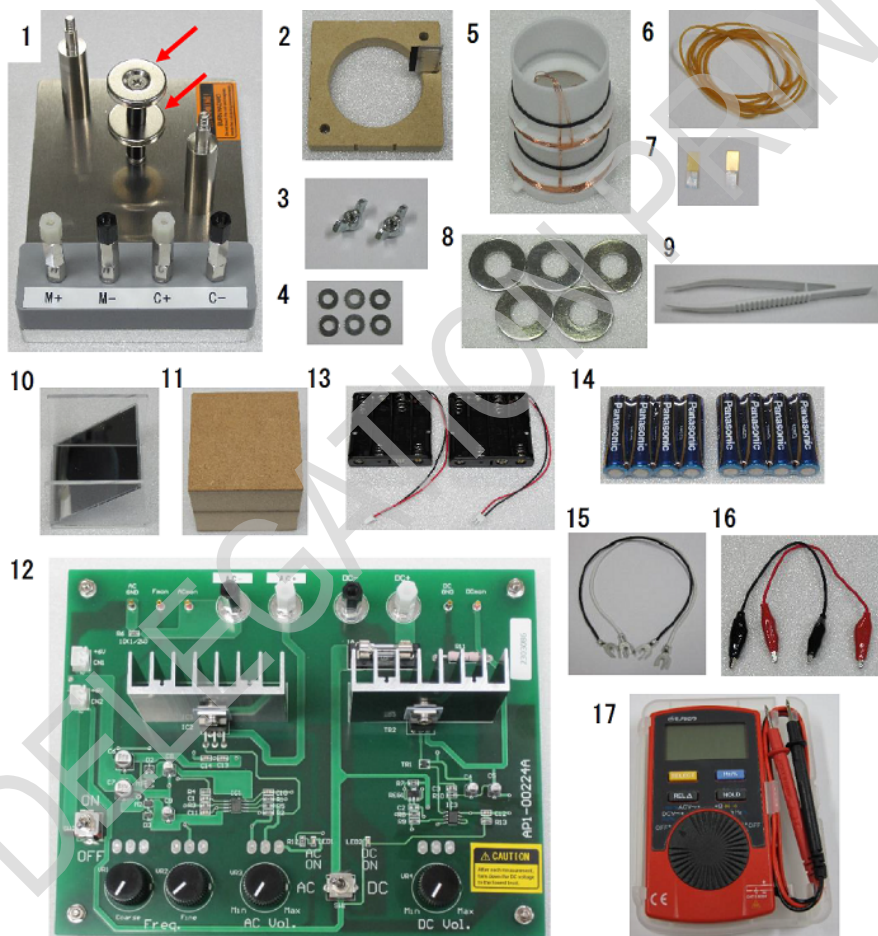


Meten van massa (10 punten)

In dit experiment wordt geprobeerd massa te bepalen. Verder bepalen we de massa door gebruik te maken van de resonantiekenmerken van de harmonische oscillator.

Experimentele opstelling

Hieronder staat de lijst met onderdelen (Fig. 1). Het aantal onderdelen staat in [] als het er twee of meer zijn.



Figuur 1: De apparatuur van dit experiment.

1. Montagevoet:

Opmerking: De magneten op de montagevoet creëren een radieel hoogte onafhankelijk magnetisch veld. Op de plek van de spoel creëren deze magneten een constant radieel veld. Dit geldt voor ± 3 mm ten opzichte van het horizontale centrale vlak tussen de magneten.

2. (Oscillator) ondersteuning (inclusief een schaalverdeling)

3. Vleugelmoeren [2]

Opmerking: Verwijder om het geheel te gaan gebruiken 2 en 3 van 1 zoals je het in de verpakking aantreft.

4. Vulringetjes (shim washer) [6]
5. Cilindervormige oscillator
6. Elastiekjes [6] (4 nodig, 2 reserve)
7. Markeringsplakkertjes (markers) [2]
8. Gewichtjes [5]
9. Pincet
10. Spiegel
11. Blokje om spiegel op te zetten
12. Voeding (Power supply (PS)):

Je kan kiezen voor de DC- of AC-modus. (Knop in het midden.)

In de DC-modus werkt de voeding als constante stroombron. Draai aan de knop "DC Vol" om de stroom in te stellen. De grootte van de stroom wordt verkregen uit de spanning tussen "DCmon" en "DC GND" met behulp van de conversiefactor 1.00 A/V.

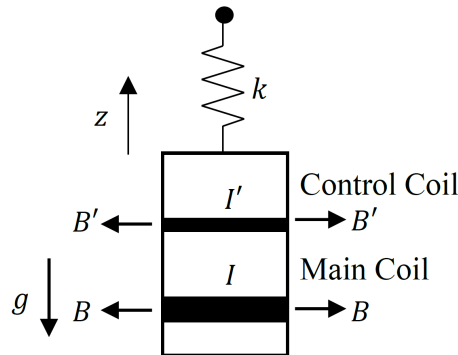
In de AC-modus functioneert de voeding als een spanningsbron met een vaste amplitude. Draai aan "AC Vol" om de spanning aan te passen. De AC-stroom wordt verkregen uit de AC spanning tussen "ACmon" en "AC GND" met behulp van de conversiefactor 0.106 A/V. De frequentie (Freq.) kan worden ingesteld met de afstemknoppen "Coarse" (grof) en "Fine" (fijn).

13. Batterijhouders [2]
14. Batterijen [8]
15. Aansluitdraden met U-vormige krimpstekker [2]
16. Snoertjes met krokodillebekjes [2]
17. Digitale Multi Meter (DMM)

Draai aan de knop om een geschikte meetmodus te selecteren, "DCV", "ACV" en "Hz". **Merk op dat de weergegeven waarde van de AC-spanning de RMS-waarde (root mean square) aangeeft, d.w.z. de effectieve waarde.**

Het systeem modelleren

Figuur 2 is een vereenvoudigd model van de experimentele opstelling. Het is in wezen een aangedreven massa-veer oscillator.



Figuur 2: Model van de harmonische oscillator. (Main Coil = Hoofdspoel, Control Coil = Stuurspoel)

De relevante parameters zijn:

- M : massa van de (cilindervormige) oscillator
- m : massa per gewichtje (ring)
- N : het aantal gewichtjes (ringen)
- g : versnelling door zwaartekracht
- k : effectieve veerconstante met betrekking tot de verticale beweging
- z : oscillatorhoogte (of verplaatsing)
- z_e : hoogte van de oscillator waarop een krachtenevenwicht zonder gravitatie en elektromagnetische krachten tot stand komt.
- $B(B')$: magnetisch veld toegepast op de hoofdspoel (stuurspoel)
- $L(L')$: lengte van de geleidende draad van de hoofdspoel (stuurspoel)
- $I(I')$: stroom door de hoofdspoel (stuurspoel)
- α : positieve luchtweerstandscoefficiënt

De bewegingsvergelijking wordt gegeven door

$$(M + Nm) \frac{d^2 z}{dt^2} = -(M + Nm)g - k(z - z_e) + BLI + B'L'I' - \alpha \frac{dz}{dt}. \quad (1)$$

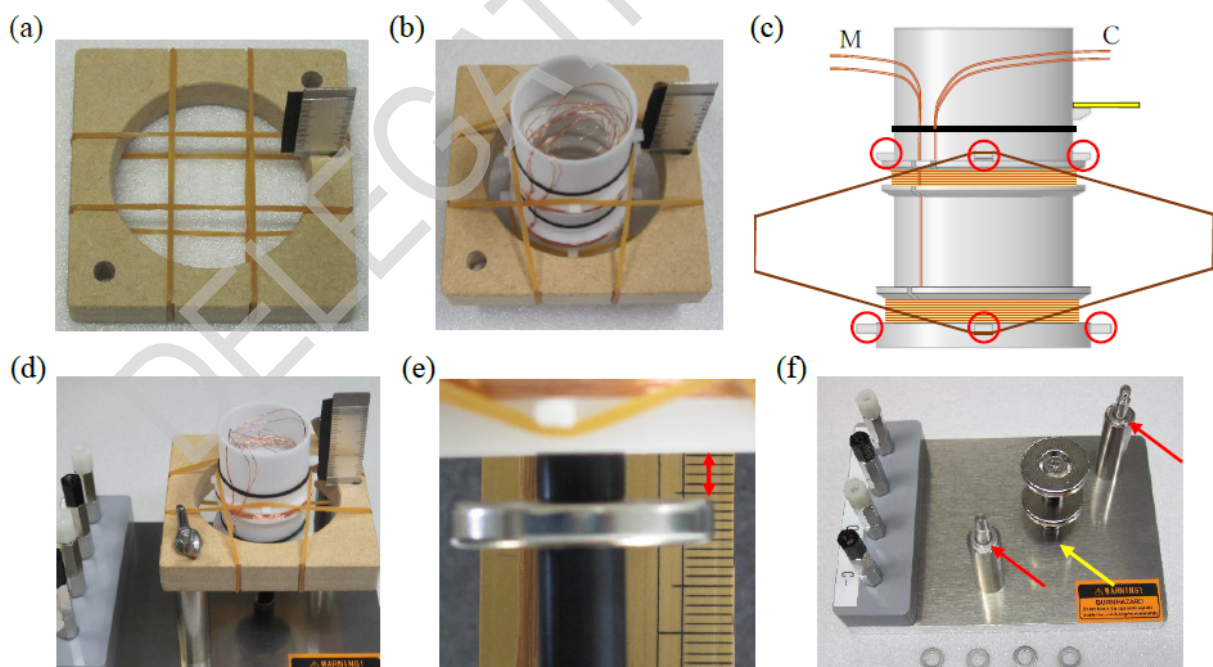
Installatie van de oscillator

1. Verwijder de steun van de montagevoet. Wikkel vier elastiekjes er in een rasterpatroon omheen (Zie Fig. 3(a)).
2. Plaats de cilindrische oscillator vanaf de zijde met schaalverdeling in de vierkante opening tussen de gekruiste elastiekjes. Plaats de draadsnoeren aan de andere kant van de schaal. (Fig. 3(b)).
(Zorg ervoor dat bij het plaatsen van de oscillator het uitstekende haakje voor het markeringsplakbandje op de juiste plek zit. Zie alvast Figuur 4.)
3. De oscillator is ontworpen om aan de steun te hangen met vier elastiekjes (in Fig. 3(c) is één bruin elastiekje weergegeven) en acht kleine haakjes (zes daarvan rood omcirkeld in Fig. 3(c)). Wanneer

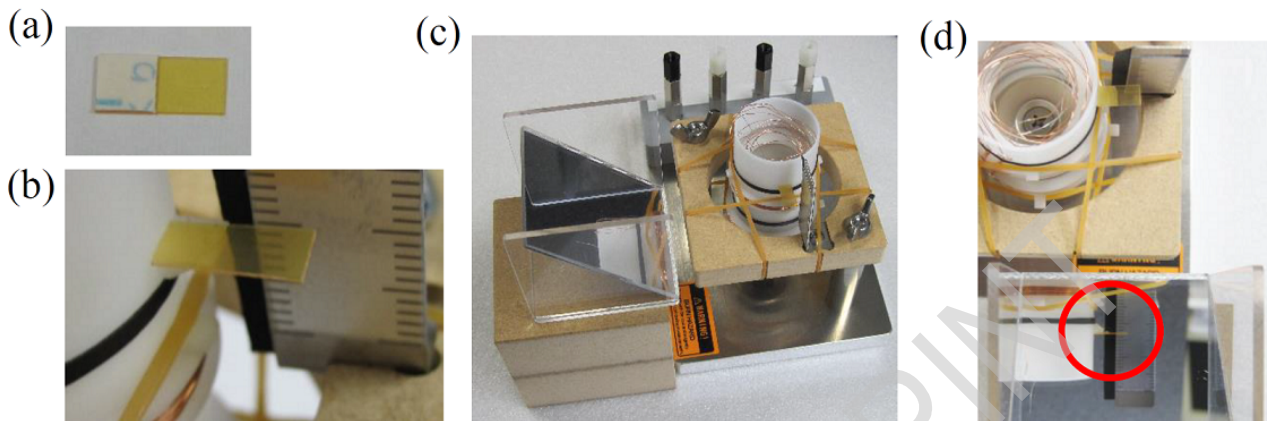
correct uitgevoerd, vormt één lus van elastiekjes een afgeknotte ruit met twee haakjes boven en onder het steunniveau in zijaanzicht.

