

## 2 OHJELMOIDUT TYÖT

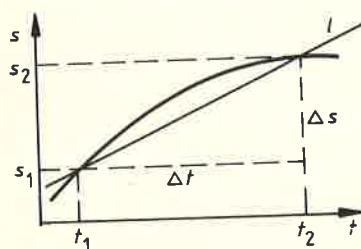
Ohjelmoitujen töiden tavoitteena on tutkittavan aiheen selvittämisen lisäksi fysikaalisten tutkimusmenetelmien harjoittelu. Opetellaan fysikaalisen koejärjestelyn tekemistä, mittauksen suorittamista, taulukoiden laadintaa, tulosten laskennallista käsittelyä, graafista esitystä ja tuloksen virheen arviointia. Näitä taitoja voidaan sitten soveltaa itsenäisissä töissä.

### 2.1 Putoamisliikkeen tutkiminen ajastimella

Kappaleen **keskinopeus** saadaan jakamalla kappaleen paikan muutos siihen kuluneella ajalla:

$$v_k = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

$ts$ -koordinaatistossa keskinopeus on pisteitä  $(t_1, s_1)$  ja  $(t_2, s_2)$  yhdistävän suoran  $l$  fysikaalinen kulmakerroin (kuva 1).



Kuva 1. Kappaleen keskinopeus on sekantin  $l$  fysikaalinen kulmakerroin.

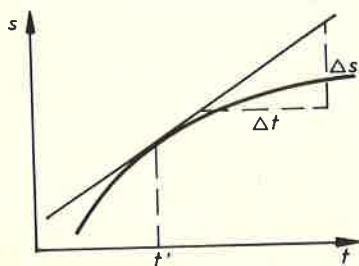
Kappaleen **hetkellinen nopeus** voidaan määrittää  $ts$ -koordinaatiston kuvaajasta graafista derivointia käyttäen. Kappaleen nopeus hetkellä  $t'$  on kuvaajan tangentin fysikaalinen kulmakerroin kohdassa  $t'$  (kuva 2):

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

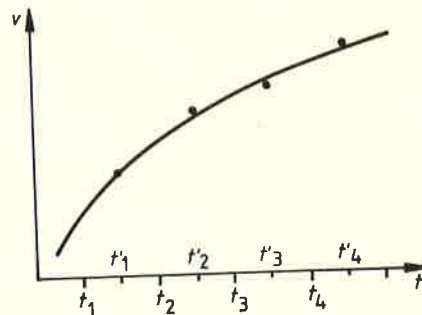
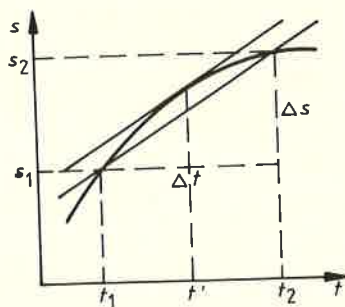
Tässä työssä selvitetään putoavan kappaleen likimääräinen hetkellinen nopeus määrittämällä kappaleen keskinopeus pienellä aikavälillä. Kuvan 3 a mukaisesti aikavälin  $t_1 \dots t_2$  keskikohdassa  $t'$  kappaleen hetkellinen nopeus on likimäärin

$$v = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Kun hetkellisiä nopeuksia on määritetty riittävän monen peräkkäisen aikavälin keskikohdissa  $t'$ , voidaan piirtää kappaleen nopeuden kuvaaja kuvan 3 b mukaisesti.



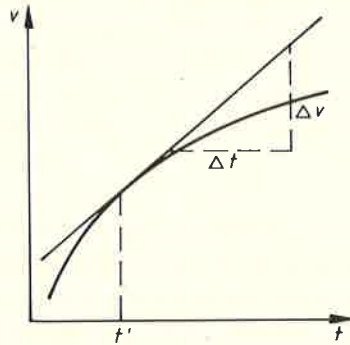
Kuva 2. Kappaleen nopeus hetkellä  $t'$  on tangentin fysikaalinen kulmakerroin.



Kuva 3. a) Kappaleen nopeus hetkellä  $t'$  on likimäärin kappaleen keskinopeus pienellä aikavälillä  $t_1 \dots t_2$ .  
b) Kappaleen nopeuden kuvaaja piirrettynä hetkellisiä nopeuksia käyttäen.

Nopeuden kuvaajan avulla voidaan määrittää graafista derivointia käyttäen kappaleen hetkellinen kiihtyvyys. Kiihtyvyys hetkellä  $t'$  on kuvaajan tangentin fysikaalinen kulmakerroin kohdassa  $t'$  (kuva 4):

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$



Kuva 4. Kappaleen kiihtyvyys hetkellä  $t'$  on tangentin fysikaalinen kulmakerroin.

Tämän työn tarkoituksena on määrittää sekä putoavan rautakappaleen että putoavan pahvilevyn nopeuden kuvaajat ja määrittää kuvaajien avulla kappaleiden kiihtyvyydet. Lisätyönä voidaan tutkia myös pahvilevyn vaikuttavia voimia.

## Välineet

ajastin ja ajastinnauhaa  
jännitelähde ( $\sim 6$  V)  
painokytkin  
rautainen pudotuskappale  
(esim. muuntajan I-sydän)  
statiivi  
puristin  
pehmustettu pudotusalusta

johtimia  
pahvilevy  
(ala  $> 40$  cm  $\times$  40 cm,  
massa  $< 70$  g)  
vaaka (tarkkuus 1 g)  
käyräviivain  
sakset  
maalariinteippiä

## Varoitus

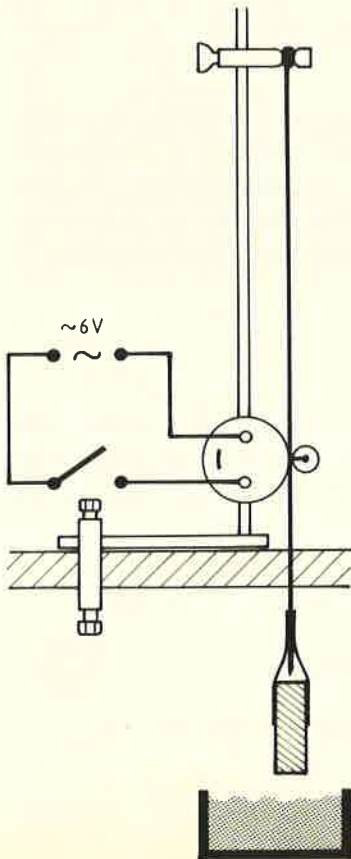
Älä pudota rautakappaletta lattialle, vaan pudotusalustalle.

