



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	3
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
6.4.4	Transformatoren en impedanties	11
6.5	Transformatoren met aftakkingen	12
6.6	Nullaststroom, de smoorspoel	13
6.7	Transformatoren en spoelen voor hoge frequenties	14
6.7.1	Overeenkomsten met LF-transformatoren	14
6.7.2	Verschillen met LF-transformatoren	14
6.7.3	Enkele voorbeelden van kernmateriaal en afscherming met foto	15
6.8	Het rekenwerk samengevat	19
6.9	Opgaven	20
6.9.1	Opgave 6-1	20
6.9.2	Opgave 6-2	21
6.9.3	Opgave 6-3	22
6.9.4	Opgave 6-4	23
6.9.5	Opgave 6-5	24
6.9.6	Opgave 6-6	25
6.9.7	Opgave 6-7	26
6.9.8	Opgave 6-8	27
6.9.9	Opgave 6-9	28
6.10	Antwoorden bij de opgaven	29
6.10.1	Uitwerking van Opgave 6-1	29
6.10.2	Uitwerking van Opgave 6-2	30



6.10.3	Uitwerking van Opgave 6-3.....	31
6.10.4	Uitwerking van Opgave 6-4.....	32
6.10.5	Uitwerking van Opgave 6-5.....	33
6.10.6	Uitwerking van Opgave 6-6.....	34
6.10.7	Uitwerking van Opgave 6-7.....	35
6.10.8	Uitwerking van Opgave 6-8.....	36
6.10.9	Uitwerking van Opgave 6-9.....	37



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) tegen wisselstroom. Transformatoren en spoelen zijn wat opbouw betreft sterk verwant. Dat geldt ook voor hun werkingsprincipes. Die laatste gelden voor transformatoren en spoelen voor lage en hoge frequenties. Er is wel verschil in uitvoering. Daarom hebben ze in dit hoofdstuk elk 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 verandering van het magnetisch veld door een spoel kan door stroomverandering in de spoel worden veroorzaakt, maar even goed door 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 met andere stroom. En dat is de bedoeling. Transformatoren worden gebruikt voor

- Vergroten of verkleinen van wisselspanning of -stroom
- Veranderen van impedanties (alleen F-leerstof)
- 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 een onbedoelde energievorm,

meestal warmte. Bij transformatoren is dat ook zo. Die neiging moet zo goed mogelijk worden onderdrukt.

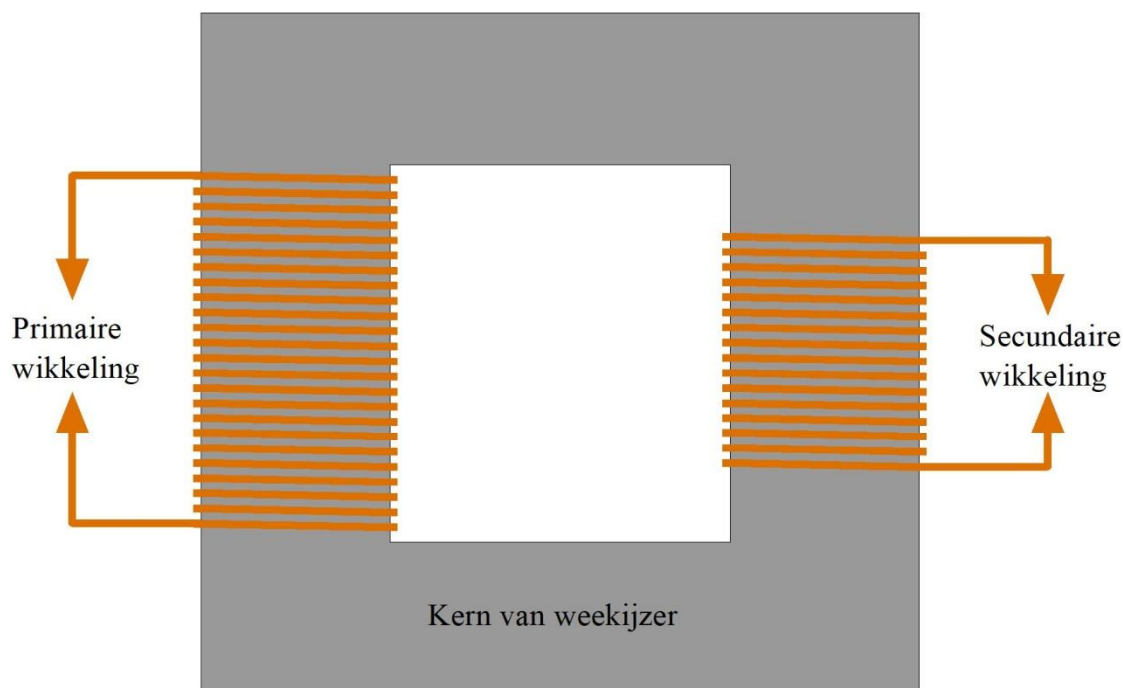
Het belangrijkste middel daarvoor is, te zorgen dat het magnetisch veld zo goed mogelijk door de spoelen wordt geleid. Dat vraagt materiaal met een hoge magnetische permeabiliteit. Bij laagfrequente toepassingen, zoals de 50 Hz van het lichtnet, wordt daarvoor vrijwel altijd weekijzer gebruikt. Dat is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