Opmerking: In dit experiment kunnen we aannemen dat de effectieve kracht door de elastiekjes de wet van Hooke volgt.

4. Bevestig de steun diagonaal aan de paaltjes met twee vleugelmoeren. De schaalverdeling moet rechtop op de bovenkant staan, niet op de zijkant van de bindstijlen (Fig. 3(d)).
5. Zet de oscillator rechtop. De as moet verticaal uitgelijnd zijn en gedeeld worden met de as van de magneeteenheid.
6. De hoofdspoel moet in rust dichtbij het midden van de twee magneten zitten, wat kan worden bevestigd door de afstand tussen de bovenkant van de onderste magneet en de onderkant van de oscillator 3 tot 5 mm te laten bedragen (Fig. 3(e) rode pijl). Als deze laag is, plaats dan de vulringen tussen de bindstiften en de steun (Fig. 3(f) rode pijlen). Als deze hoog is, draai dan de stift van de magneet om deze te verwijderen en voeg de vulring onder de stift toe (Fig. 3(f) gele pijl).
7. Leg het klevende oppervlak van het dubbelzijdige plakband op het markeringsplakbandje bloot (Fig. 4(a)). Plak het markeringsplakbandje op het kleine uitstekende haakje op de oscillator om de hoogte te meten (Fig. 4(b)).
8. Plaats de spiegel op het blokje (Fig. 4(c)). Zorg ervoor dat het markeringsplakbandje van bovenaf goed zichtbaar is door de spiegel (Fig. 4(d) rode cirkel).



Figuur 3: Installatie van de oscillator. Zorg ervoor dat bij het plaatsen van de oscillator het uitstekende haakje op de juiste plek zit. Zie alvast Figuur 4.

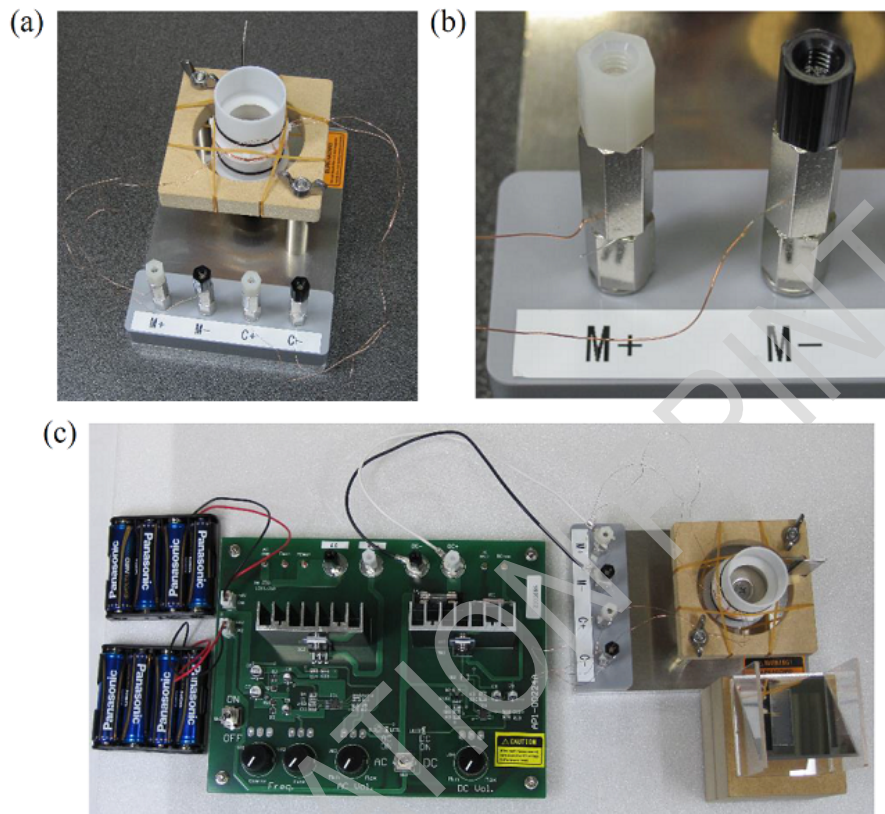


Figuur 4: Installatie van het markeringsplakbandje en de spiegel.

Bedrading

1. Zoek en trek voorzichtig aan het juiste paar draden dat naar de hoofd- (M) en stuurspoel (C) leidt (Fig. 3(c)) vanuit de binnenkant van de oscillator (Fig. 3(b)). Controleer bij alle draden of het isolerende laagje van de losse uiteinden is verwijderd.
2. Draai de schroef aansluitingen M+ en M- los om ruimte te maken voor bedrading. (M van Main = Hoofd) Gebruik de onderste openingen voor de bedrading vanuit de hoofdspoel (Fig. 5(a), (b)). De polariteitscontrole volgt binnenkort.
3. Bedraad de aansluitingen met het label C+ en C- op dezelfde manier. (Beide polariteiten zijn goed.)
4. Plaats de batterijen in de batterijhouders en verbindt de aansluitingen met de voeding (PS) (CN1, CN2) (Fig. 5(c)).
5. Verbind de aansluitingen M+ en M- met de DC-uitgang (DC+ en DC-) op de voeding (PS) met behulp van de U-vormige krimpstekkers.
6. Schakel DC in en zet de voeding (PS) aan.
7. Draai aan de knop "DC Vol." om de stroom in te stellen. Controleer of de oscillator omhoog beweegt met 2mm of hoger. Indien omlaag, verwissel dan de draden voor ompoling en probeer het opnieuw.

Voorzichtig: Onderdelen kunnen heet worden. Pas op voor de spoelen en de magneten. Zet de DC-uitgang aan het einde van elke stap op het minimum.



Figuur 5: (a), (b) Contactdraden aangesloten, (c) De hele opstelling aangesloten, inclusief voeding (PS) en batterijen.

Oscillatortest

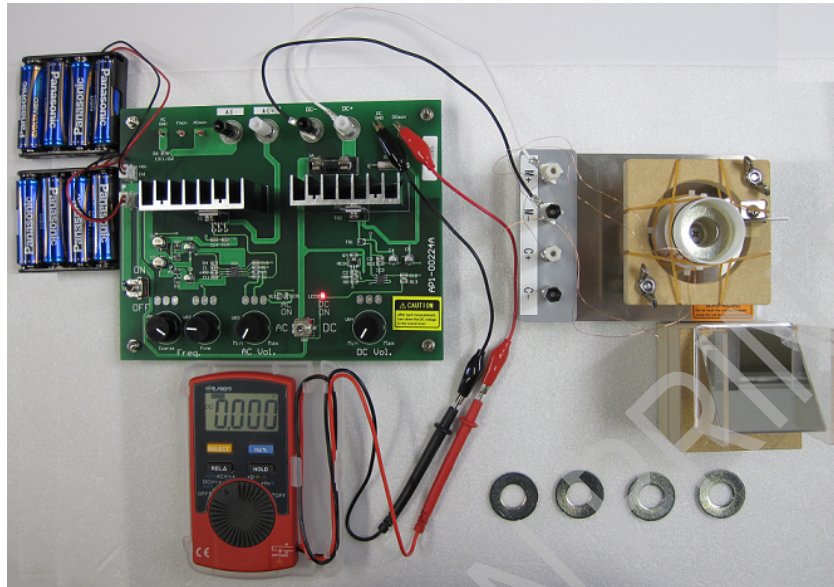
1. Sluit de M+ en M- aansluitingen aan op de AC-uitgang (AC+ en AC-) met de crimp-aansluitdraden.
2. Schakel de AC in en zet de voeding (PS) aan.
3. Draai de knop "AC Vol." rechtsonder vanaf het minimum tot een kwartslag. Stem de frequentie af met de knop "Coarse" om de oscillatie te starten.
4. Pas de AC-uitgangsspanning en frequentie aan zodat de oscillatie ongeveer $A = 3\text{ mm}$ in amplitude is (Afb.6). Als de oscillatie onstabiel is, pas dan de instellingen van de oscillator aan.
5. Koppel M+ en M- los en sluit de C+ en C- aansluitpinnen aan op de AC-uitgang.
6. Zet de voeding (PS) aan om de oscillatie te hervatten.



Figuur 6: Oscillatiegedrag gezien door de spiegel.

Deel A. Wet van Hooke en elektromagnetische krachten (2.4 punten)

- | | | |
|------------|--|-------|
| A.1 | Teken op het antwoordblad de magnetische veldlijnen van twee identieke schijf-vormige magneten met de N-polen naar elkaar toe. | 0.4pt |
| A.2 | <p>Sluit de M+ en M- aansluitingen aan op de DC uitgang. Koppel de digitale multimeter aan de aansluitingen voor DC stroom met behulp van de draden met krokodillenklemmen (Fig. 7).</p> <p>Lees de oscillatorhoogte z af bij nul gelijkstroom zonder gewicht, d.w.z. $N = 0$. Noteer dit in Tabel A.2.</p> <p>Plaats een gewicht ($N = 1$) op het cirkelvormige randje aan de binnenwand van de cilinder en noteer de hoogte z waarop de oscillator tot stilstand komt.</p> <p>Wat is de gelijkstroom I die door de hoofdspool loopt om de oscillator terug te brengen naar waar hij was zonder gewicht?</p> <p>Zet de gelijkstroom terug op 0, en herhaal de metingen met toenemende N, tot en met 5, om Tabel A.2 in te vullen.</p> | 0.6pt |



Figuur 7: De meetsnoeren van de digitale multimeter aangesloten. Rechts de oscillator met een gewichtje er in.

- | | | |
|------------|--|-------|
| A.3 | Teken een grafiek die het verband weergeeft tussen het aantal gewichten N en de hoogte z . Bereken de helling $a = \frac{\Delta z}{\Delta N}$ en zijn onzekerheid uit de grafiek. | 0.7pt |
| A.4 | Teken een grafiek die het verband weergeeft tussen het aantal gewichten N en de stroom I . Bepaal de waarde van b , gedefinieerd als $b = \frac{I}{N}$, en de onzekerheid ervan uit de grafiek. | 0.7pt |

Deel B. Geïnduceerde elektromotorische kracht (3.0 punten)

- | | | |
|------------|---|-------|
| B.1 | Stel dat een wisselstroom met frequentie f wordt aangesloten op de controlspoel zonder gewicht. De oscillatorhoogte varieert sinusoidaal met de tijd: | 0.2pt |
|------------|---|-------|

$$z - z_0 = A \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

waarbij z_0 de hoogte voor de krachtbalans is en A de amplitude van de oscillatie. Schrijf de uitdrukking op voor de amplitude V van de geïnduceerde elektromotorische kracht in de hoofdspool.

B.2	Sluit de C+ en C- aansluitingen aan op de AC uitgang. Verbind de digitale multimeter met "Fmon" en "AC GND" om de frequentie af te lezen. Pas zowel de AC-frequentie als de uitgangsspanning aan om een constante oscillatie met een gepaste amplitude te produceren. Meet de frequentie f_B en noteer deze op het antwoordblad. Verbind de digitale multimeter met de aansluitingen M+ en M-. Verander de uitgangsspanning terwijl de frequentie vaststaat en meet de oscillatieamplitude A en de AC wisselspanning V' ($V' = V/\sqrt{2}$) die in de hoofdspool wordt geïnduceerd. Vul Tabel B.2 in voor zover van toepassing.	0.5pt
B.3	Maak een grafiek die het verband weergeeft tussen de amplitude A en de spanning V' . Bereken de waarde van c , gedefinieerd als $c = \frac{V'}{A}$, en de onzekerheid ervan uit de grafiek.	0.7pt
B.4	Bereken BL en zijn onzekerheid met behulp van de resultaten van B.3 .	0.4pt
B.5	Bereken met behulp van de resultaten van A.3 , A.4 en B.4 de waarden van m en k en kwantificeer hun onzekerheden. Gebruik, waar van toepassing, de valversnelling $g = 9.80 \text{ m/s}^2$.	1.2pt

Deel C. Massa-afhankelijke resonantiefrequentie (2.3 punten)

Gebruik voor de volgende experimenten de hoofdspool om de oscillator aan te drijven. Wijzig de aansluitingen dienovereenkomstig.

