



# Inhoudsopgave

6	Transformatoren en de opbouw van spoelen .....	3
6.1	Wat leer je in dit hoofdstuk .....	3
6.2	Inleiding .....	3
6.3	Opbouw van transformatoren, schemasymbool .....	4
6.4	De werking van een transformator nader bekeken .....	8
6.4.1	Gelijkstroom .....	8
6.4.2	Wisselstroom .....	9
6.4.3	Wisselspanning en -stroom in een transformatorwikkeling .....	9
6.5	Transformeren van impedanties .....	12
6.6	Faseverschil en serieschakeling van transformatoren .....	13
6.7	Transformatoren met aftakkingen; de autotransformator .....	14
6.8	Nullaststroom, de smoorspoel .....	16
6.9	Verliezen in trafo's .....	17
6.9.1	Inleiding .....	17
6.9.2	Koperverliezen .....	17
6.9.3	Ijzerverliezen .....	17
6.9.4	Spreadingsverliezen .....	18
6.10	Transformatoren en spoelen voor hoge frequenties .....	18
6.10.1	Overeenkomsten met LF-transformatoren .....	18
6.10.2	Verschillen met LF-transformatoren .....	18
6.10.3	Enkele voorbeelden van kernmateriaal en afscherming met foto .....	21
6.11	Het rekenwerk samengevat .....	25
6.12	Opgaven .....	26
6.12.1	Opgave 6-1 .....	26
6.12.2	Opgave 6-2 .....	27
6.12.3	Opgave 6-3 .....	28
6.12.4	Opgave 6-4 .....	29
6.12.5	Opgave 6-5 .....	30
6.12.6	Opgave 6-6 .....	31



6.12.7	Opgave 6-7 .....	32
6.12.8	Opgave 6-8 .....	33
6.12.9	Opgave 6-9 .....	34
6.13	Antwoorden bij de opgaven.....	35
6.13.1	Uitwerking van Opgave 6-1 .....	35
6.13.2	Uitwerking van Opgave 6-2.....	36
6.13.3	Uitwerking van Opgave 6-3.....	37
6.13.4	Uitwerking van Opgave 6-4.....	38
6.13.5	Uitwerking van Opgave 6-5.....	39
6.13.6	Uitwerking van Opgave 6-6.....	40
6.13.7	Uitwerking van Opgave 6-7.....	41
6.13.8	Uitwerking van Opgave 6-8.....	42
6.13.9	Uitwerking van Opgave 6-9.....	43



## 6 Transformatoren en de opbouw van spoelen

### 6.1 Wat leer je in dit hoofdstuk

Je maakt kennis met de opbouw, de werking en de toepassing van transformatoren voor lage frequenties (LF), zoals die voor stroomafname van het lichtnet, maar ook met spoelen en transformatoren voor hogere frequenties. Eerst bespreken we de werkingsprincipes van transformatoren voor laagfrequente wisselspanningen en -stromen. Daarna volgen toepassingen voor hogere frequenties op basis van vrijwel dezelfde principes.

Een transformator transformeert wisselspanningen en -stromen tot hogere of lagere spanningen en tot kleinere of grotere stromen door middel van een magnetisch veld. We hebben het ook over smoorspoelen en hun reactantie (schijnbare weerstand) voor wisselstroom. Transformatoren en spoelen zijn wat opbouw betreft sterk verwant. Hun magnetisch veld staat bij de werking altijd centraal. Dat geldt dat voor transformatoren en spoelen voor lage en hoge frequenties. Die laatste hebben eigenschappen die bij LF ondergeschikt zijn of niet voorkomen. Daarom hebben ze in dit hoofdstuk een eigen plek gekregen.

### 6.2 Inleiding

In hoofdstuk 4 hebben we gezien dat in een kortgesloten spoel in een veranderend magnetisch veld een stroom ontstaat. *Inductie* heette dat. Het veranderende veld werd veroorzaakt door een bewegende magneet in de spoel. Voor inductie maakt de oorzaak van de verandering van het veld niets uit.

De oorzaak van de verandering van het magnetisch veld van een spoel kan stroomverandering in de spoel zijn, maar ook stroomverandering in een tweede spoel binnen hetzelfde magnetische veld. Zolang de verandering van het magnetisch veld in grootte, richting en snelheid dezelfde is, is de bijbehorende inductiestroom dat ook.

In transformatoren wordt van dit verschijnsel gebruik gemaakt. Het vermogen dat de eerste spoel in gaat, komt beschikbaar op de tweede spoel, maar meestal met andere spanning en dus ook andere stroom. En dat is de bedoeling. Transformatoren worden gebruikt voor

- Vergroten of verkleinen van wisselspanning of -stroom
- Veranderen van impedanties
- Scheiden van gelijkspanningen tussen schakelingen. Meestal wordt dat *galvanische scheiding* genoemd.

### 6.3 Opbouw van transformatoren, schemasymbool

In een transformator vindt energieomzetting plaats. We weten dat energie bij elke vorm van omzetting de neiging heeft, (deels) over te gaan in warmte. Bij transformatoren is dat niet anders. Die neiging moet zo goed als het kan worden onderdrukt.

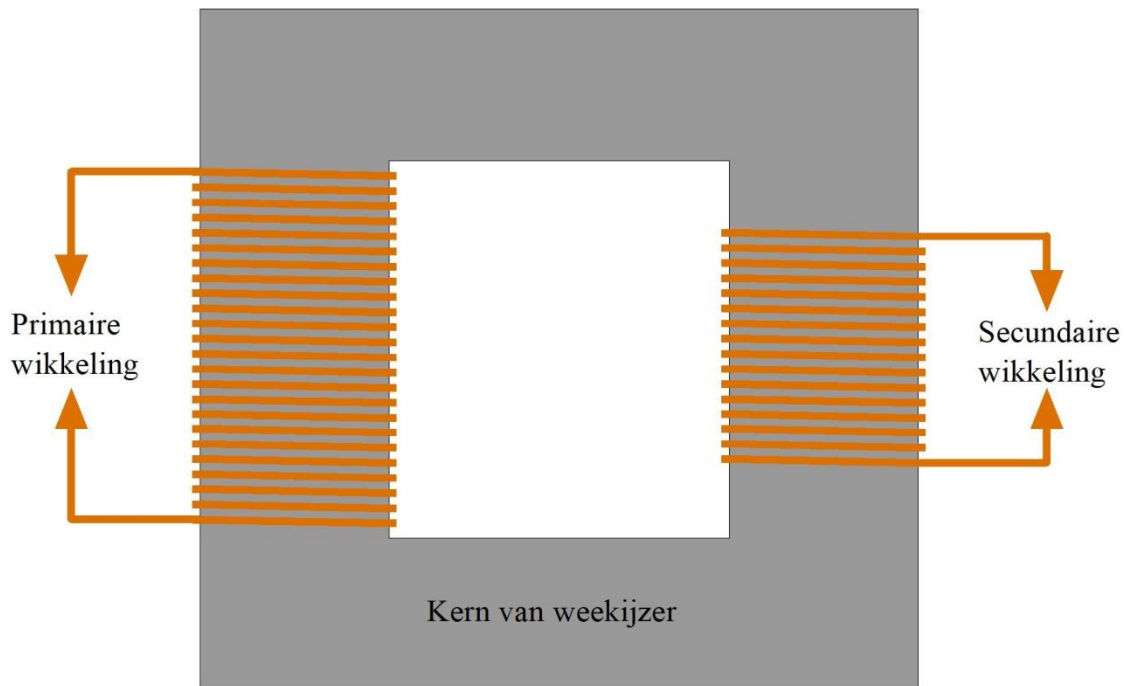
Het belangrijkste middel daarvoor is, te zorgen dat het magnetisch veld zo goed mogelijk door de spoelen wordt geleid. Dat vraagt materiaal met een hoge magnetische permeabiliteit. Bij laagfrequente toepassingen, zoals de 50 Hz van het lichtnet, wordt daarvoor vrijwel altijd weekijzer gebruikt. Dat is een ijersoort die zich (vrijwel) niet zelf laat magnetiseren, maar wel een magnetisch veld geleidt. Beide spoelen moeten om hetzelfde ijzer worden gewikkeld. Dan omvatten ze hetzelfde magnetische veld.

Het ijzer wordt *kern* genoemd, de spoelen *wikkeling*. Een wikkeling bestaat uit één of meer *windingen*. Een winding is één rondje om de kern. Bij heel hoge frequenties kan een wikkeling zelfs uit minder dan één winding bestaan (Foto 6.3-1).



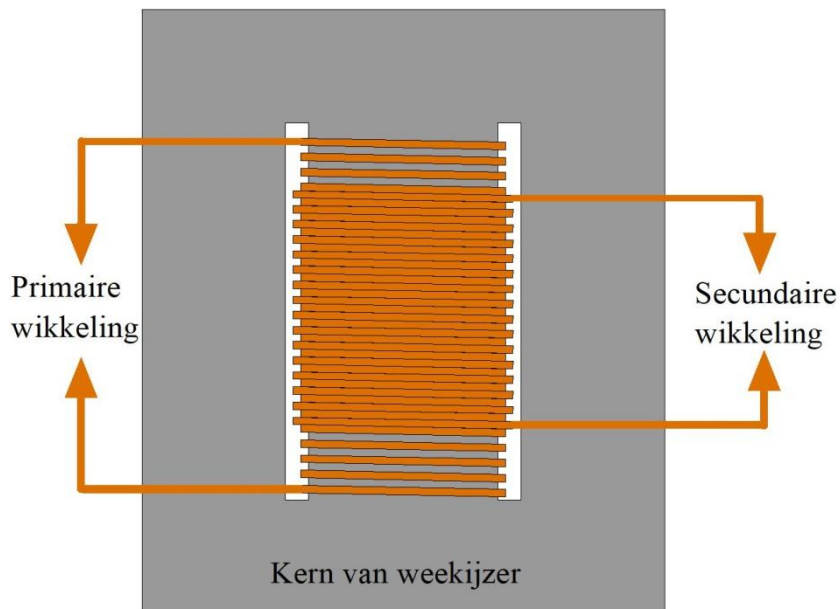
Foto 6.3-1. Spoel met een wikkeling van minder dan één winding.

In Figuur 6.3-1 is een opbouw van een transformator of kortweg *trafo* weergegeven. De wikkelingen verschillen in aantallen windingen. We zullen verderop zien, wat daarachter steekt. De kern van weekijzer geleidt het magnetisch veld heel veel beter dan lucht, waardoor maar een heel klein deel van het veld via lucht loopt, buiten de wikkelingen om. Elk deel van het veld dat via lucht loopt in plaats van door de wikkelingen, betekent energieverlies dat uiteindelijk grotendeels het heelal in gaat in plaats van naar de andere wikkeling.



*Figuur 6.3-1. Mechanische opbouw van een transformator. De secundaire wikkeling is kleiner getekend dan de primaire om te laten zien dat beide wikkelingen niet even groot hoeven te zijn.*

Figuur 6.3-2 toont een gebruikelijker opbouw.



