

# AFSCHERMING

van een zwak statisch magnetisch veld met

## Mu-METAAL

dr. ir. J. G. Bannenberg

FOM-Instituut voor Atoom- en Molecuulfysica, Amsterdam

Na een voorbeeld van de invloed van het aardveld op een elektronenbundel met lage energie, worden enige praktijk-formules afgeleid en gegevens verstrekt, die als leidraad kunnen dienen bij het construeren van een afscherming voor een statisch magnetisch veld; in het bijzonder voor het zwakke aardveld.

### 1. Inleiding

Een geladen deeltje dat loodrecht op een magneetveld beweegt, wordt door de Lorentz-kracht afgebogen.

Bij lichte deeltjes – elektronen – kan de afbuiging door het aardmagneetveld al hinderlijk zijn, vooral als het elektron weinig energie, dus een lage snelheid heeft.

De magneetveldcomponent  $B_{\perp}$  die loodrecht op de bewegingsrichting staat, zorgt voor een gekromde – cirkel – baan.

Na een afstand van  $x$ [mm] doorlopen te hebben – figuur 1 – is de baanafwijking  $y$ :

$$y = \frac{x \cdot B_{\perp}}{34 \cdot \sqrt{V}} \quad (1)$$

Hierbij is:  $B_{\perp}$  in Gauss,  $x$  en  $y$  in mm en  $V$  elektronenenergie, in eV.

#### Voorbeeld:

Aardveld  $B=0,5$  Gauss, 100 eV elektronen en loopafstand  $x=100$  mm, dan blijkt uit (1):  $y=14$  mm.

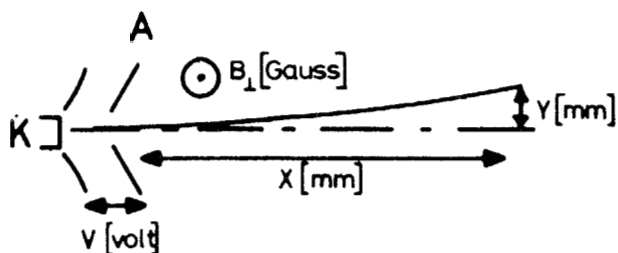
Dit magneetveld zal met een factor van circa duizend moeten worden verzwakt, om voor een dunne elektronenbundel de afbuiging over 100 mm klein ten opzichte van de bundel-afmeting – c.q. diafragma-opening – te maken.

### 2. Afscherming

2a. Om aan te geven hoe magnetische afscherming tot stand komt, zal eerst de elektrische afscherming met een kooi van Faraday worden besproken.

We gaan uit van een homogeen elektrisch veld  $E_0$  tussen twee metalen platen, afstand  $d$ , spanning respectievelijk  $V_1$  en  $V_2$  – figuur 2a –.

Het veld is:  $E_0 = (V_2 - V_1)/d$ .



Figuur 1. Schematische voorstelling van een elektronenbundel die, uitgaande van de bron K, wordt afgebogen door een magneetveld dat loodrecht staat op het vlak van tekening – richting van het veld naar boven –.

Wordt in dit veld een geleidende metalen cylinder geplaatst, dan vormen zich door elektrische inductie oppervlakte ladingen – figuur 2c –.

Het veld afkomstig van deze oppervlakte-ladingen allèen, is getekend in figuur 2b.

Binnen de cylinder is het veld homogeen en precies even groot als het oorspronkelijke veld, alleen de richting is tegengesteld.

Netto resultaat: het veld binnen de cylinder is nul. Naast de cylinder – links en rechts – is het veld zwakker – let op de pijlrichtingen in figuur 2b –. Aan de onder- en bovenkant is het veld sterker geworden: het ‘aanzuigeffect’.

De veldlijnen die op de cylinder eindigen staan loodrecht op het metaal.