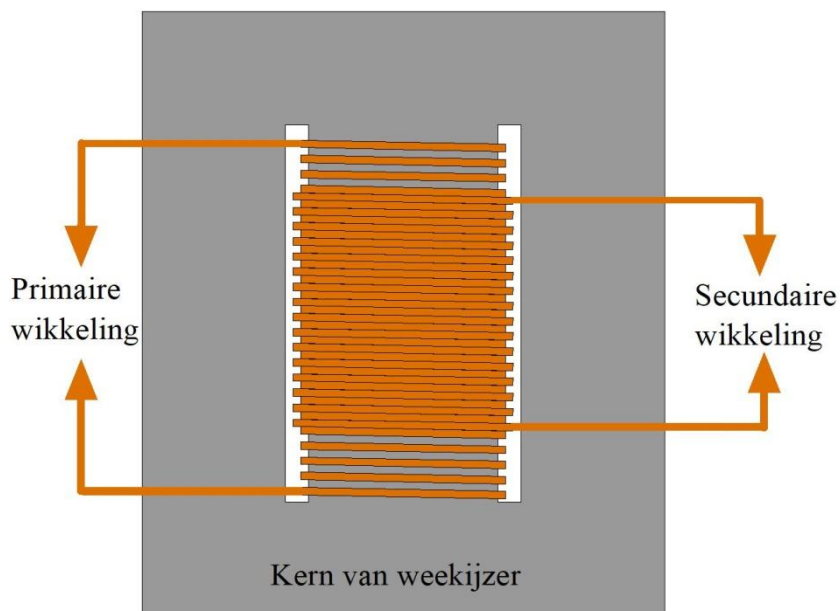
Foto 6.3-1. Spoel met een wikkeling van minder dan één winding.

In Figuur 6.3-1 is een opbouw van een transformator of kortweg *trafo* weergegeven. De wikkelingen hebben ongelijke aantallen windingen. We zullen verderop zien, wat daarvan het nut is. 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 loopt een groter deel van het magnetische veld door de wikkelingen en verdwijnt minder magnetisch vermogen de ruimte in.

De kern benadert meer de vorm van het magnetisch veld en de zijanten van de opening in de kern liggen vlak tegen de wikkelingen aan 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 en zijn de verliezen 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 deze 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 vooral in de F-cursus aan de orde.

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

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 op 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.

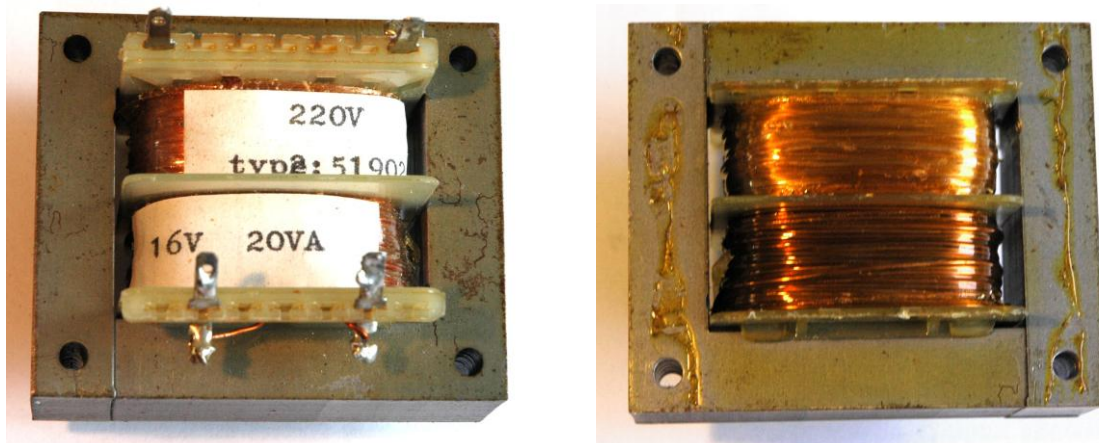


Foto 6.3-2. Een kleine trafo. Links de voorkant met gegevens, rechts de achterkant. De wikkelingen zijn anders dan in Figuur 6.3-2 gestapeld rond het middendeel van de kern. Links en rechts is het scheidingsplaatje tussen beide wikkelingen te zien. Hun draaddiktes zijn verschillend (rechts). De primaire 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 wikkeldraad is een isolerende lak.

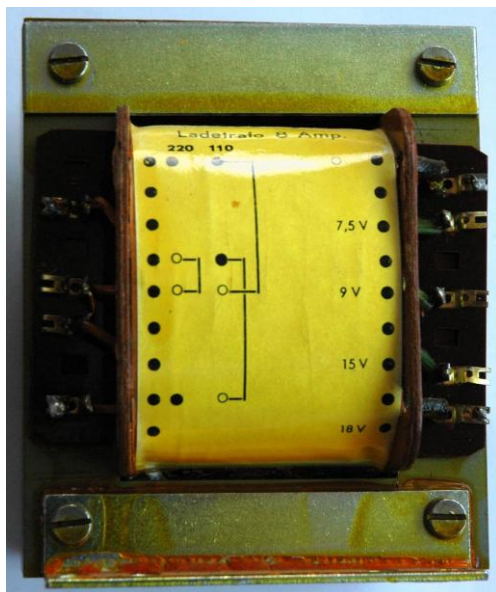


Foto 6.3-3. Links een trafo voor aanzienlijk meer vermogen dan die op Foto 6.3-2. Rechts een close-up van de bovenkant, waar de lamellen van de ijzerkern te zien zijn.

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.