## Työn suoritus

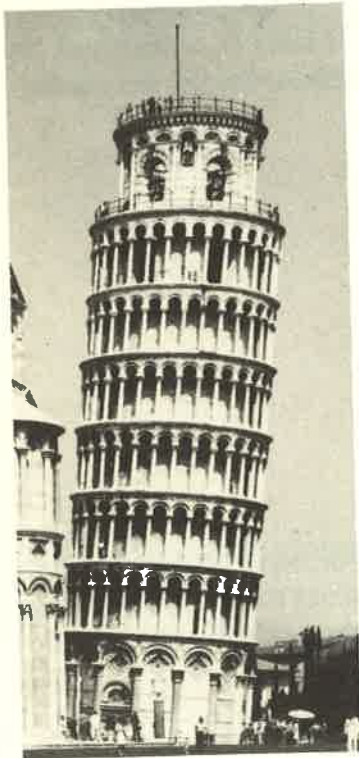
### 1. Rautakappaleen putoaminen

Kiinnitä statiivi puristimella tukevasti pöydän reunaan kuvan 5 mukaisesti. Asenna statiiviin ajastin ja puikko ajastinnauhan kiinnitystä varten. Tee sähkökytkennät jännitelähteen, kytkimen ja ajastimen välille. Aseta pudotusalusta paikalleen. Kiinnitä sitten noin 70 cm pitkän ajastinnauhan päähän pudotuskappale maalariinteipillä kuvan mukaisesti. Pujota nauha ajastimen läpi ja kiinnitä se teipillä statiivipuikkoon. Tarkista, että nauha kulkee vapaasti ajastimen raon läpi nojaamatta raon reunoihin.

Valitse ajastimen lyöntiaikaväliksi 0,02 s ( $1/50$  s). Paina kytkimestä. Nyt ajastin naputtaa alkupistettä. Katkaise sitten nauha ylhäältä saksilla terävällä leikkauksella. Jos nauhaan tuli selvästi näkyvät pisteet, niin kirjoita sen alkuun "rautakappaleen putoaminen". Jokaiselle työryhmän jäsenelle tehdään oma nauha analysoitavaksi.



Kuva 5. Koejärjestely ja sähkökytkennät ajastinmittausta varten.



Perimätiedon mukaan Galilei tutki putoamisliikettä pudottelemalla kappaleita Pisan tornista.

Vertaa omaa ja työtoverisi nauhaa asettamalla alkupisteet rinnakkain. Ovatko nauhojen muut vastinpisteet kohdakkain? \_\_\_\_\_  
Tämä johtuu siitä, että nauhan katkaisuhetki on osunut eri kohdille ajastimen lyöntien välisenä aikana.

Koska putoamisliikkeen alkuhetkeä vastaavaa nauhan kohtaa ei tunneta tarkasti, merkitään jotain nauhan alkupään pistettä vastaavaa hetkeä  $t_1$ :llä. Kappaleen hetkellisten nopeuksien määrittämiseksi valitaan pieneksi aikaväliksi 0,04 s. Merkitään nauhaan hetkeä  $t_1$  0,04 sekunnin aikavälein seuraavat hetket symboleilla  $t_2, t_3, \dots$ . Näitä hetkiä vastaa siis joka toinen nauhan piste.

Valitaan kappaleen lähtöpiste paikka-akselin origoksi. Mittaa ajastinnauhas-ta kappaleen paikka edellä mainittuina hetkinä 0,5 mm tarkkuudella ja merkitse mittaustuloksesi taulukkoon 1. Laske sitten taulukkoon kappaleen kul-lakin aikavälillä kulkema matka ja keskinopeus. Keskinopeuksia voidaan pi-tää kappaleen likimääräisinä hetkellisinä nopeuksina aikavälien keskikohdilla  $t'_1 = t_1 + 0,02$  s,  $t'_2 = t_2 + 0,02$  s,  $\dots$

Taulukko 1.

$t$	$s/m$	$\Delta s/m$	$\frac{\Delta s}{\Delta t} \frac{m}{s}$	$t'$
$t_1$				$t'_1$
$t_2$				$t'_2$
$t_3$				$t'_3$
$t_4$				$t'_4$
$t_5$				$t'_5$
$t_6$				$t'_6$
$t_7$				$t'_7$
$t_8$				

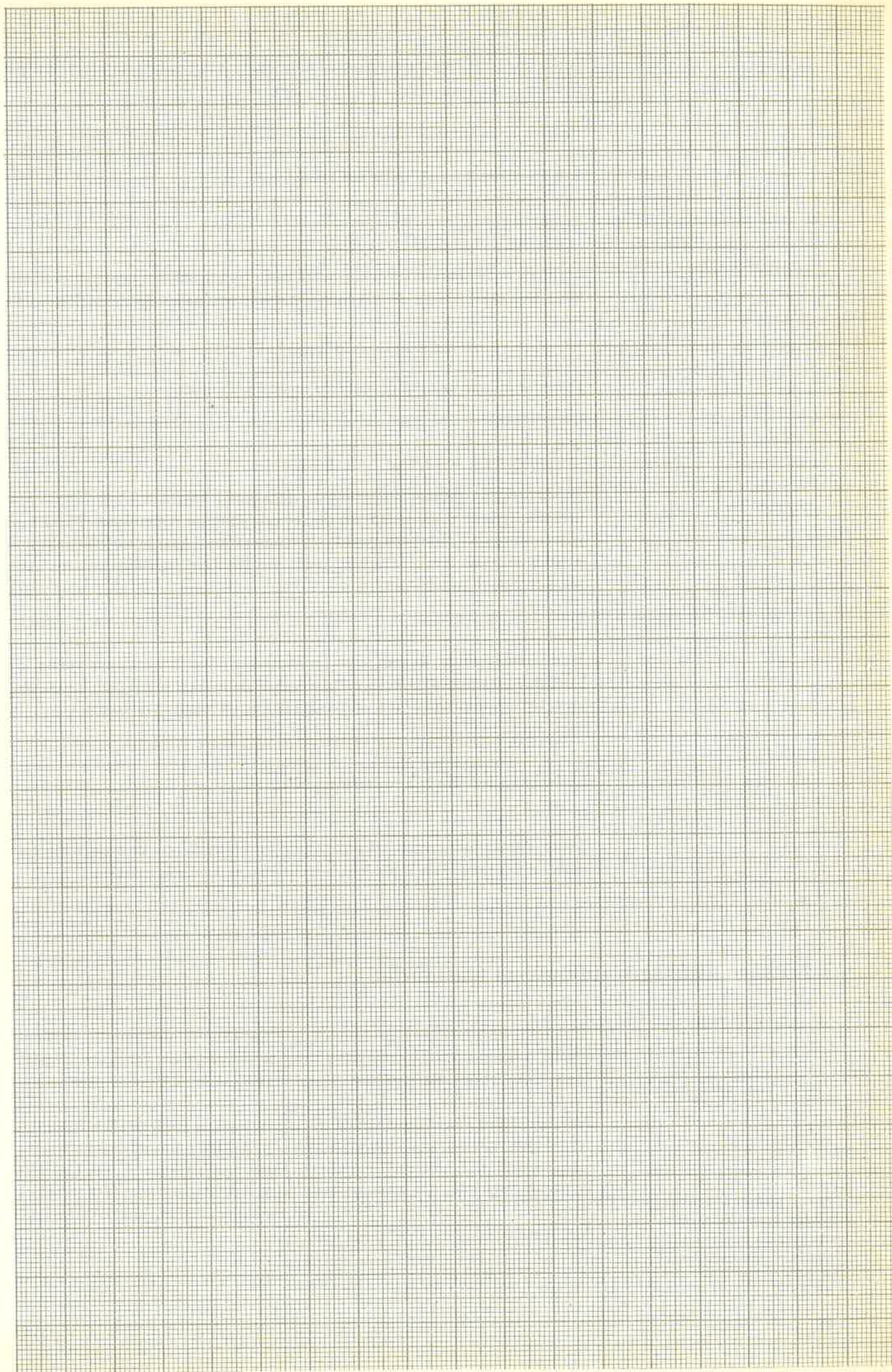
Merkitse  $tv$ -koordinaatistoon  $t$ -akselille hetkiä  $t'_1, t'_2, \dots$  vastaavat kohdat. Vaikka ei vielä tunneta  $v$ -akselin tarkkaa paikkaa, merkitään  $v$ -akselille sopi-va mitta-asteikko millimetripaperin vasempaan reunaan. Sijoita sitten hetkel-lisiä nopeuksia vastaavat pisteet koordinaatistoon riittävän kauaksi vasem-masta reunasta. Minkä muotoinen kuvaaja pisteiden perusteella tulee nopeu-den kuvaajaksi?

