

Profielwerkstuk “de Elementaire lading” <Proef van Millikan>

Simon Besters, Marcel Cleijsen en Maarten Nieuwenhuijze
© havovwo.nl

Inhoudsopgave

Voorwoord	2
Inleiding	2
Wat is de elementaire lading	3
Wie heeft de elementaire lading ontdekt?	4
Hoe bepalen we zelf de elementaire lading?	5
- werkplan	5
- proefopstelling	9
- uitvoering	10
- meetresultaten	12
- verwerking van meetresultaten	12
Conclusie	14
Evaluatie	15
Bronnenlijst	16
Bijlagen	17
- Uitleg TI-83 software	19

Profielwerkstuk “de Elementaire lading” <Proef van Millikan>

Simon Besters, Marcel Cleijsen en Maarten Nieuwenhuijze
© havovwo.nl

Voorwoord

Het profielwerkstuk moet blijken van onze opgedane kennis en vaardigheden. We zochten dus naar een onderwerp dat ons alledrie goed ligt. Natuurkunde kwam daarbij al snel naar voren, vooral omdat we iets tastbaars zochten. In de wiskunde is alles vrij abstract en binnen het vak scheikunde vonden wij niets interessants voor ons profielwerkstuk. Na een aantal mislukte pogingen om tot een goed onderwerp te komen werd ons door Dhr. Weenen een onderzoek voorgesteld: de proef van Millikan; een bekend experiment dat buiten de huidige VWO-natuurkunde onderwerpen valt. Na een kleine uitleg had hij onze interesse gewekt. Het leek ons, vanwege de precisie van de meting, een interessante uitdaging die ons terugbracht naar een fundamenteel gegeven uit de natuurkunde, de elementaire lading.

Dit onderwerp draagt dan wel niet bij aan de verbetering van het milieu, waar enkele prijzen voor uitgelooft zijn, maar het laat wel zien dat VWO-leerlingen zelfstandig een fundamenteel onderzoek kunnen uitvoeren.

Inleiding

Zoals als uit de titel blijkt gaan wij ons bezig houden met de elementaire lading. Wij gaan aan de hand van een proef de lading van een druppeltje bepalen, wat een geheel veelvoud is van de elementaire lading. Dit gaan wij doen door middel van de ‘Proef van Millikan’. Millikan is een natuurkundige die leefde rond de vorige eeuwwisseling en met deze proef behaalde hij een Nobelprijs.

De proef maakte vroeger deel uit van de standaard natuurkunde onderwerpen op het VWO, uitgevoerd als demonstratieproef door de docent, dat is nu niet meer het geval. Dat neemt natuurlijk niet weg, dat deze proef erg belangrijk is geweest voor de natuurkunde.

Naast het feit dat wij onze vaardigheden willen beproeven, willen wij de proef ook weer toegankelijk maken voor de huidige Vwo-leerling. Dat gaan wij bewerkstelligen door een duidelijke, systematische handleiding te creëren voor deze proef. Wij hopen met dit profielwerkstuk de interesse voor de natuurkunde bij de lezer te vergroten.

We beginnen het werkstuk met een stukje verdieping in de stof, een biografie van Millikan en het opstellen van een werkplan. Vervolgens gaan we de uitvoering van de proef beschrijven, meetresultaten noteren en verwerken. Na deze stappen moet het mogelijk zijn om een gegronde conclusie te schrijven. Tevens besteden we nog aandacht aan het creëren van een duidelijk geschreven handleiding voor deze proef, zodat deze in de les te doen is. In het gedeelte van de uitvoering noteren wij tevens de problemen waar wij eventueel tegen aan lopen.

De onderzoeksvragen voor ons profielwerkstuk zijn als volgt: de hoofdvraag van ons werkstuk is: ‘Wat is de elementaire lading en hoe kunnen we die bepalen?’

De deelvragen zijn beperkt tot: ‘Wat is de elementaire lading?’, ‘Hoe bepalen we zelf de elementaire lading?’ en ‘Wie heeft de elementaire lading, en de waarde daarvan, ontdekt?’

Profielwerkstuk “de Elementaire lading” <Proef van Millikan>

Simon Besters, Marcel Cleijisen en Maarten Nieuwenhuijze
© havovwo.nl

Wat is de elementaire lading?

De elementaire lading is de kleinst mogelijke lading die in de natuur voorkomt. Protonen en Elektronen hebben altijd een lading die gelijk is aan de elementaire lading ($+1,6 \cdot 10^{-19}$ C resp $-1,6 \cdot 10^{-19}$ C). Het verschil is dat bij protonen de lading positief is en dat de lading bij elektronen negatief is. Dus de lading van één proton plus de lading van één elektron is bij elkaar nul, dus neutraal. Atomen zijn zoals je weet opgebouwd uit protonen in de kern en elektronen die om de kern heen bewegen. Ook zitten er in de kern neutronen, maar zoals de naam al zegt is dit deeltje neutraal, dus heeft het geen lading. De lading van één atoom is altijd neutraal. Dus dat wil zeggen dat er altijd evenveel protonen zijn als elektronen. Bij een moleculaire stof in vaste vorm zitten alle moleculen in een raster. Ze bewegen niet door elkaar, maar trillen op een vaste plaats. Ook alle elektronen blijven bij hun eigen kern. Dit is niet het geval bij metalen. Bij metalen blijven de kernen zoals bij een moleculaire stof trillend op een plaats. Alleen de elektronen kunnen van de ene kern naar de andere kern bewegen. Meestal zijn dit maar enkele elektronen per atoom die dit gedrag vertonen. De rest blijft keurig bij zijn eigen kern.

Een geladen voorwerp is meestal geladen doordat het een aantal elektronen mist, of juist te veel heeft. De lading van zo'n voorwerp is dus altijd een geheel aantal keren de elementaire lading. Als je echter kijkt naar lading in de orde van grootte van 1 C, dan merk je die stapjes niet meer, en kun je rustig een continu verloop van de lading aannemen.

In theorie is de grootst mogelijke positieve lading die je op een voorwerp kunt aanbrengen, de lading waarbij alle elektronen uit het materiaal zijn verwijderd, en de grootst mogelijke negatieve lading is de lading waarbij er zoveel lading op een voorwerp zit, dat het door de elektrische krachten uit elkaar valt. In de praktijk heb je natuurlijk (door de capaciteit) een bepaald maximum wat je kunt aanbrengen. De spanning bepaalt dan de maximum lading die je op een voorwerp kunt brengen. Een algemene, absoluut grootst mogelijke lading bestaat echter niet.

