioptrija ( $1 \text{ dptr} = \text{m}^{-1}$ ). Lomljivost lečja, sestavljenega iz dveh leč, je:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2},$$

pri čemer je  $d$  razmik med lomnima ravninama leč. Če se leči dotikata, uporabimo približek  $d = 0$  in velja:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}.$$

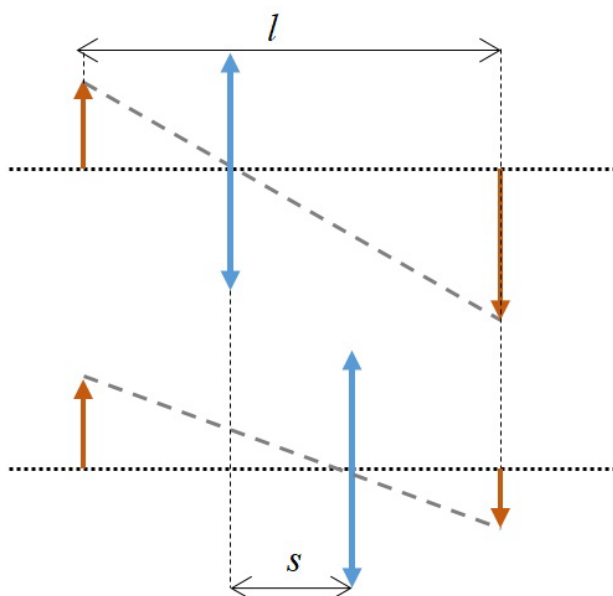
V tem primeru se leče obnaša kot tanka leča.

Goriščno razdaljo tanke konveksne leče lahko izračunamo tako, da izmerimo razdalji  $a$  in  $b$  pri preslikavi, lahko pa tudi neposredno tako, da poiščemo sliko zelo oddaljenega predmeta – ta nastane v goriščni ravnini leče.

Natančnejša je Besselova metoda (slika 2). Na optično klop postavimo predmet in zaslon, njunih leg ne spreminjamo. Če je razmik med predmetom in zaslonom večji od  $4f$ , je vedno mogoče najti dve legi leče, pri katerih nastane slika predmeta na zaslonu. Pri eni od leg leče je slika povečana, pri drugi pa pomanjšana. Če je  $s$  razmik med obema legama leče,  $l$  pa razdalja med predmetom in zaslonom ( $l > 4f$ ), velja:

$$f = \frac{(l^2 - s^2)}{4l},$$

pri čemer je  $l = a + b$  in  $s = a - b$ .



**Slika 2.** Pri Besselovi metodi poiščemo dve legi leče, pri katerih nastane na zaslonu ostra slika. Pri tem je  $l$  razdalja med predmetom in zaslonom,  $s$  pa razmik med obema legama leče.

Na enak način lahko izmerimo tudi goriščne razdalje sestavov tankih leč pri majhnih razmikih med lečama. Taka meritev nam pomaga določiti goriščne razdalje tanke konkavne leče: izmeriti moramo samo goriščno razdaljo sestava te leče s tanko konveksno lečo, ki ima znano in dovolj majhno goriščno razdaljo (sestav mora biti zbiralen). Neznano gorišče izračunamo potem iz enačbe za goriščno razdaljo sestava leč.

**Potrebščine:** optična klop z merilom, predmet, zaslon, zaslonka, svetilo, konveksni leči A in B, konkavna leča C, konkavno zrcalo.

**Navodilo:**

1. Pri treh različnih oddaljenostih predmeta od konveksne leče A izmerite oddaljenost slike od leče in izračunajte goriščno razdaljo leče.

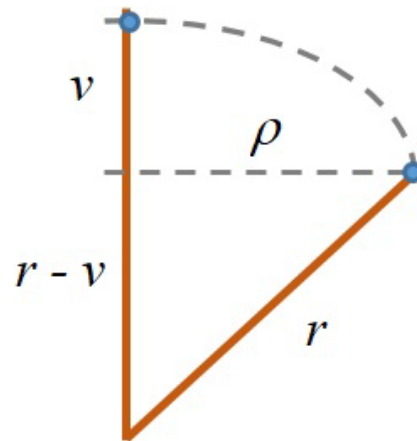
2. Z upodobitvijo oddaljenega predmeta najprej grobo ocenite goriščno razdaljo konveksne leče A. Nato luč in predmet postavite na začetek optične klopi, zaslon pa postavite tako, da bo oddaljen od predmeta za več kot  $4f$ . Postavite na klop še konveksno lečo A in naravnajte vse skupaj tako, da bodo središča predmeta, leče in zaslona v isti višini. Izmerite najprej razdaljo med zaslonom in predmetom. Poiščite obe legi leče, pri katerih dobite na zaslonu ostro sliko predmeta in izmerite njuno medsebojno razdaljo  $s$ . Če je slika nejasna, si pomagajte tako, da pred lečo postavite zaslonko. Nato izračunajte goriščno razdaljo  $f$ . Meritve opravite pri treh različnih razdaljah med predmetom in zaslonom  $l$ .

3. Sferometer, ki ga boste uporabili, je narejen iz merilne ure. Stoji na treh nogah, katerih konice so na krogu s polmerom  $\rho$ , v središču pa je gibljiva konica. Previdno postavite sferometer na lečo A. Merilna konica se vda, tako da se tudi vse nožice dotikajo leče. Kazalec kaže premik konice. Odčitajte lego na  $1/100$  mm natančno. Ničlišče sferometra določite tako, da ga postavite na ravno površino (ploščo) in odčitajte lego kazalca. Razlika obeh odčitkov je enaka višini krogelne kapice  $v$ , ki jo objema krog skozi nožice sferometra (slika 3). Krivinski polmer leče  $r$  izračunate po Pitagorovem izreku:

$$r^2 = (r - v)^2 + \rho^2 .$$

Z izmerjenima polmeroma  $r_1$  in  $r_2$  na obeh straneh leče in znanim lomnim količnikom  $n$  izračunate goriščno razdaljo leče A.

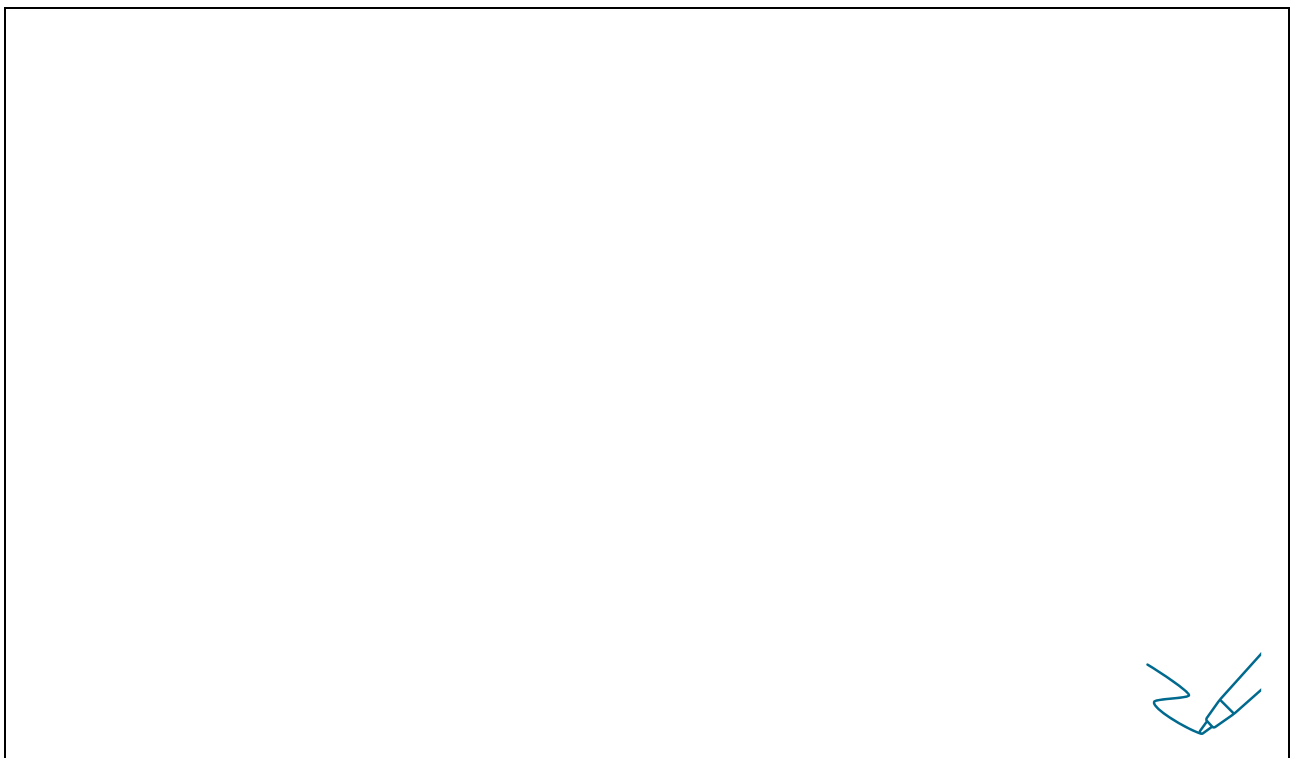




Slika 3. Merjenje krivinskega polmera leče s sferometrom

4. H konveksni leči z znano goriščno razdaljo  $B$  dodajte konkavno lečo  $C$  in z Besselovo metodo izmerite goriščno razdaljo sistema. Ocenite razmik med obema lečama, ki tvorita sestav, in izračunajte goriščno razdaljo konkavne leče. Kolikšna sme biti najmanj goriščna razdalja konkavne leče, da je meritev še mogoča? Razdalja med predmetom in zaslonom naj bo približno 1,5 m.

5. Z uporabo enačbe  $1/a + 1/b = 1/f$  določite goriščno razdaljo konkavnega zrcala. Izvedite tri meritve.



**Priprava na vaje:**

Izpeljite zvezo med oddaljenostjo predmeta od leče ( $a$ ), oddaljenost slike od leče ( $b$ ) in goriščno razdaljo leče ( $a$ ) za tanko lečo.



2. Uporabite lomni zakon in razložite, kako leče zberejo ali razpršijo žarke.



---

---

---

---

Pojasnite, kako uporabimo Besselovo metodo za določevanje goriščne razdalje leče.

---

---

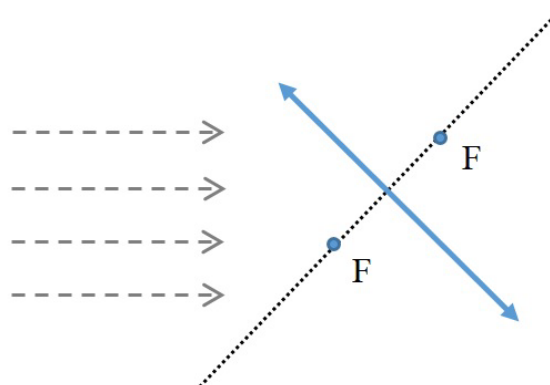
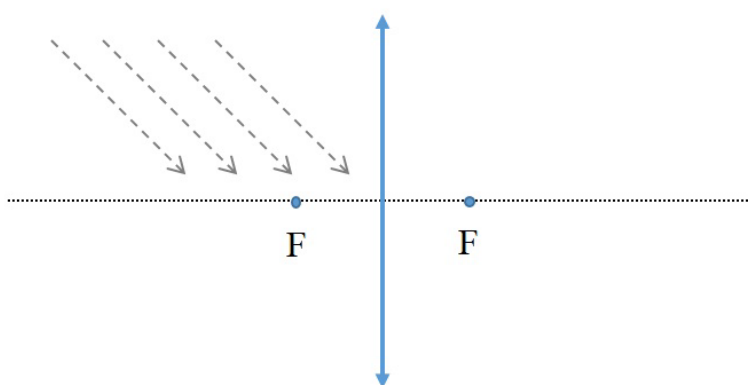
---

---

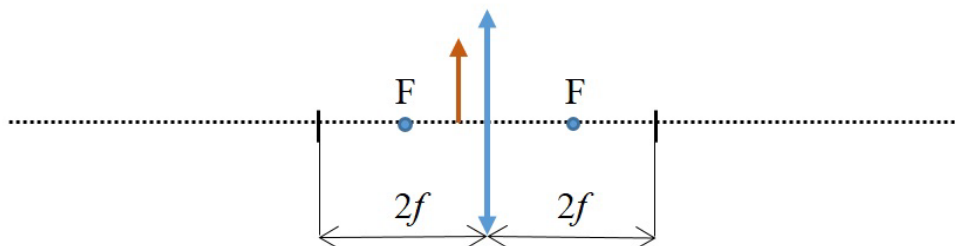
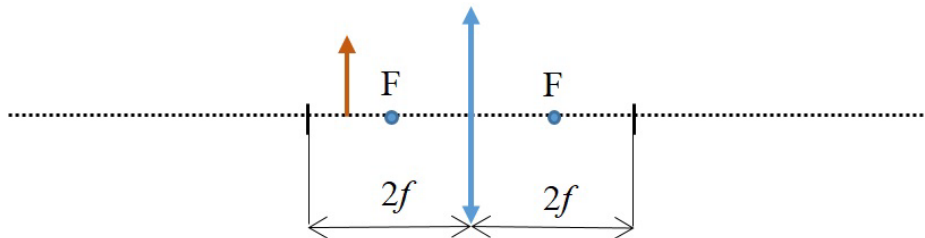
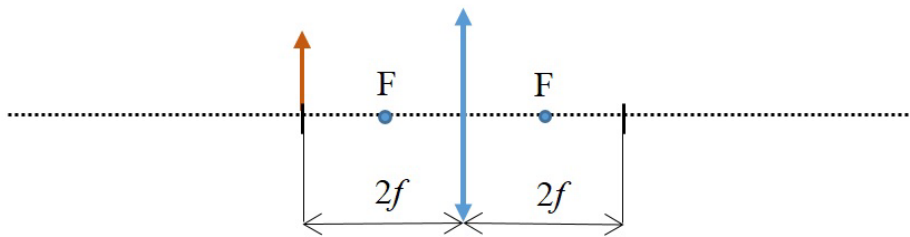
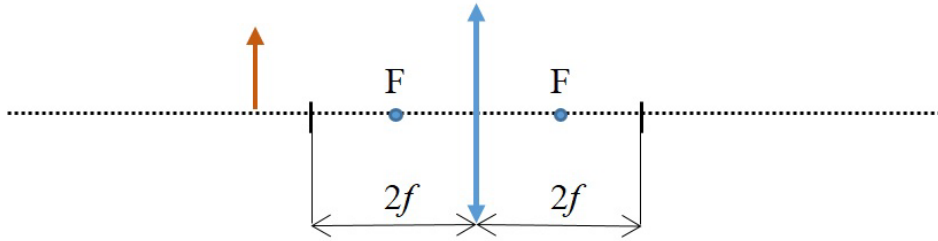
---

---

Kje se zberejo žarki, prikazani na spodnjih dveh slikah?



Preslikajte:







Na spletu poiščite vsaj eno animacijo preslikave z lečami in jo ovrednotite (izgled, nazornost, oblike grafov, možnost spreminjanja parametrov, možnost simulacije meritve in izvoza podatkov).



---

---

---

---

---

---

---

---

## 2 Uklon in interferenca

### 1. del: LASER

**Naloga:** Izmerite valovno dolžino He-Ne laserja. Z laserjem izmerite širino reže in debelino žice.

**Teorija:** Pomembna značilnost laserja je, da daje zelo močan curek skoraj natančno vzporedne, koherentne in monokromatske svetlobe. To lahko izkoristimo pri merjenju širine reže in debeline žice z interferenco svetlobe.

Uklonski pojavi so značilni za vsa valovanja. Uklon opazimo, ko valovanje naleti na oviro. Pričakovali bi, da na območju geometrijske sence, to je v prostoru za oviro, ki ga omejujeta žarka vpadnega valovanja ob robovih ovire, valovanja ni. Vendar že na razdalji nekaj valovnih dolžin v smeri razširjanja valovanja opazimo, da se valovanje širi tudi na območje za oviro. S spreminjanjem velikosti rež ali ovir in valovne dolžine vidimo, da so uklonski pojavi izraziti, če so reže ali ovire manjše ali največ nekajkrat večje od valovne dolžine valovanja. Z opazovanjem uklona na reži lahko izmerimo valovno dolžino svetlobe. Uklon razložimo s Huygensovim načelom, po katerem je vsak delček valovnega čela izvir elementarnih valov (vsaka točka je izvir novega valovanja).

**POZOR:** Če vpadne laserske svetlobe neposredno v oko, ga poškoduje. Ne glejte v laser! Nevarna je lahko tudi odbita svetloba, ki vpadne v oko. Ravnajte previdno!

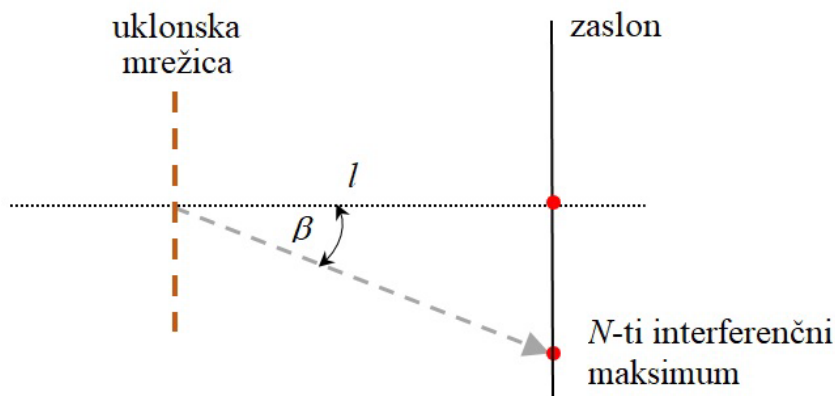
**Potrebščine:** laser, uklonska mrežica (vsaj 300 rež/mm), reža, stojalo z žico, mikrometrski vijak, zaslon, merilni trak, mrežica za sitotisk, ploščica z luknjico in ostali priloženi pripomočki.

### Navodilo:

1. Z lasersko svetlobo posvetite na uklonsko mrežico. Na zaslonu, ki je na oddaljenosti  $l$  od uklonske mrežice, dobite interferenčno sliko.  $N$ -ti uklonski maksimum vidite pod kotom  $\beta$  glede na zveznico med mrežico in zaslonom (slika 4). Valovno dolžino  $\lambda$  izračunate iz enačbe:

$$a \sin \beta = N\lambda,$$

kjer je  $a$  razdalja med sosednjima režama na uklonski mrežici,  $N$  pa uklonski red. Merite pri treh različnih razdaljah  $l$  med uklonsko mrežico in zaslonom.



Slika 4: Shema meritve valovne dolžine laserja

2. Z lasersko svetlobo posvetite na režo s širino  $b$  tako, da na zaslonu dobite značilno uklonsko sliko. Za  $N$ -ti uklonski minimum (oslabitev) velja:

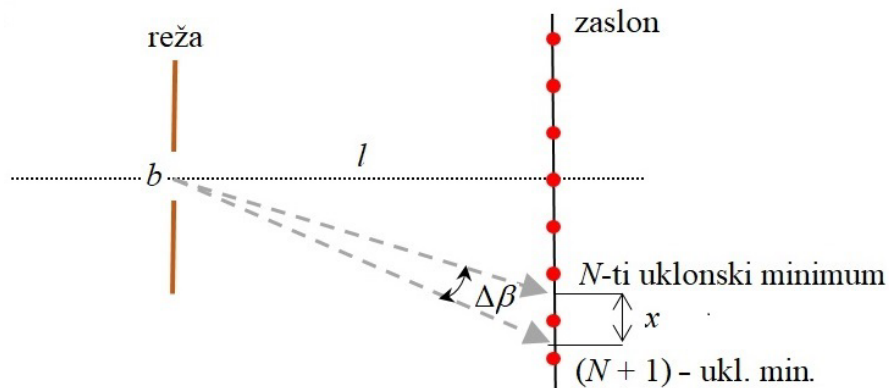
$$b \sin \beta = N\lambda.$$

V primeru, ko je izpolnjen pogoj  $\sin \beta \sim \beta$ , velja  $b \Delta\beta = \lambda$ , kjer je  $\Delta\beta$  kot med dvema sosednjima temnima progama (slika 5). Za razdaljo  $x$  med dvema sosednjima temnima progama na zaslonu velja takrat  $x = l \Delta\beta$ . Izmerite razdaljo  $l$  od reže do zaslona. Preštejte npr. 10 temnih prog in izmerite razdaljo  $s$  med prvo in 10. temno progom. Razdalja  $x$  med sosednjima progama je potem  $x = s/9$ . Ocenite napako izmerjene razdalje  $x$ . Širino reže



izračunajte iz enačbe:  $b = \lambda l/x$ . Meritev ponovite pri treh različnih razdaljah  $l$  med režo in zaslonom.

Namesto reže vstavite stojalo z žico in na enak način, kot ste določili širino reže, določite še debelino žice. Debelino žice izmerite tudi z mikrometrskim vijakom in primerjajte obe dobljeni vrednosti.



Slika 5: Shema meritve širine reže

3. Z lasersko svetlobo posvetite na mrežico, ki se uporablja pri sitotisku, in določite razdaljo med sosednjima luknjama (raster mrežice). Uporabite lahko isto enačbo, kot ste jo uporabili pri uklonski mrežici. Kako razložimo uklonsko sliko, ki jo dobimo s takšno mrežico?

---



---



---



---



---



---



---



---



## 2. del: PLINSKA SVETILKA

**Naloga:** Izmerite valovne dolžine spektralnih črt v svetlobi plinske svetilke in z uporabo spektralnih tabel ugotovite vrsto plina v svetilki.

**Teorija:** Pri uklonski mrežici se iz curka svetlobe z eno valovno dolžino oblikuje več redov interferenčnih curkov. Koti, pod katerimi nastanejo, so odvisni od razmika med sosednjima režama in od valovne dolžine svetlobe. Svetlobo, ki jo oddaja žarilna nitka, lahko z uklonsko mrežico razklonimo v mavrico. Ker prehajajo barve v njej zvezno druga v drugo, pravimo, da je spekter zvezen.

V fluorescenčni žarnici sveti plin, zato je spekter te žarnice drugačen od navadne. Na mavrico so naložene ostre črte, ki kažejo, da so deleži svetlobe z določenimi valovnimi dolžinami posebej izraziti. Plini oddajajo samo svetlobo določenih valovnih dolžin – pravimo, da je spekter črtast. Valovne dolžine izsevane svetlobe ustrezajo razliki diskretnih energijskih nivojev v atomih plina. Pri vaji boste opazovali črtast spekter neznanega plina.

**POZOR:** Ne glejte neposredno v plinsko svetilko, ker vam lahko UV-svetloba poškoduje oko!

**Potrebščine:** spektrometer na mrežico, uklonska mrežica, plinska svetilka, merilni trak, reža, spektralne tabele, list milimetrskega papirja velikosti A4.

### Navodilo:

Skozi uklonsko mrežico opazujte ozek curek svetlobe iz plinske svetilke. Na zaslonu lahko vidite interferenčno sliko. Prvo ojačitev vidite pod kotom  $\beta$ , pri katerem je izpolnjen pogoj (slika 1):

$$a \sin \beta = \lambda ,$$

kjer je  $a$  razmik med sosednjima režama na uklonski mrežici,  $\lambda$  pa je valovna dolžina spektralne črte. Kot  $\beta$  določimo iz zveze  $\tan b = x/l$ , kjer je  $x$  oddaljenost prvega maksimuma od sredine zaslona. Razdaljo  $x$  merite v obeh smereh od sredine zaslona in uporabite povprečne vrednosti. Za vsako spektralno črto izračunajte valovno dolžino, ocenite napako meritve in zapišite barvo spektralne črte. Na vodoravno letev levo in desno od odprtine nalepite milimetrski papir. Vrišite vidne črte pri gledanju skozi mrežico in list

prilepite v dnevnik. Iz spektralni tabel (internet, stena temnice) ugotovite vrsto plina v svetilki in dopišite teoretične vrednosti valovnih dolžin posameznih črt.

### Priprava na vaje:

Razložite osnove delovanja He-Ne laserja.


