

MASTER

Krachtsensor berustend op het magneto-elastisch effect

Troost, J.

Award date:
1984

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

AFDELING DER ELEKTROTECHNIEK
TECHNISCHE HOGESCHOOL EINDHOVEN
Vakgroep Meten en Regelen

KRACHTSENSOR BERUSTEND OP HET
MAGNETO-ELASTISCH EFFEKT

door J. Troost

Rapport van het afstudeerwerk
uitgevoerd van maart 1983 tot augustus 1984
in opdracht van prof. dr. ir. P. Eykhoff
onder leiding van ir. C. Huber

De afdeling der elektrotechniek van de Technische Hogeschool Eindhoven
aanvaardt geen verantwoordelijkheid voor de inhoud van stage- en
afstudeerverslagen.

Samenvatting: Krachtsensor berustend op het magneto-elastisch effect

Bestudeerd werd de mogelijkheid een krachtsensor te realiseren, die eenvoudig, robuust en toch nauwkeurig is. Verschillende principes worden besproken en één daarvan, het magneto-elastisch effect, wordt nader uitgewerkt.

De mechanische konstruktie is met behulp van de eindige elementen methode bepaald. Tevens is een onderzoek naar materiaalkeuze uitgevoerd.

Naar het zich laat aanzien is de ontwikkelde krachtsensor zeer geschikt om in ruwe omgevingen te worden ingezet. Daarbij kan o.a. gedacht worden aan tastsensoren voor robots.

Een betere mechanische meetopstelling zal moeten uitwijzen hoe nauwkeurig de krachtsensor zich gedraagt. De verwachting is echter, dat een onnauwkeurigheid lager dan 0,5% te bereiken valt.

Summary: Force sensor based on the magneto elastic effect

A study has been made on the possibility of developing a force sensor which is simple, robust and accurate. Various principles are discussed and one of them, the magneto elastic effect, has been more closely examined theoretically and practically.

The mechanical construction has been determined using the finite element method. Also, a study of the factors governing the choice of materials has been carried out.

There is every indication that the developed force sensor is very suitable for use in rough environments. Think for example of touch sensors for robots.

A better mechanical measuring apparatus will be needed to find out how accurate the force sensor really is. The expectation, however, is that an inaccuracy of less than 0,5 % can be reached.

J. Troost

THE, Vakgroep ER, 1984

symbolen

a	versnelling		ms^{-2}
α	lineaire uitzettingscoëfficiënt		K^{-1}
B	inductie		T
D	storingspenetratiefactor		K^{-1}
E	elasticiteitsmodulus		Nm^{-2}
E_H	veldenergiedichtheid		Jm^{-3}
E_K	anisotropie-energiedichtheid		Jm^{-3}
E_σ	spanningsenergiedichtheid		Jm^{-3}
ϵ	relatieve rek		
F	kracht		N
G	gewicht		N
g	aardversnelling		ms^{-2}
H	magnetisch veld		Am^{-1}
H_m	magnetisch veld in materiaal		Am^{-1}
I_S	verzadigingspolarisatie		T
K, K_1, \dots	anisotropieconstanten		Jm^{-3}
λ	relatieve lengteverandering		
	magnetostriktie		
λ_S	verzadigingsmagnetostriktie		
M	magnetisatie		Am^{-1}
M_S	spontanemagnetisatie		Am^{-1}
m	massa		kg
v	temperatuursverschil		K of °C
μ_0	permeabiliteit van het vacuüm	$4\pi \cdot 10^{-7}$	$\text{VsA}^{-1}\text{m}^{-1}$
μ_r	relatieve permeabiliteit		
ρ	specifieke weerstand		Ωm
S	spanningsgevoeligheid		WbN^{-1}
σ	spanning		Nm^{-2}
σ_i	ideële spanning		Nm^{-2}
σ_B	treksterkte		Nm^{-2}
σ_E	elasticiteitsgrens		Nm^{-2}
σ_P	proportionaliteitsgrens		Nm^{-2}
σ_R	rekgrens (0,2 % blijvende vervorming)		Nm^{-2}
T_1, T_2	temperatuur		K of °C
θ	Curie-temperatuur		K of °C
χ	susceptibiliteit		

Inhoud	pag
1. <u>Inleiding</u>	6
2. <u>Krachtopnemers</u>	7
2.1 Inleiding	7
2.2 Krachtkompenserende opnemers	12
2.3 Krachtopnemers waarvan de werking berust op materiaaleigenschappen	15
2.3.1 Krachtbepaling door het meten van de lengte van de vervorming	15
2.3.2 Piëzoëlektrische krachtopnemers	18
2.3.3 Krachtsensor met behulp van rekstrookjes	19
2.3.4 Een magneto-elastische krachtsensor	22
3. <u>Fysische achtergronden van de krachtsensor</u>	24
3.1 Inleiding	24
3.2 Domeintheorie	25
3.2.1 Ferromagnetisme	25
3.2.2 Magnetische anisotropie	29
3.2.3 Het magneto-elastisch effect	33
3.2.4 Magnetisatieproces	37
3.3 Bepaling van de spanningsgevoeligheid	44
4. <u>Ontwerp van de krachtsensor</u>	50
4.1 Inleiding	50
4.2 Materiaalonderzoek	53
4.3 Bepaling van de spanningsgevoeligheid	61
4.4 Berekeningen met behulp van de elementenmethode	66
4.5 Lamelleren van de sensor	76
5. <u>Meetresultaten</u>	83
6. <u>Konklusie en aanbevelingen</u>	102

	pag
<u>Literatuur</u>	104
Appendix A Aanroep van programma's voor berekeningen gebaseerd op de eindige elementenmethode	108
Appendix B Afmetingen van een lamel van de sensor	124

1 Inleiding

Het funktionieren van onze steeds verdergaande technische wetenschap is zonder een goed ontwikkelde meettechniek ondenkbaar.

Het meten van de kracht, die naast de tijd en de lengte, als één van de belangrijkste grootheden wordt beschouwd, neemt een bijzondere plaats in. Vooral in de industrie wordt van de krachtmeting veel gebruik gemaakt.

Vaak zal men bij krachtmeting een hoge precisie eisen. Voor het meten van de kracht kan men verschillende fysische principes toepassen, echter niet alle zijn geschikt om de kracht als mechanische grootte om te zetten in een elektrische grootte. Het omzetten van een mechanische grootte naar een elektrische, heeft o.a. het voordeel dat men op een afstand meten kan en tevens dat het elektrisch meetsignaal eenvoudiger te verwerken is dan een mechanisch signaal.

De afstudeeropdracht hield in een studie naar de mogelijkheid een krachtsensor te ontwikkelen, die eenvoudig, robuust en toch nauwkeurig is. De krachtsensor moet te maken zijn zonder dat geavanceerde technieken nodig zijn.

In hoofdstuk 2 worden verschillende principes besproken, waarbij één principe de voorkeur heeft. Dit wordt vanaf hoofdstuk 3 behandeld en uitgewerkt.

2 Krachtopnemers

2.1 inleiding

De oorzaak van het ontstaan of veranderen van een beweging wordt in de natuurkunde aangeduid met de naam kracht. Het verband tussen krachten en de daarmee gepaard gaande versnellingen van massa's werd voor het eerst door Newton ingezien en beschreven.

Volgens de wet van Newton is de kracht F gelijk aan het produkt van de (scalaire) massa m en de (vektoriële) versnelling a van een lichaam:

$$F = m \cdot a \quad (2.1)$$

Een speciale kracht is het gewicht G , die steeds naar het middelpunt van de aarde gericht is. Deze kracht ontstaat onder invloed van de aardversnelling g op een massa m en is:

$$G = m \cdot g \quad (2.2)$$

Voor de juiste bepaling van het gewicht G moet rekening gehouden worden met de afhankelijkheid van de aardversnelling van de geografische plaats en van de hoogte boven de zeespiegel. Volgens lit. 2.1 is de aardversnelling g , met daarin de afhankelijkheid van de plaats:

$$g = g_e (1 + \beta_1 \sin^2 \alpha - \beta_2 \sin^2 2\alpha) - \beta_3 h \quad (2.3)$$

hierin is:

α = geografische breedte

h = hoogte boven de zeespiegel

$g_e = 9,7803184 \text{ ms}^{-2}$ (aardversnelling op de evenaar)

$\beta_1 = 5,3024 \cdot 10^{-3}$

$\beta_2 = 5,9 \cdot 10^{-5}$

$\beta_3 = 3,086 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-2}$

Deze waarden worden aanbevolen door de "International Association of Geodesy". Formule (2.3) geeft de simpelste methode aan om de aardversnelling te berekenen op plaatsen, waar deze nog niet gemeten is. De resultaten liggen meestal binnen 10^{-3} ms^{-2} .

Fig. 2.1 geeft het verloop weer van g , als functie van de plaats en de hoogte h boven de zeespiegel. De grootte van g_n is ongeveer de waarde van de aardversnelling op de vijfenvestigste breedtegraad en is:

$$g_n = 9,80665 \text{ ms}^{-2}$$

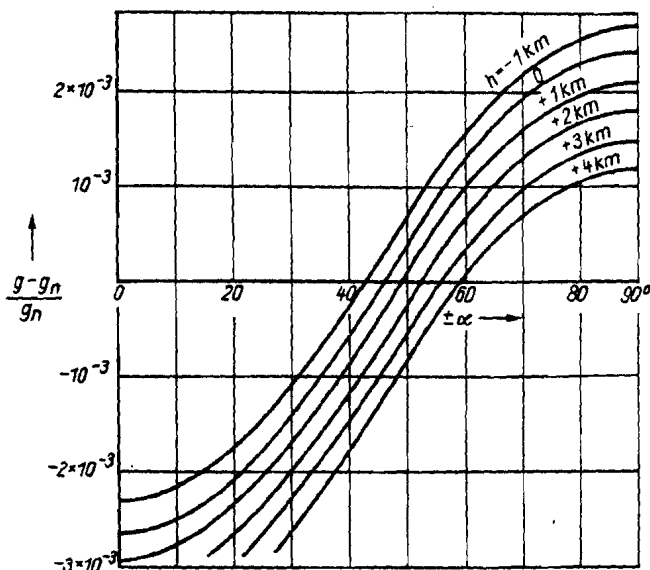


fig. 2.1 De aardversnelling als functie van de geografische breedte α en van de hoogte h boven de zeespiegel

De meeste krachtopnemers maken gebruik van één of ander element dat een kracht omzet in een mechanische verplaatsing. Deze verplaatsing komt neer op een deformatie van een elastisch lichaam, welke weer door een transducer wordt omgezet in een elektrisch uitgangssignaal.

De veranderingen die plaats vinden worden echter niet alleen ver-

oorzaakt door een uitwendig aangebrachte belasting, maar ook door storingen die in het meetsysteem doordringen. Een belangrijke stoor-grootheid waar rekening mee gehouden moet worden is de temperatuur. In het algemeen is het zo, dat hoe groter de weg die nodig is om de primair te meten kracht om te zetten in een voor de gebruiker ge-wenst meetsignaal, hoe meer kans bestaat dat op één of andere manier stoorsignalen binnendringen in de totale meetketen.

Om verschillende systemen en meetprincipes te vergelijken, kunnen we met diverse systemen experimenteren en dan konklusies trekken, of de omzetting tussen een ingangs- en uitgangsgrootheid binnen een meet-keten zodanig in een analytische vorm gieten, dat daaruit éénduidige konklusies kunnen worden getrokken. De laatste mogelijkheid is veel minder tijdrovend dan de eerste.

Uitgaande van de laatste methode leggen we een verband tussen de ingangsgrootheid Q , de n stoorgrootheden S_v en de uitgangsgroot-heid R volgens:

$$R = R(Q, S_v) \text{ met } v = 1, 2, \dots, n \quad (2.4)$$

De uitdrukking (2.4) is in een Taylorreeks te ontwikkelen wanneer we een beginsignaal Q_0 aannemen en veronderstellen dat de stoorsignalen S_v , zoals temperatuur, vocht e.d., een konstante beginwaarde S_{v0} hebben. De ontwikkeling van de reeks ligt dan om het werkpunt $R(Q_0, S_{v0})$ zoals gegeven is in (2.5).

De reeks wordt dan:

$$R = R(Q_0, S_{v0}) + \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{1!} \frac{\delta R(Q_0, S_{v0})}{\delta Q} dQ + \frac{1}{2!} \frac{\delta^2 R}{\delta Q^2} dQ^2 + \dots \quad (2.6)$$

$$+ \sum_{v=1}^n \left[\frac{1}{1!} \frac{\delta R(Q, S_{v0})}{\delta S_v} dS_v + \frac{1}{2!} \frac{\delta^2 R}{\delta S_v^2} d^2 S_v + \dots \right] \quad (2.7)$$

hierin beschrijft (2.6) de verandering die veroorzaakt wordt door het te meten ingangssignaal en (2.7) geeft de invloed weer van de n stoorsignalen.

Wanneer we alleen nauwkeurige omzeters vergelijken, waarbij het uitgangssignaal lineair verandert met het ingangssignaal, kunnen de hogere orden in (2.6) en (2.7) vervallen. Het nuttig meetsignaal als gevolg van een verandering van de te meten waarde dQ wordt dan:

$$R_n = \frac{\delta R}{\delta Q} dQ \quad (2.8)$$

De meetwaarde afkomstig van de verandering van elk stoorsignaal heeft de zelfde vorm als (2.8). Voor Q moet echter S_v gesubstitueerd worden.

Om een keuze te maken tussen de verschillende systemen, kan bijvoorbeeld de grootte van de verandering aan de uitgang van de omzetter tengevolge van een verandering aan de ingang als criterium gelden. Een groot meeteffekt geeft echter geen garantie op een kwalitatief goede opnemer, want het zegt niets over b.v. reproduceerbaarheid, lineariteit, invloed van stoorgrootheden enz.. De beste krachtopnemers die werken volgens het kolendrukprincipe, waarbij kolengruiskorrels meer of minder goed contact met elkaar maken en daardoor weerstandsverandering plaats vindt, hebben een duizend maal groter uitgangssignaal dan bijvoorbeeld het signaal afkomstig van "rekstrookjes", waar de weerstandsverandering veel kleiner is. Toch is de fout die optreedt in het uitgangssignaal bij de kolengruiskorrels ongeveer tien procent van de eindwaarde, die van de rekstrookjes slechts 10^{-3} %.

De noodzakelijke gegevens, die nodig zijn om verschillende systemen

te kunnen vergelijken, krijgen we door de verhouding te nemen tussen het maximaal optredende stoorsignaal, dat aan de uitgang van een opnemer verschijnt en niet meer te onderscheiden is van het nuttig meetsignaal, en het uitgangssignaal tengevolge van het gewenste meetsignaal. Horn (lit. 2.2) noemt deze verhouding "Störungs-durchgriff" en wordt gedefinieerd als:

$$D_{Q,R}(S_v) = \frac{R_{vmax}}{R_n} = \frac{\frac{\delta R}{\delta S} dS_{vmax}}{\frac{\delta R}{\delta Q} dQ_n} \quad (2.9)$$

Als vertaling voor "Störungsdurchgriff" lijkt "storingspenetratiefactor" een goede keuze, omdat deze term aangeeft in welke mate het stoorsignaal doordringt in het uitgangssignaal.

Afhankelijk hoe de eerste omzetting plaats vindt, kunnen de kracht-opnemers in twee hoofdgroepen verdeeld worden.

In de eerste groep wordt de te meten kracht, al dan niet gereduceerd via een stangenstelsel, toegevoerd aan een mechanische omvormer, die verbonden is met een plaatsopnemer. Iedere uitwijking wordt geregistreerd en als stuursignaal teruggevoerd naar de mechanische omvormer die een tegenkracht ontwikkelt om de te meten kracht te compenseren. De grootheid die de ontwikkelde tegenkracht opwekt is een maat voor de te meten kracht (servo-balans type).

In de tweede groep wordt uitgegaan van de eigenschappen van het materiaal, waarop de te meten kracht wordt uitgeoefend. Meestal is hier sprake van een elastische vervorming, die op de één of andere manier via omzeters in een elektrische grootheid wordt veranderd. In de volgende paragrafen worden enkele principes uitgewerkt, die eventueel voor ons doel gebruikt kunnen worden.

2.2 Krachtkompenserende opnemers

Uitgaande van een klassiek systeem, dat in weegapparatuur met een balansarm toegepast wordt, geeft fig. 2.2 schematisch een modernere versie.

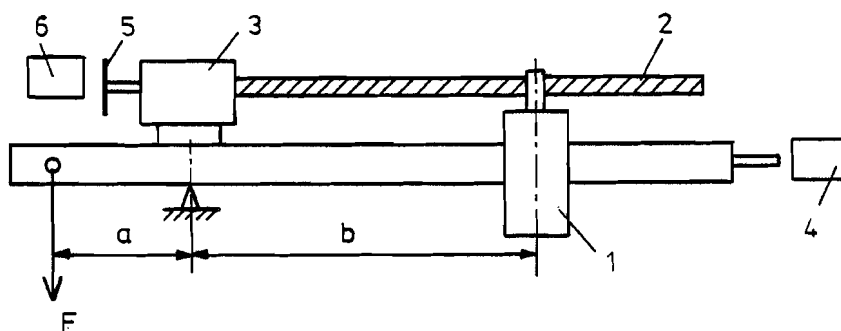


fig. 2.2 Krachtkompenserende opnemer

Een looppengewicht (1) met een massa m , wordt via een spindel (2) en een servo-motor (3) zolang verschoven totdat een plaatsopnemer (4) een bepaalde evenwichtsinstelling registreert. Met behulp van een kodeschijf (5) en een pulsteller (6) wordt de plaats van het looppengewicht bepaald. Het uitgangssignaal van de pulsteller komt overeen met:

$$R(F, T) \cong b = \frac{a}{m \cdot g} \cdot \frac{1 + \delta a}{1 + \delta b} \cdot \frac{1 + \alpha \cdot T_a}{1 + \alpha \cdot T_b} \cdot F \quad (2.10)$$

De maat afwijkingen δa en δb zijn met de huidige technologie klein te houden en bovendien is het mogelijk deze systeemfout weg te rekenen. De grootste stoorinvloed zal van de temperatuur T komen. In formule (2.10) stelt α de lineaire uitzettingscoëfficiënt voor. Uit de formule blijkt tevens, dat in eerste benadering alleen het temperatuurverschil $v = T_a - T_b$ tussen de twee armen van invloed is op het uitgangssignaal.

Het nuttig uitgangssignaal is:

$$\frac{\delta R}{\delta Q} \cdot dQ = \frac{a}{m \cdot g} \cdot F_{\max} \quad (2.11)$$

en het signaal veroorzaakt door het verschil in temperatuur is:

$$\frac{\delta R}{\delta v} \cdot d v_{\max} = \frac{a \cdot \alpha}{m \cdot g} \cdot F \cdot d v_{\max} \quad (2.12)$$

De storingspenetratiefactor wordt dan:

$$D(v) = \frac{\alpha \cdot F}{F_{\max}} \cdot d v_{\max} \quad (2.13)$$

Wanneer staal met een lineaire uitzettingscoëfficiënt van $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ wordt gebruikt en we een temperatuurverschil $v = 1 \text{ K}$ aannemen, wat een hoge waarde is en in de praktijk waarschijnlijk niet voorkomt, is de meetfout veroorzaakt door de temperatuur ongeveer 10^{-5} van de maximaal te meten kracht. Door invarstaal (64Fe, 36Ni) met een α van $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ toe te passen, wordt de meetfout nog een factor 8 kleiner.

Ondanks de lage gevoeligheid voor temperatuurverschillen beantwoordt deze krachtopnemer niet aan onze eisen. Het geheel is mechanisch complex en de verwachting is, dat het dynamisch bereik ook niet groot zal zijn. Het dynamisch gedrag wordt vooral bepaald door de verplaatsingssnelheid van het loopp gewicht.

Dit type krachtsensor maakt gebruik van het gravitatieveld, dus de schaalfactor is afhankelijk van de plaats waar gemeten wordt.

Een ander type krachtkompenserende sensor geeft fig. 2.3. Deze sensor werkt volgens het elektrodynamische principe.

Een kracht F die aangrijpt volgens fig. 2.3 zorgt voor een verplaatsing van een spoel(1) in een magneetveld. Deze verplaatsing wordt geregistreerd door een plaatsopnemer (2). Het uitgangssignaal van

opnemer wordt versterkt en teruggevoerd naar de spoel.

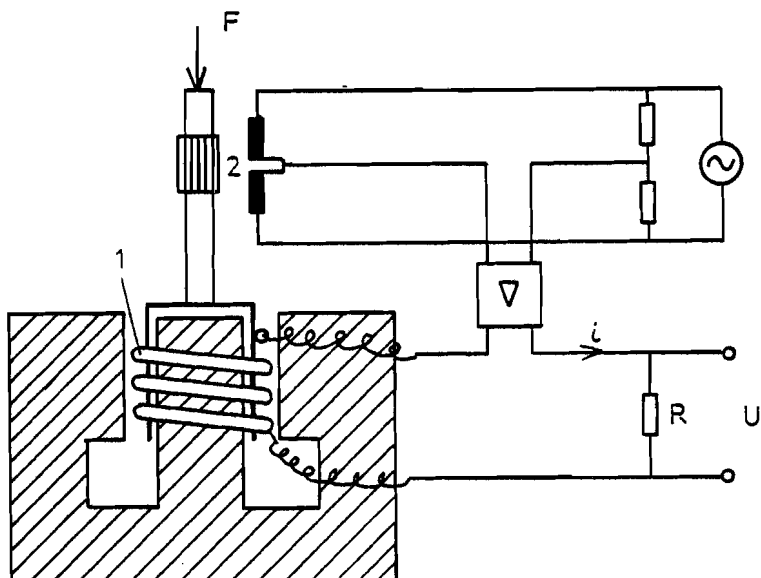


fig. 2.3 Krachtkompenserende sensor volgens het elektrodynamische principe.

De stroom die nodig is om de spoel in de evenwichtsstand te brengen, wordt door een weerstand R gevoerd, waarover een spanning u komt te staan. Deze spanning is een maat voor de te meten kracht:

$$R(F) = u = \frac{R}{\pi \cdot d \cdot n \cdot B} \cdot F \quad (2.14)$$

hierin is d de diameter van de spoel, n het aantal windingen en B de magnetische inductie in de luchtspleet.

De huidige sensoren die volgens het elektrodynamische principe werken hebben een storingspenetratiefactor van $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (lit.2.3). De kracht die gemeten kan worden heeft een bepaalde grenswaarde. De maximale kracht wordt o.a. bepaald door de magnetische inductie B , die maximaal in de buurt van 2 T zal liggen (afhankelijk van het materiaal). De spoel beweegt zich in een luchtspleet, dus om de luchtspleet zo klein mogelijk te houden, moeten er grenzen gesteld

worden aan de dikte van de draad en aan het aantal windingen. Uit lit. 2.4 blijkt, dat wanneer gebruik gemaakt wordt van Samarium-Kobalt permanente magneten die in een speciale vorm geperst zijn, maximaal een kracht van 50 N te meten is. Grotere krachten moeten dan eerst via een balansarm gereduceerd worden, wat het geheel mechanisch wat complexer maakt. Tevens is de lengte van de arm vanwege bevestigingsmiddelen e.d. aan een minimum gebonden.

Door de bewegende delen van krachtkompenserende sensoren zullen deze ook stofgevoelig zijn. Bovendien is de eigenfrequentie van dergelijke systemen van de orde van 10 Hz, wat laag is.

2.3 Krachtopnemers waarvan de werking berust op materiaaleigenschappen.

2.3.1 Krachtbepaling door het meten van de lengte van de vervorming

Wanneer een kracht wordt uitgeoefend op een materiaal zal dit zodanig vervormen, totdat de som van de reaktiekrachten gelijk is aan de op het materiaal uitgeoefende kracht.

De vervorming is afhankelijk van de elasticiteit van het materiaal en wanneer de kracht niet zo groot is, dat er plastische vervorming optreedt, zal bij het wegnemen van de kracht het materiaal in de oude toestand terugkeren. De vervorming, meestal een lengteverandering, is dan een maat voor de te meten kracht.

Fig. 2.4 geeft een principeschets van de opnemer. Hoe de lengteverandering gemeten wordt is nog niet interessant; eerst zal bekeken worden hoe groot de invloed van de temperatuur is op de lengteverandering.

Voor de eenvoud gaan wij er van uit, dat de lengte l_1 bepaald wordt door de kracht F en de lineaire uitzettingscoëfficiënt α_1 met de temperatuur T_1 en dat de lengte l_2 de temperatuur T_2 heeft aangenomen.

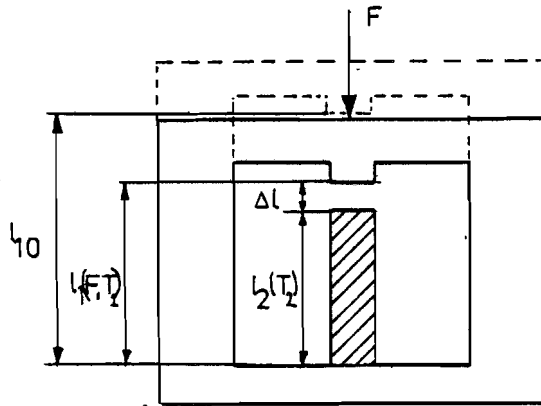


fig. 2.4 Bepaling van de vervorming

De lengteverandering Δl is dan gelijk aan:

$$\Delta l(F, T) = l_1(F, T_1) - l_2(T_2) \quad (2.15)$$

Het meetsignaal komt overeen met Δl en is te schrijven als:

$$R(F, T) \equiv \Delta l(F, T) = l_{10}(1 + \epsilon(F))(1 + \alpha_1 T_1) - l_{20}(1 + \alpha_2 T_2) \quad (2.16)$$

hierin zijn l_{10} en l_{20} de lengten in rusttoestand, ϵ de relatieve lengteverandering tengevolge van de kracht F , α_1 en α_2 zijn lineaire uitzettingscoëfficiënten van de lengten l_1 resp. l_2 .

Het nuttig meetsignaal is:

$$\frac{\delta R}{\delta F} \cdot dF_{\max} = l_{10} \cdot \epsilon(F_{\max}) \quad (2.17)$$

Wanneer we aannemen, dat Δl altijd veel kleiner is dan de lengten l_{10} en l_{20} stellen we l_{10} en l_{20} aan elkaar gelijk. Met $T_2 = T_1 - v$ en $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ wordt het stoorsignaal afkomstig van de temperatuur:

$$\frac{\delta S}{\delta v} \cdot dv_{\max} = l_{20} \cdot \alpha \cdot dv_{\max} \quad (2.18)$$

De stoordoordringingsfaktor is dan te bepalen:

$$D(v) = \frac{\alpha \cdot d v_{\max}}{\varepsilon(F_{\max})} \quad (2.19)$$

Wanneer als materiaal voor de krachtopnemer staal gekozen is, met een lineaire uitzettingscoëfficiënt $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ en een relatieve rek $\varepsilon = 10^{-3}$ bij een zodanige druk in het materiaal dat er geen plastische vervorming optreedt, vinden we voor D:

$$D(v) \approx 10^{-2} d v_{\max} \quad (2.20)$$

Wil D vergelijkbaar zijn met de stoordoordringingsfaktor van de krachtkompenserende sensoren, dan mogen de temperatuurverschillen in het materiaal niet groter zijn dan 10^{-3} K . In de praktijk is aan een dergelijke eis niet te voldoen.

Met een lucht-kondensator als verplaatsingsopnemer moet het mogelijk zijn de lengte van de vervorming te meten. Een extra referentiekondensator kan dan systematisch optredende stoorsignalen compenseren. Deze referentiekondensator moet een goed warmte-kontakt hebben met de meetkondensator, wat moeilijk te realiseren is. Door de meetkondensator in een oscillatorkring op te nemen verkrijgt men het voordeel dat een verplaatsing direkt verantwoordelijk is voor een frekwentieverandering. Het signaal is nu gemakkelijk, zonder veel extra elektronische bouwstenen, in digitale vorm te verwerken (zie bijv. lit. 2.5).

Uit de literatuur blijkt dat dergelijke systemen niet veel voorkomen, zeker niet als nauwkeurige sensoren. Bovendien, wanneer we een signaal willen hebben dat evenredig met de afstand tussen de kondensatorplaten verandert, dan moet dit systeem bij een maximale vervorming van 10 mm (wat groot is) en 10.000 afleeseenheden op 1 μm nauwkeurig kunnen meten.

Al met al lijkt de kans op een goed werkend systeem gering, vooral ook omdat stof en vochtigheid de capaciteit van de kondensator zal beïnvloeden, wat een foutief signaal tot gevolg kan hebben.

2.3.2 Piëzoëlektrische krachtopnemers

Stoffen, die onder invloed van een mechanische spanning polarisatie vertonen, zijn piezoëlektrisch: er verschijnt een elektrische lading op het oppervlak van het materiaal. De term "piezo" is afgeleid van het Griekse woord "piëzien", wat "drukken" betekent.

De grootte en polariteit van de geïnduceerde oppervlakteladingen zijn evenredig met de grootte en richting van de toegepaste kracht F

$$Q = d.F \quad (2.21)$$

hierin is Q de lading in C, d de ladingsgevoeligheid (een konstante voor een gegeven kristal in C/N).

De meest gebruikte piëzoëlektrische materialen zijn kwarts (in dit kristal werd piëzoëlektriciteit voor het eerst ontdekt door de broers Curie in 1880), toermalein, Rochelle zout, bariumtitanaat en loodzirconaattitanaat (lit. 2.6).

Alle in de natuur gevormde piezoëlektrische kristallen zijn in de natuur gepolariseerd. De synthetische piezoëlektrische materialen, zoals bariumtitanaat-keramiek, zijn gemaakt door kleine kristallen onder druk en in een sterk elektrisch veld te bakken. Het kristal wordt dan in de veldrichting gepolariseerd. Het nadeel van synthetische piezoëlektrische materialen is, dat ook het pyro-effekt optreedt (lit. 2.7). Dat wil zeggen dat door temperatuursverandering ook lading wordt opgewekt. Zij hebben echter wel een grotere ladingsgevoeligheid dan de natuurlijke kristallen ($251 \cdot 10^{-12}$ C/N voor bariumtitanaat tegen $2,31 \cdot 10^{-12}$ C/N voor kwarts; lit. 2.8).

De piëzoëlektrische kristallen zijn klein en stug. Daarom hebben zij een hoge resonantiefrekwentie (enkele kHz). De capaciteit van een piëzoëlektrische sensor is laag (tussen 10 en 100 pF). De isolatieweerstand moet meer dan 10^{10} ohm bedragen om een tijdkonstante (RC) groter dan 1 seconde te bewerkstelligen (lit.2.9). Door deze kleine tijdkonstante is het niet mogelijk statische krachten te meten, omdat in die korte tijd de oppervlakte-ladingen voor een deel weer wegvloeien. Voor onze doeleinden is het echter wel noodzakelijk

dat er statische krachten gemeten kunnen worden, dus piëzoëlektrisch materiaal is niet geschikt als basisbouwsteen voor de te ontwikkelen sensor.