Deeltjes worden tegenwoordig vooral bestudeerd door ze te maken, met behulp van versnellers. Het idee is in principe simpel: Neem geladen deeltjes, elektronen of protonen, geef ze een hoge snelheid, door ze in elektrische velden te versnellen, en laat ze botsen met andere deeltjes. Bij zo'n botsing kunnen nieuwe deeltjes ontstaan, mits de energie die bij de botsing vrijkomt groot genoeg is. Volgens $E = mc^2$ wil dat zeggen, dat op zijn minst c^2 maal de massa van de nieuwe deeltjes beschikbaar moet zijn.

De energie van deeltjes wordt in de deeltjesfysica meestal aangegeven in een bijzondere eenheid, die direct samenhangt met het versnellen. De arbeid die door een elektrisch veld wordt verricht op een deeltje dat zich in het veld verplaatst is gelijk aan lading \cdot potentiaalverschil:

$$W = q \cdot V$$

Een deeltje dat begint met een verwaarloosbare kinetische energie en dan door het elektrisch veld wordt versneld heeft dus uiteindelijk een kinetische energie

$$q \cdot V$$

Als de lading van het deeltje wordt uitgedrukt in Coulomb en de spanning in Volt, dan krijgt E_k automatisch de eenheid Joule. Bijvoorbeeld, een elektron dat een potentiaalverschil van 1 V doorloopt krijgt een energie van $1,60 \cdot 10^{-19}$ J.

Nu is de lading van een subatomair deeltje altijd een veelvoud van de *elementaire lading* e ($= 1,60 \cdot 10^{-19}$ C), en het spaart bij berekeningen over deze deeltjes veel rekenwerk en schrijfwerk om de lading uit te drukken in veelvoud van e . Daarmee ontstaat dan voor de energie ook een nieuwe eenheid, de *elektronvolt*:

1 eV = $1,60 \cdot 10^{-19}$ J. Het elektron dat een potentiaalverschil van 1 V doorloopt krijgt in deze eenheid dus heel simpel een energie van 1 eV.

Profielwerkstuk “de Elementaire lading” <Proef van Millikan>

Simon Besters, Marcel Cleijisen en Maarten Nieuwenhuijze

© havovwo.nl

Wie heeft de elementaire lading ontdekt?



Robert Andrews Millikan is geboren op 22 maart 1868 in Morrison in Amerika, als tweede zoon van Reverend Silas Franklin Millikan en Mary Jane. Zijn grootouders waren nog van het oude Engelse geslacht die voor 1750 naar Amerika waren gekomen om een nieuw bestaan op te bouwen in het Midden-Westen. He leed een boeren bestaan in zijn kindertijd en zat op de Maquoketa High School in Iowa. Na een korte tijd gewerkt te hebben als rechtbank verslaggever, ging hij in 1886 naar de Oberlin College in Ohio. Zijn favoriete vakken waren Grieks en Wiskunde tijdens deze opleiding. Maar toen hij in 1891 afstudeerde werd hij voor twee jaar leraar in de elementaire natuurkunde. In deze periode werd zijn interesse voor dit onderwerp steeds groter. In 1893, nadat hij zijn ‘mastership’ in de natuurkunde had behaald, werd hij benoemd tot hoogleraar in de natuurkunde op de Universiteit van Columbia. Daarna verkreeg hij zijn Ph.D. in 1895 (de engelse titel voor Professor).

Millikan bracht een jaar (1895-1896) door in Duitsland, op de Universiteit van Berlijn en Göttingen. He keerde terug vanwege de uitnodiging van A.A. Michelson om zijn assistent te worden in zijn nieuwe Ryerson Laboratorium op de Universiteit van Chicago in 1896. Millikan was een uitstekende leraar en de nadat hij verschillende titels had behaald werd hij professor op de Universiteit in 1910. Een functie die hij tot 1921 heeft uitgeoefend. Tijdens zijn eerste jaren in Chicago bracht hij veel tijd door met het voorbereiden van zijn boeken en het vereenvoudigen van het lesgeven in de natuurkunde. Hij was auteur of assistent-auteur van de volgende boeken: *A College Course in Physics*, met S.W. Stratton in 1898; *Mechanics, Molecular Physics, and Heat* in 1902; *The Theory of Optics*, met C.R. Mann vertaald uit het Duits in 1903; *A First Course in Physics*, met H.G. Gale in 1906; *A Laboratory Course in Physics for Secondary Schools*, met H.G. Gale in 1907; *Electricity, Sound, and Light*, met J. Mills in 1908; *Practical Physics* – nieuwe druk van *A First Course* in 1920; *The Electron* in 1917; en nieuwe drukken in 1924 en 1935.

Als wetenschapper heeft Millikan verschillende dingen ontdekt, voornamelijk in elektrische velden, en op moleculair gebied in de natuurkunde. Zijn eerste grote succes was in 1910, hij bepaalde zeer nauwkeurige de lading die een elektron draagt, gebruikmakend van de ‘falling-drop method’, ook ontdekte hij dat deze hoeveelheid constant was voor alle elektronen. Op deze manier kon de atoom structuur van elektriciteit weergegeven. Daarna controleerde hij op experimentele wijze het foto-elektrisch effect van Einstein en hij maakte de eerste foto-elektrische waarneming met de constante van Planck (1912-1915). Verder in zijn studies stopte hij al zijn energie in de bewegingen van Brown in gassen en eindigde met de atoom -en kinetische energie van vaste stoffen. Tussen 1920 en 1923 hield Millikan zich bezig met werk omtrent het hete vonken spectrum van de elementen (dit bestond uit het spectrum gebied tussen het ultraviolette en het röntgengebied), daarmee werd het ultraviolet spectrum naar beneden verlengd tot verder dan de destijds bekende limiet. De ontdekking van zijn wet van een deeltje dat naar de aarde valt na het binnendringen van de atmosfeer van de aarde, samen met zijn andere onderzoek op het gebied van elektrische deeltjes, leidde uiteindelijk naar zijn significante studies van de kosmische straling (vooral met de ionisatie energieën).

Millikan was een groot auteur hij heeft velen boeken uitgebracht in zijn leven. Hij schreef niet alleen over de wetenschap, maar ook over religies en filosofie, dit kun je ook duidelijk terug vinden in zijn boeken: *Science and Life* (1924); *Evolution in Science and Religion* (1927); *Science and the New Civilization* (1930); *Time, Matter, and Values* (1932). Kort voor zijn dood publiceerde hij *Electrons (+ and -)*, *Protons, Photons, Neutrons, Mesotrons, and Cosmic Rays* (1947); en zijn autobiografie in 1950.

