

Geleidbaarheid van edelmetaalmunten testen

Inleiding

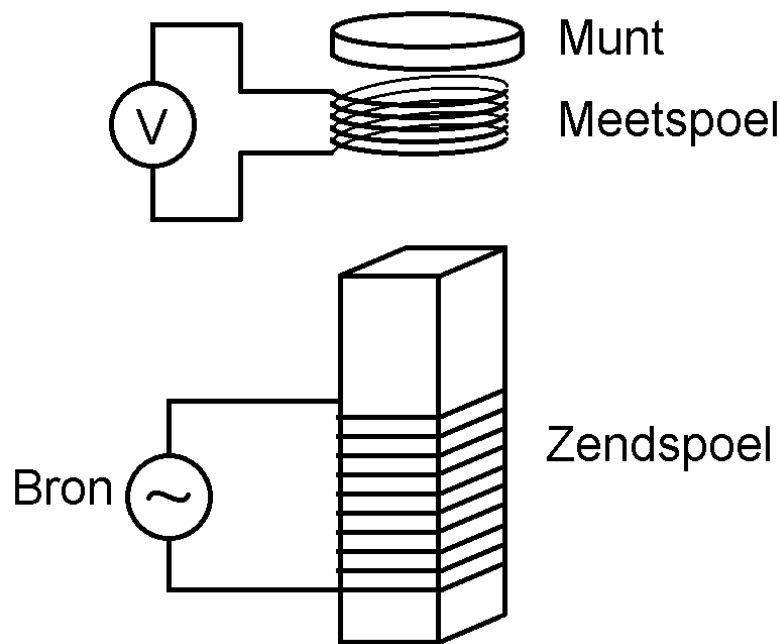
In de onderstaande figuren is een vervalste krugerrand afgebeeld. Terwijl een echte krugerrand een homogene samenstelling heeft van 91,67% goud en 8,33% koper, bestaat de vervalsing hoofdzakelijk uit het goedkope wolfraam en slechts een dun buitenste laagje van goud. Op de linker foto is het linker deel van de vervalste munt met een gasvlam verhit waarbij er een soort blaasjes aan het oppervlak zijn ontstaan.



Om vast te stellen of een edelmetaal munt echt is en geen vervalsing, kunnen we een aantal fysische eigenschappen van de munt meten en nagaan of deze overeenkomen met die van een echte munt. Om te beginnen kun je ter controle de afmetingen en de massa van de munt meten. Daarnaast kun je de munt bijvoorbeeld in trilling brengen en nagaan of de eigenfrequenties de juiste waarden hebben. In de volgende tekst beschrijven we een methode om de elektrische geleidbaarheid van de munt te testen.

Principe van de opstelling

De onderstaande figuur toont schematisch de opstelling waarmee de elektrische geleidbaarheid van een munt getest kan worden. De zendspoel met ferrietkern is op een wisselspanningsbron aangesloten. Hierdoor loopt er een wisselstroom door de spoel. De zendspoel produceert een wisselend magneetveld bij de meetspoel en bij de te onderzoeken munt. De spanning die in de meetspoel wordt opgewekt wordt met een voltmeter gemeten. Vlak boven de meetspoel bevindt zich de munt. In de munt ontstaan ten gevolge van het variërende magneetveld wervelstromen. De wervelstromen wekken een magnetisch veld op dat het oorspronkelijke magneetveld voortdurend tegenwerkt. Ten gevolge hiervan zal de spanning die de voltmeter aanwijst, kleiner zijn dan die zonder munt. De afname van de spanning hangt in sterke mate van de geleidbaarheid van de munt af. Om het effect van de wervelstromen in de munt zo goed mogelijk te kunnen meten, is het van groot belang dat alle windingen van de meetspoel zo dicht mogelijk bij de munt zitten.



