

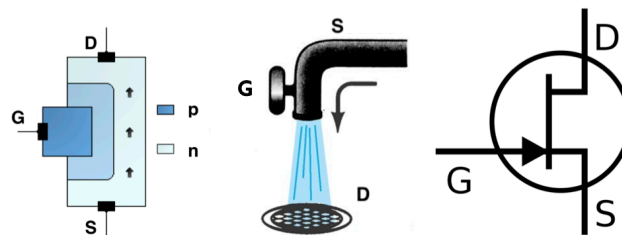
Papieren transistor (10 punten)

Elektronica-technologie in de moderne maatschappij is gebaseerd op een eenvoudige maar krachtige uitvinding: de transistor, die als een schakelaar gebruik kan worden en als een versterker. De schakelaar mode wordt gebruikt om digitale informatie op te slaan en te verwerken.

Hier zullen we twee typen van Field Effect Transistors (FETs) analyseren: JFET (Junction Field Effect Transistor) en de TFT (Thin Film Transistor).

We zullen hier kort uitleggen hoe een FET werkt.

Een FET is een niet-lineaire elektrische component met 3-aansluitpunten (de aansluitpunten worden Gate: G; Source: S; en Drain: D genoemd) die de stroom tussen Source en Drain kan controleren door de spanning over de Gate te variëren. In een eenvoudige, maar niet perfecte analogie, werkt een FET op dezelfde manier als een waterkraan, waarbij de draaiknop werkt als de Gate die de waterstroom regelt.



Figuur 1. Schema van een n-kanaal JFET (links), de hydraulische analogie (midden) en het symbool in een elektrische schakeling (rechts). De pijlen in het JFET-schema geven de elektrische stroom tussen Source (S) en Drain (D) door het smalle n-kanaal. De breedte van het kanaal hangt af van de gebruikte spanning tussen de Gate (G) en de Source (S).

De Junction-FET (JFET) is gebaseerd op de junctie tussen twee types halfgeleider materiaal, zoals p en n gedopeerd Silicium, vandaar zijn naam. Een JFET heeft een smal kanaal waardoor de stroom loopt tussen Source en Drain, en in een n-kanaal FET bestaat dit kanaal uit n-type materiaal. De breedte van zo'n kanaal kan heel precies gecontroleerd worden door een negatieve spanning tussen Gate en Source, $V_{GS} = V_G - V_S$ op te leggen. Voor een vaste V_{GS} , hangt de stroom tussen Source en Drain niet-lineair af van de spanning tussen Drain en Source, $V_{DS} = V_D - V_S$. Voor kleine V_{DS} spanningen echter, hangt de stroom lineair af van de spanning, dus vertoont de JFET een ohms gedrag. De outputweerstand $R_{DS} = V_{DS}/I_{DS}$, echter, hangt sterk af van de opgelegde V_{GS} spanning en volgt de volgende wet vrij goed:

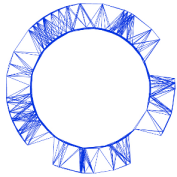
$$R_{DS} = \frac{R_{DS}^0}{1 - V_{GS}/V_P}, \quad (1)$$

waarbij R_{DS}^0 de outputweerstand bij $V_{GS} = 0$ is en $V_P < 0$ is een JFET parameter genoemd de *pinch-off voltage*. Blijkbaar, blokkeert de FET de stroom bij de pinch-off voltage.

Voor elke vaste $V_{GS} > V_P$, zal de stroom tussen Source en Drain beginnen afwijken van het lineair gedrag als we V_{DS} laten toenemen, en zal bij een bepaald punt verzadigd raken bij een bijna constante waarde. Stel dat I_{DSS} de verzadigingsstroomsterkte is bij $V_{GS} = 0$. In het verzadigingsgebied (grote opgelegde V_{DS}), zal de verzadigingsstroomsterkte afhangen van V_{GS} op de volgende manier:

$$I_{DS} = I_{DSS} (1 - V_{GS}/V_P)^2. \quad (2)$$

We moeten twee zeer belangrijke eigenschappen van een JFET benadrukken. Hoewel zijn door spanning gecontroleerde outputweerstand heel laag kan zijn, is de inputweerstand ($R_{GS} = V_{GS}/I_{GS}$) extreem hoog,

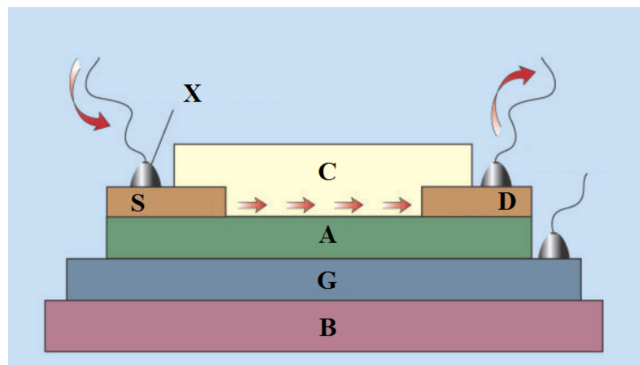


typisch groter dan $10^9 \Omega$, zodat deze component heel weinig inputstroom gebruikt. Dus, de capaciteit van een kleine JFET is vrij laag waardoor het een zeer snelle component is die kan openen en sluiten met frequenties groter het MHz bereik.

We gaan nu beschrijven hoe een andere type van FET, de TFT, werkt.

Zoals elke andere FET, kan een TFT de stroom regelen tussen twee contact punten, de Drain en Source elektroden, door middel van een opgelegde potentiaal bij de derde elektrode, de Gate.

De Gate-elektrode is fysisch gescheiden van de halfgeleiderlaag door een diëlektricum dat toelaat een verticaal elektrisch veld aan te leggen, dat de vrije ladingsdrager in de halfgeleider zal controleren (field effect). De diëlektricumlaag kan verplaatst worden door een electrolytisch membraan zoals papier waarin beweeglijke ionen aanwezig zijn (zie Figuur 2) en in dit geval zal de opgelegde spanning aan de Gate de ionen met tegengestelde lading duwen naar de halfgeleider interface, waarbij een laag ionische ladingen gecreëerd wordt die de vrije ladingendichtheid aanwezig in de halfgeleider zal moduleren (Electrolyte Gated Transistors - EGT's). Onderzoekers aan de Universidade Nova, Lissabon, waren pioniers in het ontwikkelen van de papieren transistor in 2008 en zijn wereldleiders in dit gebied.



Figuur 2. Schema van de papieren dunne film transistor (thin film transistor TFT) die moet gebruikt worden bij deze opgave. S - Source; D - Drain; G - Gate; A - papier (diëlektricum); B - substraat; C - halfgeleiderlaag (Gallium-Indium-Zinkoxide (GIZO)); X - metalen contactpunten. De pijlen geven de stroom aan.

Zoals JFET's, kunnen TFT transistoren functioneren in twee fundamentele operation modes, een lineaire en een verzadigingsmode. In tegenstelling met JFET is de intrinsieke capaciteit van een TFT een relevante parameter voor de prestatie van de component.

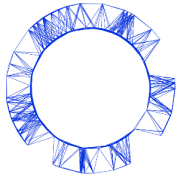
In dit experiment zal je onderzoeken hoe een n-kanaal JFET en een papieren TFT werkt.

Je zal de Characteristic Curves (CC's) bepalen van deze componenten door de stroomsterkte te meten tussen S en D (I_{DS}) door verschillende spanningen aan te leggen aan G (V_{GS}) en D (V_{DS}).

De twee belangrijkste CC's zijn de output en transfer curves:

- **Output Curve:** Voor deze curve zal de stroom tussen Source en Drain (I_{DS}) gemeten en getekend worden als functie van de spanning tussen Source en Drain (V_{DS}), met V_{DS} in stappen opgevoerd van 0 V tot +3 V, terwijl V_{GS} constant gehouden wordt.
- **Transfer Curve:** Voor deze curve zal I_{DS} gemeten en getekend worden als functie van V_{GS} . V_{DS} wordt constant gehouden bij een geschikte waarde voor de transistor om te werken in de verzadigingsmode en V_{GS} zal in stappen opgevoerd worden van -3 tot 0 V.

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

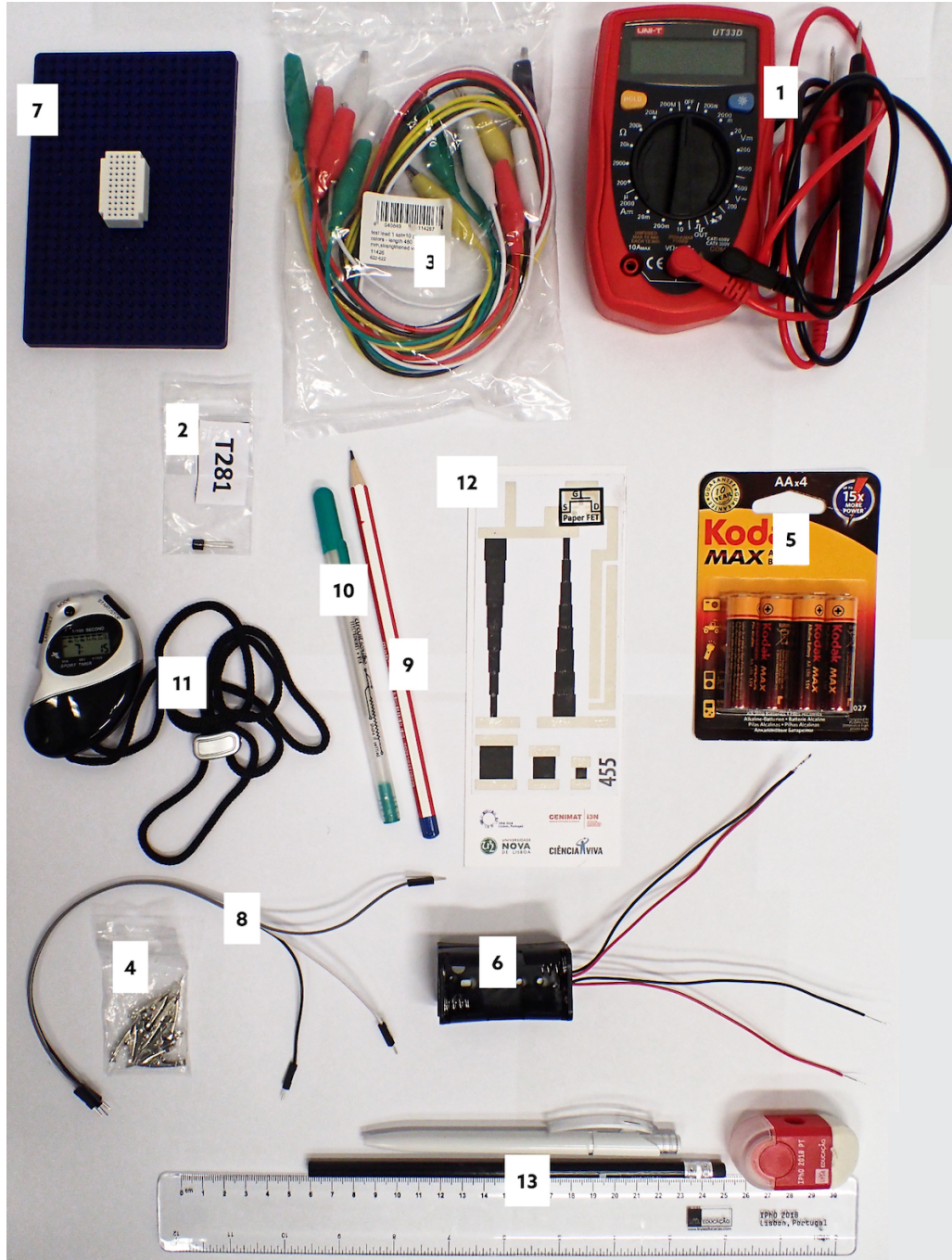
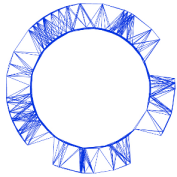
Q1-3

NLD (Netherlands)