Tijdens de Eerste Wereld Oorlog, was Millikan Vice-voorzitter van de National Research Council, hij had een belangrijke rol in het ontwikkelen van antionderzeeboten apparaten. In 1921 werd hij benoemd tot Directeur van de Norman Bridge Laboratory of Physics op het Technologische Instituut van Californië, hij was ook tot voorzitter benoemd van de Executive Council van dat Instituut. In 1946 trad hij af. Professor Millikan is ook President van de American Physical Society en Vice-President van de American Association for the Advancement of Science geweest, en hij was het Amerikaanse lid van het Committee on Intellectual Cooperation of the League of Nations, en de Amerikaanse vertegenwoordiger op het Internationale Natuurkunde Congres, beter bekend als het Solvay Congress in Brussel in 1921. Hij heeft verschillende doctor’s titels gehaald van ongeveer vijftiengint universiteiten. En hij was ontvanger van de Comstock Prize van de Nationale Wetenschap Academie, van de Edison Medaille van het Amerikaanse Instituut van Elektrische Wetenschappers,

Profielwerkstuk “de Elementaire lading” <Proef van Millikan>

Simon Besters, Marcel Cleijsen en Maarten Nieuwenhuijze
© havovwo.nl

van de Hughes Medaille van de Royal Society van Groot Britannië en van de Nobel Prijs voor de Natuurkunde in 1923.

Millikan was een enthousiast tennisspeler en golf was ook één van zijn favoriete bezigheden.

Professor Millikan trouwde in 1902 met Greta Erwin Blanchard; zij hadden drie zonen: Clark Blanchard, Glenn Allen, and Max Franklin.

Hij stierf op 19 december 1953 in San Marino, Californië.

Hoe bepalen we zelf de elementaire lading?

Werkplan

De theorie

In deze proef gaan we de elektrische lading van een elektron bepalen. Deze lading is een constante in de natuurkunde. R.A. Millikan heeft deze lading als eerste bepaald in 1913. Dat gebeurde door middel van de ‘Oil-drop experiment’, of ook wel genoemd ‘proef van Millikan’. Millikan toonde aan dat de druppeltjes een geheel veelvoud van de elementaire lading $(-) 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ bezitten.

Het apparaat van Millikan (zie figuur 1) bestaat uit 2 condensatorplaten. Tussen die platen wordt een aantal druppeltjes gespoten, d.m.v een verstuiver. De bovenste plaat is op de pluspool van een variabele gelijkspanningsbron, de onderste is aangesloten op de negatieve pool. Zo ontstaat er een elektrisch veld tussen de platen. Het druppeltje kan een lading hebben gekregen door het verspuiten van de verstuiver. Het druppeltje zweeft tussen de platen als de kracht van het elektrisch veld samen met de opwaartse kracht van de lucht, even groot is als die van de zwaartekracht (Zie figuur 2):

$$F_z = F_E + F_{opw}$$

De zwaartekracht die op het druppeltje werkt kunnen we in de volgende formule weergeven

$$F_z = m \cdot g$$

We weten dat het om een druppel gaat, dus het is een bolvorm. De formule voor het volume van een bol is:

$$\text{volume bol} = \frac{4}{3} \cdot \pi R^3$$

De massa van deze druppel is te berekenen door het volume van de bol te vermenigvuldigen met de dichtheid (ρ) van de stof. De dichtheid is gegeven, op het flesje van de gebruikte olie. Door deze drie gegevens samen te voegen krijgen we uiteindelijk de volgende formule:

$$F_z = \frac{4}{3} \cdot \pi R^3 \cdot \rho_{\text{olie}} \cdot g$$

De elektrische kracht is afhankelijk van de afstand tussen de 2 condensatorplaten, de spanning die op de positieve plaat staat en natuurlijk de lading van het druppeltje.



fig 1 - Apparaat van Millikan

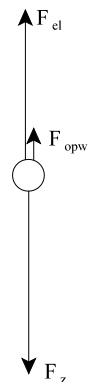


fig 2:
werkende
krachten

Profielwerkstuk “de Elementaire lading” <Proef van Millikan>

Simon Besters, Marcel Cleijns en Maarten Nieuwenhuijze
© havovwo.nl

De afstand tussen de platen noemen we d , de spanning noemen we V en de lading is q .
De kracht van het elektrisch veld is weer te geven in volt per meter:

$$E = \frac{V}{d}$$

Vervolgens kunnen we de kracht die op het druppeltje werkt weergeven door de lading van het druppeltje te vermenigvuldigen met de elektrische kracht van het veld. Daaruit volgt:

$$F_E = q \cdot E = q \cdot \frac{V}{d}$$

De opwaartse kracht F_{opw} zou je de draagkracht van de lucht kunnen noemen.

Op de plaats van het druppeltje bevond zich eerst lucht, deze lucht moet vervolgens opzij gaan om het druppeltje er door te laten gaan. De massa van deze verplaatste lucht vermenigvuldigd met de zwaartekrachtversnelling geeft de opwaartse kracht. Het volume van de verplaatste lucht is even groot als het volume van het druppeltje. Dit volume vermenigvuldigd met de dichtheid (ρ_{lucht}) van de lucht, bij een temperatuur van 20 °C, geeft de massa van de lucht:

$$F_{opw} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho_{lucht} \cdot g$$

De zwaartekracht heeft een verticale kracht omlaag op het druppeltje, de opwaartse en de elektrische kracht werken verticaal omhoog.

Dat geeft als het druppeltje op een vaste hoogte zweeft:

$$F_z = F_E + F_{opw}$$

En in formulevorm schrijven we:

$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho_{olie} \cdot g = q \cdot \frac{V}{d} + \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho_{lucht} \cdot g$$

deze formule gaan we herschrijven, zodat q vrijkomt:

$$q \cdot \frac{V}{d} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho_{olie} \cdot g - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho_{lucht} \cdot g$$

$$q \cdot \frac{V}{d} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot g \cdot (\rho_{olie} - \rho_{lucht})$$

$$q = \frac{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot g \cdot (\rho_{olie} - \rho_{lucht}) \cdot d}{V}$$

Dit is de formule die we nodig hebben als het druppeltje stil hangt en de straal al weten. De twee vooralsnog onbekende variabelen in deze formule zijn de spanning (V) en de straal (R) van het druppeltje. De spanning meten we tijdens de proef. De straal van het druppeltje is niet direct te meten, maar wel via een formule en een aparte meting. Dat doen we door het druppeltje een vrije val te laten maken en de tijd te meten die het druppeltje nodig heeft om een bepaalde afstand af te leggen.

