

Toelichting bij de “gap-berekening2.xls” spreadsheet.

TeTech, AUG 2004, Versie 1.3, Wim Telkamp.
Copyright © TeTech 2003-2004.

1. Inleiding.

“gap-berekening2.xls” Is een hulpmiddel om een indruk te krijgen van de benodigde luchtspleet (air gap) in E kernen. Het is in principe ook bruikbaar voor RM, P en EC kernen (met enige aanpassing). Eveneens wordt aangegeven: het aantal benodigde windingen, het aantal wikkellagen, de totale laagdikte en de DC weerstand. Ook wordt aandacht besteedt aan de randeffecten bij grote gaplengtes (fringing).

De spreadsheet is slechts bedoeld ter verkrijging van een goede indruk. Er wordt geen rekening gehouden met randeffecten in de buurt van de luchtspleet (hoewel wel een correctiemethode aangedragen wordt). Het is raadzaam om het hoofdstuk formules te lezen om te bepalen of dit hulpmiddel geschikt is voor uw toepassing. Het gebruik is op eigen risico. TeTech is niet aansprakelijk voor directe of indirecte schade voortvloeiende uit het gebruik van deze spreadsheet en of deze toelichting.

In het volgende hoofdstuk wordt het gebruik van de spreadsheet beschreven. Daarna wordt op de gebruikte rekenmethode ingegaan. Tot slot wordt op randeffecten ingegaan en worden enkele handige relaties behandeld.

Toelichting Internet:

*“gap-berekening2.xls” bevindt zich op de website van TeTech. Ga naar www.totech.nl en klik op **Diversen**, daar vindt u de link naar de spreadsheet.*

Verspreiding van dit document is toegestaan voor niet commerciële doeleinden, mits volledig en ongewijzigd.

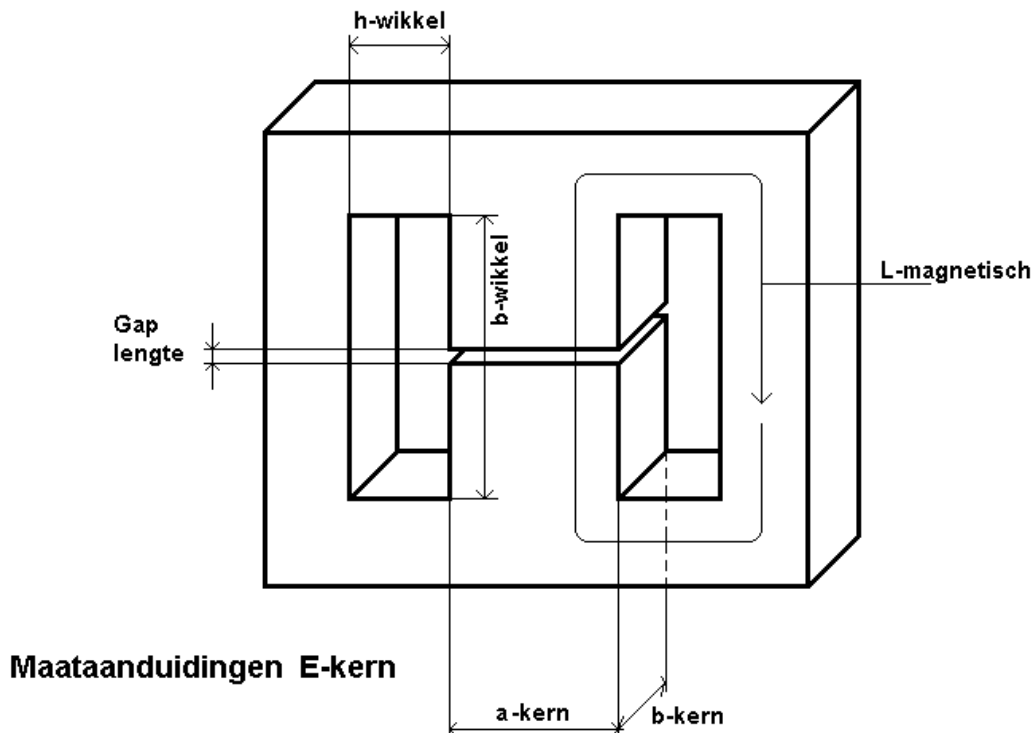
2. Het gebruik van de spread sheet.

Enige algemene invoerregels:

1. Alle maten dienen in de grondeenheden ingevoerd te worden. Dus 1mm dient als 0,003, of 1E-3 ingevoerd te worden. 15 mm² (15 vierkante millimeter) dient als 15E-6 ingevoerd te worden. Een zelfinductie van 20uH dient als 20E-6 ingevoerd te worden. Alle resultaten zijn eveneens in Henry , meter, Ampère, etc.
2. Alleen de vakken onder de **vetgedrukte** tekst dienen ingevuld te worden. De getallen onder de normaal gedrukte tekst zijn de berekende resultaten. Maak een reservekopie in het geval er toch iets misgaat tijdens de invoer.

3. Let op uw decimaalteken, bij mij is dat de komma.

In onderstaande figuur is een E-kern afgebeeld met daarin de maataanduidingen zoals deze in de spreadsheet gebruikt worden.



Bij E-kernen is de doorsnede van de buitenbenen de helft van de doorsnede van het middenbeen. Het gehele magnetische pad heeft daardoor een constante doorsnede (mits de gaplengte voldoende klein is). Hierdoor kan met eenvoudige benaderingsformules de spoel ontworpen worden.

Begrippen.

De volgende begrippen komt u tegen in de spreadsheet:

a-kern is de breedte van de middenpoot van de te gebruiken kern.

b-kern is de dikte van de kern.

Lmagn is de gemiddelde veldweglengte voor het gehele magnetische circuit. $L_{\text{magn}} = L_{\text{kern}} + \text{Gaplengte}$. Indien $H_{\text{dIm}}/H_{\text{dIt}}$ kleiner dan 0.1 is, is de invloed van L_{magn} op de zelfinductie gering (gevoeligheid van minder dan 10%). Een globale schatting van het veldlijnenpad door het ferrietmateriaal is dan voldoende.