*Figuur 6.3-2. Meer gebruikelijke opbouw van een trafo dan die van Figuur 6.3-1. Het magnetisch veld wordt nu aan weerszijden van de wikkelingen geleid. De wikkelingen liggen om elkaar heen en de twee zijkanten liggen vrijwel tegen de wikkelingen aan. Zo wordt een groter deel van het magnetische veld door de wikkelingen geleid en verdwijnt minder magnetisch vermogen de ruimte in.*

De kern in Figuur 6.3-2 benadert meer de vorm van het magnetisch veld en de zijanten van de opening in de kern liggen vlak tegen de wikkelingen die in dit geval over elkaar zijn getekend. Daardoor blijft een groter deel van het magnetisch veld binnen de wikkelingen dan in Figuur 6.3-1. De verliezen zijn daardoor kleiner. Daarbij komt het begrip *koppelingsgraad* aan de orde. Dat is het deel van het inkomend vermogen dat van de ene naar de andere wikkeling wordt overgebracht. Ter geruststelling: deze grootte is geen examenstof. Wel is het goed, te weten dat dit bestaat en dat bij een transformator in de echte wereld niet alle elektrische vermogen dat er ingaat, er ook weer als elektrisch vermogen uitkomt. Er zijn er meer oorzaken van vermogensverlies, maar die komen verderop aan de orde.

De *primaire wikkeling* is de wikkeling voor de invoer, de *secundaire* die voor de uitvoer. De wikkelingen worden meestal kortheidshalve aangeduid als de *primaire* en de *secundaire*.

De primaire en de secundaire kunnen ook gescheiden worden uitgevoerd met een isolerend wandje ertussen. Dat verkleint het risico van vonkoverslag tussen beide en is daarom veiliger. Zo'n constructie zien we in Foto 6.3-2.

Foto 6.3-2 en Foto 6.3-3 tonen afbeeldingen van transformatoren. In beide gevallen gaat het om transformatoren waar 220 (230) V ingaat en waar een aanzienlijk lagere spanning uitkomt. Die lagere wisselspanning kan ook op diezelfde wikkeling worden aangesloten. De secundaire wordt dan de primaire en de voormalige primaire wordt de secundaire, waar dan weer (vrijwel) de oorspronkelijke spanning overheen staat.

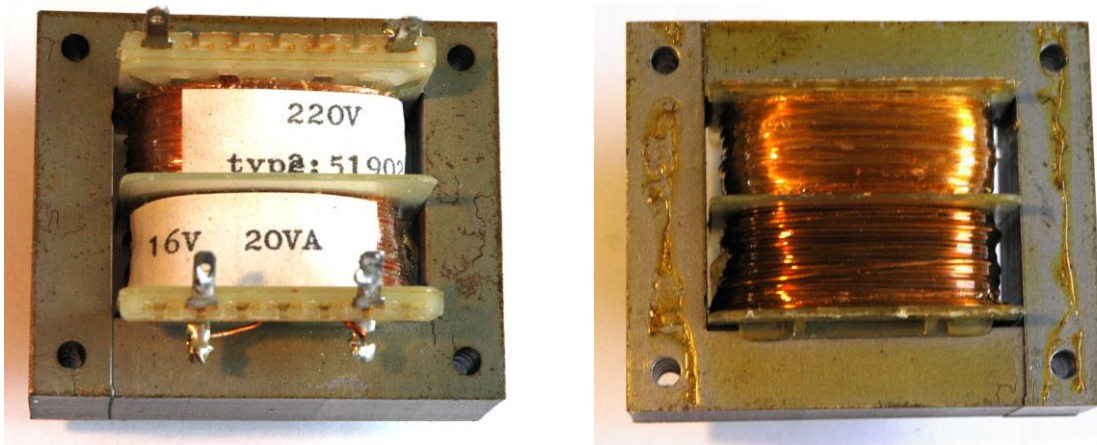


Foto 6.3-2. Een kleine trafo. Links de voorkant met gegevens, rechts de achterkant. De wikkelingen zijn anders dan in Figuur 6.3-2 gestapeld rond het middendeel van de kern. Links en rechts is het isolerende scheidingsplaatje tussen de wikkelingen te zien. De draaddikte van beide wikkelingen is verschillend (rechts). De primaire wikkeling (boven) met dun draad en veel windingen is voor een hoge spanning en kleine stroom. De secundaire wikkeling (onder) bestaat uit dikker draad en heeft minder windingen voor een lagere spanning en een grotere stroom. Het glimmende bruine materiaal op de draad is isolerende lak.

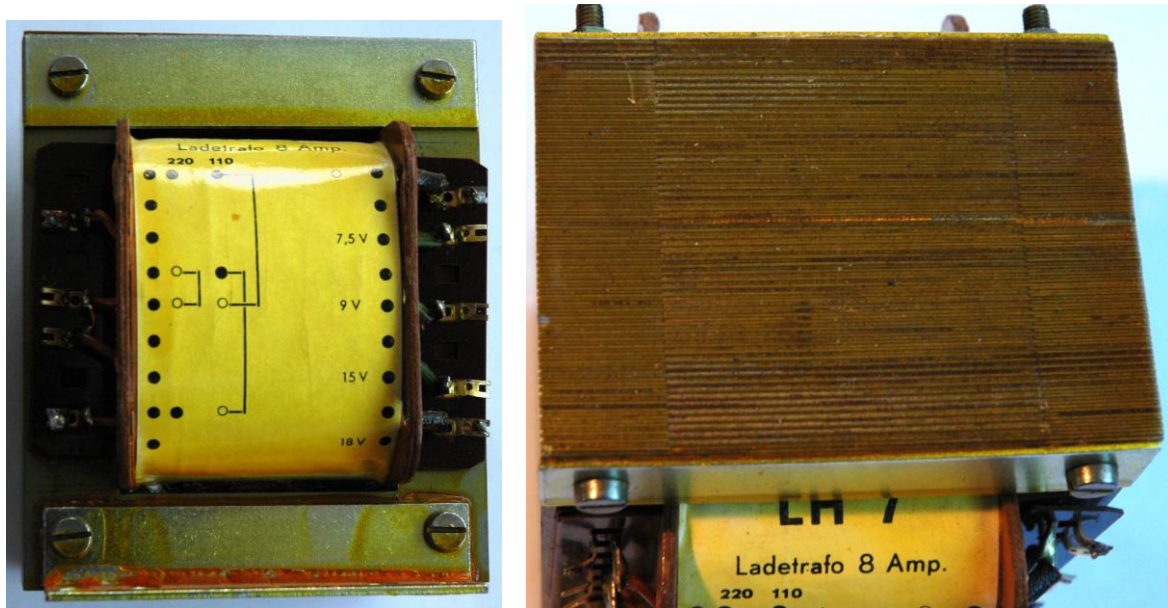


Foto 6.3-3. Links een trafo voor aanzienlijk meer vermogen dan die op Foto 6.3-2. Rechts een close-up van de bovenkant, waar de lamellen van de ijzerkern te zien zijn.

De *ringkerntrafo* (Foto 6.3-4) is een effectieve manier om een magnetisch veld binnen de wikkelingen van een trafo te houden. De kern is ringvormig en de wikkelingen liggen rond de hele ring, zodat het magnetisch veld zo goed mogelijk binnen de wikkeling blijft.

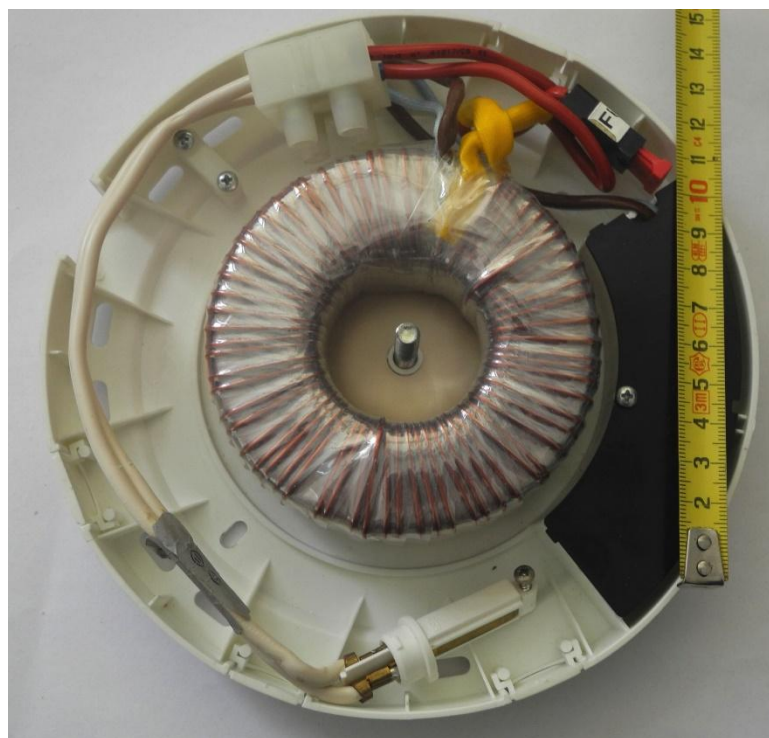
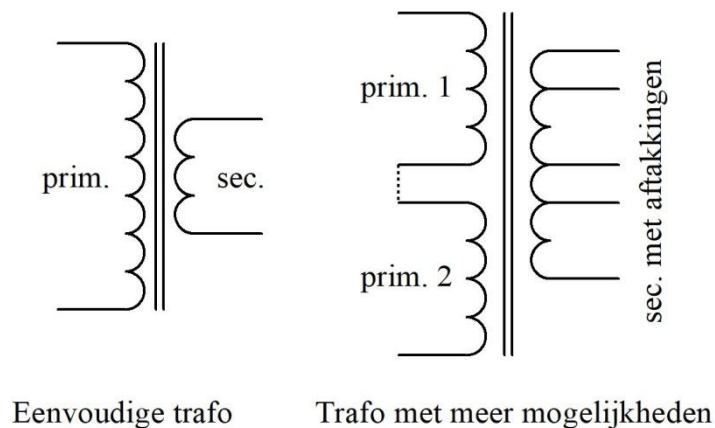


Foto 6.3-4. Ringkerntrafo. Dit exemplaar is ontworpen om minimaal 80 W te kunnen leveren aan een set van 12V-halogeenspotjes -inmiddels ouderwets. Het meetlint geeft een indruk van de grootte.

Zelfs bij dit type transformatoren wordt het veld niet voor de volle 100% binnen de wikkelingen gehouden, maar ze zijn wat dit aangaat beter dan de hoekige vormen van Foto 6.3-2 en Foto 6.3-3. In de hoogfrequentietechniek wordt veelvuldig gebruik gemaakt van ringkernen. Ze zijn dan niet van weekijzer, maar van ferriet of een ander niet elektrisch maar wel magnetisch geleidend materiaal dat vrijwel altijd ijzerhoudend is.

Weekijzer is een metaal en dus een geleider. Als een trafo in bedrijf is, zullen daardoor zonder tegenmaatregelen stromen in de kern zelf, zogenaemde *wervelstromen*, ontstaan. Daarmee krijg je hetzelfde effect als bij een inductiekookplaat waarop een pan of ketel met ijzeren bodem snel wordt verhit door het wisselende magnetisch veld van een spoel onder de glasplaat. Dat is bij een trafo nu net niet de bedoeling. Daarom is de weekijzeren kern opgebouwd uit gestapelde weekijzeren lamellen die onderling zijn geïsoleerd (Foto 6.3-3 rechts).

Twee schemasymbolen voor trafo's staan in Figuur 6.3-3.