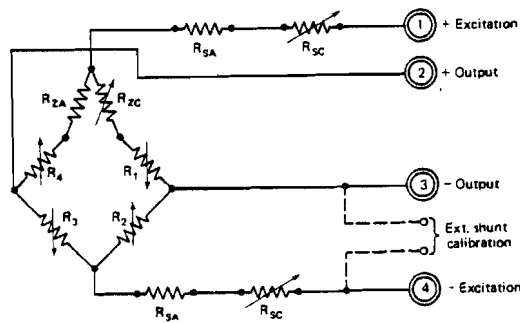
2.3.3 Krachtsensor met behulp van rekstrookjes

Geleiders en halfgeleiders, die door uitwendige krachten belast worden, zullen daardoor van vorm veranderen, zij het soms weinig. Deze vormverandering heeft een weerstandsverandering tot gevolg (piëzoweerstand-effekt in 1850 door Kelvin ontdekt).

Als de krachten niet al te groot zijn, zal na het wegnemen ervan het materiaal zijn oorspronkelijke vorm her krijgen.

Binnen het elastische gebied geldt, dat de vervorming evenredig is met de aangelegde kracht. Deze evenredigheid werd voor het eerst gekonstateerd door Hooke in 1678, na een groot aantal proeven aan metaaldraden en allerlei soorten veren (lit. 2.10).

Het piëzoweerstand-effekt wordt toegepast in zgn. "rekstrookjes". De weerstandsverandering van een rekstrookje wordt meestal omgezet in een spanningsverandering door één, twee of vier gelijke rekstroken in een wheatstone-brug te plaatsen, zie fig. 2.5.



Symbol	Function
R_{ZA}	Zero balance adjustment
R_{ZC}	Compensation for thermal zero shift
R_{SA}	Sensitivity adjustment
R_{SC}	Compensation for thermal sensitivity shift
$R_1 - R_4$	Strain-gage bridge (transduction element)

fig. 2.5 Vier rekstroken in brug (lit. 2.11)

De configuratie met vier rekstroken heeft een vier keer grotere spanningsverandering tot gevolg dan een enkele rekstrook, indien men de stroken zo aanbrengt, dat twee rekstroken door rek een grotere weerstand krijgen, terwijl twee rekstroken door samendrukking een kleinere weerstand vertonen.

Het gebruik van een wheatstone-brug heeft het voordeel, dat wanneer de rekstrookjes de zelfde temperatuur hebben, de thermische effecten gekompenseerd worden.

De relatie tussen de weerstandverandering en de rek is lineair voor de meeste weerstandsmaterialen:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (2.22)$$

De evenredigheidskonstante noemt men de K-faktor.

Het weerstandsmateriaal kan bestaan uit een metaallegering ($K \approx 2$) of een halfgeleider ($K \approx 10$ tot 200).

Bij de metaallegeringen hebben de folie-rekstrookjes, waar de structuur van ongeveer $5 \mu\text{m}$ dik op het te vervormen materiaal wordt geplakt, de draadgewonden-rekstrookjes verdrongen. De voordelen van deze rekstrook boven de draadgewonden-rekstrook zijn o.a.: grotere stabiliteit, in veel verschillende uitvoeringen te maken en door een groter oppervlak zijn ze beter in staat de temperatuurvariaties van het te meten object te volgen.

In fig. 2.6 is een voorbeeld van een folie-rekstrook gegeven.

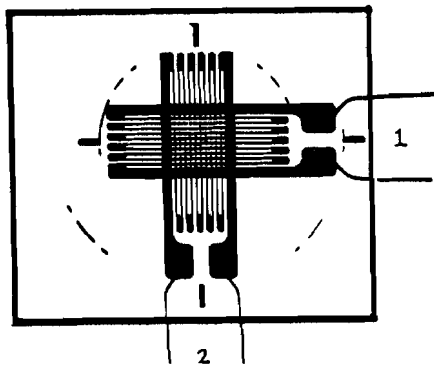


fig. 2.6 Folie-rekstrook

Wanneer beide rekstrookjes uit fig. 2.6 aan de zelfde kant van de te vervormen materiaal worden aangebracht zal bijv. rekstrook 1 in de lengte vervormen en 2 in de breedte. Alhoewel de vervorming in de breedte kleiner is dan die in de lengte heeft deze configuratie het voordeel dat beide rekstroken vrijwel de zelfde temperatuur hebben, dus ook de zelfde temperatuurwisselingen zullen ondergaan (lit.2.12) Een andere technologie wordt bij de dunnefilm-rekstroken toegepast. Hier worden verschillende lagen (isolatielaag, weerstandslaag en geleidende kontaktslaag) opgedampt op de meetopnemer (lit. 2.13). De juiste vorm wordt verkregen door het wegetsen van overtollig materiaal.

Enkele voordelen van de dunnefilm-rekstrook boven de folie-rekstrook zijn: ongevoelig voor vocht, kleine krimp, hoge temperatuur-stabiliteit, kunnen zeer klein gemaakt worden.

Temperatuurkompensatie wordt bij halfgeleider-rekstrookjes verkregen door in een brug ook twee rekstrookjes met een door dopingstechniek- en bewerkstelligde negatieve K-faktor te plaatsen.

Door de grotere K-faktor van de halfgeleider-rekstrookjes is de uitgangsspanning ook veel hoger dan bij de metaal-rekstrookjes. Dit geeft een grotere zekerheid bij storingsvelden in de meetkring. Een nadeel van halfgeleider krachtsensoren is de grote temperatuurgevoeligheid.

Door de lage storingspenetratiefaktor ($D(T) \approx 10^{-4}$; lit. 2.2) worden de huidige nauwkeurige krachtsensoren meestal uitgerust met rekstrookjes.

Gezien echter de te gebruiken "high technology" voor het vervaardigen van de folies en het aanbrengen van de rekstrookjes op het te vervormen materiaal voldoet dit type sensor niet aan onze eisen.

2.3.4 Een magneto-elastische krachtsensor

De magnetiseerbaarheid van ferromagnetisch materiaal hangt af van de elastische spanningstoestand. Deze afhankelijkheid, die een omkering is van het magnetostriktief verschijnsel waarbij een lengteverandering optreedt wanneer ferromagnetisch materiaal in een magnetisch veld geplaatst wordt, is omstreeks 1900 onderzocht door Ewing.

In 1923 is volgens lit. 2.14 voor het eerst het magneto-elastisch effect toegepast in een torsie-indikator. Toendertijd kon men het verschijnsel theoretisch niet verklaren; pas in de veertiger jaren kreeg men meer inzicht in het magnetisme.

Het Zweeds bedrijf ASEA heeft waarschijnlijk de meeste ervaring met krachtsensoren die werken volgens dit principe (lit. 2.15). Echter uit commerciële overwegingen wordt er weinig over dit onderwerp gepubliceerd.

In fig. 2.7 is het principe van de krachtsensor weergegeven.

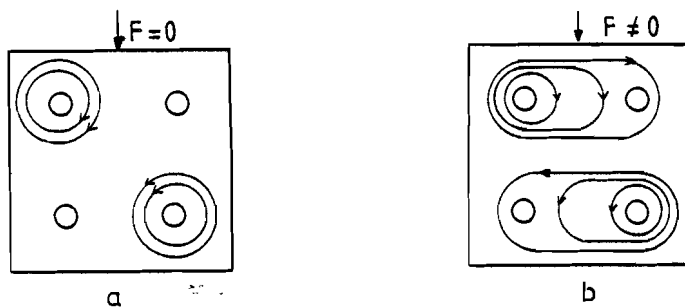


fig. 2.7 Principe krachtsensor

In een blok ferromagnetisch materiaal zijn vier gaten in de hoeken van een vierkant aangebracht. Diagonaal bevinden zich twee spoelen in de gaten. Eén van de spoelen wordt verbonden aan een wisselstroombron. In onbelaste toestand (fig. 2.7a) wordt in de tweede spoel geen spanning geïnduceerd, daar de spoelen onderling loodrecht op elkaar staan. Wanneer een kracht op het materiaal uitgeoefend wordt (zie fig. 2.7b), verandert de anisotropie van de magnetische permeabiliteit μ van richting.

De induktielijnen zullen van hun oorspronkelijke richting gaan afwijken en enkele daarvan, evenredig met de kracht, zullen de tweede spoel omvatten.

De evenredigheid, spanningsgevoeligheid, reproduceerbaarheid, materiaalkeuze e.d. zijn nog onbekend, maar de eenvoud van dit principe maakt het aantrekkelijk het magneto-elastisch effect, toegepast als basis voor een krachtensor, nader te onderzoeken.

In de volgende hoofdstukken komen de fysische achtergronden, het ontwerp van de sensor en de metingen aan de orde.

3 Fysische achtergronden van de krachtsensor

3.1 Inleiding

In paragraaf 2.3.4 is al aangestipt, dat de werking van de krachtsensor berust op eigenschappen van ferromagnetisch materiaal. In het algemeen zullen niet-fysici niet zo vertrouwd zijn met dit onderwerp, terwijl dit wel noodzakelijk is om de werking van de sensor te begrijpen. We beginnen dit hoofdstuk daarom met een algemene inleiding over het ferromagnetisme. De verhandeling over de fysische achtergronden zal nogal fenomenologisch van karakter zijn. Een meer theoretische benadering is te vinden in o.a. lit. 3.1-3.3.

Een moeilijkheid die optreedt bij het bestuderen van de literatuur over het ferromagnetisme, is het bestaan van twee eenhedenstelsels nl.: het cgs- en het mksa-stelsel (tegenwoordig het SI-stelsel genoemd). Het eerste stelsel werd in 1840 door Gauß en Weber opgesteld en is gebaseerd op de grondeenheden: centimeter, gram en sekonde. Het mksa-stelsel gaat uit van vier grondeenheden en wel van de eenheid van lengte: de meter, de eenheid van massa: de kilogram, de eenheid van tijd: de sekonde en de eenheid van stroom: de ampère. Uit deze vier grondeenheden zijn alle andere elektrische en magnetische eenheden afgeleid. In het SI-stelsel (Système International d'Unités) zijn deze basiseenheden nog uitgebreid met de kelvin, de candela en de mol.

Het huidige SI-stelsel vereenvoudigt veel vergelijkingen op het gebied van de elektriciteit; echter op het gebied van het magnetisme introduceert het nieuwe stelsel niet zulke vereenvoudigingen. Dit zal waarschijnlijk de reden zijn, dat nog veel fysici met het cgs-stelsel werken; ook in recente publikaties wordt het oude systeem nog veel toegepast. Bij het omrekenen van het oude stelsel, naar het "nieuwe" SI-stelsel geeft vooral de faktor 4π aanleiding tot vergissingen.

In dit verslag zullen de formules uitgedrukt worden in het SI-stelsel.

3.2 Domeintheorie

3.2.1 Ferromagnetisme

Om de magnetische eigenschappen van ferromagnetisch materiaal te begrijpen, is het doelmatig eerst het wezen van het magnetisme nader te analyseren en we bekijken daartoe eerst het atoom.

Elektronen bewegen zich om de atoomkern in bepaalde banen. Door deze beweging werken de elektronen als kleine stroomkringen en dragen dus magnetische momenten bij. De elektronen draaien echter ook om de eigen as en geven eveneens magnetische momenten.

De meeste elektronen die om de kern cirkelen behoeven niet beschouwd te worden als medewerkers aan het magnetisch moment. Dit is het gevolg van het feit, dat de elektronen in atomen de neiging hebben zich paarsgewijs zodanig in te stellen, dat ze gelijke en tegengestelde momenten opleveren die elkaar opheffen. Om het effect te weten van alle magnetische momenten veroorzaakt door de elektronen moeten alle bijdragen van de banen en de spins opgeteld worden.

In een volle schil geldt, dat de som van de baan-impulsmomenten en de som van de spin-impulsmomenten nul is. Voor de totale bijdrage komen dus alleen de niet volle schillen in aanmerking.

Een ijzeratoom bijvoorbeeld bevat zesentwintig elektronen die over vier schillen verdeeld zijn. De binnenste schil bevat twee elektronen, de tweede schil acht de derde schil veertien en de vierde schil heeft twee elektronen. De opbouw van de derde schil is direkt verantwoordelijk voor het ferromagnetisch effect. In deze schil blijken vijf elektronen een positieve spin te hebben en één elektron een negatieve. Dus de magnetische momenten van vier elektronen worden niet gekompenseerd. Het atoom zal hierdoor een resulterend magnetisch moment bezitten.

Naast ijzer (Fe) als ferromagnetisch materiaal, komen nog voor: nikkel (Ni), kobalt (Co) en legeringen die minstens één van deze drie elementen bevatten.

Als kenmerk van de magnetisatie is het begrip magnetische susceptibiliteit χ ingevoerd:

$$\chi = \frac{|\vec{M}|}{|\vec{H}|}$$

hierin is \vec{M} het totale magnetisch moment per eenheid van volume, waarbij het totale magnetisch moment de vektorsom van de afzonderlijke momenten is. \vec{H} is het lokale veld. De magnetische permeabiliteit ten opzichte van vacuüm wordt gegeven door:

$$\mu_r = 1 + \chi \quad (3.2)$$

In 1907 kwam Weiss met de hypothese, dat ferromagnetisch materiaal in domeinen verdeeld moet zijn. In ieder domein zijn alle magnetische momenten parallel gericht en heeft M een konstante waarde M_s . Daar de richting van de domein-magnetisatie van de domeinen "willekeurig" is, is er uitwendig geen magnetisme waar te nemen. De juistheid van de hypothese van Weiss is in 1931 aangetoond door Bitter, die met zijn "poeder-techniek" (zie voor het recept lit. 3.3 p. 219) de domeinen zichtbaar maakte.

In fig. 3.1 is de domeinstruktur weergegeven. De pijl geeft de richting van de spontane magnetisatie M_s aan. De lijnen buiten het materiaal geven het geproduceerde magnetisch veld weer.

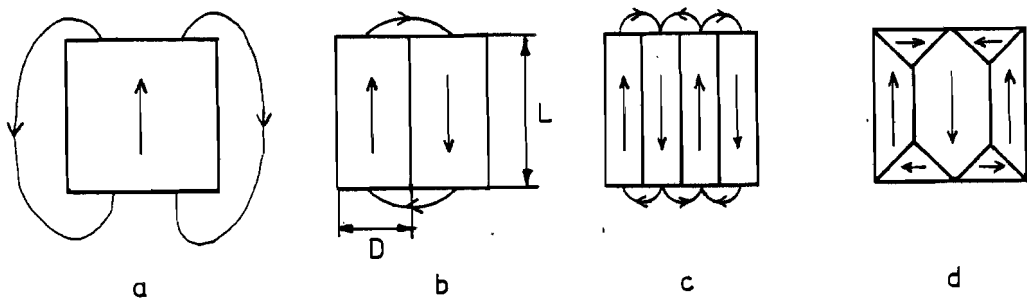


fig. 3.1 Domeinstruktur

In fig. 3.1a is een enkel kristal, waaruit ferromagnetisch materiaal is opgebouwd, weergegeven. In deze situatie, waarin alle momenten in een kristal parallel gericht zijn, brengt het magnetisch veld buiten het kristal een grote hoeveelheid energie met zich mee. Naarmate het aantal domeinen toeneemt wordt het uitwendig veld steeds kleiner, zodat de energie die in het veld is opgeslagen belangrijk vermindert (zie fig. 3.1b,c). Deze energieafname moet opwegen tegen de extra energie die nodig is voor het vormen van wanden tussen de domeinen. De evenwichtstoestand is die waarvoor de totale energie een minimum is. Dit minimum wordt bereikt wanneer geldt:

$$D = 3.04 \cdot 10^{-3} \frac{\sqrt{\gamma L}}{I_s} \quad (3.3)$$

hierin is D de breedte en L de lengte van een domein, γ de oppervlakte-energie van een domeinwand en I_s de verzadigingspolarisatie welke gelijk is aan $\mu_0 M_s$. Per definitie is μ_0 de absolute permeabiliteit van het vacuüm en is gelijk aan $4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am.

In de situatie zoals geschetst in fig. 3.1d treedt, door het ontstaan van sluitdomeinen, geen veld naar buiten. Deze configuratie is in het algemeen energetisch het voordeligst.

De verzadigingsmagnetisatie in een domein is temperatuur afhankelijk (zie fig. 3.2 voor ijzer, nikkel en kobalt).

Bij een hoger wordende temperatuur, zal door toenemende warmtebeweging van de atomen, de richting van de magnetische momenten verstoord worden. Boven een bepaalde temperatuur, de zogenaamde Curietemperatuur, is de richting van de magnetische momenten willekeurig en is het ferromagnetisch materiaal paramagnetisch geworden. Vergelijken we de temperatuurafhankelijkheid van de magnetische polarisatie I_s voor de drie ferromagnetische stoffen en zetten we de relatieve magnetische polarisatie I_s/I_0 als functie van T/θ uit, met I_0 de polarisatie bij 0 K en θ de Curietemperatuur van de

drie materialen, dan valt op dat de drie kurven nagenoeg de zelfde zijn (fig. 3.3), ondanks dat de absolute waarden voor I_s en θ voor kobalt, ijzer en nikkel verschillende waarden hebben. Deze wetmatigheid is te beschrijven door de volgende fenomenologische formule (lit. 3.4):

$$\frac{I_s}{I_0} = \tanh\left(\frac{\theta}{T} \cdot \frac{I_s}{I_0}\right) \quad (3.4)$$

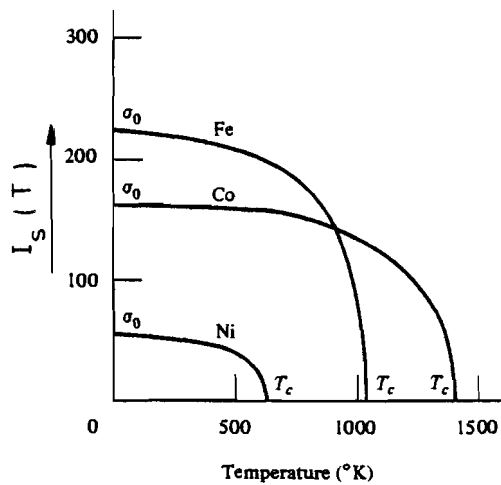


fig. 3.2 Magnetisatie als functie van de temperatuur

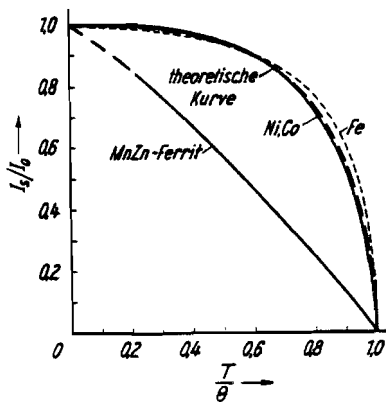


fig. 3.3 Afhankelijkheid van de relatieve verzadigingspolarisatie als functie van de relatieve temperatuur

3.2.2 Magnetische anisotropie

Kristallen zijn opgebouwd als herhalingen van gelijke cellen. Richtingen in een kristal worden aangegeven in een assenstelsel, gevormd door verlenging van de ribben van de eenheidscel. Opgegeven wordt hoeveel eenheidsstappen (is aantal ribben van de cel) er gedaan worden in de x-, y- en z-richting, vanuit de oorsprong. Vlakken worden aangegeven met de Miller-indices (h, k, l). Gerekend vanaf de oorsprong snijdt het vlak a, b en c eenheidsstappen af van de x-, y-, en z-as; h, k, en l zijn de kleinste gehele getallen m/a , m/b en m/c , waarbij m een heel getal is. Men spreekt over de textuur van een materiaal, wanneer de kristallen op een bepaalde manier liggen ten opzichte van een referentierichting. De textuur wordt meestal gespecificeerd ten opzichte van de uitwendige afmetingen van het materiaal, meestal een vlak. De gebruikelijke notatie is om eerst het vlak van het kristal te specificeren, dat parallel ligt aan het vlak van het materiaal (bijv. transformatorblik) en dan de richting van een kristal dat evenwijdig loopt aan bijvoorbeeld de walsrichting van het blik. In fig. 3.4 ligt een kristal op zijn kant in het materiaal. De pijl geeft de richting aan waarin het materiaal gewalst is.

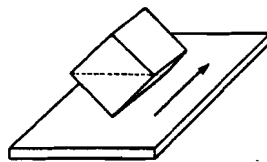


fig. 3.4 $\{110\}(100)$ textuur

Parallel aan het vlak van het materiaal ligt het $\{110\}$ -vlak van het kristal en de (100)-richting van de kristal-assen loopt evenwijdig

aan de walsrichting. De notatie is dan $\{110\}(100)$.

Binnen in een domein staat de magnetisatie in één richting. De vraag is in welke?

IJzer en nikkel zijn opgebouwd uit kubische kristallen en in deze kristallen heeft de magnetisatie een bepaalde voorkeursrichting. In fig. 3.5 is te zien, dat de magnetisatie M in een ijzerkristal de voorkeur heeft voor de (100) -richting, want in deze richting is maar een klein uitwendig veld nodig om het ijzerkristal in de verzadiging te brengen. Een groot uitwendig veld is nodig om het ijzerkristal in de (111) -richting te magnetiseren. Voor een nikkelkristal zijn de makkelijke en moeilijke richtingen resp. (111) en (100) .

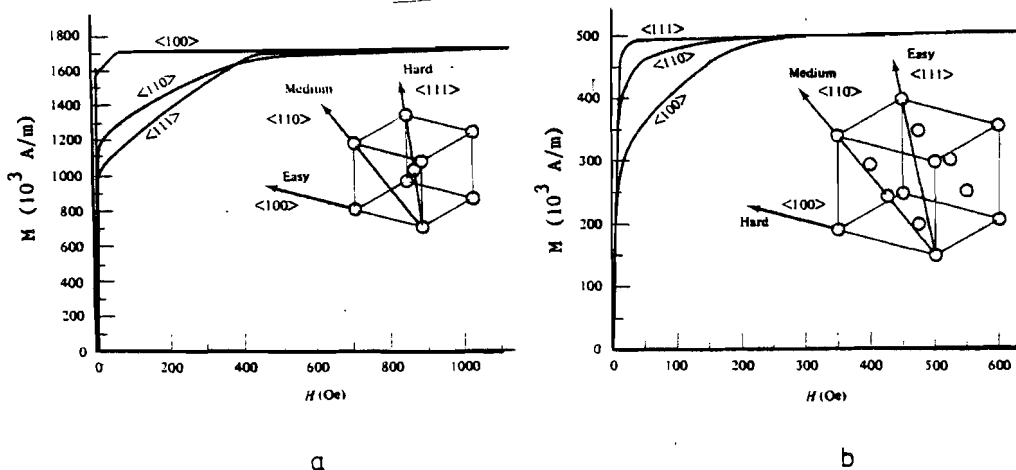


fig. 3.5 Magnetisatiekurven a) ijzerkristal
b) nikkelkristal

Het veld langs de x-as is weergegeven in Oersted (cgs-stelsel $1 \text{ Oe} \equiv (4\pi)^{-1} \cdot 10^3 \text{ Am}^{-1}$).

Een kobaltkristal heeft een hexagonale vorm en hier is de (0001) de makkelijke magnetisatie-richting. Alle richtingen loodrecht daarop zijn moeilijk te magnetiseren.

Om de anisotropie energie te beschrijven, dat is de hoeveelheid energie die nodig is om de magnetisatie M uit een voorkeursrichting te halen, worden we geleid door de beperkingen die de symmetrie van een kubus ons oplegt.

De anisotropie energie uitgedrukt in Jm^{-3} kan men voorstellen door de volgende fenomenologische formule (opgesteld in 1929 door Akulov):

$$E_k = K_0 + K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2(\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2) + \dots \quad (3.5)$$

hierin zijn K_0 , K_1 en K_2 anisotropiekonstanten, terwijl $\alpha_i (i=1,2,3)$ de richtingcosinussen voorstellen van de magnetisatie in een domein t.o.v. de assen van de kubus.

De anisotropiekonstanten zijn afhankelijk van de chemische samenstelling van het materiaal en van de temperatuur.

De waarden van de konstanten kunnen bepaald worden met behulp van een koppel-magnetometer. Met dit apparaat wordt het koppel gemeten dat uitgeoefend wordt op het rooster van een kristal door de magnetische momenten die onder invloed van een extern aangebracht magnetisch veld roteren.

Konstanten K_3 en hoger zijn in het algemeen niet nodig en soms is K_2 zo klein, dat deze ook verwaarloosd wordt.

De eerste term K_0 in (3.5) is onafhankelijk van de richting waarin de magnetisatievektor M staat, we negeren deze faktor, omdat we alleen geïnteresseerd zijn in de verandering van de energie, wanneer de magnetisatievektor van de ene richting roteert naar een andere. Bij afwezigheid van een magnetisch veld, geeft het minimum van de anisotropie energiedichtheid E_k de energetisch voordeligste richting van M voor een kristal. Het is makkelijk in te zien, dat wanneer K_2 nul is, de makkelijke magnetisatie richting bepaald wordt door het teken van K_1 .

Is K_1 negatief, dan is $E_{111} < E_{110} < E_{100}$ en heeft E_k dus een minimum wanneer M in één van de acht (111)-richtingen staat, terwijl wanneer K_1 positief is E_k minimaal is wanneer M in één van de

zes (100)-richtingen wijst. Voor het geval dat K_2 niet nul is, wordt de gemakkelijke richting bepaald door zowel K_1 als K_2 . Aan welke voorwaarden K_1 en K_2 dan moeten voldoen staat vermeld in lit. 3.1 p. 582.

De grens tussen twee domeinen is een wand waarin de richting van de magnetisatievektor niet abrupt 180° draait, maar een geleidelijke richtingsverandering ondergaat.

Het eerste theoretisch onderzoek van de structuur van de domeinwand werd in 1932 verricht door Bloch. Domeinwanden worden daarom ook vaak Bloch-wanden genoemd.

Magnetische momenten afkomstig van de bij elkaar liggende elektronen spins vertegenwoordigen een zgn. exchange-energie (lit. 3.3 p.186). Deze energie is minimaal wanneer de magnetische momenten van naburige elektronenspins parallel aan elkaar liggen. Stel dat de magnetisatievektor M abrupt 180° zou veranderen, dan zou de exchange-energie groot zijn. De energiedichtheid kan verminderd worden, wanneer de verandering van de richting over N -atomen gebeurt, zodat de hoek tussen aanliggende spins gelijk is aan π/N (zie fig. 3.6).

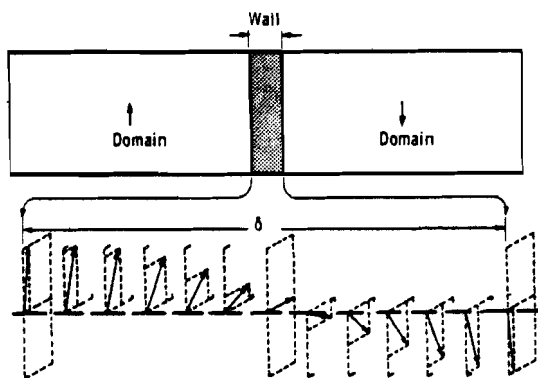


fig. 3.6 Een 180° -Blochwand (lit. 3.1 p.815)

De dikte van de wand δ wordt bepaald door de exchange-energie en de

anisotropie energie. Voor een lage exchange-energie zal de wand dik moeten zijn, omdat de naburige spins in de wand dan bijna parallel liggen; echter de magnetisatievektor M in de wand zal uit de voorkeursrichting gedraaid worden en voor een lage anisotropie energie is het energetisch gunstiger dat zo weinig mogelijk M 's buiten de voorkeursrichtingen liggen en dus de dikte, van de wand klein is. De dikte van de wand is zodanig dat de som van de twee energieën een minimum bereikt. Voor ijzer is de dikte van de wand ongeveer $4 \cdot 10^{-8}$ m wat overeenkomt met ca. 150 atomen. De afmeting van de Bloch-wand is temperatuurafhankelijk (lit. 3.2 p.290) en wel volgens:

$$\delta \sim \sqrt{\frac{T}{C}} \frac{1}{K} \quad (3.6)$$

Hoe kleiner de anisotropie konstante K hoe dikker de wand. Daarom zal de dikte met de temperatuur toenemen, omdat K vrijwel altijd kleiner wordt bij het vergroten van de temperatuur.

3.2.3 Het magneto-elastisch effect

Wanneer ferromagnetisch materiaal wordt gemagnetiseerd, treedt in de magnetisatierichting een lengteverandering op. Afhankelijk van het materiaal is deze verandering een verlenging of een verkorting, die als positieve resp. negatieve magnetostriktie wordt gekenmerkt. De magnetostriktie wordt gedefiniëerd als een relatieve lengteverandering :

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad (3.7)$$

Bij de meeste ferromagnetische materialen is de verandering van het volume te verwaarlozen, zodat een positieve lengteverandering gepaard gaat met een negatieve verandering in de dwarsrichting.

De oorzaak van de dimensieverandering is het veranderen van de richting van de spontane magnetisatie. Bij ijzer bijvoorbeeld liggen de atomen in de richting van de spontane magnetisatie M_s verder van elkaar dan in de richting loodrecht daarop. Verandert de magnetisatie M_s van richting door een uitwendig veld, dan zal de afstand tussen de atomen ook mee variëren. De lengteverandering is het grootst wanneer alle domeinen in de zelfde richting staan. Deze toestand doet zich voor wanneer de verzadigingstoestand ingetreden is.

Brengen we een druk aan in de lengterichting van het materiaal, in plaats van een magnetisch veld, dan zullen de kristallen in de richting van de druk iets kleiner worden en in de dwarsrichting iets uitzetten, dus de afstand tussen de atomen zal ook wat groter worden. Daarbij draait de spontane magnetisatie overal (wanneer er sprake is van bijv. ijzer) in de richting van de grootste afstand tussen de atomen, dus in de dwarsrichting alsof in deze richting een veld ingeschakeld is. Probeert men nu de spontane magnetisatie M_s terug te draaien, dan is daarvoor een grotere veldsterkte nodig, dan zonder de uitwendig aangebrachte druk.

De grootte van de verzadigingsmagnetostriktie λ_s , hangt voor een één-kristallijne stof ook af van de kristal-richting.

De verzadigingsmagnetostriktie van polykristallijn materiaal parallel aan een aangelegd magnetisch veld wordt aangegeven door één enkele konstante λ_s . Deze waarde hangt af van de individuele magnetostriktieve eigenschappen van de afzonderlijke kristallen en van de wijze hoe de kristallen in het materiaal liggen. Wanneer alle kristallen willekeurig gericht zijn, zou een soort van middeling van de magnetostriktie over alle oriëntaties moeten worden uitgevoerd, echter hoe deze middeling moet gebeuren is niet helemaal duidelijk.

De spanningsafhankelijke energie die per volume eenheid moet worden toegevoerd om de spontane magnetisering uit een bepaalde evenwichtsinstelling te draaien in een richting α_1 , α_2 en α_3 wordt door de

volgende fenomenologische formule (lit. 3.5 p. 273) weergegeven:

$$E_{\sigma} = -\frac{3}{2} \lambda_{100} \sigma (\alpha_1^2 \gamma_1^2 + \alpha_2^2 \gamma_2^2 + \alpha_3^2 \gamma_3^2) - 3 \lambda_{111} \sigma (\alpha_1 \alpha_2 \gamma_1 \gamma_2 + \alpha_2 \alpha_3 \gamma_2 \gamma_3 + \alpha_3 \alpha_1 \gamma_3 \gamma_1) \quad (3.8)$$

hierin wordt E_{σ} uitgedrukt in Jm^{-3} , λ_{100} en λ_{111} stellen de magnetostrikties voor wanneer M_s in resp. de (100)- en de (111)-richting staat. α_i ($i = 1, 2, 3$) zijn de richtingcosinussen van M_s t.o.v. de kristalassen en γ_i ($i = 1, 2, 3$) zijn de richtingcosinussen van σ , ook t.o.v. de kristalassen. Wanneer er sprake is van druk is σ negatief; σ is positief wanneer op het kristal een trekspanning wordt uitgeoefend.

