**Hfst 28 Magnetische inductie**

Michael Faraday (Engeland), Joseph Henry (VS) :

verandering van magneetveld veroorzaakt een veranderende magnetische flux doorheen een oppervlak dat wordt omsloten door een geleider. Deze fluxverandering veroorzaakt een emf en een stroom in de geleider !

emf’s en stromen die op deze wijze tot stand komen noemt men geïnduceerde emf’s en stromen.

Het verschijnsel op zich noemt men INDUCTIE.

Zij ontdekten ook dat hetzelfde fenomeen zich voordeed indien het magnetisch veld constant was maar de fluxverandering werd veroorzaakt door een beweging van de gesloten lus van de geleider . De aldus geïnduceerde emf noemt men een “bewegings” emf.

voorbeeld : bij uittrekken van stekker uit stopcontact zijn soms kleine vonkjes te zien. Dit komt omdat zolang er stroom door de draad loopt er een magneetveld rond de draad bestaat. Bij het verwijderen van de stekker, vermindert de stroom en dus verandert het magneetveld. Dit veranderend magneetveld induceert een emf in de draad die tracht de oorspronkelijke stroom te behouden.

Magnetische flux

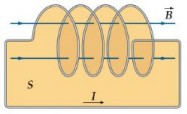
De flux van een vector veld door een oppervlak wordt op dezelfde manier berekend als de flux van een elektrisch veld door een oppervlak. Stel dA is een oppervlakte element op het oppervlak S, ^n is een eenheidsnormaal, een eenheidsvector normaal tov het oppervlakte element. Er zijn twee richtingen normaal tov een oppervlakte element, en welke van de twee als richting bepaald wordt voor de richting van ^n is een keuze. Maar, het teken van de flux hangt van deze keuze af. De magnetische flux door S is:



= BA cos θ = Bn A

De eenheid van magnetische flux is die van de magnetische veld intensiteit maal die van oppervlakte = T m² = Wb

Aangezien B proportioneel is tov het aantal vellijnen per eenheid van oppervlakte,is de magnetische flux proportioneel tot het aantal lijnen door een oppervlakte element.

Dikwijls zijn we geintereseerd in een winding met N 

lussen.

De flux = N x de flux door 1 lus

Totale oppervlak ingesloten door geleider wordt 4

maal gesneden door veldlijnen:

Flux x 4

Geinduceerde EMF’s en wet van Faraday

Experimenten van Faraday, Henry en anderen toonden dat als de magnetische flux door een oppervlak bepaald door een circuit op een manier veranderd wordt, dan wordt een emf van gelijke grootte tov de mate waarmee de flux verandert geinduceerd in het circuit. Geïnduceerde emf worden meestal gedetecteerd door het meten van de corresponderende stroom in een **gesloten** circuit.

Maar het blijkt dat deze emf steeds aanwezig zijn : ook als het circuit **niet** gesloten is en dus geen stroom ontstaat.

Tot nu toe beschouwden we emfs die gelocaliseerd waren ineen bepaald deel van het circuit, zoals tussen de polen van een batterij. Maar geinduceerde emfs kunnen gedistribueerd zitten doorheen heel het circuit.

magnetische flux doorheen een oppervlak ingesloten door een

circuit kan veranderd worden op verschillende manieren :

– de stroom die het B-veld veroorzaakt kan veranderd worden.

– permanente magneten kunnen naar oppervlak toe of van oppervlak weg bewogen worden. – het circuit kan geroteerd worden in een statisch B-veld

– het circuit kan verplaatst worden in een niet-uniform statisch B-veld.

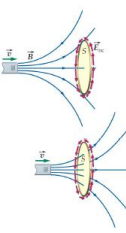
-- de orientatie vh circuit kan veranderd worden

– de oppervlakte die wordt ingesloten door het circuit kan kleiner/groter gemaakt worden in een uniform statisch B-veld.

In alle gevallen wordt een emf geinduceerd in het circuit die even groot is dan de mate waarin de magnetische flux veranderd door ( een oppervlak bepaald door) het circuit. Deze emf is : 

Dit resultaat staat bekend als de wet van Faraday.

Het minteken in de wet heeft te maken met richting van de geinduceerde emf, dit bespreken we later.

De figuur toont een enkele stationaire cirkelvormige draad in een 

magnetisch veld.

De flux dor de cirkel verandert omdat de magnetische veldsterkte

verhoogd wordt, zodat een emf geinduceerd wordt in de cirkel.

Aangezien emf de arbeid is die gedaan wordt per eenheid van

lading, weten we dat er krachten moeten inwerken op de

bewegende ladingen en arbeid op hen verrichten.