*Figuur 6.3-3. Schemasymbolen voor transformatoren. Het linker symbool zou de trafo op Foto 6.3-2 kunnen voorstellen, het rechter symbool is meer van toepassing op Foto 6.3-3. De twee verticale lijnen in het midden stellen de ijzerkern voor.*

## 6.4 De werking van een transformator nader bekeken

### 6.4.1 Gelijkstroom

We bekijken één wikkeling zonder dat de rest ergens op is aangesloten. Dan hebben we te maken met een gewone spoel. De coëfficiënt van zelfinductie (kortweg ook wel *zelfinductie*) is  $L$ . Wordt daarop een gelijkspanning  $U$  aangesloten, dan zal de stroom door de spoel rechtlijnig toenemen, zagen we in Hoofdstuk 4. In werkelijkheid beperkt de weerstand  $R$  van de spoel de stroomtoename en hebben we te maken met een RL-schakeling met tijdconstante  $\tau=R/L$  (Hoofdstuk 4). Daarin bepalen  $R$  en de spanning  $U$  de definitieve stroomsterkte. Als die laatste niet meer merkbaar verandert, verandert het magnetisch veld in het kernmateriaal ook niet meer en vindt er in de secundaire wikkeling(en) geen inductie meer plaats. Er staat over die wikkeling dus ook geen spanning. Als we er iets op aansluiten, loopt er geen stroom.



Conclusie: een transformator is nutteloos voor gelijkstroom en gelijkspanning.

#### 6.4.2 Wisselstroom

Wisselstroom veroorzaakt een voortdurende omkering van het magnetisch veld. Door inductie ontstaat in de secundaire wikkeling een wisselspanning. Als op de secundaire wikkeling een belasting is aangesloten, ontstaat er ook een wisselstroom.

Een transformator is dus alleen geschikt om wisselstroom en –spanning door te geven. Een onzuivere wisselstroom in de primaire veroorzaakt een zuivere wisselstroom in de secundaire, want het gelijkstroomdeel wordt niet doorgegeven. Het is dan wel oppassen dat het gelijkstroomdeel bij de lage Ohmse weerstand in de primaire niet te groot wordt. Bovendien kan magnetische *verzadiging* optreden. Dat verschijnsel houdt in dat boven een bepaalde magnetische veldsterkte de permeabiliteit van het ijzer in de kern lager wordt. Dat beïnvloedt het wisselstroomgedrag van de trafo nadelig. In 6.9.3 komen we daarop terug.

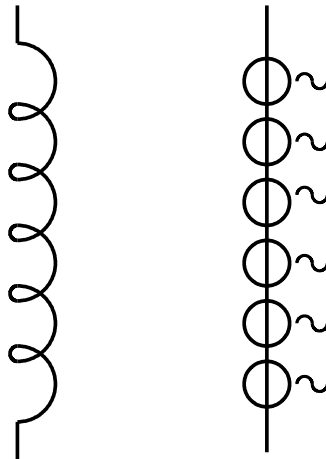
We gaan voorlopig uit van de ideale transformator, dus één zonder verliezen. Wat er op de primaire wikkeling aan vermogen ingaat, moet er dan op de secundaire wikkeling(en) weer uitkomen. Omgekeerd bepaalt de afgifte van vermogen aan de secundaire kant de opname van vermogen aan de primaire kant.

Om dit in een “echte” transformator te benaderen, moeten de zelfinducties van de primaire en secundaire flink groot zijn om een “oneindige” eigen reactantie te benaderen, zodat inderdaad de primaire stroom bij benadering 0 is als er secundair geen belasting is.

In een ideale transformator blijft vermogen primair en secundair gelijk. Wat wel groter of kleiner kan worden, zijn spanning en stroom. De transformatieverhouding, dat is de verhouding van wat er aan spanning en stroom de transformator in- en uitgaat, wordt bepaald door de wikkerverhouding. Dat is de verhouding van het aantal windingen  $N_1$  van de primaire en  $N_2$  van de secundaire wikkeling. Hoe dat zit, maken we in de volgende subparagraaf wat meer inzichtelijk.

#### 6.4.3 Wisselspanning en -stroom in een transformatorwikkeling

Elke winding in een wikkeling vergroot bij gelijkblijvende stroom het magnetische veld van de wikkeling. Omgekeerd veroorzaakt een verandering in het magnetisch veld in elke winding een spanning. Je kunt een winding zien als een spanningsbron. De windingen staan in serie. Samen zijn ze een verzameling in serie geschakelde spanningsbronnen (Figuur 6.4-1).



*Figuur 6.4-1. Een uitgerekte transformatorwikkeling van 6 windingen en een vervangende schakeling van 6 wisselspanningsbronnen in serie.*

We spreken bij transformatorwikkelingen daarom ook wel van volt per winding. Een wikkeling van 10 windingen en 1 V per winding levert aan zijn uiteinden 10 V.

Als de primaire 1000 windingen heeft met een aangesloten wisselspanning van 100 V, dan heeft de primaire 0,1 V per winding. Die grootte blijft gelden voor de secundaire, want beide wikkelingen omvatten hetzelfde wisselende magnetische veld. Heeft de secundaire 50 windingen, dan is de spanning over de secundaire 50 keer 0,1 V is 5 V. Heeft de secundaire 5000 windingen, dan krijgen we 5000 keer 0,1 V is 500 V. Wisselspanningen kunnen dus zowel omhoog als omlaag worden getransformeerd.

Bij stroom werkt het.... precies andersom. Zou het bij stroom net zo werken als bij spanning, dan zouden we een vermogensvermenigvuldiger hebben uitgevonden, want uit hoofdstuk 3 weten we dat  $P = UI$ . Ongetwijfeld een Nobelprijs meer dan waard, maar in strijd met grondbeginsel 1 van de natuurkunde (hoofdstuk 2): *energie verdwijnt niet in het niets en ontstaat niet uit het niets*. Hoe gaat het dan wel?

Het magnetisch veld van een trafo wordt opgebouwd in een aantal windingen. Stel dat er 2 A door die windingen loopt en de wikkeling 100 windingen bevat, dan hebben we te maken met 200 ampèrewinding (Aw). Dus ampères vermenigvuldigd met het aantal windingen en niet erdoor gedeeld, zoals bij de spanning. De redenering erachter: hoe meer stroom, des te sterker is het magnetisch veld en ook: hoe meer windingen des te sterker het magnetisch veld. Als dat magnetische veld door een secundaire wikkeling met maar één winding moet, heeft die winding dat hele veld voor zich alleen en kan hij 200 A afgeven, maar wel bij 0,01 maal de spanning over de hele wikkeling. Zijn de windingen van de secundaire met z'n tien, dan wordt het 20 A en 0,1 maal de totale spanning. Zijn ze met 100, dan wordt het 2 A bij 1 maal de spanning, net als bij de primaire met ook 100 windingen.



De secundaire stroom is dus gelijk aan het aantal ampèrewindingen ( $A_w$ ) gedeeld door het aantal secundaire windingen.

En zo vinden we het vermogen dat een primaire ingaat, weer netjes in de secundaire terug. Wel jammer van die Nobelprijs...

Als we dit alles in vergelijkingen uitdrukken, krijgen we voor de verhouding van de spanning  $U_1$  over de primaire en  $U_2$  over de secundaire en  $N_1$  windingen op de primaire en  $N_2$  windingen op de secundaire, de volgende vergelijking

$$\frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2} \rightarrow U_2 = U_1 \frac{N_2}{N_1} \quad (6.4-1)$$

Er is niets op tegen om bij een opgave over trafo's te werken met de grootte  $V/\text{winding}$  in plaats van vergelijking (6.4-1). Het leidt tot hetzelfde antwoord.

### Een getallenvoorbeeld

Een wisselspanning  $U_1 = 100$  V over een primaire van 1000 windingen bij een secundaire van 250 windingen geeft een spanning  $U_2$  van 25 V. Dat volgt uit vergelijking (6.4-1), maar ook uit de volgende redenering. Uit de primaire volgt dat we te maken hebben met 0,1 V per winding. 250 secundaire windingen leiden dan tot 250 maal 0,1 V is 25 V.

### En een waarschuwing

Het omgekeerde werkt ook: zetten we bij diezelfde trafo een wisselspanning van 25V op de secundaire, dan meten we 100 V op de primaire. Bij de meeste transformatoren kan dit verwisselen zonder bezwaar. Voorkomen moet worden dat een wikkeling een hogere spanning te verwerken krijgt dan waarvoor hij is ontworpen. Zet bijvoorbeeld op een trafo voor 230 V naar 20 V geen 230 V op de 20 V-wikkeling om 2,6 kV te krijgen! Word je niet door de zekering gered, dan is de kans op levens- en brandgevaarlijk vuurwerk groot. Bij een echte trafo zul je zo geen 2,6 kV krijgen maar door verliezen wat minder, maar het vuurwerkrisico blijft onverminderd in stand, al is het maar doordat de isolatie binnen de trafo tegen dit spanningsgeweld zelden of nooit bestand zal zijn. **Niet doen dus.**

Ook voor stroom kunnen we een vergelijking opstellen die vergelijkbaar is met (6.4-1).

$$\frac{I_2}{N_2} = \frac{I_1}{N_1} \rightarrow I_2 = I_1 \frac{N_1}{N_2} \quad (6.4-2)$$

$U$  is twee keer vervangen door  $I$  en  $h$  en  $h$  hebben van plaats gewisseld. De stroom  $I_2$  aan de secundaire kant past zich natuurlijk aan wat erop is aangesloten aan, de *belasting*. De grootte van  $I_1$  wordt dus bepaald door  $I_2$  volgens vergelijking (6.4-2).

### Een getallenvoorbeeld met stroom

Een wisselstroom  $I_2 = 1$  A wordt afgenomen van een secundaire met 250 windingen. De primaire heeft 1000 windingen (dezelfde trafo als in het vorige voorbeeld!). Uit



vergelijking ( 6.4-2) volgt dat de primaire stroom  $\frac{1}{4} A = 0,25 A$  moet zijn.

Het kan ook met de grootte  $A_w$ . Het aantal  $A_w$  volgt uit de 250 secundaire windingen en de secundaire stroom van 1 A. Dat zijn 1 A maal 250 windingen, is 250  $A_w$ . Omdat de primaire 1000 windingen heeft, moeten die met 0,25 A worden vermenigvuldigd om 250  $A_w$  te krijgen. 0,25 A in de primaire. Dezelfde uitkomst.

### Om te onthouden

In een transformator bepaalt de spanning over de primaire wikkeling de spanning over de secundaire. Omgekeerd bepaalt de stroom in de secundaire wikkeling de stroom in de primaire. Afgezien van een verschil in aantal windingen en draaddikte zitten primaire en secundaire precies eender in elkaar. De primaire kan de rol van secundaire hebben en de secundaire die van primaire. Denk daarbij om de waarschuwing op de vorige pagina!

## 6.5 Transformeren van impedanties

Als een trafo stromen en spanningen op tegengestelde wijze transformeert, moet een trafo óók impedanties transformeren.

