

mbo

Transformatoren

TECHNIEKSTAD



COLOFON

©2019 Kenteq, Hilversum

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand dan wel openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opname, of enige andere wijze, zonder voorafgaande toestemming van de uitgever.

Kenteq
Postbus 81
1200 AB Hilversum

info@techniekstad.nl

Inhoudsopgave

1	Elektromagnetisme	7
1.1	Elektromagnetisme	8
1.2	Magnetische inductie	11
1.3	Fluxdichtheid	11
1.4	Permeabiliteit	12
1.5	Magnetische weerstand van de kern	13
1.6	Veldsterkte van een spoel	15
1.7	Resultierend veld	16
1.8	Samenvatting	19
1.9	Antwoorden	22
2	Spoelen	23
2.1	Inductieverschijnselen	24
2.2	Wederzijdse inductie	25
2.3	Spanningsstoot	27
2.4	Principe van een generator	29
2.5	Coëfficiënt van zelfinductie	31
2.6	Snellere berekening L	34
2.7	Veldsterkte van een spoel	36
2.8	Hysteresislus	40
2.9	IJzerverliezen	43
2.10	Samenvatting	45
2.11	Antwoorden	48
3	Vermogen	49
3.1	Vermogens	50
3.2	Vermogen en $\cos \phi$	54
3.3	Samenvatting	57
3.4	Antwoorden	58
4	Vermogens in driefasennetten	61
4.1	Vermogen in sterschakelingen	62
4.2	Inductieve en capacitieve belasting in ster	63
4.3	Vermogen in driehoekschakeling	66
4.4	Samenvatting	70
4.5	Antwoorden	71
5	Principe van de transformator	73
5.1	Elektromagnetisme	74
5.2	Wervelstroom en hysteresisverliezen	75
5.3	Elektromagnetische inductie	76
5.4	Grootte van de emk	78
5.5	Samenvatting	79
5.6	Antwoorden	80
6	Eénfasetransformator, opbouw en werking	83
6.1	Elektrische eigenschappen	83

6.2	Veldopbouw éénfasetransformator	86
6.3	Praktische stroomvergelijkingen	87
6.4	Samenvatting	88
6.5	Antwoorden	88
7	Éénfasetransformator, verliezen en rendement	89
7.1	Verliezen	90
7.2	Nullastproef	92
7.3	Kortsluitproef	93
7.4	Schijnbaar vermogen en werkelijk vermogen (wattvermogen)	94
7.5	Samenvatting	99
7.6	Antwoorden	100
8	Kortsluitproef	103
8.1	Kortsluitspanning	104
8.2	Kortsluitimpedantie	105
8.3	Kortsluitstroom	107
8.4	Kortsluitvermogen	109
8.5	Samenvatting	111
8.6	Antwoorden	112
9	Éénfasetransformator, uitvoeringsvormen	113
9.1	Kern en wikkeling	114
9.2	Speciale transformatoren	118
9.3	Samenvatting	133
9.4	Antwoorden	134
10	Driefasentransformatoren	137
10.1	Elektrische eigenschappen	138
10.2	Schakelingen	140
10.3	Samenvatting	151
10.4	Antwoorden	152
11	Codering van onderdelen	155
11.1	Elektrotechnische symbolen en pictogrammen	156
11.2	Codering van onderdelen	158
11.3	Klemaanduiding, kengetallen en kenletters voor laagspanningsmaterieel	158
11.4	Klemaanduiding voor vermogenstransformatoren	165
11.5	Stroomkringschema's	166
11.6	Kleuren van drukknoppen en signaallampen	174
11.7	Samenvatting	176
11.8	Antwoorden	177
12	Vragen	179
12.1	Vragen Elektromagnetisme	180
12.2	Vragen Spoelen	187
12.3	Vragen Vermogen	197
12.4	Vragen Vermogens in driefasennetten	201
12.5	Vragen Principe van de transformator	205
12.6	Vragen Éénfasetransformator, opbouw en werking	206
12.7	Vragen Éénfasetransformator, verliezen en rendement	209

12.8	Vragen Kortsluitproef	212
12.9	Vragen Éénfasetransformator, uitvoeringsvormen	216
12.10	Vragen Driefasentransformatoren	220
12.11	Vragen Codering van onderdelen	223

BRABE

INZELDE

1 Elektromagnetisme

Inleiding

Je kent het elektrisch veld zoals dat aanwezig is tussen de platen van een geladen condensator. Een tegenhanger van het elektrisch veld is het magnetisch veld. Ook in het magnetisch veld zit energie opgeslagen, net zoals bij een geladen condensator. Daar is ook energie in opgeslagen.

