



**45e Internationale Natuurkunde Olympiade
Astana, Kazakhstan
Experimentele toets
Donderdag, 17 Juli 2014**

Lees dit eerst:

De toets duurt vijf uur en is **20 punten** waard.

Gebruik uitsluitend de ter beschikking gestelde pen. **Het is ten strengste verboden om iets met potlood te noteren of grafieken met potlood te tekenen. Alles dat met potlood is genoteerd of getekend wordt niet meegenomen in de beoordeling.**

Gebruik uitsluitend de ter beschikking gestelde rekenmachine. Bedenk dat alle getalsmatige antwoorden in het **juiste aantal** significante cijfers horen te zijn. Vergeet niet de eenheden te vermelden.

Gebruik de bijgeleverde **antwoordbladen** (answer sheets) voor je antwoorden.

Gedetailleerde berekeningen en oplossingsmethoden noteer je op de bijgeleverd werkbladen. Noteer alles wat je denkt dat nodig is voor het oplossen van de opgave en wat je beoordeeld wilt hebben. Gebruik van **alle bladen alleen de voorkant** en zorg dat je binnen het gemarkeerde gedeelte schrijft.

Gebruik zo **weinig mogelijk tekst** als mogelijk is en gebruik vooral vergelijkingen, figuren, getallen en grafieken.

Als je bij **antwoordbladen** met aangegeven grafiekgedeelte iets verkeerd doet, gebruik dan het verstrekte grafiekpapier.

Het is noodzakelijk dat je je **Student Code** in het daarvoor bestemde hokje bovenaan elk blad papier dat je gebruikt noteert. Verder moet je op de **werkbladen** die je gebruikt voor elke vraag het nummer van de opgave (**Problem No.**), het vraagnummer (**Task No.**), het opeenvolgende nummer van elk blad (**Page No.**) en het totale aantal werkbladen dat je hebt gebruikt en die je wilt nagekeken hebben voor elke vraag (**Total No. of Pages.**). Als je werkbladen gebruikt die je niet nagekeken wilt hebben, zet dan een groot kruis over het gehele blad en neem dat blad niet mee in je nummering.

As soon as you have finished, arrange all sheets in the following order:

- antwoordbladen;
- werkbladen in volgorde;
- grafiekpapier;
- werkbladen die niet nagekeken hoeven te worden;
- grafiekpapier dat niet nagekeken hoeft te worden;
- niet gebruikte werkbladen en grafiekpapier;
- de opgavenbladen.

Stop alle papieren in de bijgeleverde enveloppe en laat alles op je tafel achter. Je mag **geen enkel blad** meenemen.

Als je naar het toilet wilt, houd dan de blauwe kaart met "TOILET" erop omhoog
Heb je een ander probleem, houd dan de rode kaart met "HELP" omhoog.

Experiment. Het onzichtbare zien! (20 punten)

Introductie

Veel stoffen vertonen optisch anisotroop gedrag. Dat betekent dat de brekingsindex afhankelijk is van de voortplantingsrichting en de polarisatie van het licht. Het anisotrope gedrag kan zelfs worden waargenomen bij isotrope materialen als deze mechanisch worden belast, niet gelijkmatig worden verhit of worden blootgesteld aan externe elektrische velden. De voortplantingsrichting waarbij licht zich voortplant zonder dat dubbelbreking optreedt, wordt de optische as van het kristal genoemd.

We gebruiken in dit experiment een gangbare opstelling om het optisch anisotrope gedrag te bestuderen, zie Fig. 1.

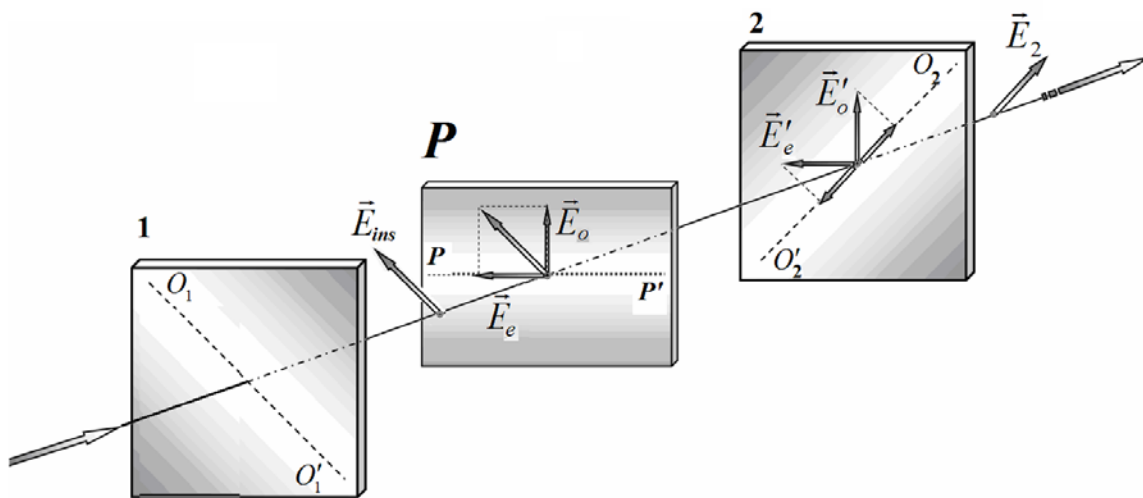


Fig. 1. Schema van de opstelling voor het bestuderen van optisch anisotroop gedrag.

Een lichtstraal valt op een polarisator 1. Het polarisatievlak snijdt het vlak van de polarisator 1 langs de rechte lijn $O_1O'_1$. Na het passeren van polarisator 1 is de lichtstraal lineair gepolariseerd en de vector van de elektrische veldsterkte \vec{E}_{ins} oscilleert in dit polarisatievlak van polarisator 1. De lichtstraal valt vervolgens op de anisotrope plaat P . Deze plaat P is zo geplaatst dat de optische as PP' , die in het vlak van de plaat P ligt en een hoek van 45° maakt met het polarisatievlak van polarisator 1.

Er worden nu twee soorten lichtgolven in plaat P gegenereerd. De 'gewone' (ordinary) \vec{E}_o , waarvan de polarisatie richting loodrecht staat op de optische as van de plaat en een 'buitengewone' (extraordinary) \vec{E}_e , waarvan de polarisatie richting evenwijdig is aan de optische as van de plaat P . De brekingsindices voor deze richtingen zijn verschillend. Dit verschil wordt aangegeven met $\Delta n = n_o - n_e$. Hierdoor ontstaat een faseverschil $\Delta\varphi = 2\pi h\Delta n/\lambda$ (h is de plaatdikte en λ is de golflengte van het invallende licht) tussen de twee uittredende golven.

Het gevolg hiervan is dat de uittredende lichtstraal elliptisch gepolariseerd is.

De lichtstraal valt vervolgens op polarisator 2. Het polarisatievlak $O_2O'_2$ van polarisator 2 staat loodrecht op het polarisatievlak van polarisator 1.

Er kan eenvoudig aangetoond worden dat de intensiteit van de doorgelaten lichtstraal, na plaat P en de polarisator 2 gepasseerd te zijn, wordt gegeven door:

$$I_2 = kI_0 \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2}, \quad (1)$$

hierin is I_0 de intensiteit van het invallende licht op de plaat, k is de transmissie coëfficiënt van de plaat en de polarisator 2, en $\Delta\varphi$ geeft het faseverschil aan tussen de 'gewone' en 'buitengewone' golven na het passeren van plaat P .

In dit experiment is geen foutenanalyse vereist, behalve als daar expliciet om gevraagd wordt.

De beschrijving van de apparatuur staat in Appendix A.

Deel 1. Kwalitatieve waarnemingen! (3,5 punten)

Deel 1.1. Polarisatoren (0,8 punten)

1.1	Bepaal de richting van de polarisatievlakken (d.w.z. welk van de diagonalen) van polarisator 1 en polarisator 2. Geef deze aan in de figuur op je antwoordblad (0,4 punten)
-----	---

Deel 1.2. Meetlatten (linialen) (1,0 punten)

Gebruik tijdens dit deel van het experiment de LED (Light Emitting Diode) als lichtbron.

