



Algemene instructies voor de experimentele toets

De experimentele toets duurt 5 uur en bestaat uit 2 verschillende proeven. Elke proef is 10 punten waard., samen dus 20 punten. Begin met het eerste experiment voordat je met het tweede experiment start. Lees de instructies aan het begin goed voordat je aan de opdrachten begint. Doe je best!

Op je tafel staat het materiaal dat je voor de eerste proef moet gebruiken (inclusief het materiaal in de doos op je tafel). Het materiaal voor de tweede proef zit in een doos die onder je tafel staat. Aan het einde van de toets stop je de materialen weer terug in de daarvoor bestemde dozen, zoals je ze hebt gekregen, behalve voor het waterreservoir in experiment 2 (omdat het na het experiment vol met water zit).

Het begin en het einde van de toets wordt aangegeven met een geluidssignaal. Voor dit geluidssignaal mag je nog niet de enveloppen openen en ook nog niet in de dozen kijken. Elk uur zal de verstreken tijd worden aangegeven. Zo ook een kwartier voor het einde van de toets.

Tijdens de toets

- Gebruik enkel de geleverde pen.
- Er zijn speciale antwoordbladen voor je antwoorden. Noteer je waarnemingen/resultaten/antwoorden in de juiste tabellen, kaders of grafieken op het betreffende antwoordblad (A). Voor elk onderdeel zijn ook lege werkbladen (aangegeven met een W) om berekeningen en/of uitwerkingen te maken. Er is extra grafiek papier aan het eind van de antwoordbladen (aangegeven met A). **Let er op dat je bladen gebruikt die bij het betreffende onderdeel horen** (controleer het nummer in de header van het blad). Zet een kruis door iets dat je hebt opgeschreven maar niet beoordeeld wilt hebben. Gebruik alleen de voorkant van elk blad.
- Wees kort en bondig in je antwoorden. Gebruik waar mogelijk vergelijkingen, logische operatoren en tekeningen om je resultaten te verduidelijken. Vermijd het gebruik van lange zinnen.
- Je antwoorden moeten weergegeven worden met het juiste aantal significante cijfers. Ook moet, indien nodig, een foutenanalyse gegeven worden. Maak daarnaast verstandige keuzes voor wat betreft het aantal datapunten en hoe vaak je metingen herhaalt, tenzij daarover expliciete instructies gegeven worden.
- Het is mogelijk onderdelen te doen zonder dat je de voorgaande onderdelen opgelost hebt.
- Je mag zonder toestemming je werkgebied niet verlaten. Als je enige hulp nodig hebt, maak je dat kenbaar aan een surveillant m.b.v. een van de drie vlaggetjes. ("WC" als je naar de WC moet, "H₂O" als je water nodig hebt, of "Help" voor extra papier of alle andere gevallen.)

Aan het einde van de toets

- Aan het einde van de toets moet je direct stoppen met schrijven.
- Leg voor elk onderdeel de antwoordbladen in de volgende volgorde: Bovenaan Voorblad (cover sheet C), dan de vragen (questions Q), vervolgens antwoorden (answer sheets A) en tenslotte onderaan werkbladen (worksheets W), inclusief de lege of extra bladen (Z).
- Stop alle bladen van één experiment in dezelfde envelop. Controleer of je leerlingcode zichtbaar is door het venster van de beide enveloppen. Stop de twee enveloppen samen met dit blad met algemene instructies in de grote envelop. Het is niet toegestaan om bladen uit de toetsruimte mee te nemen.
- Laat je schrijfgerei achter op je tafel.
- Stop de materialen van de proeven terug in de betreffende dozen, zoals je ze hebt gekregen, behalve voor het waterreservoir in experiment 2 (omdat het na het experiment vol met water zit).
- Wacht bij je tafel totdat je enveloppen zijn opgehaald. Een gids zal je naar de uitgang begeleiden.



Optische metingen

In dit experiment gaan we van een aantal voorwerpen de optische eigenschappen bepalen. Daarbij proberen we de hoogst mogelijke nauwkeurigheid te bereiken, gegeven de beschikbare apparatuur.

Opmerking: onder je tafel vind je twee grote waterflessen die je nodig hebt in het tweede experiment - **drink er niet van**.

Zet 'm op!

In onderdeel A gebruiken we twee verschillende manieren om de brekingsindex van een transparante schijf te bepalen. De eerste manier is traditioneel, de tweede manier daarentegen enigszins origineler dan de eerste, en kan daarnaast een grotere nauwkeurigheid opleveren.

In onderdeel B bepalen we de verhouding tussen de golflengte λ en de tralieconstante van de tralie d . Hierbij proberen we de hoogst mogelijke nauwkeurigheid te verkrijgen.

In onderdeel C bepalen we de brekingsindex van een driehoekig prisma. Hierbij proberen we wederom de hoogst mogelijke nauwkeurigheid te verkrijgen.

Voor deze experimenten zal de toetsruimte voor 100 minuten verduisterd worden. Deze 100 minuten beginnen 20 minuten na de start van de toets. Je mag de bureaulamp gebruiken als je licht nodig hebt. Het is handiger om de metingen van onderdeel A in het donker uit te voeren, het is echter mogelijk om de meeste metingen ook bij licht uit te voeren.

Verder mag je de wanden van je werkruimte als scherm gebruiken. Je mag dan ook, indien nodig, plakband op deze wanden aanbrengen.

In deze experimenten gebruik je de diodelaser als lichtbron.

Laser veiligheidsinstructies:

- **Kijk NOOIT recht in de laserstraal!**
- De laserstraal is in alle experimenten horizontaal. Als je een positie van de laserstraal op een oppervlak meet, **wees er dan zeker van dat je hoofd ALTIJD zich altijd hoger dan de laserstraal bevindt**.
- Richt de laser niet in de richting van de opening van je werkruimte.
- Doe de laser m.b.v. de schakelaar uit als je niet aan het meten bent.

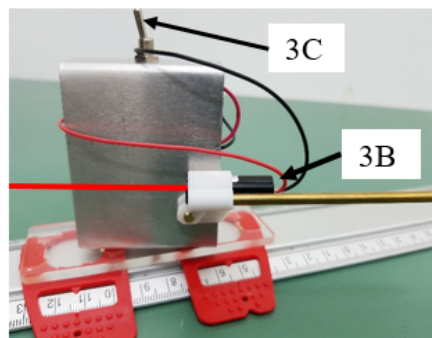
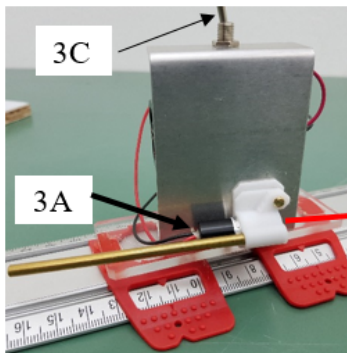
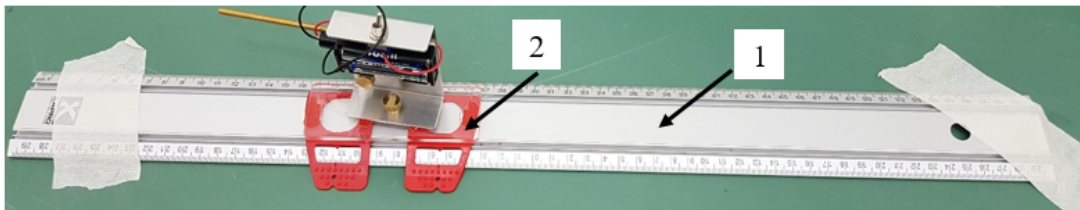
Lijst van apparatuur

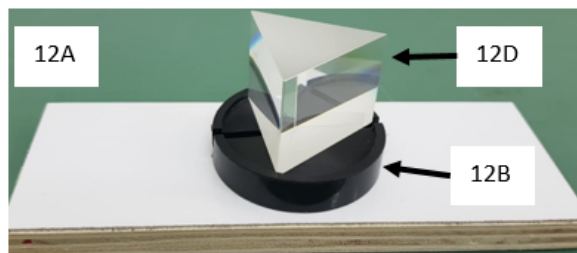
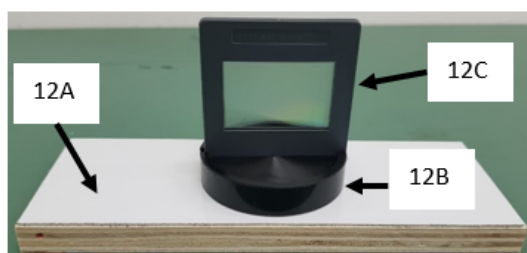
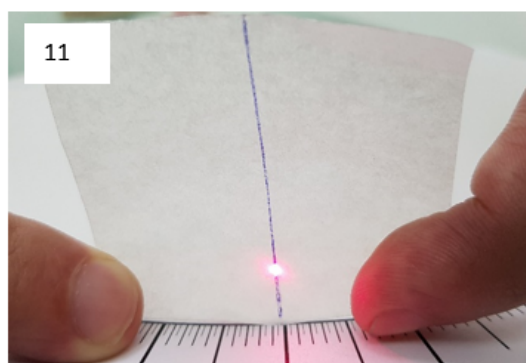
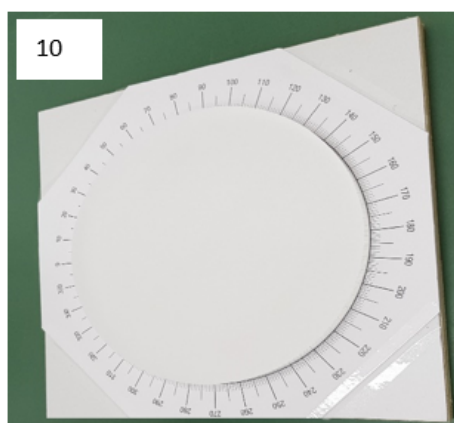
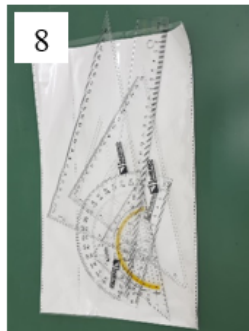
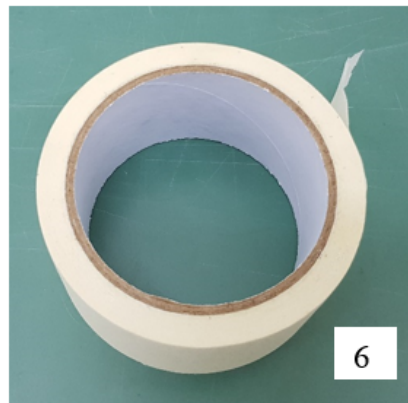
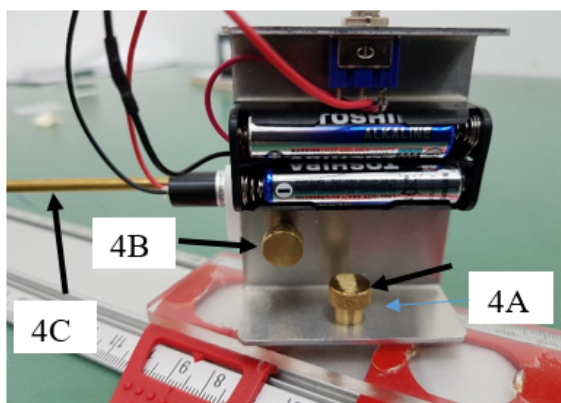
Onderdelen 1-9 worden gebruikt in alle onderdelen van de opgave, onderdelen 10-12 worden gebruikt tijdens bepaalde deelopdrachten.

Je maakt gebruik van verschillende optische materialen. Raak de verticale zijden daarvan niet aan, zo voorkom je dat deze vies worden.

1. Liniaal, lengte 60 cm
2. Schuif, kan over de liniaal heen en weer geschoven worden
3. Diodelaser, gemonteerd op de schuif. De laser heeft twee standen in hoogte: lage stand 3A voor onderdeel A van het experiment en hoge stand 3B voor onderdelen B en C van het experiment. De aan/uit schakelaar van de laser is in de figuur weergegeven als 3C.
4. De schroeven 4A en 4B om de laser vast te zetten en bepalen daardoor de stabiliteit ervan. Gebruik het kleine metalen staafje 4C om de richting van de laser te veranderen. Roteer deze 4C 180 graden om de hoogte van de laser te veranderen. Roteer de laser niet rond de as van de straal, want de polarisatie van de laserstraal is vooraf ingesteld.