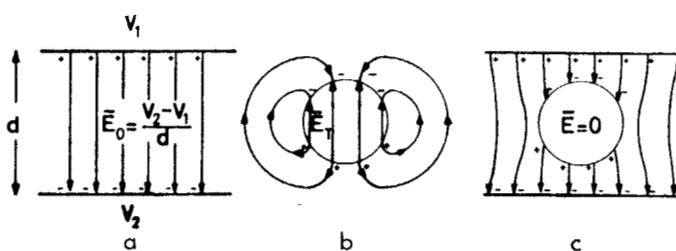
Als in plaats van een metalen cylinder een plastic cylinder wordt gebruikt, waarvan de dielektrische constante  $\epsilon_r=6$  – in plaats van  $\epsilon_r =$  oneindig bij metaal –, dan ontstaan ook oppervlakte ladingen, maar de compensatie binnen de cylinder is niet volledig en de veldlijnen staan niet precies loodrecht op het plastic.

2b. Magnetische afscherming werkt analoog aan de kooi van Varaday bij het elektrische veld.

Door toepassing van Mu-metaal is een hoge  $\mu_r$  haalbaar, zodat door de geïnduceerde oppervlakte-polen het veld binnen een cylinder nagenoeg geheel gecompenseerd wordt.

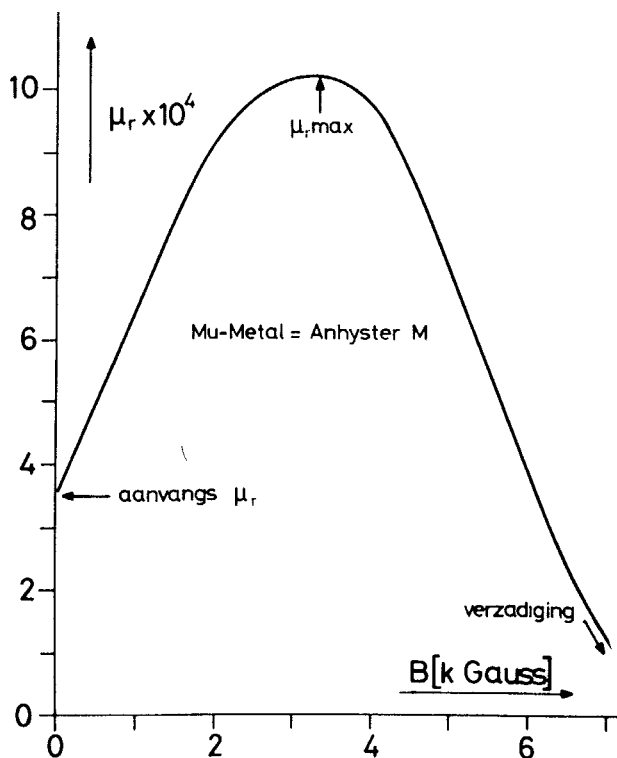
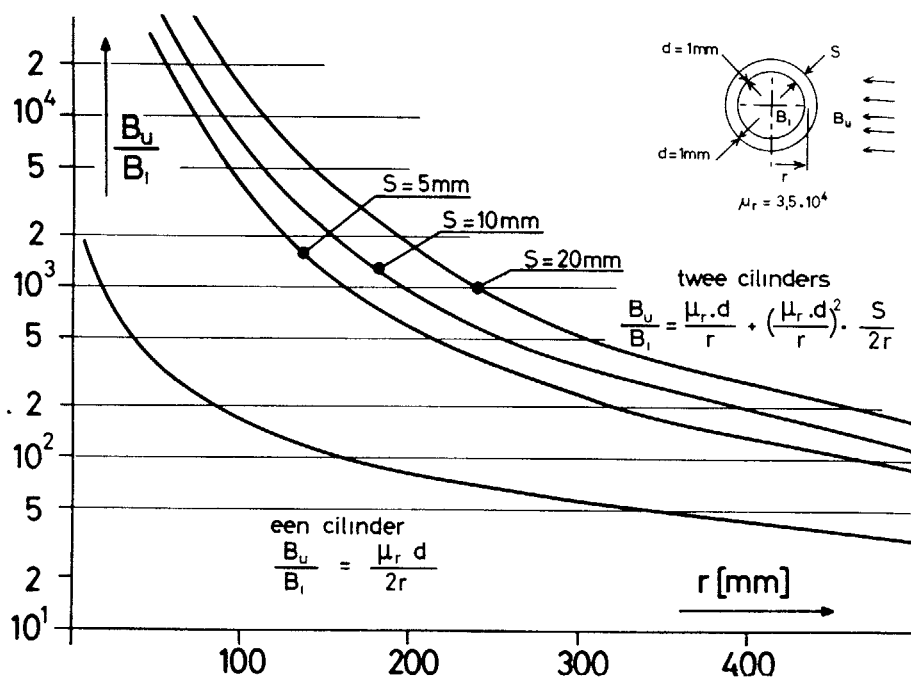
Binnen in een bol, een ellipsoïde of een zeer lange cylinder dwars op het magneetveld, is het restveld homogeen.

