

Lichtsnelheid

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
2	Theorie	1
3	Verkennen opstelling	4
4	Onderzoeksvragen en werkplan	8
5	Metingen	9
6	Rapportage	9

1 Inleiding

De lichtsnelheid c in vacuüm is exact 299792458 m/s. Dit komt omdat de lichtsnelheid als zodanig gedefinieerd is, en met behulp van die snelheid en de seconde de meter wordt bepaald.

In een medium voortplantend licht heeft een interactie met de elektronen in het medium, waardoor de voortplanting langzamer is. De verhouding tussen de lichtsnelheid in vacuüm en in het medium wordt uitgedrukt in de brekingsindex n van het medium. Lucht heeft een relatief lage dichtheid (en dus weinig elektronen), daarom is de lichtsnelheid in lucht nagenoeg gelijk aan die in vacuüm. In stoffen als water of perspex is de voortplantingssnelheid voor zichtbaar licht tientallen procenten lager dan in vacuüm. In dit experiment wordt de lichtsnelheid in lucht en minstens één van de andere genoemde media bepaald. Het doel van dit experiment is het bepalen van de lichtsnelheid in lucht, en daarna in verschillende (transparante) materialen. Hiervoor meet je het faseverschil dat een sinusvormig signaal oploopt wanneer het zich over een bepaalde afstand door zo'n medium voortplant.

2 Theorie

Om je goed voor te bereiden op het experiment wordt eerst de theorie bestudeerd.

2.1 Meten van de lichtsnelheid

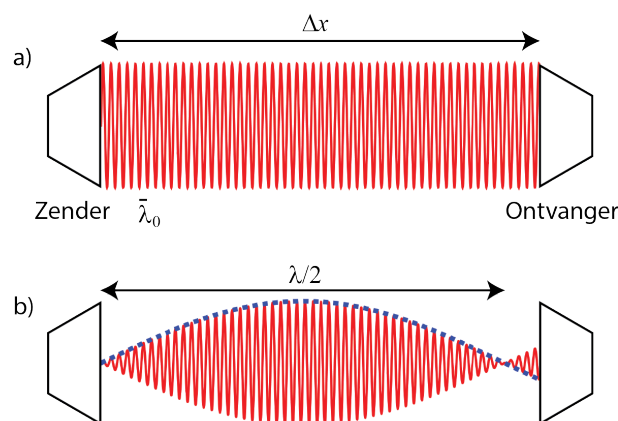
De voortplantingssnelheid van licht wordt in dit experiment bepaald met behulp van het faseverschil tussen de trillingen op twee verschillende plaatsen in een lopende elektromagnetische golf. Deze elektromagnetische golf wordt uitgezonden door een (licht)bron: de zender. Op enige afstand van de zender wordt deze golf gedetecteerd door een ontvanger. De fase van de gedetecteerde trilling bij de ontvanger op een bepaald tijdstip verschilt van de fase bij de zender op datzelfde tijdstip. Dit faseverschil tussen de trillingen bij de

zender en ontvanger hangt af van de afstand Δx tussen zender en ontvanger en van de golflengte λ in het medium.

Opdracht 1: Faseverschil en golfsnelheid

Figuur 1 toont de door een bron uitgezonden lopende elektromagnetische golf op een bepaald tijdstip getekend. Deze golf wordt gedetecteerd door een ontvanger op afstand Δx van de bron. Het medium tussen bron en ontvanger is lucht.