Monteer de LED op het statief en sluit deze aan op de spanningsbron. Plaats de twee polarisatoren zodat hun voorzijde (aangegeven door de getallen 1 en 2) naar de lichtbron zijn gericht. Zorg ervoor dat de polarisatoren gekruist worden opgesteld, d.w.z. zodanig dat er geen lichtbundel doorheen kan. Scherm de eerste polarisator af door een stukje wit papier, door het te plaatsen op de voorzijde zoals getoond in Figuur 1B van Appendix B.

Monteer de plastic meetlat tussen de polarisatoren. Je kan de meetlat met je handen verplaatsen.

1.2.1	Bepaal de mogelijke richtingen van de optische as in het midden van de plastic meetlat. Geef deze richtingen aan in de figuur op het antwoordblad. (0,2 punten)
1.2.2	Bepaal bij benadering de afstand Δl_1 bij meetlat 1 alleen en de afstand Δl_2 bij de twee meetlatten tegen elkaar geklemd, waarover het faseverschil van blauw licht met 2π verschuift. (0,4 punten)

Deel 1.3. Strip (0,8 punten)

1.3.1	Bepaal de mogelijke richtingen van de optische as van de strip. Geef ze aan in de figuur op het antwoordblad. (0,3 punten)
-------	--

Bevestig de lange flexibele strip op het scherm met de knijpers, zodat de uiteinden van de strip samenvallen met de randen van het scherm. De strip is nu gebogen (zie Fig. 3B). Plaats het scherm met de strip tussen de polarisatoren. Merk op dat de kleur van de strip verandert wanneer je het scherm verschuift. De x -coördinaten van punten op de strip worden bepaald met de liniaal op het scherm. De linkerkant van het scherm is de oorsprong, zoals in Fig. 3B.

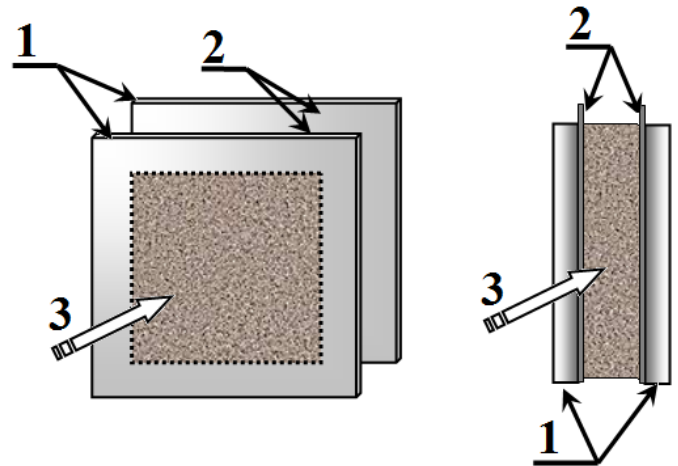
Vanaf nu worden coördinaten gemeten door gebruik te maken van de meetlat op het scherm.

1.3.2	Meet de coördinaten van het midden van de donkere banden die op de strip zichtbaar zijn. De linker positie is x_L en de rechter positie is x_R . (0,2 punten)
-------	---

Deel 1.4. Liquid crystal cel (0,9 punten)

Een vloeibaar kristal (Liquid Crystal) is een intermediaire toestand van de materie tussen een kristallijne vaste stof en een amorphe vloeistof. De oriëntatie van de kristallen kan gemakkelijk uitgelijnd en gecontroleerd worden door het aanleggen van een elektrisch veld. De vloeibare kristal cel (LCC) vertoont het optische anisotrope verschijnsel met de twee brekingsindices. De grootte van dit effect hangt af van de aangelegde wisselspanning.

De LCC is opgebouwd uit twee glazen plaatjes (1) die aan de binnenkant bekleed zijn met een transparante geleidende laag (2). Tussen de platen bevindt zich een dunne laag (ongeveer 10 μm dik) van een oplossing (3) die zich in de toestand van vloeibaar kristal bevindt. Aan de platen zijn snoertjes gesoldeerd die verbonden kunnen worden met de wisselspanningsbron.



Wanneer geen spanning wordt aangelegd, liggen de lange moleculen evenwijdig aan de platen. De optische as van het kristal valt samen met de richting van de moleculen.

Plaats de LCC tussen de polarisatoren. Sluit deze aan op de spanningsbron. Neem de verandering in kleur van het door de cel gestuurde licht waar, wanneer de aangelegde spanning over de LCC wordt gewijzigd.

1.4.1	Bepaal de mogelijke richtingen voor de optische as van de LCC als de spanning minimaal is (= 0 V) en als de spanning maximaal is. Geef deze richtingen weer op het antwoordblad. De Z-as staat verticaal.(0,2 punten)
1.4.2	Meet de spanning U_{cr} over de cel waarbij bij een kleine verandering van de spanning een abrupte verandering van de richting van de LCC moleculen optreedt. Zorg ervoor dat je de multimeter gebruikt in wisselspanningsmode (AC ~). (0,3 punten)

Deel 2. Meten! (16,5 punten)

Koppel de LED los van de voeding en verwijder de LED. Verwijder het witte stukje papier. Gebruik in dit deel van het experiment de laser als lichtbron. Zorg ervoor dat je de laser aangesloten hebt op de voeding!

Plaats de laser, polarisator 1, het scherm met de spleet en de fotodetector (fotodiode) in de daarvoor bestemde houders. Pas de opstelling zodanig aan dat de laserstraal door de polarisator gaat en precies op de fotodetector valt. Gebruik stelschroef 5c voor het aanpassen van de breedte van de laserstraal. Zorg ervoor dat de grootte van de lichtstip op de fotodetector 5 – 6 mm is.

De laser zendt lineair gepolariseerd licht uit. Met ring 5a is de polarisatierichting van de laser in te stellen. Zorg ervoor dat de laserstraal vrijwel volledig door de eerste polarisator gaat en dat de hoofdas van de elliptisch gevormde stip verticaal is. Fixeer vervolgens de oriëntatie van de laser en de fotodetector met behulp van de schroeven 5d en 15c. Plaats polarisator 2. Zorg er daarbij voor dat de polarisatoren ‘gekruist’ zijn. Fig. 4B geeft de gehele opstelling voor dit onderdeel weer.

Deel 2.1. Onderzoek aan de fotodetector (3,2 punten)

Om de lichtintensiteit te meten, gebruiken we de fotodetector. De spanning die de fotodetector afgeeft is een ingewikkelde functie van de invallende lichtintensiteit.

Om de lichtintensiteit te meten wordt de schakeling in Fig. 2 hiernaast gebruikt. De gelijkspanning die door de multimeter wordt gemeten is afhankelijk van de invallende lichtintensiteit en de weerstandswaarde van de weerstand R .

Het hoofddoel is het bepalen van de optimale weerstandswaarde van R waarbij de spanning over de weerstand R evenredig is met de intensiteit van het licht dat op de fotodetector valt.

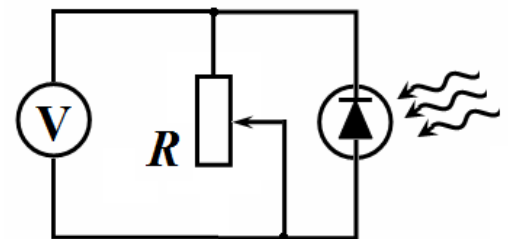


Fig. 2. Schakelschema voor het meten van de spanning van de fotodetector.

Voor metingen in dit onderdeel, verwijder de polarisator 2 en het scherm van de optische bank.

De filters die gebruikt worden om de intensiteit van de laserstraal te verzwakken moeten met behulp van knijpers aan de achterkant van polarisator 1 worden bevestigd. Zie Fig.5B in Appendix B.

De maximale waarden van de gemeten spanningen moet minimaal 300 mV zijn.

Met behulp van de multimeter kan zowel de weerstandswaarde van de weerstand als de spanning erover gemeten worden. (Uiteraard niet tegelijkertijd: de keuzeknop moet daarvoor telkens in de juiste stand worden gezet.)

