Overdruk uit PHILIPS TECHNISCH TIJDSCHRIFT, Jaargang 23, no. 12, blz. 381-395, 1961

HET ORTHOCYCLISCH WIKKELEN VAN SPOELEN

door

W. L. L. Lenders

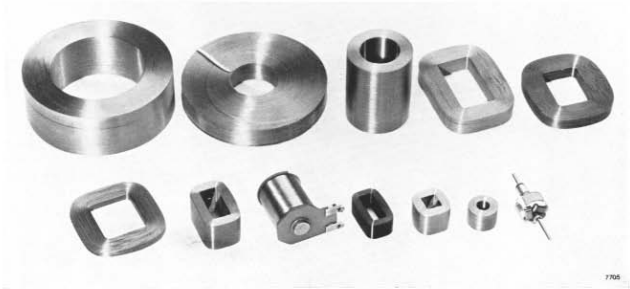
Copyright N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Eindhoven.

Overnemen van artikelen uit Philips Technisch Tijdschrift of gedeelten daarvan is toegestaan, mits vooraf mededeling wordt gedaan aan de redactie en mits de bron voluit wordt vermeld. Voor dit doel kunnen foto's en tekeningen van de bijbehorende afbeeldingen beschikbaar worden gesteld.

JAARGANG 23, 1961, no. 12 blz. 381-420 Verschenen 9 mei 1962

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELEND TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUKTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN



HET ORTHOCYCLISCH WIKKELEN VAN SPOELEN

door W. L. L. LENDERS *).

621.3.045.16

Het orthocyclisch wikkelen is een methode om spoelen te verkrijgen met de dichtst mogelijke „stapeling" van de windingen. Zulke spoelen hebben een aantal bijzonder gunstige eigenschappen, o.a. de maximale vulfactor (dus minimale afmetingen en vandaar ook minimale spreiding in de afmetingen), een regelmatige verdeling van de elektrische veldsterkte en een goede warmtegeleiding.

In ieder apparaat waarin het elektromagnetisme toepassing vindt, treft men één of meer spoelen van geïsoleerd koperdraad aan. De prestatie van het apparaat en belangrijke eigenschappen en gegevens ervan, zoals afmetingen, gewicht en prijs, zijn mede afhankelijk van de meer of minder gelukkige wijze waarop de ontwerper de elementaire constructiegegevens van de spoel heeft weten te combineren. Onder elementaire constructiegegevens verstaan wij hier:

het aantal windingen van de spoel,
de draaddoorsnede,
het volume en de vorm van de spoel,
de methode van wikkelen.

Deze heterogene variabelen laten een grote verscheidenheid in eigenschappen toe, een verscheidenheid die nog aanzienlijk uitgebreid wordt doordat de

*) Philips' Hoofdindustriegroep Radio-, grammofoon- en televisieapparaten, Eindhoven.

magnetische flux van de spoel meestal een ferromagnetisch circuit doorloopt dat uit materiaal met verschillende magnetische eigenschappen kan bestaan en zelf ook op zeer verschillende wijzen gedimensioneerd kan zijn.

Bij het ontwerpen van spoelen is het in het algemeen gunstig, ernaar te streven dat een bepaalde grootheid, de vulfactor, zo groot mogelijk wordt. Onder vulfactor F verstaan wij hier de verhouding van de gezamenlijke doorsnede der windingen (met hun isolatie) tot de oppervlakte van de omgeschreven rechthoek $ABCD$ (*fig. 1*). F is afhankelijk

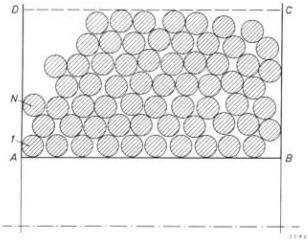


Fig. 1. Doorsnede van een onregelmatig gewikkelde spoel.

van de vorm der draaddoorsnede (wij beperken ons hier echter tot draad met ronde doorsnede) en van de manier van wikkelen. De naast en op elkaar liggende windingen sluiten ruimten in die verloren gaan, zodat zelfs bij een ideaal gewikkelde spoel F kleiner dan 1 is, zij het ook weinig. Bij een niet-ideale, d.w.z. onregelmatig gewikkelde spoel (fig. 1), is F aanmerkelijk kleiner dan 1. De theoretische maximumwaarde van de vulfactor wordt inderdaad bereikt met een methode van wikkelen die bij Philips is uitgewerkt en die we orthocyclisch wikkelen noemen. Deze methode en toepassingen ervan zullen hier worden beschreven.

Aan een eenvoudig voorbeeld willen we eerst nog het belang van een grote vulfactor demonstreren. We beschouwen een telefoonrelais of -kiezer, waarvan de (niet-orthocyclische) spoel voldoet aan de eis dat hij, bij een gegeven spanning, een bepaald aantal ampèrewindingen levert. Stel nu dat men door een betere methode van wikkelen erin slaagt, in dezelfde ruimte b.v. 1,7 maal zoveel windingen van hetzelfde draad onder te brengen (een dergelijke waarde geldt inderdaad voor het orthocyclisch wikkelen in vergelijking met het zg. „wild" wikkelen). De weerstand van de nieuwe spoel is dan 1,7 maal die van de oude, de stroom (bij dezelfde spanning) $1/1{,}7 \approx 0{,}6$ maal de oorspronkelijke stroom, het aantal ampèrewindingen verandert niet (de nieuwe spoel voldoet dus ook aan de eis), en het opgenomen vermogen wordt 0,6 maal het oorspronkelijke. Dit betekent voor een telefooncentrale, met grote aantallen relais en kiezers, een aanzienlijke besparing aan voedingscapaciteit, aan doorsnede van de leidingen en aan energie, en een geringere warmtedissipatie.

Wild gewikkelde spoelen en spoelen met isolerende tussenlagen

Eerst bespreken we twee algemeen gebruikelijke manieren van wikkelen. *Fig. 2* toont een spoel waarvan de eerste laag is voltooid. De windingen kruisen de hartlijn van de spoel onder een hoek die een bedrag α van 90° verschilt. Ze zijn hier gewikkeld van links naar rechts en vormen een linkse schroeflijn. Bij het leggen van de tweede laag, van rechts naar links, zal men er niet in slagen dit met dezelfde regelmaat te doen als bij de eerste laag. De tweede laag zou een rechtse schroef moeten volgen, maar het blijkt dat deze voortdurend verstoord wordt doordat de windingen de neiging hebben om te gaan liggen in de „groef", gevormd door de windingen van de eerste laag. Dit volgen van de groef is echter slechts over kleine afstanden mogelijk (de twee schroeflijnen passen immers niet bij elkaar), waar-

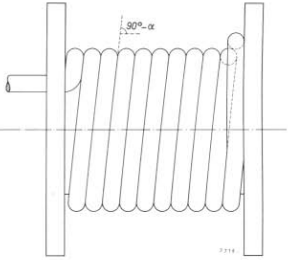


Fig. 2. Spoel van één laag, van links naar rechts gewikkeld volgens een linkse schroeflijn. De windingen kruisen de hartlijn van de spoel onder een hoek $90° - \alpha$. Bij het leggen van de tweede laag, van rechts naar links, ontstaan onregelmatigheden, die spoedig leiden tot „wild" wikkelen.

door onregelmatigheden ontstaan. Naarmate men verder wikkelt, worden de onregelmatigheden groter en groter, en al spoedig kan men van lagen niet meer spreken. Vandaar de naam wild wikkelen.

Voordelen van deze primitieve manier van wikkelen zijn dat het vlug gaat, dat men met een zeer eenvoudige wikkelmachine kan volstaan en dat het inleren van de wikkelaar weinig tijd kost. Uit een beschouwing van fig. 1 echter, die een wild gewikkelde spoel in doorsnede toont, is gemakkelijk in te zien dat het wild wikkelen de volgende bezwaren heeft:

1) De vulfactor is belangrijk kleiner dan bij een regelmatige spoel.
2) De vulfactor zal een aanzienlijke spreiding vertonen. Om de uitval te beperken, zal men het ontwerp moeten baseren op ongeveer de kleinste vulfactor die voorkomt.

   Met de spreiding in de vulfactor gaat gepaard een spreiding in de gemiddelde lengte van een winding, dus een spreiding in de weerstand van de spoel.
3) Als de wikkeling eenmaal wild is geworden, zullen er zeker (vooral aan de zijkanten) windingen terechtkomen op of tussen veel dieper gelegen windingen, ten opzichte waarvan ze een relatief hoge spanning hebben.