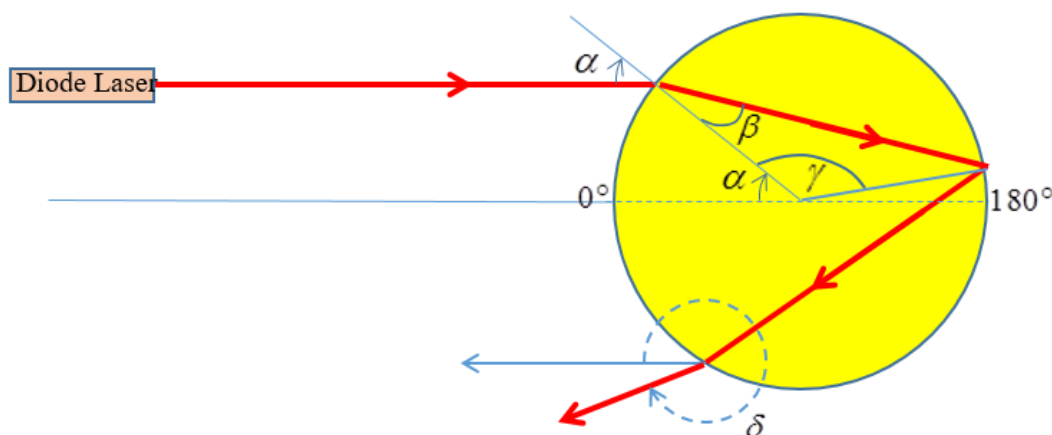
5. Scherm: je kan gebruik maken van de wanden van je werkruimte, je mag ervan uitgaan dat deze loodrecht op elkaar staan.
6. Een rol plakband. Plakband kan gebruikt worden om apparatuur vast te maken aan de tafel.
7. Rolmaat
8. Verschillende linialen
9. Bureaulamp
10. Voor onderdeel A: Ronde transparante schijf met een diameter van 20,00 cm, gemonteerd op een gradenboog. Dit geheel is op een houten grondplaat geplakt. Voor gebruik moeten de 4 kleine houten kubusjes verwijderd worden.
11. Perkamentpapier dat als een transparant scherm gebruikt kan worden. Het kan (eventjes) tegen de zijkant van de schijf gehouden worden om zodoende het punt te bepalen waar de laserstraal de schijf verlaat, ook om zodoende de gepolijste zijkant van de schijf (onderdeel A) niet vies te maken. De plek waar de laserstraal de schijf verlaat is nauwkeuriger te bepalen door een verticale lijn op het papier te tekenen, zoals in de figuur te zien is.
12. Een houten plankje (12A) en een cilindervormige houder (12B). Deze houder kan rond een verticale as draaien. Op deze houder kan een tralie (12C) of een driehoekig prisma (12D) geplaatst worden.





Deel A: De brekingsindex van een schijf (5.5 punten)

In dit onderdeel wordt de brekingsindex van een transparante schijf bepaald door te kijken naar het pad dat een lichtstraal aflegt als het in de schijf wordt gebroken en gereflecteerd.



Een schematische weergave van het experiment.

Definities en symbolen:

α	Hoek van inval tussen de schijf en de invallende bundel
$2\Delta\alpha$	De hoekspreiding in de invalshoek, oftewel de grootte van het bereik van waarden van α uitgezonden door de laser
β	Hoek van breking in de schijf
γ	$= 180^\circ - 2\beta$
n	De brekingsindex van het materiaal van de schijf
N	Het aantal keren dat de straal de zijkant van de schijf raakt voordat de straal breekt van de schijf naar de lucht. (In de figuur hierboven $N = 3$)
δ	De hoek tussen de richting tegengesteld aan de richting van de invallende straal en de richting van de uitgaande straal, gemeten met de klok mee. (De figuur hierboven laat de hoek δ zien voor $N = 3$)
$2\Delta\delta$	De hoekspreiding van de hoek δ

Het is mogelijk om aan te tonen dat de hoeken α , β en δ aan elkaar gerelateerd zijn volgens:

$$\delta = 2\alpha + (N - 1)(180^\circ - 2\beta) . \quad (1)$$

Je mag deze vergelijking gebruiken zonder deze eerst aan te tonen.

Bevestig de liniaal met plakband aan de tafel om zodoende de invalshoek van de laserstraal te kunnen instellen. Pas vervolgens de laser zodanig aan zodat je de hoek van inval gemakkelijk kan meten.



Plaats vervolgens de schijf op de tafel en zet deze vast door over de hoeken van het houten plankje (12A) plakband aan te brengen. Je kan vervolgens de helling van de laser aanpassen met metalen staafje 4C.

De laser kan, zoals eerder beschreven, ingesteld worden op twee hoogtes. De lage stand voor onderdeel A en de hoge stand voor onderdelen B en C.

De laser is vooraf ingesteld zodat de invallende bundel zgn. S-gepolariseerd is. Dat is een polarisatie waarbij de reflectie groter is. **Verander deze polarisatie van de inkomende bundel niet!** (Roteer de laser niet rond de as van de bundel.)

- | | | |
|------------|--|-------|
| A.1 | Maak een schets van je meetopstelling waarin de liniaal met de schuif (en laser) en de schijf zijn weergegeven. Geef hier een pad van laserstraal aan. Laat ook zien waar de invalshoek α te vinden is.
Maak een meetserie tussen de hoeken $15^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$ en noteer $\alpha, \Delta\alpha, \delta, \Delta\delta$ in Tabel 1.
Opmerking: Om δ te meten is het handiger om $\delta/2$ direct op de schijf te meten. | 1.0pt |
|------------|--|-------|

- | | | |
|------------|---|-------|
| A.2 | Maak, met gebruik van de metingen uit het vorige onderdeel, een gepaste grafiek waarmee je de brekingsindex n en de bijbehorende fout Δn kan bepalen. Als je gebruik gaat maken van extra berekende waarden, gebruik dan daarvoor de extra kolommen in Tabel 1.
Bepaal n en Δn . | 1.0pt |
|------------|---|-------|

- | | | |
|------------|--|-------|
| A.3 | Maak, met behulp van je metingen in A1, een grafiek van δ als functie van α . Geef bij elk meetpunt de waarden van $\Delta\delta$ en $\Delta\alpha$ aan met foutenmarges (error bars).
Verricht vervolgens een extra meting om accuraat de minimale δ en bijbehorende α te vinden. Geef deze aan met $\delta_{\min}$ en $\alpha_{\min}$.
Om dit minimum nauwkeurig te vinden, kun je de wanden van je werkruimte gebruiken als scherm voor de uitgaande bundel. | 0.5pt |
|------------|--|-------|

Een tweede manier om de brekingsindex te meten

In dit onderdeel leid je een alternatieve methode af waarmee je erg nauwkeurige resultaten kan verkrijgen. Ook al moet je met de hoogst haalbare nauwkeurigheid meten, **er is geen foutenanalyse vereist**.

Desondanks moet je de vergelijkingen die je gebruikt om je resultaten te verkrijgen, gedetailleerd weergeven. Noteer ze op de antwoordbladen.

- | | | |
|------------|--|-------|
| A.4 | Maak, gebaseerd op het gedrag van de grafiek in A3, een keuze voor de optimale hoek om metingen te doen om de brekingsindex te vinden. Leid met de door jou bedachte methode, een vergelijking af die je kan gebruiken om de brekingsindex te bepalen. | 0.7pt |
|------------|--|-------|

A.5 Voer voor $N = 3$ de noodzakelijke metingen uit om daarmee de brekingsindex met grote nauwkeurigheid te kunnen uitrekenen. Gebruik hiervoor de in A4 ontwikkelde methode. 0.8pt

- Maak een schets van de situatie met daarin de schijf en het bundelpad en geef in de schets de grootheden aan die je hebt gemeten.
- Noteer de metingen die je hebt gedaan.
- Analyseer je metingen en bepaal hiermee de brekingsindex n van de schijf met de hoogst haalbare nauwkeurigheid. Je kan hierbij gebruik maken van het extra grafiekpapier.

A.6 Herhaal het proces van de vorige opdracht voor $N = 4$ en $N = 5$. Een schets van de situatie en de bundel is niet nodig. 1.5pt

- Noteer de metingen die je hebt gedaan voor $N = 4$.
- Analyseer je metingen voor $N = 4$ en bepaal hiermee de brekingsindex n van de schijf met de hoogst haalbare nauwkeurigheid.
- Noteer de metingen die je hebt gedaan voor $N = 5$.
- Analyseer je metingen voor $N = 5$ en bepaal hiermee de brekingsindex n van de schijf met de hoogst haalbare nauwkeurigheid.
- Je hebt nu voor $N = 3$, $N = 4$ en $N = 5$ driemaal een brekingsindex bepaald. Bereken met de verkregen resultaten de gemiddelde waarde $\langle n \rangle$ van de brekingsindex.

Deel B: De parameters van een tralie (2.5 punten)

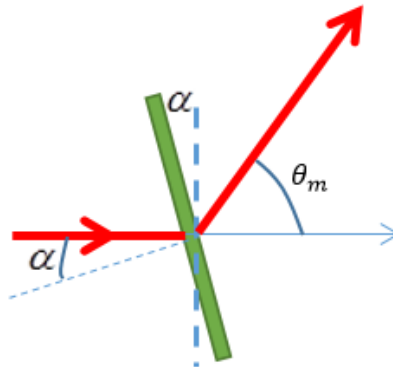
In dit onderdeel wordt niet dat verwacht dat je een foutenanalyse uitvoert.

In dit onderdeel zullen we de verhouding λ/d bepalen, waarbij λ de golflengte is en d de tralieconstante (de afstand tussen opeenvolgende spleten). Wanneer een laserstraal een tralie passeert, wordt de hoek θ_m tussen de richting van de invallende straal en de richting van het intensiteitsmaximum (van orde m) gegeven door:

$$d \cdot (\sin \alpha + \sin(\theta_m - \alpha)) = m\lambda \quad (2)$$

waarbij

m	de diffractie-orde
α	de invalshoek tussen de bundel en het tralie
θ_m	de hoek tussen de oorspronkelijke richting van de bundel en de richting waarin het maximum van orde m wordt verkregen
d	de tralieconstante – de afstand tussen de middens van twee opeenvolgende spleten



Hogere orde diffracties laten een betere scheiding van de golflengtes toe. Bijgevolg leidt een nauwkeurige meting die gebruik maakt van een hogere orde maximum tot een kleinere relatieve fout van de waarde λ/d .

Draai schroef 4B los en wijzig de hoogte (verticaal niveau) van de laser. Draai de laser over 180 graden rond de horizontale as loodrecht op de richting van de bundel (wees voorzichtig met de draden), zodat je de toestand krijgt die wordt getoond in figuur 3B. Hierdoor zal je delen B en C van de opgave kunnen uitvoeren. Gebruik de metalen staaf 4C voor het fijnregelen van de laser zodat deze correct in hoogte is uitgelijnd voor metingen waarbij gebruik wordt gemaakt van het tralie. Lijn de laserbundel zodanig uit, hij loodrecht invalt op het scherm. Plaats het tralie in de uitsparing in houder 12B. De correcte oriëntatie van het tralie wordt aangegeven door een sticker die aan één zijde van het tralie is bevestigd. Zorg ervoor dat de zijde met de sticker naar de laser is gericht en dat de sticker zich aan de bovenkant van het tralie bevindt. **Noteer de code van jouw tralie (ID) in het daarvoor voorziene vakje op de antwoordbladen.**

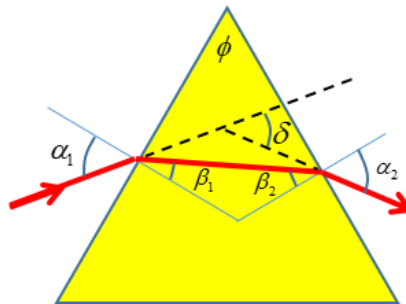
In dit onderdeel kan het handig zijn het idee, waarvan je al gebruikt hebt gemaakt tijdens de tweede methode in deel A, opnieuw te gebruiken.

- | | | |
|------------|---|-------|
| B.1 | <ul style="list-style-type: none"> • Maak op je antwoordblad een schets van de opstelling. Geef in deze schets de positie van de laser op de tafel weer, evenals het tralie, het bundelpad, de punten waar deze het scherm raken en de grootheden die je hebt opgemeten. • Doe de nodige metingen voor $m = 1$. Noteer je meetresultaten en bepaal hieruit de verhouding λ/d. • Doe de nodige metingen voor $m = 2$. Noteer je meetresultaten en bepaal hieruit de verhouding λ/d. | 0.7pt |
|------------|---|-------|

- | | | |
|------------|---|-------|
| B.2 | <p>Bepaal de verhouding λ/d door gebruik te maken van hogere orde diffracties ($m > 2$).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Maak op je antwoordblad twee schetsen van de opstelling, voor $m = 3$ en voor $m = 4$. Geef in de schets de laser, het tralie en het bundelpad weer, evenals de punten waar de laserbundel het scherm raakt en de grootheden die je hebt opgemeten. • Doe de nodige metingen voor beide ordes $m = 3, 4$. Noteer je meetresultaten, en bepaal voor beide waarden m de gemeten verhouding λ/d. | 1.8pt |
|------------|---|-------|

Deel C: De brekingsindex van een driehoekig prisma (2.0 punten)

Jullie krijgen een bij benadering gelijkzijdig driehoekig prisma. De drie zijden van het prisma zijn vlak en gepolijst. De hoeken van het prisma kunnen afwijken van 60° maar nooit meer dan 0.7° . De hoeken van het prisma hoeven niet nagemeten te worden. Het doel van dit onderdeel is het bepalen van de brekingsindex van het materiaal waaruit het prisma is gemaakt. Om de onnauwkeurigheid van de brekingsindex te reduceren is het mogelijk de kleine afwijkingen in de hoeken van het prisma te corrigeren door gebruik te maken van de kleine-hoekenbenadering ($\sin x \approx x, \cos x \approx 1$, wanneer x wordt uitgedrukt in radialen). In dit onderdeel wordt je gevraagd **een foutenanalyse uit te voeren**. De figuur toont een voorbeeld van een straal die het prisma langs één zijde binnengaat en er langs een andere zijde weer uitkomt.



Plaats de liniaal met schuif en laser op een geschikte plaats op je tafel die je toelaat de hoogst mogelijke nauwkeurigheid in de meetresultaten te bereiken.