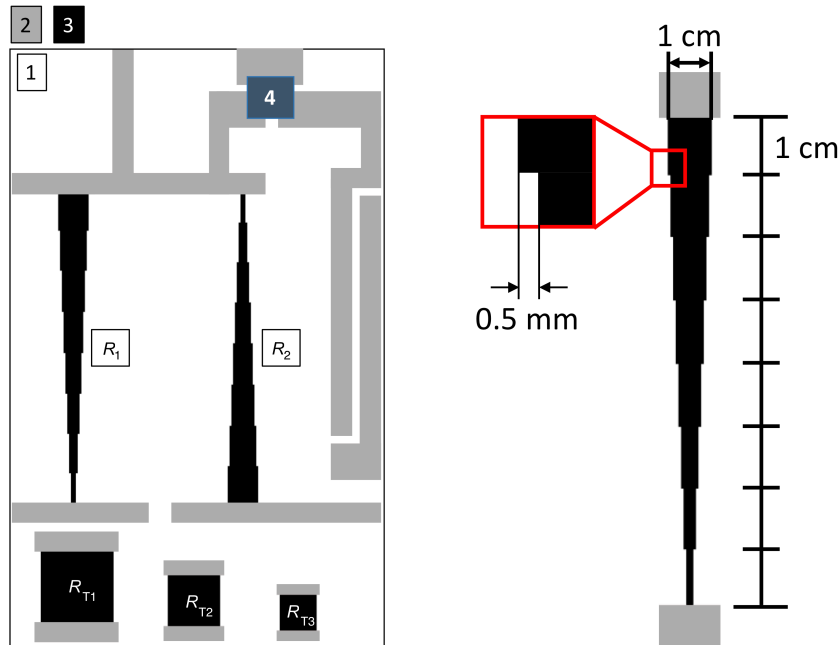
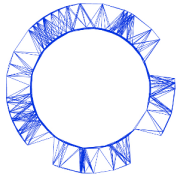
Apparatuur

De volgende apparatuur (figuur 3) is beschikbaar voor dit experiment:

1. multimeter
2. JFET transistor (in een plastic zakje voorzien van een label)
3. kabels (10) met krokodillenklemmen
4. platte krokodillenklemmen (4, in een plastic zakje)
5. batterijen (4×1.5 V)
6. batterij houder
7. mini-breadboard op een houder
8. dunne draden (3) om verbindingen te maken met de mini-breadboard
9. HB potlood
10. geleidende zilverinkt pen (Circuit Scribe)
11. stopwatch
12. blad papier met geprinte schakelingen en een ingebedde TFT met papier als diëlektrische laag (Figuur 4)
13. zak met schrijfgerij (1 pen, 1 potlood, 1 gom/potloodslijper, 1 meetlat/liniaal)



Figuur 3. Apparatuur

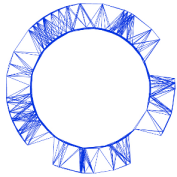


Figuur 4. Links: Blad met beschikbare geprinte schakelingen: papier (1), zilveren geleidende stroken (2), stroken met koolstofweerstand (3), papieren transistor (4), weerstanden om de spanning te verdelen (R_1 en R_2). Rechts: Fysische eigenschappen van de spanningverdelende weerstanden (de stappen van 0.5 mm zijn constant voor elk segment).

Belangrijke waarschuwing:

Vouw het blad papier met de geprinte schakelingen en ingebedde transistor **niet** omdat dit gemakkelijk beschadigd kan worden. Probeer het blad zo vlak mogelijk te houden tijdens de metingen om de best mogelijke resultaten te bekomen.

Voor de metingen is het belangrijk de volgende **belangrijke informatie** in rekening te brengen:



- De multimeter moet altijd in de **DC-stand** staan.
- De multimeter neemt niet vanzelf het juiste bereik aan. Je moet zorgvuldig het meest geschikte bereik kiezen voor je metingen. Bij "overflow" toont het scherm "1" of "-1" (links op het scherm), voor respectievelijk positieve en negatieve waarden en moet je een ander bereik instellen.
- De lage-stroombereiken zijn beveiligd door een 315 mA-zekering. **Vermijd in ieder geval kortsluiting** tussen de batterij en de multimeter want een grote stroom zal dezekering doen doorbranden!
- Bij gebruik in de voltmeter stand is de inwendige weerstand van de multimeter gelijk aan, is $10\text{ M}\Omega$.
- Indien gebruikt als ampèremeter, hangt de inwendige weerstand van de multimeter af van het bereik zoals getoond in de volgende tabel:

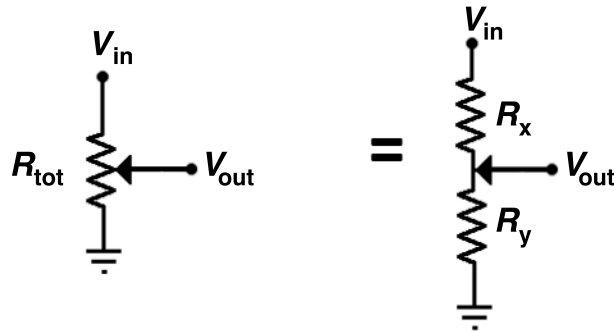
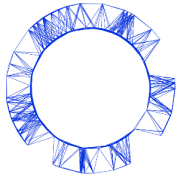
Range Bereik	R_{int}/Ω
200 mA	1.0
20 mA	10
2 mA	100

Tabel 1. Inwendige weerstand van de gegeven multimeter indien gebruikt als ampèremeter.

Dus, wanneer de multimeter gebruikt wordt in DC ampèremeterstand, zal er een 200 mV potentiaalverschil zijn tussen zijn aansluitpunten bij volledige schaal wanneer gebruikt in gelijk welke van de 3 beschikbare DC-bereiken.

Deel A. Dimensionering van de schakeling (2.5 punten)

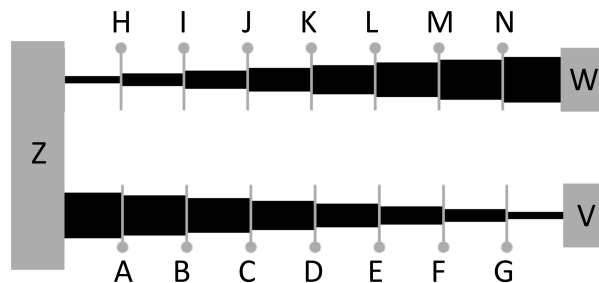
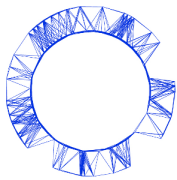
Om de noodzakelijke spanningen V_{DS} en V_{GS} te verkrijgen gebruik je twee koolstof weerstanden die geprint zijn op papier (R_1 en R_2 , zie figuur 4) en spanningsdelers om de schakeling voor de juiste spanningen te dimensioneren. R_1 en R_2 worden de totale weerstand (R_{tot}) van een spanningsdeler schakeling. Als je een constante spanning gebruikt (hier ongeveer 3 V van de batterij) over R_1 bijvoorbeeld, zien we een spanningsval van 3 V (V_{in} , de positieve pool van de batterij) naar nul (0 V). Vanaf nu noemen we het gezamenlijke contact van de twee batterijvakken de nul. R_{tot} kan verdeeld worden in essentie twee weerstanden (R_x en R_y) om de gewenste V_{out} te krijgen (figuur 5).



Figuur 5. Spanningsdeler schakeling.

- | | | |
|------------|---|-------|
| A.1 | Noteer de uitdrukking voor de output spanning V_{out} , als functie van V_{in} en de weerstanden R_x en R_y . | 0.2pt |
| A.2 | Meet de weerstand van de drie testweerstand onderaan het vel (R_{T1} , R_{T2} en R_{T3}) met de multimeter. Doe voldoende metingen op verschillende plaatsen van de zilveren contacten. Noteer de waarden op het antwoordblad. Bereken de gemiddelde waarde en schat de onzekerheid van de weerstandswaarde van elke testweerstand. | 0.5pt |
| A.3 | Toon aan dat de weerstandswaarde van een dunne vierkante film met een bepaald weerstandsvermogen ρ , onafhankelijk zou moeten zijn van zijn lengte. Deze grootte-onafhankelijke weerstand wordt sheet resistance genoemd en aangegeven met $R_{\square}$. | 0.3pt |
| A.4 | Bereken de gemiddelde waarde van de sheet resistance van de koolstoffilm met de data in A.2 En bepaal het weerstandsvermogen ρ van de koolstoffilm met een schatting van de onzekerheid (ga uit van een dikte t van de koolstoffilm van $20 \pm 1 \mu\text{m}$). | 0.4pt |
| A.5 | Toon aan dat voor de theoretische waarde van de weerstanden R_1 en R_2 geldt: $R_1 = R_2 = \kappa R_{\square}$, $\kappa \sim 14.2897$ Meet R_1 en R_2 en noteer de waarden op het antwoordblad. Bepaal de experimentele waarde van κ en vergelijk deze met de theoretische waarde. | 0.5pt |

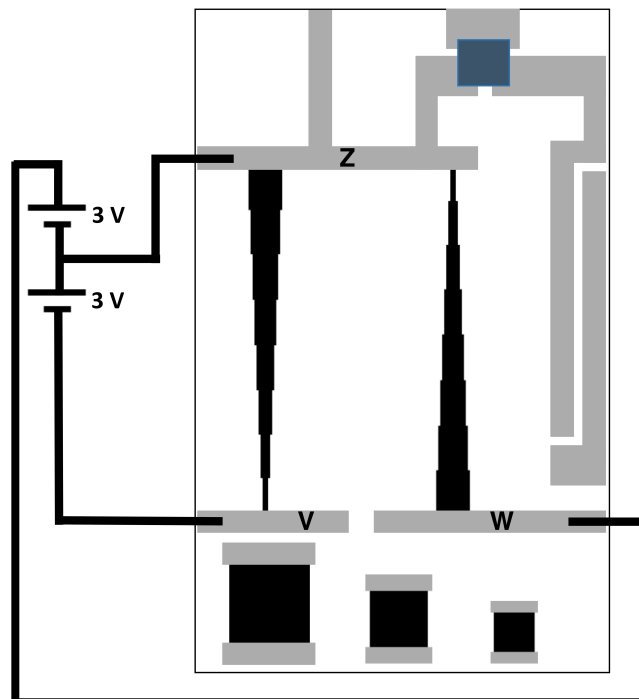
Gebruik de zilveren inkt pen om zeven equidistante lijnen bij elk van de gegeven weerstanden (zoals weergegeven in figuur 6) te tekenen. Deze lijnen zullen elk als contactpunt fungeren voor de spanningsdelers.



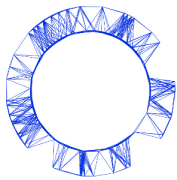
Figuur 6. Voorbeeld voor hoe de lijnen getrokken moeten worden en ook benoemd met letters voor verder gebruik.

- A.6** Meet de weerstanden R_x en R_y voor alle contactpunten. R_x is gedefinieerd als de weerstand tussen het contactpunt en de punten V (weerstand 1) of W (weerstand 2), en R_y is gedefinieerd als de weerstand tussen het contactpunt en punt Z. Vul dit in in de kolommen in de tabel op het antwoordblad. 0.3pt

Plaats de 4 AA batterijen in de batterijhouder. Let goed op de juiste polariteit van de batterijen en zorg dat je geen kortsluiting maakt. Sluit dan de batterijhouder aan zoals weergegeven in figuur 7. Zorg dat je de zilveren contacten niet beschadigt met de krokodillenklemmen.



Figuur 7. Aansluitingen van de batterijen



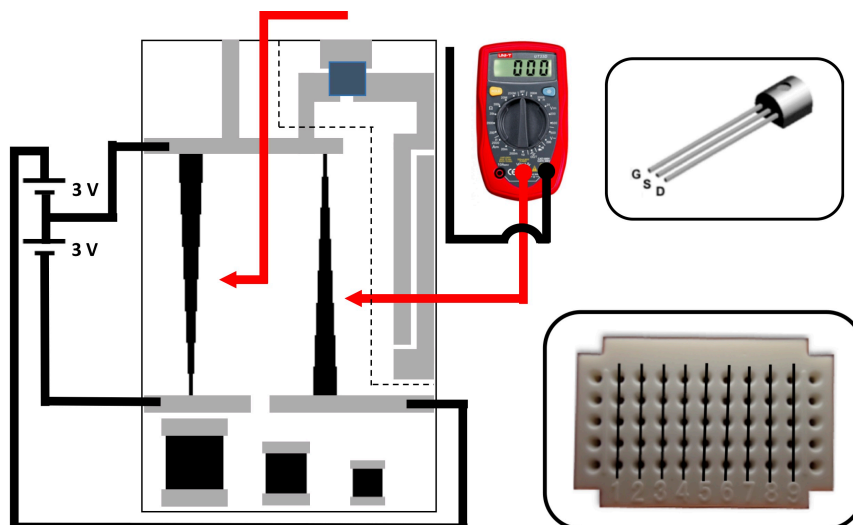
- A.7** Meet V_{out} van elk contactpunt, met V_{out} de gemeten spanning ten opzichte van punt Z en vul de gemeten waarden in in de kolommen van de tabel op het antwoordblad. 0.3pt

Hiermee is de dimensionering van de schakeling gedaan en kun je verder gaan met meten aan de JFET transistor.

Deel B. Karakteristieken van de JFET transistor (4,0 punten)

Om de JFET transistor te karakteriseren, gebruik je de schakeling zoals in figuur 8 getoond wordt. Begin met het identificeren van de drie contacten (S, D en G) van de beschikbare JFET transistor. Zorg dat je de contacten correct identificeert, want de transistor is niet symmetrisch! Je kunt het bijgeleverde minibreadbord op het plankje gebruiken om de JFET transistor op te plaatsen. De meegeleverde dunne draden zijn bedoeld om bij het breadbord te gebruiken.