Profielwerkstuk “de Elementaire lading” <Proef van Millikan>

Simon Besters, Marcel Cleijisen en Maarten Nieuwenhuijze
© havovwo.nl

Als we het elektrisch veld uitschakelen verdwijnt de naar boven gerichte elektrische kracht. Het druppeltje zal vervolgens een beweging omlaag maken. Nu komt er een werkende kracht bij. Doordat het druppeltje een vallende beweging maakt door de lucht, ontstaat er wrijving, F_w (Zie figuur 3).

De wrijving die het druppeltje ondergaat is te berekenen m.b.v. de wet van Stokes. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de viscositeit (stroperigheid) van lucht, die in de Binas te vinden is. Na enige tijd zijn de krachten die werken gelijk aan elkaar, dat is als de druppel een bepaalde constante snelheid heeft gekregen.

$$F_z = F_{opw} + F_w$$

De zwaartekracht F_z is nog steeds hetzelfde als bij de eerste formule. Het volume van het druppeltje vermenigvuldigd met de dichtheid van de olie, vervolgens vermenigvuldigd met de zwaartekrachtsversnelling.

$$F_z = \frac{4}{3} \cdot \pi R^3 \cdot \rho_{olie} \cdot g$$

De opwaartse kracht is ook weer hetzelfde als bij de eerste formule. Het volume van de verplaatste lucht, vermenigvuldigd met de dichtheid van de lucht, vervolgens vermenigvuldigd met de zwaartekrachtsversnelling.

$$F_{opw} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho_{lucht} \cdot g$$

De nieuwe werkende kracht is de wrijving van de lucht. Dit komt door de viscositeit (η) van de lucht. Deze waarde is bepaald en bij een temperatuur van 20 °C geldt dat de viscositeit $1.83 \times 10^{-5} \text{ N/m}^1 \text{ s}^{-1}$ is. Bij de bepaling van deze kracht zijn we afhankelijk van de Wet van Stokes. Deze wet beschrijft de wrijvingskracht van stof op een voorwerp met een bepaalde straal en snelheid. Wij moeten bij onze meting er vanuit gaan dat deze formule correct opgesteld is. De formule van de Wet van Stokes is:

$$F_w = 6\pi \cdot \eta \cdot R \cdot v$$

Nu hebben we dus drie krachten werken op het druppeltje tijdens de vrije val. Hierbij hebben we een aantal gegeven waarden en twee variabelen. De twee variabelen zijn de straal en de snelheid van de druppel.

in formulevorm krijgen we:

$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho_{olie} \cdot g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho_{lucht} \cdot g + 6\pi \cdot \eta \cdot R \cdot v$$

Om deze formule bruikbaar te maken, moeten we de formule vereenvoudigen. Dat doen we als volgt:

We delen beide leden door π en daarna door R .

$$\frac{4}{3} \cdot R^2 \cdot \rho_{olie} \cdot g = \frac{4}{3} \cdot R^2 \cdot \rho_{lucht} \cdot g + 6 \cdot \eta \cdot v$$

Uit deze vergelijking willen we bepalen wat de variabele R is. Dat doen we door R naar het linker lid te brengen en de rest naar het rechter lid.

$$\frac{4}{3} \cdot R^2 \cdot (\rho_{olie} - \rho_{lucht}) \cdot g = 6 \cdot \eta \cdot v$$

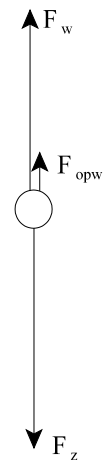


fig 3:
werkende
krachten

Profielwerkstuk “de Elementaire lading” <Proef van Millikan>

Simon Besters, Marcel Cleijisen en Maarten Nieuwenhuijze
© havovwo.nl

$$R^2 = \frac{6 \eta \cdot v}{\frac{4}{3} \cdot g \cdot (\rho_{\text{olie}} - \rho_{\text{lucht}})}$$

$$R = \sqrt{\frac{6 \cdot \eta \cdot v}{\frac{4}{3} \cdot g \cdot (\rho_{\text{olie}} - \rho_{\text{lucht}})}}$$

Met deze formule verwerken we onze metingen.

Nu moeten we alleen nog de snelheid van het druppeltje bepalen. Dat doen we door de afstand en de tijd te bepalen van de vrije val van het druppeltje. De afgelegde afstand delen we door de tijd en daaruit volgt de snelheid. Als afstand nemen we drie hokjes op een rasterverdeling van een microscoop. Tijdens de uitvoering bepalen we deze afstand.

Uit de tijd en de afstand volgt de snelheid:

$$v = \frac{s}{\Delta t}$$

Als we nu de proef uitvoeren komen de volgende metingen naar voren: de tijd (t), de afstand (s) en de spanning (V). Als we de t en de s invullen in de formule van de snelheid, volgt daar uit de snelheid.

Nu we v hebben kunnen we deze invullen in:

$$R = \sqrt{\frac{6 \cdot \eta \cdot v}{\frac{4}{3} \cdot g \cdot (\rho_{\text{olie}} - \rho_{\text{lucht}})}}$$

De waarde van r die daar uit volgt vullen we in de formule in waar we q hebben vrijgemaakt. Tevens vullen we de spanning (V) in de formule in:

$$q = \frac{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot g \cdot (\rho_{\text{olie}} - \rho_{\text{lucht}}) \cdot d}{V}$$

Uit deze formule volgt de waarde q, de lading van het druppeltje. De lading vertegenwoordigt een geheel veelvoud van de elementaire lading (e) in het druppeltje. Dit geheel veelvoud is het aantal extra elektronen in het druppeltje. Door de lading q te delen door een geheel getal, komen we uit op een waarde die de elementaire lading zou moeten benaderen.

Deze proef moet erg nauwgezet worden uitgevoerd. Door een groot aantal metingen uit te voeren wordt ons resultaat nauwkeuriger. We gaan per druppel drie vrije vallen meten en drie keer de spanning bij het evenwicht. Dit doen we bij ongeveer 10 druppeltjes.