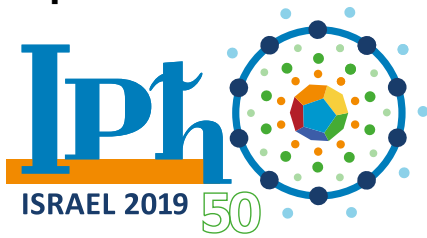
Plaats het prisma in houder 12B.

C.1 In het symmetrisch geval ($\alpha_1 = \alpha_2$), geldt voor een gelijkzijdig prisma de volgende relatie: $n = 2\sin(\delta_{\text{sym}}/2 + 30^\circ)$. 0.4pt

- Bedenk een methode die toelaat de brekingsindex van het prisma te bepalen met een zo hoog mogelijke nauwkeurigheid.
- Verduidelijk op je antwoordbladen welke formules je gebruikt om de brekingsindex te bepalen.

C.2 1.6pt

- Noteer op de antwoordbladen welke grootheden je hebt gemeten en welke meetwaarden dit opleverde (inclusief de onnauwkeurigheden).
- Bereken de brekingsindex van het prisma voor de golflengte van de gebruikte laser, en de onnauwkeurigheid hiervan.



Optische metingen - Antwoordblad

Deel A: De brekingsindex van een schijf (5.5 punten)

A.1 (1.0 pt)

Schets van de opstelling voor $N = 3$:

Vul tabel 1 in op volgende bladzijde.

A.2 (1.0 pt)

Vul indien nodig tabel 1 op volgende bladzijde in.
Teken een geschikte grafiek op het geleverde milimeterpapier.

Analyse van de grafiek:

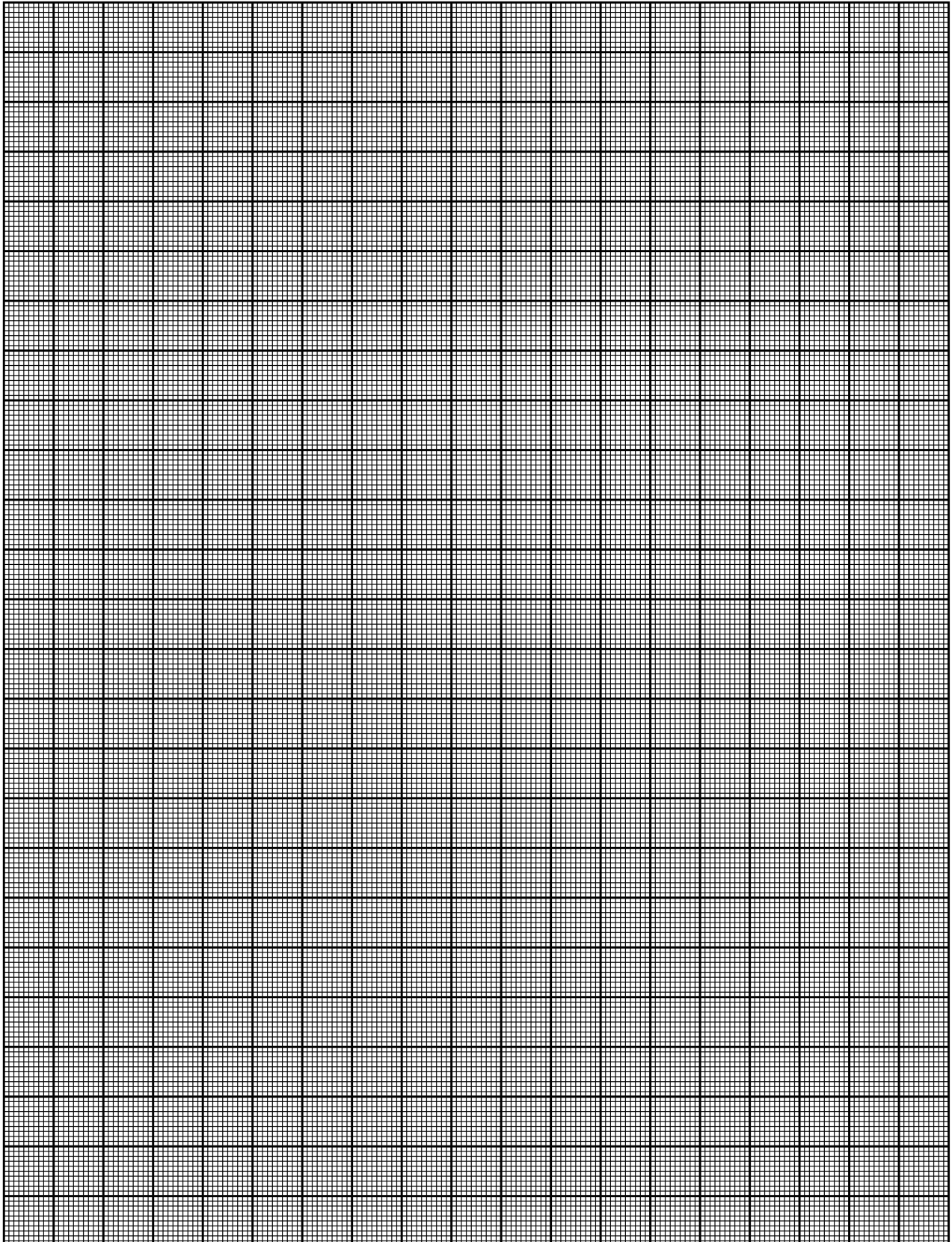
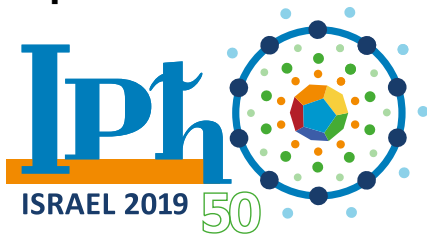
Resultaten:

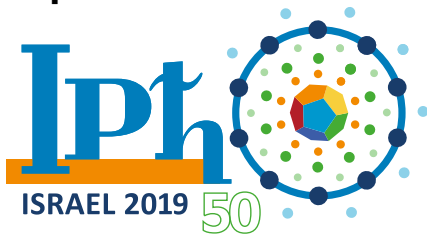
$n =$

$\Delta n =$

Tabel 1, te gebruiken voor opgaven A1 en A2:

[illegible]



**A.3** (0.5 pt)

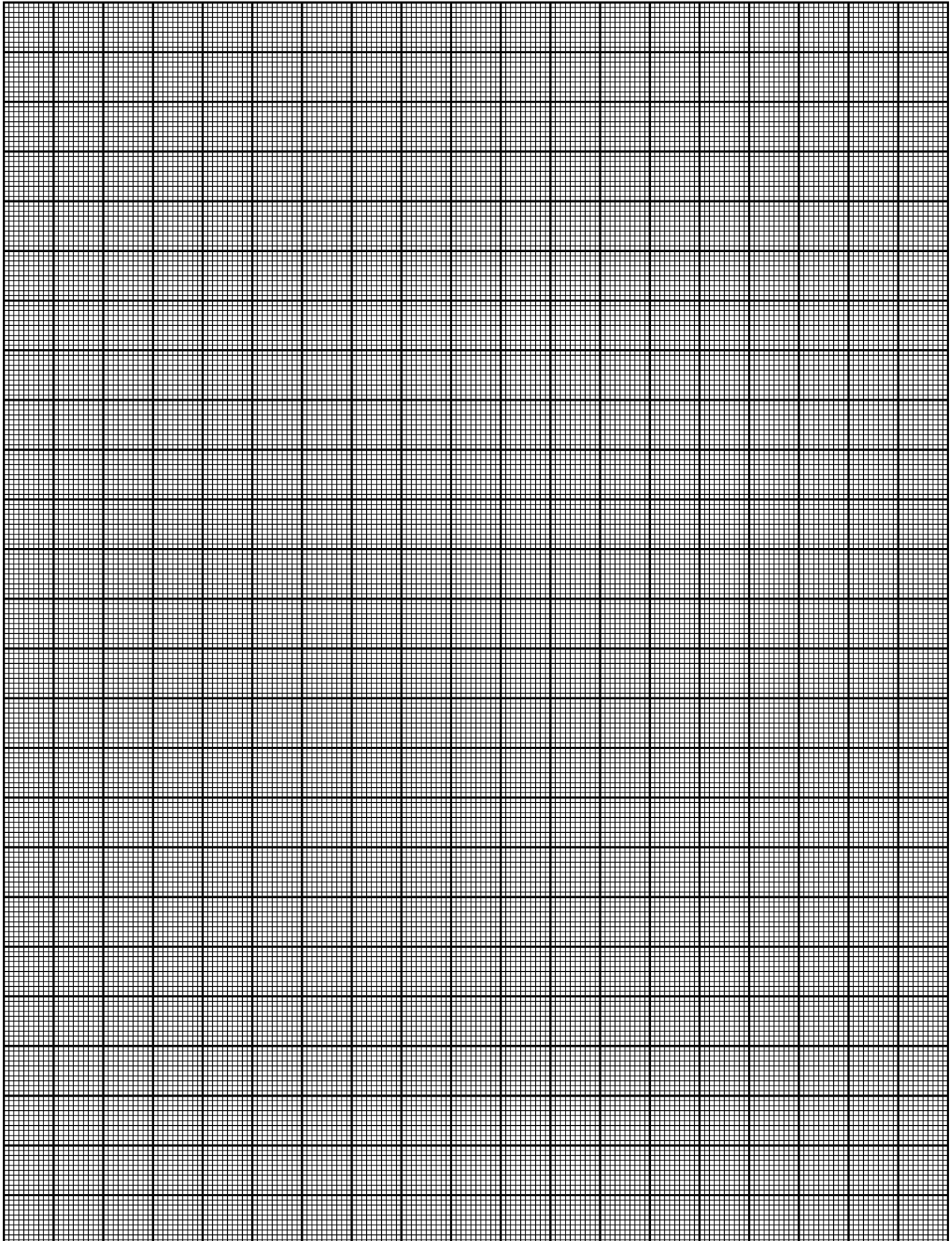
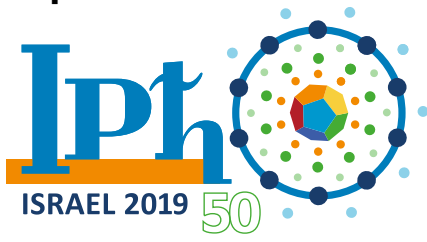
Geef δ weer als functie van α op het geleverde milimeterpapier.

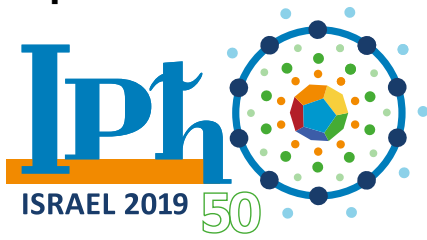
$$\delta_{\min} =$$

$$\alpha_{\min} =$$

A.4 (0.7 pt)

Vergelijkingen die werden gebruikt voor het bepalen van de brekingsindex voor een invalshoek naar keuze:

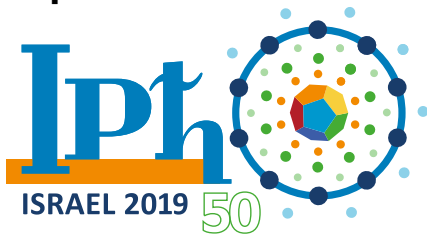




A.5 (0.8 pt)

Schets van de schijf en de bundel, waarbij in de schets de grootheden worden aangegeven die je hebt gemeten:

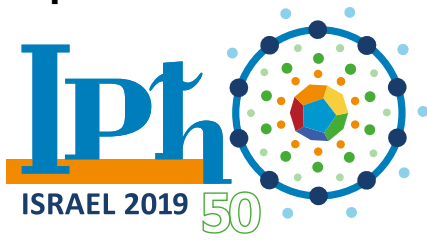
Metingen uitgevoerd bij $N = 3$:



A.5 (cont.)

Analyse en meetresultaten:

$n =$

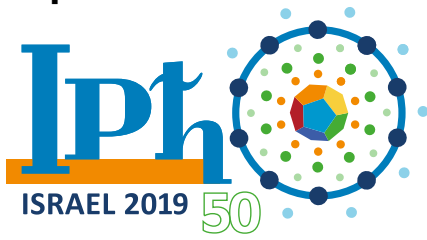


A.6 (1.5 pt)

Metingen uitgevoerd bij $N = 4$:

Analyse en meetresultaten:

$n =$



A.6 (cont.)

Metingen uitgevoerd bij $N = 5$:

Analyse en meetresultaten:

$n =$

Gemiddelde waarde van de brekingsindex gevonden uit de metingen bij $N = 3$, $N = 4$ en $N = 5$:

$\langle n \rangle =$

$\Delta n =$

Deel B: Parameters van een tralie (2.5)

B.1 (0.7 pt)

Code van het gebruikte tralie (ID):

Werkruimte en tafel, schets van de opstelling die gebruikt werd om λ/d te meten.

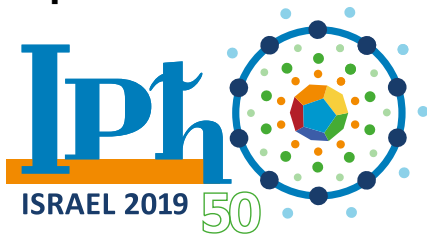


Metingen uitgevoerd voor $m = 1$:

Analyse en meetresultaten:

$\theta_1 =$

$\lambda/d =$



B.1 (cont.)

