



Inhoudsopgave

| | | |
|-------|---|----|
| 6 | Transformatoren en de opbouw van spoelen | 2 |
| 6.1 | Wat leer je in dit hoofdstuk | 2 |
| 6.2 | Opbouw van transformatoren, schemasymbool | 2 |
| 6.3 | Werking | 4 |
| 6.3.1 | Transformeren van spanning en stroom | 4 |
| 6.3.2 | Transformeren van impedanties | 5 |
| 6.4 | Faseverschil en serieschakeling van transformatoren | 6 |
| 6.5 | Transformatoren met aftakkingen: de autotransformator | 6 |
| 6.6 | Nullaststroom, de smoorspoel | 7 |
| 6.7 | Verliezen in trafo's | 8 |
| 6.8 | Transformatoren en spoelen voor hoge frequenties (HF) | 8 |
| 6.8.1 | Overeenkomsten en verschillen met LF | 8 |
| 6.8.2 | Afscherming van HF-spoelen en transformatoren | 9 |
| 6.8.3 | Afgestemde kringen | 10 |
| 6.9 | Het rekenwerk samengevat | 10 |



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.

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. Net als voor de werkingsprincipes geldt dat voor transformatoren en spoelen voor lage en hoge frequenties. De natuurkundige principes van beide zijn dezelfde, maar de bijbehorende technieken niet. Daarom hebben ze in dit hoofdstuk een eigen plek gekregen.

6.2 Opbouw van transformatoren, schemasymbool

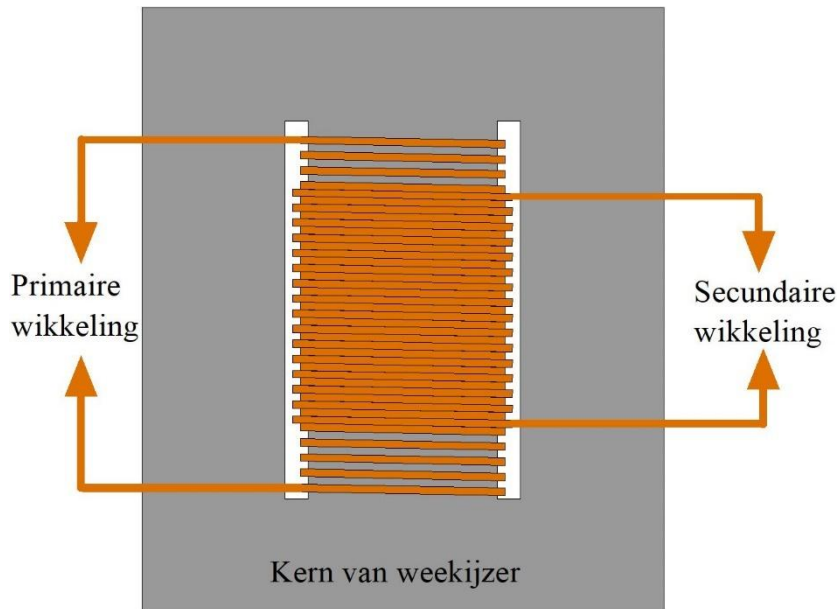
De werking van een transformator is gebaseerd op koppeling van spoelen via een magnetisch veld. Dat proces heet *inductie*. Als een spoel zich in een veranderend magnetisch veld bevindt, veroorzaakt dat een spanning over de spoel. Als de uiteinden van de spoel onderling zijn verbonden, loopt er ook stroom.

Een magnetisch veld kan veranderen door de invloed van een bewegende magneet, zoals in een dynamo. In een transformator wordt deze veroorzaakt door wisselstroom in een spoel. Daardoor wordt in een tweede spoel in hetzelfde magnetische veld spanning *geïnduceerd* en als de spoel is aangesloten op iets dat geleidt, ook stroom.

Bij transformatoren heet een spoel *wikkeling*. Een wikkeling bestaat uit een (meestal groot) aantal windingen, maar ook wel eens uit één of zelfs een halve winding. De wikkeling die de verandering van het magnetisch veld veroorzaakt, heet de *primaire wikkeling*. De wikkeling(en) die daarop reageert/reageren, heet/heten de *secundaire wikkeling(en)*. In een transformator vindt *overdracht van vermogen* plaats van de primaire wikkeling naar één of meer secundaire wikkelingen.