Om de juiste stand van de magnetisatie M_s te bepalen moet ook rekening gehouden worden met de bijdrage van de magnetische anisotropie-energiedichtheid E_k (3.5). Het minimum van de som $E_k + E_{\sigma}$ bepaalt de richting.

Formule (3.8) is nogal gekompliceerd. Wanneer we aannemen dat het materiaal isotroop is, dus $\lambda_{100} = \lambda_{111} = \lambda_s$, reduceert de formule tot:

$$E_{\sigma} = -\frac{3}{2} \lambda_s \sigma \cos^2 \beta \quad (3.9)$$

hierin is $\cos \beta = \alpha_1 \gamma_1 + \alpha_2 \gamma_2 + \alpha_3 \gamma_3$,

de cosinus van de hoek tussen de richting van de magnetisatie en de spanningsrichting.

We zien uit (3.9), dat de verandering van de richting van de magnetisatie alleen afhangt van het produkt van λ_s en σ ; een materiaal met een positieve λ_s belast met een trekspanning gedraagt zich dus het zelfde als een materiaal met een negatieve magnetostriktie onder druk.

Het kwadraat van de cosinus geeft de tweevoudige symmetrie aan langs een lijn, dat wil zeggen dat door een uitwendig aangebrachte spanning de magnetisatie in de domeinen zowel in de positieve richting als in de negatieve richting (180° gedraaid) zal roteren, omdat het energetisch niet uitmaakt of M_s in de positieve of in de richting antiparallel daaraan staat. Dus uitwendig is er geen magnetisatie waar te nemen. Eén en ander is nog verduidelijkt in fig. 3.7.

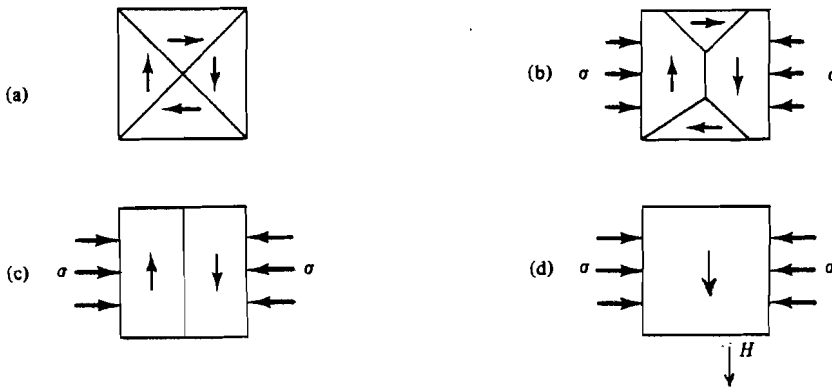


fig. 3.7 Magnetisatie van een materiaal met een positieve magnetostriktie onder invloed van een drukspanning

Stel dat een klein stukje van een materiaal met een positieve magnetostriktie uit vier domeinen bestaat (fig. 3.7a). Door het aanbrengen van een kleine drukspanning (fig. 3.7b) zullen de domeinwanden verschuiven en wel zo, dat de domeinen met de magnetisatierichting loodrecht op de drukrichting in volume groter worden, ten koste van de domeinen die de magnetisatierichting parallel hebben aan de drukrichting. Deze sluitdomeinen worden helemaal geëlimineerd door de drukspanning wat te vergroten (fig. 3.7c). In deze situatie is E_σ (3.9) minimaal.

Een klein magnetisch veld is nog maar nodig om het stukje materiaal in de verzadigde toestand te brengen (fig. 3.7d), omdat de overgang tussen fig. c en d door een weinig energie kostend proces van 180° -wandverschuiving kan gebeuren.

3.2.4 Magnetisatieproces

De domeinstruktuur van ferromagnetisch materiaal verandert wanneer een magnetisch veld wordt aangelegd. De reden voor deze verandering is dat de momenten van de atomen zich zo zullen richten, dat er een minimum optreedt in de potentiële energie.

De energie per volume eenheid die het magnetisch veld levert is:

$$E_H = -\mu_0 M_s H \cos \theta \quad (3.10)$$

hierin is θ de hoek tussen de magnetisatierichting en de veldrichting.

Als resultaat van het veranderen van de domeinstruktuur vinden we een magnetische inductie B , die gerelateerd is met het magnetisch veld H en de magnetisatie M volgens:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (3.11)$$

Op twee manieren kan de magnetisatie van een ferromagnetisch lichaam veranderd worden, en wel door:

- a) een verandering in de volume van een domein (wandverschuiving)
- b) een verandering in de richting van de magnetisatie van een domein (rotatie).

In het eerste proces groeien de domeinen, waarvan M een grote komponent parallel aan het aangebrachte veld H heeft, ten koste van andere domeinen.

In fig. 3.8 heeft een veld H tot gevolg, dat de wanden gaan bewegen, doordat een kracht op de wanden wordt uitgeoefend. Op deze wijze ontstaat er een netto-magnetisatie. De kracht ontstaat, omdat de magnetostatische energie tussen het veld en de magnetisatie aan één kant van de wand lager is dan aan de andere kant.

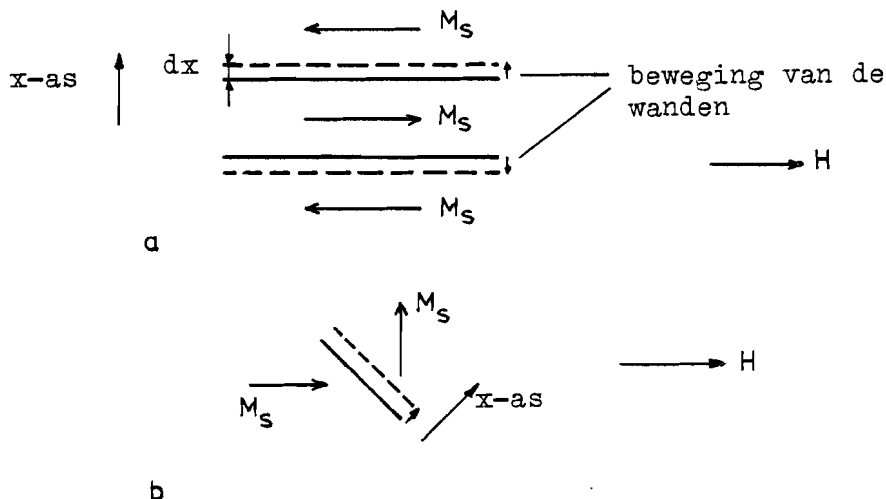


fig. 3.8 De beweging van a) 180°- en b) 90°- wanden veroorzaakt door een veld H

In fig. 3.8a is de magnetostatische energie per volume eenheid van het domein dat naar links gemagnetiseerd is, volgens (3.10), $\mu_0 M_s H$ en naar rechts gemagnetiseerd gelijk aan $-\mu_0 M_s H$.

Dus een wandbeweging over een afstand dx , zoals aangegeven in de figuur, vermindert de energie met $2\mu_0 M_s H \cdot dx$ per eenheid van wandoppervlak en de kracht per oppervlakte eenheid is in de x-richting daarom $2\mu_0 M_s H$.

In het geval van een 90°-wand (fig. 3.8b) staat de wand zodanig, dat de componenten van de magnetisaties loodrecht op de wand tussen twee domeinen continu verlopen. De druk, die nu op de wand in de x-richting wordt uitgeoefend is dus $0.5\sqrt{2}$ maal zo groot als de druk op de 180°-wanden.

Uit bovenstaande blijkt, dat de druk op de 90°-wanden kleiner is dan op de 180°-wanden. Een klein veld is dan al voldoende om eerst de 180°-wanden te bewegen en vooral de 180°-wanden, die de kleinste hoek maken met het veld H , omdat op die wanden de grootste druk wordt uitgeoefend.

Een belangrijk verschil tussen de 180°- en de 90°-wanden is, dat

wanneer een 90° -wand van plaats verandert, de magnetisatie 90° draait. Een dergelijke draaiing veroorzaakt magnetostriktie welke kan leiden tot inwendige spanningen in het materiaal (zie paragraaf 3.2.3). Geen lengteveranderingen vinden plaats bij een beweging van een 180° -wand, omdat de magnetostriktie invariant is bij een tekenomkering van de magnetisatie.

Wandverschuiving is gedeeltelijk een irreversibel proces, dat wil zeggen dat de wand na verschoven te zijn geweest, bij een bepaalde veldsterkte niet op de zelfde plaats terug zal keren. In fig. 3.9 is dit schematisch aangegeven.

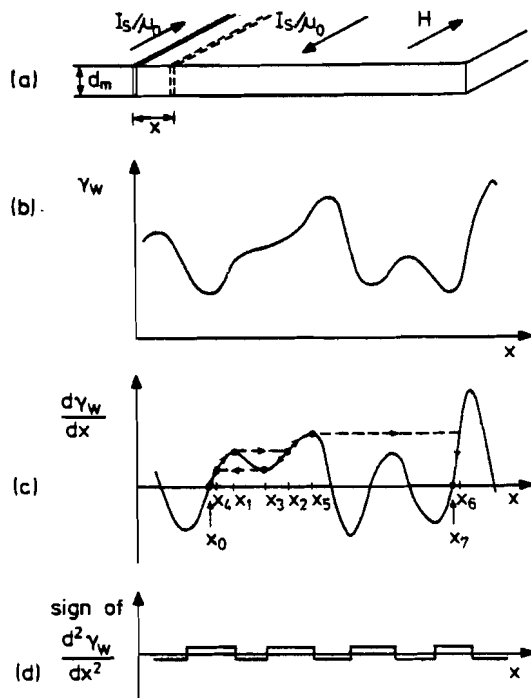


fig. 3.9 a) Verplaatsing van een 180° -wand
b) Wandenergie $\gamma_w(x)$
c) Gradiënt van de wandenergie
d) Het teken van de tweede afgeleide van $\gamma_w(x)$ (lit. 3.6 p.2)

Door onzuiverheden in ferromagnetisch materiaal, zoals lege ruimtes, ingesloten deeltjes niet-ferromagnetisch materiaal e.d., mogen we veronderstellen dat voor iedere wand als functie van de plaats een bepaalde potentiële energie bestaat. Deze functie kan beschreven worden door $\gamma_w(x)$, welke de energie per oppervlakte eenheid als functie van de plaats voorstelt.

In afwezigheid van een veld H is de wand in rust op een plaats x_0 (fig. 3.9c). Hier heeft γ_w een zeker minimum want $d\gamma_w/dx = 0$ en $d^2\gamma_w/dx^2 > 0$.

Door een magnetisch veld, dat in sterkte toeneemt, verplaatst de wand zich reversibel tot de positie x en wel zolang als de wand zich in een "energietrog" bevindt.

De energie E_h per eenheid van wandoppervlakte die het veld levert is:

$$E_h = - 2\mu_0 M_s H(x - x_0) \quad (3.12)$$

De wand gaat op die plaats staan waar de totale energie E , met $E = \gamma_w + E_h$, een minimum bereikt.

$$\frac{dE}{dx} = \frac{d\gamma_w}{dx} - 2\mu_0 M_s H = 0 \quad (3.13)$$

Dus voor een bepaalde veldsterkte H is x de evenwichtspositie waar geldt:

$$\frac{d\gamma_w}{dx} = 2\mu_0 M_s H \quad (3.14)$$

In het gebied $x_0 < x < x_1$ is de verplaatsing van de wand reversibel en houdt de druk $2\mu_0 M_s H$ op de wand op plaats x de wand in balans.

Op positie x_1 is de gradiënt $d\gamma_w/dx$ van de wandenergie maximaal, omdat $d^2\gamma_w/dx^2$ negatief wordt. Zonder dat het veld wordt vergroot, zal de wand irreversibel bewegen naar positie x_2 . Deze irreversibele wandverplaatsing wordt een Barkhausen-sprong genoemd, naar de ont-

lopen, maar meer een structuur hebben die uit "treden" bestaat (zie fig. 3.10).

Wanneer de wandbeweging is voltooid is het materiaal nog niet in de richting van het veld verzadigd, omdat de richting van de magnetisatie in een kristal nog langs een voorkeurs-as ligt. Van ieder kubisch kristal met de zes makkelijke magnetisatie richtingen (positieve magnetostriktie), zullen die domeinen overgebleven zijn, waarvan M_s de richting heeft die het meest de richting van het veld benadert.

De volgende stap in het magnetisatieproces is een rotatie van de magnetisatievektor in de richting van het veld. Dit proces zal natuurlijk ook al plaats vinden tijdens de wandbeweging, maar van de meeste materialen zal de magnetische anisotropie zo groot zijn, dat er een veel sterker veld moet worden toegepast om de magnetisatievektor uit een voorkeursrichting te draaien dan voor het verplaatsen van de wanden nodig is.

De rotatie van de magnetisatievektor is een reversibel proces. De rotatie zal klein zijn totdat de energie E_H per volume eenheid (3.10), die door het veld geleverd wordt in de zelfde orde van grootte komt te liggen als de anisotropie energie K_1 (3.5). De verzadiging is pas volledig wanneer geldt dat:

$$H \gg \frac{|K_1|}{\mu_0 M_s} \quad (3.15)$$

Het veld dat nodig is om de wandbeweging te voltooien kan ook geschat worden door het koërcitieveld H_c te nemen (fig. 3.10), omdat deze waarde een grove maat van het veld weergeeft dat nodig is om de irreversibele processen te voltooien. De koërcitieveldsterkte hangt o.a. af van de zuiverheid van het materiaal, maar ook van inwendige spanningen.

In fig. 3.10 is ook een zgn. "minor loop" (ook wel Rayleigh-lus genoemd, lit. 3.7 p. 52) weergegeven. Hier hebben de snijpunten (c) van de lus met de H-as geen vaste waarden, maar zijn afhankelijk van

het veld. Dit in tegenstelling tot de koërcitiefveldsterkte, die een materiaalkonstante is.

Hoe komt het dat insluitingen in een materiaal de wandbeweging hinderen? Uit het oogpunt van magnetisme verstaan we onder een insluiting een gebied in een domein met een spontane magnetisatie (of helemaal geen) die verschillend is met de magnetisatie van het materiaal rond een insluiting.

De verandering van de wandbeweging is als volgt te verklaren (zie ook fig. 3.11).

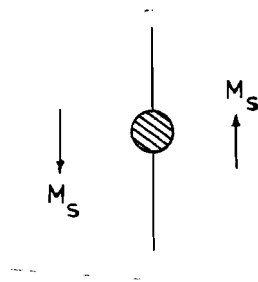


fig. 3.11 Insluiting in een domeinwand

De wand bezit per oppervlakte eenheid een bepaalde energie γ . De wand zal daarom proberen een kleine oppervlakte in te nemen. Wanneer een wand beweegt en een insluiting tegenkomt zoals weergegeven is in fig. 3.11, zal de wandoppervlakte met πr^2 afnemen (er van uitgaande dat de insluiting een bol is met straal r). De wandenergie neemt dan af met $\gamma \pi r^2$. De insluiting "pint" de Bloch-wand met een bepaalde kracht vast en alleen bij een groter wordende veldsterkte schiet de wand los van de insluiting.

3.3 Bepaling van de spanningsgevoeligheid

In paragraaf 3.2.3 is aangetoond, dat door een spanning uit te oefenen op een ferromagnetisch lichaam, de richting van de spontane magnetisatie M_s in een domein verandert.

De verwachting is, dat de magnetisering van ferromagnetisch materiaal met een positieve magnetostriktie moeilijker zal verlopen, wanneer een druk in de richting van het magnetisch veld wordt aangebracht.

De druk zal tot gevolg hebben, dat de magnetisatie van de domeinen door wandverschuiving en rotatie hoofdzakelijk de richting loodrecht op de druk zal aannemen. De energie E_σ per volume eenheid (3.9) zal dan minimaal zijn. Het veld zal echter proberen de magnetisatievektoren in de richting van het veld te draaien, om te streven dat E_H (3.10) minimaal wordt. Hiervoor is een beduidend sterker veld nodig, dan wanneer het materiaal niet belast wordt. De B-H curve zal dan een verloop hebben zoals schematisch is aangegeven in fig. 3.12.

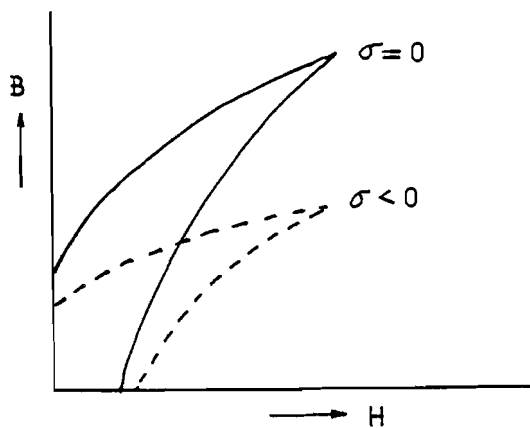


fig. 3.12 Verandering van de B-H curve door een drukspanning bij positieve magnetostriktie

Om bovenstaande te verifiëren zijn wij uitgegaan van de proefopstelling zoals schematisch weergegeven is in fig. 3.13.

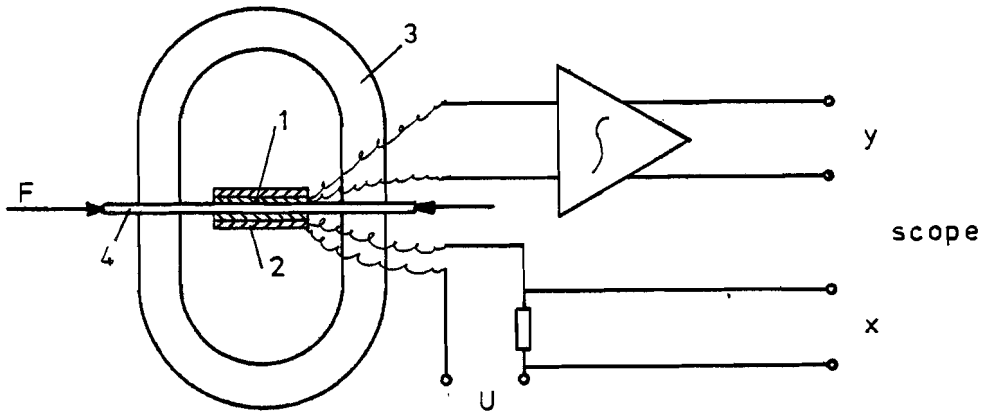


fig. 3.13 Proefopstelling voor het meten van de B-H kromme

In het midden van het transformatorblik zijn twee wikkelingen aangebracht. Iedere wikkeling bestaat uit vijftig windingen. Met behulp van de buitenste wikkeling (2) wordt het veld geëxciteerd. Deze wikkeling is daartoe aangesloten op een variabele transformator (Variac) met gescheiden wikkelingen. De stroom is een maat voor de veldsterkte en de spanning over een weerstand die evenredig is met de stroom wordt toegevoerd aan de horizontale afbuigspoelen van de oscilloscoop (x).

In de binnenste wikkeling (1) wordt door het wisselende magnetisch veld een spanning opgewekt, evenredig met dB/dt . Om een maat te krijgen voor de magnetische inductie B, wordt deze spanning eerst geïntegreerd en daarna aangesloten op de verticale afbuigspoelen van de oscilloscoop (y). De kracht F werd verkregen door de uiteinden van het transformatorblik te klemmen in een bankschroef.

De verandering van de hystereselus onder invloed van de druk, was zoals getekend is in fig. 3.12.

Wanneer een ferromagnetisch lichaam van eindige afmetingen wordt gemagnetiseerd, worden er zgn. vrije polen geïnduceerd aan de uiteinden van het materiaal zoals in fig. 3.14 is te zien.

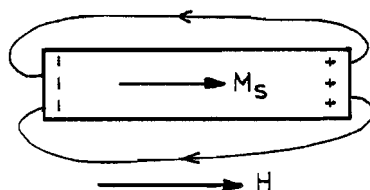


fig. 3.14 Vrije poolvorming wanneer het materiaal wordt gemagnetiseerd

Deze vrije polen zorgen voor een magnetisch veld, dat tegengesteld gericht is aan het veld dat de poolvorming veroorzaakt. Dit ontmagnetiserend veld is evenredig met de magnetisatie M . Het veld H_m in het ferromagnetisch materiaal is dus kleiner dan het aangelegde veld H .

$$\vec{H}_m = \vec{H} - N\vec{M} \quad (3.15)$$

hierin is N de ontmagnetiserende faktor. Deze faktor hangt niet af van de aard van de materie, maar alleen van de vorm en steeds is $0 \leq N \leq 1$. Voor materiaal met een oneindige lengte geldt bijvoorbeeld $N = 0$. Het produkt van N en M is het ontmagnetiserend veld.

De U-vormige konstruktie (3) op en onder het op druk belaste transformatorblik (4) bestaat uit bandgewikkelde transformator materiaal. Deze konstruktie heeft tot doel, het ontmagnetiserend veld, dat aan de vrije uiteinden van het transformatorblik onstaat, te verminderen. Op deze wijze hebben wij een gesloten weg voor de magnetische flux gecreëerd. Door de vlakken van het U-vormig materiaal dat tegen het transformatorblik worden gehouden, vlak te slijpen, worden de luchtspleten klein gehouden en daardoor ook het ontmagnetiserend veld.

De proefopstelling in fig. 3.13 is ook zeer geschikt om transformatorblik door middel van een B-H kromme te onderzoeken. Het U-vormig bandgewikkelde transformator materiaal moet echter wel een hogere permeabiliteit μ_T hebben, dan het te onderzoeken transformatorblik. De ringkern Ultraperm 10 van Vacuumschmelze met een $\mu_T = 3 \cdot 10^5$, zal goed voldoen.

Welke eigenschappen moet ferromagnetisch materiaal hebben om een grote spanningsgevoeligheid te vertonen?

Om dit te onderzoeken gaan wij uit van materiaal, dat opgebouwd is uit kubische kristallen. We veronderstellen tevens dat het magnetisch veld en de magnetisatie M_S in één vlak van een kubus liggen.

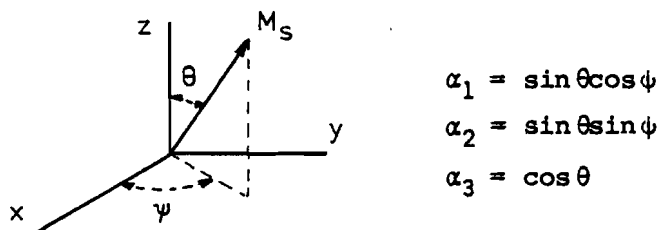


fig. 3.15 Richtingcosinussen

Voor het geval dat M_S en H in het xz-vlak liggen geldt:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \sin \theta \\ \alpha_2 &= 0 \\ \alpha_3 &= \cos \theta \end{aligned}$$

De magnetische anisotropie energie E_k (3.5) reduceert dan tot:

$$E_k = \frac{K_1}{8} (1 - \cos 4\theta) \tag{3.16}$$

En de energie geleverd door het veld (zie fig. 3.16) is dan (3.10):

$$E_H = - \mu_0 M_s H \cos(\beta - \theta) \quad (3.17)$$

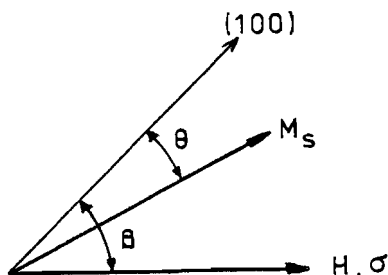


fig. 3.16 Oriëntatie van M-, H- en σ -vectoren t.o.v. een 100-as van een kubus

Met de druk σ in de richting van het veld wordt de magneto-elastische energie E_σ (3.9):

$$E_\sigma = - \frac{3}{2} \lambda_s \sigma \cos^2(\beta - \theta) \quad (3.18)$$

De totale energie is gelijk aan :

$$E = E_K + E_H + E_\sigma \quad (3.19)$$

En om de richting van M_s te bepalen, wanneer het systeem in evenwicht is, stellen we

$$\frac{dE}{d\theta} = 0 \quad (3.20)$$

Bozorth en Williams (lit. 3.8) komen dan tot een betrekking voor de spanningsgevoeligheid S .

$$S = \frac{dB}{d\sigma} = \frac{3}{2} \frac{\lambda_s I_s}{K_1} \left(\frac{B_0}{I_s} \right) \left(1 - \frac{B_0^2}{I_s^2} \right) \cdot f. 10^7 \quad (3.21)$$

hierin is B_0 de inductie veroorzaakt door het veld H bij $\sigma = 0$, f is een van de kristaloriëntering afhankelijke faktor en bedraagt ongeveer 1,5. De spanningsgevoeligheid S wordt uitgedrukt in WbN^{-1} . De grootste spanningsgevoeligheid wordt bij een bepaalde veldsterkte H bereikt. Dit is ook wel voor te stellen, omdat in de buurt van de verzadiging $B_0 = I_s$ geen noemenswaardige invloed van de spanning te bereiken is, omdat de richting van de magnetisatie M_s hoofdzakelijk bepaald wordt door de veldenergie.

De noodzakelijke uitsturing B_0 volgt uit (3.21) met behulp van

$$\frac{dS}{dB} = 0 \quad (3.22)$$

Uit deze differentiatie volgt dat $B_0 \approx 0,58 I_s$.

De maximale spanningsgevoeligheid is dan:

$$S_{\max} = \frac{\lambda_s I_s}{K_1} C \quad (3.23)$$

hierin is C een konstante faktor.

Bovenstaande formules zijn afgeleid voor een konstant magnetisch veld H . Wij gebruiken echter een wisselveld, dus de spanningsgevoeligheid S zal kleiner zijn dan in het statische geval, mede door het optreden van wervelstromen. Uit formule (3.23) blijkt, dat de spanningsgevoeligheid van drie materiaalgrootheden afhangt en wel van de :

- a) verzadigingspolarisatie $I_s (= \mu_0 M_s)$,
- b) verzadigingsmagnetostriktie λ_s ,
- c) anisotropiekonstante K .

Dus voor een grote gevoeligheid moet het materiaal een hoge verzadigingspolarisatie bezitten met daarnaast een grote verzadigingsmagnetostriktie en een lage anisotropiekonstante.

4 Ontwerp van de krachtsensor

4.1 Inleiding

De basiskonfiguratie van de krachtsensor is weergegeven in fig. 4.1a.

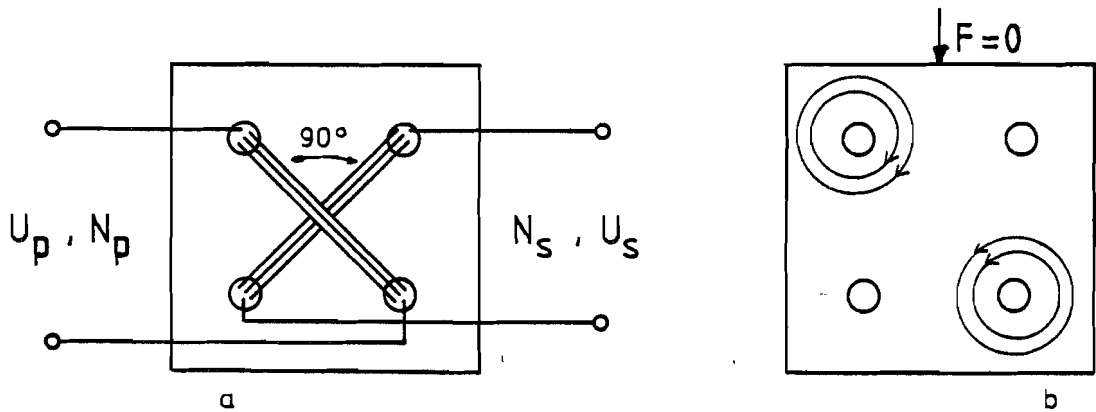


fig. 4.1 Basiskonfiguratie

De krachtsensor kan als een "verkeerd" ontworpen transformator gezien worden, waarin de primaire en sekundaire windingen zodanig zijn geplaatst, dat de magnetische koppeling tussen de windingen, in de mechanisch onbelaste toestand, nul is. Fig. 4.1b toont de fluxlijnen, die geëxciteerd worden door een stroom in de primaire wikkeling.

Gaan we voor de eenvoud er van uit, dat het ferromagnetisch materiaal isotroop is, zonder inwendige spanningen e.d., dan zal de vektor van de magnetische inductie B in de richting van het magnetisch veld H liggen (fig. 4.2).

De inductievector B kan ontbonden worden in de x - en y -richting in twee gelijke componenten: B_x en B_y . In dit geval is de geïnduceerde spanning in de sekundaire spoel nul, omdat B in het vlak van de spoel ligt.

Wanneer druk op het ferromagnetisch materiaal, met positieve magnetostriktie, wordt uitgeoefend, zal de magneto-elastische energiedichtheid E_G (3.9) verminderen als de magnetisatievector M meer in de richting loodrecht op de drukrichting verandert.

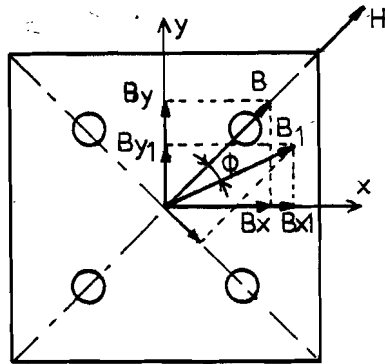


fig. 4.2 Induktie B in onbelaste en B_1 in belaste toestand

De componenten van de inductievector B_1 , B_{x1} en B_{y1} , zijn nu niet meer aan elkaar gelijk. De permeabiliteit zal in de y-richting met de druk afnemen, met als gevolg dat de component B_{y1} kleiner zal worden. In de x-richting neemt de permeabiliteit toe en dus ook de inductiecomponent B_{x1} . De resultante B_1 verandert hierdoor van richting over een hoek ϕ (fig. 4.2). De projectie van deze vektor ($B_1 \sin \phi$) loodrecht op het vlak waarin de sekundaire wikkeling ligt heeft een magnetische flux tot gevolg, die een spanning in de sekundaire spoel opwekt.

Theoretisch kan op deze wijze maximaal $0,5 \sqrt{2}$ van de totale flux (ongeveer 70 %) door de sekundaire spoel gestuurd worden.

Waarmee moet rekening gehouden worden bij het mechanisch ontwerp van de sensor? Om op deze vraag een antwoord te geven is in fig. 4.3 nogmaals de basiskonfiguratie van de sensor weergegeven.

Om een gekoncentreerde fluxverdeling te krijgen moet de afstand tussen de vier gaten, voor de primaire en sekundaire wikkeling, klein zijn. Wanneer een druk wordt aangebracht zullen spanningen worden opgewekt in de zones A en B, terwijl door de ontlastende invloed van de gaten, bijna geen spanningen zullen optreden in de zones C en D.

In de gebieden A en B mag de spanning niet zo hoog zijn, dat het materiaal plastisch gedeformeerd wordt.

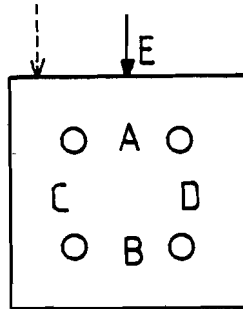


fig. 4.3 Basiskonfiguratie onder druk belast, met vier gebieden A, B, C en D

De plaats waar de kracht aangrijpt is ook van belang, want het is wel in te zien, dat de drukverdeling in het materiaal anders verloopt, wanneer een kracht in punt E of aan de zijkant van het materiaal wordt aangebracht.