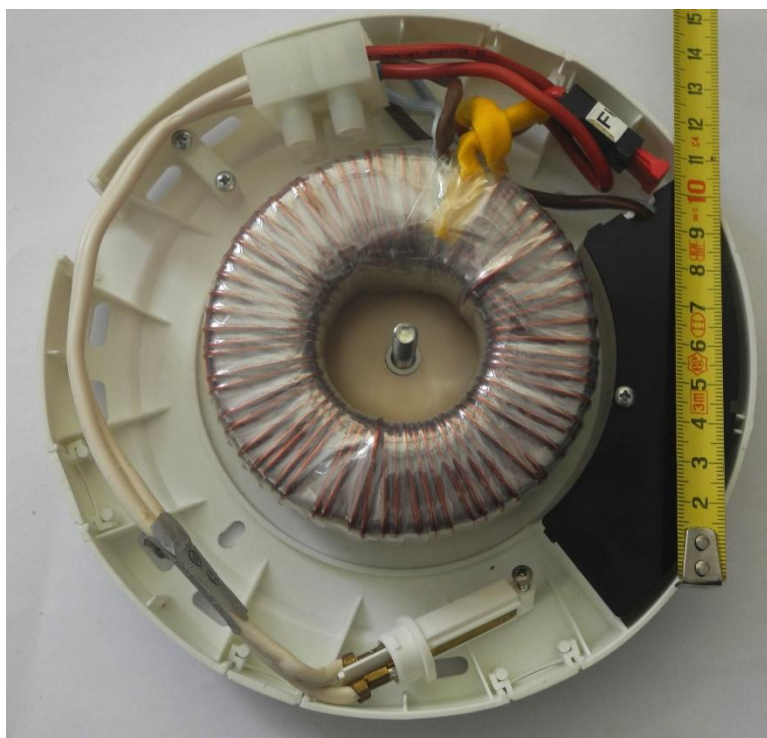
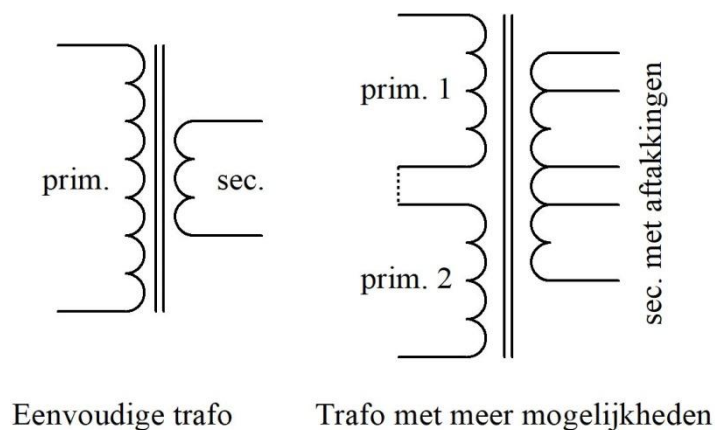


Foto 6.3-4. Ringkerntrafo. Dit exemplaar is ontworpen om minimaal 80 W te kunnen leveren aan een set van 12V-halogeenspotjes -inmiddels ouderwets-. Het meetlint geeft een indruk van de grootte.

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 *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 (en die van de spanningsbron) de stroomtoename. 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 dan over de secundaire 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 spanning. Als op de secundaire wikkeling een belasting, bijvoorbeeld een weerstand, is aangesloten, loopt er een wisselstroom.

Een transformator is dan ook alleen geschikt om wisselstroom en –spanning door te geven. Een eventueel gelijkstroomdeel (gelijkstroom bovenop wisselstroom) 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.

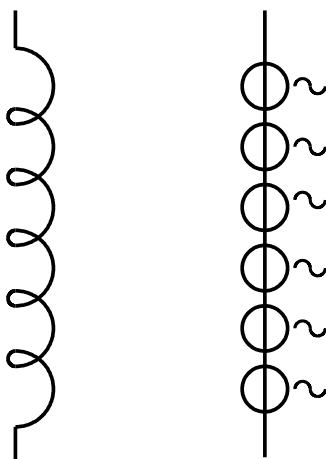
We gaan voorlopig uit van de ideale transformator, dus één zonder verliezen. Wat er op de primaire wikkeling aan vermogen ingaat, moet er dan op de secundaire wikkeling(en) weer uitkomen. Omgekeerd bepaalt de afgifte van vermogen aan de secundaire kant de opname van vermogen aan de primaire kant.

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 wikkelverhouding. 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 dan zien als een spanningsbron. De windingen staan in serie. Samen zijn ze een verzameling in serie geschakelde wisselspanningsbronnen (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. Als de spanning met een factor x omhoog wordt getransformeerd, moet de stroom met diezelfde factor x omlaag worden getransformeerd. Anders zou er uit het niets extra vermogen ontstaan, wat in de natuurkunde niet kan. Uit hoofdstuk 3 weten we dat $P = UI$. Het vermogen P verandert niet. Een hogere secundaire spanning betekent een omgekeerd evenredige (dus lagere) stroom en omgekeerd. **Samengevat: spanning wordt getransformeerd volgens de verhouding van het aantal secundaire windingen gedeeld door het aantal primaire windingen. Stroom wordt getransformeerd volgens de omgekeerde verhouding.**

En zo vinden we het vermogen dat een primaire ingaat, weer netjes in de secundaire terug. Op onvermijdelijke verliezen na, natuurlijk. In een goede trafo zijn die klein.

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

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

Voor stroom geldt het omgekeerde van (6.4-1). Verwissel I en I of (**niet en**) N_1 en N_2 :



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

Een getallenvoorbeeld met spanning

Een transformator heeft een primaire met 1000 windingen en een secundaire met 250 windingen. Over de primaire staat een wisselspanning van 100 V. Hoe groot is de spanning over de secundaire?

De wikkelverhouding is $1000:250 = 4:1$. De spanningsverhouding is dan ook 4:1. De 100 V primair gaat in 4 delen. Dan is 1 deel 25 V. Over de secundaire staat 1 deel is 25 V.

