



Srednja šola Slovenska Bistrica

Ulica dr. Jožeta Pučnika 21

2310 Slovenska Bistrica

Raziskovalna naloga

OPAZOVANJE KONVEKCIJSKIH TOKOV V PLINIH S POMOČJO TEHNIKE SCHLIEREN

Raziskovalno področje: Fizika in astronomija

Avtorja: Aleksander Emeršič, 3. b in Zala Pučnik, 3. a

Mentor: mag. Marko Žigart, prof. fizike

Slovenska Bistrica, januar 2024

ZAHVALA

Za nasvete, pomoč in vodenje pri ustvarjanju raziskovalne naloge se zahvaljujema mentorju mag. Marku Žigartu, profesorju fizike. Za jezikovni pregled naloge se zahvaljujema Ivanu Žigartu, prof. slovenščine.

KAZALO VSEBINE

POVZETEK.....	5
1 UVOD.....	6
2 TEORETIČNI DEL	6
2.1 Optika.....	6
2.1.1 Geometrijska optika	6
2.2 Optična gostota.....	7
2.3 Lomni in odbojni zakon	7
2.4 Konkavno zrcalo in njegove lastnosti	8
2.5 Schlieren sistem	10
2.6 Uporaba Schlieren sistema/tehnike	12
2.7 Omejitve tehnike Schlieren.....	13
3 RAZISKOVALNI DEL	14
3.1 Eksperimentalna oprema.....	14
3.2 Postavitev Schlieren sistema.....	14
3.3 Fotografiranje	16
4 REZULTATI Z RAZPRAVO	17
6 ZAKLJUČEK.....	24
7 VIRI IN LITERATURA.....	25

KAZALO SLIK

Slika 1: Openprof. Prehod svetlobe iz optično redkejšje v optično gostejšo snov [online]. Pridobljeno 30. januarja 2024. Dostopno na spletnem naslovu: https://si.openprof.com/wb/odboj_in_lom_svetlobe?ch=202

Slika 2: Primerjava odboja žarkov od parabolnega in krogelnega zrcala (osebni arhiv)

Slika 3: Preslikava točkastega svetila v snop paralelnih žarkov [online]. Pridobljeno 30. januarja. Dostopno na spletnem naslovu: https://si.openprof.com/wb/optična_preslikava_-_zrcala?ch=204#solution

Slika 4: Točka O je središče krogelne kapice [online]. Pridobljeno 30. januarja. Dostopno na spletnem naslovu: https://si.openprof.com/wb/optična_preslikava_-_zrcala?ch=204#solution

Slika 5: Optična postavitev enozrcalnega schlieren sistema (osebni arhiv)

Slika 6: Postavitev sistema Schlieren (osebni arhiv)

Slika 7: Postavitev sistema iz drugega vzornega kota (osebni arhiv)

Slika 8: Postavitev rezila in LED diode pred kamero (osebni arhiv)

Slika 9: Fotografiranje v zatemnjenem prostoru (osebni arhiv)

Slika 10: Dviganje toplega zraka (osebni arhiv)

Slika 11 in 12: Pot toka toplega zraka pod vplivov pihanja (osebni arhiv)

Slika 13 in 14: Potovanje laminarnega toka (osebni arhiv)

Slika 15: Potovanje toka - dvojna slika (osebni arhiv)

Slika 16 in 17: Dvojna slika toka (osebni arhiv)

Slika 18 in 19: Tok butana (osebni arhiv)

POVZETEK

Zrak okoli nas kroži zaradi različnih dejavnikov. Med pogostimi je kroženje zaradi razlik v njegovi gostoti, ki so posledica različno segrelih delov zraka. Ker takšno gibanje s prostim očesom težko zaznamo, uporabimo optično tehniko, ki nam omogoča vizualizacijo konvekcijskih tokov plinov z neposrednim zaznavanjem sprememb lomnega količnika v snovi. Ena izmed njih je tehnika Schlieren, ki zaznava spremembe v lomu svetlobe, ki se pojavijo, ko svetloba potuje skozi snov z neenakomerno gostoto. Postavila sva optični sistem Schlieren, skozi katerega sva opazovala pretok zraka, toplejšega od sobne temperature. Videla in posnela sva, kako se topel zrak, ki ga oddaja sveča, zaradi manjše gostote dviga in kako se plin iz vžigalnika zaradi večje gostote od okoliškega zraka spušča proti tlom. Spremljala sva tudi konvekcijske tokove v bližini površine človeške kože. Prišla sva do ugotovitve, da je sistem Schlieren lahko zelo koristen in zanimiv, vendar mora biti sestavljen zelo natančno, če želimo priti do dobrih rezultatov.

KLJUČNE BESEDE: lom in odboj svetlobe, konvekcijski tokovi, tehnika Schlieren, fotografija

1 UVOD

Konvekcijski tokovi so gibanja plinov ali kapljev in zaradi različnih dejavnikov, kot so npr. tlačne razlike v tekočinah. Med pomembnimi vzroki za konvekcijo so temperaturne razlike, ki vplivajo na spremembo gostote tekočine, in sicer tako, da se redkejši deli tekočine zaradi vzgona dvigajo, hladnejši pa spuščajo. Konvekcija je učinkovit prenos toplote, ki poteka, dokler se temperature ne izenačijo. Zaradi konvekcijskih tokov tudi zrak okoli nas ves čas kroži. Tega ljudje ne moremo videti brez pomoči optičnih naprav. Zato sva si pri raziskavi pomagala s tehniko Schlieren.

Cilj našega raziskovanja je bil, da vzpostaviva sistem Schlieren in z njegovo pomočjo opazujeva ter posnameva konvekcijske tokove v zraku. Tako v prvem delu naloge predstavljava omenjeno optično tehniko, ki ima različne variante. Uporabila sva najpreprostejšo z zbiralnim zrcalom, točkovnim virom svetlobe, rezilom in kamero. V nadaljevanju naloge podrobneje predstavljava izgradnjo naprave in v zadnjem delu tudi rezultate našinega dela. Na koncu povzameva najpomembnejše ugotovitve, ki izhajajo iz našinih opazovanj.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Optika

Optika je področje fizike, ki preučuje lastnosti in obnašanje svetlobe. Ukvarja se tudi z obnašanjem svetlobe v interakciji s snovjo, torej preučuje, kako svetloba vpliva na snov in kako snov vpliva na pot svetlobe.