\_\_\_\_\_

Piirrä kuvaaja ja jatka (ekstrapoloi) sitä niin, että se leikkaa  $t$ -akselin. Näin saat putoamisliikkeen alkuhetken. Piirrä nyt  $v$ -akseli ja merkitse aika-akselille nauhan katkaisuhetkestä alkava aika-asteikko. Minkä arvon saa hetki  $t'_1$  tällä asteikolla ?

\_\_\_\_\_

Minkälaista on kappaleen liike saadun kuvaajan perusteella ?





## Välineet

oskilloskooppi (1-kanavainen riittää)	säädettävä vaihtojännitelähde (maksimijännite < 24 V)
taajuusgeneraattori	
kaiutin	erimittaisia johtimia
muuntaja (toisipuolella enemmän kierroksia kuin ensiöpuolella)	äänirauta 1700 Hz
mikrofoni	muovi- tai kumipäinen vasara
paristo 4,5 V	mittanauha hauenleukoja

## Työn suoritus

### 1. Oskilloskooppiin tutustuminen

Taulukossa 1 on selvitetty oskilloskoopin tärkeimpien säätimien ja liittimien nimet ja merkitykset. (Mikäli käytettävissä olevan oskilloskoopin englanninkielisiä nimiä ei löydy taulukon luettelosta, opettaja voi merkitä oskilloskooppiin taulukon numeroilla nämä säätimet.) Taulukon ohjeet ovat sekä 1- että 2-kanavaisille oskilloskoopeille.

Taulukko 1. Oskilloskoopin säätimet ja liittimet

englanninkielisiä nimityksiä	Säätimen tai liittimen merkitys
1. POWER (ON) OFF	<b>Verkkokytkin</b> , josta oskilloskooppiin kytketään jännite. Verkkokytkin voi olla kirkkauden säätimen (2) yhteydessä. Kytkemisen jälkeen lämpeneminen vie jonkin verran aikaa (n. 1/2 min).
2. BRILLIANCE BRILL BRIGHTNESS INTENSITY	<b>Kirkkauden säädin</b> muuttaa elektronisuihkun elektronien lukumäärää ja siis kuvapinnan valopisteen kirkkautta. Tämä säädin on usein verkkokytkimen yhteydessä.
3. FOCUS	Kuvan <b>terävyyden säädin</b> muuttaa elektronisuihkun hajontaa kuvapinnan kohdalla.
4. $\uparrow$ , $\downarrow$ Y SHIFT $\Delta$ POSITION $\nabla$	<b>Pystykeskityssäädin</b> ( $\uparrow$ -säädin) on kuvan pystysuuntaisen paikan säädin. Kaksikanavaisessa oskilloskoopissa on kummallekin kanavalle oma säädin.
5. $\leftarrow$ , $\rightarrow$ X SHIFT $\leftarrow$ POSITION	<b>Vaakakeskityssäädin</b> ( $\leftrightarrow$ -säädin) on kuvan vaakasuuntaisen paikan säädin.
6. TRIGGER MODE MODE	<b>Toimintokytkin</b> (liipaisun valitsin), jolla voidaan kytkeä erilaiset näytöt oskilloskooppiin. 1-kanavaisessa oskilloskoopissa esimerkiksi: NORM = pyyhkäisynäyttö (aika-akseli) TB OFF = pistenäyttö, jolloin x- ja y-tuloliittimiin kytketyt jännitteet määräävät valopisteen vaaka- ja pystysuoran paikan. 2-kanavaisessa oskilloskoopissa esimerkiksi: CH 1 = 1. kanavan pyyhkäisynäyttö CH 2 = 2. kanavan pyyhkäisynäyttö DUAL = molempien kanavien pyyhkäisynäyttö X—Y = pistenäyttö, jolloin x- ja y-liittimiin kytketyt jännitteet määräävät valopisteen vaaka- ja pystysuoran paikan.
7. TIME/CM SWEEP TIME/CM TIME/DIV	<b>Vaakapoikkeutusajan valitsin</b> , jolla voidaan valita vaakasuoran aika-akselin yksikkö (s/cm). Kaksikanavaisessa oskilloskoopissa kummallakin kanavalla on oma valitsin.
8. VARIABLE TIME VAR SWEEP	<b>Vaakapoikkeutusajan hienosäädin</b> . Vaakapoikkeutusaika saa asteikon mukaisen arvon, jos hienosäädin on CAL-asennossa.
9. VOLTS/CM VOLTS/DIV Y SENSITIVITY VERTICAL SENSITIVITY AMPLITUDE POSITION	Pystypoikkeutuksen <b>herkkyden valitsin</b> (vaimennin), jolla voidaan valita y-liittimiin kytketylle jännitteelle sopiva jänniteakselin yksikkö (V/cm). Kaksikanavaisessa oskilloskoopissa kummallakin kanavalla on oma valitsin.

10. VARIABLE  
VAR SENS  
FINE GAIN  
Y GAIN VERNIER

**Herkkyuden hienosäädin.** Herkkyys saa asteikon mukaisen arvon, jos hienosäädin on CAL-asennossa.

11. AC—DC  
AC—GND—DC

**Tulokytkin**, jonka asento valitaan kytketyn jännitteen mukaan:  
AC = vaihtojännite  
DC = tasajännite

12. INPUT  
(Y) (X)  
Y INPUT X INPUT  
Y IN  
VERTICAL (HORI—  
ZONTAL) INPUT

**Tuloliitin**, jonka kautta kytketään elektronisuihkun poikkeutuslevyihin jännite.

13. LEVEL  
TRIG(GER) LEVEL

**Liipaisujännitteen** alkuarvon **valitsin**. AUTO-, PULL AUTO- tai keskiasento yleensä käytössä. Kuvan ”juokseminen” voidaan pysäyttää tällä valitsimella.

