

HOOFDSTUK 2

OPBOUW VAN HET MAGNETISCH VELD

2.1 Magnetische keten

2.1.1 Bekrachtigingswijzen

De hoofdflux in de luchtspleet van een machine wordt geproduceerd door het veldopwekkingssysteem, meestal de stator. De magnetische inductie \vec{B} heeft gesloten veldlijnen. Daarom is een ferromagnetische structuur vereist om het magnetisch circuit te sluiten en de veldlijnen te geleiden. Ter hoogte van de polen zorgt een doorstromingsbron (bron van m.m.k.) ervoor dat de flux doorheen de magnetische reluctantie van het gevolgde pad wordt gestuurd. Het overgrote deel van deze reluctantie bevindt zich in de luchtspleet.

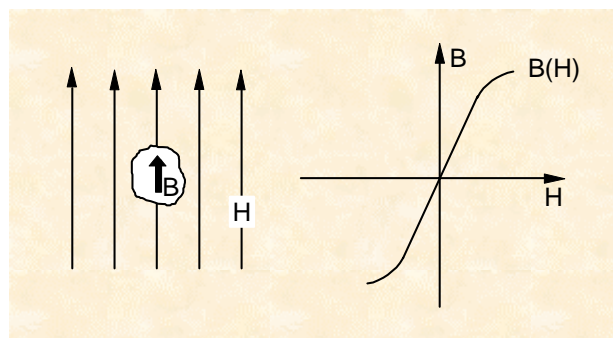
In de meeste grotere industriële machines worden de polen bekrachtigd door stromen te sturen in gelokaliseerde spoelen. In miniatuurmachines en machines voor regeltechnische doeleinden geeft men de voorkeur aan permanent magneetbekrachtiging.

2.1.2 Permanent magneetbekrachtiging

2.1.2.1 Basisbegrippen en magnetische grootheden

Er dient onderscheid gemaakt worden tussen zachte en harde magnetische materialen. Praktisch wordt de grens tussen beide gelegd op een coërcitief veld H_c van 1 kA/m. Stoffen met een coërcitief veld groter dan 1 kA/m zijn magnetisch hard, de andere magnetisch zacht.

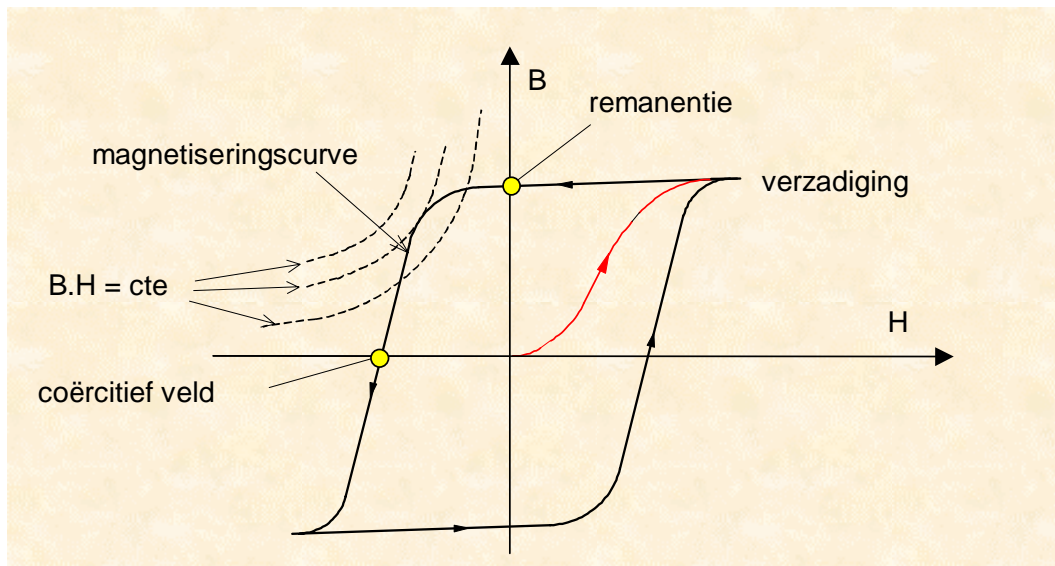
Bij het aanleggen van een uitwendig veld \vec{H} , ontstaat in een anisotroop ferromagnetisch materiaal een inductie \vec{B} parallel met het veld. De magnetiseringscurve $B(H)$ (figuur 2.1) geeft het verband tussen de grootte van de inductie en de veldsterkte.



figuur 2.1 *Polarisatie \vec{B} ten gevolge van een uitwendig veld \vec{H}*

Figuur 2.2 toont de in een gesloten magnetische kring opgemeten B-H-curve van een willekeurig magnetisch materiaal. De aanvangscurve is de curve die men doorloopt als een nieuw materiaal in een magnetisch veld H gebracht wordt. De remanentie B_r is de inductie die zich instelt, nadat bij een magnetisch materiaal dat zich in een magnetische kring bevindt en volledig gemagnetiseerd is, het opwekkende veld afgeschakeld wordt.

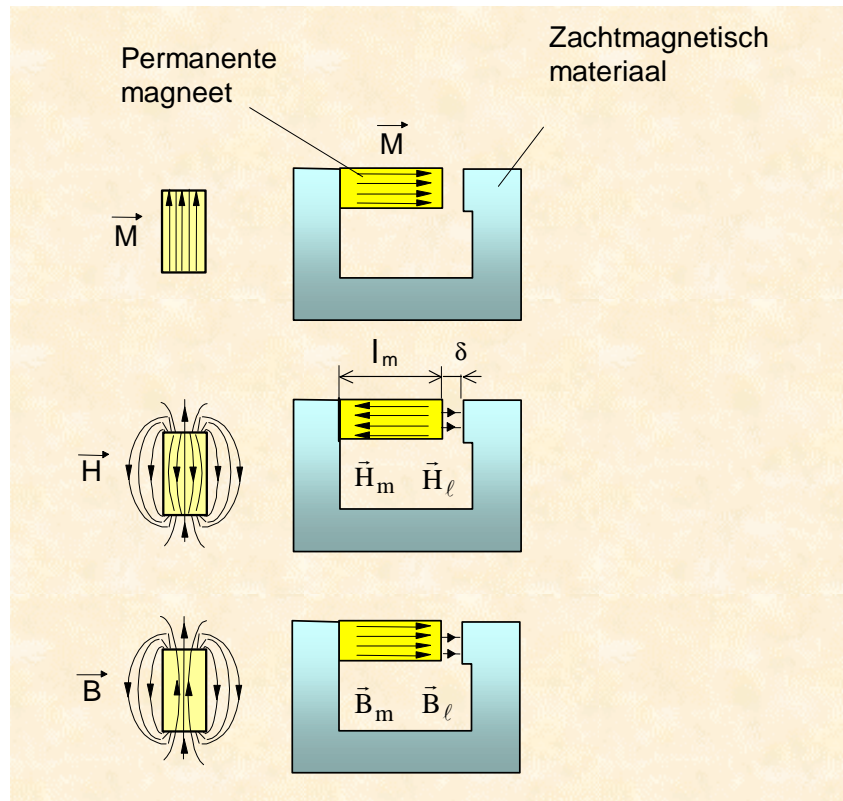
Voor permanente magneten maakt men gebruik van magnetisch harde materialen. figuur 2.3 toont de veldsterkte \vec{H} en de inductie \vec{B} van een permanente magneet staaf en dezelfde staaf in een magnetische kring. Uit deze figuur blijkt dat de richting van de veldsterkte en de richting van de inductie van de permanente magneet aan elkaar tegengesteld zijn. Het werkpunt van permanente magneten bevindt zich in het tweede kwadrant.