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). De secundaire spanning is $\frac{1}{4}$ maal de primaire. Dan is de secundaire stroom 4x de primaire. De primaire stroom is dan $\frac{1}{4}$ A = 0,25 A. Die wordt dus getransformeerd naar de al genoemde 1 A.

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.

Daar hoort een waarschuwing bij. Een transformator die bedoeld is om secundair een lagere spanning te leveren dan er op de primaire inkomt, bijvoorbeeld 230 V in, 24 V uit, kan in theorie worden omgekeerd. Primair wordt secundair en andersom. Op de voormalige primaire wikkeling die nu secundair is, kan meer dan 2000 V komen te staan als de voormalige secundaire met het lichtnet wordt verbonden. Daar zal de isolatie niet op berekend zijn, met als gevolg een grote kans op rook, vuur en ernstige verwonding van de experimenteerder. Als je geluk hebt, word je gered door de zekering. **Niet doen dus!**

6.4.4 Transformatoren en 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:

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} \quad (6.4-3)$$

En voor Z_2 op de secundaire geldt vergelijking (6.4-3) ook:

$$Z_2 = \frac{U_2}{I_2} \quad (6.4-4)$$



En dan zie je het eigenlijk al aankomen. Als bijvoorbeeld de spanning door de transformatie 3 keer zo klein wordt, wordt de stroom 3 keer zo groot. Een 3x zo **kleine** spanning die een 3 keer zo **grote** stroom met zich meebrengt, betekent dat de impedantie niet 3 keer zo klein wordt, maar $3 * 3 = 9$ keer. Een transformator transformeert impedanties dus niet volgens de wikkilverhouding, maar volgens het kwadraat daarvan. Om nog maar eens een voorbeeld te geven: een transformator die spanning met een factor 10 omhoog of omlaag transformeert, transformeert de impedantie van de schakeling die de spanning levert, met een factor 100 omhoog of omlaag.

Behalve met impedantie doet een transformator hetzelfde met weerstand en reactantie.

Dat is iets om goed te onthouden: een transformator transformeert:

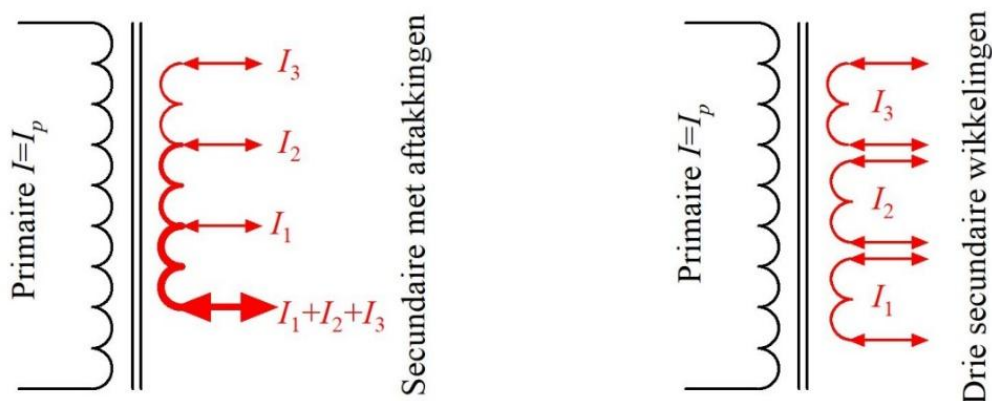
- **Spanning volgens de wikkilverhouding**
- **Stroom volgens het omgekeerde van de wikkilverhouding**
- **Impedantie, weerstand en reactantie volgens het kwadraat van de wikkilverhouding**

Een toepassing van impedantietransformatie is bijvoorbeeld de uitgangstransformator in veel audioversterkers: die transformeert de uitgangsimpedantie van de eigenlijke versterker naar die van de luidspreker. Ook in de eindtrap van bijna elke zender wordt impedantietransformatie toegepast, maar dan op zo'n manier dat de transformatieschakeling nog meer dingen doet. Daarop komen we verderop in deze cursus terug.

6.5 Transformatoren met aftakkingen

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 in schemavorm getekend.

De secundaire op 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 6.5-1 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 dit probleem niet.



Figuur 6.5-1. 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 probleem van overbelasting is daar verlegd naar de primaire!

6.6 Nullaststroom, de smoorspoel

Een trafo waarvan de secundaire wikkeling niet wordt belast, trekt in theorie geen stroom. In werkelijkheid wel, want de primaire wikkeling is dan gewoon een spoel met hoge zelfinductie en maar een beetje weerstand, waardoor de impedantie hoog is. 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, samen met de belastingsstroom.

Een spoel met één wikkeling, een hoge reactantie 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 en/of -spanning over. Op een smoorspoel staat meestal de maximale gelijkstroom vermeld. Een trafo waarvan maar één wikkeling wordt gebruikt, werkt als smoorspoel. Het schemasymbool voor een smoorspoel met ijzerkern staat in Figuur 6.6-1.



Figuur 6.6-1. 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.

6.7 Transformatoren en spoelen voor hoge frequenties

6.7.1 Overeenkomsten met LF-transformatoren

De belangrijkste overeenkomst is dat ook in HF-transformatoren energie-overdracht plaatsvindt via een magnetisch veld. De natuurkunde van wisselende magnetische velden bij hoge frequenties wijkt 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.

6.7.2 Verschillen met LF-transformatoren

De verschillen hebben onder meer betrekking op

- Aantallen windingen
- Kernmateriaal en afscherming

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, hoe 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 een paar windingen en dan ook nog zonder kern.