Zet de schakelaar op de juiste plaats in de schakeling, zodanig dat met één multimeter zowel de spanning als de weerstandswaarde te meten zijn, zonder dat daarvoor het circuit moet worden aangepast. Met andere woorden: dat enkel door het aan- of uitzetten van de schakelaar en het instellen van de keuzeknop van de multimeter de gevraagde spanning en weerstandswaarde te meten zijn.

2.1.1	Teken het schakelschema met daarin de schakelaar, waarmee zowel de weerstandswaarde als de spanning te meten zijn op de hierboven aangegeven wijze. (0,2 punten)
2.1.2	Meet de spanning over de weerstand als functie van de weerstandswaarde voor twee waarden van de invallende lichtintensiteit: maximaal (met het aantal filters $n = 0$) en minimaal (met het aantal filters $n = 5$). Geef in één diagram beide meetseries weer. Geef het interval van de weerstandswaarden aan waarvoor de verandering in de spanningen maximaal is. (1,0 punten)

2.1.3	<p>Meet de spanning U over de weerstand als functie van het aantal filters $n = 0,1,2,3,4,5$. Deze filters verlagen de intensiteit van het licht dat op de fotodetector valt. De metingen moeten uitgevoerd worden bij drie vaste waarden van de weerstand R, bij ongeveer $R = 30\text{ k}\Omega$, $R = 20\text{ k}\Omega$ en $R = 10\text{ k}\Omega$.</p> <p>Geef in één enkel diagram de drie meetseries weer. Kies hierbij een schaal zodat het mogelijk is om te verifiëren of de spanning over de weerstand lineair afhankelijk is van de intensiteit van het invallende licht op de fotodetector.</p> <p>Kies van de drie hierboven genoemde waarden van de weerstand een optimale R_{opt}. Hiermee verricht je de verdere metingen van de lichtintensiteit. (1,0 punten)</p>
2.1.4	<p>Bepaal, door gebruik te maken van de data van onderdeel 2.1.3, de doorlaatbaarheid van een filter $\gamma = I_{tr}/I_{inc}$. Maak eveneens een schatting van de onnauwkeurigheid (fout) hierin. I_{tr} is de intensiteit van het doorgelaten licht en I_{inc} is de intensiteit van het invallende licht. Je kan, indien nodig, extra metingen uitvoeren. (1,0 punten)</p>

Alle volgende metingen moeten uitgevoerd worden met de in het vorige onderdeel bepaalde weerstandswaarde van de weerstand.

We nemen aan dat in het volgende de lichtintensiteit in relatieve eenheden gelijk is aan de spanning over de weerstand in mV.

Deel 2.2 Transmissie van licht door de meetlatten (5,4 punten)

Gebruik in dit deel de opstelling zoals weergegeven in Fig. 4B. Bevestig de meetlat met knijpers aan het scherm met een spleet (zie Fig. 2B). De onderkant van de meetlat moet samenvallen met de lijn die op het scherm is getekend en de schaal van de meetlat moet aan de bovenkant zitten.

2.2.1	<p>Meet de intensiteit van het doorgelaten licht (in mV) als functie van de coördinaat x die aangeeft waar de lichtstip de meetlat raakt in het gebied van 0 tot 10 cm. Metingen moet je voor elke meegeleverde meetlat doen en voor de twee meetlatten op elkaar gelegd. Meet in de drie gevallen het maximum van de spanning. Teken de bijbehorende grafieken in dezelfde figuur. (2,0 punten)</p>
2.2.2	<p>Bereken voor elk van de twee meetlatten de waarde van het faseverschil $\Delta\varphi$ tussen de gewone en de buitengewone golven in het gebied van x tussen 0 en 7 cm. Teken de bijbehorende grafieken $\Delta\varphi(x)$. Noteer de formule die je voor de berekeningen hebt gebruikt. (1,2 punten)</p> <p><i>Bedenk dat het faseverschil niet eenduidig uit formule (1) kan worden bepaald, je moet nog wat fysische aannames (veronderstellingen) doen om het faseverschil netjes (correct) te bepalen.</i></p>
2.2.3	<p>Neem aan dat $\Delta\varphi(x)$ lineair is voor beide meetlatten:</p> $\Delta\varphi_1 = a_1x + b_1,$ $\Delta\varphi_2 = a_2x + b_2,$ <p>Bereken de numerieke waarden van bovenstaande coëfficiënten voor de meetlatten 1 en 2. (1,0 punten)</p>
2.2.4	<p>Bereken, door gebruik te maken van de meetgegevens verkregen in 2.2.1-2.2.3, de theoretische waarden voor de intensiteit als het licht door beide meetlatten gaat als ze op elkaar gelegd zijn. Noteer de formule die je gebruikt voor de berekeningen.</p> <p>Teken de grafiek van deze theoretische afhankelijkheid in dezelfde figuur van deel 2.2.1. (1,2 punten)</p>

Deel 2.3 Liquid Crystal Cell (6,2 punten)

Transmissie van de LCC (4,5 punten)

Plaats de LCC tussen de polarisatoren zoals afgebeeld in figuur 6B.

De experimentele afhankelijkheid die je hier onderzoekt heeft gebieden met abrupte veranderingen. Houd hier rekening mee als je metingen doet.

Om de AC spanning van de spanningsbron en de DC spanning van de fotodetector te meten moet je de goede snoeren direct op de multimeter aansluiten.

2.3.1	Meet de intensiteit van het doorgelaten licht als functie van de spanning over de LCC. Teken de bijbehorende grafiek. (2,0 punten)
2.3.2	Bereken het faseverschil tussen de gewone en de buitengewone golven $\Delta\varphi_0$ als de spanningsbron niet is aangesloten op de LCC. (1,5 punten)
2.3.3	In een groot deel van de grafiek waarin de spanning over de LCC monotoon afneemt, geldt de volgende vergelijking: $\Delta\varphi = CU^\beta.$ waarbij $\Delta\varphi$ het faseverschil is tussen de 'gewone' en de 'buitengewone golven' en U de spanning over de LCC. Teken, met behulp van de verkregen gegevens, de grafiek die je in staat stelt om het gebied te bepalen waarin bovenstaande formule geldt en exponent β te bepalen. Bepaal het interval waarin de formule geldt en bepaal de numerieke waarde van de parameter β . (1,0 punt)

Deel 2.4 Transmissie van een gebogen strip (3,4 punten)

Bevestig de plastic strip zoals in deel 1.3 beschreven.

2.4.1	Meet de lichtintensiteit door het optische systeem als functie van de coördinaat x van de plaats waar de lichtstip door de strip heen gaat in het gebied ± 20 mm rondom het centrum van de strip. Teken de bijbehorende grafiek (1,2 punt)
2.4.2	Bereken het faseverschil tussen de gewone en de buitengewone golven $\Delta\varphi_0$ die door een niet gebogen strip gaan. Het is bekend dat $\Delta\varphi_0$ in het gebied tussen 10π en 12π ligt. (1,2 punten)

Vlakbij het midden van de strip kan de vorm benaderd worden door een cirkelboog met kromtestraal R . Theoretisch geldt voor de faseverandering $\Delta\varphi$ als functie van de afstand z ($z \ll R$) vanaf het midden van de strip:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 \left(1 + \frac{z^2}{2n^2R^2} \right),$$

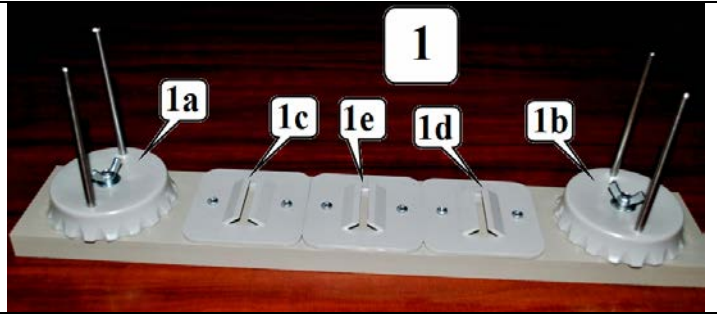
met $n = 1,4$ de brekingsindex van het materiaal van de strip.