Amagn (berekend veld, niets invullen) geeft het oppervlak van het magnetisch circuit weer (de doorsnede van het magnetisch circuit, loodrecht op de veldlijnrichting). Indien u gebruik maakt van een kern met andere geometrie (bijv portkern of een toroïde met luchtspleet), dient u a-kern en b-kern zodanig op te geven opdat A_{magn} overeenkomt met uw daadwerkelijk oppervlak.

Rel.permeab. is de relatieve permeabiliteit (μ_r) van het kernmateriaal. Neem voor alle zekerheid de beginpermeabiliteit (dit is de permeabiliteit bij zeer lage fluxdichtheid in het materiaal). Voor LF ferrieten in orde van 2000 of meer.

Bmax is de maximale fluxdichtheid welke u in het kernmateriaal toe wenst te staan. Voor kleinsignaal toepassingen met lage vervorming dient u bij spoelen zonder luchtspleet beneden ongeveer 0,003T te blijven. Zie voor aanbevelingen de documentatie van de diverse leveranciers van magnetische materialen. Resulteert de luchtspleet in een HdIm/HdIt aanmerkelijk groter dan 1 (bijvoorbeeld 20), dan kan men een aanmerkelijk hogere fluxdichtheid toestaan (in orde van 0.05T).

De maximaal toelaatbare fluxdichtheid in geval van lineaire (filtertoepassingen zoals in eindtrappen) is sterk afhankelijk van de toegestane vervorming. Kies in ieder geval een waarde lager dan de verzadigingsfluxdichtheid (in geval van ferriet rond de 0.35-0.45T). Indien prijs en ruimte minder zwaar wegen dan technische perfectie, kies dan een kern welke iets groter is, het maakt een wereld van verschil.

In geval van vermogenstoepassingen (transformatoren, opslagspoelen) zult u een goede afweging dienen te maken tussen: koperverlies, kernverlies, nominaal en nullastverlies. Indien het kernmateriaal in het frequentiegebied gebruikt wordt waarvoor het ontworpen is (of lager), kiest men in de regel een B dicht tegen B_{sat} . Voor details wordt verwezen naar de documentatie van fabrikanten.

Max stroom is de maximale piekstroom welke in uw spoel optreedt in ampère (dus niet de effectieve waarde). Indien uw spoel meerdere wikkelingen heeft waar gelijktijdig stroom doorloopt, dient u de magnetisatiestroom te achterhalen. Het valt buiten deze toelichting om daar dieper op in te gaan.

Veldenergie (berekend veld, niets invullen) is de maximaal optredende veldenergie ($0.5 \cdot L \cdot I_{piek}^2$) in Joule.

Gapvolume (berekend veld, niets invullen) geeft het volume van de gap weer (luchtspleet).

¡LET OPI: Indien het gapvolume negatief uitvalt, kan bij de gegeven zelfinductie en stroom de ingevulde B onder **Bmax** niet bereikt worden. Alle berekende resultaten zijn nu waardeloos. Verlaag **Bmax** opdat Gapvolume groter dan 0 is of kies een kleinere kern.

Draaddiam is de diameter van ronde draad, of de dikte van vierkante draad welke u wenst te gaan gebruiken. Dit getal wordt gebruikt voor het uitrekenen van het aantal windingen per laag en de totale dikte van de wikkeling (welke altijd kleiner uit dient te vallen dan **h-wikkel**).

Draaddsnde is de doorsnede van de gebruikte draad (in m^2). Dit is geen berekend veld, u dient het zelf in te vullen. Voor ronde draad geldt:
 $Draaddsnde = 0.25 \cdot \pi \cdot Draaddiam^2$. Voor litzedraad dient u de gegevens van de leverancier te raadplegen.

h-wikkel is de hoogte van de wikkelruimte om de kern. U dient rekening te houden met een reductie van de effectieve wikkelhoogte vanwege de dikte van de spoelkoker en beperkte buigradius van dik draad.

b-wikkel is de breedte van de wikkelruimte om de kern. Houdt eveneens rekening met breedte vermindering t.g.v. een eventuele spoelkoker, kruipafstanden en onnauwkeurigheden.

Wikkelvol (berekend veld, niets invullen) geeft de benodigde wikkelruimte (doorsnede) weer in m^2 . De berekening gaat er vanuit dat de windingen over elkaar vallen (niet orthocyclisch gewikkeld).

Windperlaag (berekend veld, niets invullen) geeft het aantal windingen dat per laag gelegd kan worden over de breedte van de beschikbare wikkelruimte (bij de gegeven draaddiam).

Wikkellagen (berekend veld, niets invullen) geeft het aantal benodigde lagen weer.

Laagdikte (berekend veld, niets invullen) geeft de uiteindelijke laagdikte weer (deze dient kleiner te zijn dan **h-wikkel**, daar anders de spoel op de gegeven kern niet realiseerbaar is). Opgemerkt dient te worden dat t.g.v. de beperkte buigradius van (massief) draad en eventueel isolatieband effectief gezien minder wikkelruimte beschikbaar is.

Windinglengte (berekend veld, niets invullen) geeft de gemiddelde lengte van één winding weer. Bij de berekening wordt rekening gehouden met de **laagdikte**.

Tot.draadlengte (berekend veld, niets invullen) geeft de totale benodigde draadlengte weer.

Rdc geeft de DC weerstand van de gehele wikkeling weer. Voor de AC ohmse weerstand dient men op zijn minst een correctie voor het "skin effect" uit te voeren (vooral bij dik draad en hoge frequenties). Daarnaast treden wervelstroomverliezen op ten gevolge van het heersende magnetisch veld rond de windingen. De AC koperweerstand neemt daardoor verder toe ("proximity effect"). Vermijdt windingen dicht bij een grote luchtspleet en/of gebruik eventueel (duurder) litzedraad.