Uit dit laatste volgt dat men bij een wild gewikkelde spoel waarover de spannung U staat, niet weet hoe groot de hoogste spanning U_n tussen twee tegen elkaar liggende windingen zal zijn, dus ook niet hoe groot het gevaar van doorslag en, bij gelijkstroom, het gevaar van corrosie zullen zijn. Bij een regelmatig gewikkelde spoel is dit wèl bekend: bestaat de spoel uit l lagen, dan is

$$U_n = 2U/l. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

(U_n is aanwezig tussen de eerste winding van een laag en de laatste winding van de volgende laag.) In fig. 1 is het ergste geval getekend dat zich kan voordoen, namelijk dat de laatste winding (N) van de spoel op de eerste (l) is komen te liggen.

Om aan deze bezwaren tegemoet te komen, gaat men vaak ertoe over, na het voltooien van iedere laag (soms na iedere twee lagen) een velletje papier of ander isolatiemateriaal tussen te voegen. Dit kan automatisch gebeuren en hoeft dus geen tijd te kosten. Het grote voordeel van het wikkelen met tussenlagen is dat er regelmatige lagen ontstaan: het papier voorkomt dat de laag die men bezig is te wikkelen, beïnvloed wordt door het patroon van de eronderliggende laag. Iedere laag kan nu dus worden gewikkeld alsof het de eerste was. Bij gevolg geldt nu verg. (1), terwijl bovendien het papier de doorslagspanning nog verhoogt. De vulfactor echter blijft klein: wat men wint door de verkregen regelmaat, wordt te niet gedaan doordat het papier ruimte vergt en doordat de breedte van de lagen wat kleiner gehouden moet worden dan de breedte van het papier, om te voorkomen dat er windingen zouden afglijden. Aan de zijkanten moet men dus ruimte ongebruikt laten (*fig. 3*).

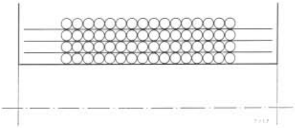


Fig. 3. Doorsnede van een spoel met isolerende tussenlagen. De windingen liggen regelmatig, maar desondanks is de vulfactor klein, doordat de isolerende lagen ruimte in beslag nemen en doordat aan de zijkanten enige ruimte ongebruikt moet blijven.

Orthocyclische spoelen

We hebben gezien dat bij het wild wikkelen de tweede laag al niet meer regelmatig gelegd kan worden. De oorzaak is dat de neiging van de windingen om te gaan liggen in de groef, gevormd door de eerste laag, in conflict komt met het links zijn van de ene en het rechts zijn van de andere schroeflijn. Dit laatste is ook zo uit te drukken: als de windingen van de eerste laag de hartlijn kruisen onder een hoek $90° - \alpha$ (fig. 2), zouden die van de tweede laag het moeten doen onder de hoek $90° + \alpha$. Daaruit volgt dat de moeilijkheid zal verdwijnen indien men erin slaagt $\alpha = 0$ te maken, dus indien men de eerste laag zo kan wikkelen dat elke winding (althans het grootste deel van elke winding) de hartlijn orthogonaal kruist.

Fig. 4 toont hoe daartoe de eerste laag eruit zou moeten zien. Dit patroon nu is met enige zorgvuldigheid en handigheid te verwezenlijken. Is dit gelukt, dan blijkt het niet moeilijk te zijn, de volgende lagen zodanig gewikkeld te krijgen dat de volkomen regelmatige „stapeling" ontstaat die het kenmerk van dit zg. orthocyclisch wikkelen is; deze naam houdt verband met het vereiste orthogonaal kruisen. *Fig. 5* laat aan een doorgezaagde orthocyclische spoel de fraaie regelmaat en compactheid van de wikkeling zien.

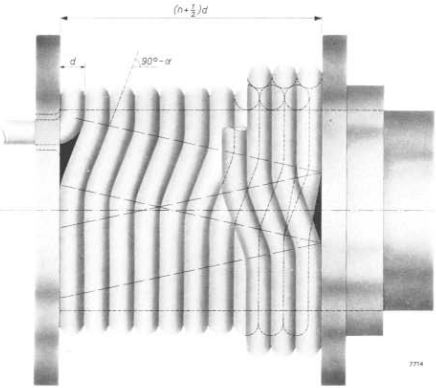
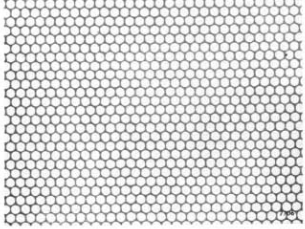


Fig. 4. De eerste laag en enige windingen van de tweede laag van een ronde orthocyclische spoel. Iedere winding kruist over ca. 90% van zijn lengte de hartlijn orthogonaal. Het resterende, scheve, gedeelte is de overstap; de overstappen van één laag vormen samen een overstaplijn. De windingen van de tweede laag (uitgezonderd de overstappen) liggen netjes in de „groef", gevormd door de windingen van de eerste laag.

De overstap

Uiteraard is het onmogelijk, de windingen over hun volle lengte aan de voorwaarde van orthogonaliteit te laten voldoen. Het gedeelte van iedere winding dat er niet aan voldoet (de scheef lopende gedeelten in fig. 4), noemen we de overstap. De overstappen van één laag vormen samen een overstaplijn.

Bij spoelen met ronde opening is de lengte van de overstap ca. 10% van de lengte van de winding. De overstaplijnen lopen zig-zag over de spoel, en op de kopvlakken van de spoel tekenen de einden van de overstaplijnen zich af als een spiraal van Archimedes (*fig. 6*). Bij spoelen met rechthoekige opening beslaat de overstap van de binnenste lagen één rechthoekzijde (*fig. 7*).



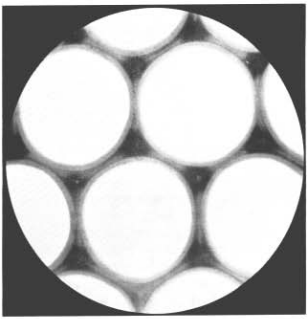


Fig. 5. Doorgezaagde orthocyclische spoel; lineaire vergroting links 48 maal, rechts 600 maal. Diameter van het koper 50 μ. Door de volmaakte regelmaat en de gunstige stapeling is de vulfactor maximaal.

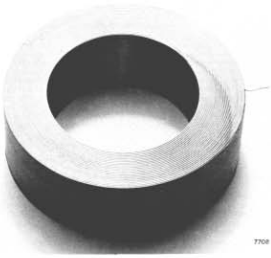


Fig. 6. Ronde orthocyclische spoel. Op het kopvlak tekenen de einden van de overstaplijnen zich af als een spiraal van Archimedes.

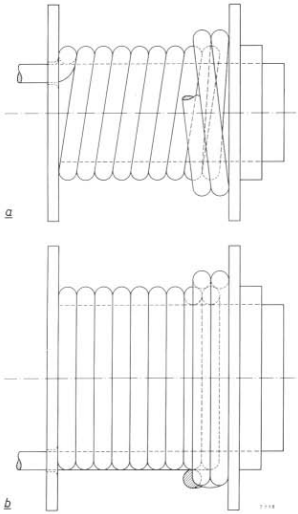


Fig. 7. Rechthoekige orthocyclische spoel, *a*) gezien op het zijvlak waar de overstappen zich bevinden, *b*) gezien op een zijvlak met orthogonale ligging van de windingen.

De wikkelhoogte en de vulfactor

De wikkelhoogte (of dikte) van orthocyclische spoelen is op gedeelten die overstappen bevatten, iets groter dan op gedeelten die vrij van overstappen zijn. Beschouwen we eerst deze laatste. Daar draagt alleen de eerste laag het volle bedrag d tot de wikkelhoogte bij (d is de draaddikte uitwendig). Iedere volgende laag echter draagt, doordat de windingen in de groef van de vorige laag liggen, slechts $\frac{1}{2}\sqrt{3}\,d$ bij (*fig. 8*). Op het gedeelte zonder overstappen is de wikkelhoogte van een orthocyclische spoel met l lagen dus

$$[1 + \tfrac{1}{2}\sqrt{3}(l-1)]d,$$

wat bij een groot aantal lagen nagenoeg gelijk is aan $\frac{1}{2}\sqrt{3}ld = 0{,}87ld$.

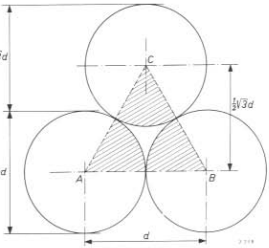


Fig. 8. Doorsnede van drie elkaar rakende windingen (uitwendige dikte d) van een orthocyclische spoel. De vulfactor F_v (waarbij het effect van de overstappen en het randeffect buiten beschouwing blijven) is de verhouding van de gearceerde oppervlakte tot de oppervlakte van driehoek ABC. Deze verhouding is 91%.