In de volgende paragrafen wordt het model nader uitgewerkt en berekend, waarvan voor de berekeningen gebruik gemaakt is van de eindige elementenmethode.

4.2 Materiaalonderzoek

Materialen, die door uitwendige krachten belast worden zullen daardoor van vorm veranderen. De vormverandering is meestal maar weinig en als de krachten niet al te groot zijn zal, na het wegnemen ervan, het materiaal zijn oorspronkelijke vorm weer herkrijgen.

In een gedeelte van het elastisch gebied geldt, dat de vervorming evenredig is met de aangelegde kracht. Deze wetmatigheid is voor het eerst door Hooke in 1678 beschreven.

De mechanische eigenschappen van materiaal wordt o.a. bepaald door een trekproef. Daartoe wordt een proefstaaf van bepaalde afmetingen in een trektoestel belast, waarbij de gemeten kracht en de optredende verlenging worden geregistreerd. De kracht gedeeld door de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de proefstaaf geeft de gemiddelde spanning in de staaf en deze waarde wordt als functie van de relatieve lengteverandering in een grafiek uitgezet. In fig. 4.4 is een zgn. trekkromme weergegeven.

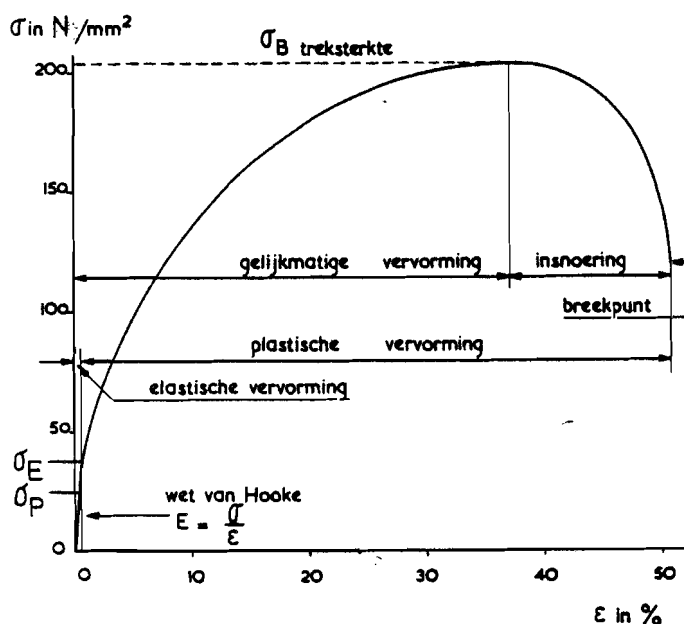


fig. 4.4 Trekkromme

Het lineaire verband tussen verlenging en spanning wordt weergegeven door de wet van Hooke:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4.1)$$

hierin is ε de relatieve lengteverandering en σ de spanning. E is een evenredigheidsconstante, de zgn. elasticiteitsmodulus, en is afhankelijk van het materiaal. Boven de proportionaliteitsgrens σ_p geldt de wet van Hooke niet meer.

De hoogste spanning waarbij nog geen plastische vervorming optreedt wordt de elasticiteitsgrens (σ_E) genoemd. De rekgrens σ_R wordt meestal gedefiniëerd als die belasting per oppervlakte eenheid, die een blijvende rek van 0,2 % van de oorspronkelijke lengte heeft veroorzaakt.

De treksterkte σ_B is een waardecijfer, dat algemeen als maat voor de sterkte wordt gebruikt. Deze waarde wordt verkregen door de hoogste belasting te nemen en te delen door de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de proefstaaf.

In het elastische gebied gedragen de meeste materialen zich onder een drukbelasting het zelfde als onder een trekbelasting. Daarom maakt men meestal alleen gebruik van een trekkromme.

Wanneer een staaf in het elastisch gebied op trek wordt belast zal de staaf niet alleen langer, maar ook dunner worden. Deze gelijkmatige, over de gehele lengte van de staaf optredende vermindering van de dwarsdoorsnede wordt dwarskontraktie genoemd. Het verband dat bestaat tussen de relatieve verandering van de diameter en de relatieve lengteverandering is:

$$\frac{\frac{\Delta D}{D_0}}{\frac{\Delta L}{L_0}} = \nu \quad (4.2)$$

hierin is ν de konstante van Poisson. Bij een $\nu = 0,5$ zal het volume van materialen niet veranderen. Metalen, die een ν van ongeveer 0,3 hebben, zullen dus in het elastische gebied in volume groter worden.

In paragraaf 3.3 bleek, dat voor een grote spanningsgevoeligheid het ferromagnetisch materiaal een hoge verzadigingspolarisatie (I_s) moet bezitten, met daarnaast een grote verzadigingsmagnetostriktie (λ_s) en een lage anisotropieconstante (K).

Alle drie materiaalgrootheden zijn temperatuurafhankelijk, met als uitschieter de verzadigingspolarisatie, die in de buurt van de Curie-temperatuur (zie fig. 3.2) de grootste verandering ondergaat. Uit deze figuur blijkt tevens, dat hoe hoger de Curie-temperatuur is hoe minder I_s rond kamertemperatuur in waarde daalt.

In fig. 4.5 zijn enkele konstanten weergegeven van de drie ferromagnetische stoffen.

element	I_s (T)	K_1 10^4 Jm^{-3}	λ_s 10^{-6}	T_c (K)
Fe	2,2	4,8	- 9	1043
Ni	0,6	- 0,5	-34	631
Co	1,6	45	-17	1404

fig. 4.5 Enkele fysische konstanten van Fe, Ni en Co

In fig. 4.6 is de magnetostriktie als functie van de veldsterkte weergegeven. Hieruit blijkt, dat ijzer voor onze doeleinden niet voldoet, omdat het teken van de magnetostriktie boven een bepaalde veldsterkte omkeert. Dit houdt in, dat in het ene geval de magnetisatie de voorkeur heeft voor de trekrichting, terwijl bij hogere veldsterkten de voorkeursrichting van de magnetisatie verandert in de drukrichting.

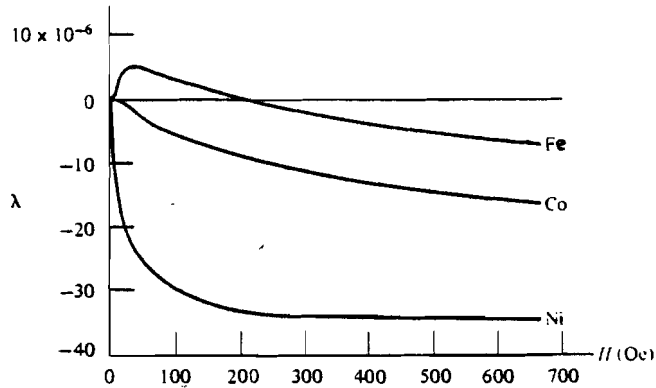


fig. 4.6 Magnetostriktie als functie van de veldsterkte

Niet alleen geeft een grote anisotropieconstante een lage gevoeligheid voor spanningen, maar het is ook moeilijker om het materiaal te magnetiseren. Door extra elementen aan de drie basismaterialen toe te voegen is het mogelijk de magnetische eigenschappen te veranderen.

In de transformatorindustrie worden veel ijzer-silicium-legeringen toegepast, omdat door het silicium de anisotropieconstante wordt verlaagd (ongeveer gehalveerd bij 3% Si) en tevens de soortelijke weerstand wordt verhoogd. Dit laatste is vooral gunstig bij het gebruik van wisselende magnetische velden, omdat de ontstane wervelstromen, dus ook de hystereseverliezen, klein gehouden kunnen worden. Echter hoe meer silicium toegevoegd wordt hoe brosser het materiaal, daarom is de Si bijdrage meestal niet meer dan vijf procent.

De magnetiseerbaarheid kan nog vergroot worden door de Fe-Si-kristallen een bepaalde richting in het materiaal te geven. De zgn. Goss-textuur $\{110\}(100)$, zie fig. 3.4, wordt in Fe-Si-legeringen het meeste toegepast (lit. 4.1).

Inwendige spanningen in het materiaal kunnen een nadelige invloed hebben op de magnetiseerbaarheid, wat in grote hystereseverliezen kan resulteren. Effekten die in Fe-Si-legeringen op kunnen treden

ten gevolge van druk- en trekspanningen is onderzocht (lit. 4.2-4.3) en daaruit blijkt, dat de hysteresse verliezen, als gevolg van drukspanningen, tot honderd procent kunnen toenemen.

Nog kleinere anisotropieconstanten krijgt men bij de nikkel-ijzerlegeringen (fig. 4.7), waarbij tussen 75 en 80% nikkel, zeer kleine waarden te bereiken vallen.

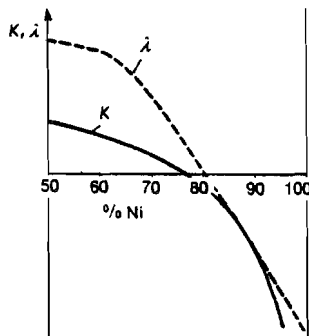


fig. 4.6 Verloop van de kristalanisotropie K en de magnetostriktie λ als functie van het nikkelpercentage

In de figuur is te zien, dat de magnetostriktie ook sterk vermindert bij het groter worden van het nikkelpercentage, om daarna bij een bepaalde percentage van teken om te keren.

Commerciëel zijn er veel materialen beschikbaar, die naast ijzer tussen 72 en 83% nikkel bevatten (zie bijv. lit. 4.4). De Curie-temperatuur van deze legeringen ligt rond de 400°C , terwijl de verzadigingspolarisatie I_s resp. de verzadigingsmagnetostriktie λ_s ongeveer $0,9\text{ T}$ en $1 \cdot 10^{-6}$ bedraagt. Door de lage Curie-temperatuur zal I_s bij temperatuurwisselingen wat meer variëren, dan materialen die een hogere Curie-temperatuur bezitten. De relatieve permeabiliteit van deze legeringen is groot en is meestal hoger dan 10^5 .

De rekgrens ligt ongeveer bij 150 Nmm^{-2} , wat lager is dan de waarde voor konstruktieetaal; deze ligt in de buurt van 200 Nmm^{-2} .

De maximaal toelaatbare spanning hoeft geen maatgevende eis te zijn bij de konstruktie. Een zekere stijfheid is wel gewenst, dat wil zeggen dat de sensor onder invloed van de erop werkende krachten niet te veel elastisch mag vervormen. De elasticiteitsmodulus E is dan de maatgevende faktor, met dien verstande dat de spanning nooit hoger mag worden dan de elasticiteitsgrens. Een grote E houdt ook een grote stijfheid in. De elasticiteitsmodulus van de nikkel-ijzerlegeringen met ongeveer 70% nikkel ligt in de buurt van 170 kNmm^{-2} , wat beduidend lager is dan van konstruktiestaal, die een waarde heeft van ongeveer 210 kNmm^{-2} . Dus bij een zelfde belasting vervormt materiaal van een Ni-Fe-legering meer dan materiaal dat alleen uit ijzer bestaat.

Het element kobalt heeft een hoge Curie-temperatuur, dus de verzadigingspolarisatie zal rond kamertemperatuur weinig veranderen. De anisotropiekonstante K_1 is echter hoog, ongeveer honderd maal zo groot als van nikkel. Het toevoegen van ijzer aan kobalt heeft een gunstig effect op de anisotropiekonstante, zie fig. 4.8 (lit. 4.5).

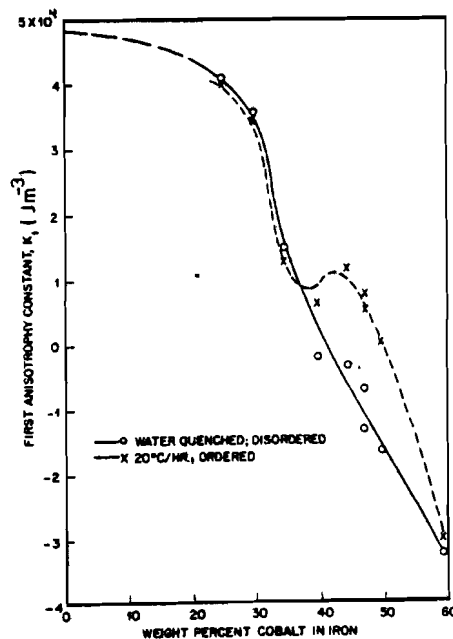


fig. 4.8 Anisotropiekonstante K_1 , voor Co-Fe-legeringen

Tussen de 40 en 50% kobalt bereikt de anisotropiekonstante een lage waarde.

Een kobalt-ijzer-legering bestaat bij temperaturen boven 800 °C uit verschillende fasen, o.a. uit de α - en de γ -fase. De α -fase houdt in, dat een gedeelte van de legering uit kristallen met een bcc-structuur (body centered cubic) bestaat zoals bijvoorbeeld een ijzerkristal (fig. 3.5a). De γ -fase heeft kristallen met een fcc-structuur (face centered cubic) zoals een nikkel kristal die ook heeft.

Bij lage temperaturen is de Co-Fe-legering in de α -fase en bestaat dus hoofdzakelijk uit kristallen met een bcc-structuur. Wanneer deze legering van boven 800 °C snel in water wordt afgekoeld hebben niet alle fcc-kristallen de tijd om in de bcc-structuur te transformeren. Dus bij lage temperaturen zullen, naast de kristallen met een bcc-structuur, ook nog kristallen voorkomen met een fcc-structuur. Dat dit van invloed is op de anisotropiekonstante is te zien in fig. 4.8. In de zgn. "disordered toestand" (kristallen met ook een fcc-structuur) gaat K_1 eerder door nul dan wanneer de legering alleen uit kristallen met een bcc-structuur bestaat.

Wil men een Co-Fe-legering met een kobaltpercentage die groter is dan 35% een warmtebehandeling geven, dan komt dat nogal precies. Naast ijzer wordt soms ook nog enkele procenten vanadium aan kobalt toegevoegd. Uit de praktijk blijkt, dat het materiaal zich dan makkelijker laat bewerken. Tevens wordt de specifieke weerstand ρ van het materiaal een faktor vier groter. Ook heeft het element vanadium een gunstige invloed op de koërcitiefveldsterkte.

Er zijn fabrikanten die nog andere elementen toevoegen, het doel daarvan is niet helemaal duidelijk, maar de indruk bestaat, dat men de octrooi-rechten op bestaande materialen op deze wijze tracht te omzeilen.

Bij een Co-Fe-legering met ongeveer 50% kobalt heeft de anisotropiekonstante een zeer kleine waarde. Deze legering is kommerciëel in de handel bij o.a. Vacuumschmelze (lit. 4.4) onder de naam: Vacoflux 50. In fig. 4.9 zijn enkele magnetische en mechanische eigenschappen gegeven.

H_c	H_c ($A \cdot m^{-1}$)	I_s (T)	λ_s 10^{-6}	T_c ($^{\circ}C$)
12000	110	2,35	70	950

a) Magnetische eigenschappen

ρ ($10^{-6} \Omega \cdot m$)	E ($kN \cdot mm^{-2}$)	σ_R ($N \cdot mm^{-2}$)
0,35	230	400

b) Fysische en mechanische eigenschappen

fig. 4.9 Vacoflux 50 (plaatdikte 0,3 mm)

Door zijn hoge elasticiteitsmodulus is Vacoflux 50 een stijf materiaal, dat zich tevens door zijn grote rekgrens minder makkelijk plastisch laat deformereren. De magnetische eigenschappen zijn ook gunstig, waarbij vooral de hoge verzadigingspolarisatie en de grote verzadigingsmagnetostriktie opvallen. Het vermoeden bestaat, dat dit materiaal een hoge spanningsgevoeligheid zal vertonen. Zeker is dit echter niet, omdat de anisotropieconstante van materiaal tot materiaal verschillend is. De TH-Eindhoven heeft geen faciliteiten, om de anisotropieconstante te meten en daarom is ook het gedrag van K_1 bij verschillende temperaturen onbekend.

Een nadeel van dit materiaal is zijn hoge koërcitiefveldsterkte.

Deze legering zal daarom moeilijker te magnetiseren zijn dan bijv. materiaal met een bepaald nikkel-percentage, dit houdt in dat er meer energie moet worden toegevoerd.

Door de te verwachten hoge spanningsgevoeligheid zal dit materiaal voor de krachtsensor worden gekozen.

4.3 Bepaling van de spanningsgevoeligheid

Theoretisch zal men verwachten dat het voor de spanningsgevoeligheid niet uitmaakt of op een materiaal een drukspanning dan wel een trekspanning wordt uitgeoefend. Komt dit ook praktisch tot uiting?

Om dit te onderzoeken hebben we o.a. gebruik gemaakt van de opstelling in fig. 4.10.

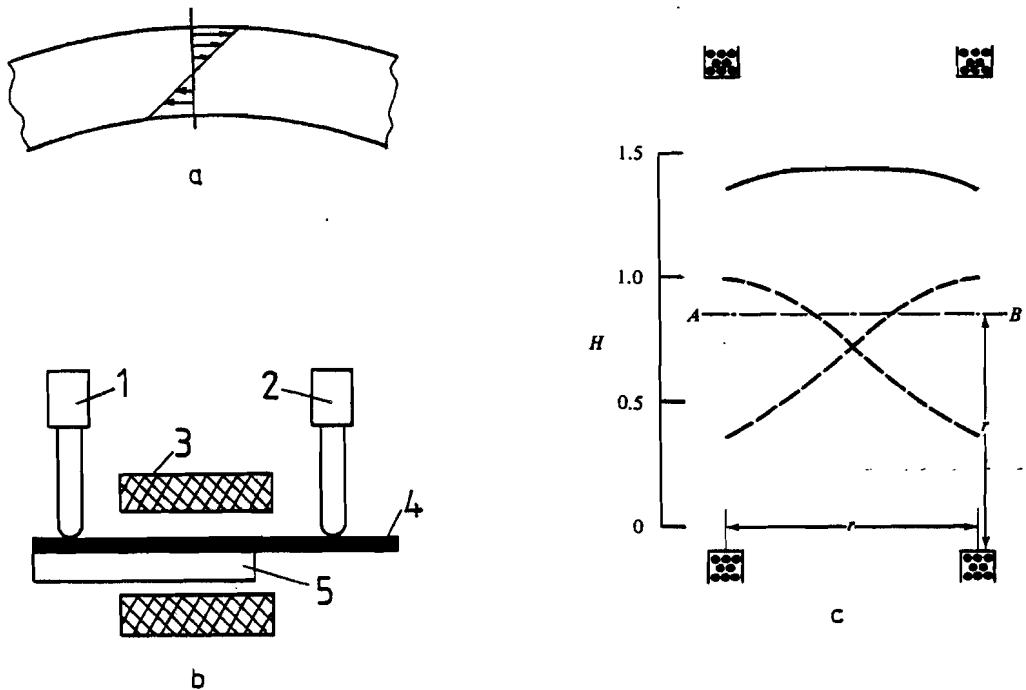


fig. 4.10 Opstelling voor de bepaling van de spanningsgevoeligheid

Wanneer een staaf materiaal gebogen wordt, treden er zowel trek- als drukspanningen op, die in het elastische gebied wat betreft grootte gelijk zijn (fig. 4.10a). Bij ferromagnetisch materiaal met een positieve magnetostriktie is dus in het spanningsgebied één helft moeilijker te magnetiseren dan de andere helft, wanneer een magnetisch veld in het verlengde van de staaf wordt aangelegd.

In fig. 4.10b is het mechanische gedeelte van de meetopstelling weergegeven. Een staafje ferromagnetisch materiaal (4), met een lengte van 32 mm, een breedte van 4 mm en een dikte van 0,4 mm, wordt aan één kant met behulp van een stelschroef (1) vast geklemd tegen een aanslag (5). Met stelschroef (2) kan het materiaal gebogen worden, waarbij één omwenteling overeenkomt met een verticale verplaatsing van 0,5 mm.

Om de inductieverandering te meten in de onbelaste en belaste toestand is rond het staafje ferromagnetisch materiaal een spoel (3) gewikkeld met ongeveer 1500 windingen. Het geheel plaatsen we in het centrum van een zgn. Helmholtz-spoelenpaar (fig. 4.10c). Een Helmholtz-konfiguratie bestaat uit twee identieke spoelen die op een afstand gelijk aan de straal r van de spoelen van elkaar zijn geplaatst. Een dergelijke opstelling produceert een vrijwel homogeen veld in de axiale richting A-B, dat in fig. 4.10c weergegeven wordt door de getrokken lijn. De gestreepte lijnen stellen het veld voor van iedere spoel afzonderlijk. Iedere spoel heeft ongeveer 850 windingen koperlakdraad met een diameter van 0,6 mm. De straal r van de spoelen bedraagt 100 mm.

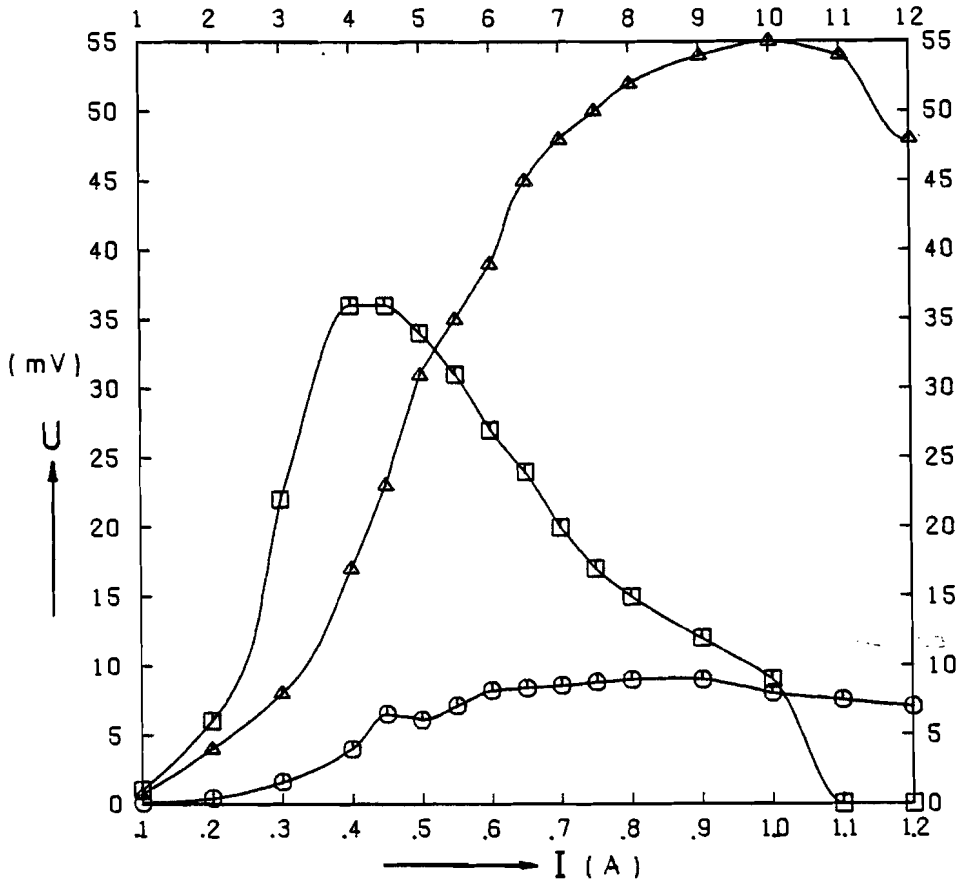
De afleiding van de veldverdeling in de ruimte tussen de spoelen is o.a. te vinden in lit. 4.6. Verwaarlozen we de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de windingen, dan is het magnetisch veld (Am^{-1}) in het midden tussen de spoelen in axiale richting A-B:

$$H = \frac{0,3577 \, ni}{r} \quad (4.3)$$

hierin is n het aantal windingen van de twee spoelen samen, i is de stroom in ampere en r is de straal van een spoel in meter.

Bij een wisselstroom met een effectieve waarde van 1 A is de veldsterkte in het midden tussen de spoelen ongeveer 6100 Am^{-1} . Echter door de vorm van het staafje ferromagnetisch materiaal zal er een sterk ontmagnetiserend veld optreden, dat het aangelegde wisselveld zal tegenwerken. Een exakte berekening van het ontmagnetiserend veld is niet mogelijk, omdat dit alleen vastgelegd is voor ellipsoïden (lit. 4.7). Benaderen we het staafje door een ellipsoïde, dan blijkt deze benadering te grof te zijn, omdat een berekening leert dat het ontmagnetiserend veld groter is dan het aangelegde veld; en dit is natuurlijk niet mogelijk.

Het gedrag van Vacoflux 50 in onbelaste toestand is te zien in fig. 4.11.



(stroom door de Helmholtz-spoelen)

○ Fe-Co onegloed, Δ Fe-Co gegloed, □ Fe-Si (4±1)%

fig. 4.11 Het gedrag van Fe-Co en Fe-Si in belaste toestand

In de grafiek is de absolute spanningsverandering t.o.v. de onbelaste toestand als functie van de stroomsterkte gegeven.

Vacoflux 50, zonder een warmtebehandeling, vertoonde tijdens de belasting een hogere geïnduceerde spanning dan in de onbelaste toestand. De belasting werd verkregen door stelschroef (2) één omwenteling te draaien. Dat de geïnduceerde spanning hoger wordt kan twee oorzaken hebben:

- 1) de trekspanning heeft de grootste invloed op de domeinen, zodat het materiaal makkelijker te magnetiseren is,
- 2) wanneer we ervan uitgaan, dat de Fe-Co-legering als halffabrikaat tijdens de produktie snel is afgekoeld, dan moet het materiaal nog veel kristallen met een fcc-struktuur bevatten. Deze kristallen hebben net andere magnetische eigenschappen dan kristallen met een bcc-struktuur. Bij fcc-kristallen gaan de magnetisatievektoren M in de richting van de druk staan en bij trek loodrecht daarop. Dus hier moet dan gelden dat druk de grootste invloed heeft, omdat het materiaal makkelijker te magnetiseren is.

De fabrikant (Vakuumschmelze) schrijft voor, dat ieder ferromagnetisch materiaal na een mechanische bewerking een warmtebehandeling moet ondergaan om betere magnetische eigenschappen te krijgen. Dit voorschrift luidt voor Vacoflux:

Het materiaal in een oven vier uur verwarmen op een temperatuur die ligt tussen de 800 en 820 °C. De Fe-Co-legering mag tijdens de verwarming niet reageren met zuurstof en moet daarom in een beschermgas geplaatst worden. Waterstof wordt aanbevolen, omdat dit gas tevens reageert met verontreinigingen in het metaal.

Na de vier uur verwarming moet het ferromagnetisch materiaal in de oven afgekoeld worden tot 200 °C. De verdere afkoeling mag buiten de oven plaats vinden.

Bovenstaande warmtebehandeling hebben we toegepast op de Fe-Co-legering. Alleen is er, wegens explosie gevaar, geen gebruik gemaakt van waterstofgas maar is het materiaal geplaatst in vacuüm.

Na de warmtebehandeling zullen de kristallen met een bcc-struktuur overheersen.

Uit de daarop volgende meting bleek nu, dat de geïnduceerde spanning in belaste toestand daalt. Dus hier heeft een drukspanning de grootste invloed, want het materiaal is moeilijker te magnetiseren. We kunnen hieruit de konklusie trekken dat de verhoging van de geïnduceerde spanning bij het ongegloeide materiaal het gevolg is van de tweede oorzaak.

In fig. 4.11 is te zien, dat de legering na de warmtebehandeling bij een zelfde belasting een grotere spanningsverandering geeft dan het ongegloeide materiaal.

Dezelfde spanningstest is uitgevoerd met ander ferromagnetisch materiaal afkomstig van een transformator. Om te weten met wat voor soort materiaal we van doen hebben is een proefstukje onderzocht door de Vakgroep deeltjes fysica van de afdeling Natuurkunde. Met behulp van de PIXE-methode (Particle Induced X-ray Emission), waarbij het proefstukje beschoten werd met bundels ionen die versneld waren tot een energie van enkele MeV, is de emissie van röntgenstralen geanalyseerd. Na analyse bleek het proefstukje naast ijzer nog $(4\pm 1)\%$ silicium te bevatten. Dit materiaal heeft een positieve magnetostriktie en de kristallen hebben een bcc-structuur.

De verandering van de inductiespanning van dit materiaal is te zien in fig. 4.11. De spanning nam ook af tijdens de belasting.

Hoewel de uitkomsten kwalitatief van aard zijn, blijkt dat de Fe-Si-legering bij een kleinere stroom, dus een lagere veldsterkte, te magnetiseren is dan de Fe-Co-legering. Tevens tonen de metingen aan, dat de spanningsverandering t.g.v. de belasting ook van de stroom, dus de grootte van het magnetisch veld, afhangt.

Wanneer het materiaal door de belasting iets gebogen wordt, ligt het verlengde van het staafje materiaal niet meer in de richting van het veld. De invloed daarvan op de verandering van de geïnduceerde inductie door de belasting bleek ongeveer 2% te zijn.

Omdat in alle metingen de drukspanning de grootste invloed heeft op de magnetische eigenschappen zal het mechanisch ontwerp van de krachtensor zodanig zijn, dat een aangebrachte kracht hoofdzakelijk drukspanningen in de sensor teweeg brengt.

4.4 Berekeningen m.b.v. de eindige elementenmethode

Eén van de belangrijkste ontwikkelingen in de mechanica is de opkomst van numerieke methoden voor de analyse van het statisch en dynamische gedrag van mechanische konstrukties. Al in de jaren vijftig verschenen de eerste publikaties over het gebruik van elektronische rekenmachines bij het onderzoek naar de stijfheid en sterkte en het trillingsgedrag van ontwerpen van mechanische aard. De meest bekende numerieke methode is zonder twijfel de zogenaamde methode van de eindige elementem ook wel eindige elementenmethode genoemd. Deze methode vond voor het eerst toepassing in de wereld van de vliegtuigbouw.

Met behulp van de numerieke methoden is het mogelijk geworden konstrukties te berekenen die vroeger of met modelonderzoek werden geanalyseerd of langs de, veel tijd vergende, klassieke weg werden berekend. Het is echter niet zo, dat nu ook niet-deskundige konstruktors vitale problemen aankunnen zonder enig inzicht te hebben in het gedrag van de konstruktie.

In de numerieke methoden wordt de konstruktie in elementen verdeeld. Deze elementen zijn meestal van eenvoudige vorm b.v. driehoeken, rechthoeken enz.. Van ieder element worden de belangrijkste eigenschappen bepaald waarna de eigenschappen van de oorspronkelijke konstruktie worden afgeleid uit die van de elementen.

Er zijn verschillende numerieke methoden die toegepast worden en die ook allen aangeduid worden met de naam "elementenmethode". De meesten zijn gebaseerd op het één of ander evenwichtsprincipe.

Er is al veel literatuur over de elementenmethode verschenen, vooral lit. 4.8 geeft veel informatie over de eindige elementenmethode.

Programmatuur die we gebruiken, beschikbaar gesteld door de Vakgroep Theoretische Mechanica van de afdeling Werktuigbouwkunde, om de drukverdeling in de krachtopnemer te berekenen berust op het principe van de minimale potentiële energie. Als primaire onbekenden treden daarin uitsluitend verplaatsingsgrootheden op.

Ongeacht van welke rekenmethodiek gebruik wordt gemaakt, er zullen

altijd drie soorten voorwaarden optreden. Deze zijn:

- de aansluitvoorwaarden (kompatibiliteit),
- de spanning-rek relaties,
- de evenwichtsvergelijkingen.