2.4.3	Bereken de kromtestraal R van de strip vlakbij het midden, door gebruik te maken van de verkregen gegevens in de vorige onderdelen. (1,0 punten)
-------	--

Appendix A. Experimenteel materiaal

Optische bank 1 met houders:

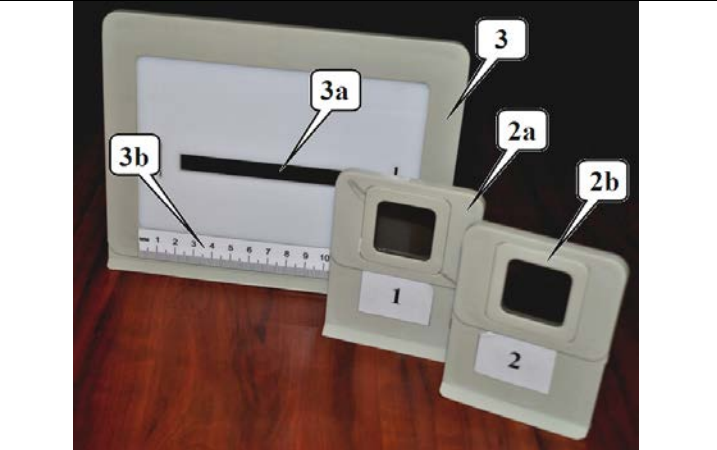
1a – statief voor de lichtbron met een schroef
1b – statief voor de lichtdetector met een schroef
1c, 1d – houders voor de polarisatoren
1e – houder voor het scherm en de liquid crystal cell (LCC)



2a, 2b – polarisatoren. De cijfers 1 en 2 staan aan de voorzijde.

De polarisatoren moeten zodanig geplaatst worden dat hun voorzijde naar de lichtbron toewijst!

De polarisatievlakken van de polarisatoren maken een hoek van 45° met de horizontaal.
3 – scherm met een spleet (3a) en een schaalverdeling (3b).



Lichtbronnen:

4 – LED (licht emitterende diode)

4a – plug voor de spanningsbron

4b – bevestigingsschroef

5 – laser

5a – schijf met schaalverdeling om de laser te roteren (verdeling wordt niet gebruikt)

5b – plug voor de spanningsbron

5c – draaiknop aan de voorkant voor het instellen van de breedte van de laserbundel.

5d – bevestigingsschroef

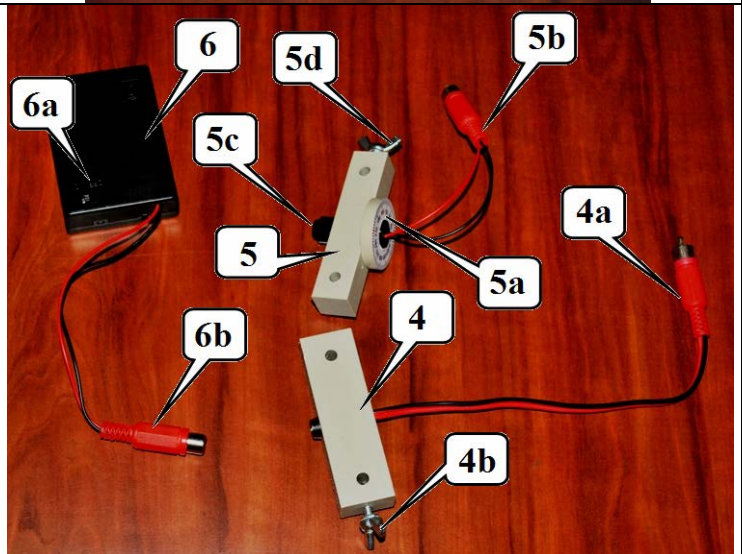
6 – spanningsbron voor de lichtbronnen

6a – schakelaar

6b – plug voor de spanningsbron

Schakel de lichtbron alleen aan bij het doen van metingen!

Zorg dat de laserbundel niet in je oog of in het oog van iemand anders schijnt, dit is erg gevaarlijk!



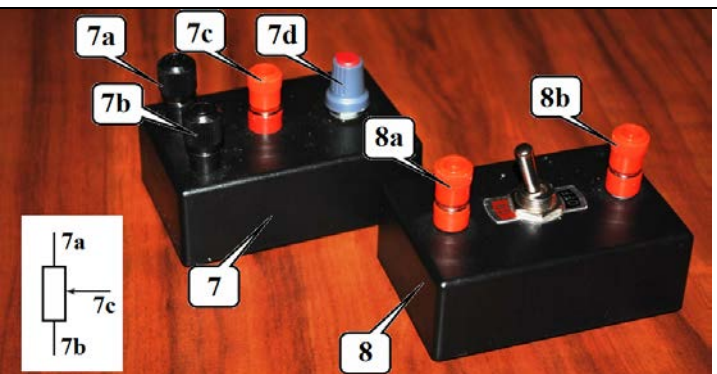
7 – variabele weerstand

7a, 7b, 7c – aansluitpunten voor het opnemen van de weerstand in een schakeling

7d – knop om de weerstand te variëren

8 – schakelaar

8a, 8b – aansluitpunten om de schakelaar in de schakeling op te nemen



9a – liquid crystal cell (LCC) 9a in houder (9b),
9c – plug om LCC aan te sluiten op de spanningsbron;

10 – spanningsbron voor LCC

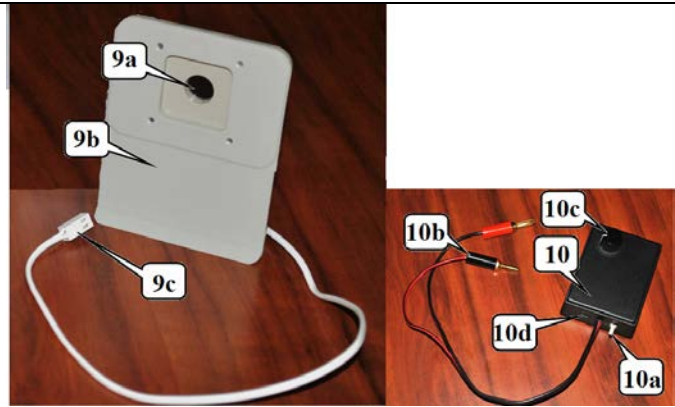
10a – ingang voor de LCC

10b – stekkers voor het meten van de uitgangsspanning

10c – knop om uitgangsspanning aan te passen

10d – aan/uit knop

Schakel de bron alleen aan bij het doen van metingen!



11 – multimeter

11a – stand keuzeknop om weerstand te meten (200 kΩ)

11b – stand keuzeknop om gelijkspanning te meten (2V)

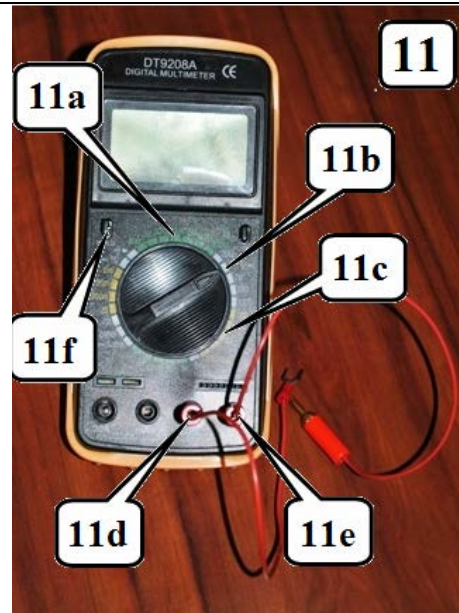
11c – stand keuzeknop om wisselspanning te meten (20V)

11d, 11e – aansluitpunten van de multimeter

11f – aan/uit knop

Als het scherm van de multimeter in “sleep” mode is, druk dan twee keer de aan en uit knop in!

Bij het meten van de weerstand met de multimeter, dient het element niet aangesloten te zijn aan een spanningsbron!



