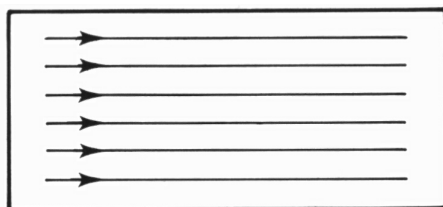


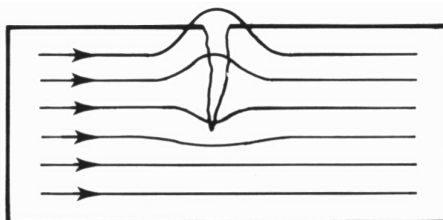
3 Magnetisch onderzoek

3.1. Inleiding

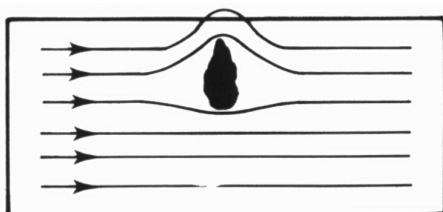
Het magnetisch onderzoek is een inspectietechniek waarmee fouten aan of dicht onder het oppervlak aangetoond kunnen worden bij ferromagnetische materialen. Bij deze methode wordt als regel het werkstuk gemagnetiseerd direct of indirect met behulp van een elektrische stroom. Bij een foutloos werkstuk bevinden de opgewekte magnetische veldlijnen zich voor het grootste gedeelte in het materiaal (figuur 3.1). De figuren 3.1, 3.2 en 3.3 geven het veldverloop aan in een werkstuk, dat bijvoorbeeld met gelijkstroom is gemagnetiseerd. Bij het gebruik van wisselstroom concentreren de veldlijnen zich aan het oppervlak (het zogenaamde skineffect).



Figuur 3.1. Veldverloop in een foutloos werkstuk.



Figuur 3.2. Veldverloop in een werkstuk met fout aan het oppervlak.



Figuur 3.3. Veldverloop in een werkstuk met fout in het inwendige.

In een werkstuk met een scheurtje of een ander soort fout wordt dit patroon verstoord en een aantal veldlijnen (zie figuur 3.2), die de luchtspleet moeten overbruggen waaier uit en kan dan boven het oppervlak uitkomen. Ook een fout onder het oppervlak geeft een dergelijk verstoring patroon (zie figuur 3.3). Dit zogenaamde lekveld kan met behulp van een meetsonde worden aangetoond of 'zichtbaar' worden gemaakt door kleine en gemakkelijk te magnetiseren ijzeroxydedeeltjes in dit gebied te brengen. Tengevolge van de magnetische wisselwerking begeven deze deeltjes zich naar het gedeelte met de grootste veldsterkte.

Voor het aantonen van onvolkomenheden worden drie methoden toegepast:

- a. de droge methode, waarbij de ijzeroxydedeeltjes in poedervorm over het werkstuk verstoven worden;
- b. de natte methode, waarbij de deeltjes als suspensie in olie of water op het oppervlak gebracht worden. Voor het aantonen van uiterst kleine fouten worden de deeltjes vaak omgeven met een fluorescerende laag.
- c. de methode, waarbij de onvolkomenheid wordt aangetoond met een meetsonde.

Alle methoden zijn zeer gevoelig en een ervaren onderzoeker kan uit de plaats en de vorm van de indicatie tot een uitspraak komen over de soort fout. Bij het magnetisch onderzoek zijn er geen beperkingen wat de vorm en afmetingen van het werkstuk betreft.

Belangrijk is dat de richting van de magnetisatie loodrecht op de fout moet staan, daar dan de indicatie het duidelijkst is. Tot een hoek van 45° is de fout nog zeer goed aantoonbaar. Loopt een scheur evenwijdig aan de veldlijnrichting, dan ontstaat er geen lekveld en wordt geen indicatie verkregen.

Na afloop van het onderzoek dient in vele gevallen zorg gedragen te worden voor een goede demagnetisatie. Samengevat zijn de belangrijkste handelingen:

- a. Het aanbrengen van een geschikt magnetisch veld in het werkstuk (§ 3.3).
- b. Het aanbrengen van een testmiddel (§ 3.5) of het gebruik van een meetsonde (§ 3.9).
- c. De inspectie (§ 3.6).
- d. De demagnetisatie (§ 3.8).

Ook bij deze methode neemt de kans op foutdetectie toe naarmate het werkstuk vooraf beter wordt schoongemaakt en de ruwheid van het oppervlak wordt vermindert.

De methode wordt in de praktijk ondermeer gebruikt voor het onderzoek van:

- smeedstukken (bijvoorbeeld krukassen),
- voorbewerkte laskanten, met name als er is voorverwarmd,
- lassen (bijvoorbeeld de voet van hoeklassen),
- constructies tijdens periodieke inspectie op (vermoeiings-)scheuren,
- buitengaatse constructies onder water (zie lit. 3.9).

De droge en de natte methode zijn zeer geschikt voor manueel onderzoek. Meetsondes worden meestal ingezet bij geautomatiseerde inspectie en hebben als bijkomend voordeel, dat hiermee *kwantitatieve* uitspraken over de aangetoonde defecten mogelijk zijn.

Belangrijke normen bij het onderzoek zijn: ASTM E 709 (methode) en E 125 (voorbeelden), DIN 54121, 54130 & 54131, MIL6868D, BS6072, NEN2515.

3.2. Magnetisme

Voor een goed inzicht in de mogelijkheden van het magnetisch onderzoek is kennis van het magnetisme een vereiste. Hieronder worden enige voor het onderzoek belangrijke gedeelten uit de theorie aangegeven. De theorie van de magnetische eigenschappen van elektrische stromen wordt bekend verondersteld (lit. 3.1 en 3.2).

Het magnetische veld wordt beschreven door twee vectorgrootheden, de magnetische inductie \vec{B} en de magnetische veldsterkte \vec{H} .

De magnetische inductie

$$\vec{F} = Q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad \text{of} \quad \vec{F} = (\vec{I} \times \vec{B})\ell$$

De eenheid van B , de Wb/m^2 , wordt de tesla (T) genoemd. Een oude eenheid is de gauss, 1 tesla = 10^4 gauss.

In de hierboven genoemde wet komt de invloed van het medium niet voor. B is dus een integrale grootheid, waarvan de grootte bepaald wordt door het medium én de magnetische veldsterkte H . Algemeen kan gesteld worden dat:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H}$$

μ_0 is een grootheid met een dimensie die door de keuze van de eenheden wordt bepaald, terwijl μ_r , de relatieve permeabiliteit, van de aard van het medium afhangt.

De magnetische veldsterkte

In het geval van een oneindig lange rechte stroomdraad, waardoor een stroom I gaat, is op een afstand r van de draad de grootte van de magnetische inductie:

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{I}{2\pi r}.$$

De grootheid $I/2\pi r$ bevat de invloed van I en r wordt gedefinieerd als de grootte van de magnetische veldsterkte \vec{H} , onafhankelijk van het medium.