Optika se deli na tri osnovna področja, in sicer na geometrijsko, ki je pomembna za razumevanje pojavnosti Schlieren, valovno in kvantno optiko. [1]

2.1.1 Geometrijska optika

Področje geometrijske optike svetlobo obravnava kot žarke, ki se širijo vzdolž pravih linij, ne da bi upoštevala vpliv valovne naravne svetlobe. Ukvarja se z opisom in analizo širjenja svetlobe, za kar uporablja osnovne koncepte geometrije.

Glavni poudarek geometrijske optike je na sledenju poti svetlobnih žarkov skozi optične sisteme, kot so leče, zrcala in druge optične naprave.

Uporablja se pri analizi in oblikovanju optičnih sistemov, kot je Schlierenov. Geometrijska optika se skriva tudi za daljnogledi, mikroskopi in drugimi optičnimi napravami.

Temelji na Fermatovem načelu, ki pravi, da svetloba med dvema točkama potuje po takšni poti, za katero porabi najmanj časa. [2]

2.2 Optična gostota

Optična gostota je parameter, ki opisuje, kako hitro svetloba potuje skozi snov.

Ta parameter je povezan z lomnim količnikom snovi, skozi katero potuje svetloba. Lomni količnik (n) snovi je razmerje hitrosti svetlobe v vakuumu (c_v) in hitrosti svetlobe v snovi (c_s):

$$n = \frac{c_v}{c_s}. \quad [1]$$

Snovi z različnim lomnim količnikom imajo različno optično gostoto. Pri prehodu med dvema snovema z različnima gostotama pride do loma svetlobe. Sistem Schlieren omogoča vizualizacijo sprememb gostote v prostoru. Pri lomu žarkov se svetloba delno odbije, delno pa prodre v drugo snov. [7]

2.3 Lomni in odbojni zakon

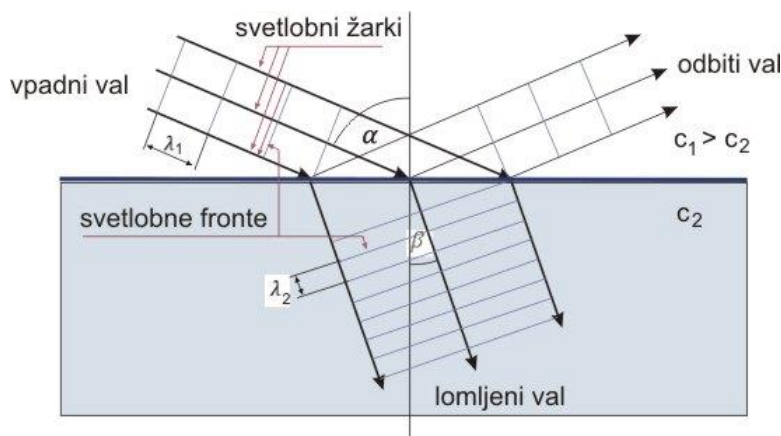
Fizikalna podlaga za pojav Schlieren temelji na lomnem zakonu. Ta pravi, da se hitrost svetlobe upočasni pri interakciji s snovjo. Če je prostor, v katerem potuje svetloba, homogen, potuje svetloba enakomerno s konstantno hitrostjo. Ko naleti na nehomogen prostor, kot so tekočine v gibanju, se svetlobni žarki lomijo in odklonijo od svoje prvotne poti.

Spremembe v gostoti ali temperaturi v snovi povzročajo spremembe v lomnem količniku, kar vpliva na pot svetlobe. Vemo, da imata topel in hladen zrak drugačno gostoto, zato pride ob prehodu svetlobe med njima do lomljenja žarkov. S tehniko Schlieren lahko te spremembe vizualiziramo in uporabimo za opazovanje poti toplega zraka.

Lomni zakon povezuje vpadni in lomni kot z lomnima količnikoma snovi 1 in 2 in ga izražamo z enačbo:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}. \quad [2]$$

Pri kateri n_1 in n_2 predstavljata lomna količnika snovi 1 in snovi 2, α vpadni kot (kot med vpadno pravokotnico in vpadnim žarkom), β pa lomni kot (kot med vpadno pravokotnico in lomljenim žarkom) (glej sliko 1). [10]



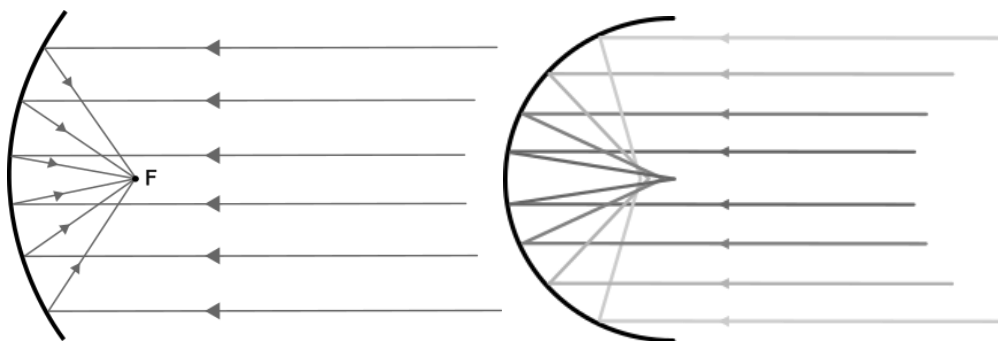
Slika 1: Prehod svetlobe iz optično redkejše v optično gostejšo snov

Odbojni zakon pravi, da je pri vpadu svetlobe na gladko ploskev vpadni kot α enak odbitemu. Vpadni kot merimo od navpičnice na mejno ploskev, enako tudi odbojni kot (glej kot α na sliki 1). Z odbojnim zakonom si pomagamo pri postavitvi vira svetlobe in kamere, drugače pa odbojni zakon sam po sebi na pojav Schlieren ne vpliva neposredno. [4]

2.4 Konkavno zrcalo in njegove lastnosti

Za izvedbo sistema Schlieren potrebujemo kvalitetno konkavno oz. vbočeno zrcalo, da je popačitev slike čim manjša. Kakovost površine zrcala vpliva na jasnost in ločljivost slike.