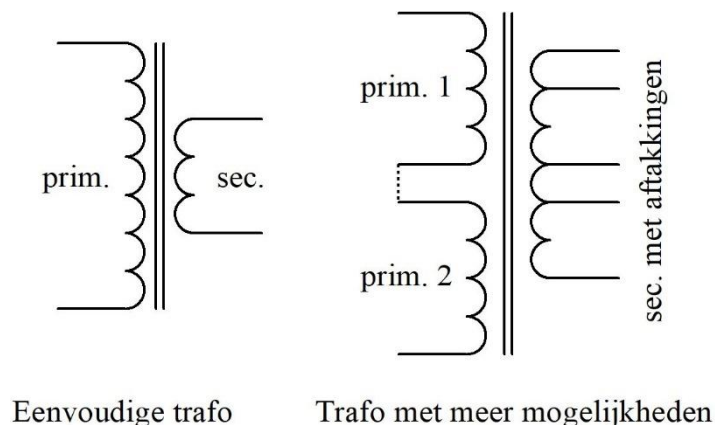
Het belangrijkste bij het ontwerpen van een transformator is, te zorgen dat het magnetisch veld zo goed mogelijk binnen de spoelen blijft. Dan zijn de verliezen minimaal en is de energieoverdracht maximaal. Bij een goede transformator loopt het veld vrijwel in zijn geheel door de *kern*. De wikkelingen liggen om de kern. De kern bestaat uit materiaal met een hoge magnetische permeabiliteit. Bij transformatoren voor lage

frequenties zoals die van het lichtnet (in Europa 50 Hz) is dat meestal weekijzer. Dat is ijzer dat zijn magnetisme snel verliest als het veld dat het veroorzaakt, wegvalt. De term *transformator* wordt vaak afgekort tot *trafo*. De opbouw van een trafo is enigszins schematisch weergegeven in Figuur 6.2-1.



Figuur 6.2-1. Opbouw van een transformator. De kern ligt niet alleen in, maar ook om de wikkelingen, zodat ook het deel van het veld buiten de wikkelingen van pool naar pool wordt geleid met weinig verliezen en zo het deel van het veld binnen de wikkelingen effectiever maakt.

Het schemasymbool weerspiegelt de opbouw met een primaire en een secundaire wikkeling, kortweg de *primaire* en de *secundaire*. Je kunt er altijd aan aflezen hoe het zit met het aantal wikkelingen en hun eventuele aftakkingen (Figuur 6.2-2).



Figuur 6.2-2. Schemasymbolen van een eenvoudige trafo zoals in Figuur 6.2-1 (links) en een wat ingewikkelder type (rechts). Het tweede type heeft twee primaire wikkelingen en een secundaire wikkeling met aftakkingen. De verticale getrokken lijnen stellen de ijzerkern voor.

6.3 Werking

6.3.1 Transformeren van spanning en stroom

Een transformator werkt alleen voor wisselstroom. Gelijkstroom levert een constant magnetisch veld en een transformator moet het van een veranderend veld hebben. In theorie is een trafo dus geschikt om een onzuivere wisselstroom te ontdoen van zijn gelijkstroomdeel. Het is alleen oppassen dat het kernblik, zoals het weekijzer vaak wordt genoemd, door de gelijkstroom niet *in verzadiging* komt. Dat laatste houdt in dat boven een zekere magnetische veldsterkte de magnetische permeabiliteit van de kern afneemt. Dat gaat ten koste van de werking voor wisselstroom.

Bij de ideale trafo gaat er bij een zuivere wisselstroom evenveel energie de primaire wikkeling in als er op de secundaire uitkomt. Over verliezen bij trafo's in de werkelijke wereld zullen we het verderop hebben. Voorlopig houden we het bij de ideale trafo. Een goede 'echte' trafo komt daar redelijk dichtbij.

We noemen het aantal windingen van een wikkeling N . Dan is N_1 het aantal windingen op de primaire wikkeling en N_2 dat op de secundaire. N_1 en N_2 bepalen de verhouding van de spanningen U_1 over de primaire en U_2 over de secundaire wikkeling volgens de **transformatievergelijking voor de spanning**:

$$\frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2} \rightarrow U_2 = U_1 \frac{N_2}{N_1} \quad \text{en} \quad U_1 = U_2 \frac{N_1}{N_2} \quad (6.3-1)$$

Een getallenvoorbeeld

Een primaire wikkeling telt 1000 windingen en een secundaire 250. Het aantal windingen van de secundaire is dus een kwart van het aantal primaire windingen. Over de primaire staat een spanning van 100 V. Dan is de spanning over de secundaire ook een kwart van de spanning over de primaire, dat is 25 V.