Gaplengte (berekend veld, niets invullen) geeft de spleetlengte (spleetbreedte) weer welke benodigd is om te voorkomen dat bij de gegeven zelfinductie en stroom, de opgegeven fluxdichtheid overschreden wordt. Wenst men dat de Gaplengte groter wordt, verlaag dan de fluxdichtheid (**Bmax**). Het resultaat is in Meters. Bij de berekening wordt geen rekening gehouden met randeffecten (fringing). In veel gevallen is een correctie noodzakelijk. Zie het hoofdstuk "Correctie voor randeffecten (fringing)" voor de benodigde correcties.

¡LET OPI!: Indien de gaplengte negatief uitvalt, kan bij de gegeven zelfinductie en stroom de ingevulde B (onder **Bmax**) niet bereikt worden. Alle berekende resultaten zijn nu waardeloos. Verlaag **Bmax** opdat de gaplengte groter dan 0 wordt, of kies een kleinere kern. In geval van een luchtspleet in alle 3 de benen (ongeslepen kernhelften), vergeet dan niet de gaplengte te halveren. De veldlijnen komen de immers twee maal een luchtspleet tegen.

Rmagn (berekend veld, niets invullen) geeft de magnetische weerstand weer van het complete magnetisch circuit (som van effect van luchtspleet en van kernmateriaal). Magnetische weerstand wordt ook vaak met "reluctantie" aangeduid. Het is de verhouding tussen de magnetische spanning in het magnetisch circuit (Ampere windingen, $\int H \cdot dl$ over gesloten kromme) en de flux welke gaat lopen (Weber, Vs, $\int B \cdot dA$).

Windingen (berekend veld, niets invullen) geeft het aantal benodigde windingen weer.

Hdlm/Hdlt (berekend veld, niets invullen) geeft de verhouding weer tussen de magnetische spanning (integraal $H \cdot dl_{\text{mag.mat}}$) over het kernmateriaal en de totale magnetische spanning over het magnetische circuit ($= H \cdot dl_{\text{tot}}$ = aantal ampèrewindingen). Het is een maat voor de invloed van het kernmateriaal op het gedrag van de spoel. Hoe kleiner dit getal, hoe minder invloed het kernmateriaal op de eigenschappen van de spoel heeft. Een waarde van 0.05 betekent dat een relatieve verandering van permeabiliteit slechts met een factor 0.05 doorwerkt in de zelfinductie.

Kleine waarden voor **Hdlm/Hdlt** geven spoelen met een goede temperatuurstabiliteit en geringe afhankelijkheid van de zelfinductie van eventuele DC stroom. De niet lineaire vervorming neemt eveneens sterk af. Komt de spreadsheet met een te grote waarde voor uw toepassing? Verlaag dan **Bmax**, u zult zien dat **Hdlm/Hdlt** kleiner wordt (dus grotere **gaplengte**).

Gap.fact geeft de verhouding weer van de gaplengte en de gemiddelde afmeting van het magnetisch oppervlak ($\text{Gaplengte}/\sqrt{[A_{\text{magn}}]}$). Dit is een maat voor het randeffect. Het getal is nodig voor uitrekenen van de benodigde correctie op de gaplengte. Het hoofdstuk "Correctie voor randeffecten (fringing)" gaat in op de benodigde correctie (de gaplengte dient namelijk iets groter te zijn dan de door de spreadsheet getoonde waarde).

Het strooiveld van grote luchtspleten kan in massief draad aanzienlijk wervelstroomverliezen opleveren. Meting van de AC weerstand van de wikkeling is noodzakelijk. Het gebruik van geïsoleerde getwiste aders of litze draad kan de verliezen sterk verminderen. Indien technisch commercieel mogelijk, dient men geen windingen in de buurt van de gap te leggen.

Een grote Gapfactor heeft eveneens tot gevolg dat de zelfinductie in meer of mindere mate afhankelijk wordt van hoe de windingen in de beschikbare ruimte verdeeld worden.

Men kan de gap.fact met een factor twee verlagen door de luchtspleet te verdelen over zowel het middenbeen van de kern als de twee buitenbenen. Men kan dan gebruik maken van ongeslepen kernen. Dit komt de nauwkeurigheid en verliezen t.g.v. wervelstromen in het koper ten goede. Het aanbrengen van een luchtspleet in de buitenbenen van de E-kern, verhoogt het strooiveld in sterke mate.

3. Gebruikte formules.

In dit hoofdstuk treft u de berekeningsmethode aan plus enige toelichting.

Gebruikte symbolen en begrippen.

E = Elektrische veldsterkte (V/m) of Energie (Ws, J).

$E_{\text{Hveld/cubm}}$ = Energie in het magnetisch veld per kubieke meter (J/m^3).

V = volume in m^3 .

μ = magnetische permeabiliteit (Vs/m^2 per A/m, H/m).

μ_0 = magnetische permeabiliteit van het vacuüm (ong $1.2566 \cdot 10^{-6}$ H/m),

μ_r = relatieve permeabiliteit ($=\mu/\mu_0$),

H =index voor magnetisch veld of eenheid van zelfinductie (Henry, Vs/A).

I = elektrische stroom in A.

A = oppervlak in m^2 .

B = fluxdichtheid (T, Vs/ m^2).

Gaplengte = lengte van de luchtspleet in m.

Hdl = integraal van H over een zekere lengte l .

L_{kern} = gemiddelde veldlijnlengte door kernmateriaal.

L_{magn} = Lengte van het gehele magnetische circuit ($=L_{\text{magn}} + \text{Gaplengte}$).

Globale berekeningsvolgorde:

De energie in de spoel wordt bepaald en gelijkgesteld aan de magnetische veldenergie. Uitgaande van de maximale ingevulde fluxdichtheid en de energie in het magnetische veld, wordt het volume van de luchtspleet bepaald. Dit levert uiteindelijk de luchtspleet op (Gaplengte).

Aan de hand van de magnetische weerstand van het magnetisch circuit en de opgegeven zelfinductie wordt het aantal windingen bepaald.

Uit de draaddiameter, de wikkelluimte en het aantal windingen wordt het aantal wikkellagen en de totale dikte van de wikkellaag bepaald.

Er wordt vanuit gegaan dat de doorsnede van het magnetisch circuit overal gelijk is. Voor E kernen en afgeleiden daarvan gaat dat redelijk op.