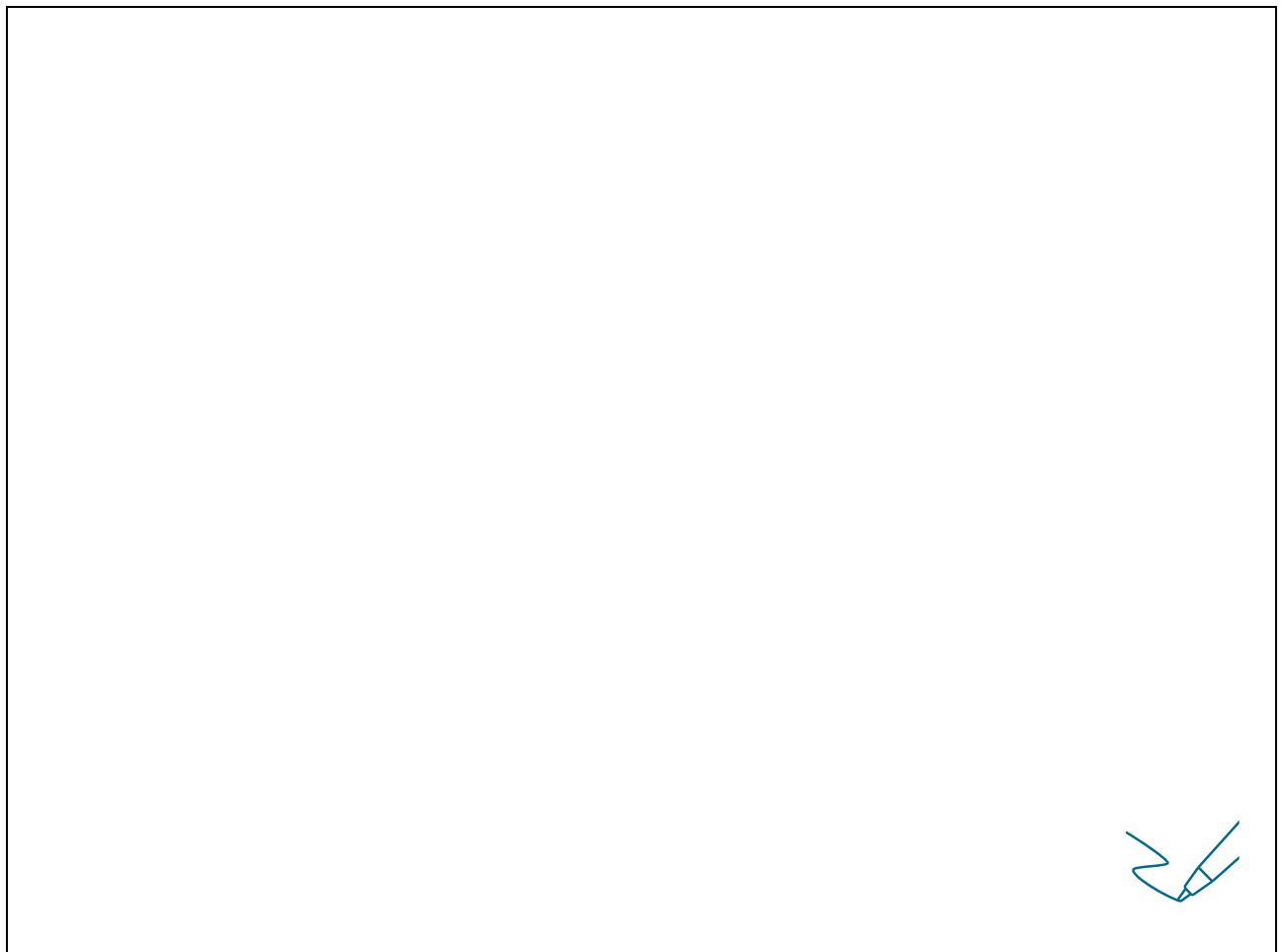
---

---

---

---

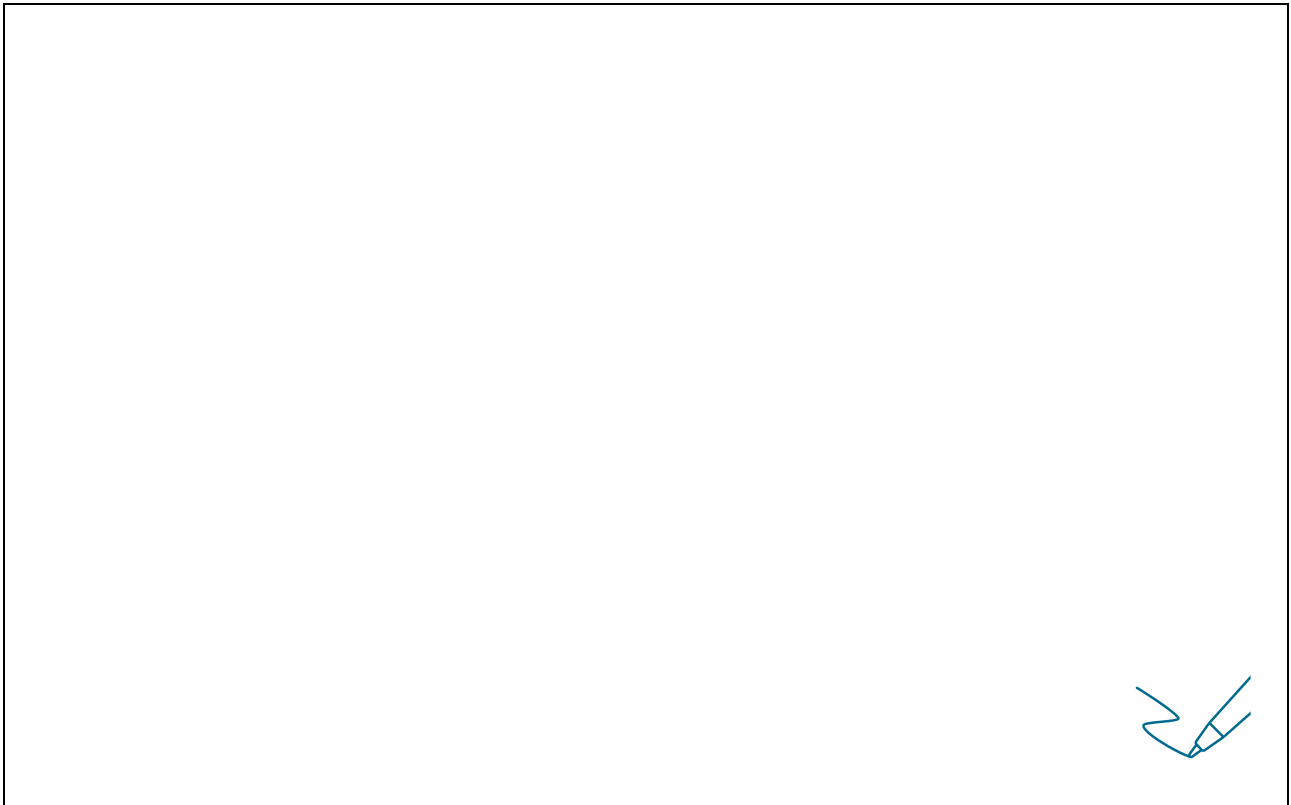
Narišite ustrezno skico in izpeljite enačbo za interferenco svetlobe iz dveh točkastih izvirov  $a \sin \beta = N\lambda$ .




Izpeljite izraz  $x = l \Delta\beta$ , ki smo ga uporabili pri uklonu na reži in žici (slika 2). Pokažite, da velja  $\Delta\beta = \beta_1$ , kjer je  $\beta_1$  kot do prvega uklonskega minimuma.



Enačbo za lego uklonskih minimumov pri uklonu na reži izpeljite z uporabo fazorjev.



Z diferenciranjem enačbe za uklon na reži izpeljite napako za izračun valovne dolžine laserske svetlobe  $\lambda$  in širino reže  $b$ .



Na spletu poiščite emisijske in absorpcijske spektre različnih plinov.

Razložite osnove delovanja plinske svetilke.

---

---

---

---

---

---

---

Na spletu poiščite vsaj eno animacijo interference svetlobe na uklonski mrežici ali reži in jo ovrednotite (izgled, nazornost, oblike grafov, možnost spreminjanja parametrov, možnost simulacije meritve in izvoza podatkov).







### 3 Stefanov zakon

**Naloga:** Preverite veljavnost Stefanovega zakona za svetlobo, ki jo oddaja žarnica na nitko.

**Teorija:** Telo, segreto na temperaturo  $T$ , oddaja v okolico elektromagnetno valovanje. Pravimo, da seva. Celotno gostoto izsevanega energijskega (svetlobnega) toka  $j^*$  za idealno črno telo opisuje Stefanov zakon (1879):

$$j^* = \sigma T^4,$$

pri čemer je  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$  Stefan-Boltzmannova konstanta. Podrobnejšo razporeditev energijskih deležev po intervalih valovnih dolžin  $\lambda$  izsevanega elektromagnetnega valovanja črnega telesa je leta 1900 izpeljal Max Planck:

$$\frac{dj^*}{d\lambda} = \frac{2\pi hc_0}{\lambda^5} \left( \exp\left\{\frac{hc_0}{\lambda kT}\right\} - 1 \right),$$

pri čemer je  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$  Planckova konstanta,  $c_0 = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  svetlobna hitrost v vakuumu in  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$  Boltzmannova konstanta. Stefanovo enačbo dobimo z integriranjem Planckovega zakona po vseh valovnih dolžinah. Telesu, ki ni črno, ima pa odbojnost (albedo  $a$ ) neodvisno od valovne dolžine, pravimo sivo telo. Ker je emisivnost  $(1 - a)$  za vse intervale valovne dolžine enaka, velja:

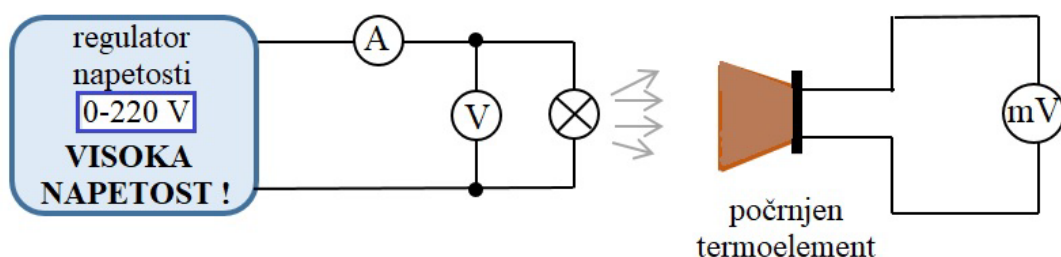
$$j^* = (1 - a)\sigma T^4.$$

**Potrebščine:** žarnica, regulator izmenične napetosti – variac, dva merilnika toka in napetosti (AVO – metra), digitalni merilnik napetosti, počrnjen termoelement.

**Navodilo:**

1. Z digitalnim merilnikom izmerite upor nitke v žarnici in določite njeno temperaturo (hladna nitka). Primerjajte določeno temperaturo z izmerjeno temperaturo okolice.
2. Sestavite vezje, kot je prikazano na sliki 6. Napetost na termoelementu merite z digitalnim merilnikom. Žarnica naj bo približno pol metra oddaljena od termoelementa. Med meritvami ne smete premikati žarnice in termoelementa.

Spreminjajte napetost na viru in merite napetost in tok skozi žarnico ter napetost na termoelementu. Opravite vsaj 10 meritev pri povečevanju napetosti (segrevanje), nato pa še vsaj 10 meritev pri zmanjševanju napetosti (ohlajanje).



Slika 6: Shema postavitve eksperimenta

3. Ker je specifični upor  $\zeta(T)$  volframa odvisen od temperature  $T$  (tabela 1), lahko določimo temperaturo nitke iz izmerjenega električnega upora  $R(T)$ . Za upor nitke velja  $R(T) = \zeta(T) l/S$ , kjer je  $l$  dolžina nitke,  $S$  pa njen presek. Če zanemarimo raztezanje nitke, lahko zapišemo razmerje

$$\frac{R(T)}{R(300\text{ K})} = \frac{\zeta(T)}{\zeta(300\text{ K})}$$

in izračunamo:

$$\zeta(T) = R(T) \frac{\zeta(300\text{ K})}{R(300\text{ K})}.$$

Pri posamezni meritvi izračunamo električni upor  $R(T)$  iz napetosti in toka. Ker so  $R(300\text{ K})$  in  $\zeta(300\text{ K})$  konstante, lahko iz razmerja izračunamo  $\zeta(T)$  za posamezno meritev. Iz podatkov v tabeli 1 narišemo diagram  $\zeta = \zeta(T)$  in iz diagrama odčitamo temperaturo pri  $\zeta(T)$  za posamezno meritev.

Temperaturo lahko določimo tudi z (linearno) interpolacijo tabeliranih vrednosti. Recimo, da je izračunani specifični upor  $\zeta(T) = 9,10 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ . Vrednost pade v interval med 400 K in 500 K. Prirastek specifičnega upora za ta interval za 1 K je

$$\frac{(10,56 - 8,06) \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}}{500\text{ K} - 400\text{ K}} = 0,025 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m/K}.$$

Izračunana vrednost specifičnega upora  $9,10 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$  se od tabelirane začetne vrednosti  $8,06 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$  razlikuje za  $(9,10 - 8,06) \cdot 10^{-8} \Omega\text{m} = 1,04 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ . Ustrezna razlika temperatur je  $1,04 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m} / (0,025 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m/K}) = 42\text{ K}$  in temperatura nitke je

$$400\text{ K} + 42\text{ K} = 442\text{ K}.$$

Še bolj natančna metoda je prilagoditev tabeliranih vrednosti z ustrezno funkcijo (polinom dovolj visoke stopnje) in izračun vmesnih vrednosti iz prilagoditvene funkcije.

Tabela 1: Specifični upor volframa v odvisnosti od temperature [3]

$T(10^2\text{K})$	2,93	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
$\zeta(10^{-8}\Omega\text{m})$	5,50	5,65	8,06	10,56	13,23	16,09	19,00

$T(10^2\text{K})$	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0
$\zeta(10^{-8}\Omega\text{m})$	21,94	24,93	27,94	30,98	34,09	37,19	40,36

$T(10^2\text{K})$	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	21,0	22,0
$\zeta(10^{-8}\Omega\text{m})$	43,55	46,78	50,05	53,35	56,60	60,06	63,48

$T(10^2\text{K})$	23,0	24,0	25,0
$\zeta(10^{-8}\Omega\text{m})$	66,91	70,39	73,91

4. Gostoto izsevanega svetlobnega toka merimo s počrnjenim termoelementom. Del svetlobnega toka absorbira počrnjeni stik termoelementa, drugi stik je skrit v ohišju pri stalni temperaturi okolice. Počrnjeni stik se segreje in razlika temperatur stikov termoelementa je v stacionarnem stanju sorazmerna z delom svetlobnega toka, ki vpade na počrnjeni stik. Ta del je sorazmeren s celotnim svetlobnim tokom, ki ga žarnica seva, zato pa je tudi sorazmeren z gostoto izsevanega toka. Hkrati je razlika temperatur sorazmerna z merjeno napetostjo termoelementa. Izmerjena napetost termoelementa je tako sorazmerna z gostoto izsevanega toka žarnice. Albedo volframa je približno od 0,7 do 0,8 za vidno območje in se s temperaturo rahlo spreminja, kar pri poskusu zanemarimo.

5. Stefanov zakon za žarnico lahko preverite tako, da iz meritev narišete graf  $j = j(T^4)$ . Pričakovani rezultat je premica. Narišite še graf  $\ln(j/j_1)$  v odvisnosti od  $\ln(T/T_1)$  in določite strmino premice. Pri slednjem izberite konstantni vrednosti  $j_1$  in  $T_1$  tako, da bo napaka čim manjša.

### Priprava na vaje:

Kaj je albedo in kako ga upoštevamo v Stefanovem zakonu?

---

---

---

---

Zakaj telesa vidimo barvna, če nanje posvetimo z belo svetlobo?

---

---

---

---

Kakšna je karakteristika žarnice (odvisnost  $U$  od  $I$ )?

---

---

---

Zakaj gostota svetlobnega toka točkastega svetila pada s kvadratom razdalje?

---

---

---

---

Razložite pojme: svetlost, svetilnost, osvetljenost, gostota svetlobnega toka, moč svetila.

---

---

---

---

Kaj je belo, črno in kaj sivo telo?

---

---

---

---

Pojasnite tri načine prenosa toplote. Kateri pogoj je potreben pri vseh treh načinih?


---

---

---

---

8. Kakšno obliko ima Stefanov zakon za barvno telo, pri katerem je  $a = a(\lambda)$ ?



---

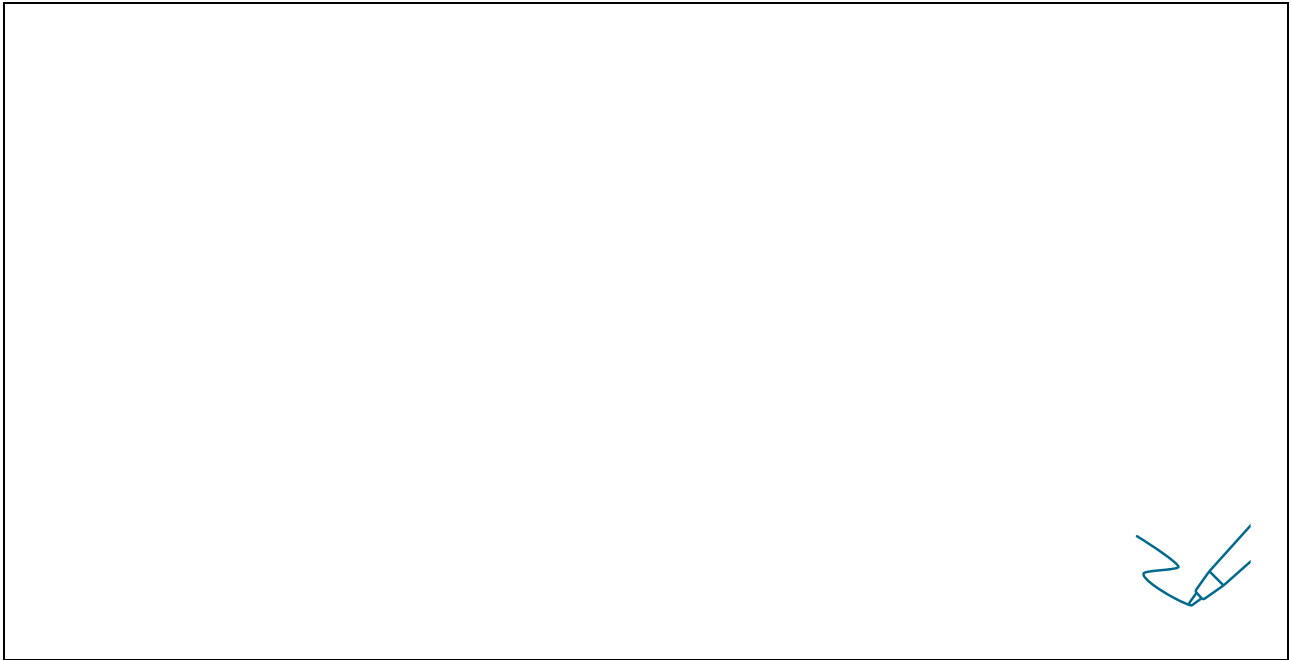
---

---

---

---

Razložite Planckov zakon in kako iz njega dobimo Stefanov zakon?



---

---

---

---

Kaj pravi Wienov zakon?



Na spletu poiščite vsaj eno animacijo Stefanovega in Planckovega zakona in jo ovrednotite (izgled, nazornost, oblike grafov, možnost spreminjanja parametrov, možnost simulacije meritve in izvoza podatkov).



---

---

---

---

---

---

---

---



## 4 Sklopljeno nihanje

**Naloga:** Opazujte sklopljeno nihanje dveh enakih fizikalnih nihali, povezanih s prožno vzmetjo. Izmerite nihajna časa obeh lastnih nihanj in čas utripanja ter jih primerjajte s teoretičnimi vrednostmi.

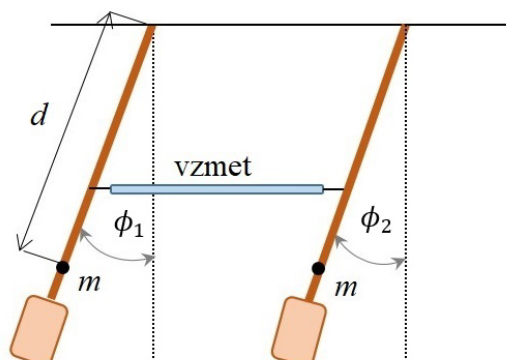
**Teorija:** Fizikalno nihalo je vsako togo telo, vrtljivo okoli vodoravne osi, ki ne gre skozi težišče telesa. Pri majhnih odklkih navor sile teže povzroča harmonično nihanje z nihajnim časom

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgd}},$$

kjer je  $J$  vztrajnostni moment telesa okoli osi vrtenja,  $m$  masa telesa,  $g$  težni pospešek in  $d$  razdalja med težiščem in osjo vrtenja.

Povežimo dve enaki fizikalni nihali z vzmetjo. Vzmet naj bo pripeta simetrično na obe nihali, v mirovnem položaju naj ne bo napeta. Zdaj nihali ne moreta več nihati neodvisno, odklik posameznega nihala preko sile vzmeti vpliva na drugo nihalo. Pravimo, da sta nihali sklopljeni. Izkaže se, da lahko poljubno nihanje dveh sklopljenih nihali opišemo z linearno kombinacijo dveh sinusnih nihanj. Ti nihanji imenujemo lastni nihanji, njuna nihajna časa pa lastna nihajna časa sklopljenih nihali. V splošnem je časovni potek posameznega nihala odvisen od začetnih pogojev (oba odklika in hitrosti). S posebno izbiro začetnih pogojev lahko dosežemo nihanje nihali v enem od lastnih nihajnih načinov.

**Prvo lastno nihanje:** Nihali odmaknemo za enak začetni kot (slika 7) in ju hkrati spustimo: obe nihata sočasno z enakima nihajnima časoma in enakima odmikoma. Vzmet je ves čas nenapeta in ne vpliva na nihanje – to je prvi lastni nihajni način. Nihajni čas prvega lastnega nihanja  $T_1$  je enak nihajnemu času ločenih nihali:  $T_1 = T$ .



Slika 7: Prvi lastni nihajni način dobimo tako, da nihali na začetku odmaknemo za enak kot v istih smereh ( $\phi_1 = \phi_2$ ) in ju hkrati spustimo

**Drugo lastno nihanje:** Nihali odmaknemo za enako velik kot v različnih smereh in ju hkrati spustimo (slika 8): sedaj nihata v nasprotnih smereh, drugo proti drugemu, z enako velikima odmikoma (ker je problem povsem simetričen, ni nobenega razloga, zakaj bi eno izmed nihali nihalo z večjo amplitudo kot drugo). Pri takem nihanju se napetost v vzmeti ves čas spreminja: ko se nihali približujeta, se vzmet stiska; ko se oddaljujeta, se vzmet razteguje. Napeta vzmet deluje na posamezno nihalo s časovno spremenljivim navorom  $M_{vzm}$ :

$$M_{vzm} = Fb = k(x_1 - x_2)b = kb^2(\phi_1 - \phi_2),$$

kjer je  $F$  sila vzmeti,  $k$  je koeficient vzmeti,  $b$  je razdalja med osjo vrtenja in pritrdisčem vzmeti,  $x_1$  in  $x_2$  sta odmika levega in desnega konca vzmeti od ravnovesnega položaja,  $\phi_1$  in  $\phi_2$  pa kota, ki ju tvorita prvo in drugo nihalo z navpičnico. Upoštevali smo, da so odmiki majhni, zato je sila vzmeti v dovolj dobrem približku pravokotna na zveznico med osjo in pritrdisčem vzmeti. Odmike in odklonske kote štejemo kot pozitivne v isti smeri: pri drugem lastnem nihanju, ko nihali nihata v nasprotnih smereh, velja

$$\phi_2 = -\phi_1,$$

zato je navor vzmeti enak:

$$M_{vzm} = 2kb^2\phi_1.$$

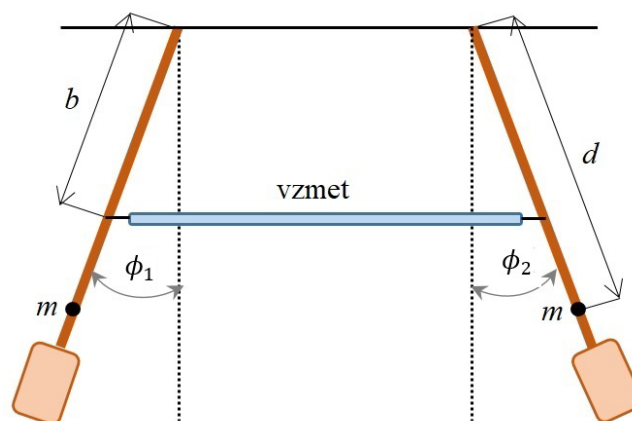
Pri drugem lastnem nihanju ima torej navor sile vzmeti na nihalo enako (linearno) kotno odvisnost kot navor sile teže in tudi kaže ves čas v isto smer kot navor teže – nihalo vedno vrta proti mirovni legi. Rečemo lahko, da vzmet navidezno poveča navor sile teže. Pri splošnem odmiku od ravnovesne lege ( $\phi$ ) je skupni navor ( $M$ ) enak

$$M = mgd\phi + 2kb^2\phi,$$

iz česar dobimo nihajni čas drugega lastnega nihanja:

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgd + 2kb^2}}.$$

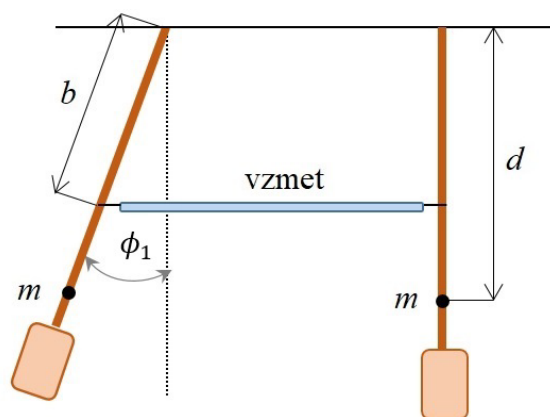
Nihalo niha hitreje, kot če ne bi bilo sklopljeno, saj ga proti mirovni legi vračata dva navora; učinek vzmeti je tem večji, čim trša je vzmet ( $k$ ) in čim dlje od osi vrtenja je vzmet pripeta ( $b$ ).