Magnetische krachten kunnen geen arbeid verrichten, dus, we

kunnen de emf niet toeschrijven aan de arbeid verricht door

magnetische krachten. Ht zijn elektrische krachten, geassocieerd

met een niet-conservatief elektrisch veld Enc die arbeid verrichten

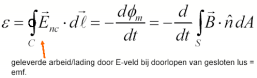
op de bewegende ladingen.

De lijnintegraal van dit elektrisch veld over een gesloten circuit =

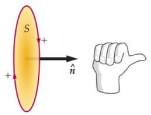
de arbeid verricht per eenheid van lading, welke de geinduceerde

emf in het circuit is.

De elektrische velden die we bestudeerd hebben in de vorige hoofdstukken kwamen voort uit een statische elektrische lading. Zulke elektrische velden zijn conservatief, wat betekent dat hun kringintegraal over een gesloten curve C nul is.

Daarentegen, het elektrische veld dat geassocieerd is met een veranderende magnetische flux is niet conservatief. Zijn kringintegraal over C is een emf, gelijk aan de negatieve mate van verandering van de magnetische flux door een oppervlak S vastgelegd door C: 

De wet van Faraday legt een verband tussen magnetische en elektrisch velden.

• Teken conventie : de positieve tangentiële richting langs 

het integratiepad C is verbonden met de normaal op het

oppervlak S dat ingesloten wordt door C zoals

weergegeven op de figuur.

We kunnen hiervoor de rechterhandregel gebruiken :

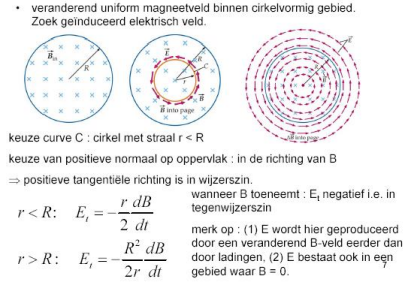
duim wijst in richting van normaal, dan geeft gekromde

hand de pos.

tangentiële richting. Als dΦm/dt > 0 dan (Faraday) zijn Enc

en ε in de negatieve tangentiële richting.

Voorbeeld:

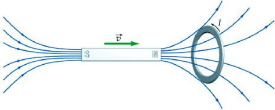


Wet van Lenz

Het minteken in de wet van Faraday heeft te maken met de richting van de geinduceerde emf. Deze kan bepaald worden adhv de tekenconventie beschreven in de vorige paragraaf, of adhv een algemeen fysisch principe gekend als de wet van Lenz:

**De geinduceerde emf is zodanig gericht dat hij de oorzaak van zijn ontstaan tracht tegen te werken.**

Merk op dat de wet van Lenz niet specifieert welke verandering de geinduceerde emf en stroom veroorzaakt. De verwoording van de wet van Lenz is opzettelijk vaag gehouden zodat verschillende condities onder de wet vallen. We zullen nu enkele van deze condities illustreren.

De figuur toont een staafmagneet 

die naar een lus met weerstand R

toe beweegt. Het is de beweging

van de staafmagneet naar rechts

dat de emf en stroom induceert in

de lus. De wet va nLenz vertelt

ons dat deze geinduceerde emf en

stroom in de richting moeten zijn

zodat ze de beweging van de

staafmagneet tegenwerken. Dat is, de stroom die geinduceerd wordt in de lus produceert een eigen magnetisch veld en dit magn veld moet een kracht uitoefenen naar links op de naderende staafmagneet. 

Deze figuur toont het

geinduceerde magnetisch moment

van de stroomlus wanneer de

magneet ernaartoe beweegt. De

lus gedraagt zich dan als een

kleien magneet met zijn

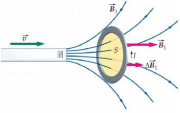
noordelijke pool naar links en zijn zuidelijke pool naar rechts. Aangezien gelijke polen elkaar afstoten, werkt het geinduceerde magnetisch moment van de lus de staafmagneet tegen. Dat is, het werkt zijn beweging naar de lus toe tegen. Dit betekent dat de richting van de geinduceerde stroom moet zijn zoals aangegeven op de figuur.

Stel dat de geinduceerde stroom in de lus in de andere richting zou geweest zijn. Dan zou er een magnetische kracht zijn opde naderende staafmagneet naar rechts, waardoor de snelheid van de magneet verhoogt wordt. Deze verhoging van de snelheid zou een toename in de geinduceerde stroom veroorzaken, welke op zijn beurt een toename van de kracht op de magneet zou veroorzaken, en zo verder. Dit is te mooi om waar te zijn. Elke keer we een staagmagneet naar een geleidende lus toe zouden laten bewegen, zou deze naar de lus toe bewegen met een alsmaar groter wordende snelheid en zonder enige inspanning van onszelf. Als dit zou gebeuren, dan zou het een overtreding zijn van de wet van behoud van energie. Dus in de realiteit wordt energie behouden en is de wet van Lenz consistent met deze realiteit.