figuur 2.2 *Hysteresiscurve van een hard magnetisch materiaal*

Het ferromagnetisch materiaal van de magnetische kring uit figuur 2.3 wordt ideaal verondersteld, dus zonder magnetische weerstand. Als de luchtspleet een lengte δ en de magneet een lengte ℓ_m heeft, geeft de doorstromingswet toegepast op deze magnetische kring:

$$H_m \cdot \ell_m + H_\ell \cdot \delta = 0 \quad (2.1)$$



figuur 2.3 *Veldsterkte en inductie van een permanente magneet*

Hieruit volgt:

$$H_m = -\frac{\delta}{l_m} H_l \quad (2.2)$$

H_m en H_l hebben een tegengesteld teken. In de luchtspleet geldt:

$$H_l = \frac{B_l}{\mu_0} \quad (2.3)$$

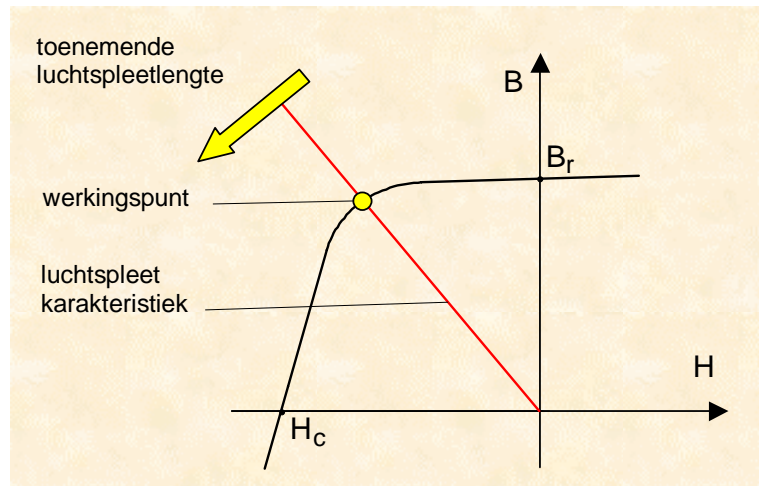
Wegens de bronvrijheid van \vec{B} is:

$$B_l = B_m$$

zodat:

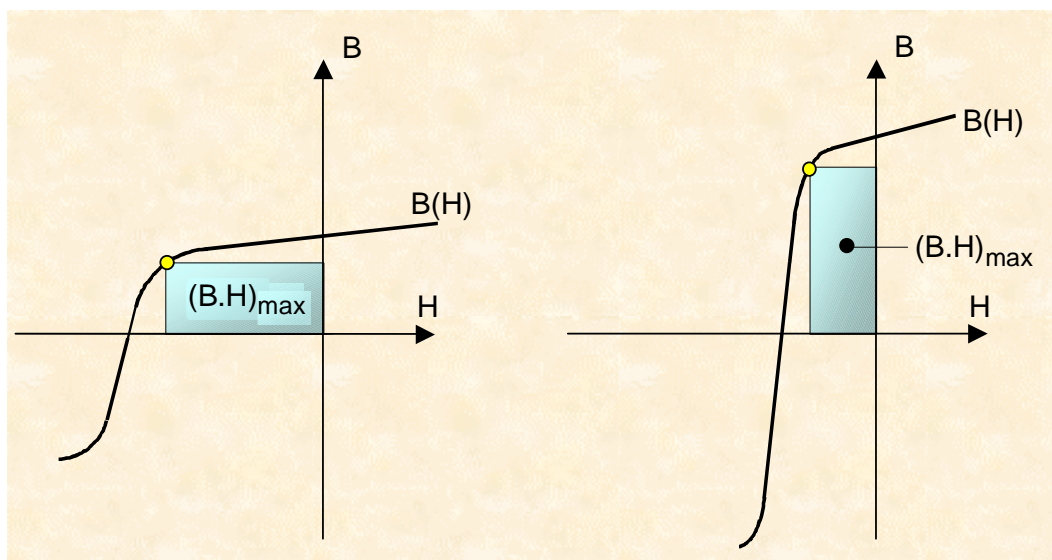
$$H_m = -\frac{\delta}{l_m} \frac{B_m}{\mu_0} \quad (2.4)$$

Men heeft nu een tweede betrekking tussen B_m en H_m gevonden: de luchtspleetkarakteristiek (figuur 2.4). Het snijpunt van deze rechte met de hysteresislus van de permanente magneet geeft het werkingpunt in het tweede kwadrant. Het deel van de hysteresislus in het tweede kwadrant, wordt ook demagnetiseringscurve genoemd: $B_m < B_r$. Het geval $\delta = 0$ stelt een magnetische kortsluiting voor ($H_m = 0$). De maximale inductie B_r stelt zich in.



figuur 2.4 *Demagnetiseringscurve, luchtspleetkarakteristiek en werkingspunt*

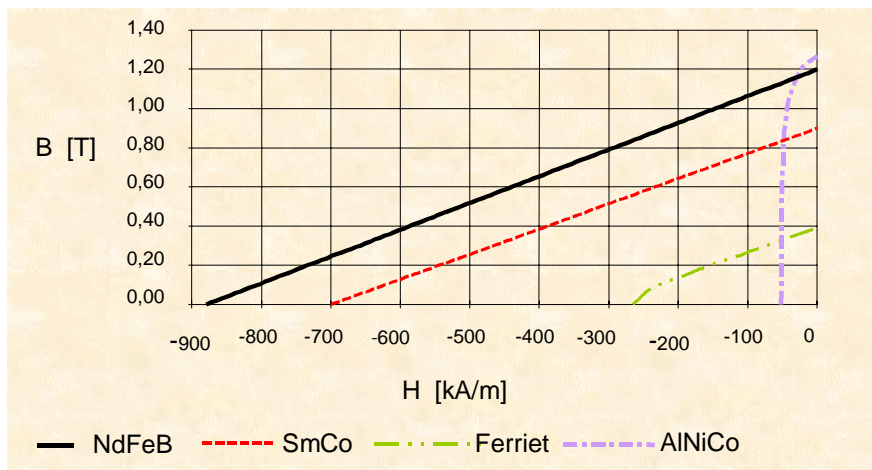
Technisch gezien is een permanente magneet des te interessanter naarmate H_c en B_r groter zijn. Om de magnetische kwaliteit aan te geven, wordt gebruik gemaakt van het zogenaamde energieproduct $(BH)_{\max}$ (figuur 2.5). $(BH)_{\max}$ is het maximum van het product van B en H op de demagnetiseringscurve, de energiedichtheid (J/m^3). Het energieproduct van een magnetisch materiaal is groter, naarmate de remanentie en het coërcitief veld groter zijn.