Slika 8: Drugi lastni nihajni način dobimo tako, da nihali na začetku odmaknemo za enak kot v nasprotnih smereh ( $\phi_2 = -\phi_1$ ) in ju hkrati spustimo

**Utripanje:** V splošnem lahko poljubno nihanje sklopljenih nihala opišemo kot linearno kombinacijo obeh lastnih nihanj, torej kot vsoto obeh nihanj z različnima amplitudama in faznima zakasnitvama. Utripanje kot eno izmed posebnih načinov nihanja dobimo tako, da eno izmed nihala odklonimo, drugo pa zadržimo v mirovni legi, nato pa ju hkrati spustimo (slika 9). Tedaj se odklonjeno nihalo začne vračati proti mirovni legi, napeta vzmet pa premika tudi drugo nihalo: nihajna energija se s prvega nihala prenaša na drugega. Izkaže se, da se čez nekaj časa prvo nihalo umiri, vsa nihajna energija se prenese na drugo telo, ki niha z enako amplitudo, kot je bila začetna amplituda prvega telesa. Potem se vse skupaj ponovi in energija se spet prenaša na prvo nihalo itd. Čas med zaporednima mirovanjema istega nihala v ravnovesni legi imenujemo čas utripanja  $T_u$ . Izkaže se, da je odvisen le od nihajnih časov obeh lastnih nihanj:

$$\frac{1}{T_u} = \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}.$$



Slika 9: Utripanje dobimo tako, da eno od nihala na začetku odmaknemo za kot  $\phi_1$ , drugo pa zadržimo ( $\phi_2 = 0$ )

**Potrebščine:** fizikalni nihali na stojalu, vzmet, štoparica, merilni trak, tehtnica, prižema z definicijsko ploskvijo lege nihala, programska oprema Logger Pro, merilni vmesnik, detektor gibanja Vernier.

#### Navodilo:

1. Za vsako od nihala izmerite nihajni čas. Izmerjeni nihajni čas primerjajte z izračunanim. Tega dobite tako, da izmerite dolžine in mase sestavnih delov nihala, iz česar izračunate količine  $J$ ,  $d$  in  $T$ .

2. Nato nihali obesite tako, da sta osi natančno v sredini podpore. Na vsako nihalo pritrdite kavljia tako, da bosta oba oprijema na isti višini. Nanju obesite vzmet, ki mora biti vodoravna in nenapeta. Izmerite prvi lastni nihajni čas  $T_1$  in ga primerjajte z nihajnim časom, ki ste ga dobili pri neodvisnem nihanju nihala.

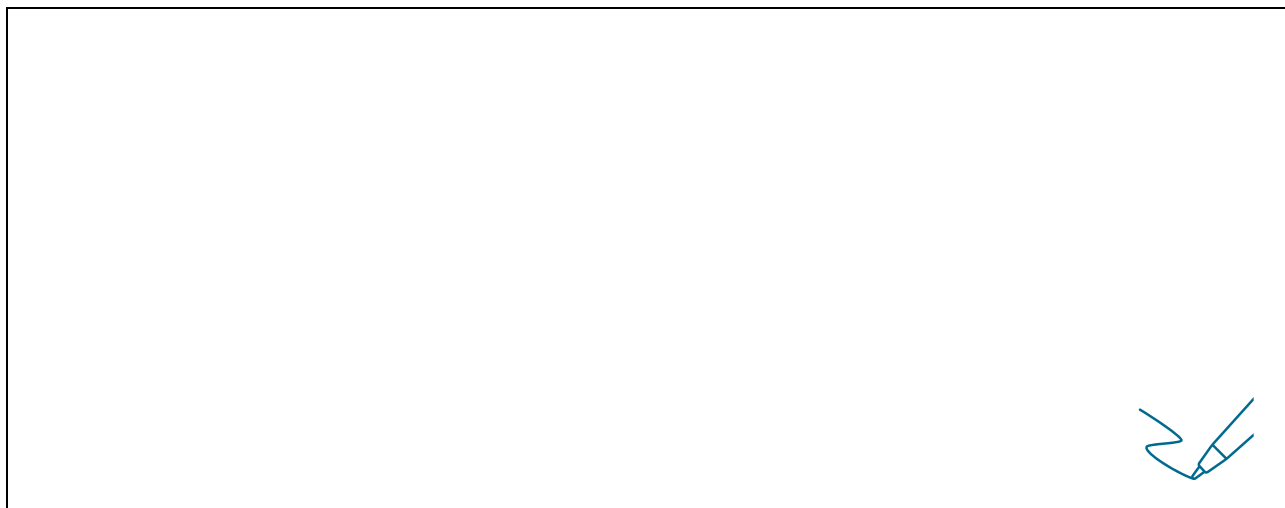
3. Drugi lastni nihajni čas  $T_2$  izmerite tako, da obe nihali odklonite za enak kot v nasprotnih smereh in hkrati spustite. Pričakujemo, da velja  $T_2 < T_1$ . V primeru, da se oba izmerjena lastna nihajna časa ne razlikujeta bistveno, spremenite lego vzmeti na nihalih. Izmerite čas vsaj desetih nihajev, meritev nekajkrat ponovite in zapišite rezultat z ocenjeno napako.

4. Čas utripanja  $T_u$  izmerite tako, da eno nihalo odklonite, drugo pa zadržite v mirovni legi, nato pa ju hkrati spustite. Čas utripanja je čas med zaporednima mirovanjema istega nihala v ravnovesni legi. Meritev nekajkrat ponovite in zapišite rezultat z napako. Rezultat primerjajte z vrednostjo, ki jo izračunate iz izmerjenih lastnih nihajnih časov  $T_1$  in  $T_2$ .

5. Izmerite količini  $k$  in  $b$ , izračunajte čas utripanja in ga primerjajte z izmerjenim.

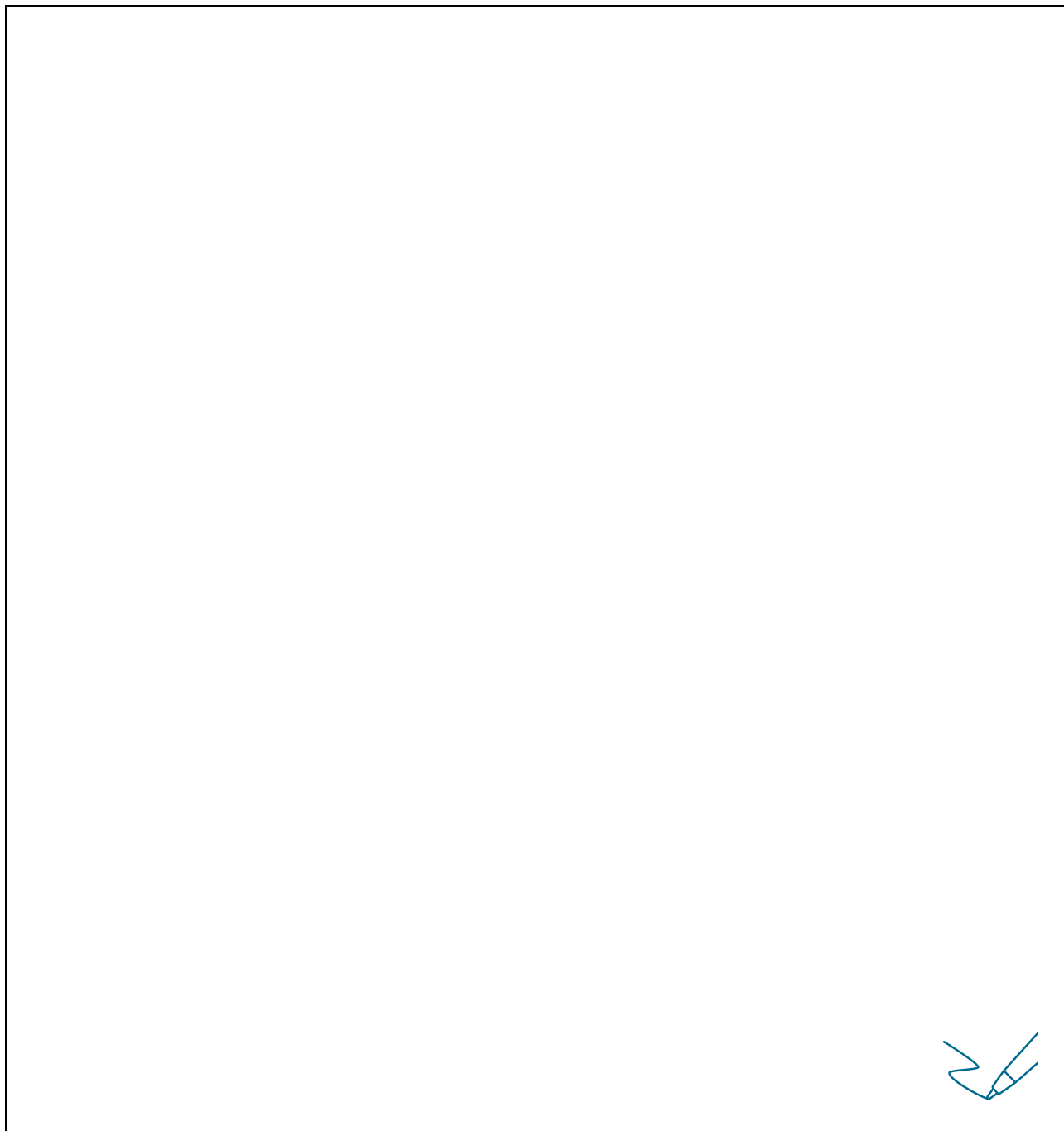
6. Posnemite graf odmika posameznega nihala pri utripanju. Uporabite ultrazvočni detektor gibanja Vernier, merilni vmesnik in program Logger Pro. Graf odmika nihala narišite v poljubnem programu in ga priložite k rezultatu vaj. Na njem nazorno označite čas utripanja in čas med zaporednima zaustavitvama nihala v skrajnih legah. Kolikšen je ta čas in čemu je enak?

7. Izmerite odvisnost časa utripanja  $T_u$  od pritrdišča vzmeti  $T_u = T_u(b)$ . Grafično primerjajte izmerjeno odvisnost s teoretično.



**Priprava na vaje:**

Za sklopljeno nihanje iz dveh enakih nihala ponovite izpeljavo odmika posameznega nihala od ravnovesne lege v odvisnosti od časa (analitična rešitev s predavanj in vaj pri predmetu Nihanje in valovanje).



Z uporabo ustreznega programa (Mathematica, Simulink/Mathlab, Berkeley Madonna ...) izračunajte odmik posameznega nihala od ravnovesne lege v odvisnosti od časa (numerična rešitev sistema diferencialnih enačb). Po opravljenih meritvah izberite v modelu enake parametre, kot ste jih uporabili v eksperimentu, in primerjajte modelsko odvisnost odmika nihala od časa z izmerjeno odvisnostjo.

## 5 Hitrost ultrazvoka

**Naloga:** Izmerite hitrost ultrazvoka v zraku.

Teorija: Zvok se po prostoru prenaša kot nihanje snovi, zato se po vakuumu ne more razširjati. Pri zvočnem valovanju v plinih in kapljevinah nihajo delci snovi le v smeri razširjanja zvoka, zato je tam zvočno valovanje vzdolžno (longitudinalno). Valovna dolžina  $\lambda$ , frekvenca  $\nu$  in hitrost zvočnega valovanja  $c$  so povezane:

$$c = \lambda \nu .$$

Ultrazvok je zvočno valovanje s frekvencami nad **20 kHz**. Zgornja meja frekvence oddajnika je omejena s tehnično zmogljivostjo proizvodnje hitrih mehanskih nihanj. Najvišje dosežene frekvence so okrog **250 MHz**. Tako hitra mehanska nihanja ne morejo prodreti do slišnega centra možganov in jih zato ne moremo slišati, lahko pa jih občutimo kot posebno bolečino, glavobol. Ultrazvok je tudi del hrupa, ki ga proizvajajo hitro se vrteči stroji in naprave. Posebno močan izvor hrupa so raketni motorji.

Ultrazvok zaznavajo in oddajajo nekatere živali. Slišijo ga psi, netopirji se orientirajo in lovijo plen z ultrazvokom podobno kot z radarjem. Ultrazvok, ki ga oddajajo, ima frekvenco od **20 kHz** do **60 kHz**. Delfini in kiti uporabljajo ultrazvok za medsebojno komunikacijo in orientacijo. Vsak izmed njih ima svojo govorico, t. i. ultrazvočne zvone. Ultrazvok, ki ga oddajajo, ima frekvenco **150 kHz**. To je ugodno, saj se ultrazvok v vodi absorbira veliko manj kot običajni zvok.

Navadni zvočniki in mikrofoni niso primerni kot izvori ali detektorji ultrazvoka. V ta namen se največkrat uporabljajo piezoelektrični kristali. To so kristali, na katerih se ob majhnem mehanskem stiskanju ali raztezanju pojavi električna napetost. Zvočno valovanje, ki vpada na piezoelektrični kristal, povzroči izmenično stiskanje in raztezanje kristala s frekvenco, ki je enaka frekvenci vpadnega zvoka. Zaradi tega se na kristalu pojavi izmenična napetost enake frekvence, ki jo lahko nato opazujemo z osciloskopom. Pojav poteka tudi v obratni smeri: ko piezoelektrični kristal priključimo na izmenično napetost, se začne izmenično raztezati in stiskati s frekvenco, ki je enaka frekvenci izmenične napetosti. Nihanje kristala se prenese na okoliško snov in kristal s tem oddaja ultrazvočno valovanje.

**Potrebščine:** ultrazvočni oddajnik in sprejemnik, funkcijski generator (sinusne, žagaste in pravokotne napetosti), osciloskop, merilni trak ali meter, koaksialni vodniki.

### Navodilo:

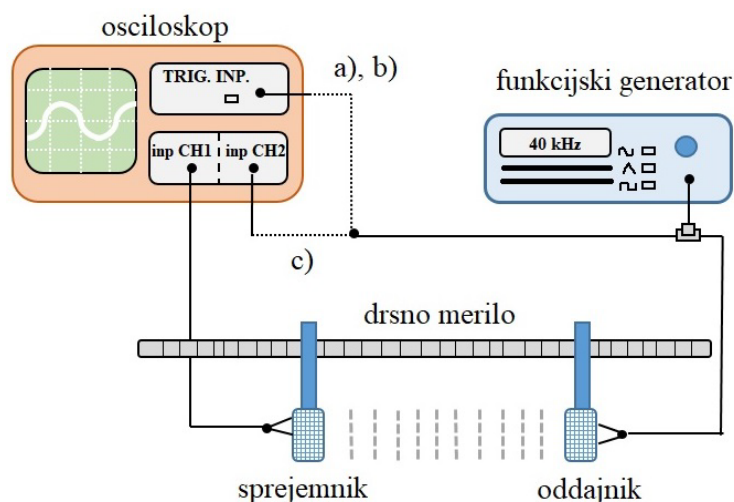
Hitrost ultrazvoka v zraku s pomočjo ultrazvočnega oddajnika in sprejemnika boste izmerili na tri načine:

- a) z zunanjim proženjem osciloskopa,
- b) z notranjim proženjem osciloskopa in
- c) z opazovanjem fazne razlike med signaloma.

Pri vseh treh merilnih načinih boste izračunali hitrost ultrazvoka iz zveze  $c = \lambda v$ .

**a) Zunanje proženje.** Ultrazvočni oddajnik in sprejemnik sta pritrjena na drsno merilo. Oddajnik priključite na funkcijski generator, sprejemnik pa na osciloskop (slika 10). Drugi izhod generatorja povežite na vhod za zunanji prožilni signal osciloskopu (angleško *trigger*). Frekvenco napetosti na oddajniku nastavite na **40 kHz**. Vključite osciloskop in generator. Če je osciloskop pravilno nastavljen, prikaže ob pravilni vezavi sinusno napetost s sprejemnika.

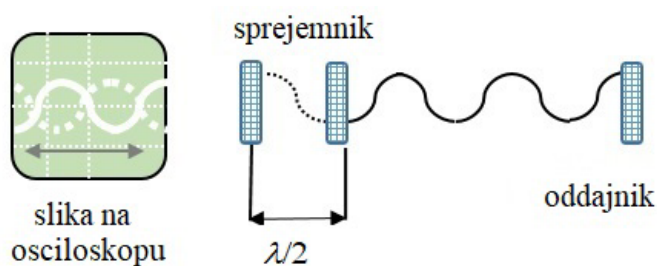




Slika 10: Postavitev eksperimenta

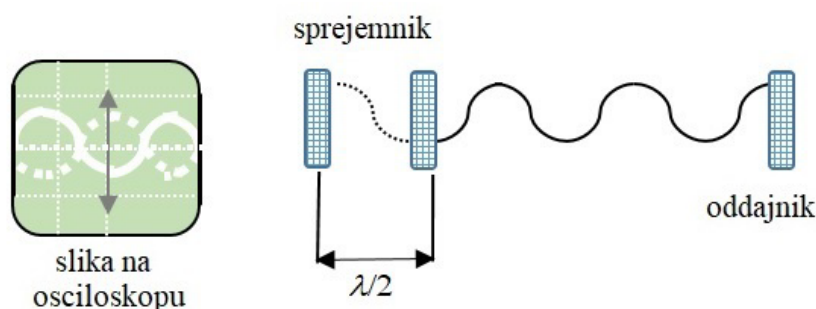
Na sliki 2 je prikazano spreminjanje faze signala na sprejemniku s spreminjanjem razdalje med oddajnikom in sprejemnikom. Prožilec slike osciloskopa je sinhroniziran s signalom na oddajniku; v prikazanem primeru sliko na osciloskopu začne risati, ko napetost na oddajniku doseže vrh nihaja. Če je sprejemnik v tem trenutku na mestu, kjer ima ultrazvočno valovanje dolino, se bo slika na zaslonu začela z dolino (polna črta). Če sprejemnik premaknemo za polovico valovne dolžine, se bo temu ustrezno premaknila tudi slika na osciloskopu (črtkana črta). Podobno se zgodi, če namesto oddajnika premikamo sprejemnik.

Z drsnim merilom spreminjajte razdaljo med oddajnikom in sprejemnikom. Opazili boste, da se s spreminjanjem razdalje premika tudi slika na zaslonu osciloskopa (premikanje v vodoravni smeri). Če razdaljo med oddajnikom in sprejemnikom spremenite za polovico valovne dolžine ultrazvočnega valovanja, se slika na osciloskopu premakne ravno za polovico periode (slika 11). Natančnost meritve povečate tako, da izmerite spremembo razdalje med oddajnikom in sprejemnikom, ki bo enaka spremembi večjega števila valovnih dolžin ultrazvočnega valovanja. Meritev opravite šestkrat in izračunajte hitrost zvoka.



Slika 11: Shematični prikaz spreminjanja faze signala na sprejemniku s spreminjanjem razdalje med oddajnikom in sprejemnikom pri zunanjem proženju osciloskopa

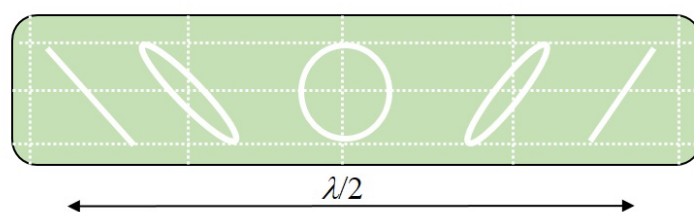
**b) Notranje proženje.** Pri drugem delu vaje izklopite zunanje proženje osciloskopa in ga priključite na notranje. To storite s pritiskom na gumb TRIG. INP., pri čemer lahko ostane vezava enaka. Spet spreminjajte razdaljo med ultrazvočnim oddajnikom in sprejemnikom ter opazujte spreminjanje slike na zaslonu osciloskopa. Zdaj se valovanje ob spreminjanju razdalje med oddajnikom in sprejemnikom spreminja v navpični smeri (slika 12). Izmerite spremembo razdalje med ultrazvočnim sprejemnikom in oddajnikom, ki bo enaka večjemu številu ponovitev slike na zaslonu (amplitudam). Meritev opravite šestkrat in izračunajte hitrost zvoka.



Slika 12: Shematični prikaz spreminjanja faze signala na sprejemniku s spreminjanjem razdalje med oddajnikom in sprejemnikom pri notranjem proženju osciloskopa

**c) Fazna razlika med signaloma.** Pri tretjem delu povežite drugi izhod generatorja na vhod za drugi kanal na osciloskopu (INPUT CH 2). Osciloskop preklpite v način X-Y, (gumb x-y v zgornjem levem delu osciloskopa). Opisani način se uporablja samo takrat, ko je na vhodu signal, saj se lahko drugače uniči notranja fosforna plast zaslona. Na ekranu se vam izriše elipsa. S spreminjanjem razdalje med oddajnikom in sprejemnikom opazite, da se elipsa splošči v črto, nagnjeno v eno smer.

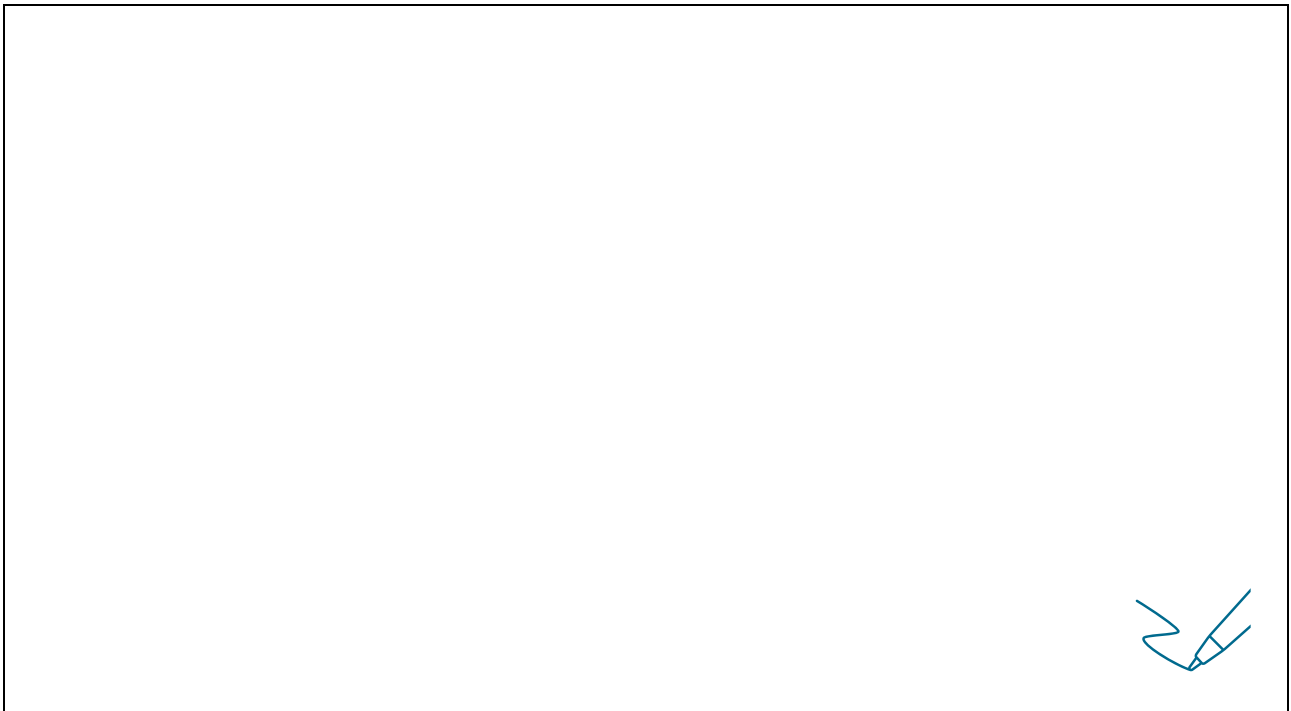
Z nadaljnjim večanjem razdalje črta spet preide v elipso, ta nadalje preide spet v črto, ki pa je nagnjena v drugo smer (slika 13). Sprememba razdalje med oddajnikom in sprejemnikom je enaka eni valovni dolžini natanko tedaj, ko se izriše črta, nagnjena v isto smer. Izmerite razdaljo šestih valovnih dolžin in izračunajte amplitudo. Napravite šest meritev in izračunajte hitrost zvoka.



