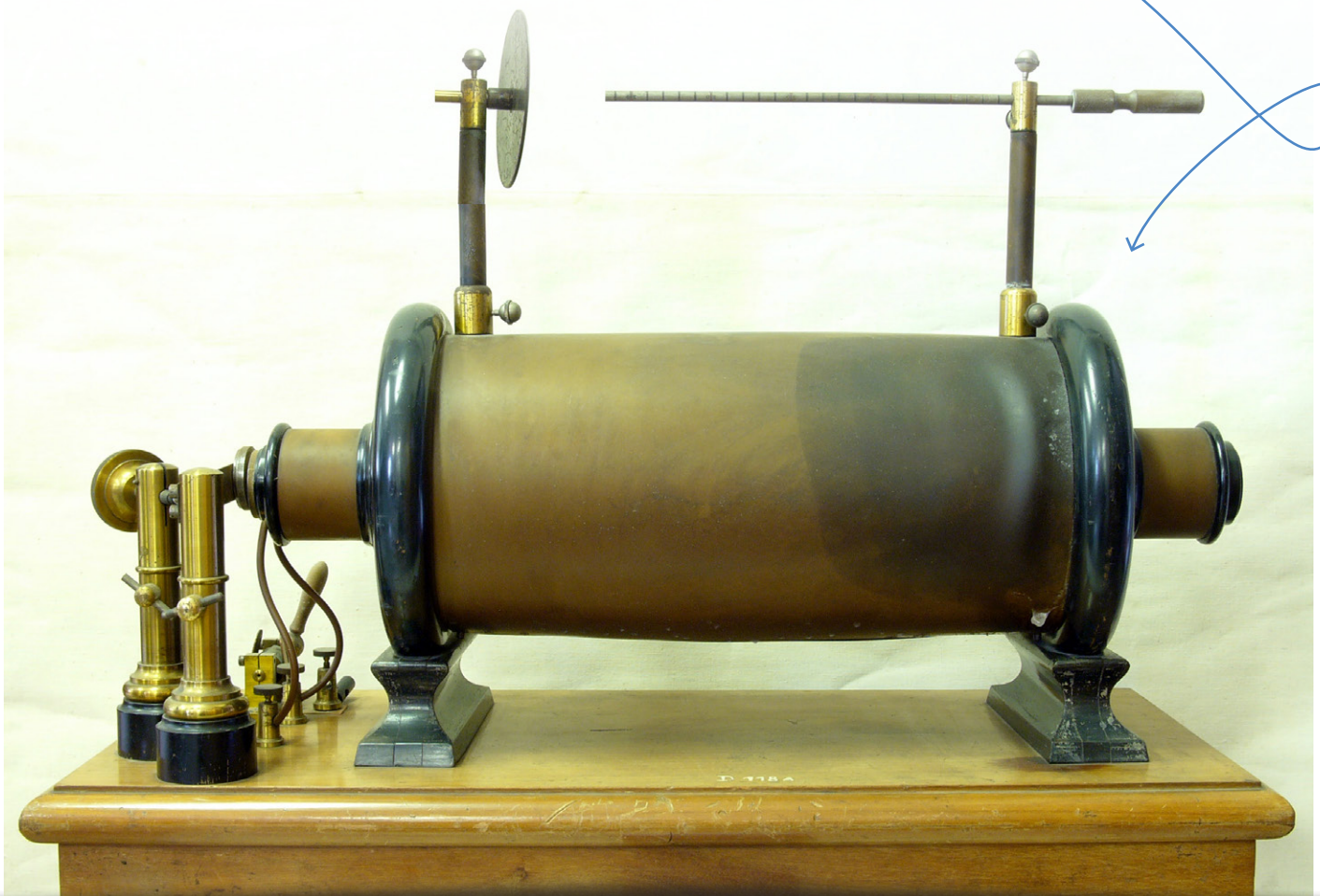
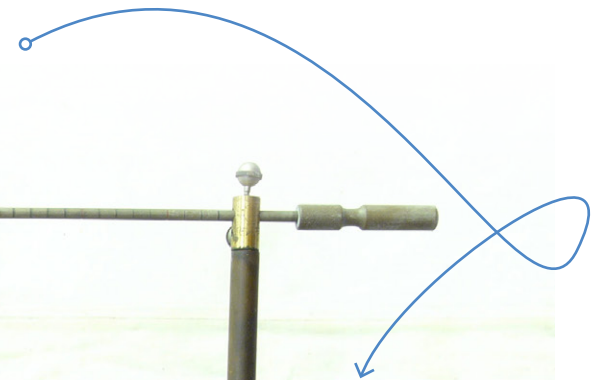