14. STABILITY

Erytinen tahdistin, joka on joissakin oskilloskoopeissa. Tällä ja liipaisujännitteen valitsimella yhdessä säädetään liikkuva kuva vakaaksi.

---

Kytke oskilloskoopin johto pistorasiaan ( $\sim 220$  V). Kokeile sitten järjestyksessä taulukon säätimien 1—8 toimintaa niin, että opit käyttämään niitä luontevasti. Tutki erityisesti vaakapoikkeutusajan valitsimen asteikkoa pienimmästä suurimpaan. Missä ajassa valopiste kulkee kuvapinnan poikki, jos vaakapoikkeutusajan valitsin on kohdassa 10 ms/cm ja hienosäädin on CAL-asennossa?

---

Millä nopeudella elektronisuihku pyyhkäisee kuvapinnan poikki, kun valitsin on kohdassa 1  $\mu$ s/cm ?

---

Keskitä kokeilujesi jälkeen valopiste koordinaatiston origoon.

Kierrä sitten pystypoikkeutuksen herkkyyden valitsin (säädin 9 taulukossa) asentoon 2 V/cm. Liitä sitten 4,5 voltin paristo tuloliittimeen ja tutki taulukon säätimiä ja liittimiä 9—12. Kuinka paljon valopiste siirtyy origosta, jos herkkyys on 2 V/cm ja hienosäädin on CAL-asennossa ?

---

Liitä sitten äänitaajuusgeneraattori verkkojännitteeseen ( $\sim 220$  V) ja kytke verkkokytkimellä jännite. Kierrä taajuusgeneraattorin säätimet pienimpiin lukemiin. Kytke sitten taajuusgeneraattorin suuriohmiset liittimet oskilloskoopin Y-liittimeen ja aseta tulokytkin asentoon AC. Kasvata sitten jännitettä jännitteen säätimellä. Piirrä marginaaliin oskilloskoopin kuvapinnalle syntyvä kuva. Kierrä sitten taajuusalueen valitsin seuraavaan alueeseen. Mikä muutos on havaittavissa kuvan rakenteessa ja mistä se johtuu ?

---

Säädä taajuusgeneraattorin antaman värähtelyn taajuudeksi 100 Hz. Ota sitten käyttöön oskilloskoopin aika-akseli kytkemällä toimintokytkin pyyhkäisy näytölle ja valitse vaakapoikkeutusajaksi 1 ms/cm (aika-akselin yksikkö). Piirrä marginaaliin kuvapinnalle syntyvä kuva värähtelystä ajan funktiona. Päätele aika-akselin avulla, kuinka pitkä aika kuluu yhteen värähdykseen.

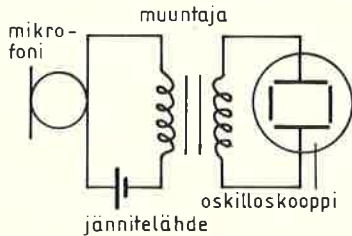
---

Muuttele aika-akselin mittayksikköä vaakapoikkeutusajan valitsimella. Näet joko useita värähdyksiä tai värähdyksen murto-osan.

Säädä kuvapinnalle yhden värähdyksen kuva. Muuttele sitten taajuusgeneraattorin taajuusalueita. Kuinka monen värähdyksen kuva nähdään, jos taajuus on a) 1 kHz, b) 10 kHz (päättelä)? a) \_\_\_\_\_ b) \_\_\_\_\_

## 2. Äänen tutkiminen oskilloskoopilla

Kytke taajuusgeneraattorin pieniohmisiin liittimiin kaiutin. Käy läpi taajuusgeneraattorin kaikki taajuudet muuttamatta jännitettä. Minkä taajuisen äänen kuulet voimakkaimmin ?



Kuva 5. Kaavio kytkennästä, jolla äänen värähtely muutetaan oskilloskoopilla nähtäväksi.

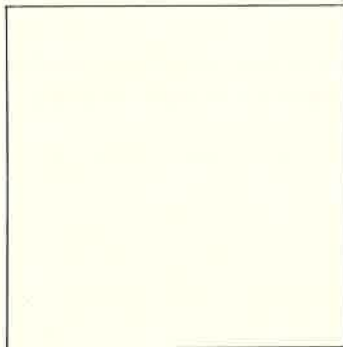
Mikä on suurin taajuus, jonka pystyt vielä kuulemaan ?

Pura kytkennät.

Kytke sitten mikrofonin, 4,5 voltin pariston ja muuntajan ensiöpuoli sarjaan sekä muuntajan toisiopuoli oskilloskoopin Y-liittimiin kuvan 5 mukaisesti. Vihellä mikrofonin ja valitse vaakapoikkeutusaika ja pystypoikkeutuksen herkkyys siten, että näet muutaman värähdyksen kuvan suurikokoisena. Mikä on vihellyksesi a) värähdysaika, b) taajuus?

a) \_\_\_\_\_ b) \_\_\_\_\_

Lyö sitten kumi- tai muovivasaralla 1700 hertzin äänirauta värähtelemään. Vertaa oskilloskoopikuvan avulla ääniraudan ääntä viheltämäsi ääneen.



Vähennä vaakapoikkeutusaikaksi 10 ms/cm, jolloin ääniraudan äänestä näkyy hyvin monta värähdystä kuvapinnalla. Lyö äänirauta soimaan ja vihellä samalla voimakkuudella likipitään yhtä korkeaa ääntä. Piirrä näiden kahden äänen aiheuttama interferenssikuvio marginaaliin. Kahden likipitään samantaajuisen aaltoliikkeen interferenssiä sanotaan **huojunnaksi**. Pura kytkennät.

## 3. Kahden toisiaan vastaan kohtisuoran värähtelyn alaisen värähtelijän liike

Keskitä oskilloskoopin valopiste koordinaatiston origoon. Kierrä herkkyden valitsimet (1-kanavaisessa valitsin) asentoon 2 V/cm. Kytke oskilloskoopin Y-tuloliittimeen taajuusgeneraattorin suuriohmisen liitin. Säädä taajuusgeneraattorin taajuudeksi 100 Hz ja kokeile jännitteen kasvattamista, jolloin piste värähtelee pystysuorassa suunnassa. Pienennä jännite nolnaan.

Kytke sitten oskilloskoopin X-tuloliittimeen (1-kanavaisessa oskilloskoopissa yleensä sen takana) säädettävän vaihtojännitelähteen navat. Kytke vaihtojännitelähde sähköverkkoon, kierrä jännitteen säädin nolla-asentoon ja kytke verkkokytkimestä jännite laitteeseen. Kasvata jännitteensäätimellä jännitettä, kunnes oskilloskoopin valopiste värähtelee vaakasuorassa 8 cm mittaista rataa edestakaisin. Vaihtojännitteen värähtelyn taajuus on 50 Hz.