Zendspoel met bron

De zendspoel is voorzien van een ferrietkern. Aangezien de frequentie van de bron in het kilohertzgebied ligt (zie hierna), is ferriet superieur boven weekijzer. Anders zouden de wervelstroomverliezen in de kern van de zendspoel te groot zijn. De maximale waarde van de stroom $I(\max)$ door de zendspoel is evenredig met de maximale waarde van de bronspanning $U_b(\max)$ en omgekeerd evenredig met de frequentie f . In symbolen geldt:

$$I(\max) \sim (1/f) \cdot U_b(\max)$$

De ferrieten kern in de zendspoel heeft als voordeel dat de zelfinductie van de zendspoel veel groter wordt waardoor de bron minder belast wordt. Bovendien is het opgewekte magnetische veld bij de meetspoel en de munt veel sterker waardoor de gemeten spanning van de meetspoel veel groter is.

Meetspoel zonder munt

De opgewekte spanning in de meetspoel is evenredig met de tijdsafgeleide van de flux door deze spoel. Hieruit volgt dat de maximale waarde van de spanning $U_m(\max)$ van de meetspoel evenredig is met de maximale waarde van de flux $\Phi(\max)$ en met de frequentie f .

In symbolen:

$$U_m(\max) \sim f \cdot \Phi(\max).$$

De maximale waarde van de magnetische flux $\Phi(\max)$ door de meetspoel is evenredig met de maximale waarde van de stroomsterkte $I(\max)$ door de zendspoel.

In symbolen:

$$\Phi(\max) \sim I(\max)$$

Hieruit volgt dat:

$$U_m(\max) \sim f \cdot I(\max) \sim f \cdot (1/f) \cdot U_b(\max) \sim U_b(\max).$$

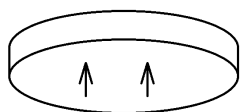
Als van de bronspanning dus alleen de frequentie verhoogd zou worden (en niet de amplitude!), zou de effectieve waarde van de spanning van de meetspoel dus gelijk blijven, althans in theorie.

Een andere manier om hier naar te kijken is door de zendspoel en meetspoel te beschouwen als respectievelijk de primaire en de secundaire spoel van een transformator. Ook dan is de secundaire spanning evenredig met de primaire spanning.

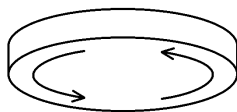
De munt

In het algemeen zijn wervelstromen lussen van elektrische stromen binnen een geleider door een veranderend magnetisch veld in de geleider. Wervelstromen vloeien in gesloten circuits, in vlakken loodrecht op het magnetisch veld. Je zou kunnen zeggen dat wervelstromen rond magnetische veldlijnen stromen. Wervelstromen nemen toe bij 1) toenemende frequentie van het veranderende magnetisch veld en bij 2) toenemende geleidbaarheid van het metaal.

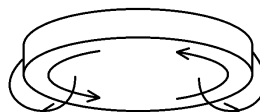
In de munt ontstaan wervelstromen die de verandering van de magnetische flux door de munt tegenwerken. Zie de onderstaande figuren waarin de munt van de onderkant wordt bekeken. Stel dat de magnetische flux (afkomstig van de zendspool) naar boven wijst en toeneemt. Zie de linker figuur. Er ontstaat dan een rondgaande stroom door de munt. Zie de tweede figuur. Deze rondgaande stroom wekt dan een magneetveld op dat volgens de wet van Lenz een tegenflux geeft. Zie de veldlijnen in de derde figuur. Dit heeft tot gevolg dat de stroomdichtheid in de munt naar boven toe afneemt. Dit wordt uitgelegd met behulp van de vierde figuur (geheel rechts). Hierin is de munt in een aantal horizontale plakjes verdeeld. In het onderste plakje zorgt de rondgaande stroom voor een tegenflux. Deze tegenflux loopt ook door het een na onderste plakje waardoor de fluxverandering hierin kleiner is (vier verticale pijltjes in plaats van acht). Dientengevolge zal ook de opgewekte stroom in dit plakje kleiner zijn. Op dezelfde manier is de fluxverandering in het derde plakje nog weer kleiner (slechts twee verticale pijltjes) waardoor de stroom in dit plakje ook weer kleiner is. Enzovoort. Kortom, de stroomdichtheid aan de onderzijde van de munt is het grootst. Dit heet het skineffect. De effectieve dikte van de laag (skin) waar de stroom doorheen gaat is omgekeerd evenredig met de wortel van de frequentie en ook omgekeerd evenredig met de wortel van de geleidbaarheid.



