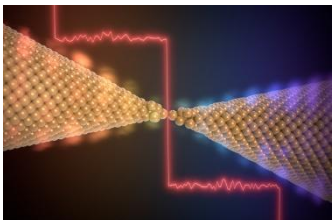
Quantum Rules!

Het geleidingsquantum: experiment

Inleiding

In handleiding QR_geleidingsquantum_theorie staat beschreven dat de geleiding door een nanodraad zoals een gouden contact dat enkele atomen dik is, gequantiseerd is. Dit is experimenteel aan te tonen met dit experiment, door de weerstand $R\ (=1/G)$ te meten terwijl de dikte van de nanodraad gecontroleerd veranderd wordt.

De geleidbaarheid bij een verbinding van slechts één atoom, de kleinst mogelijke brug, heet het **geleidingsquantum** omdat de waarde ervan bepaald wordt uit fundamentele quantumconstanten. Bij dit experiment ga je de waarde van het geleidingsquantum bepalen door met behulp van een speaker twee goudcontacten tegen elkaar te laten botsen en weer uit elkaar trekken.



Figuur 1 *Artist impression* van het puntcontact en de gequantiseerde geleiding (rode lijn) bij een atomaire verbinding van goud-tips. © Enrique Sahagun

Achtergrond

Een schakelaar (zoals een lichtknop thuis) is een elektrisch component waarmee je een stroomkring kunt onderbreken. Dit gebeurt door het verbinden en verbreken van twee contacten. We kunnen in plaats van een schakelaar ook twee in **goud vergulde** moerdoppen contact laten maken. Goud is zacht en zodra de moerdoppen uit elkaar bewegen, zullen ze op atomair niveau als kauwgom uit elkaar worden getrokken. Dit heeft als gevolg dat er op het laatste moment een verbinding van slechts één goudatoom is (zie figuur 1). Als we het uit elkaar trekken van de goudcontacten langzaam genoeg laten gebeuren en tegelijk snel genoeg meten, kunnen we de te verwachten stapjes van de spanning U_{ijk} (zie formule (3) uit de theorie-handleiding) meten en daaruit de waarde van het geleidingsquantum G_0 bepalen.

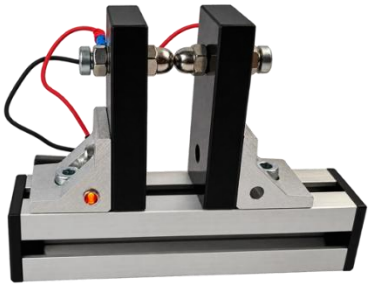
Meetmethode

Voor het meten van de geleiding hebben we een spanningsbron, een toon- (of functie-)generator en een (computer-)oscilloscoop nodig. Een oscilloscoop is een meetinstrument dat tijdsafhankelijke spanningen, grafisch kan weergeven. Het oscilloscoopbeeld laat de aangelegde spanning U (verticaal) zien als functie van de tijd (horizontaal). Wij gebruiken de Virtual Bench van National Instruments (figuur 2) die op een fascinerende manier in een keer de stappen in de geleiding toont.



Figuur 2 De Virtual Bench is supersnelle oscilloscoop, functiegenerator en tevens spanningsbron in één.

Versie: 2026-11-13



Figuur 3 Vergroot model: schuif de helften uiteen en naar elkaar toe. Bij contact tussen de dopmoeren gaat het lampje branden.

Model in het groot

Op tafel staat ook een demonstratiemodel van de opstelling waar we mee gaan meten. Je kunt hierbij de twee dopmoeren naar elkaar toe schuiven en dan gaat het lampje branden. Als je ze héél voorzichtig uit elkaar schuift, dan zie je dat het lampje zwakker gaat branden.

Dat betekent dat bij het verbreken van het contact de spanning over de component (hier het lampje) dat in serie staat dus afneemt. In de meetopstelling gaan we dit contact steeds weer verbreken en is de buitenkant van de dopmoeren bedekt met een laagje goud.

