

MAGNETOSTRICTIE (praatje voor de ZX ronde van 7 juni 2020)

Enige jaren geleden had ik een email uitwisseling met een goede kennis over zijn metingen aan breedband transformatoren. Bij zijn proeven maakte hij een vergissing, waardoor er even een grote gelijkstroom door zijn trafo liep. Daarna bleek de overdracht gewijzigd te zijn, alleen al door een resonantie-dip in de overdracht rond 190 kHz. Voor zo'n resonantie bij die relatief lage frequentie is doorgaans een niet meer te verwaarlozen capaciteit vereist, die in deze proeven niet alleen afwezig was, maar gezien de grote ook niet veroorzaakt kon worden door parasitaire effecten rond zijn metingen. Omdat de oorzaak niet snel gevonden kon worden, werd de trafo even terzijde gelegd en op een andere kern een nieuwe trafo geconstrueerd. Deze werkte weer volgens de verwachtingen en de proeven konden worden voortgezet. Natuurlijk werd op zeker moment weer een soortgelijke vergissing gemaakt en liep er opnieuw kort een grotere stroom door de trafo. Ook nu weer waren de transformator-eigenschappen gewijzigd en ook verscheen opnieuw een resonantie rond 190 kHz. Dat was het moment dat niet naar de soldeerbout, maar naar de email werd gegrepen en ik een mailtje ontving met zijn wederwaardigheden en het verzoek om even mee te denken. Gelukkig had ik wat ervaring met dit soort magnetische materialen en begreep al gauw waar ik de achtergronden van dit verschijnsel zou moeten zoeken.

Om te beginnen was er natuurlijk die vergissing die de grotere stroom door de trafo liet lopen. Al eerder kwamen in deze ronde verschillende eigenschappen van ferrietmaterialen op tafel, waarbij ik nu even de aandacht vestig op de magnetiseringscurve, ook wel bekend als de hysteresis lus. Deze figuur ontstaat wanneer men een grafiek maakt van de magnetische eigenschappen van enig materiaal, met op de horizontale as het aangelegde magnetische veld en op de verticale as het effect van dit veld binnen het materiaal, ook wel de susceptibiliteit genoemd, ofwel de materiaalgevoeligheid voor magnetische velden.

In nieuw materiaal begint het verband tussen deze grootheden in de oorsprong van de grafiek, omdat er geen veld binnen het materiaal aanwezig is, wanneer er geen uitwendig veld wordt aangelegd. Laat men nu het aangelegde veld toenemen, dan neemt ook het magnetische veld in het materiaal toe, maar niet helemaal lineair. Bij grote aangelegde veldsterkten neemt het interne veld minder sterk toe, om bij de hoogste waarden nauwelijks meer toe te nemen, en vrijwel constant te blijven. Dit gebied noemen we de verzadigingsveldsterkte.

Wanneer we op elk moment kijken naar de variatie in de verhouding tussen het aangelegde veld en het interne veld, dan vinden we een grootheid die we kennen als de permeabiliteit, ' μ ' (mu) van dat materiaal. We zien nu ook meteen, dat deze permeabiliteit bij toenemende magnetisatie kleiner zal worden, om bij verdere uitsturing in verzadiging zelfs vrijwel te verdwijnen. Houdt hier rekening mee wanneer er grote magnetisering-stromen door wikkelingen op misschien te kleine kernen zou worden gestuurd. De zelfinductie en dus ook de impedantie loopt dan terug waardoor de berekende filter- of trafo-werking wordt verstoord.

Wanneer we in onze uitsturingsproef met magnetische materialen het aangelegde veld weer laten afnemen, neemt ook het interne veld weer af. Misschien tot onze verbazing merken we dat wanneer het aangelegde veld helemaal tot nul is teruggebracht, het interne veld dat nog niet is. In het materiaal is nog steeds een rest van het magnetisch veld aanwezig, bekend als het remanent veld. Andere materialen, ontworpen voor permanente magneten, houden zelfs een heel groot deel van het magnetiserende veld vast, hetgeen je aan de buitenzijde gemakkelijk kunt vaststellen; we zeggen dat het materiaal 'magnetisch' is geworden. In het materiaal voor transformatoren en spoelen kunnen we dit remanente veld weer opheffen, wanneer we het aangelegde veld van teken laten omkeren, en opnieuw in sterkte

laten toenemen. Ook het magnetische veld in de kern neemt nu verder af, totdat het helemaal verdwenen is. De aangelegde veldsterkte in omgekeerde richting, die nodig was om het interne veld weer helemaal op te heffen, noemen we het coërcitief veld.

