

Eksperimentell bestemmelse av Lyshastigheten

Christopher Ljosland Strand
Frederic Ljosland Strand

13.01.2026

Sammendrag

I dette forsøket ble lyshastigheten i luft bestemt ved å måle tidsforsinkelsen mellom utsendt og mottatt lyssignal for ulike avstander. Tidsmålingene ble utført med et oscilloskop ved hjelp av et synkroniseringssignal og et reflektert lyssignal fra en fotodiode. Sammenhengen mellom tilbakelagt strekning og effektiv forplantningstid ble analysert ved minste kvadraters metode for en rett linje gjennom origo, og usikkerheten i resultatet ble estimert ved feilforplantning.

Den målte lyshastigheten ble funnet til $c_{\text{målt}} = (3,09 \pm 0,02) \times 10^8 \text{ m/s}$, i overensstemmelse med etablerte referanseverdier for lyshastigheten i luft og vakuum innenfor den beregnede måleusikkerheten. Resultatet viser at det med det benyttede måleoppsettet ikke er mulig å eksperimentelt skille mellom lyshastigheten i luft og i vakuum.

1 Innledning

Lysets hastighet er en fundamental konstant i fysikken og spiller en sentral rolle i både klassisk og moderne teori. I vakuum har lyset en eksakt definert hastighet på $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$, mens lysets hastighet i materie er lavere og avhenger av mediets brytningsindeks [**lyshastigheten**].

Formålet med dette forsøket er å bestemme lysets hastighet i luft ved å måle tiden en lyspuls bruker på å forflytte seg en kjent avstand. Ved hjelp av et oscilloskop måles tidsforsinkelsen mellom et synkroniseringssignal og et reflektert lyssignal for ulike avstander. Resultatene analyseres ved bruk av minste kvadraters metode for en rett linje gjennom origo, og måleusikkerheten estimeres ved feilforplantning.

Det målte resultatet sammenlignes med den kjente verdien for lyshastigheten i luft, og måleusikkerheten brukes til å vurdere hvorvidt det er hensiktsmessig å skille mellom lyshastighe-

ten i luft og vakuum i denne sammenhengen.

2 Teori

De målte tidsforsinkelsene gjør det mulig å knytte tilbakelagt strekning direkte til forplantningstid, og danner grunnlaget for beregningen av lyshastigheten i luft.

I denne seksjonen presenteres de fysiske antagelsene og de statistiske metodene som benyttes i analysen av måledataene, samt utledning av usikkerheten i de beregnede størrelsene.

Generelle formler

Lyshastigheten beregnes fra sammenhengen

$$v = \frac{x}{\Delta t}, \quad (1)$$

der x er den tilbakelagte strekningen og Δt den målte forplantningstiden.

Avviket mellom målt verdi og referanseverdi uttrykkes i antall standardavvik som

$$z = \frac{|c_{\text{målt}} - c_{\text{ref}}|}{\sigma_c}, \quad (2)$$

der $c_{\text{målt}}$ er den målte lyshastigheten, c_{ref} er referanseverdien og σ_c er den tilhørende standardusikkerheten.

Utleddning av usikkerhet til stigningstall

Vi antar et proporsjonalt forhold mellom avstanden og tiden, og dermed kan vi beskrive sammenhengen mellom de målte variable gitt ved

$$y = Bx,$$

der usikkerheten i x_i er neglisjerbar og alle målinger y_i er uavhengige og har samme standardavvik σ_y .

Summen av kvadrerte avvik kan skrives som

$$S(B) = \sum_{i=1}^N (y_i - Bx_i)^2.$$

Det beste estimatet for B finnes ved å minimere $S(B)$ med hensyn på B :

$$\frac{\partial S}{\partial B} = -2 \sum_{i=1}^N x_i (y_i - Bx_i) = 0.$$

Dette gir

$$\sum_{i=1}^N x_i y_i - B \sum_{i=1}^N x_i^2 = 0,$$

som løses med hensyn på B og gir

$$B = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{\sum_{i=1}^N x_i^2}. \quad (3)$$

Usikkerheten i konstanten B bestemmes ved den generelle formelen for feilforplantning.