Je gaat leren dat een magnetisch veld bij een stroomvoerende geleider hoort. Andersom geldt dat ook. Een (veranderend) magnetisch veld veroorzaakt in een geleider een elektrische stroom. Je merkt dat dat een elektrische stroom en een magnetisch veld onafscheidelijk bij elkaar horen. Vandaar de naam elektromagnetisme.

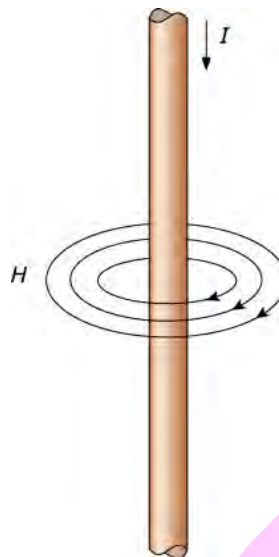
Leerdoelen

Je kunt:

- de werking van elektromagnetisme uitleggen
- magnetische spanning (magnetorische kracht) berekenen
- de fluxdichtheid berekenen
- het permeabiliteit uitleggen en berekenen
- de magnetische weerstand berekenen
- de veldsterkte van een spoel berekenen.

1.1 Elektromagnetisme

Om een stroomvoerende geleider ontstaat een magnetisch veld met een magnetische veldsterkte. De magnetische veldsterkte duid je aan met H . Dit magnetische veld is overal om de geleider aanwezig. De veldlijnen zijn cirkelvormig. De richting van de veldlijnen is afhankelijk van de stroomrichting. Om de richting van de veldlijnen te bepalen, maak je gebruik van de schroefdraadregel.



Stroomvoerende geleider met magnetisch veld

Stroomrichting

De stroom in een geleider geef je als volgt aan:

- Stroom vloeit van je af (achterkant van een pijl, kruisje).
- Stroom vloeit naar je toe (punt van een pijl, punt).

Veldrichting

De richting van de veldlijnen van het bijbehorend magnetisch veld geef je als volgt aan:

- Stroom van je af, veldrichting rechtsom.
- Stroom naar je toe, veldrichting linksom.



Stroom in de geleider stroomt van je af



Stroom in de geleider stroomt naar je toe



Veldlijnen van het magnetisch veld draaien rechtsom



Veldlijnen van het magnetisch veld draaien linksom

Aangeven stroom in geleider en bijbehorend magnetisch veld

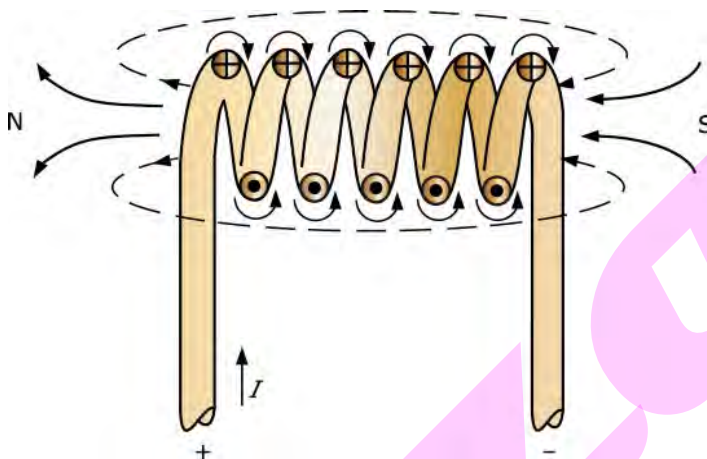
Spoel

Een spoel is een elektrische component dat bestaat uit wikkelingen van koperdraad op een spoelvorm.



Om een ronde kern gewikkelde spoel

Een spoel zonder kern noemen je een solenoïde of luchtspoel. Het magnetisch veld van een stroomvoerende spoel bepaal je met de schroefdraadregel. Je doet dit op de volgende manier:



Een rechte stroomvoerende spoel met zijn elektromagnetisch veld

1. Vanuit de stroomrichting bepaal je het veld om de geleider aan de bovenzijde en aan de onderzijde van de spoel.
2. Deze velden stel je samen tot een totaal veld.
3. Aan de hand van de richtingen van de krachtlijnen bepaal je de noord- en zuidpool.