Als de primaire een impedantie  $Z_1$  'ziet', geldt daarvoor volgens de wet van Ohm:

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} \quad (6.5-1)$$

En voor  $Z_2$  op de secundaire geldt vergelijking ( 6.5-1) ook:

$$Z_2 = \frac{U_2}{I_2} \quad (6.5-2)$$

Het verband tussen  $U_1$  en  $U_2$  wordt gegeven door vergelijking ( 6.4-1) en dat tussen  $I_1$  en  $I_2$  door vergelijking ( 6.4-2). Daaruit en uit vergelijkingen ( 6.5-1) en ( 6.5-2) is de verhouding van  $Z_1$  en  $Z_2$  te bepalen. We geven zonder wiskundige afleiding de uitkomst:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (6.5-3)$$

**De transformatie van spanning en stroom heeft de wikkelverhouding  $N_1/N_2$ , resp.  $N_2/N_1$  als evenredigheidsconstante. Bij impedantiëtransformatie is die constante het kwadraat daarvan.**

Een transformator die spanning met een factor 10 omhoog of omlaag transformeert, transformeert de impedantie dus met een factor 100 omhoog of omlaag. Datzelfde geldt voor reactanties en weerstanden. We mogen in ( 6.5-3) dus in plaats van  $Z$  ook  $X$  of  $R$  invullen. In praktische schakelingen zit er bij een reactantie altijd wel ergens een kleine verborgen weerstand en bij een weerstand een kleine verborgen reactantie. Die kunnen bij hoge frequenties van belang zijn, maar bij lage frequenties zoals van een netspanning zijn ze praktisch altijd verwaarloosbaar.



Het nut van impedantiëtransformatie is dat de impedantie van elke vermogensbron met wisselstroom- of spanning kan worden getransformeerd tot de impedantie van elke willekeurige belasting. Dan is de energie-overdracht maximaal. We hebben dit voor gelijkspanningsbronnen al gezien in hoofdstuk 3. Voor wisselspanning is dat niet anders.

Een voorbeeld van impedantiëtransformatie is de uitgangstransformator van een audioversterker met buizen. Die zijn de laatste tijd terug van weggeweest. Een luidspreker heeft een bepaalde impedantie, bijvoorbeeld  $4 \Omega$ . Als de uitgangsimpedantie van de daaraan gekoppelde versterker niet (ongeveer) diezelfde waarde heeft, moet er een transformator aan te pas komen om de impedanties op elkaar aan te passen. Een hiervoor ontworpen trafo wordt dan ook vaak *aanpassingstrafo* genoemd.

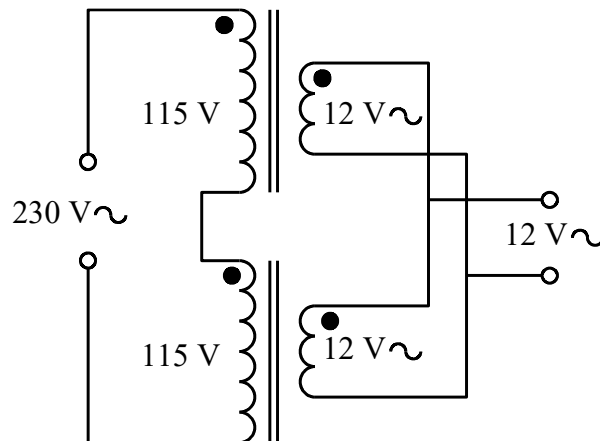
Het vaakst komen we impedantiëtransformatie tegen in hoogfrequenttoepassingen. Transformatoren voor HF-toepassingen hebben, zoals in 6.4.2 al vermeld, nooit een weekijzerkern. Het magnetisch veld in dat materiaal voegt zich daarvoor te langzaam naar de wisselende stroom in de wikkelingen. In sub-paragraaf 6.9.3 gaan we op dat laatste verder in.

## 6.6 Faseverschil en serieschakeling van transformatoren

Bij een transformatorwikkeling zijn de spanningen aan de uiteinden in tegenfase. Zouden ze in fase zijn, dan zou er geen stroom lopen. Daarmee moeten we rekening houden als transformatorwikkelingen in serie worden gezet. Worden twee gelijke wikkelingen onderling met de verkeerde uiteinden verbonden, dan is tussen de uiteinden van de schakeling van twee transformatorwikkelingen de spanning 0. Het kan nog erger: als twee wikkelingen parallel worden geschakeld met de verkeerde fase, dan leidt dat tot kortsluiting met alle gevolgen van dien.

In Figuur 6.6-1 zien we als voorbeeld twee transformatoren met de primaire wikkelingen in serie en de secundaire parallel. Wat onderling in fase is, of moet zijn, is aangegeven met een zwart rondje (de figuur is gebaseerd op een examenvraag).

Denk bijvoorbeeld aan twee transformatoren, bestemd voor een elektriciteitsnet in de Verenigde Staten, waar men een netspanning van 110 V heeft en die in Nederland worden toegepast voor 230 V (Figuur 6.6-1). Die 5 V per wikkeling verschil is verwaarloosbaar.

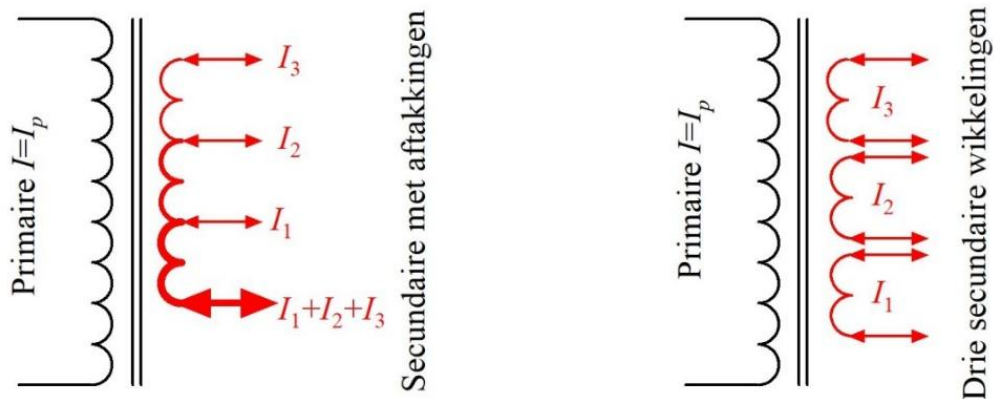


*Figuur 6.6-1. Twee transformatoren met hun primaire wikkelingen in serie en de secundaire wikkelingen parallel. De primaire en secundaire aansluitingen die onderling in fase zijn, worden aangeduid met een zwart rondje.*

## 6.7 Transformatoren met aftakkingen; de autotransformator

Een wikkeling van een transformator kan tussen de uiteinden aftakkingen hebben. Op de secundaire wikkeling van de trafo op Foto 6.3-3 is te zien dat die verschillende spanningen kan leveren: 7,5, 9, 15 en 18 V. In Figuur 6.3-3 is de secundaire met aftakkingen getekend.

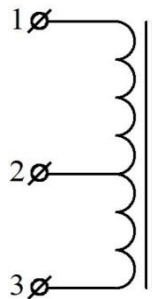
De secundaire van Foto 6.3-3 kan volgens het opschrift op de trafo maximaal 8A leveren. Die 8A mag van alle vier de aansluitingen worden afgenomen, maar niet tegelijkertijd. Stel dat van de 18V-aansluiting 8A wordt afgenomen. Dan loopt die stroom via de secundaire ook tussen de nulaansluiting (op Foto 6.3-3 aangegeven met een 0) en de aansluitpunten voor 7,5V, 9V en 15V. Die drie aansluitingen mogen dan niet ook nog worden belast. Dan loopt de stroom in de secundaire tussen de nulaansluiting en die voor 7,5 V op tot boven de maximaal toegestane 8A. Daarom mag de belasting van alle vier aansluitingen samen niet boven de 8A komen. Figuur 6.7-1 laat dat zien. In de linker trafo met aftakkingen op één secundaire moet de stroom voor alle aftakkingen samen door de onderste windingen. In de rechter trafo zijn er drie secundaire wikkelingen met elk hun eigen afzonderlijke stroom. Daarin speelt het probleem niet.



Figuur 6.7-1. Het verschil tussen een wikkeling met aftakkingen (links) en afzonderlijke wikkelingen (rechts). Links moeten alle drie de stromen door het onderste deel van de wikkeling. Rechts heeft elke wikkeling zijn eigen stroom.

De drie secundaire stromen in de rechter trafo mogen samen natuurlijk geen te grote stroom door de primaire veroorzaken.

Het kunstje van een wikkeling met aftakkingen in Figuur 6.7-1 links kan ook op de primaire worden uitgevoerd door de secundaire stroom (of spanning) op de primaire af te takken. Dan kan de secundaire helemaal worden weggelaten. Zo'n trafo staat bekend onder de naam *autotrafo*. De opbouw is als getoond in Figuur 6.7-2.



Figuur 6.7-2. Autotransformator.

Een autotrafo heeft geen secundaire wikkeling. De transformatie gebeurt in één en dezelfde wikkeling. Dat spaart wikkeldraad (koper). Vergelijking (6.4-1) gaat nog steeds op: de spanningen zijn evenredig met het aantal windingen tussen de paren aansluitingen. Als de aangelegde spanning is aangesloten op de aansluitingen 1 en 3, wordt de getransformeerde spanning afgenomen op 1 en 2 of op 2 en 3. De getransformeerde spanning is dan lager dan de oorspronkelijke. Bij aansluiting van de 'primaire' spanning op 1 en 2 of op 2 en 3 wordt de getransformeerde spanning afgenomen op 1 en 3. De getransformeerde spanning is dan hoger dan de oorspronkelijke.

Met de stroom zit het anders. De toegevoerde stroom bewerkstelligt een veranderend magnetisch veld in de kern. Die verandering wordt tegengewerkt door de afgenomen

stroom. Die twee zijn dus in tegenfase. In het gemeenschappelijke deel van de wikkeling vloeit daardoor de som van twee ongelijke sinusvormige stromen in tegenfase. Het resultaat is een effectieve stroomsterkte ter grootte van het verschil, niet van de som van beide. De stroomverhouding voldoet dus in de praktijk niet meer aan vergelijking ( 6.4-2)!

De autotrafo heeft naast het voordeel van zijn beperkte gewicht en omvang het grote nadeel dat er geen galvanische scheiding is tussen aangevoerde en afgenomen wisselstroom. Het is dus voor het gebruik van netspanning in huis een onveilig ding. Het systeem wordt wel toegepast in de hoogspanningstechniek en ook in hoogfrequent-schakelingen.

Een andere toepassing is de *Variac*, een trafo waarin één van de aansluitingen een glijcontact is, waardoor een continu-regelbare trafo ontstaat. De naam *Variac* was tot 2002 een handelsmerk van General Radio en daarmee een merknaam die soortnaam is geworden (<https://en.wikipedia.org/wiki/Autotransformer>, helaas in het Engels). Een Nederlandstalige webpagina is bijvoorbeeld <https://nl.wikipedia.org/wiki/Variac>.

## 6.8 Nullaststroom, de smoorspoel

Een trafo waarvan de secundaire wikkeling niet wordt belast, trekt in theorie geen stroom. In werkelijkheid gebeurt dat wel. De primaire wikkeling is dan gewoon een spoel met hoge zelfinductie en dus hoge reactantie. De stroom die dan loopt, heet *nullaststroom*. Als de reactantie van de zo ontstane spoel groot is ten opzichte van zijn ohmse weerstand, is het energieverlies klein. Nullaststroom blijft ook bij belasting van de secundaire wikkeling lopen.

Een spoel met één wikkeling, een hoge reactantie voor een frequentiegebied en kleine Ohmse weerstand heet een *smoorspoel*. Een smoorspoel ‘smoort’ de wisselstroom, maar laat een eventueel gelijkstroomdeel wel door. Dat is dus precies het omgekeerde van wat een trafo doet. Die brengt alleen de wisselstroom/spanning over. Op een smoorspoel staat meestal de maximaal toelaatbare gelijkstroom vermeld. Een trafo waarvan maar één wikkeling wordt gebruikt, werkt als smoorspoel. Het schemasymbool voor een smoorspoel met ijzerkern staat in Figuur 6.8-1.