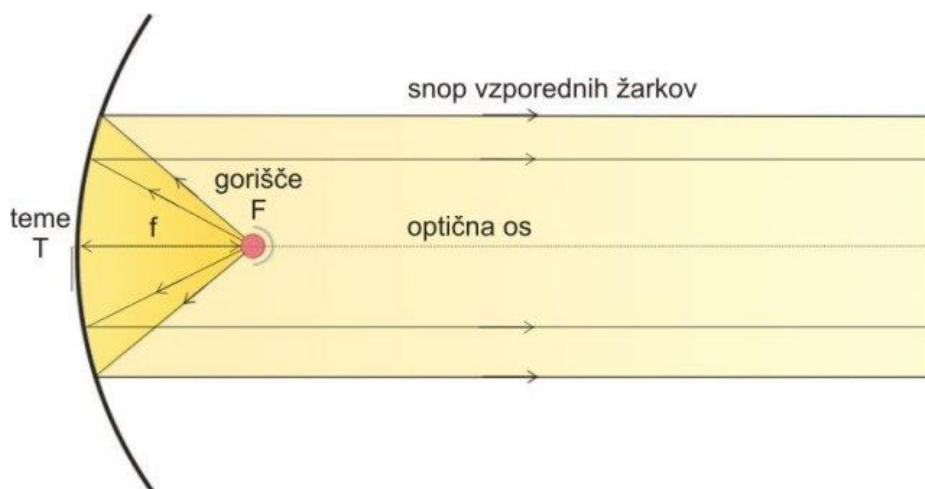
Za postavitev opisanega sistema lahko tudi uporabimo parabolična zrcala, saj so na tržišču lažje dostopna, ker so pogosto uporabljena kot glavna zrcala v reflektorjih, na primer v teleskopih tipa Newton ali Dobson. Ta zrcala omogočajo učinkovito zbiranje in usmerjanje svetlobe. Vsi vzporedni žarki, ki padajo v zrcalo, se po odboju sekajo v eni točki oz. gorišču.



Slika 2: Primerjava odboja žarkov od paraboličnega in krogelnega zrcala

Osnovni pojmi pri obravnavi zrcal:

- Središče zrcala imenujemo **teme zrcala**. Označeno je s točko T.
- Premica, ki je pravokotna na površino zrcala v točki T in potuje skozi teme zrcala, se imenuje **optična os**.
- **Gorišče zrcala ali fokus** (F) je točka, kjer se po odboju sekajo žarki, ki so pred odbojem vzporedni z optično osjo.
- **Goriščna razdalja** (f) je razdalja med goriščem in temenom zrcala.



Slika 3: Preslikava točkastega svetila v snop paralelnih žarkov

Snop svetlobe, ki vpade v konkavno zrcalo, se po odboju zbira in združi v eno točko, ki jo imenujemo gorišče ali fokus. Lahko je tudi obratno – točkasto svetilo, ki ga postavimo v gorišče, daje po odboju snop vzporednih žarkov (primer so avtomobilski reflektorji). Gorišče, v katerem se sekajo vsi žarki, ki so vzporedni z optično osjo, se nahaja na optični osi. Razdalja med temenom (T) in goriščem (F) se imenuje goriščna razdalja (f).

Goriščna razdalja

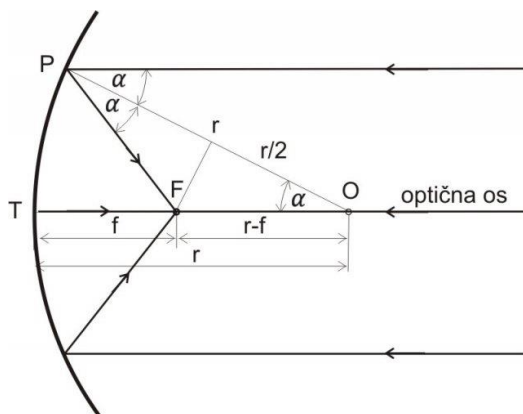
Goriščna razdalja zrcala je enaka polovici radija ali krivinskega polmera ukrivljenosti krogelnega zrcala:

$$f = \frac{r}{2}$$

Ta formula je veljavna le v primeru, da žarki vpadajo na zrcalo blizu optične osi. Zaradi tega se po navadi uporabljajo parabolična zrcala. Pri njih se vsi žarki, ki so vzporedni z optično osjo, sekajo v gorišču. Tudi midva sva za raziskovanje s tehniko Schlieren uporabila parabolično zrcalo. [2]

To, da je goriščna razdalja krogelne kapice približno enaka polovični dolžini krivinskega polmera za žarke, ki so vzporedni in blizu optični osi, lahko dokažemo s sliko 4.

Opazujmo vzporedni žarek, ki se odbije od zrcala v točki P. Na sliki 4 predstavlja radij r pravokotnico na ploskev, kjer se žarek odbije. Odbojni zakon pravi, da je vpadni kot α enak odbojnemu kotu. Kot med radijem (razdaljo med točkama P–O) in optično osjo je enak vpadnemu kotu α , saj sta to izmenična kota. Iz tega sledi, da je trikotnik PFO enakokrak trikotnik z osnovnico r . Višina trikotnika seka osnovnico na polovici, torej na $r/2$. [6]



Slika 4: Točka O je središče krogelne kapice.