Wanneer we het aangelegde veld verder laten toenemen in omgekeerde richting neemt ook het interne veld in deze richting weer toe, totdat opnieuw de verzadiging wordt bereikt.

Wanneer je deze zaken op een stukje papier hebt meegetekend, dan zie je dat de grafiek van het verband tussen het aangelegde- en interne magnetische veld, een S-vormige lus is geworden. Deze figuur staat bekend als de hysteresis curve. De vorm en grote van deze figuur hangt samen met het uitwendig aangelegde magnetische veld en met het type materiaal.

Verder is het oppervlak van de lus evenredig met de inwendige materiaal verliezen, waaruit je kunt opmaken, dat deze verliezen toenemen bij hogere uitsturing. Weer iets om te onthouden wanneer je deze materialen toepast in HF eindtrappen en antenne aanpassingen.

Denk niet dat het verhaal tot nu toe alleen betrekking heeft op onze bekende ferrietmaterialen; alle materialen met magnetiseerbare eigenschappen vertonen dit gedrag, vanaf de bekende ijzernuclei van LF- en netspannings-transformatoren tot aan de bekende permanente magneten toe. De grote verschillen tussen de materialen zie je vooral in de vorm van deze hysteresis lus. Zo kennen materialen bedoeld voor transformatoren en spoelen een relatief klein remanent magnetisme en vertoont de hysteresis lus meer een slanke, ronde vorm.

Materialen bedoeld voor permanente magneten of geheugen-functies vertonen een meer rechthoekige hysteresis-vorm.

De beschreven magnetische veranderingen in het materiaal zijn echter niet zonder gevolgen voor de afmetingen hiervan. Doordat de magnetische domeinen in het materiaal zich gaan richten naar het aangelegde veld, groeien deze domeinen in grote ten koste van niet-georiënteerde domeinen. Hierdoor verschuiven de magnetische wanden tussen die gebieden en verandert het materiaal ook een heel klein beetje van vorm. Dit verschijnsel noemen we magnetostrictie. Omgekeerd zal de magnetisatie in het materiaal op zijn beurt veranderen, wanneer dit van buiten af wordt vervormd; dit staat bekend als het Villari-effect. Zonder het misschien te beseffen zijn we allemaal vertrouwd met magnetostrictieve effecten. Denk maar eens aan het brommen van netspanningstransformatoren en ook het snerpende gepiep van de uitgangstransformator in oude beeldbuis Tv's op 15.625 Hz. van de lijn herhalings-frequentie. Samengevat beschrijft 'magnetostrictie' de mechanische verandering in ferromagnetische materialen onder invloed van een aangelegd magnetisch veld.

Deze verschijnselen zijn enigszins te vergelijken met de vormverandering binnen kristallen onder invloed van een daarover aangelegd elektrisch veld, hetgeen bekend is als het piëzo-elektrische effect. Ook dit kent weer een omkering, waarbij een elektrische spanning ontstaat wanneer dergelijk materiaal vervormd wordt, denk maar aan de kristal microfoon en zelfs aan elektrische aanstekers, van een ander piëzo-elektrisch materiaal.

Voor de volledigheid vermeld ik nog even, dat elk mechanisch effect zich in een materiaal steeds zal voortplanten met de specifieke geluidssnelheid binnen dat materiaal, die een stuk lager zal zijn dan de elektro-magnetische voortplantings-snelheid.

Nu we deze zaken, die al verschillende malen geheel of gedeeltelijk in de ZX-ronde zijn gepasseerd, weer even opgehaald hebben, gaan we terug naar het probleem uit het begin. Het is nu wellicht duidelijk, dat de vergissing, die de grotere stroom door de spoel op de kern had gestuurd, deze kern ook ter plaatse van de spoelwikkeling gemagnetiseerd heeft, waarbij een deel van deze magnetisatie in de kern is achtergebleven in de vorm van remanent

magnetisme. De kleinere stroom in de normale toepassing kan deze magnetisatie niet opheffen, waarmee de toestand voor deze toepassing permanent is geworden.