Profielwerkstuk “de Elementaire lading” <Proef van Millikan>

Simon Besters, Marcel Cleijsen en Maarten Nieuwenhuijze
© havovwo.nl

proefopstelling

Voor het uitvoeren van de proef hebben we de volgende onderdelen nodig:

- Benodigdheden:
- Millikan's 'Oil drop apparatus'
 - Verstuiwer
 - Siliconen olie ($0,972 \text{ g/cm}^3$)
 - 600V voeding voor condensatorplaten
 - Potentiometer
 - 6V voeding voor lampje
 - Voltmeter
 - Stopwatch
 - Thermometer
 - Dun ijzerdraad
 - Waterpas
 - Geodriehoek

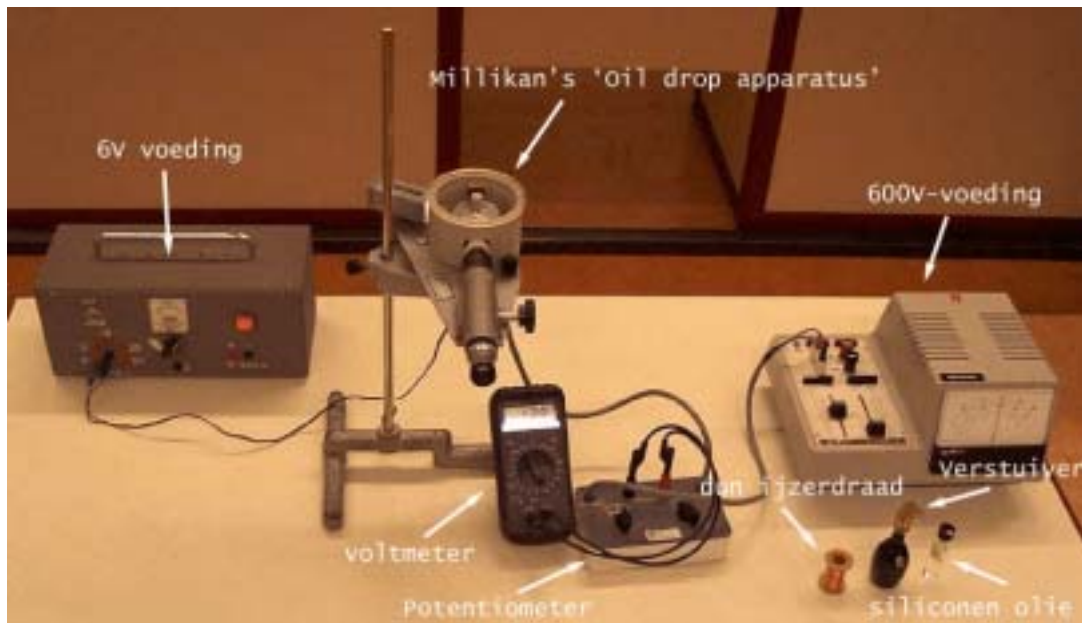


fig 4 - de gebruikte proefopstelling

Profielwerkstuk “de Elementaire lading” <Proef van Millikan>

Simon Besters, Marcel Cleijsen en Maarten Nieuwenhuijze
© havovwo.nl

Uitvoering

- We nemen het apparaat en plaatsen deze op een vlakke tafel, vervolgens nemen we de waterpas en controleren of het apparaat volledig vlak staat. Als dit niet het geval is, kunnen we d.m.v. de drie schroefpootje op het apparaat dit bijstellen. Dit is nodig omdat de proef anders niet nauwkeurig kan verlopen: het vallende/zwevende druppeltje kan dan uit het gezichtsveld verdwijnen.
In figuur 5 duiden de rode pijlen de schroefpootjes aan voor het bijstellen.
- Vervolgens sluiten we de 600V voeding (zie figuur 6) aan op het lichtnet. De kabels hiervan worden aangesloten op de plus- en de min-pool van de potentiometer (zie figuur 7). Dit apparaat kan de spanning over de platen omkeren of uitschakelen, dat is mogelijk met de linker draaiknop. De middelste stand (N) schakelt het elektrisch veld uit. Met het apparaat kun je d.m.v. de rechter draaiknop de hoogte van de spanning regelen. Vanaf de potentiometer lopen kabels naar het apparaat van Millikan. De voeding moet van 0V tot 600V regelbaar zijn en gelijkspanning geven. Wij hebben er voor gekozen om de spanning op de potentiometer te regelen, dit kan namelijk ook op de spanningsbron zelf. Dat doen we omdat de condensatoren in de spanningsbron een vertragend effect hebben. Met de potentiometer hebben we hier geen last van.
- De 6V voeding moet aangesloten worden op het lampje in het apparaat van Millikan, het lampje zorgt er voor dat de druppeltjes en de rasterverdeling waargenomen kunnen worden. We verduisteren de ruimte volledig, want licht van buitenaf maakt het waarnemen erg moeilijk.
- De voltmeter wordt aangesloten op de potentiometer, hiervoor is een speciale aansluiting midden bovenaan op de potentiometer (zie figuur 7). Hier lezen we verderop in de proef op af hoeveel volt er op de bovenste, positieve condensator plaat staat. Aan de hand van dit voltage en de afstand tussen de platen kunnen we de kracht van het elektrisch veld berekenen.
- Als het apparaat goed staat en de spanningsbronnen zijn aangesloten, maken we het apparaat klaar voor gebruik. We verwijderen de kunstof bovendeksel en halen de plug uit het gaatje van de bovenste condensatorplaat, vervolgens steken we een zeer dun ijzerdraadje door dat gaatje naar binnen (zie figuur 8). Deze houden we even vast op die plaats, vervolgens stellen we de microscoop op het draadje scherp, zodat de druppeltjes die straks ongeveer op dezelfde plaats bewegen scherp te zien zijn. Vervolgens verwijderen we het ijzerdraadje weer en plaatsen de kunstof deksel terug op het apparaat.