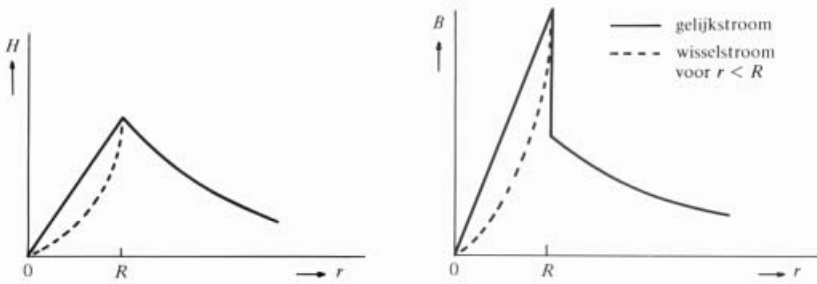
De eenheid van H is de A/m. Een oude eenheid is de oersted (Oe). ($1 \text{ Oe} = \frac{10^3}{4\pi} \text{ A/m}$).

Figuur 3.4 geeft het verloop van H en van B tegen r , voor een draadvormige stroomgeleider met een straal R voor zowel gelijkstroom als wisselstroom. Voor waarden van r kleiner dan R volgen H en B voor wisselstroom de onderbroken lijn.

Voor een oneindig lange lege spoel of een toroïde, met n windingen per lengte-eenheid, waardoor een stroom I gaat is $B = \mu_0 n I$ en dus $H = n I$.

Wordt in de spoel een kern van een ferromagnetische stof geplaatst, dan geldt de volgende beschouwing. De elementaire magneetjes waaruit de kern is opgebouwd zijn te beschouwen als magnetische dipolen, maar ook, volgens de bekende hypothese van Ampère, als kringstroompjes die door de gelijkrichtende werking van de stroom door de spoel een bijdrage leveren tot de inductie. Gedefinieerd wordt nu de grootheid \vec{M} , de

magnetisatie, als het dipoolmoment per volume-eenheid. Een gevolg van de hypothese van Ampère is, dat de kern ook opgevat kan worden als een spoel met een stroom I_m per lengte-eenheid. Bewezen kan worden (lit. 3.2), dat $M = I_m$.



Figuur 3.4. Het verloop van H en B tegen r voor een draadvormige geleider van ferromagnetisch materiaal met straal R .

B wordt nu:

$$B = \mu_0 (nI + I_m) = \mu_0 (nI + M) = \mu_0 (H + M).$$

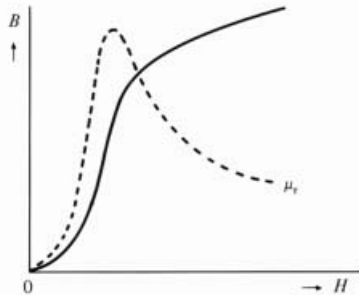
Wordt M gelijkgesteld aan χH , dan wordt $B = \mu_0 H(1 + \chi)$ met $\mu_r = 1 + \chi$.

χ wordt de *magnetiseerbaarheid* of de *magnetische susceptibiliteit* genoemd.

Belangrijk is nog het verband tussen B en H of M en H .

Figuur 3.5 geeft voor een nog niet eerder gemagnetiseerd materiaal het verband tussen B en H . De M - H -kromme heeft een analoge vorm, alleen gaat de kromme voor grote waarden van H horizontaal lopen (*verzadiging*).

In figuur 3.5 is ook het verband van μ_r tegen H geschetst, waarbij opgemerkt wordt dat μ_r geen constante grootte is, maar door een maximum gaat.

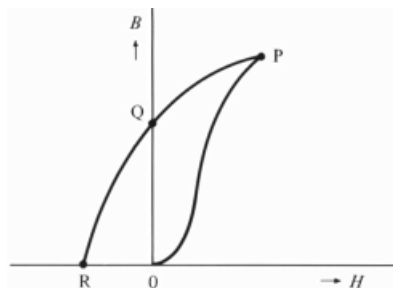


Figuur 3.5. B en μ_r als functie van H .

Hysteresis

Genoemd moet worden het verschijnsel van de *hysteresis*. Wordt een materiaal gemagnetiseerd tot P in figuur 3.6 en vermindert men hierna H weer tot nul, dan volgt de magnetische inductie de lijn PQ . In een uitwendig veld nul bestaat in het materiaal een inductie ongelijk aan nul die het remanent magnetisme genoemd wordt. De grootte van B

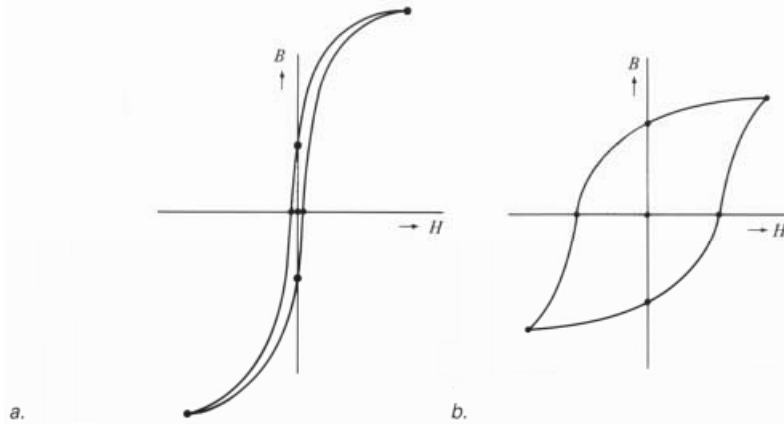
in het punt Q wordt bepaald door de ligging van P (zie ook figuur 3.25).



Figuur 3.6. B als functie van H . Voor maagdelijk materiaal OP , gedeelte van de hystereselus PR , remanent magnetisme Q , coërcitief veld R .

Bij het aanbrengen van een tegenveld daalt de inductie en wordt in het punt R nul; het bij dit punt behorend veld wordt het *coërcitieve veld* (vaak foutief *coërcitief-kraft*) genoemd. Wordt het werkstuk in een wisselveld gebracht, dan doorloopt de inductie de zogenaamde *hystereselus*, waarvan de vorm wordt bepaald door de aard van het materiaal. Figuur 3.7 geeft een tweetal voorbeelden, voor weekijzer (a) en een staalsoort die magnetisch sterk wordt genoemd (b).

Niet alleen de vorm van de lus maar ook de waarde van het remanent magnetisme en van het coërcitieve veld worden in de praktijk gebruikt voor de *identificatie* van een materiaal of voor de bestudering van (mechanische) *eigenschappen* van magnetiseerbare materialen. In dit verband kan nog een meetmethode genoemd worden als bij figuur 3.25, waarbij uitgaande van een geconditioneerd sinusvormig H -signaal het hierbij horende B -signaal wordt onderzocht op voor het materiaal karakteristieke boventonen. Ook optredende trek- en drukspanningen beïnvloeden de vorm van de hystereselus. Commercieel verkrijgbaar is apparatuur, waarmee tijdens het doorlopen van de hystereselus het zogenaamde *Barkhausen-effect* wordt gemeten. Het Barkhausen-effect treedt op bij *schoksgewijze* verplaatsingen van de grenzen van de magnetische domeinen, waarbij lokaal zeer grote fluxveranderingen per tijdseenheid optreden die meetbare inductiespanningen opleveren. De methode wordt gebruikt voor onderzoek aan processen en aan materiaaleigenschappen, die hun invloed hebben op het Barkhausen-effect. Men kan hierbij denken aan warmtebehandelingen, aan harding maar ook aan trek- en drukspanningen. De methode levert meestal kwalitatieve gegevens omdat ijkprocedures vaak zeer tijdrovend zijn (lit. 3.11). Zie ook § 19.5.