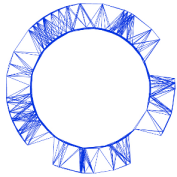
Verbind de gate en de source met behulp van de meegeleverde draden met de nul (punt Z in de schakeling, bij 0 V). Zorg dat, tijdens dit deel van de opdracht, de source van de JFET altijd met de nul is verbonden.



Figuur 8. Opstelling voor het bepalen van de karakteristieken van de JFET. Het deel van de schakeling binnen de stippellijn met de TFT wordt in deel B niet gebruikt. De bovenste ingevoerde figuur laat zien hoe je de Gate, Source en Drain van de JFET transistor kunt identificeren. De onderste ingevoegde figuur laat zien op welke wijze de gaten van het minibreadbord met elkaar zijn verbonden. Alle gaten in een genummerde kolom zijn intern met elkaar verbonden en geïsoleerd van de gaten van de andere kolommen. Het plaatje van de multimeter is vooral illustratief: jij moet de juiste meetmethode kiezen en de juiste stand van de draaischijf op de multimeter.

- B.1** Verbind de gate van de transistor met de nul ($V_{GS} = 0$). Verbind dan één van de snoeren van de multimeter, die in de DC current modus moet staan, met de drain van de transistor en druk met het andere snoer het punt met de hoogste spanning, die bij de spanningsdelers beschikbaar is. Noteer op het antwoordblad de waarde van stroom I_{DS} . 0.2pt

Experiment



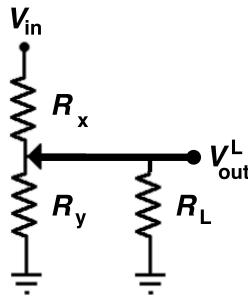
IPhO 2018
Lisbon, Portugal

Q1-10

NLD (Netherlands)

- B.2** Meet de stroom I_{DS} voor verschillende positieve spanningen aan de drain, terwijl je $V_{GS} = 0$ houdt. Vul dit in in de bovenste rij van de tabel. Pas daarna de schakeling aan om een negatieve spanning ($V_{GS} < 0$) tussen de gate en de source van de transistor aan te brengen en herhaal de metingen van I_{DS} als functie van de positieve aangelegde spanning tussen drain en source. Noteer je meetwaarden in de volgende rijen van de tabel in die op het antwoordblad staat. 0.8pt

Als de spanningsdeler is belast met een lage weerstandswaarde (figuur 9), zijn de spanningen die door de spanningsdeler worden geleverd, V_{out}^L , verschillend van de nominale waarden V_{out} die met een grote belastingsweerstand gemeten worden, zoals met een voltmeter met een hoge impedantie.



Figuur 9. Spanningsdeler met een belastingsweerstand.

- B.3** Neem aan dat de spanningsdeler met een belastingsweerstand R_L is verbonden. Geef een uitdrukking voor de correctiefactor $f = V_{out}^L / V_{out}$ als functie van R_L , R_x en R_y . 0.2pt

De JFET transistor heeft een kleine uitgangsweerstand als $V_{GS} = 0$, namelijk $R_{DS}^0 \sim 50 \Omega$. De weerstand wordt echter veel groter als de gate een negatieve spanning krijgt ten opzichte van de source. Als $V_{GS} < 0$ beschrijft de wet, beschreven door vergelijking (1) vrij goed wat de uitgangsweerstand doet.

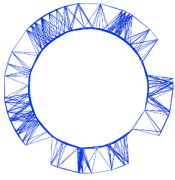
- B.4** Bereken, met gebruikmaking van de juiste correctiefactoren, V_{DS} , de spanningsval tussen drain en source, voor alle punten die je in B.2 gemeten hebt. Ga uit van de volgende nominale gegevens voor de JFET in deze opdracht: $R_{DS}^0 = 50 \Omega$, $V_p = -1.4 \text{ V}$ 1.2pt

- B.5** Teken de verschillende output curves $I_{DS}(V_{DS})$ voor je JFET transistor. 0.5pt

- B.6** Ga er vanuit dat de transistor meet een kleine V_{DS} werkt. Bepaal de *experimentele* waarden van R_{DS} van jouw JFET bij verschillende V_{GS} en maak een grafiek van de data. 0.5pt

- B.7** Teken de transfer curve $I_{DS}(V_{GS})$ van je JFET transistor voor $V_{DS} \sim +3 \text{ V}$. 0.3pt

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

Q1-11

NLD (Netherlands)

Als de JFET transistor in de verzadigingsmodus is, gedraagt de stroom I_{DS} bij benadering volgens de wet die in vergelijking (2) staat.

- | | | |
|------------|---|-------|
| B.8 | Bepaal met de gemeten data I_{DSS} en de 'pinch -off' spanning V_p voor jouw JFET transistor. Vergelijk de verkregen waarde van V_p met de nominale waarde. | 0.4pt |
|------------|---|-------|

Een belangrijke parameter van een JFET transistor, zeker als deze gebruikt wordt in versterkers, is de zogenaamde transgeleidbaarheid, gedefinieerd als

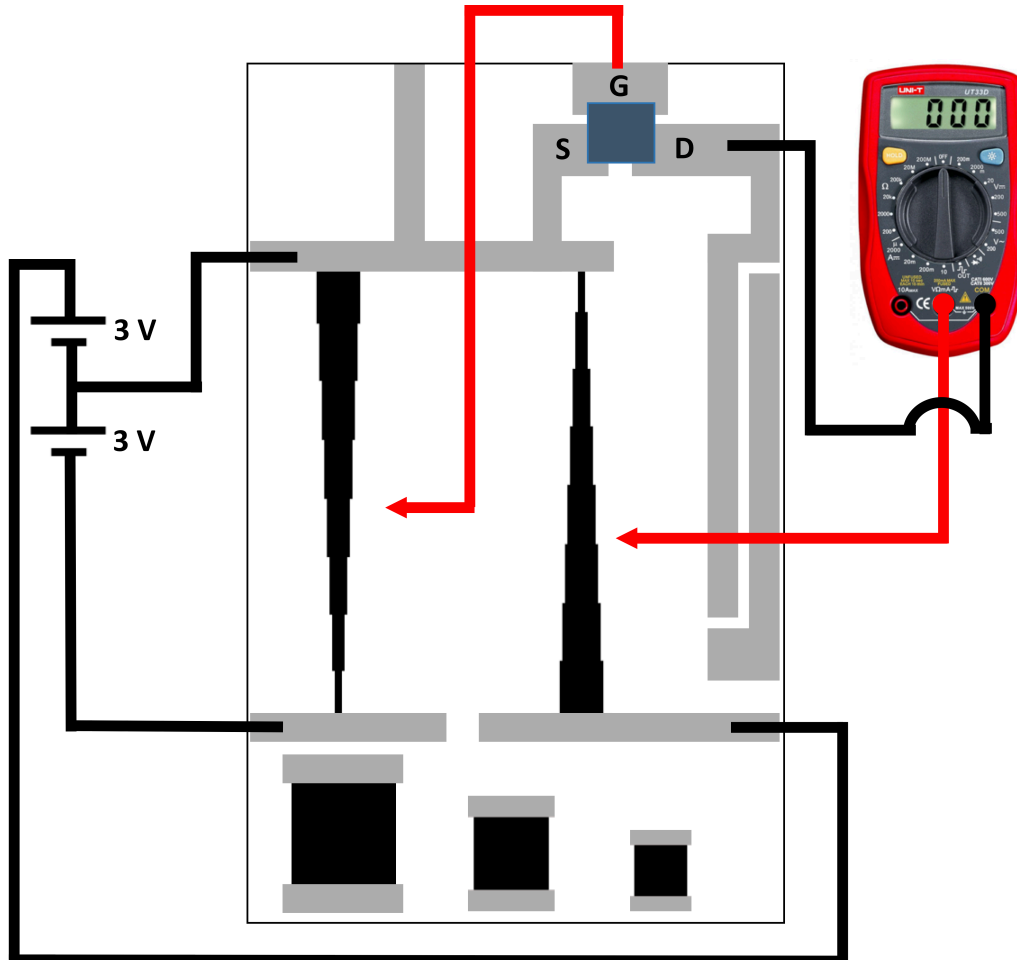
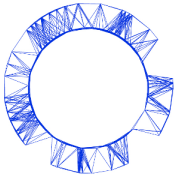
$$g = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}}. \quad (3)$$

Voor een functie met twee variabelen $f(x, y)$, betekent de notatie $\frac{\partial f}{\partial x}$ de afgeleide van f naar x terwijl y constant wordt gehouden.

- | | | |
|------------|---|-------|
| B.9 | Bepaal met de gemeten transfer curve, de transgeleidbaarheid van je apparaat voor $V_{GS} = -0.50$ V. Vergelijk dit met de berekende waarde die je met de modelvergelijking (2) hebt verkregen. | 0.4pt |
|------------|---|-------|

Deel C. De Papieren Dunne Film Transistor (2.0 punten)

Vanaf nu gebruik je de JFET niet meer. De volgende vragen en opdrachten gaan over de papieren dunne filmtransistor (TFT) in de bovenhoek van de gedrukte schakeling. De TFT Gate, Source en Drain zijn figuur 10 aangegeven. Ook in dit deel met de TFT moet de Source worden aangesloten op het gemeenschappelijke contact van de batterijhouder, d.w.z. 0 V, zoals weergegeven in afbeelding 10. Verbind de TFT Gate ook met deze 0 Volt. Polariseer de transistor met $V_{DS} > 0$, via een van de spanningsdelers (figuur 10). Controleer of er een stroom door de ampèremeter stroomt.



Figuur 10. Instellingen voor metingen aan de papieren TFT. De afbeelding van de multimeter is slechts illustratief: je kan zelf kiezen voor de naar jouw idee beste meetmethode en de bijbehorende instelling van de multimeter.

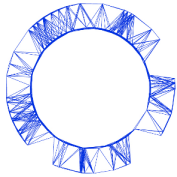
C.1 Sluit $V_{DS} = +3.0 \text{ V}$ aan. Sluit daarna $V_{GS} = -3.0 \text{ V}$ aan zodat de transistor gesloten is. Wacht daartoe 1 minuut. Noteer op het antwoordblad waarde voor de stroom I_{closed} , de restwaarde van de stroom. Open daarna de transistor door $V_{GS} = 0$ aan te sluiten, en ondertussen $V_{DS} = +3.0 \text{ V}$ aan te sluiten. Meet de stroom als functie van de tijd, tenminste 5 minuten en noteer je meetwaarden voor $I_{DS}(t)$ op het antwoordblad. 0.8pt

C.2 Maak een grafiek van $I_{DS}(t)$. Dit is een superpositie van twee exponentiële tijdsafhankelijke processen waarbij de ene een veel grotere tijdsconstante (τ_2) heeft dan de ander (τ_1). Bepaal de kleinere tijdsconstante τ_1 . 1.2pt

Deel D. Inverter schakeling (1.5 punten)

De inverter is in de de micro-elektronica een van de belangrijkste schakelingen. Een inverter keert een digitale input om. Bijvoorbeeld als $V_{\text{in}} = \text{hoog}$ dan $V_{\text{out}} = \text{laag}$ en andersom. Een transistor ligt wederom aan de basis van deze schakeling en een van de eenvoudigste ontwerpen is de zogenaamde common

Experiment

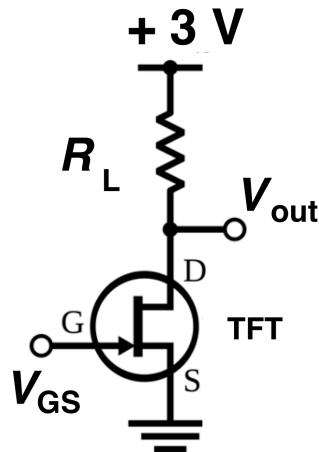


IPhO 2018
Lisbon, Portugal

Q1-13

NLD (Netherlands)

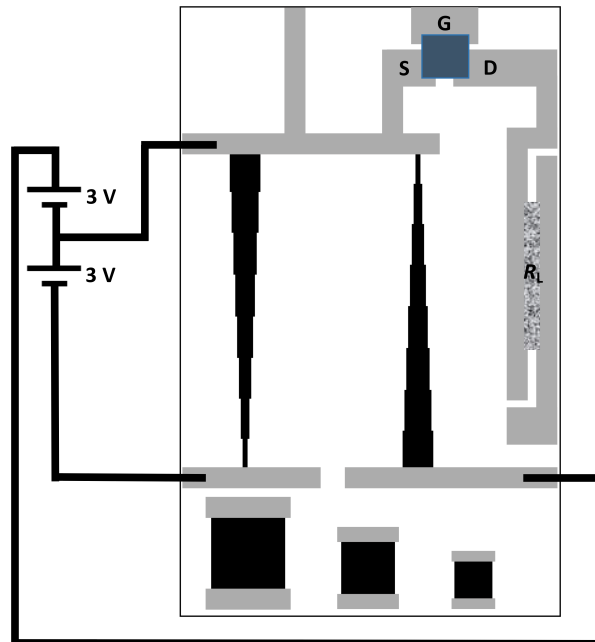
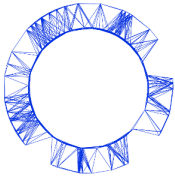
source amplifier (versterker), afgebeeld in onderstaande figuur 11. De schakeling bevat een transistor en een belastingsweerstand (load resistance) R_L . In dit geval geldt $V_{in} = V_{GS}$ en V_{out} is de spanning gemeten aan de drain aansluiting van de transistor. In dit onderdeel wordt gecontroleerd wat er gebeurt met V_{out} als V_{GS} stapsgewijs wordt verlaagd van -3 V tot 0 V.