Te onderzoeken optische elementen

12 – plastic meetlatten (linialen)

12a – Nr.1 (met schaal van 0 tot 14 cm)

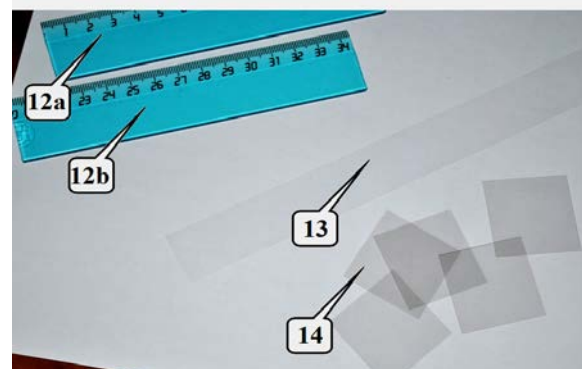
12b – Nr.2 (met schaal van 20 tot 34 cm)

13 – flexibele strip

14 – een aantal identieke filters

De filters en strip zitten in een aparte envelop!

De plastic meetlatten (linialen) en de strip vertonen dubbelbreking gedrag, hun optische assen liggen in hun eigen vlak.

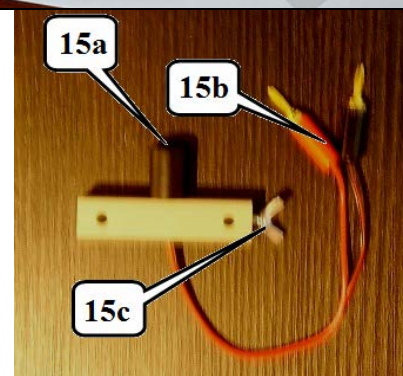


15 Fotodetector (fotodiode)

15a – opening van de detector (detector venster)

15b – stekkers voor het meten van de uitgangsspanning

15c – bevestigingsschroef



Aansluitkabels, knijpers, een papieren zakdoekje en een stuk papier.

Raak de optische onderdelen waar het licht doorheen gaat niet aan. Indien nodig, gebruik een zakdoekje om het voorzichtig schoon te vegen.

Appendix B. Foto's van de experimentele opstellingen.



Fig. 1B Meetopstelling voor het waarnemen van dubbelbreking in de meetlat (liniaal).



Fig. 2B Meetlat (liniaal) gemonteerd op het scherm.



Fig. 3B Monteren van de flexibele plastic strip op het scherm.



Fig. 4B Opstelling voor het meten van de transmissie van licht door de plastic meetlat (liniaal).

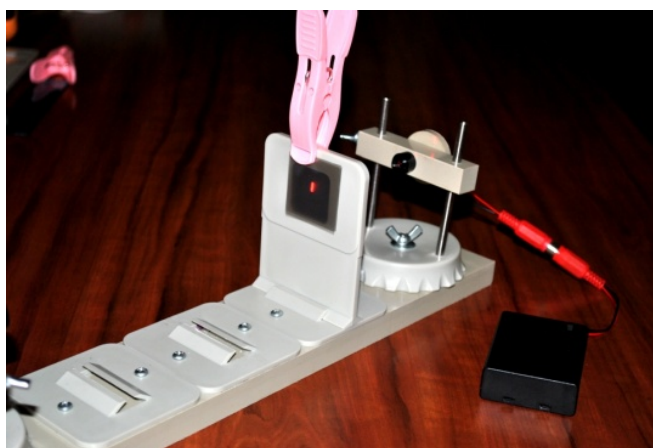


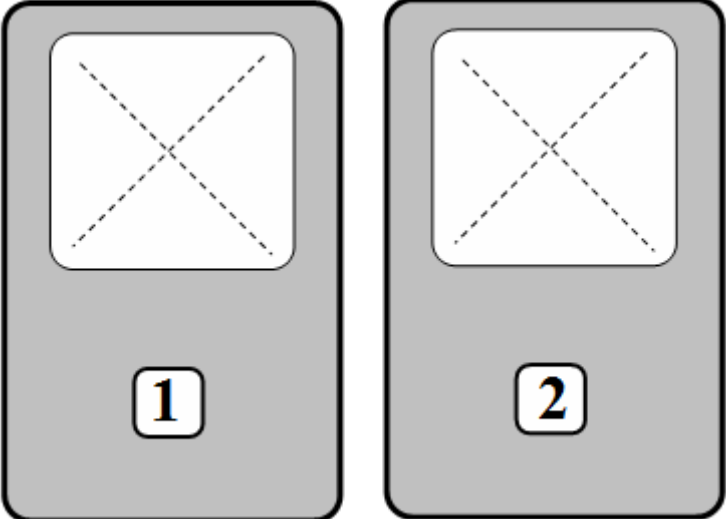
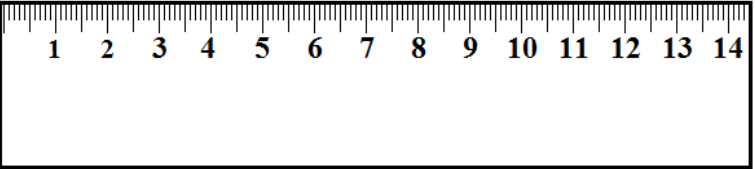

Fig. 5B Filters gemonteerd op de polarisator.

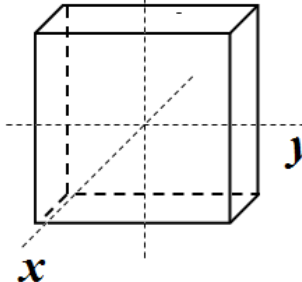
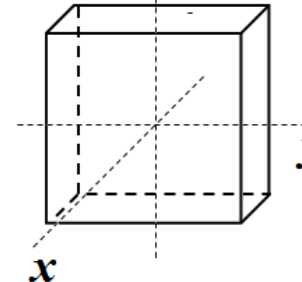


Fig. 6B Opstelling voor het opmeten van de LCC karakteristieken.

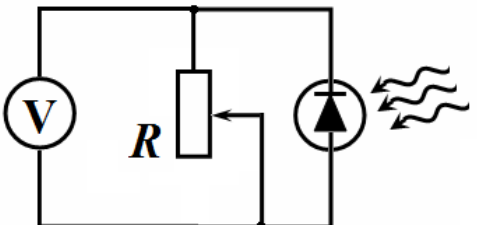
Het serienummer van je apparatuur (op de grote doos)

Deel 1.

1.1	Oriëntatie van het polarisatievlak		
1.2.1	Mogelijke richtingen van de optische as van de plastic meetlatten		
1.2.2		$\Delta l_1 =$ $\Delta l_\Sigma =$	
1.3.1	Mogelijke richtingen van de optische as van de strip		
1.3.2	Coördinaten van het midden van de donkere banden	$x_L =$ $x_R =$	