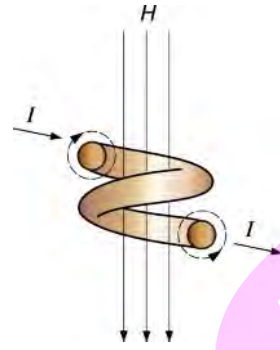
Van de spoel bekijk je één winding. Het totaal van alle krachtlijnen is de magnetische flux Φ . De flux Φ kun je als een magnetische stroom beschouwen. Deze ondervindt in de lucht van de spoel een magnetische weerstand R_m .

Wordt de magnetische weerstand kleiner, dan wordt de flux groter. Hier geldt dus hetzelfde als bij de elektrische spanning, stroom en weerstand. De 'magnetische spanning' noem je de magnetomotorische kracht, afgekort mmk. De magnetomotorische kracht mmk geef je aan met U_m (magnetische bronspanning) of met F_m .

Als je alles in formulevorm zet dan zie je dat het volgende geldt.

Magnetomotorische kracht (Wet van Hopkinson)	
$F_m = \Phi \cdot R_m$	
F_m	= mmk in ampère (A)
Φ	= magnetische flux in weber of voltseconde (Wb of Vs)
R_m	= magnetische weerstand of reluctantie in henry ⁻¹ (1/H of H ⁻¹)

Bij deze formule ga je uit van een spoel met één winding. Heeft een spoel meerdere windingen, dan wordt de mmk groter. Je kunt namelijk elke winding als een magnetische spanningsbron beschouwen. Een spoel is dus een serieschakeling van magnetische spanningsbronnen.



Elke winding is een magnetische spanningsbron

Je rekent deze serieschakeling uit door de stroom te vermenigvuldigen met het aantal windingen.

Magnetomotorische kracht	
$F_m = I \cdot N$	of $F_m = \Phi \cdot R_m$
F_m	= mmk in ampère (A)
I	= stroomsterkte in ampère (A)
N	= aantal windingen

Voorbeeld

Gegeven:
 Een spoel heeft 600 windingen.
 Door deze spoel vloeit een stroom van 3 A.

Gevraagd:
 Hoe groot is de mmk?

Oplossing:
 De mmk bedraagt dan: $F_m = I \cdot N = 600 \times 3 = 1.800 \text{ A}$

Voorbeeld

Gegeven:
 De magnetische weerstand van een spoel bedraagt 80.000 H⁻¹ en de flux Φ bedraagt $6 \times 10^{-3} \text{ Wb}$.

Gevraagd:
 Hoe groot is dan de mmk?

Oplossing:

De mmk bedraagt dan: $F_m = \Phi \cdot R_m = 6 \times 10^{-3} \times 80.000 = 480 \text{ A}$

Formules combineren

Beide formules voor de mmk zijn ook te combineren.
We krijgen dan:

$$F_m = I \cdot N = \Phi \cdot R_m$$

Door deze combinatie is de magnetische weerstand sneller uit te rekenen.

Voorbeeld

Gegeven:

Door een spoel met 300 windingen vloeit een stroom van 8 A.

De flux bedraagt $6 \times 10^{-3} \text{ Wb}$.

Gevraagd:

Bereken de magnetische weerstand.

Oplossing:

$$\text{Er geldt: } I \cdot N = \Phi \cdot R_m \Rightarrow 8 \times 300 = 6 \times 10^{-3} \cdot R_m$$

De magnetische weerstand:

$$R_m = \frac{8 \times 300}{6 \times 10^{-3}} = 400.000 \text{ H}^{-1} = 400 \times 10^3 \text{ H}^{-1}$$



1. Van een spoel met 450 windingen is de mmk 3200 A. Het aantal windingen wordt verdubbeld. Hoe groot is nu de mmk?

1.2 Magnetische inductie

Je brengt een materiaal met een goede magnetische geleiding (bijvoorbeeld zacht staal) vlak bij een spoel.

Onder invloed van het magnetische veld van de spoel zal dit materiaal ook magnetische eigenschappen vertonen. Dit verschijnsel noem je magnetische polarisatie, magnetische influentie of magnetische inductie. Wij noemen dit in het vervolg magnetische inductie. Hoe dicht je het materiaal bij de spoel brengt, hoe sterker de magnetische inductie wordt. In het hart van de spoel zijn de meeste krachtlijnen. Hier is de magnetische inductie het hevigst.