- De trillingen bij de zender en de ontvanger kennen een faseverschil $\Delta\phi$. Welk verband is er tussen de afstand Δx , de golflengte λ en $\Delta\phi$?
- Toon aan dat de snelheid c_{lucht} gegeven wordt door $c_{lucht} = (\Delta x / \Delta\phi) \cdot f$, met f de frequentie van de lopende golf.
- Omdat de golf een lopende golf is, verandert zowel bij de zender als bij de ontvanger de fase van de trilling voortdurend,. Toch is bij gelijke Δx het faseverschil $\Delta\phi$ constant. Leg uit waarom.
- Het licht dat in het experiment wordt gebruikt heeft een golflengte λ_0 van ongeveer 650nm . De elektromagnetische golf zelf kan dan niet zomaar gebruikt worden als hiervoor geschetst. Er zijn twee praktische problemen.
 - Gegeven dat de afstand tussen zender en ontvanger typisch tientallen cm is, welk probleem is er dan bij het bepalen van $\Delta\phi$? Hint: wat is het effect van een heeltalig aantal golflengtes verschil in de afstand Δx ?
 - De lichtintensiteitsmeter (fotodetector) moet de variaties kunnen volgen. De typische meetsnelheid van een fotodetector is typisch een nanoseconde. Laat zien dat de periode $T = \lambda_0 / c$ van een elektromagnetische golf veel te kort is om hiervan de fase te kunnen bepalen.



Figuur 1: a) Lopende elektromagnetische golf met golflengte tussen zender (links) en ontvanger (rechts), in het geval dat $\lambda_0 \ll \Delta x$ (let op: in werkelijkheid is λ nog veel korter!). Het faseverschil is nu niet eenduidig te bepalen. b) Gemoduleerde lopende golf tussen zender en ontvanger. Het faseverschil tussen zender en ontvanger is voor de omhullende (in blauw) goed te bepalen.

2.2 Modulatie

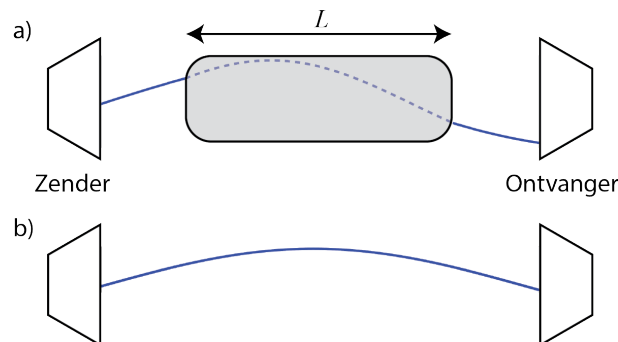
In deze opstelling zijn de problemen opgelost door gebruik te maken van (amplitude)modulatie van het signaal. De lichtbron wordt met een wisselspanning van $f = 50,05 \text{ MHz}$ periodiek aan- en uitgezet, zie Figuur 1. De ontvanger neemt de snelle variaties van de elektromagnetische golf niet waar (zie opdracht 1 d.), maar meet wel een intensiteitsvariatie bij de modulatiefrequentie. Hiermee is het gemoduleerde signaal de informatiedrager geworden, en is effectief de golflengte toegenomen tot die van een golf met frequentie f en voortplantingssnelheid c_{lucht} .

Opdracht 2: Faseverschil voor het gemoduleerde signaal

Laat zien dat door modulatie met frequentie $f = 50,05 \text{ MHz}$ de praktische meetproblemen zijn opgelost. Hoe groot kan de afstand Δx nu maximaal worden voor er zich weer een probleem met de fasemeting voordoet?

2.3 Meten van de lichtsnelheid in een medium anders dan lucht

Voor de bepaling van de lichtsnelheid in lucht heb je de vrijheid om Δx te variëren. Voor de bepaling aan perspex of water heb je de beschikking over een buis of cuvet met vaste lengte L . Voor deze bepaling doe je dus een verschilbepaling tussen het faseverschil $\Delta\phi_m$ met buis / cuvet en het faseverschil $\Delta\phi$ zonder. Zie hiervoor Figuur ??. In de volgende voorbereidingsvraag werk je uit welke experimentele parameters dan relevant zijn.