Figuur 11. Common source amplifier en inverter schakeling.

In de schakeling van figuur 11 is de transistor de papieren TFT en R_L is belastingsweerstand die je zelf gaat maken. Verbind door gebruik te maken van het potlood de Drain van de transistor met de V_{in} aansluiting zoals aangegeven in figuur 12. Terwijl je schrijft, leg je eigenlijk dunne lagen geleidend grafiet op het papier, dus hoe meer lagen je over en naast elkaar heen tekent, hoe lager de weerstand zal zijn. Let tijdens het tekenen voortdurend op de weerstand ervan. De belastingsweerstand moet groot genoeg zijn om er voor te zorgen dat V_{out} zo dicht mogelijk bij 0 V kan komen. Zorg er daartoe voor dat je een belastingsweerstand maakt in de orde van van $R_L = 200 \text{ k}\Omega$.

Je kan het potlood gebruiken om de R_L kleiner te maken, dan wel de gum om de R_L juist groter te maken. Zorg ervoor dat je een waarde verkrijgt die niet meer dan 10% afwijkt van de beoogde waarde van $R_L = 200 \text{ k}\Omega$.

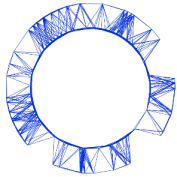


Figuur 12. Opstelling voor de inverter / common source amplifier schakeling.

Gebruik het HB potlood en teken met de hand een weerstand met een waarde van $R_L \simeq 200 \text{ k}\Omega$. Gebruik deze als belastingsweerstand voor de papieren TFT in de schakeling voor de inverter (zie Figuur 12).

D.1 Noteer op het antwoordblad de gemeten waarde van R_L die je hebt gemaakt. 0.5pt
Maak vervolgens de inverter schakeling (Figuur 12) m.b.v. je gemaakte (grafiet) weerstand en de papieren TFT. Voordat je gaat meten: Schakel de transistor volledig uit door voor $\sim 1 \text{ min}$ een spanning $V_{GS} = -3 \text{ V}$ aan te sluiten. Meet vervolgens V_{out} door de spanning V_{GS} stapsgewijs van -3 V naar 0 V te verhogen. Lees V_{out} af maar houd rekening met een stabilisatietijd voor elk punt tot een maximum van 100 s . Noteer de gemeten waarden op het antwoordblad.

D.2 Zet de gemeten $V_{out}(V_{in})$ uit in een grafiek, de zgn. spannings transfer curve. 0.5pt
Trek een vloeiende trendcurve door de meetpunten.



Noteer de cijfers 0 t/m 9 in de onderstaande tabel.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

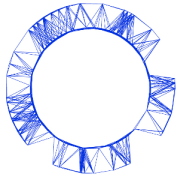
Deel A. Dimensionering van de schakeling (2.5 punten)

A.1 (0.2 pt)

$V_{\text{out}} =$

A.2 (0.5 pt)

#	R_{T1}	R_{T2}	R_{T3}
$\overline{R}$			
σ_R			



A.3 (0.3 pt)

Bewijs:

A.4 (0.4 pt)

$$R_{\square} = \quad \pm$$

$$\rho_{\text{Carbon film}} = \quad \pm$$

A.5 (0.5 pt)

Bewijs:

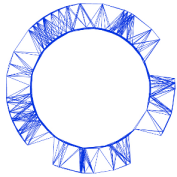
Gemeten waarden:

$$R_1 =$$

$$R_2 =$$

$$\kappa =$$

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

A1-3

NLD (Netherlands)

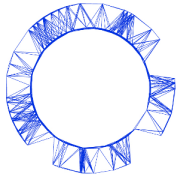
A.6 (0.3 pt)

R_1 Punten	R_x	R_y	R_2 Punten	R_x	R_y
Z			Z		
A			H		
B			I		
C			J		
D			K		
E			L		
F			M		
G			N		
V			W		

A.7 (0.3 pt)

Punten	V_{out}	Punten	V_{out}
A		H	
B		I	
C		J	
D		K	
E		L	
F		M	
G		N	
V		W	

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

A1-4

NLD (Netherlands)

Deel B: Karakteristieken van de JFET transistor (4.0 punten)

B.1 (0.2 pt)

$I_{DS} =$

B.2 (0.8 pt)

I_{DS} stroom waarden:

Gate/Drain	Z	H	I	J	K	L	M	N	W
Z									
A									
B									
C									
D									
E									
F									
G									
V									

B.3 (0.2 pt)

$f =$

A1-5
NLD (Netherlands)

$$R_{\text{DS}} =$$
$$R_{\text{DS}} =$$
[illegible]

A1-6
NLD (Netherlands)

$$R_{\text{DS}} =$$
[illegible]
$$R_{\text{DS}} =$$
[illegible]

A1-7

NLD (Netherlands)

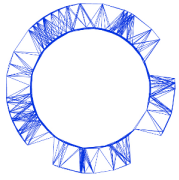
Gate E: $V_{GS} =$

[illegible]
$$R_{\text{DS}} =$$
[illegible]

A1-8
NLD (Netherlands)

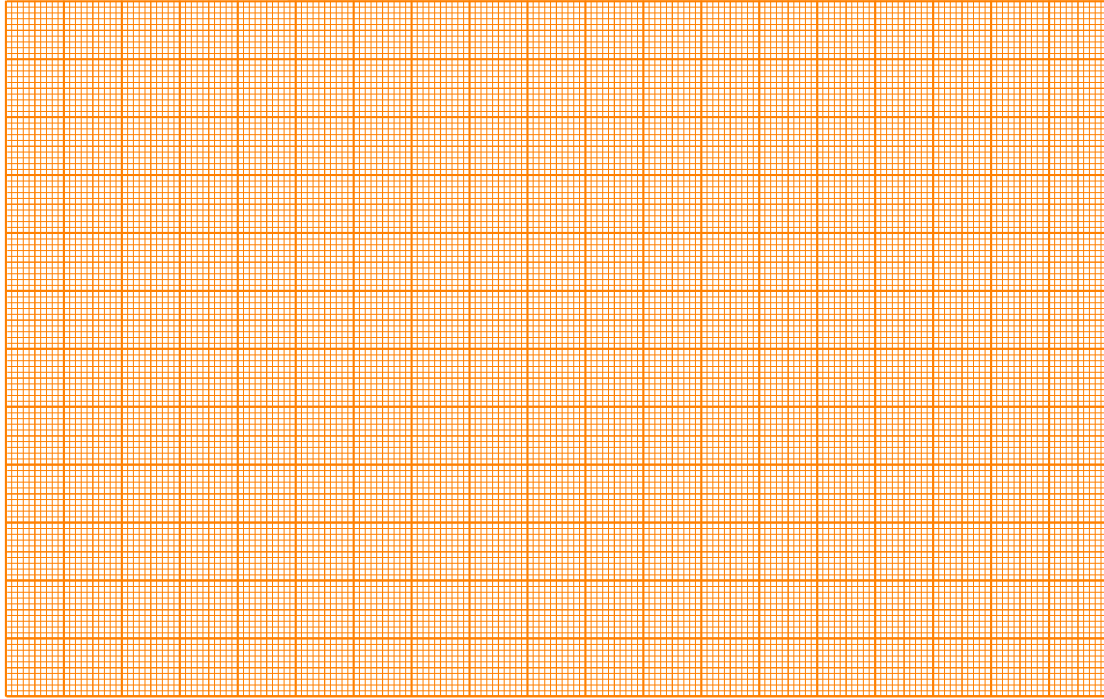
Gate G: $V_{GS} =$

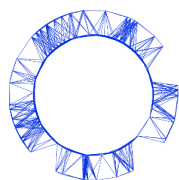
[illegible]
$$R_{\text{DS}} =$$
[illegible]



B.5 (0.5 pt)

Output curves:

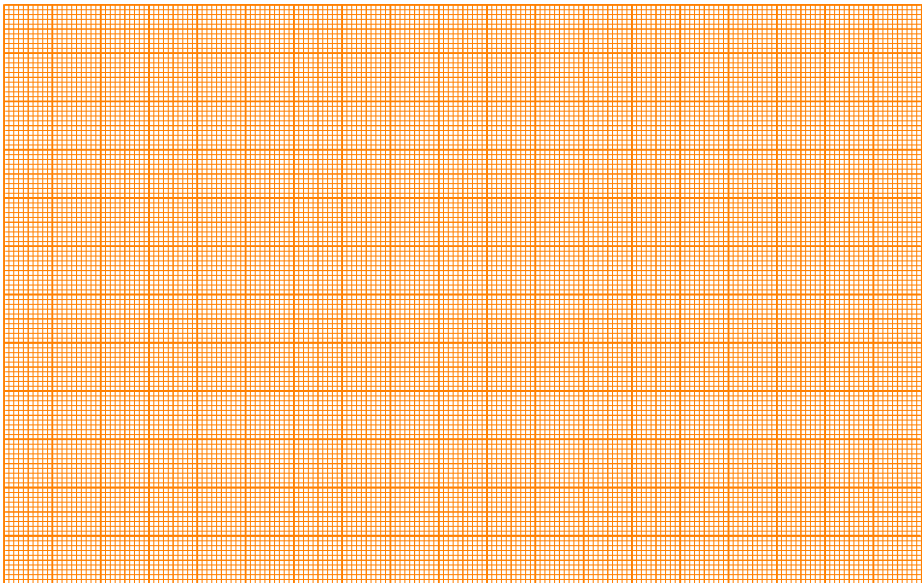


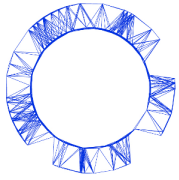


B.6 (0.5 pt)

V_{GS}	R_{DS}

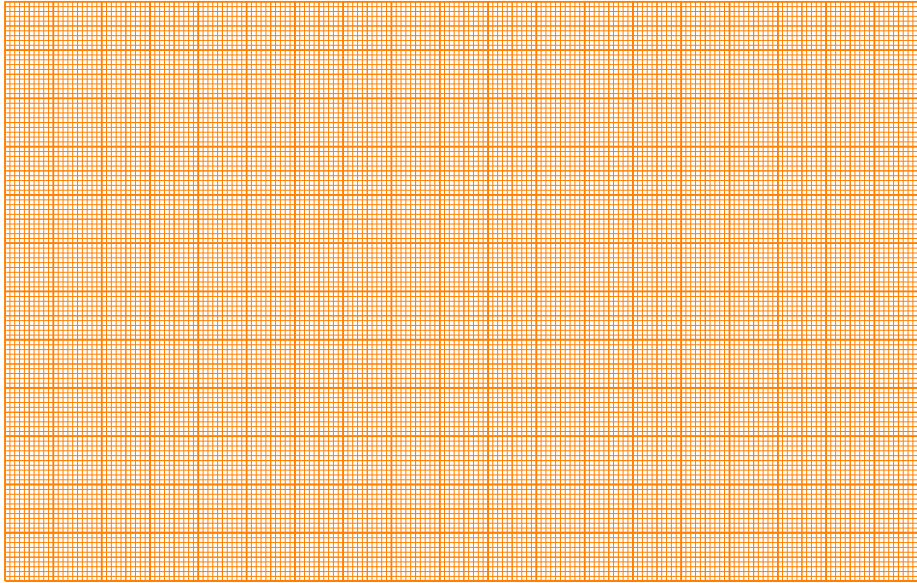
Grafiek: $R_{DS}(V_{GS})$





B.7 (0.3 pt)

Transfer curve:



B.8 (0.4 pt)

$I_{DSS} =$

$V_P =$

B.9 (0.4 pt)

Gemeten transgeleidbaarheid: $g =$

Berekende transgeleidbaarheid van het JFET model: $g =$

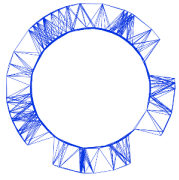
A circular diagram consisting of a central white circle and a surrounding ring of blue triangles. The triangles are arranged in a circular pattern, with their vertices pointing outwards. The triangles are connected by lines, forming a continuous ring around the central circle.