1.4.1	Mogelijke richtingen van de optische as van de LCC	$U = 0$  $U = U_{\max}$ 	
1.4.2		$U_{cr} =$	

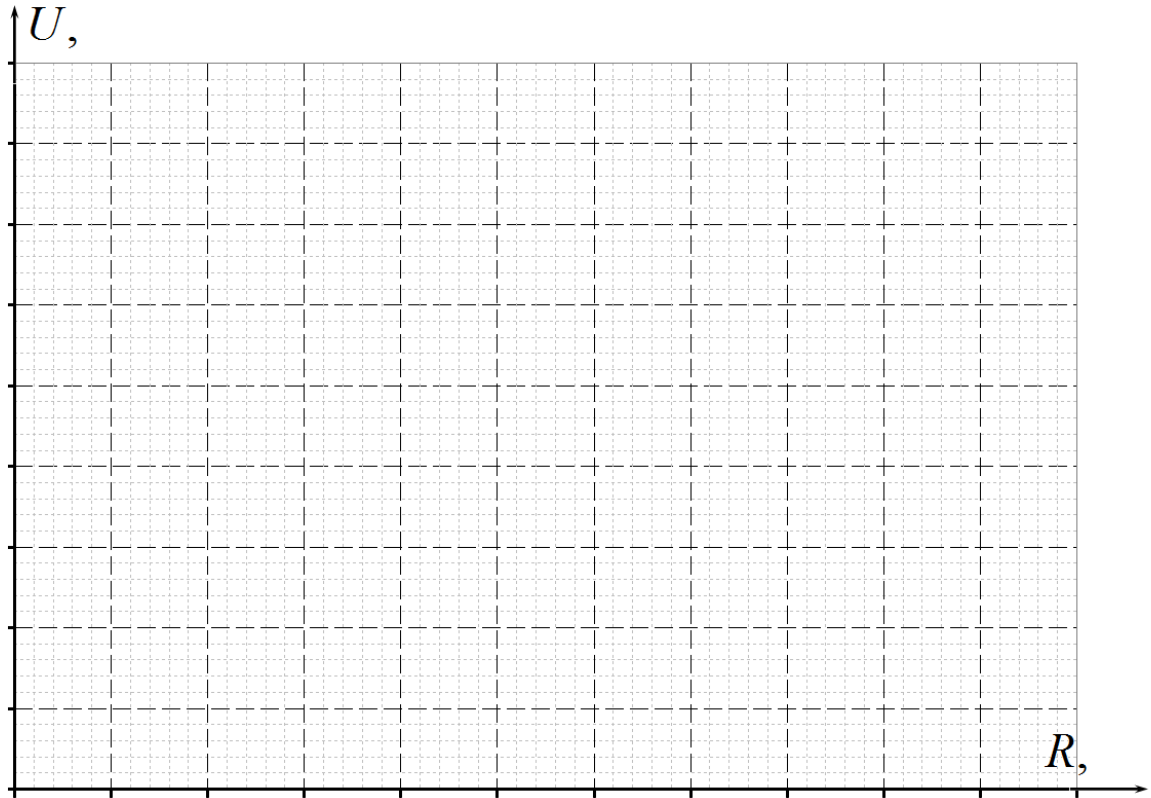
Deel 2.1

2.1.1	Teken de schakelaar in het schakelschema	
-------	--	--

2.1.2 Spanning als functie van de weerstand

	$n = 0$		$n = 5$	
	$R,$	$U,$	$R,$	$U,$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

2.1.2 Spanning over de weerstand als functie van zijn weerstandswaarde

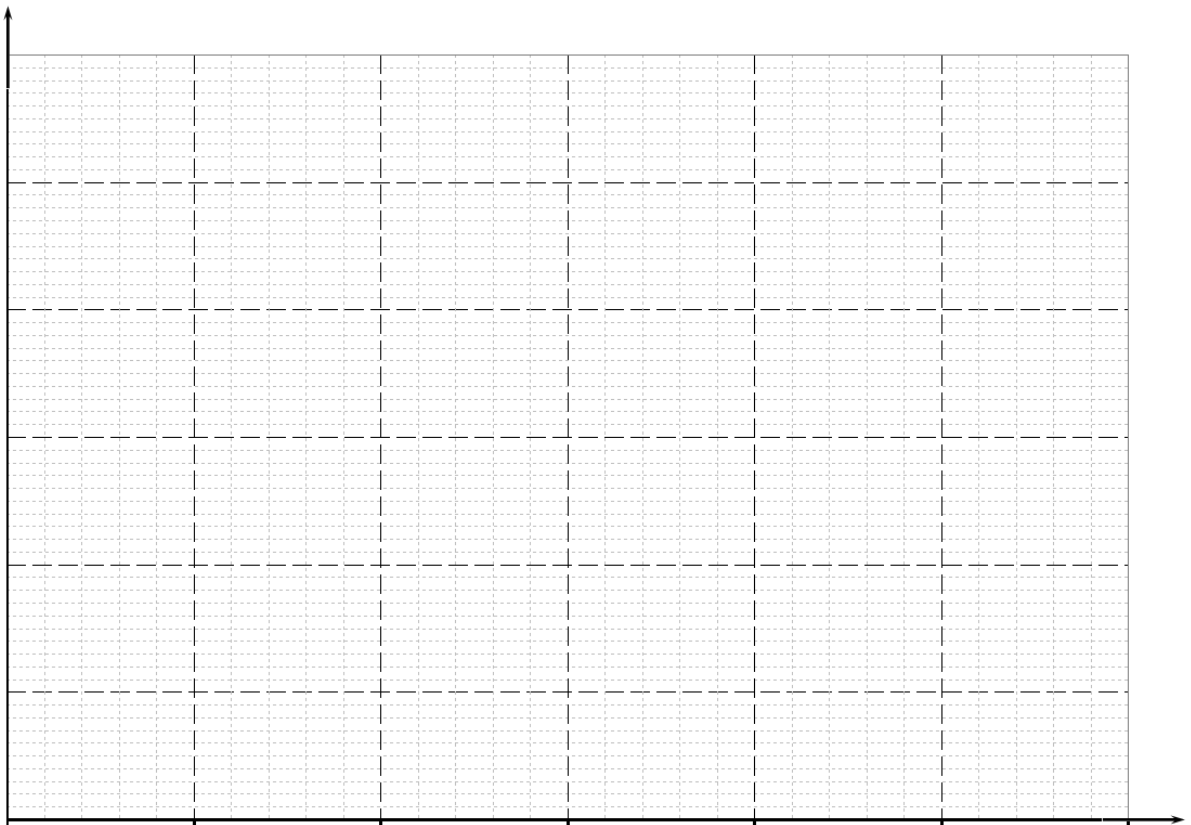


Het gebied van de weerstandswaarde waarbinnen de lichtintensiteit gemeten moet worden:

$$R = (\quad - \quad)$$

2.1.3 De spanning als functie van het aantal filters

n	$R =$		$R =$		$R =$	
	$U,$		$U,$		$U,$	
0						
1						
2						
3						
4						
5						



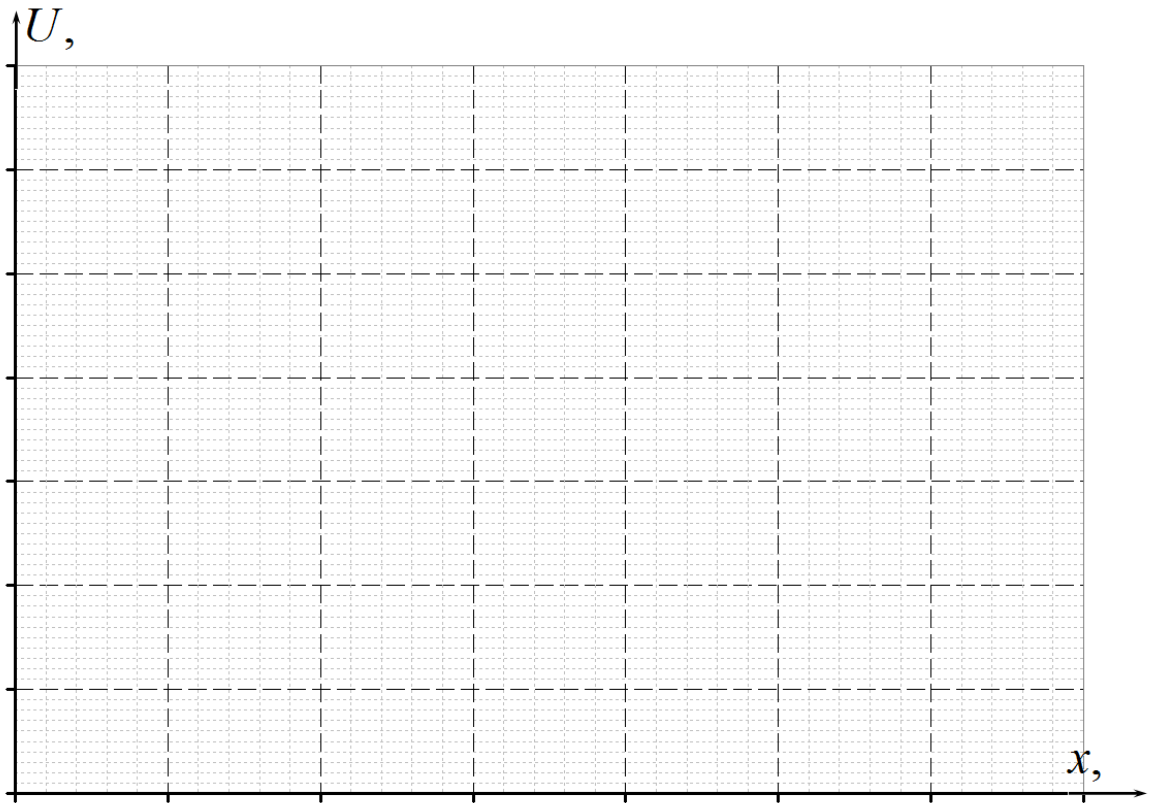
2.1.3 De optimale waarde van de weerstand voor het vervolg van de metingen