*Figuur 6.8-1. Schemasymbool van een smoorspoel met ijzerkern. Het lijkt op een halve trafo en eigenlijk is het dat ook.*

Eigenlijk is een smoorspoel een ‘doodgewone’ zelfinductie, zoals we die in Hoofdstuk 4 en Hoofdstuk 5 langs hebben zien komen. Een ideale spoel zonder Ohmse weerstand heeft geen dissipatie, zoals we in hoofdstuk 5 zagen. In werkelijkheid is die weerstand er altijd. Als hij klein is in vergelijking met de reactantie van de spoel, is het verlies door nullaststroom ook klein. De reactantie beperkt dan het vermogen dat de weerstand in warmte kan omzetten.

## 6.9 Verliezen in trafo's

### 6.9.1 Inleiding

In elke trafo treden verliezen op. Als een trafo een tijdje heeft gewerkt, wordt hij warm. Die warmte moet ergens vandaan komen. Het is een deel van de energie die erin gaat en niet voor het beoogde doel van het apparaat wordt gebruikt. Warmteontwikkeling gaat ten koste van het rendement, zoals we in hoofdstuk 2 al zagen. De vraag is nu hoe die verliezen bij transformatoren tot stand komen. We onderscheiden

- Koperverliezen
- Ijzerverliezen
- Spreidingsverliezen

### 6.9.2 Koperverliezen

De wikkelingen van een trafo bestaan vrijwel altijd uit koperdraad, omdat koper zo'n goede geleider is. Maar zelfs een heel goede geleider heeft altijd een beetje weerstand. Hoe dunner de draad, des te groter is de weerstand van een bepaalde draadlengte. Daarmee bepaalt de draaddikte mede de maximale stroomsterkte. Door de weerstand in de draad ontwikkelt zich bij stroomdoorgang warmte. Omdat de windingen tegen elkaar aan liggen en alleen zijn gescheiden door een isolerende laklaag op de draad, kunnen ze hun warmte veel minder goed kwijt dan wanneer de draad vrij in de lucht zou hangen. Zo warmt de trafo op.

### 6.9.3 Ijzerverliezen

We hebben het al gehad over wervelstromen in de ijzerkern. Die worden tegengegaan, maar niet voor 100% voorkomen, door de kern op te bouwen uit onderling geïsoleerde ijzerlamellen (Foto 6.3-3). Er zijn nog meer verliezen in het ijzer. IJzer kan niet onbeperkt sterke magnetische velden geleiden. Bij een zekere magnetische veldsterkte treedt in een ijzerkern *verzadiging* op. Bij verzadiging neemt de permeabiliteit van ijzer met toenemende veldsterkte af. Daardoor neemt de zelfinductie af en de nullaststroom die ook bij gebruik blijft lopen, toe. De koperweerstand blijft dezelfde. Alles bij elkaar genomen neemt de warmteontwikkeling bij verzadiging toe.

Een andere vorm van ijzerverliezen zit in de magnetisering van de ijzerkern. Ideaal weekijzer bestaat net zomin als welk ideaal materiaal ook. Bij elke halve periode van de wisselstroom wordt de ijzerkern gemagnetiseerd. Bij de volgende halve periode waarin de stroom in tegengestelde richting loopt, wordt die magnetisering eerst ongedaan gemaakt

en daarna omgekeerd. Tijdens de daarop volgende halve periode herhaalt zich dat proces, enz. Dit verschijnsel van voortdurend ongedaan maken van magnetisering staat bekend onder de naam *hysterese*. De Engelse benaming *hysteresis* kom je ook tegen. Ook hysterese leidt tot warmteontwikkeling. De energie die daarmee gemoeid is, komt dus niet als vermogen in de secundaire wikkeling terecht. Hysterese is ook de oorzaak dat ijzerkernen niet geschikt zijn voor hoogfrequenttoepassingen. De omkering van het magnetisch veld gaat voor ijzerkernen al gauw te snel, waardoor de hystereseverliezen bij toenemende frequentie snel oplopen. Er moet dan ander kenmateriaal worden toegepast. Dat behandelen we in paragraaf 6.10.

#### 6.9.4 Spreidingsverliezen

Het magnetisch veld van een wikkeling blijft nooit voor de volle 100% binnen de ijzerkern. Daarover hebben we het al even gehad in paragraaf 6.3. Een klein deel van het magnetisch veld komt daarbuiten en gaat zagezegd het heelal in. Dat deel wordt in de secundaire wikkeling dus niet terug omgezet in elektrisch vermogen. Spreidingsverliezen dragen niet bij aan de opwarming van een trafo, maar het zijn en blijven verliezen.

### 6.10 Transformatoren en spoelen voor hoge frequenties

#### 6.10.1 Overeenkomsten met LF-transformatoren

De belangrijkste overeenkomst is dat ook in HF-transformatoren energie-overdracht plaatsvindt via een magnetisch veld. Kernmateriaal als weekijzer is alleen geschikt voor lage frequenties als lichtnetvoedingen en audiotoeepassingen.

De natuurkunde van wisselende magnetische velden bij hoge frequenties wijkt dan ook niet wezenlijk af van die bij lage frequenties.

Met de bijbehorende techniek ligt dat anders. Dat zit hem in een aantal zaken die we in de volgende sub-paragraaf nader belichten.

#### 6.10.2 Verschillen met LF-transformatoren

De verschillen hebben betrekking op

- Aantallen windingen
- Kernmateriaal en afscherming
- Vooral bij heel hoge frequenties: het wikkeldraad

#### Aantallen windingen

Naarmate een frequentie hoger is, is de benodigde zelfinductie bij eenzelfde reactantie kleiner. Daardoor zijn minder windingen nodig, naarmate de werkfrequentie hoger is. Dat komt, doordat de energieoverdracht effectiever is, naarmate de stroom door een wikkeling sneller verandert. Eigenlijk zie je dat ook in de vergelijking voor de reactantie van spoelen. Die neemt toe, naarmate de frequentie hoger is, want

$$X_L = 2\pi fL$$

Algemene stelregel: hoe hoger de frequentie, des te minder windingen. Om een idee te krijgen: bij 50 Hz zie je trafo's met meerlaagswikkelingen en heel veel windingen op een ijzerkern, zoals op Foto 6.3-2. Voor de amateurfrequentie 144-146 MHz of nog hoger zie je vaak maar één of enkele windingen en dan vaak ook nog zonder kern. Als die er wel is, is hij meestal van metaal en **verlaagt** de zelfinductie. Foto 6.10-6 in sub-paragraaf 6.10.3 laat twee voorbeelden zien.

### **Kernmateriaal en afscherming**

In de vorige paragraaf hebben we gezien dat ijzerkernen en hoogfrequenttoepassingen niet goed samengaan. Wisselstroom in een zelfinductie gaat gepaard met voortdurende ompoling van het magnetisch veld. Naarmate die ompolingen sneller gaan, kan weekijzer die ompolingen moeilijker bijhouden. Magnetische ompoling van een stuk weekijzer is nu eenmaal een relatief traag proces. Ook heeft weekijzer de ongemakkelijke eigenschap dat het elektrisch geleidend is. Naarmate frequenties hoger worden, krijgt die geleidende eigenschap meer de overhand. Dat leidt tot verliezen die al gauw de 100% naderen. Daar hebben we weinig aan.

Kernmateriaal voor hoge frequenties moet daarom de omkering van de stroomrichting per halve periode goed kunnen volgen en niet elektrisch geleidend zijn. Daarvoor zijn verschillende materialen in omloop. Dat zijn

- **Ferriet.** Ferrieten zijn keramisch materiaal, waarin onder meer ijzeroxide, zeg maar roest, verwerkt is. Ferrieten zijn in verschillende vorm en samenstelling en voor verschillende frequentiegebieden beschikbaar. Een bezwaar van ferriet is dat het bij grote stromen verzadiging vertoont. Dat wil zeggen dat de permeabiliteit boven een zekere magnetische veldsterkte vermindert. Als er veel stroom door een wikkeling loopt, heeft een beetje extra stroom minder effect dan wanneer er nog weinig stroom loopt. Als er signaal door een ferriettrafo moet, kan dit leiden tot vervorming.
- **Ijzerpoederkernen.** Omdat ferriet minder geschikt is voor vervormingsarme signaaloverdracht, worden in plaats daarvan vaak spoelen met een ijzerpoederkern gebruikt. Daarin zijn fijne metallische deeltjes ijzer samengeperst in een niet-geleidende massa. Die fijne deeltjes zijn in tegenstelling tot de grote stukken ijzer in laagfrequenttransformatoren wel goed bestand tegen hoge frequenties.
- **Ijzercarbonylkernen.** Ijzercarbonyl is een groep van verbindingen van ijzer, koolstof en zuurstof. Het is voor elektronische toepassingen verwerkt in materiaal dat op het oog niet altijd goed te onderscheiden is van poederijzerkernen. De documentatie van de fabrikant vertelt er dan meer over. Het is vaak geschikt voor nog wat hogere frequenties dan ijzerpoeder.

Maar voor al deze materialen geldt net als voor weekijzer dat bij toenemende frequentie de magnetische ompoling voor iedere periode moeizamer wordt, tot ook het beste materiaal dat niet meer "bijsloft". Bij zo'n 50 MHz of nog iets hoger is het met alle min of meer gebruikelijke kernmaterialen wel voorbij.



Bij de keuze van wikkeldraad speelt nog een kwestie. Die heet *huid-effect* of in het Engels *skin effect*. Dat effect komt erop neer dat de stroom steeds meer de buitenkant van een geleider opzoekt, naarmate de frequentie hoger wordt. Dat begint al bij frequenties van enkele tientallen kHz. Dan is het zelden hinderlijk, maar bij frequenties van vele MHz wel. Je ziet dan vaak dat verzilverd koperdraad wordt toegepast. Daarvan is het binnenste deel nog steeds koper, maar het buitenste een laagje zilver. Zilver is een nog betere geleider dan koper. Uit kostenpunt wordt verzilverd koper gebruikt en geen massief zilver. Bij hoge frequenties zijn beide elektrisch gezien praktisch even effectief.

Een andere optie is, in plaats van massief koperdraad zogenoemde *litze* te gebruiken. Dat is draad dat uit een groot aantal heel dunne onderling geïsoleerde draadjes bestaat. Daardoor is het totale oppervlak groter dan bij gebruik van een even dikke draad van massief koper. Om dat te laten zien, werken we een getallenvoorbeeld uit.

We gaan uit van een draad met een doorsnede van  $1 \text{ mm}^2$ . Die heeft een omtrek van  $2\sqrt{\pi}$  mm. Een draad met een doorsnede van  $0,1 \text{ mm}^2$  heeft een omtrek van  $2\sqrt{0,1\pi}$  mm.