A1-12

NLD (Netherlands)

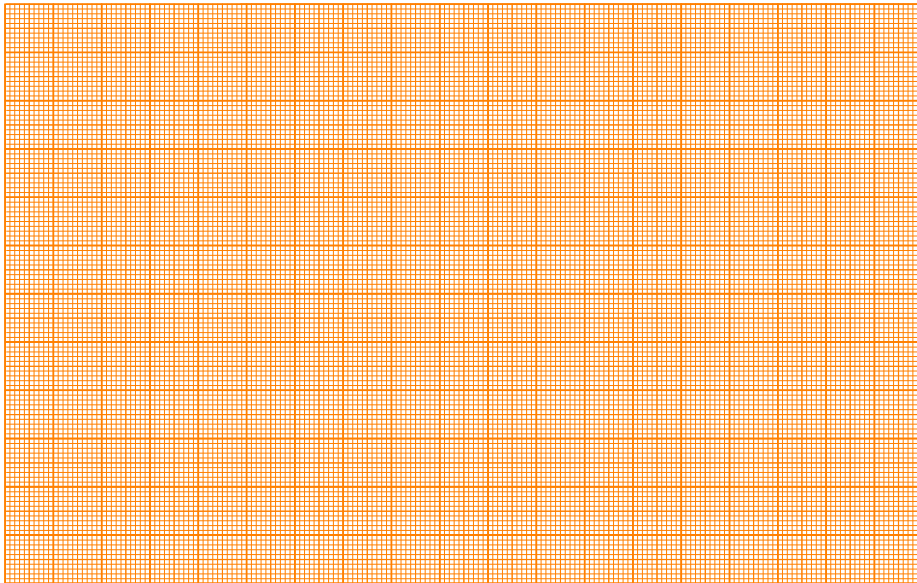
C.1 (0.8 pt)

$$I_{\text{closed}} =$$
[illegible]

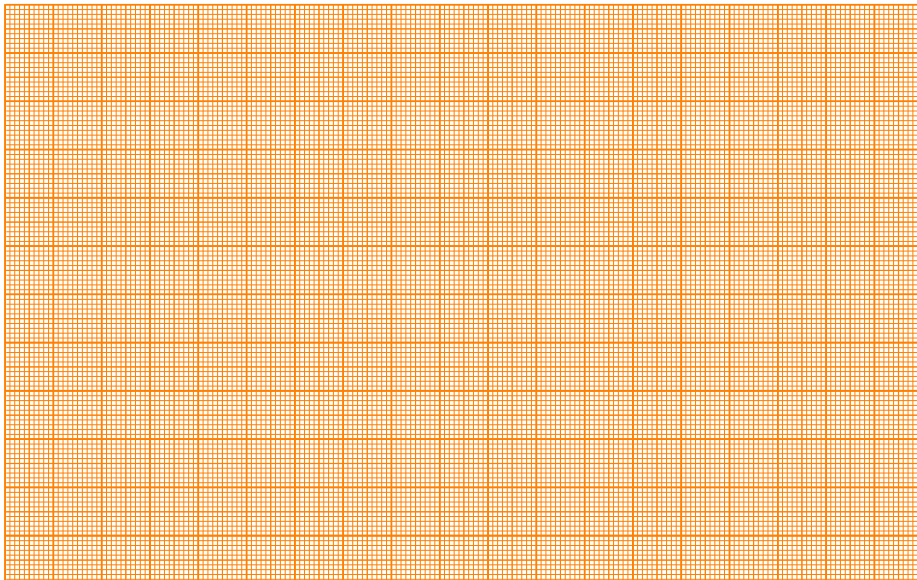


C.2 (1.2 pt)

Grafiek: $I_{DS}(t)$



Hulp grafiek om τ_1 te bepalen:



$\tau_1 =$

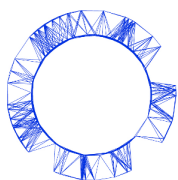
A circular diagram consisting of a central white circle and a surrounding ring of blue triangles. The triangles are arranged in a circular pattern, with their vertices pointing outwards. The triangles are connected by lines, forming a continuous ring around the central circle.

A1-14

NLD (Netherlands)

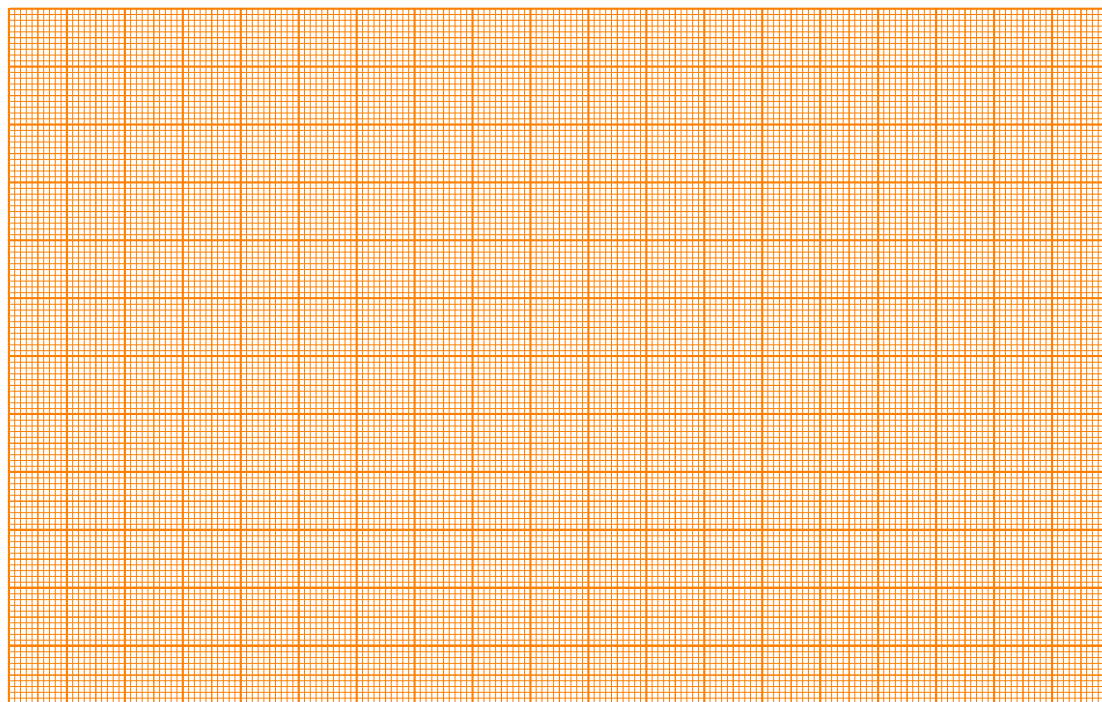
D.1 (0.5 pt)

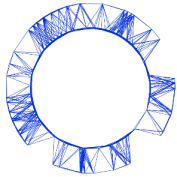
$$R_L =$$
[illegible]



D.2 (0.5 pt)

Grafiek: $V_{\text{out}}(V_{\text{in}})$





Visco-elasticiteit van een polymeer draad

Let op: de draad moet niet worden belast (opgehangen) voordat je aan het experiment begint!
Doe de weegschaal nu aan (deze heeft een opwarmtijd van 10 minuten). Wijzig de instellingen van de weegschaal niet.

Inleiding

Wanneer er op een vast lichaam een externe kracht wordt uitgeoefend, vervormt dit. Voor kleine uitgeoefende krachten, is de vervorming evenredig met de kracht (wet van Hooke) en reversibel (omkeerbaar), zodanig dat het materiaal zijn initiële vorm terug krijgt, wanneer er geen kracht meer op het lichaam wordt uitgeoefend.

Voor een vast lichaam, is dit concept makkelijker te omschrijven met het concept van rek en belasting. De belasting σ is gelijk aan de kracht F gedeeld door de oppervlakte S waarop deze werkt, en de rek ϵ is de relatieve verandering van de lengte:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad \text{and} \quad \epsilon = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0}, \quad (1)$$

waarbij ℓ and ℓ_0 respectievelijk de eindlengte en beginlengte zijn. Bij eenvoudig elastisch gedrag, is de belasting evenredig met de rek, $\sigma = E \epsilon$ (wet van Hooke) en de evenredigheidsconstante, E , wordt de *Young's modulus* genoemd.

Het elastisch gedrag uitgedrukt in de wet van Hooke is een benadering die enkel geldig is voor een kleine rek. Voor grotere rek waarden, beginnen veranderingen langzaam irreversibel te worden, omdat het plastisch gedrag van het materiaal wordt bereikt. In dit geval wordt de beweging van de moleculen niet beperkt en lijkt dit op die van een viskeuze vloeistof. Dit betekent dat indien het materiaal wordt uitgerekt of gecompriemd voorbij de elastische grens, het materiaal asymptotisch een vloeistof wordt.

Visco-elastische materialen

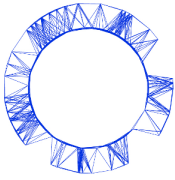
Enkele materialen combineren aspecten van een elastische vaste stof met kenmerken die lijken op een viskeuze vloeistof en zijn daarom bekend als visco-elastisch.

Bij het gebruik van een visco-elastisch materiaal is het redelijk om afzonderlijk het pure elastisch gedrag en het additionele viskeuze gedrag te beschouwen, wat betekent dat de totale belasting σ die nodig is om een bepaalde rek ϵ te verkrijgen, de som is van een pure elastische term $\sigma_0 = E_0 \epsilon_0$ en een visco-elastische term σ_1 :

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 \quad (2)$$

Er wordt aangenomen dat beide termen van de belasting corresponderen met dezelfde rek ($\epsilon = \epsilon_0 = \epsilon_1$). Echter, de rek ϵ_1 , corresponderend met de visco-elastische term, doorgaans gemodelleerd wordt als een som van een puur elastische rek $\epsilon_1^e = \sigma_1 / E_1$, met een pure viskeuze rek, ϵ_1^v , (beide onderhevig aan dezelfde belasting $\sigma_1 = \sigma_1^e = \sigma_1^v$):

$$\epsilon_1 = \epsilon_1^e + \epsilon_1^v \quad (3)$$

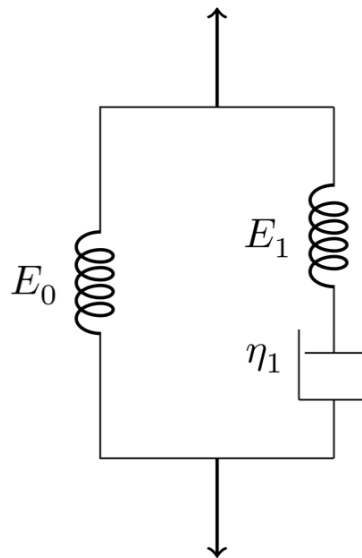


Bij het pure viskeuze proces, is een lineaire relatie tussen de belasting en de tijd afgeleide van de rek toegestaan (gelijk aan dat voor viskeuze vloeistoffen),

$$\sigma_1 = \eta_1 \frac{d\epsilon_1^v}{dt},$$

waarbij η_1 de viscositeitscoëfficiënt is.

Dit fenomenologisch model wordt ook wel het *standard linear model of linear viscoelasticity* genoemd en is weergegeven in Figuur 1, waarbij de veren de pure elastische componenten representeren en de demper representeert de viskeuze component.



Figuur 1. Standard linear model of linear viscoelasticity

Met behulp van bovenstaande vergelijkingen wordt de volgende relatie afgeleid:

$$\frac{d\epsilon_1}{dt} = \frac{1}{E_1} \frac{d\sigma_1}{dt} + \frac{\sigma_1}{\eta_1} \quad (4)$$

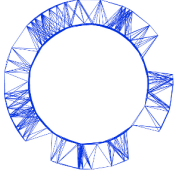
Daarom is het mogelijk om binnen het *standard linear model of viscoelasticity*, aan te tonen dat

$$\sigma = E_0 \epsilon + \tau_1 (E_0 + E_1) \frac{d\epsilon}{dt} - \tau_1 \frac{d\sigma}{dt} \quad (5)$$

Deze differentiaalvergelijking laat zien dat het verband tussen de rek en belasting niet langer lineair is, en dat zowel rek als belasting een functie zijn van de tijd. Om $\epsilon(t)$ te verkrijgen is het nodig om de functie $\sigma(t)$ te specificeren, en visa-versa.