C.1	Schrijf de uitdrukking op voor de resonantiefrequentie f van de oscillator met N gewichten. Gebruik hierbij de veerconstante k' als notatie tijdens de beweging, om aan te geven dat dit een anders bepaalde k is dan eerder.	0.2pt
C.2	Stuur de oscillator aan door de hoofdspool aan te sluiten op wisselstroom. Meet de resonantiefrequentie f , voor verschillende aantallen gewichten, $N = 0$ tot 5, en noteer de waarden in Tabel C.2 . Vermijd het springen van de gewichtjes.	0.5pt
C.3	Teken met behulp van de resultaten van C.2 een grafiek om $\frac{M}{k'}$ en $\frac{m}{k'}$ te verkrijgen. Schrijf de verkregen waarden op het antwoordblad. Als je nog andere fysische grootheden moet berekenen, schrijf ze dan op in de lege vakken van Tabel C.2 .	1.0pt
C.4	Wat is de waarde van $\frac{M}{m}$? Bereken M en k' met behulp van de resultaten van B.5 .	0.6pt

Deel D. Kenmerken van de resonantie (2.3 punten)

Wanneer een periodieke kracht met amplitude F_{AC} en frequentie f op de oscillator, zonder gewicht,

werkt, wordt de oscillatieamplitude van A goed beschreven door de volgende formule:

$$A(f) = \frac{F_{AC}}{8\pi^2 M f_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{(f - f_0)^2 + (\Delta f)^2}}. \quad (3)$$

Waarbij $\Delta f = \frac{\alpha}{4\pi M}$. Deze formule geldt enkel in het frequentiebereik waar $|f - f_0| \ll f_0$.

In dit deel worden de kenmerken van de resonantie gebruikt om de massa, M , van de oscillator te bepalen. Je mag ervan uitgaan dat formule (3) nog steeds geldig is.

- | | | |
|------------|--|-------|
| D.1 | <p>Stuur de oscillator aan door de hoofdspool te verbinden met wisselstroom. Pas de frequentie en de uitgangsspanning aan om een resonantie met de gepaste amplitude te produceren.</p> <p>Noteer de wisselspanning V'_{AC} tussen "ACmon" en "AC GND" op het antwoordblad.</p> <p>Bereken met behulp van de resultaten van B.4 en de correctiefactor 0.106 A/V de amplitude F_{AC} van de periodieke elektromagnetische kracht die op de oscillator werkt.</p> | 0.4pt |
| D.2 | <p>Noteer in tabel D.2 de amplitude A van de oscillatie voor verschillende frequenties f. Tijdens de meting moet de amplitude F_{AC} van de uitgeoefende kracht constant blijven.</p> <p>Maak een grafiek die het verband weergeeft tussen de frequentie f en de amplitude A.</p> | 0.9pt |
| D.3 | Bepaal M met je resultaten van D.1 en D.2 . | 1.0pt |

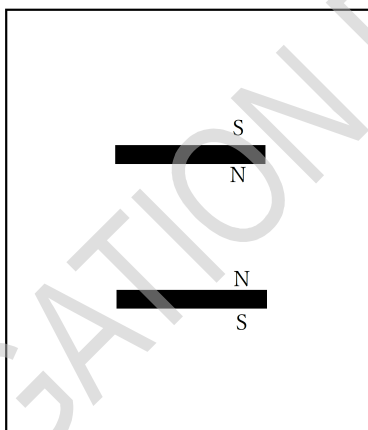
Meten van massa (10 pt)

Noteer de cijfers 0 t/m 9 in de volgende tabel:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Onderdeel A: Wet van Hooke en elektromagnetische krachten (2.4 pt)

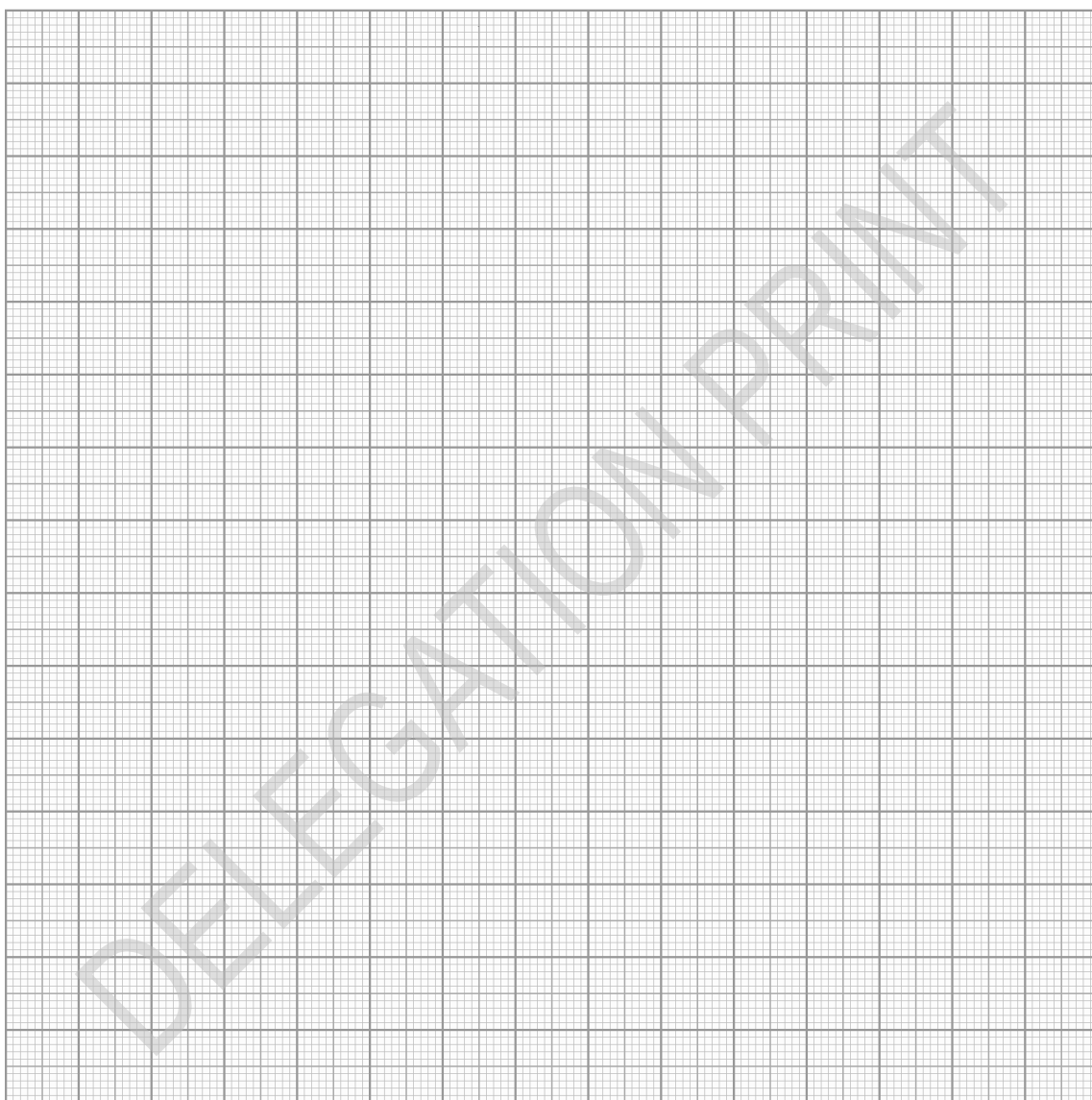
A.1 (0.4pt)



A.2 (0.6pt)

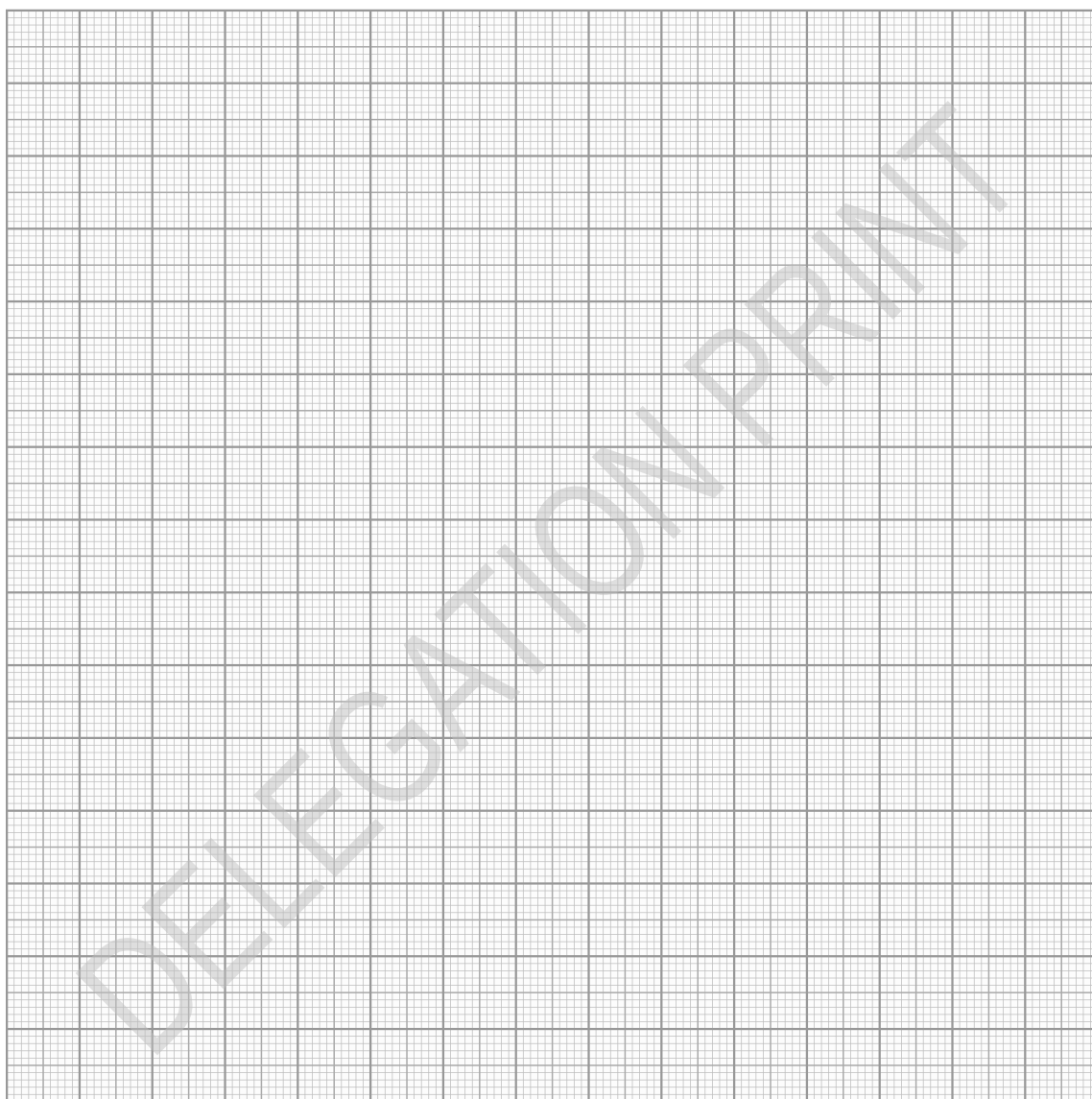
N	z /mm	I /A
0		0
1		
2		
3		
4		
5		

A.3 (0.7pt)



$a =$

A.4 (0.7pt)