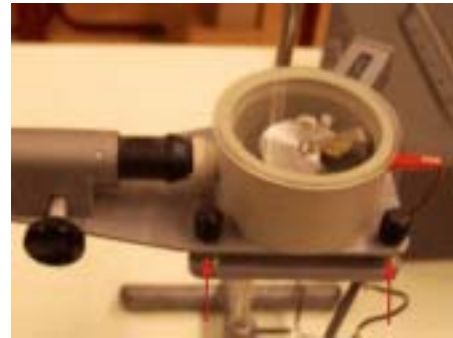


fig 5 - Bijstellen van het apparaat



fig 6 - 600 V voeding



fig 7 - potentiometer

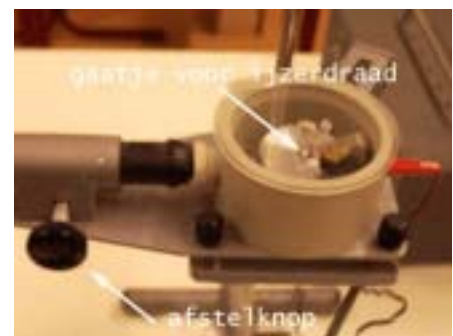


fig 8 - afstellen microscoop

Profielwerkstuk “de Elementaire lading” <Proef van Millikan>

Simon Besters, Marcel Cleijns en Maarten Nieuwenhuijze
© havovwo.nl

- f. De verstuiver vullen we met de siliconen-olie, ongeveer 5mm hoog (zie figuur 9). Vervolgens knijpen we aantal maal stevig in het ballonnetje zodat de verstuiver klaar voor gebruik is. De kop van de verstuiver steken we net door het gat in de kunststof deksel heen, maar niet te ver. Vervolgens knijpen we stevig in het ballonnetje en de ruimte tussen de kunststof deksel en de bovenste condensatorplaat wordt gevuld met fijne druppeltjes olie. Een klein aantal van deze druppeltjes valt dan al door C heen en komt tussen de twee condensatorplaten terecht. Gebeurt dit niet, dan maken we met een ijzer-draadje het gat schoon en proberen het opnieuw.
- g. We zetten het elektrisch veld aan, d.m.v het inschakelen van de 600V voeding. We voeren d.m.v. potentiometer de spanning zo op, ondertussen kijkend door de microscoop, dat een van de druppeltjes stil blijft hangen tussen de platen. Met dit druppeltje vervolgen we de rest van de eerste meting.



fig 9 - Siliconenolie en verstuiver

- h. We verplaatsten het druppeltje naar een lijntje op de rasterverdeling en hangen deze stil. De spanning die daar voor nodig is noteren we bij druppel 1. Vervolgens schakelen we het elektrisch veld uit en starten tegelijkertijd de tijdmeting bij de hierop volgende valbeweging van het druppeltje. Nadat het druppeltje drie hokjes heeft afgelegd stoppen we de tijd. Deze tijd noteren we bij druppel 1. Dit doen we in totaal drie keer. Dus per druppel krijgen we drie tijden en drie spanningen.

In totaal voeren we bij tien druppels deze metingen uit. Dat is nodig om tot een goede gegronde conclusie te komen. Tijdens de uitvoering voeren we ook de volgende meting uit: we pakken een geodriehoek, knippen hier de punt vanaf, zodat de rasterverdeling vanaf de rand meteen begint. Vervolgens verwijderen we de kunststof deksel en de bovenste condensatorplaat. We houden de geodriehoek in het midden van de cilinder (zie figuur 10). Als we nu door de microscoop kijken zien we de rasterverdeling van de geodriehoek. Eventueel stellen we de microscoop wat af, zodat het beeld scherp wordt. We nemen nu 2 mm en kijken hoeveel hokjes dit in beslag neemt op de graadverdeling van de microscoop. Bij de calibratie van de rasterverdeling komen we uit op 4.8 hokje per 2 mm. Dat betekent dat 1 hokje 0,42 mm groot is.



fig 10 - calibreren van rasterverdeling

Profielwerkstuk “de Elementaire lading” <Proef van Millikan>

Simon Besters, Marcel Cleijsen en Maarten Nieuwenhuijze
© havovwo.nl

Meetresultaten

Druppel	Tijdmeting 1 (s)	Tijdmeting 2 (s)	Tijdmeting 3 (s)
1	17.11	17.38	17.24
2	17.14	17.52	17.16
3	12.69	12.59	12.52
4	19.62	19.89	19.70
5	20.21	19.95	19.89
6	19.87	19.93	19.68
7	11.81	12.19	12.01
8	17.58	17.52	17.46
9	14.85	15.01	15.08
10	12.68	12.61	12.64

Druppel	Spanning 1 (V)	Spanning 2 (V)	Spanning 3 (V)
1	598	601	601
2	316	306	309
3	498	489	520
4	490	505	501
5	239	241	242
6	163	168	165
7	178	181	172
8	296	301	303
9	375	372	378
10	503	508	505

verwerking van meetresultaten

Zoals in ons werkplan is te zien verwerken we de meting in de formules. Nu hebben wij drie tijdmetingen en drie spanningen. Hier nemen we per druppel een gemiddelde van en vullen deze in, in de formules. Om dit proces te versnellen hebben we een programma geschreven voor de TI-83 waar de drie tijdmetingen en de drie spanningen moeten worden ingevoerd. Deze geeft vervolgens alle waarden die daar uit te berekenen zijn. Over de werking van het programma is in de bijlage 'uitleg TI-83 software' de programmaregels te lezen.

De uitwerkingen via de TI-83 staan in de tabel op de volgende pagina. Hierbij houdt het programma rekening met significante cijfers.

Profielwerkstuk “de Elementaire lading” <Proef van Millikan>

Simon Besters, Marcel Cleijisen en Maarten Nieuwenhuijze
© havovwo.nl

Verwerking van de meetresultaten

no.	gem. tijd (s)	gem. spanning (V)	snelheid (m/s)	straal (m)	veldsterkte (V/m)	lading (C)	element. lading (C)	aantal elektronen	afwijking (%)
1	17.2	600	$7.27 \cdot 10^{-5}$	$7.92 \cdot 10^{-7}$	120000	$1.66 \cdot 10^{-19}$	$1.66 \cdot 10^{-19}$	1	3.5
2	17.3	310	$7.23 \cdot 10^{-5}$	$7.90 \cdot 10^{-7}$	62000	$3.18 \cdot 10^{-19}$	$1.59 \cdot 10^{-19}$	2	0.8
3	12.6	502	$9.92 \cdot 10^{-5}$	$9.26 \cdot 10^{-7}$	100400	$3.15 \cdot 10^{-19}$	$1.58 \cdot 10^{-19}$	2	1.7
4	19.7	499	$6.35 \cdot 10^{-5}$	$7.40 \cdot 10^{-7}$	99800	$1.62 \cdot 10^{-19}$	$1.62 \cdot 10^{-19}$	1	1.1
5	20.0	241	$6.25 \cdot 10^{-5}$	$7.35 \cdot 10^{-7}$	48200	$3.29 \cdot 10^{-19}$	$1.65 \cdot 10^{-19}$	2	2.6
6	19.8	165	$6.31 \cdot 10^{-5}$	$7.38 \cdot 10^{-7}$	33000	$4.87 \cdot 10^{-19}$	$1.62 \cdot 10^{-19}$	3	1.3
7	12.0	177	$10.42 \cdot 10^{-5}$	$9.48 \cdot 10^{-7}$	35400	$9.63 \cdot 10^{-19}$	$1.61 \cdot 10^{-19}$	6	0.2
8	17.5	300	$7.14 \cdot 10^{-5}$	$7.85 \cdot 10^{-7}$	60000	$3.23 \cdot 10^{-19}$	$1.62 \cdot 10^{-19}$	2	0.8
9	15.0	375	$8.33 \cdot 10^{-5}$	$8.48 \cdot 10^{-7}$	75000	$3.25 \cdot 10^{-19}$	$1.63 \cdot 10^{-19}$	2	1.4
10	12.6	505	$9.92 \cdot 10^{-5}$	$9.26 \cdot 10^{-7}$	101000	$3.14 \cdot 10^{-19}$	$1.57 \cdot 10^{-19}$	2	2.0