Er zijn twee speciale gevallen interessant voor praktische toepassingen, waarbij of $d\epsilon/dt = 0$ of $d\sigma/dt = 0$, ook wel respectievelijk bekend als de belasting relaxatie condities en kruip condities. Bij de belasting relaxatie condities, wordt een plotselinge rek ϵ opgelegd aan het materiaal, welke constant wordt gehou-

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

Q2-3

NLD (Netherlands)

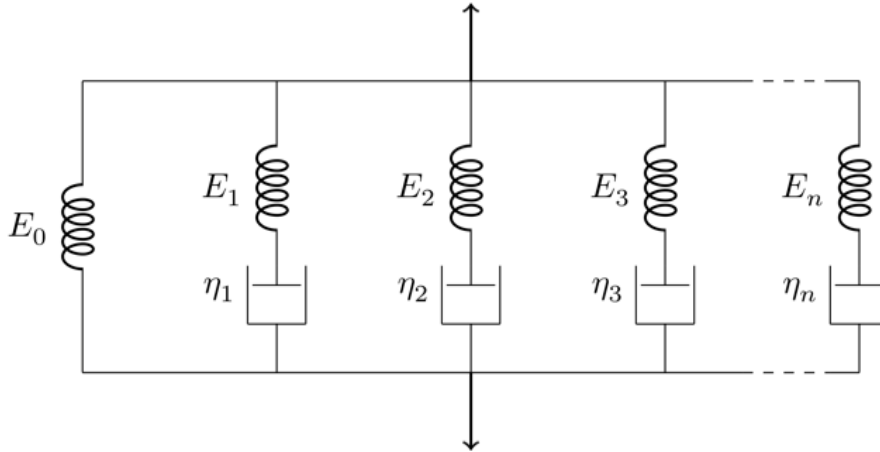
den in de tijd, zodat $d\epsilon/dt = 0$. In dit geval, is de functie $\sigma(t)$ alleen afhankelijk van de visco-elastische parameters van het medium en de oplossing van vergelijking 5 is

$$\sigma(t) = \epsilon(E_0 + E_1 e^{-t/\tau_1}) \quad (6)$$

waarbij het is toegestaan dat op $t = 0$ alleen de elastische componenten bijdragen aan de belasting en dus $\sigma(t = 0) = \epsilon(E_0 + E_1)$. Deze oplossing laat zien dat de visco-elastische belasting exponentieel met de tijd afneemt, met een tijdsconstante τ_1 .

Multi visco-elastische processen

Het standaard lineair model kan gemakkelijk uitgebreid worden om meerdere visco-elastische processen te beschouwen, zoals aangegeven in Figuur 2.



Figuur 2. Een gegeneraliseerd model voor multi visco-elastische processen.

Dus, indien N verschillende visco-elastische componenten worden beschouwd,

$$\sigma = \sigma_0 + \sum_k \sigma_k, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

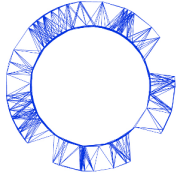
waarbij $\frac{d\epsilon_k}{dt} = \frac{1}{E_k} \frac{d\sigma_k}{dt} + \frac{\sigma_k}{\eta_k}$, en zoals bovenstaande, $\frac{d\epsilon_0}{dt} = \frac{d\epsilon_k}{dt} = \frac{d\epsilon}{dt}$.

De volgende generalisatie van vergelijking 5 is dus van toepassing:

$$\sigma = E_0 \epsilon + \eta_t \frac{d\epsilon}{dt} - \sum_k \tau_k \frac{d\sigma_k}{dt}, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

waarbij $\eta_t = \sum_k \eta_k$, and $\tau_k = \eta_k / E_k$.

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

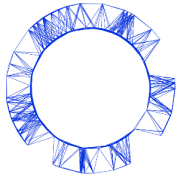
Q2-4

NLD (Netherlands)

Bij constante rek condities, moeten de verschillende visco-elastische belastingen nog steeds exponentieel afnemen met de tijd, $\sigma_k = A_k e^{-t/\tau_k}$, welke leidt tot de volgende oplossing:

$$\sigma(t) = \epsilon \left(E_0 + \sum_k E_k e^{-t/\tau_k} \right), \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

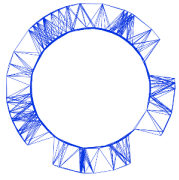
waarbij er is aangenomen dat op $t = 0$ enkel de elastische componenten bijdragen aan de totale belasting en dus $\sigma_0 = \epsilon(E_0 + \sum_k E_k)$. Het resulterende visco-elastische response is duidelijk niet-lineair.



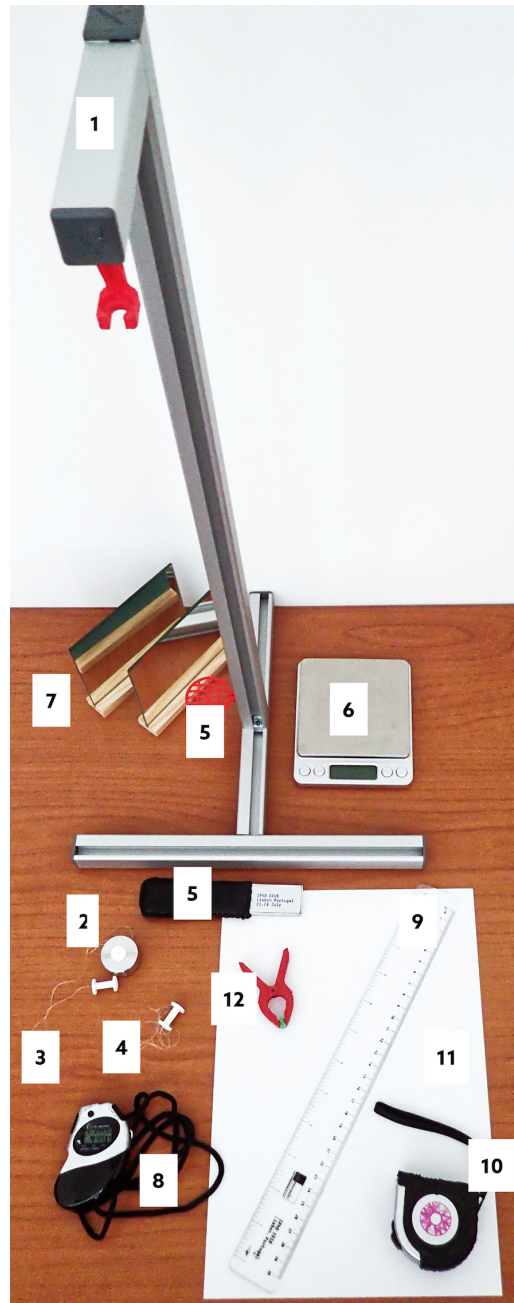
Benodigdheden bij het experiment

De volgende onderdelen zijn nodig tijdens dit experiment (zie Figuur 3):

1. 1 statief met een ondersteunde houder voor een laser pointer en een andere houder aan de bovenzijde om de draad verticaal uitgerekt te houden met een constante rek;
2. 1 massa-onderdeel, bestaande uit een holle cilindrische massa met een houder schroef om de draad aan te bevestigen;
3. 1 lange thermoplastische polyurethaan (TPU) draad bevestigd aan een massa-onderdeel (stuk) en aan een andere houder schroef die gebruikt wordt om de draad op te hangen aan de bovenste houder van het statief;
4. 1 korte TPU draad enkel bevestigd aan één houder schroef;
5. 1 laser pointer en de respectieve houder;
6. 1 digitale weegschaal;
7. 2 vlakke spiegels;
8. 1 stopwatch;
9. 1 liniaal of meetlat;
10. 1 rolmaat (rolmeter);
11. 1 vel A4 papier dat als scherm dient
12. 1 veerklem om de laser vast te houden en aan te doen.

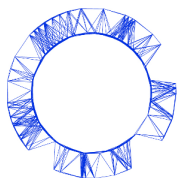


Figuur



Figuur 3. Onderdelen van de meetopstelling voor dit experiment.

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

Q2-7

NLD (Netherlands)

Deel A: Belasting relaxatie metingen (1.9 punten)

Let op: de draad moet niet worden opgehangen voordat je aan het experiment begint! In het geval dat de draad per ongeluk toch wordt opgehangen, vraag dan om een andere draad, maar houd rekening mee dat je hierdoor minder tijd zal hebben om het experiment uit te voeren! Lees aandachtig de aanwijzingen die worden gegeven in "Deel D: Data analyse" voordat je begint aan de metingen van dit deel om zo een volgorde te bepalen van metingen die je moet verrichten.

A.1 Meet de lengte van de onbelaste (niet uitgerekte) draad tussen de twee schroefkoppen. Om de totale lengte van de draad, l_0 , te bepalen, tel je voor iedere schroef 5 mm op bij jouw gemeten waarde. Noteer deze waarde van l_0 met de meetfout op het antwoordblad. 0.3pt

A.2 Bepaal het totale gewicht van het massa-onderdeel, P_0 , in gram-force (gf) eenheden. Herinner dat 1 gram-force de kracht is die correspondeert met het gewicht van een massa van 1 gram ($1\text{gf} = 9.80 \times 10^{-3} \text{ N}$). Noteer deze gemeten waarde met een schatting van de fout op het antwoordblad. 0.3pt

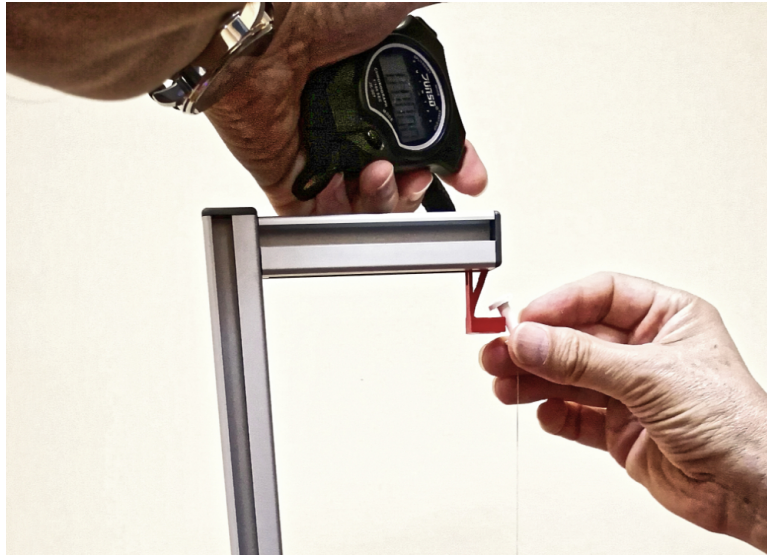
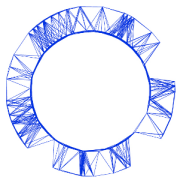
Om experimenteel de verschillende relaxatie componenten waar te nemen, is het nodig om de belasting over een langere periode te meten. In dit geval is het voldoende om het verloop van de belasting te meten over een periode van **45 minuten**.

Je dient nu twee simultane taken uit te voeren: 1. en 2. Lees de instructies aandachtig alvorens je begint met meten.

Belangrijk: indien het experiment wordt onderbroken, kan je deze niet hervatten. Je moet dat opnieuw beginnen met een nieuwe aan dit experiment. Vraag in dit geval om een reserve draad.

Voer de volgende twee simultane taken uit:

1. Blijf het massa-onderdeel op de weegschaal houden, en rek de draad zodat de schroef aan het andere uiteinde van de draad bevestigd wordt aan de bovenste houder van het statief (Figuur 4).
2. Start de stopwatch simultaan met de eerste taak.



Figuur 4: Het bevestigen van de draad aan de bovenste houder en het beginnen met meten.

A.3 Noteer de meetwaarden van de weegschaal, $P(t)$ met het corresponderend tijdstip t op de stopwatch gedurende 45 minuten, in het tabel op het antwoordblad. 1.0pt

A.4 Meet de lengte l van de uitgerekte draad en maak een schatting van de fout. Noteer de gemeten waarde van l met corresponderende fout. 0.3pt

Deel B: Bepaling van de diameter van de uitgerekte draad (1.5 punten)

Kijk nooit in de laser! Indien de laser niet wordt gebruikt, maak het dan uit. Indien je moeilijkheden ondervindt bij het zien van een diffractiepatroon, vraag dan om een nieuwe laser.

In dit deel zul je gebruik maken van licht diffractie om de diameter van een polymeer draad te meten. De nominale diameter van de niet-uitgerekte draad is 0.5 mm. Zoals bekend, is het diffractiepatroon van een rechthoekige spleet met breedte d gelijk aan dat van een cilindervormig object met dezelfde diameter d als de breedte van de spleet. Op grote afstand, in het zogenaamde Fraunhofer regime, waarbij het diffractiepatroon wordt waargenomen op een scherm die geplaatst is op een afstand die vele malen groter is dan de diameter van het object, is de afstand tussen de diffractie minima voor kleine hoeken dezelfde voor zowel de spleet als het object, en wordt gegeven door

$$d \sin \theta = n\lambda, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (10)$$

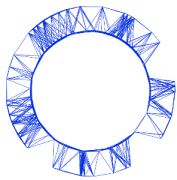
waarbij θ de diffractie hoek is.

Je zult een laser met golflengte $\lambda = 650 \pm 10$ nm gebruiken.