$b =$

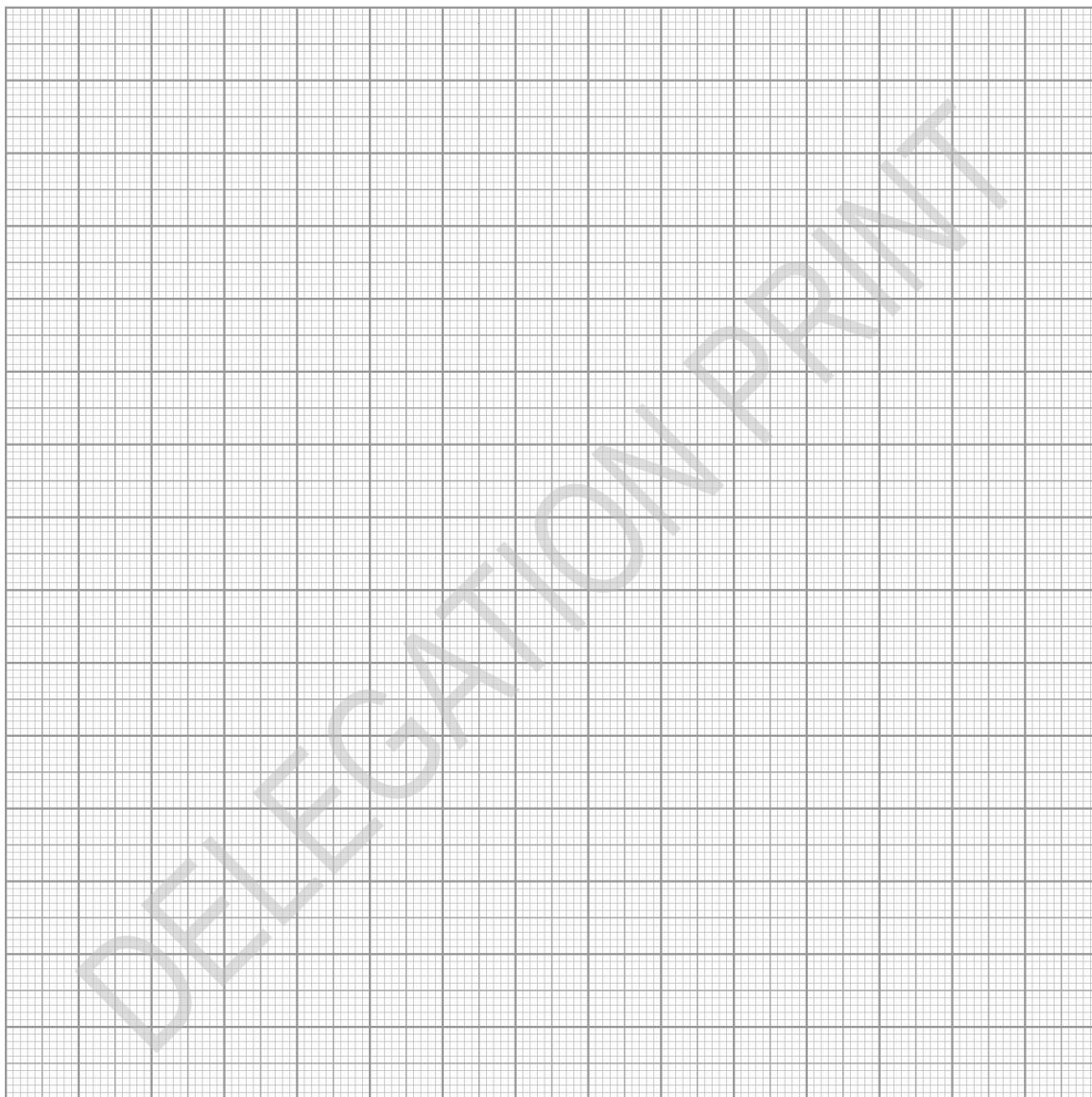
Dutch (Netherlands)

B.1 (0.2pt)

$V =$

$$V =$$
$$f_{\mathbf{B}} =$$
[illegible]

B.3 (0.7pt)



$c =$

B.4 (0.4pt)

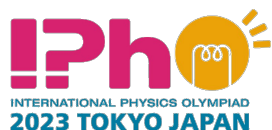
$BL =$

B.5 (1.2pt)

$m =$

$k =$

Experiment



A1-7

Dutch (Netherlands)

Onderdeel C: Massa-afhankelijke resonantiefrequentie (2.3 pt)

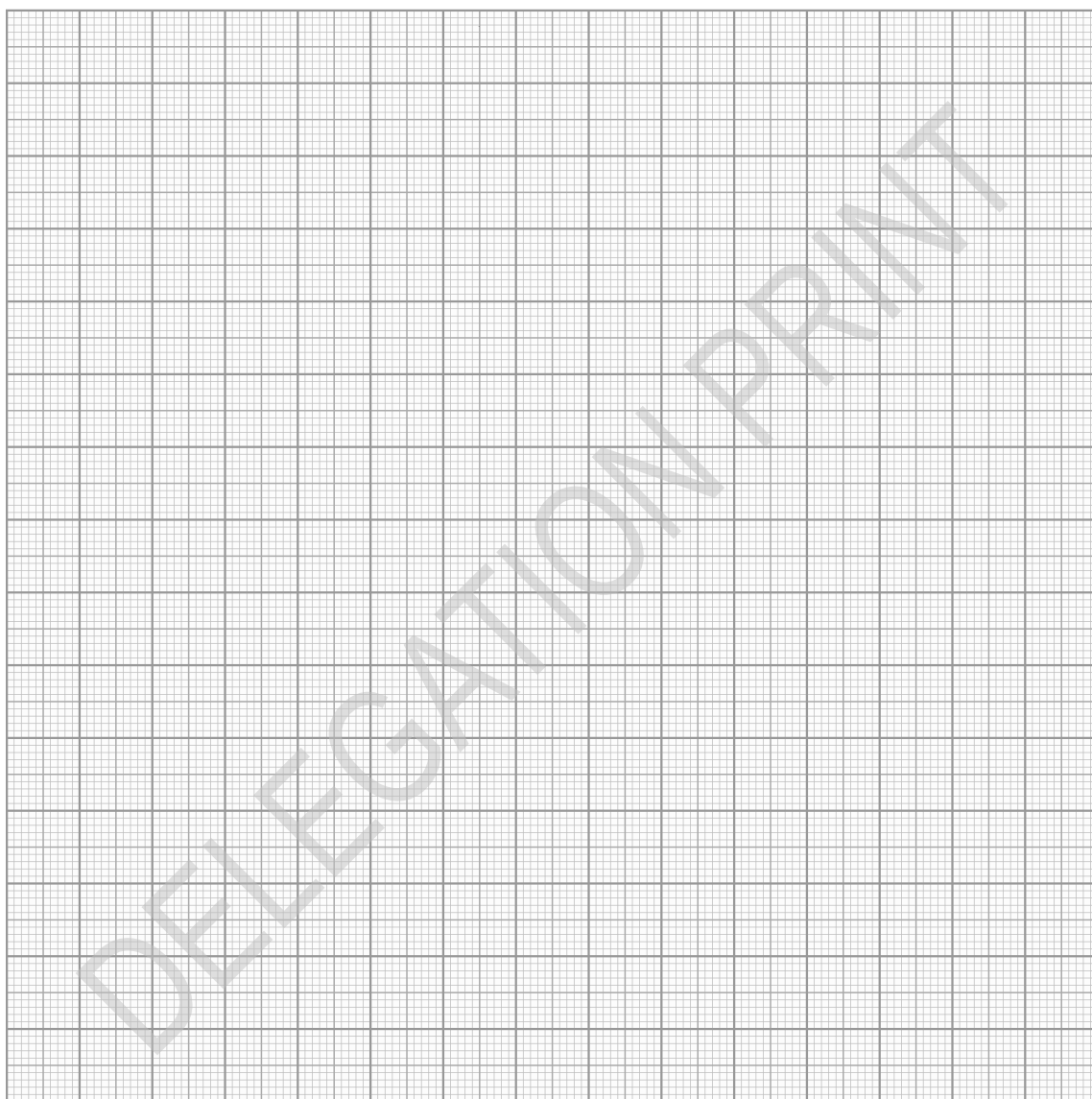
C.1 (0.2pt)

$f =$

C.2 (0.5pt)

N	f /Hz			
0				
1				
2				
3				
4				
5				

C.3 (1.0pt)



$$\frac{M}{k'} =$$

$$\frac{m}{k'} =$$

C.4 (0.6pt)

$$\frac{M}{m} =$$

$$M =$$

$$k' =$$

Onderdeel D: Resonantie karakteristieken (2.3 pt)

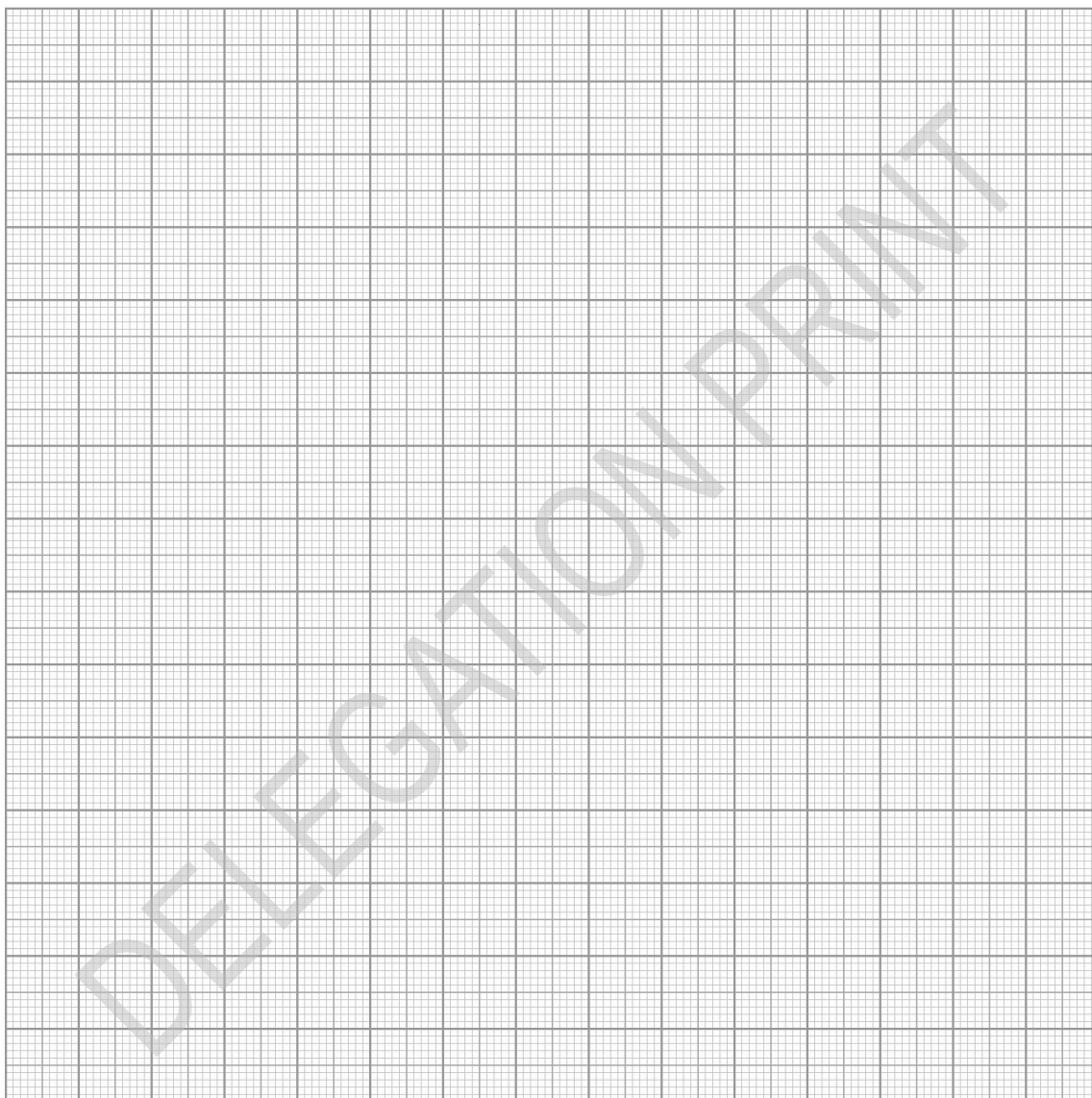
D.1 (0.4pt)

$$V'_{AC} =$$
$$F_{AC} =$$

D.2 (0.9pt)

[illegible]

D.2 (cont.)