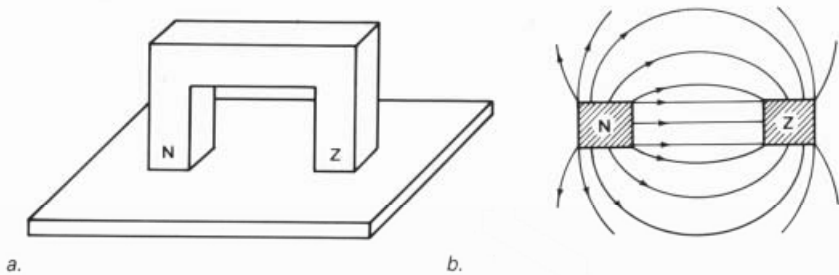


Figuur 3.7. De hystereselus a) voor weekijzer, b) voor een staalsoort.

3.3. Het magnetiseren van het werkstuk

Met een permanente magneet (zie figuur 3.8).

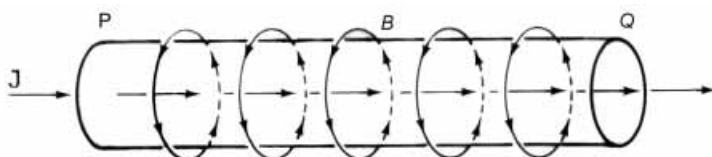
De toepassing van een permanente magneet is beperkt. In § 3.9 wordt een toepassing beschreven.



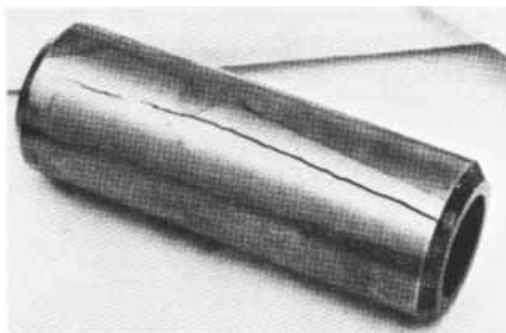
Figuur 3.8. a) Permanente magneet op proefplaat. b) Veldverloop tussen de polen.

Met behulp van een elektrische stroom (directe methode)

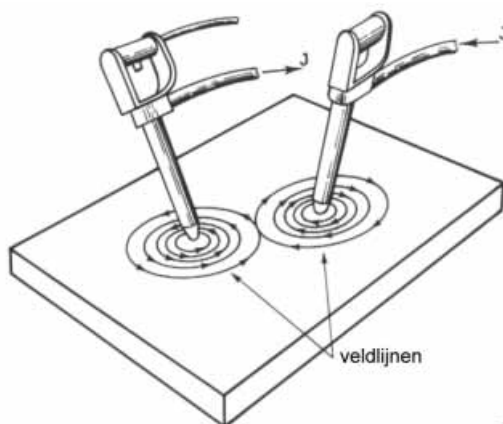
- rechtstreekse stroomdoorgang. Zie figuur 3.9 voor een ronde staaf. De aansluiting en voor de elektrische stroom door het werkstuk worden aangebracht bij P en Q. Bij deze stroom doorgang ontstaan er in het werkstuk en daarbuiten cirkelvormige veldlijnen. Fouten in de lengterichting van dergelijke staafvormige werkstukken kunnen op deze manier worden aangetoond (figuur 3.10).
- de 'prod'methode (zie figuur 3.11). Hierbij maakt men gebruik van speciale elektroden ('prods') die op het te onderzoeken deel van het werkstuk geplaatst kunnen worden voordat het elektrische circuit gesloten wordt. Deze methode is zeer geschikt voor het onderzoek van grote werkstukken (gelaste werkstukken, smeedstukken, gietstukken).



Figuur 3.9. Veldverloop bij een rechte stroomgeleider.



Figuur 3.10. Scheur in een zuigerpen van een dieselmotor. (Afgestaan door Magnaflux Corporation)



Figuur 3.11. De 'prod'methode. (In de figuur zijn de veldlijnen van de afzonderlijke prods getekend.)

In het algemeen moeten bij de directe methode zeer hoge stroomsterkten worden gebruikt. Door de directe stroomovergang is er kans op het overspringen van vonken en te hoge verwarming in het contactvlak, waardoor inbranding of ook een ongewenste warmtebehandeling mogelijk is. Een goede stroomaansluiting (werkstuk zo nodig schoonmaken) en een voldoende groot contactoppervlak zijn noodzakelijk. Bij verschillende toepassingen zijn kopercontacten uit den boze, omdat bij het hechten van koperdeeltjes aan het werkstuk naderhand corrosie kan optreden. De veel gebruikte Engelse norm BS 6072 laat contacten van zink in zijn geheel niet toe. Lood mag wel gebruikt worden mits de

werkruimte goed wordt geventileerd.

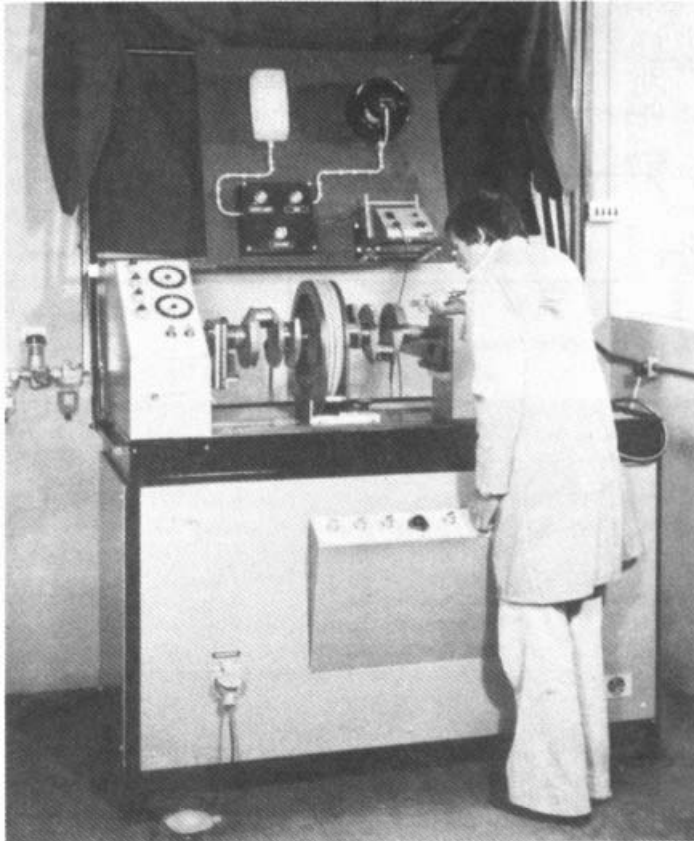
De indirecte methode

Bij de indirecte methode wordt gebruik gemaakt van:

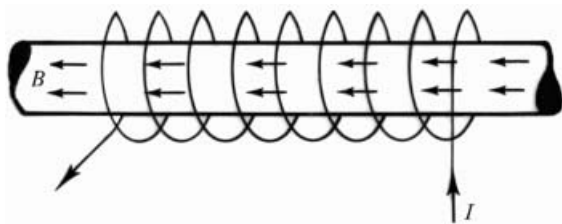
- een spoel, waardoor een elektrische stroom loopt (zie figuur 3.12).