Een ideale trafo geeft geen vermogensverlies. Dan moet de stroom door de secundaire dus niet 4x zo laag, maar 4x zo hoog zijn als die in de primaire. Dat brengt ons bij de **transformatievergelijking voor de stroom**. Daarin zijn de rollen van I_1 en I_2 verwisseld ten opzichte van die van U_1 en U_2 in vergelijking (6.3-1). I_1 en I_2 zijn de stromen in respectievelijk de primaire en de secundaire. Dus:

$$\frac{I_2}{N_1} = \frac{I_1}{N_2} \rightarrow I_2 = I_1 \frac{N_1}{N_2} \quad \text{en} \quad I_1 = I_2 \frac{N_2}{N_1} \quad (6.3-2)$$

Bij een ideale transformator gaat stroom in de primaire pas lopen als van de secundaire stroom wordt afgenomen. Daaruit volgt (om te onthouden):

De spanning over de primaire wikkeling bepaalt de spanning over de secundaire. De stroomafname van de secundaire wikkeling bepaalt de stroom in de primaire.



Een alternatieve rekenmethode

Het is mogelijk, vergelijkingen (6.3-1) en (6.3-2) ogenschijnlijk te omzeilen. Ogenschijnlijk, omdat ze eigenlijk wel worden toegepast.

We gebruiken daarbij de begrippen *volt per winding* (V/w) voor spanning en *ampèrewinding* (Aw) voor stroom. **Let op!** V/w is een deling, Aw een vermenigvuldiging. We passen daarvoor ons getallenvoorbeeld van 1000 windingen primair en 250 secundair weer toe.

100 V op de primaire betekent 0,1 V/w . Die grootte geldt ook voor de secundaire. Die heeft dan een spanning van 250 windingen maal 0,1 V/w is 25 V.

Stel dat er 4 A door de secundaire loopt, dat is $4A \cdot 250$ windingen is $1000Aw$. Die $1000 Aw$ heeft ook betrekking op de primaire. Die heeft 1000 windingen. Terugrekenen door $1000Aw$ te delen door 1000 windingen is 1 A.

Beide uitkomsten kloppen met wat we eerder uit (6.3-1) en (6.3-2) kregen. Wie wil, mag proberen te achterhalen hoe deze vereenvoudiging wiskundig in elkaar zit.

6.3.2 Transformeren van impedanties

We weten nu dat een trafo stromen en spanningen op tegengestelde wijze transformeert. Dan kan het niet anders of impedanties worden óók getransformeerd. Anders kunnen een hogere stroom en een lagere spanning (of omgekeerd) niet voldoen aan de natuurwet die zegt dat energie nooit uit het niets ontstaat of in het niets verdwijnt.

In het getallenvoorbeeld hiervoor transformeerden we 100V naar 25 V. We breiden het getallenvoorbeeld uit door aan te nemen dat we bij die 100 V een stroom van 1A hadden, dat is 100 W. Om hetzelfde vermogen van 100 W te behouden, moest bij 25V de stroom 4 A zijn. Als van de secundaire 1A wordt afgenomen, is de primaire stroom 0,25 A.

Volgens de Wet van Ohm hebben we bij een spanning van 100V en een stroom van 1 A te maken met een impedantie van $100V/1A = 100 \Omega$. Bij 25V en 4 A wordt dat $25V/4A = 6,25\Omega$. Een transformatieverhouding voor de spanning van 4:1 leidt dus tot een transformatieverhouding voor de impedantie van $100:6,25$ is 16:1. Die is het kwadraat van de wikkelverhouding van 4:1. Dat brengt ons tot de vergelijking voor de transformatieverhouding voor de impedantie:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (6.3-3)$$

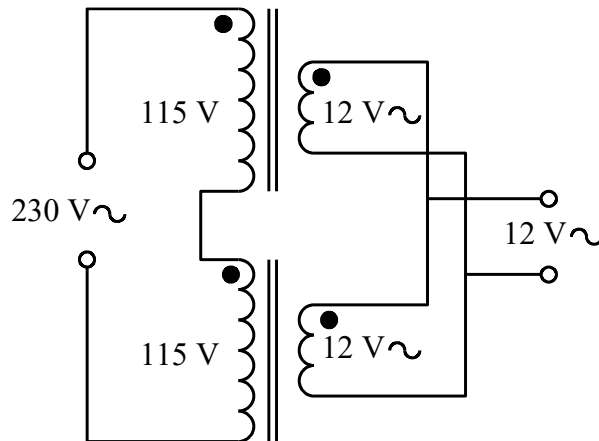
Een transformatieverhouding van bijvoorbeeld 3:1 voor de spanning betekent een transformatieverhouding van 1:3 voor de stroom en daardoor 1:9 voor de impedantie.