$$R_{opt} =$$

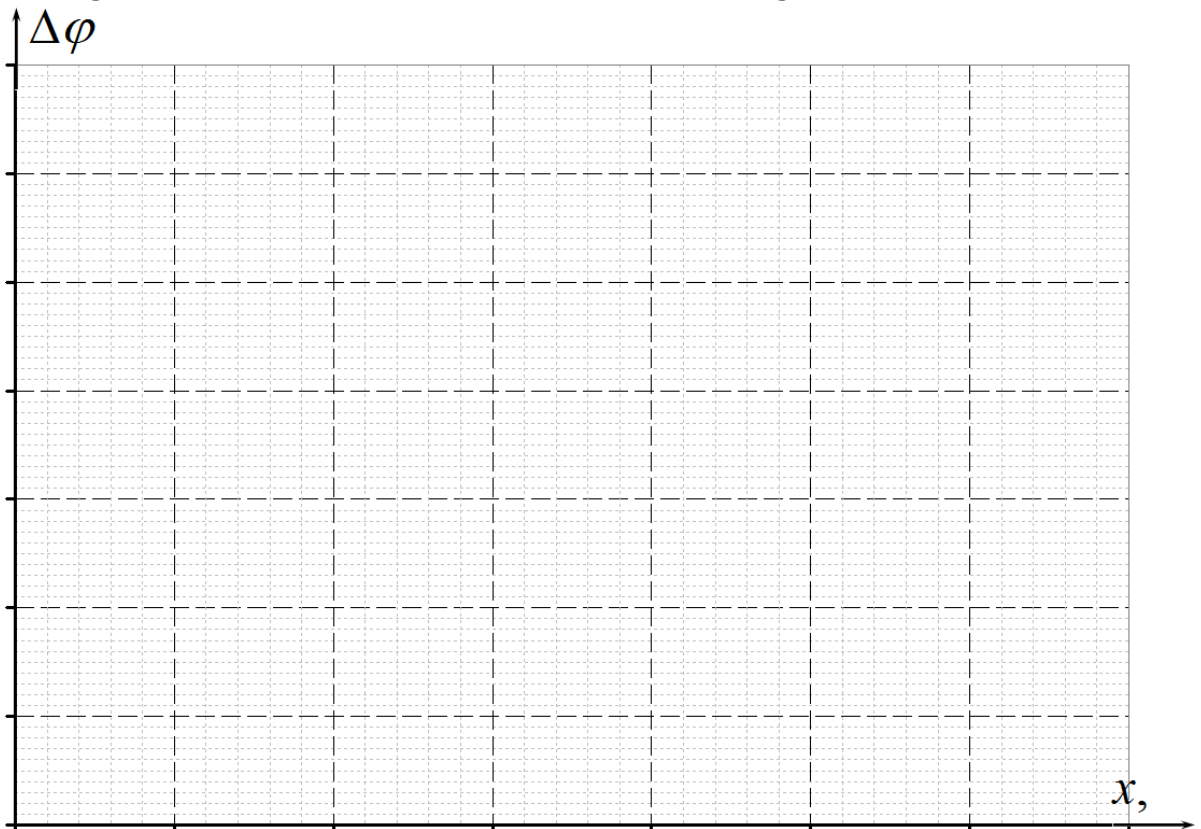
2.1.4 De doorlaatbaarheid van het filter

$$\gamma =$$

2.2.1 De grafiek voor de intensiteit van het doorgelaten licht als functie van de coördinaat x



2.2.2 De grafieken voor de waarden van de faseverschuiving als functie van x .



De formule die je hebt gebruikt voor de berekeningen:

2.2.3 Numerieke waarden van de coëfficiënten $(\Delta\varphi)_{1,2} = a_{1,2}x + b_{1,2}$

Meetlat #1

$$a_1 = \qquad b_1 =$$

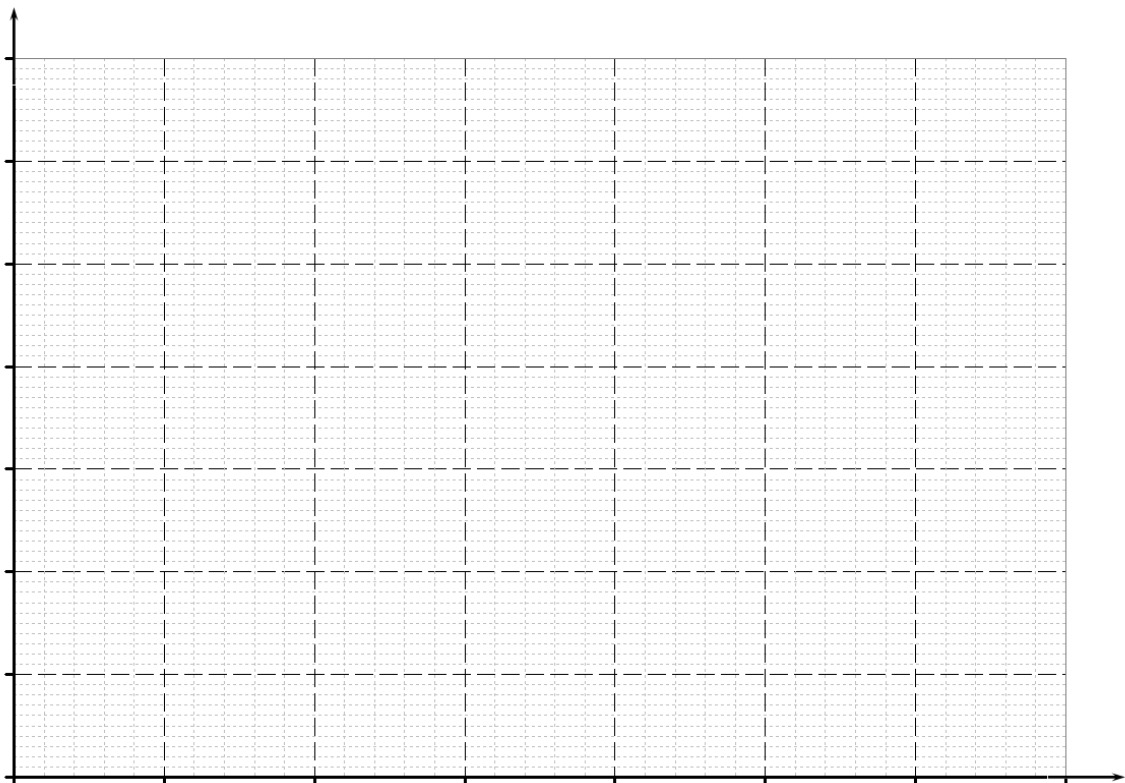
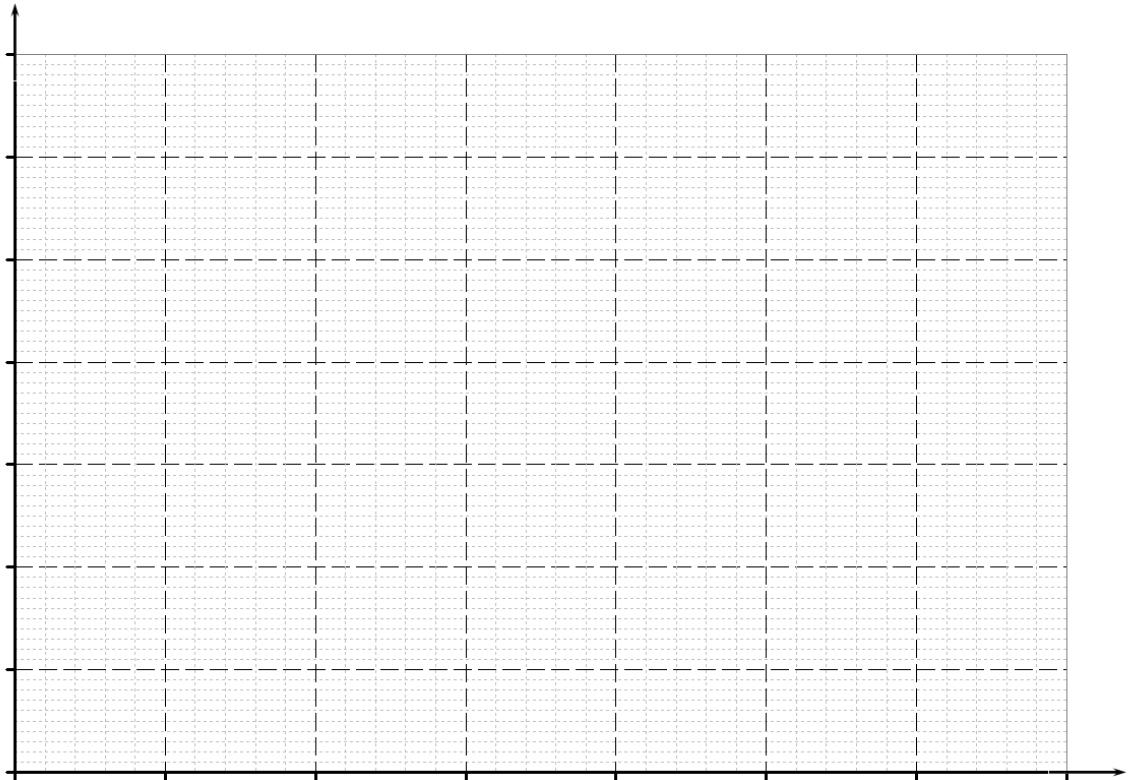
Meetlat #2