De aansluitvoorwaarden gelden ter plaatse van iedere knoop, waar de hoekpunten van verschillende elementen samenkomen. Ieder hoekpunt van een element in een knoop moet de verplaatsingen van die knoop aannemen.

Onder de werking van de belasting ondergaat elke knoop een beweging die kan bestaan uit een horizontale verplaatsing, een verticale verplaatsing en een rotatie. Deze componenten worden in het algemeen als verplaatsingen aangeduid. Iedere verplaatsingsmogelijkheid is een vrijheidsgraad.

Voor de meeste berekeningen die verricht zijn om tot een model van de krachtensor te komen, is gebruik gemaakt van een driehoekig element het zgn. TRIM3-element (triangular element with membrane stresses and 3 nodal points per element) zie fig. 4.12.

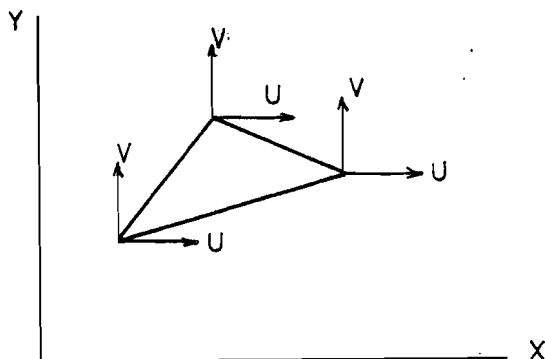


fig. 4.12 Een element van het type TRIM3

Met behulp van een driehoekig element is het mogelijk een vlakke plaat met willekeurige vorm te analyseren, die in het vlak belast wordt en waarin een vlakspanningstoestand heerst. De mechanica-theorie waarop dit element gebaseerd is, is de zgn. twee-dimensionale elasticiteitstheorie. In die theorie treden als verplaatsings-

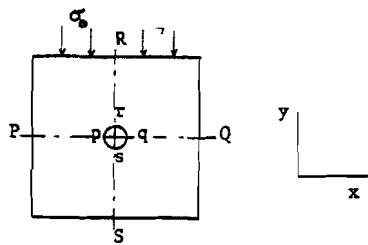
grootheden alleen de verplaatsingen $u(x,y)$ en $v(x,y)$ in het vlak van de plaat op (zie fig. 4.12). Dus ieder hoekpunt van een dergelijk element heeft twee vrijheidsgraden; in totaal heeft het TRIM3-element er zes.

Wanneer alle verplaatsingen bekend zijn, kunnen de normaalspanningen $\sigma_x(x,y)$ en $\sigma_y(x,y)$ en de schuifspanningen $\tau(x,y)$ met behulp van de wet van Hooke berekend worden.

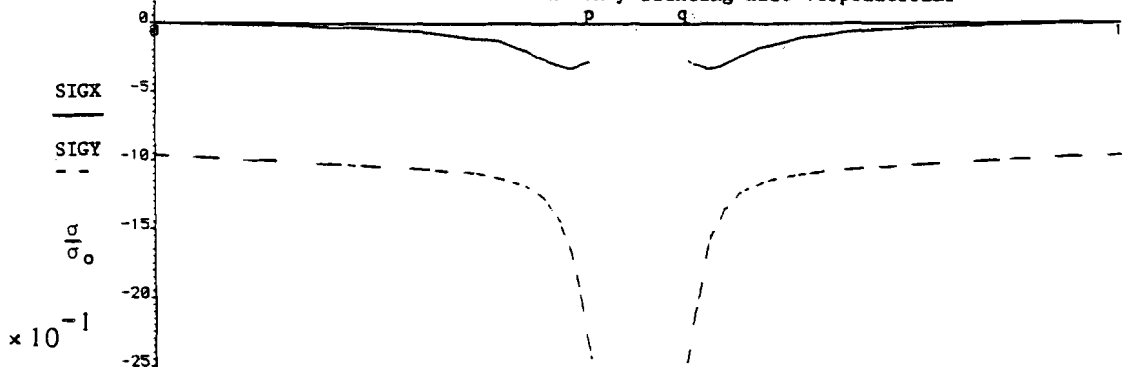
Hoe groter het aantal knooppunten, des te nauwkeuriger het resultaat in principe wordt. Bij een groter aantal knooppunten is echter het bezwaar, dat de systeemvergelijkingen in omvang toenemen. De reken-tijd en de vereiste geheugenruimte nemen hierdoor ook toe. Voor de meeste berekeningen hebben wij gebruik gemaakt van een driehoekig element de zgn. TRIM3-element. In bepaalde modellen, bijv. in recht-hoekige plaatkonstrukties is door ons een driehoekig element met zes knopen toegepast, de zgn. TRIM6-element. Dit type element heeft in plaats van een lineair verplaatsingsveld, zoals het geval is bij een TRIM3-element, een kwadratisch verplaatsingsveld. De rekken in een element zijn nu niet konstant, maar zijn afhankelijk van de plaats-koördinaten. In het algemeen is dit type element door het groter aantal vrijheidsgraden nauwkeuriger, maar kost relatief meer reken-tijd.

In appendix A wordt de samenhang tussen de verschillende programma's besproken. De modellen, die met behulp van de eindige elementen-methode zijn doorgerekend, worden in de appendix geschematiseerd weergegeven. Tevens zijn de gegevens van de konstrukties zodanig in numerieke waarden vertaald, dat de programma's er mee kunnen werken.

Zoals al in paragraaf 4.1 is opgemerkt moet de ruimte tussen de gaten van de spoelen zo klein mogelijk gehouden worden om een concentratie van de flux te bereiken. De drukspanning in het materiaal mag niet boven de elasticiteitsgrens komen, omdat anders het materiaal plastisch vervormd wordt en inwendige spanningen achterblijven.

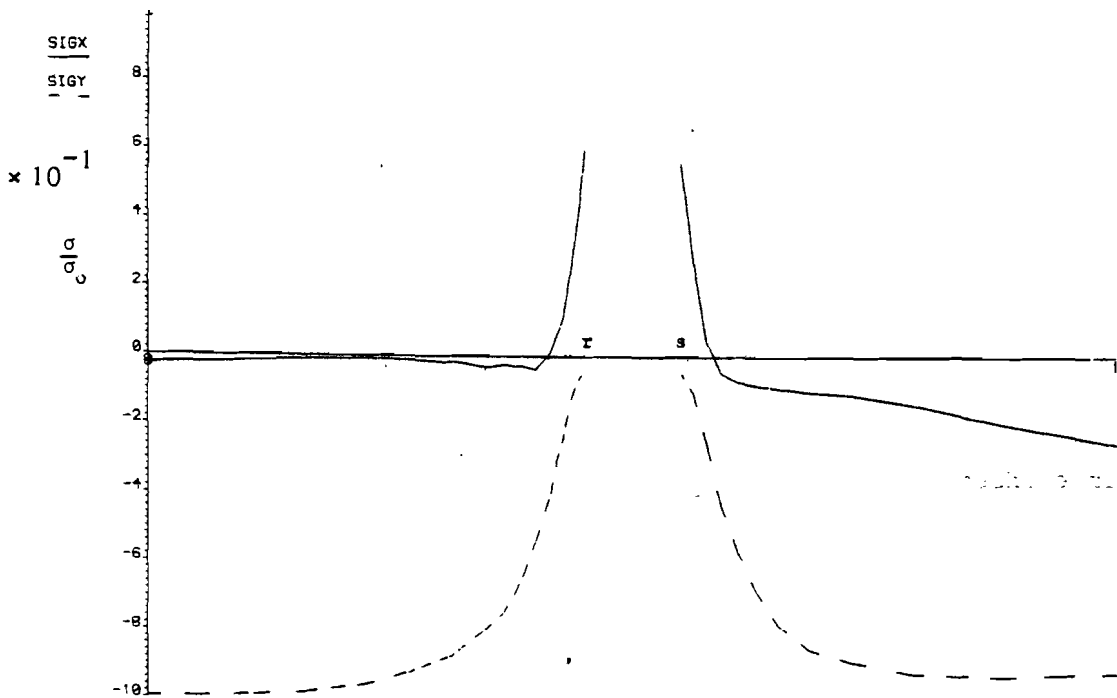


a) De onderkant is in de x- en y-richting niet verplaatsbaar



b) Doorsnede P - Q

HOLE



c) Doorsnede R - S

fig. 4.13 Drukverdeling rond een gat

Om na te gaan hoe de spanning rond een gat verandert, wanneer een plaat materiaal (fig. 4.13a) belast wordt, is m.b.v. de programmatuur de spanning t.o.v. een uitwendig aangebrachte drukspanning als functie van de plaats berekend (fig. 4.13b,c). In deze figuren is SIGX de relatieve spanning in de x-richting en SIGY de relatieve spanning in de y-richting. Een positieve waarde geeft een trekspanning weer een neagatieve waarde een drukspanning. Uit fig. 4.13b blijkt, dat de maximale spanning aan de rand van het gat, in de punten p en q, optreedt. De spanning wordt ongeveer 2,5 maal zo groot als de gemiddelde uitwendig aangebrachte spanning. Deze waarde neemt ook verder van het gat snel weer af. Een mogelijke overbelasting zal dus sneller optreden, naarmate de afstand tussen de gaten kleiner wordt. Op een afstand ter grootte van een gatdiameter is de druk weer sterk verminderd. Een goede keuze lijkt daarom ook de ruimte tussen de gaten ongeveer gelijk aan de diameter van een gat te nemen. In fig. 4.13c is te zien, dat een gat in de drukrichting een ontlastende invloed heeft op de drukspanning SIGY (punten r en s).

Voor de juiste werking is het essentieel, dat de druk vanuit het midden op gelijkmatige wijze verdeel wordt. De Saint Venant voelde al intuïtief aan, dat een spanning in een kolom, veroorzaakt door een puntkracht, op voldoende afstand van de aangrijpingsplaats van de kracht, in trek/druk-richting, overal gelijk is.

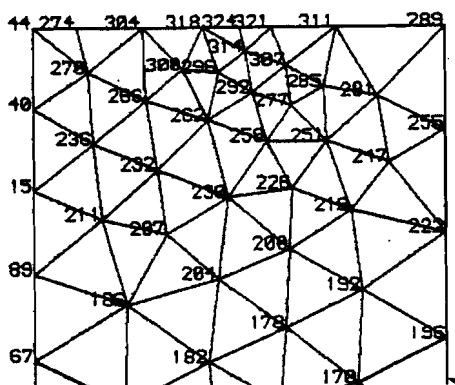


fig. 4.14 Strip verdeeld in elementen

Wat "voldoende afstand" is, hebben we bepaald met de hulp van de eindige elementenmethode (een klassieke berekening geeft lit. 4.9). We zijn voor de berekening uitgegaan van een strip materiaal waarvan de lengte groter is dan de breedte (voor de juiste configuratie zie appendix A onder de naam DATAMG/STRESS).

In fig. 4.14 is een deel van de strip, verdeeld in elementen weergegeven. De cijfers korresponderen met de plaatskoordinaten van de knooppunten.

Uit berekeningen blijkt, dat wanneer een puntkracht in het midden van de strip aangebracht wordt, de druk zich op een afstand van ongeveer anderhalf maal de breedte van de strip gelijkmatig verdeeld heeft (zie fig. 4.15).

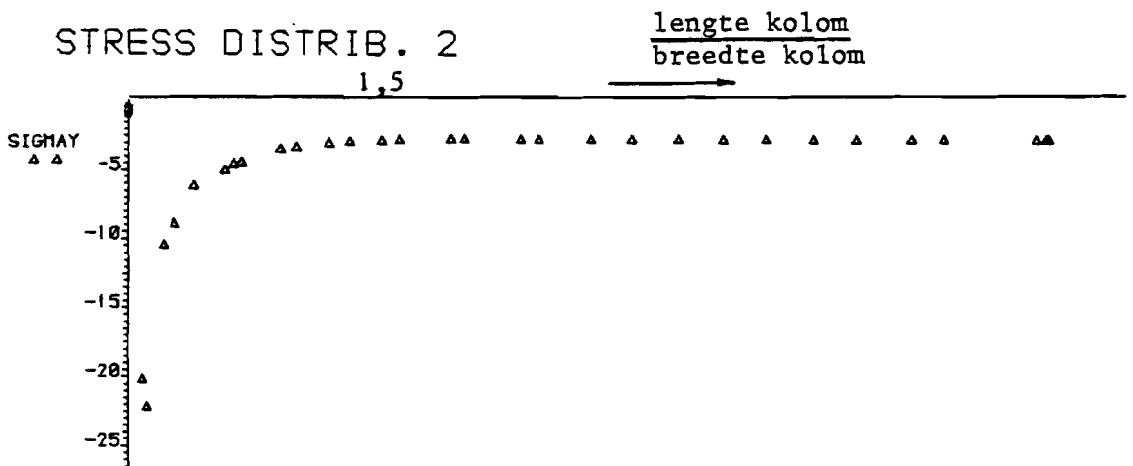


fig. 4.15 Drukverdeling in een strip t.g.v. een puntkracht

Door dergelijke strips met de juiste verhouding tussen de lengte en de breedte te "plaatsen" op de rechthoekige basisvorm, waarin de vier gaten voor de twee spoelen zijn geplaatst, heeft een puntkracht in het midden van de strip aangebracht geen nadelige invloed op de werking van de krachtensor. De krachtensor ziet er dan uit volgens fig. 4.16, waarbij tevens de verdeling van de elementen in opgenomen is. De aansluitingen van de strips op de rechthoekige vorm zijn afgerond, om piekspanningen te vermijden.

FORCE SENSOR TYPE2.2

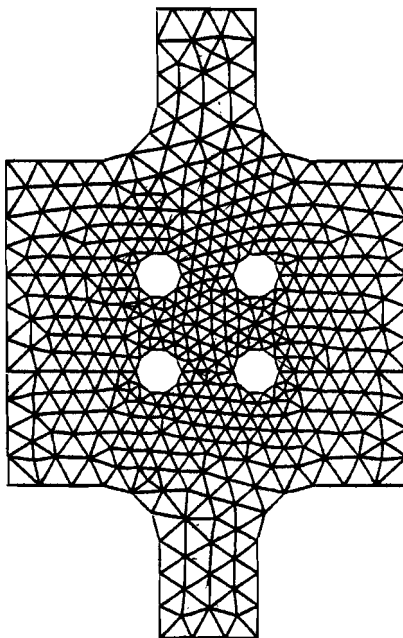


fig. 4.16 De krachtsensor

De configuratie van dit type krachtsensor is te vinden in appendix A onder de naam: DATAMG/TYPE2. De juiste afmetingen van deze sensor zijn vermeld in appendix B.

Omdat het centrum van de sensor wat betreft optredende spanningen het belangwekkendste gebied is, is op die plaats een fijnere verdeling van elementen aangebracht, zodat de berekeningen wat nauwkeuriger verlopen.

Wanneer een spanningstoestand in ieder punt van de sensor bekend is, kan men zich de vraag stellen of deze spanningstoestand "toelaatbaar" is. In het algemeen is het zo, dat men geen blijvende deformatie toestaat, zodat de spanning in een konstruktiedeel nooit groter mag worden dan de elasticiteitsgrens σ_E (fig. 4.4).

De krachtsensor mag voor de goede werking niet hoger belast worden dan de proportionaliteitsgrens σ_p , omdat boven deze grens de evenredigheid tussen spanning en rek niet meer geldt. De uiterste grens is ook hier de elasticiteitsgrens, omdat bij hogere spanningen de materiaaleigenschappen door deformatie veranderen en bij het wegnemen van de belasting inwendige spanningen achter blijven.

Om een bepaalde spanningstoestand te beoordelen wordt gewerkt met een rekengrootheid, de zgn. ideële spanning, want het is in het algemeen moeilijk een bepaalde spanningstoestand op de juiste manier in te schatten, daar de spanningen die optreden in het materiaal niet allemaal op de zelfde as liggen.

De ideële spanning is nu die spanning die de toestand benadert alsof alle spanningen die langs verschillende assen werken toegevoerd zijn naar één as. Deze ideële spanning mag een bepaalde waarde (voor de krachtsensor de proportionaliteitsgrens) niet overschrijden, wil men nog over een toelaatbare toestand spreken.

In de literatuur (zie bijv. lit. 4.10) worden verschillende criteria genoemd om de ideële spanning te definiëren. Het zijn echter allen hypothesen.

De door ons gebruikte programmatuur maakt gebruik van de hypothese van Huber, Mises, en Hencky en deze luidt voor de ideële spanning in een vlakkespanningstoestand:

$$\sigma_1 = \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + 3 \tau^2)} \quad (4.4)$$

hierin is σ de optredende hoofdspanning en τ de schuifspanning.

In fig. 4.17 zijn enkele spanningen weergegeven t.o.v. de uitwendig aangebrachte spanning σ_0 . SIGX geeft de relatieve spanning in de x-richting weer, SIGY in de y-richting, TXY is de relatieve schuifspanning en SIGID is de relatieve ideële spanning.

Uit de weergegeven relatieve spanningen langs de twee doorsneden van de sensor blijkt, dat geen enkele spanning groter wordt dan de uitwendig aangebrachte spanning.

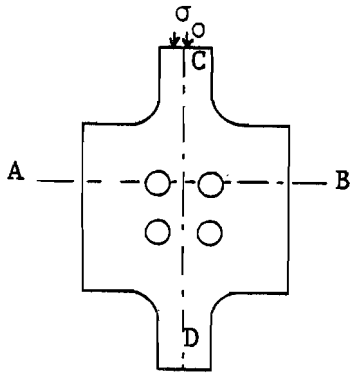
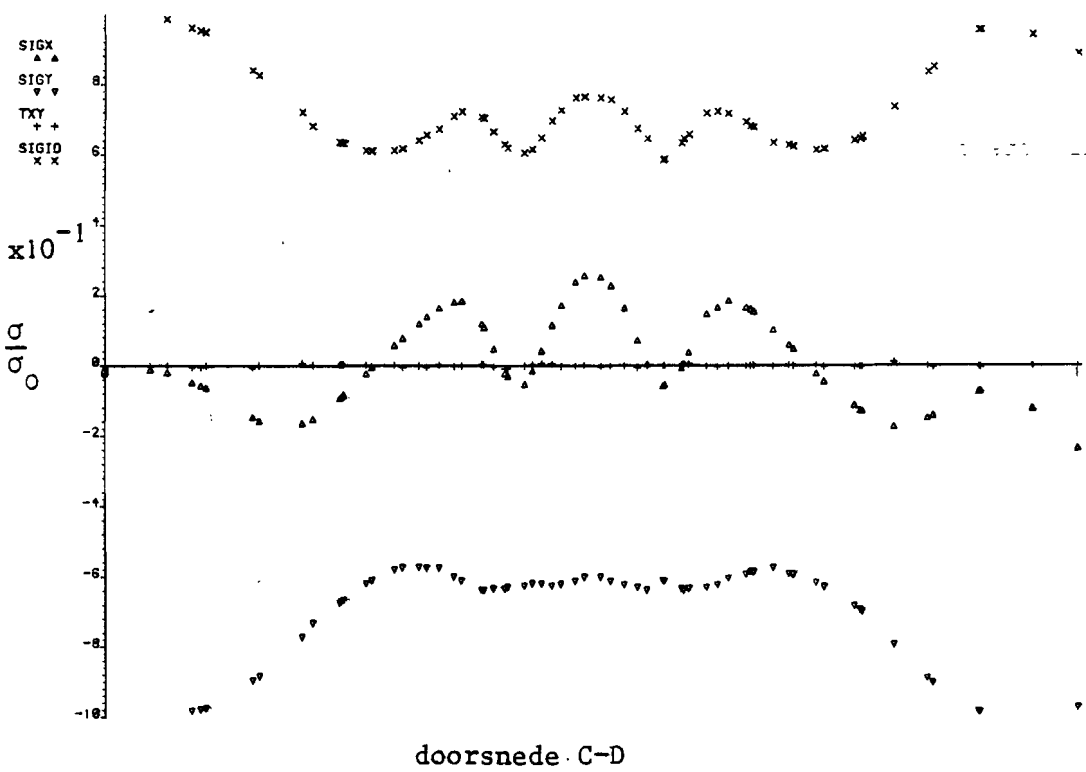
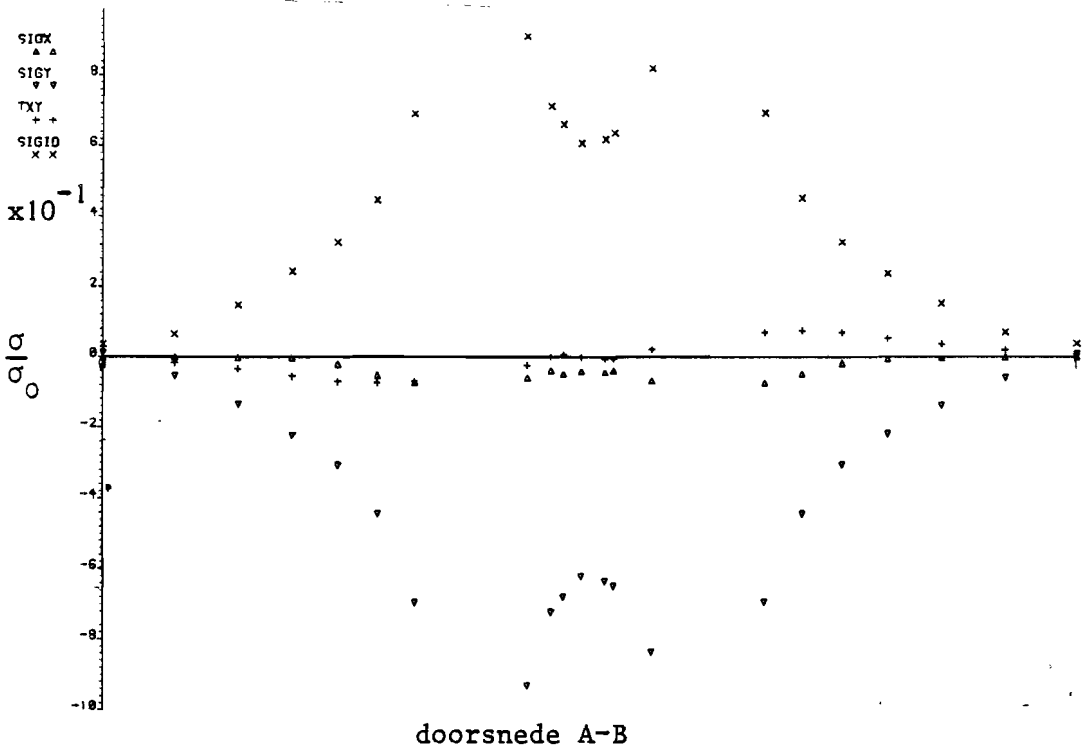


fig. 4.17 Spanningen die optreden in de krachtsensor



In fig. 4.18 is de ideële spanning t.o.v. de uitwendig aangebrachte spanning in de hele sensor weergegeven. De lijnen stellen iso-kurven weer waarlangs σ_1 overal de zelfde is en de cijfers bij de lijnen vermenigvuldigingsfactoren.

FORCE SENSOR TYPE 2.2

CONTOURS OF SIGID . LEVELS: $0 + I * 0.1, I=0 \text{ TO } 11$

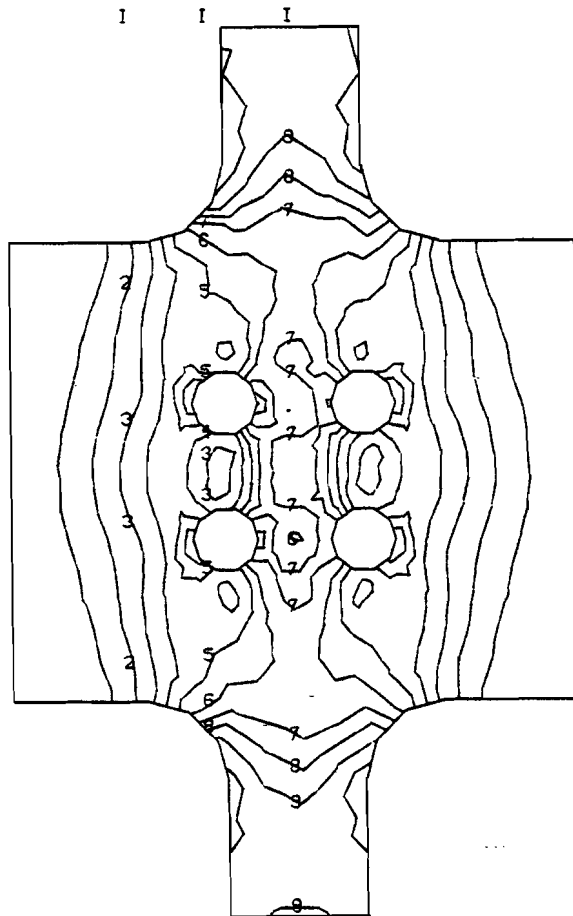


fig. 4.18 Relatieve ideële spanning

Uit deze figuur blijkt, dat de ideële spanning niet hoger wordt dan de aangelegde spanning. Dus de uitwendig aangebrachte kracht per oppervlakte eenheid mag niet groter worden dan de proportionaliteitsgrens σ_p .

Voor Vacoflux 50 geeft de fabrikant een rekgrens σ_R op van 400 Nmm^{-2} . De proportionaliteitsgrens is niet bekend en alleen te bepalen door het materiaal aan een trekproef te onderwerpen. We zitten aan de veilige kant wanneer we voor σ_p een vierde deel van de rekgrens σ_R nemen. Dus de uitwendig aangebrachte druk mag dan niet groter worden dan 100 Nmm^{-2} .

De sensor die in appendix A vermeld staat als DATAMG/SENSOR1, zal ook als krachtsensor voldoen, echter door de grote afrondingen zal een gedeelte van de drukspanningen om het centrale gebied geleid worden, zodat de gevoeligheid kleiner is dan het model in fig. 4.16.

4.5 Lamelleren van de sensor

De stromen, die een magnetisch wisselveld aan de oppervlakte van een ferromagnetisch lichaam induceert, induceren zelf in het materiaal een wisselveld, dat zo gericht is, dat het uitwendig veld gehinderd wordt in het materiaal binnen te dringen. Het magnetisch veld zal dus in het materiaal kleiner zijn dan buiten het materiaal.

De sterkte van het veld neemt in het materiaal exponentieel met de afstand tot het oppervlak af. De zgn. skin-diepte δ waar het veld in het materiaal een faktor e is afgenomen wordt weergegeven door (lit. 4.11):

$$\delta = \sqrt{\left(\frac{2\rho}{\mu_0 \mu_r \omega} \right)} \quad (4.5)$$

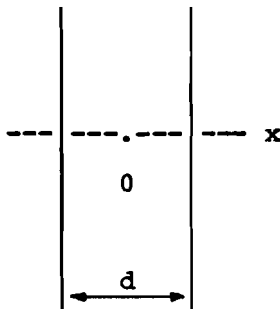
hierin is ρ de soortelijke weerstand, μ_r de relatieve permeabiliteit, μ_0 de permeabiliteit van het vacuüm en ω de frekwentie in radialen.

Voor Vacoflux 50 geldt bij een frekwentie van 50 Hz dat $\delta = 0,38 \text{ mm}$ (zie voor de materiaalgegevens de tabel in fig. 4.9).

Omdat het veld afneemt, zal de effectieve bijdrage tot een verandering van de geïnduceerde spanning van het magneto-elastisch effect ook kleiner worden.

Om de wervelstromen te verminderen zal de sensor gelamelleerd worden uitgevoerd. Wij zijn uitgegaan van een plaat met een dikte van 0,4 mm. De amplitudeverhouding tussen het magnetisch veld in het materiaal en daarbuiten is:

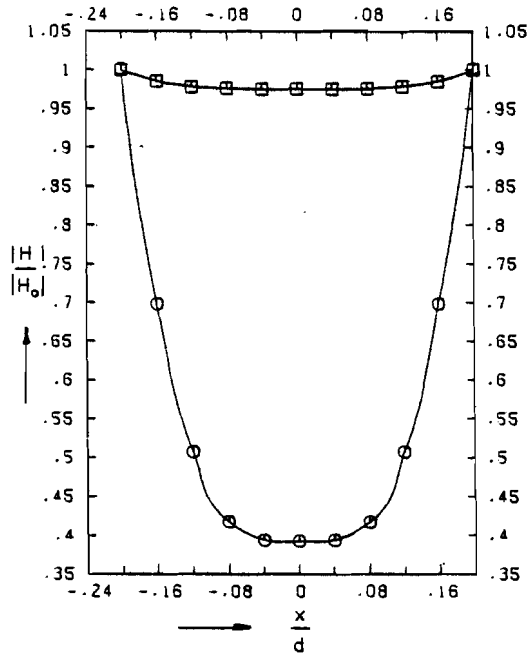
$$\left| \frac{H}{H_0} \right| = \left[\frac{\cosh(2x/\delta) + \cos(2x/\delta)}{\cosh(d/\delta) + \cos(d/\delta)} \right]^2 \quad (4.6)$$



hierin is $|H|$ de amplitude van het veld in het materiaal, $|H_0|$ de amplitude aan de oppervlakte van het materiaal, x is de afstand zoals aangegeven in de figuur, d de dikte van de plaat en δ de skin-diepte .

In fig. 4.19 zijn voor twee frekventies de omhullende berekend waarbinnen de veldverdelingen op een bepaald moment steeds zullen blijven.

Bij een wisselveld van 50 Hz is in het midden van de plaat de magnetische veldsterkte met bijna drie procent afgenomen. Bij 500 Hz is de veldsterkte zelfs met ruim zestig procent afgenomen. De frekwentie van de excitatiestroom, die het magnetisch veld moet opwekken, mag dus niet te hoog zijn. Om interferentie van stoorvelden afkomstig van het openbare net te vermijden, is een excitatie-frekwentie van 50 Hz ook geen goede keuze. Het beste is een frekwentie tussen 60 à 70 Hz. Een frekwentie lager dan 50 Hz is ook mogelijk. Echter hoe lager de frekwentie hoe kleiner het dynamisch bereik (snel wisselende belastingen) van de krachtsensor wordt.



- $f = 50$ Hz
- $f = 500$ Hz

fig. 4.19 Omhullende waarbinnen de veldverdeling zal blijven

Om de krachtsensor een zekere stijfheid te geven, zijn de lamellen met lijm aan elkaar bevestigd, waarbij we aan de lijm de volgende eisen hebben gesteld:

- goed hechten aan de te lijmen oppervlakte,
- een goede sterkte bezitten,
- als een elektrische isolator dienen tussen de lamellen onderling, om de invloed van wervelstromen te verminderen.

Andere eisen die men nog kan stellen zijn o.a.: de lijm moet de zelfde uitzettingscoëfficiënt hebben als het te lijmen materiaal en de lijm mag in bepaalde vloeistoffen (b.v. olie) niet oplossen.

Lijmproeven op de elektrisch isolerende werking brachten aan het licht, dat de lijm op zich een isolator was, maar dat door de lamellen op elkaar te persen er wel een elektrisch geleidende verbinding tussen de lamellen tot stand werd gebracht. De lamellen zijn niet helemaal vlak, dit komt mede door de warmtebehandeling. Waarschijnlijk wordt daardoor op bepaalde plaatsen zoveel lijm weg geperst, dat er een elektrisch geleidende verbinding kan ontstaan. Om toch een isolerende laag te krijgen hebben we tussen de lamellen onderling ook nog een sigarettenvloei geplaatst. De sigarettenvloei, van het fabrikaat Modiano, is 20 μm dik, heeft een massa van 10 gr/m^2 en heeft de afmetingen 42 mm bij 70 mm, wat net groot genoeg is voor ons doel. De vloei is uit vlas bereid.