Tien draden met elk een doorsnede van  $0,1 \text{ mm}^2$  hebben samen ook een doorsnede van  $1 \text{ mm}^2$  en gezamenlijk een omtrek van  $20\sqrt{0,1\pi}$  mm. Is dat meer of minder dan  $2\sqrt{\pi}$  mm? We delen ze op elkaar:

$$x = \frac{20\sqrt{0,1\pi}}{2\sqrt{\pi}}$$

Als  $x=1$ , dan zijn ze gelijk. Als  $x>1$ , dan hebben de 10 dunne draadjes samen de grootste omtrek en als  $x<1$ , dan wint de enkele draad van  $1 \text{ mm}^2$ . We delen boven en onder de streep door  $\sqrt{\pi}$ . Dan vinden we

$$x = \frac{20\sqrt{0,1}}{2} = 10\sqrt{0,1} = 10 \cdot 0,316 = 3,16$$

3,16 is ruim 3x meer dan 1. De 10 dunne draadjes winnen het met glans van de enkele draad met een 10x zo grote doorsnede. Dat toont het nut van litze bij hoogfrequente wisselstromen. Foto 6.10-1 toont drie voorbeelden van wikkeldraad.



Foto 6.10-1. Drie voorbeelden van wikkeldraad. Van links naar rechts: koperdraad met isolatie van heldere lak ("lakdraad"); verzilverd koperdraad en koperlitze: elk draadje, omwikkeld met heel dunne zijde bestaat uit 10 draadjes met zg. posijnisolatie. Posijn laat zich met een hete soldeerbout gemakkelijk vertinnen, in tegenstelling tot de lak van het lakdraad, dat je eerst moet afkrabben. Verzilverd draad is meestal lakloos. Ruimte tussen de windingen is dan nodig om geen sluiting tussen de windingen te krijgen.

### 6.10.3 Enkele voorbeelden van kernmateriaal en afscherming met foto

We beginnen met zogenoemde ferrietkernen in E-vorm. Ze worden dan ook wel aangeduid met de term *E-kern* (Foto 6.10-2)

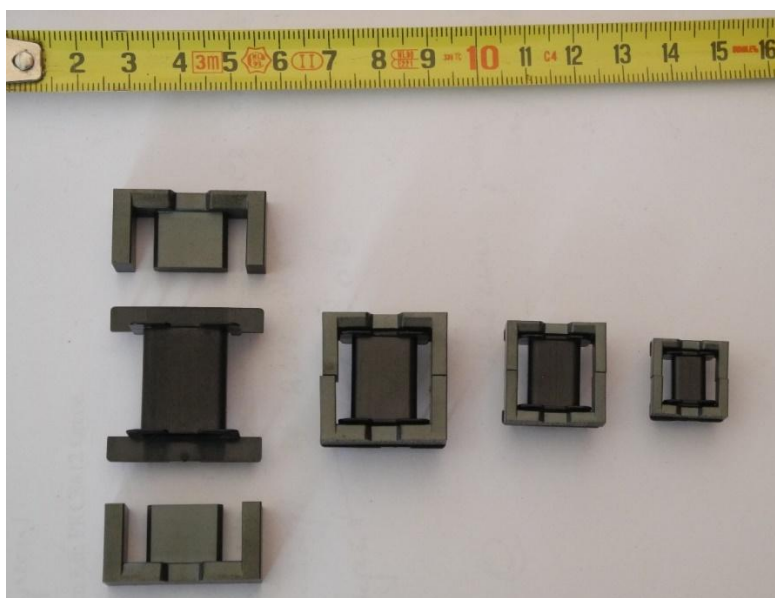
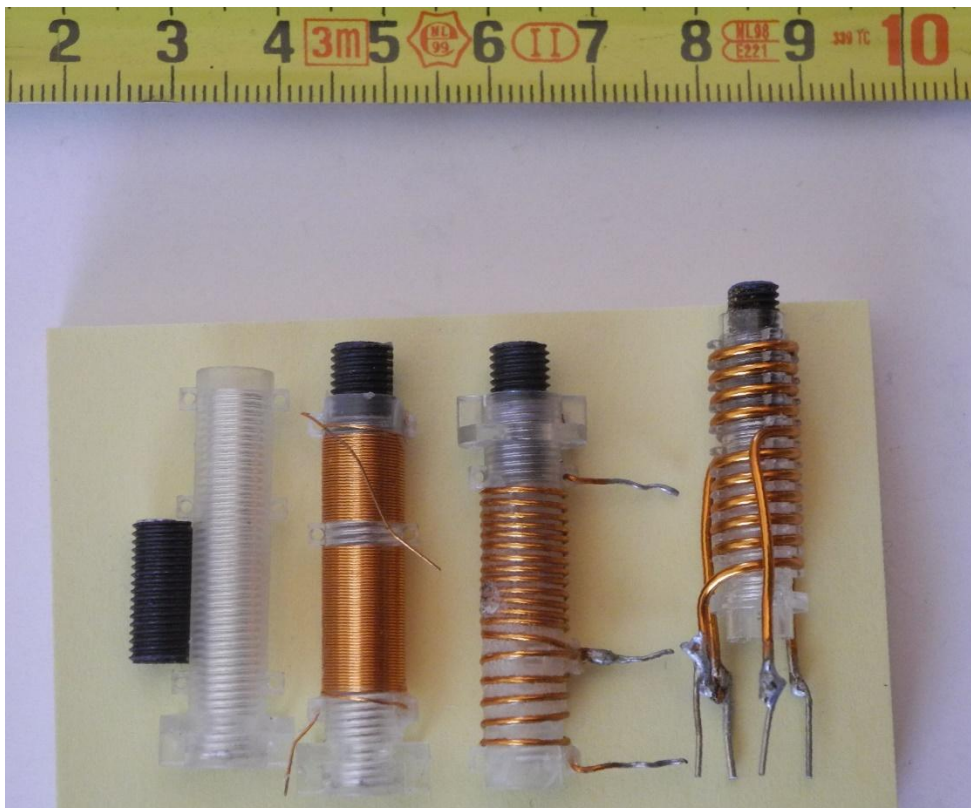


Foto 6.10-2. Ferrietkernen. Het zijn zogenoemde E-kernen. Ze bestaan uit een wikkellijchaam en twee E-vormige ferriethelften (links) en kunnen in elkaar worden geschoven zodat een gesloten ferrietlichaam ontstaat (de drie kernlichamen rechts). Het magnetisch veld verloopt daarin als bij een ijzerkerntrafo.

Het wikkellijchaam, los te zien bij de kern links op de foto, is gemakkelijk te bewikkelen, waarna het ferriet in en om het wikkellijchaam wordt geschoven (de drie kernen rechts op de foto) en het magnetisch veld, net al bij de trafo op Foto 6.3-2 grotendeels opgesloten blijft in het ferrietmateriaal. Daardoor blijven spreidingsverliezen klein. Het getoonde materiaal is geschikt tot enkele honderden kHz.

Foto 6.10-3 toont vier rechte spoellichamen met in- en uitschroefbare kern van poederijzer. Drie zijn bewikkeld als HF-trafo. In tegenstelling tot de E-kernen die we zojuist zagen, heeft deze constructie een magnetisch veld om zich heen, doordat het veld buiten de spoel in lucht verloopt. Daardoor kunnen ongewenste koppelingen met andere delen van de schakeling optreden. Dat betekent oppassen en bij voorkeur afschermen.



*Foto 6.10-3. Rechte zelfgemaakte spoelen met poederijzerkern, elk met twee windingen. Links een leeg wikkellijchaam met losse kern. De kernen kunnen meer of minder naar binnen worden geschroefd. Daarmee kan de zelfinductie worden ingesteld. Desgewenst kunnen er ook meer kernen in een wikkellijchaam.*

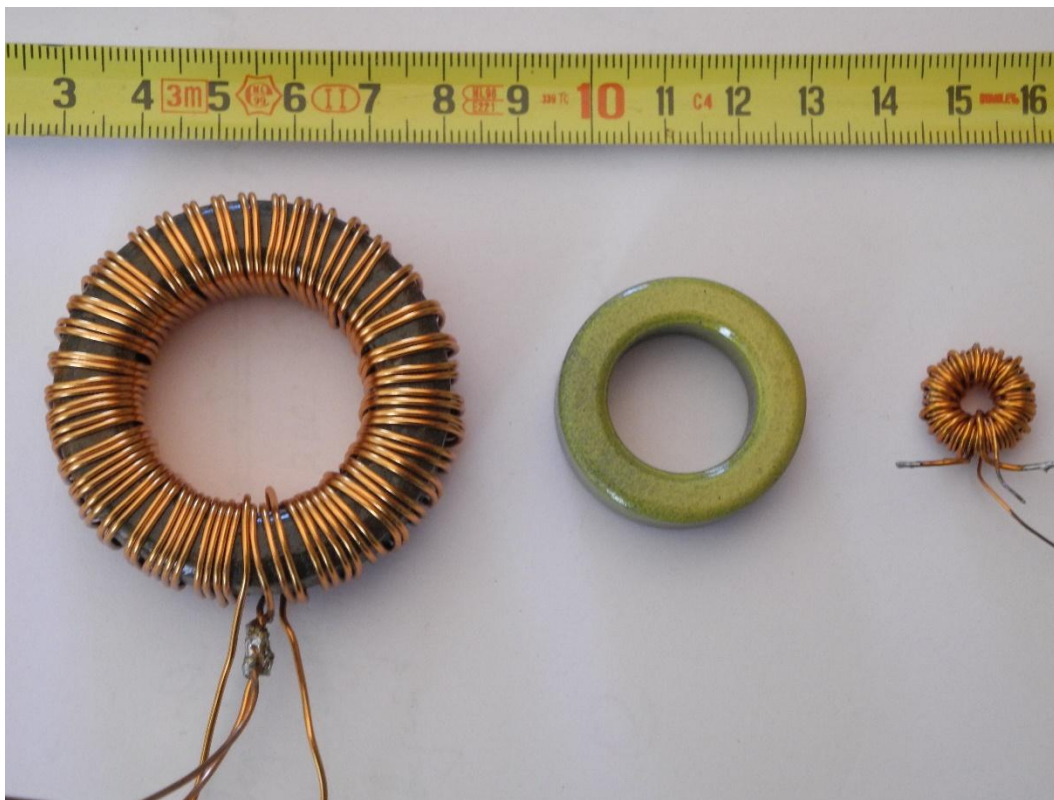
Dat afschermen gebeurt voor dit soort spoelen niet met een omhulling van ferriet of een ander medium met hoge permeabiliteit, maar met een geleidende metalen bus. De oplettende lezer zal zich nu misschien afvragen of hier bij vergissing elektrisch en magnetisch veld worden verwisseld. Dat is niet het geval. Bij een wisselend magnetisch veld wordt in die afschermibus een stroom geïnduceerd die een tegengesteld magnetisch veld maakt. Dat tegengestelde veld vernietigt het oorspronkelijke veld buiten de

afschermbus. Deze manier van afschermen is weliswaar effectief, maar leidt tot verlaging van de zelfinductie van de spoel en door de verliezen tot een verminderde  $Q$ .

Je kunt bij dit soort constructies dus niet zomaar de spoel uit de bus halen en de zelfinductie meten. Je krijgt een te hoge waarde!

De kern binnen de spoel kan in- en uitgedraaid worden, zodat de zelfinductie binnen bepaalde grenzen regelbaar is. Zo kun je met behulp van een of meer condensatoren ook een afgestemde trafo maken.

Een effectieve afscherming krijg je met een spoel die gewikkeld is op een ringkern. Foto 6.10-4 laat enkele kernen zien. Door de constructie blijft het magnetische veld voor het overgrote deel opgesloten in de ring. Je zou kunnen zeggen dat de spoel in zijn eigen staart bijt. Hij heeft geen uiteinde. De kern bestaat uit materiaal met een relatief hoge magnetische permeabiliteit. Afschermen is zelden nodig. Vergelijk Foto 6.10-4 ook met Foto 6.3-4 die een ringkerntrafo met ijzeren kern voor netspanning toont.