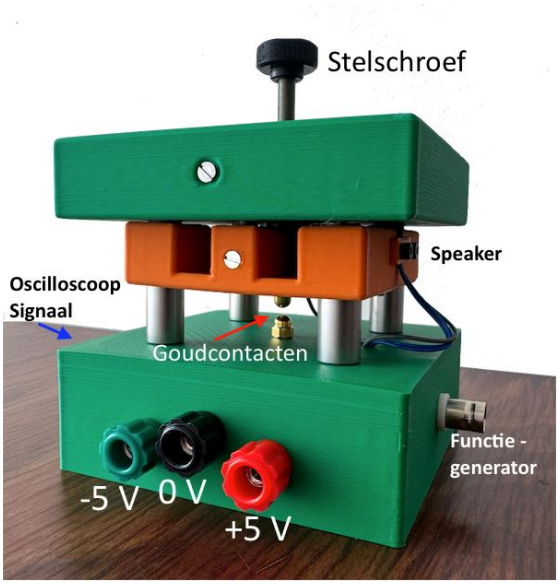
De opstelling

De opstelling die we gaan gebruiken wordt getoond in figuur 4.

De goudcontacten staan in serie met een ijkweerstand (R_{ijk}) van **1 kΩ** die, samen met andere elektronica in de groene doos onder de goudcontacten zit. De spanning over de ijkweerstand wordt gemeten via de virtual bench en een computer.

Om de schakeling te laten werken zijn op de virtual bench de +5 V, 0 V en -5 V uitgangen aangesloten op de rode, zwarte en groene connectoren. Ook de wisselende spanning voor de speaker en uitgangsignaal worden door de virtual bench geleverd en gemeten.

Eén van de goudcontacten beweegt doordat deze is aangesloten op een speaker.

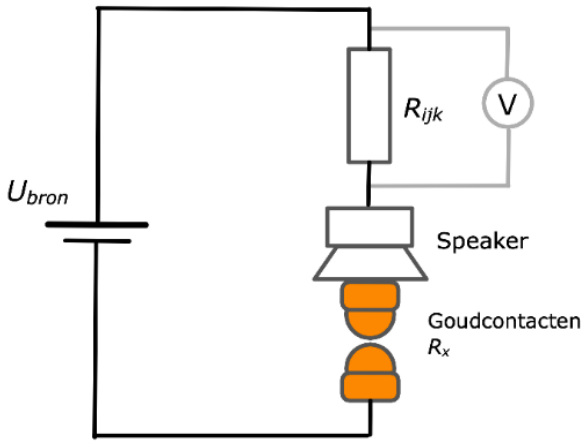


Figuur 4 De opstelling met goudcontacten en aansluitingen. De coax aansluiting voor de oscilloscoop zit aan de linkerkant.

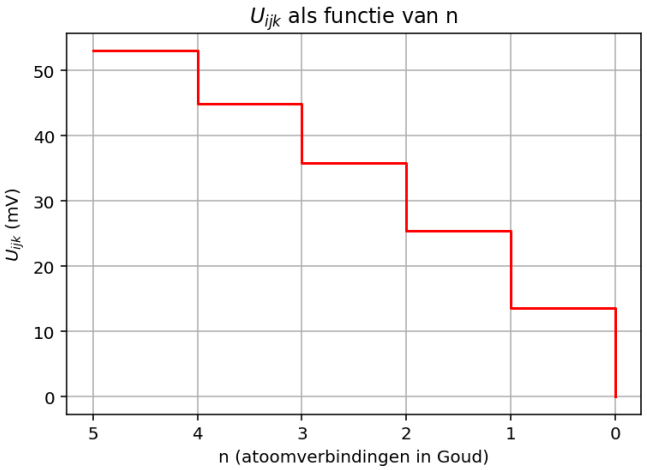
Een functiegenerator maakt het signaal (1 Hz) voor de speaker; dit signaal is een sinus waarvan de frequentie en amplitude in het programma ingesteld kunnen worden. In de groene doos bevindt zich een schakeling die de 5 V omzet in een stabiel signaal van ca. 190 mV. Dit is de bronspanning U_{bron}.

