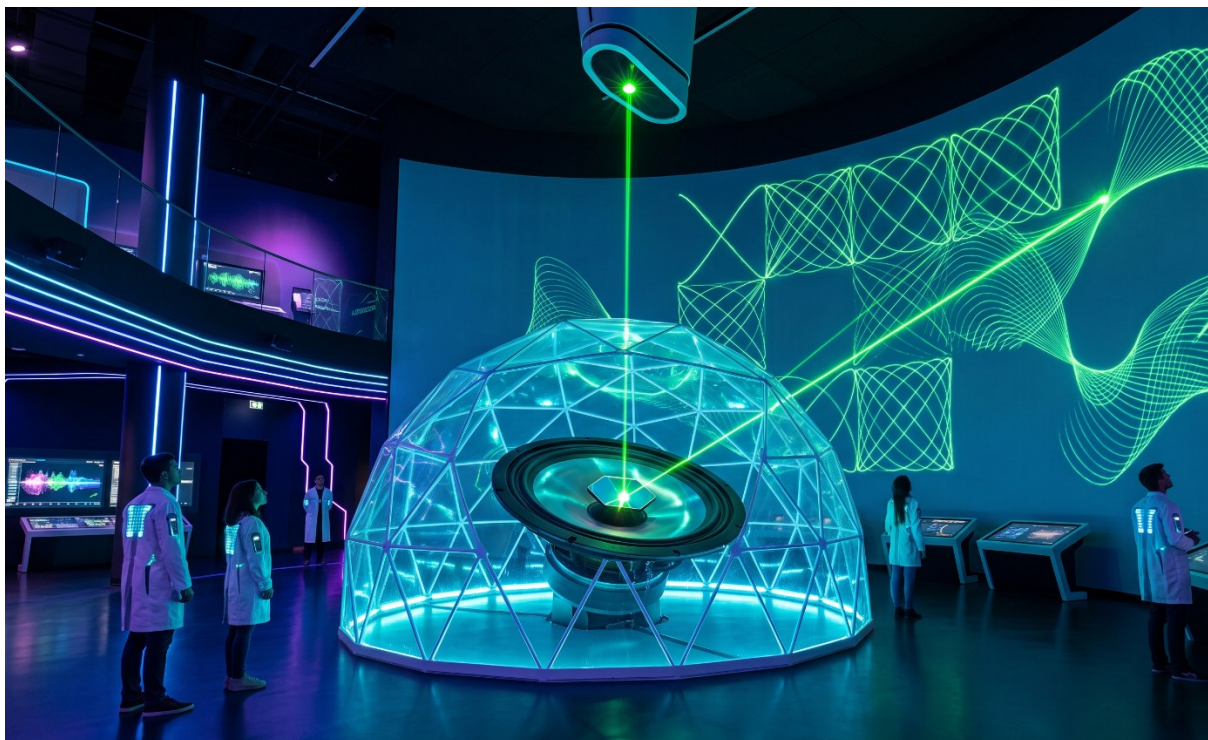


Laserski osciloskop

Laserski ples zvoka



Si lahko predstavljate, da stojite na koncertu tik pred ogromnim zvočnikom in v prsnem košu začutite močan udarec ob vsakem ritmu basa? Morda ste že videli posnetek operne pevke, ki z enim samim čistim in močnim tonom razbije kristalni kozarec. Ali pa ste ob močnem grmenju začutili, kako so se zatresla okenska stekla v vaši sobi?

Zvok je za naše oči popolnoma neviden. Nebo, zrak in prostore okoli nas neprestano polnijo zvočni valovi, a jih zaznavamo le z ušesi ali kot vibracije v telesu. Zvok torej nosi energijo, ki lahko premika predmete. Kaj pa, če bi ta nevidni svet zvočnega valovanja spremenili v svetlobo in z lastnimi očmi opazovali geometrijske vzorce, ki jih v zraku riše glasba?

Kako so znanstveniki poskušali videti zvok

Želja, da bi nevidno premikanje zvoka naredili vidno, že stoletja vznemirja fizike in inženirje. Konec 18. stoletja je nemški fizik in glasbenik **Ernst Chladni** (danes znan kot »oče akustike«) izvedel prelomni poskus. Na tanko kovinsko ploščo je posul drobna zrna peska, nato pa po robu plošče potegnil z lokom za violino. Plošča je zavibrirala, pesek na njej pa se je začel divje premikati in se kmalu samodejno razporedil v čudovite, simetrične linije. Ti neizmerno natančni vzorci so danes znani kot **Chladnijeve figure**.