Kernmateriaal en afscherming

Kernmateriaal als weekijzer is alleen geschikt voor lage frequenties als lichtnetvoedingen en auditoepassingen. IJzerkernen en hoogfrequenttoepassingen gaan niet goed samen. 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 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.
- **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 meestal niet 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 wat hoger is het met alle min of meer gebruikelijke kernmaterialen wel voorbij en blijft het bij luchtspoelen.

6.7.3 Enkele voorbeelden van kernmateriaal en afscherming met foto

We beginnen met zogenoemde ferrietkernen in E-vorm. Ze worden dan ook meestal aangeduid met de term *E-kern* (Foto 6.7-1).

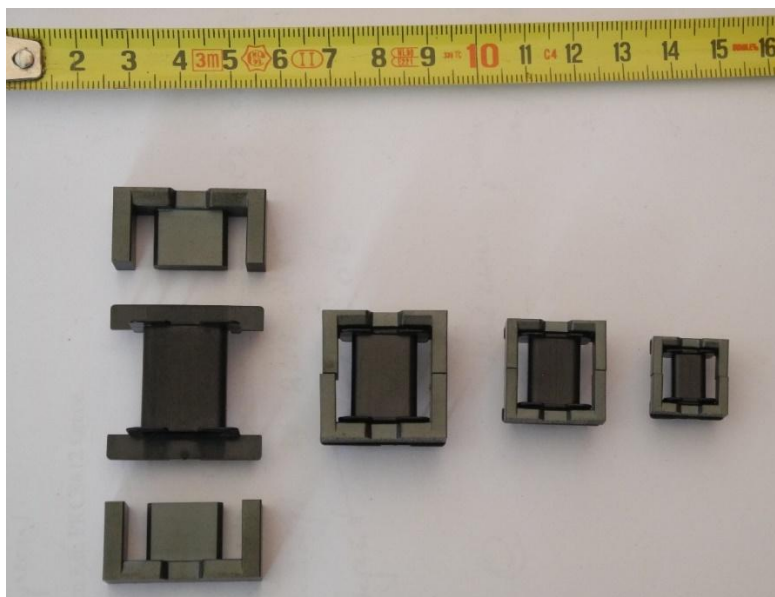


Foto 6.7-1. Ferrietkernen. De foto toont zogenoemde E-kernen. Ze bestaan uit een wikkellichaam en twee E-vormige ferriethelften (links) en kunnen in elkaar worden geschoven zodat een gesloten ferrietlichaam ontstaat (de drie kernlichamen rechts). Het magnetisch veld verloopt daarin als bij een ijzerkerntrafo.

Het wikkellichaam, los te zien bij de kern links op de foto, is gemakkelijk te bewikkelen, waarna het ferriet in en om het wikkellichaam wordt geschoven (de drie kernen rechts op de foto) en het magnetisch veld, net als 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, maar er is ook materiaal dat het blijft doen tot een aantal MHz.

Foto 6.7-2 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.

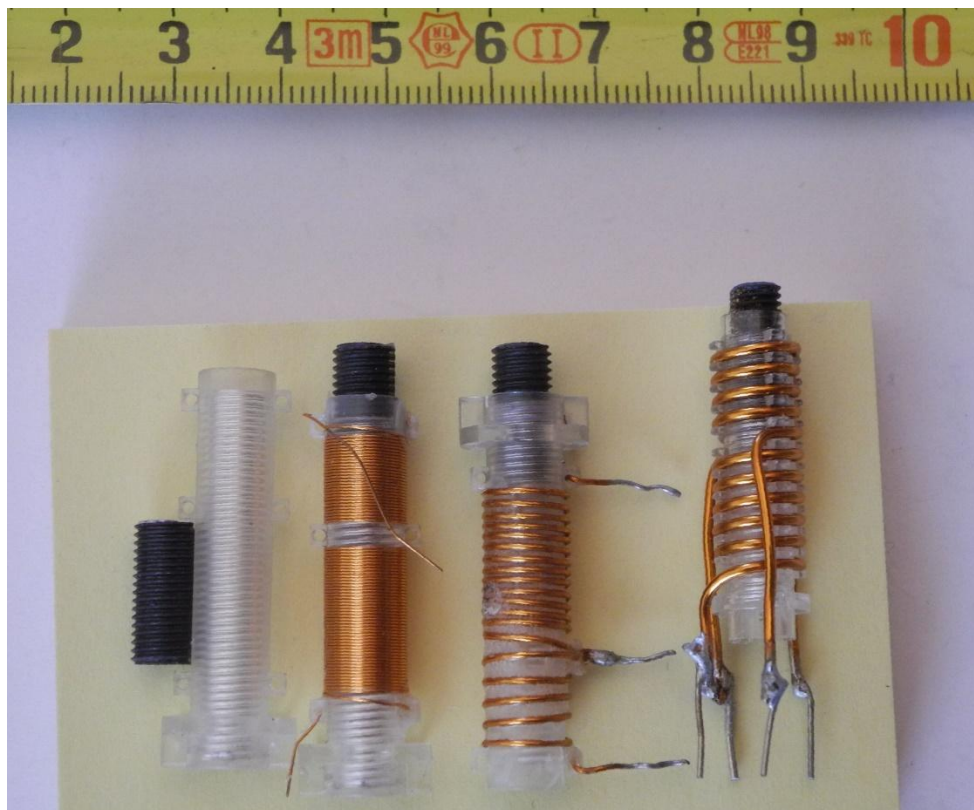


Foto 6.7-2. Rechte zelfgemaakte spoelen met poederijzerkern, elk met twee wikkelingen. Links een leeg wikkellichaam met losse kern. De kernen kunnen meer of minder naar binnen worden geschroefd. Daarmee kan de zelfinductie worden ingesteld. Desgewenst kunnen er ook meer kernen in een wikkellichaam.