Slika 13: Shematični prikaz slik na zaslonu osciloskopa med spreminjanjem razdalje med ultrazvočnim oddajnikom in sprejemnikom

**Priprava na vaje:**

Narišite shemo katodne cevi in pojasnite njeno delovanje.



---

---

---

---

Opišite delovanje osciloskopa.

---

---

---

---

---

Opišite posebnosti ultrazvoka.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Kako delujeta ultrazvočni oddajnik in sprejemnik?

---

---

---

---

---

---

---

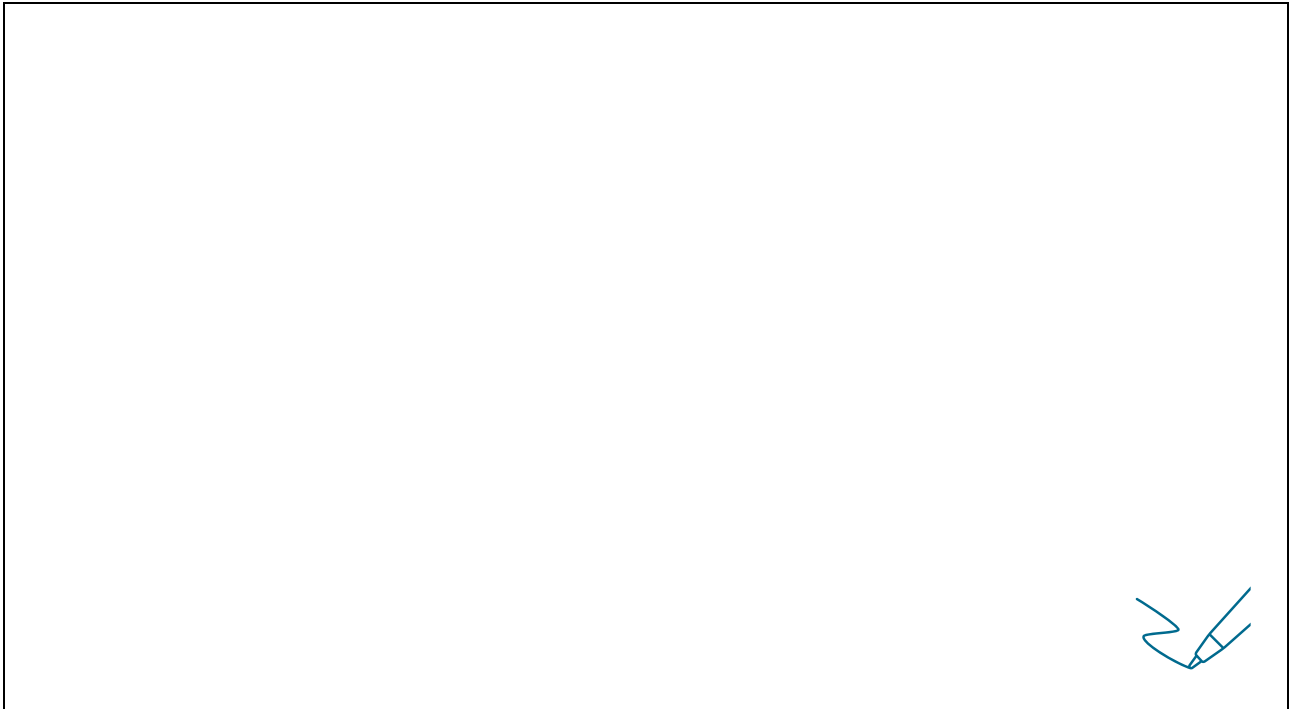
---

---

---

---

Razložite razliko med merilnima načinoma a) in b).



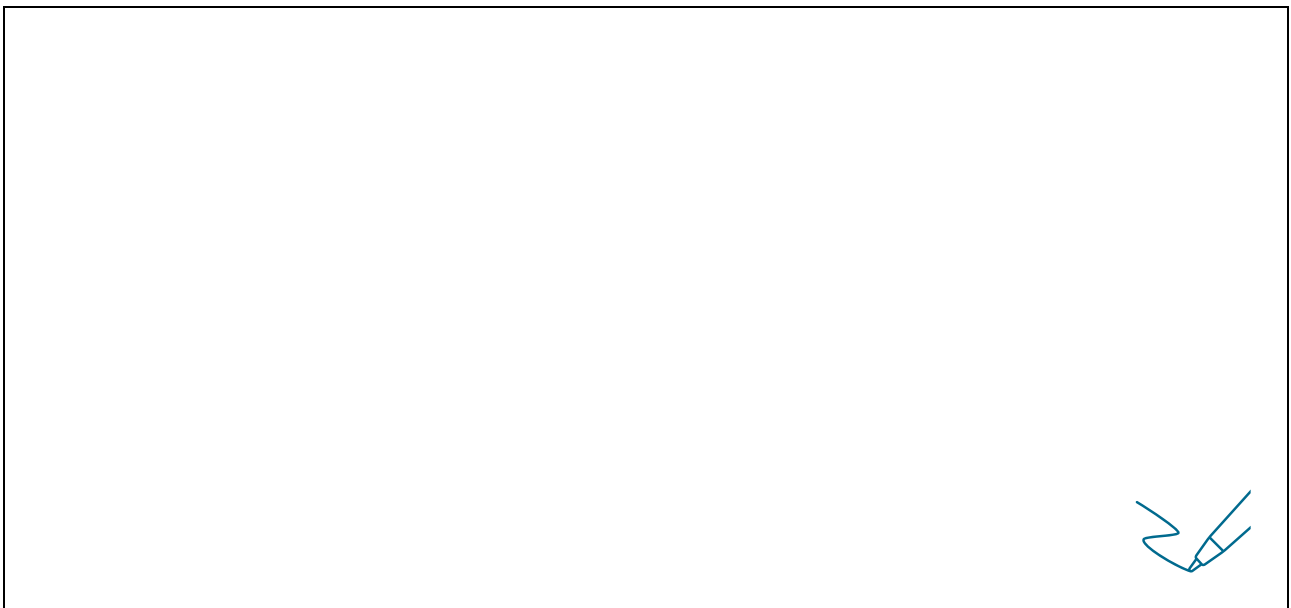
---

---

---

---

Razložite nastanek slik na zaslonu osciloskopa pri merilnem načinu c).





## 6 Nihanje s trenjem

**Naloga:** Posnemite nihanje na zračni drči pri različnih režimih trenja in zračnega upora ter določite velikosti količin, povezanih z izgubo energije (koeficient dušenja zraka, koeficienta trenja in lepenja).

**Teorija:** Vzmetno nihalo, na katero deluje stalna sila trenja, se zaradi izgube energije po določenem času zaustavi. Za lažje razumevanje takšnega nihanja in vloge sile trenja si lahko pomagamo z analogijo z navpičnim nihalom (slika 14) [4].

Ko zasučemo nedušeno vzmetno nihalo iz vodoravne postavitve v navpično, se nihajni čas nihala ne spremeni, spremeni pa se ravnovesna lega nihala. Pri vodoravni postavitvi je ravnovesna lega pri neobremenjeni vzmeti, odmik nihala od ravnovesne lege pa sovpada z raztezkom vzmeti  $x$  (slika 1a). Pri navpični postavitvi nihala sta v ravnovesni legi sila teže nihala ( $F_g$ ) in sila vzmeti ( $F$ ) enako veliki  $F_g = F$  (slika 14a). Ker velja  $F_g = mg$  in  $F = kx$  ( $m$  je masa nihala,  $g$  težni pospešek in  $k$  konstanta vzmeti), je v ravnovesni legi nihala raztezek vzmeti  $\Delta$  enak

$$\Delta = \frac{mg}{k}.$$

Na grafu na sliki 1a sta hkrati prikazana odmika nihala v odvisnosti od časa pri obeh postavitvah nihala in enakem začetnem raztezku vzmeti  $x_0$ . Zaradi spremenjene ravnovesne lege niha navpično nihalo z manjšo amplitudo  $x_0 - \Delta$ .

Pri vodoravnem nihalu s trenjem postavimo izhodišče koordinatnega sistema v lego klade, kjer vzmet ni raztegnjena (slika 14b). Vzmet raztegnemo za  $x_0$  in spustimo, da zaniha. Sila trenja  $F_t$  ima v prvi polovici nihaja podoben učinek kot sila teže  $F_g$  pri navpični postavitvi: nihajni čas ostane nespremenjen, spremeni pa se ravnovesna lega. Ker velja  $F_t = k_t mg$ , kjer je  $k_t$  koeficient trenja, bo raztezek vzmeti v ravnovesni legi enak

$$\Delta = \frac{k_t mg}{k}$$

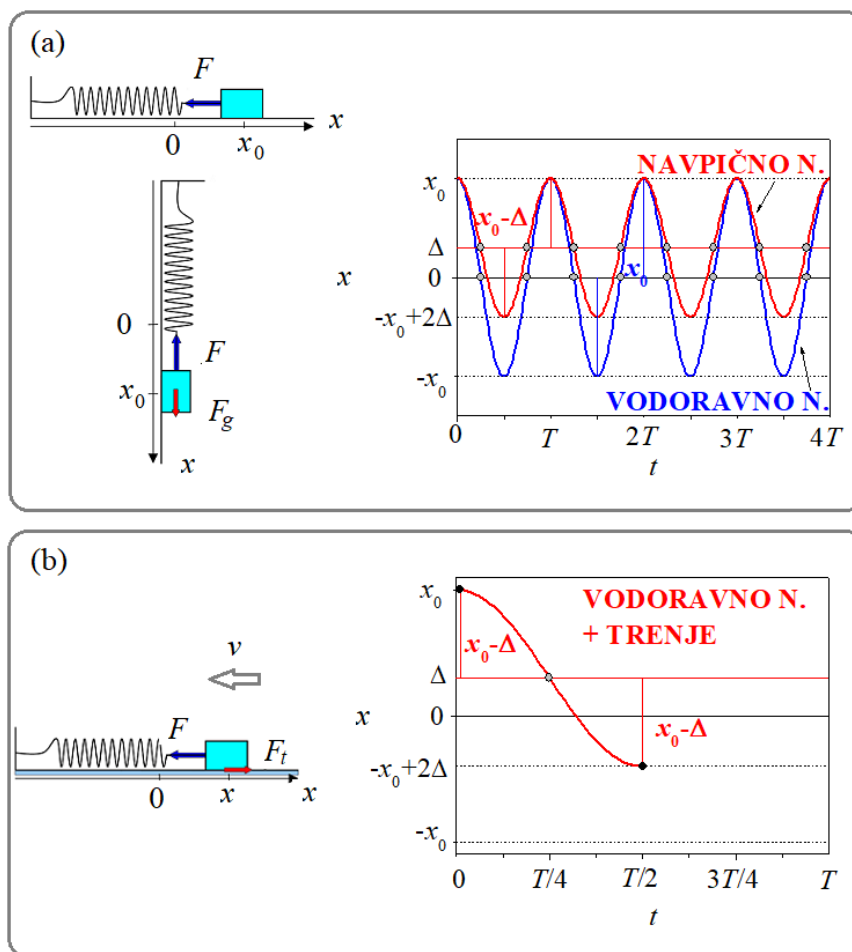
(slika 1b). V naslednji polovici nihaja se smer sile trenja spremeni, zato je nova ravnovesna lega pri skrčku vzmeti  $x = -\Delta$ .

S ponavljajočim spreminjanjem ravnovesnih leg se zmanjšuje amplituda nihanja, skrajne lege nihala pa se s časom zmanjšujejo linearno (slika 15). Pri tem se v vsakem nihaju zmanjša raztezek vzmeti v skrajni legi za vrednost  $4\Delta$ . Iz smernega koeficienta premice ( $k_{pr}$ ), ki povezuje skrajne lege nihala, lahko izračunamo koeficient trenja iz enačbe

$$|k_{pr}| = \frac{4\Delta}{T} = \frac{2k_t g}{\omega\pi},$$

pri čemer smo za nihajni čas  $T$  in krožno frekvenco  $\omega$  uporabili zvezo  $T = 2\pi/\omega$ .





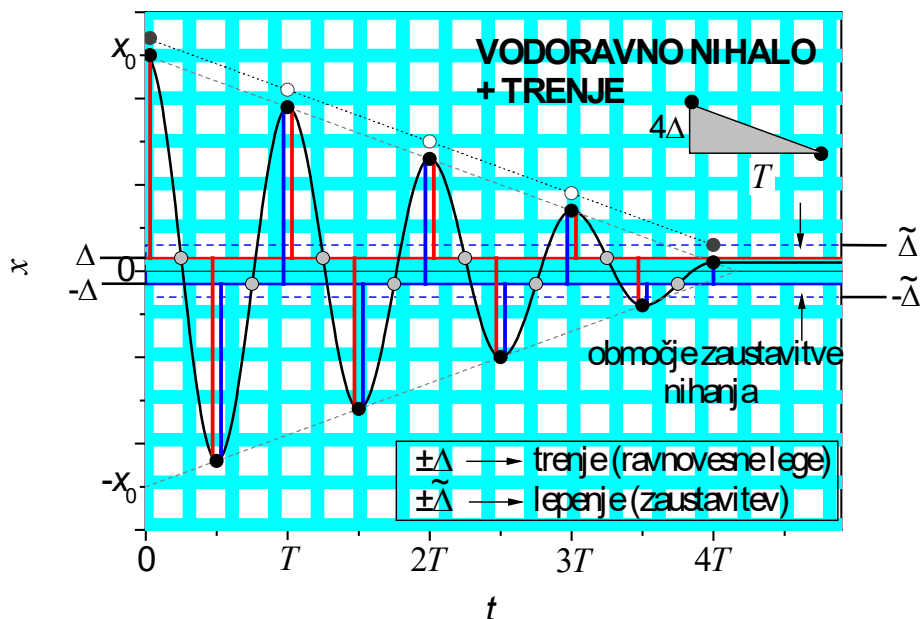
Slika 14: Učinek sile teže pri navpičnem vzmetnem nihalu (a) je podoben učinku sile trenja v prvi polovici nihaja pri vodoravnem nihalu (b)

Nihanje se konča, kadar je v eni od skrajnih leg sile vzmeti ( $F$ ) prvič manjša ali enaka največji vrednosti sile lepenja ( $F_l$ ). Ker velja  $F_l = k_l mg$ , kjer je  $k_l$  koeficient lepenja, je raztezek vzmeti  $\tilde{\Delta}$  v mejnem primeru enak

$$\tilde{\Delta} = \frac{k_l mg}{k} .$$

Nihalo se dokončno zaustavi, ko je v skrajni legi raztezek vzmeti ( $x$ ) prvič znotraj intervala  $x \in [-\tilde{\Delta}, \tilde{\Delta}]$ , to je v razširjenem zasenčenem področju na sliki 2.

S spreminjanjem začetne lege nihala se spreminja tudi lega zaustavljanja. Na sliki 15 so prikazane tudi skrajne lege ob rahlo spremenjeni začetni legi nihala. Ob enako velikem trenju sta obe premici, ki povezujeta skrajne lege, vzporedni. Pri dovolj veliki gostoti meritev lahko raztezek (ali skrček) vzmeti pri največji končni skrajni legi uporabimo kot približek za  $\tilde{\Delta}$  in izračunamo koeficient lepenja  $k_l$ .



Slika 15. Če je sila trenja edina zaviralna sila, se koordinate skrajnih leg nihala zmanjšujejo s časom linearno. Nihalo ima dve izmenjujuči se ravnovesni legi  $x = \pm\Delta$ , zaustavi se v eni od skrajnih leg, za katero velja  $x \in [-\tilde{\Delta}, \tilde{\Delta}]$ .

Pri nihanju najpogosteje predpostavimo, da velja za silo upora  $F_u$  linearni (viskozni) zakon upora  $F_u = -bv$ , pri čemer je  $b$  konstanta dušenja in  $v$  hitrost telesa. V tem primeru se amplituda nihanja  $x'_0$  s časom  $t$  spreminja po enačbi

$$x'_0(t) = x_0 e^{-\beta t},$$

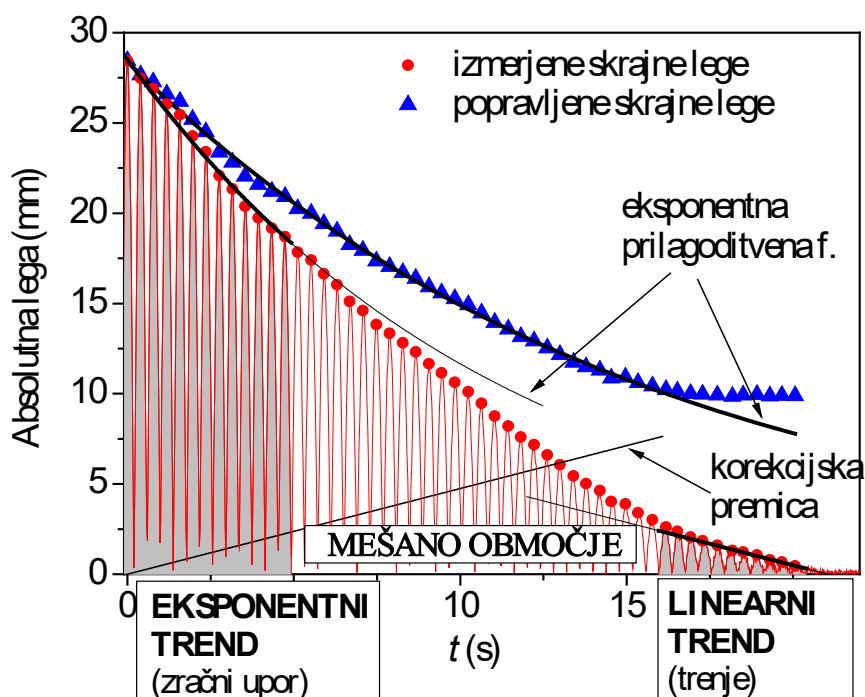
pri čemer je  $x_0$  začetna amplituda ( $t = 0$ ),  $\beta$  pa koeficient dušenja (obratna vrednost karakterističnega časa dušenja). Velja zveza  $\beta = -b/(2m)$ , kjer je  $m$  masa nihala.

V primeru, da nihanje zaustavlja sila upora, za katero velja kvadratni zakon upora  $|F_u| = dv^2$ , kjer je  $d$  konstanta dušenja, enačba nihanja ni analitično rešljiva. Izkaže se, da funkcija

$$x'_0(t) = \frac{x_0}{1 + Dt}$$

dobro opiše spreminjanje amplitude nihanja s časom, pri čemer velja za koeficient dušenja  $D$  zveza  $D = (4dx_0\omega_0)/(3\pi m)$ , kjer je  $\omega_0$  lastna (nedušena) krožna frekvenca nihala. Takšno nihanje ne more biti niti kritično, niti nadkritično dušeno, frekvenca nihanja pa ostane enaka kot pri nedušnem nihanju [5].

V primeru, ko poleg trenja na nihalo deluje še primerljivo velika sila upora zraka, lahko zaradi različnih mehanizmov delovanja obeh sil analitično ločimo njuna učinka (slika 3). Pri večjih amplitudah na začetku nihanja, ko so v povprečju hitrosti nihala večje, prevladuje zaviralni učinek sile upora zraka. Če velja linearni zakon upora, dobimo v tem področju skoraj eksponentno upadanje amplitude nihanja (slika 16). Proti koncu nihanja, pri majhnih amplitudah in hitrostih, postane sila upora zraka zanemarljiva glede na stalno silo trenja. Odmiki nihala se začnejo spreminjati skoraj linearno (slika 16). To področje lahko izkoristimo za določanje koeficienta trenja. Učinek trenja v posnetem grafu lahko (v prvem približku) izničimo tako, da k izmerjenim absolutnim vrednostim skrajnih leg prištejemo premico z enako strmino, kot smo jo uporabili za določanje koeficienta trenja (korekcijska premica). Popravljene skrajne lege sledijo predvidenemu eksponentnemu upadanju na daljšem časovnem intervalu kot izmerjene skrajne lege (slika 16) in tako služijo za natančnejši izračun koeficienta dušenja zraka. Opisani analitični postopek lahko uporabimo zmeraj, ko je meritev obremenjena s sistematično napako, ki se kaže v linearnem upadanju merjene količine pri daljših merilnih časih (npr. nestabilno vpeto nihalo).

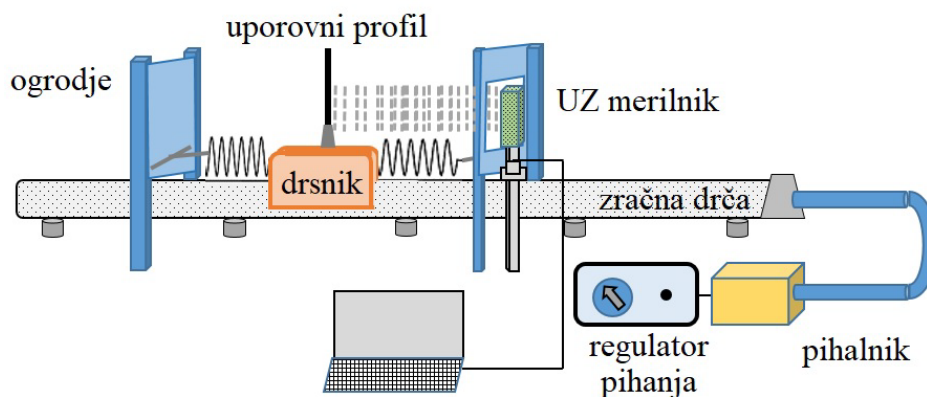


Slika 16: Hkratno merjenje koeficienta trenja in koeficienta upora zraka temelji na ločevanju učinkov obeh pojavov

**Potrebščine:** zračna drča z regulatorjem pihanja, drsnik, vzmeti, uporovni profili in ogrodje iz kartona, programska oprema Logger Pro, merilni vmesnik, detektor gibanja Vernier.

## Navodilo:

1. Postavite eksperiment tako, kot je prikazano na sliki 17. Vzmetno nihalo sestavite iz dveh enakih vzmeti in drsnika, ki lahko niha brez trenja vzdolž zračne drče. Obe vzmeti pripnite simetrično na drsnik in kovinsko ploščico, ki jo prilepite na pripravljeno togo ogrodje (masko) iz kartona. Z ultrazvočnim detektorjem gibanja Vernier, merilnim vmesnikom in programom Logger Pro boste merili časovno odvisnost odmika nihala od ravnovesne lege. Na drsnik pripnite pravokotni uporovni profil iz kartona. Ta služi med merjenjem za ploskovno definicijo gibajočega se telesa (odboj ultrazvoka), hkrati pa lahko z izbiro velikosti profila regulirate upor zraka med nihanjem. Z regulatorjem pihalnika zraka lahko spreminjate pretok zraka skozi zračno drčo in s tem silo trenja med drsnikom in drčo.