2.5 Sistem Schlieren

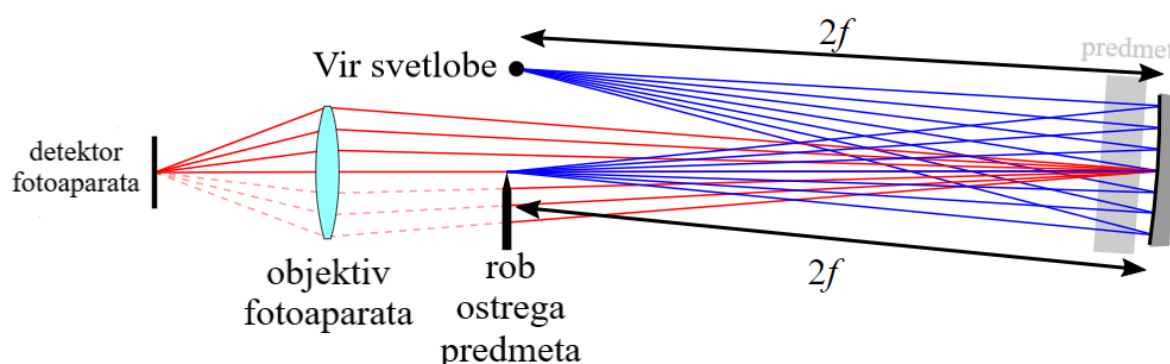
Omenjen postopek se uporablja, da lahko vizualiziramo pretoke tekočin. Fotografijo Schlieren je izumil nemški fizik August Toepler leta 1864, ko je preučeval nadzvočna gibanja, ki se danes pogosto uporabljajo v letalskem inženirstvu za fotografiranje toka zraka okoli predmetov. [8]

Klasična izvedba optičnega sistem Schlieren uporablja svetlobo iz enega samega kolimiranega ali vzporednega vira, ki sveti na ciljni predmet. Spremembe lomnega količnika, ki jih povzročajo lokalne spremembe v gostoti tekočin, popačijo kolimirani svetlobni žarek. To popačenje ustvarja prostorske spremembe v intenzivnosti svetlobe, ki jo je mogoče vizualizirati neposredno s sistemom senčnih grafov (shadowgraph). [8]

Klasični slikovni sistemi Schlieren se pojavljajo v dveh konfiguracijah: z uporabo enega ali dveh zrcal. V vsakem primeru je prozoren predmet osvetljen s kolimirano ali skoraj kolimirano svetlobo (glej sliko 5). Žarki, ki jih predmet ne odbije, gredo do svojega gorišča, kjer jih ustavi rob ostrega predmeta. Žarki,

ki jih predmet odbije, imajo možnost, da preidejo rob ostrega predmeta, ne da bi bili blokirani. Posledično lahko postavimo kamero za rob noža, tako da bo slika predmeta pokazala razlike v intenzivnosti svetlobe zaradi odklonov žarkov.

Rezultat je niz svetlejših in temnejših lis, ki ustrezajo pozitivnim in negativnim gradientom gostote tekočine. Ko se za zaustavitev žarkov uporablja rob ostrega predmeta, se sistem na splošno imenuje sistem Schlieren. Če se ta ne uporablja, se sistem na splošno imenuje sistem senčni graf (shadowgraph).



Slika 5: Optična postavitve enozrcalnega schlieren sistema

Za najboljšo natančnost moramo izboljšati naslednje osnovne principe:

1. **Koherentna svetloba:** Uporablja se koherentna svetloba, kot je svetloba iz laserskega vira. Koherentna svetloba pomeni, da so valovi svetlobe sinhronizirani – imajo enako frekvenco in časovno nespremenljivo fazno razliko, kar omogoča ustvarjanje jasnih interferenčnih vzorcev.
2. **Leče in zrcala:** V optični postavitvi eksperimenta Schlieren se uporabljajo leče in zrcala. Ključna leča je Schlieren leča (objektiv), ki je postavljena tik pred detektorjem (najpogosteje pred fotoaparatom ali kamerami). Zrcala se uporabljajo za usmerjanje svetlobe skozi sistem.
3. **Potovanje svetlobe:** Ko svetloba prehaja skozi testni medij (plin ali kapljevino), se lomi glede na različno gostoto in temperaturo medija. To lomljenje povzroči spremembe v faznih razmerah svetlobe, kar vodi do nastanka progastih (Schlieren) vzorcev.
4. **Interferenca:** Schlieren leča je postavljena tako, da izniči večino svetlobe, ki ni doživela sprememb v faznih razmerah. To pomeni, da se svetloba, ki ni bila ukrivljena, ne prenaša na detektor. Svetloba, ki je doživela spremembe, pa tvori svetlejše in temnejše območje, kar omogoča vizualizacijo razlik v gostoti medija.

Eksplozivni tokovi omogoča opazovanje različnih pojavov, kot so udarni valovi, konvekcijski tokovi in druge spremembe v gostoti tekočine. To je lahko koristno pri raziskovanju dinamike tekočin v aerodinamiki, preučevanju toplotnih procesov ali analiziranju različnih fizikalnih pojavov.

2.6 Uporaba tehnike Schlieren

Tehnika Schlieren se uporablja v različnih znanstvenih disciplinah zaradi njene sposobnosti vizualizacije majhnih sprememb v gostoti plinov ali tekočin. Nekaj takšnih primerov je:

Fizika v študiju plinskih tokov. To med drugim vključuje raziskovanje udarnih valov, gibanja plinskih oblakov in drugih dinamičnih procesov v plinskih medijih. Pri eksperimentih, povezanih z izmenjavo toplote in maso v plinskih ali tekočih sistemih, lahko Schlieren tehnika pomaga vizualizirati spremembe koncentracije in temperature.

Aerodinamika, v kateri se Schlieren eksperimenti uporabljajo za vizualizacijo zračnih tokov okoli letal, raket, vozil ali objektov, kar je ključno za razumevanje aerodinamičnih lastnosti plovil in izboljšanje oblikovanja.

V **biologiji** se tehnika Schlieren lahko uporablja za vizualizacijo bioloških procesov, ki vključujejo pretok tekočin. To vključuje raziskovanje krvnega pretoka v žilnem sistemu ali gibanje tekočin v celicah in tkivih.

V **medicini** se tehnika Schlieren lahko uporablja za raziskovanje dihalnih procesov. Na primer pomaga lahko pri vizualizaciji gibanja zraka in raziskovanju dihalnih poti. Pri biomedicinskih raziskavah se Schlieren tehnika lahko uporablja za vizualizacijo različnih bioloških procesov, vključno s tekočinskim gibanjem v organih.