Alle begin...

...neemt het op tegen de spoel!



Vonkinductor (Bron: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Induktionsapparat_hg.jpg).

Eric Bogers

Laten we eerlijk zijn: de meeste (hobby-)elektronici haten spoelen. Kant-en-klare smoorspoeltjes, dat gaat nog, maar zodra we zelf aan het wikkelen moeten is de boot aan – meestal kost het ettelijke pogingen voordat we zelfs maar in de buurt van de gewenste eigenschappen komen...

In alle opzichten zijn spoelen de tegenpool van condensatoren. Bij een condensator neemt de impedantie (wisselstroomweerstand) af met toenemende frequentie; bij een spoel (zelfinductie) neemt die impedantie juist toe met toenemende frequentie. En terwijl bij een condensator de stroom voorijlt op de spanning (zie de vorige aflevering van “Alle begin...”), ijlt deze bij spoelen juist na op de spanning.

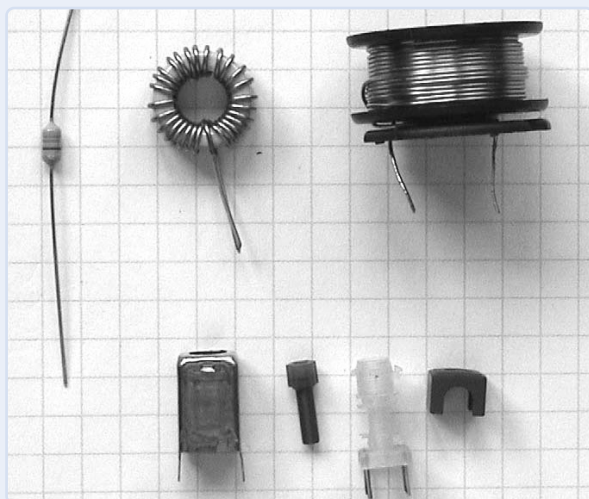
In **figuur 1** hebben we een paar ‘schoolvoorbeelden’ van spoelen geportretteerd. Helemaal links prijkt een (axiaal) smoorspoeltje; ten gevolge van de uitvoering en de gekleurde ringen wordt zo’n spoeltje snel voor een weerstand aangezien. Terzijde: de kleurcode bij deze spoeltjes is vergelijkbaar met die van weerstanden. Middenboven is een ringkernspoel te zien; deze vindt vooral in

ontstorningsnetwerkjes toepassing. En rechtsboven zien we een luchtspoel in volle glorie – deze komen we vaak tegen in wissel-filters voor luidsprekersystemen.

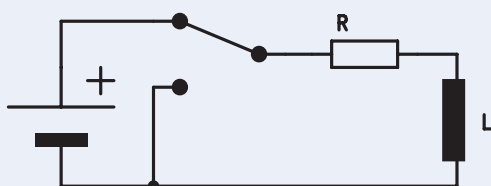
Onder tenslotte zien we een spoelvorm met ferrietkern voor hoogfrequente toepassingen. Hier moeten we de draad zelf op het spoellichaam wikkelen en daarom kunnen we binnen zekere grenzen de zelfinductie van de spoel zelf bepalen.