Wat betreft het gedeelte *met* overstappen, moet men onderscheid maken tussen ronde en rechthoekige spoelen. Bij ronde spoelen overlappen de overstaplijnen van ten hoogste drie opeenvolgende lagen elkaar. De overstappen veroorzaken dus plaatselijk een verdikking van de spoel van maximaal $3(1 - \frac{1}{2}\sqrt{3})d = 0{,}4d$. Het hangt geheel van de omstandigheden af of dit bedrag belangrijk is of niet. Bij rechthoekige spoelen is de lengte van de overstap, tenminste bij de binnenste lagen, gelijk aan de lengte van het desbetreffende zijvlak (fig. 7*b*), zodat daar de overstappen van de verschillende lagen boven elkaar komen te liggen. De verdikking, veroorzaakt door deze overstappen, zal dus groter zijn dan bij een ronde spoel met evenveel lagen.

De vulfactor van een orthocyclische wikkeling, afgezien van de invloed der overstappen en van een tweede effect, dat we dadelijk zullen noemen, geven we aan met F_0. Deze factor is gemakkelijk te berekenen: F_0 is de verhouding van de gezamenlijke oppervlakte der drie gearceerde sectoren in fig. 8, gedeeld door de oppervlakte van de gelijkzijdige driehoek ABC:

$$\frac{\frac{2}{6}\times\frac{1}{4}\pi\, d^2}{\frac{1}{4}\sqrt{3}\, d^2} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} = 0{,}91.$$

Daarbij is echter geen rekening gehouden met het feit dat bepaalde windingen niet alzijdig door andere windingen zijn omringd, namelijk de windingen aan de kopvlakken van de spoel en de windingen van de binnenste en van de buitenste laag. Dit „randeffect" — dat zich natuurlijk ook bij niet-orthocyclische spoelen voordoet — hangt af van de vorm der doorsnede van de spoel. Het is relatief belangrijk bij lange „dunwandige" spoelen (met relatief veel windingen in de binnenste en de buitenste laag), en in sterkere mate bij platte schijfvormige spoelen (met relatief veel windingen aan de kopvlakken), maar ook daar is de werkelijke vulfactor F zelden meer dan enkele procenten kleiner dan F_0.

Doordat de vulfactor zo constant is, vertonen orthocyclische spoelen een bijzonder kleine spreiding in de uitwendige afmetingen. Deze zijn volkomen bepaald door de uitwendige draaddiameter, het aantal windingen per laag en het aantal lagen.

De wikkelmal

Gewone spoelen worden in de regel gewikkeld op een uit hardpapier of kunststof bestaande spoelkoker, die de spoel ten opzichte van zijn omgeving isoleert en tegen beschadiging beschermt. Voor het orthocyclisch wikkelen echter voldoen spoelkokers, wat betreft hun afmetingen, in het algemeen niet aan de vereiste nauwkeurigheid. Dat de nauwkeurigheid bij deze manier van wikkelen zoveel groter moet zijn, volgt uit het feit dat iedere laag precies uit het voorgeschreven aantal (n) windingen moet bestaan, dus dat de afstand tussen de flenzen $(n+\frac{1}{2})d$ moet zijn (fig. 4), met een spreiding die, volgens de ervaring, maximaal $\pm 0{,}2d$ mag bedragen. Vooral bij het wikkelen van zeer dun draad, van b.v. 50 μ, is dit een zware eis.

Het orthocyclisch wikkelen gebeurt daarom niet op een spoelkoker, maar op een nauwkeurig bewerkte metalen wikkelmal van onveranderlijke afmetingen. Pas nadat de voltooide spoel van de mal af is genomen, wordt hij van een isolerend en beschermend omhulsel voorzien.

Het draad

In fig. 4 hebben wij stilzwijgend aangenomen dat bij het orthocyclisch wikkelen de windingen van iedere laag tegen elkaar aan liggen. Dit impliceert dat d binnen bijzonder nauwe grenzen moet blijven. Werd d vanaf een bepaald punt b.v. 1% groter, dan zou reeds 50 windingen voorbij dit punt de draad niet meer in de groef van de vorige laag liggen, maar juist *op* een winding van die laag; de volgende winding die men legt, zou van de eronder liggende afglijden en er zou een opening ter breedte $\frac{1}{2}d$ ontstaan. Een dergelijke verstoring zou onherroepelijk leiden tot een steeds onregelmatiger worden van de rest van de spoel.

Uit de bovengenoemde tolerantie van $\pm 0{,}2d$ in de breedte van de laag volgt $\pm 0{,}2d/n$ voor de tolerantie in de uitwendige draaddiameter. Met b.v. d = nominaal 100 μ en $n = 120$ windingen per laag is $0{,}2d/n = 0{,}17$ μ. Bij de fabricage van het draad wordt de koperen kern op maat gebracht door middel van trekken door een treksteen. Dit maakt de spreiding in de koperdiameter van draad op één klos verwaarloosbaar klein [1]). De enige soort isolatie die voor draad dat orthocyclisch gewikkeld moet worden, in aanmerking komt, is *lak*. Het aanbrengen van de laag lak is een voor velerlei invloeden gevoelige techniek, die aan een complex van elektrische, chemische en mechanische eisen moet voldoen [2]). Het mag als een bijzondere prestatie worden beschouwd dat het gelukt, de spreiding in d van draad op één klos binnen $\pm$ 1% te houden. In het voorbeeld van zoëven is dit echter nog een factor 6 te groot!

Er zijn twee manieren om draad met te grote spreiding in d toch voor orthocyclisch wikkelen te gebruiken: wikkelen met tussenruimte, en kalibreren van het draad.

1) De variatie in d kan worden opgevangen door de eerste laag te wikkelen met een kleine ruimte tussen de windingen. In de praktijk is gebleken dat de tussenruimte niet meer dan $0{,}03d$ mag bedragen, anders drukken de windingen van de tweede laag die van de eerste te ver opzij.

Het wikkelen met tussenruimte (bij dun draad in de orde van microns!) vereist een vrij gecom-

[1]) Tussen draad van verschillende klossen, dat door verschillende treksteenen getrokken kan zijn, zijn natuurlijk grotere verschillen in diameter te verwachten.

[2]) R. J. H. Alink, H. J. Pel en B. W. Speekman, Fabricage en onderzoek van lakdraad, Philips techn. T. **23**, 358-367, 1961 (no. 11).

pliceerde wikkelmachine, die de steek van de windingen nauwkeurig voorschrijft. Wij komen daarop aanstonds nog terug.

2) Draad met te grote spreiding in *d* kan men orthocyclisch zonder tussenruimte wikkelen door een voorafgaande kalibrering, d.w.z. door het draad door een treksteen (kaliber) te trekken. De opening van deze treksteen moet een diameter hebben die gelijk is aan de minimumwaarde van *d*, zodat alle dikkere gedeelten tot dezelfde maat worden teruggebracht.

Bij het kalibreren doet zich het misschien onverwachte verschijnsel voor dat de variaties in *d* worden overgebracht (met tegengesteld teken) op de koperen kern, dus dat plaatselijk het koper in dezelfde verhouding dunner wordt als *d* afneemt (*fig. 9*). Dit heeft twee ongunstige gevolgen:

a) Het koper wordt door de plastische vervorming harder, dus minder buigzaam; de overstappen krijgen daardoor de neiging om langer te worden, en dit maakt dat de plaats van de overstappen minder goed te beheersen is.

b) Overal waar *d* te groot was, is de diameter van het koper kleiner geworden. De elektrische weerstand per meter is dus toegenomen, en wel, als *d* gemiddeld a % te groot was, met ca. $2a$ %.

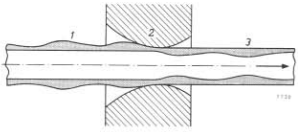


Fig. 9. Schematische voorstelling van het „kalibreren" (trekken door een treksteen) van lakdraad. Doel is: het verkrijgen van draad dat overal een zelfde buitendiameter heeft. Het kalibreren heeft het gewenste effect, maar brengt tevens de oorspronkelijke variaties in de buitendiameter over op het koper. *1* is het nog niet gekalibreerde draad, met variabele buitendiameter en constante koperdiameter, *2* is de treksteen en *3* is het gekalibreerde draad, waarvan de buitendiameter constant, maar de koperdiameter variabel is geworden. De dikte van de lak en de variaties daarin zijn duidelijkheidshalve overdreven groot getekend.

Om deze nadelen zo klein mogelijk te houden, streeft men in de draadfabricage ernaar, de spreiding in *d* nog kleiner te maken dan ze nu al is, waardoor het kalibreren minder vervorming zal teweegbrengen.