D.3 (1.0pt)

DELEGATION PRINT

$M =$

Meting van dikte door dubbele breking (birefringence) (10 pt)

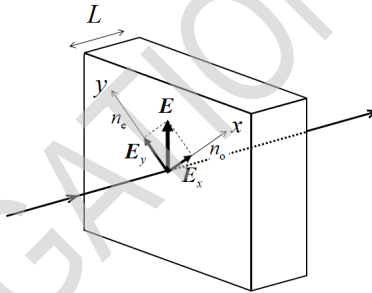
Bij dit experiment is onzekerheidsanalyse niet gevraagd.

Dubbele breking is een optische eigenschap van een kristal waarbij licht zich voortplant als twee stralen met verschillende brekingsindexen. Wanneer de orthogonale kristalassen x en y in het vlak liggen van het ingangsvlak van een dubbelbreking-kristal (fig. 1), wordt het elektrisch veld $\mathbf{E}$ van lineair gepolariseerd licht bij normale inval op het kristal ontbonden in twee orthogonale componenten $\mathbf{E}_x$ en $\mathbf{E}_y$, respectievelijk vergezeld van brekingsindices n_o en n_e . Voor een kristal met dikte L wordt de faseverschuiving van het x -gepolariseerde licht Γ_x en die van het y -gepolariseerde licht Γ_y als ze door het kristal gaan respectievelijk gegeven door

$$\Gamma_x = \frac{2\pi}{\lambda} n_o L, \quad (1)$$

$$\Gamma_y = \frac{2\pi}{\lambda} n_e L, \quad (2)$$

waarbij λ de golflengte van licht in vacuüm is.



Figuur 1: Vectoriële ontbinding van het elektrisch veld $\mathbf{E}$ van lineair gepolariseerd licht bij loodrechte inval op het oppervlak van een dubbelbreking-kristal.

Het faseverschil Γ tussen de twee stralen is

$$\Gamma = \Gamma_y - \Gamma_x = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L, \quad (3)$$

waarbij

$$\Delta n = n_e - n_o \quad (4)$$

de dubbelbreking (birefringence) is. Aangezien het elektrische veld van licht de vectoriële som is van $\mathbf{E}_x$ en $\mathbf{E}_y$ met een faseverschil Γ , heeft het licht na passage door het kristal een polarisatiecomponent loodrecht op de initiële lineaire polarisatie van het invallende licht.

Laat $I_{\parallel}$ en $I_{\perp}$ de intensiteiten zijn van de componenten van het licht na passage door het kristal respectievelijk evenwijdig aan en loodrecht op de richting van de oorspronkelijke polarisatie van het invallende

licht. Hierna is de richting van de lineaire polarisatie van het invallende licht (E in fig. 1) 45° ten opzichte van de x as. Dan wordt de genormaliseerde intensiteit van de loodrechte component I_{Norm} gegeven door

$$I_{\text{Norm}} = \frac{I_{\perp}}{I_{\text{Total}}} = \sin^2 \frac{\Gamma}{2}, \quad (5)$$

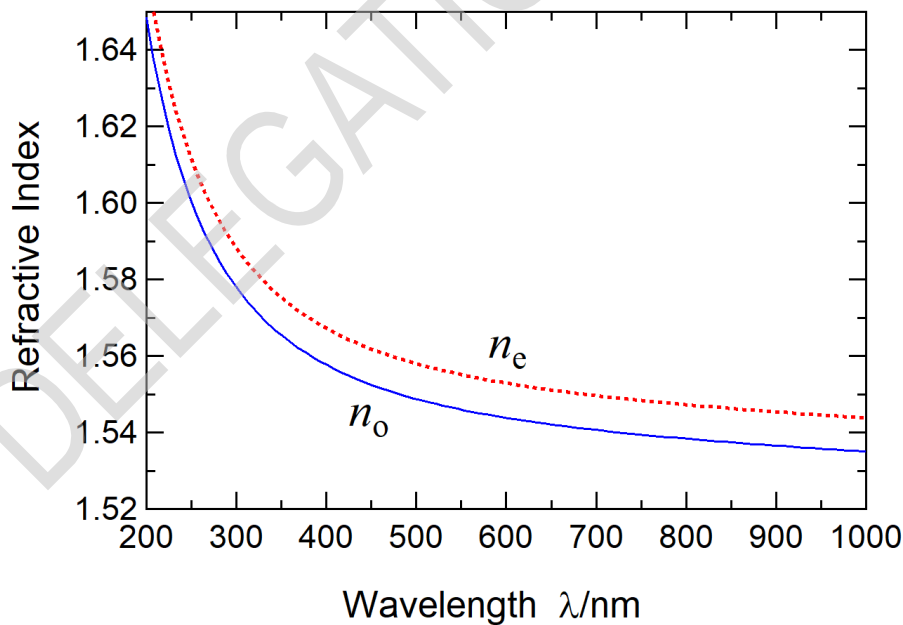
met I_{Total} de totale doorgelaten lichtintensiteit $I_{\parallel} + I_{\perp}$.

We kunnen een experiment zo opzetten dat I_{Norm} varieert tussen 0 en 1 als we de golflengte van het invallende licht variëren. Laat λ_m ($m = 1, 2, 3, \dots$) de golflengte zijn waarbij $I_{\text{Norm}} = 0$; dan vinden we het faseverschil Γ_m zodanig dat

$$\Gamma_m = \frac{2\pi}{\lambda_m} \Delta n(\lambda_m) L = 2\pi m. \quad (6)$$

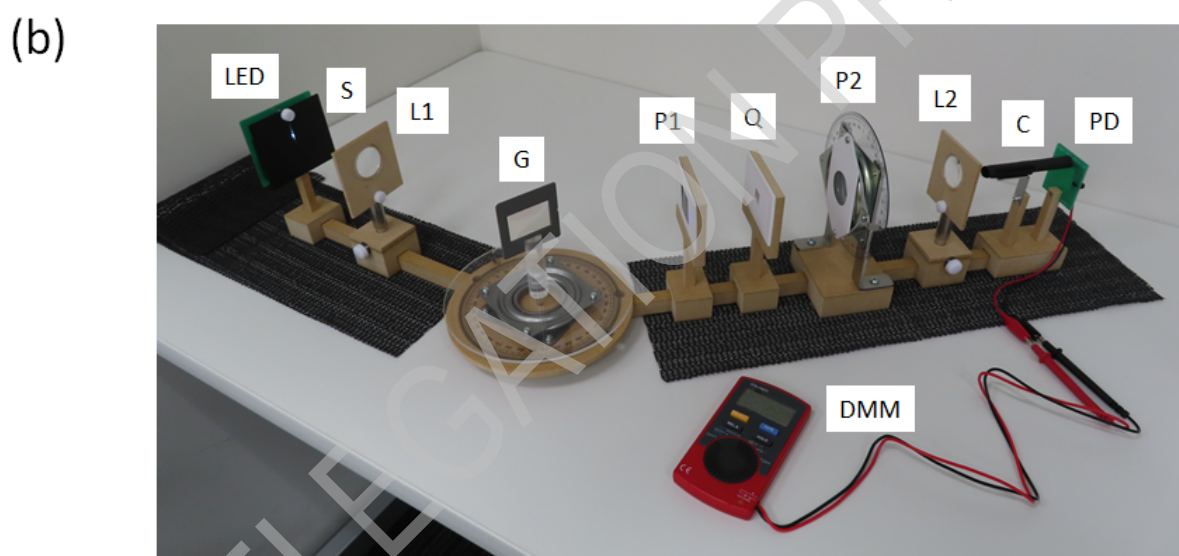
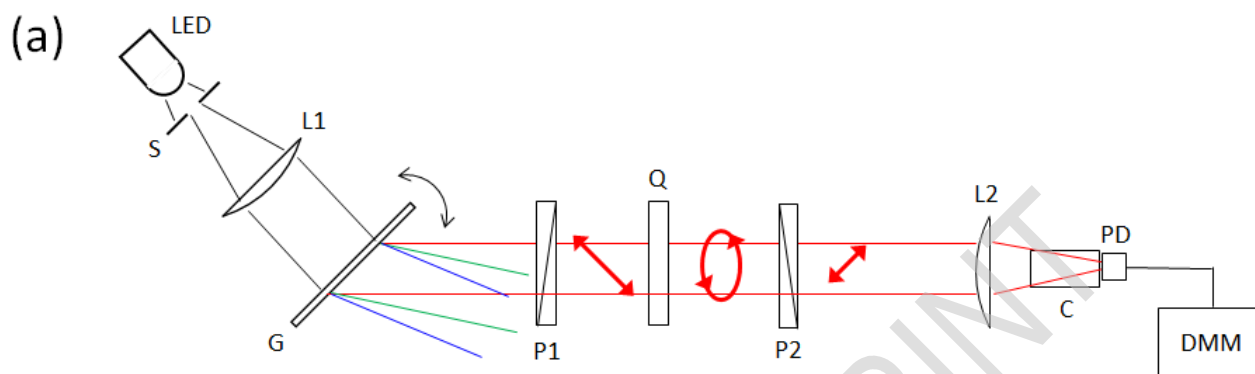
Met deze vergelijking kunnen we de kristaldikte L bepalen als we meerdere λ_m 's kunnen meten voor de bekende $\Delta n(\lambda_m)$.

In dit experiment gebruik je een plaatje kwarts om de dikte ervan te bepalen. Kwarts is dubbel brekend met zijn brekingsindices n_o en n_e afhankelijk van de golflengte van het licht zoals weergegeven in Fig. 2.

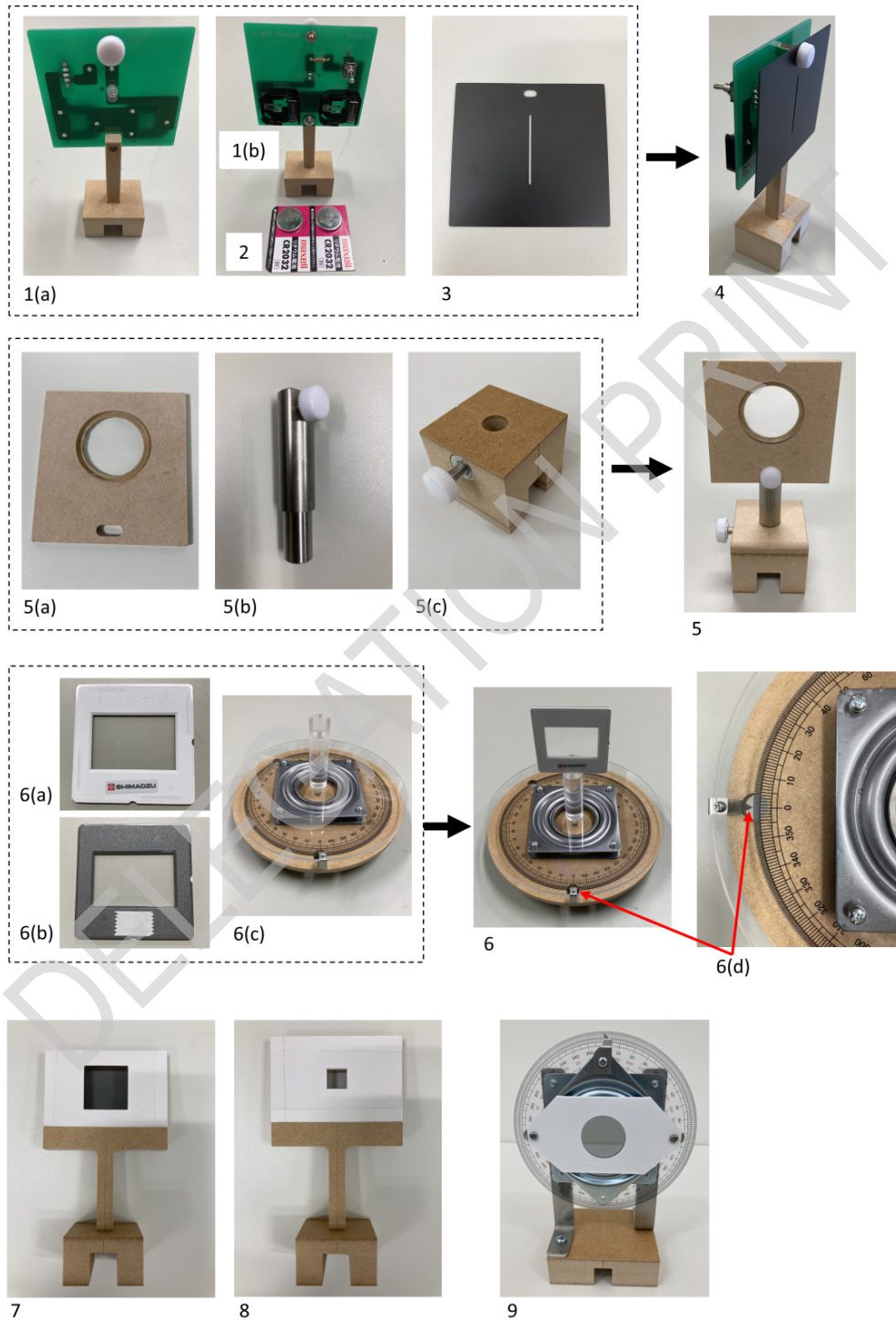


Figuur 2: De brekingsindices n_o en n_e van kwarts als functie van de golflengte.

