

## Contents

1. Snelheid elektronen in een koperdraad .....1
2. Wat is een koperdraad, elektrisch bekeken? ..... 2
3. Wat is de snelheid van de elektronen stroom in een koperdraad? 4
4. Wat is de werkelijke snelheid van een elektron in een geleider? 5
5. En wat is de gemiddelde lengte dat een elektron aflegt? .... 6

# 1.Snelheid elektronen in een koperdraad

Veronderstel dat we een schakeling hebben zoals in fig1. Een lampje van 9 Watt is via een schakelaar verbonden aan een batterij van 9 volt. De verbindingsdraden hebben een doorsnede van  $1 \text{ mm}^2$ . Het lijkt mij dus een eenvoudige vraag: "Wat is de snelheid van de elektronen in deze koperdraad?".

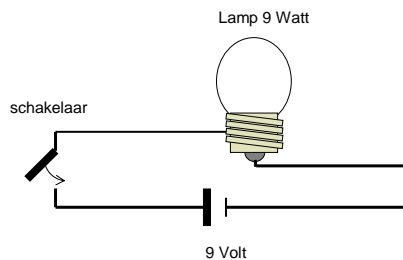


fig 1

Wanneer men aan verschillende personen vraagt wat is de snelheid waarmee de elektronen zich verplaatsen in de koperdraad kan men de volgende antwoorden verwachten.

De snelheid is gelijk, of toch bijna gelijk, aan de snelheid van het licht. Er kan wel een materiaal constante zijn  $\mu$ r die de snelheid iets vertraagt zodat er wel een klein verschil bestaat tussen koperdraad of aluminiumdraad. Als men bedenkt dat hoe lang de afstand van de draad van de schakelaar naar de lamp ook moge zijn men onmiddellijk ziet dat de lamp aangaat. Vergelijk dit met een telefoongesprek dat men voert met een persoon, laten we zeggen die in Oostende woont, dan is er toch ook geen (hoorbare) vertraging in het gesprek, en ook hier is het een elektronisch circuit dat elektronen verplaatst van mij tot in Oostende.

Een ander zeer nadenkend persoon redeneert als volgt. Als stroom een verplaatsing is van elektronen dan is dat te vergelijken met verplaatsing van moleculen. Nu weten we dat als moleculen zich hevig (dus snel ) verplaatsen dat dit warmte veroorzaakt. Als de elektronen zich zouden verplaatsen met de snelheid van het licht dan zou de koperdraad gloeiend heet staan, en dat gebeurt niet. Dus de snelheid zal veel minder zijn maar toch nog behoorlijk snel want ook ik zie geen tijdsverschil tussen het sluiten van de schakelaar en het opflitsen van het licht in de lamp.

Weer anderen zullen verschrikt met hun wenkbrauwen fronsen in hun haar krabben en dan voorzichtig beweren dat deze vraag een strikvraag is en dat het meer met magnetische en elektrische velden te maken heeft dan met het verplaatsen van elektronen.

Maar wat is dan het juiste antwoord?