1.3 Fluxdichtheid

Door het hart van een stroomvoerende spoel loopt een hoeveelheid krachtlijnen. Met de fluxdichtheid B geef je aan hoeveel van deze krachtlijnen er in een bepaald oppervlak zijn.

De fluxdichtheid druk je uit in weber per vierkante meter (Wb/m^2) of tesla (T) en reken je uit met de volgende formule:

Fluxdichtheid	
$B = \frac{\Phi}{A}$	
B	= fluxdichtheid in weber per vierkante meter (Wb/m^2) of tesla (T)
Φ	= flux in weber (Wb) of volt-seconde (Vs)
A	= oppervlakte in vierkante meter (m^2)

Voorbeeld

Gegeven:

In een oppervlakte van 5 cm^2 is in een spoel een flux van 40 mWb .

Gevraagd:

Hoe groot is de fluxdichtheid?

Oplossing:

De oppervlakte van 5 cm^2 komt overeen met $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$.

De flux van 40 mWb (= milliveber) komt overeen met $40 \times 10^{-3} \text{ Wb}$.

Voor de fluxdichtheid geldt:

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{40 \times 10^{-3} \text{ Wb}}{5 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 8 \times 10 \text{ Wb/m}^2 = 80 \text{ Wb/m}^2 = 80 \text{ T}$$

1.4 Permeabiliteit

De fluxdichtheid B die ten gevolge van een magnetische inductie in een kern ontstaat, is sterk afhankelijk van het soort materiaal van de kern. Bij dezelfde veldsterkte H van een spoel zal dus de fluxdichtheid B van elk materiaal anders zijn. De verhouding tussen de veldsterkte H en de fluxdichtheid B noem je het magnetisch geleidingsvermogen of ook wel de permeabiliteit μ (spreek uit als mu).

Permeabiliteit is de mate waarin materiaal een magnetisch veld geleidt.

De permeabiliteit bereken je met de volgende formule:

Permeabiliteit	
$\mu = \frac{B}{H}$	of: $B = \mu \cdot H$
μ	= permeabiliteit in henry per meter (H/m)
B	= fluxdichtheid in weber per vierkante meter (Wb/m^2) of (T)
H	= veldsterkte van een spoel in ampère per meter (A/m)

De totale permeabiliteit μ is:

Totale permeabiliteit	
μ	$= \mu_0 \cdot \mu_r$
μ_0	= de permeabiliteit in een vacuüm: $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m
μ_r	= de relatieve permeabiliteit

Het getal voor de relatieve permeabiliteit heeft geen eenheid. Je bepaalt hiermee hoeveel keer beter een materiaal de magnetische krachtlijnen geleidt dan vacuüm.

Voorbeeld

Gegeven:

Een spoel heeft een veldsterkte van 7.500 A/m. In de kern is een fluxdichtheid van 3 T.

Gevraagd:

Bereken de (relatieve) permeabiliteit μ .

Oplossing:

Er geldt: $B = \mu \cdot H$

$$\text{dus: } \mu = \frac{B}{H} = \frac{3}{7.500} = 4 \times 10^{-4} \text{ H/m.}$$

$$\text{De relatieve permeabiliteit: } \mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{4 \times 10^{-4}}{4 \times \pi \times 10^{-7}} = 318$$



2. Wat is magnetische inductie?

1.5 Magnetische weerstand van de kern

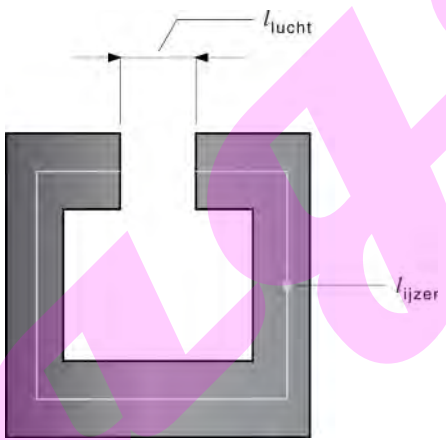
Je kunt de permeabiliteit of het magnetisch geleidingsvermogen vergelijken met het elektrisch geleidingsvermogen voor geleiders.