Figuur 2: a) Faseverschil tussen zender en ontvanger in aanwezigheid van een medium in het bundelpad. Voor de overzichtelijkheid wordt hier alleen de modulatie-amplitude getoond. b) Faseverschil zonder aanwezigheid van het medium.

Opdracht 3: Faseverschil en medium

Tussen de zender en ontvanger wordt een vaste stof of een cuvet met vloeistof geplaatst met lengte L . Zie Figuur 2. De lightsnelheid c_m in dit materiaal is kleiner dan de lightsnelheid c_{lucht} .

- Bereken dat het signaal daardoor een extra tijdvertraging oploopt, vergeleken met de situatie in lucht. Dus: dat het faseverschil $\Delta\phi_m$ groter is dan bij voortplanting door alleen lucht (Figuur 2).
- Laat zien dat het extra faseverschil (dus: ten opzichte van het faseverschil in lucht) gelijk is aan $\Delta\phi_m - \Delta\phi = (L/c_m - L/c_{lucht}) \cdot f$, met $f = 50,05\text{MHz}$ de modulatiefrequentie.

3 Verkennen opstelling

Je gaat nu aan de slag met de opstelling waarbij je eerst zal lezen over hoe de opstelling werkt en daarna een aantal proefmetingen zal uitvoeren. Op deze manier begrijp je goed hoe de opstelling werkt. Daarna ga je, op basis van deze kennis, het werkplan opstellen.

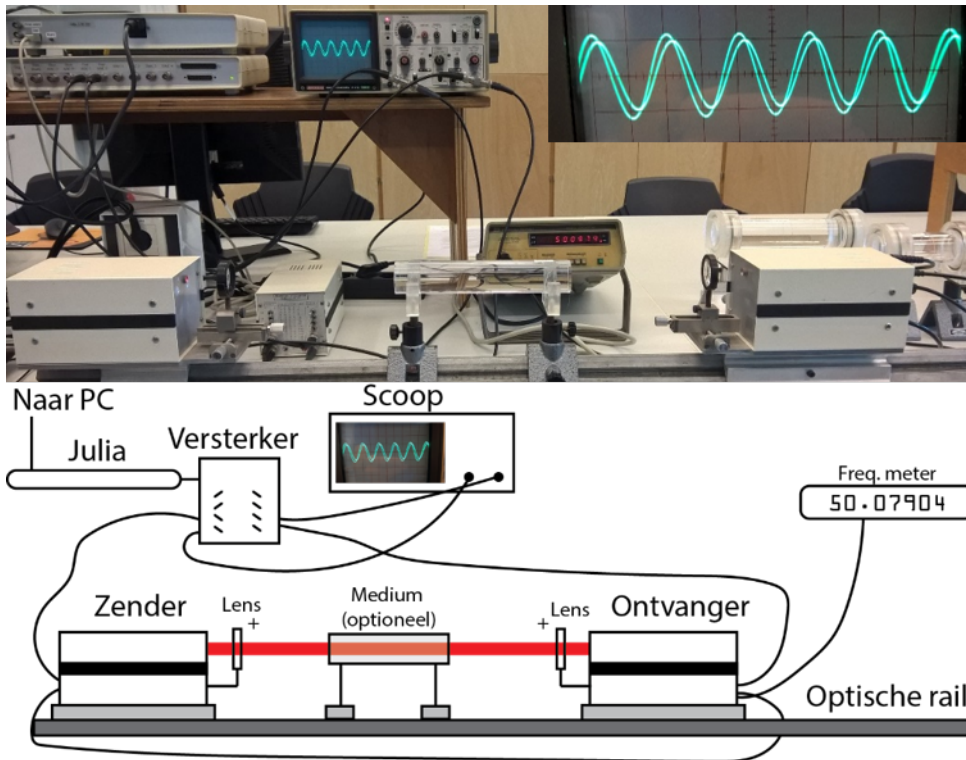
3.1 De opstelling

De meetopstelling (zie Figuur 3) bestaat uit een $1,5\text{m}$ lange optische rail met mm-verdeling. Op de rail staat een verschuifbare lichtbron (de zender) en een verschuifbare lichtdetector (de ontvanger).