Säädä valopiste värähtelemään samanaikaisesti pystysuorassa suunnassa 100 Hz taajuudessa kuvapinnan peittäväällä laajuudella. Kuvapinnalla nähtävä värähtelijän liikerata muodostaa ns. **Lissajous'n kuvion**. Säädä taajuusgeneraattorin taajuutta, kunnes saat kuvion liikkeen pysähtymään. Piirrä kuvion taulukkoon 2. Värähtelykuviossa on pystysuorassa suunnassa kaksi huippua siinä ajassa kuin vaakasuorassa suunnassa yksi huippu.

Säädä taajuusgeneraattorin antamalle taajuudelle taulukon 2 mukaiset arvot, pysäytä värähtelykuvion liike ja piirrä kuvio taulukkoon. Koska sähköverkosta saatavan vaihtojännitteen taajuus on hyvin tarkasti 50 Hz, voidaan Lissajous'n kuvioiden avulla samalla tarkistaa taajuusgeneraattorin asteikon tarkkuutta.

Taulukko 2. Lissajous'n kuvat, kun vaakasuoran värähtelyn taajuus on 50 Hz ja pystysuora värähtely saa taulukon mukaiset arvot:

Pystysuoran värähtelyn taajuus/Hz	100	75	50	25	20
Lissajous'n kuvio					
Huippuja pystysuorassa suunnassa					
Huippuja vaakasuorassa suunnassa					

Mikä yhteys on pystysuorassa ja vaakasuorassa suunnassa tapahtuvien värähtelyjen taajuuksien ja näissä suunnissa olevien huippujen lukumäärien välillä?

---



---

### Lisätehtäviä

#### 1) Äänen aallonpituuden ja nopeuden määrittäminen

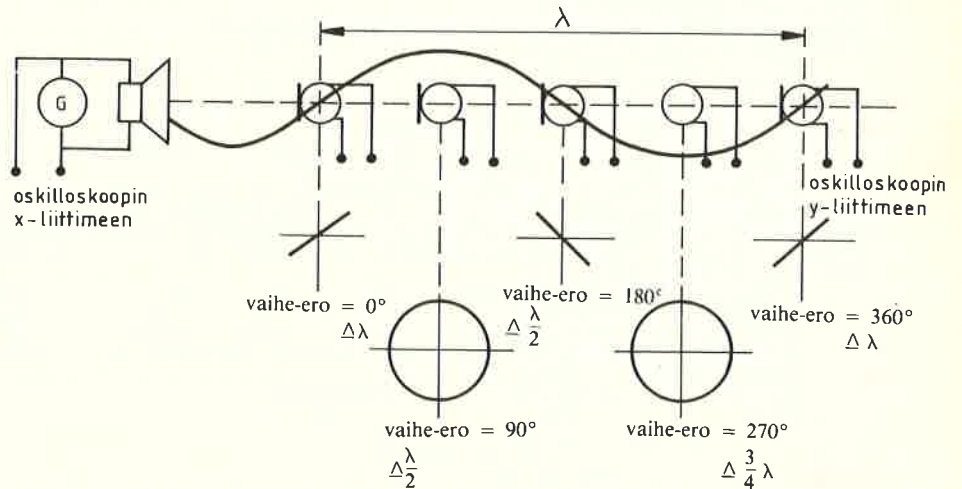
Jos taajuusgeneraattorin asteikko edellisessä kokeessa osoittautui epätarkaksi, niin määritä 1700 hertsin äänirautaa käyttäen Lissajous'n kuvion avulla asteikolta kohta, jossa taajuusgeneraattori antaa hyvin tarkasti 3400 Hz taajuista värähtelyä. Määritetään seuraavassa tämäntaajuisen äänen avulla äänen aallonpituus ja nopeus.

Kytke 3400 Hz taajuudelle säädetyin taajuusgeneraattorin pieniohmisiin napoihin kaiutin ja suuriohmisiin napoihin oskilloskoopin X-liittimet. Säädä valopiste värähtelemään noin 4 cm:n amplitudilla.

Kytke sitten edellä kuvan 5 mukaista kytkentää käyttäen mikrofoniipiiri muuntajan välityksellä oskilloskoopin Y-liittimeen.



Kun mikrofoni asetetaan vähän matkan päähän kaiuttimesta, oskilloskoopin valopiste joutuu värähtelemään taajuusgeneraattorista ja mikrofonista tulevien samantaajuisten värähtelyjen alaisena (vrt. taulukossa 2 taajuutta 50 Hz). Syntyvän Lissajous'n kuvion muodon määrää värähtelyjen vaihe-ero, joka riippuu mikrofonin ja kaiuttimen välisestä etäisyydestä. Jos etäisyys on aallonpituus  $\lambda$  tai sen monikerta, on vaihe-ero nolla. Vaihe-eroa vastaavat kuvat muuttuvat kuvan 6 mukaisesti.



Kuva 6. Lissajous'n kuvion muodon riippuvuus komponenttivärähtelyjen vaihe-erosta ja kaiuttimen ja mikrofonin välisestä etäisyydestä.

Aseta pöydälle mittanauha äänen etenemisen suuntaisesti siten, että mikrofonin ollessa sen nollakohdassa on oskilloskoopin kuvapinnalla vino viiva (säädä tarvittaessa pystypoikkeutuksen herkkyyden säädintä). Siirrä sitten mikrofonia mitan vieressä tarkasti 8 aallonpituutta. Ota lukema muistiin ja toista mittaus. Mittauksien perusteella

$$8\lambda = \underline{\hspace{4cm}}$$

Mittauksen perusteella äänen aallonpituus on

$$\lambda = \underline{\hspace{4cm}}$$

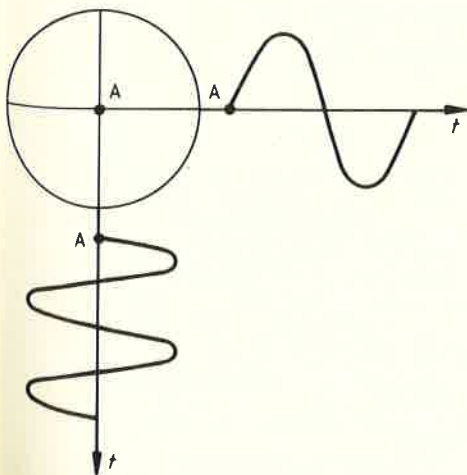
Laske sitten ääniaaltojen etenemisnopeus  $v$  käyttäen aaltoliikeopin perusyhtälöä  $v = f\lambda$ .

$$v = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Mikä on kirjallisuuden mukaan äänen nopeus huoneen lämpötilassa ?