Binnen in een korte met deksels afgesloten cylinder of in een rechthoekige doos, is het restveld in het algemeen niet homogeen; ook niet bij een homogeen uitwendig aardveld.



Figuur 2. Analogie met het afschermen van elektrische velden; een homogeen veld tussen platen – 2a – wordt binnen de afscherming tot nul gereduceerd – 2c – door het in de afscherming geïnduceerde, tegengesteld gerichte veld – 2b –.

**Figuur 3.** Verband tussen de verhouding van de inductie buiten en binnen een afscherming – de afschermfactor  $B_u/B_i$  – verticaal afgezet, en de gemiddelde straal van een dunwandige cilindrische afscherming, horizontaal afgezet. De onderste kromme geldt voor één cilinder; de drie bovenste voor twee coaxiale cilindres, respectievelijk met een onderlinge afstand van 5, 10 en 20 mm.



**Figuur 4.** Verband tussen de relatieve permeabiliteit –  $\mu_r$  –, verticaal afgezet, en de magnetische inductie –  $B$  in kilo Gauss – voor het speciale afschermmateriaal ‘Anhyster M’, horizontaal afgezet.

### 3. Afschermfactor

Noemen we de magnetische inductie *buiten* de afscherming  $B_u$  (Gauss) en de magnetische inductie *binnen* de afscherming  $B_i$  (Gauss), dan is de *afschermfactor* voor een lange cilinder dwars op het veld geplaatst – referentie 1 –:

$$\frac{B_u}{B_i} = \frac{\mu_r(r_2^2 - r_1^2)}{4 \cdot r_2^2} \quad (2)$$

met  $\mu_r$  = relatieve permeabiliteit van het gebruikte ijzer en  $r_1$ , respectievelijk  $r_2$ , de binnen- respectievelijk buitenstraal van de cilinder.

Voor een dunwandige cilinder ( $r_2 - r_1 \ll r_2$ ) met wanddikte  $d = r_2 - r_1$  en een gemiddelde straal  $r$ , is de afschermfactor bij benadering:

$$\text{één cilinder} \quad \frac{B_u}{B_i} = \frac{\mu_r \cdot d}{2 \cdot r} \quad (3)$$

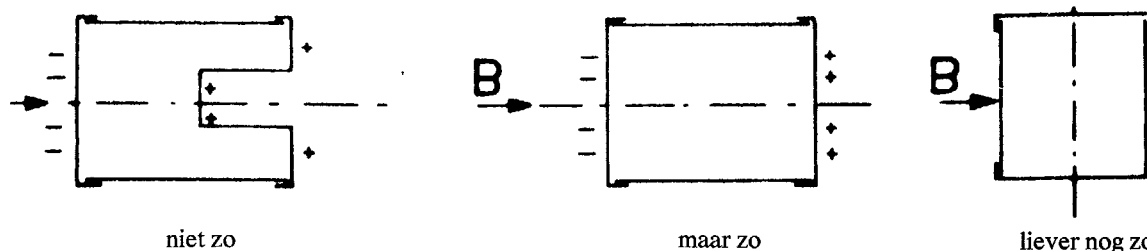
Als de cilinder kort is moeten beide einden worden afgesloten; formules (2) en (3) zijn dan niet meer exact.

Zo wordt voor een dunwandige bol gevonden:

$$\text{één bol} \quad \frac{B_u}{B_i} = \frac{2 \mu_r \cdot d}{3 \cdot r} \quad (4)$$

Veel grotere afschermfactoren zijn haalbaar door twee coaxiale cilindres toe te passen.