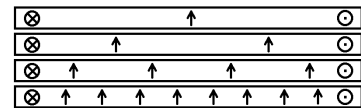
De flux neemt toe.



Er loopt een wervelstroom.



De wervelstroom creëert een tegenflux.



De stroom is aan de onderzijde van de munt het sterkst.

Bij toenemende frequentie zijn de wervelstromen sterker, omdat de fluxveranderingen dan in een kortere tijd plaatsvinden.

Meetspoel met munt

In de volgende beschouwing nemen we aan dat de windingen van de meetspoel een zeer kleine afstand tot de munt hebben. De flux door de meetspoel is dan opgebouwd uit twee componenten namelijk flux A en flux B. Flux A is de flux die door de zendspool wordt opgewekt en flux B is de flux die in de munt wordt opgewekt. Flux B werkt flux A tegen.

De procentuele daling van de gemeten spanning (van de meetspoel) ten gevolge van het plaatsen van de munt wordt groter bij 1) toenemende frequentie van het magneetveld en bij 2) toenemende geleidbaarheid van de munt. In beide gevallen wordt flux B groter. In twee extreme gevallen is de gemeten spanning van de meetspoel nul namelijk bij een oneindig hoge frequentie van het magneetveld en bij een oneindig grote geleidbaarheid in de munt.

Keuze van de frequentie

De optimale frequentie waarbij onderscheid gemaakt kan worden tussen de geleidbaarheid in munten hangt nauw samen met de indringdiepte van het magnetische veld (dikte van de skin). Hieronder staat een tabel met indringdieptes van verschillende metalen bij verschillende frequenties. De indringdiepte wordt kleiner bij toenemende frequentie en toenemende geleidbaarheid.

| Stof | Geleidbaarheid (MS/m) | Indringdiepte bij 200 Hz (mm) | Indringdiepte bij 1 kHz (mm) | Indringdiepte bij 2 kHz (mm) | Indringdiepte bij 5 kHz (mm) | Indringdiepte bij 10 kHz (mm) |
|------------|-----------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Aluminium | 37,7 | 5,80 | 2,59 | 1,83 | 1,16 | 0,82 |
| Goud | 45,2 | 5,30 | 2,37 | 1,67 | 1,06 | 0,75 |
| Krugerrand | 9,7 | 11,43 | 5,11 | 3,62 | 2,29 | 1,62 |
| Wolfraam | 18,8 | 8,21 | 3,67 | 2,60 | 1,64 | 1,16 |
| Zilver | 62 | 4,52 | 2,02 | 1,43 | 0,90 | 0,64 |

Je wilt voorkomen dat bij de te testen munten de indringdiepte veel kleiner is dan de dikte van de munt. Je wilt namelijk niet alleen het buitenste laagje van de munt testen maar ook het materiaal binnenin de munt. Deze eis stelt een bovengrens aan de frequentie. Aan de andere kant wil je de frequentie ook niet te laag maken omdat de procentuele afname van de spanning van de meetspoel dan te klein wordt. Een goed compromis blijkt 2 kHz te zijn. Je kan dan bij wijze van spreken 'diep' in de munt kijken. De krugerrand, die in vergelijking tot de andere metalen de grootste indringdiepte heeft, heeft bij 2 kHz een indringdiepte van maar liefst 3,62 mm. De dikte van deze munt bedraagt slechts 2,84 mm.

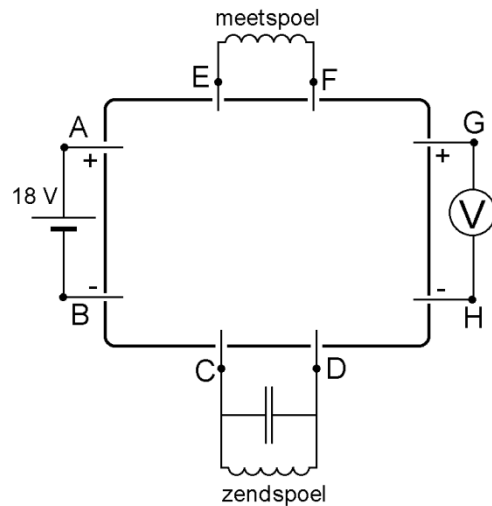
De elektronica in de opstelling

In de opstelling vormt een kastje met elektronica het hart van de opstelling. Zie de figuur hiernaast. Het kastje heeft acht aansluitingen A tot en met H. Op A en B wordt de voeding aangesloten. Punten C en D sturen de zendspool in combinatie met een condensator aan. Bij de door het kastje aangeboden frequentie f (zie hierboven voor de keuze van f) moeten de spoel en de condensator in parallelresonantie komen. Als de spoel een zelfinductie L heeft, moet de condensator een capaciteit C hebben, zodanig dat geldt:

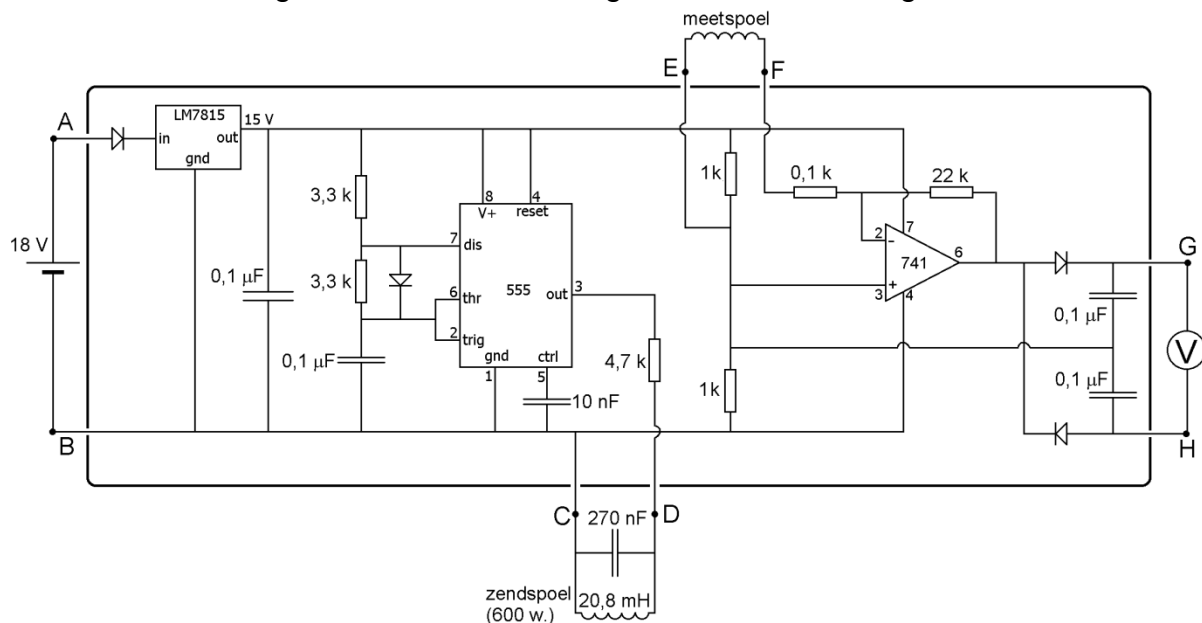
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Elke spoel heeft dus zijn eigen condensator.

De meetspoel wordt op de punten E en F aangesloten. De elektronica in het kastje versterkt het signaal van de meetspoel en maakt er vervolgens een gelijkspanning van. Deze laatste spanning wordt op de punten G en H aangeboden. Zodoende kan met een simpele gelijkspanningsmeter gemeten worden wat het effect van een munt bij de meetspoel is.



De onderstaande figuur toont de schakeling binnen de behuizing.



De LM7815 levert een constante voedingsspanning van 15 V voor de rest van de schakeling. De condensator van 100 nF gaat snelle fluctuaties van deze voedingsspanning tegen.