Je berekent de magnetische weerstand R_m met de volgende formule:

Magnetische weerstand	
$R_m = \frac{l}{\mu \cdot A}$	
R_m	= magnetische weerstand in henry ⁻¹ (1/H of H ⁻¹)
μ	= permeabiliteit in henry per meter (H/m)
A	= oppervlakte in vierkante meter (m ²)
l	= gemiddelde lengte van de kern in meter (m)

Weerstand in kern met luchtspleet

Als een kern een luchtspleet heeft, dan moet je de kern beschouwen als een serieschakeling van twee magnetische weerstanden. Je berekent dan eerst de magnetische weerstand van de kern en vervolgens die van de luchtspleet.



Kern met luchtspleet

Weerstand in kern met luchtspleet

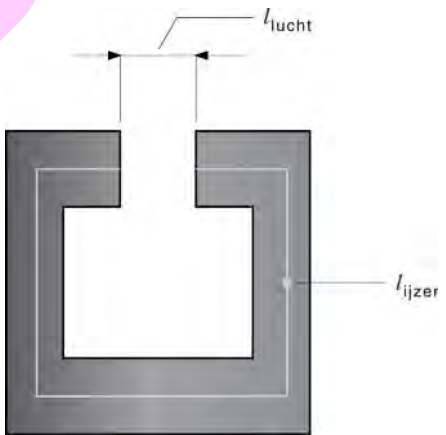
Als een kern een luchtspleet heeft, dan moet je de kern beschouwen als een serieschakeling van twee magnetische weerstanden. Je berekent dan eerst de magnetische weerstand van de kern en vervolgens die van de luchtspleet.

De luchtspleet in de kern vergroot de magnetische weerstand R_m sterk. Hierdoor vermindert de flux Φ sterk. De breedte van de luchtspleet en de lengte van de kern vormen een serieschakeling. De totale magnetische weerstand is de som van beide weerstanden:

$$R_{m_{tot}} = R_{m_1} + R_{m_2} + \text{enzovoort.}$$

Voor het kerndeel gebruik je de totale permeabiliteit μ en voor de luchtspleet gebruik je μ_0 .

Om de weerstand in een kern met een luchtspleet uit te rekenen pas je de volgende formule toe:



Kern met luchtspleet

Magnetische weerstand in de kern met luchtspleet	
$R_m = \frac{l_{\text{Ijzer}}}{\mu \cdot A} + \frac{l_{\text{Lucht}}}{\mu_0 \cdot A}$	$(\mu = \mu_0 \cdot \mu_r)$
R_m	= magnetische weerstand in henry ⁻¹ (1/H of H ⁻¹)
μ	= permeabiliteit in henry per meter (H/m)
A	= oppervlakte in vierkante meter (m ²)
l	= gemiddelde lengte van de kern in meter (m)

1.6 Veldsterkte van een spoel

Je kunt de veldsterkte H van een spoel berekenen met:

- het aantal windingen
- de stroom door de spoel
- de lengte van de spoel.

Je gaat er vanuit dat de lengte groter is dan de gemiddelde diameter. Wordt de stroomsterkte groter I , dan wordt ook de veldsterkte H groter. Maak je het aantal windingen groter, dan wordt ook de veldsterkte H groter. Wordt de spoel langer, dan gaan er meer krachtlijnen door de lucht en wordt de veldsterkte H kleiner (meer magnetische weerstand).

Je berekent de veldsterkte H van een spoel met de volgende formule:

Veldsterkte	
$H = \frac{I \cdot N}{l}$	
H	= veldsterkte van een spoel in ampère per meter (A/m)
I	= stroomsterkte in ampère (A)
N	= aantal windingen
l	= lengte van de spoel in meter (m)

$I \cdot N$ is de magnetomotorische kracht mmk. Hieruit kun je concluderen dat de veldsterkte afhankelijk is van de mmk en de lengte. Met andere woorden de veldsterkte H is afhankelijk van het aantal ampèrewindingen per meter.

Veldsterkte	
$H = \frac{F_m}{l}$	
H	= veldsterkte van een spoel in ampère per meter (A/m)
F_m	= magnetomotorische kracht in ampère (A)
l	= lengte van de spoel in meter (m)

Voorbeeld

Gegeven:

Een 5 cm lange spoel heeft 800 windingen.
Er vloeit een stroom door van 0,3 A.

Gevraagd:

Bereken de veldsterkte.