De spoel als energiereservoir

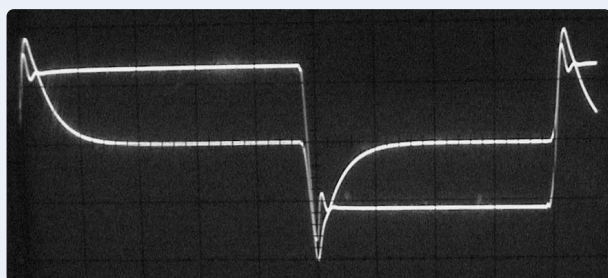
Wanneer er een stroom door een spoel loopt, dan wordt rond die spoel een magnetisch veld opgebouwd waarin de energie wordt opgeslagen. Als de stroom door de spoel wordt onderbroken, komt die energie weer vrij: er wordt dan een spanning geïnduceerd die de aanvankelijke stroom in stand probeert te houden.



Figuur 1. Enkele spoelen.



Figuur 2. Omschakelen van de stroom door een spoel.



Figuur 3. Doorschot bij in- en uitschakelen.

De mate waarin een spoel energie kan opslaan, wordt de zelfinductie L genoemd (uitgedrukt in henry, afgekort H). Voor de energie die in een spoel wordt opgeslagen, geldt:

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

Waarschijnlijk ziet u enige overeenkomst met de corresponderende formule voor de condensator – alleen staat er bij de spoel een *stroom* I en bij de condensator een *spanning* U .

In- en uitschakelgedrag

Ook de in- en uitschakelkarakteristieken van een spoel zijn het tegengestelde van de laad/ontlaadkarakteristiek van een condensator.

Wanneer er een spanning over een spoel wordt gezet, loopt er in eerste instantie nauwelijks een stroom; de spoel is dus hoogohmig en de spanning over de spoel is maximaal. De stroom neemt echter langzaam toe, waarbij de spanning over de spoel navenant afneemt. De stroom door de spoel nadert asymptotisch tot een maximumwaarde (die door de draadweerstand van de spoel wordt bepaald), en de spanning over de spoel neemt af tot een minimum dat wordt bepaald door de spanning over de draadweerstand.

Het gedrag van een spoel is vooral interessant op het moment van omschakelen: wanneer de polariteit van de aangelegde spanning wordt omgekeerd (**figuur 2**), stort het magnetische veld van de spoel in en wordt een spanning geïnduceerd met een polariteit die de stroom in de aanvankelijke richting in stand wil houden – die polariteit is dus tegengesteld aan die van de aanvankelijk aangelegde spanning. Het gevolg is dat er op het moment van omschakelen een forse ‘doorschieter’ te zien is (**figuur 3**).

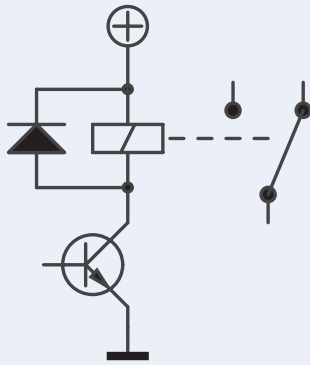
Bij het uitschakelen kunnen zelfinductiespanningen veroorzaken die aanzienlijk hoger zijn dan die welke aanvankelijk waren aangelegd. (Bij condensatoren zien we iets vergelijkbaars: die kunnen aanzienlijk grotere stromen leveren dan die waarmee ze zijn geladen.)

Deze eigenschap van spoelen kan worden gebruikt om uit een lage spanning een hogere spanning te maken; een voorbeeld is de vonkinductor [1]. Hebt u toevallig een auto met benzinemotor? De ontsteekspanning voor de bougies wordt geleverd door een bobine die volgens precies dit principe werkt.