Nekaj desetletij kasneje je francoski matematik **Jules Antoine Lissajous** razvil optično metodo za natančno proučevanje valovanja. Z uporabo svetlobnih žarkov in majhnih zrcal, pritrjenih na nihajoče glasbene vilice, je na steno projiciral prepletene svetlobne krivulje – **Lissajousove figure**. Odkril je, da lahko s svetlobo izjemno natančno razkrijemo tudi najmanjša nihanja, ki so za človeško oko prehitra ali premajhna.

Kako zvok ustvari laserski ples?

Da bo naša merilna naprava delovala, moramo razumeti nekaj osnovnih fizikalnih pojavov:

- **Zvok kot valovanje tlaka:** Zvok v zraku ni nič drugega kot potujoče zgoščine in razredčine zračnih molekul. Ko membrana zvočnika niha naprej in nazaj, potiska okoliški zrak in s tem ustvarja zvočne valove tlaka.
- **Resonanca:** Pomislite na otroško gugalnico. Če jo potisnete ob pravem trenutku (z njeno naravno frekvenco nihanja), bo z vsakim potiskom zanihala višje. Če jo potisnete neusklajeno, se bo gugalnica ustavila. Enako velja za napeto membrano: ko jo zvočnik vznemirja s točno določeno frekvenco, se njeno nihanje močno okrepi. Temu pravimo resonanca.
- **Stojno valovanje:** Ko zvočni val doseže rob napete membrane, se odbije nazaj. Z mešanjem izvirnega in odbitega valovanja na membrani nastane *stojno valovanje*. Nekatere točke na membrani mirujejo (tem točkam pravimo **vozli**), drugi deli pa nihajo z največjo amplitudo (tem pravimo **trebuhi**).
- **Zračni tlak v zaprti posodi:** Če zvočnik zapremo v posodo in jo nepredušno prekrijemo z elastično folijo, vsak premik zvočniške membrane spremeni tlak zraka v posodi. Stisnjeni zrak deluje kot elastična zračna blazina, ki potiska zunanjo membrano.
- **Optični vzvod:** Kako pretvoriti mikro-premike membrane v veliko sliko? Uporabimo odboj svetlobe! Če na membrano prilepimo majhno zrcalce in vanj usmerimo laserski žarek, zrcalce ob nihanju spreminja svoj kot. Laserski žarek, ki potuje do oddaljene stene, deluje kot izjemno dolg vzvod brez teže. Majhen nagib zrcalca za delček stopinje povzroči velik premik svetlobne pike na steni!

Zdaj je čas, da postanemo akustični inženirji. Naša naloga je sestaviti zvočno komoro, nanjo namestiti zrcalni optični vzvod ter z uporabo laserskega žarka in frekvenčnega generatorja razkriti skrite geometrijske vzorce zvoka na steni.

Boste uspeli uglasiti sistem tako, da se bo navadna laserska pika spremenila v stabilne vzorce, elipse in kompleksne Lissajousove figure?

Potrebni pripomočki

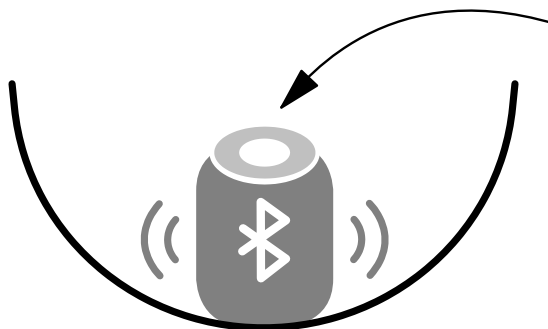
Za izvedbo naloge potrebujemo:

- Bluetooth zvočnik (primerne velikosti, da se ga lahko položi na dno skleda)
- Globoko skledo (npr. plastično ali kovinsko skledo za solato)
- Prozorno folijo za živila
- Škarje in močan lepilni trak
- Majhno, zelo lahko zrcalce (velikosti največ 1×1 cm; uporabi se lahko odsluženi del CD plošče, tanko stekleno zrcalce, ali zrcalca za izdelave disco krogel)
- Lepilo (ali obojestranski lepilni trak)
- Laserski kazalnik s stojalom (ali nekaj knjig in plastelin)
- Mobilni telefon ali prenosni računalnik z aplikacijo za generiranje tona
- Meter ali dolgo ravnilo
- Fotoaparat ali kamero (lahko na mobilnem telefonu)
- Zaščita za sluh