In deze situatie ontstaat een veld in de langsrichting (figuur 3.13), zodat nu scheuren in de dwarsrichting (figuur 3.14) opgespoord kunnen worden (tot 20 à 30 cm buiten de spoeleinden). Soms wordt in de praktijk een geïsoleerde stroomkabel enige malen om het werkstuk geslagen; een drietal windingen is meestal voldoende.

Ook speciale spoelen, waarmee alternerend magnetisatie in verschillende richtingen bijvoorbeeld met een oscillerend draaiveld mogelijk is worden gebruikt (lit. 3.3).



Figuur 3.12. Bank voor het beproeven van onderdelen (tot 1 m). Hier is een spoel aangebracht om een krukas. (Afgestaan door Aims N.D.T. B.V.)

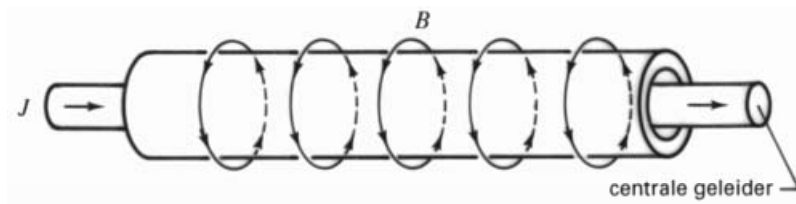


Figuur 3.13. Veldlijnenpatroon binnen een spoel.

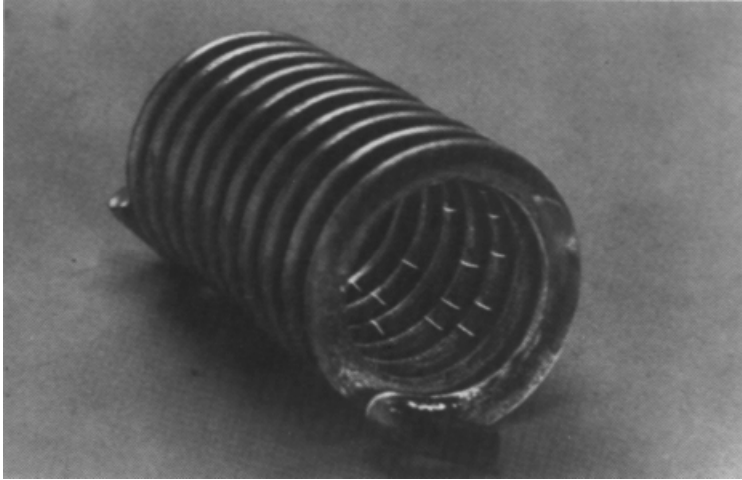


Figuur 3.14. Dwarsscheuren in een boor. (Afgestaan door Magnaflux Corporation)

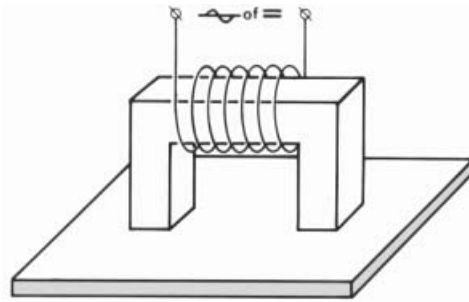
- een *stroomgeleider* binnen een werkstuk (zie figuur 3.15).
Deze methode is zeer geschikt voor de inspectie van buizen en gaten. De inspectie van de binnenkant is nu ook mogelijk. Zie als voorbeeld figuur 3.16.
- een *elektromagneet* (de jukmethode) (zie figuren 3.17 en 3.18).
Deze methode komt overeen met de in figuur 3.8 aangegeven werkwijze voor een permanente magneet. De te bereiken veldsterkte is evenwel veel hoger dan bij een permanente magneet, terwijl bovendien de magneet gemakkelijk van het werkstuk te verwijderen is na het uitschakelen van de stroom.
- de *inductiemethode* (figuur 3.19).
Het werkstuk vormt als bij een transformator de secundaire spoel, waarin de inductiestroom een torusvormig veld opwekt, waarmee langsscheuren kunnen worden aangetoond.



Figuur 3.15. Stroomgeleider binnen het werkstuk.



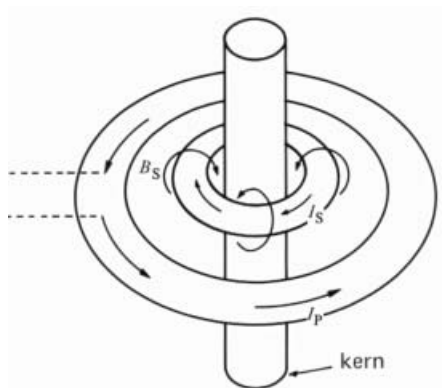
Figuur 3.16. Scheuren in een geplateerde veer. (Afgestaan door Magnaflux Corporation.)



Figuur 3.17. De jukmethode.



Figuur 3.18. Elektromagneet (juk) met verstelbare poten (verlengstukken van de kern). (Afgestaan door Magnaflux Corporation)



Figuur 3.19. De inductiemethode.

3.4. De grootte van de stroom

Bij een gegeven stroomsterkte bepalen de magnetische eigenschappen van het materiaal hoe hoog de magnetische inductie wordt.

Verschillende n.d.o.-specificaties en -normen schrijven een dusdanige magnetisatie voor, dat B groter is dan $\frac{1}{3}$ van de verzadigingswaarde (voor zeer kleine fouten wordt gekozen voor B is $\frac{1}{3}$ van deze waarde).

De verzadigingstoestand moet vermeden worden omdat dan valse indicaties gaan optreden. In de literatuur (lit. 3.4) wordt ook gewaarschuwd voor te lage waarden van B , omdat dan de veldlijnen bij een (kleine) fout het werkstuk niet verlaten. Vertaald in een waarde voor de veldsterkte van het oppervlak, wordt door verschillende normbladen een minimale H van 2400 A/m (30 Oe) aanbevolen. Voor een goede bepaling van de veldsterkte zijn veldsterktemeters verkrijgbaar. Deze zijn nogal kwetsbaar, vandaar dat in de praktijk veelal gebruik wordt gemaakt van het Burmah-Castrol- of Berthold-plaatje die na ijking naast de richting slechts aangeven of de veldsterkte boven of onder een gegeven waarde ligt. (Het Burmah-Castrol plaatje (0,1 mm dik) als voorbeeld bestaat uit 8 driehoekige plaatjes Fe met een tophoek van 45° , die via laagjes brons (0,05 mm dik) aan elkaar zijn verbonden. Elk bronzen laagje fungeert als “luchtspleet” en kan afhankelijk van de richting van het veld en de sterkte met een testmiddel zichtbaar gemaakt worden tijdens de magnetisatie). De waarde van $H = 2400$ A/m is voor hoog gelegerde staalsoorten bevredigend, voor zacht en laag gelegerd staal aan de hoge kant.