Een ongewenst effect van dit verschijnsel is dat de geïnduceerde spanning andere onderdelen in een schakeling kan vernielen. Het bekendste voorbeeld is een relais (een elektromagnetische schakelaar waarin het magnetische veld van een spoel wordt gebruikt om schakelcontacten te bedienen) dat via een transistor wordt aangestuurd. Bij het afschakelen wordt een spanning geïnduceerd die de transistor niet alleen *kan* maar in veel gevallen ook *zal* vernielen. De oplossing voor dit probleem is een zogenaamde vrijloopdiode die de geïnduceerde spanning kortsluit en zo onschadelijk maakt (**figuur 4**).

Serie- en parallelschakeling

Net als weerstanden en condensatoren kunnen spoelen parallel en in serie worden geschakeld. In dit opzicht gedragen ze zich precies als weerstanden (wat ook voor de hand ligt wanneer u er



Figuur 4. De diode beschermt de transistor als de stroom door het relais wordt uitgeschakeld.

even over nadenkt: bij serieschakeling komen er gewoon windingen bij). Voor serieschakeling geldt dus:

$$L_{tot} = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n$$

En voor parallelschakeling:

$$L_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_n}}$$

De spoel als wisselstroomweerstand

Ook als wisselstroomweerstand gedraagt de spoel zich exact tegengesteld aan de condensator. Bij een condensator neemt de impedantie af met toenemende frequentie; bij de spoel neemt deze juist toe met de frequentie:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

Ook bij de spoel hebben we met een faseverschuiving tussen spanning en stroom te maken: de stroom ijlt 90° na op de spanning.

Inductie

Wanneer een spoel zich in een wisselend magnetisch veld bevindt, dan wordt er een spanning in die spoel geïnduceerd. We kunnen de grootte van die spanning met deze formule berekenen:

$$U_{ind} = n \cdot A \cdot B' \cdot \cos \alpha$$

Hierin is n het aantal windingen van de spoel, A het (gemiddelde) door de spoel omsloten oppervlak, B' de afgeleide van de magnetische fluxdichtheid naar de tijd en α de hoek tussen het vlak van de windingen en het magnetische veld.

Wanneer we met een sinusvormig variërend magnetisch veld te maken hebben, kunnen we voor de afgeleide van de fluxdichtheid schrijven:

$$B' = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot B \cdot \cos \phi$$

Zonder inductie zou de wereld om ons heen er heel anders uit zien... Transformatoren zouden dan bijvoorbeeld niet kunnen werken (de

wisselstroom door de primaire wikkeling genereert een wisselend magnetisch veld, dat op zijn beurt in de secundaire wikkeling een spanning induceert). Maar ook generatoren (denk aan de dynamo onder de motorkap) zouden niet functioneren.

In de geluidstechniek kan inductie echter onaangenaam zijn: een eventuele aardlus (die kan ontstaan wanneer audioapparatuur niet op de juiste manier wordt aangesloten) kan een irriterende brom oppikken.

Hiermee is nog (lang) niet alles gezegd wat er over spoelen te vertellen valt; in de volgende aflevering gaan we verder. ◀

210342-02

De artikelreeks "Alle begin..." is gebaseerd op het boek "Basiscursus elektronica" van Michael Ebner, dat bij Elektor is verschenen.

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de auteur of naar de redactie van Elektor, via redactie@elektor.com.

Een bijdrage van

Idee en illustraties: **Michael Ebner**

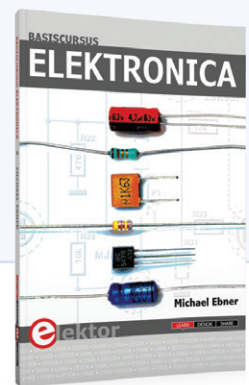
Tekst en redactie: **Eric Bogers**

Layout: **Harmen Heida**



GERELATEERDE PRODUCTEN

- **Boek:**
Basiscursus elektronica
www.elektor.nl/13950
- **E-boek:**
Basiscursus elektronica
www.elektor.nl/18232



WEBLINK

- [1] **Vonkinductor:** <https://nl.wikipedia.org/wiki/Vonkinductor>