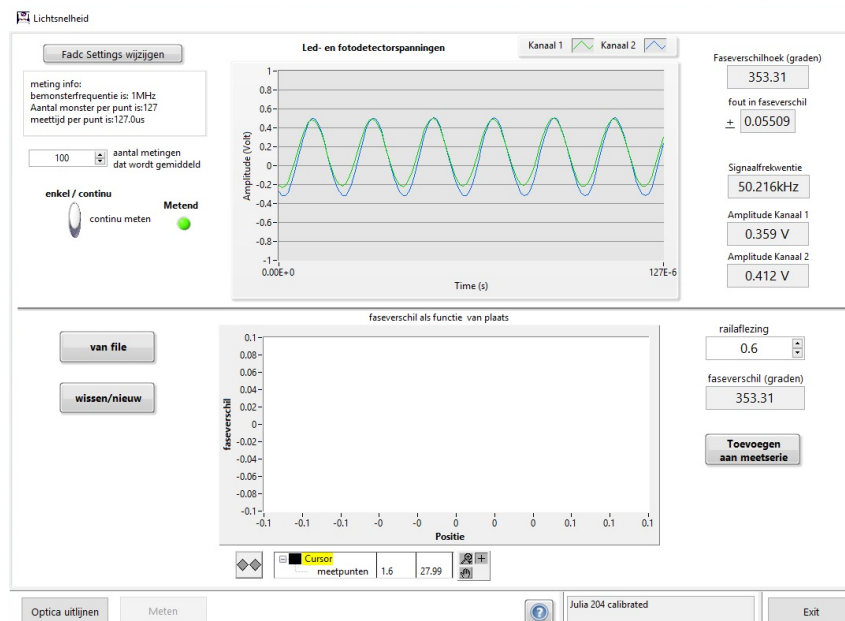
In de zender zit een rood licht emitterende diode (LED). Deze LED wordt gevoed door een wisselspanning $f = 50,05\text{MHz}$ afkomstig van een kristaloscillator in de zender. De intensiteit van het door de LED uitgezonden licht verandert dus met een frequentie van $50,05\text{MHz}$. De lichtbundel van de LED wordt gedetecteerd door een fotodiode in de ontvanger die de invallende lichtsterkte omzet in een wisselspanning van dezelfde frequentie.

Zender en ontvanger zijn aangesloten op een tweekanaals versterker om de spanningen onafhankelijk van elkaar te kunnen versterken. De spanningen na versterking worden gemeten met een Julia-II data-acquisitiekast en doorgestuurd naar de computer. Verder bevat de meetopstelling een frequentiemeter voor het meten van de zenderfrequentie en een analoge oscilloscoop voor het bekijken van het zender- en ontvangersignaal. Tussen de zender en ontvanger kunnen op de optische rail een staaf perspex of een cuvet met water worden geplaatst. Er is een leeg cuvet beschikbaar dat als referentie kan dienen voor de meting aan water.

Data-acquisitie In principe zijn de zender- en ontvangersignalen met elkaar te vergelijken op een oscilloscoop (zie Figuur 3). Het faseverschil $\Delta\phi$ wordt dan bepaald uit de verschuiving van beide signalen ten opzichte van elkaar. De bepaling is echter eenvoudiger, nauwkeuriger en automatisch uit te voeren met een computer. Hiervoor worden de zender- en ontvangersignalen eerst gemengd met een ander signaal met een frequentie van $50,10\text{MHz}$ (zie de Appendix voor een uitleg). Het resulterende signaal wordt gefilterd en opgemeten met de witte Julia-II kast.