Profielwerkstuk “de Elementaire lading” <Proef van Millikan>

Simon Besters, Marcel Cleijssen en Maarten Nieuwenhuijze
© havovwo.nl

Conclusie

Na het uitvoeren van de proef en het verwerken van de theorie en meetresultaten zijn we tot een aantal conclusies gekomen die antwoord geven op onze hoofdvraag en deelvragen.

Wat is de elementaire lading?

De elementaire lading is de kleinst mogelijke lading die in de natuur voorkomt. Deze lading komt voor in atomen, waarbij dat altijd een geheel veelvoud van de elementaire lading is, dit kan positief of negatief zijn.

Hoe is de elementaire lading te bepalen?

Door middel van de proef van Millikan kan men zeer nauwkeurig de elementaire lading bepalen. De proef op school misschien minder nauwkeurig verloopt, kan het wel heel erg nauwkeurig gebeuren. Geautomatiseerd, verloopt dit natuurlijk veel nauwkeuriger en kunnen er veel meer metingen in een veel kortere tijd gedaan worden. Dit verhoogd natuurlijk de nauwkeurigheid. Al met al zijn we toch wel tevreden over de behaalde resultaten.

Wie heeft de elementaire lading, en de waarde daarvan, ontdekt?

R.A. Millikan, heeft de elementaire lading en zijn waarde ontdekt in 1910, daarmee behaalde hij de Nobelprijs. Zijn meting week wel ernstig af van de huidige bepaalde waarde, dit kwam omdat hij een systematische fout maakte tijdens zijn meting.

Uit de proef kwamen een aantal verbanden naar voren. Hoe meer vrije elektronen, dus een grotere lading, hoe minder spanning er nodig was om de druppel stil te hangen. Als er je voor 1 vrij elektron 500V nodig zou hebben, zou bij dezelfde druppel met 2 elektronen, de helft van de spanning nodig zijn. Hieruit concluderen wij dat de aanwezigheid van een lading, invloed heeft op het gedrag van de druppel. Deeltjes die geen lading bezaten konden wij dan ook niet stilzetten.

De snelheid van de druppel is, in een elektrisch-veld-vrije ruimte, afhankelijk van de grootte van de straal. Hoe groter de straal, des te groter de massa. Die grotere massa zorgt dan tevens voor een grotere zwaartekracht.

Na het uitvoeren van de proef en het verwerken van de meetresultaten, zijn wij tot de conclusie gekomen dat een fundamentele proef heel goed door Vwo-leerlingen kan worden uitgevoerd. Het vereist wel enige discipline en precisie.

Profielwerkstuk “de Elementaire lading” <Proef van Millikan>

Simon Besters, Marcel Cleijsen en Maarten Nieuwenhuijze
© havovwo.nl

Evaluatie

Allereerst is duidelijk naar voren gekomen dat we de proef zeer precies moesten uitvoeren. Bij een eerste proef, om de apparatuur te leren kennen, bleek dat onze resultaten een erg grote afwijking hadden met de waarde die in de BINAS vermeld staat. Bij de uitvoering liepen we tegen een aantal problemen aan. Allereerst was de apparatuur niet compleet. Toen we deze hadden verzameld, bleek de verstuiver niet te werken. Dat kwam omdat de persoon die de proef als laatste had uitgevoerd de olie in de verstuiver had laten zitten. Daardoor waren de buisjes in het apparaat dichtgeslibd. Nadat we deze met aceton hadden behandeld, werkte het nog steeds niet. Na een aantal mislukte pogingen, lukte het ons om een fijne wolk van druppeltjes te creëren. Vervolgens hadden we problemen met de waarneming. De druppeltjes waren moeilijk zichtbaar. Dit kwam omdat het lenslampje niet goed functioneerde, er was roet gevormd binnenin, dat belemmerde het licht. In het kabinet waren alleen 2.5 Volts lampjes aanwezig, deze zorgde voor te weinig licht. Daardoor waren we genoodzaakt om de spanning over het lampje te vergroten, met als gevolg dat er enkele lampjes sneuvelden.

Voor we aan de proef begonnen werden we gewaarschuwd, dat de resultaten stevig zouden kunnen afwijken van de BINAS-waarde. Dit viel ons erg mee. Bij de tien verschillende metingen kwamen we op een gemiddelde afwijking van 1,5%.

Het is ons gelukt om een afwijking van maar 0,2% te realiseren. Tevens hadden we een uitschieter naar de 3,5%.

De berekeningen van de resultaten zijn uitgevoerd met de TI-83, dit zorgde voor een snelle, foutloze berekening van de waarden, waarbij rekening is gehouden met de significante cijfers. Zie voor de werking van het programma de bijlage ‘uitleg TI-83 software’.

Wij zijn erg tevreden over het verloop van de proef en het maken van het werkstuk. Het groepje werkte goed samen, waarschijnlijk omdat we goed op elkaar ingespeeld waren. We hebben allebei erg veel geleerd van dit werkstuk, en we vonden het een grote uitdaging.