*Foto 6.10-4. Ringkernen: poederijzer/carbonyl;. Links een kern, bewikkeld als transformator ("balun"; meer hierover in het hoofdstuk over antennes). Midden een onbewikkelde kern. De kleur geeft het frequentiegebied aan, in dit geval 12-50 MHz. Rechts een kleine kern, 1:4 bewikkeld.*

Bij een ringkerntrafo valt aan de zelfinductie niets te regelen. Dat hoeft ook niet, omdat zelfinductie bij een trafo zonder afstemming niet kritisch is. In documentatie van

ringkernen hoor je te kunnen vinden, hoeveel windingen je bij een bepaald materiaal nodig hebt om een bepaalde zelfinductie te bereiken.

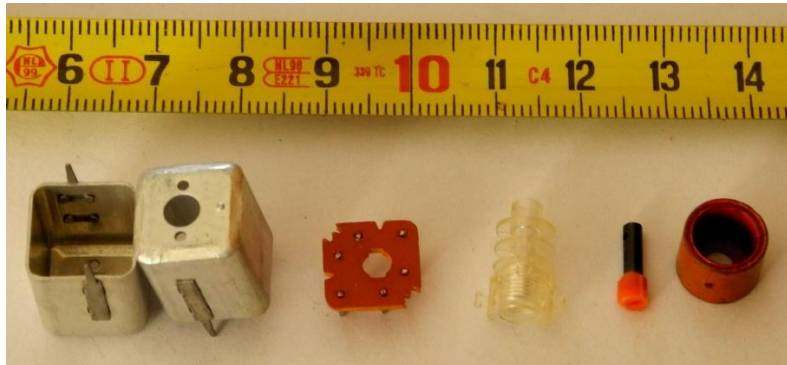


Foto 6.10-5. Miniatuurspoeltje in onderdelen. Van links naar rechts: afschermbus (2x), voetje, spoellichaam, spoelkern, ferriet-omhulling.

En het kan altijd nog weer anders en kleiner (Foto 6.10-5). We zien een miniatuurspoeltje in onderdelen. Van links naar rechts: aluminium afschermbus in onder- en bovenaanzicht, voetje, onbewikkeld spoellichaam met mogelijkheid voor twee gescheiden windingen, spoelkern en ferrietomhulling. Er is overigens niets tegen een enkele winding. Alleen leidt die tot een spoel en niet tot een trafo.

Het ferrietmateriaal op Foto 6.10-5 is bruikbaar in het frequentiegebied van 100 kHz tot ongeveer 5 MHz. Dat is te zien aan de kleur. De informatie daarvoor vind je in de documentatie van de fabrikant die te vinden is op Internet. Kijk bijvoorbeeld eens rond op de site van de Duitse firma Neosid (<https://neosid.de/en/products/inductors/>). De site is Engelstalig. Helaas is er geen Nederlandstalige versie.

Foto 6.10-6 toont drie “ingeblikte” en afgestemde trafosysteempjes voor frequenties van resp. 10, 145 en 432 MHz. Die voor 10 MHz heeft een kern met relatief hoge magnetische permeabiliteit, die van de andere twee zien eruit als metalen kernen. Dat zijn het ook. Zoals eerder opgemerkt, verlagen die de zelfinductie als ze naar binnen worden gedraaid. Aan de kleur van het systeempje voor 432 MHz kun je zien dat het afschermbusje verzilverd is. Dat houdt direct verband met huid-effect bij deze hoge frequentie.

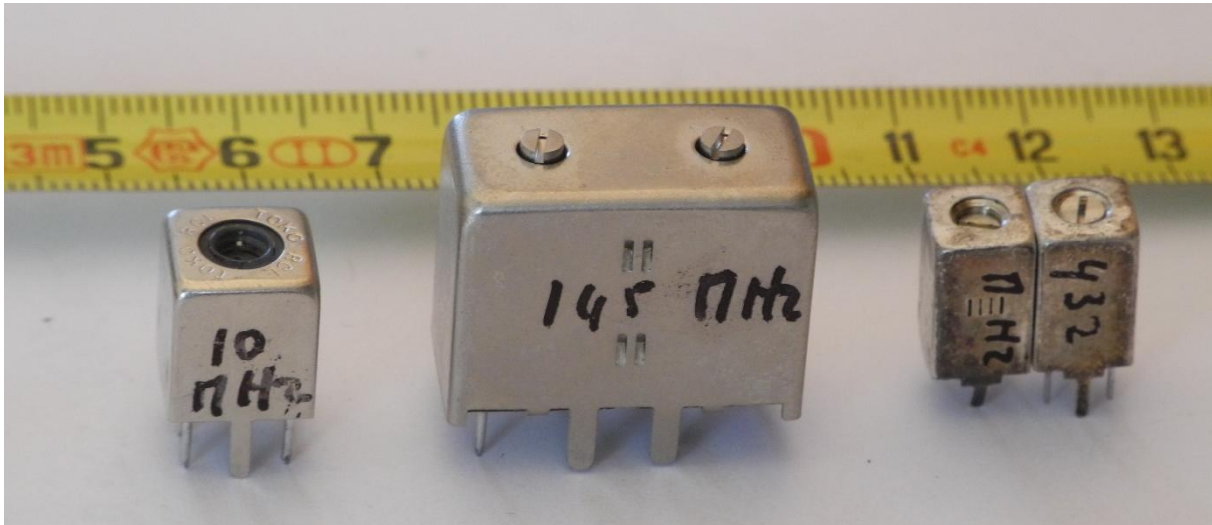


Foto 6.10-6. Trafo's voor 10, 145 en 432 MHz. Die voor 10 MHz heeft een kern met hoge permeabiliteit, de andere twee een metalen kern die de zelfinductie verlaagt.

## 6.11 Het rekenwerk samengevat

Bij LF-transformatoren is de belangrijkste grootte de wikkelverhouding, dat is de verhouding  $N_1/N_2$  van het aantal primaire windingen  $N_1$  en het aantal secundaire windingen  $N_2$ .

Bij **spanningstransformatie** is de verhouding  $U_1/U_2$  van de primaire spanning  $U_1$  en de secundaire spanning  $U_2$  gelijk aan de wikkelverhouding.

Bij **stroomtransformatie** is de verhouding  $I_1/I_2$  van de primaire stroom  $I_1$  en de secundaire stroom  $I_2$  gelijk aan het **omgekeerde** van de wikkelverhouding.

Bij **impedantietransformatie** is de verhouding  $Z_1/Z_2$  van de primaire impedantie  $Z_1$  en de secundaire impedantie  $Z_2$  gelijk aan het kwadraat  $(N_1/N_2)^2$  van de wikkelverhouding. Hetzelfde geldt voor de transformatie van **weerstand** en **reactantie**. Voor autotrafo's gelden dezelfde regels als voor trafo's met afzonderlijke primaire en secundaire wikkeling(en).

Naarmate de frequentie hoger wordt, verandert de geldigheid van de regels uit het LF-deel in dit hoofdstuk in een steeds grovere benadering.



## 6.12 Opgaven

### 6.12.1 Opgave 6-1

Een ideale transformator heeft een primaire wikkeling van 900 windingen en een secundaire van 300 windingen. Op de primaire wikkeling wordt een spanning aangesloten van 240 V. De spanning over de secundaire wikkeling bedraagt

- A. 720 V
- B. 80 V
- C. 26,7 V
- D. 30 V

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking






### 6.12.2 Opgave 6-2

Een ideale transformator heeft een primaire wikkeling van 900 windingen en een secundaire van 300 windingen. De secundaire wikkeling levert 900 mA aan de aangesloten schakeling. Door de primaire wikkeling loopt

- A. 300 mA
- B. 2,7 A
- C. 100 mA
- D. 8,1 A

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 



### 6.12.3 Opgave 6-3

Een ideale transformator heeft een primaire wikkeling van 900 windingen en een secundaire van 300 windingen. Op de secundaire wikkeling wordt een condensator van 90 pF aangesloten.

Op de primaire wikkeling wordt een capaciteit gemeten van

- A. 10 pF
- B. 30 pF
- C. 270 pF
- D. 810 pF

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking





#### 6.12.4 Opgave 6-4

Een ideale transformator heeft een primaire wikkeling van 900 windingen en een secundaire van 300 windingen. Op de secundaire wikkeling wordt een zelfinductie van 9 mH aangesloten

Op de primaire wikkeling wordt een zelfinductie gemeten van

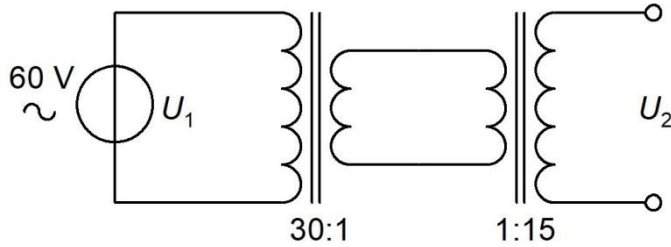
- A. 10 mH
- B. 27 mH
- C. 30 mH
- D. 81 mH

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



### 6.12.5 Opgave 6-5


Twee transformatoren worden geschakeld volgens het schema hieronder.



De wikkelverhoudingen zijn in het schema aangegeven.

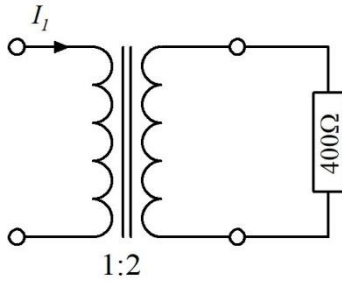
De spanning  $U_2$  bedraagt

- A. 240 V
- B. 120 V
- C. 30 V
- D. 15 V

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 

**6.12.6 Opgave 6-6**

In de weerstand wordt een vermogen van 1 W gedissipeerd (=verbruikt).



$I_1$  bedraagt

- A. 25 mA
- B. 50 mA
- C. 100 mA
- D. 200 mA

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking




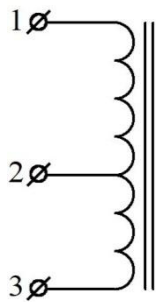


### 6.12.7 Opgave 6-7

Een op een ringkern gewikkelde HF-trafo

- A. Hoeft meestal niet te worden afgeschermd
- B. Heeft grote spreidingsverliezen
- C. Moet bij voorkeur worden afgeschermd met een aluminium of koperen bus
- D. Moet worden afgeschermd met een ferrietomhulling.