Figuur 3: Meetopstelling voor het bepalen van de lichtsnelheid. De witte kastjes links- en rechtsonder zijn respectievelijk de zender en ontvanger. Schuin naast de zender staat het versterkerkastje. Op de plank zijn de oscilloscoop en de Julia-II te zien. Op dit moment is op de optische rail de perspex buis geplaatst. Inzet rechtsboven is een uitvergroott oscilloscoopbeeld waar de zender- en ontvangerspanningen en het faseverschil tussen beide te zien is. Onder: schematische weergave van dezelfde opstelling.



Figuur 4: Meetscherm

In het meetprogramma (zie onder) worden voor zowel het zender- als het ontvangersignaal de nuldoorgangen van de sinusvormige spanningen bepaald. Uit het tijdsverschil tussen deze nuldoorgangen wordt het faseverschil tussen beide signalen berekend.

Meetprogramma Het meetprogramma bij dit experiment is te vinden op de computer onder:

All Programs — Julius Programs — Bovenbouwpracticum — Meting van de lichtsnelheid (maar zoeken op “lichtsnelheid” of de link op het bureaublad brengt je er ook). De inloggegevens voor de computer zijn onder het beeldscherm te vinden.

Na het openen van het meetprogramma zie je het schermbeeld in Figuur 4. Het programma heeft de volgende instelmogelijkheden:

- Linksboven kun je de bemonsterfrequentie instellen, klik op Fadc Settings wijzigen (standaard 1 MHz, wat betekent dat er elke $1\mu s$ een spanning bepaald wordt). Een hogere waarde betekent meer metingen per periode maar bij hetzelfde aantal meetpunten per monster (serie) minder periode.
- Linksboven kun je ook het aantal meetpunten per monster instellen. Een hogere waarde betekent een langere meting en dus meer periodes, meer nulpuntsdoorgangen en (mogelijk) een betere fasebepaling.
- Linksboven stel je ook het aantal middelingen per meting in. Meer middelingen betekent een nauwkeuriger resultaat.
- Rechts midden kun je de railaflezing invoeren (in m); deze zal met het oog op de optische rail moeten worden bepaald. Het programma heeft verder de volgende weergavemogelijkheden:
- Midden boven zie je een grafiek met de zender- en ontvangerspanningen als functie van de index van het meetpunt.
- Rechtsboven zie je de gemeten amplitudes en het faseverschil met onzekerheid. Het meetresultaat wordt niet weergegeven als een faseverschil (getal tussen 0 en 1), maar als een faseverschilhoek (tussen 0 en 360).
- Midden onder zie je het gemeten faseverschil uitgezet tegen de railaflezing (positie Δx). Bij twee of meer metingen wordt onder de grafiek de richtingscoëfficiënt van de bepaalde lijn (in graden/m) weergegeven.

Meetgegevens opslaan

Het is mogelijk om de meetwaarden op te schrijven of zelf in bijvoorbeeld Excel in te voeren. Je kunt met de knop “naar file” linksonder ook de resultaten als een databestand met tab-gescheiden waarden wegschrijven (bijvoorbeeld op de desktop). Je kunt dit bestand lezen door Excel te openen en via File — Open “All files” het bestand te selecteren. De Import Wizard geeft dan automatisch aan hoe het bestand te interpreteren. Schermbeelden met informatie kunnen via print-screen op het clipboard worden geplaatst en in een plaatje of Word-bestand gezet. Bij de practicumzaal staat een printer, figuren en dergelijke kunnen indien gewenst ter plekke geprint worden.