Metingen uitgevoerd voor $m = 2$:

Analyse en meetresultaten:

$\theta_2 =$

$\lambda/d =$

B.2 (1.8 pt)

Werkruimte en tafel, schets van de opstelling die gebruikt werd om λ/d te meten voor $m = 3$:



Metingen uitgevoerd voor $m = 3$:

Analyse en meetresultaten:

$\theta_3 =$

$\lambda/d =$

B.2 (cont.)

Werkruimte en tafel, schets van de opstelling die gebruikt werd om λ/d te meten voor $m = 4$:



Metingen uitgevoerd voor $m = 4$:

Analyse en meetresultaten:

$\theta_4 =$

$\lambda/d =$

Deel C: Brekingsindex van een driehoekig prisma (2.0 punten)

C.1 (0.4 pt)

Vergelijkingen die werden gebruikt voor het bepalen van de brekingsindex van het prisma:

C.2 (1.6 pt)

Tabel met de meetresultaten:

Analyse en meetresultaten:

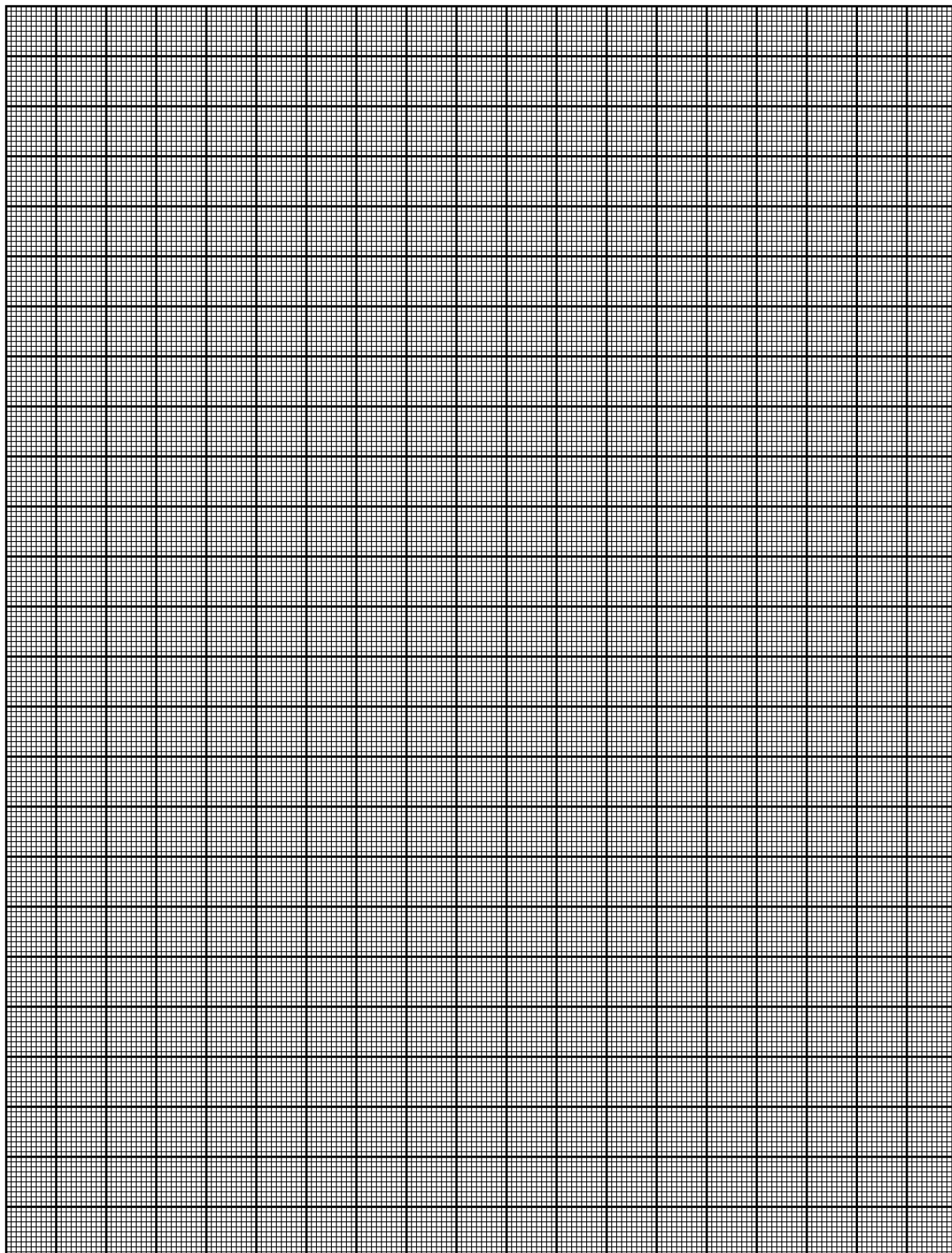
$n =$

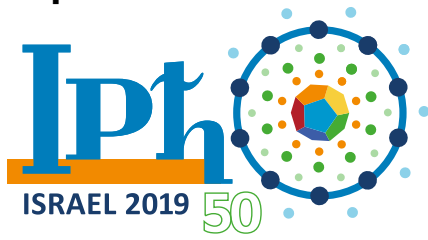
$\Delta n =$



A1-15

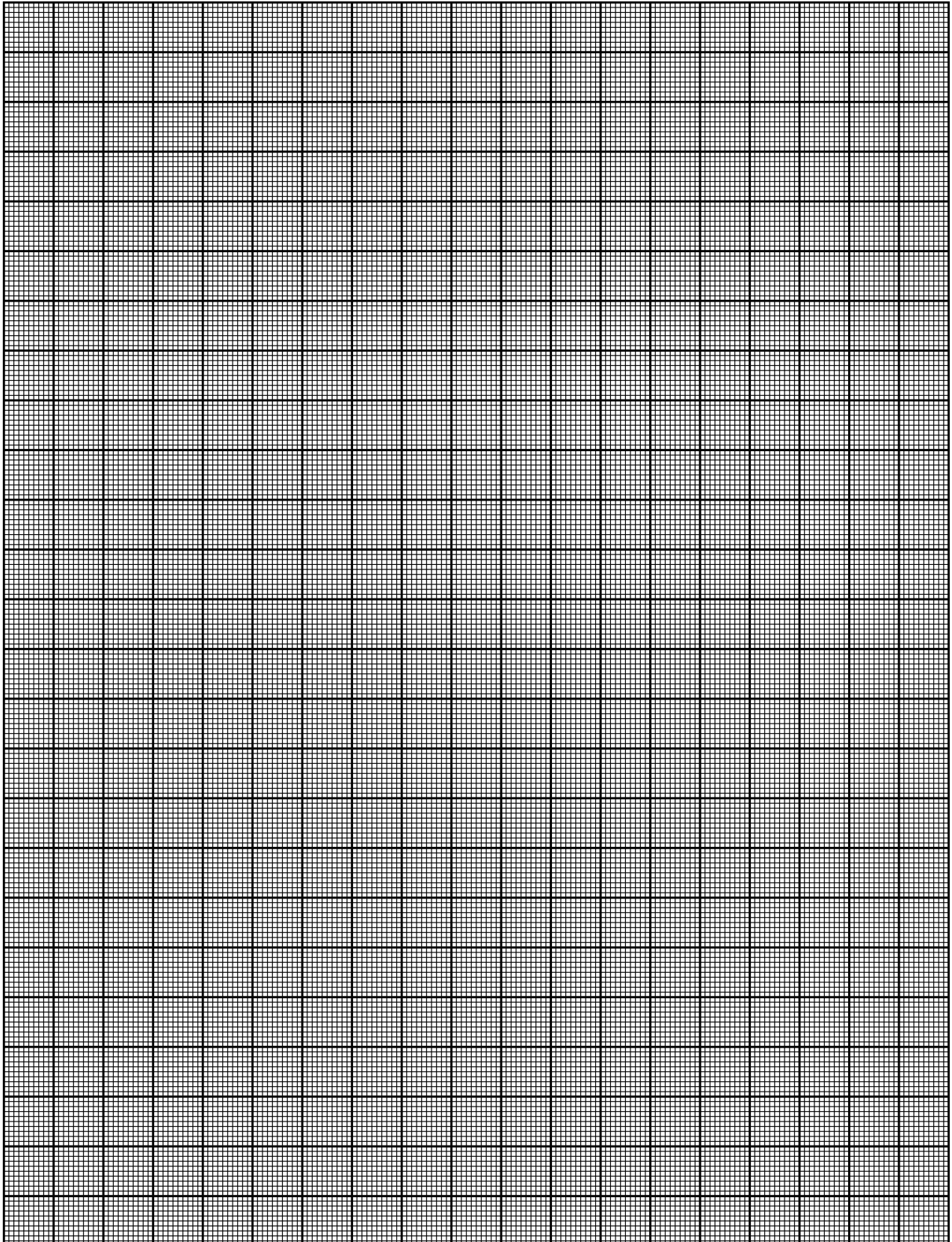
Dutch (Netherlands)

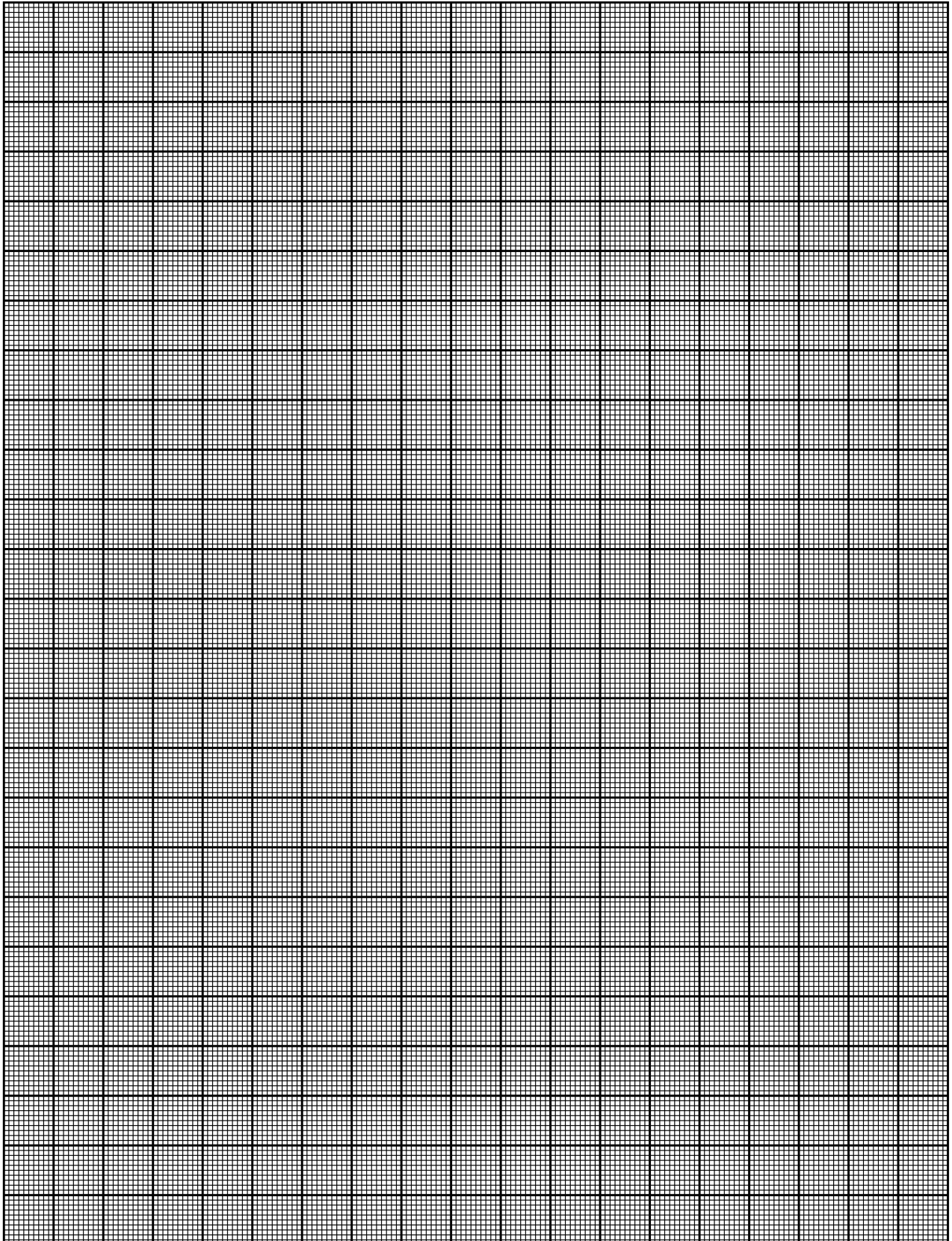
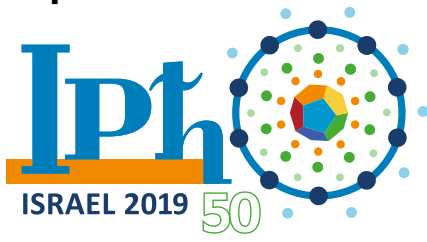