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 

**6.12.8 Opgave 6-8**

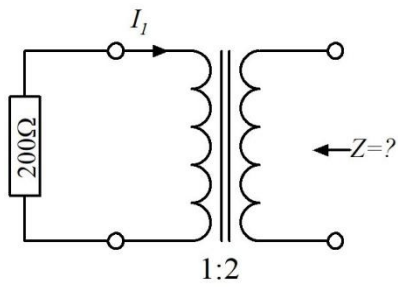
Het aantal windingen tussen de punten 1 en 2 bedraagt 200, tussen 2 en 3 zitten 100 windingen. Tussen de punten 1 en 3 wordt een spanning van 300 V 50 Hz aangesloten. De spanning tussen de punten 2 en 3 bedraagt

- A. 100 V
- B. 200 V
- C. 150 V
- D. 300 V

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



## 6.12.9 Opgave 6-9



De impedantie  $Z$  bedraagt bij de aangegeven wikkilverhouding

- A.  $50\ \Omega$
- B.  $100\ \Omega$
- C.  $400\ \Omega$
- D.  $800\ \Omega$

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



## 6.13 Antwoorden bij de opgaven

### 6.13.1 Uitwerking van Opgave 6-1

Een ideale transformator heeft een primaire wikkeling van 900 windingen en een secundaire van 300 windingen. Op de primaire wikkeling wordt een spanning aangesloten van 240 V. De spanning over de secundaire wikkeling bedraagt

- A. 720 V
- B. 80 V**
- C. 26,7 V
- D. 30 V

#### Uitwerking

De spanningsverhouding primair/secundair is gelijk aan de wikkelverhouding. Dat komt tot uitdrukking in vergelijking ( 6.4-1) in de tekst. Deze luidt:

$$\frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2} \rightarrow U_2 = U_1 \frac{N_2}{N_1}$$

De gegevens leveren

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{300}{900} = \frac{1}{3} \quad \text{en} \quad U_1 = 240 \text{ V}$$

Invullen in de oorspronkelijke vergelijking ( 6.4-1) levert

$$U_2 = 240 * \frac{1}{3} \text{ V} = 80 \text{ V}$$

Dat is antwoord B.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



### 6.13.2 Uitwerking van Opgave 6-2

Een ideale transformator heeft een primaire wikkeling van 900 windingen en een secundaire van 300 windingen. De secundaire wikkeling levert 900 mA aan de aangesloten schakeling. Door de primaire wikkeling loopt

- A. 300 mA
- B. 2,7 A
- C. 100 mA
- D. 8,1 A

#### Uitwerking

De primaire en secundaire spanningen verhouden zich als de wikkelverhouding, zagen we in vergelijking ( 6.4-1). Op grond van de wet van energiebehoud (hoofdstuk 2) moeten de primaire en secundaire stromen zich dan verhouden als het omgekeerde van de wikkelverhouding. Voor

$$\frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2}$$

Stroom  $I$  komt in plaats van spanning  $U$  en  $N_1$  en  $N_2$  wisselen van plaats:

$$\frac{I_1}{N_2} = \frac{I_2}{N_1} \rightarrow I_1 = \frac{I_2 N_2}{N_1}$$

Dat lijkt op vergelijking ( 6.4-2), maar aangepast aan het berekenen van  $I_1$  uit  $I_2$  in plaats van  $I_2$  uit  $I_1$ . De gegevens leveren

$$I_1 = \frac{I_2 N_2}{N_1} = \frac{900 \text{ mA} * 300}{900} = 300 \text{ mA}$$

Antwoord A is juist.

Het kan ook met Aw (ampèrewindingen):

De secundaire levert 900 mA uit 300 windingen, dat is  $0,9\text{A} * 300\text{w} = 270 \text{ Aw}$ . In de primaire wikkeling zijn 900 windingen. Die moeten ook 270 Aw leveren. Deel de 270 Aw door 900 en je hebt de stroom: 0,3 A is 300 mA. Hetzelfde antwoord, A.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



### 6.13.3 Uitwerking van Opgave 6-3

Een ideale transformator heeft een primaire wikkeling van 900 windingen en een secundaire van 300 windingen. Op de secundaire wikkeling wordt een condensator van 90 pF aangesloten.

Op de primaire wikkeling wordt een capaciteit gemeten van

- A. 10 pF
- B. 30 pF
- C. 270 pF
- D. 810 pF

#### Uitwerking

Omdat de wikkelverhouding primair : secundair 3:1 is, is de impedantieverhouding het kwadraat daarvan, 9:1. Een op de primaire aangesloten apparaat “ziet” daarom een 9x zo hoge impedantie. Omdat capaciteit omgekeerd evenredig is met reactantie, betekent dat een 9x zo kleine capaciteit, dat is 90 pF:9 = 10 pF. Antwoord A.

Het kan ook met vergelijking ( 6.5-3):

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$$

Voor de impedanties  $Z$  mag ook weerstand  $R$  worden gelezen als de belasting van de secundaire een weerstand is of een reactantie  $X$  als er sprake is van een belasting met een spoel of condensator zoals hier het geval is.

Dan is

$$\frac{X_1}{X_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad \text{en} \quad X_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 X_2$$

Dan is  $X_1 = 9X_2$  en de capaciteit die je via de primaire “ziet” is dan 9x zo klein is 10 pF. Zelfde goede antwoord: A.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave





#### 6.13.4 Uitwerking van Opgave 6-4

Een ideale transformator heeft een primaire wikkeling van 900 windingen en een secundaire van 300 windingen. Op de secundaire wikkeling wordt een zelfinductie van 9 mH aangesloten

Op de primaire wikkeling wordt een zelfinductie gemeten van

- A. 10 mH
- B. 27 mH
- C. 30 mH
- D. **81 mH**

#### Uitwerking

De uitwerking is in het begin dezelfde als die van Opgave 6-3. De impedantieverhouding primair : secundair bedraagt 9:1. Omdat zelfinductie evenredig is met reactantie, “ziet” een op de primaire aangesloten apparaat een 9x zo hoge zelfinductie. Dat komt neer op  $9 * 9 \text{ mH} = 81 \text{ mH}$ . Antwoord D.

Met vergelijking ( 6.5-3) werkt het net als in de vorige opgave ook. Op de aansluitingen van de primaire “zie” je een 9x zo grote reactantie als in werkelijkheid over de secundaire staat. Bij een spoel is de reactantie evenredig met de frequentie en dus lijkt de spoel via de aansluitingen van de primaire 9x zo groot is 81 mH. Ook hier antwoord D



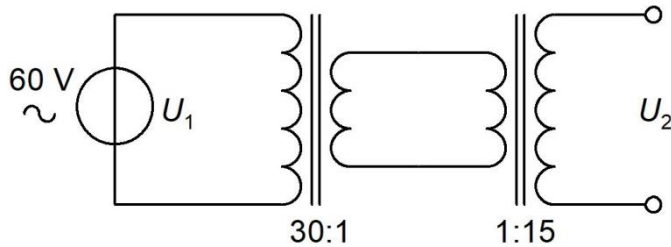
Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



### 6.13.5 Uitwerking van Opgave 6-5

Twee transformatoren worden geschakeld volgens het schema hieronder.



De wikkelverhoudingen zijn in het schema aangegeven.

De spanning  $U_2$  bedraagt

- A. 240 V
- B. 120 V
- C. **30 V**
- D. 15 V

De spanning van 60 V wordt door de linker trafo met een factor 30 omlaag getransformeerd. Dat rekenen we niet verder uit, want de volgende trafo transformeert met een factor 15 omhoog. De totale transformatieverhouding is dan 30:15 en dat is 2:1. Daaruit volgt dat  $U_2$  gelijk is aan  $60 \text{ V} / 2 = 30 \text{ V}$ . Antwoord C



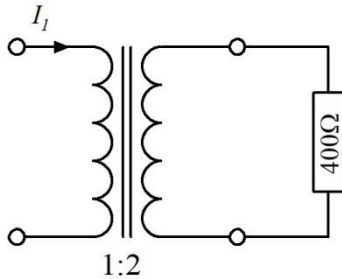
Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



### 6.13.6 Uitwerking van Opgave 6-6

In de weerstand wordt een vermogen van 1 W gedissipeerd (=verbruikt).



$I_1$  bedraagt

- A. 25 mA
- B. 50 mA
- C. 100 mA
- D. 200 mA

#### Uitwerking

We rekenen terug vanaf de weerstand van 400 ohm. De weerstand dissipeert 1 W. Daarmee kunnen we de secundaire stroom uitrekenen.  $P = I^2 R \rightarrow I^2 R = 1 \text{ W}$ . Dan is

$$I^2 = 1\text{W}/R \rightarrow I^2 = 1\text{W}/400\ \Omega \rightarrow I = \sqrt{1\text{W}/400\ \Omega} = 1/20 \text{ A} = 50 \text{ mA}$$

De wikkilverhouding is 1:2. Dan is de stroomverhouding 2:1, dus de primaire stroom is  $2 \cdot 50 \text{ mA} = 100 \text{ mA}$ . Antwoord C.

#### Het kan ook zo:

De weerstandsverhouding tussen primair en secundair is het kwadraat van de wikkilverhouding, dat is 1:4.

Op de aansluitingen van de primaire “zien” we een weerstand van  $400 \text{ ohm}/4$  is 100 ohm.

De stroom  $I_1$  in de primaire is te berekenen uit  $P = I_1^2 R$ , ofwel  $I_1^2 = P/R$  en  $I_1 = \sqrt{P/R}$ .

Invullen levert

$$I_1 = \sqrt{1\text{W}/100\ \Omega} = \sqrt{0,01} \text{ A} = 0,1 \text{ A} = 100 \text{ mA}. \text{ Zelfde uitkomst, antwoord C.}$$



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave





### 6.13.7 Uitwerking van Opgave 6-7

Een op een ringkern gewikkelde HF-trafo

- A. **Hoeft meestal niet te worden afgeschermd**
- B. Heeft grote spreidingsverliezen
- C. Moet bij voorkeur worden afgeschermd met een aluminium of koperen bus
- D. Moet worden afgeschermd met een ferrietomhulling.

#### **Uitwerking**

Een ringkerntrafo voor HF hoeft vrijwel nooit te worden afgeschermd, omdat het magnetisch veld bijna helemaal opgesloten zit in de ringkern. Antwoord A.

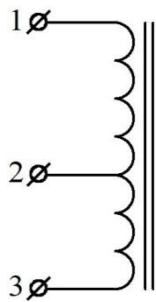


Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



### 6.13.8 Uitwerking van Opgave 6-8



Het aantal windingen tussen de punten 1 en 2 bedraagt 200; tussen 2 en 3 zitten 100 windingen. Tussen de punten 1 en 3 wordt een spanning van 300 V 50 Hz aangesloten. De spanning tussen de punten 2 en 3 bedraagt

- A. 100 V
- B. 200 V
- C. 150 V
- D. 300 V

#### Uitwerking

De totale wisselspanning over deze autotrafo (tussen punten 1 en 3) is 300 V bij in totaal 300 windingen. Dat is dus 1 V per winding. Tussen de punten 2 en 3 zitten 100 windingen. Bij 1 V per winding wordt dat  $100 \cdot 1V = 100V$  over 100 windingen.

Antwoord A.

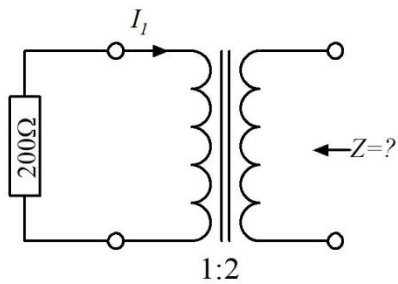


Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



### 6.13.9 Uitwerking van Opgave 6-9



De impedantie  $Z$  bedraagt bij de aangegeven wikkilverhouding

- A.  $50\ \Omega$
- B.  $100\ \Omega$
- C.  $400\ \Omega$
- D.  **$800\ \Omega$**

#### Uitwerking

De wikkilverhouding van linker- naar rechterwikkeling is 1:2. Als parallel aan de linker wikkeling  $200\ \Omega$  staat, moet rechts een weerstand (impedantie) worden “gezien” van  $2^2=4$  maal  $200\ \Omega$  is  $800\ \Omega$ . Antwoord D.



Terug naar de opgave