6.4 Faseverschil en serieschakeling van transformatoren

In een transformatorwikkeling zijn de spanningen aan de uiteinden in tegenfase. Dat is van belang als wikkelingen in serie worden gezet. Worden van twee gelijke wikkelingen de verkeerde uiteinden verbonden, dan is tussen de uiteinden van die schakeling van twee wikkelingen de spanning 0. Nog veel erger: worden twee wikkelingen parallel geschakeld met de verkeerde fase, dan betekent dat kortsluiting met alle gevolgen van dien.

In Figuur 6.4-1 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.

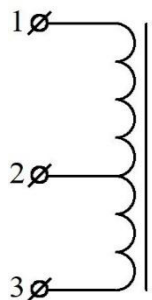
Je zou hier kunnen denken aan twee transformatoren die in Nederland worden toegepast, maar gemaakt zijn voor een elektriciteitsnet in de Verenigde Staten, met een netspanning van 110 V. Het verschil van 110 V en 115 V per wikkeling zal zelden een probleem geven.



Figuur 6.4-1. Twee transformatoren met hun primaire wikkelingen in serie en de secundaire wikkelingen parallel. De zwarte rondjes geven de aansluitingen aan die onderling in fase zijn.

6.5 Transformatoren met aftakkingen: de autotransformator

Een transformator kan aftakkingen op elke wikkeling hebben, elk voor een andere spanning. De autotrafo heeft maar één wikkeling met aftakking(en). Die wikkeling is tegelijk primaire en secundaire. Een eenvoudige vorm zien we in Figuur 6.5-1.



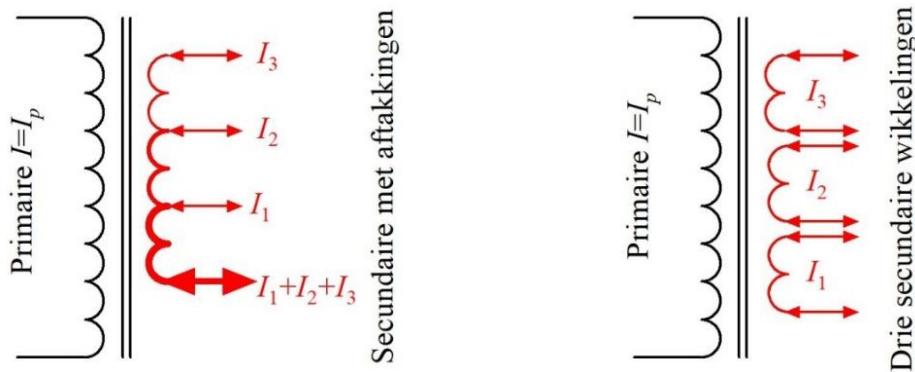
Figuur 6.5-1. Autotransformator met twee aansluitpunten en één aftakking.

Bij de autotrafo in Figuur 6.5-1 kan de primaire stroom lopen tussen de paren aansluitingen 1 en 2, 2 en 3 en tussen 1 en 3. De secundaire aansluiting bestaat dan uit één aansluiting van die paren en de overgebleven aansluiting. Op het eerste gezicht lijkt de autotrafo een prettig goedkope oplossing, maar er zijn bezwaren. Als die er niet zouden zijn, zou dit type trafo het meest van alle soorten transformatoren worden toegepast.

Het kleinste bezwaar is dat bij een autotrafo een deel van de wikkeling tegelijk als primaire en als secundaire fungeert. Het gevolg is dat zowel de primaire als de secundaire stroom gezamenlijk door een deel van de totale wikkeling lopen. De wikkeling moet dan op de som van die stromen zijn berekend.

Een veel groter bezwaar is dat de uit een autotrafo gevoede schakeling een geleidende verbinding heeft met het lichtnet of daarvan, zoals dat heet, niet *galvanisch is gescheiden*. De autotrafo is daarom als voeding van schakelingen in huis een onveilige oplossing. Hij vindt wel toepassing in de hoogspanningstechniek en in hoogfrequente schakelingen..