figuur 2.5 *Magnetiseringscurven van twee harde magnetische materialen*

2.1.2.2 Permanent magneet materialen

figuur 2.6 geeft een overzicht van de drie groepen magnetische materialen die belangrijk zijn voor de technische toepassing van permanente magneten. Op dit ogenblik kent het materiaal Nd-Fe-B een grote doorbraak.



figuur 2.6 *Karakteristieken van enkele permanent magneet materialen*

Alnico-magneten

AlNiCo-magneten vormen de oudste groep. Zij bestaan hoofdzakelijk uit ijzer en, zoals de naam het zegt, aluminium, nikkel en cobalt. Ondanks de hoge prijs, wordt dit materiaal nog vaak aangewend omwille van zijn goede temperatuurstabiliteit. Naast speciale motoren, vormen de meetinstrumenten een belangrijk toepassingsgebied. Deze AlNiCo-magneten worden ofwel via de smeltmetallurgische weg, door gieten, ofwel via de poedermetallurgische weg, door persen en sinteren, geproduceerd. Na de vormgeving wordt een warmtebehandeling toegepast om de permanente magneeteigenschappen in te stellen.

Ferrieten

De tweede groep, de ferrieten, zijn keramische magneten uit ijzer, barium of strontium en zuurstof. Ze worden langs poedermetallurgische weg bereid. Deze materialen hebben een leidende marktpositie, door hun lage grondstof- en productiekosten. De ferrieten waren de eerste hoogcoërcitieve materialen, maar hebben door hun lage remanentie een beperkt energieproduct.

Zeldzame aarden magneten

De magneten uit zeldzame aarden vormen een recente groep. Door een remanentie van 1T samen met een hoog coërcitief veld, hebben zij een zeer hoog energieproduct. Deze groep omvat enerzijds de magneten op basis van samarium en cobalt en konden met hun hoge grondstofprijs slechts een beperkt marktaandeel veroveren. Anderzijds zijn er de magneten op basis van neodymium, ijzer en boor, die bij kamertemperatuur op magnetisch gebied recordwaarden bereiken. Deze waarden nemen af bij toenemende temperatuur. Bovendien zijn magneten uit zeldzame aarden erg onderhevig aan corrosie. Deze magneten worden geproduceerd langs een poedermetallurgische weg, gelijkaardig aan die van ferrieten. Er bestaan ook minder krachtige, polymeer gebonden versies die merkkelijk goedkoper zijn.

Volledigheidshalve vermeldt men hier ook nog de staalmagneten, door wolfram of cobalt geharde stalen, die tot in de jaren 50 in gebruik waren. Verder zijn er nog diverse legeringen, zoals Pt-Co en Cu-Ni-Fe, die voor speciale toepassingen worden aangewend. Hun gebruik is echter beperkt. Tenslotte is er ook nog een legering uit aluminium, mangaan en koolstof met interessante magnetische eigenschappen, geringe grondstofkosten, maar echter nog steeds hoge productiekosten.

tabel 2.1 toont voor verschillende magnetische materialen, welk maximaal energieproduct bij in polymeren gebonden materiaal (isotroop) kan bereikt worden in vergelijking met de maximale waarde bij de gesinterde materialen (anisotroop).

tabel 2.1 *Vergelijking isotrope (polymeergebonden) en anisotrope (gesinterde) materialen*

Magnetisch materiaal	BH _{max} [KJ/m ³]	
	compact	gebonden
Isotroop ferriet	8	4
Anisotroop ferriet	30	15
Isotroop Alnico	18	9
Anisotroop Alnico	50	/
Isotroop Sm-Co	55	/
Anisotroop Sm-Co	220	70
Isotroop Nd-Fe-B	80	60
Anisotroop Nd-Fe-B	320	/

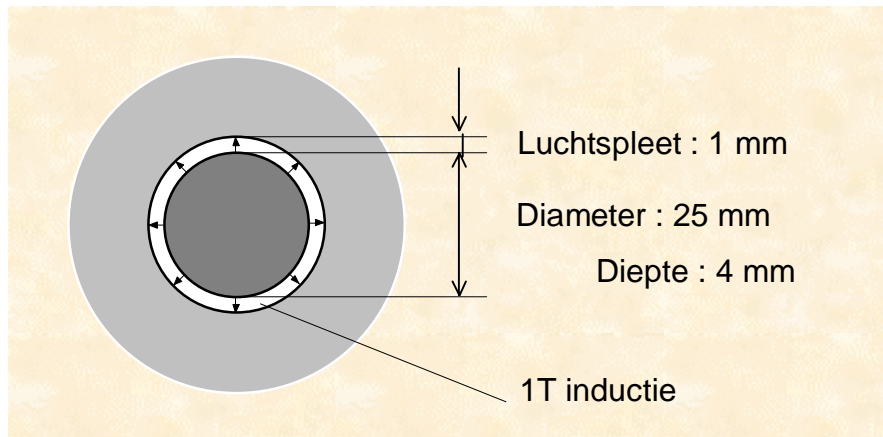
In het algemeen is het energieproduct bij gebonden magneten ongeveer met 50 % gereduceerd. Bij de Sm-Co-magneten is het onderscheid groter. Bij de Nd-Fe-B-magneten ligt het energieproduct van de polymeer gebonden magneten slechts weinig onder de waarde van een niet georiënteerde, gesinterde magneet.

Daar bijna alle magnetische materialen zeer bros en hard zijn, moet bij de bewerking ervan gebruik gemaakt worden van speciale beitels om slijtage van de werktuigen te verminderen.

2.1.2.3 Dimensionering van permanente magneten

Om de kwaliteit van permanente magneten aan te geven, is het energieproduct de belangrijkste grootte. Het magneetvolume, nodig om een bepaald magnetisch veld op te wekken, is hiermee omgekeerd evenredig. Bij het dimensioneren van de magneet is de verhouding van de inductie B en van het veld H in het werkingpunt belangrijk. Dit wordt ter vergelijking verduidelijkt voor twee materialen, Alnico 32/5 en ferriet 30/26, bij een zelfde toepassing. Het energieproduct van beide materialen (32 respectievelijk 30 kJ/m³) is nagenoeg gelijk. Het coërcitief veld (50 kA/m, respectievelijk 260 kA/m) verschilt sterk.