Slika 17: Shema postavitve eksperimenta

2. V prvem delu vaje nas zanima nihanje, ki ga zaustavlja samo sila upora zraka. Povečajte pretok zraka skozi drčo tako, da drsnik lahko niha brez zaznavnega trenja in uporabite čim večji uporovni profil. Z majhnimi začetnimi odmiki drsnika in opazovanjem nihanja poiščite ustrezno ravnovesno lego. V primeru, da se ob koncu amplituda nihala več ne zmanjšuje, nekoliko zmanjšajte pretok zraka skozi drčo. Ko se drsnik zaustavi v ravnovesni legi, določite v programu Logger Pro ničelno lego nihala (zaporedje ukazov *Experiment/Zero*). Pred meritvijo izberite v programu največjo dosegljivo časovno gostoto meritev (*Experiment/Data Collection/Sample Rate*). Posnemite nihanje tako, da bo jasno izrisanih vsaj 10 nihajev in meritev shranite.

Analize vseh meritev opravite doma. V analizah uporabite absolutne vrednosti skrajnih leg. Te lahko pridobite s tvorbo nove kolone v programu Logger Pro (*Data/New Calculated Column...*) ali s prenosom podatkov v kakšen drug program (npr. Excel ali Origin).

Z uporabo funkcije *Analyze/ Curve Fit*, vgrajeno v program Logger Pro, določite iz izmerjenega nihanja v prvem delu vaje koeficient upora zraka. Pri tem preverite, kateri od obeh modelov za zračni upor ustrezneje opiše zmanjševanje amplitude nihanja s časom in določite vrednost ustreznega parametra.

3. V drugem delu vaje nas zanima nihanje, ki ga zaustavlja predvsem sila trenja med drsnikom in zračno drčo. Zmanjšajte pretok zraka skozi cev zračne drče do te stopnje, da se nihalo po nekaj nihajih dokončno zaustavi. Uporabite najmanjši uporovni profil in posnemite nihanje podobno, kot ste naredili v prvem delu vaje. Pri istem pretoku zraka in uporovnem profilu opravite vsaj 10 meritve, pri čemer naključno spreminjajte začetno lego nihala, vse meritve pa sproti shranjujte v istem programskem oknu (*Experiment/Store Latest Run*).

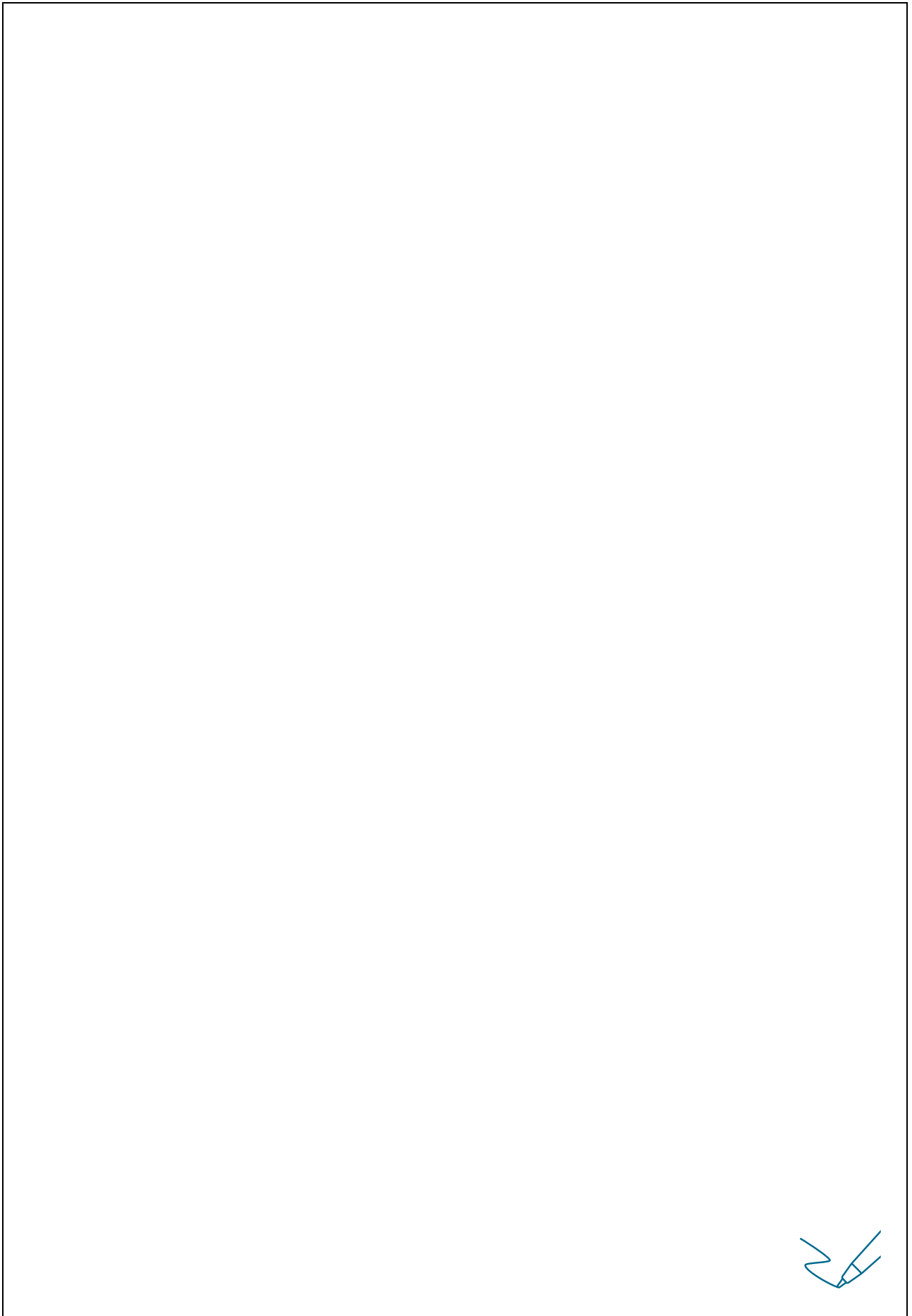
Z analizo spreminjanja skrajnih leg v odvisnosti od časa pri eni od meritve določite koeficient trenja  $k_t$ . Iz razlike med največjo in najmanjšo vrednostjo končne lege določite še koeficient lepenja  $k_l$ .

4. V tretjem delu vaje nas zanima nihanje, ki ga hkrati zaustavljata sila upora zraka in sila trenja. Zmanjšajte trenje med drsnikom in drčo in povečajte zračni upor. Ko dosežeta obe zaviralni sili približno enak velikostni red, posnemite gibanje nihala vse do zaustavljanja (slika 3). Prepričajte se, da padajo koordinate skrajnih leg proti koncu nihanja linearno in da se nihalo popolnoma zaustavi. Če to ne velja, ponovite meritve pri zmanjšanem pretoku zraka.

Z analizo dobljenega grafa določite koeficient trenja  $k_t$  in koeficient zračnega upora  $b$ . Pri analizi posvetite posebno pozornost številu uporabljenih skrajnih leg ob koncu nihanja, iz katerih določate trenje.

5. Nihalo razstavite, določite konstanto posamezne vzmeti  $k_0$  ( $k = 2k_0$ ) in maso drsnika z vsemi dodatki ( $m$ ). Primerjajte izmerjeni nihajni čas nihala z izračunanim.





**Priprava na vaje:**

Razložite razliko med trenjem in lepenjem.

---

---

---

---

---

---

---

---

Razložite razliko med linearnim in kvadratnim zakonom upora za gibanje telesa v tekočini.

---

---

---

---

---

---

---

---

Vaja je kompleksna, zato skrbno preberite teoretični del navodil. V primeru nejasnosti pred prihodom na vajo pripravite ustrezna vprašanja za mentorja vaje oz. za asistenta.

Z merilnim programom Logger Pro ste bili seznanjeni v uvodnih predavanjih, takrat ste dobili tudi namestitveni program za domačo uporabo. Ponovite osnove delovanja programa, predvsem risanje grafov, tvorbo novih stolpcev, ki temeljijo na izračunanih vrednostih (*Data/New Calculated Column*), in prilagajanje analitičnih funkcij izmerjenim vrednostim (*Analyze/Curve Fit*).



## 7 Resonanca

**Naloga:** Izmerite vsiljeno nihanje vozička in narišite resonančno krivuljo.

**Teorija:** Ko deluje na nihalo zunanja zaviralna sila, se mehanska energija nihala ne ohranja, nihanje je dušeno. Če želimo preprečiti zmanjševanje energije nihala, je treba dovajati energijo. To lahko storimo s periodično zunanjo silo  $F(t)$ , ki poganja nihalo. V tem primeru je nihanje vsiljeno. Pri vzmetnem nihalu velja:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F(t),$$

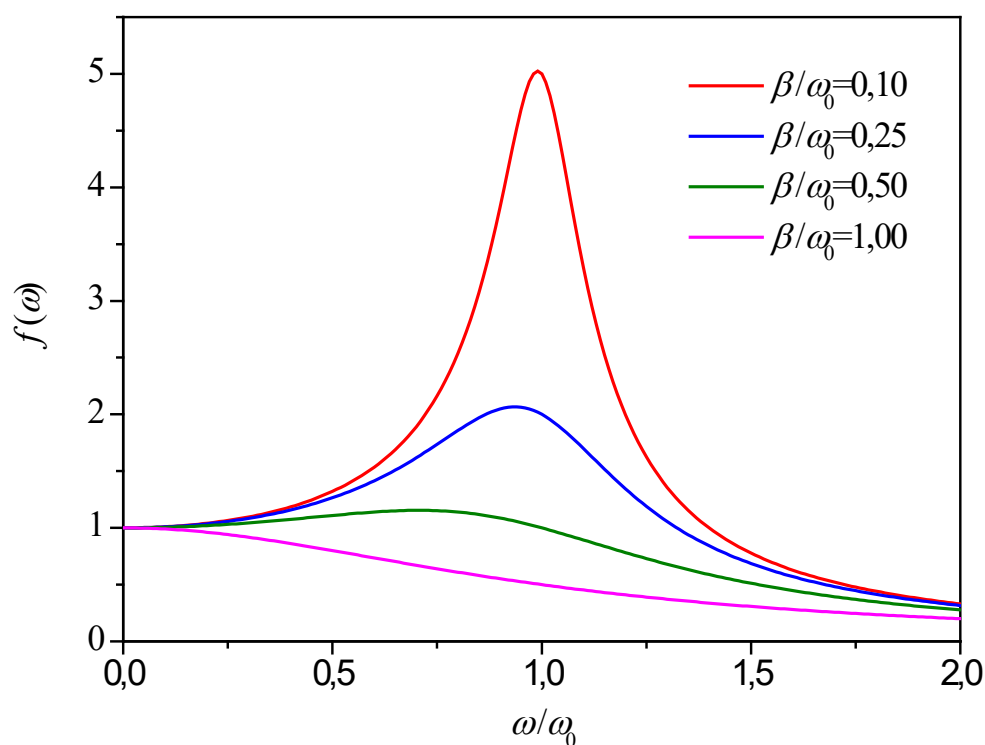
pri čemer je  $m$  masa nihala,  $b$  konstanta dušenja in  $k$  koeficient vzmeti. Pri tem smo privzeli, da velja za silo upora  $F_u$  linearni zakon upora  $F_u = -bv$ , kjer je  $v$  hitrost nihala. Za koeficient dušenja  $\beta$  potem velja  $\beta = -b/2m$ .

Nihalo se na periodično zunanjo silo odzove tako, da po določenem času niha harmonično s krožno frekvenco  $\omega$ , s katero mu vsiljujemo nihanje (rešitev zgornje diferencialne enačbe). Amplituda vsiljenega nihanja je močno odvisna od vsiljene krožne frekvence. Za relativno amplitudo  $f$  velja zveza:

$$f(\omega) = \frac{1}{\sqrt{((\omega/\omega_0)^2 - 1)^2 + 4(\beta/\omega)^2(\omega/\omega_0)^2}}.$$

Graf relativne amplitude  $f$  v odvisnosti od krožne frekvence  $f = f(\omega)$  kaže resonančno krivuljo (slika 1). Amplituda je največja približno pri lastni krožni frekvenci nedušenega nihala  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ , takrat je nihalo v resonanci.

Na sliki 18 so prikazane resonančne krivulje za štiri različne vrednosti razmerja koeficienta dušenja  $\beta$  glede na krožno frekvenco  $\omega_0$  nedušenega nihanja. Najbolj priostrena je krivulja z najmanjšim razmerjem  $\beta/\omega_0$ , njen maksimum pa je višji kot pri ostalih treh funkcijah. Če je faktor dušenja dovolj majhen, je vrednost vsiljene krožne frekvence v resonanci skoraj enaka lastni krožni frekvenci nedušenega nihala  $\omega/\omega_0 \sim 1$ .

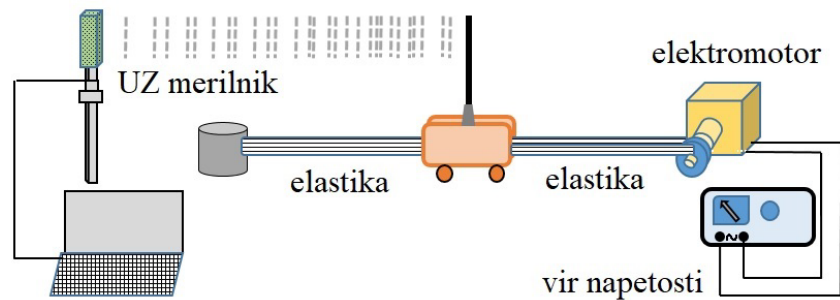


Slika 18: Odvisnost relativne amplitude ( $f$ ) od frekvence vsiljenega nihanja ( $\omega$ ) pri različnih (relativnih) stopnjah dušenja ( $\beta/\omega_0$ )

**Potrebščine:** voziček, elektromotor, elastika, merilni sistem Vernier, program Logger Pro, program za risanje grafov.

### Navodilo:

1. Z merilnim sistemom Vernier in programom Logger Pro izmerite najprej lastno (dušeno) frekvenco nihala  $\nu$  (slika 19). To naredite tako, da pri izključenem elektromotorju zanihate voziček in posnamete graf odmika vozička v odvisnosti od časa za večje število nihajev. Z analizo grafa določite koeficient dušenja  $\beta$  in relativno stopnjo dušenja  $\beta/\omega_0$ .



Slika 19: Shema eksperimenta

2. Vključite elektromotor in opazujte vsiljeno nihanje vozička. Z merilnim sistemom Vernier najprej izmerite amplitudo nihanja vozička pri frekvenci, ki je mnogo manjša od lastne frekvence (pri najmanjši možni frekvenci elektromotorja, pri kateri voziček še niha). Nato zelo počasi povečujte frekvenco in z merilnikom merite amplitudo nihanja v odvisnosti od frekvence vsiljevanja. Preden izvedete posamezno meritev, počakajte nekaj časa, da se zadušijo nihanja, ki nastanejo med spreminjanjem frekvence (prehodni pojavi).

3. Večje število meritev omogoča izris kvalitetnejše resonančne krivulje. Opravite meritev vsaj pri desetih različnih frekvencah. Uporabite ustrezno prilagoditveno funkcijo (Lorentzova funkcija) in z računalnikom narišite resonančno krivuljo, ki se najbolj prilagaja izmerjenim vrednostim. Primerjajte koeficient dušenja, ki ga določite iz prilagoditvene funkcije (fit) z izmerjeno vrednostjo pri lastnem nihanju nihala.

### Priprava na vaje:

Zapišite izraz za odvisnost odmika nihala  $x$  od časa  $x(t)$  pri vsiljenem nihanju in poimenujte količine, ki nastopajo v njej (splošna rešitev zgornje diferencialne enačbe).



---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



Na spletu poiščite vsaj eno animacijo vsiljenega nihanja in jo ovrednotite (izgled, nazornost, oblike grafov, možnost spreminjanja parametrov, možnost simulacije meritve in izvoza podatkov).



---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## 8 Stoječe valovanje

### 1. del: VRVICA

**Naloga:** Opazujte stoječe transversalno (prečno) valovanje na vrvici in izmerite hitrost valovanja v odvisnosti od napetosti vrvice.

**Teorija:** Če vrvici na enem krajišču vsiljujemo nihanje v prečni smeri, se po njej širi transversalno valovanje. Na drugem krajišču se valovanje odbije. Vpadno in odbito valovanje interferirata – na vrvici nastane stoječe valovanje. Razdalja med dvema vozloma je enaka polovici valovne dolžine  $\lambda/2$ , zato lahko valovno dolžino izmerimo. Če poznamo še frekvenco nihanja  $\nu$ , lahko izračunamo hitrost transversalnega valovanja  $c$  po vrvici:

$$c = \lambda\nu .$$

Izkaže se, da je hitrost transversalnega valovanja po vrvici odvisna od sile  $F$ , s katero je vrvica napeta, in od dolžinske gostote vrvice  $m/l$ :

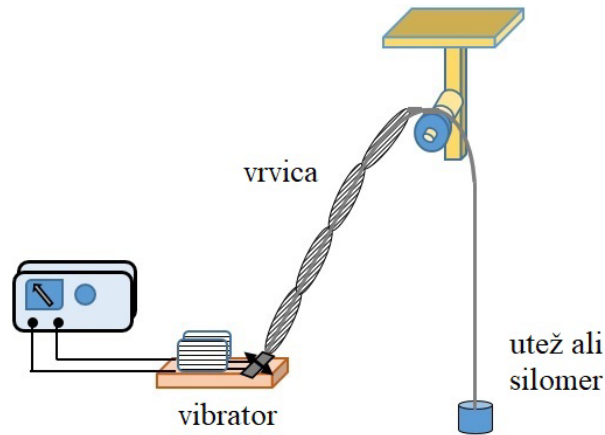
$$c = \sqrt{Fl/m} .$$

Če izmerimo silo, maso in dolžino vrvice, lahko hitrost valovanja tudi izračunamo.

**Potrebščine:** transformator, vezne žice, vibrator, škripec, vrvica, silomer, uteži, merilo dolžin.

**Navodilo:**

1. Železni jeziček pred elektromagnetom niha z dvakratno frekvenco izmenične napetosti, tj. 100 Hz. Spreminjajte napetost vrvice in opazujte nastanek stoječega valovanja (slika 20).



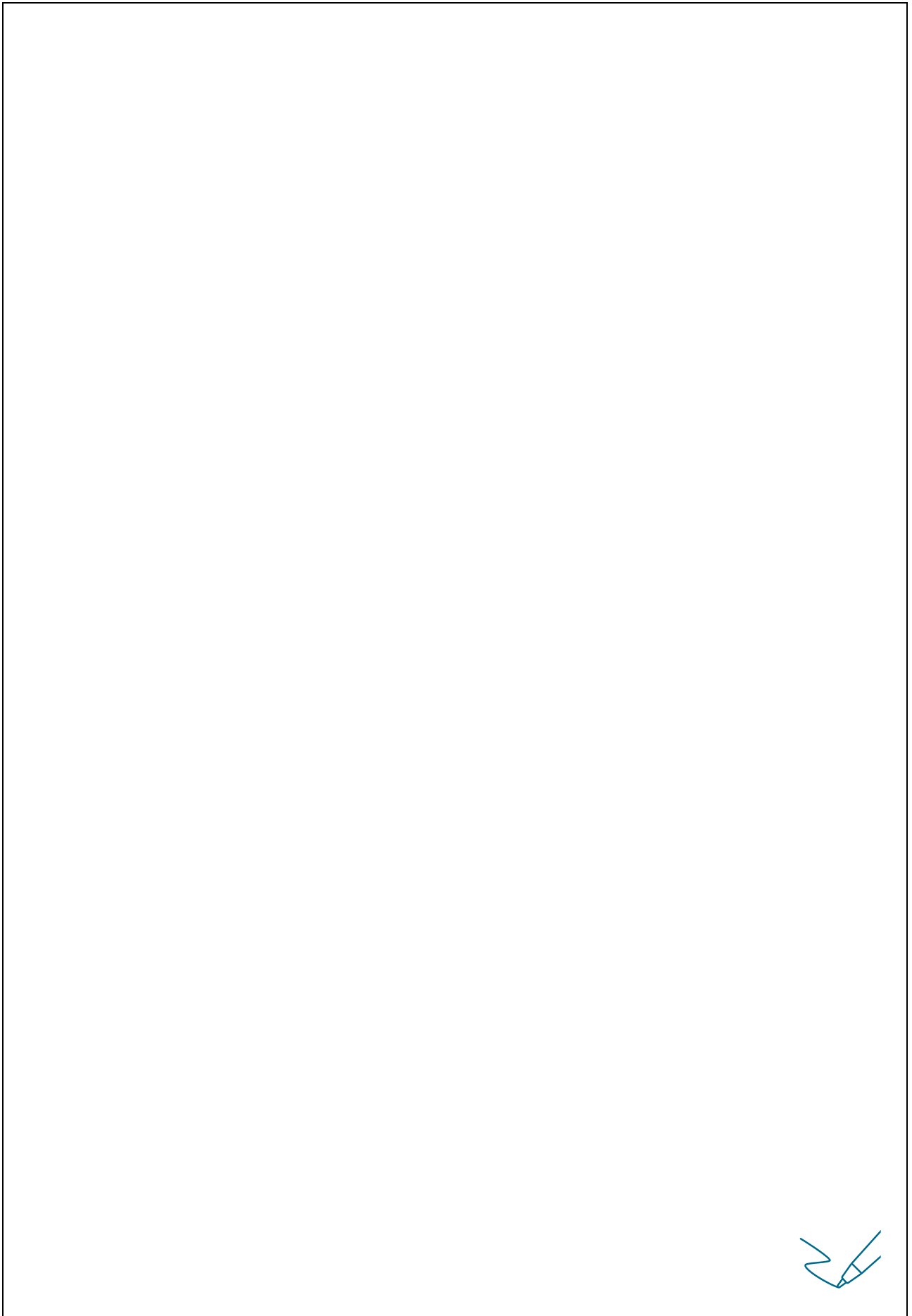
Slika 20: Shema postavitve eksperimenta

Ko je stoječe valovanje stabilno in se slika več ne spreminja, izmerite silo in valovno dolžino. Namesto silomera lahko uporabite za napenjanje vrvice različne uteži ali predmete z znano težo. Meritev opravite pri različnem številu vozlov med obema koncema vrvi (1, 2, 3, 4 in 5 vmesnih vozlov).

2. Narišite graf  $c^2 = c^2(F)$ , pri čemer merske točke v grafu označite tako, da bodo razvidne njihove napake.

3. Izmerite vrednost  $m/l$  za vrvico in pri vseh vrednostih  $F$  izračunajte hitrost valovanja. Hitrosti zapišite z napakami in grafično primerjajte izračunane vrednosti z izmerjenimi.





## 2. del: VZMET

**Naloga:** Opazujte stoječe longitudinalno (vzdolžno) valovanje na vzmeti in izmerite hitrost valovanja v odvisnosti od dolžine vzmeti.

**Teorija:** Če krajišče vijačne vzmeti nihamo v vzdolžni smeri, se po vzmeti širi longitudinalno valovanje, pri katerem opazujemo zgoščine in razredčine. Valovanje se na drugem krajišču odbije. Ker vpadno in odbito valovanje interferirata, dobimo stoječe valovanje. Na nekaterih mestih vzmet miruje. To so vozli. V sredini med dvema vozloma vzmet najbolj niha. To je hrbet stoječega valovanja. Podobno kot pri stojećem valovanju na vrvici je razdalja med dvema vozloma enaka polovici valovne dolžine  $\lambda/2$  in jo lahko izmerimo. Če poznamo še frekvenco nihanja  $\nu$ , lahko hitrost valovanja po vzmeti  $c$  izračunamo iz

$$c = \lambda \nu .$$

Hitrost longitudinalnega valovanja po palici/žici je odvisna od prožnostnega modula  $E$  in gostote snovi  $\rho$ :  $c = E/\rho$ . Iz te enačbe lahko z uporabo ustrezne analogije izpeljemo tudi hitrost longitudinalnega valovanja po vijačni vzmeti. S primerjavo Hookovega zakona za vzmet  $F = kx$  ( $F$  je sila v vzmeti,  $k$  je konstanta vzmeti,  $x$  je raztezek vzmeti) in Hookovega zakona za palico  $F/S = kx/l$  ( $S$  je presek palice,  $E$  je prožnostni modul snovi,  $x$  je raztezek palice,  $l$  je dolžina palice), lahko uvedemo (efektivni) prožnostni modul za vzmet  $E = kl/S$ , pri čemer je zdaj  $l$  dolžina vzmeti in  $S$  njen presek. Uporabimo še (efektivno) gostoto vzmeti  $\rho = m/V = m/(lS)$  ( $m$  je masa vzmeti,  $V$  pa njena prostornina) in dobimo za hitrost valovanja po vijačni vzmeti:

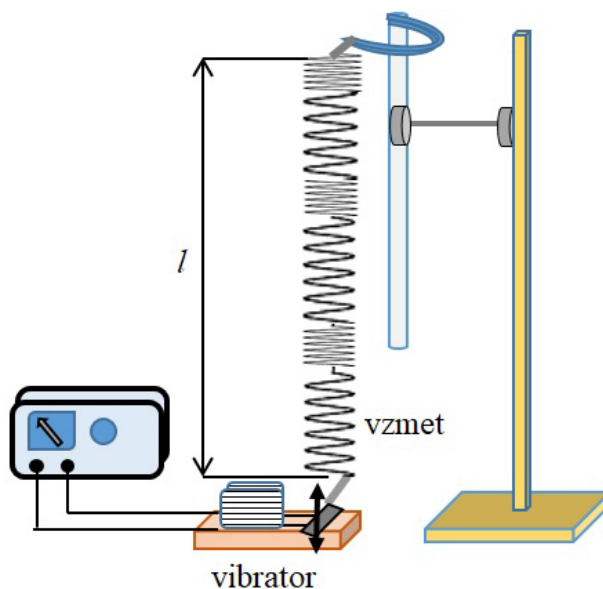
$$c = l\sqrt{k/m} .$$

Poudarimo, da je  $l$  celotna dolžina napete vzmeti.