Een transformator met aftakkingen op de secundaire, waardoor daarvan verschillende wisselspanningen kunnen worden afgenomen, heeft alleen het bezwaar dat verschillende delen van de secundaire ongelijke stromen voeren. Door het gemeenschappelijk deel van de secundaire loopt de som van de afgenomen stromen, zoals links in Figuur 6.5-2. De betere oplossing met afzonderlijke secundaire wikkelingen staat rechts in de figuur.



Figuur 6.5-2. Secundaire wikkeling met aftakkingen (links) en met afzonderlijke wikkelingen (rechts)

6.6 Nullaststroom, de smoorspoel

In een ideale transformator voert de primaire geen stroom als de secundaire geen stroom levert. Dat zou betekenen dat de primaire een oneindig hoge impedantie heeft. Zo'n impedantie bestaat in de praktijk niet. Er loopt door elke primaire wikkeling dan ook een (kleine) stroom, ook als secundair geen stroom wordt afgenomen. Die stroom heet *nullaststroom*. De trafo werkt dan als *smoorspoel*. Het schemasymbool van zo'n smoorspoel staat in Figuur 6.6-1. Het ziet eruit als dat van een halve trafo, één zonder secundaire wikkeling. En zo zitten smoorspoelen ook vrijwel altijd in elkaar.



Figuur 6.6-1. Schemasymbool van een smoorspoel met ijzern kern.

Een smoorspoel wordt hoofdzakelijk gebruikt om van een onzuivere wisselstroom het gelijkstroomdeel door te laten en het wisselstroomdeel zoveel mogelijk tegen te houden, dus te *smoren*. Dat is het omgekeerde van een trafo die alleen de wisselstroom doorgeeft.

6.7 Verliezen in trafo's

Een trafo heeft drie soorten verliezen.

Om te beginnen heeft het koperdraad, waarmee verreweg de meeste trafo's zijn gewikkeld, weerstand, ook al is die klein. Verliezen door opwarming van het koperdraad heten heel toepasselijk **koperverliezen**.

Het ijzer in de kern, ook wel het *kernblik* genoemd, is geleidend. We weten wat er gebeurt in een geleider die zich in een wisselend magnetisch veld bevindt: er gaat stroom lopen. Zulke stromen in een geleidende transformatorkern noemt men *wervelstromen*. Die worden tegengegaan door geen massief ijzer te gebruiken, maar op elkaar gestapelde ijzerlamellen. Die lamellen zijn onderling geïsoleerd door om en om een ijzerplaat en een dun blad isolerend materiaal te stapelen. Bij elke halve wisselstroomperiode wordt het ijzer een beetje gemagnetiseerd. Bij de volgende halve periode wordt die magnetisering ongedaan gemaakt en ontstaat een kleine magnetisering in de tegenovergestelde richting. Ook dat vraagt steeds een beetje energie. Dit verschijnsel heet *hysteresis*. Een 100% verliesvrije ijzern kern bestaat dus ook al niet. Daarom warmt een transformatorkern altijd wat op. De verliezen die hiermee gemoeid zijn, heten *ijzerverliezen*.

De derde verliessoort ontstaat doordat een magnetisch veld wel grotendeels, maar nooit helemaal binnen de transformatorkern is te houden. Een klein deel van het veld verspreidt zich in de omgeving van de trafo. Deze vorm noemt men *spreidingsverliezen*.

6.8 Transformatoren en spoelen voor hoge frequenties (HF)

6.8.1 Overeenkomsten en verschillen met LF

Achter de werking van transformatoren voor lage frequenties zoals tot hier besproken en die voor hoge frequenties steekt dezelfde natuurkunde. Een verandering van de stroom door wikkeling A verandert een magnetisch veld, waardoor de stroom door wikkeling B verandert.

Wel zijn er technische verschillen. De aantallen windingen bij HF zijn aanzienlijk kleiner; het materiaal voor kern en afscherming is anders. Bij heel hoge frequenties werkt een kern helemaal niet meer en is vaak ook het wikkeldraad anders. We bekijken dat nader.

Het aantal windingen. Een bepaalde waarde van de reactantie wordt bij hogere frequenties bereikt bij lagere zelfinductie. Lagere zelfinductie vraagt minder windingen.