Men gebruikt vaak een alternatieve formulering van de wet van Lenz in termen van de magnetische flux:

**Wanneer de magnetische flux doorheen een oppervlak verandert,dan produceert het magnetisch veld dat geïnduceerd wordt door de geïnduceerde stroom zelf ook een flux doorheen hetzelfde oppervlak maar in tegengestelde richting.**

Een voorbeeld van hoe deze alternatieve formulering gebruikt wordt:

We moeten de alternatieve formulering gebruiken om de richting van het magnetische veld tgv de geinduceerde stroom in de lus te bepalen. Daarna gebruiken we de rechter-hand-regel om de richting van de geinduceerde stroom te 

controleren.

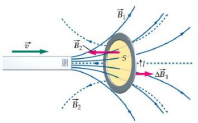
1. we tekenen een schema van de lus die een

plat oppervlak S afbakent. Op dit oppervlak

S tekenen we de vector ∆B1, welke de

verandering in het magnetische veld B1 is

van de naderende staafmagneet

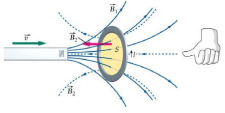
2. we tekenen de vector B2, welke het 

magnetische veld van de geinduceerde

stroom in de lus is. We gebruiken de

alternatieve formulering om de richting

van B2 te bepalen.

3. we gebruiken de rechter-hand-regel 

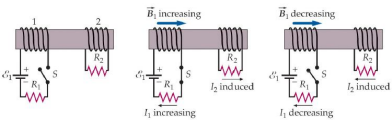
en de richting van B2 om de

richting van de geinduceerde stroom

in de lus te controleren.

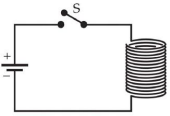
Wanneer we stellen dat de staafmagneet in rust is, en de lus van de magneet weg beweegt, dan trekt de staaf de lus aan, en werkt hiermee de beweging van de lus tegen, zoals geeist in de wet van Lenz.

Voorbeeld:



Wanneer de stroom in circuit 1 verandert, is er een verandering in magnetische flux in circuit 2. stel dat de schakelaar S in circuit 1 oorspronkelijk open is zodat er gen stroom is in eht circuit. Wanneer we de schakelaar toe doen, dan bereikt de stroom in circuit 1 zijn continue waarde ε1/R1 niet onmiddellijk maar duurt het een tijdje voordat de stroom van begin = 0 deze waarde heeft. Gedurende de tijd dat de stroom toeneemt, verandert de flux door circuit 2 en wordt er een stroom geinduceerd in circuit 2 in de aangeduide richting. Wanneer de stroom in circuit 1 zijn continue waarde bereikt, verandert de flux in circuit 2 niet meer zodat er niet langer een stroom geinduceerd wordt in circuit 2.

Een geinduceerde stroom in circuit 2 in de tegengestelde richting verschijnt ogenblikkelijk zodra de schakelaar in circuit 1 geopend wordt en de stroom afneemt naar 0. het is belangrijk om te begrijpen dat er alleen een geinduceerde emf is wanneer de flux verandert! De emf hangt niet af van de grootte van de flux zelf, maar alleen van zijn mate van verandering. Als er een grote continue flux is doorheen het circuit, is er geen geinduceerde emf.

En ander voorbeeld: 

Beschouw het enkele geisoleerde circuit zoals in de

figuur.

Als er een stroom in het circuit is, is er een

magnetische flux door de winding tgv zijn eigen

stroom. Als de stroom verandert, verandert ook de flux

in de winding en is er een geinduceerde emf in het

circuit zolang de flux verandert. Deze **zelfinducerende**

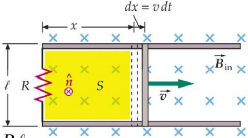
emf werkt de verandering in de stroom tegen.

= ZELFINDUCTIE! Men noemt deze daarom “back emf” of “tegen emf”. Door deze zelfinducerende emf, kan de stroom in het circuit niet onmiddellijk van nul naar een eindige waarde springen of omgekeerd van een eindige waarde naar nul.