Voor een goede lijmverbinding tussen de lamellen is gekozen voor een traag werkend twee-komponentenlijm op acrylaatbasis (Cetabever). De trage werking (ongeveer twee uur) heeft tot doel de lijm tijd te gunnen in de vloei door te dringen, voordat de lijm hard wordt. Om schuiven van de lamellen tijdens het lijmen te voorkomen zijn de lamellen met behulp van een mal door middel van schroefverbindingen tegen elkaar geklemd.

Het hele lijmgebeuren is nogal bewerkelijk. Beter is het lijm toe te passen die ook in de vliegtuigindustrie gebruikt wordt. Deze lijm is op een rol in harde toestand verkrijgbaar, waarbij de lijm pas vrijkomt na verwarming. Zolang de temperatuur geen hogere waarde bereikt dan 200 °C, heeft dit geen nadelige invloed op de materiaaleigenschappen van de sensor (zie paragraaf 4.3 waar o.a. de warmtebehandeling wordt besproken).

Uit hoeveel lamellen moet de sensor zijn opgebouwd om een bepaalde stijfheid te krijgen? Voor de berekening zijn wij uitgegaan van die drukspanning waarbij de krachtsensor begint te "knikken".

De zwakste delen zijn de "uitsteeksels". We zijn verder voor de berekening dan ook uitgegaan alsof de sensor een rechthoekige vorm heeft met een zelfde breedte als de opstaande kolommen.

Volgens Euler (1774) geldt voor een elastische knik, waarbij de drukspanning σ_k bij het begin van het knikken kleiner is dan de

elasticiteitsgrens σ_E :

$$\sigma_k = \frac{\pi^2 E I}{l^2 d b} \quad (4.7)$$

hierin is : $E = 230 \text{ kN/mm}^2$, de elasticiteitsmodulus,

$l = 62 \text{ mm}$, de lengte van de sensor,

$b = 9,5 \text{ mm}$, de breedte van een kolom,

d is de dikte van de sensor,

I is het traagheidsmoment en wordt berekend volgens:

$$I = \frac{b d^3}{12} \quad (4.8)$$

We zien uit (4.8) ingezet in (4.7) dat de drukspanning bij het begin van het knikken met de tweede macht van de dikte toeneemt.

Stel dat de maximaal te meten kracht $F = 500 \text{ N}$, dan moet de dikte van de sensor minimaal $d = 1 \text{ mm}$ bedragen. De sensor kan dus gemaakt worden van drie lamellen met een dikte van $0,4 \text{ mm}$.

Bij de berekening is uitgegaan van massief materiaal; wij maken echter gebruik van lijm en deze heeft andere eigenschappen dan de massieve Fe-Co-legering. Wat de reële drukspanning σ_k dan wordt is alleen door destructie proeven te bepalen.

Om de krachtsensor extra stevigheid te geven zijn wij uitgegaan van zes lamellen.

Het magnetisch veld wordt geëxciteerd door een stroom in de primaire spoel. Uit symmetrie overwegingen nemen we het aantal windingen van de primaire- en sekundairespoel gelijk. Dit aantal mag niet te hoog zijn om de volgende redenen: de uitgangsimpedantie mag niet te groot zijn en ook om de bewerkelijkheid van het inbrengen van de spoelen in de gaten klein te houden.

Het aantal windingen van iedere spoel nemen we 21. Met dit aantal is het mogelijk een voldoende sterk magnetisch veld op te wekken, ook

een veld dat groter is dan de koërcitiefveldsterkte van de Fe-Co-legering.

We gebruiken koperlakdraad met een diameter van 0,4 mm.

In de transformatorindustrie gaat men, voor het bepalen van de diameter van de draad bij een zekere stroomsterkte, uit van de volgende vuistregel:

$$d = 0,7 \sqrt{I} \quad (4.9)$$

hierin is d de diameter van de draad in mm en I de effectieve stroomsterkte in Ampere. Bij een dikte van 0,4 mm mag de stroom dan maximaal 325 mA bedragen. Transformatoren hebben echter veel windingen dus de ohmse verliezen (warmteontwikkeling) zullen ook groot zijn. De krachtsensor heeft echter een gering aantal windingen; wij kunnen dan ook zonder bezwaar een grotere stroom toepassen.

De sekundairespoel wordt het eerst gewikkeld, zodat de windingen dicht tegen de Fe-Co-legering aanliggen. De invloed van strooivelden op het uitgangssignaal wordt op deze wijze verminderd.

Berekeningen, m.b.v. de computer, tonen aan dat de grootste verplaatsingen optreden in de kolommen. Een drukspanning van 1 N/mm^2 geeft een maximale verplaatsing van $0,8 \text{ }\mu\text{m}$. Door deze kleine deformatie is het noodzakelijk dat de zijden van de krachtsensor, waarop druk wordt uitgeoefend, zeer vlak geslepen worden. Tevens verhindert een vlak geslepen oppervlak dat onregelmatigheden op het drukoppervlak als puntbelastingen gaan werken, zodat de druk zich niet meer ongelijkmatig in de kolom verdeelt.

Om te onderzoeken of de mechanische bewerking van invloed is op het gedrag van de krachtsensor is één sensor verkregen door de vorm uit de Fe-Co-legering te frezen en één krachtsensor is gemaakt m.b.v. een vonkersieve bewerking.

Vonkersief bewerken wordt gekenmerkt door het optreden van vonken tussen twee door een diëlektrikum gescheiden elektroden (lit. 4.12).

De vonken veroorzaken plaatselijk metaalverwijdering aan de elektrode-oppervlakte. Een lamel van de sensor fungeert als de ene elektrode terwijl de andere elektrode het gereedschap is waarmee het werkstuk wordt bewerkt. Om de vorm van de sensor uit het materiaal te "snijden" is als gereedschapselektrode een koperdraad gebruikt. Door slijtage van de draad door vonkerosie moet steeds nieuw draad aangevoerd worden (ongeveer 1 m/min).

De vier gaten van 5 mm werden verkregen door een gereedschapselektrode met een diameter van 5 mm in het materiaal te "zinken".

Het voordeel van vonkerosief bewerken t.o.v. mechanische bewerkingsmethoden is, dat mechanische krachten bijna niet voorkomen en dat harde metalen zonder problemen kunnen worden bewerkt. Tevens treedt er ook geen braamvorming rond de gaten op.

Een groot nadeel is echter, dat de bewerkingsnelheid veel lager is (voor één sensor ongeveer vier uur), dus voor massafabrikage is deze methode niet interessant.

De lengterichting van de lamellen van de twee krachtsensoren vallen samen met de walsrichting.

Beide sensoren hebben na de mechanische resp. vonkerosieve bewerking een warmtebehandeling ondergaan.

In het volgende hoofdstuk komen de meetresultaten aan de orde.

5 Meetresultaten

Om het gedrag van de twee krachtsensoren te onderzoeken bij verschillende belastingen en stroomsterkten, is gebruik gemaakt van de meetopstelling in fig. 5.1.

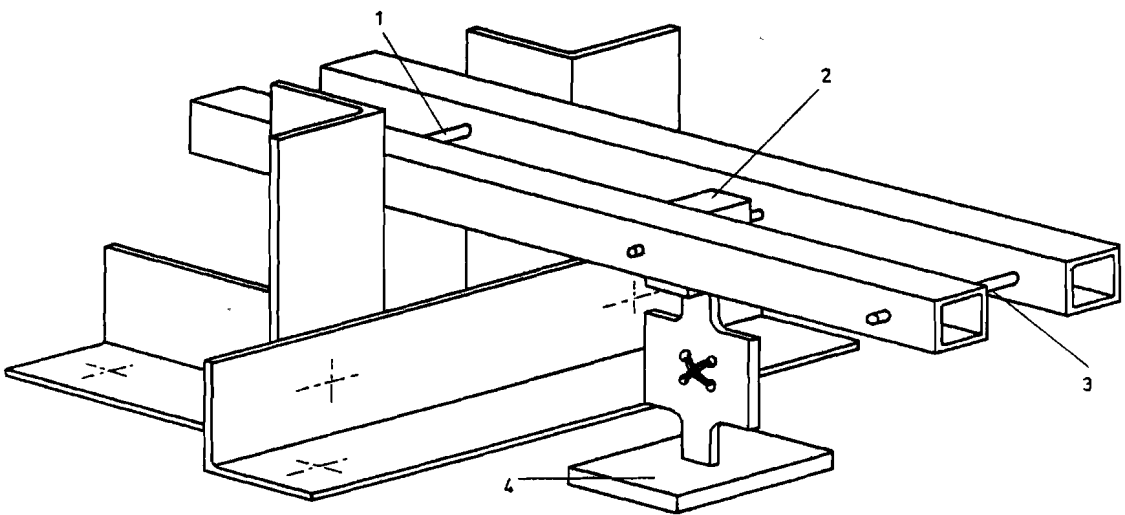


fig. 5.1 Meetopstelling (schaal 1 : 2,85)

De balkkonstruktie is draaibaar om een as (1). Aan as (3) wordt via vier koorden een schotel gehangen, waarop de ijkgewichten kunnen worden geplaatst. De krachtsensor komt tussen een drukijzer (2), wat in één vlak draaibaar is om een as, en een metalen plaat (4). Beide materialen zijn vlak geslepen.

Door de mechanische konstruktie van de meetopstelling wordt de te meten kracht een faktor 1,6 maal versterkt.

Het magnetisch veld wordt geëxciteerd door een stroom afkomstig van een stroombron. Deze stroombron is in eerste instantie opgebouwd

uit een weerstand van 100 Ω in serie met een variabele transformator (Variac) gekombineerd met een netspanningsstabilisator. Als nauwkeurige stroombron voldeed deze configuratie niet, vanwege o.a. de onstabieliteit van de netspanningsstabilisator.

In de definitieve opstelling is gebruik gemaakt van een Fluke-meetkalibrator als wisselstroombron. Twee frekwenties konden ingesteld worden te weten: 50 Hz en 400 Hz. Wegens de gebleken belastingafhankelijkheid van de stroom met een frekwentie van 400 Hz zijn de metingen, hoewel niet de ideale frekwentie vanwege de invloed van optredende stoorspanningen, uitgevoerd met een wisselstroom met een frekwentie van 50 Hz.

Door het niet-lineaire karakter van de B-H kurve bestaat het uitgangssignaal van de sensor uit hogere harmonischen. Volgens Peterson in lit. 3.7 p. 67, is de uitgangsspanning bij een sinusvormig magnetisch veld opgebouwd uit oneven harmonischen. Fig. 5.2 toont het uitgangssignaal van de krachtsensor wanneer een kracht is aangebracht.



fig. 5.2 Uitgangssignaal van de krachtsensor

Om na te gaan of een bepaalde harmonische t.o.v. anderen een relatief grotere verandering zouden vertonen bij krachtveranderingen is het uitgangssignaal, met behulp van een spectrum analyser van Hewlett-Packard type 3582 A, geanalyseerd. Metingen toonden aan dat de grondharmonische relatief en absoluut de grootste verandering gaf.

Om de grondharmonische te meten is een proefopstelling gebouwd welke

bestond uit een verschilversterker van Princeton Applied Research die de uitgangsspanning van de krachtsensor vijftig maal versterkte, een laagdoorlaatfilter van Krohn-Hite model 3202R met een kantelfrekwentie van ongeveer 60 Hz en een verzwakking van 24 dB/okt. Het uitgangssignaal van het filter werd toegevoerd aan een digitale multimeter van Hewlett-Packard type 3438 A.

De metingen waren niet bevredigend en nader onderzoek leerde dat de stabiliteit van het laagdoorlaatfilter op willekeurige tijdstippen verminderde.

De uiteindelijke proefopstelling is weergegeven in fig. 5.3.

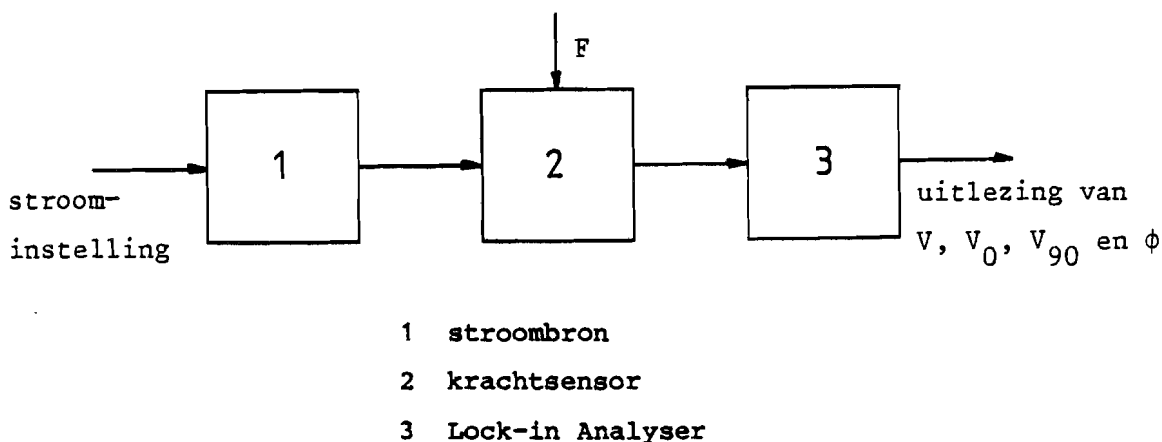


fig. 5.3 Proefopstelling

De Two Phase Lock-in Analyser van Brookdeal type ortholog-SC 9509 filtert met behulp van een PLL (Phase Lock Loop)-konfiguratie de grondharmonische uit het uitgangssignaal van de krachtsensor. Het voordeel van een PLL-schakeling is, dat bij eventueel optredende frequentievariatië van de stroombron de grondharmonische "gevolgd" wordt. Bij het definitieve ontwerp is een PLL-konfiguratie daarom onontbeerlijk.

Met de Lock-in Analyser is het mogelijk het te meten signaal te bekijken t.o.v. een referentiesignaal, waarbij het meetsignaal gesplitst wordt in een deel dat in fase is met het referentiesignaal en een deel dat t.o.v. het referentiesignaal 90° in fase verschoven is.

Als referentiesignaal nemen we de stroom; om een maat hiervoor de krijgen plaatsen we een weerstand van één ohm in de toevoerleiding van de primaire spoel. De spanning over deze weerstand sluiten we aan de referentie-ingang. Voor een goede werking moet het referentiesignaal minimaal 140 mV bedragen.

Bij het afregelen is eerst de referentie-ingang verbonden met de signaalingang en aangesloten op een funktiegenerator. Het is dan mogelijk met behulp van een offset-regeling de faseverschuiving veroorzaakt door de meetdraden te compenseren.

Dat deel van de uitgangsspanning V van de sensor, dat in fase is met de stroom wordt aangegeven door V_0 en het gedeelte van de spanning dat 90° t.o.v. de stroom verschoven is door V_{90} . Deze spanningen zijn gelijkgericht, waarbij de gelijkspanning een waarde heeft dat overeenkomt met duizend maal de effectieve spanning. De gelijkspanningen worden in vier cijfers gemeten aan de recorderuitgang van de Lock-in Analyser met behulp van een digitale multimeter van Keithley model 195.

De Lock-in Analyser werd in de volgende standen gezet:

Two Phase
High Stab
tijdkonstante 3 sec
Sine trac
gevoeligheid 10 mV

Het eigengewicht van de arm inclusief de schotel waarop de ijkgewichten zullen worden geplaatst komt overeen met $F \approx 8$ N op de sensor.

De grafieken, met de uitgangsspanning (grondharmonische) als functie van de belasting, zijn achterin dit hoofdstuk te vinden.

De uitgangsspanning V van de sensor (gefreesd) neemt eerst in waarde af wanneer de kracht, op de sensor uitgeoefend, toeneemt. Daarna stijgt de uitgangsspanning V . In de fase karakteristiek, waarin ϕ uitgezet is als functie van de kracht F , is te zien dat de vektor V over 180 graden gedraaid is. Dat V in onbelaste toestand niet nul is, kan aan twee oorzaken te wijten zijn: (1) het niet zuiver haaks op elkaar staan van de spoelen, (2) de door het walsen aangebrachte voorkeursrichting. Dit laatste zal de grootste invloed hebben.

Uit de literatuur blijkt dat in het algemeen de walsrichting de voorkeursrichting is van de magnetisatie, omdat de assen van de kristallen meer in de walsrichting worden gedrukt. Het is daarom niet verwonderlijk, dat we al een beginspanning in onbelaste toestand meten, daar de lamellen zodanig uit het materiaal zijn gehaald, dat de lengterichting van een lamel samenvalt met de walsrichting.

Dat de hoek ϕ in onbelaste toestand geen 90° is, komt mede door de optredende wervelstromen, waardoor de permeabiliteit niet meer reëel is, maar uit een reëel deel en een imaginair deel bestaat (zie fig. 5.4).

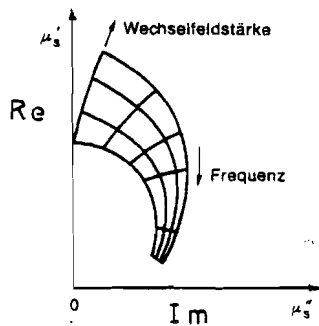


fig. 5.4 Komplexe permeabiliteit (lit. 4.4 p. 72)

Hoe groter het aantal ampere windingen (dus hoe groter de veldsterkte), hoe groter de hoek tussen het reële deel en de vektor van de permeabiliteit wordt. Deze hoekvergroting in onbelaste toestand is ook waar te nemen in de fase karakteristiek bij verschillende ampere windingen.

Hoewel de lamellen van de tweede krachtsensor (vonkerosief) op de zelfde wijze qua oriëntatie uit het materiaal zijn gehaald, blijkt dat in onbelaste toestand de voorkeursrichting niet zo geprononceerd naar voren komt.

Uit de fase karakteristiek is te zien, dat ϕ 180° verdraait dus de voorkeursrichting is wel aanwezig. Waarom deze krachtsensor een meer isotroop gedrag vertoont dan de mechanisch bewerkte sensor, is niet duidelijk. Het is echter wel zo, dat deze lamellen voordat ze

vonkerosief bewerkt werden, al een warmtebehandeling hebben gehad. Met tevens een warmtebehandeling aan het eind van de bewerking. Maar het is niet waarschijnlijk dat deze extra warmtebehandeling de oorzaak is van de lage uitgangsspanning in onbelaste toestand.

Om de hysteresis van de krachtsensor te bepalen werden ijkgewichten op de schotel geplaatst met massa's vanaf 500 gr olopend tot 7500 gr. Daarna werden in omgekeerde volgorde de ijkgewichten verwijderd. Als hysteresis is genomen het grootste verschil tussen op en neergaande kromme gedeeld door het meetbereik. Uit de metingen bleek, dat de hysteresis afnam bij een toenemende stroom. Een verklaring hiervoor is dat bij een groter wordende stroom de veldsterkte toeneemt en boven de koërcitieveldsterkte de reversibele processen zoals rotatie van de magnetisatievektoren gaan overheersen boven de irreversibele processen zoals wandverschuivingen. Dat bij grotere stromen de spanningsgevoeligheid afneemt, is wel voorspelbaar. In deze situatie heeft de veldenergie E_H een grotere invloed op de verandering van de richting van de magnetisatie dan de drukenergie E_σ .

In het algemeen was de hysteresis bij 14,7 Aw in de grootte orde van 0,2 % terwijl bij 3,78 Aw de hysteresis een faktor drie hoger lag. Door deze kleine waarden van de hysteresis moeten ook hoge eisen gesteld worden aan de meetopstelling in fig. 5.1. Helaas toonden metingen aan dat een speling in de as (1) de metingen nadelig beïnvloedde. Deze speling veroorzaakte dat de balkkonstruktie in het horizontale vlak kon bewegen. De krachtsensor bewoog dan mee en wel zo dat de krachtsensor niet meer vertikaal onder het drukijzer (2) kwam te staan. Op de drukoppervlakken van de sensor werd dan geen gelijkmatige druk uitgeoefend, waardoor een fout in de uitgangsspanning van maximaal 2 % kon ontstaan. Omdat deze fout groter is dan de hysteresis is het moeilijk een uitspraak te doen over de hysteresis. Dus het is zeker mogelijk dat de hysteresis in werkelijkheid lager is dan 0,2 %. De indruk bestaat echter wel dat de spanning V_{90} en de modulus V in het algemeen een lagere hysteresis vertoonden dan het signaal V_0 dat in fase met de stroom is.

Om de nawerking van de krachtsensor (vonkerosief) te onderzoeken is een gewicht met een massa van 3500 gr op de schotel geplaatst. De krachtsensor werd geëxciteerd met 3,78 Aw. De uitgangsspanning nam "exponentieel" af om, na ongeveer twee uur, een vaste waarde te bereiken. De fout die hierdoor optrad was 0,3 % van het meetbereik, waarbij ook hier de fout in V en V_{90} kleiner was dan in V_0 . Na het ijkgewicht verwijderd te hebben nam de uitgangsspanning af om daarna "exponentieel" toe te nemen tot een vaste waarde. Deze stabiele waarde, die echter lager was dan voordat de proef werd uitgevoerd, werd na ongeveer 90 min. bereikt. De fout was ook hier 0,3 %. Omdat tijdens de meting van de nawerking aan de proefopstelling niets veranderde moeten deze verschijnselen gezocht worden in de kristalstructuur van de Fe-Co-legering. In fig. 5.5 is de spanningsverdeling (lit. 5.1) te zien in een polykristal (zoals bijv. de Fe-Co-legering).

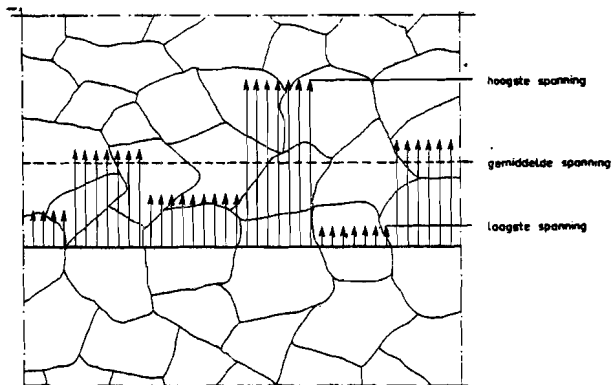


fig. 5.5 Spanningsverdeling in een polykristal

De elasticiteitsmodulus hangt af van de oriëntatie van de kristallen. In verschillend georiënteerde kristallen zullen dan ook verschillende spanningen optreden. Wanneer een kracht op het materiaal wordt uitgeoefend zullen de kristallen t.o.v. elkaar verschuiven, hierdoor verandert ook de spanningsverdeling in het materiaal. De kristallen hebben, na het wegnemen van de belasting,

tijd nodig om weer terug te keren naar hun oorspronkelijke plaats. Blijkbaar keren niet alle kristallen op de zelfde plaats terug, gezien de afwijkende uitgangsspanning voor en na de proef. Het is voor te stellen, dat de kristallen zich onder een wisselende belasting gaan "zetten", zodat de hysteresis na verloop van tijd vermindert.

De reproduceerbaarheid is onderzocht, maar ook hier is de fout van de zelfde grootte orde als de fout in de meetopstelling van fig. 5.1 nl. 2 %.

Om te onderzoeken hoe het gedrag is van de uitgangsspanning bij wisselende temperaturen is een krachtsensor (gefreesd) in onbelaste toestand in een temperatuurkast geplaatst. Deze sensor heeft voor de meting de voorkeur, omdat in onbelaste toestand al een uitgangsspanning aanwezig is. Voor de excitatie was $N_i = 3,8$ Aw. Wegens beperkte ruimte in de temperatuurkast kon de invloed van de temperatuur bij verschillende belastingen niet gemeten worden.

Er is tussen -25 °C en 40 °C gemeten in stappen van ongeveer 10 °C. De sensor werd bij iedere stap 15 min. op de zelfde temperatuur gehouden. De snelheid tussen de verandering van de stappen was ongeveer $0,6$ °C/min.

De procentuele verandering t.o.v. de spanning V bij 20 °C als functie van de temperatuur is weergegeven in fig. 5.6.

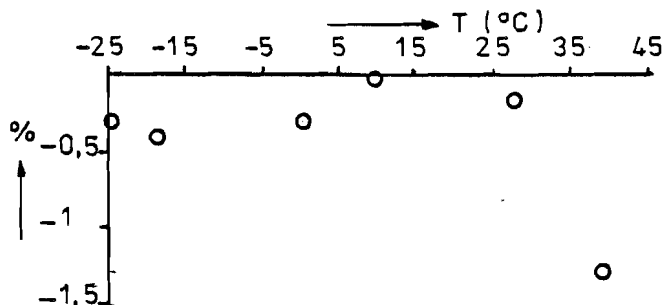
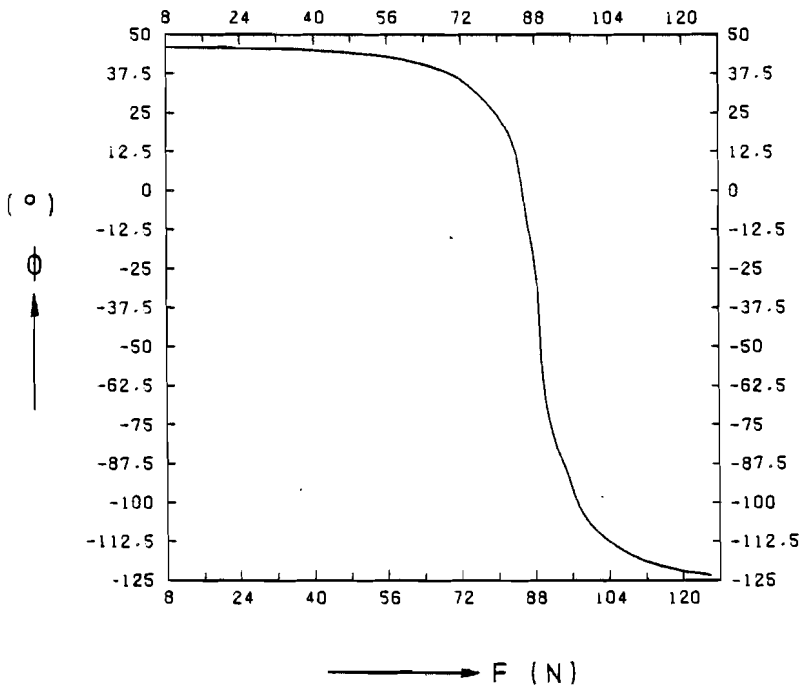
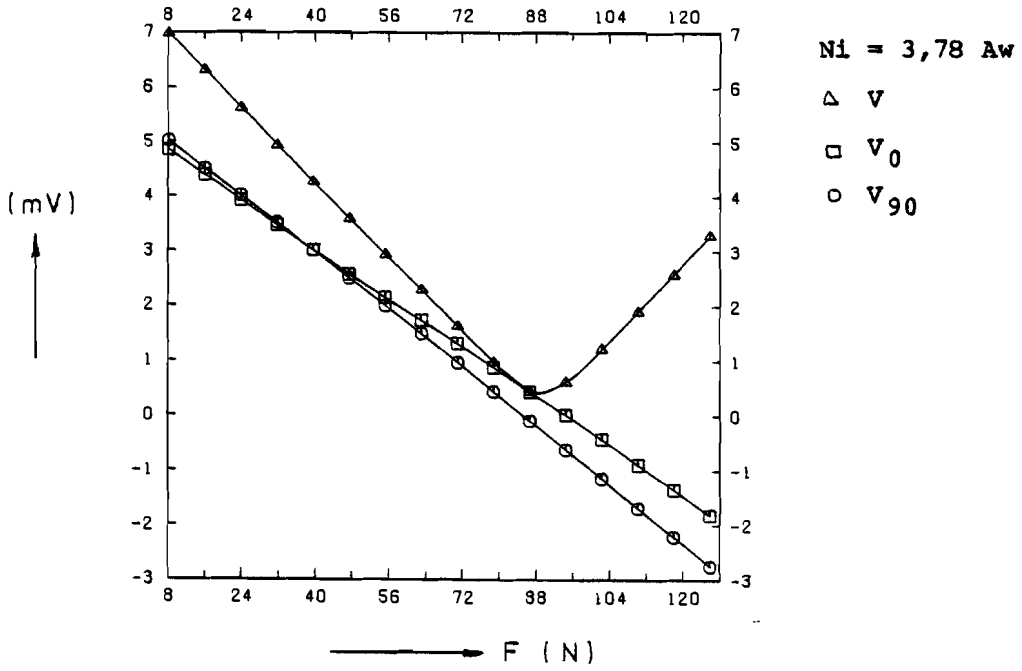
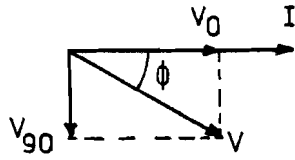


fig. 5.6 Procentuele spanningsverandering als functie van de temperatuur

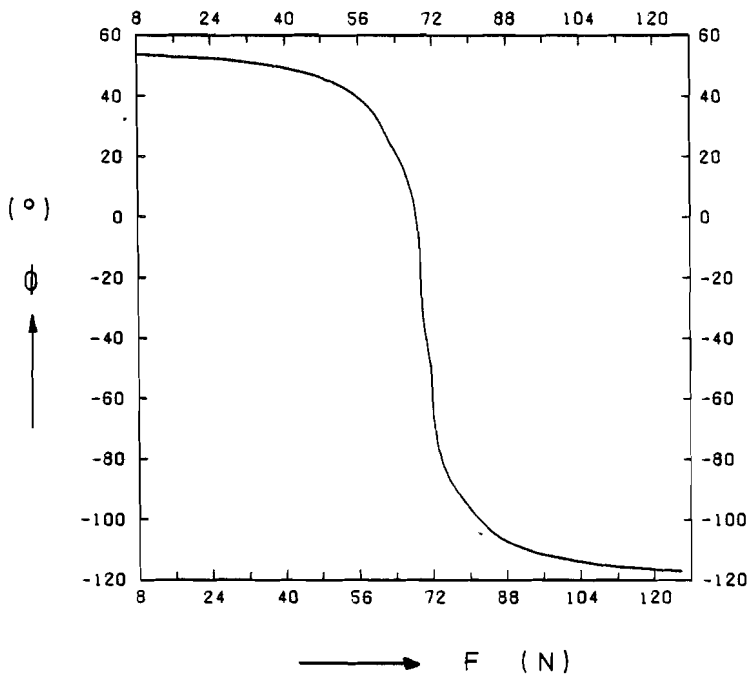
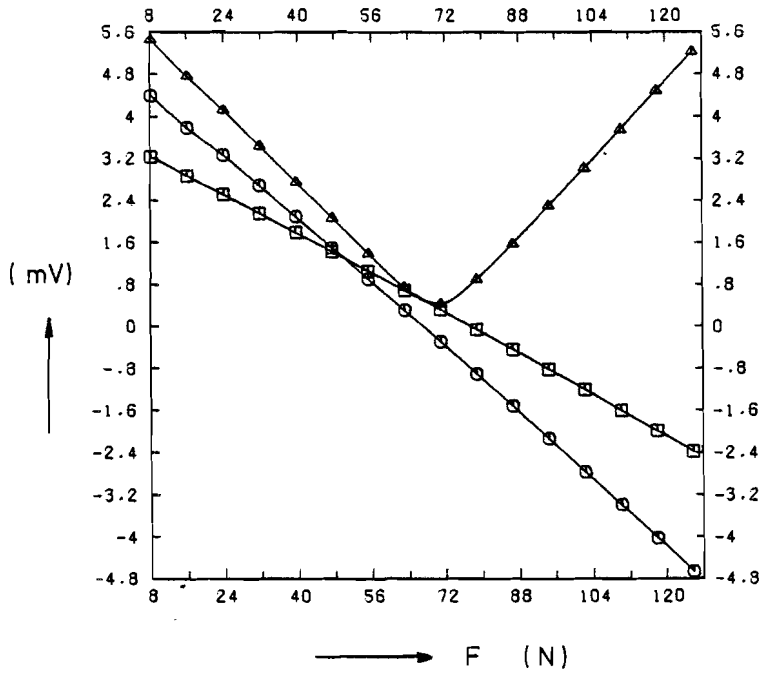
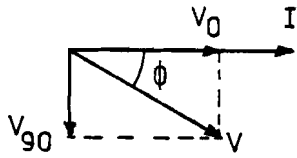
Uit de grafiek blijkt, dat rond 39 °C de procentuele verandering sterk toeneemt. Of dit een materiaaleigenschap is, of dat de lijm hierop invloed uitoefent is niet bekend.