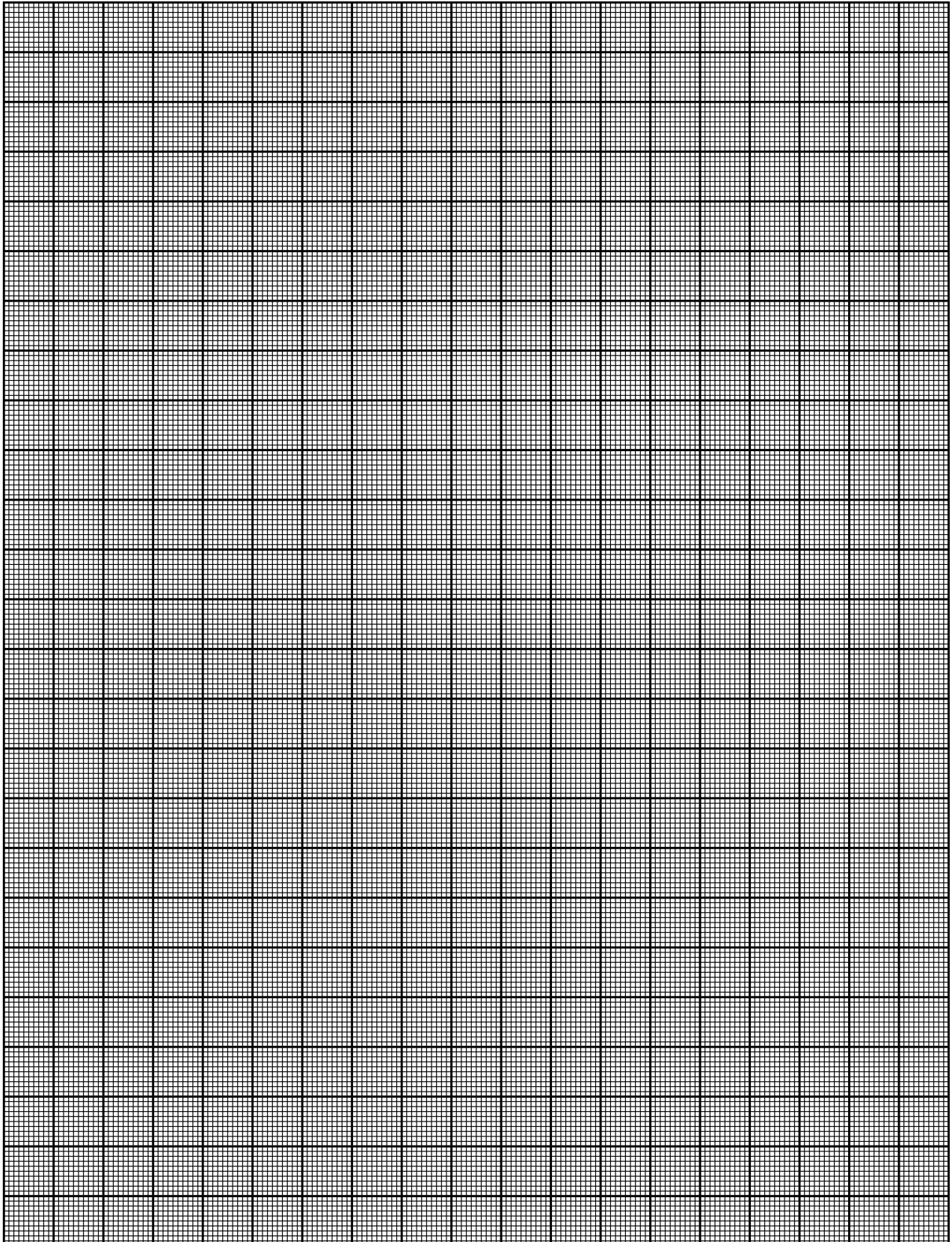
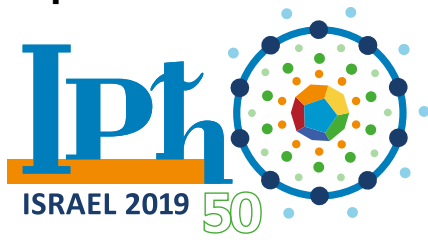


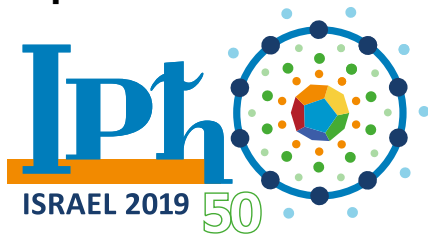
A1-16

Dutch (Netherlands)



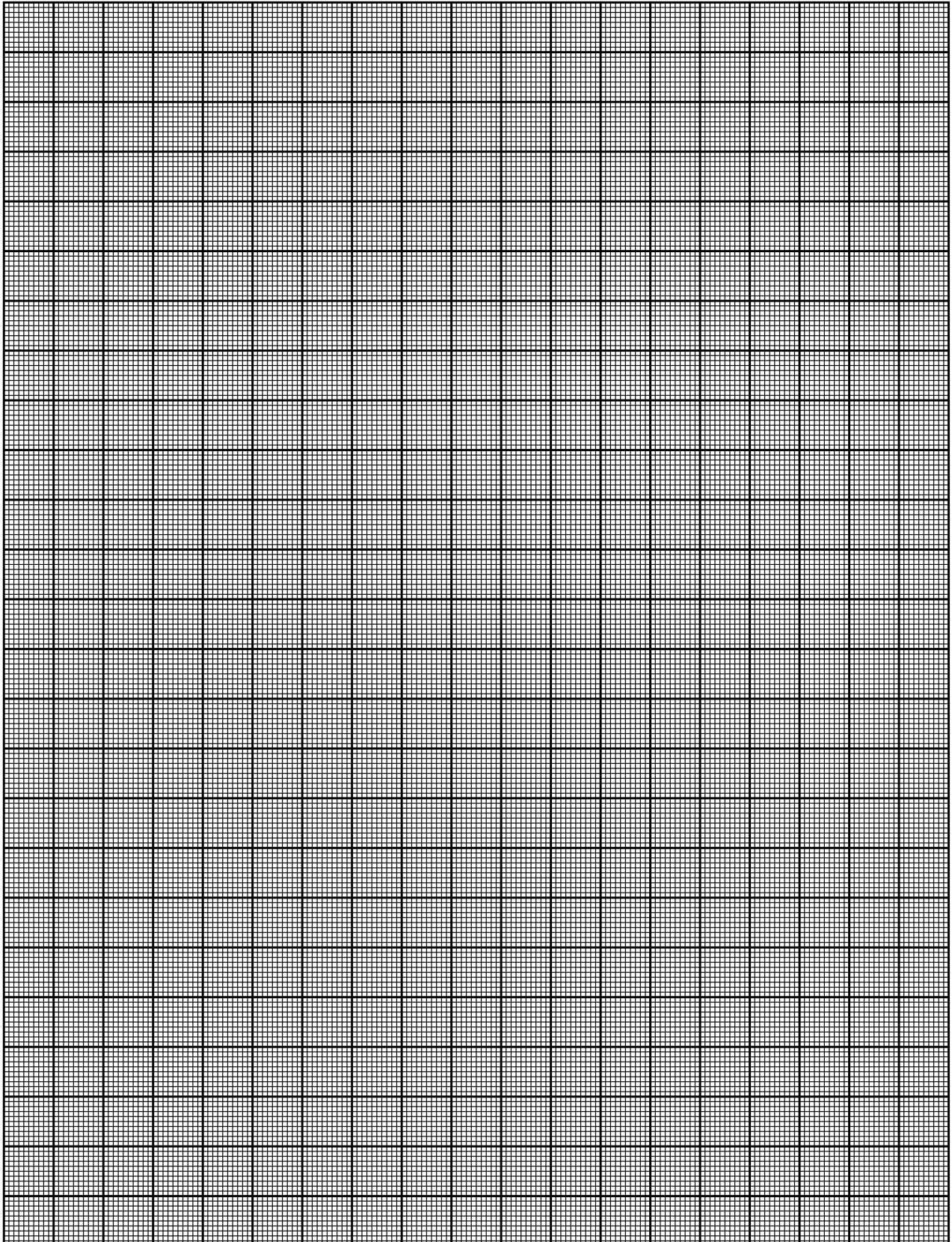


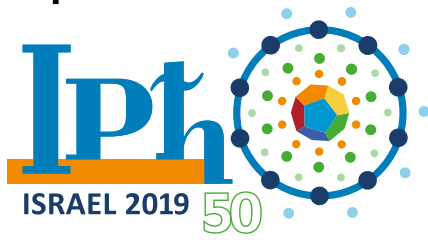




A1-19

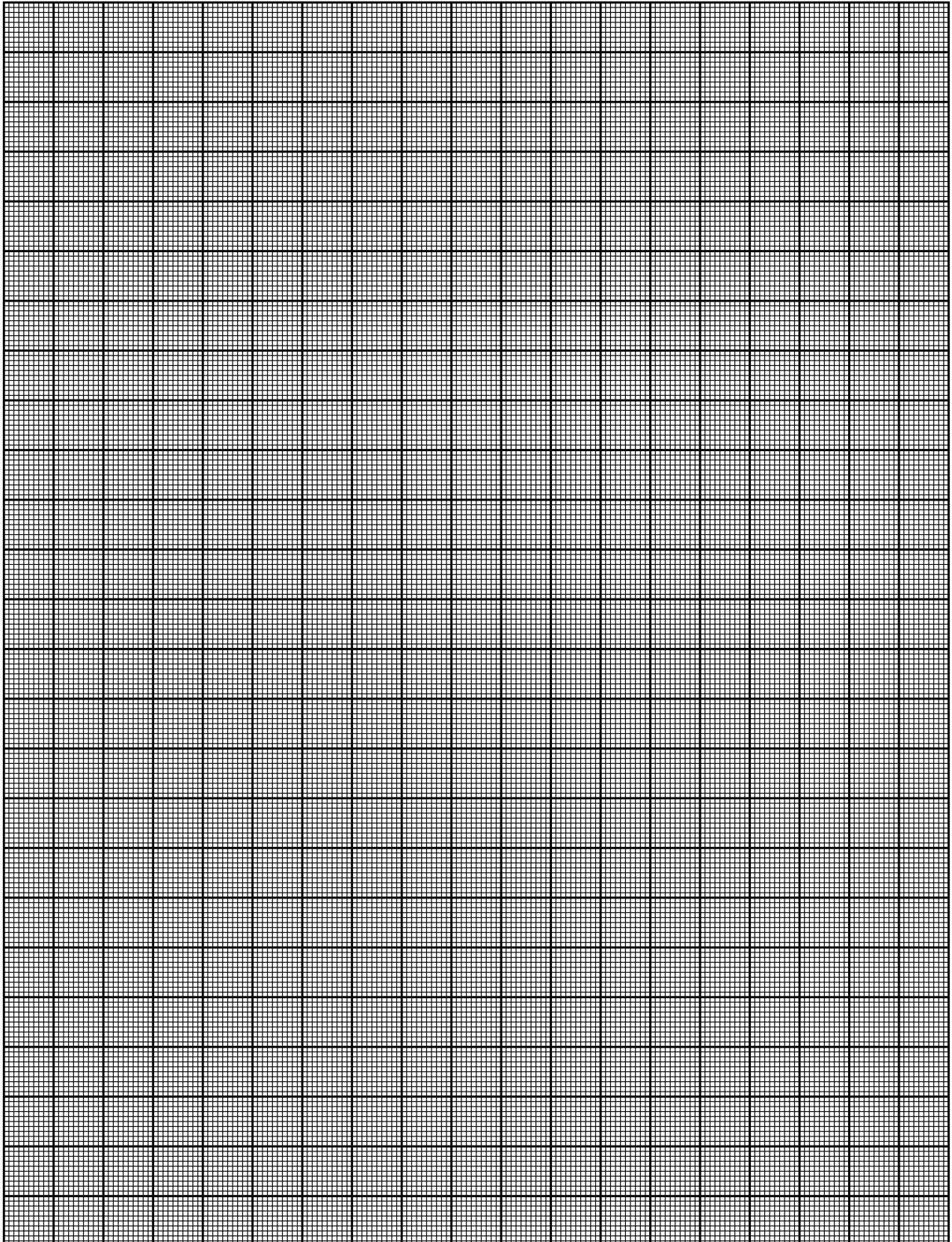
Dutch (Netherlands)





A1-20

Dutch (Netherlands)



De wet van Wiedemann-Franz

In metalen vindt warmtegeleiding hoofdzakelijk plaats door middel van elektronen. Hierdoor zijn thermische en elektrische geleiding aan elkaar gekoppeld (gerelateerd). Dit staat bekend als de wet van Wiedemann-Franz.

Het doel van dit experiment is om de thermische en elektrische eigenschappen van verschillende metalen met een grote nauwkeurigheid te meten. In deel A wordt de elektrische geleidbaarheid van koper, messing en aluminium bepaald. In deel B wordt de warmtegeleiding van koper gemeten. In deel C wordt de soortelijke warmte van koper gemeten. In deel D wordt de warmtegeleidingscoëfficiënt van messing en aluminium bepaald. Uiteindelijk wordt in deel E de universele relatie tussen de fysische eigenschappen van materialen gecontroleerd.

Bij dit experiment hoef je geen foutenanalyse te maken.

Merk op dat de wachttijd in deel B en deel D **15 minuten** duurt. Houd hiermee rekening in je tijdsplanning.