De opstelling zoals in de figuur geeft een grote flux door het circuit voor zelfs een kleine stroom. Toen Joseph Henry het circuit wou breken merkte hij vonken op die uit de schakelaar kwamen. Zulke vonken zijn tgv de grote geinduceerde emf die optreedt wanneer de stroom snel verandert, zoals bij het openen van de schakelaar. In dit geval is de geinduceerde emf zo gericht dat hij de oorspronkelijke stroom wilt behouden. De grote geinduceerde emf produceert een groot potentiaal verschil over de schakelaar wanneer deze geopend wordt. Het elektrische veld tussen de contacten van de schakelaar is groot genoeg op dielektrische doorslag te produceren in de omringende lucht. Wanneer dieelektrische doorslag zich voordoet, geleidt de lucht de elektrische stroom in de vorm van een vonk.

Bewegings emf = Motional emf

De emf geinduceerd in een geleider die beweegt in een magnetisch veld = bewegings emf. Meer algemeen:

Bewegings emf is een emf geinduceerd door de beweging van een geleider in een magnetisch veld. 

Voorbeeld:

De figuur toont een dunne geleidende

draad die naar rechts schuift over

geleidende rails die verbonden zijn door

een weerstand. Een uniform magnetisch

veld B is in het blad gericht.

Beschouw de magn flux door het platte oppervlak S afgebakend door het circuit. Stel ^n de normaal nara het oppervlak is in het blad. Als de draad naar rechts beweegt, vergroot S, en ook de magn flux door S vergroot.

Dus, een emf wordt geinduceerd in het circuit.

Stel ℓ is de afstand tussen de rails en x is de afstand van het linker uiteinde van de rails naar de draad. Het oppervlak S is dan ℓx, en de magnetische flux door S is:



De emf geinduceerd in dit circuit hangt af van de mate van verandering van de flux: 

Het minteken vertelt ons dat de emf in de negatieve tangentiele richting is. We kunnen deze richting van de emf controleren met de rechter-hand-regel en de wet van Lenz.

De figuur toont een positieve ladingsdrager in een geleidende draad die met cste snelehid door een uniform magn veld (in het blad gericht) beweegt.

Omdat de ladingsdrager horizontaal mee beweegt met de draad, is er een opwaartse magnetische kracht op deze ladingsdrager met grootte qvB. Als antwoord op deze kracht, bewegen d e ladingsdrager opwaarts in de draad, hierbij een netto positieve lading aan de top van de draad producerend en een netto negatieve lading aan de onderkant van de draad. De ladingsdrager blijven opwaarts bewegen totdat het elektrische veld E|| geproduceerd door de gescheiden ladingen een neerwaartse kracht van grootte qE|| uitoefend op de gescheiden ladingen, waarbij de opwaartse magnetische kracht qvB gebalanceerd wordt. In evenwichtstoestand is de grootte van dit elektrisch veld in de draad:



De richting van dit Eveld is parallel met de draad, neerwaarts gericht. Het geassocieerde potentiaal verschil over de lengte ℓ vna de draad is:



Met de hoogste potentiaal bovenaan. Dat is, wanneer er geen stroom is door de draad, is het potentiaalverschil over dee draad gelijk aan vBℓ ( de bewegings emf). Wanneer er een stroom I doro de draad vloeit, is het potentiaal verschil:



Waarbij r de weerstand van de draad is.

De algemene uitdrukking voor de bewegings-emf is



Waarbij v de snelehid van de draad is op het element dℓ.

Deze emf wordt gegenereerd wanneer geleider beweegt in een magnetisch veld.

Eddy currents – wervelstromen

wervelstromen (stromen in gesloten lussen in het materiaal) die ontstaan in stuk (niet enkel dunne draden) metaal wanneer dit beweegt in een magneetveld of wanneer magneetveld verandert als functie van de tijd i.e. wanneer er een magnetische flux aanwezig is. Deze wervelstromen veroorzaken energieverliezen bv. In transformatoren tgv “Joule heating”.

Eddy stromen zijn niet altijd ongewenst. Vb, eddy stromen worden vaak gebruikt om ongewenste oscillaties te dempen.

We kunnen het bestaan van eddy stromen 

aantonen door een koper of alluminium blad te

trekken tussen de polen van een sterke

permanente magneet.

Een deel van het opp omsloten door curve C in

deze figuur is in het magnetische veld en een deel ervan is buiten het magnetische veld. Als het blad naar rechts getrokken wordt, neemt de flux door deze curve af (aangenomen dat in het papier de de positieve normaal richting is). Een emf met de klok mee is geinduceerd ron deze curve. Deze emf drijft een stroom die opwaarts gericht is in het gebied tussen de polen en het magnetische veld oefent een kracht uit op deze stroom naar links, waarbij het de beweging van het blad tegen werkt.