De niet-lineariteit, van de kurven V_0 en V_{90} als funktie van de belasting, is voor sensor (gefreesd) ongeveer 1 % resp. 1,8 %. Voor de vonkersief bewerkte krachtsensor is de niet-lineariteit wat kleiner; voor V_{90} bij $N_i = 6,3$ Aw ongeveer 0,3 %. De steilheid van deze kurve neemt bij groter wordende belasting wat af, terwijl bij de spanningskurve V_{90} voor $N_i = 14,7$ Aw de steilheid juist toeneemt. Vermoedelijk zal dus bij een bepaald aantal amperewindingen een spanningskurve zijn die lineair verloopt.

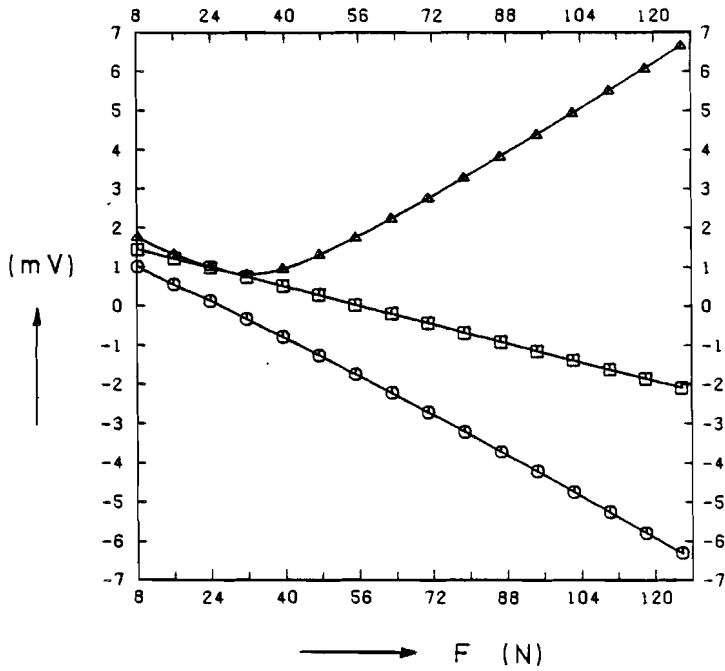
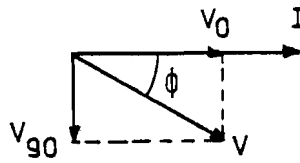
Sensor (gefreesd)



Sensor (gefreesd)



Sensor (gefreesd)

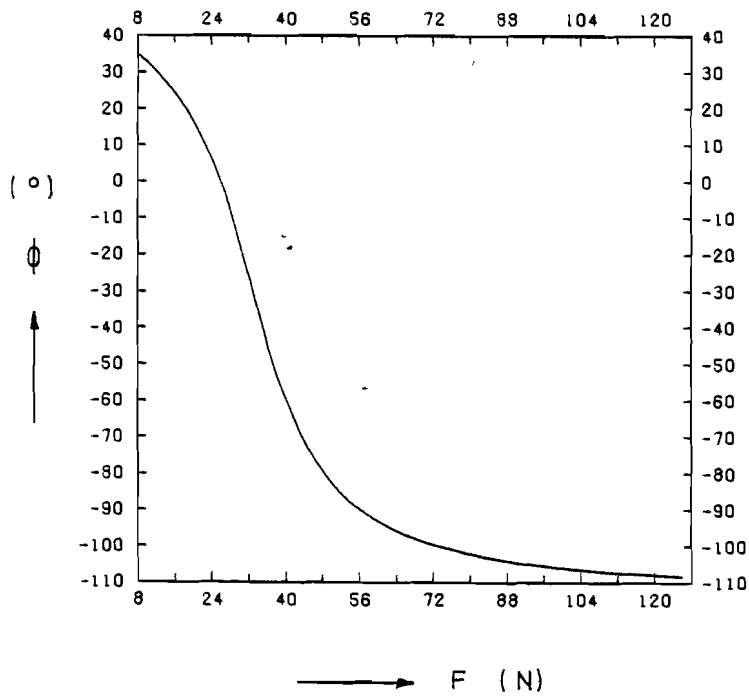


Ni = 14,7 Aw

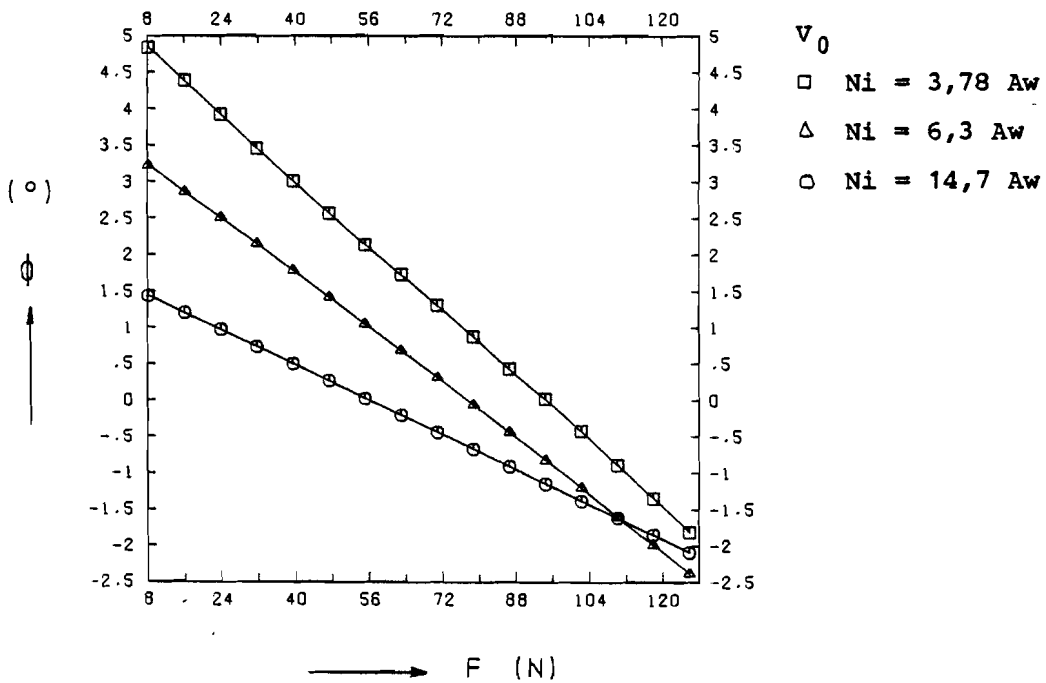
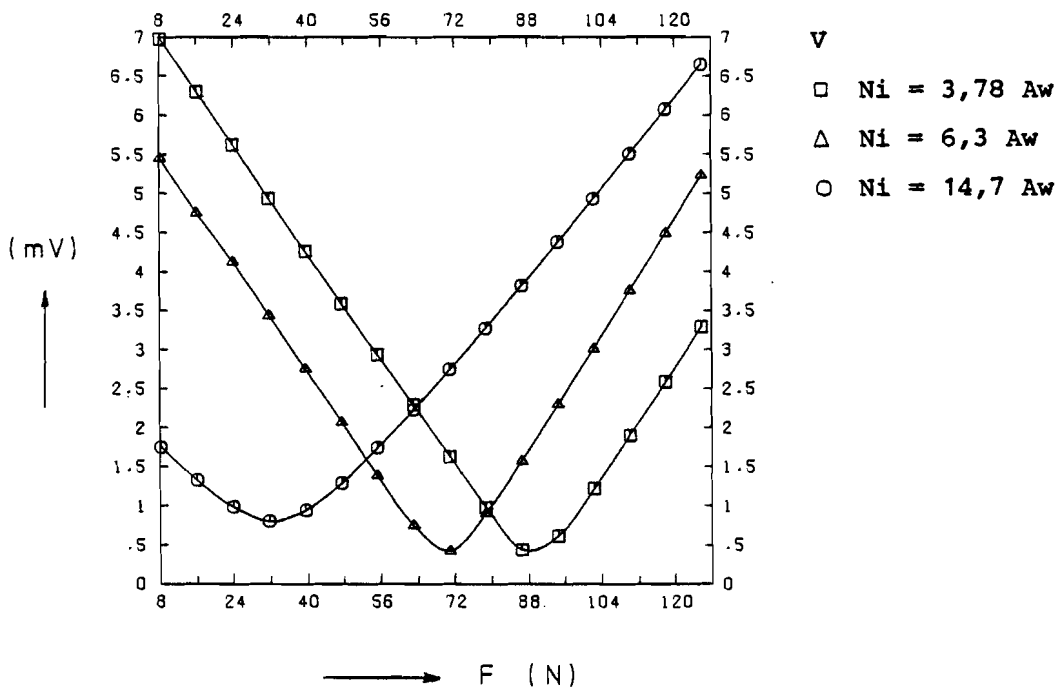
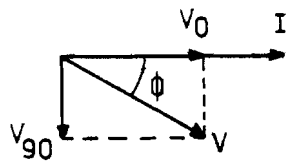
△ V

□ V₀

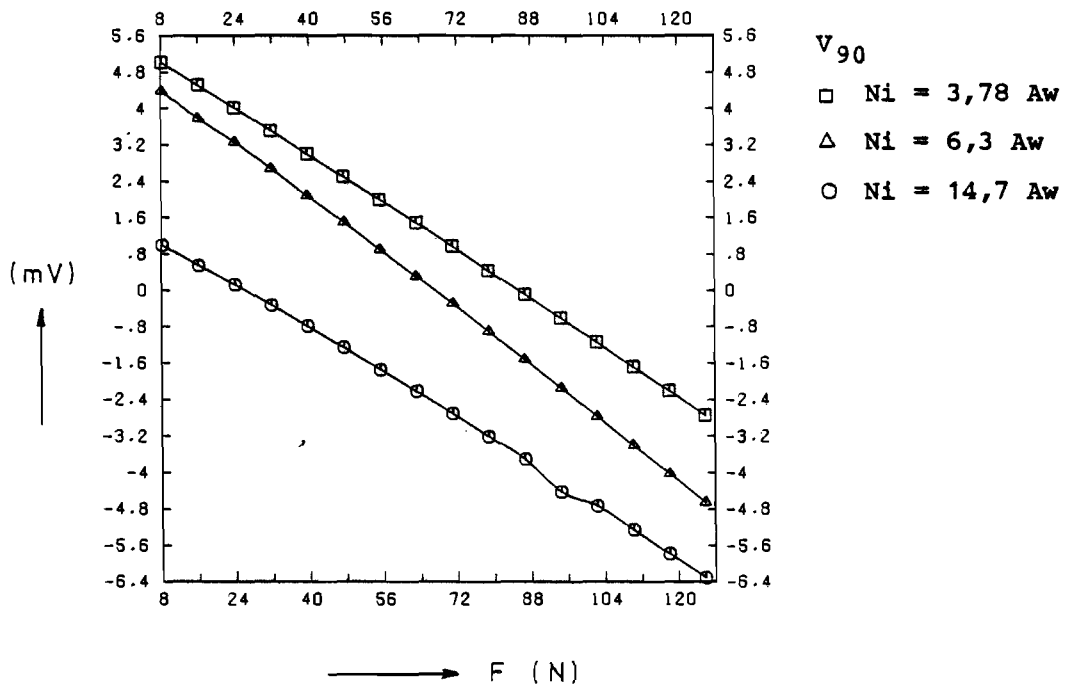
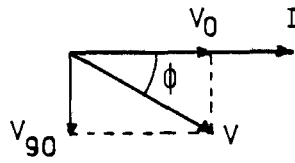
○ V₉₀



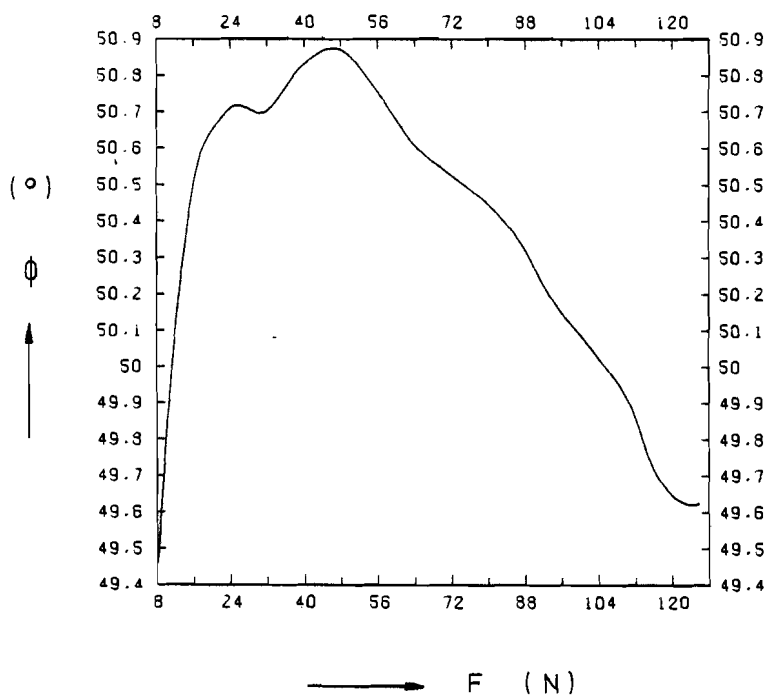
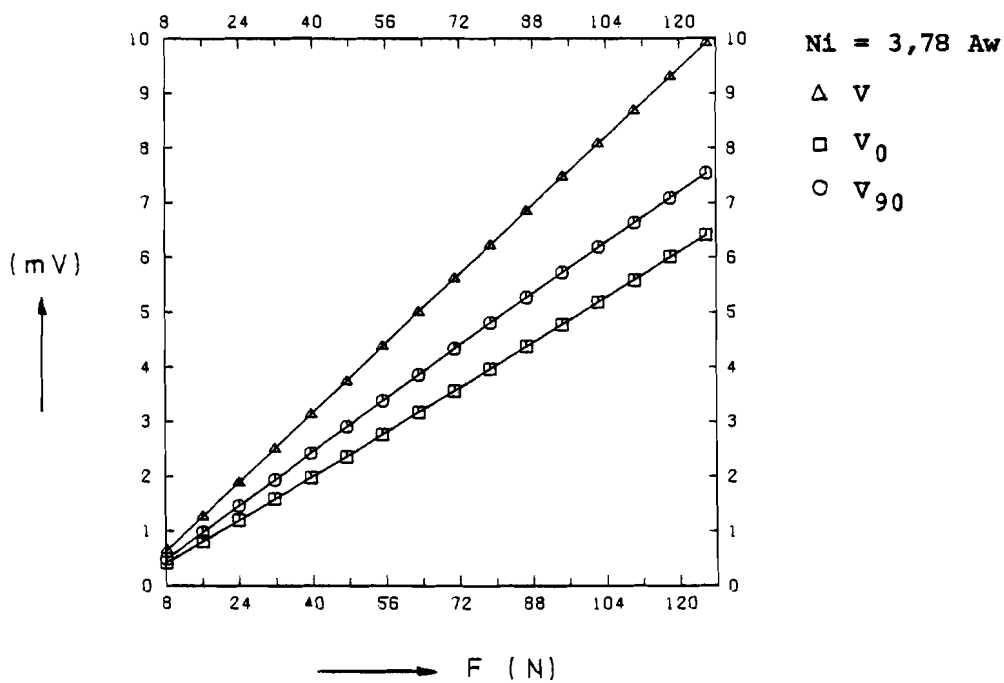
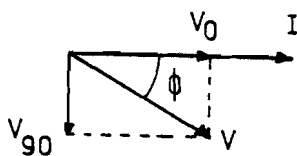
Sensor (gefreesd)



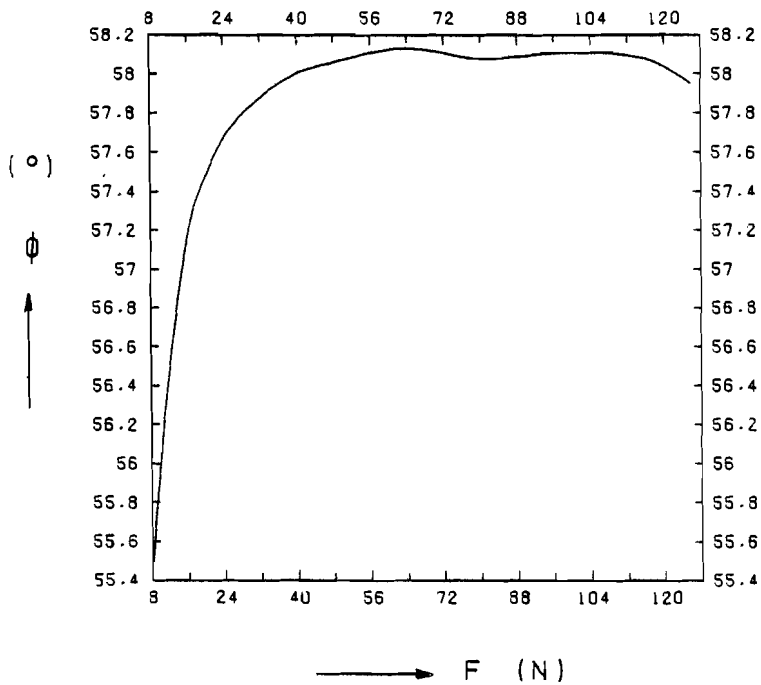
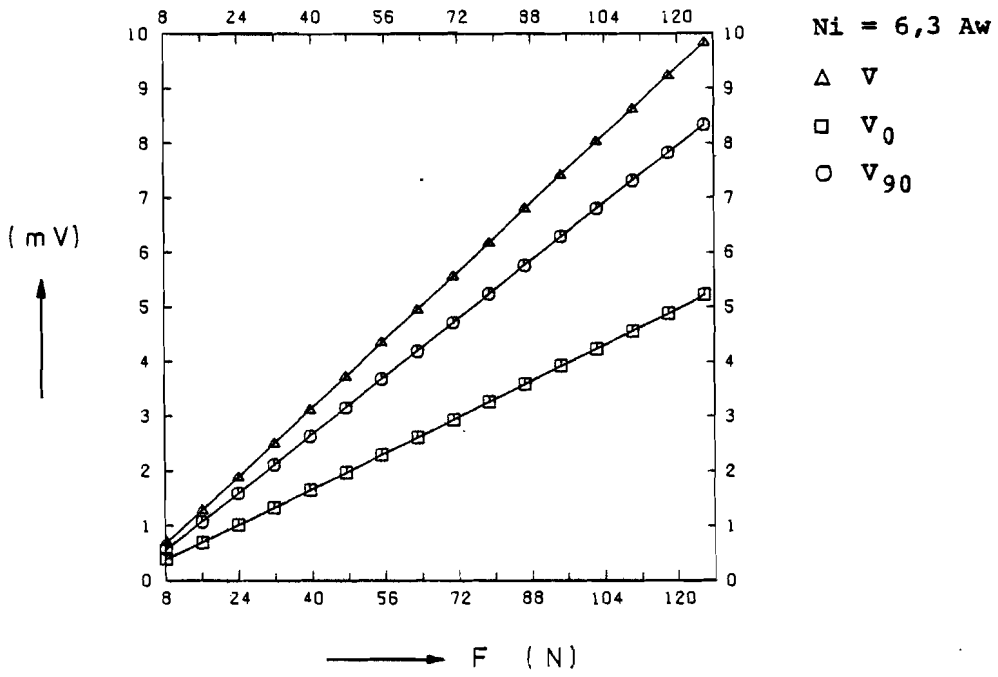
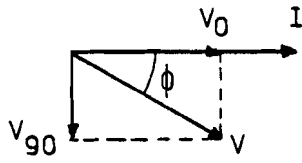
Sensor (gefreesd)



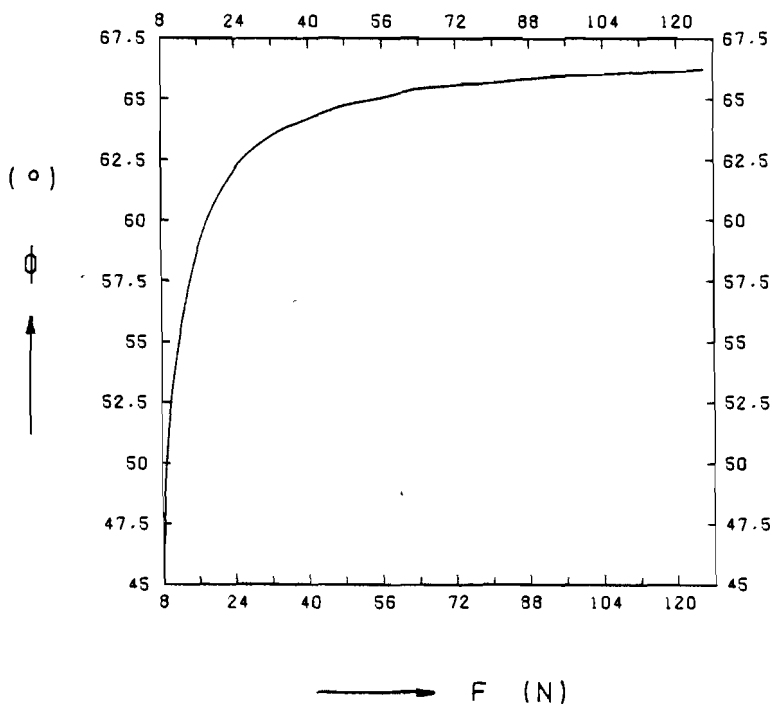
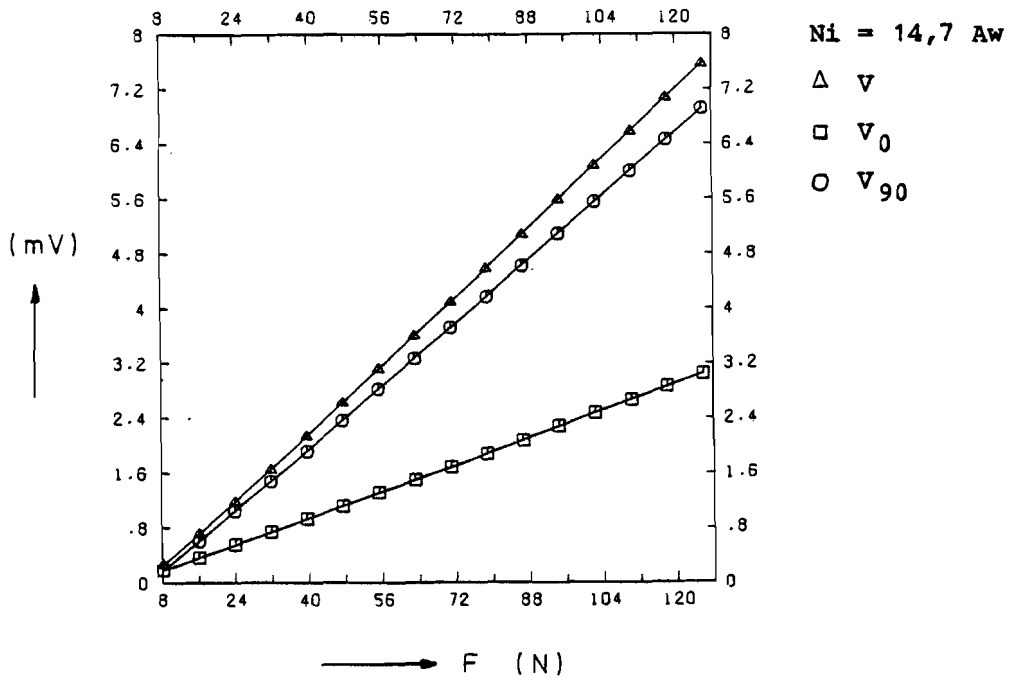
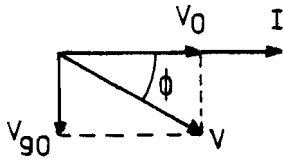
Sensor (vonkerosief)



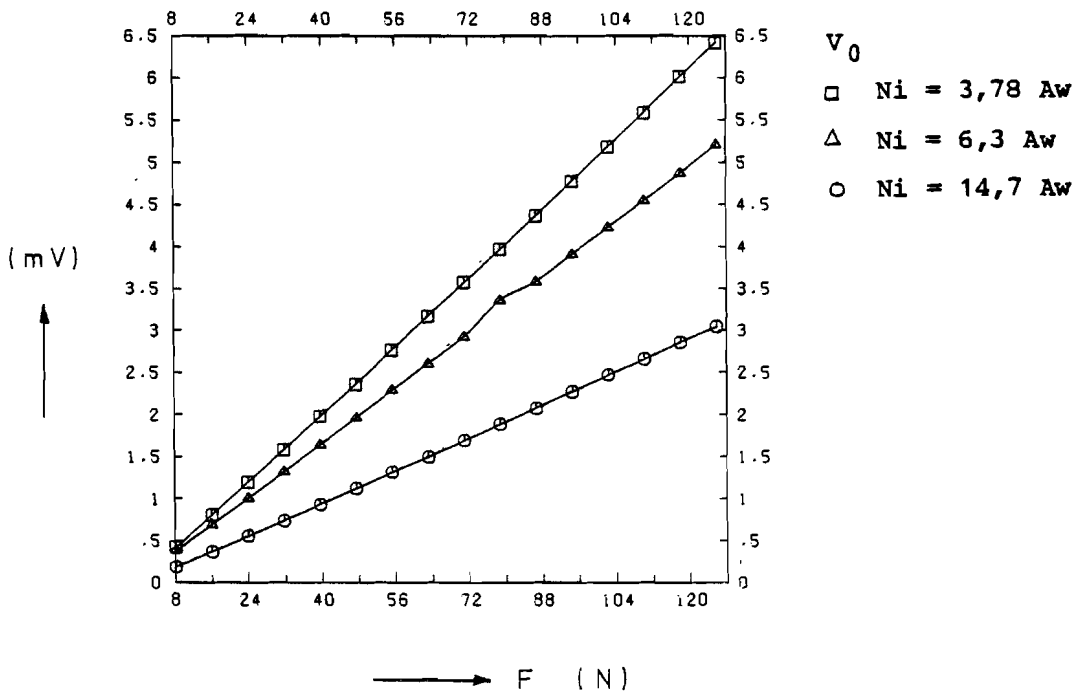
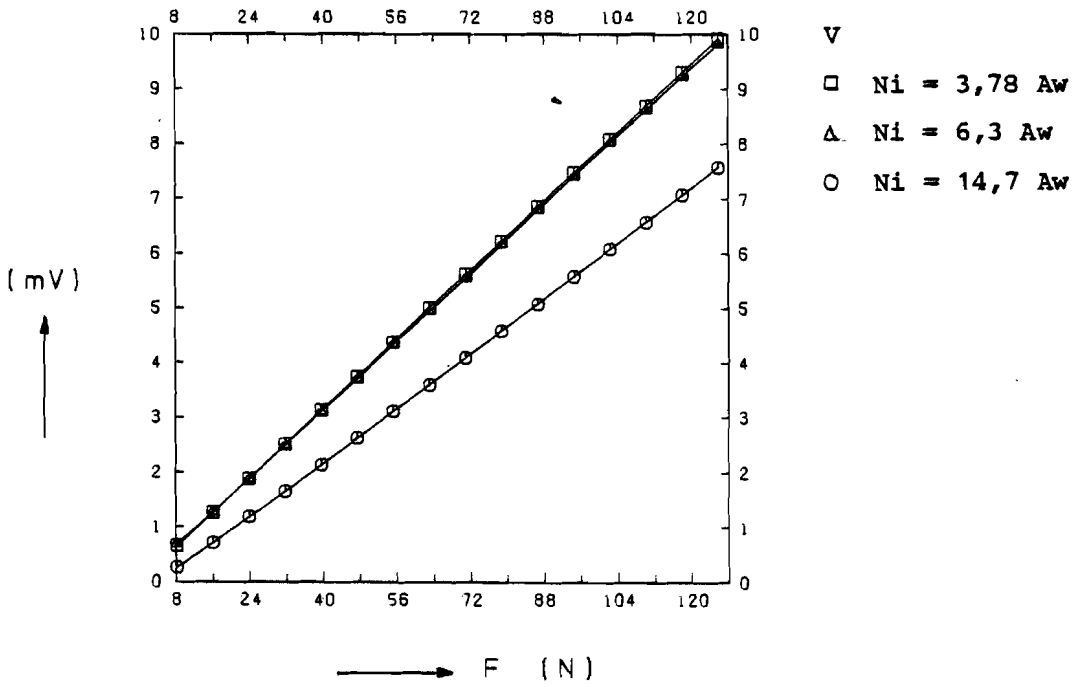
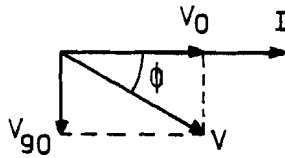
Sensor (vonkerosief)



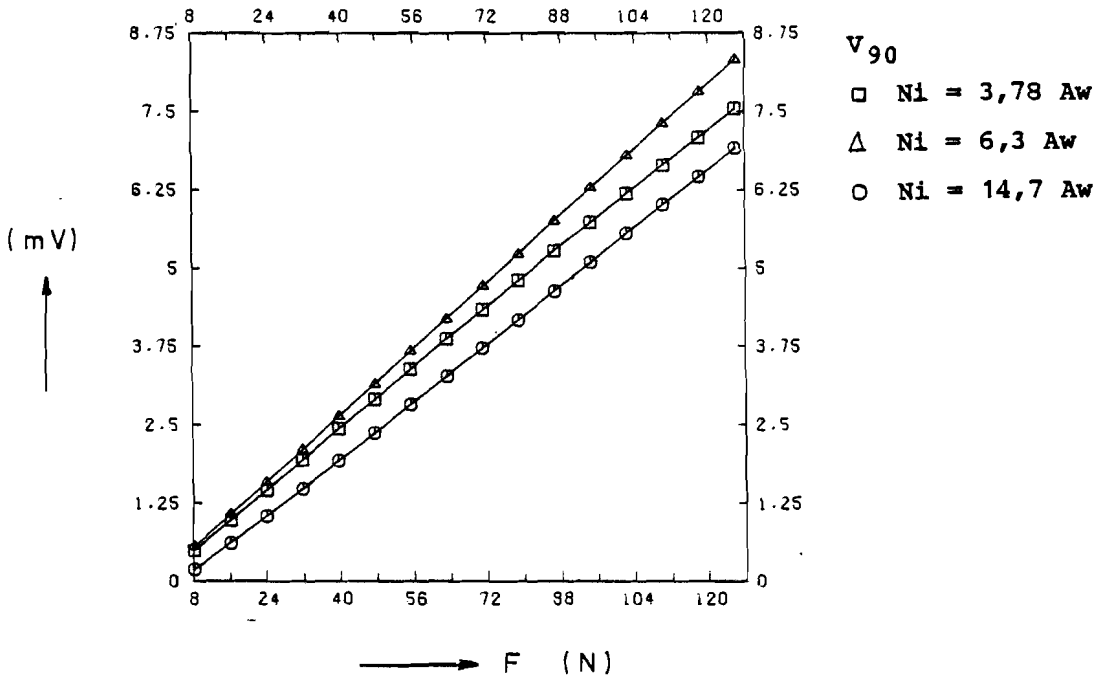
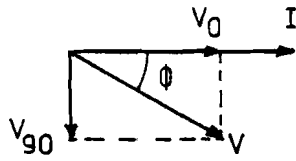
Sensor (vonkerosief)



Sensor (vonkerosief)



Sensor (vonkerosief)



6 Konklusies en aanbevelingen

Met de huidige technologie waaronder die van de microprocessoren speelt de niet-lineariteit van de uitgangsspanning van de krachtsensor een kleinere rol dan de reproduceerbaarheid. Helaas blijkt de meting van de reproduceerbaarheid sterk afhankelijk te zijn van de gebruikte mechanische meetopstelling. Om duidelijke uitspraken te doen over de reproduceerbaarheid is een betere meetopstelling gewenst. Echter de verwachting is toch wel dat de fout in de reproduceerbaarheid kleiner zal zijn dan een 0,5 % van het meetbereik.