Oplossing:

Voor de veldsterkte geldt:

$$H = \frac{I \cdot N}{l} = \frac{0,3 \times 800}{0,05} = 4.800 \text{ A/m}$$

Als het kernmateriaal en de doorsnede bekend zijn, dan kun je ook de flux Φ en de fluxdichtheid B berekenen.

Voorbeeld

Als het kernmateriaal en de doorsnede bekend zijn, dan zijn ook de flux en de fluxdichtheid te berekenen.

Gegeven:

Door een spoel met 500 windingen vloeit een stroom van 600 mA.
De spoel is 4 cm lang en heeft een kern van zachtstaal ($\mu_r = 6000$) met een doorsnede van 3 cm².

Gevraagd:

Bereken de veldsterkte H , de fluxdichtheid B en de flux Φ .

Oplossing:

Voor de veldsterkte geldt:

$$H = \frac{I \cdot N}{l} = \frac{600 \times 10^{-3} \times 500}{4 \times 10^{-2}} = 7,5 \times 10^3 \text{ A/m}$$

De fluxdichtheid is:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = 4\pi \times 10^{-7} \times 6.000 \times 7,5 \times 10^3 = 56,5 \text{ T}$$

De flux Φ is:

$$\Phi = B \cdot A = 56,5 \times 3 \times 10^{-4} = 169,5 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

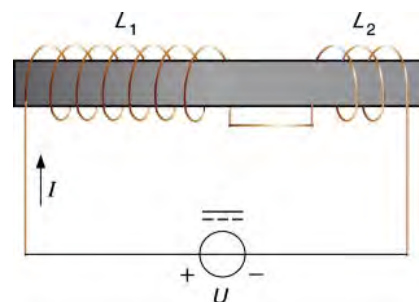
1.7 Resultierend veld

Als een spoel windingen heeft die tegengesteld zijn, dan ontstaat een resultierend veld.

Voorbeeld

Spoel L_1 heeft 700 windingen en spoel L_2 heeft 300 windingen.
De stroom is 2 A.

Het resultierend veld is: $(700 - 300) \times 2 = 800 \text{ AW}$.



Spoel met een winding in twee richtingen

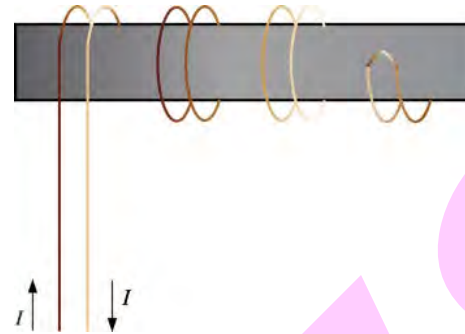
Je kunt het resultierend veld ook zo uitrekenen.

Het resulterend veld is: $(700 \times 2) - (300 \times 2) = 800 \text{ AW}$.

De laatste manier gebruik je bij voorkeur bij verschillende spoelen met verschillende spanningsbronnen op dezelfde kern. Hebben twee spoelen evenveel windingen die tegengesteld zijn aan elkaar, dan ontstaat er geen veld.