Nadere toelichting formules.

Aan de hand van **a-kern** en **b-kern** wordt het oppervlak van het magnetisch circuit bepaald (**$A_{\text{magn}} = \text{a-kern} \cdot \text{b-kern}$**).

Aan de hand van **Max stroom** en de zelfinductie wordt volgens: $E_L = 0.5 \cdot L \cdot I^2$ de in de spoel opgeslagen energie bepaald (**veldenergie**). Deze energie is gelijk aan de in het magnetisch circuit opgeslagen veldenergie (bestaande uit het kernmateriaal en de luchtspleet).

Voor het elektrisch veld (zijn meer mensen mee bekend) geldt: $E_{\text{Eveld/cubm}} = 0.5 \cdot \epsilon \cdot E^2$.

Voor het magnetisch veld geldt: $E_{\text{Hveld/cubm}} = 0.5 \cdot \mu \cdot H^2 = 0.5 \cdot B \cdot H$.

Door gebruik te maken van $B = \mu \cdot H$ geldt: $E_{\text{Hveld/cubm}} = 0.5 \cdot B^2 / \mu$. Integratie over het gehele volume (luchtspleet en kernmateriaal) geeft de veldenergie. Bij benadering geldt:

$$E_{\text{Hveld}} = \frac{A_{\text{magn}} \cdot L_{\text{kern}} \cdot B^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r} + \frac{A_{\text{magn}} \cdot \text{Gaplengte} \cdot B^2}{2 \cdot \mu_0} = \frac{L \cdot I^2}{2} \quad [\text{J}]$$

$$L_{\text{magn}} = L_{\text{kern}} + \text{Gaplengte} \quad [\text{m}]$$

Hieruit kan het **gapvolume** en de **gaplengte** berekend worden (alle overige gegevens zijn immers bekend).

$$\text{Gapvolume} = \frac{(E_{\text{Hveld}} - Z \cdot L_{\text{magn}}) \cdot A_{\text{magn}}}{Z(\mu_r - 1)}, \quad Z = \frac{A_{\text{magn}} \cdot B^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r} \quad [\text{m}^3]$$

$$\text{Gaplengte} = \text{Gapvolume} / A_{\text{magn}} \quad [\text{m}]$$

Het kan zijn dat dit een negatief resultaat oplevert. Dit is het geval als de opgeslagen energie in het kernmateriaal bij gegeven B reeds groter is dan de totale veldenergie op grond van de zelfinductie en de piekstroom. Het is dan niet mogelijk om bij gegeven zelfinductie en piekstroom de geplande B te bereiken (de resultaten zijn dan waardeloos).

OPM:

*In het overgrote deel van de toepassingen is de lengte van de luchtspleet slechts een fractie van **L_{magn}** (formeel geldt: **L_{magn}** = *l_{gap}* + *l_{kern}*). In die gevallen waarbij dit niet meer het geval is, is **H_{d1m}/H_{d1t}** dusdanig klein, dat de lengte van het magnetisch pad door het kernmateriaal praktisch geen invloed heeft op het benodigd aantal windingen.*

*Hoewel het daardoor in principe niet nodig is om de kernlengte (= **L_{magn}** indien geen gap aanwezig is) te corrigeren voor het weggeslepen materiaal, is deze correctie wel doorgevoerd bij de bepaling van het de **gaplengte**. Dit maakt de formules ook geschikt voor materialen met een lage μ_r (Poederijzerkernen of RF ferrietmateriaal met gap).*

Net als elektrische weerstand uitgerekend kan worden aan de hand van specifieke geleiding en geometrie geldt dit ook voor het magnetisch veld. Er wordt vanuit gegaan dat alle flux (magnetische stroom, $\int B \cdot dA$) zich bevindt in de kern en de luchtspleet. Er wordt geen rekening gehouden met randeffecten rondom de luchtspleet. Dit is de grote beperking van deze spreadsheet (zie het hoofdstuk "Correctie voor randeffecten (fringing)").

Voor **R_{magn}** geldt:

$$R_{\text{magn}} = \frac{L_{\text{magn}} - \text{Gaplengte}}{A_{\text{magn}} \cdot \mu_0 \cdot \mu_r} + \frac{\text{Gaplengte}}{A_{\text{magn}} \cdot \mu_0} \quad [\text{A/Vs}]$$

Het aantal benodigde **windingen** voor de spoel volgt uit:

$$L = n^2 / R_{\text{magn}} \quad [\text{Vs/A}]$$

Bij het berekenen van het aantal windingen per laag (**windperlaag**) wordt natuurlijk naar beneden afgerond en het aantal lagen wordt naar boven afgerond. Ofwel:

$$\text{Windperlaag} = \text{trunc}(\mathbf{b\text{-wikkel}} / \mathbf{draaddiam}).$$

$$\text{Wikkellagen} = \text{round.up}(\mathbf{windingen} / \mathbf{windperlaag})$$

$$\text{Laagdikte} = \mathbf{draaddiam} \cdot \mathbf{wikkellagen}.$$

$$\text{Windinglengte} = 2 \cdot (\mathbf{a\text{-kern}} + \mathbf{b\text{-kern}} + 2 \cdot \mathbf{laagdikte}).$$

$$\text{Tot.draadlengte} = \mathbf{windingen} \cdot \mathbf{windinglengte}$$

Trunc() = resultaat afbreken tot geheel getal.

Round.up() = afronden naar hoger liggend geheel getal.

Rdc wordt uitgerekend aan de hand van de handmatig ingevulde waarde voor **Draadsnde** (in m²) en **tot.draadlengte**. Er wordt uitgegaan van koperdraad (spec.weerstand 0.0176·10⁻⁶ Ωm).