*Het is belangrijk om de twee goudcontacten goed uit te lijnen! Als dit gevraagd wordt, draai dan **voorzichtig** aan de stelschroef om op de oscilloscoop te zien wanneer er periodiek contact is en wordt verbroken.*

Een verwachting van het signaal is schematisch weergegeven in figuur 6. Hier zijn de in de theorie genoemde stappen zichtbaar, waarbij in elke stap het contact met één goudatoom verminderd wordt totdat er geen goudatomen meer over zijn en het contact verbroken is. Aan de hand van vergelijking (3) in de theorie handleiding kan bepaald worden welke spanning je verwacht voor iedere stap.



Figuur 5 Schematische tekening van de schakeling. Merk op dat dit dus een spanningsdeler is. De speaker wordt apart gevoed door de functiegenerator. Het goudcontact aan de speaker is geleidend verbonden met R_{ijk}. Doordat de speaker trilt wordt het contact tussen de goudcontacten wisselend gemaakt, en verbroken.



Figuur 6 Computerplot van de te verwachte quantumstappen in de gemeten spanning bij afnemende aantal atomen in het goudcontact. Deze grafiek zal zeker afwijken van je meetwaarden.

Opdrachten vooraf

I. Zoek op hoe groot een goud atoom is (internet of BiNaS) in m.

II. We tikken met een dopmoer op een stuk papier en zien een afdruk met een straal van 0,50 mm. Bereken het oppervlak van de cirkel.

III. Stel dat de dopmoeren over het oppervlak van vraag II contact maken met elkaar. Uit hoeveel atomen bestaat dit contactoppervlak dan (neem aan dat de goud atomen op een perfecte gladde laag liggen)?

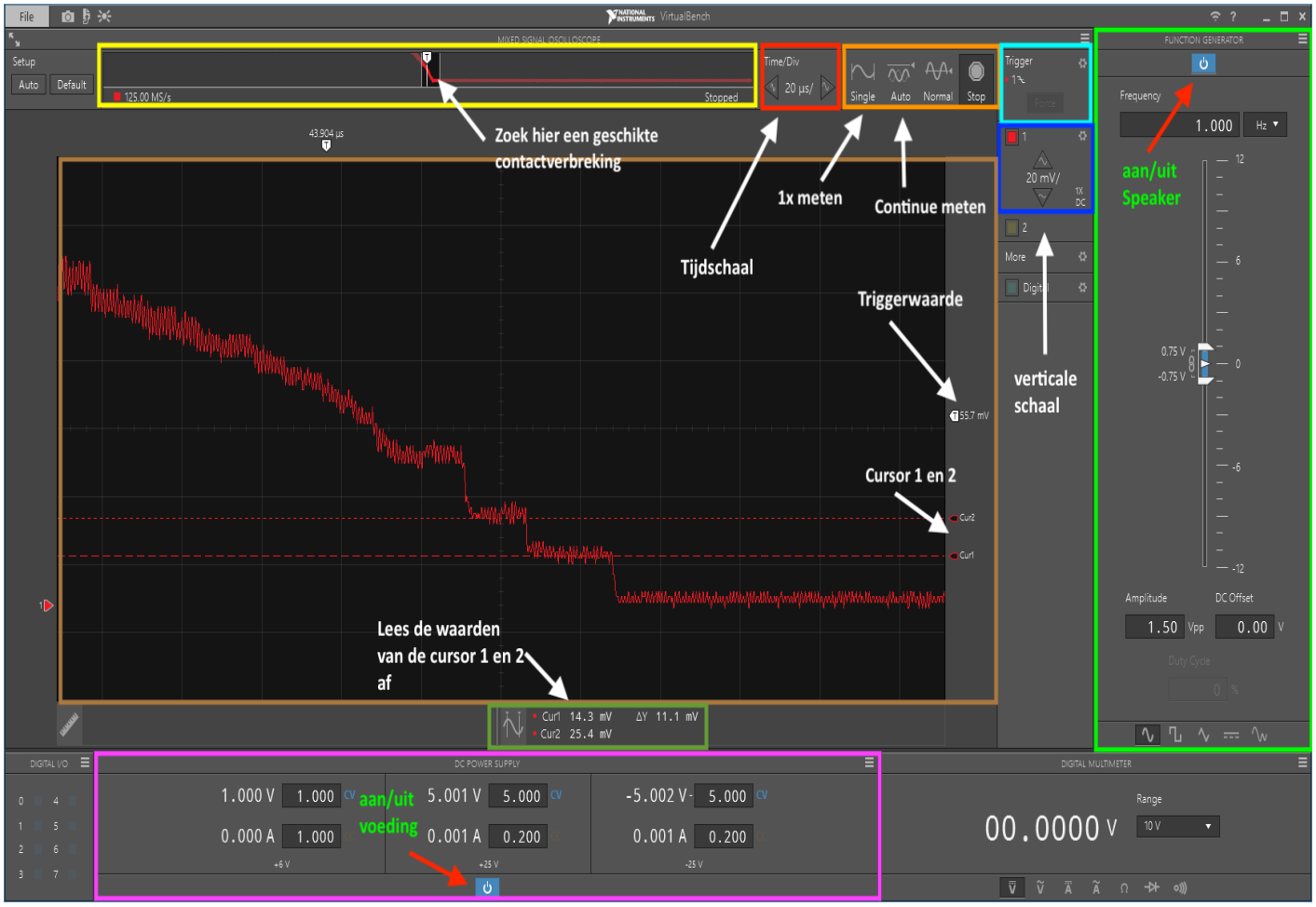
IV. Hoe groot is de kans dat het allerlaatste contact verbroken wordt tussen twee dezelfde atomen? Leg uit.