In figuur 2.7 is een deel van een magnetische kring met een ringvormige luchtspleet, samen met de afmetingen, gegeven. De gearceerde cirkel stelt een cilindervormige schijf voor met een diameter van 25 mm en een dikte van 4 mm. In de luchtspleet wordt, met permanente magneten een magnetisch veld van circa 1 T opgewekt. De magnetische kring van het systeem wordt ideaal verondersteld. Dit heeft tot gevolg dat de volledige flux die door de magneten wordt opgewekt, het product van de inductie B_m van de magneet en zijn oppervlakte S_m loodrecht op de fluxlijnen, als werkflux in de luchtspleet ter beschikking staat. Deze werkflux is het product van de inductie B_l in de luchtspleet en de oppervlakte S_l van de luchtspleet.



figuur 2.7 *Bovenaanzicht: een luchtspleet waarin een magnetisch veld van 1 T wordt opgewekt*

De door de magneten opgewekte m.m.k. is het product van de veldsterkte H_m en de lengte ℓ_m van de magneten, gemeten in de richting van de veldlijnen. Bij een ideale magnetische kring is deze opgewekte m.m.k. gelijk aan de m.m.k. over de luchtspleet. Dit is het product van de magnetische veldsterkte H_ℓ in de luchtspleet en de lengte van de luchtspleet δ . Als nu voor B_m en H_m de waarden behorend bij het $(BH)_{\max}$ -punt gekozen worden, wordt de oppervlakte en de lengte van de magneten bepaald door:

$$S_m = S_\ell \frac{B_\ell}{B_m} \quad (2.5)$$

en

$$\ell_M = \delta \frac{H_\ell}{H_m} \quad (2.6)$$

Omwille van de hoge inductie van 0,86 T in het optimale werkingpunt van de Alnico-materialen, volstaat een magneet met poolvlakken van ongeveer 380 mm^2 . Hierdoor is het mogelijk de permanente magneet volledig onder de cilindervormige schijf aan te brengen (figuur 2.8, links). De rechthoek waarin de pijl zich bevindt, die de richting van het magnetisch veld aangeeft, is de schematische voorstelling van de magneet. In het ferrietsysteem daarentegen moet gebruik worden gemaakt van een magneetring (de delen uit het rechterdeel van figuur 5.24 met de pijlen) om de nodige flux op te wekken. Anderzijds is de ferietring veel vlakker dan de Alnico-magneet.

Het magneetvolume (V_m) van beide magneten is nagenoeg gelijk ten gevolge van de gelijke energieproducten. Door de andere constructievorm heeft het ferrietsysteem echter veel meer ijzer nodig en zijn de globale kosten van beide systemen bijgevolg verschillend, ofschoon twee materialen met een zelfde energieproduct gekozen worden.

Alnico 32/5

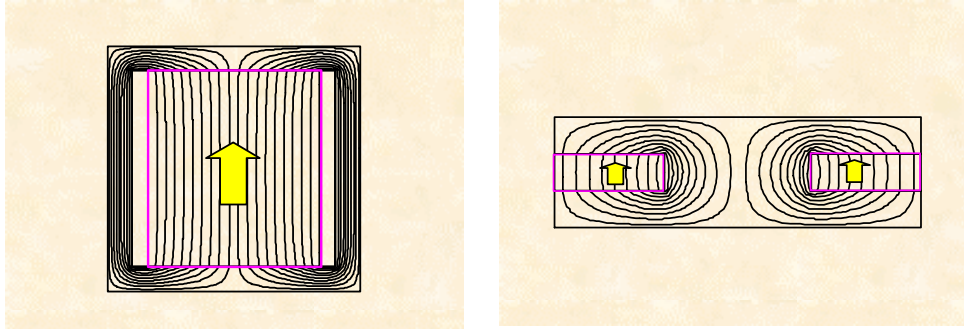
Ferriet 30/26

$$\underline{B_m = 860\text{mT} \Rightarrow S_m = 380\text{mm}^2}$$

$$\underline{B_m = 180\text{mT} \Rightarrow S_m = 1800\text{mm}^2}$$

$$\underline{H_m = 37\text{kA} / \text{m} \Rightarrow \ell_m = 22\text{mm}}$$

$$\underline{H_m = 160\text{kA} / \text{m} \Rightarrow \ell_m = 5\text{mm}}$$



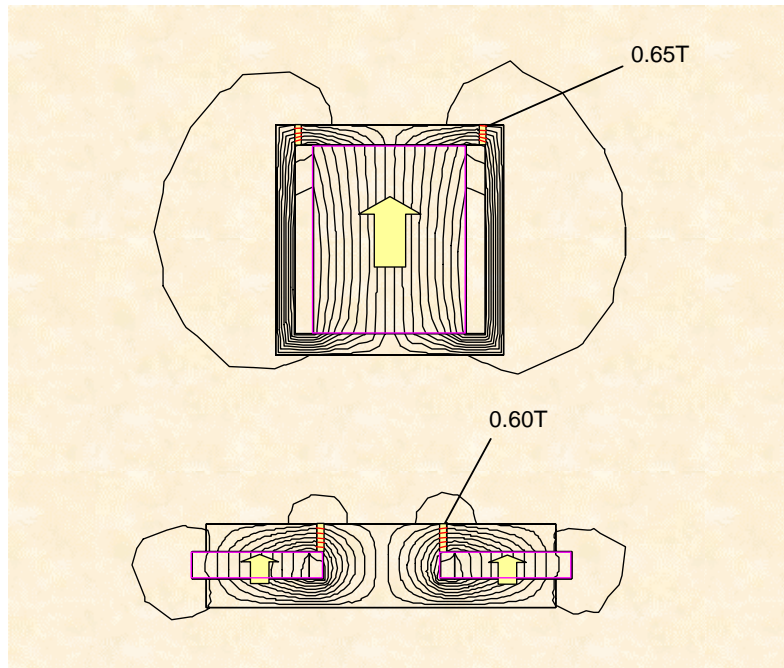
$$V_m = 8400\text{mm}^3 \quad V_{\text{Fe}} = 12000\text{mm}^3 \quad V_m = 9000\text{mm}^3 \quad V_{\text{Fe}} = 21000\text{mm}^3$$

figuur 2.8 *Opwekking van 1 T in de luchtspleet met een Alnico- en een ferrietmagneet*

Daar komt nog bij dat de strooiing sterk afhankelijk is van het gebruikte systeem (figuur 2.9). Bij het in rekening brengen van de strooifluxen en van het ijzer, ligt de luchtspleetinductie ver onder de inductie van het ideale systeem. De grotere uitwendige strooiflux in het ferrietsysteem is voor vele toepassingen nadelig en leidt tot een slechtere benutting van de magneten.

De voorbeelden van een magnetisch systeem geven twee belangrijke punten aan, waarmee bij de keuze en het gebruik van een magnetisch materiaal rekening moet gehouden worden:

- een nieuw magnetisch materiaal vereist vaak een volledig nieuwe configuratie van het systeem;
- ofschoon zeer belangrijk voor de magnetische eigenschappen, is het energieproduct alleen niet voldoende om een materiaal te beoordelen.



figuur 2.9 *Berekend veldlijnenverloop in de systemen uit figuur 2.8*

Niet magnetische eigenschappen van de materialen zijn vaak van doorslaggevend belang bij hun toepassing. Voorbeelden hiervan zijn:

- bewerkbaarheid
- chemische stabiliteit
- temperatuurstabiliteit
- soortelijk gewicht
- elektrische geleidbaarheid
- mechanische eigenschappen
- toxiciteit
- kleefbaarheid

tabel 2.2 *Mogelijke classificatie van de toepassingsgebieden van permanente magneten*

	Mechanica	Elektromechanica	Andere
Fysisch effect	$F \sim B^2 \cdot S$	$F \sim B \cdot I$	Divers
Marktaandeel	15 %	70 %	15 %
Voorbeelden	magnetische koppelingen lagers hefmagneten afscheiders	elektrische motoren en generatoren luidsprekers	positiebepaling televisietoestellen deeltjesversnellers ionenbuizen kernspintografie

Bij de mechanische toepassingen wordt gebruik gemaakt van de kracht tussen twee gemagnetiseerde materialen. Het kan gaan om twee permanente magneten (magnetische

koppelingen en lagers) of om een permanent magneet en een in het veld ervan gemagnetiseerd zacht magnetisch materiaal (hefmagneten en afscheiders). De kracht neemt kwadratisch toe met de inductie tussen beide materialen en bijgevolg, zolang er geen delen in verzadiging gaan, ook kwadratisch met de remanente inductie van de permanente magneten. Ongeveer 15 % van alle toepassingen zijn mechanisch.