Om dit deel uit te voeren, volg de volgende stappen:

1. Maak de laser aan met behulp van de veerklem (zie Figuur 5).
2. Plaats de laser zodanig dat het de draad direct raakt (treft).

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

Q2-9

NLD (Netherlands)

3. Gebruikmakend van het gegeven materiaal moet je een methode bedenken om het diffractiepatroon te projecteren op het scherm (vel A4 papier), en meet de data die nodig is om de diameter van de draad te bepalen met behulp van vergelijking 10.



Figuur 5. Het aanzetten van de laser met de veerklem.

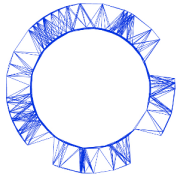
B.1	Maak een schets van je gebruikte opstelling op het antwoordblad.	0.6pt
B.2	Meet de afstand, D , tussen de draad en het geprojecteerde diffractie patroon. Noteer deze waarde met een schatting van de fout op het antwoordblad.	0.3pt
B.3	Bereken de gemiddelde afstand $\bar{x}$, tussen de diffractie minima en zijn fout. Noteer deze waarde met een schatting van de fout op het antwoordblad.	0.3pt
B.4	Bepaal met behulp van vergelijking 10 de diameter d van de uitgerekte polymeer draad met zijn fout. Noteer deze waarde met een schatting van de fout op het antwoordblad.	0.3pt

Deel C: Een nieuwe draad (0.3 punten)

Voordat je continueert met de data analyse (**Part D**), moet je de meetopstelling met een kortere draad voorbereiden (**E**).

Maak het massa-onderdeel los van de lange draad door deze los te schroeven en bevestig het aan het losse uiteinde van de korte draad (steek de draad door de opening en fixeer het met de schroefdraad, zie Figuur 6).

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

Q2-10

NLD (Netherlands)

Indien het je niet lukt om de draad door de opening in te steken, vraag dan om hulp.



Figuur 6. Bevestigen van de korte TPU draad aan de houder schroef.

- C.1** Meet de lengte ℓ'_0 zoals bij **A.1**. Noteer de waarde hiervan op het antwoordblad 0.3pt en geef ook een schatting van de fout.

Hang dit nieuwe draad aan de bovenste houder van de statief zodat de massa een constante belasting zal uitoefenen op de draad. De draad zal uiteindelijk de stationaire rek bereiken, waarbij $\epsilon = \sigma/E$. Doe dit terwijl je werkt aan de data analyse in **Deel D (de draad moet voor minstens 30 minuten worden opgehangen)**.

Deel D: Data analyse (5.7 punten)

N.B.: de valversnelling in Lissabon is $g = 9.80 \text{ ms}^{-2}$

- D.1** Bereken de kracht op de draad, F , in gf, voor alle gemeten waardes en vul deze 0.3pt in de betreffende kolom in van de tabel in A3.

- D.2** Teken $F(t)$ op het grafiekpapier op het antwoordblad. 0.4pt

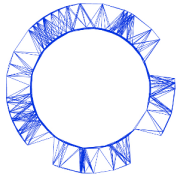
Omdat het plateau van de weegschaal niet beweegt, kunnen de metingen beschouwd worden als gedaan bij constante rek en kan vergelijking (9) gebruikt worden. De verhouding $\frac{\sigma}{\epsilon}$ kan geschreven worden als $\frac{\sigma}{\epsilon} = \beta F$, met β een constante. Daarom geldt

$$\frac{\sigma}{\epsilon} = \beta F(t) = E_0 + E_1 e^{-t/\tau_1} + E_2 e^{-t/\tau_2} + E_3 e^{-t/\tau_3} + \dots \quad (11)$$

met de som geordend als $(\tau_1 > \tau_2 > \tau_3 > \dots)$ voor het gemak.

- D.3** Bepaal de constante rek, ϵ met de bijbehorende onzekerheid. Noteer dit op het antwoordblad met een schatting van zijn onzekerheid. 0.3pt

- D.4** Bereken de factor β met σ in SI eenheden en F in gf eenheden. Noteer dit op het antwoordblad (geen onzekerheid gevraagd) 0.3pt



- D.5** Bekijk de data in de grafiek die in D.2 is gebruikt: het kan niet verklaard worden door een puur elastisch proces. Schets kwalitatief in het grafiekpapier op het antwoordblad wat jij verwacht voor $F(t)$ in het puur elastische geval. 0.4pt

De data analyse wordt eenvoudiger als we uitgaan van $\frac{dF}{dt}$ in plaats van $F(t)$. Dat betekent dat de relaxatieparameters in opeenvolgende stappen bepaald kunnen worden. Om dat te doen, moet de afgeleide naar de tijd $\frac{dF}{dt}$ bij elk punt berekend worden. Dit kan zowel grafisch als numeriek gedaan worden. In het meer eenvoudige geval dat de meetpunten met gelijke intervallen zijn genomen, wordt de numerieke waarde van de afgeleide van $f(t)$ in punt $f(t)$ in een dataset $(t_1, f_1), (t_2, f_2), (t_3, f_3), \dots$ bij benadering gegeven door

$$\left. \frac{df}{dt} \right|_i = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2h} \quad i = 2, \dots, N-1 \quad (12)$$

met h het (constante) interval tussen de punten en met N het aantal punten.

Als de intervallen tussen de datapunten niet gelijk zijn, wordt de numerieke waarde van de afgeleide bij benadering gegeven door:

$$\left. \frac{df}{dt} \right|_i = \frac{h_-^2 f_{i+1} - h_+^2 f_{i-1} + (h_+^2 - h_-^2) f_i}{h_+^2 h_- + h_+ h_-^2} \quad i = 2, \dots, N-1 \quad (13)$$

met $h_+ = (t_{i+1} - t_i)$ en $h_- = (t_i - t_{i-1})$ en met N het aantal datapunten. Deze uitdrukking geeft de gemiddelde afgeleide naar links en naar rechts, gewogen met het inverse tijdsinterval.

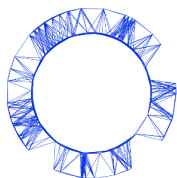
Om de data te kunnen analyseren en de relevante parameters te bepalen, is het nodig een set van stappen te volgen. Doe daarom, gegeven de geordende som in vergelijking 11, het volgende:

- D.6** Neem aan dat je set data verder gaat dan τ_2 bereken de afgeleide $\frac{dF}{dt}$ voor datapunten op tijden later dan $t > 1000$ s. Noteer de waarden in de tabel, gebruikt in A.3. In het geval dat je een grafische methode gebruikt om $\frac{dF}{dt}$ te bepalen, gebruik dan het grafiekpapier op het antwoordblad. 0.5pt

- D.7** Schrijf op het antwoordblad een uitdrukking voor de verwachte tijdsafhanke-lijkheid van $\frac{dF}{dt}$ in het geval van een enkelvoudig viscoelastisch proces. 0.3pt

- D.8** Bepaal, met een grafische methode, de parameters E_1 en τ_1 in SI eenheden van de datapunten, aangegeven in D.6. Noteer E_1 en τ_1 op het antwoordblad (onzekerheden zijn niet nodig). 1.0pt

- D.9** Bepaal de parameter E_0 in Si eenheden met de datapunten aangegeven in D.6. Noteer op het antwoordblad (geen onzekerheid nodig). 0.3pt



D.10 Vul de kolom $y(t)$ in de tabel uit **A.3** in door de elastische en de langstdurende visco-elastische componenten af te trekken van $F(t)$ (de punten die gebruikt zijn in **D.6** dienen hier niet te worden beschouwd). 0.3pt

D.11 Bepaal met $y(t)$ (zie **D.10**), door gebruik te maken van een grafische methode, de parameters voor de tweede visco-elastische component, E_2 en τ_2 in SI eenheden. Noteer E_2 en τ_2 op het antwoordblad (de fout is niet nodig). 1.0pt

Additionele visco-elastische componenten kunnen op dezelfde manier worden bepaald.

D.12 Identificeer het tijdsinterval $[t_i, t_f]$ dat relevant is voor de derde component. Noteer zowel t_i als t_f op het antwoordblad (de fout is niet nodig). 0.3pt

D.13 Schat de waarde van τ_3 in SI eenheden uit de grafiek gemaakt bij **D.11**. Noteer dit op het antwoordblad (de fout is niet nodig). 0.3pt

Deel E: Bepaling van

Ga terug naar de korte draad opgehangen in Deel C. Let op dat er minimaal 30 minuten zijn verstreken sinds het moment dat je korte draad hebt opgehangen. Je kunt nu veilig aannemen dat deze draad de stationaire toestand voor de rek $\epsilon = \sigma/E$ heeft bereikt.

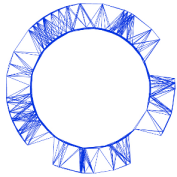
E.1 Bepaal de waarde van E rechtstreeks met behulp van de lengte van de uitgerekte draad. Vul dit in op het antwoordblad, samen met het relatieve verschil van de waarde van E_0 bepaald in **Deel D** (de fout is niet nodig). 0.6pt

A2-1

NLD (Netherlands)

[illegible][illegible]

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

A2-2
NLD (Netherlands)

A.3 (cont.)

[illegible]

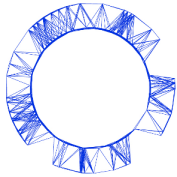


A.3 (cont.)

t	$P(t)$	F/gf	$\frac{dF}{dt}$	$y(t)$

A.4 (0.3 pt)

$\ell = \qquad \pm$



Deel B: Bepaling van de diameter van de uitgerekte draad (1.5 punten)

B.1 (0.6 pt)

B.2 (0.3 pt)

$D =$ $\pm$

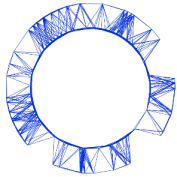
B.3 (0.3 pt)

$\bar{x} =$ $\pm$

B.4 (0.3 pt)

$d =$ $\pm$

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

A2-5

NLD (Netherlands)

Deel C: Een nieuwe draad gebruiken (0.3 punten)

C.1 (0.3 pt)

ℓ'_0 $\pm$

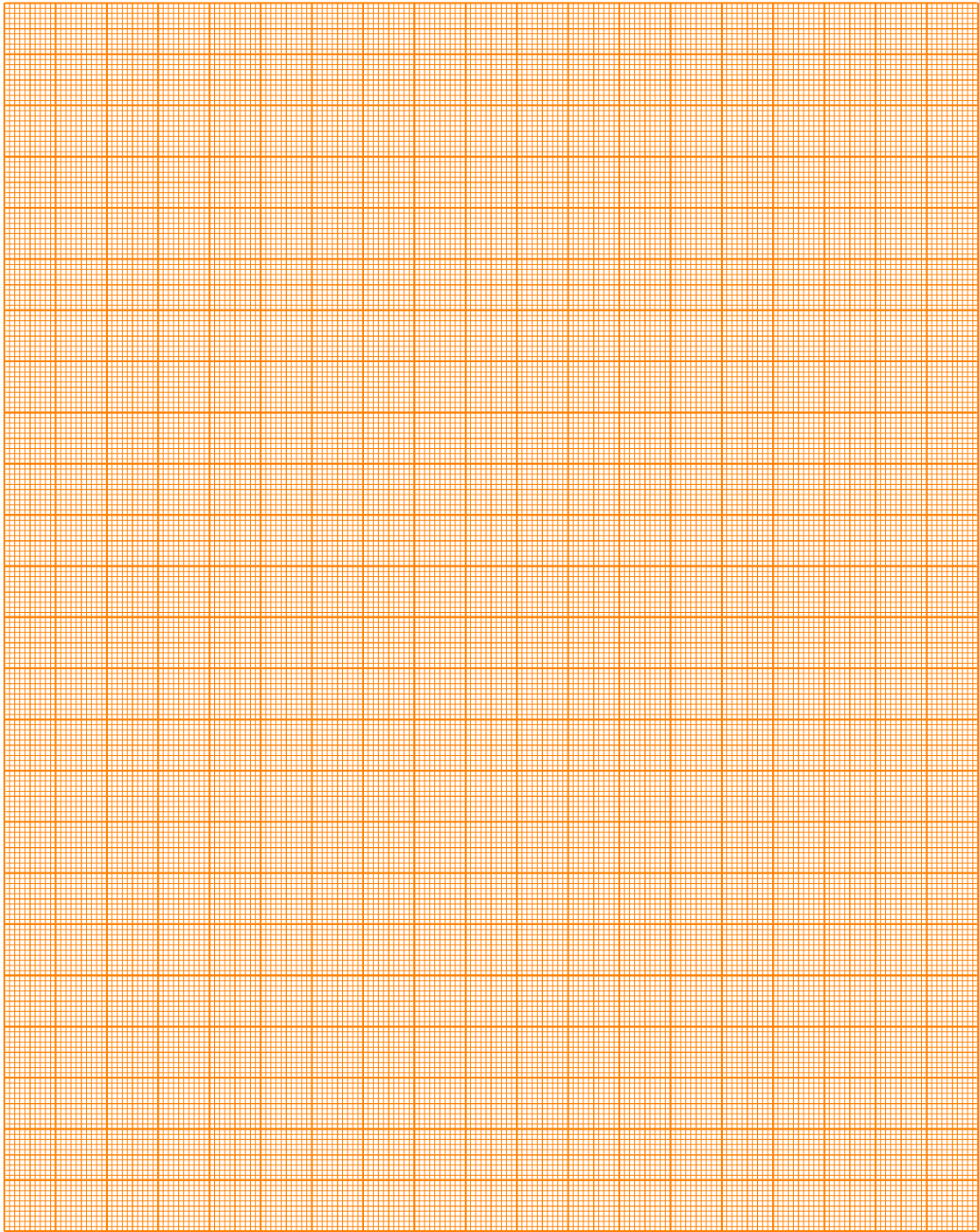
Deel D: Data analyse (5.7 punten)

D.1 (0.3 pt)

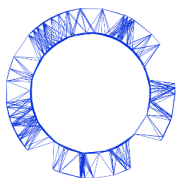
Noteer F in de tabel die in **A.3.** geïntroduceerd is.