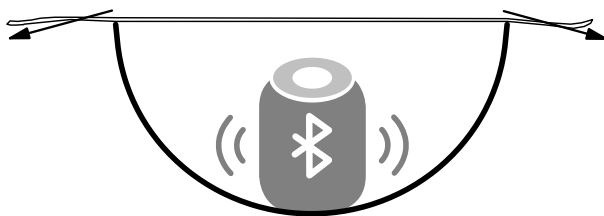
Opis poteka naloge

Če želimo opazovati laserski ples svetlobe, moramo najprej izdelati zadosti veliko membrano, da lahko nanjo namestimo zrcalce, ki bo laserski žarek odbilo. Najlažji način, da to storimo, je z uporabo kovinske ali plastične kuhinjske posode za solato, ki ima raven, trden, ter enakomeren rob.

V posodo položimo Bluetooth zvočnik in poskrbimo, da je ta povezan na osebni računalnik ali mobilni telefon. Preko robu nato napnemo prozorno folijo za živila. Folija mora biti resnično enakomerno napeta, brez vseh gub, saj le te povzročijo, da bo resonančna frekvenca naše opne popačena, rezultatu poskusa pa bomo težko verjeli.



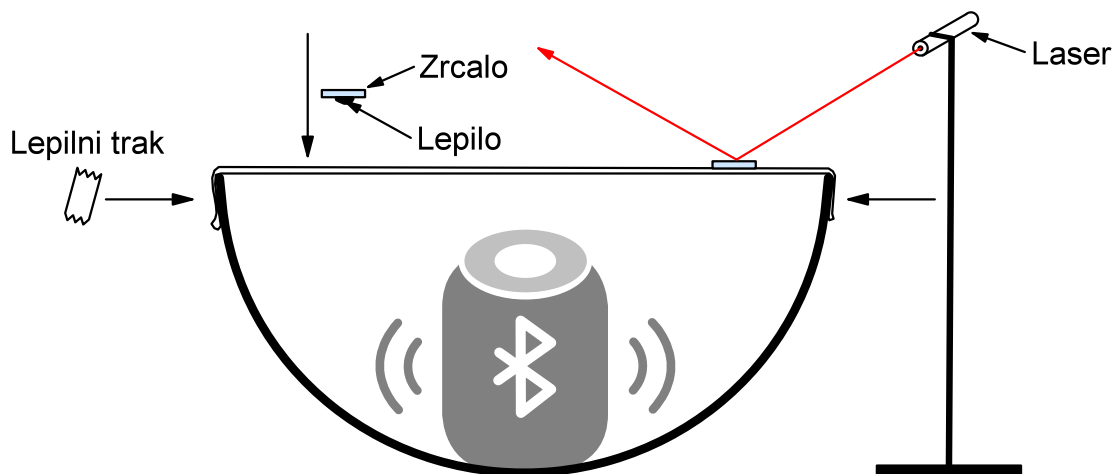
Slika 1: Ne pozabimo prižgati in povezati Bluetooth zvočnika



Slika 2: Opno napnemo preko robu posode

Folijo je najlažje najprej namestiti na nasprotnih koncih posode, nato pa počasi napenjati še preostali del po celotnem robu. Večina folij je dovolj elastičnih, da se samostojno oprimejo posode, bolje pa delujejo cenejše in tanjše folije, kot nekoliko debelejšje.

Če se folija ne oprime robu, si pomagamo z lepilnim trakom ali dovolj veliko elastiko.



Slika 3: Končna postavitev poskusa. Slika prikazuje namestitve zgolj dveh stranskih zrcal.

Na membrano nato namestimo 3 zrcalca na različne konce, pri čimer prvo zrcalce prilepimo točno na sredino nastale površine. Drobna zrcala lahko kupimo v trgovinah, ki prodajajo pripomočke za zabavo (*Tedi*), jih poiščemo v odpadnih ploščicah s pudri, ali pa uporabimo odslužen CD/DVD/BlueRay plošček, ki ga s kleščami previdno zlomimo na drobne koščke.