**Potrebščine:** transformator, vezne žice, vibrator, vzmeti, uteži, ravnilo.

**Navodilo:**

1. Železni jeziček niha s frekvenco 100 Hz. Spreminjajte raztezek vzmeti in opazujte nastanek stoječega valovanja (slika 21). Ko je stoječe valovanje stabilno in se slika več ne spreminja, izmerite razdaljo med prvim in zadnjim vozlom ter izračunajte valovno dolžino, iz nje pa hitrost valovanja. Meritev opravite pri različnih dolžinah vzmeti.



Slika 21: Shema postavitve eksperimenta,  $l$  je dolžina napete vzmeti

2. Izmerite koeficient vzmeti  $k$  in maso vzmeti  $m$  ter pri vseh izmerjenih vrednostih  $l$  izračunajte hitrost valovanja po vzmeti. Hitrosti zapišite z napakami in grafično primerjajte izračunane vrednosti z izmerjenimi.

**Priprava na vaje:**

Razložite pogoje za nastanek stoječega prečnega valovanja.

---



---



---



---





Na spletu poiščite vsaj eno animacijo stoječega valovanja in jo ovrednotite (izgled, nazornost, oblike grafov, možnost spreminjanja parametrov, možnost simulacije meritve in izvoza podatkov).



---

---

---

---

---

---

---

---

---

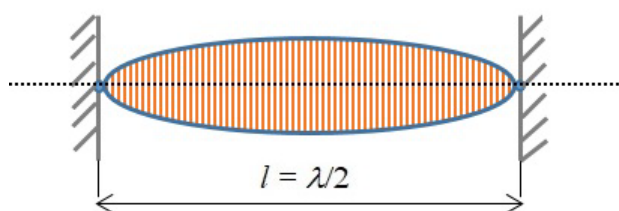
---

## 9 Frekvenca in hitrost zvok

### 1. del: FREKVENCA

**Naloga:** S primerjalno metodo izmerite frekvenco zvoka, ki ga oddajajo glasbene vilice.

**Teorija:** Pri brenkanju po strunah kitare hitro ugotovimo, da je frekvenca zvoka odvisna od napetosti, dolžine strune in debeline strune. Na obeh krajiščih vpeta struna niha z osnovno lastno frekvenco tako, da med krajiščema ni nobenega vozla (slika 22).



Slika 22: Nihanje strune z osnovno frekvenco;  $l$  je dolžina strune,  $\lambda$  pa valovna dolžina

Dolžina strune ( $l$ ) je enaka polovici valovne dolžine ( $\lambda$ ). Frekvenca nihanja strune ( $\nu$ ) je:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2l} = \frac{\sqrt{F/(\rho S)}}{2l},$$

pri čemer je  $F$  sila, s katero je struna napeta,  $\rho$  gostota in  $S$  presek strune. Pri tem smo upoštevali, da je hitrost transverzalnega valovanja po struni:

$$c = \sqrt{\frac{F}{m/l}} = \sqrt{\frac{F}{\rho S}}.$$

Če spreminjamo samo dolžino strune, je frekvenca zvoka obratno sorazmerna z dolžino:

$$\frac{\nu_1}{\nu_2} = \frac{l_2}{l_1}.$$

To razmerje lahko izkoristimo za določanje neznane frekvence glasbenih vilic. Človek lahko loči dva tona ali zvena celo v primeru, ko se frekvenci razlikujeta za manj kot 1 Hz.

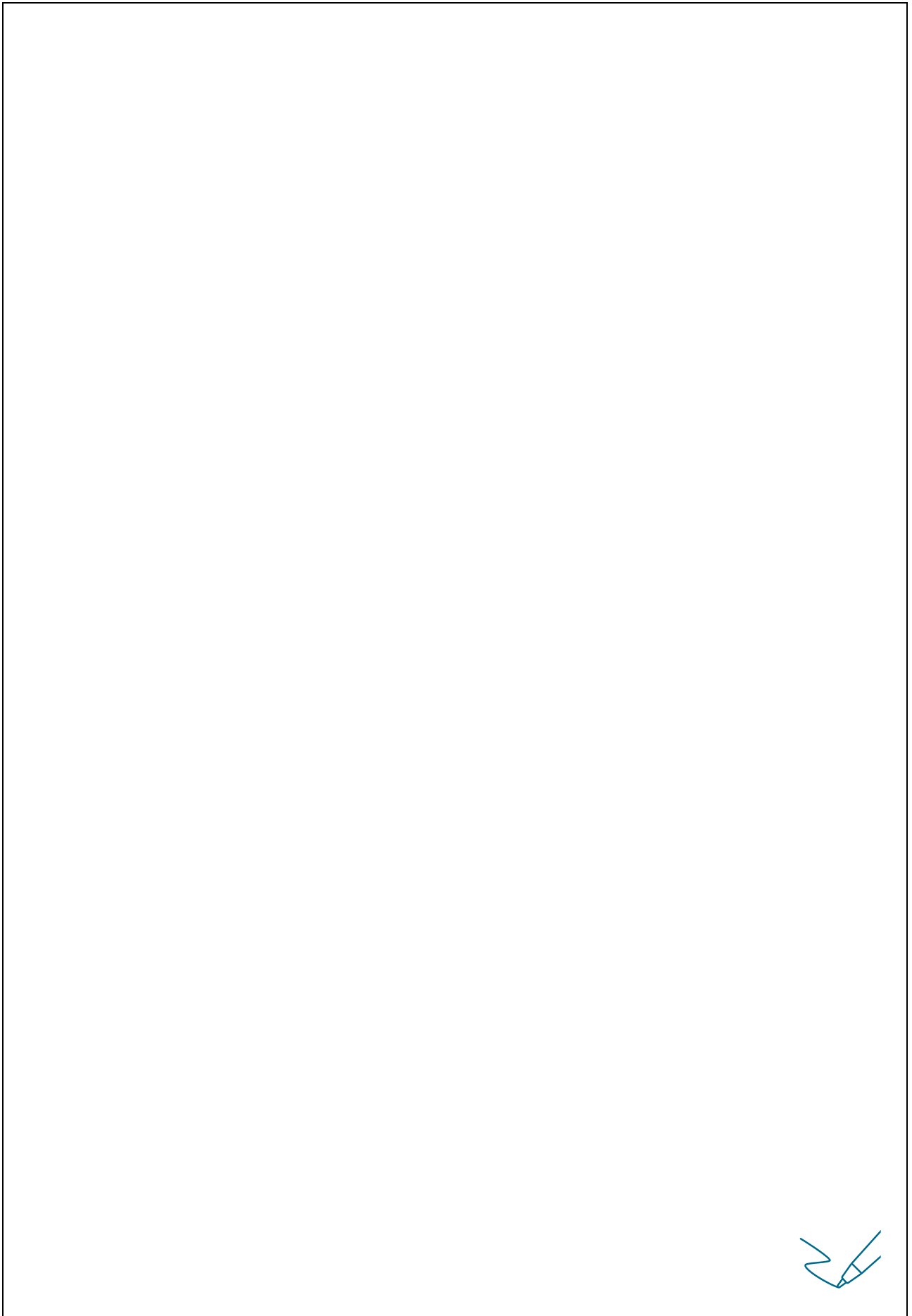
**Potrebščine:** frekvenčni generator z zvočnikom, glasbene vilice z znano frekvenco, glasbene vilice z neznano frekvenco, strunjak, meter.

### Navodilo:

1. Neznano frekvenco izmerimo tako, da jo primerjamo s frekvenco zvoka iz zvočnika. Zvočnik napajajte s frekvenčnim generatorjem z zvezno spremenljivo frekvenco. Frekvenco spreminjajte tako dolgo, dokler se zvok iz zvočnika ne bo ujema z zvokom glasbenih vilic. Ko je frekvenca zvoka iz zvočnika blizu frekvenci glasbenih vilic, slišite utripanje. Čim bolj se frekvenci ujemata, tem daljši je čas enega utripanja. Pojav izkoristite za natančno določitev neznane frekvence. Meritev ponovite trikrat.

2. Neznano frekvenco izmerimo z uporabo glasbenih vilic z znano frekvenco in s primerjavo z zvokom strune s spremenljivo dolžino. Glasbene vilice z višjo frekvenco uglasite na manjšo dolžino strune, vilice z nižjo frekvenco pa na večjo dolžino. Izmerite obe dolžini in iz razmerja  $\nu_1/\nu_2 = l_2/l_1$  izračunajte neznano frekvenco. Meritev šestkrat ponovite. Izmerjeno frekvenco zapišite z napako in jo primerjajte s frekvenco, ki ste jo izmerili s frekvenčnim generatorjem.





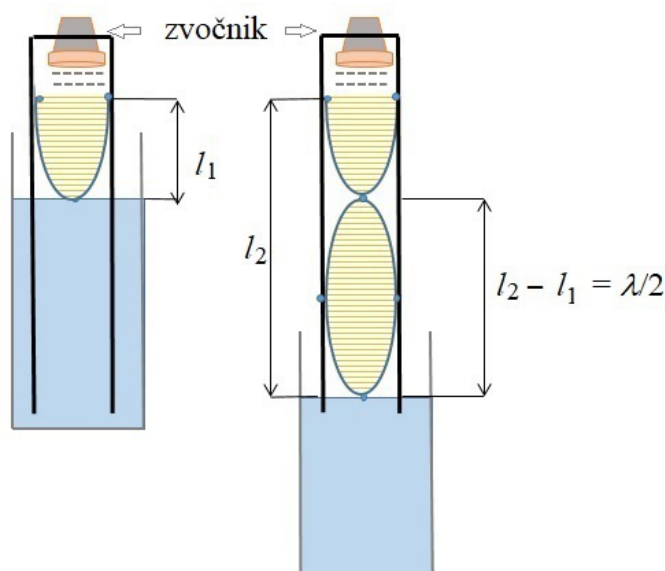
## 2. del: HITROST

**Naloga:** Iz stoječega valovanja v cevi izmerite valovno dolžino in hitrost zvoka v zraku.

**Teorija:** Z zvočnikom, ki je priključen na frekvenčni generator, vsiljujemo nihanje stolpcu zraka v cevi. Po cevi se širi valovanje, ki se na dnu odbije. Ker se sestavita vpadno in odbito valovanje, dobimo v cevi stoječe valovanje. S spreminjanjem dolžine ( $l$ ) stolpca zraka v cevi spreminjamo lastno frekvenco stolpca zraka. Ko je lastna frekvenca enaka vsiljeni, dobimo resonanco oz. slišimo ojačan zvok. Takrat velja:

$$l = (2N - 1)(\lambda/4),$$

kjer je  $N$  naravno število,  $\lambda$  pa valovna dolžina (slika 23).



Slika 23: Stoječe zvočno valovanje pri dveh dolžinah stebra zraka v cevi

Razlika dveh sosednjih dolžin, pri katerih slišimo ojačan zvok, je enaka polovici valovne dolžine:

$$l_2 - l_1 = \lambda/2.$$

Izmerimo obe dolžini in izračunamo hitrost zvoka v zraku:

$$c = \lambda v = 2(l_2 - l_1)v.$$

Za hitrost zvoka v zraku velja:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa RT}{M}},$$

kjer je  $\kappa$  razmerje specifičnih toplot pri stalnem tlaku ( $c_p$ ) in stalni prostornini ( $c_V$ ):

$\kappa = c_p/c_V = 1,40$  (v zraku prevladujejo dvoatomne molekule),  $R = 8310 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$  je plinska konstanta,  $T$  je absolutna temperatura,  $M = 29 \text{ kg}/\text{kmol}$  pa relativna molekulska masa (v zraku je približno  $4/5$  dušika in  $1/5$  kisika).

**Potrebščine:** frekvenčni generator, zvočnik, resonančna cev z dolžinskim merilom, cev z vodo.

#### Navodilo:

1. Izmerite temperaturo zraka v prostoru. Dolžino stebra zraka boste spreminjali s potapljanjem potopne cevi v zunanjo posodo z vodo. Če boste uporabili svežo vodo iz pipe, počakajte nekaj časa, da se temperatura vode in zraka nad njo izenači s temperaturo zraka v okolici.
2. Pri treh različnih frekvencah med 200 Hz in 600 Hz poiščite resonančne dolžine stebra zraka. Poleg osnovnega nihanja (slika 2, levo) potrebujete za večjo zanesljivost izračunov še vsaj prvo vzbujeno nihanje (slika 2, desno). Pri najnižji frekvenci poskusite poiskati še dolžino za drugo lastno nihanje. Slednje lahko služi za preizkus natančnosti uporabljene metode. Iz meritev izračunajte hitrost zvoka v zraku.
3. Iz enačbe za hitrost zvoka v zraku izračunajte temperaturo zraka in jo zapišite z napako. Izračunano temperaturo v okviru napake primerjajte z izmerjeno temperaturo zraka v prostoru.



**Priprava na vaje:**

Razložite delovanje frekvenčnega generatorja.

---

---

---

---

---

---

Razložite delovanje zvočnika.

---

---

---

---

---

---

Na spletu poiščite podatke o občutljivosti človeškega ušesa.

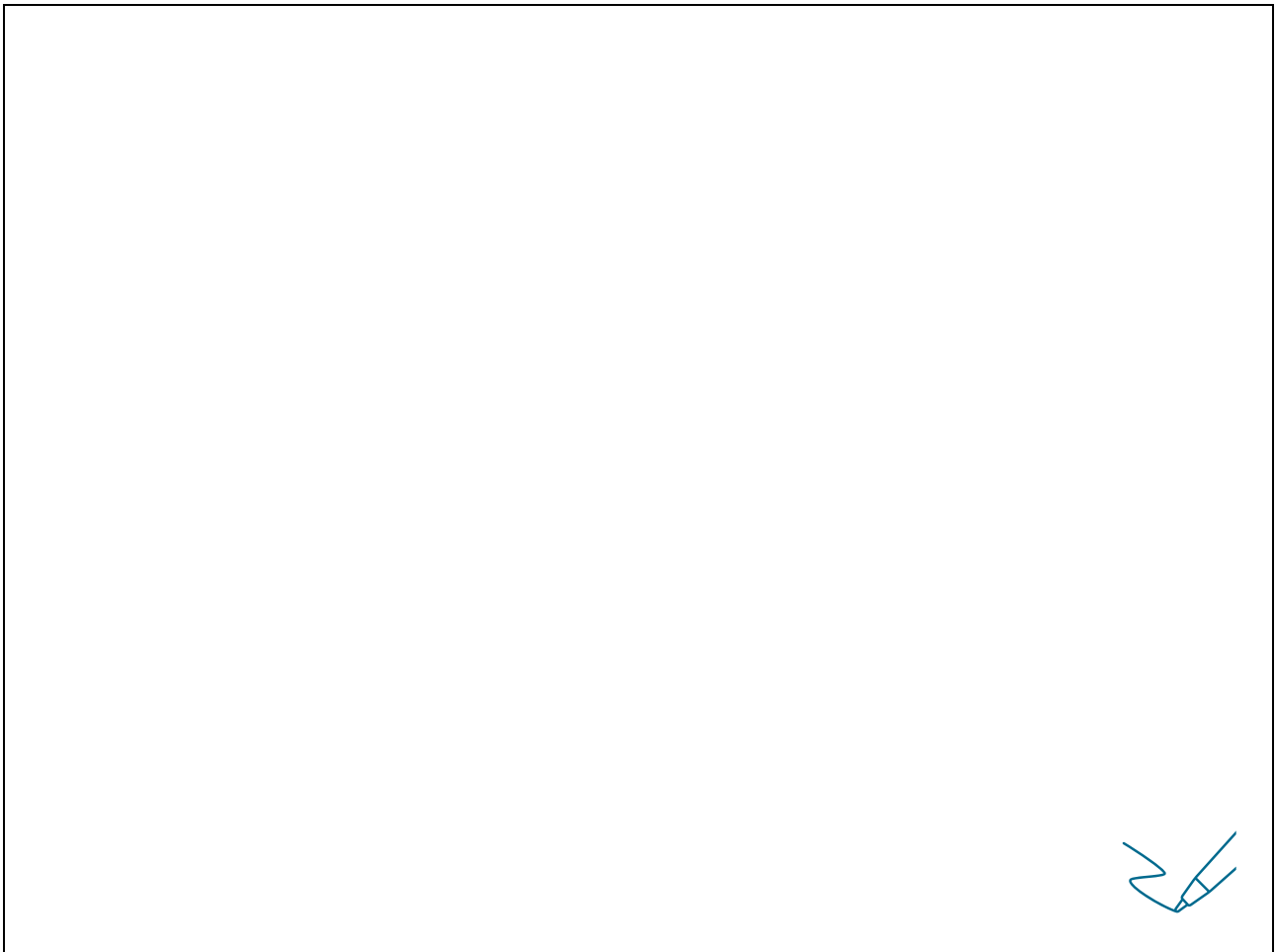
Pojasnite vlogo resonatorjev.

---

---

---

Na spletu poiščite vsaj eno animacijo stoječega zvočnega valovanja in jo ovrednotite (izgled, nazornost, oblike grafov, možnost spreminjanja parametrov, možnost simulacije meritve in izvoza podatkov).



---

---

---

---

---

---

---

---

## 10 Prekinjeno nihalo

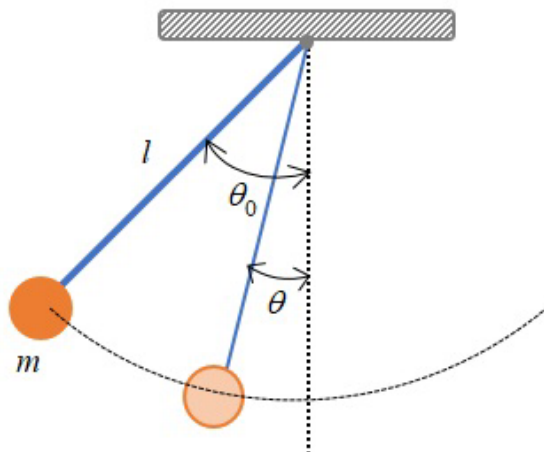
### 1. del: NEPREKINJENO NIHALO

**Naloga:** Izmerite odvisnost nihajnega časa neprekinjenega nihala od začetnega odmika nihala.

**Teorija:** Nitno (matematično) nihalo je model fizikalnega nihala, pri katerem je vsa masa nihala zbrana v točki na razdalji  $l$  od osi vrtenja (slika 24). Nihajni čas takšnega nihala ni odvisen od njegove mase. Nitno nihalo dobimo, če en konec zelo lahke niti pritrdimo v točki (vrtilišču), na drugi konec pa obesimo majhno telo. Dimenzije telesa morajo biti veliko manjše od dolžine niti ( $l$ ), masa niti pa mora biti zanemarljivo majhna v primerjavi z maso telesa ( $m$ ). Za nihajni čas nitnega nihala navadno privzamemo, da je neodvisen od amplitude nihanja (harmonično nihalo). Pri tem poudarimo, da mora biti amplituda nihanja majhna. V splošnem je nihajni čas ( $t_0$ ) odvisen od amplitude ( $\theta_0$ ):

$$t_0(\theta_0) = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left( 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2(\theta_0/2) + \left(\frac{3}{8}\right)^2 \sin^4(\theta_0/2) + \dots \right),$$

kjer je  $g$  (lokalni) gravitacijski pospešek.



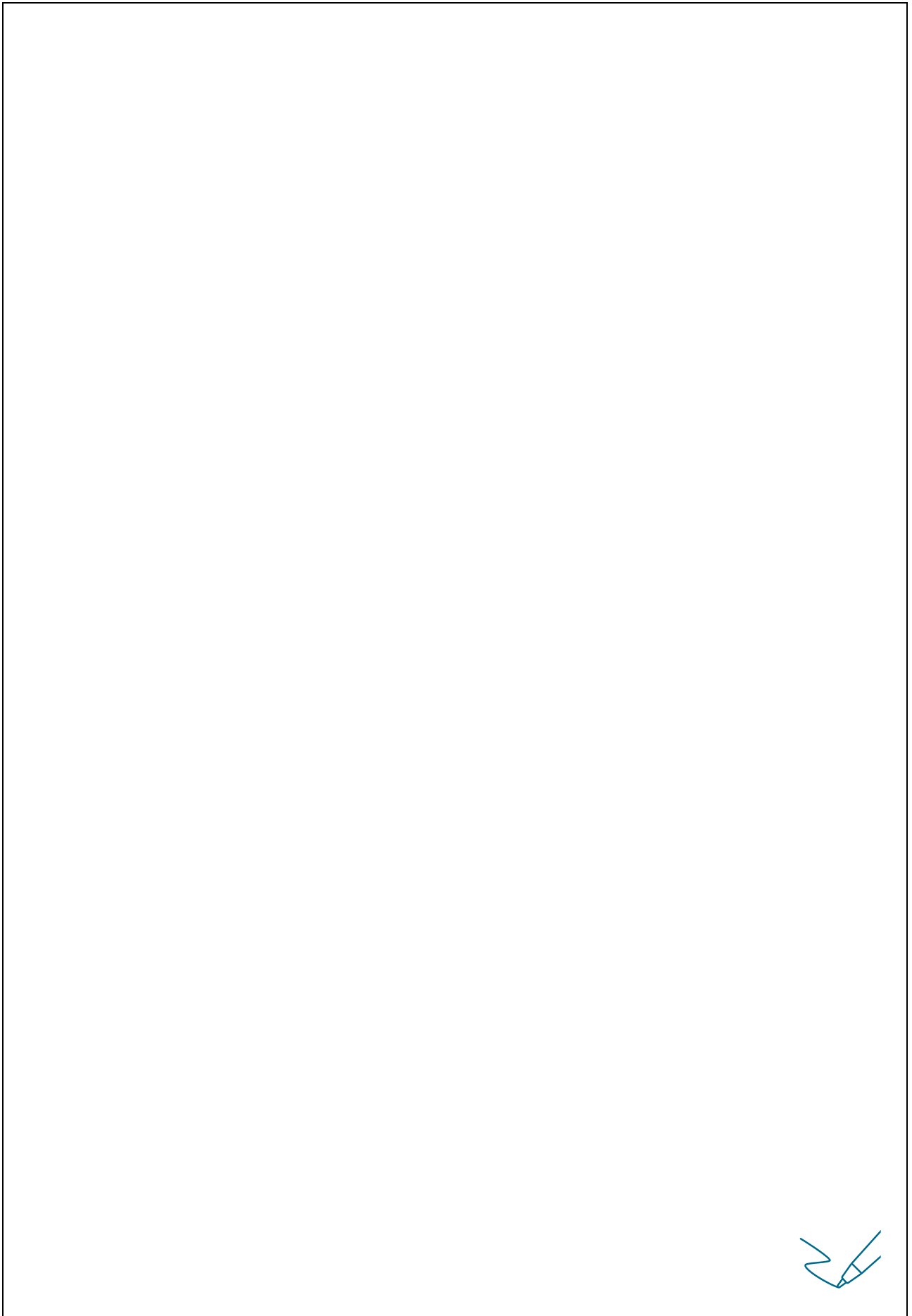
Slika 24. Model nitnega nihala z začetnim odklikom  $\theta_0$  in trenutnim odklikom  $\theta$ ,  $l$  je dolžina nihala,  $m$  pa njegova masa

**Potrebščine:** merilni komplet (vrtišče, pravokotni palčki, vzmetna zaskočka, kroglica z nitkama, kotomer), grafoskop, štoparica, tračno merilo.