## 2) Lissajous'n kuvion piirtäminen

Oheiseen kuvioon on piirretty oskilloskoopin X- ja Y-liittimiin viedyt värähtelyt ajan  $t$  funktiona. Piirrä oskilloskoopin kuvapinnalle värähtelijän liikerrata, kun se on samanaikaisesti kummankin värähtelyn alaisena. Pisteellä A on merkitty värähtelijän paikka alkuhetkellä. Kuinka moninkertainen on x-akselin suuntaisen värähtelyn frekvenssi  $f_x$  verrattuna y-akselin suuntaisen värähtelyn frekvenssiin  $f_y$ ?



## 2.7 Linssin polttoväli ja kuvausvirheet

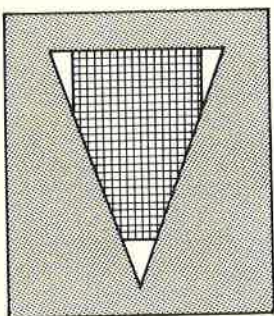
Linssi muodostaa esineestä täydellisen kuvan, jos kaikki esineen pisteestä lähteneet ja linssin läpi kulkeneet valonsäteet leikkaavat toisensa samassa pisteessä, kuvapisteessä. Tämä on mahdollista vain äärettömän ohutta linssiä käytäen. Todellisella linssillä on aina paksuutta ja siksi sen synnyttämä kuva on jossain määrin epäterävä. Ohuelle linssille pätee likimäärin **kuvausyhtälö**

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

missä  $a$  on esineen etäisyys,  $b$  kuvan etäisyys ja  $f$  linssin **polttoväli** eli **polttopisteen**  $F$  etäisyys linssin keskipisteestä. Valonsäteiden poikkeamista kuvausyhtälön esittämästä laista sanotaan **kuvausvirheiksi**.

Tässä työssä on tarkoituksena määrittää sekä kuperan että koveran linssin polttoväli eri menetelmillä ja tutkia joitakin kuvausvirheitä.

### Välineet



Kuva 1. Kuvioitu esinelevy.

optinen penkki (n. 150 cm)  
mittanauha (2 m)  
projektorilamppu ja sille jännitelähde  
kondensorilinssi (+ 5 cm)  
tutkittavat linssit, joiden polttovälit  
ovat + 15 cm... + 25 cm ja  
- 20 cm... - 30 cm  
kuvan 1 mukainen pahvilevy, johon  
tehdyssä kolmioaukossa on  
kuvioitu muovikalvo

taskulamppu  
lukulamppu  
punainen ja sininen värisuodatin  
iirishimmennin  
rengashimmennin (peittää linssin  
keskiosan)  
varjostin

Työ suoritetaan pimennettävässä luokassa.

### Varoitus

Älä koske sormin linssin lasiin. Kiinnitä linssit tukevasti optiseen penkkiin. Noudata työpaikalla annettuja jännitelähteen käyttöohjeita.

### Työn suoritus

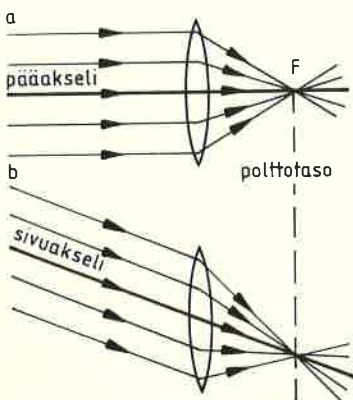
#### 1. Kuperan linssin polttovälin määrittäminen kuvan tai esineen paikan perusteella

a) Kuvausyhtälön mukaan polttoväli voidaan määrittellä äärettömän kaukana olevasta esineestä ( $a = \infty$ ) muodostuneen kuvan etäisyydeksi linssistä. Kuvausyhtälöhän saa tässä tapauksessa muodon

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

mistä nähdään, että polttoväli  $f = b$ .

Kun esine on äärettömän kaukana linssistä, siitä lähtevät valonsäteet tulevat yhdensuuntaisesti linssiin ja linssissä taituttuaan leikkaavat toisensa linssin polttopisteessä kuvan 2a mukaisesti. Jos valonsäteet tulevat sivuakselin suuntaisesti, ne leikkaavat toisensa kuvan 2b mukaisesti **polttotasolla**, joka on polttopisteen sisältävä pääakselia vastaan kohtisuora taso.



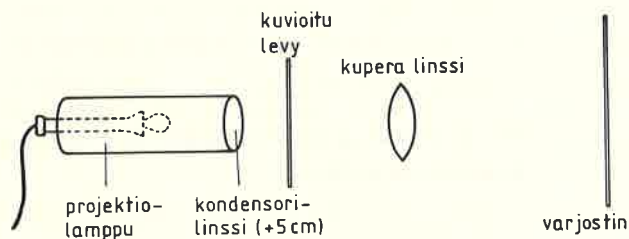
Kuva 2. a) Pääakselin, b) sivuakselin suuntaisten valonsäteiden kulku kuperan linssin läpi.

Aseta tutkittava kupera linssi ja varjostin optiseen penkkiin sekä taskulamppu kauaksi pimennetyssä luokassa. Säädä linssin ja varjostimen välinen etäisyys

sellaiseksi, että varjostimella on terävä kuva lampusta. Mittaa kuvan etäisyys linssin keskikohdasta. Tämän mittauksen mukaan linssin polttoväli

$$f = \underline{\hspace{4cm}}$$

b) Kuvausyhtälön mukaan polttoväli voidaan määritellä myös sellaisen esineen etäisyydeksi linssistä, josta muodostuu kuva äärettömän kauaksi linssistä ( $b = \infty$ ).



Kuva 3. Kaaviokuva koejärjestelystä.

Aseta kaaviokuvan 3 mukaisesti optiseen penkkiin projektiolamppu ja välittömästi sen jälkeen kondensorilinssi (+ 5 cm) niin, että se kokoaa valon tasaisesti kuvioituun esinelevyyn. Etsi sitten kuperalle linssille sellainen paikka, että kuvioidusta levystä muodostuu terävä kuva kaukaiselle varjostimelle (seinälle). Mittaa kuvioidun levyn etäisyys linssin keskikohdasta. Tämän mittauksen mukaan linssin polttoväli

$$f = \underline{\hspace{4cm}}$$

## 2. Kuperan linssin polttovälin määrittäminen kuvausyhtälön avulla

Muuta edellisessä koejärjestelyssä varjostin noin 1 metrin päähän linssistä. Etsi sitten linssille sellainen paikka, että varjostimelle tulee terävä kuva esineestä. Mittaa kuvioidun levyn etäisyys  $a$  ja varjostimen etäisyys  $b$  linssin keskikohdasta sekä laske kuvausyhtälön avulla linssin polttoväli