3.2 Proefmeting

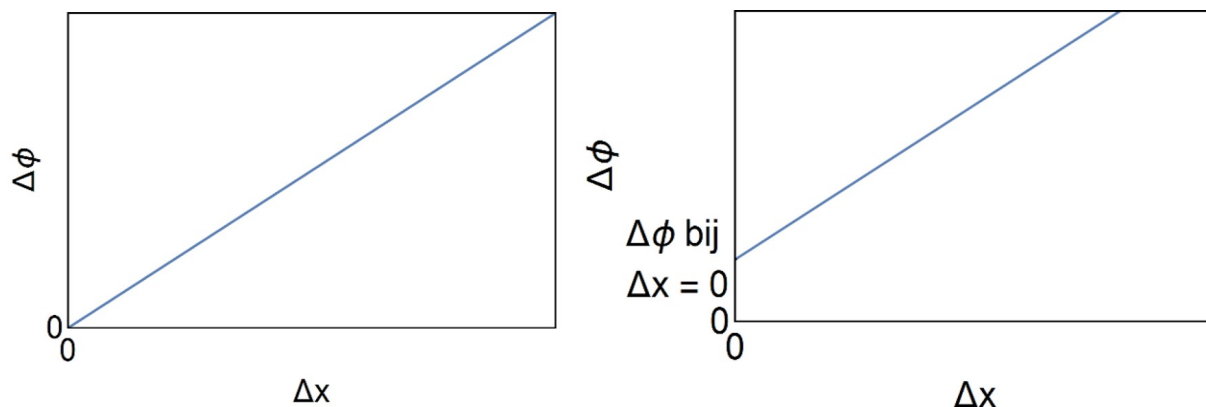
In de twee volgende opdrachten controleer en -indien nodig- optimaliseer je de instelling van de meetopstelling en voer je enkele verkennende metingen uit.

Opdracht 4: Instellen meetopstelling

Om bij verschuiving van de zender of ontvanger een redelijk constant signaal te handhaven, moet de lichtbundel afkomstig van de zender evenwijdig zijn. Dit gebeurt met de lens op de zender. De lens op de ontvanger concentreert het licht zo goed mogelijk op de fotodiode. Bovendien moeten de versterkingsfactoren voor de signalen van de zender en ontvanger goed zijn ingesteld.

- Zorg dat de zender en versterker (beide met NET-schakelaar), oscilloscoop en frequentiemeter aan staan.
- Meet de signaalfrequentie f met de frequentiemeter. Houd er rekening mee dat deze 50 kHz teveel aangeeft (zie voor uitleg de Appendix bij deze handleiding). Controleer eventueel tijdens het experimenteel onderzoek of er verloop in de signaalfrequentie zit.
- Start het meetprogramma. Controleer of de gemeten signalen van de zender en de ontvanger sinusvormig zijn, of hun amplitude ongeveer gelijk is en of de meting van de faseverschilhoek stabiel is (typisch minder dan een graad variatie). Je mag er vanuit gaan dat de technische staf dit goed heeft ingesteld. Als dit niet het geval is, dan moeten mogelijk de signaalinstelling of de optische instelling (zie hieronder) aangepast worden.
 - Signaalinstelling – De spanning van de beide signalen mag niet buiten de voorgeschreven grenzen komen. Pas met de schakelaars de versterkingsfactoren aan – als dat nodig is. Dit is het gemakkelijkst na te gaan door naar de amplitudes in het meetscherm te kijken. De maximumamplitude moet lager blijven dan $[-4096, +4096]$; daarboven zal Julia een piepsignaal geven dat uit te schakelen is door de amplitude weer binnen het gewenste bereik te zetten en de Resetknop op de achterzijde van Julia in te drukken.
 - Optische instelling – Controleer met bijvoorbeeld een vel wit papier of de lichtbundel tussen de lenzen evenwijdig is, en of de lichtbundel goed op de fotodiode invalt. Ga na of het signaal van de fotodiode over het hele schuifgebied ongeveer even sterk blijft. Maak vervolgens de amplitude op de ontvanger – als dat nodig is – maximaal door de stand van de lenzen bij te regelen.