Figuur 3 toont het diktemeetsysteem. Figuren 4 en 5 tonen de optomechanische en fotonische componenten en apparaten. Een wit licht emitterende diode (LED) wordt gebruikt als lichtbron, die een blauwe LED en een fosfor bevat. Wanneer licht van de blauwe LED op de fosfor schijnt wordt wit licht met een continu spectrum uitgezonden. Het licht van deze witte LED wordt verspreid, d.w.z. spectraal uit elkaar gehaald, met behulp van het diffractierooster **G** en lineair gepolariseerd door de polarisator **P1**. De polarisatierichting (E in Fig. 1) is 45° van de x -as van de kwartsplaat **Q**. De polarisatiecomponent van het licht nadat het door **Q** is gegaan, d.w.z. parallel en loodrecht op de polarisatierichting van **P1**, wordt geselecteerd door de polarisator **P2** te draaien. De fotodetector meet de lichtintensiteit.



Figuur 3: (a) Schematische weergave en (b) foto van het diktemeetsysteem. **LED**: witte LED, **S**: spleet, **L1**: bundelende lens, **G**: transmissie diffractierooster, **P1**: polarisator, **Q**: kwartsplaat, **P2**: polarisator, **L2**: focusserende lens, **C**: lichtafscherm-cilinder, **PD**: fotodetector, **DMM**: digitale multimeter.



Figuur 4: Onderdelen en apparaten: **1(a)**. witte LED (vooraanzicht); **1(b)**. witte LED (achteraanzicht); **2**. batterijen; **3**. spleet (**S** in Fig. 3); **4**. LED met spleet bevestigd; **5**. lens (**L1**, **L2** in Fig. 3); **5(a)** gemonteerde lens; **5(b)** lenshouder; **5(c)** houdervoet; **6**. transmissie diffractierooster (**6(a)** voorkant; **6(b)** achterkant (met plaktape) op **6(c)** draaitafel (**G** in Fig. 3); **6(d)** hoekaflezing op de draaitafel; **7**. polarisator (**P1** in Fig. 3); **8**. kwartsplaat (**Q** in Fig. 3); **9**. polarisator op draaitafel (**P2** in Fig. 3).



Figuur 5: Componenten en apparaten (vervolg): **10.** cilinder met magneet voor afschermen licht (**C** in Fig. 3); **11.** cilinderbevestiging; **12.** fotodetector (**PD** in Fig. 3); **13.** fotodetector met cilinder; **14.** digitale multimeter (**DMM** in Fig. 3); **15.** korte geleiderail; **16.** lange geleiderail; **17.** schaalverdeling; **18.** witte kaart; **19.** zwarte kaart; **20.** antislipvellen; **21** & **22.** lichtafschermdoos (vóór montage en zoals gemonteerd).

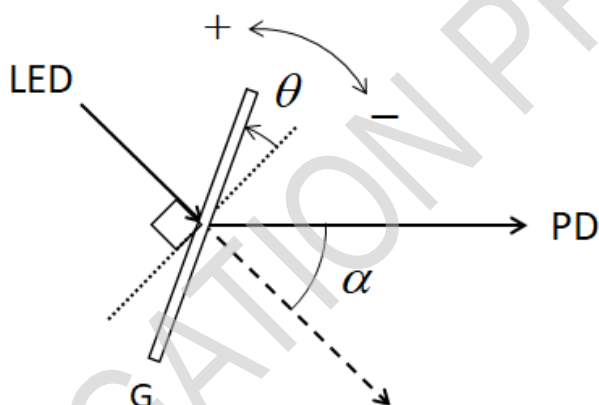
Deel A. Instelling meetsysteem (2.3 pt)

Het LED-licht valt in op het roosteroppervlak (Fig. 6). De rotatiehoek θ van **G** voor loodrechte inval is gedefinieerd als 0° . De rotaties linksom en rechtsom worden respectievelijk aangeduid met $+$ en $-$. De eerste orde diffractiehoek α wordt gedefinieerd zoals geïllustreerd. Met behulp van de spleetafstand d van tralie **G** wordt de golflengte λ gegeven in termen van θ als

$$\lambda = d \sin(\alpha - \theta) + d \sin \theta \quad (7)$$

$$= 2d \sin \frac{\alpha}{2} \cos \left(\frac{\alpha}{2} - \theta \right). \quad (8)$$

Gebruik hierna verder $d = 1,00, \mu\text{m}$ en de vaste diffractiehoek $\alpha = 40,0^\circ$.



Figuur 6: De draaihoek θ van het tralie **G** en de diffractiehoek α .

A.1	Bereken de grootste golflengte λ die gemeten kan worden en de bijbehorende θ .	0.3pt
A.2	Bereken de numerieke waarde van θ voor $\lambda = 440 \text{ nm}$.	0.2pt

De procedures voor het opzetten van het meetsysteem zijn als volgt.

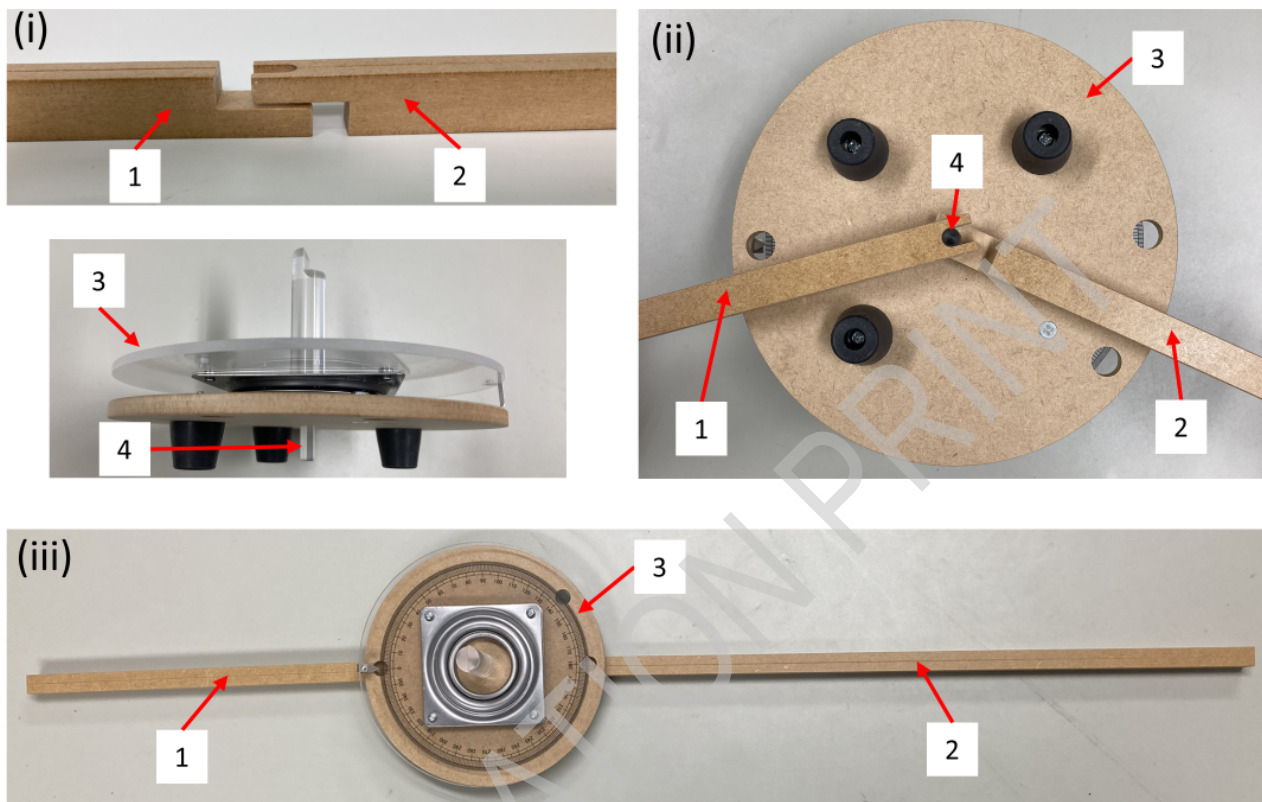
[1] Zet de schaalverdeling recht op (**17** in Fig. 5) met behulp van het voetstuk (**17(b)**).

[2] Plaats twee batterijen op de witte LED-module. De "+"-zijden moeten naar je toe wijzen.

[3] Zet de LED aan.

[4] Verwijder de schroef aan de voorkant van de LED-module. Bevestig de spleet aan de LED-module met de schroef (**4** in Fig. 4). Stel met behulp van de schaalverdeling de positie van de spleet zodanig af dat de uitgezonden witte lichtbundel het helderst is en meet de hoogte van het middelpunt van de lichtbundel bij het verlaten van de spleet (voor punt 9).

[5] Laat van de lange geleiderail het U-vormige uiteinde met open sleuven op dat van de korte geleiderail rusten (Fig. 7(i)). Steek de rotatieas die uit de onderkant van de draaitafel steekt in het "virtuele doorvoergat" dat gemaakt is door de geleiderails (Fig. 7(ii)). Zorg voor een vrije en soepele rotatie van beide armen om de as, zie Fig. 7(iii). Zorg ervoor dat de lange geleiderail op de tafel blijft liggen $0^\circ \leq \alpha \leq 40,0^\circ$.



Figuur 7: (i) U-vormig open sleufuiteinde van de korte geleiderail onder dat van de lange geleiderail waardoor een "virtueel" doorvoergat ontstaat. (ii) Steek de as die uit de onderkant van de draaitafel steekt in het virtuele gat. (iii) Bovenaanzicht van de draaitafel met geleiderails die vrij om de as kunnen draaien. 1. korte geleiderail; 2. lange geleiderail; 3. draaitafel; 4. as van de draaitafel.

[6] Lijn de middellijn van de korte geleiderail uit met 0° op de schaal van de draaitafel en houd hem op die plaats. U kunt een antislipmat onder de korte geleiderail leggen.

[7] Zet de lenzen in elkaar (5 in afb. 4).

[8] Plaats de witte LED-module met de spleet en de lens (**L1** in Fig. 3) op de korte geleiderail. Stel de afstand tussen de spleet en **L1** zo af dat de grootte van de lichtstraal na het passeren van **L1** bijna constant blijft, d.w.z. evenwijdig, over de baan van de bundel.

[9] Meet na **L1** de hoogte van de bundel met behulp van de schaalverdeling. Stel het niveau van **L1** bij door de stelschroef van de houdervoet los te draaien en de lenshouder zonodig te verplaatsen om de hoogte van de straal vrijwel gelijk te houden aan die vlak na de spleet.