Pri **kemiji** se tehnika Schlieren lahko uporablja pri študiju plinskih in tekočih reakcij – lahko omogoča opazovanje sprememb v koncentraciji in gostoti snovi, kar je ključno pri razumevanju kemičnih procesov.

Tehnika Schlieren tako zagotavlja dragocene podatke v različnih znanstvenih disciplinah, kjer je vizualizacija subtilnih sprememb v gostoti plinov ali tekočin ključna za razumevanje in raziskovanje določenih pojavov.

V vsakdanjem življenju je tehnika Schlieren uporabljena v:

- raziskavah eksplozivnih materialov za vizualizacijo plinskih oblakov, ki nastanejo ob eksplozijah. To pomaga pri oceni hitrosti in smeri širjenja plina ter boljšem razumevanju eksplozijskih procesov;

- sončnih kolektorjih za opazovanje toplotnih procesov, kot so koncentriranje sončne svetlobe in pretok toplote. To pomaga pri optimizaciji sončnih kolektorjev za učinkovitejše zbiranje sončne energije;
- preučevanje plinskih tokov v cevovodih, kar je pomembno za naftno in plinsko industrijo. Omogoča vizualizacijo morebitnih izlivov ali turbulentnih pojavov, ki bi lahko vplivali na varnost in učinkovitost operacij;
- preučevanju plazemskih tokov in obnašanja plazme v eksperimentih z jedrsko fuzijo. To je pomembno za razvoj tehnologij za nadzorovanje plazme in doseganje pogojev za združevanje jeder.

Zgornji primeri jasno kažejo, da tehnika Schlieren omogoča vizualizacijo in razumevanje kompleksnih pojavov, tudi v različnih industrijskih panogah ter prispeva k izboljšanju varnosti, učinkovitosti in razvoju novih tehnologij.

2.7 Omejitve tehnike Schlieren

Čeprav je, kot sva že zgoraj omenila, tehnika Schlieren zelo koristna pri vizualizaciji določenih pojavov, ima tudi svoje pomanjkljivosti in omejitve, s katerimi se znanstveniki in uporabniki soočajo med uporabo. Prva izmed teh je omejena občutljivost, saj je tehnika občutljiva na majhne spremembe v gostoti, vendar je lahko omejena pri zaznavanju zelo majhnih razlik. Za nekatere aplikacije, kjer so spremembe v gostoti zelo subtilne, se lahko zahteva visoka občutljivost in natančna kalibracija.

Motnje v zračnih tokovih ali vibracije v okolici lahko prav tako vplivajo na kakovost slik in natančnost meritev. Za doseg zanesljivih rezultatov je potrebno ustrezno nadzorovati pogoje okolja, če je to le mogoče. V nekaterih primerih, še posebej pri zelo turbulentnih tokovih, lahko pride do zamegljenosti slik, kar otežuje natančno analizo. To je še posebej zahtevno pri študijah s hitro premikajočimi se objekti ali kompleksnimi tokovi.

Ločljivost tehnike Schlieren je odvisna od optične opreme, uporabljene v eksperimentu. Omejena ločljivost lahko oteži zaznavanje majhnih podrobnosti ali manjših sprememb v gostoti.

3 RAZISKOVALNI DEL

3.1 Eksperimentalna oprema

Pri postavitvi sistema Schlieren smo uporabili naslednje pripomočke oziroma orodja:

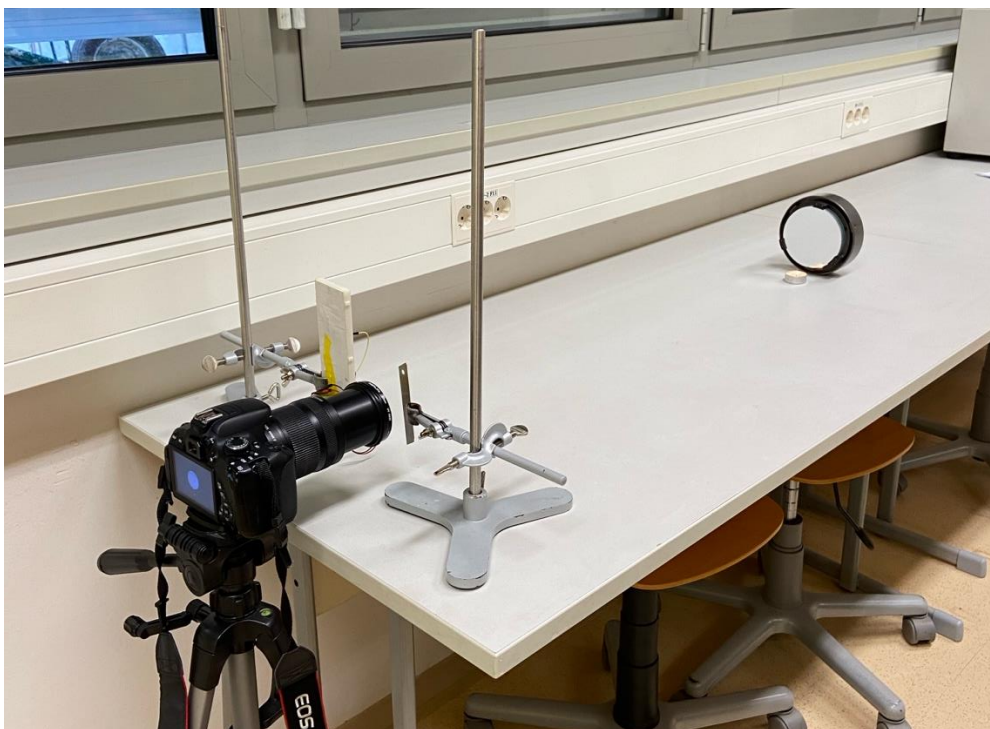
- Parabolično (konkavno) zrcalo teleskopa tipa Newton premera 11 cm
- LED-dioda (točkasti vir svetlobe)
- Ostro rezilo ali britvica
- Kamera
- Sveča
- Vžigalnik
- Sušilnik za lase