Za pritrdjevanje uporabimo dvostranski lepilni trak ali drobno kapljico sekundnega lepila. Poskušajmo čim manj obremeniti membrano, da se bo ta čim lažje odzivala na zvočne valove.



Slika 4: Pripomočki za izvedbo poskusa

Nato v zrcalce na sredini membrane posvetimo z laserjem. Tega najlažje najdemo v laserskih kazalnikih, njegova barva pa ni pomembna. Pričvrstimo ga na poljubno stojalo, lahko pa si pomagamo tudi s plastelinom in knjigami. Žarek preko zrcala usmerimo tako, da se pika pojavi na sredini prazne stene, kjer bomo pojav opazovali.

Dlje, kot je stena oddaljena od našega zrcala, lažje bomo opazovali spremembe žarka!

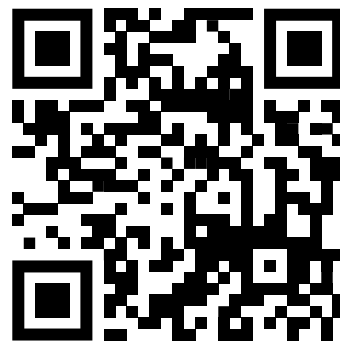


Slika 5: Primer namestitve treh zrcalc na membrano iz folije za živila

Sedaj je čas za prvi poskus. Na telefonu, ki je povezan na naš Bluetooth zvočnik, odpremo spletno aplikacijo za ustvarjanje laserskih slik, dostopno na: https://lso.si/laserski_osciloskop/

V aplikaciji vklopimo zvok, izberemo način resonance ter kot obliko valovanja nastavimo sinusno. S premikanjem drsnika nato spreminjamo frekvenco in opazujemo kaj se dogaja z vzorcem na steni.

Poskušajmo poiskati frekvenco, kjer bo laser na steni izrisal čim lepšo krožnico. Manjše frekvenčne korake lahko delamo s pomočjo gumbov za premik frekvence. Zapišimo si frekvenco. Z ravnilom ali metrom na steni izmerimo premer krožnice.



Slika 6: Spletna aplikacija

Nato poiščemo frekvenco pri kateri je rezultat čim večja elipsa. Pri tem pazimo, da vidimo zgolj eno elipso in ne dveh, saj bi to nakazovalo, da naša membrana niha še na višjem harmoniku. Tu bo morala biti nastavitve frekvence zelo natančna! Zabeležimo si frekvenco pri kateri na steni opazimo največjo elipso. Po potrebi prilagodimo tudi glasnost zvoka. Z metrom nato izmerimo kako velika je elipsa na steni.

Glasneje ni nujno tudi bolje! Če bo glasnost previsoka, lahko valovanje membrane popačimo do te mere, da vzorec ni več stabilen. Nastavitve glasnosti je odvisna tudi od zmogljivosti uporabljenega zvočnika.

Nato aplikacijo preklopimo v večtonski način. Kot prvi ton izberimo frekvenco za največjo elipso. Nato izberimo možnost 1:2 ali 2:3 (to pomeni, da dodamo še 2. ton, ki ima frekvenco $2 \times$ ali $2/3 \times$ višjo kot prvi ton). Frekvenco 2. tona prilagodimo tako, da na steni vidimo še eno elipso, ki s prvotno tvori poljuben vzorec. Spreminjajmo fazo in glasnost obeh tonov, ter opazujemo rezultat. Zapišimo si obe frekvenci.

Ko smo osvojili ustvarjanje vzorca s pomočjo dveh tonov dodamo še tretjega ali četrtega in poskušamo ustvariti čim bolj kompleksen vzorec na steni.

Pri ustvarjanju laserskih vzorcev naj imajo ti periodično strukturo, to pomeni, da vzorec ni povsem naključen, ampak lahko jasno opazimo in opišemo njegovo obliko.

Na koncu poskusimo vzorec ustvariti še s pomočjo udarjanja in FM modulacije. Poskušajmo dobiti čim bolj zanimive vzorce. Zabeležimo si nastavitve.

Ko preizkusimo vse možnosti v aplikaciji in imamo zapisane frekvence ter dimenzije krožnice/elipse (resonanca membrane v izbrani točki) poskus ponovimo še za preostali dve zrcali. Poskrbimo, da se razdalja med novim zrcalom in steno ne spremeni preveč, saj bo to vplivalo na naše ugotovitve.