De uitgang van de 555 (timer) heeft een potentiaal die op en neer springt tussen nul en de voedingsspanning. De frequentie (dit is 2 kHz) van het uitgangssignaal van de 555 wordt bereikt met twee weerstanden R van 3,3 k Ω , een diode en de condensator met een capaciteit C van 0,1 μ F. Voor de gegenereerde periode van de 555 geldt bij benadering:

$$T = 1,4 \times R \times C.$$

Na invulling van de componentwaarden geldt dan voor de frequentie f:

$$f = 1/T = 2,2 \text{ kHz.}$$

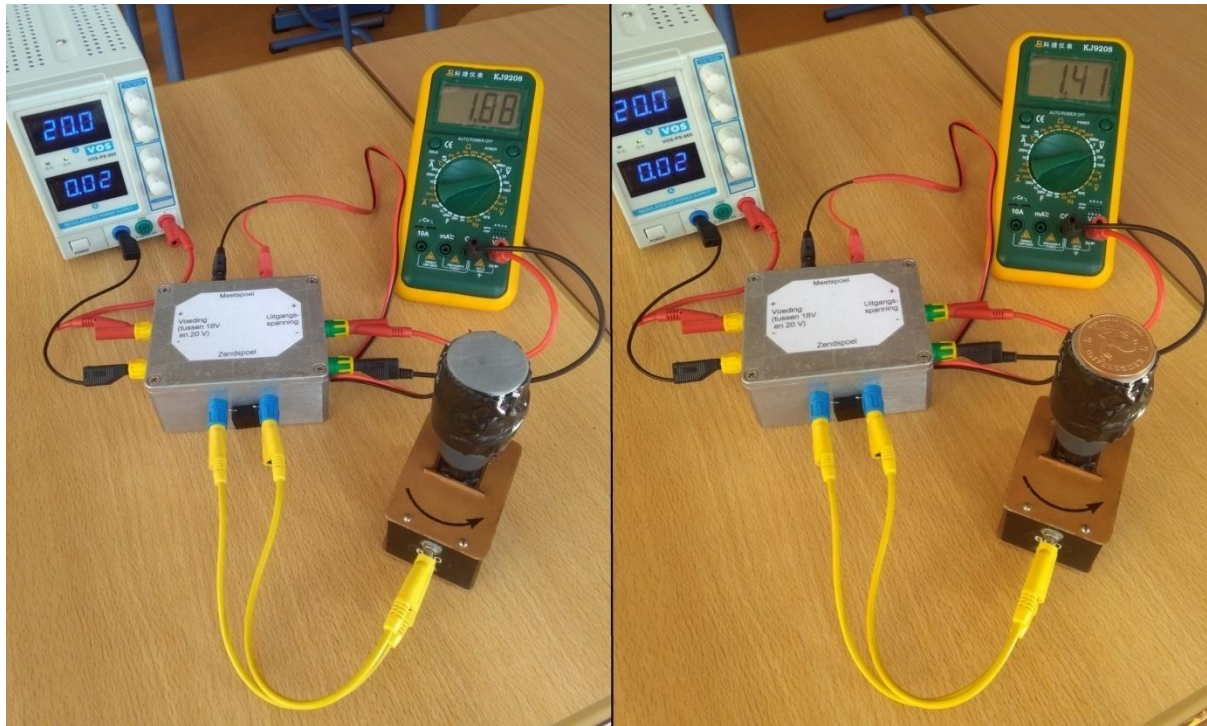
De uitgang van de 555 stuurt via een weerstand (4,7 k) de parallelschakeling aan van de zendspoel en een condensator. Deze laatste heeft een zodanige capaciteit, dat de resonantiefrequentie van de spoel met condensator 2,2 kHz bedraagt. Omdat onze zendspoel een zelfinductie L van 20,8 mH heeft, moet de condensator een capaciteit C hebben van ongeveer 270 nF. De spanning over de spoel is dan bij benadering sinusvormig, mits de verbindingsweerstand (in de schakeling 4k7) groot genoeg is.

Met de 741 (opamp) is een inverterende versterker gemaakt. Het signaal van de meetspoel wordt iets minder dan 220 keer versterkt. Het gain-bandwidth produkt van de 741 is zeg 1 MHz. Bij 2 kHz zou de open loop gain dan 500 zijn. Met de terugkoppeling in de schakeling is de closed loop gain iets minder dan 220 keer. Vervolgens wordt het versterkte signaal aangeboden aan een dubbelfasige gelijkrichter.