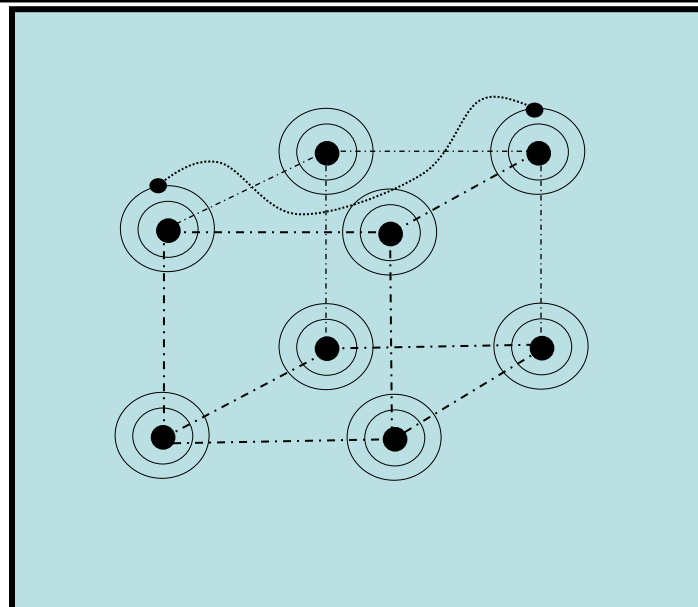
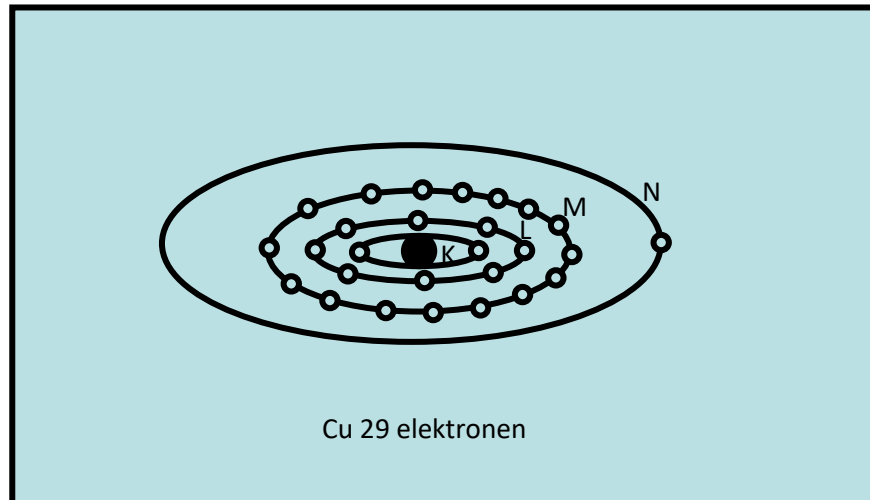
Om dit te beantwoorden moeten we even enkele begrippen wat beter definiëren.

## **2. Wat is een koperdraad, elektrisch bekeken?**

In een koperdraad is de binding van de elektronen rond de atoomkern in de buitenste schil, (namelijk de valentieband) niet zeer sterk. Dit is de reden dat reeds door de omgevingstemperatuur er genoeg elektronen kunnen vrijgemaakt worden die zich vrij gemakkelijk, door de warmte kracht, kunnen bewegen in de een of andere richting in het kopermateriaal. Dit is dus wat men noemt de geleidbaarheid van koper, of misschien anders uitgedrukt de kleine weerstand die koper biedt ten opzichte van het transport van elektronen. Het aantal vrije elektronen/m<sup>3</sup> is enorm groot en gelijk aan:

$n \approx 8.5 \times 10^{28}$  elektronen/m<sup>3</sup> Dit getal komt ongeveer overeen met het aantal koper-moleculen een stuk draad bevat. Of in andere woorden, men mag aannemen dat voor koper er per

molecule (één proton + 29 elektronen) er één elektron bij is (het valentie elektron) dat zich kan vrijmaken.



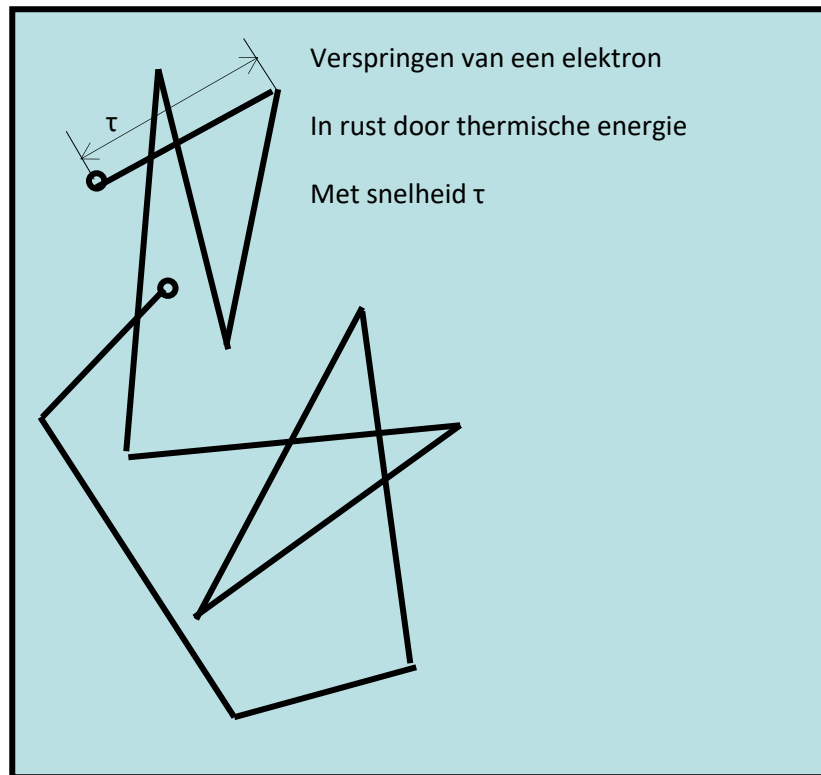
Een vrij elektron wordt onmiddellijk aangetrokken door een proton in de geburen dat ook een elektron verloren heeft op zijn buitenste schil. Met een tamelijk grote snelheid en versnelling verplaatst het elektron zich totdat het gevangen wordt in zijn nieuwe omgeving.