In de literatuur worden tal van voorbeelden genoemd (bijvoorbeeld lit. 3.5), waaruit blijkt dat onderzoek ook bij een lagere veldsterkte goed mogelijk is.

Voor de praktijk is een aantal vuistregels opgesteld. Bij rechtstreekse stroomdoorgang is de stroomsterkte per cm materiaaldikte: 40 – 160 A en bij een niet-ronde staaf 24 A per cm van de omtrek van de doorsnede. Bij de ‘prod’ methode is de stroomsterkte per 2,5 cm elektrode-afstand: 90 – 110 A als de dikte van het werkstuk kleiner is 200 mm (ASTM E 709).

Bij de indirecte methode is experimenteel vastgesteld dat het aantal ampèrewindingen ($I \times n$) gelijk moet zijn aan $k(\ell/d)$.

n = het aantal windingen per lengte-eenheid, ℓ = lengte werkstuk, d = diameter (cilindervormig) werkstuk.

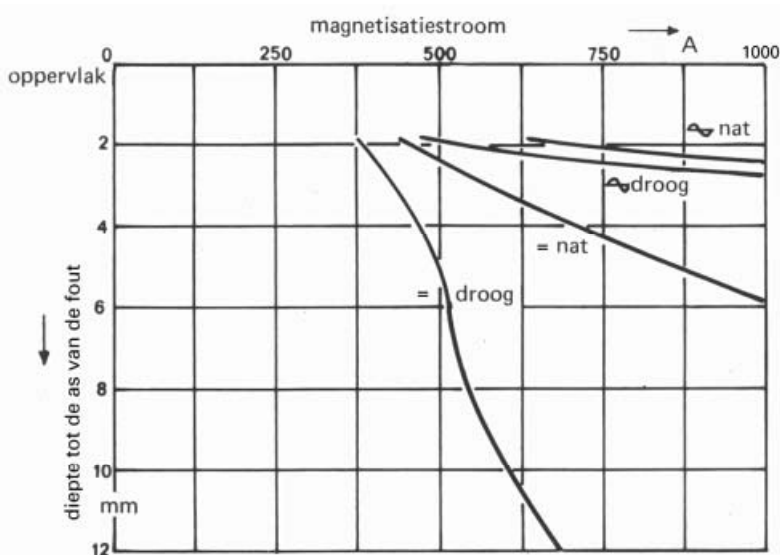
Voor de constante k worden in de literatuur uiteenlopende waarden aanbevolen. Voor gelijkstroom geeft bijvoorbeeld:

ASTME 709	k tussen 35.000 en 45.000,
BS 6072	$k = 32.000$,
en lit. 3.7	$k = 45.000$.

BS 6072 vermeldt ook een waarde voor wisselstroom: $k = 22.000$.

Voorwaarden voor een goede inspectie zijn:

- $2 \leq \ell/d \leq 15$; wordt aan deze eis niet voldaan, dan moeten hulpstukken gebruikt worden.
- vulfactor $\geq \frac{1}{10}$ (vulfactor = d^2 / d_s^2 , d_s = diameterspoel).



Figuur 3.20. Diepte waarop een kunstmatige fout met diameter = 1,8 mm te detecteren is als functie van de magnetisatiestroom voor verschillende methoden.

Keuze stroomtype

De keuze 'gelijk- of wisselstroom' hangt van de toepassing af. Zo geeft wisselstroom bij gecompliceerde werkstukken met grote verschillen in dikte een betere magnetisatie (meer homogeen) dan gelijkstroom. Bij gelijkstroom is de geïnspecteerde diepte groter (geen skin effect) (zie figuur 3.20). De maximale diepte waarop een fout nog gevonden wordt hangt evenwel sterk af van de geometrie en de ruwheid van het oppervlak en van de grootte en de vorm van de fout. Voor de praktijk wordt de magnetische methode bij voorkeur als *oppervlakte-inspectiemethode* en niet voor het aantonen van fouten diep onder het oppervlak, vanwege de vaagheid van de indicatie, aanbevolen.

3.5. Testmiddelen

In de meeste gevallen wordt tijdens het magnetiseren het testmiddel (een ferromagnetische stof) aangebracht. Op die plaatsen waar een lekveld aanwezig is, hoort het middel zich op en een indicatie wordt zichtbaar. Bij de droge methode wordt een poeder met behulp van verstuivers over het werkstuk geblazen. Bij de natte methode wordt het werkstuk ondergedompeld in een bak gevuld met de testinkt, (het poeder als suspensie in water of kerosine); of laat men de inkt langs het oppervlak stromen (deze werkwijze wordt het meest toegepast). Bij werkstukken, vervaardigd van materialen, bijvoorbeeld gereedschapsstaal, met een hoog remanent magnetisme wordt het poeder vaak na het magnetiseren aangebracht. De gevoeligheid van de methode is dan wel minder, maar voor vele praktische toepassingen toch voldoende.

Bij de fabricage van een poeder zijn van belang:

- *goede magnetische eigenschappen* (een goede magnetiseerbaarheid en een laag remanent magnetisme).

De poeders die in testinkten gebruikt worden hebben een lagere waarde voor het remanent magnetisme dan de droge poeders. Hiermee wordt bij de natte methode de kans op afzetten van gemagnetiseerde deeltjes op niet-relevante plaatsen verminderd.

- de *grootte* van de deeltjes. De deeltjes mogen niet te groot zijn, daar dan de beweeglijkheid te gering wordt. Te grote deeltjes zakken snel na het aanbrengen weg of worden bij testinkten, als de vloeistoflaag te dun is, niet meer meegenomen. Ook mogen de deeltjes niet te klein zijn, ze worden dan onvoldoende aangetrokken en hechten zich bij een droog poeder als een stoflaagje aan het oppervlak.

In testinkten ligt de goede grootte tussen 1 en 100 μm . In poeders kunnen de deeltjes gemiddeld groter zijn (tussen 5 en 100 μm). De minimale grootte bepaalt mede de kleinste scheurafmeting die nog waargenomen kan worden.

- de *vorm* van de deeltjes. De beste vorm is de staafvorm; deze geeft bij het magnetiseren de sterkste magneet, de beweeglijkheid is evenwel minder dan die van bolvormige deeltjes. In de praktijk blijken bij het gebruik van droge poeders mengsels van de verschillende vormen het best te voldoen.

Een groot aantal poeders en testinkten is verkrijgbaar, waarbij behalve aan het hierboven genoemde ook nog aandacht geschonken is aan de zichtbaarheid:

- de deeltjes zijn *gekleurd*, bijvoorbeeld zwart, rood, geel en wit. Hierbij zij opgemerkt dat van de testinkten de zwarte de meest gevoelige is. Ook kan men vooraf het oppervlak van het werkstuk voorzien van een speciale, egale en goed hechtende witte verflaag om het contrast te verbeteren.
- de deeltjes zijn omgeven door een *fluorescerende laag*.