Het energieverlies tgv eddy stromen kan gereduceerd 

worden door de weerstanden van de mogelijk paden die de

eddy sromen kunnen volgen te verhogen. Dit wordt getoond

in de figuur. Hier is de geleidende onderverdeeld in smalle

stroken die aan elkaar gelijmd zijn. Omdat de isolerende

lijm de stroken van elkaar scheidt, zijn de eddy stromen

beperkt tot de stroken. De grote eddy-stromen lussen zijn

dus verbroken en het energieverlies is gereduceerd.

Een andere mogelijkheid is om sneden in het blad aan te

brengen, hierdoor worden de eddy stromen minder en wordt

de magnetische kracht enorm gereduceerd.

Inductie

Zelfinductie

De magnetische flux door een circuit is gerelateerd met de stroom in dat circuit en de stromen in andere, nabije circuits. Beschouw een winding die een stroom I draagt. De stroom in de winding produceert een magnetisch veld B dat van punt tot punt afhangt, maar de waarde van B is in elk punt proportioneel tov I. de magnetische flux door de winding is dus ook proportioneel tov I:



Waar L de proportionaliteitsconstante is die men de zelf-inductie van de winding noemt. De zelf-inductie hangt af van de geometrische vorm van de winding.

De SI eenheid van zelf-inductie is de henry (H)

1 H = 1 Wb/A = 1 Tm²/A

In principe kan de zelf-inductie van een winding of circuit berekend worden door een stroom I te aanschouwen, B in elk punt op een oppervlak bepaald door de winding te berekenen, de flux te berekenen en gebruik te maken van bovenstaande vergelijking.

In de praktijk is deze berekening vaak heel moeilijk. Maar, de zelf-inductie van een lange, dicht opgewonden solenoïde kan rechtstreeks berekend worden.

De zelf-inductie van een solenoïde van lengte ℓ en met N windingen die een stroom I draagt is:



Net als bij de capaciteit van een condensator hangt de zelf-inductie enkel af van geometrische factoren.

Wanneer de stroom in het circuit verandert, verandert ook de magnetische flux tgv de stroom, zodat een emf geinduceerd wordt. Omdat de zelf-inductie van een circuit constant is, is de verandering in flux gerelateerd tot de verandering in stroom. En de emf is in dit circuit is dan: 

Dus, de zelfgeinduceerde emf is proportioneel tov de mate van verandering van de stroom. Een winding of een solenoïde met veel windingen eheft een grote zelf-inductie en noemt men een inductor of spoel.

Normaal gesproken kunnen we de zelf-inductie van de rest van het circuit negeren vergeleken met de zelf-inductie van een spoel.

Het potentiaal verschil over een spoel wordt gegeven door:



Waarbij r de interne weerstand van de spoel is. Voor een ideale spoel is r = 0.

Wederzijdse inductie 

Wanneer twee of meer circuits zich dicht bij

elkaar bevinden, zoals op de figuur, dan is de

magnetische flux door 1 circuit niet alleen

afhankelijk van de stroom in dat circuit maar

ook van de stroom in het nabije circuit.

Stel I1 is de stroom in circuit 1 en I2 is e

stroom in circuit 2. Het magnetische veld B op

oppervlak S2 is de superpositie van B1 tgv I1

en B2 tgv I2, waarbij B1 proportioneel is tov I1 ( en B2 is proportioneel tov I). we kunnen dus de flux van B1 door het circuit 2 schrijven als:



Of de flux van B2 door circuit 1:



In beide vergelijkingen is M de wederzijdse inductie van de twee circuits. De wederzijdse inductie hangt af van de geometrische schikking van de twee circuits.

We kunnen de wederzijdse inductie berekenen 

voor twee dicht gewonden concentrische

solenoïdes zoals in de figuur.

Stel ℓ is de lengte van beide solenoïdes en de

binnenste solenoïde heeft N1 windingen en straal

r1 en de buitenste solenoïde heeft N2 windingen en

straal r2.

Dan is de wederzijdse inductie:

**

*m M n n r*

2,1 2

= = * *

2,1 0 2 1 1

*I*

1

Magnetische energie

Een spoel slaat magnetische energie op zoals een condensator elektrische energie opslaat. Deze magnetische energie wordt gegeven door: (geen bewijs)



De energie per volume eenheid is magnetische energiedichtheid um:

um = B²/2µ0

Voor een lange solenoïde is de magnetische energie:



deze uitdrukking is algemeen geldig :

ook voor plaats- en tijdsafhankelijke Bvelden. Als er een magnetisch veld is (ook in vacuum) dan is er ook magnetische energie.