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \sigma_{x_1}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \sigma_{x_n}\right)^2} \quad (4)$$

For en størrelse $B = B(y_1, \dots, y_N)$ er variansen σ_B^2 gitt ved

$$\sigma_B^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial B}{\partial y_i}\right)^2 \sigma_y^2.$$

Siden

$$B = \frac{1}{\sum_{j=1}^N x_j^2} \sum_{j=1}^N x_j y_j,$$

får vi

$$\frac{\partial B}{\partial y_i} = \frac{x_i}{\sum_{j=1}^N x_j^2}.$$

Innsatt i uttrykket for σ_B^2 gir dette

$$\sigma_B^2 = \sigma_y^2 \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i}{\sum_{j=1}^N x_j^2}\right)^2 = \frac{\sigma_y^2}{\sum_{i=1}^N x_i^2}.$$

Dermed blir

$$\sigma_B = \frac{\sigma_y}{\sqrt{\sum_{i=1}^N x_i^2}}. \quad (5)$$

Dette er uttrykket for usikkerheten i stigningstallet slik det er gitt i labheftet. **[lyshastigheten*formler]**

Oscilloskop

Et oscilloskop er et måleinstrument som brukes til å vise og analysere elektriske signaler grafisk som funksjon av tid. Ved hjelp av oscilloskopet kan man visualisere variasjoner i spenning over tid, noe som gjør det mulig å bestemme tidsforskjeller mellom ulike signaler med høy presisjon **[snl*oscilloskop]**.

I dette forsøket benyttes oscilloskopet til å måle tidsforsinkelsen mellom et synkroniseringssignal og signalet fra fotodioden som registrerer det reflekterte lyssignalet. Den målte tidsforsinkelsen danner grunnlaget for bestemmelsen av lypulsens effektive forplantningstid, som videre brukes i analysen av lyshastigheten.

Måling av hastighet

Måleboksen er konstruert for presis tidsmåling av korte lypulser og fungerer som både sender

og mottaker. En lysemitterende diode (LED) genererer korte lyspulser, samtidig som et elektrisk synkroniseringssignal produseres internt og definerer starttidspunktet for målingen.

Det reflekterte lyssignalet registreres av en fotodiode, som omdanner den optiske pulsen til et elektrisk signal. Fotodiodens responstid og tilhørende elektronikk bidrar med en konstant tidsforsinkelse, som inngår i den målte totalforsinkelsen. **[lyshastigheten formel]**

Denne forsinkelsen elimineres ved å innføre en referansetid t_0 .

Oscilloskopet måler tidsdifferansen mellom synkroniseringssignalet og signalet fra fotodioden med høy tidsoppløsning, og muliggjør dermed direkte bestemmelse av lyspulsens forplantningstid.

Når en lyspuls sendes mot en reflektor og returnerer til utgangspunktet, vil den tilbakelagte strekningen tilsvare dobbelt avstanden mellom sender og reflektor. Sammenhengen mellom tilbakelagt strekning x og målt forplantningstid Δt kan derfor beskrives som

$$x = v\Delta t,$$

der v er lysets hastighet i mediet.

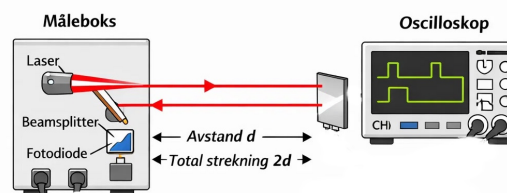
For å isolere lysets forplantningstid i luft må interne optiske og elektroniske forsinkelser i måleoppsettet tas hensyn til. Dette gjøres ved å introdusere en referansetid t_0 , målt når reflektoren er plassert så nært måleboksen som mulig. Den effektive forplantningstiden defineres da som

$$\Delta t = t - t_0.$$

Siden den effektive forplantningstiden er definert relativt til referansetiden t_0 , skal null forplantningstid tilsvare null tilbakelagt strekning, noe som begrunner bruk av en lineær regresjon gjennom origo.

På denne bakgrunn bestemmes lyshastigheten ved å analysere sammenhengen mellom x og Δt ved hjelp av minste kvadraters metode for en rett linje gjennom origo. Under antagelse om uavhengige målinger og tilnærmet konstant måleusikkerhet gir denne metoden det mest sannsynlige estimatet av v . Usikkerheten i den estimerte lyshastigheten beregnes ved standard feilforplantning.