In de formule komt dan een term met  $\mu_r^2$  erin, waardoor een hoge afschermfactor bereikt kan worden – referentie 1 –:



**Figuur 7.** Instekende, magnetiseerbare delen, geven binnen de afscherming een ongewenst ‘magnetisch potentiaal’-verschil.

twee cylinders

$$\frac{B_u}{B_1} = \frac{\mu_r^2(r_4^2 - r_3^2)(r_3^2 - r_2^2)(r_2^2 - r_1^2)}{16 \cdot r_4^2 \cdot r_3^2 \cdot r_2^2} + \frac{\mu_r(r_4^2 \cdot r_2^2 - r_3^2 \cdot r_1^2)}{4 \cdot r_4^2 \cdot r_2^2} \quad (5)$$

Voor een tweetal dunwandige coaxiale cylinders met wanddikte  $d = r_2 - r_1 = r_4 - r_3$ , spatie tussen binnen en buiten cylinder  $S = r_3 - r_2$  en een gemiddelde straal  $r$ , is de afschermfactor bij benadering:

$$\text{twee cylinders} \quad \frac{B_u}{B_1} = \frac{\mu_r \cdot d}{r} + \left[ \frac{\mu_r \cdot d}{r} \right]^2 \cdot \frac{S}{2r} \quad (6)$$

De eerste term is twee keer zo hoog als bij één cilinder (3) omdat er nu twee cylinders zijn. De tweede term wordt flink groot als  $S$  niet te klein gekozen wordt, dus liefst 10 à 20 mm voor 1 mm plaatdikte.

4. Mu-Metaal.

Welke  $\mu_r$  is nu in de praktijk haalbaar?

Goede resultaten zijn bereikt met 'Anhyster M' van de firma Creusot-Loire, Métalimphy. Vertegenwoordiger: J. J. Batenburg, Berkel Enschtot (013/421107).

Na rondzetten, buigen, forceren, boren en/of lassen is een gloei-behandeling nodig in waterstof atmosfeer of in vacuüm  $\leq 0,1$  Pa. Opwarmingsnelheid: maximaal 500 °C/uur. Gloeitemperatuur 1050 °C, gedurende 2 uur. Afkoelingsnelheid niet van belang; kan in vacuüm, mag in stikstof – sneller –.

Na de gloei-behandeling is de 'aanvangs'  $\mu_r = 3,5 \cdot 10^4$ .

In figuur 4 is het verloop van  $\mu_r$  als functie van  $B$  aangegeven. De permeabiliteit loopt op tot een maximale waarde van ruim  $10 \cdot 10^4$  bij 3000 Gauss; het materiaal raakt verzadigd bij zo'n 7000 Gauss, waar  $\mu_r$  flink onder de aanvangs  $\mu_r$  is gezakt.

5. Een paar eenheden en formules

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad (7)$$

$B$  = magnetische inductie.

– c.g.s. stelsel Gauss: m.k.s.-Stelsel: Tesla of Weber/m<sup>2</sup>.

Omrekening: 1 Tesla =  $10^4$  Gauss.

$H$  = magnetische veldsterkte.

c.g.s. stelsel: Oerstedt. m.k.s.-stelsel: Amp/m.

Omrekening: 1 Oerstedt =  $10^3/4\pi$  Amp/m.

$\mu$  = magnetische permeabiliteit.

Van vacuüm: c.g.s.-stelsel  $\mu_0 = 1$  [Gauss/Oerstedt];

m.k.s.-stelsel  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Tesla/Amp/m.

$\mu_r$  = relatieve permeabiliteit

$\mu_r = 1$  voor vacuüm en lucht.

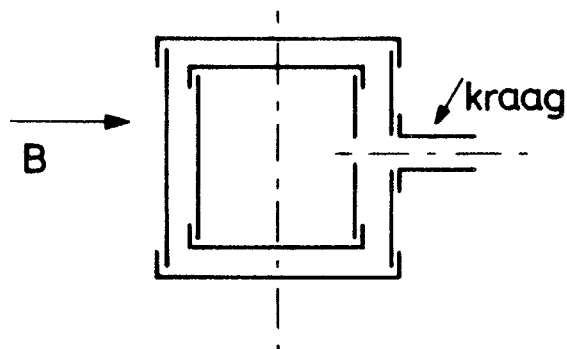
$\mu_r \gg 1$  voor Mu metaal, mits niet verzadigd.