Het grootste deel (70 %) van de permanente magneten wordt aangewend bij elektromagnetische systemen. Hiertoe behoren niet alleen elektrische motoren en generatoren, maar ook luidsprekers. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de wisselwerking tussen een magnetisch veld en elektrische stroom. Deze wisselwerking neemt lineair met het magnetisch veld toe.

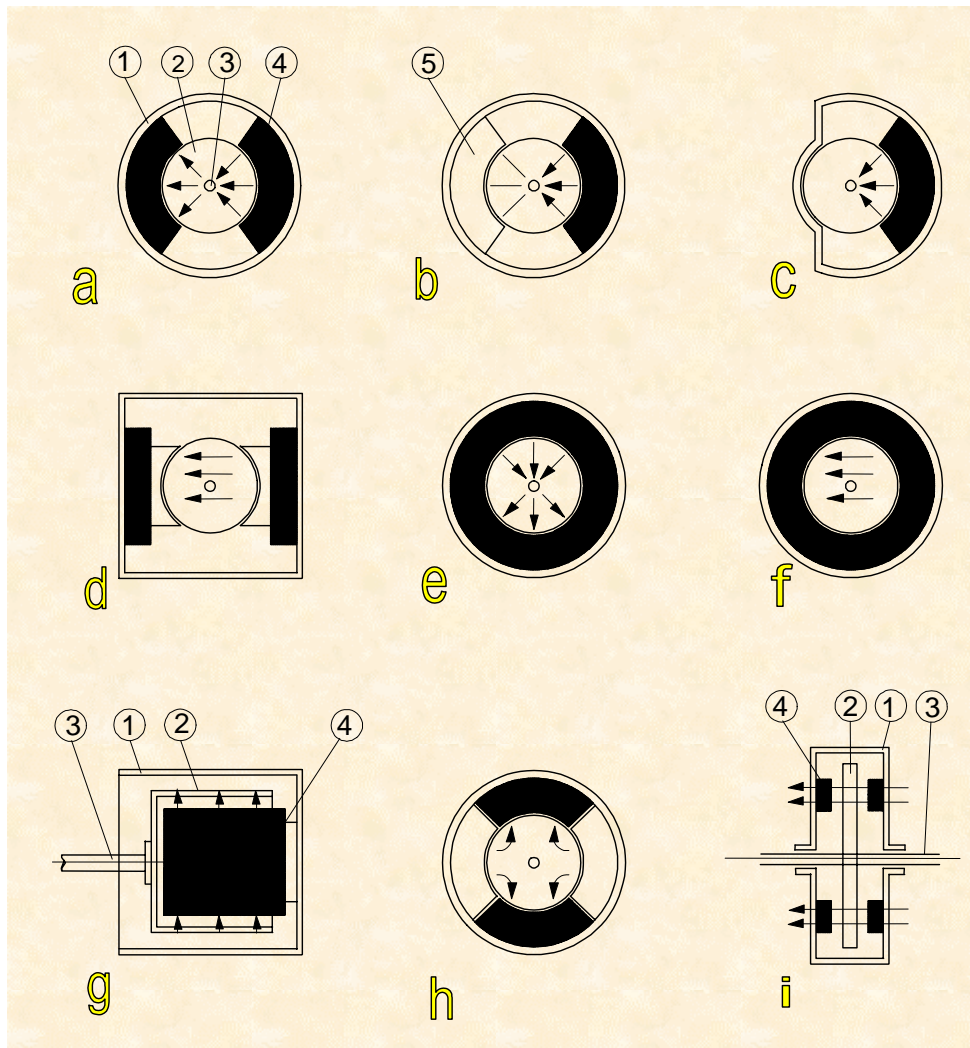
In de derde groep zijn alle andere toepassingen ondergebracht. In de techniek van de sensoren, worden magneten aangewend voor de positiebepaling. Halfgeleider-elementen dienen hier in toenemende mate voor de detectie van de magneten (Hall-effect, magneetveld-afhankelijke diodes, enz.). In televisietoestellen, deeltjesversnellers, ionenbuizen, enz. worden magneten gebruikt voor stralingssturing en -correctie. Tenslotte dient nog de kernspintomografie vermeld te worden, die hoofdzakelijk in de medische technologie de toepassing van krachtige permanente magneten vormt.

In vele potentiële toepassingen, waar tot nu toe het veld door een elektrische stroom opgewekt werd, kan gebruik gemaakt worden van permanente magneten. In het algemeen laten kleine toepassingen beter het gebruik van permanente magneten toe. De basis hiervoor ligt in de groeiwetten. Als in een configuratie bestaande uit permanente magneten en ijzer alle afmetingen groter worden, blijft het magnetisch veld op overeenkomstige plaatsen onveranderd. In een elektrische spoel daarentegen, neemt het veld bij constante stroomdichtheid lineair met de afmetingen toe. In grote machines is de elektrische opwekking hierdoor interessanter. Er zijn dan immers grotere velden nodig en die velden zijn tevens gemakkelijk te regelen. Permanente magneten hebben het voordeel geen stroom te verbruiken en op een betrouwbare wijze zeer constante velden te leveren. Voor zeer kleine toepassingen zijn ze daarenboven relatief eenvoudig te vervaardigen.

2.1.2.4 Ruimtelijke schikking van de magneten

Bij de ruimtelijke schikking van permanente magneten heeft men de gewoonte de axiale lengte van de permanent magneetsegmenten iets groter te nemen dan deze van het anker om de randeffecten te minimaliseren en zo een geschikte luchtspleetflux te creëren (figuur 2.10).

In figuur 2.10a is een zeer elementaire, twee segment permanent magneet constructie getoond. In figuur 2.10b heeft men voor een goedkopere oplossing gekozen en een magneet vervangen door een stuk staal. figuur 2.10c is een nog verder vereenvoudigde versie. Bij de methode van figuur 2.10d kan men platte magneten gebruiken, waarop men dan poolschoenen bevestigt. De figuur 2.10e en figuur 2.10f tonen ringvormige magneten, de ene radiaal, de andere dwars gemagnetiseerd. In figuur 2.10g is de magneet centraal geplaatst binnen in een klokvormig anker. De figuur 2.10a tot en met g zijn allen tweepolige machines; h en j daarentegen zijn meerpole. De machine in figuur 2.10h heeft twee magneetsegmenten en twee staalsegmenten. In figuur 2.10j verloopt het veld in axiale richting; er zijn een aantal magneetblokjes op een cirkelomtrek met tussenin een schijfvormige rotor.