Voor- en nadelen van de droge methode

Voordelen:

1. Zeer geschikt om fouten dicht onder het oppervlak aan te tonen (gevolg van de gunstige deeltjesgrootte en de goede magnetiseerbaarheid van de poeders). Toepassing: bijvoorbeeld inspectie van geverfde en gegalvaniseerde voorwerpen; haarscheuren hierin worden evenwel niet gevonden.
2. Inspectie bij hogere temperatuur is mogelijk (tot ongeveer 250 °C). In dit geval is een fluorescerend poeder niet te gebruiken, omdat bij hogere temperatuur het fluorescerende laagje ontleedt.
3. Het poeder is na afloop gemakkelijk te verwijderen.
4. Gemakkelijk toe te passen op grote werkstukken.
5. Geschikt bij inspectie van ruwe oppervlakken.

Nadelen:

1. Geringere gevoeligheid, in vergelijking met de natte methode, bij het opsporen van zeer fijne en van ondiepe scheuren.
2. Geringere snelheid van onderzoek, in vergelijking met de natte methode, bij grote aantallen van kleine voorwerpen.
3. Vooral bij onregelmatig gevormde voorwerpen is het niet gemakkelijk het gehele oppervlak op de juiste manier te bestuiven.
4. Het proces is moeilijk te mechaniseren.

Voor- en nadelen van de natte methode

Voordelen:

1. Geschikt voor zeer fijne en ondiepe oppervlaktescheurtjes.
2. Een snelle en volledige bedekking van elk oppervlak is mogelijk, bijvoorbeeld door onderdompelen in een bad.
3. De methode is geschikt voor mechanisering. In de praktijk worden reeds lasers gebruikt voor de inspectie van het werkstuk. De reflecties van gebieden met een overmaat aan (fluorescerend) poeder worden geregistreerd.

Nadelen:

1. Minder geschikt voor het opsporen van fouten onder het oppervlak.
2. Het schoonmaken geeft soms na afloop van het onderzoek problemen.
3. Brandgevaar bij het gebruik van testinkten, die op oliebasis zijn gemaakt (3%; 97% heeft een waterbasis).
4. Elektrische isolatie is vereist, wanneer baden met testinkten op waterbasis gebruikt worden. Bovendien moet men in dit geval bedacht zijn op corrosie.
5. Aandacht moet besteed worden aan de bescherming van handen en armen, daar verschillende bestanddelen op de huid inwerken.

Voorafgaand aan het magnetisch onderzoek moet het oppervlak van het werkstuk voorbereid worden. Er moet voor gezorgd worden dat het oppervlak:

- zo glad mogelijk is,
- zo schoon mogelijk is,
- droog en vetvrij is,
- vrij is van gedeeltelijk losliggende verf- en roestdeeltjes.

Wat dit laatste punt betreft is voorzichtigheid geboden, omdat fijne scheurtjes dichtgedrukt kunnen worden (bijvoorbeeld bij het stralen). Bevat een werkstuk een verflaag of een 'coating', dan moet eerst nagegaan worden of deze verwijderd moet worden. De dikte van de laag bepaalt namelijk de minimaal te detecteren foutgrootte. BS 6072 geeft aan, dat een laag tot 50 μm tolerabel is. (Ook het aanbrengen van een contrastlaag is niet in alle codes toegestaan).

3.6. Inspectie

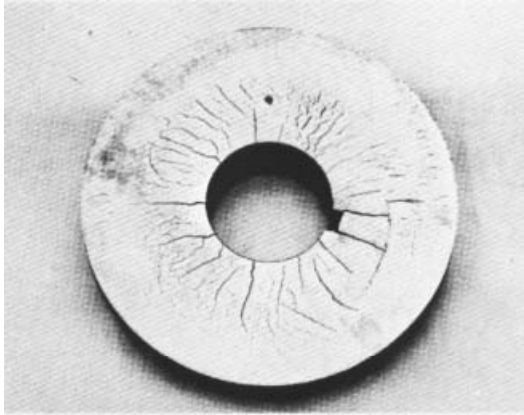
Indicaties kunnen een gevolg zijn van:

- fouten aan het oppervlak
- fouten onder het oppervlak
- niet-relevante magnetische verschijnselen.

Fouten aan het oppervlak

Het magnetisch onderzoek is zeer geschikt om haarscheurtjes en vermoeiingsscheuren te detecteren. Het onderzoek levert scherpe en duidelijke patronen op.

Figuur 3.21 geeft een voorbeeld van scheuren die ontstaan zijn bij het slijpen van een gehard oppervlak.

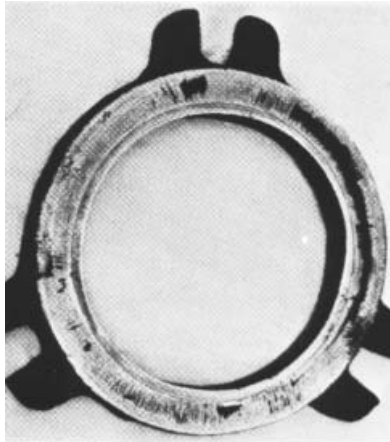


Figuur 3.21. Scheuren, ontstaan bij het slijpen van een gehard oppervlak. (Afgestaan door Magnaflux Corporation)

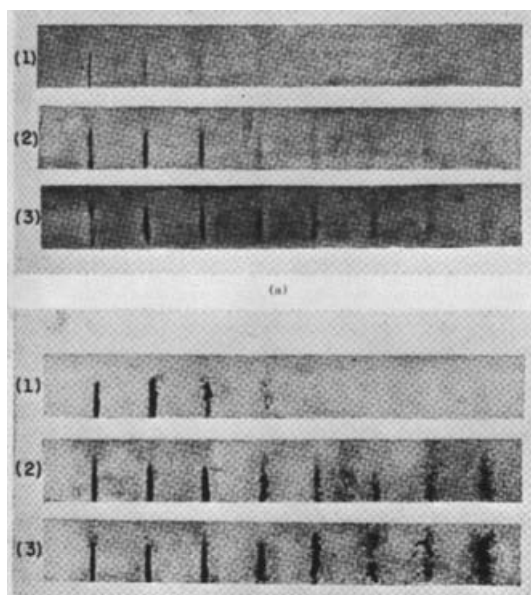
Fouten onder het oppervlak

Figuur 3.22 geeft een voorbeeld van poreusheid in een gegoten stalen flens. Vaak worden niet-metallische insluitsels aangetoond, waarvan de indicaties gewoonlijk evenwijdig aan de walsrichting zijn.

De indicaties van fouten onder het oppervlak geven in het algemeen een wazig patroon. Figuur 3.23 toont dit aan. In een werkstuk zijn, van links naar rechts in de figuur, gaten geboord op toenemende afstand vanaf het oppervlak. Het werkstuk is onderzocht met verschillende stroomsterkten, (1) = 500 A, (2) = 1000 A, (3) = 2000 A. Bovendien worden in deze figuur de natte (a) en de droge methode (b) vergeleken.