Praktische uitvoering

De onderstaande twee foto's tonen de opstelling in de praktijk. Op elke foto zijn de voeding, het elektronicakastje, de zend- en ontvangerspoel en de multimeter te zien. In de linker foto ligt er geen munt op de meetspoel en wijst de multimeter 1,88 V aan. In de rechter foto ligt er een krugerrand (dikte 2,84 mm, diameter 32,77 mm) op de meetspoel en wijst de multimeter 1,41 V aan. Als er een 1 oz American Silver Eagle munt (dikte 2,98 mm, diameter 40,6 mm) op de meetspoel zou liggen, zou de multimeter slechts 0,49 V aanwijzen.

Overigens nemen de uitgangsspanningen af bij een minder goede multimeter (door de lagere ingangsimpedantie van de meter).

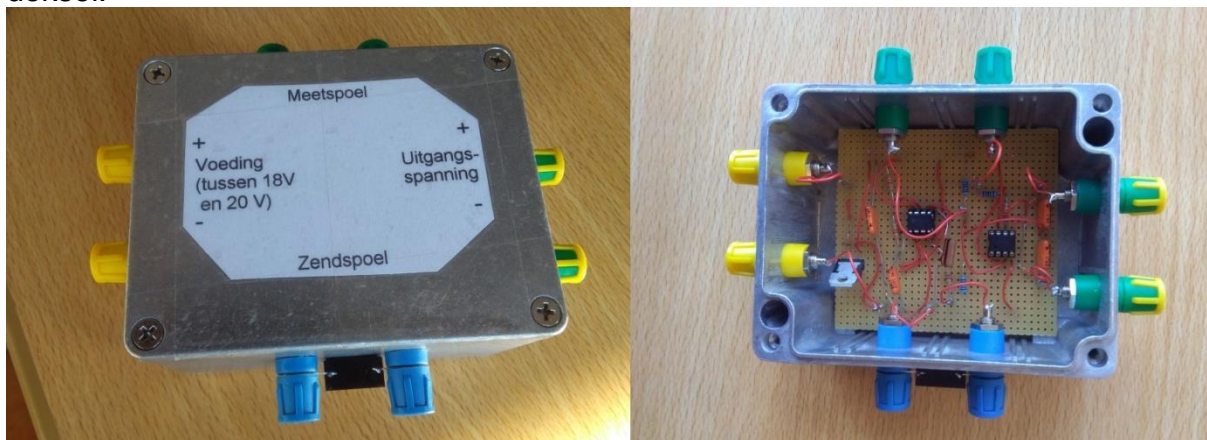


Dat een krugerrand in verhouding een kleine afname van de spanning geeft, komt doordat zijn geleidbaarheid relatief klein is. Een krugerrand heeft een gehalte van 22 karaat (goudgehalte van 91,67%). De rest bestaat uit koper, wat de munt sterker maakt en een lichtoranje kleur geeft. Terwijl goud en koper een geleidbaarheid hebben van 45 MS/m respectievelijk 58 MS/m, bedraagt de geleidbaarheid van een krugerrand slechts 9,7 MS/m. Een vervalste krugerrand met een wolframkern zou op deze manier door de mand vallen omdat wolfram een geleidbaarheid heeft van 19 MS/m en de afgelezen spanning lager zou liggen.

In de onderstaande drie foto's zijn de zend- en meetspoel van dichtbij afgebeeld. Links is het geheel afgebeeld waarbij de zendspool onder zit en de meetspoel boven. Rechtsboven is de meetspoel (nog zonder tape) afgebeeld en rechtsonder de ferrietkern die het hart van de zendspool vormt.



De onderstaande figuren tonen het elektronicadoosje; links met deksel en rechts zonder deksel.



Het doormeten van een zilverbaar (van bijvoorbeeld 1 kg)

Bij het controleren van zilverbaren met een dikte van meer dan 1 cm moet de indringdiepte van het wisselende magneetveld vergroot worden. Volgens de bovenstaande tabel lijkt een frequentie van 200 Hz dan passend. In plaats van de schakeling in het doosje aan te passen (bij de 555), kunnen we de zendspoel natuurlijk ook rechtstreeks op een toongenerator aansluiten. Om deze laatste niet te zwaar te belasten, kan een condensator parallel aan de zendspoel gezet worden. Overigens kan het tweede deel van de schakeling in het doosje (de versterker/gelijkrichter) wel van nut blijven.