Richting van de flux

- | | | |
|-------------|-----------|----------------------|
| 1 Motorhuis | 2 Rotor | 4 Permanente magneet |
| | 3 Rotoras | 5 Weerkijzer |

figuur 2.10 *Praktische permanent magneet machines*

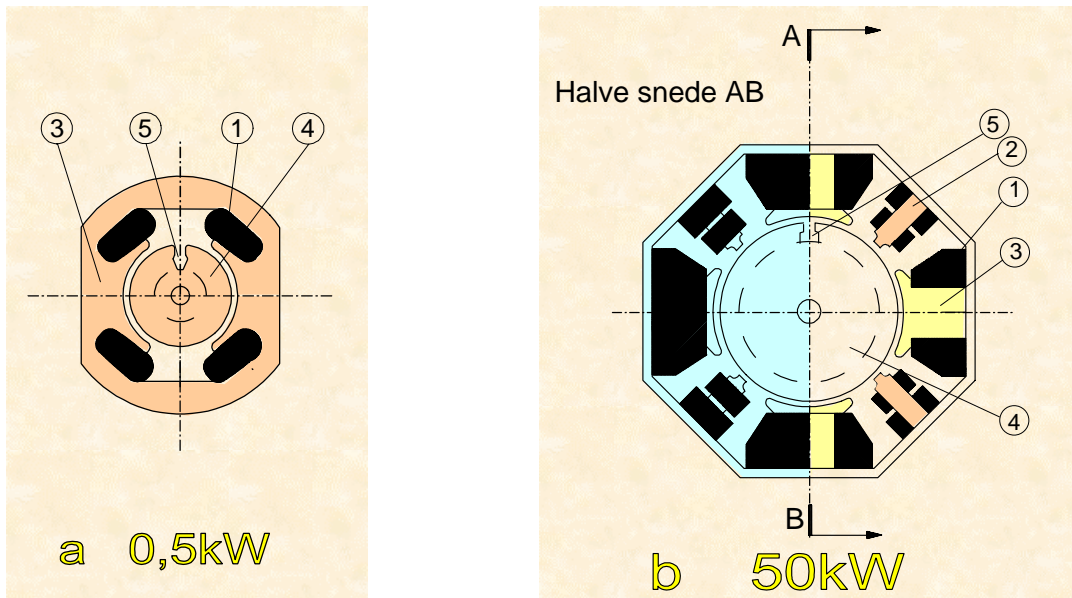
2.1.3 Stroombekrachtiging

De flux in de machine wordt bekomen door een stroom I_b te sturen in de veld- of de bekrachtigingswikkelingen, die rond de polen gewikkeld zijn. figuur 2.11a toont een gedeelte van de magnetische keten van een kleine machine (0,5 kW). De gehele magnetische keten (stator en rotor) is opgebouwd uit blikpakket.

figuur 2.11b geeft een schets van een grotere machine (50 kW). Deze machines die worden gevoed uit gelijkrichters die een gerimpelde gelijkstroom leveren, zijn gelamelleerd. De figuur

toont eveneens de commutatiepolen, dit zijn bijkomende bekrachtigingssystemen die door de ankerstroom doorlopen worden om een beter commutatiegedrag te verkrijgen.

De m.m.k. of doorstroming van iedere pool moet ervoor zorgen dat er een voldoende grote werkflux in de machine is. Deze hoofdvelddoorstroming moet groter zijn dan de ankerreactiedoorstroming, die verder besproken wordt, om een overdreven distortie van de luchtspleetflux te voorkomen. Bij machines waar men de snelheid regelt door veldverzwakking, is dat een erg belangrijk probleem.



1. Veldwikkeling

2 Commutatiepool

3 Hoofdpool

4 Anker

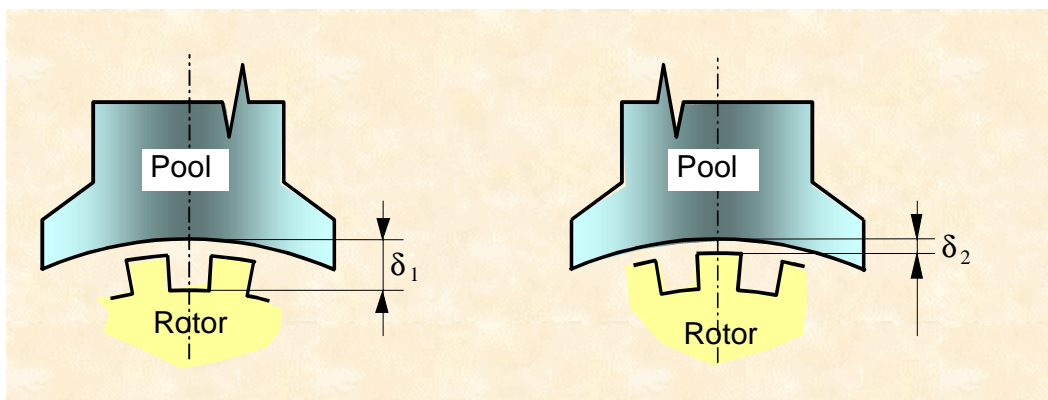
5 Gleuf

figuur 2.11 *Elektrisch bekrachtigde machines (rechts foto ABB)*

Het blikpakket bestaat uit dunne blikplaten (4% Si-staal) die van elkaar geïsoleerd zijn. Het hoofddoel van een gelamelleerde magnetische keten is het verminderen van de wervelstroomverliezen die het gevolg zijn van de wisselende flux.

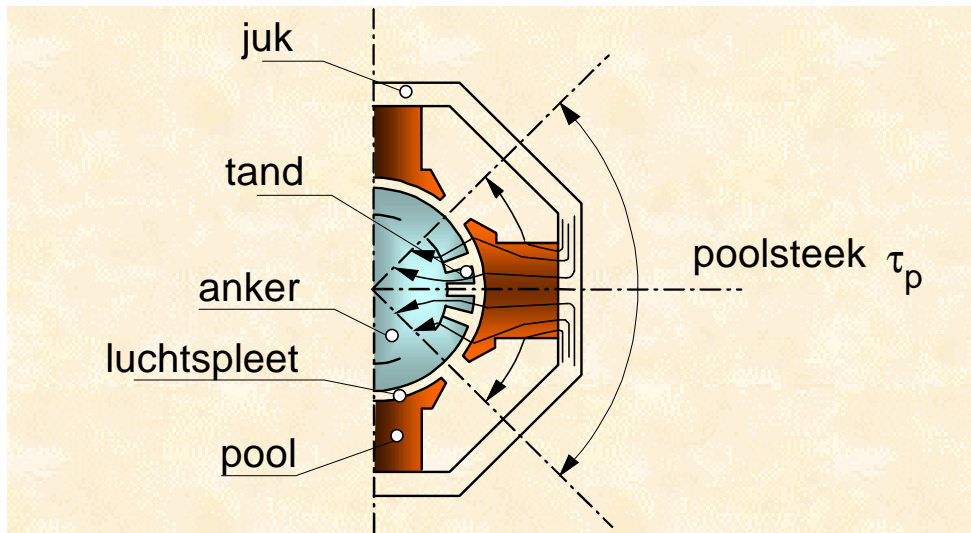
Wervelstroomverliezen, ten gevolge van een in de tijd veranderende flux, doen zich voor bij een gelijkstroommachine. In de eerste benadering bestaan ze niet in de stator. Immers, de stator ziet steeds hetzelfde stilstaand, resulterend magnetisch veld, als de machine in stationair regime is. In transiënt regime, m.a.w. bij wijziging van bekrachtigingsstroom I_b of ankerstroom I_a , ziet de stator een veranderlijk veld en treden er wervelstromen op. In de rotor daarentegen zijn er steeds wervelstromen. Een willekeurig volume-elementje van de rotor komt achtereenvolgens voorbij een noord- en een zuidpool, zodat de flux doorheen dit volume-elementje een wisselflux is, alhoewel hij onveranderlijk is in de ruimte. Buiten de wervelstroomverliezen zorgt deze wisselflux ook voor hysteresisverliezen.