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 afschermbus 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 tot grotere verliezen.

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. Met behulp van een of meer condensatoren kun je ook een afgestemde trafo maken.

Een effectieve afscherming krijg je met een spoel die gewikkeld is op een ringkern. Foto 6.7-3 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 uiteinden. De kern bestaat uit materiaal met een relatief hoge

magnetische permeabiliteit. Afschermen is bijna nooit nodig. Vergelijk Foto 6.7-3 ook met Foto 6.3-4 die een ringkerntrafo met ijzeren kern voor netspanning toont.

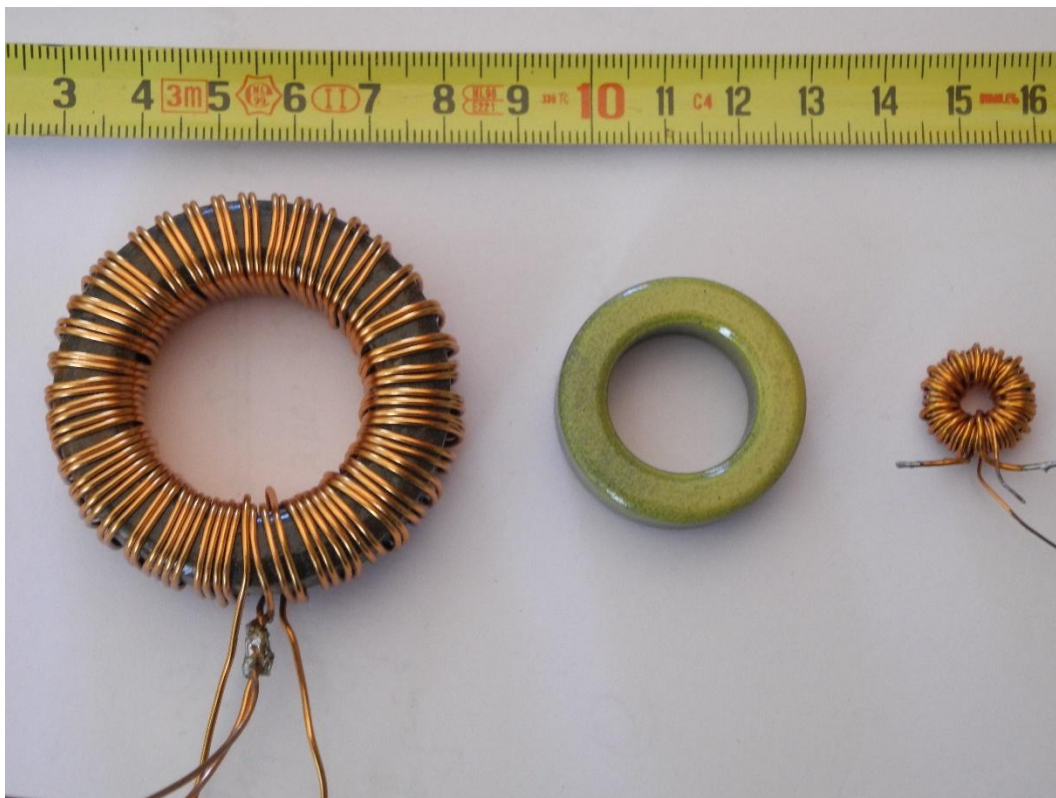


Foto 6.7-3. Ringkernen: poederijzer/carbonyl. Links een kern, bewikkeld als transformator ("balun"; meer hierover in het hoofdstuk over antennes). Midden een onbewikkelde kern. De kleur geeft het frequentiegebied aan, in dit geval 12-50 MHz. Rechts een kleine kern, 1:4 bewikkeld.

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.

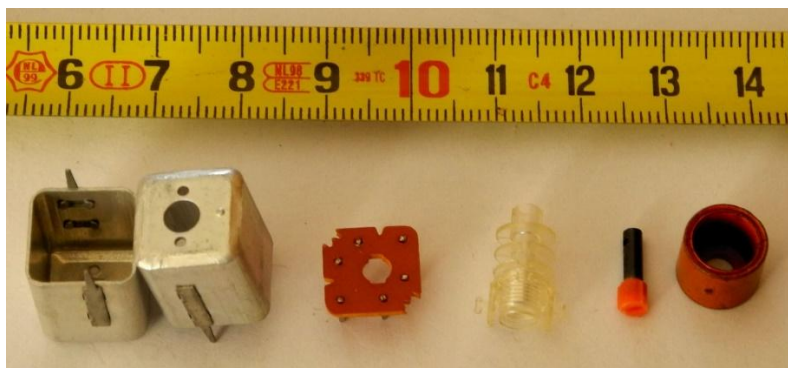


Foto 6.7-4. Miniatuurspoeltje in onderdelen. Van links naar rechts: afschermbus (2x), voetje, spoellichaam, spoelkern, ferriet-omhulling.



En het kan altijd nog weer anders en kleiner (Foto 6.7-4). We zien een miniatuurspoeltje in onderdelen. Van links naar rechts: aluminium afschermbus in onder- en bovenaanzicht, voetje, onbewikkeld spoellichaam met mogelijkheid voor twee gescheiden wikkelingen, spoelkern en ferrietomhulling. Er is overigens niets tegen een enkele wikkeling. Alleen leidt die tot een spoel en niet tot een trafo.

Het ferrietmateriaal op Foto 6.7-4 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 documentatie van de fabrikant. Die is te vinden 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.