3.2 Postavitev sistema Schlieren

Postavitve sistema smo se lotili v prostoru, ki smo ga lahko zatemnili. Najprej smo postavili konkavno parabolično zrcalo, ki smo ga vzeli iz Newtonovega teleskopa. Premer zrcala je 11 cm, goriščna razdalja pa 50 cm. Nato smo izmerili dvakratno goriščno razdaljo (100 cm), kjer je krivinsko središče zrcala. Na tem mestu smo na laboratorijsko stojalo pritrdili LED-diodo. Ker je točkasti vir svetlobe oddaljen za točno dve goriščni razdalji, se njegova svetloba od zrcala odbije in zbere na isti razdalji. Če je svetlobni vir izmaknjen z optične osi, tako da leži na pravokotnici na os, se bo svetloba po odboju od zrcala zbrala v točki na nasprotni strani optične osi. S poizkušanjem poiščemo takšno lego, da bo svetlobna točka najmanjša. Na enaki višini tik za točko postavimo kamero tako, da gre snop svetlobe neposredno na zaslonko. Nato na drugo laboratorijsko stojalo s prižemo pritrdimo britvico, za katero postavimo kamero. Britvica prepolavlja točko svetlobe. Ko je sistem postavljen, vključimo kamero in objektiv prilagajamo, dokler ne vidimo belega kroga, ki nastane zaradi odbitih žarkov od zrcala.



Slika 6: Postavitev sistema Schlieren



Slika 7: Postavitev sistema z drugega zornega kota



Slika 8: Postavitev rezila in LED-diode pred kamero

Pred zrcalo smo postavili svečo in jo prižgali. Skozi fotoaparata smo videli, kako se od plamena dviga in potuje topel zrak. Posneli smo tudi konvekcijo okrog človeške dlani in pot toplega zraka iz sušilnika za lase.

3.3 Fotografiranje

Za jasne fotografije smo po tem, ko smo v objektiv ujeli celotno zrcalo, sliko izostrili in povečali ter fotoaparata nastavili na ročni način (manual mode). Ta način nam je omogočal popoln nadzor nad vsemi pomembnimi nastavitvami fotoaparata, kot so odprtost zaslonke, čas osvetlitve in ročno ostrenje.

Čas osvetlitev smo nato toliko zmanjšali, da svetloba, ki se je odbijala od zrcala, ni bila premočna in so se jasno videli temni madeži, ki so nastali zaradi toplejšega ali hladnejšega zraka. Sliko smo ponovno izostrili na zrcalo, da smo jasno videli temne madeže in naredili posnetke.



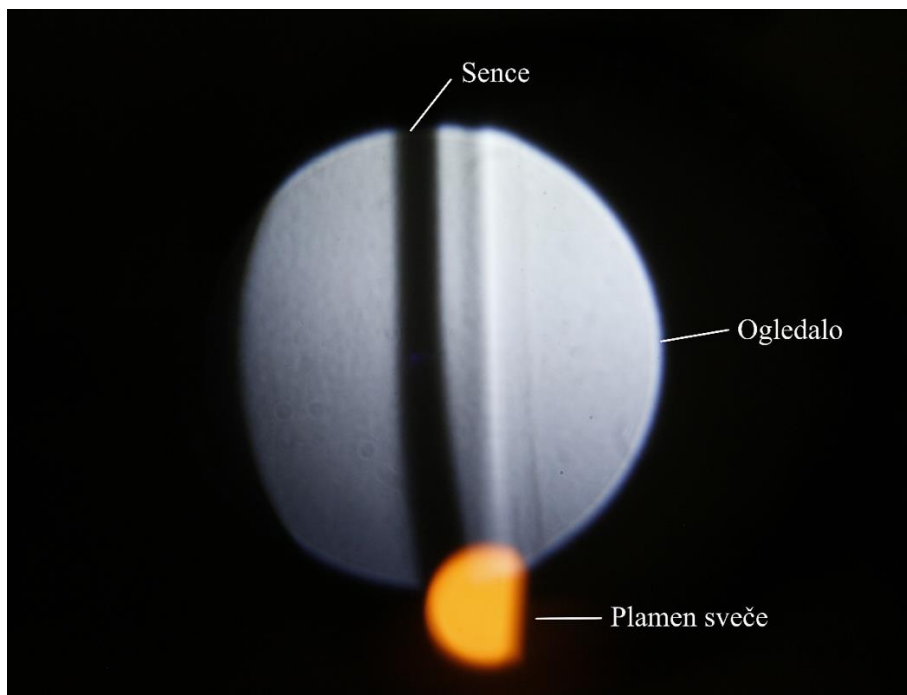
Slika 9: Fotografiranje v zatemnjenem prostoru

4 REZULTATI Z RAZPRAVO

Priprava sistema Schlieren je precej zahtevna. Na kvaliteto fotografij lahko vpliva že najmanjša motnja. Sistem mora biti zelo stabilen in nepremičen. Že najmanjši premik zrcala pomeni, da se vir svetlobe ne bo odbil pod želenim kotom in ne bo pravilno padel na zaslonko. To močno vpliva na vidljivost tokov na posnetih fotografijah.

Ko sva nastavila sistem, skozi katerega so se konvekcijski tokovi jasno videli, sva s pomočjo šolskega fotoaparata Canon EOS 650D posnela nekaj fotografij.

Najprej sva opazovala pot toplega zraka, ki je nastal ob gorenju sveče. Temperatura zraka je bila višja od sobne temperature. Vemo, da ima toplejši zrak manjšo gostoto in se zato zaradi vzgona dviga.



Slika 10: Dviganje toplega zraka

Na zgornji sliki 10 lahko vidimo zrcalo krožne oblike, plamen in sence pred zrcalom. S podrobnejšim opisom bova predstavila »motive« na sliki.

Plamen na fotografiji 10 je nekoliko zamegljen, ker je bil fotoaparat izostren na zrcalo in na dogajanje na njem.