Uitvoering

1.a Bepaal G_0 met gegevens uit BiNaS en formule (5) op het theorieblad.

1.b Bereken met vergelijking (1) welke waarden je voor de ijkspanning U_{ijk} kunt verwachten (orde van grootte) voor $n = 1$. Ga hierbij uit van $U_{\text{bron}} = 190$ mV. Deze waarden zijn een indicatie voor wat je zult zien bij de meting bij het laatste atoomcontact.

2. Start het meetprogramma: **Ni VirtualBench**. Als het goed is, staat het programma zo ingesteld als in figuur 7. Bestudeer dit figuur goed.



Figuur 7 Startscherm van de Ni VirtualBench

Instellingen niet zoals in figuur 7? Importeer ze via File > Import configuration …, kies Break_Junction.vbconfig

Werken met Virtual Bench Software

(zie figuur 7 voor de gekleurde vakken)

Oscilloscoop:

- Gele vak: hier kies je na een **Single** meting uit het hele signaal een geschikte dalende curve.
- Rode vak: Horizontale tijdschaal, aanpassen door de driehoekjes te klikken of met scroll wieltje van de muis.
- Oranje vak: Bij het **instellen van de gouden doppen** gebruik je stand "Auto". Daarna klik je elke keer op "Single" voor een meting.
- Cyaan vak: Hier stel je de waarde van de trigger in. Rond de 60 mV en dalend is een goede keuze.
- Blauw vak: Verticale schaal, pas aan met de driehoeken. (startwaarde 20 mV)
- Bruine vak: Oscilloscoop scherm met het signaal. Er zijn twee cursors die je op de plateau's kunt plaatsen en waarvan in het donker groene vlak de waarden wordt getoond. De witte cursor is de ingestelde triggerwaarde. Het rode pijltje links is de 0 -lijn van het signaal.

Spanningsbron:

- Paarse vak: hier kun je spanning instellen en de spanningsbron aan en uit zetten (rode pijl wijst naar de aan en uit knop).

Functiegenerator:

- Groene vak: frequentie en piek tot piek amplitude voor ons experiment. (waarden: frequentie 1Hz en amplitude 1.5 Vpp).
- De functiegenerator zet je aan door op de knop te drukken die is aangegeven door de rode pijl.