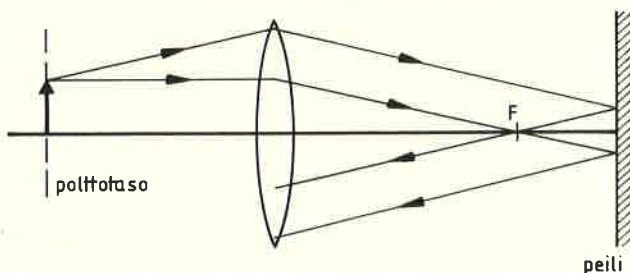
$$a = \underline{\hspace{4cm}} \quad b = \underline{\hspace{4cm}}$$

$$\frac{1}{f} = \underline{\hspace{4cm}} = \underline{\hspace{4cm}}$$

$$f = \underline{\hspace{4cm}}$$

## 3. Kuperan linssin polttovälin määrittäminen peilimenetelmällä

Kun esine on linssin polttotasossa kuvan 4 mukaisesti, esineestä lähteneet valonsäteet ovat linssin toisella puolella yhdensuuntaiset. Kun asetetaan peili valonsäteiden tielle, ne heijastuvat takaisin ja taittuvat linssissä siten, että ne leikkaavat toisensa linssin polttotasossa. Esineen kohdalle muodostuu esineen kuva.



Kuva 4. Kaaviokuva peilimenetelmästä.

Kaaviokuvaan 4 on valittu kaksi esinepisteestä lähtevää valonsädettä, jotka osuvat peiliin yhtä kaukana linssin pääakselista. Piirrä jatkoa näiden säteiden kululle ja esinenuolesta muodostuva kuva.

Siirrä edellisessä koejärjestelyssä linssi likimäärin polttovälin etäisyydelle kuvioidusta esinelevystä ja aseta suunnilleen yhtä kauaksi linssistä peili. Etsi siten linssille sellainen paikka, että esinelevyn taakse muodostuu terävä kuva. Minkä kokoisena esinekolmioon verrattuna ja mihin asentoon kolmio kuvautuu?

Mittaa kuvan ja linssin keskikohdan välinen etäisyys. Tämän mittauksen mukaan linssin polttoväli

$$f = \underline{\hspace{5cm}}$$

#### 4. Koveran linssin polttovälin määrittäminen linssisysteemin avulla

Koveran linssin polttoväliä ei voi suoraan mitata, koska linssi muodostaa todellisesta esineestä aina valekuvan, jota ei saada varjostimelle. Seuraavassa muodostetaan todellinen kuva edellä tutkitun kuperan linssin ja tutkittavan koveran linssin linssisysteemin avulla.

Jos linssit ovat ohuita ja kiinni toisissaan, on likimääräisesti voimassa suu-  
reyhtälö

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

missä  $f$  on yhdistelmän polttoväli sekä  $f_1$  kuperan linssin ja  $f_2$  koveran linssin polttoväli. Kuinka suuri pitää  $f_1$ :n itseisarvon olla verrattuna  $f_2$ :n itseisarvoon, jotta tätä menetelmää voidaan käyttää koveran linssin polttovälin määrittämiseen?

Lisää 3. kohdan koejärjestelyyn välittömästi kuperan linssin jälkeen kovera linssi ja etsi linssisysteemille sellainen paikka, että esinelevyn taakse muodostuu terävä kuva. Mittaa linssisysteemin polttoväli ja laske koveran linssin polttoväli.

$$f = \underline{\hspace{5cm}} \quad f_1 = \underline{\hspace{5cm}}$$

$$\frac{1}{f_2} = \underline{\hspace{5cm}} \quad = \underline{\hspace{5cm}}$$

$$f_2 = \underline{\hspace{5cm}}$$

#### 5. Koveran linssin polttovälin määrittäminen kuperan linssin antaman kuvan avulla

Kaaviokuvan 5 mukaisesti määritetään ensin varjostimen avulla kuperan linssin esineestä  $e_1$  muodostaman kuvan  $k_1$  paikka. Sitten asetetaan kovera linssi varjostimen ja kuperan linssin välille. Varjostimelle etsitään uusi paikka siten, että saadaan terävä kuva. Tässä tapauksessa kuperan linssin antama kuva  $k_1$  toimii koveran linssin esineenä  $e_2$ . Kun on mitattu koveran linssin esineen  $e_2$  ja kuvan  $k_2$  etäisyydet  $a_2$  ja  $b_2$  linssistä, voidaan kuvausyhtälön avulla laskea koveran linssin polttoväli.

## Lisätehtäviä

### 1) Optinen aktiivisuus

Käytetään edellistä koejärjestelyä. Aseta maitohappoa (tai noin 20 % sokeriliuosta) läpinäkyvässä kyvetissä ristikkäisten polarisaatiosuodattimien väliin. Mitä havaitset varjostimella ?

---

Kierrä analysaattoria sen verran, että se ei päästä valoa läpi.

Koe osoittaa, että polarisoituneen valon värähtelysuunta on kiertynyt liuoksessa. Tällaista ainetta sanotaan **optisesti aktiiviseksi**. Aineen optinen aktiivisuus johtuu sen molekyylien epäsymmetrisyydestä. Aine voi olla joko oikealle tai vasemmalle kiertävä. Oikealle kiertäväksi sanotaan ainetta, joka kiertää valonsädettä vastaan katsoen polarisaatiosuuntaa myötäpäivään. Miten päin kiertää maitohappo (sokeriliuos) ?

---

Kiertymiskulma riippuu aineen laadun lisäksi liuoksen väkevyydestä ja valon kulkemasta matkasta liuoksessa. Kiertymiskulmaa mitataan käytännössä **polarimetrillä**.

### 2) Sironneen valon polarisaatio

Pese kyvetti ja täytä se vedellä. Valaise liuosta projektiolampulla ja säädä kondensorilinsi siten, että valonsädekimppu menee kyvetin läpi varjostimelle. Lisää ja sekoita veden joukkoon tipoittain maitoa tai jotain muuta veteen liukenematonta ainetta, kunnes varjostimelle tuleva valo muuttuu punertavaksi. Veteen sekoitettu maito aiheuttaa valon **siroamisen** joka puolelle. Tutki polarisaatiosuodattimella kyvetin kyljestä sironnutta valoa. Mitä havaitset ?

---

Edellä kokeillun kaltainen ilmiö tapahtuu ilmakehässä, kun auringon valo siroaa siinä. Sininen valo siroaa enemmän kuin punainen ja siksi taivas näyttää siniseltä. Punaista siroamatonta valoa nähdään iltaruskona, kun taivaanrannalta tulevasta auringon valosta on sininen valo sironnut pois. Taivaan sinisen valon polarisaatiota voi tutkia polarisaatiosuodattimella, jos sääolosuhteet sen sallivat.

3) Miten on selvitettävissä, mikä polarisaatiosuodattimen asento päästää vaakasuoraan lineaarisesti polarisoituneen valon läpi ?