[10] Lijn de middellijn van de lange geleiderail uit met 180° op de hoekschaal op de draaitafel.

[11] Draai de horizontale positie van de lensvatting (**5(a)** in Fig. 4) bij door de stelschroef los te draaien en naar rechts of links te bewegen. Het middelpunt van de bundel na **L1** moet uitgelijnd zijn met de middellijn van de lange geleiderail. U kunt de schaalverdeling omgekeerd over de lange rail plaatsen.

[12] Onthul het tweede oppervlak van het dubbelzijdige plakband op de achterkant van het tralie (**6(b)** in Fig. 4) en bevestig het aan de bovenkant van de as van de draaitafel (**6** in Fig. 4).

[13] Richt de voorkant van het rooster naar de lichtbron en draai de tafel zo dat het gereflecteerde licht van de spleet terug in de spleet valt, d.w.z. $\theta = 0^\circ$ (loodrechte inval). Noteer de nul-hoek θ_{tafel} van de

draaitafel. Deze wordt gebruikt in B.1.

[14] Beweeg de lange geleiderail rond de as zodat $\alpha = 40.0^\circ$ (Afb. 6). Eenmaal vastgezet, kunt u daarna nog een antislipmat plaatsen om te voorkomen dat het per ongeluk verkeerd wordt uitgelijnd.

[15] Plaats de lens (**L2** in Fig. 3) en de fotodetector (**PD** in Fig. 3) met de cilinderbevestiging op de lange rail. Om het diffractielicht op **de PD** te richten, moet de afstand tussen **de PD** en **L2** langs de lange rail worden aangepast, evenals de hoogte van **L2**. Hierdoor wordt de verticale bundeldiameter geminimaliseerd. Controleer de straaldiameter met de witte kaart. Als de lichtbundel te zwak is om met het blote oog te zien, gebruik dan de lichtafschermdoos om **de PD** af te dekken.

[16] Plaats de lichtafscherm-cilinder op de houder (**13** in Fig. 5). De lichtafscherming minimaliseert het ongewenste licht dat wordt gedetecteerd.

[17] Sluit **PD** aan op de DMM. De rode (zwarte) draad gaat naar de rode (zwarte) aansluiting. Stel de multimeter in op de DC-spanningsmeetmodus.

[18] Pas de hoogte van **L2** aan om de aflezings van de DMM te maximaliseren. Hierna is de intensiteit van het licht gedefinieerd als de spanningswaarde op de DMM.

- | | | |
|------------|---|-------|
| A.3 | Draai de draaitafel en bepaal de hoek θ en de bijbehorende golflengte λ_{peak} waarbij de spectrale intensiteit van het blauwe licht van de LED maximaal is, aangenomen dat $\alpha = 40.0^\circ$. Als je antwoord voor λ_{peak} inligt tussen 450 en 460 nm, is je opstelling goed uitgelijnd; Noteer dan $\alpha = 40.0^\circ$ op het antwoordvel en ga verder.
Anders moet je de juiste waarde voor α bepalen zonder je opstelling te veranderen of je eerste waarde van λ_{peak} , zodat je eerder gevonden λ_{peak} binnen het hierboven genoemde voorkeursbereik valt. Noteer dan deze α , en gebruik deze voor de rest van de opdrachten. | 0.8pt |
|------------|---|-------|

[19] Plaats de polarisatoren (**P1** en **P2** in Fig. 3) op de lange geleiderail.

- | | | |
|------------|---|-------|
| A.4 | Stel de rotatietafel in op de positie $\theta = -15.0^\circ$. Bekijk de aflezings op de DMM en bepaal de hoek $\varphi_\perp$ van de rotatiebevestiging van de polarisator P2 waarvan de polarisatierichting loodrecht staat op die van het licht dat door de polarisator P1 wordt doorgelaten. Bereken uit dit resultaat de hoek $\varphi_\parallel$ van de rotatiebevestiging van polarisator P2 wanneer de polarisatierichting evenwijdig is aan die van polarisator P1 . | 0.3pt |
|------------|---|-------|

- | | | |
|------------|--|-------|
| A.5 | Blokkeer het licht uit de spleet door de zwarte kaart voor de spleet te plaatsen. Hierdoor kun je de intensiteit van de achtergrond van het systeem, d.w.z. de offset van de intensiteit ten opzichte van nul, bepalen. We definiëren de lichtintensiteiten $I_{\text{Offset } \perp}$ en $I_{\text{Offset } \parallel}$ als de hoeken van de rotatiebevestiging van de polarisator P2 respectievelijk $\varphi_\perp$ en $\varphi_\parallel$ zijn. Bepaal de offsets $I_{\text{Offset } \perp}$ en $I_{\text{Offset } \parallel}$. Merk op dat $I_{\text{Offset } \perp}$ en $I_{\text{Offset } \parallel}$ komen door ander licht dan de lichtbron. Ze moeten worden geëlimineerd door aftrekking om de werkelijke bijdrage van de lichtbron te bepalen. | 0.2pt |
|------------|--|-------|

- | | | |
|------------|--|-------|
| A.6 | $I_\perp$ en $I_\parallel$ verwijzen naar de lichtintensiteiten van de lichtbron wanneer de hoeken van de rotatiebevestiging van de polarisator P2 respectievelijk $\varphi_\perp$ en $\varphi_\parallel$ zijn. Bepaal de lichtintensiteiten $I_\perp$ en $I_\parallel$ voor $\theta = -15.0^\circ$. | 0.5pt |
|------------|--|-------|

Deel B. Meting van doorgelaten lichtintensiteiten (4.7 pt)

Gebruik hierna waar nodig de waarden van λ berekend met de gecorrigeerde waarde van α in **A.3**.

B.1	Plaats de kwartsplaat tussen de polarisatoren P1 en P2 en meet de doorgelaten lichtintensiteiten $I_{\perp}$ en $I_{\parallel}$ onder verschillende hoeken θ . De metingen moeten het golflengtebereik van 440 nm tot 660 nm volledig overdekken. Maak een tabel van de volgende parameters: θ_{Tafel} (hoekmetingen van de draaitafel), θ , λ , $I_{\perp}$, $I_{\parallel}$, $I_{\text{Total}} = I_{\perp} + I_{\parallel}$, $I_{\text{Norm}} = I_{\perp}/I_{\text{Total}}$. Opmerking: Bedenk dat als de waarde van θ_{Tafel} toeneemt, de waarde van θ met dezelfde waarde afneemt en omgekeerd. Je hoeft niet alle rijen van de gegeven tabel te gebruiken, maar je moet wel voldoende metingen doen om een goed resultaat te bereiken.	2.0pt
B.2	Maak een grafiek van het spectrum van de witte LED, I_{Total} als functie van de golflengte.	1.0pt
B.3	Bepaal de volle breedte bij halve hoogte $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$ van het spectrum van het licht van de blauwe LED die in de witte LED is ingebouwd. Dit is de breedte van de piek, gemeten tussen de punten op halve hoogte van het maximum.	0.2pt
B.4	Maak een grafiek van het spectrum van I_{Norm} .	1.5pt

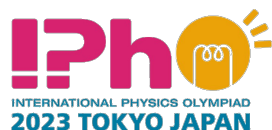
Deel C. Analyse van gemeten resultaten (3.0 pt)

C.1	Bepaal uit de grafiek van I_{Norm} alle golflengten waarbij de intensiteit door lokale minima gaan. Het bijbehorende nummer m van de orde volgens Eq. (6) moet onder de bijbehorende golflengte worden gegeven. Gebruik voor het bepalen van de dubbelbreking Δn de waarden van n_o en n_e uit tabel 1.	1.5pt
C.2	Bepaal de dikte van het sample L .	1.5pt

Tabel 1: Brekingsindices n_o en n_e van kwarts (400-700 nm).

λ/nm	n_o	n_e	λ/nm	n_o	n_e	λ/nm	n_o	n_e
400	1.55769	1.56725	434	1.55394	1.56337	467	1.55107	1.56041
401	1.55756	1.56712	435	1.55384	1.56327	468	1.55099	1.56033
402	1.55744	1.56700	436	1.55374	1.56318	469	1.55091	1.56025
403	1.55732	1.56687	437	1.55365	1.56308	470	1.55084	1.56017
404	1.55720	1.56674	438	1.55355	1.56298	471	1.55076	1.56009
405	1.55707	1.56662	439	1.55346	1.56288	472	1.55068	1.56001
406	1.55695	1.56649	440	1.55337	1.56278	473	1.55061	1.55993
407	1.55684	1.56637	441	1.55327	1.56269	474	1.55054	1.55986
408	1.55672	1.56625	442	1.55318	1.56259	475	1.55046	1.55978
409	1.55660	1.56613	443	1.55309	1.56250	476	1.55039	1.55970
410	1.55648	1.56601	444	1.55300	1.56240	477	1.55031	1.55963
411	1.55637	1.56589	445	1.55291	1.56231	478	1.55024	1.55955
412	1.55625	1.56577	446	1.55282	1.56222	479	1.55017	1.55948
413	1.55614	1.56565	447	1.55273	1.56213	480	1.55010	1.55940
414	1.55603	1.56554	448	1.55264	1.56203	481	1.55003	1.55933
415	1.55592	1.56542	449	1.55255	1.56194	482	1.54995	1.55926
416	1.55580	1.56531	450	1.55247	1.56185	483	1.54988	1.55918
417	1.55569	1.56519	451	1.55238	1.56176	484	1.54981	1.55911
418	1.55558	1.56508	452	1.55229	1.56167	485	1.54974	1.55904
419	1.55548	1.56497	453	1.55221	1.56159	486	1.54967	1.55897
420	1.55537	1.56485	454	1.55212	1.56150	487	1.54961	1.55890
421	1.55526	1.56474	455	1.55204	1.56141	488	1.54954	1.55883
422	1.55515	1.56463	456	1.55195	1.56132	489	1.54947	1.55875
423	1.55505	1.56452	457	1.55187	1.56124	490	1.54940	1.55868
424	1.55494	1.56442	458	1.55179	1.56115	491	1.54933	1.55862
425	1.55484	1.56431	459	1.55171	1.56107	492	1.54927	1.55855
426	1.55474	1.56420	460	1.55162	1.56098	493	1.54920	1.55848
427	1.55463	1.56410	461	1.55154	1.56090	494	1.54913	1.55841
428	1.55453	1.56399	462	1.55146	1.56082	495	1.54907	1.55834
429	1.55443	1.56389	463	1.55138	1.56073	496	1.54900	1.55827
430	1.55433	1.56378	464	1.55130	1.56065	497	1.54894	1.55821
431	1.55423	1.56368	465	1.55122	1.56057	498	1.54887	1.55814
432	1.55413	1.56358	466	1.55115	1.56049	499	1.54881	1.55807
433	1.55403	1.56348						

Experiment

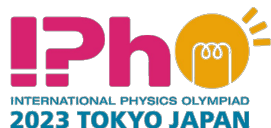


Q2-11

Dutch (Netherlands)