Als gevolg van de variatie in de koperdiameter van gekalibreerd draad vertonen orthocyclische spoelen die van zulk draad zijn gewikkeld, een zekere spreiding in de weerstand. Deze spreiding is echter in de regel kleiner dan de spreiding bij wild gewikkelde spoelen, die daar, zoals boven al is vermeld, het gevolg is van de aanzienlijke spreiding in de vulfactor (dus in de totale draadlengte).

Het orthogonaal toevoeren van het draad

Zoals we hebben gezien, is het kenmerk van een orthocyclische wikkeling dat het grootste deel van iedere winding de hartlijn van de spoel orthogonaal kruist. Het draad, komend van een voorraadklos, dient dan ook zodanig aan de wikkelmachine te worden toegevoerd dat het eveneens de hartlijn orthogonaal kruist, althans binnen nauwe grenzen. Men zou daartoe het draad van de voorraadklos naar de wikkelmachine kunnen leiden via een wiel dat op voldoend grote afstand van de machine is opgesteld. In de praktijk komt dit erop neer dat deze afstand vele meters zou moeten bedragen. Dit is niet alleen lastig, maar het lange stuk draad tussen het leiwiel en de machine zou zodanig in trilling kunnen komen dat dit de regelmaat van het wikkelen zou verstoren. Daarom maken we gebruik van een opstelling met een beweeglijk leiwiel dat automatisch zorgt voor handhaving van de orthogonaliteit, zonder dat het zich ver van de machine behoeft te bevinden. In *fig. 10* is deze opstelling schematisch weergegeven.

„Thermoplac" draad

Als men de voltooide orthocyclische spoel zo maar van de wikkelmal nam, zou hij zeker uit elkaar vallen. Om deze reden gebruikt men voor het orthocyclisch wikkelen draad waarvan de isolatie aan de buitenkant is voorzien van een thermoplastisch laagje („Thermoplac" draad [3])). Voordat men de spoel van de mal neemt, verwarmt men hem zodanig dat het laagje plastisch wordt en met de laagjes van de naburige windingen samensmelt. Bij afkoeling ontstaat dan een stevige zelfdragende spoel. Het thermoplastische laagje behoeft slechts ca. 2 μ dik te zijn. Het is bestand tegen kalibreren.

Voor het verwarmen van de spoel (nog op de mal) komen de volgende methodes in aanmerking, die alle worden toegepast:

a) Verwarming in een oven.

b) Inductieve verwarming door een hoogfrequent magnetisch veld (de warmte ontstaat daarbij voornamelijk in de metalen wikkelmal en stroomt vandaar naar de spoel).

c) Verwarming door stroom door de spoel te sturen, afkomstig van een uitwendige bron.

d) Verwarming door in de spoel, nadat deze is kortgesloten, een wisselstroom (meestal met de netfrequentie) te induceren.

---

[3]) Zie het in [2]) aangehaalde artikel, blz. 363.

In tegenstelling met methode (b) wordt bij (c) en (d) de warmte in de spoel zelf ontwikkeld en werkt de mal warmteonttrekkend. Het is daarom bij methode (c) en (d) zaak, de omstandigheden zo te kiezen dat de spoel op plaatsen waar hij in aanraking met de mal is, hoog genoeg wordt verhit zonder dat hij op andere plaatsen te heet wordt. Dit betekent in de praktijk dat de gewenste temperatuur binnen enkele seconden bereikt moet zijn. Met methode (c) is hieraan te voldoen mits de weerstand van de spoel laag genoeg is; een spoel met hoge weerstand vereist voor het snel verhitten een zo hoge spanning dat er kans is op doorslag tussen de eerste en de laatste winding via de metalen wikkelmal. Bij (d) bestaat dit gevaar niet, doordat de spoel is kortgesloten. Deze methode vereist echter een bij de spoel passende kern met primaire spoel, waarvan de kosten alleen aanvaardbaar worden als de spoelen in voldoend grote aantallen worden gefabriceerd.

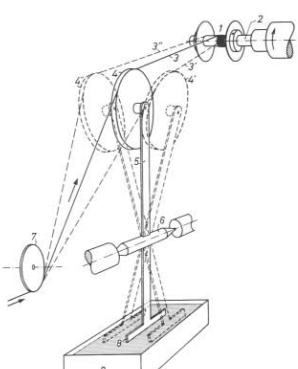


Fig. 10. Inrichting die automatisch ervoor zorgt dat het draad dat van de voorraadklos komt, de hartlijn van de spoel voortdurend orthogonaal kruist, onafhankelijk ervan hoe ver de laag is gevorderd. *1* spoel die gewikkeld wordt. *2* as van de spoel. *3* het aangevoerde draad. *4* leiwiel met arm *5*, die draaibaar is om de as *6*, welke de as *2* orthogonaal kruist. *7* vast leiwiel. Het punt waar het draad het wiel *7* verlaat, ligt op het verlengde van de as *6*. De mechanische spanning in het draad zorgt ervoor dat het wiel *4*, wanneer men een laag begint, de stand *4'* inneemt, en wanneer het eind van een laag is bereikt, de stand *4''*. Kleine afwijkingen door de eindige lengte van de arm *5* daargelaten, kruist het draad (*3'*-*3-3''*) de as *2* voortdurend orthogonaal.

Het verlengde van de arm *5* draagt een vaan *8*, die in een bak *9* met olie is gedompeld. De olie geeft een zodanige demping dat de arm niet aan het slingeren geraakt.

Nadere beschouwing van enige gevallen van orthocyclisch wikkelen

De manier waarop het orthocyclisch wikkelen het best kan gebeuren, hangt af van verschillende omstandigheden, o.a. van de vraag of men slechts enkele exemplaren wil vervaardigen dan wel een groot aantal spoelen in serie wil fabriceren, en of de spoelen rond dan wel rechthoekig zijn. Wij willen hier de methodes van orthocyclisch wikkelen indelen in twee groepen, naar gelang het patroon van de eerste laag met de hand wordt gevormd of mechanisch. Deze indeling loopt ten dele parallel met een indeling naar fabricage op kleine resp. op grote schaal.

Het patroon van de eerste laag wordt met de hand gevormd

Het met de hand vormen van het orthocyclische patroon van de eerste laag vergt van de wikkelaar een zekere bedrevenheid. Een groot bezwaar is dit niet zolang het de vervaardiging van spoelen in kleine aantallen betreft. Men is dan wel aangewezen op het gebruik van gekalibreerd draad; de bij ongekalibreerd draad nodige kleine tussenruimte is met de hand niet te verwezenlijken.

De wikkelmachine behoeft in deze omstandigheden slechts te bestaan uit een goed gelegerde as met aandrijving, rem en toerenteller. De wikkelmal dient te zijn voorzien van één vaste en één nauwkeurig instelbare flens, waarbij een zorgvuldige mechanische afwerking is vereist. Het draad moet orthogonaal worden toegevoerd (fig. 10). Het kalibreren kan tijdens het wikkelen gebeuren.

Nadat de eerste laag volgens het juiste patroon is gelegd en de verschuifbare flens op de juiste plaats is vastgezet, leggen de windingen van de volgende lagen, zoals proefondervindelijk blijkt, zich vanzelf volgens hetzelfde regelmatige patroon neer. Men dient echter te voorkomen dat tijdens het wikkelen bijkomstige onvolkomenheden — zoals trillen van het aangevoerde draad en, bij heel dun draad, stofdeeltjes — de regelmaat verstoren. Voor zover deze verschijnselen geen grens stellen, kan vanaf de tweede laag de snelheid van wikkelen worden opgevoerd tot ca. 10 000 windingen per minuut.

Het patroon wordt mechanisch gevormd

De eisen van de massafabricage hebben geleid tot mechanisering van het vormen van het orthocyclische patroon in de eerste laag en ook in de volgende. De wikkelmachine is daardoor aanzienlijk gecomplicceerder geworden, zoals uit het onderstaande zal blijken.

De afstand tussen de flenzen van de wikkelmal wordt zo gekozen dat er voor het voorgeschreven aantal windingen per laag juist voldoende plaats is als het draad zijn maximale diameter heeft. Draad dat b.v. 3% dunner is (ongekalibreerd draad dus), kan dan over dezelfde breedte regelmatig verdeeld worden door de windingen met een kleine tussenruimte te leggen. Dit verdelen gebeurt automatisch door middel van een draadgeleider, die zich sprongsgewijs evenwijdig met de hartlijn van de spoel verplaatst.