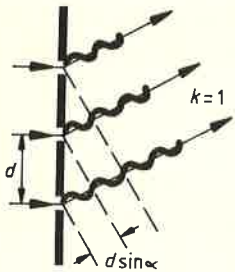
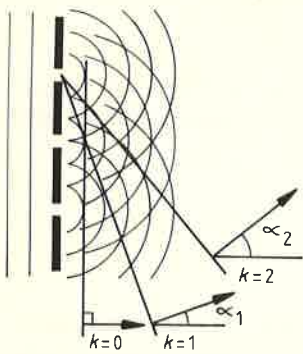
---

---

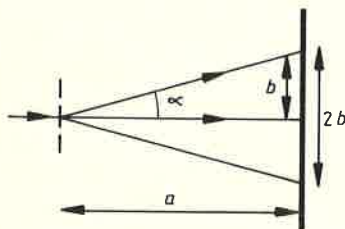
---

## 2.9 Hilavakion ja valon aallonpituuden määrittäminen

**Optisen hilan** muodostaa suuri joukko yhdensuuntaisia rakoja. Vierekkäisten rakojen välimatka on vakio, ja siitä käytetään nimitystä **hilavakio**  $d$ . Hiloja voidaan valmistaa vetämällä timanttikärjellä lasilevyille yhdensuuntaisia uurteita. Valo pääsee läpi lasipinnan sileistä osista. Tällaisista hiloista voidaan valokuvaamalla tehdä halpoja jäljennöksiä.



Kuva 1. Valon taipuminen ja interferenssi hilassa.

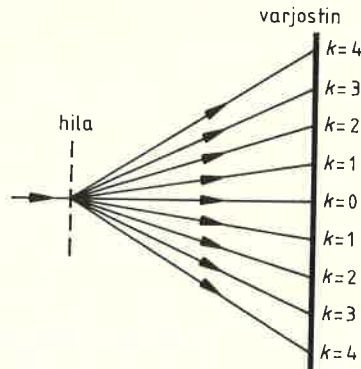


Kuva 3. Taipumiskulman  $\alpha$  määrittäminen.

Hilan rako on aallonpituuden suuruusluokkaa, ja se aiheuttaa aaltoliikkeen ja sen energian hajaantumista. Ilmiötä sanotaan valon **taipumiseksi** eli **diffraktioksi**. Useasta raosta taipuneet alkeisaallot **interferoivat** kuvan 1 mukaisesti. Aallot vahvistuvat Huygensin periaatteen mukaisesti aaltorintamiksi suunnissa, joissa viereisistä raoista lähtevien aaltojen matkaero  $d \sin \alpha$  on aallonpituuden  $\lambda$  jokin monikerta

$$d \sin \alpha = k\lambda, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Kerrointa  $k$  sanotaan **kertaluvuksi**. Sen arvoa 0 vastaava valon osa menee suuntaansa muuttamatta hilan läpi. Muita kertalukuja vastaava valo taipuu symmetrisesti alkuperäisen suunnan suhteen kuvan 2 mukaisesti. Laserin monokromaattinen valo taipuu hilassa useaksi erilliseksi valonsäteeksi.



Kuva 2. Monokromaattisen valonsäteen taipuminen hilassa useaksi säteeksi.

**Taipumiskulma**  $\alpha$  voidaan määrittää trigonometrisesti mittaamalla varjostimen etäisyys  $a$  hilasta ja varjostimella valoisan kohdan etäisyys  $b$  taipumiskuvion keskikohdasta. Tällöin kuvan 3 mukaisesti

$$\tan \alpha = \frac{b}{a}$$

Tämän työn tarkoituksena on määrittää annetun hilan hilavakio käyttäen He-Ne-laserin monokromaattista valoa, jonka aallonpituus on 632,8 nm. Lisäksi määritetään tiiviin kankaan lankojen välimatka. Lopuksi määritetään tunnettua hilaa käyttäen näkyvän valon aallonpituusalue piirtoheittimen tai diaprojektorin avulla.

## Välineet

He-Ne-laser	kangasta
hila (noin 50 rako/mm)	taskulamppu
piirtoheitin ja 2 kpl peitepahveja	maalariinteippiä
tai diaprojektori ja mustaan diafilmiin tehty kapea rako	tarraa
mittanauha 10 m	prisma
heijastava (lasi)levy	sulkia

Työ suoritetaan pimennettävässä luokassa.

## Varoitukset

- Laservalo saattaa vahingoittaa silmää. Myös heijastunut lasersäde voi olla vaarallinen.
- Hilalevyyn tai piirtoheittimen ja diaprojektorin linsseihin ja peileihin ei saa koskea sormin.

## Työn suoritus

Suuntaa laserlaite osittain pimennetyin luokan seinää kohti. Kytke laseriin valo. Kiinnitä heijastava levy (ei hopeapeili) teipillä seinään valon osumiskohtaan. Suuntaa lasersäde kohtisuoraan seinää vastaan, jolloin levystä heijastunut säde yhtyy tulevaan säteeseen. Laserlaitteen voi kiinnittää tarralla pöytään siten, että se ei liiku mittauksia tehtäessä.

Aseta (esimerkiksi tarralla) lasersäteen eteen hila siten, että diffraktiokuvio tulee vaakasuoraan seinälle. Mittaa hilan etäisyys seinästä:

$$a = \underline{\hspace{4cm}}$$

Mittaa sitten mahdollisimman tarkasti samaa kertalukua olevien valopisteiden keskinäiset välimatkat seinältä ja merkitse tulokset taulukkoon 1. Tarkoituksena on määrittää hilavakio monen kertaluvun valopisteiden antamien arvojen keskiarvona. Lasketaan laskimella taulukkoon eri kertaluvuilla saatavat hilavakiot ja niiden keskiarvo riittävän monen merkitsevän numeron tarkkuudella. Kirjoita ensin laskemiseen tarvittavat suureyhtälöt ja sijoita niihin ensimmäisen hilavakion laskemiseen tarvittavat arvot:

$$\tan \alpha_1 = \underline{\hspace{4cm}}$$

$$\alpha_1 = \underline{\hspace{4cm}}$$

$$d_1 = \underline{\hspace{4cm}} = \underline{\hspace{4cm}}$$

$$= \underline{\hspace{4cm}}$$

Määritä muut arvot suoraan taulukkoon laskimen avulla.

Taulukko 1.

$k$	$2b/m$	$b/m$	$d/\mu\text{m}$

Hilavakioiden keskiarvo  $\bar{d} = \underline{\hspace{4cm}}$

Arvioi tuloksen mittaustarkkuus saatujen hilavakioiden keskiarvon keskihajonnan avulla.

$$s(\bar{d}) = \frac{s(d)}{\sqrt{n}} \approx \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

missä  $\sigma$  voidaan laskea laskimella (vrt. 2.1 a).

Keskiarvon keskihajonaksi saadaan

$$s(\bar{d}) = \underline{\hspace{4cm}}$$

joten hilavakion arvo on noin 68 % todennäköisyydellä

$$d = \underline{\hspace{4cm}} \pm \underline{\hspace{4cm}}$$