Het kernmateriaal. Kernmateriaal moet bij een gegeven frequentie een relatief hoge magnetische permeabiliteit hebben en een zo laag mogelijk elektrisch geleidingsvermogen. Dat laatste is hetzelfde als een zo hoog mogelijke soortelijke weerstand. Weekijzer voldoet niet aan die voorwaarde. De lamellen bij een transformator voor netspanning en hun onderlinge isolatie getuigen daarvan. Bij toenemende frequenties werken die steeds minder goed. Van groot belang is ook dat weekijzer, zoals in transformatoren voor netspanning, zich magnetisch niet heel snel laat ompolen.

Voor HF worden vaak ferrieten, poederijzerkernen of ijzercarbonylkernen gebruikt. Ferriet is keramisch materiaal, meestal met de een of andere ijzerverbinding, poederijzer is, zoals de naam zegt, verpoederd ijzer, maar samengehouden met een niet-geleidend bindmiddel. Ijzercarbonyl is een chemische verbinding van ijzer, koolstof en zuurstof. Bij heel hoge frequenties werken ze geen van allen meer.

Tot slot het wikkeldraad. Voor niet al te hoge frequenties wordt meestal massief koperdraad gebruikt. Zulk materiaal is bedekt met een dunne doorzichtige laklaag die als isolatie dient. Bij solderen moet die bij het draadeinde worden afgekrabd. Bij hogere frequenties maakt het *huideffect*, *skin effect* in het Engels, dat de draadweerstand toeneemt. Dat komt doordat bij toenemende frequentie de stroom steeds meer de buitenkant van de draad opzoekt. Door het binnenste deel loopt bij toenemende frequentie steeds minder stroom. Dat geeft meer weerstand. Een middel daartegen is *verzilveren* van de draad. Het buitenste laagje is dan zilver. Dat geleidt beter dan koper.

Een andere mogelijkheid is het gebruik van *litzedraad*. Dat bestaat uit een groot aantal onderling geïsoleerde dunne draadjes. Samen hebben die per lengte een groter oppervlak dan massief draad met dezelfde doorsnede als de litzedraadjes samen. Het resultaat bij hoge frequenties is een lagere weerstand dan bij gebruik van massief draad.

6.8.2 Afscherming van HF-spoelen en transformatoren

Afscherming is bedoeld om te voorkomen dat het ene deel van de schakeling het andere via zijn elektrisch en/of magnetisch veld beïnvloedt. Bij niet al te hoge frequenties kan de magnetische afscherming bestaan uit ferriet. Dat geleidt het magnetisch veld van de spoel en voorkomt zo dat een groot deel van het veld ruim buiten de spoel komt.

Een gebruikelijke manier van afschermen bij hogere frequenties is een koperen of aluminium bus rondom de schakeling. Die is niet magnetisch geleidend, maar wel elektrisch. De bus is eigenlijk een kortgesloten “jasje” om de spoel. Daarin ontstaan onder invloed van het wisselende elektrische en magnetische veld stromen die de invloed van



het veld buiten de bus tenietdoen. Zo'n "jasje" vermindert de zelfinductie doordat het magnetische veld minder ruimte krijgt.

Een ringkern is een andere vorm van afscherming. In zo'n kern zit het magnetisch veld van de spoel vrijwel opgesloten, vooral doordat de kern geen uiteinde heeft. Ook dat beperkt het veld buiten de spoel.

6.8.3 Afgestemde kringen

De meeste spoelen voor HF-toepassingen zijn onderdeel van een afgestemde kring, maar ook smoorspoelen voor HF zijn algemeen. Inductief gekoppelde kringen die je ook afgestemde transformatoren kunt noemen, worden vrij algemeen toegepast.

Terwille van de afstemming kan het gewenst zijn om de zelfinductie te regelen. Dat kan met een magnetisch permeabele kern van bijvoorbeeld poederijzer die met een schroefdraad in en uit de spoel kan worden gedraaid. Bij indraaien wordt de zelfinductie groter, bij uitdraaien kleiner. Bij heel hoge frequenties worden ook metalen en dus elektrisch geleidende kernen gebruikt. Die verlagen juist de zelfinductie bij indraaien door dezelfde oorzaak als een metalen afschermibus dat doet.

6.9 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**, **impedantie** en **reactantie**. Voor autotrafo's gelden dezelfde regels als voor trafo's met afzonderlijke primaire en secundaire wikkeling(en).

Bij HF-transformatoren "vervagen" de rekenregels door technische oorzaken: kleiner aantal windingen, grotere spreiding van het magnetisch veld, huideffect en afnemende effectiviteit van kernmateriaal.