Dit gebeurt voortdurend in een kriskras beweging maar totaal beschouwd is er gemiddeld genomen geen elektronen verplaatsing naar boven of naar onder (maar misschien wel van links of naar rechts). De draad gedraagt zich voor de buitenwereld neutraal. Er komen geen elektronen bij of er verdwijnen geen elektronen in het beschouwde stukje draad.

Wanneer er echter een spanning aangelegd wordt over de uiteinden van de draad, dan zal onder invloed van deze spanning de elektronen meer de neiging vertonen om zich GEMMIDELD

gezien meer naar de positieve kant (waar er een tekort is aan elektronen) te verplaatsen. Deze gemiddelde snelheid is, verbazingwekkend genoeg, niet erg groot. In een draad met doorsnede van  $1 \text{ mm}^2$  waarin een stroom vloeit van 1 Ampère is deze minder dan 1 mm per seconde!

Noteer dat er wel degelijk een spanningsverschil bestaat over een stuk koperdraad (ook al is deze spanning zeer klein door de grote geleidbaarheid van koper). Vergelijk dit met een grote waterbuis. Zolang er geen waterniveau verschil bestaat tussen de ingang en de uitgang van de waterbuis zal er geen druppel water zich verplaatsen van het ene niveau naar het andere.



### 3. Wat is de snelheid van de elektronen stroom in een koperdraad?

Proberen we nu even uit te rekenen wat de snelheid ( $v_d$ ) is van deze elektronen wanneer we een koperen draad hebben met een doorsnede van  $1 \text{ mm}^2$  waarin een stroom vloeit van 1 Ampère.

De afstand ( $L$ ) dat een elektron aflegt in een bepaalde tijd ( $t$ ) is gelijk aan:

$L = v_d \cdot t$  (als men  $10 \text{ km/u}$  fiets gedurende  $2 \text{ u}$  dan is de afstand  $10 \text{ km/u} \times 2 \text{ u} = 20 \text{ km}$ ).

Het aantal elektronen in de volume  $V$ , welke gelijk is aan  $L \cdot S$ , is dan  $n \cdot L \cdot S$  en met  $L = v_d \cdot t$  wordt dit  $n \cdot v_d \cdot t \cdot S$  hierin is  $n$  het aantal elektronen/volume zoals hierboven gedefinieerd.

De lading van 1 elektron is  $q = e$ , en deze lading heeft een waarde van:

$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Coulomb}$  (Coulomb is de eenheid van lading)

De totale lading ( $Q$ ) is dan  $Q = q \cdot n \cdot v_d \cdot t \cdot S$

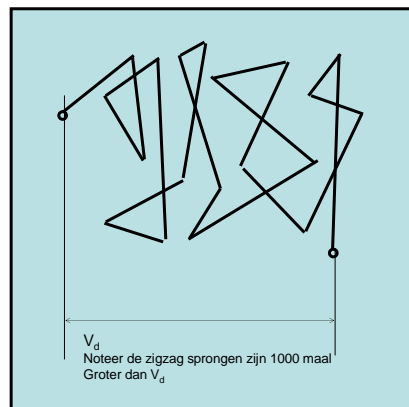
Nu is de definitie van stroom niets anders dan de lading / tijdseenheid (Hoeveel elektronen passeren er hier voorbij per sec ) of anders uitgedrukt  $I = Q/t$  en dus  $I = Q/t = q.n.v_d.S$ . En dus kunnen we de snelheid bepalen als  $v_d = I/q.n.S$

Vullen we de gekende cijfers in dan bekommen we

$$V_d = 1 \text{ Amp} / (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})( 8.5 \times 10^{28} )( 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2) = 7.440 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

ofwel 0.744 mm / sec, dit is zelfs trager dan een luie slak. Hoe is zo iets te verklaren, als men weet dat een elektron in de vrije ruimte tegen een snelheid van bijna 300.000 km/s raast?