De aanwezigheid van gleuven en tanden aan de ankerromtrek is er de oorzaak van dat een punt op een pool een veranderende luchtspleetlengte ziet. Op het ene moment is de luchtspleetlengte δ_1 , iets later δ_2 , dan weer δ_1, \dots (figuur 2.12).



figuur 2.12 *Variërende luchtspleet door de vertanding*

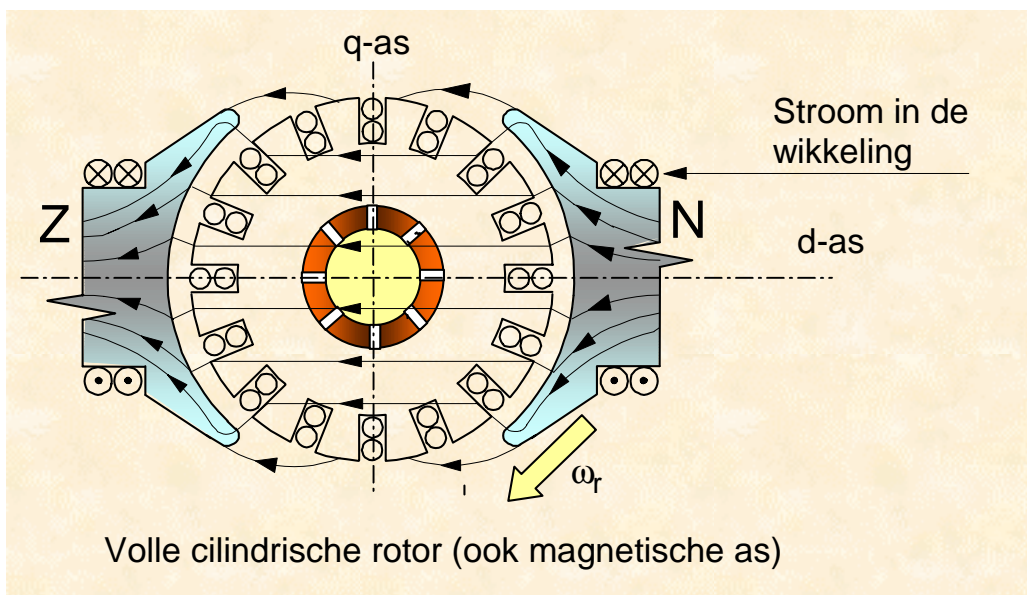
Door de veranderende luchtspleetlengte varieert ook de flux in de poolschoenen. De polen zien een in de tijd veranderende flux. Daarom is het aangewezen zowel stator als rotor van een gelijkstroommachine te lamelleren. Een schets van het fluxverloop in een vierpolige machine is op figuur 2.13 a gegeven.



figuur 2.13 Fluxverloop in een vierpolige machine

2.2 Ankerreactie

Wanneer de veldwikkeling van de magnetische keten van een gelijkstroombusmachine wordt bekrachtigd, ontstaat in de machine een magnetische flux (figuur 2.14), als het anker geen stroom voert. Dit is het hoofdveld van de machine. Wanneer alleen dit veld aanwezig is, staat de neutrale lijn magnetisch loodrecht op de poolmiddellijn. De neutrale lijn wordt q-as genoemd (van het engelse quadrature) vandaar ook de benaming kwadratuur-as of dwarsas. De poolmiddellijn noemt men d-as of directe as. Dit is de theoretische neutrale lijn. Vroeger werd reeds aangegeven dat de borstels zo op de collector moeten worden geplaatst dat zij de spoelen kortsluiten op het ogenblik dat deze de neutrale lijn passeren. Bij een onbelaste machine komen de borstels in de neutrale lijn of de q-as te staan.