De signalen die nu op de spoel worden gezet, introduceren in de kern een wisselend magnetisch veld als van ouds, dat nu ter plaatse van het gemagnetiseerde stukje hiermee in wisselwerking gaat. Was dit veld even in dezelfde richting als de magnetisatie, dan telt dit er bij op, en stuurt de kern verder uit, waarbij ook door de magnetostrictie de materiaalvervorming groter wordt. In de omgekeerde richting wordt de vervorming weer iets kleiner, waarmee er een koppeling ontstaat tussen het aangelegde magnetische veld, en de vormverandering van het materiaal, met het gemagnetiseerde stukje als 'anker punt'.

Aan de buitenzijde merk je hier bij oppervlakkige beschouwing weinig van. Wanneer echter de frequentie van het aangelegde veld aanleiding geeft tot een magnetostrictieve materiaalvervorming, die juist een mechanische golflengte lang is, worden de materiaal afmetingen ook weer teruggekoppeld naar de elektrische werking en vinden we dit terug als een resonantie in de impedantie van de spoel op de kern. Overigens is deze magnetostrictieve terugkoppeling ook bij niet gemagnetiseerd materiaal altijd wel een beetje aanwezig, zij het bijna onmerkbaar klein, in een toename van de demping van enkele tienden van een dB over een frequentie gebiedje van een enkele kHz., op een centrale frequentie beneden enkele honderden kHz., afhankelijk van de afmetingen. In het HF gebied zul je hier weinig van merken.

Na magnetisatie gevolgd door een plaatselijk, remanent magnetisch veld kan deze extra demping oplopen tot 8 dB en meer en wordt dan duidelijk meetbaar in de overdracht. Doordat het kernmateriaal na magnetisatie op een ander punt van de hysteresis curve wordt bedreven, veranderen de elektrische eigenschappen met een enigszins afgenomen materiaal permeabiliteit, dus een lagere spoel-impedantie op deze kern dan vóór de magnetisatie.

Voor wie dit allemaal een beetje ingewikkeld klinkt, vraag ik even terug te denken aan het piëzo-elektrische effect in een radio kristal. Ook hier veranderen de elektrische eigenschappen sterk, wanneer de materiaal-vervorming, die zich ook hier met de geluidssnelheid door dit materiaal voortplant, juist past bij de afmetingen hiervan. We meten dan een scherpe resonantie piek in het elektrische gedrag door de koppeling tussen mechanische- en elektrische eigenschappen, waarvan we graag gebruik maken in onze filters en oscillatoren.

Dat dit geen theoretisch verhaal is, blijkt uit het vervolg van de eerder genoemde email-uitwisselingen. Om de waargenomen verschijnselen te kunnen duiden vroeg ik om nog enkele aanvullende proeven te doen.

De gebruikte ferriet ringkern had een buitendiameter van 12,7 mm., en een binnen diameter van 7,15 mm. De gemiddelde omtrek van de ring bedraagt daarmee 31,8 mm. In dit harde ferriet materiaal is de geluidssnelheid gelijk aan ca 6000 m/sec. Een hele golflengte van 31,8 mm. wordt in dit materiaal dan ook doorlopen in: $31,8 \text{ mm} / 6000 \text{ m/sec} = 5,3 \text{ } \mu\text{sec.}$, hetgeen overeenkomt met een frequentie van ca 190 kHz. Dit was juist de resonantie frequentie die werd gevonden in de defecte transformator. Verder bleek dat dit inderdaad een mechanisch effect was, omdat door hard in de ring te knijpen, de kwaliteitsfactor van het elektrisch gemeten resonantie verschijnsel sterk beïnvloed kon worden, al bleef de resonantie frequentie wel ongewijzigd. Ter verdere controle werd ook nog zo'n transformator op een kleinere ringkern aangelegd, die eveneens, maar nu bewust, met een korte, hoge stroomstoot plaatselijk werd gemagnetiseerd. Ook hier werd weer zo'n resonantie piek gevonden in het elektrische gedrag van de trafo, nu echter op een evenredig hogere frequentie, samenhangend met de kleinere afmetingen van de nieuwe kern. De beschreven effecten konden daarmee worden verklaard op basis van fundamentele materiaal eigenschappen.