D.2 (0.4 pt)



Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

A2-7

NLD (Netherlands)

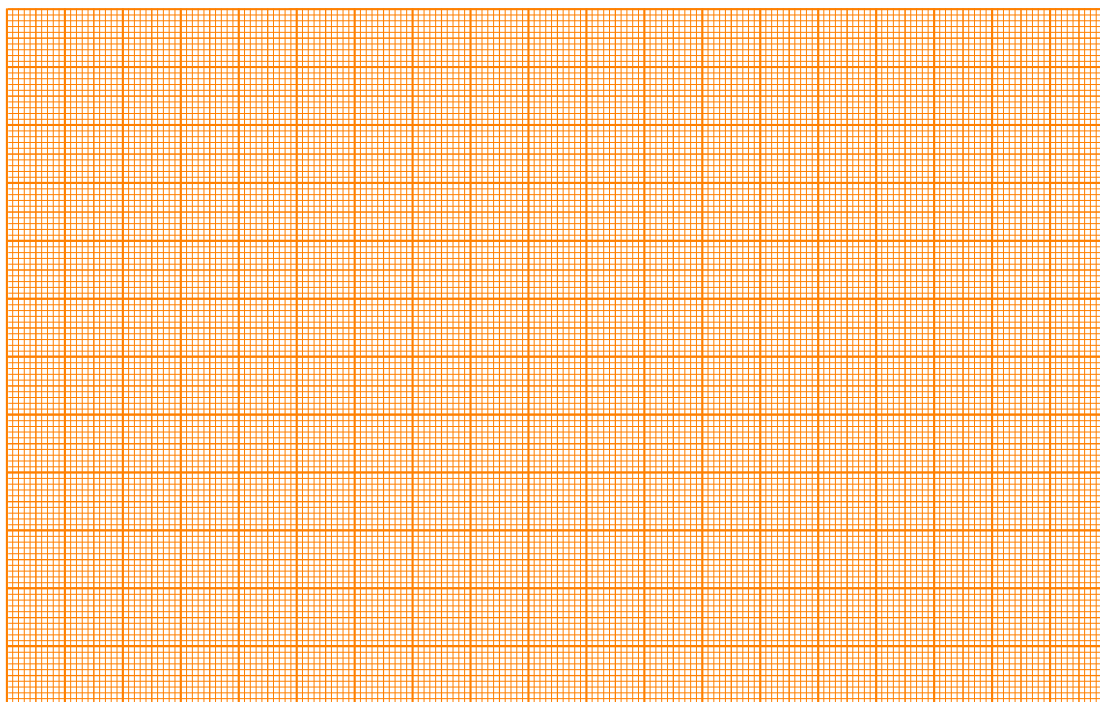
D.3 (0.3 pt)

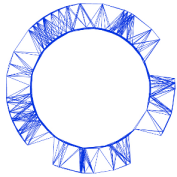
$\epsilon =$ $\pm$

D.4 (0.3 pt)

$\beta =$

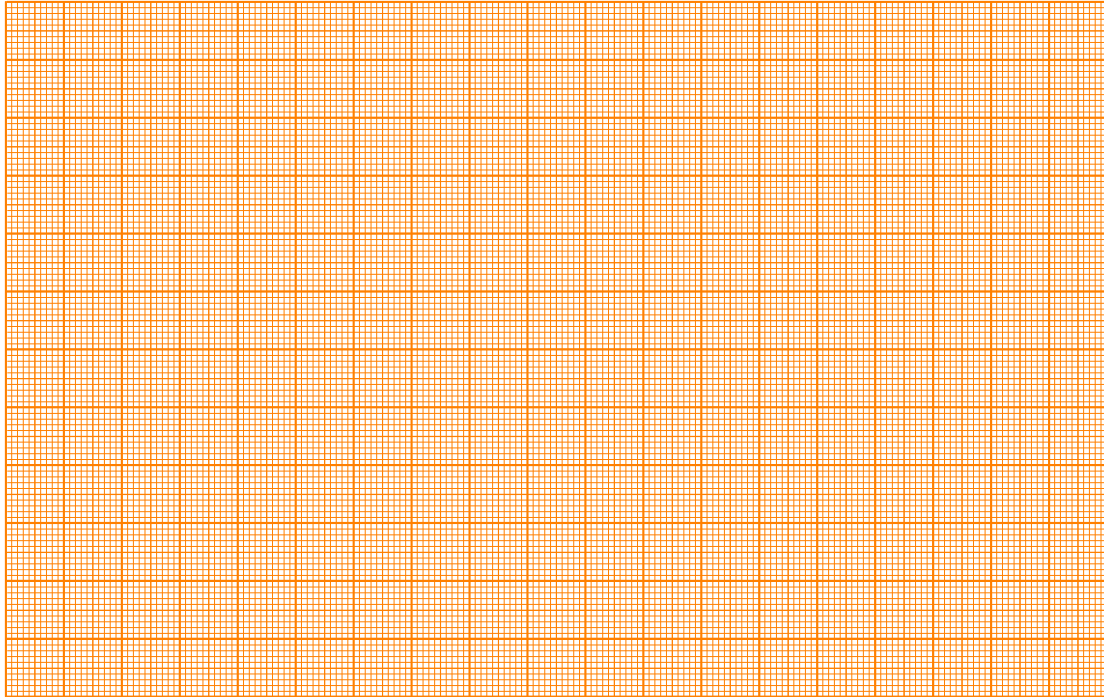
D.5 (0.4 pt)



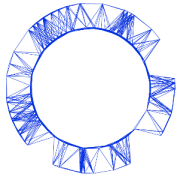


D.6 (0.5 pt)

Noteer $\frac{dF}{dt}$ in de tabel die in **A.3.** geïntroduceerd is.



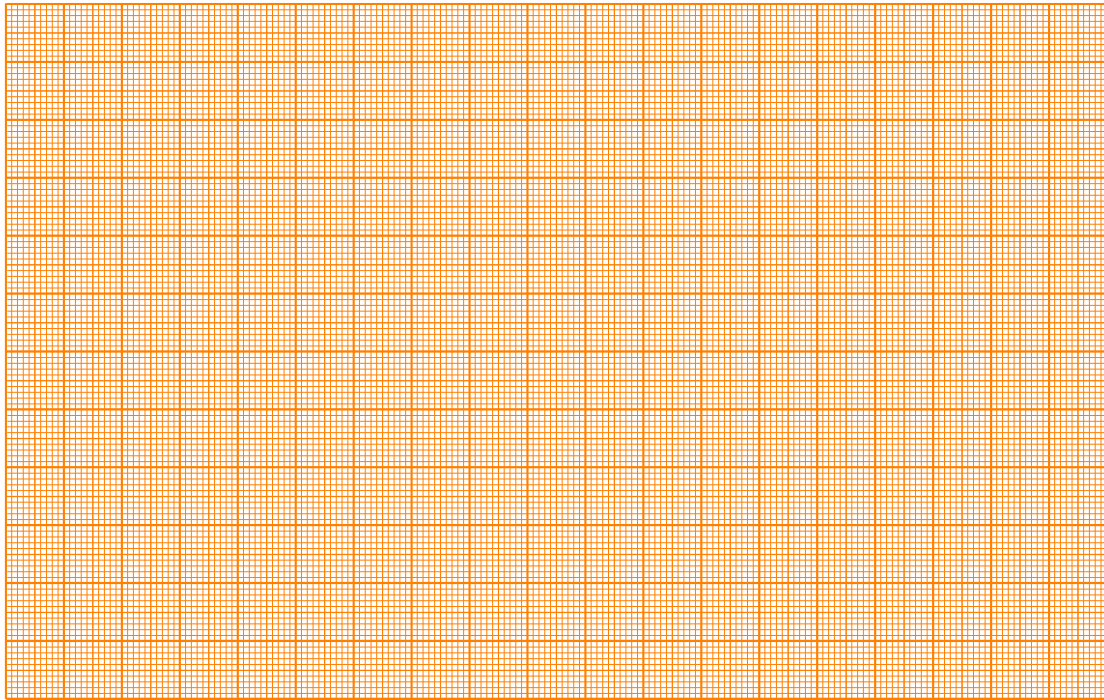
D.7 (0.3 pt)



D.8 (1.0 pt)

$$E_1 =$$

$$\tau_1 =$$

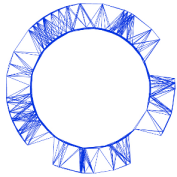


D.9 (0.3 pt)

$$E_0 =$$

D.10 (0.3 pt)

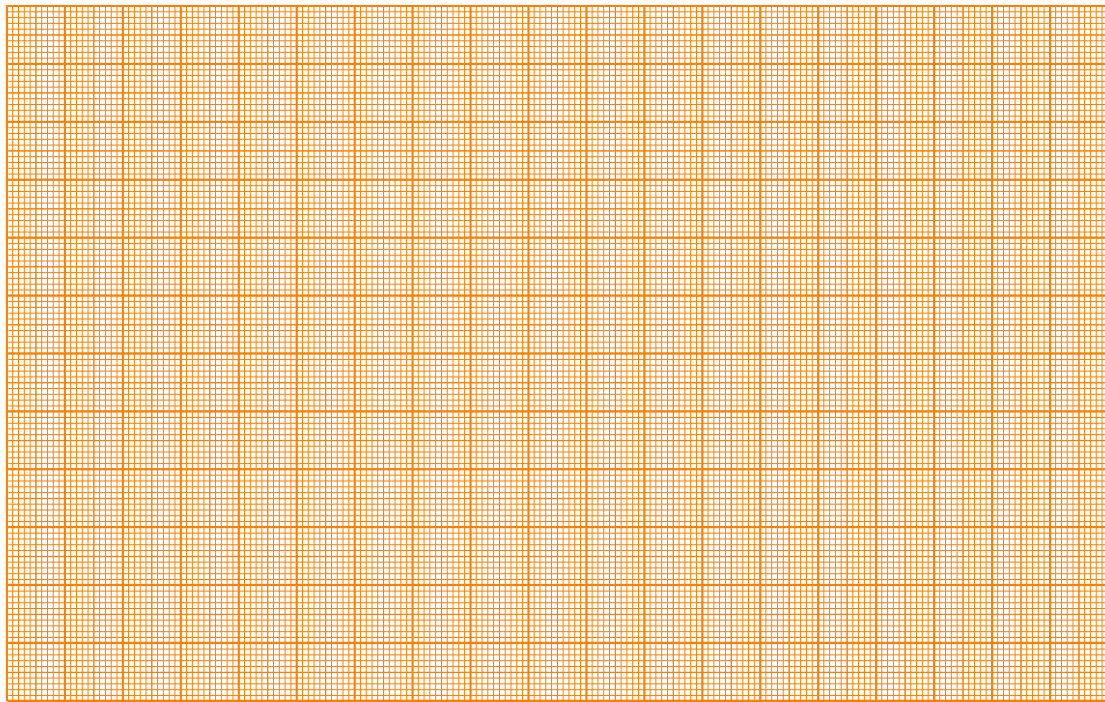
Noteer $y(t)$ in de tabel die in **A.3.** geïntroduceerd is.



D.11 (1.0 pt)

$$E_2 =$$

$$\tau_2 =$$

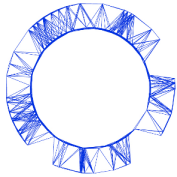


D.12 (0.3 pt)

$$t_i =$$

$$t_f =$$

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

A2-11

NLD (Netherlands)

D.13 (0.3 pt)

$\tau_3 =$

Deel E: Bepaling van E bij constante belasting (0.6 punten)

E.1 (0.6 pt)

$E =$

$\frac{E-E_0}{E_0} =$