λ/nm	n_o	n_e	λ/nm	n_o	n_e	λ/nm	n_o	n_e
500	1.54875	1.55801	534	1.54678	1.55597	567	1.54518	1.55432
501	1.54868	1.55794	535	1.54673	1.55592	568	1.54514	1.55427
502	1.54862	1.55788	536	1.54667	1.55587	569	1.54509	1.55423
503	1.54856	1.55781	537	1.54662	1.55581	570	1.54505	1.55418
504	1.54850	1.55775	538	1.54657	1.55576	571	1.54500	1.55414
505	1.54843	1.55768	539	1.54652	1.55570	572	1.54496	1.55409
506	1.54837	1.55762	540	1.54647	1.55565	573	1.54492	1.55405
507	1.54831	1.55756	541	1.54642	1.55560	574	1.54487	1.55400
508	1.54825	1.55749	542	1.54637	1.55555	575	1.54483	1.55396
509	1.54819	1.55743	543	1.54632	1.55549	576	1.54479	1.55391
510	1.54813	1.55737	544	1.54627	1.55544	577	1.54474	1.55387
511	1.54807	1.55731	545	1.54622	1.55539	578	1.54470	1.55383
512	1.54801	1.55725	546	1.54617	1.55534	579	1.54466	1.55378
513	1.54795	1.55718	547	1.54612	1.55529	580	1.54462	1.55374
514	1.54789	1.55712	548	1.54607	1.55524	581	1.54458	1.55370
515	1.54783	1.55706	549	1.54602	1.55519	582	1.54453	1.55365
516	1.54777	1.55700	550	1.54597	1.55514	583	1.54449	1.55361
517	1.54772	1.55694	551	1.54592	1.55509	584	1.54445	1.55357
518	1.54766	1.55688	552	1.54587	1.55504	585	1.54441	1.55352
519	1.54760	1.55682	553	1.54583	1.55499	586	1.54437	1.55348
520	1.54754	1.55676	554	1.54578	1.55494	587	1.54433	1.55344
521	1.54749	1.55671	555	1.54573	1.55489	588	1.54429	1.55340
522	1.54743	1.55665	556	1.54568	1.55484	589	1.54425	1.55336
523	1.54738	1.55659	557	1.54564	1.55479	590	1.54421	1.55331
524	1.54732	1.55653	558	1.54559	1.55474	591	1.54417	1.55327
525	1.54726	1.55648	559	1.54554	1.55470	592	1.54413	1.55323
526	1.54721	1.55642	560	1.54550	1.55465	593	1.54409	1.55319
527	1.54715	1.55636	561	1.54545	1.55460	594	1.54405	1.55315
528	1.54710	1.55631	562	1.54541	1.55455	595	1.54401	1.55311
529	1.54705	1.55625	563	1.54536	1.55451	596	1.54397	1.55307
530	1.54699	1.55619	564	1.54531	1.55446	597	1.54393	1.55303
531	1.54694	1.55614	565	1.54527	1.55441	598	1.54389	1.55299
532	1.54688	1.55608	566	1.54522	1.55437	599	1.54385	1.55295
533	1.54683	1.55603						

Experiment



Q2-12

Dutch (Netherlands)

λ/nm	n_o	n_e	λ/nm	n_o	n_e	λ/nm	n_o	n_e
600	1.54382	1.55291	634	1.54260	1.55165	667	1.54157	1.55059
601	1.54378	1.55287	635	1.54257	1.55162	668	1.54154	1.55056
602	1.54374	1.55283	636	1.54254	1.55159	669	1.54151	1.55053
603	1.54370	1.55279	637	1.54250	1.55155	670	1.54148	1.55050
604	1.54366	1.55275	638	1.54247	1.55152	671	1.54145	1.55047
605	1.54363	1.55271	639	1.54244	1.55148	672	1.54143	1.55044
606	1.54359	1.55267	640	1.54241	1.55145	673	1.54140	1.55041
607	1.54355	1.55264	641	1.54237	1.55142	674	1.54137	1.55038
608	1.54351	1.55260	642	1.54234	1.55138	675	1.54134	1.55035
609	1.54348	1.55256	643	1.54231	1.55135	676	1.54131	1.55032
610	1.54344	1.55252	644	1.54228	1.55132	677	1.54128	1.55029
611	1.54340	1.55248	645	1.54224	1.55128	678	1.54125	1.55026
612	1.54337	1.55245	646	1.54221	1.55125	679	1.54123	1.55023
613	1.54333	1.55241	647	1.54218	1.55122	680	1.54120	1.55020
614	1.54330	1.55237	648	1.54215	1.55119	681	1.54117	1.55017
615	1.54326	1.55233	649	1.54212	1.55115	682	1.54114	1.55014
616	1.54322	1.55230	650	1.54209	1.55112	683	1.54111	1.55011
617	1.54319	1.55226	651	1.54206	1.55109	684	1.54109	1.55009
618	1.54315	1.55222	652	1.54202	1.55106	685	1.54106	1.55006
619	1.54312	1.55219	653	1.54199	1.55102	686	1.54103	1.55003
620	1.54308	1.55215	654	1.54196	1.55099	687	1.54100	1.55000
621	1.54305	1.55211	655	1.54193	1.55096	688	1.54098	1.54997
622	1.54301	1.55208	656	1.54190	1.55093	689	1.54095	1.54994
623	1.54298	1.55204	657	1.54187	1.55090	690	1.54092	1.54992
624	1.54294	1.55201	658	1.54184	1.55087	691	1.54090	1.54989
625	1.54291	1.55197	659	1.54181	1.55083	692	1.54087	1.54986
626	1.54287	1.55193	660	1.54178	1.55080	693	1.54084	1.54983
627	1.54284	1.55190	661	1.54175	1.55077	694	1.54081	1.54980
628	1.54280	1.55186	662	1.54172	1.55074	695	1.54079	1.54978
629	1.54277	1.55183	663	1.54169	1.55071	696	1.54076	1.54975
630	1.54274	1.55179	664	1.54166	1.55068	697	1.54073	1.54972
631	1.54270	1.55176	665	1.54163	1.55065	698	1.54071	1.54969
632	1.54267	1.55172	666	1.54160	1.55062	699	1.54068	1.54967
633	1.54264	1.55169				700	1.54066	1.54964

Meting van dikte door dubbele breking (birefringence) (10 punten)

Deel A. Instelling meetsysteem (2.3 punten)

A.1 (0.3pt)

$$\lambda =$$

$$\theta =$$

A.2 (0.2pt)

$$\theta =$$

A.3 (0.8pt)

$$\theta =$$

$$\lambda_{\text{Peak}} =$$

$$\alpha =$$

A.4 (0.3pt)

$$\varphi_{\perp} =$$

$$\varphi_{\parallel} =$$

A.5 (0.2pt)

$$I_{\text{Offset } \perp} =$$

$$I_{\text{Offset } \parallel} =$$

A.6 (0.5pt)

$$I_{\perp} =$$

$$I_{\parallel} =$$

IPhO
INTERNATIONAL PHYSICS OLYMPIAD
2023 TOKYO JAPAN

A2-3
Dutch (Netherlands)

B.1 (2.0pt)

[illegible]

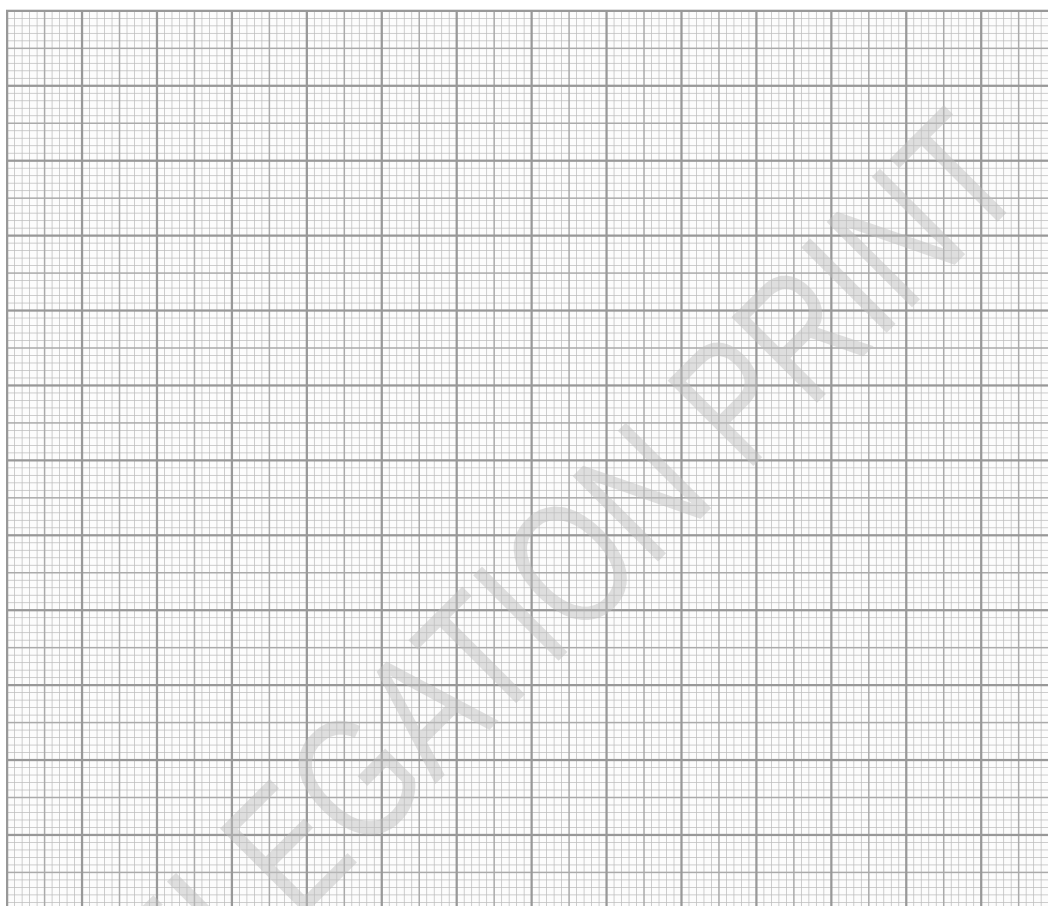
[illegible]

A2-5
Dutch (Netherlands)

[illegible]

[illegible]

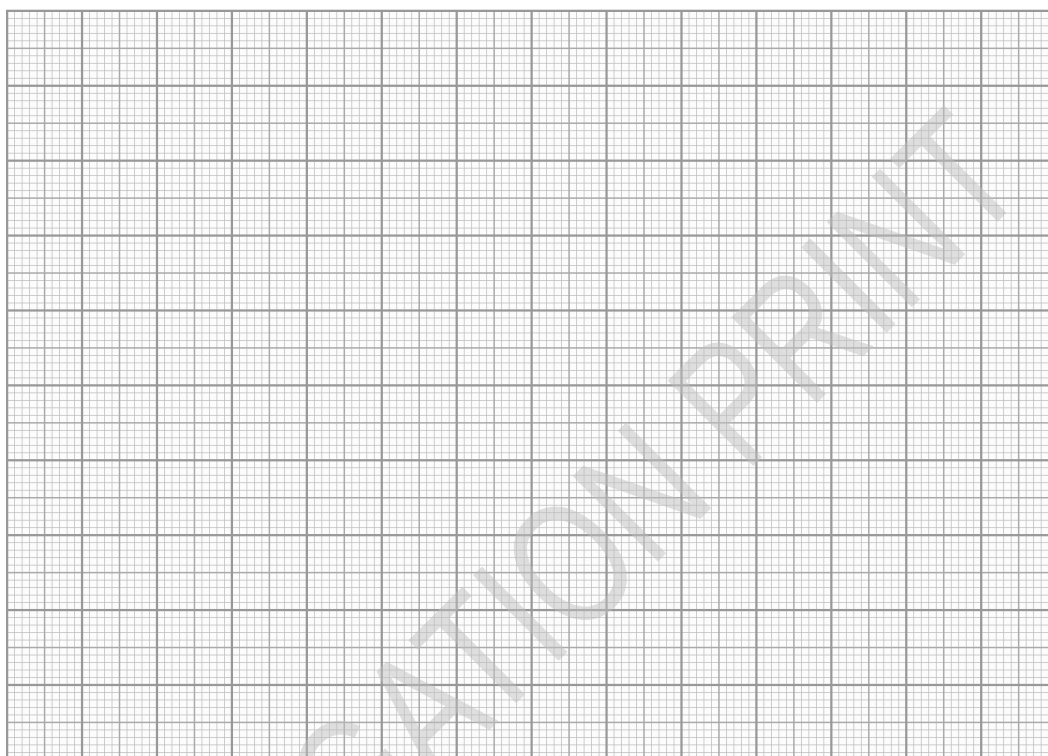
B.2 (1.0pt)



B.3 (0.2pt)

$\Delta\lambda_{\text{FWHM}} =$

B.4 (1.5pt)



Deel C. Analyse van de gemeten resultaten (3.0 punten)

C.1 (1.5pt)

$\lambda =$

$m =$

C.2 (1.5pt)

$L =$

DELEGATION PRINT