Veiligheidsinstructies

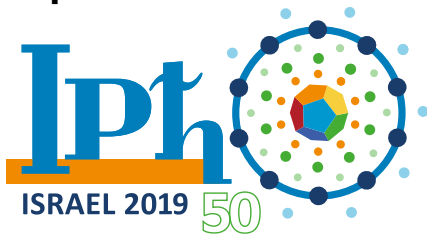
Plug geen enkele draad of daarvoor niet bedoelde instrumenten in het stopcontact. Je mag alleen de aangeleverde spanningsbronnen, zonder enige aanpassingen, in het stopcontact pluggen.

Materiaal lijst



Figuur 1

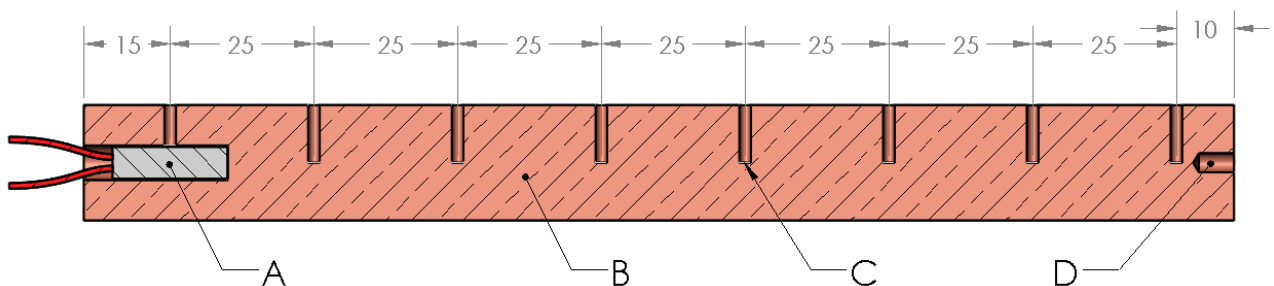
1. Een koperen holle cilindrische buis met een lengte van 200,0 mm, een binnendiameter van 6,0 mm en een buitendiameter van **20,0 mm**
2. Een messing holle cilindrische buis met een lengte van 200,0 mm, een binnendiameter van 6,0 mm en een buitendiameter van **19,0 mm**



3. Een aluminium holle cilindrische buis met een lengte van 200,0 mm., een binnendiameter van 6,0 mm en een buitendiameter van **20,0 mm**
4. Een kleine permanente magneet met een massa van 1,2 gram.
5. Een waterreservoir - dat oorspronkelijk bedoeld is voor het bereiden van een lokaal gerecht genaamd "Jachnun", een soort Israëlisch gebakje. Het deksel van het reservoir heeft aan de onderkant een warmtewisselaar en aan de bovenkant een schroef. Je hebt 4 liter niet-bruisend water ontvangen (2 x 2 liter flessen) om het reservoir te vullen.
6. Staaf #1 - een koperen staaf met een diameter van 20,0 mm waarbij temperatuursensoren zijn aangesloten op de plug van de thermometerkabel. Verder heeft de staaf een ingebouwde warmtebron aangesloten op de rode snoeren (figuur 2.a). De rode snoeren dienen in een schakeling aangesloten te worden op een DC spanningsbron (onderdeel 15 hieronder). De staaf is bedekt met zwart thermisch isolerend foam.
7. Staaf #2 - Een samengestelde staaf met een diameter van 20,0 mm waarbij de temperatuursensoren zijn aangesloten op de plug van de thermometer kabel. Verder heeft de staaf een ingebouwde warmtebron aangesloten op de rode draden (figuur 2.b). De rode draden dienen in een schakeling aangesloten te worden op een DC spanningsbron (onderdeel 15 hieronder). De staaf is bedekt met zwart thermisch isolerend foam.
8. Thermisch isolerend kapje voor het uiteinde van de staaf.
9. 12 V DC spanningsbron voor het digitale uitleesapparaat.
10. Het digitale uitleesapparaat. Dit apparaat toont tegelijkertijd de gemeten temperaturen van acht sensoren (zie onderstaande instructies). Het apparaat kan ook als stopwatch dienen.
11. Thermometer kabel die de thermometer van de staaf verbindt met het digitale uitleesapparaat
12. Voltmeter - het bereik van de voltmeter moet worden ingesteld op 20 V DC (Figuur 3).
13. Ampèremeter - het bereik van de ampèremeter moet worden ingesteld op 10 A DC (Figuur 3).
14. Elektrische snoertjes.
15. 9 V DC spanningsbron met bananen pluggen aan het uiteinde om op de warmtebron aan te sluiten.

Waarschuwing:

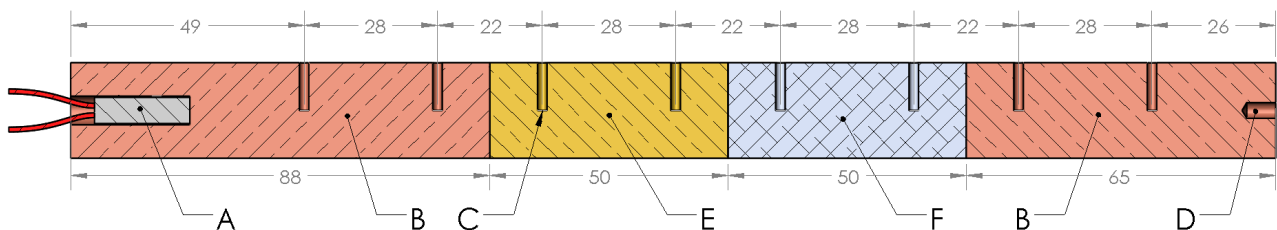
1. Alleen de aangeleverde spanningsbronnen (met de daarvoor bedoelde stekkers) mogen in het stopcontact worden aangesloten. Het is strikt verboden om individuele draden of andere apparatuur op het net aan te sluiten want dat kan ernstige verwondingen veroorzaken.
2. Dompel de staven niet in het water.



Figuur 2.a - Schematische voorstelling van staaf #1.

De afstanden zijn aangegeven in mm met een nauwkeurigheid van 0,1 mm.

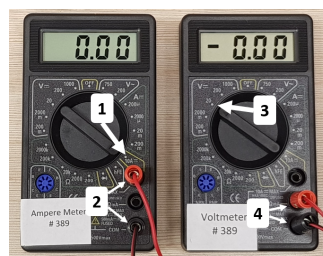
(A) Warmtebron aangesloten op de rode snoeren. (B) Koperen staaf. (C) Acht temperatuursensoren die elk door een inkeping zijn weergegeven net zoals eentje die door de pijl wordt aangegeven. (D) Schroefgat voor de schroef van de deksel van het waterreservoir.



Figuur 2.b - De schematische voorstelling van staaf #2.

De afstanden zijn aangegeven in mm met een nauwkeurigheid van 0,1 mm.

(A) Warmtebron aangesloten op de rode draden. (B) Koperen staaf. (C) Acht temperatuursensoren die elk door een inkeping zijn weergegeven net zoals eentje die door de pijl wordt aangegeven. (D) Schroefgat voor de schroef van de deksel van het waterreservoir. (E) Messing staaf (F) Aluminium staaf.



Figuur 3. Ampèremeter en Voltmeter.

(1) Stand van de knop om een bereik van 10 A te selecteren tijdens de experimenten.

(2) Ingangspoorten van de Ampèremeter.

(3) Positie van de knop om een bereik van 20 V te selecteren tijdens de experimenten.

(4) Ingangspoorten van de Voltmeter.



Het gebruik van het digitale uitleesapparaat.

Sluit het digitale uitleesapparaat aan op zijn 12 V DC spanningsbron.

Het digitale uitleesapparaat kan dienen als stopwatch of om de temperatuur af te lezen. Wanneer de kabel van de sensoren is aangesloten op het apparaat, zal het apparaat automatisch overgaan tot het uitlezen van de temperatuur. Wanneer de kabel van de sensoren wordt losgemaakt, zal het apparaat automatisch overschakelen op de stopwatch modus en verschijnt op het scherm de tekst "Timer mode".

In temperatuur modus:

- Houd de rode knop 3 seconden ingedrukt om de tijd te resetten.
- Door de rode knop zeer kort in te drukken bevriest het uitleesscherf (terwijl het apparaat de tijd na de laatste reset door blijft meten, maar deze niet op het scherm toont).
- Door de rode knop weer in te drukken, wordt de huidige (momentane) temperatuur en tijdsduur op het scherm getoond.

In stopwatch modus:

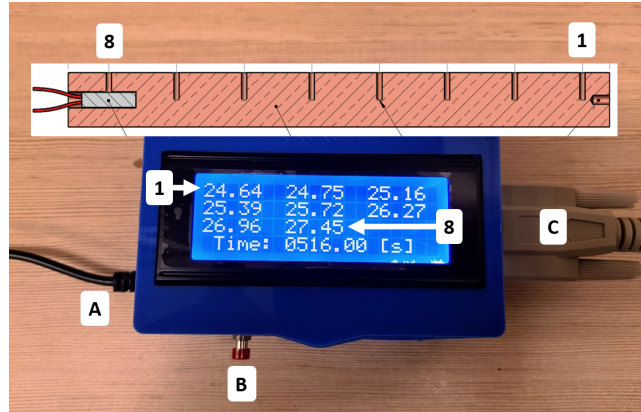
- Door de rode knop in te drukken start je de stopwatch.
- Door de rode knop nogmaals in te drukken stop je de tijd.
- Door nog een keer de rode knop in te drukken, wordt de stopwatch weer gereset op nul.

Het afleesapparaat moet voor elke eerste meting van elke staaf worden gekalibreerd.

De thermometers die worden gebruikt in deze experimenten zijn niet geheel identiek. Daarom wil je, terwijl de staaf in thermisch evenwicht is, het apparaat kalibreren om zodoende dezelfde aflezing te krijgen van elke sensor. Om dit te bereiken moet je eerst een uiteinde van de thermometer kabel verbinden met de staaf. Houd de rode knop daarna ingedrukt terwijl je het andere uiteinde van de thermometer kabel verbindt met het uitleesapparaat. Het loskoppelen van de stroom van het apparaat of thermometer kabel wist de kalibratie niet.

Waarschuwing: Voer de kalibratie uit **voordat** je de staaf aansluit op het reservoir of zijn warmtebron aansluit op de spanningsbron. Dit zal ervoor zorgen dat de temperatuur van de staaf uniform is tijdens de kalibratie.

Indien je problemen ondervindt met het afleesapparaat, is het handig om dit apparaat los te koppelen van de spanningsbron en daarna weer aan te koppelen. Het apparaat onthoudt de laatste kalibratie.



Figuur 4. het afleesapparaat

(A) 12 V DC spanningsbron. (B) Multifunctionele rode knop. (C) Thermometer kabel (1-8)
Rij na rij thermometer aflezingen in horizontale volgorde in Celsius.

Deel A. Elektrische geleidbaarheid van koper, aluminium en messing (1.5 punten)

Theorie

Wanneer een permanente magneet door een geleidende holle cilindrische buis valt, ondervindt deze een tegenwerkende kracht door geïnduceerde wervelstromen. Daardoor bereikt de magneet een eindsnelheid. Voor deze geometrie wordt de eindsnelheid uitgedrukt als:

$$v_{\text{eind}} = \frac{8\pi m g a^2}{\mu_0^2 (\pi r_m^2 M)^2 \sigma w f\left(\frac{d}{a}\right)}. \quad (1)$$

Hierbij is m de massa van de magneet, σ de elektrische geleidbaarheid van het materiaal van de buis, a is de straal binnen in de buis, r_m en d zijn respectievelijk de straal en hoogte van de magneet, M is de remanente magnetisatie van de magneet, w is de dikte van de buiswand en $f\left(\frac{d}{a}\right)$ is een schalingsfunctie. In ons geval is $a \approx r_m$, $d = 2r_m \approx 2a$ en $f(2) \approx 1,75$. Daarom kan de tijd die de magneet nodig heeft om door de buis te vallen benaderd worden door:

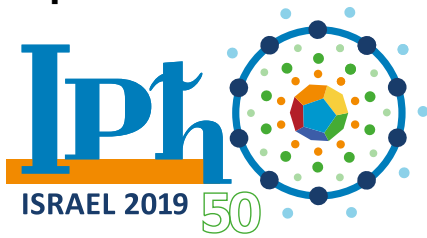
$$t = 0.22 \frac{\pi r_m^2 (\mu_0 M)^2 w L_0 \sigma}{m g}. \quad (2)$$

Hierbij is $L_0 = 0,2$ m de lengte van de buis en we nemen aan dat de magneet zijn eindsnelheid meteen bereikt op het moment dat deze wordt losgelaten door de buis.

De karakteristieke eigenschappen van de buis en de magneet die nodig zijn om de berekeningen uit te voeren zijn:

$\mu_0 M = 0,65 T$, $w_{\text{Aluminum}} = w_{\text{Koper}} = 7.0 \times 10^{-3}$ m, $w_{\text{Messing}} = 6.5 \times 10^{-3}$ m, $m = 1.2 \times 10^{-3}$ kg, $r_m = 3.0 \times 10^{-3}$ m, $g = 9.8$ m/s²

Experiment



Q2-6

Dutch (Netherlands)

Experiment

- | | | |
|------------|--|-------|
| A.1 | Gebruik het digitale uitleesapparaat in de stopwatch modus en meet de tijd die de magneet nodig heeft om te vallen door de holle buis gemaakt van aluminium, koper en messing. Noteer je meetresultaten in tabel A1. | 1.0pt |
| A.2 | Maak gebruik van de bovenstaande vergelijking en bereken de elektrische geleidbaarheid $\sigma_{\text{Aluminium}}$, σ_{Koper} , σ_{Messing} voor elk van de drie materialen. | 0.5pt |

Deel B: Thermische geleidbaarheid van koper (3.0 punten)

Het doel van dit onderdeel is om de warmtegeleiding van koper dichtbij thermisch evenwicht te meten.