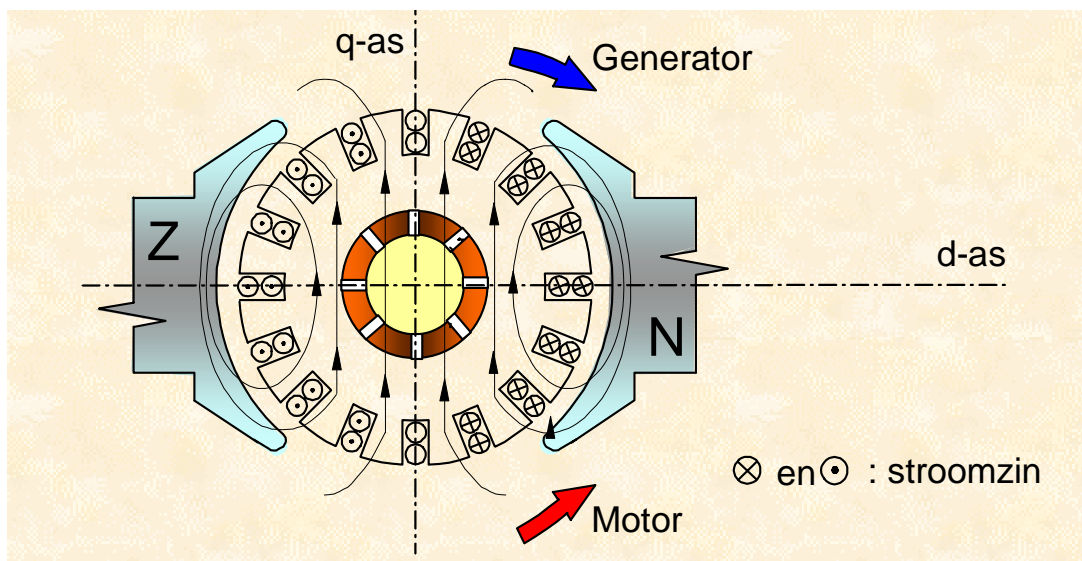


figuur 2.14 Veldverloop in een onbelaste gelijkstroombusmachine

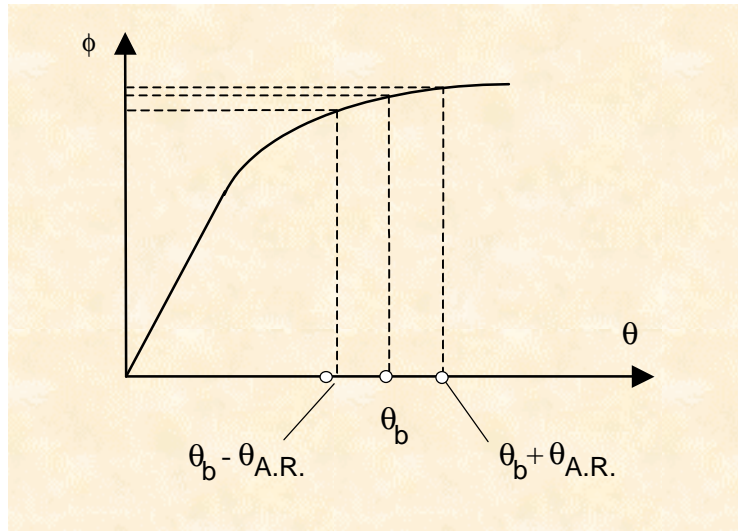
Wordt de machine belast (dit geldt zowel voor de generator- als de motormode), dan voert het anker stroom. Een generator voert stroom als hij aangesloten is op een uitwendige belasting. Een motor trekt stroom uit het voedend systeem als hij belast wordt met een tegenwerkend koppel. Bij theoretische nullast draait de motor met constante hoeksnelheid en is het koppel nul, zodat uit de B/I -regel volgt dat de getrokken stroom bij nullast nul is. Enkel als de machine zelf koppel levert om het tegenwerkend koppel te overwinnen of om te versnellen, voert het anker stroom.

De stroom I_2 die door de ankergeleiders vloeit, veroorzaakt een "tweede" magnetisch veld in de magnetische keten (figuur 2.15). Dit veld noemt men het ankerreactieveld of het dwarsveld omdat het loodrecht staat op het hoofdveld. De veldlijnen van het ankerveld sluiten zich over de poolschoenen.

Het hoofdveld wordt door de helft van het dwarsveld aan de bovenzijde van de noordpool verzwakt (figuur 2.14 en figuur 2.15). De veldlijnen van hoofd- en dwarsveld zijn tegengesteld. Aan de onderzijde wordt het versterkt. Bij de zuidpool is het net andersom: een versterking aan de bovenzijde en een verzwakking aan de onderzijde. De invloed van het ankerveld op het hoofdveld noemt men ankerreactie. Door het gelijktijdig aanwezig zijn van het hoofdveld en het ankerveld treedt, naast een verzwakking, een vervorming van het hoofdveld op.

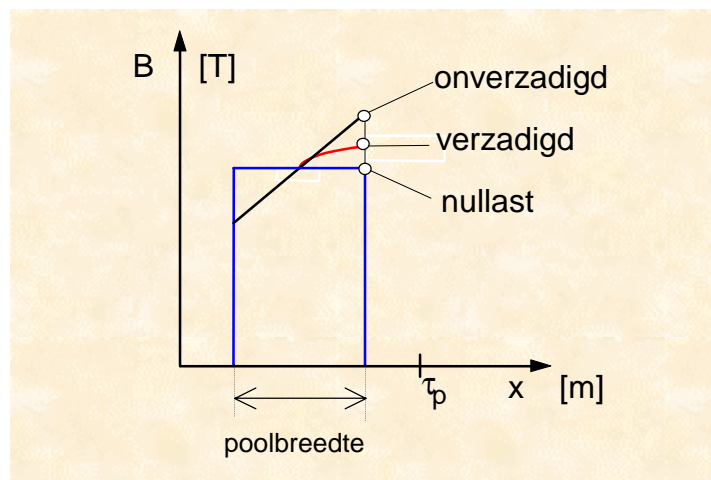


figuur 2.15 Veld van de ankerstroom



figuur 2.16 Fluxverandering door de ankerreactie in een verzadigde machine

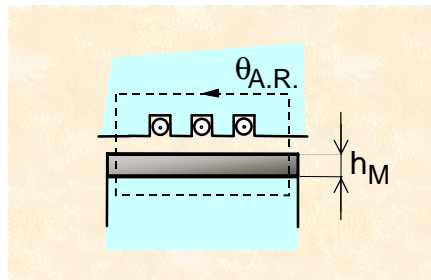
Ondanks het feit dat de termen hoofd-, dwars en resulterend veld gebruikt worden om de verschillende componenten van het veld aan te geven, is er in de machine op ieder ogenblik maar een veld aanwezig: het resulterend veld. Daar de flux in het ijzer loopt, mag men, omwille van het niet-lineair gedrag, de velden niet zonder meer superponeren. De afname van de flux is langs een zijde van de pool groter dan de overeenkomstige toename langs de andere zijde, ondanks het feit dat de m.m.k.'s die de afname en de toename genereren, dezelfde zijn. Bij een door de veldflux reeds verzadigde machine zorgt een veldafbrekende m.m.k. voor een proportioneel grotere afname van de flux dan de bijkomende flux gegenereerd door de opbouwende m.m.k. (figuur 2.16). Globaal neemt de flux onder de pool af, wat voor een gegeven snelheid tot een lagere e.m.k. leidt, of tot een lager koppel voor een gegeven stroom (figuur 2.17).



figuur 2.17 Inductievermindering bij verzadigde machine

De ankerreactie is bij machines met permanente magneten veel minder uitgesproken dan bij machines met elektromagneten. Bij machines met elektromagneten is de magnetische reluctantie voor de m.m.k. van de veldwikkeling θ_b en de m.m.k. van de ankerreactie $\theta_{A.R.}$ dezelfde, met name de reluctantie van de luchtspleet, indien de reluctantie van het ijzer

verwaarloosd wordt. Een permanente magneet gedraagt zich voor een uitwendig opgedrukt veld als lucht. Bij een permanent magneet bekrachtigde machine is de reluctantie gezien door de m.m.k. van de ankerreactie niet alleen die van de luchtspleet, maar ook die van de magneten met hoogte h_M (figuur 2.18).



figuur 2.18 *Reluctantie voor de m.m.k. van de ankerreactie bij een permanent magneet machine*

Indien de m.m.k. van de ankerreactie $\theta_{A.R}$ is, is de inductie bij een machine met elektromagneten

$$B_{A.R.,\text{elektro}} \sim \frac{\theta_{A.R}}{\delta} \quad (2.7)$$

en bij een machine met permanente magneten

$$B_{A.R.,\text{Perm.magn.}} \sim \frac{\theta_{A.R}}{\delta + h_M} \quad (2.8)$$

Daar de magneetdikte meestal enkele malen groter is dan de luchtspleetlengte, is het duidelijk dat de ankerreactie bij permanent magneetmachines veel kleiner is dan bij machines met elektromagneetbekrachtiging. De resulterende spannings-, koppel- en toerentalvariatiëes zijn bij permanent magneetmachines minder uitgesproken.