Profielwerkstuk “de Elementaire lading” <Proef van Millikan>

Simon Besters, Marcel Cleijns en Maarten Nieuwenhuijze
© havovwo.nl

Bronnenlijst

Boeken:

Kern van de natuurkunde - deel 1

Dr. R.L. Krans

Wolters-Noordhoff - 1974

ISBN: 9001503055

Kern van de natuurkunde - deel 2

Dr. R.L. Krans

Wolters-Noordhoff - 1974

ISBN:

Systematische Natuurkunde N2-VWO1

Drs. J.W. Middelink

Nijgh-Versluys - 2000

ISBN: 9042503688

Systematische Natuurkunde N2-VWO2

Drs. J.W. Middelink

Nijgh-Versluys - 2000

ISBN: 9042503726

Systematische Natuurkunde N1-VWO3

Drs. J.W. Middelink

Nijgh-Versluys - 2001

ISBN: 9042503653

Internetadressen:

Thinkquest - Atom, The Incredible World

Team# 19662

<http://library.thinkquest.org/19662/low/eng/exp-millikan.html>

Measuring e Using the Millikan Apparatus

Tom Haynie

<http://webphysics.davidson.edu/Alumni/ToHaynie/OilDrop/oiltable.htm>

Profielwerkstuk “de Elementaire lading” <Proef van Millikan>

Simon Besters, Marcel Cleijsen en Maarten Nieuwenhuijze
© havovwo.nl

Bijlagen

TI-83 software

Om onze meetresultaten wat sneller te verwerken, zonder steeds weer opnieuw die formules in te voeren, schreef Simon een programma voor de TI-83. Zo konden we resultaten vrijwel onmiddellijk evalueren. Het programma heeft drie verschillende tijdsmetingen nodig per druppel, voor elke tijdmeting krijg je een nieuw scherm. Daar rekent deze het gemiddelde van uit, lettend op de significante cijfers.



Vervolgens vraagt het programma drie verschillende spanningsmetingen, ook hier krijg je voor elke spanningsmeting een apart scherm. Dat betekent dat we drie keer het druppeltje stilhangen, daarvan de spanning noteren. Ook hiervan wordt het gemiddelde berekend, incl. significante cijfers.



Vervolgens berekent het programma de snelheid van het druppeltje, de straal van het druppeltje, de veldsterkte en de lading van het druppeltje. Komt deze laatste waarde buiten de grenzen van $(0.8 \cdot 10^{-19})$ tot $(10.4 \cdot 10^{-19})$ dan geeft de GR aan OUT OF RANGE. De benedengrens betekent dat de gemeten waarde echt fout is, de bovengrens is een 6-voud van (e) . Een grotere lading komt niet zo vaak voor, omdat die druppeltjes hun lading al snel weer verliezen aan andere druppeltjes. Als de waarden buiten de aangegeven grenzen komt is de meting dus niet goed verlopen (of een te grote lading) en wordt het meetresultaat als ongeldig beschouwd. Als de waarde wel binnen de grenzen valt, dan krijg je een aantal waarden in beeld.

Eerst de snelheid van het druppeltje, vervolgens de straal ervan.



Profielwerkstuk “de Elementaire lading” <Proef van Millikan>

Simon Besters, Marcel Cleijisen en Maarten Nieuwenhuijze
© havovwo.nl

Vervolgens geeft het de veldsterkte en de lading van de druppel weer.



De volgende stap is de weergave van de berekende elementaire lading en het aantal vrije elektronen in het druppeltje.



Als laatste krijgen we te zien hoeveel procent onze meting afwijkt van de waarde die in de BINAS vermeld staat.



Profielwerkstuk “de Elementaire lading” <Proef van Millikan>

Simon Besters, Marcel Cleijisen en Maarten Nieuwenhuijze
© havovwo.nl

Broncode

```
:ClrHome
:Input "TIJDMETING 1 " ,A
:ClrHome
:Input "TIJDMETING 2 " ,B
:ClrHome
:Input "TIJDMETING 3 " ,C
:(A+B+C)/3→D
:round(D,1)→T
:ClrHome
:Input "SPANNINGSMETING1",L
:ClrHome
:Input "SPANNINGSMETING2",M
:ClrHome
:Input "SPANNINGSMETING3",N
:ClrHome
:(L+M+N)/3→P
:round(P,0)→U
:0.00125/T→V
:√((6*1.83*10-5*V)/(4/3*9.81*(973-1)))→R
:((4/3*P*(R)3*9.81*(973-1)*5*10-3)/U)→Q
:Q*1019→Q
:round(Q,2)→Q
:Q*10-19→Q
:(10-19)→K
:If Q<(0.8K) or Q>(10.4K)
:Then
:ClrHome
:Disp "","","","!!OUT OF RANGE!!"
:Pause
:ClrHome
:Stop
:Else
:ClrHome
:Disp "","","GEM. TIJD (S)","-----",T
:Pause
:ClrHome
:Disp "","","GEM. SPANNING(V)","-----",U
:V*105→V
:round(V,2)→V
:V*10-5→V
:Pause
:ClrHome
:Disp "","","SNELHEID (M/S)","-----",V
:Pause
:ClrHome
:R*107→R
:round(R,2)→R
:R*10-7→R
:Disp "","","STRAAL (M)","-----",R
:Pause
:U/(5*10-3)→G
:ClrHome
:Disp "","","VELDSTERKTE(V/M)","-----",G
:Pause
```

Profielwerkstuk “de Elementaire lading” <Proef van Millikan>

Simon Besters, Marcel Cleijisen en Maarten Nieuwenhuijze

© havovwo.nl

```
:ClrHome
:Disp “”, “”, “LADING DRUPPEL”, “-----“, Q
:Pause
:ClrHome
:If Q<(2.4K)
:Then
:1 → X
:Else
:If Q>(2.4K) and Q<(4K)
:Then
:2 → X
:Else
:If Q>(4K) and Q<(5.6K)
:Then
:3 → X
:Else
:If Q>(5.6K) and Q<(7.2K)
:Then
:4 → X
:Else
:If Q>(7.2K) and Q<(8.8K)
:Then
:5 → X
:Else
:If Q>(8.8K) and Q<(10.4K)
:Then
:6 → X
:End
:End
:End
:End
:End
:End
:End
:Q/X → E
:ClrHome
:Disp “”, “”, “ELEMENT. LADING”, “-----“, E, ””
:Pause
:ClrHome
:Disp “”, “”, “ELEKTRONEN”, “-----“, X
:Pause
:ClrHome
:(1.6021765*10^-19)/E → Y
:(Y-1)*100 → Z
:round(Z,1) → F
:abs(F) → O
:Disp “”, “”, “PROCENTUELE”, “    AFWIJKING”, “-----“, O
:Pause
:ClrHome
:Stop
:End
```