3 Metode



Figur 1: AI-generert visualisering av det eksperimentelle oppsettet med måleboks, reflektor og oscilloskop.

Målingene ble utført ved hjelp av en måleboks, en flyttbar reflektor og et oscilloskop, som vist i figur 1. Måleboksen inneholder en lysemitterende diode (LED), en strålesplitter, en Fresnel-linse og en fotodiode.

Lyspulser ble sendt fra LED-en og fokusert ut i luft mot reflektoren, før de ble reflektert tilbake og registrert av fotodioden i måleboksen. Et synkroniseringssignal fra måleboksen, som markerer utsendelsestidspunktet for lyspulsene, ble koblet til kanal 1 (CH1) på oscilloskopet, mens signalet fra fotodioden ble koblet til kanal 2 (CH2).

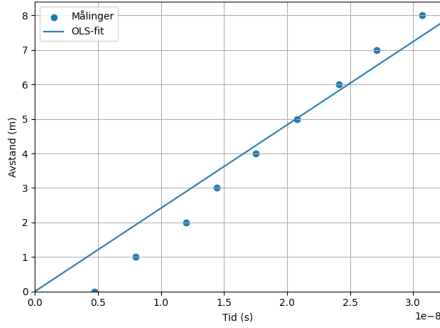
Først ble en referansemåling utført med reflektoren plassert rett foran Fresnel-linsen for å bestemme referansetiden t_0 . Deretter ble reflektoren flyttet bort fra måleboksen i trinn på 0,5 m, og tidsforsinkelsen t mellom CH1 og CH2 ble målt for hver posisjon ved hjelp av oscilloskopet.

Totalt ble ni målepunkter samlet, inkludert referansemålingen med reflektoren plassert rett inntil måleboksen.

Vi har brukt AI for språkvask ved skiving av rapporten.

4 Resultater og beregninger

De rå målte dataene som ligger til grunn for analysen er gitt i Vedlegg B.



Figur 2: Eksperimentelle måledata og beste lineære tilpasning gjennom origo bestemt ved minste kvadraters metode.

Ved å benytte minste kvadraters metode, beskrevet i vedlegg A, for en rett linje gjennom origo på sammenhengen mellom tilbakelagt strekning og effektiv forplantningstid, ble lyshastigheten i luft estimert. Referansetiden t_0 , som inkluderer både forplantning inne i måleboksen og elektroniske forsinkelser, ble trukket fra alle tidsmålingene før analysen.

Tabell 1: Resultater fra minste kvadraters analyse og referanseverdier

Størrelse	Verdi
Antall målinger N	8
$c_{\text{målt}}$	$(3,09 \pm 0,02) \times 10^8 \text{ m/s}$
c (vakuum)	$2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$
c (luft)	$2,997 \times 10^8 \text{ m/s}$

5 Diskusjon

Den målte verdien for lyshastigheten ble funnet til

$$c_{\text{målt}} = (3,09 \pm 0,02) \times 10^8 \text{ m/s}.$$

Denne verdien ligger nær både lyshastigheten i vakuum,

$$c = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s},$$

og lyshastigheten i luft ved romtemperatur,

$$c_{\text{luft}} \approx 2,997 \times 10^8 \text{ m/s}.$$

Den målte lyshastigheten er noe høyere enn referanseverdiene, men avviket er av samme størrelsesorden som den samlede

måleusikkerheten. Avviket kan derfor forklares ved en kombinasjon av statistiske fluktuasjoner og gjenværende systematiske effekter i forsøket.

En av de viktigste usikkerhetskildene i forsøket er avlesningen av tidsforsinkelsen på oscilloskopet. Små feil i data av tidspunktet der signalet krysser et valgt terskelnivå kan gi systematiske avvik i tidsmålingene. I tillegg kan begrenset tidsoppløsning og elektronisk responstid i måleboksen føre til at forplantningstiden blir noe underestimert, noe som igjen gir en overvurdering av lyshastigheten.

Bestemmelsen av referansetiden t_0 er også kritisk. Selv små feil i denne størrelsen vil påvirke alle tidsmålingene likt og dermed påvirke stigningstallet i regresjonen. I analysen er det videre antatt at usikkerheten i lengdemålingene er neglisjerbar sammenlignet med usikkerheten i tidsmålingene, samt at alle tidsmålinger har lik usikkerhet. Disse antakelsene representerer forenklinger av den faktiske målesituasjonen.