Bij het leggen van de eerste laag staat de draadgeleider gedurende een deel van iedere omwenteling stil, zodat dan het „orthogonale deel" van de winding wordt gelegd. Als we de zaak eerst even iets te eenvoudig voorstellen, verspringt de draadgeleider op het moment waarop een overstap moet beginnen, over een afstand s die gelijk is aan de draaddikte d plus de tussenruimte t.

Deze vereenvoudigde beschrijving geldt alleen voor een draadgeleider die zich vlak bij de wikkelkern bevindt, dus tussen de flenzen. In dit geval echter kan de draadgeleider — waarvan de breedte noodzakelijkerwijs groter is dan de draaddiameter — niet voldoen aan de eis dat de laag van flens tot flens reikt. Om deze reden moet de draadgeleider zich op een afstand tot de hartlijn bevinden die ten minste gelijk is aan de halve flensdiameter. Wegens deze grotere afstand moet de draadgeleider zich bij iedere sprong niet alleen over de afstand $s = d + t$ verplaatsen, maar bovendien tijdelijk over een afstand s_e; zie *fig. 11*, die de overstappen op een rechthoekige spoel weergeeft. Immers, maakte de draadgeleider deze extrastap niet, dan zou hij de winding tegen de voorgaande aan trekken, de gewenste tussenruimte t zou plaatselijk (langs een bepaalde beschrijvende lijn) nul worden, en de laag zou aldaar smaller worden dan overeenkomt met de gewenste regelmaat. Voor ronde spoelen betekent dit dat met iedere volgende winding de overstap langer zou worden, en voor rechthoekige spoelen, met alle overstappen op één zijvlak, dat langs één ribbe de laag smaller zou zijn dan langs de andere ribben.

Na het voltooien van elke overstap moet de draadgeleider over de afstand s_e terugkeren.

Voor de tweede en volgende lagen is de extrastap s_e niet meer nodig, omdat daar het spoor waarin de windingen moeten komen te liggen, al door de vorige laag gegeven is.

Bij elke winding van de eerste laag moet de draadgeleider dus een vrij gecomplicerde beweging maken. De tijd die daarvoor ter beschikking staat, is de tijd die de wikkelmal nodig heeft om te draaien over de hoek waarbinnen de overstap wordt gemaakt. Dit stelt een grens aan de snelheid van wikkelen. Bij vierkante spoelen is de genoemde overstaphoek 90° (bij rechthoekige spoelen wat meer of wat minder, naar gelang men de overstappen op een groot of op een klein zijvlak van de spoel legt); bij ronde spoelen daarentegen is de overstaphoek slechts 30 tot 40°. Hieruit volgt dat de eerste laag bij rechthoekige spoelen sneller kan worden gewikkeld dan bij ronde.

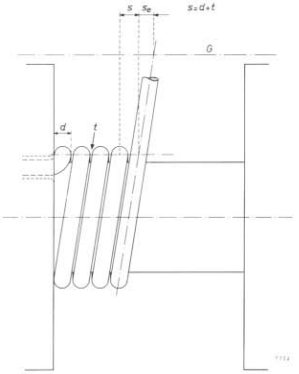


Fig. 11. Bij het wikkelen met tussenruimte t moet de draadgeleider, die zich langs de lijn G beweegt, bij het begin van iedere overstap in de eerste laag niet alleen een sprong $s = d + t$ maken, maar zich bovendien over een afstand s_e verplaatsen, en aan het eind van de overstap moet de draadgeleider zich over de afstand s_e terugbewegen.

Redenen waarom bij rechthoekige spoelen de overstappen op één zijvlak moeten liggen

In fig. 4 is voor een ronde spoel te zien dat de overstaplijnen zig-zag over het oppervlak van de spoel lopen. Bij rechthoekige spoelen hebben de overstaplijnen van nature deze neiging evenceens. Het is echter noodzakelijk, de overstaplijnen, zoals in fig. 7*a* is getekend, op één zijvlak te houden, anders kan de spoel niet orthocyclisch blijven. Dit komt doordat de lengte van de overstap — en daarmee de hoek waaronder de overstaplijn de hartlijn kruist — afhangt van de kromtestraal die de winding ter plaatse van de overstap heeft. Wanneer de overstaplijn van een laag „de hoek om gaat" (naar het volgende zijvlak overgaat), gebeurt dit op een plaats waar de kromtestraal sterk verandert, dus ook de hoek waaronder de overstaplijn de hartlijn kruist. Het gevolg

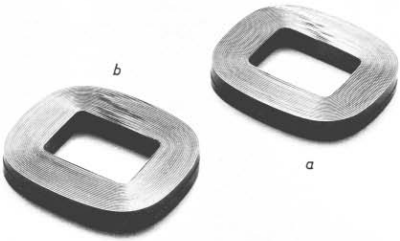


Fig. 12. Rechthoekige orthocyclische spoelen. Aan de figuur die de uiteinden van de overstaplijnen op de kopvlakken van de spoelen vormen, is te zien dat bij spoel *a* de overstappen „de hoek om" gaan en dat ze bij spoel *b* tot één zijvlak beperkt zijn gebleven.

is dat ter plaatse van de ribbe de overstaplijn afbuigt, zodat er op deze ribbe één winding zal ontbreken. Aldus vormt er zich een onregelmatigheid, en deze wordt voortdurend erger naarmate het aantal lagen toeneemt. Ten slotte wordt de wikkeling wild.

Er is nog een tweede reden die het bij rechthoekige spoelen wenselijk maakt, alle overstappen op één zijvlak te houden. Men denke b.v. aan de spoel van een transformator waarvan de kern is samengesteld uit E- en I-vormige blikken: aan de twee tegenover elkaar liggende zijvlakken die zich in de vensters van de kern bevinden (laten we deze zijvlakken *A* en *C* noemen), dient de wikkelhoogte zo klein mogelijk te zijn. Men zal dus trachten de overstappen te beperken tot een van de andere zijvlakken (*B* of *D*), die zich buiten de vensters bevinden.

Een speciale constructie van de wikkelmal veroorlooft een zodanige beheersing van de overstaplijnen dat de overstappen niet „de hoek om" gaan, maar alle op één zijvlak blijven. Aan de figuur die de uiteinden van de overstaplijnen op de kopvlakken van de spoel vormen, is te zien of de overstappen zich al dan niet op één zijvlak bevinden. Bij spoel *a* in *fig. 12* is dit niet het geval, bij spoel *b* wel.

Aan de zijvlakken *A* en *C* zullen de windingen, in een mate die afhangt van de mechanische spanning in het toegevoerde draad, enigszins bol staan, dus — als we weer aan de transformatorspoel denken — meer ruimte in het venster in beslag nemen dan nodig is. Men kan deze ruimte terugwinnen door de genoemde windingsdelen tijdens of na het verhitten recht te drukken. De isolatie loopt daarbij geen gevaar, aangezien de zijvlakken *A* en *C* vrij van kruisingen zijn. In *fig. 13* is bij spoel *a* het rechtdrukken niet en bij spoel *b* (aan drie kanten) wel gebeurd.

Vergelijking van orthocyclische spoelen met anders gewikkelde spoelen

In het bovenstaande zijn twee belangrijke voordelen van orthocyclische ten opzichte van andere spoelen gebleken:

1) De vulfactor van orthocyclische spoelen bereikt de theoretische maximumwaarde. Bij gevolg is de spreiding in de vulfactor, dus ook in de uitwendige afmetingen, uitzonderlijk klein.
2) Doordat in orthocyclische spoelen iedere winding op de voorgeschreven plaats ligt, is het spanningsverschil tussen elk paar naburige windingen goed gedefinieerd, en voor het grootste spanningsverschil tussen naburige windingen dat in de spoel voorkomt, is verg. (1) van kracht. Men kan dus tevoren nagaan of dit grootste spanningsverschil voor de isolatie toelaatbaar is, dan wel of men moet overgaan op wikkelen met isolerende tussenlagen. (In dit laatste geval heeft orthocyclisch wikkelen natuurlijk geen zin meer.)

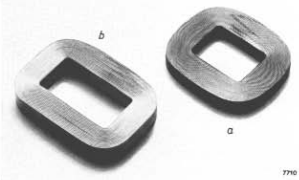


Fig. 13. Rechthoekige orthocyclische spoelen, beide met alle overstappen op één zijvlak. Bij spoel *a* staan de windingen nog enigszins bol. Bij spoel *b* zijn ze (aan de drie kanten zonder overstappen) rechtgedrukt, waardoor enige ruimte wordt gewonnen.

Hieronder volgen nog verdere belangrijke eigenschappen waarin orthocyclische spoelen zich van andere spoelen onderscheiden.