- Opdracht 5: Verkennende metingen**
- Bekijk de signalen van de zender en ontvanger tegelijkertijd op de oscilloscoop. Controleer of er een faseverschil tussen deze twee signalen zichtbaar is. Ga na hoe dit faseverschil verandert bij het verschuiven van de zender of ontvanger, en bij het plaatsen van een medium tussen de zender en ontvanger. Zijn de veranderingen van het faseverschil kwalitatief in overeenstemming met je verwachtingen?
 - Oefen met het meetprogramma. Zoek eventueel naar waarden voor de instelparameters (bemonsterfrequentie, aantal meetpunten, aantal middelingen) waarbij je snel een nauwkeurig resultaat krijgt.
 - Doe een bepaling van c_{lucht} door bij één waarde van Δx de faseverschilhoek $\Delta\phi$ te meten. Wanneer je je meetresultaat omrekent naar een waarde voor de lichtsnelheid c_{lucht} zul je zien dat dit een onjuiste waarde oplevert. De



Figuur 5: Het verband tussen de afstand Δx tussen zender en ontvanger en de faseverschilhoek $\Delta\phi$ zonder (links) en met een extra faseverschil (rechts) als gevolg van het lengteverschil tussen de kabels van de zender en de ontvanger naar de computer.

oorzaak hiervan is het lengteverschil tussen de kabels van de zender en de ontvanger naar de computer (en mogelijk een verschil in de werkelijke $\Delta x = 0$ en de waarde zoals afgelezen op de optische rail). Die verschillen veroorzaken een extra (constant) faseverschil tussen de twee signalen. Zonder dat extra faseverschil zouden Δx en $\Delta\phi$ rechtevenredig zijn, zoals weergegeven in het linkerdiagram van Figuur 5. Met een extra fase-verschil ziet het verband tussen Δx en $\Delta\phi$ er uit zoals in het rechterdiagram van Figuur 5. Een dergelijk constant verschil wordt ook wel een nulpuntsfout

- d) Bedenk hoe je bij een verband tussen Δx en $\Delta\phi$ als in het rechterdiagram de lichtsnelheid kunt bepalen.

4 Onderzoeksvragen en werkplan

Na de theoretische voorbereiding en het verkennen van de opstelling kun je nu de onderzoeksvraag en een werkplan op te stellen.

Opdracht 6: Onderzoeksvragen

Formuleer de onderzoeksvraag die je met deze opstelling wilt beantwoorden. Gebruik hiervoor de kennis die je hebt opgedaan in de voorbereiding. Je moet de onderzoeksvraag kunnen beantwoorden met deze opstelling. Stel voor de onderzoeksvraag een hypothese op. De hypothese is wat je verwacht dat het antwoord zal zijn op de onderzoeksvraag.

Opdracht 7: Werkplan

Stel nu het werkplan op waarin in ieder geval de volgende punten behandeld worden:

- De onderzoeksvraag en hypothese.
- De grootheden die gevarieerd worden.

- De grootheden die gemeten worden en hoe deze metingen gedaan worden.
- Het aantal metingen.
- Hoe de data weergegeven wordt.

Laat het werkplan controleren voordat je verder gaat.

5 Metingen

Nadat je de voorbereiding hebt uitgevoerd en het werkplan is goedgekeurd door de docent of assistent, kan je het experiment gaan uitvoeren.

Opdracht 8: Metingen

Zoek met behulp van de meetopstelling volgens je werkplan een antwoord op de onderzoeksvraag en controleer de opgestelde hypothese.

6 Rapportage

Afhankelijk van wat je docent van je verwacht rapporteer je met een schriftelijk verslag of een presentatie over het onderzoek. Zorg ervoor dat in dit verslag of deze presentatie de volgende onderdelen duidelijk naar voren komen:

- De onderzoeksvraag en hypothese.
- Een beschrijving en een uitleg van de werking van de meetopstelling.
- Grafische weergave van de meetresultaten.
- Verwerking en interpretatie van de meetresultaten.
- Het antwoord op de onderzoeksvraag verkregen door de meetresultaten.