6.8 Het rekenwerk samengevat

Bij LF-transformatoren is de belangrijkste grootte de wikkilverhouding, 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 wikkilverhouding.

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 wikkilverhouding.

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



6.9 Opgaven

6.9.1 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



**6.9.2 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





6.9.3 Opgave 6-3

Een transformator met een wikkelverhouding van 2:1 wordt gebruikt op een frequentie van 144 MHz. De meest waarschijnlijke opbouw is:

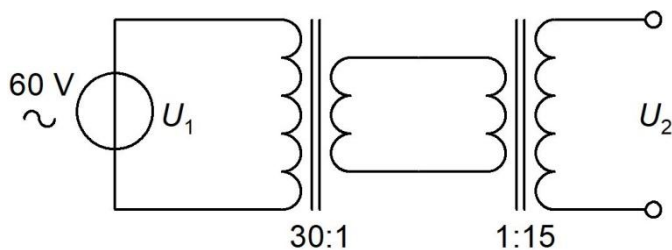
- A. Een weekijzerkern met 500 windingen primair en 250 windingen secundair
- B. Een poederijzerkern met 500 windingen primair en 250 windingen secundair
- C. Een poederijzerkern met 50 windingen primair en 25 windingen secundair
- D. Luchtspoel met 4 windingen primair en 2 windingen secundair

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



6.9.4 Opgave 6-4

Twee transformatoren worden geschakeld volgens het schema hieronder.



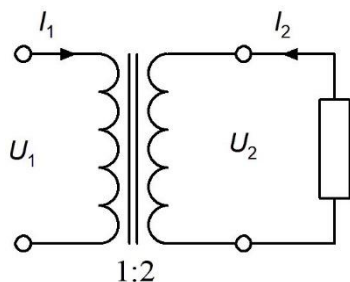
De wikkelverhoudingen zijn in het schema aangegeven.

De spanning U_2 bedraagt

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

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



6.9.5 Opgave 6-5

In het schema is de wikkelverhouding gegeven als 1:2. Als $U_1 = 10\text{ V}$ en $I_1 = 1\text{ A}$, hoe groot zijn dan U_2 en I_2 ?

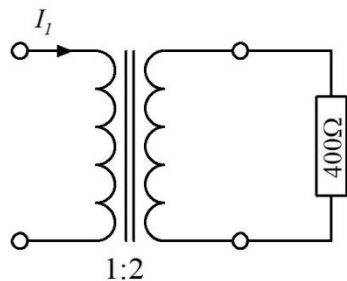
- A. $U_2 = 20\text{ V}$ en $I_2 = 0,5\text{ A}$
- B. $U_2 = 5\text{ V}$ en $I_2 = 2\text{ A}$
- C. $U_2 = 5\text{ V}$ en $I_2 = 0,5\text{ A}$
- D. $U_2 = 20\text{ V}$ en $I_2 = 1\text{ A}$

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



6.9.6 Opgave 6-6

Door de weerstand wordt een vermogen van 1 W opgenomen.



I_1 bedraagt

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

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking





6.9.7 Opgave 6-7

Een op een ringkern gewikkelde HF-trafo

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

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 



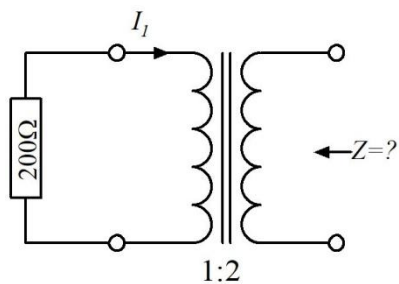
6.9.8 Opgave 6-8

In een voedingsapparaat is de meest waarschijnlijke manier om de netspanning om te zetten naar de benodigde wisselspanning het gebruik van:

- A. Een weerstand
- B. De gelijkrichter
- C. Een transformator
- D. Het afvlakfilter

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



6.9.9 Opgave 6-9

De impedantie Z bedraagt bij de aangegeven wikkelverhouding

- A. 50 Ω
- B. 100 Ω
- C. 400 Ω
- D. 800 Ω

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



6.10 Antwoorden bij de opgaven

6.10.1 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.

Opmerkingen

Het kan ook grotendeels in woorden. De secundaire wikkeling heeft 1/3 van het aantal windingen van de primaire. Dan is de spanning over de secundaire wikkeling ook 1/3 van de spanning over de primaire. 1/3 van 240 V is 80 V. Antwoord B.

Onthoud: de spanningsverhouding bij een trafo is evenredig met de wikkelverhouding.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



6.10.2 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 de spanningen geldt:

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

Schrijven we stroom I in plaats van spanning U en wisselen N_1 en N_2 van plaats:

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

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.

Opmerking

Ook dit kan grotendeels in woorden. De secundaire wikkeling heeft 1/3 van het aantal windingen van de primaire. In de uitwerking van Opgave 6-1 zagen we dat de spanning over de secundaire 1/3 was van de spanning over de primaire. Op grond van het behoud van vermogen (natuurwet!) moet de stroom door de secundaire dan 3x zo groot zijn als die door de primaire en dan is de primaire stroom 1/3 van de secundaire stroom.