Theorie

The thermische geleidingscoëfficiënt κ wordt gedefinieerd door de vergelijking $P(x) = -\kappa A \cdot \frac{\Delta T(x)}{\Delta x}$. Deze vergelijking geeft een lineair verband tussen de lokale temperatuurgradiënt en het lokaal vermogen dat stroomt door een dwarsdoorsnede van het materiaal. Hierbij is $P(x)$ het vermogen dat stroomt door een dwarsdoorsnede in locatie x , A is het dwarsdoorsnede-oppervlak van de staaf en $\frac{\Delta T(x)}{\Delta x}$ is de temperatuurgradiënt in positie x .

Experiment

Sluit het digitale afleesapparaat aan op de bronspanning en kalibreer staaf #1. Giet 4 liter water (2 flessen) in de pot zodat de warmtewisselaar volledig is ondergedompeld en sluit de pot af met het deksel.

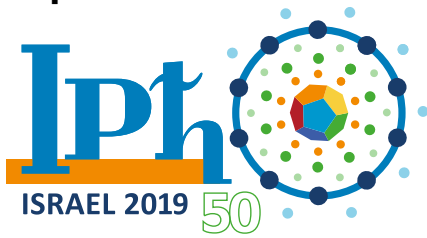
- | | | |
|------------|--|-------|
| B.1 | Noteer de begintemperatuur van staaf #1 op het moment dat de staaf op tafel wordt geplaatst. | 0.1pt |
|------------|--|-------|

Koppel de thermometer kabel los van de staaf. Verwijder het isolatie kapje en schroef staaf #1 vast op het deksel van de pot. Koppel de kabel weer aan het afleesapparaat zoals getoond in Figuur 5. Gebruik niet te veel kracht om vast te schroeven.



Figuur 5

Experiment



Q2-7

Dutch (Netherlands)

- B.2** Teken een elektrische schakeling die je in staat stelt om een vermogen te leveren aan de warmtebron en om dat geleverd vermogen te meten. In jouw schakeling moet je het volgende opnemen: de 9 V spanningsbron, een warmtebron (al bevestigd aan de staaf), de voltmeter, de ampèremeter en de snoeren. Je mag de draden ook gebruiken als schakelaar om de schakeling te openen of te sluiten. 0.5pt

De warmtegeleiding zal worden gemeten door aan een zijde van de staaf een vermogen te leveren, terwijl de andere zijde op de nagenoeg constante temperatuur van het reservoir wordt gehouden.

We streven ernaar om thermisch evenwicht te bereiken voor alle thermometers. Bouw de schakeling van B.2 en lever vermogen aan de warmtebron.

- B.3** Doe relevante metingen om het geleverde vermogen P aan de warmtebron te berekenen. Noteer de berekende waarde op het antwoordformulier. 0.1pt

Wacht 15 minuten terwijl het vermogen wordt geleverd (Je kan deze tijd gebruiken voor het plannen van je experimenten).

- B.4** Noteer in de geleverde tabel de temperaturen van alle acht thermometers na ongeveer de volgende tijdstippen: 15 min, 17,5 min, 20 min. 0.5pt

- B.5** Teken op hetzelfde grafiekenpapier, drie grafieken van de temperatuur als functie van de plaats voor elk van de gemeten tijdstippen. Deze grafieken zullen ook worden gebruikt in deel D. 1.0pt

- B.6** Gebruik de grafiek om de thermische geleidingscoëfficiënt κ_0 te bepalen met gebruik van de data van ongeveer 17,5 min. Verwaarloos in dit deel elke vorm van warmteverliezen. Maak een schatting van de gemiddelde snelheid van temperatuurverandering van de staaf, $\frac{\Delta T}{\Delta t}$, op ongeveer 17,5 min. 0.5pt

- B.7** Verwacht je een hogere / lagere / zelfde waarde voor κ_0 in vergelijking met de werkelijke waarde van κ ? 0.3pt

Deel C: Bepalen van het warmteverlies en de warmtecapaciteit van koper (4.0 punten)

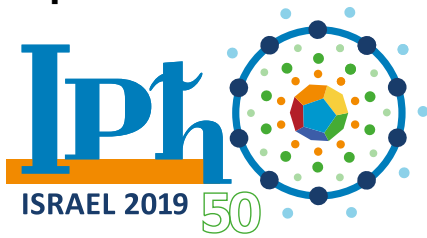
Theorie

De warmtecapaciteit C wordt gedefinieerd met één van de volgende vergelijkingen:

$$\Delta Q = C \Delta T, \quad \frac{\Delta Q}{\Delta t} = C \left(\frac{\Delta T}{\Delta t} \right). \quad (3)$$

met:

$\Delta Q / \Delta t$ de snelheid van netto warmtetransport naar het materiaal.



$\Delta T / \Delta t$ de snelheid van temperatuursverandering.

c_p is de soortelijke warmte, de warmtecapaciteit per massa-eenheid.

Voor de massa van de koperen staaf neem je 0,58 kg.

Experiment

Zet de voeding van de verwarming uit. Haal de schakeling uit elkaar. Schroef staaf #1 los en leg deze op de tafel. Plaats de isolerende eindkap op de staaf, zoals je die in het begin van het experiment hebt aangetroffen. sluit de verwarming opnieuw aan en sluit de staaf weer aan op de digitale uitleesapparaat.

WAARSCHUWING: Laat de verwarming niet lang aanstaan zonder op de temperatuur te letten.

Met behulp van een opvolging van koelen, verwarmen en weer koelen kun je zowel het warmteverlies als de warmtecapaciteit van het materiaal bepalen. Bij de stap van opwarmen moet de temperatuurstijging ongeveer 2.5°C zijn. De noodzakelijke precisie in deze stap kan je krijgen bij een koelen-verwarmen-koelen opvolging van 10 tot 15 minuten.

We nemen aan dat je werkt rondom de gemiddelde temperatuur dicht bij het thermisch evenwicht van deel B.

Om alle in de staaf opgenomen warmte mee te nemen, moeten we zijn gemiddelde temperatuur meten. De temperatuur in het midden van de staaf is ongeveer gelijk aan de gemiddelde actuele temperatuur van de staaf.

C.1	Doe een koelen-verwarmen-koelen opvolging en zet je metingen in tabel C1. om de gemiddelde temperatuur te vinden.	1.0pt
------------	---	-------

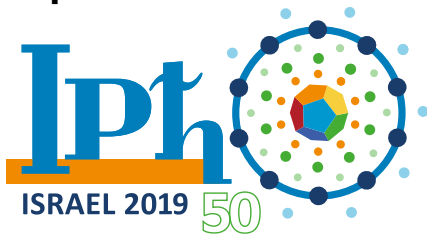
C.2	Teken op grafiekpapier de gemiddelde temperatuur als functie van de tijd.	1.0pt
------------	---	-------

C.3	Bepaal, met behulp van de grafiek, de soortelijke warmte c_p en het warmteverlies per tijdseenheid P_{loss} in de buurt van de gemiddelde temperatuur van deel B. Beschrijf je methode met behulp van diagrammen en vergelijkingen	1.0pt
------------	---	-------

Er zijn twee belangrijke mechanismen waarmee rekening gehouden moet worden om de nauwkeurigheid van de warmtegeleidingscoëfficiënt gevonden in deel B te verbeteren.

- Er is warmteverlies door warmtetransport loodrecht op de staaf door de isolatie heen.
- Het systeem bereikte in de tijd van het experiment niet zijn thermisch evenwicht.

Je mag, in eerste orde benadering, ervan uitgaan dat door deze mechanismen de verandering per lengte-eenheid van de vermogensstroom langs de staaf $\Delta P(x) / \Delta x$ constant is.



- C.4** Geef een vergelijking die in eerste orde benadering de in deel B gevonden warmtegeleidingscoëfficiënt corrigeert voor beide mechanismen. Gebruik $\kappa_0, P, c_p, m, P_{\text{loss}}, \frac{\Delta T}{\Delta t}$ van de delen B en C om de gecorrigeerde waarde van de warmtegeleidingscoëfficiënt van koper κ_{Koper} te noteren en bereken zijn waarde. 1.0pt

Deel D: Warmtegeleidingsvermogen van messing en aluminium (1.0 punten)

Verbind de geïsoleerde staaf #2 met de digitale uitleesapparaat, en kalibreer de thermometers van deze staaf op de manier zoals bij het begin van deel B beschreven is.

- D.1** Noteer de begintemperatuur van de staaf terwijl hij op tafel ligt. 0.1pt

Maak de kabel los en schroef staaf #2 op het deksel van de pot, zoals weergegeven in figuur 4. Verbind de kabel weer met de uitleesapparaat.

Herhaal de procedure in deel B om in de buurt van het thermisch evenwicht te komen tijdens het verwarmen.

Zet de verwarmingsbron aan en wacht tenminste **15 minuten** met meten.

Je mag ervan uit gaan, dat voor de nauwkeurigheid die in dit deel vereist is, de staaf in thermisch evenwicht is. Verder mag je er van uit gaan dat het warmteverlies per eenheid van lengte over de staaf constant is.

- D.2** Noteer de uitlezing van alle acht thermometers van staaf #2 en noteer $\Delta T / \Delta x$ voor elk van zijn secties. 0.2pt

In eerste orde benadering mag je dezelfde aanname doen als in opdracht C.4, namelijk dat $\Delta P(x) / \Delta x$ constant is.

- D.3** Geef uitdrukkingen voor κ_{Messing} en $\kappa_{\text{Aluminium}}$ met gebruikmaking van je vorige metingen en bepaal hun numerieke waarden. 0.7pt

Deel E: De Wiedemann-Franz wet (0.5 punten)

De Wiedemann-Franz wet stelt dat in metalen waar warmtetransport vooral wordt veroorzaakt door geleidingselektronen, de verhouding tussen de elektrische en warmte geleidingscoëfficiënten lineair afhangt van de absolute temperatuur. Beter nog, de wet geeft aan dat de helling $L = \frac{\kappa}{\sigma T}$ (bekend als het "Lorenz getal") van deze afhankelijkheid gelijk is voor de meeste metalen en alleen afhangt van universele natuurconstanten. In werkelijkheid geldt deze wet bij kamertemperatuur met een nauwkeurigheid van ongeveer 10%.

- E.1** Noteer wat je gevonden hebt aan warmte- en elektrische geleidingscoëfficiënten (κ, σ) in tabel E1. Bereken L voor elk materiaal en noteer dit in dezelfde tabel E1. Neem daarbij aan dat de warmtegeleidingscoëfficiënt in eerste orde niet afhangt van de temperatuur. 0.5pt

De Wet van Wiedermann-Franz - Antwoordblad

Deel A. Elektrische geleiding van koper, aluminium en messing (1.5 punten)

A.1 (1.0 pt)
tijdsduur dalen van magneet:

nummer	Koper	Aluminium	Messing

A.2 (0.5 pt)

	Koper	Aluminium	Messing
Elektrische geleidbaarheid			

Deel B: Thermische geleidbaarheid van koper (3.0 punten)

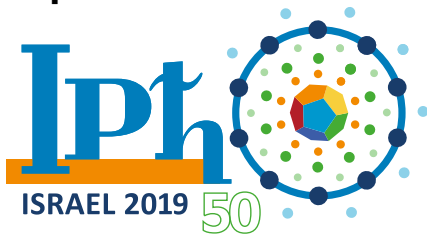
B.1 (0.1 pt)
Temperatuur van staaf #1:

B.2 (0.5 pt)**B.3** (0.1 pt) $P =$ **B.4** (0.5 pt)

Tijds- duur	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8

B.5 (1.0 pt)

Teken in de bijgeleverde grafiekpapieren de temperatuur als functie van de plaats.



B.6 (0.5 pt)

$$\kappa_0 =$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} =$$

B.7 (0.3 pt)

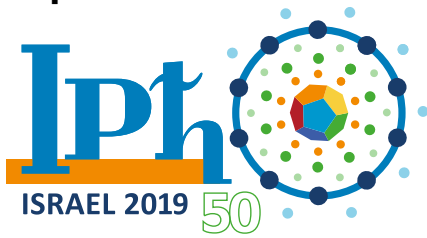
Omcirkel het juiste antwoord:

$$\kappa > \kappa_0 \text{ or } \kappa < \kappa_0 \text{ or } \kappa = \kappa_0$$

Deel C: Bepalen van het warmteverlies en de warmtecapaciteit van koper (4.0 punten)

C.1 (1.0 pt)

[illegible]

**C.2** (1.0 pt)

Teken op het bijgeleverde grafiekpapier de gemiddelde temperatuur als functie van de tijd.