3) *Onveranderlijkheid van de vorm*

Dank zij het thermoplastische bindmiddel vormen de windingen van een orthocyclische spoel één zeer stevig geheel, veel steviger dan bij een wild gewikkelde spoel met een even dikke thermoplastische laag. Dit komt doordat de windingen van een orthocyclische spoel elkaar over hun gehele lengte nauw omsluiten. Deze stevigheid maakt dat orthocyclische spoelen aanzienlijke mechanische krachten verdragen zonder dat er windingen losraken. Door deze eigenschap zijn orthocyclische spoelen bijzonder geschikt voor toepassingen waarin ze aan sterke trillingen zijn blootgesteld, zoals rotorspoelen van motoren en luidsprekerspoelen. Op orthocyclische luidsprekerspoelen komen we aanstonds bij bespreking van afzonderlijke toepassingen terug.

4) *Goede warmtegeleiding*

De warmte die in een spoel wordt ontwikkeld, moet worden afgevoerd via het buitenoppervlak. Er ontstaat dus een temperatuurgradiënt in de spoel. Met het oog op de levensduur van de isolatie mag de hoogste temperatuur die in de spoel voorkomt, een bepaalde waarde niet overschrijden [4]). Daar echter het punt met de hoogste temperatuur voor een meting meestal niet toegankelijk is, neemt men in de praktijk genoegen met het bepalen van de gemiddelde temperatuur, die afgeleid wordt uit de eenvoudig te meten verhoging welke de elektrische weerstand van de spoel tijdens het warm worden ondergaat. Bij niet-orthocyclische spoelen kan het gemakkelijk voorkomen dat de hoogste temperatuur (binnenin) b.v. 10 °C hoger is dan de laagste temperatuur (aan het buitenoppervlak) en 5 °C hoger dan de gemiddelde temperatuur.

Orthocyclische spoelen echter geleiden de warmte zo goed dat er bij normaal gebruik geen merkbaar temperatuurverschil tussen het inwendige en de buitenzijde ontstaat. Voor de warmtegeleidingscoëfficiënt van orthocyclische spoelen, loodrecht op de richting van de draad, is gevonden: 1 W/m² per °C/m (= 0,85 kcal/mh°C), dat is 20 maal zo groot als bij spoelen met papiertussenlagen! Als men in het voorbeeld van zoëven overgaat op een orthocyclische spoel, zal men dus de temperatuur van deze spoel, zonder gevaar voor de isolatie, 5 °C hoger mogen laten worden dan de gemiddelde temperatuur van de niet-orthocyclische spoel. Dit nu vormt een welkome compensatie voor de omstandigheid dat orthocyclische spoelen, door hun grote vulfactor, kleiner van volume zijn dan niet-orthocyclische en daardoor in de regel ook kleiner van oppervlakte. Door de betere warmtegeleiding wordt de orthocyclische spoel, bij gelijke binnentemperatuur, van buiten warmer dan de niet-orthocyclische en kan hij dus voor het afvoeren van een bepaalde hoeveelheid warmte per seconde toe met een kleinere oppervlakte.

5) *Grote kwaliteitsfactor*

Een direct gevolg van de grote vulfactor van orthocyclische spoelen, bij een gegeven aantal windingen van draad met gegeven dikte, is een relatief kleine lengte van de draad. Daardoor is de verhouding van de elektrische weerstand R tot de zelfinductie L kleiner dan bij niet-orthocyclische spoelen, en de kwaliteitsfactor $Q = \omega L/R$ dus relatief groot.

6) *Kleine spreiding in zelfinductie en eigen capaciteit*

Als gevolg van het feit dat in orthocyclische spoelen de plaats van iedere winding nauwkeurig gedefinieerd is, hebben de zelfinductie en de eigen capaciteit een bijzonder kleine spreiding. Dit is van belang bij balanstransformatoren, die, zoals in de telefonie, moeten voldoen aan strenge eisen van symmetrie. Bij balanstransformatoren met gewone spoelen is de symmetrie alleen te verkrijgen door het gebruik van trimcondensatoren. Met orthocyclische spoelen zijn deze in de regel overbodig.

In gevallen waarin het aankomt op zeer geringe eigen capaciteit, is men aangewezen op spoelen met grote wikkelhoogte en kleine wikkelbreedte (schijfspoelen).

Over de spreiding in de weerstand is in het voorgaande al gesproken (blz. 387).

Toepassingen van orthocyclische spoelen

Uiteraard waren in de beginperiode van het orthocyclisch wikkelen, dat nu al gedurende een aantal jaren in onze fabrieken wordt toegepast, verschillende factoren die op het resultaat van invloed zijn, nog onvoldoende onderzocht: factoren zoals de vereiste nauwkeurigheid in de draaddikte en in de afmetingen van de wikkelmal, het juiste patroon van de eerste laag, enz. In verband hiermee werden van de wikkelaar meer inzicht en grotere handvaardigheid vereist dan het geval was bij de van ouds bekende wikkeltechniek. Dit maakte een lange inleerperiode noodzakelijk, en in de fabricage was het tempo traag en de uitval nu en dan groot. In die tijd waren ortho-

[4]) Voor het verband tussen de levensduur en de temperatuur, zie b.v. Th. Hehenkamp. De levensduur van voorschakelapparaten voor gasontladingslampen. I. Transformatoren en smoorspoelen. Philips techn. T. **20**, 18-28, 1958.

cyclische spoelen dan ook relatief duur en kon van seriefabricage nog geen sprake zijn. Daarom bleven de toepassingen aanvankelijk beperkt tot enkele professionele gevallen. Tegenwoordig echter worden alle omstandigheden die van invloed zijn, in voldoende mate beheerst, met het gevolg dat het orthocyclisch wikkelen nu ook doordringt in onze massafabricage.

Van beide categorieën van toepassingen geven we een aantal voorbeelden.

Professionele toepassingen

1) Het 600-MeV-synchrocyclotron van de CERN te Genève is voorzien van een modulator, die de frequentie van de versnellingsspanning periodiek (55 maal per seconde) doet zwaaien van ca. 29 tot 16,5 MHz. Deze modulatie wordt tot stand gebracht met behulp van een trilcondensator, die hier de vorm van een reusachtige stemvork heeft [5]). Deze wordt in trilling gebracht door het veld van orthocyclische spoelen, waar een stroom met de frequentie 27,5 Hz doorheen loopt. Zowel de „stemvork" als de spoelen bevinden zich in vacuüm.

De voornaamste redenen waarom orthocyclische spoelen zijn gekozen, zijn de grote vulfactor (de beschikbare ruimte was zeer beperkt), de goede warmteafvoer en de bestandheid tegen trillingen. Bij het evacueren werd geconstateerd dat de spoelen bijzonder weinig gas afgaven en dat de pomptijd bijzonder kort was.

2) In de fabricage van gloeilampen gebeurt het vullen van de lampen met gas via een klep die door een elektromagneet wordt bediend. Uit constructieve overwegingen werd grote waarde gehecht aan minimale afmetingen van de magneet. Daarom was een orthocyclische spoel hier de aangewezen oplossing.

3) Voor de permanente controle van stoomturbines zijn elektronische apparaten ontwikkeld die de trillingsamplitudes en de lengteveranderingen die zich op verschillende plaatsen van de machine voordoen, voortdurend registreren [6] [7]). Zo wordt b.v. de excentriciteit van de as gemeten met behulp van een inductieve verplaatsingopnemer, waarvan het principe is weergegeven in *fig. 14*. De spoelen van de opnemer maken deel uit van een brugschakeling, die met wisselstroom wordt gevoed. De brug moet bij excentriciteit nul in evenwicht zijn en bij verstoring van het evenwicht een signaal geven dat met de excentriciteit evenredig is. Een storende omstandigheid echter is dat de spoelen onderling vaak aanmerkelijk verschillen in temperatuur en dus ook in weerstand. De brugschakeling is daardoor bij excentriciteit nul niet altijd precies in evenwicht en het geleverde signaal is niet meer alleen van de excentriciteit afhankelijk. De fout is des te kleiner naarmate de weerstand van de spoelen, bij gegeven zelfinductie, lager is, dus naarmate de kwaliteitsfactor Q groter is. In dit opzicht zijn orthocyclische spoelen, zoals we hebben gezien, in het voordeel boven niet-orthocyclische.

Hetzelfde geldt voor andere inductieve verplaatsingopnemers die bij turbines worden gebruikt (zie fig. 9 en 10 van het in [6]) aangehaalde artikel).