Juist zoals in een watervat waarvan men onderaan de kraan opendraait, zal het ook nog een tijdje duren vooraleer de waterdruppels van boven in het vat naar onder gezakt zijn. Zo ook onder invloed van de spanning over de draad, zullen de elektronen aan het uiteinde van de draad eerst naar de negatieve kant van de Spanningsbron vloeien, en al de elektronen in de draad schuiven op. Vermits er zoveel vrije elektronen aanwezig zijn per  $\text{mm}^3$  zal de opschuiving traag verlopen, maar het effect dat er stroom vloeit naar de spanningsbron is (bijna) onmiddellijk zichtbaar.



#### 4. Wat is de werkelijke snelheid van een elektron in een geleider?

Uit de fysica weet men dat de energie die nodig is om een elektron uit zijn rooster te onttrekken gelijk is aan 7.04 ev. Dat is dus ook de energie dat het elektron meegegeven krijgt bij zijn aanvang als vrij elektron in het rooster.

Nu is (en dat heb ik heb op school geleerd)  $E = \frac{1}{2}.m.v^2$  Hieruit volgt dat  $v = \sqrt{\frac{2.E}{m}}$

Wanneer men weet dat  $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$  en de massa van een elektron  $m = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$

$$\text{dan wordt } v_e = \sqrt{\frac{2 \times 7.04 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}}} = 1.57 \times 10^6 \text{ m/s of } 1570 \text{ km/s.}$$

En dit is dan toch wel een behoorlijke snelheid.

### 5. En wat is de gemiddelde lengte dat een elektron aflegt?

Dit is een langer verhaal maar in een degelijk boek van fysica zal men wel een formule kunnen vinden die de Weerstand per meter of  $R/L = \rho$  laat zien. Deze formule is:

$$\rho = \frac{2 \cdot m \cdot v_e}{n \cdot q^2 \cdot S \cdot x}$$

Hierin is  $\rho = R/L$  Weerstand per meter,  $m$  = massa van een elektron,  $v_e$  de snelheid van het elektron zoals hiervoor uitgerekend,  $n$  het aantal elektronen per  $\text{m}^3$ ,  $q$  de lading van een elektron,  $S$  de doorsnede van de draad (in ons geval  $1 \text{ mm}^2$ ) en  $x$  de werkelijke afstand dat een elektron aflegt (Dit is veel maal groter dan de GEMIDDELDE afstand !!!).

$$\text{Uit de formule } \rho = \frac{2 \cdot m \cdot v_e}{n \cdot q^2 \cdot S \cdot x} \text{ halen we dat } x = \frac{2 \cdot m \cdot v_e}{n \cdot q^2 \cdot S \cdot \rho}$$

Wanneer men weet dat de weerstand per meter in koper gelijk is aan  $1.72 \times 10^{-8} \text{ Ohm}$  dan is de afstand  $x$  van een vrij elektron gemiddeld genomen gelijk aan

$$x = \frac{2 \times (9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(1.57 \times 10^6 \text{ m/s})}{(8.48 \times 10^{28} \text{ e/m}^3)(1.6 \times 10^{-19} \text{ C/e})(1 \text{ mm}^2)(1.78 \times 10^{-8} \Omega)} = 76.6 \text{ nm}$$

Wanneer men weet dat de ionen in een koperrooster op  $0.26 \text{ nm}$  van elkaar staan dan passeert gemiddeld genomen een elektron  $766/0.26 = 295$  ionen vooraleer terug opgenomen te worden bij een ander proton.

Ik hoop dat deze uitleg niet te ingewikkeld was, maar langs de andere kant toch een juiste verklaring weergeeft over een eenvoudige vraag die intuïtief zeer moeilijk te beantwoorden valt.

Jan Spaenjers