Hdlm/Hdlt is de verhouding tussen de magnetische spanning over het kernmateriaal en de totale magnetische spanning (het aantal ampère windingen). Het wordt berekend als een "spanningsdeling" over twee in seriegeschakelde magnetische weerstanden:

$$\mathbf{Hdlm/Hdlt} = \frac{\mathbf{L_{kern}}}{\mathbf{\mu_r \cdot gaplengte} + \mathbf{L_{kern}}} \quad []$$

Gap.fact is de verhouding tussen de **gaplengte** en de gemiddelde afmetingen van de kern ter plekke van de spleet. Doordat de breedte van de middenpoot en de dikte van de middenpoot in de meeste gevallen niet meer dan een factor twee verschillen, wordt de gapfactor bepaald door:

$$\mathbf{Gap.fact} = \frac{\mathbf{Gaplengte}}{\sqrt{\mathbf{a\text{-kern}} \cdot \mathbf{b\text{-kern}}}} \quad []$$

Indien deze factor groter dan 0.1 is, neemt de nauwkeurigheid sterk af. De zelfinductie valt dan hoger uit en uiteindelijke fluxdichtheid valt hoger uit. Zie hiervoor het volgende hoofdstuk

4. Correctie voor randeffecten (Fringing correction).

Inleiding.

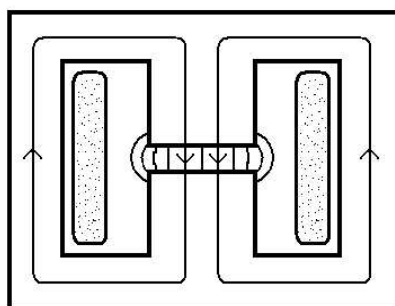
Als u de spoel zou maken op grond van de gegevens uit de spreadsheet, zal de daadwerkelijke zelfinductie in veel gevallen groter zijn. Dit wordt veroorzaakt doordat de gap zich anders gedraagt dan volgens het in de spreadsheet gebruikte model. Aan de randen van de kern heeft het veld de neiging om te divergeren. Dit effect treedt in veel vakdisciplines op en staat bekend als “rand effect” (eng “fringing” of “fringe”). In de spreadsheet wordt aangenomen dat alle magnetische flux binnen Amagn blijft (dus recht oversteekt). De praktijk leert dat dit niet altijd opgaat. Dit hoofdstuk is gewijd aan het corrigeren voor randeffecten

Zolang nagenoeg alle door de windingen opgewekte flux door de kern gaat, wordt de zelfinductie van de spoel nagenoeg alleen bepaald door de geometrie van de kern, de kerneigenschappen en het aantal windingen. In dat geval geldt: $\Phi_{\text{lucht}} \ll \Phi_{\text{kern}}$. De ligging van de windingen om de kern heeft een zeer geringe invloed op de zelfinductie.

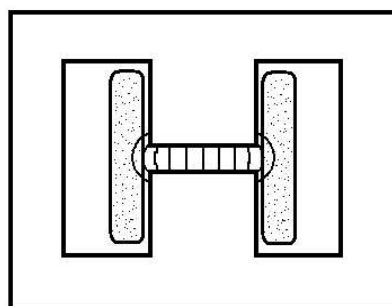
Het introduceren van een gap heeft een verhoging van de weerstand van de kern tot gevolg (drukt men vaak uit als de effectieve permeabiliteit van de kern). Bij een gelijkblijvende stroom leidt dit tot een afname van de flux in de kern (Φ_{kern}). Dit zorgt voor een lagere zelfinductie. Zolang de gaplengte veel kleiner is dan de breedte van het wikkellichaam (**b-wikkel**) geldt: $\Phi_{\text{lucht}} \ll \Phi_{\text{kern}}$ en wordt de zelfinductie nagenoeg geheel bepaald door het magnetisch circuit (dat dan opgebouwd is uit het kernmateriaal in serie met de luchtspleet).

Grote gaps hebben het gevolg dat Φ_{lucht} niet meer te verwaarlozen is. Dit komt doordat een spoel met luchtspleet meer windingen nodig heeft om dezelfde zelfinductie te halen als een spoel zonder luchtspleet. In geval van een grote luchtspleet zullen de veldlijnen zich gedeeltelijk buiten het kernoppervlak begeven. Er zullen zelfs veldlijnen aan de zijkant van de kern uittreden. De figuur op de volgende platzijde probeert een en ander te verduidelijken.

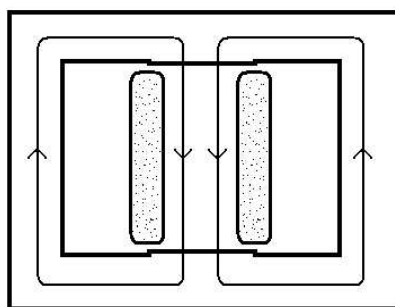
De A figuur toont de dwarsdoorsnede van een E- of P-kern met daarin twee rondlopende veldlijnen en het veldlijnenverloop in de luchtspleet. De gearceerde vlakken geven de ligging van de windingen weer.



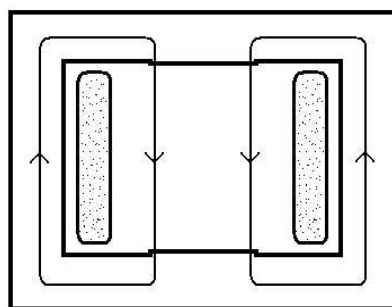
Spoel A



Spoel B



Spoel C



Spoel D

Het veldlijnverloop bij de spleet heeft de volgende gevolgen:

1. Er gaat flux buiten de gap om. Het oppervlak van de gap is schijnbaar wat groter dan het oppervlak van de kern. Dit buigen van veldlijnen (in de buurt van randen) wordt aangeduid met "fringing". Het heeft een verlaging van de magnetische weerstand (reluctantie) van de gap tot gevolg. Dit effect is echter niet meegenomen in de spreadsheet. De werkelijke zelfinductie zal daardoor hoger uitvallen dan gewenst. Hetzelfde effect doet zich ook voor bij plaatcondensatoren. De capaciteit is hoger dan op grond van $C=\epsilon A/s$ verwacht wordt.
2. De veldlijnen in het kernmateriaal dicht bij de gap lopen niet meer volledig in de lengterichting van de kern. In geval van gelamineerde kernen (laminated or wounded cores) geeft dit extra kernverliezen t.g.v. wervelstromen.
3. Om dezelfde zelfinductie te bereiken, zal de flux buiten de kern toenemen, vooral dicht bij de gap. In spoel B is dit weergegeven. De windingen liggen nu dicht bij de gap. De windingen het dichtst bij de gap omvatten niet meer de volledige flux waardoor de zelfinductie lager zal zijn dan bij Spoel A. De zelfinductie wordt afhankelijk van de plaatsing van de windingen.
4. Door de hogere flux in het wikkelpakket (vooral in de buurt van de gap) ontstaan extra verliezen in het wikkeldraad (ten gevolge van wervelstroomverlies in het koper). Litze draad kan uitkomst bieden (is wel duurder).