C.3 (1.0 pt)

Uitdrukking:

$$c_p =$$

$$P_{\text{loss}} =$$

Waarde:

$$c_p =$$

$$P_{\text{loss}} =$$

C.4 (1.0 pt)

Uitdrukking:

$$\kappa_{\text{koper}} =$$

Waarde:

$$\kappa_{\text{koper}} =$$

Deel D: Warmtegeleidingsvermogen van messing en aluminium (1.0 punten)

D.1 (0.1 pt)

Staaf #2 : $T =$

D.2 (0.2 pt)

Tijd van aflezen na start:

T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8

$\Delta T_{Koper-1}/\Delta x$	$\Delta T_{Messing}/\Delta x$	$\Delta T_{Aluminium}/\Delta x$	$\Delta T_{Koper-2}/\Delta x$

D.3 (0.7 pt)

Uitdrukking:

$$\kappa_{Aluminium} =$$

$$\kappa_{Messing} =$$

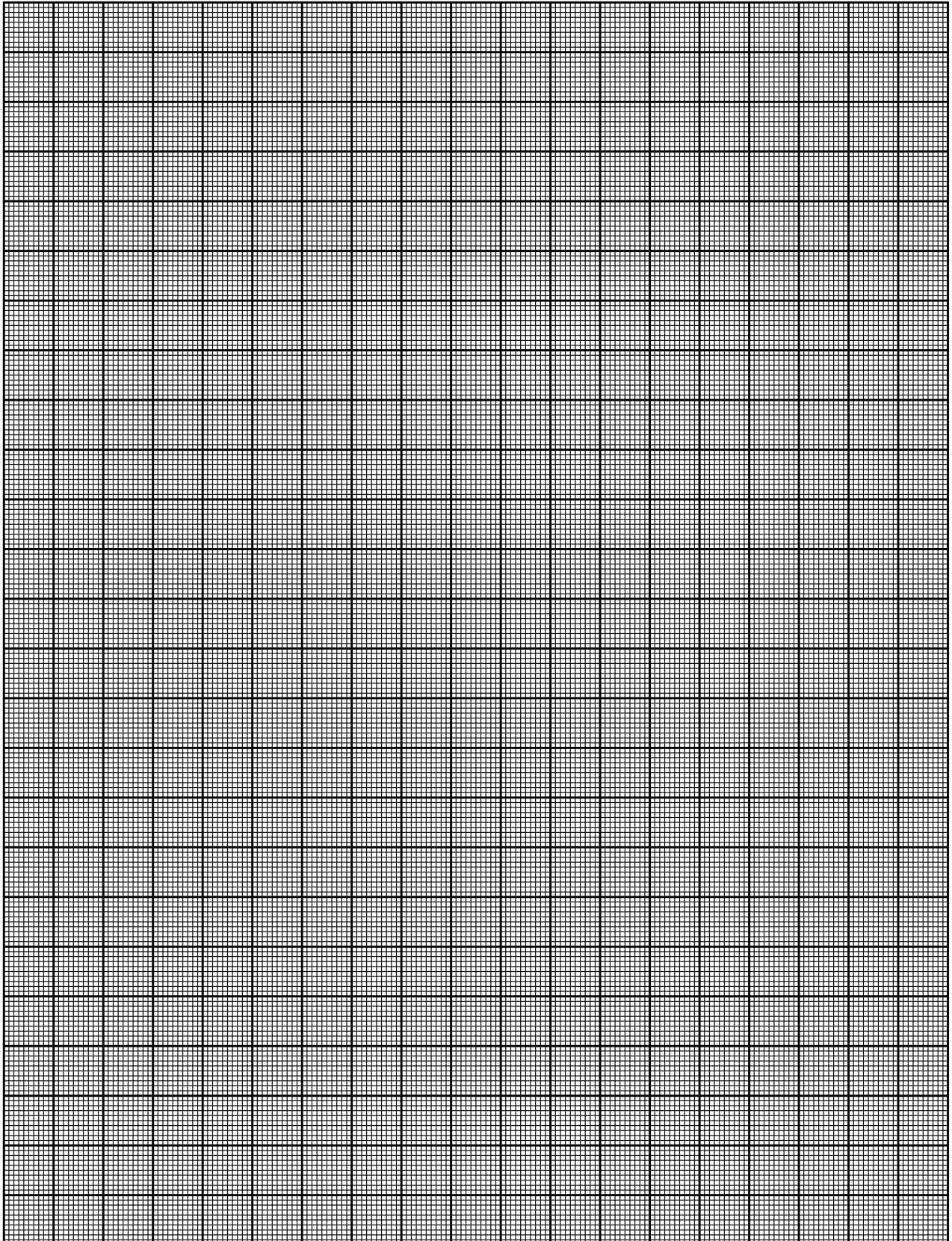
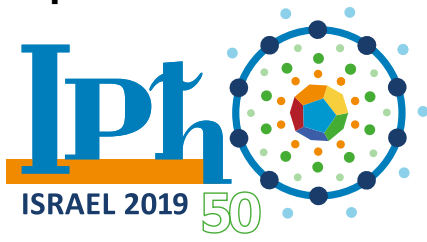
Waarde:

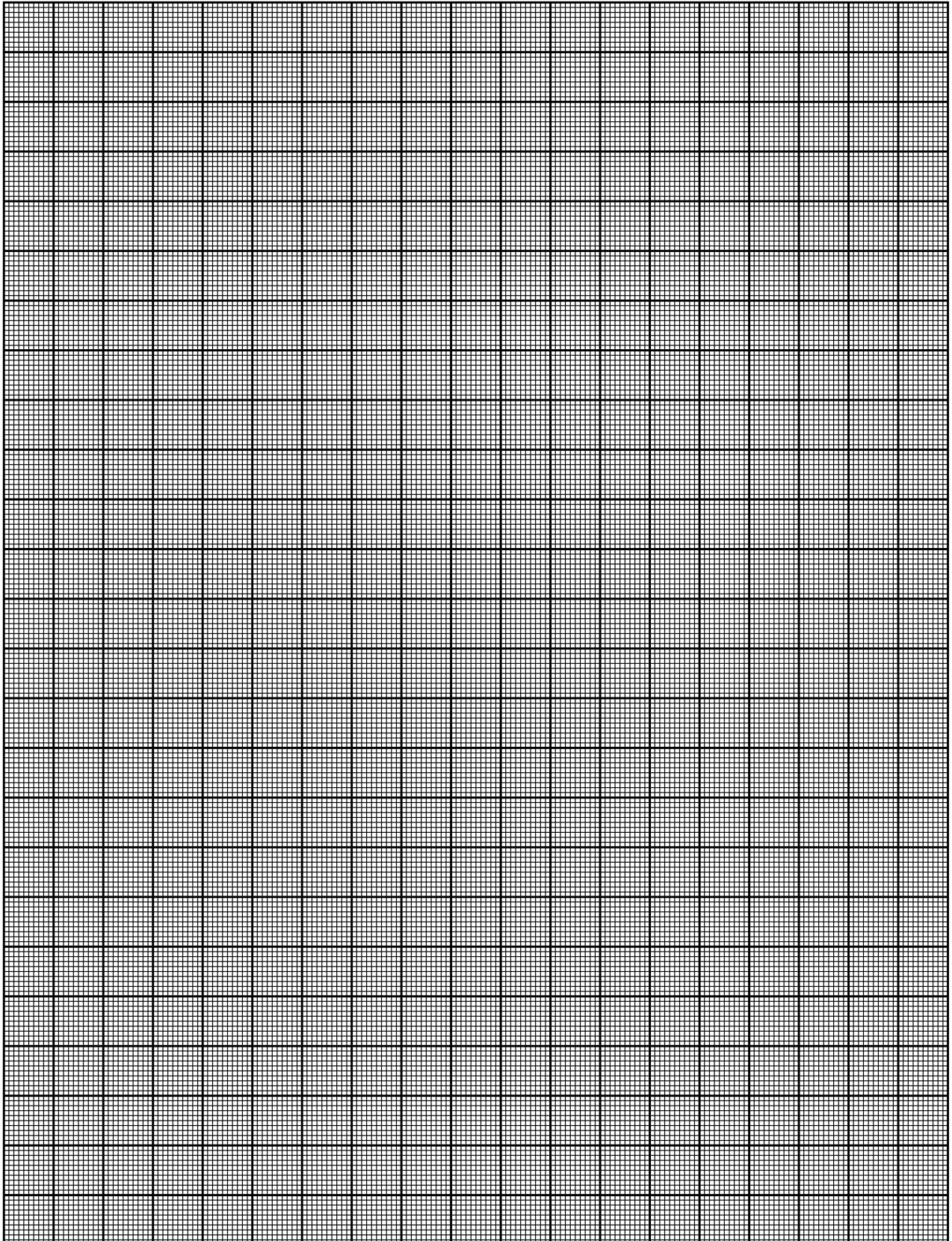
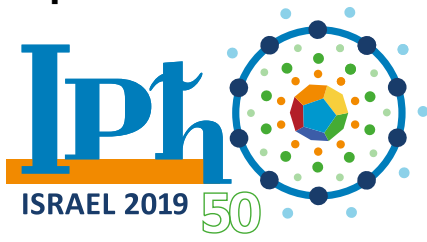
$$\kappa_{Aluminium} =$$

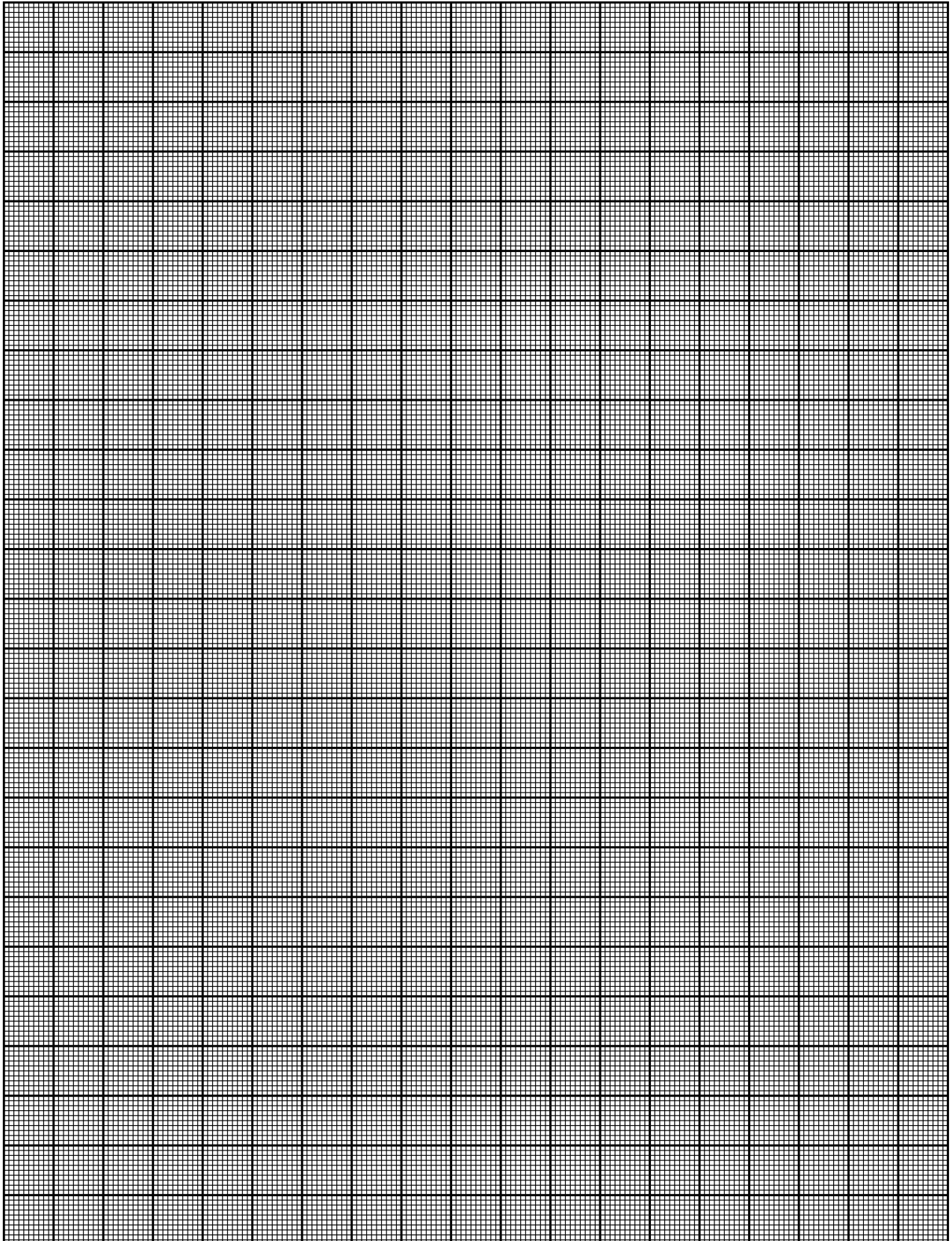
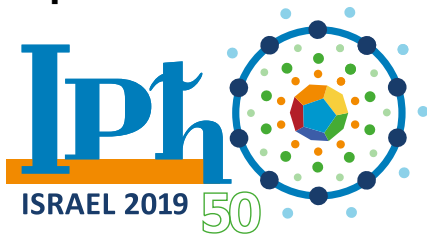
$$\kappa_{Messing} =$$

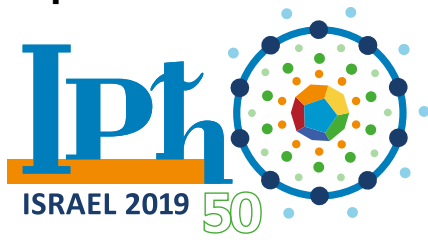
Deel E: De wet van Wiedemann-Franz (0.5 punten)**E.1** (0.5 pt)

	Koper	Aluminium	Messing
Elektrisch geleidingsvermogen			
Warmte geleidingsvermogen			
Lorenz coëfficiënt			









A2-10

Dutch (Netherlands)