Figuur 3.22. Poreusheid in een gegoten stalen flens. (Afgestaan door Magnaflux Corporation)



Figuur 3.23. Invloed van de diepte van een fout bij: (1) = 500A, (2) = 1000A, (3) = 2000A. a) de natte methode; b) de droge methode. (Afgestaan door Magnaflux Corporation)

Niet-relevante indicaties

De interpretatie van een indicatie is in het algemeen niet moeilijk. In sommige gevallen treden ten gevolge van misleidende indicaties echter moeilijkheden op bij de beoordeling. Oorzaken hiervan kunnen zijn:

a. overmatige magnetisatie

Wanneer het werkstuk te sterk gemagnetiseerd wordt, kan het poeder zich op verschillende foutvrije plaatsen vastzetten. Een extra nadeel van overmatige magnetisatie is dat in het algemeen het contrast verminderd wordt.

b. geometrische effecten

Indicaties bij scherpe overgangen, bijvoorbeeld groeven, zaagsneden, hoeken in het werkstuk.

c. magnetisch schrift

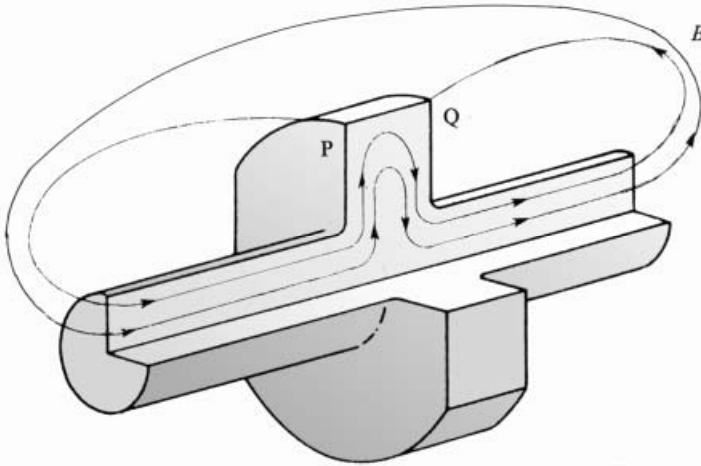
Hieronder verstaat men een plaatselijk voorkomende magnetisatie die het gevolg is van het aanraken van het werkstuk met een magneet.

d. lokale magnetische polen

Zie figuur 3.24. De door de magnetisatie opgewekte veldlijnen vormen altijd een gesloten kring. Bij een grillig gevormd werkstuk zoals in dit voorbeeld is de kans op extra polen, bijvoorbeeld P en Q, aanwezig.

e. sporen

Deze treden vaak op bij het gebruik van testinkten die langs het werkstuk vloeien, bijvoorbeeld tijdens het opdrogen.



Figuur 3.24. Lokale magnetische polen.

f. plaatselijke verschillen in permeabiliteit

Verschillen in permeabiliteit geven niet-relevante indicaties bij:

- een plaatselijke overgang tussen twee verschillende ferromagnetische materialen,
- de overgangszone tussen las en moedermateriaal, vooral als ze van verschillende samenstelling zijn. In eerste instantie is de indicatie niet te onderscheiden van een randinkarteling.
- een soldeerverbinding,
- segregatie,

3.7. Het vastleggen van de indicaties

Het fotograferen van de indicaties op het werkstuk, ook bij het gebruik van fluorescerende poeders, is in het algemeen geen probleem. Alleen is bij de laatste de belichtingstijd nogal lang.

In sommige gevallen wordt een transparante 'tape' gebruikt, waarop het poeder zich hecht. Ook magnetische banden die door het lekveld worden gemagnetiseerd worden gebruikt. De indicaties zijn dan in een later stadium met poeder of met speciale sonden (zie § 3.9) aan te tonen. Voor een uitvoerige bespreking van de volgende technieken wordt verwezen naar het Metals Handbook (deel 17) (lit. 3.5).

a. 'magnetic printing'

Op het werkstuk wordt een witte plastic laag aangebracht die tijdens het magnetiseren soepel blijft. Bij plaatselijk magnetiseren met wisselstroom en het bestuiven met poeder worden op deze laag de indicaties zichtbaar. Na het aanbrengen van een transparante deklaag en na het uitharden kan het geheel verwijderd worden. De afdruk kan zo nodig op een andere plaats geïnspecteerd worden en daarna bewaard worden.

b. Een methode, waarbij gebruik wordt gemaakt van een suspensie in vloeibaar rubber, een variant op de natte methode, waarmee replica's kunnen worden gemaakt.

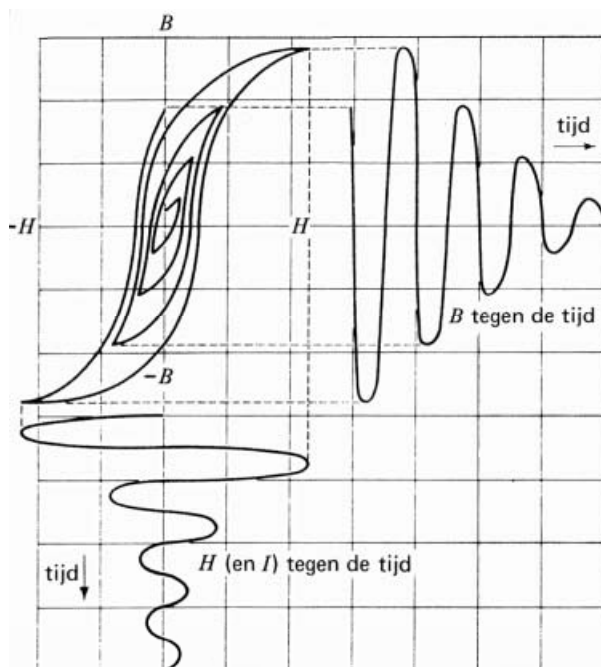
c. 'magnetic painting'

Voor het magnetiseren wordt een verlaag met hierin het poeder aangebracht. Door het magnetiseren worden de indicaties zichtbaar.

De (visuele) inspectie kan natuurlijk alleen goed worden uitgevoerd bij een goede verlichting met wit licht van voldoende sterkte of met een u.v. lamp in een verduisterde ruimte. In hoofdstuk 4 over het penetrant onderzoek, waarvoor hetzelfde geldt, wordt nader ingegaan op de eisen die de codes aan de verlichting stellen.

3.8. Demagnetisatie

Na afloop van een magnetisch onderzoek moet in vele gevallen het werkstuk gedemagnetiseerd worden. De kans bestaat dat na het magnetiseren het remanente magnetisme een waarde heeft die ontoelaatbaar hoog is. Bekend is de invloed van een ferromagneet op instrumenten (kompas). Is het werkstuk onderdeel van een roterende of bewegende constructie, bijvoorbeeld een zuiger in een cilinder, dan is er kans op toename van de wrijving en erosie. Moet het werkstuk nog verspanend bewerkt worden, dan mag daarna het slijpsel niet blijven plakken waardoor beschadigingen veroorzaakt kunnen worden. Ook bij booglassen levert plaatselijk remanent magnetisme problemen op, omdat de boog afgebogen kan worden.



Figuur 3.25. Het verloop van de magnetische inductie en de stroom tijdens een demagnetisatie.