Een zeer extreem geval is spoel C en spoel D. De gap is gelijk aan de breedte van het wikkellichaam (**b-wikkel**). Stel dat dit potkernen zijn, dan is in feite sprake van een luchtspoel, waarvan het veld dat buiten de spoel zou treden volledig afgeschermd wordt door de potkern.

Binnen de spoel steken de veldlijnen nagenoeg recht over (dus geen fringing en is geen correctie nodig). In dit geval gaat de standaard spoelformule op

($L = \mu_0 \cdot A \cdot \text{magn} \cdot n^2 / b \cdot \text{wikkel}$). De wikkeling van spoel D heeft een twee keer zo grote diameter dan die van spoel C (dus 4 keer zo groot oppervlak). De zelfinductie van Spoel D zal bij gelijk aantal windingen in orde van een factor 4 groter zijn dan spoel C (uitgaande van een potkern). Hier is de plaatsing van de windingen dominant geworden.

Resumerend kunnen we stellen dat het veldlijnverloop rond de gap afhankelijk is van de gapfactor en de verhouding Geplengte/b-wikkel. De zelfinductie is natuurlijk afhankelijk van het aantal windingen de gaplengte, doch helaas ook afhankelijk van de ligging van de draadwikkeling. Kortom een lastig probleem om te vatten in een simpele correctie op de gaplengte..

Zeer kleine gaps.

Er is sprake van een zeer kleine gap indien:

- 1 **gap.factor** < 0.05.
- 2 afstand tussen windingen en gap > **gaplengte**.
3. **gaplengte/b-wikkel** < 0.2.

In die gevallen is het veldlijnenverloop van de gap nagenoeg alleen afhankelijk van de gaplengte en het kernoppervlak (**Amagn**).

Indien dan ook nog **Hdlm/Hdlr** < 0.05, dan wordt de zelfinductie voor meer dan 95% bepaald door de magnetische weerstand van alleen de Gap.

In veel literatuur verdisconteert men het randeffect als een toename van de lengte en breedte van het kernoppervlak. In eerste orde benadering geldt dan:

$$\frac{L_{\text{werk}}}{L_{\text{gew}}} = F \approx 1 + 3 \cdot \text{gapfactor} \quad (\text{Gaplin}) \quad []$$

Geldig voor **gap.factor** < 0.05, afstand tussen windingen en gap > **gaplengte**, **gaplengte/b-wikkel** < 0.2 en ronde tot vierkante kerndoorsneden.

F noemt men de "fringing factor" en is altijd groter dan 1. Een gapfactor van 0.1 geeft op grond van deze formule een 30% grotere zelfinductie dan gewenst. Uit dit voorbeeld blijkt dat een correctie op de gaplengte zeker noodzakelijk is.

HONEYWELL gebruikt in een berekeningsprocedure voor amorphous cores (wounded cores) onderstaande formule:

$$F \approx \frac{(a\text{-kern} + \text{gaplengte})(b\text{-kern} + \text{gaplengte})}{a\text{-kern} \cdot b\text{-kern}} \quad []$$

Indien A-kern = B-kern geldt:

$$F \approx 1 + 2 \cdot \text{gapfactor} + \text{gapfactor}^2. \quad []$$

Deze formule wijkt iets af van de vorige formule.

Relatief grote gaps.

In geval van gapfactoren groter dan ongeveer 0.1 gaan de genoemde formules voor de "fringing factor" aanmerkelijk afwijkingen vertonen. Zij geven een te grote correctiefactor.

Dit komt voornamelijk doordat de windingen dicht bij de gap niet meer de volledige flux omvatten. Hierdoor is de zelfinductie lager dan de verkregen zelfinductie na correctie voor Fringing.

Bij verdere vergroting is **gaplengte/b-wikkel** niet meer veel kleiner dan 1. Indien dit het geval is, is het randeffect aanmerkelijk minder ten opzichte van een veel grotere kern met dezelfde **gapfactor**.

Een goede correctieformule zou dus naast de gapfactor ook de wikkelgeometrie en kernafmetingen als input dienen te hebben. Dit is echter bijzonder complex en valt buiten het bestek van deze toelichting..

Door de aanname dat de denkbeeldige vergroting van de afmetingen van de gap rechtevenredig met de gapfactor is, geeft de formule "Gaplin" een te grote correctiefactor voor grote gapfactoren. Een betere benadering is te verkrijgen door het toevoegen van een bewerking welke de denkbeeldige lengte en breedte vergroting niet evenredig met de gaplengte laat toenemen. Twee voorbeelden:

Relatieve toename a-kern = $(1 + \text{rel.gap}/k)^k$. Rel.gap= gap/a-kern. Een k in orde van 0.7-0.8 geeft redelijke resultaten.

Relatieve toename oppervlak = $1 + \text{gapfactor} \cdot \log(\text{const}/\text{gapfactor})$.

Het mag duidelijk zijn dat de tweede optie faalt voor gapfactoren welke tot nul naderen. In dit document wordt uitgegaan van de eerste benaderingsmogelijkheid

Voor een ronde of vierkante kerndoorsnede geeft dit onder weglating van de kwadratische term:

$$F = (1 + 4 \cdot \text{Gap.fact})^{0.7}. \quad []$$

Geldig voor ronde en vierkante kerndoorsneden en Gap.fact < 0.3. De constanten zijn bepaald aan de hand van de A_L waarden en gaps van kernen van diverse fabrikanten.