$$\Phi = B \cdot \text{Oppervlak} \quad (8)$$

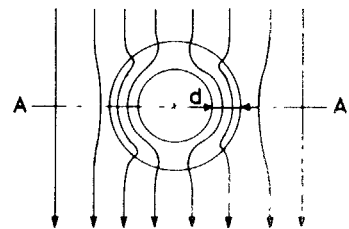
$\Phi$  = magnetische flux.

c.g.s.-Stelsel: Maxwell of Gauss/cm<sup>2</sup>. m.k.s.-Stelsel: Weber.

Omrekening: 1 Weber =  $10^8$  Maxwell.



Figuur 6. Het afsluiten van, vooral korte, afscherm-cylinders en gaten in de afscherming, vereist bijzondere aandacht.



Figuur 5. Verdeling van een aanvankelijk homogeen magneetveld door een cilindrische afscherming.

Wordt een afschermcylinder, diameter  $2r$ , lengte  $l$ , dwars op een magneetveld  $B$  geplaatst, dan is de flux op de cylinderwand volgens vergelijking (8):

$$\Phi = B \cdot l \cdot 2r \quad (9)$$

Om afscherming te verkrijgen moet deze flux door de cylinderwand worden omgeleid – figuur 5 –.

De flux door het ijzer ter plaatse van de doorsnede  $AA^1$  is dan:

$$\Phi_y = B_y \cdot l \cdot 2d \quad (10)$$

Omdat nu  $\Phi = \Phi_y$  – flux behoud –, vinden we uit de formules (9) en (10):

$$B_y/B = r/d \quad (11)$$

Dit is een benadering; door het aanzuigeffect is  $B_y/B$  nog wat groter – naast de cylinder is de flux immers wat lager dan zonder cylinder –.

Voorbeeld:

Cylinder  $r = 350$  mm en  $d = 1$  mm in het aardveld  $B = 0,5$  Gauss.

Nu blijkt volgens (11):  $B_y = 175$  Gauss.

Uit figuur 4 volgt voorts:  $\mu_r = 3,5 \cdot 10^4$ .

Zodat volgens (7):  $H_y = 175/1 \cdot 3,5 \cdot 10^4 = 5 \cdot 10^{-3}$  Oerstedt.

Dus ondanks de fluxverdichting, toch nog een lage veldsterkte.

6. Constructieve maatregelen

De gegeven formules (3) en (6), weergegeven in figuur 3 voor Mu-metaal met  $\mu_r = 3,5 \cdot 10^4$ , zijn goede benaderingen voor lange cylinders in een dwarsveld.

Korte cylinders en ook lange cylinders evenwijdig aan het magneetveld moeten worden afgesloten met goed passende deksels om de flux inderdaad om te leiden.

Bij gaten ontstaat doorgreep – referentie 2 –.

Voorzie gaten van een opstaande kraag, liefst met grote lengte/diameter verhouding. Deze kraag moet naar buiten wijzen en met een geforceerde rand goed sluitend tegen de hoofd-cylinder bevestigd worden – figuur 6 –.

Neem ruime afstand – liefst enkele centimeters – tussen beide bussen.

Gebruik niet-magnetische afstands-blokjes. Plaats geen magnetiseerbaar materiaal binnen de afscherming.

Test alle onderdelen op magnetische eigenschappen.

Zorg dat er geen magnetiseerbaar materiaal naar binnen steekt – figuur 7 – en bedenk dat er altijd een magnetisch potentiaal verschil overblijft tussen de twee wanden waar de flux intreedt, respectievelijk uitreedt.

Referentie 1: V.K. Zworykin et al. *Electron optics and the electron microscope*.

New York, John Wiley & Sons (1945) pag. 481 e.v.

Referentie 2: W. G. Wadey. *Rev. Sc. Instr.* 27, 910 (1956).

Dit werk maakt deel uit van het onderzoeksprogramma van de Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie – FOM – en werd mogelijk gemaakt door financiële steun van de Nederlandse Organisatie voor Zuiver Wetenschappelijk Onderzoek – ZWO –.