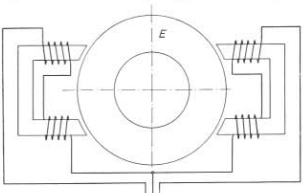


Fig. 14. Inductieve verplaatsingopnemer voor het permanent controleren van de excentriciteit van een turbineas [6]). Op de as is een schijf E van een nikkel-ijzerlegering bevestigd. Aan weerskanten van de schijf bevindt zich een ijzeren juk met spoelen, die deel uitmaken van een met wisselstroom gevoede brugschakeling. Bij gelijke weerstanden van de spoelen is het signaal dat de brug levert, evenredig met de excentriciteit. Ongelijkheid van de weerstanden (door ongelijke temperaturen) veroorzaakt een meetfout. Deze is des te kleiner naarmate de kwaliteitsfactor Q van de spoelen groter is. Dit is één van de redenen waarom hier orthocyclische spoelen worden gebruikt.

4) Focusseerspoelen voor lopendegolfbuizen. Een van de soorten elektronenbuizen voor het versterken of opwekken van centimetergolven is de lopendegolfbuis. In deze buis plant een elektromagnetische golf zich voort langs een gespiraliseerde metaaldraad, terwijl een elektronenbundel langs de as van de spiraal wordt gezonden [8]). De bundel wordt gefocusseerd door een magnetisch veld. Dit veld moet in axiale richting een bepaald verloop hebben en voldoen aan strenge eisen van rotatiesymmetrie. Bij de meeste typen lopendegolfbuizen wordt het veld opgewekt door permanente magneten. Bij som-

[5]) B. Bollée en F. Krienen, Het 600-MeV-synchrocyclotron van de CERN te Genève, III. De stemvork-modulator. Philips techn. T. **22**, 170-189, 1960 (no. 5). — De aandrijving is daar weergegeven in fig. 11 en 12.

[6]) C. von Basel, H. J. Lindenhovius en G. W. van Santen, Elektronische apparatuur voor de permanente controle van turbines, Philips techn. T. **17**, 53-62, 1955.

[7]) C. von Basel, Messanlage zur Überwachung von Dampfturbinen, Arch. techn. Messen V 8232-2, 221-224, oktober 1956.

[8]) J. G. van Wijngaarden, Un tube à propagation d'ondes pour la bande de 3800 à 5000 MHz, Le Vide **15**, 36-40, 1960.

mige typen voor groot vermogen echter moet het veld zo sterk zijn en zich axiaal over een zo grote lengte uitstrekken dat voor de focussering alleen een elektromagneet in aanmerking komt. Het gewenste axiale verloop van de veldsterkte is te verkrijgen door drie spoelen van verschillende vorm naast elkaar te plaatsen: twee schijfspoelen met ertussenin een langere en dunnere spoel. Ronde orthocyclische spoelen hebben hier in vergelijking met wild gewikkelde niet alleen de bekende voordelen van kleinere afmetingen en verwaarloosbare spreiding in de afmetingen, maar bovendien voldoen ze, door de regelmaat van de wikkeling, bijzonder goed aan de eis van rotatiesymmetrie.

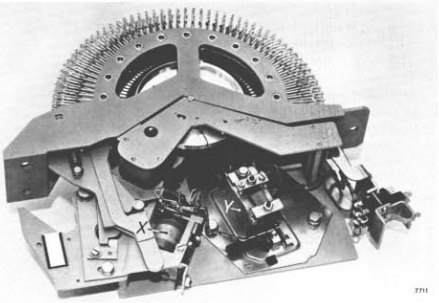


Fig. 15. Snelle draaikiezer type U 45a [9]). De koppelmagneet X en de stopmagneet Y zijn beide voorzien van een orthocyclische spoel.

Wij noemen hier ook een van de weinige gevallen waarin het orthocyclisch wikkelen geen succes was. Bij het zoeken naar een constructie voor een grote röntgeninstallatie waarbij de hoogspanningstransformator en de röntgenbuis tot één geheel verenigd konden worden, bleek een kleinere en lichtere transformator wenselijk. Deze werd verkregen door de met papiertussenlagen gewikkelde hoogspanningsspoel te vervangen door een orthocyclische spoel. Deze had echter het bezwaar van een te grote eigen capaciteit. Weliswaar kon dit bezwaar ondervangen worden door in plaats van één spoel een aantal platte, in serie geschakelde, orthocyclische schijfspoelen te nemen, maar toen werd de spanning tussen de opeenvolgende schijfspoelen zo hoog (in de orde van 10 kV) dat er moeilijkheden ontstonden door corona en overslag. Het aanbrengen van voldoende isolatie maakte zulke grote afstanden tussen de spoelen nodig dat de besparing aan ruimte en gewicht die het orthocyclisch wikkelen had opgeleverd, geheel verloren ging.

Toepassingen in massa-artikelen

De laatste jaren heeft men in onze fabrieken het orthocyclisch wikkelen zodanig onder de knie gekregen dat het ook in de massafabricage op grote schaal wordt (of zal kunnen worden) toegepast. Hier volgen enige voorbeelden.

1) Telefoonkiezers. In de snelle draaikiezer type U 45a van Philips' Telecommunicatie-industrie [9]) (*fig. 15*) worden orthocyclische spoelen gebruikt, zowel voor de koppelmagneet, die de as van de contactborstels koppelt met een permanent draaiende as, als voor de stopmagneet, die de borstels op de gewenste plaats tot stilstand brengt. Het gebruik van orthocyclische spoelen betekent hier, zoals we in het begin van dit artikel hebben gezien, vooral een besparing aan vermogen en vermindert dus de warmteontwikkeling in de telefoncentrales, waar de talrijke kiezers en relais meestal de voornaamste bron van warmte zijn.

2) De spoel van elektrodynamische luidsprekers wordt gewikkeld op een kokertje, dat vervolgens aan de conus wordt gelijmd. Het kokertje is weliswaar dun van wand, maar vergt toch een zekere ruimte in de luchtspleet van de magneet, en fracties van een millimeter zijn hier al van belang. Bovendien moet de luchtspleet er nog op berekend zijn dat de meeste spoelen, wegens de vrij geringe stijfheid in radiale richting, afwijkingen van de cirkelronde vorm vertonen.

Door de spoel orthocyclisch te wikkelen, kan men, dank zij het feit dat er een methode is ontwikkeld om een zelfdragende spoel bijzonder stevig aan de conus te bevestigen, in de eerste plaats de spoelkoker laten vervallen. Bestaat de spoel uit verscheidene lagen — wat zeker het geval is bij spoelen met hoge weerstand [10]) —, dan wordt door orthocyclisch wikkelen

[9]) J. M. Unk, Een snelle draaikiezer voor automatische telefonie, Philips techn. T. **18**, 366-376, 1956.

[10]) J. Rodrigues de Miranda, Laagfrequentieversterkers met direct gekoppelde luidspreker, Philips techn. T. **19**, 1-10, 1957.

bovendien de wikkelhoogte merkbaar kleiner. En voorts is de radiale stijfheid van orthocyclische spoelen vele malen groter dan die van spoelen volgens de oude constructie. De luchtspleet zal bij gebruik van een orthocyclische spoel dus om verschillende redenen nauwer kunnen worden gemaakt, waardoor de luidspreker een hoger rendement krijgt of minder magneetstaal nodig heeft. Een ander voordeel is de grotere bestandheid van orthocyclische spoelen tegen trillingen.

3) Bij elektrodynamische microfoons werd ook vroeger al een zelfdragende (maar niet-orthocyclische) spoel gebruikt. Als men deze spoel orthocyclisch wikkelt, kan men de luchtspleet vernauwen, waardoor de microfoon gevoeliger wordt.

4) Door over te gaan op orthocyclisch wikkelen van de spoel van weekijzermeters heeft men zoveel meer windingen kunnen onderbrengen dat de gevoeligheid van de meters 2 tot 2,5 maal zo groot is geworden als voorheen.

5) Draagbare elektronische apparaten die uit een batterij worden gevoed, dienen klein van afmetingen te zijn en een zo gering mogelijk vermogen op te nemen. Bij het ontwerpen van een motor voor batterijgrammofoons en -magnetofoons bleek orthocyclisch wikkelen van de rotorspoelen zoveel ruimte te besparen dat de rotor aanzienlijk lichter kon worden dan met wild gewikkelde spoelen. Door de geringere hoeveelheid ijzer zijn ook de ijzerverliezen kleiner, wat tot uiting komt in een ruim 25% kleiner opgenomen vermogen. Een tweede voordeel van orthocyclische spoelen is de verwaarloosbare spreiding in hun massa, waardoor ze geen bijdrage tot onbalans van de rotor leveren. *Fig. 16* toont de rotor met zijn drie orthocyclische spoeltjes.