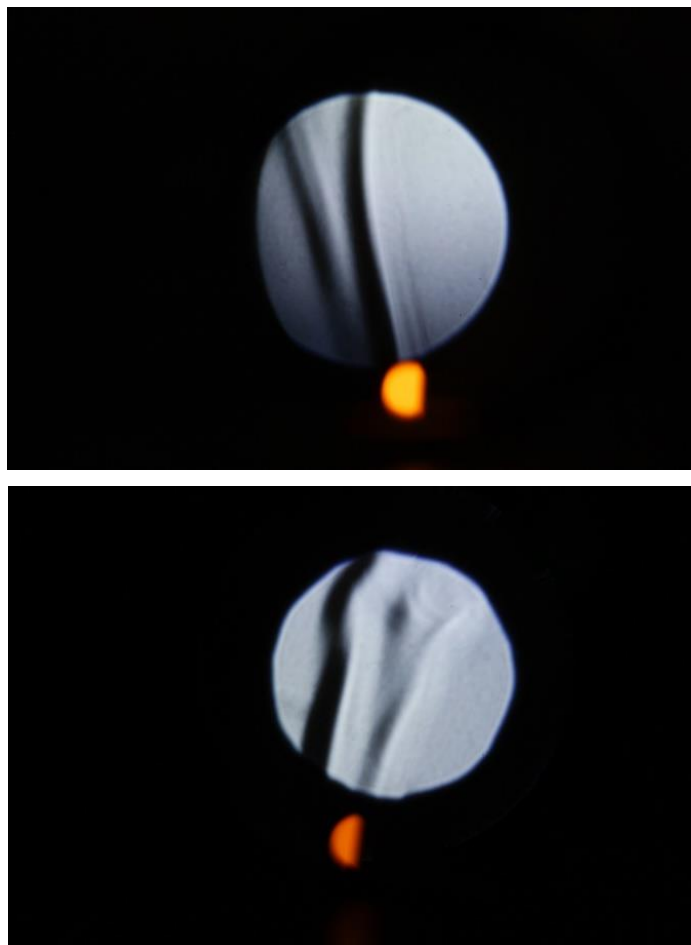
Zrcalo, ki sva ga v eksperimentu uporabljala, je bilo okroglo, kot lahko to opazimo na sliki. Hkrati pa lahko na sliki opazimo, da »sivina« ogledala ni po vsej ploskvi enako intenzivna. Neenakomerno osvetljenost zrcala dobimo, ker svetloba vira ni pravilno usmerjena v središče zrcala.

Sence ali senčna območja na sliki nastanejo zaradi različno segretyh delov zraka, ki jih segreva plamen. Tokovi so počasni in se širijo laminarno. Toplejši deli zraka imajo drugačen lomni količnik kot hladnejši. Zaradi drugačnega lomnega količnika se svetloba, ki se odbije od zrcala, ne odbije v fotoaparat, ampak se zamakne in pade na rezilo ostrega predmeta in tako na tistem območju nastane senca ali temna lisa.

Prikaz na sliki 10 je bolj enostaven, saj na tok ni vplival noben dejavnik. Tako je lahko tok toplejšega medija tek el enakomerno in gladko. Do negladkega toka lahko pride zaradi zunanje motnje.



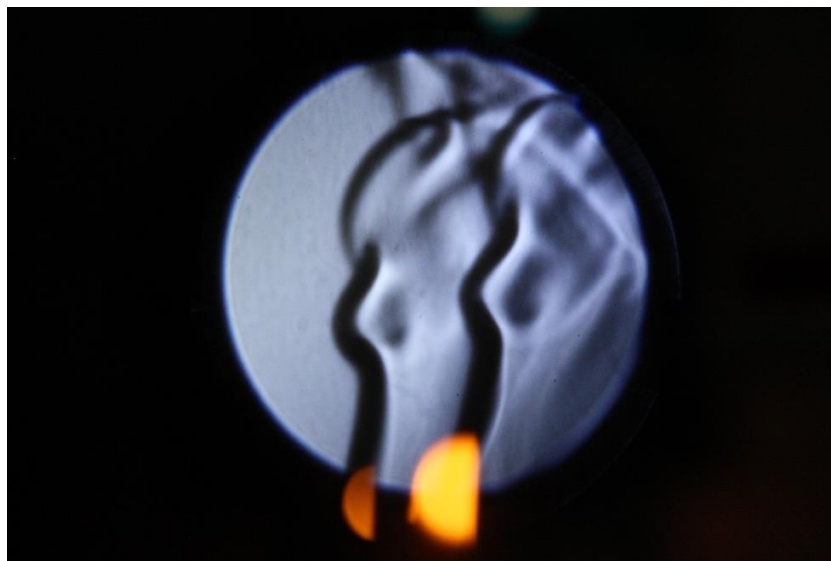
Slika 11 in 12: Pot toka toplega zraka pod vplivom pihanja



Slika 13 in 14: Potovanje laminarnega toka

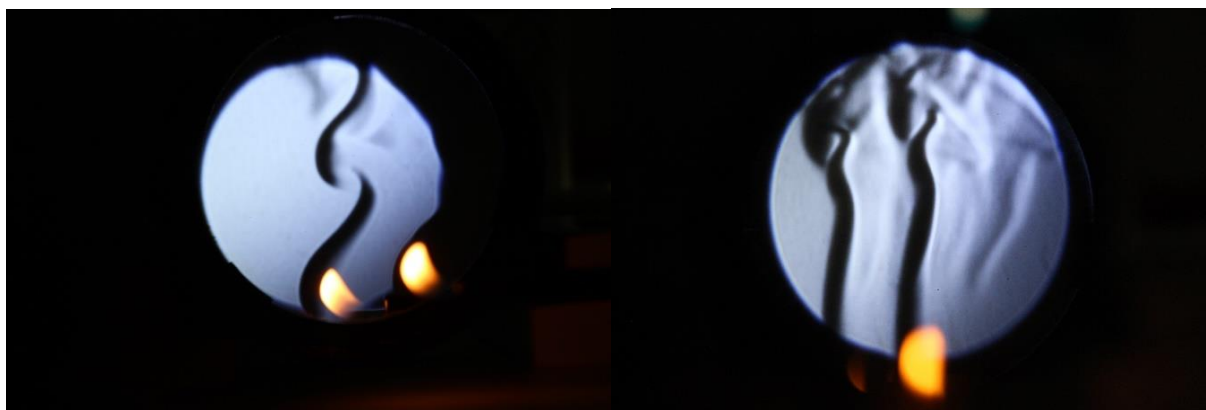
Za boljše rezultate sva eksperiment večkrat ponovila in poskusila različne pozicije luči in kamere. Poskusila sva jih postaviti nekoliko stran od optične osi, drugič pa čim bolj skupaj. Tako sva dobila posnetke iz različnih kotov.