Voorbereiden van je metingen

3. Zet de spanningsbron van virtual bench aan door in het paarse vak op de **aan** knop te klikken. Klik in het oranje vlak op knop "Auto". Kijk in het oscilloscoopscherm (bruine vlak in figuur 5) of je een signaal ziet.

N.B. Als de contacten los zijn dat is dat signaal 0 mV. TIP *Misschien moet je verticaal uitzoomen. (blauwe vlak gebruiken). We willen een continue waarde van ongeveer 200 mV zien.*

4. Draai de stelschroef zo aan (rechtsom), dat de goudcontacten *nét* met elkaar contact maken, (niet te strak!). De gemeten spanning door de oscilloscoop zal op een gegeven moment niet meer hoger worden.

TIP: Pas eventueel de verticale schaal aan om het goed te zien. Je kunt ook het oscilloscoopscherm schuiven met de muis.

5. Meet de maximale bronspanning met de virtuale oscilloscoop, verschuif een cursor aan de rechterkant van het bruine vlak naar het signaal en bepaal de waarde van deze spanning.

$U_{\text{bron}} =$ mV

We weten nu de maximale spanning over de weerstand, nu gaan we zoeken naar het contact verbrekende signaal.

6. Zet de functiegenerator (groene vak) aan met een frequentie van 1 Hz en amplitude 1,5 Vpp. N.B. check of de oscilloscoop nog steeds meet op stand "Auto".

7. Draai voorzichtig aan de stelschroef (**losser draaien, dus linksom!**) totdat je in het oscilloscoopscherm ziet wanneer de goudcontacten periodiek contact maken en verbreken: je ziet het signaal dan heen en weer springen van laag naar hoog.

De meting

8. Klik nu in het oranje vak steeds op "Single". Er wordt nu één meetreeks gemeten. In het Gele vak kun je nu zoeken naar een geschikte dalende curve: dat betekent contact verbreking). Klik op een dalende curve, om deze in het oscilloscoop scherm verder te onderzoeken. Het kan zijn dat de dalende curve al in beeld is.

9. Kijk of je duidelijke plateau's ziet bij het verbreken van het contact tussen de gouden doppen (zoals in figuur 6 en in het computerplotje van figuur 5).

*Zie je geen plateau's? Stel de stelschroef voorzichtig nog eens in volgens stap **7**. Zorg da de oscilloscoop weer op "Auto" staat.*

Dataverwerking

10. Noteer voor een goede meting de hoogte (in mV) van plateau 1, 2 en 3 in tabel 1 (verschuif cursor 1 of 2 om de metingen te kunnen doen. De meetwaarden lees je af in het donkergroene vak onder de oscilloscoop. Kies mooie metingen, wees niet te snel tevreden. Zoek voor een signaal als in figuur 6.

11. Herhaal dit voor nog vier goede metingen.

Tabel 1 Gemeten ijkspanningen voor 3 plateaus voor 5 runs

Run nr.	Afgelezen spanning U_{ijk} bij $1 \cdot G_0$ (mV)	Afgelezen spanning U_{ijk} bij $2 \cdot G_0$ (mV)	Afgelezen spanning U_{ijk} bij $3 \cdot G_0$ (mV)
1			
2			
3			
4			
5			
U_{ijk} gem.:			

12.a Bereken voor elke "spanningsplateau" bij je meting van het verbreken van het contact de gemiddelde waarde van U_{ijk} (mV) met de onzekerheid in die waarde en zet die op de laatste rij.

12.b Bereken met deze waarde van U_{ijk} de waarde van R_x, gebruikmakend van formule (1) uit de theorie handleiding.

12.c Reken deze waarde van R_x om naar G_0.

12.d Bereken met je metingen de gemiddelde waarde van G_0 voor je experiment bij $n = 1$.

12.e Bereken de gemiddelde waarde van het geleidingsquantum G_0 voor $n = 2$ en $n = 3$ in je experiment.

Evaluatie

13. Vergelijk je metingen met de literatuurwaarde (vraag **1.a**). Hoeveel procent wijkt je gemeten gemiddelde hiervan af?

14. Kun je afwijking met de literatuurwaarde verklaren? Leg uit.