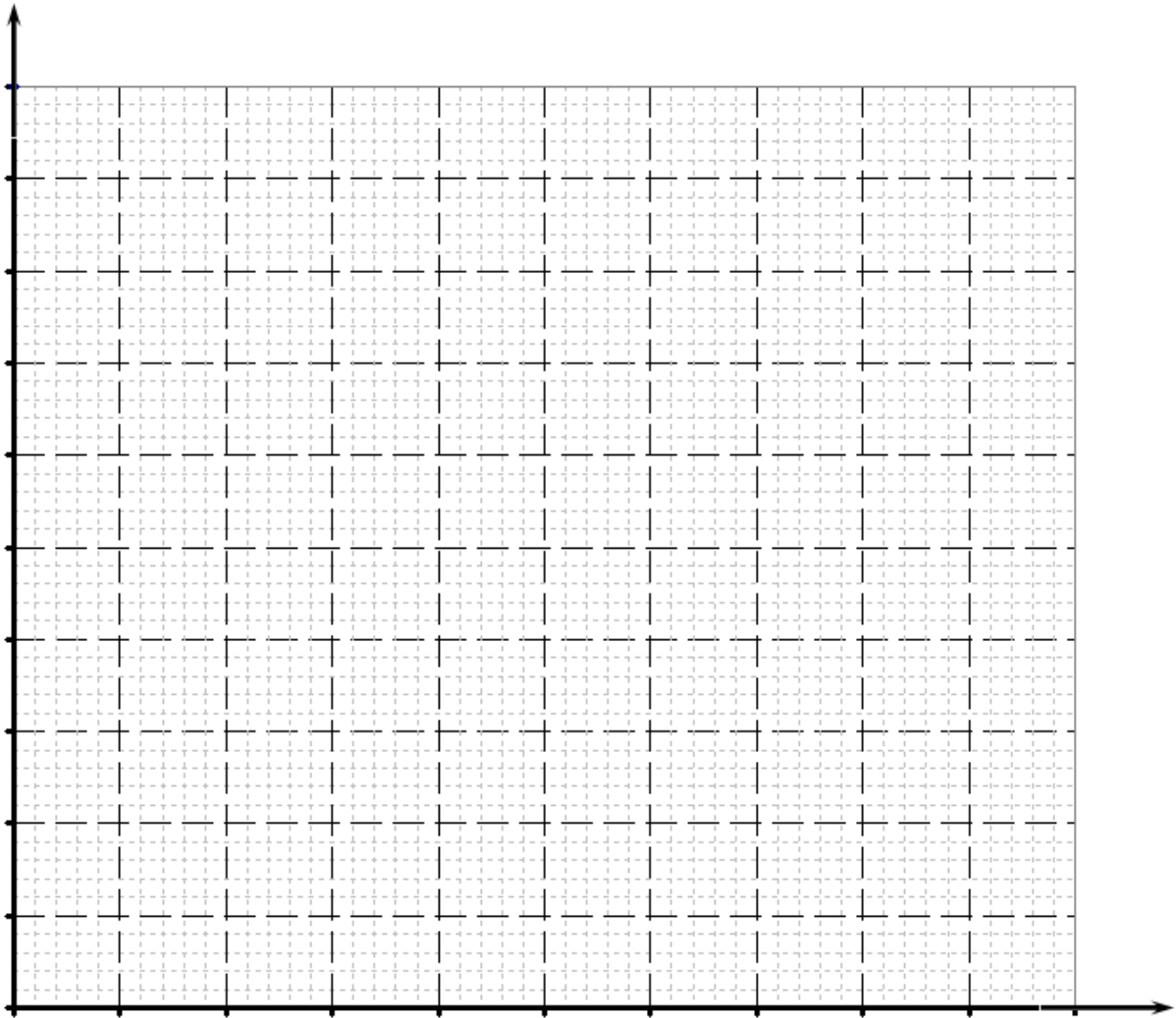
$$a_2 = \qquad b_2 =$$

2.2.4 De door jou gebruikte formule

$$U =$$

2.3.1. De grafiek van de intensiteit als functie van de spanning.





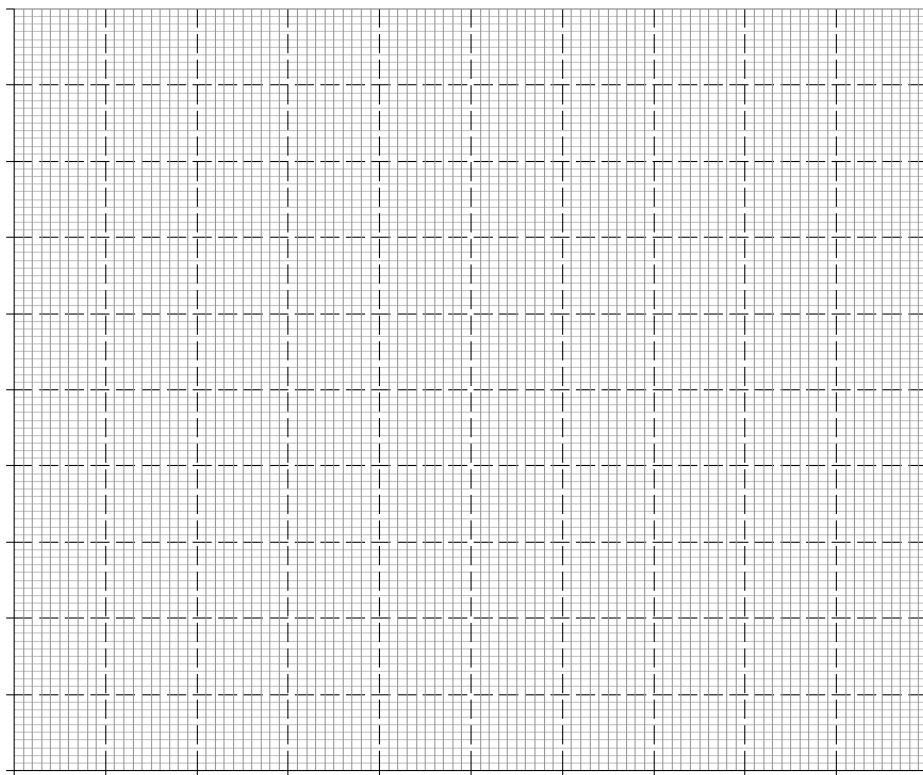
Numerieke waarde

$$\beta =$$

Deel 2.4 Lichtdoorlaatbaarheid van een gebogen strip

2.4.1 Lichtintensiteit van het doorgelaten licht als functie van coördinaat z van de lichtstip en de faseverschillen.

2.4.1 De grafiek voor de hierbovengemelde functie.



2.4.2

$\Delta\varphi_0 =$

2.4.4 Kromtestraal van de curve

$R =$