Na slikah 15, 16 in 17 lahko vidimo »podvojen« plamen in tok.



Slika 15: Potovanje toka - dvojna slika

Vzrokov za nastanek dvojne slike je več, vendar je najbolj verjeten ta, da fotoaparat ni bil dovolj blizu optične osi zrcala. Tako sva v objektiv ujela pravi plamen (realni predmet) in plamen, ki ga ogledalo odseva.



Slika 16 in 17: Dvojna slika toka

Zanimalo naju je tudi gibanje drugih plinov v zraku. Opazovala sva tok butana (C_4H_{10}) iz vžigalnika. Butan je v vžigalniku v tekočem stanju in pod povišanim tlakom. Če tlaka ne bi bilo, bi se butan spremenil v paro, saj je njegovo vrelišče že pri $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na slikah 18 in 19 se vidi, kako butan v močnem ravnem curku puhne v prostor. Na videoposnetku je razvidno, da se plin začne spuščati proti tlom, s čimer dokažemo, da ima butan večjo gostoto od zraka.



Slika 18 in 19: Tok butana



Slika 20: Prikaz eksperimenta z butanom

Kot vir toplote sva uporabila še sušilnik za lase. Širjenje toplote sušilnika zaradi njegove moči nisva fotografirala, sva pa naredila video posnetek. Na njem se vidi, da se toplota iz sušilnika, dokler je ta prižgan, ne dviguje, temveč ga moč sušilnika usmerja v smer, v katero je obrnjen. Ko pa sušilnik izklopimo, gre preostanek toplega zraka navzgor proti stropu.

Skozi sistem se je zelo lepo videlo tudi, da človek v primeru, da je njegova temperatura višja od sobne, v svoji okolici ustvarja konvekcijske tokove. Z drgnjenjem rok druge ob drugo sva povečala temperaturo dlani in nato roko nastavila pred zrcalo. Roka je zaradi višje temperature sprožila konvekcijske tokove v okoliškem zraku. Najin sistem je bil torej dovolj natančen in občutljiv za manjše temperaturne razlike v opazovanem mediju. Povprečna telesna temperatura človeka se giblje med 35,7 in 37,3 °C, v učilnici, v kateri sva izvajala poskus, pa je bilo okoli 21 °C. Temperaturna razlika je torej znašala le 15 °C, kar je v primerjavi z razliko temperature plamena, ki lahko doseže tudi do 590 °C¹, zelo majhna razlika. Ker je temperaturna razlika plamena in učilnice toliko večja (okoli 440 °C), je topli tok sveče tudi toliko bolj izrazit in oster.

¹ Podatek dostopen dne 11. 2. 2024 na spletni strani:

<http://www.fizika.si/seminarji/TemperaturaPlamena/TemperaturaPlamena.pdf>

6 ZAKLJUČEK

Namen raziskovalne naloge je bil raziskati čim več o sistemu Schlieren, ga čim bolje postaviti in z njegovo pomočjo opazovati konvekcijske tokove v zraku.

Z nalogo sva razširila najino znanje o geometrijski optiki, hkrati pa pridobila oziroma izboljšala najine sposobnosti fotografiranja in snemanja.

Najina pričakovanja so bila v nalogi izpolnjena. Z novo pridobljenim znanjem o optiki in aerodinamiki bi lahko to nalogo nadaljevala. Ta eksperiment bi lahko razširila in prikazala še tokove drugih plinov in tekočin ter preizkusila tudi upodobitev aerodinamičnosti določenih predmetov.

Na področju najine naloge je vsekakor možnost nadaljnjega raziskovanja, vendar je lahko takšno delo težje izvedljivo na srednji šoli z omejenimi sredstvi in pripomočki.

7 VIRI IN LITERATURA

1. Wikipedija, prosta enciklopedija. 2023 [online]. Optika. Pridobljeno 13. 11. 2023. Dostopno na spletnem naslovu: <https://sl.wikipedia.org/wiki/Optika>
2. Wikipedija, prosta enciklopedija. 2024 [online]. Geometrijska optika. Pridobljeno 13. 11. 2023. Dostopno na spletnem naslovu: https://sl.wikipedia.org/wiki/Geometrijska_optika
3. Harvard Natural Sciences Lecture Demonstrations [online]. Lights and Optics. Pridobljeno 13. 11. 2023. Dostopno na spletnem naslovu: <https://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/light-and-optics>
4. Openprof [online]. Odboj in lom svetlobe. Pridobljeno 27. 1. 2024. Dostopno na spletnem naslovu: https://si.openprof.com/wb/odboj_in_lom_svetlobe?ch=202
5. Eucbeniki [online]. Fizika 8, poglavje Svetloba. Pridobljeno 27. 1. 2024. Dostopno na spletnem naslovu: <https://eucbeniki.sio.si/fizika8/143/index2.html>
6. Openprof [online]. Optična preslikava - zrcala. Pridobljeno 27. 1. 2024. Dostopno na spletnem naslovu: https://si.openprof.com/wb/optična_preslikava_-_zrcala?ch=204#Konkavno_ali_zbiralno_zrcalo
7. Splet arnes [online]. Svetloba v OŠ, Lom svetlobe. Pridobljeno 27. 1. 2024. Dostopno na spletnem naslovu: <https://svetloba.splet.arnes.si/lom-svetlobe/>
8. Wikiwand [online]. Schlieren photography. Pridobljeno 26. 1. 2024. Dostopno na spletnem naslovu: https://www.wikiwand.com/en/Schlieren_photography
9. National aeronautics and space administration. 2021 [online]. Schlieren System. Pridobljeno 27. 1. 2024. Dostopno na spletnem naslovu: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunvshlrm.html>
10. Wikipedija, prosta enciklopedija. 2015 [online]. Lomni zakon. Pridobljeno 21. 2. 2024. Dostopno na spletnem naslovu: https://sl.wikipedia.org/wiki/Lomni_zakon