Opgemerkt dient te worden dat de gegevens voor grote Gap.factor per fabrikant in orde van 10% verschillen. Het aangeven van een absolute nauwkeurigheid is daardoor weinig zinvol. Deze verschillen worden waarschijnlijk veroorzaakt door de plaatsing van de windingen tijdens de bepaling van de A_L waarden.

Indien het kernoppervlak niet rechthoekig is (bijvoorbeeld 1.5:1), is er vanwege de grotere omtrek meer invloed ten gevolge van randeffecten. In dat geval is het aan te raden de factor 4 te vervangen door een factor 5.

Een andere formule (waarschijnlijk uit "Transformer and inductor design handbook" door: T. McLyman) corrigeert ook voor de breedte van de wikkeling (**b-wikkel**).

$$F = 1 + \text{Gap.fact} \cdot \log(\text{b-wikkel}/\text{gaplengte}) \quad []$$

Helaas is niets bekend over de geldigheidvoorwaarden. Deze formule komt wel met een correct resultaat ($F = 1$) indien Gaplengte = b-wikkel (en over de volledige wikkelbreedte gewikkeld is).

Het gebruik van de correctieformules.

F is altijd groter dan 1, zodat een grotere gap nodig is om de gewenste zelfinductie te bereiken. Vergroot u echter de Gapafstand, dan neemt F eveneens toe. De formules staan dus eigenlijk in de verkeerde vorm. Er geldt:

Gebruikte symbolen:

GFs = gapfactor volgens de spread sheet,

GFw = de werkelijk benodigde gapfactor om de gewenste zelfinductie te bereiken,

L_{gew} = de gewenste zelfinductie zoals ingevuld in de spread sheet,

L_{werk} = de werkelijke zelfinductie die men verkrijgt als men hem zou maken aan de hand van de gegevens uit de spreadsheet.

F = Fringing Factor

$$L_{werk} = L_{gew} \cdot F_{(GF)}$$

$F_{(GF)}$ betekent: F (de fringing factor) als functie van de GF.

Indien geen fringing meegenomen wordt, zoals in deze spreadsheet, geldt dat zelfinductie omgekeerd evenredig is met de gapfactor of gaplengte ($L=C \cdot GFs/GFw$). De twee formules samenvoegen geeft:

$$\frac{L_{werk}}{L_{gew}} = \frac{GFs \cdot F_{(GFw)}}{GFw} \quad (A)$$

We wensen $L_{werk}=L_{gew}$ ofwel de formule dient zoveel mogelijk gelijk aan 1 te worden.

Dit leidt tot een eenvoudige relatie:

$$GFs \cdot F_{(GFw)} = GFw$$

Daar waar GF staat, mag men ook de Gaplengte denken ($Gaplengte_s \cdot F_{(Gaplengte-w)} = Gaplengte_w$). Via handmatige of computerondersteunde iteratie is aan de hand van grafieken of formules voor F de benodigde gaplengte te vinden.

Een iteratief voorbeeld:

Voor een zekere spoel is volgens de spreadsheet een gap van 0.2 mm nodig, de gapfactor bedraagt 0.05. Het betreft een ronde kern. Hoe groot moet de werkelijke Gap zijn?

Stel dat geldt $F = (1 + 4.5 \cdot GF)^{0.7}$. We vullen het resultaat voor GFw rechts van het gelijkteken, herhaaldelijk in $F_{(GFw)}$. We beginnen met $GFw=0.05$:

$$0.05 \cdot F_{(0.05)} = 0.05 \cdot (1 + 4.5 \cdot 0.05)^{0.7} = 0.0576, \text{ nogmaals invullen:}$$

$$0.05 \cdot F_{(0.0576)} = 0.05 \cdot (1 + 4.5 \cdot 0.0576)^{0.7} = 0.0588. \text{ Dit convergeert zeer snel.}$$

Dit ter controle invullen in formule A geeft:

$$L_{werk}/L_{gew} = 0.05 \cdot (1 + 4.5 \cdot 0.0588)^{0.7} / 0.0588 = 1.0022.$$

Dit is nauwkeurig genoeg.

Ofwel een Gapfactor van 0.0588 is nodig (gaplengte = 0.235mm) om te compenseren voor fringing. Deze waarde voldoet aan de beperkingen van onze formule (Gapfactor < 0.3).

Hoewel voor veel toepassingen 10% tolerantie in zelfinductie best groot is, is slechts een correctie van maximaal 5% noodzakelijk voor wat betreft het aantal windingen (L is recht evenredig met n^2). De daadwerkelijk verkregen fluxdichtheid zal daardoor niet meer dan 5% afwijken van de in de spreadsheet ingevoerde fluxdichtheid.

Voor nauwkeurigere formules wordt verwezen naar de datasheets van fabrikanten. Hierbij dient opgemerkt te worden indien de gaplengte aanmerkelijk groter is dan de wanddikte van de spoelkoker, de benodigde correctie afhankelijk is van de ligging van de windingen. In geval van sterk afwijkende geometrie is een simulatie op basis van eindige elementen methode (Finite Elements Method) wenselijk. Er bestaan diverse (commerciele) pakketten voor berekeningen aan (E)M-veld problemen.

Verdere overwegingen.

Luchtspleten zijn de oplossing om (tijdelijk) magnetische energie op te slaan. De energie inhoud is vele malen groter dan die van de zacht magnetische kernmaterialen. Bovendien maakt de luchtspleet de zelfinductie veel minder afhankelijk van de kernmateriaaleigenschappen. Dit is zowel handig in geval van klein- en grootsignaal toepassingen (vervorming in filters, spoelen waar DC doorheen gaat).

Gaps brengen ook nadelen met zich mee. Men dient te slijpen en wellicht (gedeeltelijk) litze draad toe te passen. Bovendien dient men over de benodigde kennis te beschikken. Een van de mogelijkheden is om de gap ook aan te brengen in de buitenbenen van bijvoorbeeld een E-kern. Het halveert de gaplengte per gap en verlaagt op die manier wervelstroomverliezen in het wikkeldraad en men hoeft niet te slijpen. Een plaatje elektrisch isolerend materiaal tussen de kernhelften is voldoende. Nadeel van deze methode is de enorme toename van het strooiveld.