På bakgrunn av den beregnede måleusikkerheten er det ikke hensiktsmessig å forsøke å skille mellom lyshastigheten i luft og i vakuum i dette forsøket. Avviket mellom den målte verdien og referanseverdiene for henholdsvis vakuum og luft tilsvarer omtrent $4,6\sigma$ og $4,65\sigma$, beregnet ved hjelp av uttrykk (2), og er betydelig mindre enn den samlede måleusikkerheten. Forskjellen mellom lyshastigheten i luft og vakuum kan derfor ikke påvises eksperimentelt med det benyttede måleoppsettet.

Dersom forsøket hadde blitt repetert mange ganger under identiske betingelser, ville målepunktene forventes å fordele seg tilfeldig rundt regresjonslinjen, med en spredning bestemt av den statistiske usikkerheten i tidsmålingene. Resultatet indikerer imidlertid at gjenværende systematiske effekter vil føre til et lignende avvik også ved gjentatte målinger.

6 Konklusjon

I dette forsøket ble lyshastigheten i luft bestemt ved å måle tidsforsinkelsen mellom utsendt og mottatt lyssignal for ulike avstander, og analyse-

re sammenhengen ved hjelp av minste kvadraters metode for en rett linje gjennom origo. Ved å trekke fra en referansetid som inkluderer interne og elektroniske forsinkelser, ble systematiske bidrag redusert før den statistiske analysen.

Den målte verdien ble

$$c_{\text{målt}} = (3,09 \pm 0,02) \times 10^8 \text{ m/s},$$

som er i overensstemmelse med etablerte referanseverdier for lyshastigheten i luft og vakuum innenfor den beregnede måleusikkerheten. Avviket kan derfor ikke anses som signifikant.

Usikkerheten domineres av tidsmålingene på oscilloskopet og bestemmelsen av referansetiden t_0 , og med tilgjengelig måleutstyr er det ikke mulig å skille eksperimentelt mellom lyshastigheten i luft og vakuum. Forsøket viser hvordan statistiske metoder og feilforplantning kan brukes til å vurdere påliteligheten av eksperimentelle resultater.

7 Bruk av AI

Vi har tatt i bruk AI for språkvask.

A Vedlegg A: Pseudokode for dataanalyse

Algorithm 1 Bestemmelse av lyshastigheten ved minste kvadraters metode

- 1: Read measurement data (distance*2, time) from CSV file
- 2: Convert measured times from nanoseconds to seconds

3: **Data preparation**

- 4: Multiply all distances by 2 to account for round-trip propagation
- 5: Let $t_0 \leftarrow$ time of first measurement
- 6: Compute corrected times:
$$t_i \leftarrow t_i - t_0$$
- 7: Remove first data point $(t_0, 0)$ from dataset
- 8: $N \leftarrow$ number of remaining measurements
- 9: Assume negligible uncertainty in distance measurements
- 10: Assume equal uncertainty for all time measurements

11: **Least squares fit through the origin**

- 12: Compute slope

$$B \leftarrow \frac{\sum_{i=1}^N t_i s_i}{\sum_{i=1}^N t_i^2}$$

- 13: where t_i is corrected propagation time and s_i is round-trip distance

14: **Uncertainty estimation**

- 15: Compute residuals

$$r_i \leftarrow s_i - B t_i$$

- 16: Compute standard deviation of residuals

$$\sigma_s \leftarrow \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N r_i^2}$$

- 17: Compute uncertainty in slope

$$\sigma_B \leftarrow \frac{\sigma_s}{\sqrt{\sum_{i=1}^N t_i^2}}$$

18: **Reference comparison**

- 19: Compute speed of light in air

$$c_{\text{luft}} \leftarrow \frac{c}{n}$$

- 20: Compare measured value $B \pm \sigma_B$ with c and c_{luft}

21: **Visualization**

- 22: Plot distance as a function of corrected time
 - 23: Plot best-fit line $s = Bt$ through the origin
 - 24: Extend fit line slightly beyond measured data range
-

B Vedlegg B: Rådata fra målingene

meter	time(ns)
0	4.70
0.5	8.00
1	12.00
1.5	14.40
2	17.50
2.5	20.80
3	24.10
3.5	27.10
4	30.70

Tabell 2: Rådata fra målingene