Helaas was dit nu alweer de derde kern die permanent gemagnetiseerd was, en daarmee onbruikbaar voor de voorziene toepassing. De vraag die over bleef was dan ook, of deze kernen als verloren moesten worden beschouwd? Ook hiervoor levert enige materiaalkennis de oplossing. Het is immers bekend dat magnetische materialen hun nuttige eigenschappen verliezen boven een bepaalde temperatuur, bekend als de Curie temperatuur. Het verschijnsel dat we kennen als ‘temperatuur’ is eigenlijk niets anders dan de mate van bewegelijkheid van de afzonderlijk atomen of moleculen. Wanneer de moleculen in magnetische materialen op een hogere temperatuur gebracht worden, en dus harder gaan trillen, verliezen de magnetische domeinen hun onderlinge magnetische samenhang, en groeperen zich weer in veel kleinere eenheden, en in willekeurige richtingen. Dit gebeurt op een abrupte manier, waarmee deze Curie temperatuur een goed gedefinieerde waarde is, die echter voor elk magnetisch materiaal verschillend is. In het geval van de proefjes met de brede band transformator betrof dit 4A11 of ‘43’ materiaal, waarvan de Curie temperatuur op 125 °C ligt. De vorming van ferriet-materialen vindt echter plaats bij temperaturen ruim boven de 1000 °C, zodat dit specifieke materiaal gemakkelijk boven zijn Curie temperatuur kan worden gebracht zonder dat dit de mechanische eigenschappen te veel beïnvloedt. Inderdaad was een korte verwarmingssessie in een gewone huishoudelijke oven voldoende om het materiaal weer in maagdelijke conditie te krijgen, zonder hinderlijke resonanties. Denk er aan dat de Curie temperatuur voor diverse materialen nogal uiteen kan lopen, met als voorbeeld het bekende 4C65 of ‘61’ materiaal, dat dit Curie effect pas vertoont bij 350 °C. Bij onbedoelde permanente magnetisatie is dit materiaal dus niet zo gemakkelijk weer in maagdelijke toestand terug te brengen.

Je kunt je afvragen of het probleem van de magnetisatie en magnetostrictie en het verlies van de magnetische eigenschappen boven de Curie temperatuur allemaal hinderlijke zaken zijn die kunnen optreden als storende factoren in specifieke toepassingen. Zoals altijd worden materiaal-eigenschappen bepaald door een aantal factoren, waarvan sommige in een bepaalde toepassing gewenst zijn, en andere ongewenst. Het blijkt steeds weer dat eigenschappen die in de ene toepassing ongewenst zijn, in een andere juist als belangrijk en nuttig worden ervaren. Zo wordt het Curie effect o.a. toegepast wanneer een nauwkeurige temperatuur overgang belangrijk is bij andere dan kamertemperatuur. Denk maar eens aan de vroegere uitvoering van de Weller soldeerbout. In de tip hiervan was een specifiek magnetisch materiaal verwerkt dat bij lagere temperaturen magnetiseerbare eigenschappen vertoont en dus een magnetische schakelaar kan vasthouden voor het elektrisch contact van het verwarmings-element. Boven de Curie temperatuur verdwijnen de magnetische eigenschappen en valt de schakelaar weer af, waarmee de soldeerbout nauwkeurig op temperatuur kan worden gehouden.

Spraken we over brommende transformatoren, snerpande TV- toestellen en experimentele transformatoren die last hadden van magnetostrictive effecten, dan is het toch ook nuttig om de contactloze positie sensoren te vermelden en precisie actuatoren, die juist gebaseerd zijn op dit magnetostrictie-effect. Er zijn in het algemeen maar weinig hinderlijke materiaal eigenschappen, die niet juist bijzonder nuttig kunnen zijn in een andere toepassing. Ook de kennis over de magnetostrictie is dus zeker geen interessant, maar nutteloos weetje.

Dit was wat ik deze morgen wilde vertellen over de perikelen rondom wat proefjes met ferrietmaterialen en magnetostrictieve effecten. Als altijd kan ook dit verhaal weer worden opgevraagd met een mailtje aan: on9cvd@amsat.org evenals vragen op het gebied van deze ferriet materialen en hun toepassingen.

Bob J. van Donselaar, ON9CVD [website](#)