Fabrikanten hebben dit ook gezien. Er komen meer gemixte kernmaterialen op de markt. Het zijn mengsels van (kunst)hars en losse ferromagnetische korrels. Zij hebben als het ware een continu verdeelde luchtspleet. Het principe werkt het beste in geval van een ringkernconfiguratie. Hoewel de volumebenutting van het kernmateriaal ongunstiger is dan van kernen met discrete gaps, kan het een oplossing zijn voor uw probleem. De toekomst zal uit wijzen of dit type kernen concurrerend wordt met gewone ferriet of gelamineerde kernen.

Er bestaan diverse softwarepakketten t.b.v. van (E)M simulatie. Bedenk echter dat deze pakketten relatief prijzig zijn en dat, ondanks de sterk verbeterde grafische interfaces, de nodige studie noodzakelijk is om een zinvol resultaat te krijgen. Uitproberen aan de hand van technisch inzicht geeft in veel gevallen een goede en snelle oplossing voor uw probleem. Deze spreadsheet is bedoeld om de tijd tussen idee en oplossing te bekorten.

5. Relatie tussen aantal windingen, kerndoorsnede, zelfinductie en stroomsterkte.

Uitgaande van het begrip zelfinductie is een handige relatie te vinden tussen de fluxdichtheid, kerndoorsnede, maximale stroom, zelfinductie en benodigd aantal windingen.

De zelfinductie van een spoel, gezien als een netwerkelement, is gelijk aan het $u \cdot t$ product (spanningsstoot of $\int u \cdot dt$) dat ontstaat per ampère stroomverandering door de spoel. De eenheid van zelfinductie is immers Vs/A. Bij een condensator is het precies andersom, de eenheid van capaciteit is $As/V = \text{stroomstoot}/V = \text{lading}/V$.

Bij een spoel van één winding om een kern is het extern aangelegde Vs-product ($\int u \cdot dt$) gelijk aan de fluxverandering in de kern ($\Delta\Phi_{\text{kern}}$) welke door de winding "loopt". De eenheid van flux is Weber of Vs. Voor een spoel met één winding geldt dus:

$$L = \frac{\Delta \int u \cdot dt}{\Delta I} = \frac{\Delta \Phi_{\text{kern1}}}{\Delta I} \quad [\text{Vs/A}]$$

Waarin: $\Delta \int u \cdot dt$ = de verandering van spanningsstoot in Vs, $\Delta \Phi_{\text{kern1}}$ = de verandering van magnetische flux in de kern t.g.v. één winding, in Vs, L = de Zelfinductie in H (Vs/A), ΔI = de bijbehorende stroomverandering in A.

Opm:

Formeel gesproken gaat het om alle flux door de die ene winding en niet alleen de flux door de kern. Als echter de permeabiliteit van de kern veel hoger is dan die van lucht, en die ene wikkeling strak om de kern gewikkeld is, geldt bij goede benadering dat het $u \cdot t$ product gelijk is aan de flux door de kern.

Indien echter om dezelfde kern, n windingen liggen, zal bij dezelfde fluxverandering ($\Delta\Phi_{\text{kern1}}$) de uitgangsspanning n keer zo groot zijn (dus ook het $u \cdot t$ product). Echter, bij een zekere stroomsterkte zal de flux zal ook met een factor n toenemen omdat de magnetische spanning ($I \cdot n$) met een factor n toeneemt (uitgaande van een lineair magnetisch medium). Ofwel voor een spoel met n windingen geldt:

$$L = \frac{\Delta \int u \cdot dt}{\Delta I} = \frac{n \cdot \Delta \Phi_{\text{kern-n}}}{\Delta I} \quad [\text{Vs/A}]$$

waarin: $\Delta \Phi_{\text{kern-n}} = n \cdot \Delta \Phi_{\text{kern1}}$ = de fluxverandering in de kern ten gevolge van de stroomverandering ten gevolge van n windingen.

Hier ziet men de in veel formules terugkomende factor n^2 . Zelfinductie is vaak evenredig met n^2 . Als alle beginvoorwaarden nul zijn ($I=0, \Phi=0$), kunnen we de Δ 's weglaten en schrijven:

$$L = \frac{n \cdot \Phi_{\text{kern-n}}}{I} \quad [\text{Vs/A}]$$

Eveneens geldt $\Phi_{\text{kern}} = B_{\text{kern}} \cdot n \cdot A_{\text{kern}}$. Invulling in de vorige formule geeft onderstaande formule:

$$L = \frac{n \cdot B \cdot A_{\text{kern}}}{I} \quad [\text{Vs/A}]$$

Waarin: L = zelfinductie in H, n = aantal draadwindingen om de kern, A_{kern} = oppervlak van kern in m^2 , I = de maximale stroom welke door de spoel gaat in A, B = de in het kernmateriaal optredende fluxdichtheid in T (Tesla, Vs/m^2).

Bovenstaande formule is een bijzonder handige formule. Hij legt een direct verband tussen de fluxdichtheid in het kernmateriaal, aantal windingen, kerndoorsnede en stroom door de spoel.

Een voorbeeld:

Stel ik heb een E kern met een doorsnede van $2 \cdot 2.7 \text{ cm}^2$ (540 um^2). Ik wil daar draad op wikkelen om een spoel van $80 \mu\text{H}$ te maken welke 40 A piekstroom moet kunnen hebben. De fluxdichtheid in het kernmateriaal wens ik niet hoger op laten lopen dan 300 mT . Hoeveel windingen heb ik ongeveer nodig?

Er geldt $n = L \cdot I / (B \cdot A) = 80 \mu \cdot 40 / (0.3 \cdot 540 \mu) = 20$ windingen. Heeft u voldoende ruimte voor 20 windingen? Zo nee, dan dient u een grotere kern te gebruiken.

Deze formule is handig voor het maken van een eerste inschatting.

TeTech ontvangt graag suggesties ter verbetering van dit document. U kunt suggesties sturen naar: [**info@totech.nl**](mailto:info@totech.nl).

EINDE TOELICHTING