Dus: $\frac{1}{3} * 900 \text{ mA} = 300 \text{ mA}$. Antwoord A

Onthoud: de stroomverhouding bij een trafo is omgekeerd evenredig met de wikkelverhouding



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave





6.10.3 Uitwerking van Opgave 6-3

Een transformator met een wikkerverhouding van 2:1 wordt gebruikt op een frequentie van 144 MHz. De meest waarschijnlijke opbouw is:

- A. Een weekijzerkern met 500 windingen primair en 250 windingen secundair
- B. Een poederijzerkern met 500 windingen primair en 250 windingen secundair
- C. Een poederijzerkern met 50 windingen primair en 25 windingen secundair
- D. Een luchtspoel met 4 windingen primair en 2 windingen secundair

Uitwerking

Op deze hoge frequentie heeft kernmateriaal weinig zin en zijn heel weinig windingen nodig. Antwoord D.



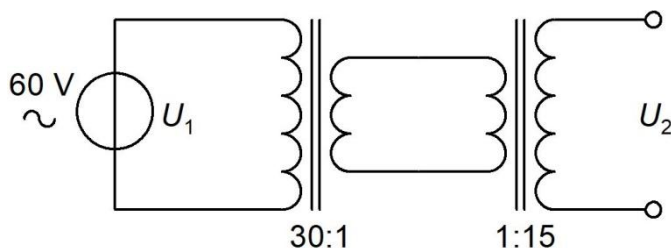
Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



6.10.4 Uitwerking van Opgave 6-4

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 de spanning 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 $60V/2 = 30V$. Antwoord C

Opmerking

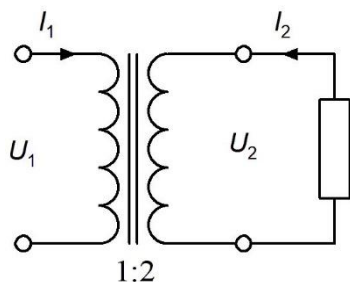
Het is natuurlijk niet verboden, de transformaties door de linker en de rechter trafo afzonderlijk uit te rekenen. Dat levert dezelfde uitkomst op, maar het is meer werk.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



6.10.5 Uitwerking van Opgave 6-5

In het schema is de wikkilverhouding gegeven als 1:2. Als $U_1 = 10 \text{ V}$ en $I_1 = 1 \text{ A}$, hoe groot zijn dan U_2 en I_2 ?

- A. $U_2 = 20 \text{ V}$ en $I_2 = 0,5 \text{ A}$
- B. $U_2 = 5 \text{ V}$ en $I_2 = 2 \text{ A}$
- C. $U_2 = 5 \text{ V}$ en $I_2 = 0,5 \text{ A}$
- D. $U_2 = 20 \text{ V}$ en $I_2 = 1 \text{ A}$

Uitwerking

De transformator heeft secundair 2x zoveel windingen als primair. Dat betekent dat de spanning met een factor 2 omhoog getransformeerd wordt en de stroom met een factor 2 omlaag. Voor de spanning wordt dat $2 * 10 \text{ V} = 20 \text{ V}$ en voor de stroom $1 \text{ A} / 2 = 0,5 \text{ A}$.

Antwoord A.



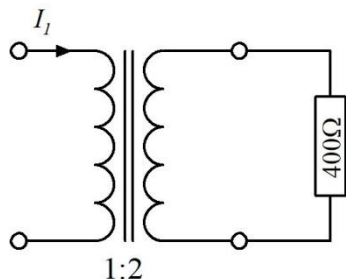
Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



6.10.6 Uitwerking van Opgave 6-6

Door de weerstand wordt een vermogen van 1 W opgenomen.



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. Dat is het zelfde als: “De weerstand neemt 1 W op”.

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.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave





6.10.7 Uitwerking van Opgave 6-7

Een op een ringkern gewikkelde HF-trafo

- A. **Hoeft meestal niet te worden afgeschermd**
- B. Heeft grote verliezen
- 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





6.10.8 Uitwerking van Opgave 6-8

In een voedingsapparaat is de meest waarschijnlijke manier om de netspanning om te zetten naar de benodigde wisselspanning door middel van:

- A. Een weerstand
- B. Een gelijkrichter
- C. Een transformator**
- D. Het afvlakfilter

Uitwerking

Dit lijkt misschien een instinker, omdat dit hoofdstuk over transformatoren gaat, maar het is toch echt de transformator. Antwoord C.

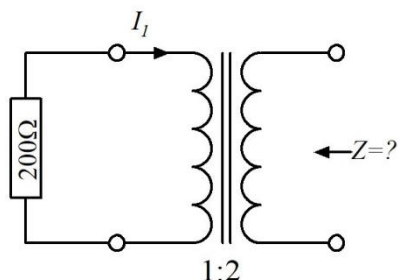


Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



6.10.9 Uitwerking van Opgave 6-9



De impedantie Z bedraagt bij de aangegeven wikkilverhouding

- A. 50 Ω
- B. 100 Ω
- C. 400 Ω
- D. 800 Ω

Uitwerking

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

Opmerking

Met een reactantie over de primaire wikkeling is het verhaal net zo. Op de secundaire “ziet” de aangesloten schakeling een reactantie die het kwadraat van de wikkilverhouding maal de reactantie over de primaire is.

Let wel op, of de reactantie wordt gevraagd of de waarde van de capaciteit of zelfinductie. Wordt de reactantie gevraagd, dan gaat het net als in deze opgave: vermenigvuldig de reactantie over de primaire met het kwadraat van de wikkilverhouding en je bent klaar.

Wordt de capaciteit gevraagd, bedenk dan dat capaciteit **omgekeerd evenredig** is met reactantie. Vervang de weerstand in de opgave door een condensator van 200 pF, dan “ziet” de aangesloten schakeling geen 800 pF, maar 200 pF gedeeld door 4 is 50 pF.

Bij een zelfinductie gaat het net als bij de weerstand, want reactantie is evenredig met de zelfinductie 200 mH wordt dus in dit geval 800 mH.



Terug naar de opgave