**Navodilo:**

1. Preglejte vsebino merilnega kompleta in na tabli postavite pripomočke za meritev nihajnih časov različno prekinjenih matematičnih nihala. Kotomer preslikajte na tablo s pomočjo grafoskopa.
2. Meritev nihajnega časa neprekinjenega nihala začnite pri odkliku (amplitudi)  $\theta_0 = 7,5^\circ$  in nadaljujete do odklika  $\theta_0 = 90^\circ$  s koraki po  $7,5^\circ$ . Pri vsakem začetnem odkliku naredite tri meritve. Vsaka meritev nihajnega časa naj vsebuje večje število nihajev, pri čemer mora ostati amplituda pri zajetih nihajih stalna.
3. Izmerite dolžino nihala  $l$  in izračunajte nihajne čase pri uporabljenih začetnih odklikih. V enotni graf vnesite izmerjene in izračunane vrednosti, oboje naj vsebujejo tudi napako.

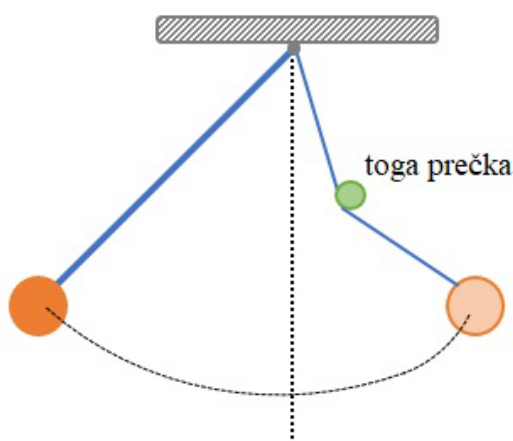




## 2. del: AMPLITUDA SIMETRIČNO PREKINJENEGA NIHALA

**Naloga:** Izmerite odvisnost amplitude simetrično prekinjenega nihala v drugi polovici nihaja od začetnega odmika nihala.

**Teorija:** Poseben primer nitnega nihala je prekinjeno nihalo. To je nihalo, ki ima v nihajni ravnini postavljeno ozko togo prečko (oviro), v katero zadene nit, tako da se spremeni polmer vrtenja, nihalo pa opravi del nihaja pri zmanjšani dolžini (slika 25).



Slika 25: Shema prekinjenega nitnega nihala

Prekinjeno nihalo je zanimivo za demonstracijo energijskega zakona. Za nedušeno nihanje velja, da se energija nihala ( $E$ ), to je vsota kinetične ( $W_k$ ) in potencialne ( $W_p$ ) energije, ohranja:

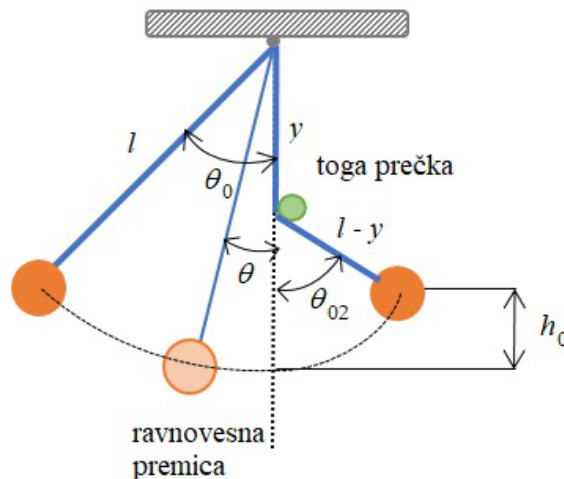
$$E = W_k + W_p = \text{konst.}$$

Zaradi enostavnosti najprej uporabimo simetrično prekinjeno nihalo: toga prečka leži na ravnovesni premici, nihalo pa naredi polovico nihaja z zmanjšano dolžino (slika 26). Amplituda nihanja v drugi polovici nihaja ( $\theta_{02}$ ) je odvisna od začetne amplitude ( $\theta_0$ ) in od relativne višine prekinitve ( $y/l$ ):

$$\cos \theta_{02} = \frac{\cos \theta_0 - (y/l)}{1 - (y/l)}.$$

Dokler je amplituda  $\theta_{02}$  manjša ali enaka  $90^\circ$ , še lahko govorimo o nihanju, ko je amplituda  $\theta_{02}$  med  $90^\circ$  in  $180^\circ$ , pa nihanja več ni. V primeru, ko se nihalo zavrti natanko do  $\theta_{02} = 180^\circ$ , bo kroglica prosto padla navpično na togo prečko. Takrat velja zveza:

$$y/l = \frac{1 + \cos \theta_0}{2}.$$



Slika 26: Simetrično prekinjeno nitno nihalo z začetnim odklikom  $\theta_0$ , trenutnim odklikom  $\theta$ ,  $l$  je dolžina daljšega nihala,  $y$  je višina prekinitve,  $(l - y)$  je dolžina krajšega nihala in  $\theta_{02}$  amplituda krajšega nihala. Zaradi ohranitve energije nihala se nihalo v obeh ravnovesnih legah nahaja na enaki višini  $h_0$ .

Če ima nihalo v navpični legi dovolj veliko hitrost, se zavrti okoli toge prečke. Za mejno vrednost velja:

$$y/l = \frac{3 + 2\cos \theta_0}{5}.$$

**Potrebščine:** merilni komplet (vrtišče, pravokotni palčki, vzmetna zaskočka, kroglica z nitkama, kotomer), grafoskop, štoparica, tračno merilo, zaščitne rokavice.

### Navodilo:

1. Pri relativni višini prekinitve  $y/l = 0,5$  izmerite odvisnost amplitude v drugi polovici nihaja  $\theta_{02}$  od začetne amplitude  $\theta_0$ . Začetne amplitude spreminjajte po enakih korakih, kot ste to naredili v prvem delu vaje, pri čemer izmerjena amplituda  $\theta_{02}$  ne sme preseči  $90^\circ$ .

2. Pri uporabljenih začetnih odmikih izračunajte amplitude v drugi polovici nihaja. Narišite graf  $\theta_{02} = \theta_{02}(\theta_0)$  z izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi, oboje naj vsebujejo tudi napako.
3. Za izbrano relativno višino prekinitve znotraj  $0,6 < y/l < 0,9$  izračunajte začetno amplitudo  $\theta_0$ , pri kateri je  $\theta_{02}$  natanko  $180^\circ$ , in začetno amplitudo  $\theta_0$ , pri kateri dobimo krožno vrtenje. Izračunane parametre preverite z eksperimentom. Amplituda  $\theta_{10}$  pri tem ne sme biti večja od  $90^\circ$ .

**POZOR:** Ker obstaja velika verjetnost, da strgamo nit ali celo poškodujemo togo prečko, ko pade nanjo kroglica, je dobro, če vam pri vaji pomaga sošolec. Sošolec naj stoji ob togi prečki in prime kroglico, da ta ne pade na togo prečko (pri  $180^\circ$  odklonu) oziroma da se nit ne navije okoli toge prečke do konca (pri krožnem vrtenju). Pri tem uporabljajte zaščitne rokavice.



### 3. del: NIHAJNI ČAS SIMETRIČNO PREKINJENEGA NIHALA

**Naloga:** Izmerite odvisnost nihajnega časa simetrično prekinjenega nihala od začetnega odmika pri različnih vrednostih relativne višine prekinitve.

**Teorija:** Nihajnega časa simetrično prekinjenega nihala ni težko izračunati. Zamislimo si, da imamo dve nitni nihali, prvo z dolžino  $l$  in nihajnim časom  $t_1$ , drugo pa z dolžino  $(l - y)$  in nihajnim časom  $t_2$ . K celotnemu nihajnemu času  $t$  prispeva vsako nihalo polovico svojega nihajnega časa. Če privzamemo, da nitno nihalo niha harmonično, lahko nihajni čas prekinjenega nihala zapišemo kot:

$$t = \frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2} = \pi \left( \sqrt{\frac{l}{g}} + \sqrt{\frac{(l - y)}{g}} \right).$$

Kot smo se prepričali v prvem delu vaje, je nihajni čas nitnega nihala  $t_0$  v splošnem odvisen tudi od amplitude nihanja, zato dodamo zgornji enačbi še popravek

$$t_0 = t \left( 1 + \frac{\theta_0^2}{16} \sqrt{\frac{1}{1 - (y/l)}} \right).$$

**Potrebščine:** merilni komplet (vrtišče, pravokotni palčki, vzmetna zaskočka, kroglica z nitkama, kotomer), grafoskop, štoparica, tračno merilo.

#### Navodilo:

1. Meritev nihajnega časa  $t_0$  simetrično prekinjenega nihala v odvisnosti od začetnega odmika  $\theta_0$  začnite pri relativni višini prekinitve  $y/l = 0,3$ . Relativno višino prekinitve povečujte s korakom po  $0,2$  do vrednosti  $0,9$ . Meritve opravite pri dovolj majhnih začetnih odklkih  $\theta_0$  tako, da amplituda  $\theta_{02}$  ne preseže  $90^\circ$ .

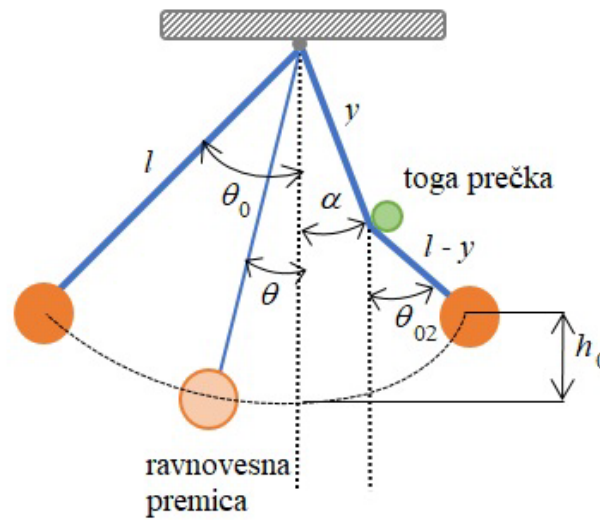
2. Pri uporabljenih vrednostih parametrov izračunajte nihajne čase simetrično prekinjenega nihala. Za različne vrednosti relativne višine prekinitve  $y/l$  narišite graf  $t_0 = t_0(\theta_0)$  z izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi, izmerjene vrednosti naj vključujejo tudi napako meritve.



#### 4. del: ASIMETRIČNO PREKINJENO NIHALO

**Naloga:** Izmerite odvisnost nihajnega časa asimetrično prekinjenega nihala od začetnega odmika pri izbrani vrednosti relativne višine prekinitve in kota asimetrije.

**Teorija:** Asimetrično prekinjeno nihalo je nitno nihalo, ki ga s togo prečko prekinemo izven ravnovesne premice (slika 27).



Slika 27: Asimetrično prekinjeno nitno nihalo s kotom asimetrije  $\alpha$ . Vse ostale količine imajo enake oznake kot pri simetričnem nihalu:  $\theta_0$  je začetni odklik,  $\theta$  je trenutni odklik,  $l$  je dolžina daljšega nihala,  $y$  je višina prekinitve,  $(l - y)$  je dolžina krajšega nihala in  $\theta_{02}$  je amplituda krajšega nihala. Ob ohranitvi energije nihala je tudi v tem primeru nihalo v obeh skrajnih legah na enaki višini  $h_0$ .

Pri asimetrično prekinjenem nihalu delež periode daljšega nihala  $l$  ni več enak deležu periode krajšega nihala  $(l - y)$ , kot je to veljalo pri simetrični prekinitvi. Za nihajni čas  $t_0$  asimetrično prekinjenega nihala velja:

$$t_0 = t \left\{ 1 + \frac{1}{\pi t} \left[ t_1 \sin^{-1} \frac{\alpha}{\theta_0} - t_2 \sin^{-1} \frac{\alpha}{\theta_{02}} \right] \right\} \left( 1 + \frac{\theta_0^2}{16} \sqrt{\frac{1}{1 - (y/l)}} \right),$$

kjer je  $t$  nihajni čas simetrično prekinjenega nihala (brez amplitudnega popravka),  $t_1$  je nihajni čas pri dolžini nihala  $l$ ,  $t_2$  je nihajni čas pri dolžini nihala  $(l - y)$ ,  $\theta_0$  in  $\theta_{02}$  sta amplitudi nihanja,  $\alpha$  pa je kot asimetrije (glej sliko 27).

Med amplitudama  $\theta_0$  in  $\theta_{02}$  velja zveza

$$\theta_{02}^2 = (\theta_0^2 + \alpha^2) \left(1 - \frac{y}{l}\right),$$

ki jo dobimo iz ohranitve energije nihala.

**Potrebščine:** merilni komplet (vrtišče, pravokotni palčki, vzmetna zaskočka, kroglica z nitkama, kotomer), grafoskop, štoparica, tračno merilo.

**Navodilo:**

1. Meritev nihajnega časa asimetrično prekinjenega nihala v odvisnosti od začetnega odmika  $t_0 = t_0(\theta_0)$  opravite pri relativni višini prekinitve  $y/l = 0,5$  in pri dveh legah toge prečke:  $\alpha = 30^\circ$  in  $\alpha = 22,5^\circ$ . V obeh primerih začnite meritev pri vrednosti začetnega odmika  $\theta_0 = 45^\circ$ .
2. Pri uporabljenih vrednostih parametrov izračunajte nihajne čase asimetrično prekinjenega nihala  $t_0$ . Narišite graf  $t_0 = t_0(\theta_0)$  z izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi, izmerjene naj vključujejo še napake meritve.





**Priprava na vaje:**

Ker je vaja Prekinjeno nihalo obsežnejša od ostalih, v okviru priprave na vajo skrbno preberite navodilo vaje in razmislite o izvedbi. Na ostala vprašanja lahko odgovorite po opravljeni vaji.

Razmislite in razložite, zakaj se nihajni čas z naraščanjem amplitude povečuje.

---

---

---

---

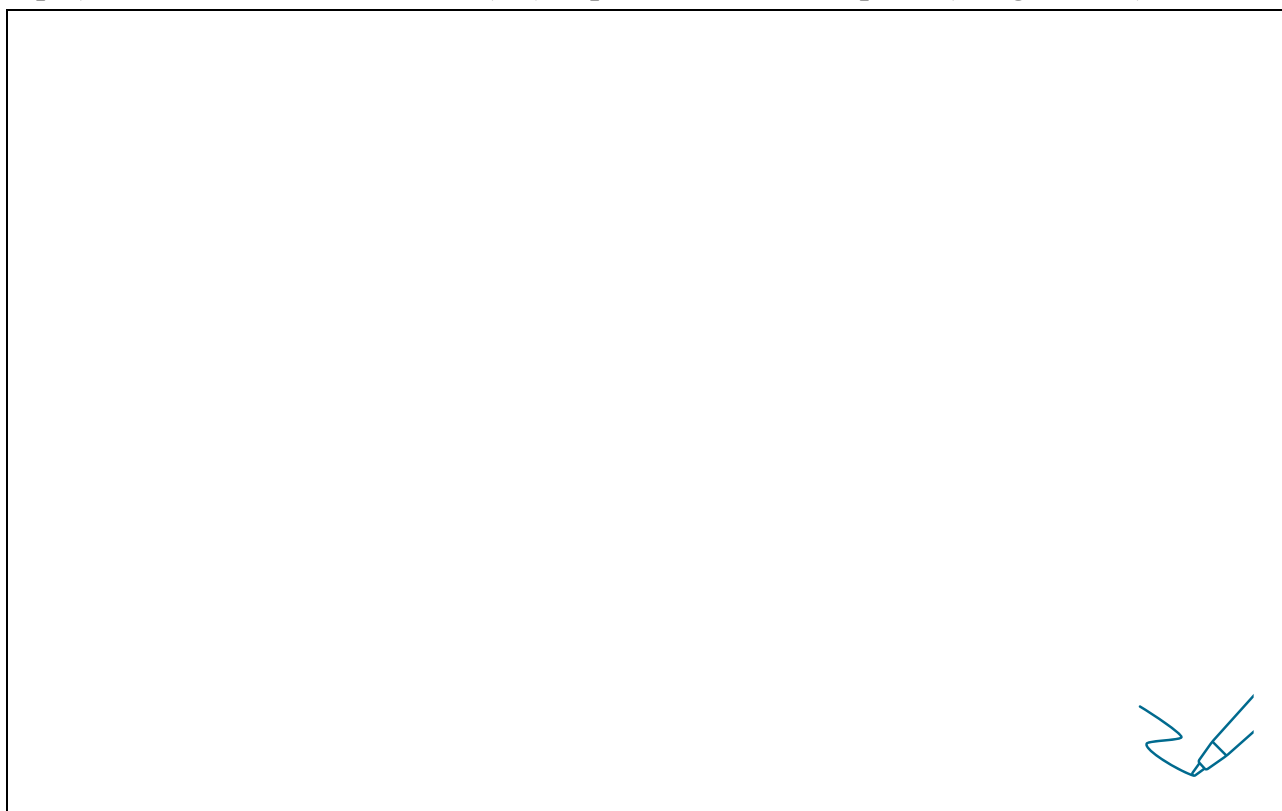
---

---

---

---


Izpeljite vse tri izraze iz 2. dela vaje (Amplituda simetrično prekinjenega nihala).



Izpeljite izraz za nihajni čas simetrično prekinjenega nihala v 3. delu vaje.



Ali lahko dobimo odklon  $\theta_{02} = 180^\circ$ , če je relativna višina prekinitve  $y/l$  manjša od 0,5? Kaj pa krožno vrtenje? Odgovora utemeljite.



---

---

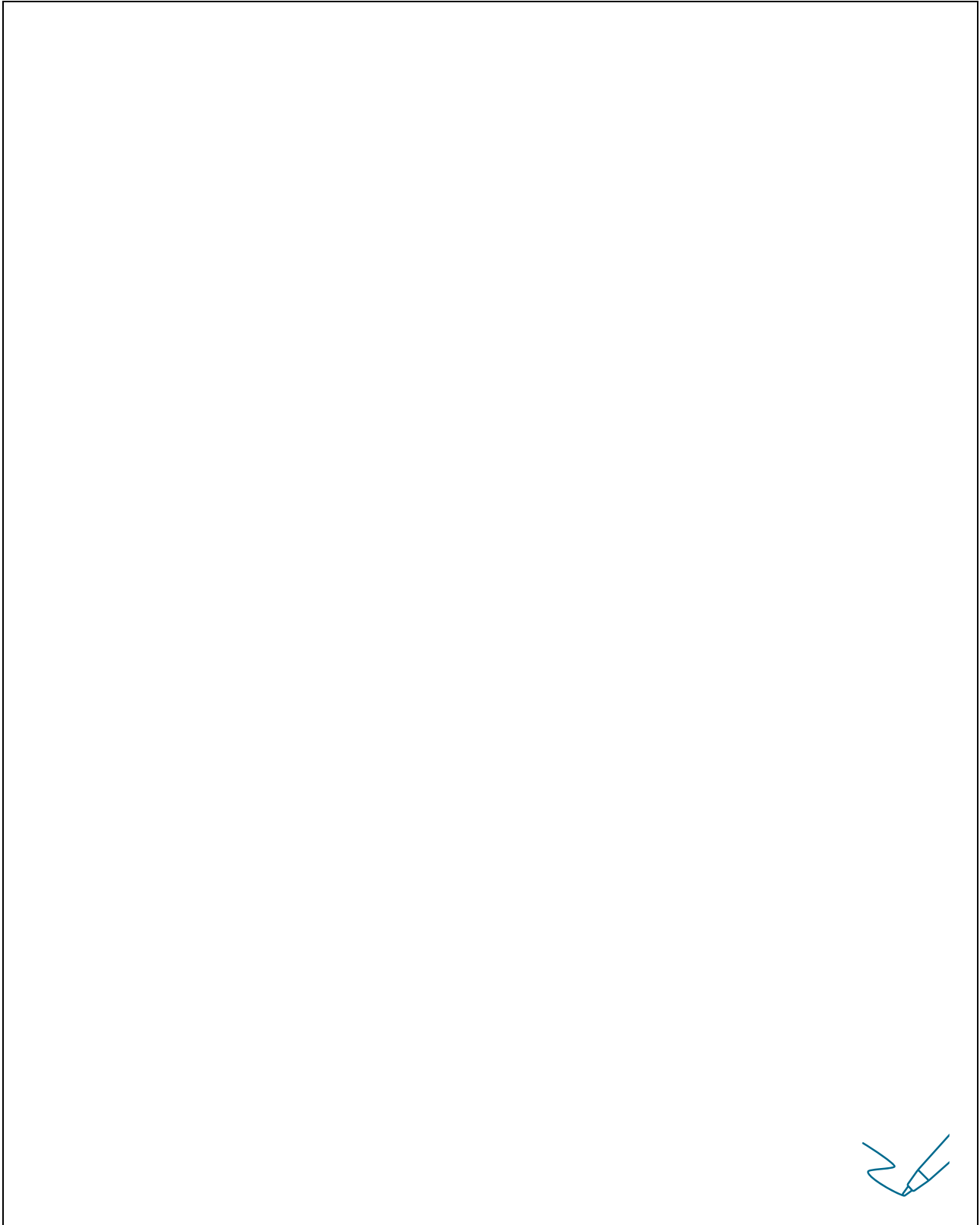
---

---

Ali je lahko nihajni čas prekinjenega nihala daljši od nihajnega časa neprekinjenega nihala, če imata oba enako dolžino niti? Odgovor utemeljite.



Napovejte vpliv parametrov  $\theta_0$ ,  $\alpha$ ,  $y/l$  na izmerjeni nihajni čas.



A large empty rectangular box for writing the answer. In the bottom right corner of this box, there is a small blue handwritten mark that looks like a stylized signature or initials.

---

---

## 11 Spektrometer

**Naloga:** S spektrometrom izmerite referenčne spektre različnih virov svetlobe in prepustne spektre različnih absorpcijskih materialov in filtrov.

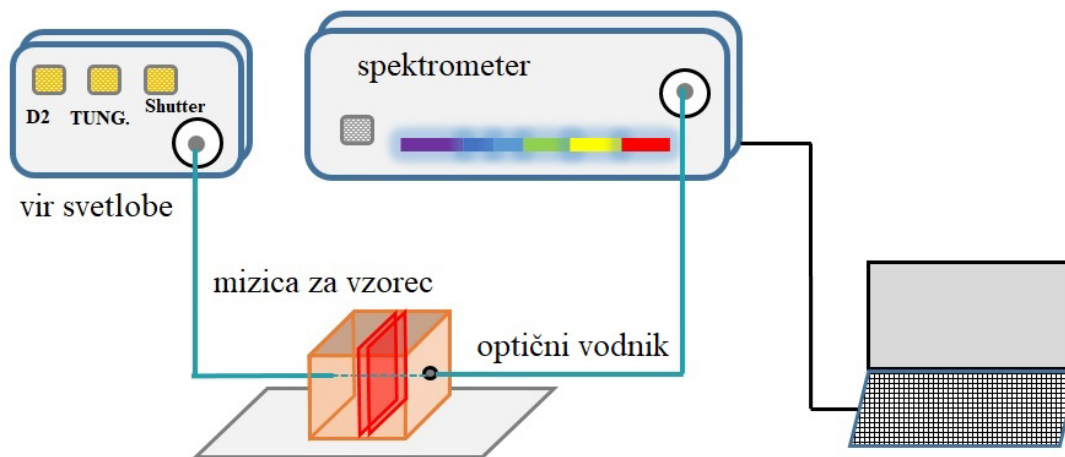
**Teorija:** Spektroskop je pripomoček, ki svetlobo razdeli in prikaže po posameznih komponentah (valovnih dolžinah). Za razliko od spektroskopa je spektrometer naprava, ki omogoča tudi merjenje valovnih dolžin svetlobe. Pri vaji bomo uporabili spektrometer UV-VIS-NIR, ki je občutljiv v območju vidne svetlobe, bližnjem IR-področju in bližnjem UV- področju, z njim pa bomo izmerili relativno spektralno intenziteto svetlobe v odvisnosti od valovne dolžine za različne primere svetil.

**Potrebščine:** spektrometer TRISTAN, svetlobni vir ILLUMIA UV/VIS, osebni računalnik s programsko opremo TriWin3, optični vodniki, mizica za meritve prepustnih (transmisijskih) spektrov, mizica za meritve obojnih (refleksijskih) spektrov, barvni filtri, barvne raztopine, kivete, LED diode.