V primeru, da zvok postane preveč moteč, uporabimo zaščito za sluh v obliki čepkov ali slušalk. **Vendar pozor!** Če v tem trenutku zmanjšamo glasnost, bomo morali meritve ponoviti od začetka, saj bo nemogoče primerjati točke membrane glede na velikost stenskih vzorcev.

Zopet si zabeležimo nastavitve in velikosti vzorcev na steni.

Na podlagi meritev določimo, katero izmed zrcal daje največje vzorce na steni.

Za konec preverimo, kako se vzorci spreminjajo ob predvajanju glasbe. Izberimo zrcalo, ki je proizvedlo največjo elipso na steni, ter vanj ponovno usmerimo laserski žarek.

Predvajamo vsaj naslednje pesmi:

- *Time of my life* – Benson Boone
- *Oj, Triglav, moj dom (radio edit)* - Laibach
- *Berghain* – ROSALÍA, Björk, Yves Tumor

Opazujemo v katerih delih pesmi se na steni pojavijo značilni vzorci, ki smo jih predhodno ustvarili s pomočjo spletne aplikacije. So to nižji ali višji toni? Lahko ob poplavi različnih zvokov razločimo elipse? Katera naša najljubša pesem ustvari najbolj zanimive vzorce na steni?

Raziskovanje v svet glasbenih vizualizacij se sedaj zares šele prične!

Laserski žarki in oko ne gredo dobro skupaj!

Varujmo svoj vid

Z laserskim žarkom nikoli ne svetimo neposredno v oko!

Nasveti

- Čim bolj enakomerno in močno je napeta folija za živila, višje bodo resonančne frekvence in čistejši bodo geometrijski vzorci. Če je folija ohlapna, bodo vzorci popačeni.
- Večja kot je razdalja od zrcalca do stene, večji bo vzorec na steni (večje bo povečanje optičnega vzvoda), kar omogoča natančnejše merjenje.
- Zrcalce mora biti čim manjše in čim lažje. Pretežko zrcalce bo s svojo maso zadušilo nihanje membrane.
- Poskus izvajajte v zatemnjenem prostoru, saj boste le tako jasno videli tudi bolj razpršene laserske vzorce pri višjih frekvencah.
- Ustrezno prilagodite glasnost, sodobni prenosni zvočniki so lahko celo premočni za naš poskus.
- Nekateri prenosni zvočniki umetno ustvarjajo močne base, kar lahko pokvari izvajanje našega poskusa. Če nam to omogočajo nastavitve zvočnika, poskusimo izključiti možnost globokih basov.
- *Uporabljajte le varne laserske kazalnike razreda 1 ali 2 (moč pod 1 mW)*

Dodatno

- Na membrano namestite še več zrcal. Ali dajo vsa zrcala največjo elipso pri isti frekvenci?
- Namesto folije za živila uporabite zelo velik napihljiv balon. Balon lahko kupite v trgovinah s pripomočki za zabavo. Kako se spremeni resonančna frekvenca membrane?
- Z meritvijo razdalje med zrcalom, steno in velikostjo vzorca izračunajte naklonski kot membrane pri izbrani frekvenci. Pomagajte si z umetno inteligenco.
- Po dnu sklede položite nekaj kosov puhaste vate. Kaj se spremeni?

Vprašanja za razmislek

- Pri kateri najnižji frekvenci ste opazili prvi stabilen geometrijski vzorec?
- Kaj se zgodi z obliko in kompleksnostjo vzorca, če frekvenco zvišate na točno dvakratnik (II. harmonik) prve resonančne frekvence?
- Kaj se zgodi z zrakom in zračnim tlakom znotraj zaprte skledе v trenutku, ko membrana zaniha navznoter?
- Zakaj že mikroskopsko majhen premik zrcalca na membrani ustvari več deset centimetrov velik vzorec na oddaljeni steni? Kako se temu pojavi reče v fiziki in kako bi izračunali njegovo povečavo?
- Kaj se zgodi z vzorcem, če zrcalce prilepite točno na sredino membrane v primerjavi s položajem tik ob robu skledе?
- Kako bi opisani optično-akustični sistem lahko uporabili v praksi za merjenje nevidnega hrupa ali vibracij v industrijskih strojih?