Demagnetisatie bereikt men door het werkstuk te brengen in een wisselend magnetisch veld, waarvan de sterkte, die eerst boven het coërcitieve veld ligt, langzaam daalt (zie

figuur 3.25). Het bij het magnetiseren en demagnetiseren opgewekte veld moet hetzelfde veldlijnenpatroon hebben.

De vorm van remanent magnetisme die de meeste hinder geeft is de magnetisatie in de langsrichting, omdat in dit geval de veldlijnen buiten het eindoppervlak moeten komen (zie figuur 3.1). Deze vorm is gemakkelijk te verstoren. Vaak is het in de praktijk al voldoende, als men het werkstuk langzaam uit een wisselveld haalt. Meestal is de apparatuur voorzien van een demagnetiseringsgedeelte.

3.9. Foutdetectie met meetsonden

Naast het aantonen van defecten met behulp van de droge en natte methode wordt in de praktijk een derde methode toegepast, die gebruik maakt van het detecteren van het lekveld (men spreekt ook over *strooiflux*) met behulp van meetsonden.

De Duitse norm DIN 54130 geeft als mogelijke sonden aan:

- inductiespoelen
- sonden, met geschikte halfgeleiders, die gevoelig zijn voor veranderingen van de magnetische inductie. (Hall-sonde, veldplaten, magnetodioden, transistoren)
- andere sonden, gevoelig voor optredende magneetvelden (bijvoorbeeld de Förster-sonde).

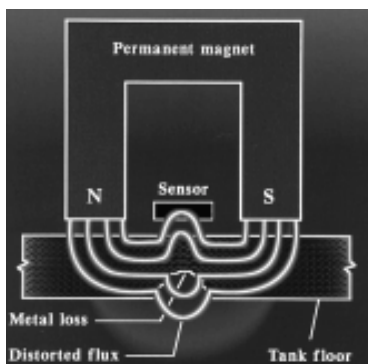
De *inductiespoel*, waarmee in principe een inductiespanning wordt gemeten tijdens het roteren van het spoeltje in het lekveld (zie ook § 5.3) en de Hall-sonde, waarin het lekveld met een stroom door de sonde een Lorentzkracht (zie § 3.2), veroorzaakt, die op zijn beurt een elektrisch spanningsverschil genereert dat evenredig is met de sterkte van het lekveld, worden veelvuldig toegepast. Met name de *Hall-sonde* kan zeer klein zijn en een zeer hoge gevoeligheid halen. In de literatuur wordt aangegeven, dat magnetodioden een nog hogere gevoeligheid bezitten, zij hebben echter het bezwaar dat zij gevoelig zijn voor veranderingen in de temperatuur.

Voordelen van deze methode:

- kwantitatieve uitspraken zijn mogelijk, hierbij kan men denken aan de bepaling van de scheurgrootte door de gemeten waarde van de sterkte van het lekveld te vergelijken met bekende waarden van ijkfouten of aan de toepassing van de eindige elementen methode, waarmee van elk gemagnetiseerd werkstuk met elk type fout het profiel van het lekveld kan worden berekend. Na de opmeting van het profiel van een onbekend defect, bijvoorbeeld door een meetsonde op verschillende afstanden van het oppervlak door het lekveld heen te bewegen, kan profielvergelijking plaats vinden. Het blijkt, dat fouten onder en aan het oppervlak zich onderscheiden door een verschillende signaalvorm.
- zeer geschikt bij de toepassing van gelijktijdige magnetisatie in twee richtingen.
- de snelheid van inspectie is hoog, de methode is contactloos.
- de methode leent zich voor automatisering, voor koppeling aan dataverwerkende systemen met mogelijkheden voor patroonherkenning.

Praktisch wordt de methode vooral toegepast bij de geautomatiseerde inspectie van pijpen, draden en staven van ferromagnetische materialen tijdens productie. Hiervoor zijn

bijvoorbeeld opstellingen gemaakt met een roterende elektromagneet. Er zijn ook andere toepassingen te noemen, zo wordt de techniek ook gebruikt door Volkswagen tijdens het fabricageproces en door inspectiefirma's voor het aantonen van corrosiegebieden aan de onderkant van stalen bodemplaten. Zie de figuren 3.26 en 3.27 met een meetsonde midden tussen de poten van het juk. De laatstgenoemde toepassing van de methode is vermeldenswaard, in de eerste plaats omdat gemagnetiseerd wordt met een zeer sterke permanente (Samarium Cobalt) jukmagneet van circa 1 tesla en in de tweede plaats omdat gewerkt kan worden op tamelijk ruwe oppervlakken, die nog bedekt kunnen zijn met een coating of verflaag tot 2 mm dikte. In dit geval kan putcorrosie, (dat een lekveld genereert als in figuur 3.3 met het defect aan de onderkant), met een putinhoud van circa 85 mm³ worden aangetoond. De methode is geoptimaliseerd voor platen met een dikte van 6 mm (lit. 3.10).



Figuur 3.26. Het aantonen van putcorrosie door strooifluxmeting met een sensor bij gebruik van een permanente magneet.



Figuur 3.27. Apparatuur voor het aantonen van putcorrosie in een bodemplaat (afgestaan door RTD b.v. te Rotterdam).

Opgemerkt moet nog worden, dat het magnetisch onderzoek met name met meetsonden behoort tot de klasse van elektromagnetische methoden waartoe ook het wervelstroomonderzoek (hoofdstuk 5) en de potentiaalvalmethode (hoofdstuk 14) behoren met vergelijkbare meetprincipes. Zo zal in hoofdstuk 14 nog een moderne uitvoering van een techniek worden beschreven, die op economische gronden ondermeer het klassieke magnetische onderzoek met deeltjes als detectiemiddel op tal van terreinen zal gaan verdringen. (zie lit. 14.3 en 14.4).

Literatuur hoofdstuk 3

- 3.1. C.E. Betz, *Principles of magnetic particle testing*, Magnaflux Corporation.
- 3.2. M. Alonso en E.J. Finn, *Fundamentele Natuurkunde*, deel 2.
- 3.3. V. Deutz en E.A. Becker, *Neue Geräte zur kombinierten magnetischen Rissprüfung*, Materialprüfung 16(1974), blz. 305-307.
- 3.4. *Non-destructive testing Handbook*, ASNT.
- 3.5. R.F. Lumb en P. Winship, *Magnetic particle crack detection*, Metal construction, juli 1977 blz. 293-296 en augustus 1977, blz. 331-334.
- 3.6. *Quality Technology Handbook*, N.D.T. centre, Harwell.
- 3.7. *Metals Handbook*, vol. 17.
- 3.8. *Handbook for Magnetic Inspection*, I.I.W.
- 3.9. *Materials Evaluation*, Vol. 41, nr. 5, April 1983.
- 3.10. RTD b.v. *Magnetische onderzoekprocedure*, 1993.
- 3.11. A.S. Wojtas, W.J.P. Vink, G. den Ouden and K. Tiito, *Evaluation of the stress distribution in welded steel by measurement of the Barkhausen noise level*, Proceedings Int. Conf. on Pract. Appl. of Res. Stress Techn., USA, 1991.