6) Voorschakelapparaten voor „TL" lampen in vliegtuigen. Buisvormige fluorescentielampen vinden wegens hun hoog rendement meer en meer toepassing in verschillende verkeersmiddelen [11]), waaronder tegenwoordig ook vliegtuigen. Verkeersvliegtuigen kunnen voorzien zijn van b.v. 20 „TL" lampen van 40 W. Zoals bij alles wat tot de uitrusting van vliegtuigen behoort, dient het gewicht van de voorschakelapparaten tot het uiterste beperkt te worden. Door de smoorspoel orthocyclisch te wikkelen, is het gewicht van het voorschakelapparaat (bestaande uit een smoorspoel en een condensator) voor een 40-W-lamp beperkt kunnen worden tot 195 gram, voor de netten van 115 V, 400 Hz, die voor vliegtuigen genormaliseerd zijn. In *fig. 17* is zo'n voorschakelapparaat afgebeeld.

[11]) L. P. M. ten Dam en D. Kolkman, Verlichting in treinen en andere verkeersmiddelen door middel van „TL" lampen, Philips techn. T. **18**, 28-35, 1956.

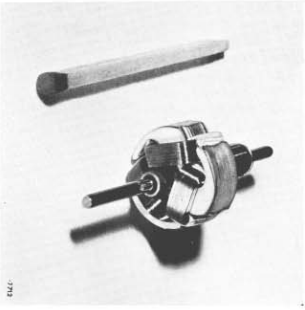


Fig. 16. Rotor van de motor van uit een batterij gevoede draagbare grammofoons en magnetofoons. De drie spoeltjes zijn orthocyclisch gewikkeld, waardoor de motor kleiner is en minder vermogen opneemt.

7) Elektromagnetisch bestuurde luchtkleppen. In de machinebouw maakt men voor bepaalde bewegingen, die meestal door een elektrisch commando moeten worden ingeleid, gaarne gebruik van een luchtcilinder. Dit in wezen eenvoudige onderdeel vergde tot voor kort een uitgebreide pneumatische schakeling. Deze omvatte namelijk, behalve de luchtcilinder zelf benevens een filter en een smeertoestel: één of twee elektromagnetisch bestuurde ontluchtingskleppen, een hierdoor bediende servoschuif en één of twee regelbare smoorventielen

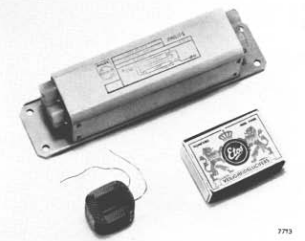


Fig. 17. Voorschakelapparaat van een „TL" lamp 40 W voor aansluiting op een net van 115 V, 400 Hz, zoals genormaliseerd is voor vliegtuigen. De smoorspoel en de bijbehorende condensator wegen samen slechts 195 gram. Links vooraan de orthocyclisch gewikkelde spoel.

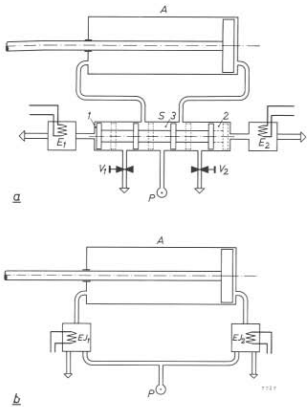


Fig. 18. *a*) Luchtcilinder *A* met persluchtleiding *P* en bijbehorende pneumatische apparatuur: servoschuif *S*, elektromagnetisch bediende ontluchtingskleppen E_1-E_2 en regelbare smoorventielen V_1-V_2.

In de stand van de schuif *S* die met getrokken lijnen is getekend, staat de ruimte links van de zuiger in *A* in verbinding met *P*, terwijl de ruimte rechts van de zuiger via V_2 verbinding met de buitenlucht heeft. De zuiger bevindt zich dus geheel rechts. De ruimten *1* en *2* in *S* staan door (niet getekende) kanalen in de schuif in verbinding met de voortdurend onder overdruk staande kamer *3*. Zolang de kleppen E_1 en E_2 dicht zijn, heerst in *1* en *2* dus dezelfde overdruk als in *3*.

Om de zuiger in *A* naar links te doen gaan, opent men klep E_2; de overdruk in *2* verdwijnt, de servoschuif gaat in de gestippelde stand staan, de ruimte rechts van de zuiger in *A* komt in verbinding met *3* (en daardoor met *P*), terwijl uit de ruimte links van de zuiger de lucht ontwijkt via V_1. De zuiger gaat dus naar links, met een snelheid die regelbaar is met V_1. Om de zuiger weer naar rechts te doen gaan, sluit men E_2 en opent men E_1.

b) De luchtcilinder *A* wordt nu nog slechts bediend door de twee „Electrojet" kleppen EJ_1 en EJ_2 (van Martonair). Deze vervangen zowel de schuif *S* als de ontluchtingskleppen E_1-E_2 in (*a*), en moeten daartoe een doorlaat van ten minste dezelfde grootte als *S* hebben. Regelbare uitlaatopeningen maken dat ze tevens de taak van de smoorventielen V_1-V_2 kunnen vervullen. De „Electrojet" kleppen werken met orthocyclische spoelen (kleine afmetingen, goede warmteafvoer.)

plus de bijbehorende pijpen en fittingen. Een voorbeeld van zo'n schakeling (waarop vele varianten mogelijk zijn) is weergegeven in *fig. 18a*.

Een belangrijke vereenvoudiging betekent het systeem „Electrojet", ontworpen en in de handel gebracht door de N.V. Martonair te Amsterdam. Fig. 18*b* laat zien hoe ver met dit systeem de schakeling van fig. 18*a* kan worden vereenvoudigd. Behalve de luchtcilinder zijn nu nog slechts twee elektromagnetische kleppen van het nieuwe type nodig, die het werk van de servoschuif, de twee ontluchtingskleppen en de twee smoorventielen overnemen. De „Electrojet" klep is uitwendig niet groter dan de oorspronkelijke ontluchtingsklep. Hij moet echter, om de servoschuif te kunnen vervangen, een aanzienlijk grotere doorlaat hebben en daarom moet de elektromagneet een grotere kracht ontwikkelen. Dit laatste is mogelijk geworden mede door het gebruik van een orthocyclische spoel; dank zij de goede warmtegeleiding kan deze zo zwaar worden belast dat hij in staat is, het vereiste grotere aantal ampèrewindingen te leveren zonder te warm te worden.

Voor de meeste luchtcilinders die in de bij Philips gebruikte machines toepassing vinden, is de doorlaat van de „Electrojet" klep groot genoeg. Hij laat voldoende lucht door om bij 4 atm overdruk een zuiger van 4″ diameter tegen een kracht van 300 kg in te verplaatsen met een snelheid van ca. 17 cm/s, of een zuiger van $1\frac{1}{4}$″ diameter tegen 30 kg in met een snelheid van ca. 170 cm/s.

Met deze voorbeelden mogen in voldoende mate de gevarieerdheid der toepassingen van het orthocyclisch wikkelen en de voordelen daarvan zijn aangetoond. Het zal duidelijk zijn dat deze methode ook in vele andere gevallen met succes zal kunnen worden toegepast.

Samenvatting. Onder orthocyclisch wikkelen van spoelen wordt verstaan een zodanige manier van wikkelen dat het grootste deel van iedere winding de hartlijn van de spoel orthogonaal kruist. Mits de eerste laag volgens het juiste patroon is gelegd en bepaalde voorzorgen zijn genomen, worden de volgende lagen volkomen regelmatig en komt iedere winding op de voorgeschreven plaats te liggen, in de „groef" van de vorige laag. De stapeling van de windingen is de dichtst mogelijke. Het gevolg is 1) dat de vulfactor de theoretische maximumwaarde bereikt, 2) dat de hoogste tussen twee naburige windingen voorkomende spanning volkomen gedefinieerd is, en 3) dat de afmetingen, de zelfinductie en de eigen capaciteit van gelijksoortige spoelen bijzonder weinig uiteenlopen. Door het gebruik van „Thermoplac" draad verkrijgt men stevige zelfdragende spoelen van onveranderlijke afmetingen, die goed bestand zijn tegen trillingen. De warmtegeleiding van orthocyclische spoelen is zo groot (1 W/m °C, 20 maal zo groot als bij spoelen met papiertussenlagen) dat de temperatuurgradiënt verwaarloosbaar klein is en men een hogere temperatuur mag toelaten dan de gemiddelde temperatuur van niet-orthocyclische spoelen. Aan het slot worden verscheidene toepassingen van orthocyclische spoelen besproken (o.a. voor de focussering in lopendegolfbuizen, voor telefoonkiezers, weekijzermeters en kleine motoren) en de daarbij verkregen voordelen vermeld.