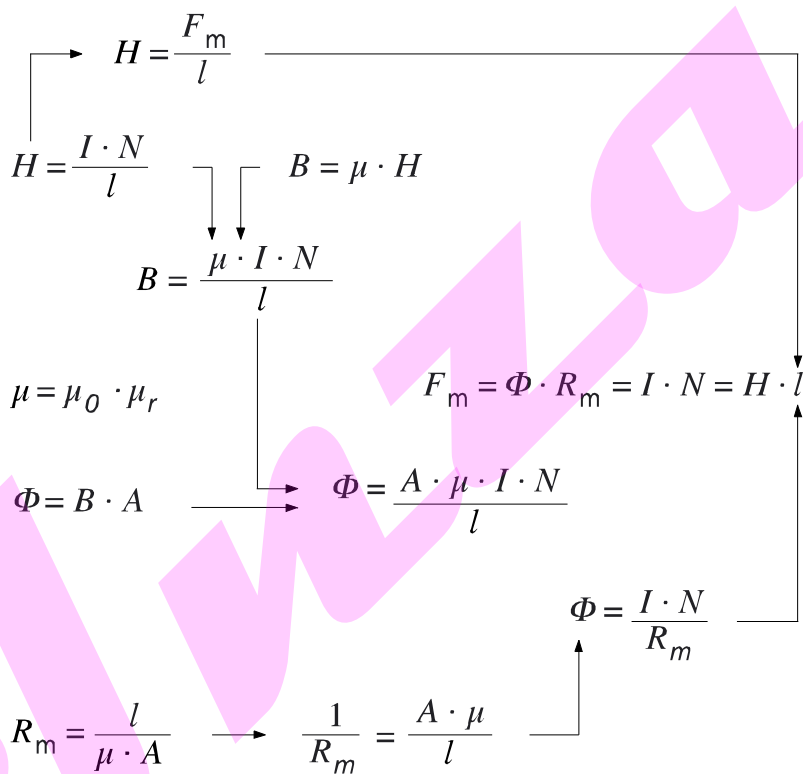
Bifilaire wikkelingen

Het resulterend veld in de afbeelding is nul. De spoel is bifilaire gewikkeld. Een bifilaire wikkeling is een dubbelgevouwen draad. Je past deze spoelen toe als je weerstanden wilt hebben die ongeveer gelijk moeten zijn voor magnetisme.



Het resulterend veld is nul

Verband tussen de formules



3. Wat is de permeabiliteit van een stof?



4. Wanneer gebruik je een bifilaire wikkeling om een spoel?

BRUNNEN

- Met de fluxdichtheid geef je de hoeveelheid krachtlijnen door een oppervlak aan. Je berekent de fluxdichtheid met de volgende formule.

Fluxdichtheid	
$B = \frac{\Phi}{A}$	
B	= fluxdichtheid in weber per vierkante meter (Wb/m ²) of tesla (T)
Φ	= flux in weber (Wb) of volt-seconde (Vs)
A	= oppervlakte in vierkante meter (m ²)

- De verhouding tussen de veldsterkte en fluxdichtheid is het magnetisch geleidingsvermogen of de permeabiliteit.

Permeabiliteit	
$\mu = \frac{B}{H}$	of: $B = \mu \cdot H$
μ	= permeabiliteit in henry per meter (H/m)
B	= fluxdichtheid in weber per vierkante meter (Wb/m ²) of (T)
H	= veldsterkte van een spoel in ampère per meter (A/m)

- De totale permeabiliteit μ is:

Totale permeabiliteit	
$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$	
μ_0	= de permeabiliteit in een vacuüm: $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m
μ_r	= de relatieve permeabiliteit

- De magnetische weerstand in de kern bereken je met de volgende formule.

Magnetische weerstand
$R_m = \frac{l}{\mu \cdot A}$
R_m = magnetische weerstand in henry ⁻¹ (1/H of H ⁻¹)
μ = permeabiliteit in henry per meter (H/m)
A = oppervlakte in vierkante meter (m ²)
l = gemiddelde lengte van de kern in meter (m)

- De magnetische weerstand in een kern met luchtspleet bereken je met de volgende formule.

Magnetische weerstand in de kern met luchtspleet
$R_m = \frac{l_{\text{Ijzer}}}{\mu \cdot A} + \frac{l_{\text{Lucht}}}{\mu_0 \cdot A} \quad (\mu = \mu_0 \cdot \mu_r)$
R_m = magnetische weerstand in henry ⁻¹ (1/H of H ⁻¹)
μ = permeabiliteit in henry per meter (H/m)
A = oppervlakte in vierkante meter (m ²)
l = gemiddelde lengte van de kern in meter (m)

- Veldsterkte om een spoel bereken je met de volgende formule.

Veldsterkte
$H = \frac{I \cdot N}{l}$
H = veldsterkte van een spoel in ampère per meter (A/m)
I = stroomsterkte in ampère (A)
N = aantal windingen
l = lengte van de spoel in meter (m)

1.9 Antwoorden

Antwoord 1

Het aantal windingen wordt verdubbeld dus ook de mmk, $3200 \times 2 = 6400$ mmk

Antwoord 2

Onder invloed van het magnetische veld van een spoel zal materiaal met een goede magnetische geleiding ook magnetische eigenschappen vertonen. Dit verschijnsel noem je magnetische inductie.

Antwoord 3

De permeabiliteit van een stof is de mate waarin het een magnetisch veld geleidt of het magnetisch geleidingsvermogen.

Antwoord 4

Je gebruikt een bifilaire wikkeling om een spoel als je een weerstand wil hebben die ongevoelig moet zijn voor magnetisme.