### Navodilo:

1. Eksperimente izvajate v zatemnjenem prostoru. Med meritvijo morajo biti luči ugasnjene. Preverite, ali je spektrometer priklopljen na računalnik in ga vklopite. Na računalniku poiščite program TriWin3. Preden začnete s posameznimi meritvami, preučite menije v programu in vse možnosti, ki jih program ponuja.

2. **Referenčni spekter.** V prvem delu vaje boste uporabljali svetlobni vir v spektrometru (slika 28). Pri tem naj bodo prižgana vsa tri stikala: *D2* (devterij), *Tungsten* (volfram), *Shutter* (zaklop).



Slika 28: Shema postavitve eksperimenta

Spekter svetlobe, ki ga oddaja svetlobni vir v spektrometru, izmerite kot referenčni spekter (ukaz *REF*). Izmerjeni spekter shranite tako, da ga označite in izvozite kot datoteko programa Excel. Optično vlakno naj bo usmerjeno čim bolj pravokotno na mizico. Posebej pazite, da ga ne upognete preveč in poškodujete. Bodite pozorni tudi na primerno intenziteto svetlobe. Intenziteta pri meritvi je ustrezna, če so na grafu vidni tudi lokalni maksimumi (vrh ni odrezan). Intenziteto analizirane svetlobe regulirajte z nastavitvijo časa osvetljevanja. Na začetku merjenja uporabite funkcijo *Auto*, nato po potrebi preklopite na *Manual* in ročno spreminjate čas posameznega koraka zajemanja svetlobe. Vse meritve spektrov izvajajte v temi. Edini svetlobni vir naj bo tisti, katerega spekter merite. Vse uspešne meritve v nadaljevanju merjenja sproti shranjujte na prej opisani način.

### 3. Prepustni spektri.

a) K vaji so priloženi različni barvni filtri. Poleg osnovnih (**R** - rdeč, **G** - zelen, **B** - moder) uporabite še rumeni (**Y**) in turkizni filter (**C**) in izmerite njihove prepustne spektre (*Single scan*). Filtri naj bodo pravokotni na curek vpadne svetlobe, pri tem si pomagajte s plastičnim držalom. Posamezne spektre sproti normirajte znotraj programa TriWin3 (orodje *Mathematica*, deljenje z maksimalno vrednostjo) in jih shranjujte na računalnik. Normiranje omogoča, da lahko vse spektre hkrati prikažete na grafu in jih medsebojno

primerjate. Pri taki primerjavi/predstavitvi izberite tudi ustrezno barvo za posamezni spekter.

b) Izmerite prepustne spektre za kombinacije filtrov R/G, B/Y, R/Y. Primerjajte kombinacijo B/Y z G. Spektre z dvema filtroma primerjajte z matematičnim produktom izmerjenih spektrov ustreznih enojnih filtrov (uporabite Excel, Logger Pro3, Origin ali kakšen drugi program).

c) Izberite enega od filtrov in izmerite prepustne spektre v odvisnosti od debeline plasti  $d$  (1–5 uporabljenih plasti). Intenziteta prepuščene svetlobe ( $j$ ) pada eksponentno z debelino ( $d$ ):

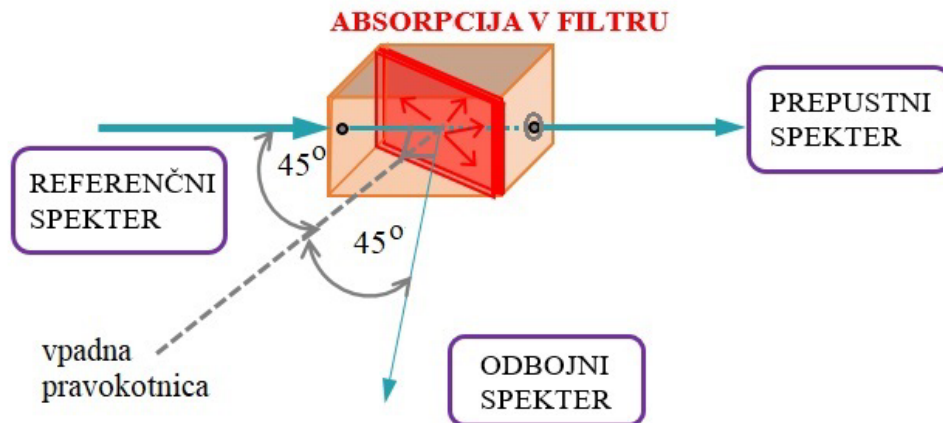
$$j(d) = j_0 e^{-\mu d},$$

kjer je  $j_0$  intenziteta vpadne svetlobe,  $\mu$  pa linearni absorpcijski koeficient snovi (filtra). Slednji je v splošnem odvisen od valovne dolžine  $\lambda$  vpadne svetlobe  $\mu = \mu(\lambda)$ . Z analizo izmerjenih grafov določite pri izbrani valovni dolžini približno vrednost linearnega absorpcijskega koeficienta  $\mu$  (brez upoštevanja odbite svetlobe).

Če vam čas dopušča, opravite po koncu vaje še ekvivalentno meritev s spreminjanjem koncentracije ustne vodice ali kakšnega drugega barvila. Pri meritvah s tekočinskimi vzorci uporabite čisto kiveto in meritev začnite z navadno vodo, ki naj predstavlja referenčni spekter.

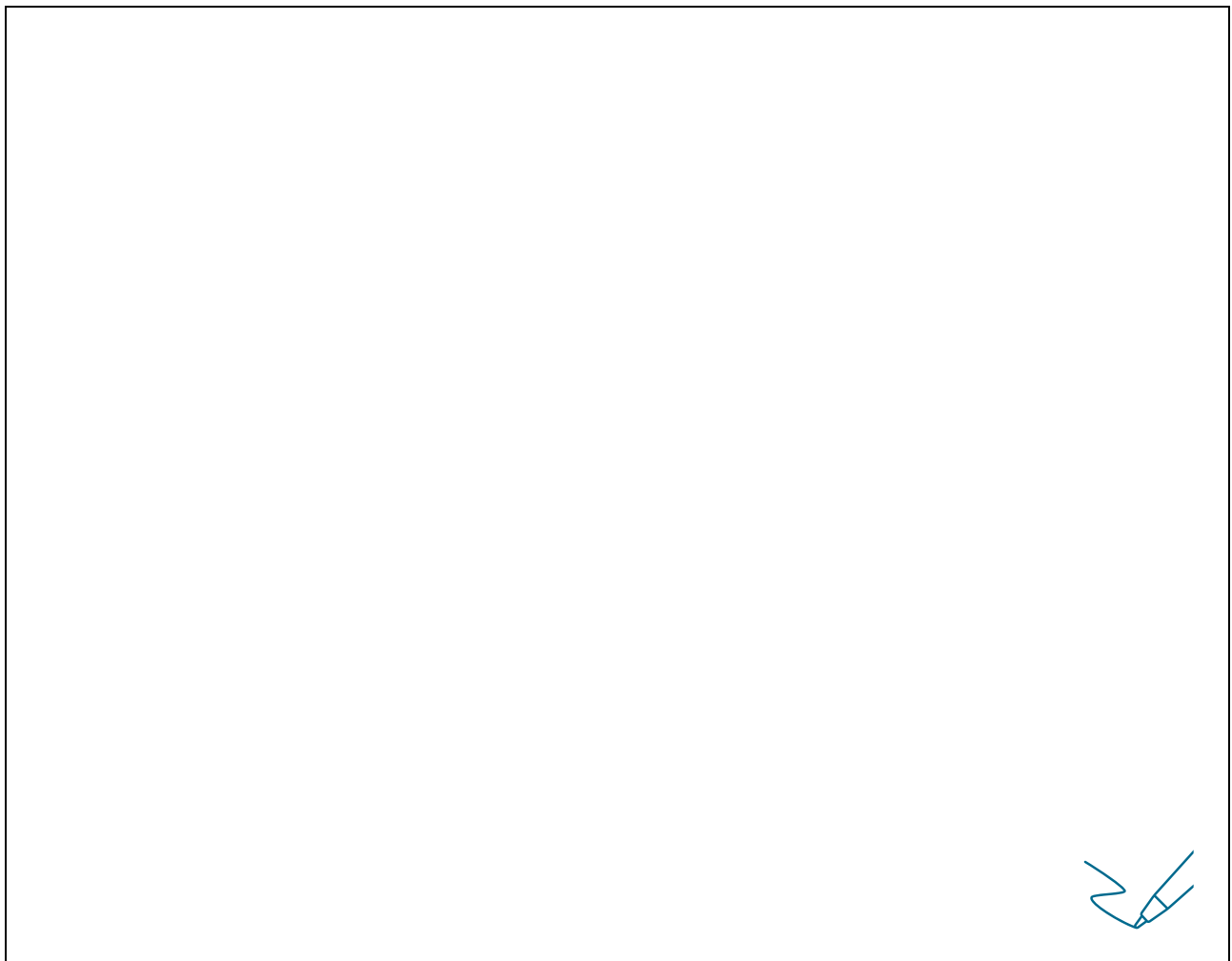
4. **Svetlobni viri.** Ločeno izmerite obe komponenti spektra svetlobe, ki ga oddaja svetlobni vir spektrometra (devterij in volfram). Izmerite emisijske spektre (*Reference scan*) še iz drugih svetlobnih virov: luč v kabinetu, računalniški monitor, priložene LED diode. Še pred tem izmerite občutljivost (temni tok) spektrometra. To naredite tako, da izmerite referenčni spekter brez virov svetlobe.

5. **Odbojni spekter.** Z uporabo dodatne mizice za meritve odbojnih spektrov poskusite izmeriti spekter odbite svetlobe na izbranem filtru ali tekočinskem vzorcu (slika 29). Ker samo majhen del svetlobe vpade na optično vlakno spektrometra, je pri teh meritvah potrebno povečati čas osvetlitve. Še pred meritvijo izmerite/uvozite referenčni spekter izbranega vira svetlobe.

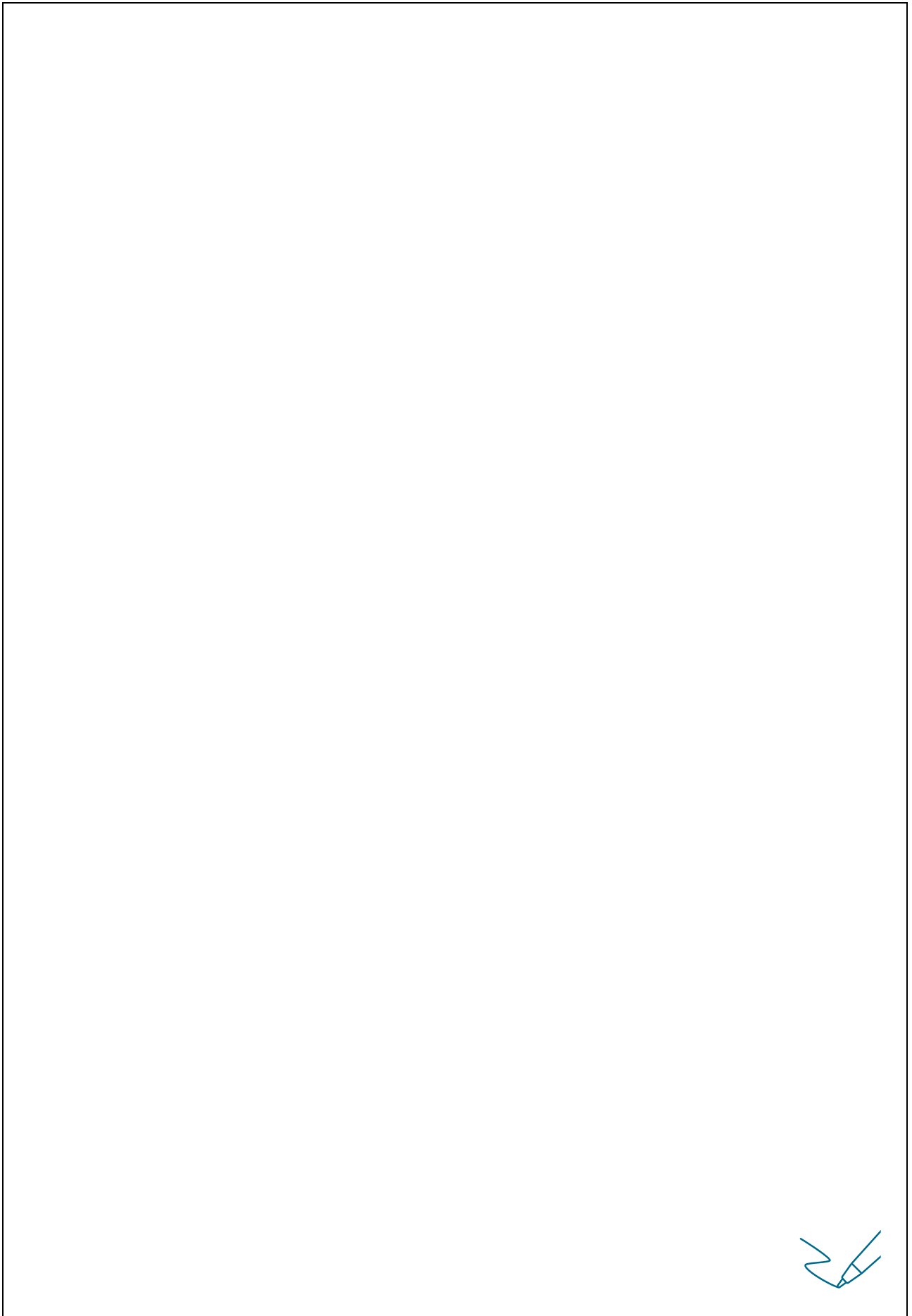


Slika 29: Pri meritvah odbojnih spektrov je filter postavljen pod kotom  $45^\circ$  glede na referenčni snop. Pri ostalih meritvah je pravokoten na snop vpadne svetlobe.

**5. Absorpcijski spekter.** Narišite absorpcijski spekter za izbrani filter tako, da od referenčnega spektra odštejete vsoto prepustnega in odbojnega spektra. Ker je pri meritvi prepustnih spektrov svetloba prepotovala krajšo pot skozi filter, je treba ponovno izmeriti prepustni spekter pri spremenjeni legi filtra (slika 2).







**Priprava na vaje:**

Opišite značilnosti prepustnih, odbojnih, absorpcijskih in emisijskih spektrov. Poiščite primere teh spektrov (v naravi, tehniki ...) in jih pojasnite.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Ne spletu pridobite osnovne informacije o spektrometru TRISTAN, ki ga boste uporabljali pri vaji [6].

Ne spletu pridobite osnovne informacije o značilnostih virov svetlobe, ki se uporabljajo v spektrometrih [7].

## Dodatek: Samostojni projekti

**Navodilo:** Pri predmetu Fizikalni eksperimenti 3 izvedete poleg laboratorijskih vaj še Samostojni projekt s področja nihanja in valovanja. Za projekt lahko izberete poljubno temo, pri čemer so vam v pomoč objavljeni predlogi z aktualno tematiko (nova učila, znanstveni članki, tehnične novosti, tema iz računskih nalog ...). Projekt izvedete v skupinah, ki štejejo od dva do tri člane, izjemoma ga lahko opravite tudi samostojno ali v povečani skupini (odvisno od zahtevnosti). V okviru projekta načrtujete, izvedete in analizirate meritev in primerjate rezultate z modelskimi rešitvami. Delo v skupini si razdelite tako, da so enakomerno obremenjeni vsi člani skupine. Projekt predstavite na skupni predstavitvi, na kateri so prisotni vsi člani skupin. Predstavitev posameznega projekta traja okrog 30 minut, vključuje lahko tudi prikaz eksperimenta ali posnetega gradiva. Najuspešnejši projekti imajo možnost nadgraditve v strokovne ali znanstvene članke.

**Že izvedeni projekti:** V tabeli 2 so zajeti naslovi že izvedenih projektov v študijskih letih od 2014/2015 do 2020/2021. Naslovi so vam lahko v pomoč pri izbiri lastne teme projekta, lahko pa katerega od izvedenih projektov tudi nadgradite in ga v spremenjeni obliki ponovno izvedete.

Tabela 2: Izvedeni samostojni projekti

Študijsko leto – Naslov projekta
<b>2020/2021</b>
Intenziteta svetlobe pri dvojni reži
Poskakujoče kapljice na gladini tekočine
Kundtova cev 2
<b>2019/2020</b>
Kundtova cev 1
Haló učinek v ozračju
Simulacija valovanja z nihali
Chladnijeva plošča
Lastne frekvence kozarcev
<b>2018/2019</b>
Stoječe valovanje na navpični verigi
Model odkrivanja planetov
Nevidnost v raztopinah
Lissajousove figure – nihanje membrane
Padanje dolge težke vzmeti
Lomni količnik mikrovalov v vodi
<b>2017/2018</b>
Absorpcija zvoka v zraku
Frekvence zvoka pri mobilni telefoniji
Popolni odboj svetlobe
Hitrost zvoka v vlažnem zraku [9]
3D hologram
<b>2016/2017</b>
Hitrost zvoka v vročem zraku [9]
<b>2015/2016</b>
Analiza glasbenih tonov
Akustična levitacija
Mikrovalovna pečica
<b>2014/2015</b>
Optična nevidnost z lečami [8]
Optična nevidnost z zrcali
Nihanje s trenjem [4]
Ploskve enake osvetljenosti
Spektrometer – merjenje odbojnosti

## Literatura

- [1] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fundamentals of Physics*, 10. izdaja, (John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2014).
- [2] J. Strnad, *Fizika*, 1. in 2. del, (DMFA, Ljubljana, 2002).
- [3] H. A. Jones, I. Langmuir: *Properties of Tungsten*, *General Electric Review* 30 (1927), str. 354–361.
- [4] R. Hauko, D. Andreevski, D. Paul, M. Šterk, R. Repnik, *Teaching of the harmonic oscillator damped by a constant force: the use of analogy and experiments*, *Am. J. Phys.* 86 (2018), str. 657–662.  
<https://aapt.scitation.org/doi/pdf/10.1119/1.5044654>
- [5] R. Hauko, R. Repnik, *Damped harmonic oscillation: linear or quadratic drag force?*, *Am. J. Phys.* 87 (2019), str. 910–914.  
<https://aapt.scitation.org/doi/full/10.1119/1.5124978>
- [6] TRISTAN svetlobni spektrometer, spletna stran (dostopno 1.2.2022).  
<http://www.speciation.net/Database/Instruments/mut-GmbH/TRISTAN-light--Spectrometer-;i1998>
- [7] Svetlobni viri za spektrometre, spletna stran (dostopno 1.2.2022).  
<https://www.shimadzu.com/an/service-support/technical-support/analysis-basics/fundamentals-uv/lightsources.html#3>
- [8] R. Hauko, J. Murko, L. Strmšek, J. Padežnik Gomilšek, R. Repnik, *Optična nevidnost  $\approx$  lečami*, *Presek* 44 (2017), str. 14–19. <https://www.dlib.si/stream/URN:NBN:SI:doc-P1SWW0Q6/18adbc99-d92e-4685-945f-c248302a852c/PDF>
- [9] R. Hauko, M. Dajnko, D. Gačević, P. Marinko, M. Potrč, R. Repnik, *From speed of sound to vapour pressure: an undergraduate school experiment as an example of systematic error research*, *Eur. J. Phys.* 43 (2022).  
<https://doi.org/10.1088/1361-6404/ac6cb9>



# FIZIKALNI EKSPERIMENTI 3

## ZBIRKA LABORATORIJSKIH VAJ

ROBERT REPNIK,<sup>1</sup> ROBERT HAUKO<sup>2</sup>

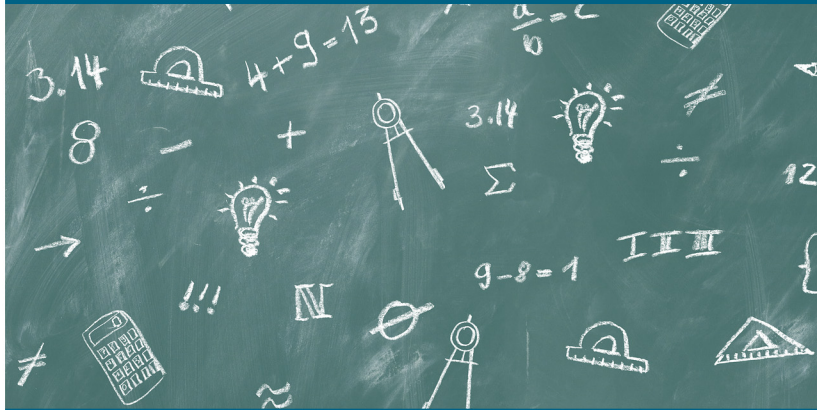
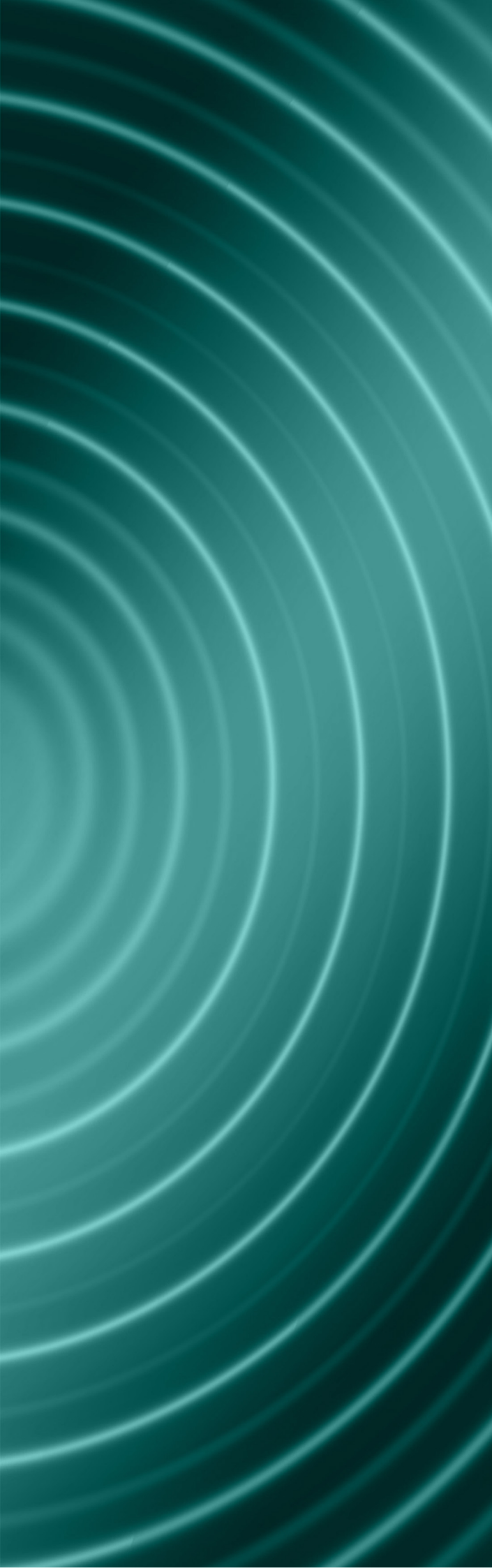
<sup>1</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor, Slovenija  
robert.repnik@um.si

<sup>2</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor, Slovenija  
robert.hauko@um.si

**Povzetek** Fizikalni eksperimenti 3 – zbirka laboratorijskih vaj – so namenjeni študentom 1. stopnje študija v programih Fizika in Predmetni učitelj na Fakulteti za naravoslovje in matematiko v Mariboru. Zbirka zajema snov s področja nihanja in valovanja. Vaje se izvajajo pri predmetu Fizikalni eksperimenti 3 v letnem semestru 2. letnika. Naslovi vaj: Goriščne razdalje leč, Uklon in interferenca, Stefanov zakon, Sklopljeno nihanje, Hitrost ultrazvoka, Nihanje s trenjem, Resonanca, Stojče valovanje, Frekvenca in hitrost zvoka, Prekinjeno nihalo, Spektrometer. Navodila so namenjena uspešni izvedbi meritev, analizi, interpretaciji in vrednotenju merskih rezultatov. Dodani so naslovi samostojnih projektov, ki so bili v okviru predmeta izvedeni v preteklih letih.

**Ključne besede:**

fizika,  
nihanje,  
valovanje,  
laboratorijske vaje,  
fizikalne meritve,  
projekti



Univerza v Mariboru

Fakulteta za naravoslovje  
in matematiko