De invloeden van de temperatuurswisselingen op het uitgangssignaal werken allemaal de zelfde kant op; het moet dus mogelijk zijn een gedeelte van deze invloeden te corrigeren. Wat de invloed is van de lijm op het gedrag van de sensor is niet bekend.

Een voordeel van deze krachtsensor is zijn sommerende werking; hoe meer lamellen hoe groter de kracht die op de sensor mag worden uitgeoefend voordat plastische vervorming optreedt en hoe groter de uitgangsspanning bij gelijke belasting per lamel. De hysteresis die optreedt is afhankelijk van de stroomsterkte. Hoe hoger de stroom hoe kleiner de hysteresis maar hoe ongevoeliger de sensor. Er moet dus een kompromis gezocht worden tussen de hysteresis en de gevoeligheid. Een gevoeligheid van 80 $\mu\text{V}/\text{N}$ is haalbaar.

Tijdens de meting is gebleken dat een krachtsverandering van 0,02 N (ca. 0,2 promille van het door mij gemeten gebied) nog te registreren is.

Een nadeel van deze sensor is, dat iedere krachtsensor apart geijkt moet worden.

Een deel van de hysteresis lijkt veroorzaakt te worden door de nawerking van het polykristallijn materiaal. Door de krachtsensor wisselend te belasten is de verwachting dat de hysteresis, die veroorzaakt wordt door het materiaal, kleiner wordt. Ouderen van de sensor kan dus zin hebben. Amorf materiaal heeft geen kristal structuur en heeft daarom ook geen last van nawerking. Ferromagnetisch materiaal dat het amorfe gedrag benadert zijn de zgn. "amorphous ribbons". Dit materiaal bestaat uit kristallen van verschillende grootte.

Door de produktietechniek is dit materiaal momenteel alleen nog maar verkrijgbaar in dikten kleiner dan 50 μm (Vacuumschmelze).

In plaats van de krachtsensor op druk te belasten is het aan te bevelen het gedrag bij een trekbelasting te onderzoeken. Hoewel de gevoeligheid kleiner zal zijn is het mechanisch eenvoudiger de krachtsensor in verschillende systemen toe te passen. De zelfde krachtsensor is te gebruiken. Alleen dienen in de opstaande strips gaten te worden aangebracht (zie fig. 6.1) met daarin assen gestoken waarop de trekspanningen worden uitgeoefend. Zowel de gaten als de assen moeten goed geslepen worden.

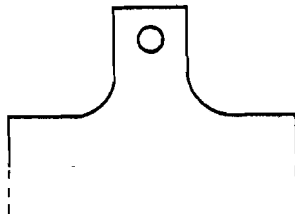


fig. 6.1 Krachtsensor op trek belast

De verschillen tussen de mechanisch en de vonkerosief bewerkte sensor waren niet significant. Alleen vertoonde de uitgangsspanning van de mechanisch bewerkte sensor in onbelaste toestand een hogere waarde. Dat zou ook een toevallige omstandigheid kunnen zijn. Als men meer sensors maakt zal men kunnen zien of er een vaste relatie tussen bewerking en gedrag bestaat. Deze spanning is te verminderen door de lengterichting van de lamellen afwisselend in de walsrichting en de richting loodrecht daarop te laten samenvallen, en daarna op elkaar te stapelen. De gevoeligheid zal echter wel verminderen omdat nu al een deel van de magnetisatievectoren loodrecht op de richting van de druk staat.

Naar het zich laat aanzien is de krachtsensor zeer geschikt om in ruwe omgevingen te worden ingezet. Daarbij kan o.a. gedacht worden aan tastsensoren voor robots.

Literatuur

- 2.1 Kaye, C.W.C. and Laby, T.H.; Tables of physical and chemical constants, Longman, London, 1973, p. 134.
- 2.2 Horn, K.; Lassen sich nur mit Dehnungsmeßstreifen hochgenaue Kraftaufnehmer bauen? In: VDI-Berichte Nr. 312, 1978, p. 1-13.
- 2.3 Horn, K.; Physikalische Prinzipien für elektromechanische Wägezellen. In: Wägen + Dosieren, Vol.1, 1976, p. 5-16.
- 2.4 Brinkmann, K.; Ein Tauchspulen-Kraftgeber mit Sm-Co Magnete. In: Magnetische Werkstoffe und Bauelemente in der Nachrichten- und Datentechnik, NTG-Fachberichte, Bd. 76, VDE-Verlag GmbH, Berlin, 1980, p. 181-186.
- 2.5 Ponte, de S.; Ein digitaler Druckmeßwert aufnehmer. In: Sensor'82-Mechanische und Thermodynamische messungen, Vol. 1, 1982, p. 158-166.
- 2.6 Mansfield, P.H.; Electrical transducers for industrial measurements, Butterworth & Co Ltd., London, 1973, p. 77-82.
- 2.7 Kleinschmidt, P.; Piezokeramische Sensoren. In: Sensoren Technologie und Anwendung, NTG-Fachberichte 79, VDE-Verlag GmbH, Berlin, 1982, p. 189-202.
- 2.8 Müller, R.K.; Mechanische Größen elektrisch gemessen, VDE-Verlag, Berlin, 1980, p. 100.
- 2.9 Wieringa, H.; Electrical force measuring transducers. In: Proceedings of the S&A-symposium on force, pressure, displacement and flow sensors, TH-Twente, may 1982, p. 79-97.

- 2.10 Timoshenko, S.P.; History of strength of materials, McGraw-Hill, London, 1953, p. 18.
- 2.11 Norton, H.N.; Sensor and analyzer handbook, Prentice-Hall inc., Englewood Cliffs N.J., 1982, p. 155-169.
- 2.12 Vaughan, J.; Strain measurements: application of B&K equipment, ISBN 87 87355 08 6.
- 2.13 Bethe, K.; Sensoren mit Dünnschicht-Dehnungsmessstreifen aus Metallischen und Halbleitenden Materialien. In: Sensoren-Technologie und Anwendung, NTG-Fachberichte 79, VDE-Verlag GmbH, Berlin, 1982, p. 168-176.
- 2.14 Janovsky, W.; Über die magnetoelastische Messungen von Druck-, Zug und Torsionskräften, Zeitschrift f. techn. Phys., Vol. 14, 1933, p. 466-472.
- 2.15 Johansson, E.; New generation of Pressductor force transducers. In: ASEA journal, vol. 45 nr. 5, 1972, p. 129-139.
- 3.1 Bozorth, R.M.; Ferromagnetism, Van Nostrand Comp., London, 1951.
- 3.2 Cullity, B.D.; Introduction to magnetic materials, Addison-Wesley Publishing Company, London, 1972.
- 3.3 Chikazumi, S.; Physics of magnetism, John Wiley & Sons Inc., New York, 1964.
- 3.4 Reinboth, H.; Technologie und Anwendung magnetischer Werkstoffe VEB Verlag Technik, Berlin, 1970, p. 18.
- 3.5 Kneller, E.; Ferromagnetismus, Springer-Verlag, Berlin, 1962

- 3.6 Wiegeman, N.J.; Barkhausen noise in magnetic thin films, proefschrift, TH-Eindhoven, 1979.
- 3.7 Olsen, E.; Grootheden uit het toegepaste magnetisme in de wisselstroomtechniek, N.V. Uitgeversmaatschappij Centrex, Eindhoven, 1964.
- 3.8 Bozorth, R.M. and Williams, H.J.; Effect of small stresses on magnetic properties, Rev. Mod. Phys. 17, 1945.
- 4.1 Graham, C.D.; Textured magnetic materials. In: Magnetism and Metallurgy, Vol 2, Berkowitz, A.E. (ed), Academic Press, New York, 1969, p. 734.
- 4.2. Perryman, R.; Effects of tensile and compressive stress on 3% grain-oriented silicon iron, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 8, 1975, p. 1901-1909.
- 4.3 Moses, A.J. and Davies, D.; Influence of compressive stress on magnetic properties of commercial (110)[100] oriented silicon-iron, IEEE Trans. Magn., Vol. Mag-16 no.2, 1980, p. 454-460.
- 4.4 Boll, R.; Weichmagnetische Werkstoff, Vacuumschmelze, GmbH, Hanau, 1977.
- 4.5 Chin, G.Y. and Wernick, J.H.; Soft magnetic metallic materials. In: Ferromagnetic materials, Wohlfarth, E.P. (ed.), Vol 2, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1980, p. 168-176.
- 4.6 Peters, M.F. and Ruark, A. E.; Helmholtz Coils for producing uniform magnetic fields, J. Opt. Soc. Am., vol 13, 1926, p. 205-212.
- 4.7 Osborn, J.A.; Demagnetizing factors of the general ellipsoide, Phys. Rev., Vol 67, p. 351-357.

- 4.8 Zienkiewicz, O.C.; The finite element method, Mc-GrawHill, London, 1977.
- 4.9 Timoshenko, S. and Goodier, J.N.; Theory of elasticity, McGrawHill Book Company, London, 1951, p. 52.
- 4.10 Sass, F.; Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer Verlag, Berlin, 1974.
- 4.11 Laan van der, P.C.T.; Magnetisch gekoppelde ketens, collegediktaat nr. 5572, TH-Eindhoven, p. 38.
- 4.12 Heuvelman, C.J.; Fysische bewerkingen, collegediktaat nr. 4512 TH-Eindhoven, p. 1-8.
- 5.1 Jongenburger, P; Kennis der metalen, deel 1, Delftsche Uitgevers Maatschappij B.V., 1973, p. 206.
- A1 Beukering van, L. e.a.; Aanroep van programma's voor berekeningen gebaseerd op de eindige elementenmethode, diktaatr. 4506, TH-Eindhoven, 1983
- A2 Joosen, A.; Handleiding bij het tekenen van plotfiles op beeldschermen, RC-informatie AG-20, TH-Eindhoven, 1982
- A3 Langenberg van de, H.; Het gebruik van de B7700-systeem, RC-informatie AG-18, TH-Eindhoven, 1983
- A4 Cuijpers, J.G.M.; Het gebruik van CANDE, RC-informatie AG-13.1.1, TH-Eindhoven, 1982

APPENDIX A Aanroep van programma's voor berekeningen gebaseerd op de eindige elementenmethode.

De modellen, die met behulp van de eindige elementenmethode worden doorgerekend, moeten op de juiste wijze geschematiseerd zijn. Dit houdt in, dat een model zodanig in numerieke waarden moet worden vertaald, dat de rekenprogramma's er mee kunnen werken.

De samenhang tussen de verschillende programma's is weergegeven in fig. A1.

De aanroep van de programma's wordt beschreven in lit. A1.

De gebruiker begint met het schematiseren van een tweedimensionaal model waarvan bijvoorbeeld het spanningsverloop als gevolg van een uitwendig aangebrachte belasting moet worden berekend. Het schematiseren gaat door middel van het toewijzen van plaatscoördinaten van de hoekpunten van de konstruktie in het x-y vlak.

Alle gegevens van de konstruktie verwacht het programma op een invoerfile DATAMG.

Door het aanroepen van een semi-interaktieve programma TRIQUAMESH wordt een elementenverdeling gemaakt van het ingevoerde model. Bepaalde opties in het programma maken het mogelijk het generatieproces op een "grafic display" zichtbaar te maken. De uitvoer van het programma staat op een uitvoerfile met de naam: TRIQUAMESH-datum/-naam van het model-/SAFERESULTS.

In het interaktieve programma USER/INTERFACE moet men o.a. aangeven waar en hoe de krachten op het model aangrijpen en tevens wordt gevraagd naar de waarde van de elasticiteitsmodulus, de kontraktieverhouding (getal van Poisson) en de dikte van het model. Bij dit programma is het raadzaam een schets van de te berekenen konstruktie erbij te hebben, met daarop aangegeven de basispunten en de belastingen.

De uitvoerfile INREADFEM van USER/INTERFACE is de invoerfile voor het programma FEMSYS. Dit programma voert de berekeningen uit die gebaseerd zijn op de eindige elementenmethode. FEMSYS levert o.a. twee uitvoerfiles nl. OUTREADFEM en OUT0.

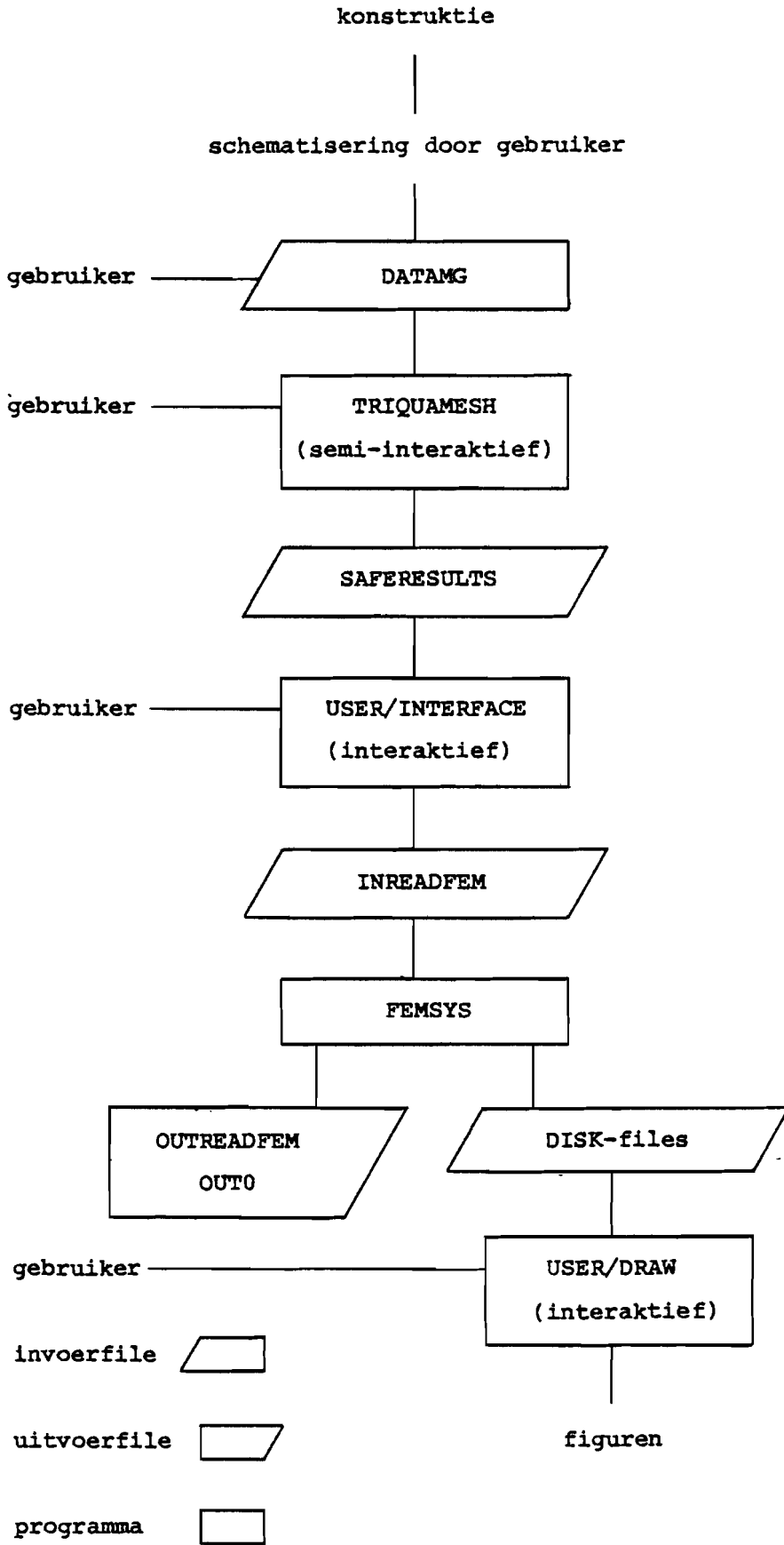


fig. A1

OUTREADFEM is een kopie van de invoer, aangevuld met eventuele foutmeldingen terwijl OUT0 de berekeningsresultaten weergeeft. In OUT0 worden voor ieder knooppunt de verplaatsing, de krachten en de spanningen vermeld en tevens wordt aangegeven hoe groot de spreiding is van de spanningen in een knooppunt t.o.v. de gemiddelde waarde. FEMSYS levert ook een aantal files, die als invoer kunnen dienen voor het interactieve tekenprogramma USER/DRAW. Met dit tekenprogramma kunnen plaatjes gemaakt worden van spanningen in een willekeurige doorsnede van het model en ook is het mogelijk vervormingen, veroorzaakt door uitwendige krachten, grafisch weer te geven. Met de optie "Plot" in het programma wordt een gewenst plaatje op een elektrostatische plotter afgedrukt in het Rekencentrum. Het is echter ook mogelijk dat het gewenste plaatje wordt bijgeschreven in een zogenaamde PREVIEW-file. Op de Burroughs B7700 van het Rekencentrum is nl. een preview-systeem beschikbaar (zie lit. A2). Met dit systeem wordt een mooiere uitvoering van de tekening verkregen, dan met een elektrostatische plotter.

Het maken en samenstellen van files (o.a. DATAMG) gebeurt onder supervisie van het systeem CANDE (zie lit. A3 en A4). Met dit systeem kan men op eenvoudige wijze via terminals programma's samenstellen en deze programma's door middel van kommando's vanaf de terminals uitvoeren.

Een andere functie van CANDE is het bijwerken en wijzigen van files.

Op de volgende bladzijden is een listing gegeven van de invoerfiles DATAMG van de berekende modellen. De te berekenen konstrukties zijn zodanig in numerieke waarden vertaald, dat de programma's er mee kunnen werken. De bij de invoerfiles getekende schetsen geven de berekende modellen grafisch weer.

Lit. A1 geeft een uitgebreide beschrijving hoe een model in numerieke waarden moet worden omgezet.

De termen die volgen op de \$-tekens worden nu in het kort beschreven.

INPUT " struktuurnaam "

De struktuurnaam kan door de gebruiker worden gekozen en wordt gebruikt bij het benoemen van de uitvoerfiles.

BASISPOINTS

Dit zijn punten, vastgelegd door een koördinatenpaar (x-koördinaat y-koördinaat), die het model beschrijven. Er moeten ook punten gedefinieerd worden, waar uitwendige krachten, die later in USER/INTERFACE worden gespecificeerd, aangrijpen.

Als eenheid van een koördinaat is 0,25 millimeter genomen.

CONTOURPIECES

In dit blok wordt de geometrische beschrijving van de kontourdelen opgegeven. De kontourdelen worden samengesteld uit niet vertakte elementaire krommen. Het kontourdeel krijgt een oriëntatierichting mee, die aangegeven wordt door een pijl. Een kontourdeel wordt in positieve zin doorlopen als het doorlopen wordt in de richting van zijn oriëntatie. Een kontourdeel dat in negatieve zin doorlopen wordt, krijgt een minteken.

De elementaire krommen worden als volgt beschreven:

A RL B : een rechte lijn tussen de basispunten A en B

A CB B,C : een cirkelboog door drie punten. A en C zijn de eindpunten en B het tussenpunt. Wordt de boog tegengesteld aan de richting van de wijzers van de klok doorlopen, dan krijgt punt B een minteken.

A CM B,C : een cirkelboog door twee eindpunten A en C met tevens opgegeven het middelpunt B. Wordt de boog in de richting van de wijzers van de klok doorlopen, dan krijgt punt B een minteken.

SUBAREA

In dit blok wordt een subgebied gedefinieerd, door middel van de kontourdelen die de rand van het subgebied vormen. Het is mogelijk meer subgebieden aan te wijzen, waarin verschillende element-typen worden toegepast. Wij hebben steeds het model beschouwd als één subgebied.

Bij het doorlopen van de rand moet het subgebied, dat in elementen verdeeld moet worden, steeds links van de kontour liggen. Kontourdelen die worden doorlopen in een richting die niet overeenkomt met de oriëntatie-richting van dat deel, krijgen een minteken.

SUBSTRUCTURES

In dit blok worden de subgebieden opgegeven met het elementtype dat in een bepaald gebied wordt toegepast. In hoofdzaak zijn wij uitgegaan van het driehoekig element TRIM3, met drie knooppunten maar voor de berekening van de spanningsverdeling in een rechthoekige plaat (zie invoerfile DATAMG/STRESS2) is gebruik gemaakt van het element TRIM6, die ook in het midden van de zijden van de driehoek knooppunten heeft.

GRADING

De standaardlengte van een elementribbe wordt in dit blok gedefinieerd (G gevolgd door een relatieve grofheidswaarde en de standaardlengte van een elementribbe).

Voor de nauwkeurigheid is het meestal gewenst dat op bepaalde plaatsen van het model de elementen fijner verdeeld worden. Dit wordt aangegeven door de letters GV, gevolgd door een relatieve grofheidswaarde en de basispuntnummers waar de elementen fijner verdeeld moeten worden.

RENUMBER

In dit blok worden bepaalde hernummeringsopdrachten gegeven, met het doel de coëfficiënten-matrices zodanig te ordenen, dat de programma's efficiënter werken.

De invoerfiles DATAMG zijn vrijgegeven en aan te roepen door:

(ELERAG1)DATAMG/naam

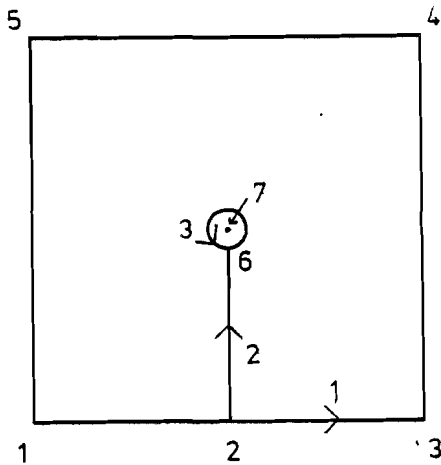
hierin is naam: HOLE, SENSOR1, STRESS2 of TYPE2.

Om een indruk te geven hoe de verschillende programma's worden aangeroepen en hoe de interactie verloopt tussen de gebruiker en de programma's is een listing toegevoegd van de berekening van het model DATAMG/TYPE2.

In basispunt 14 wordt in USER/INTERFACE een puntkracht van 1 N aangebracht. De onderkant van de sensor (basispunten 1 en 2) wordt vastgezet. Voor de waarde van de elasticiteitsmodulus is 210 kNmm^{-2} genomen terwijl voor de kontraktieverhouding en de dikte van het materiaal resp. 0.3 en 1 mm ingevoerd is.

DATAMG/HOLE ON USER6
DATE & TIME PRINTED: WEDNESDAY, APRIL 4, 1984 @ 11:09:24.

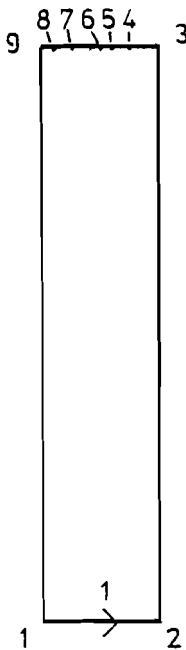
```
100 $INPUT "TROOST=HOLE"  
200 $BASISPOINTS  
300 1: 0, 0;  
400 2:100, 0;  
500 3:200, 0;  
600 4:200,200;  
700 5: 0,200;  
800 6:100, 90;  
900 7:100,100;  
1000 $CONTOURPIECES  
1100 1(2 RL 3 RL 4 RL 5 RL 1 RL 2)  
1200 2(2 RL 6)  
1300 3(6 CM 7, 6)  
1400 $SUBAREA  
1500 1(1, 2, -3, -2)  
1600 $SUBSTRUCTURE  
1700 FEMSYS 1 TRIM6 (1)  
1800 $GRADING  
1900 G 1.0 RI 20  
2000 GV 0,3 (6)  
2100 $RENUMBER  
2200 PROFILE (1 CMK 1)(1 CMK 5)(1 LINE 1, 5)  
2300 $STOP
```



DATAMG/STRESS2 ON USER6

DATE & TIME PRINTED: WEDNESDAY, APRIL 4, 1984 @ 11:10:02.

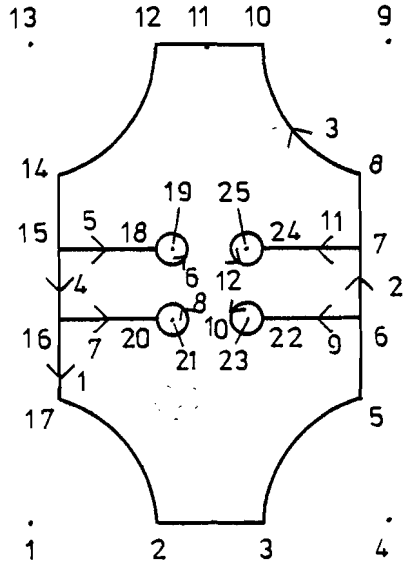
```
100  $INPUT "STRESS DISTRIBUTION 2"  
200  $BASISPOINTS  
300  1: 0, 0;  
400  2: 38, 0;  
500  3: 38,200;  
600  4: 28,200;  
700  5: 22,200;  
800  6: 19,200;  
900  7: 10,200;  
1000 8: 4,200;  
1100 9: 0,200;  
1200 $CONTOURPIECES  
1300 1(1RL2RL3RL4RL5RL6RL7RL8RL9RL1)  
1400 $SUBAREA  
1500 1(1)  
1600 $SUBSTRUCTURE  
1700 FEMSYS 1 TRIM6 (1)  
1800 $GRADING  
1900 G 1.0 RI 19  
2000 GV .15 (5, 6)  
2100 GV .40 (4, 7, 8, 9)  
2200 GV .50 (3)  
2300 $RENUMBER  
2400 PROFILE (1 CMK 6)(1 LINE 1, 3)  
2500 $STOP
```



DATAMG/SENSOR1 ON USER6
 DATE & TIME PRINTED: WEDNESDAY, APRIL 4, 1984 @ 11:44:05.

```

100  $INPUT "SENSOR PRESS"
200  $BASISPOINTS
300    1:  0,  0;
400    2: 70,  0;
500    3: 126, 0;
600    4: 196, 0;
700    5: 176, 66;
800    6: 176, 105;
900    7: 176, 182;
1000   8: 176, 143;
1100   9: 196, 248;
1200  10: 126, 248;
1300  11:  98, 248;
1400  12:  70, 248;
1500  13:  0, 248;
1600  14:  20, 182;
1700  15:  20, 143;
1800  16:  20, 105;
1900  17:  20,  66;
2000  18:  70, 143;
2100  19:  79, 143;
2200  20:  70, 105;
2300  21:  79, 105;
2400  22: 126, 105;
2500  23: 117, 105;
2600  24: 126, 143;
2700  25: 117, 143;
2800  $CONTOURPIECES
2900    1(16 RL 17 CM-1, 2 RL 3 CM-4, 5 RL 6)
3000    2(6 RL 7)
3100    3(7 RL 8 CM-9, 10 RL 11 RL 12 CM-13, 14 RL 15)
3200    4(15 RL 16)
3300    5(15 RL 18)
3400    6(18 CM 19, 18)
3500    7(16 RL 20)
3600    8(20 CM 21, 20)
3700    9(6 RL 22)
3800   10(22 CM 23, 22)
3900   11(7 RL 24)
4000   12(24 CM 25, 24)
4100  $SUBAREA
4200    1(1, 9,-10,-9, 2, 11,-12,-11, 3, 5,-6,-5, 4, 7,-8,-7)
4300  $SUBSTRUCTURE
4400    FEMSYS 1TRIM3 (1)
4500  $GRADING
4600    G 1.0 RI 14
4700    GV 0.4(18, 20, 22, 24)
4800  $RENUMBER
4900    PROFILE (1 CMK 11)(1 LINE 2,12)(1 LINE 5,17)
5000  $STOP
    
```



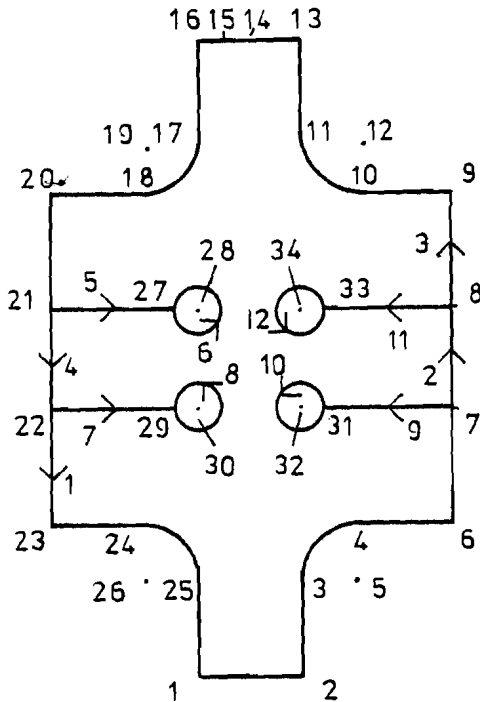
DATAMG/TYPE2 ON USER6

DATE & TIME PRINTED: WEDNESDAY, APRIL 4, 1984 @ 11:44:21.

100 \$INPUT "SENSOR PRESS TYPE 2"

200 \$BASISPOINTS

- 300 1: 59, 0;
- 400 2: 97, 0;
- 500 3: 97, 38;
- 600 4:119, 60;
- 700 5:119, 38;
- 800 6:156, 60;
- 900 7:156,105;
- 1000 8:156,143;
- 1100 9:156,188;
- 1200 10:119,188;
- 1300 11: 97,210;
- 1400 12:119,210;
- 1500 13: 97,248;
- 1600 14: 78,248;
- 1700 15: 65,248;
- 1800 16: 59,248;
- 1900 17: 59,210;
- 2000 18: 37,188;
- 2100 19: 37,210;
- 2200 20: 0,188;
- 2300 21: 0,143;
- 2400 22: 0,105;
- 2500 23: 0, 60;
- 2600 24: 37, 60;
- 2700 25: 59, 38;
- 2800 26: 37, 38;
- 2900 27: 50,143;
- 3000 28: 59,143;
- 3100 29: 50,105;
- 3200 30: 59,105;
- 3300 31:106,105;
- 3400 32: 97,105;
- 3500 33:106,143;
- 3600 34: 97,143;



3700 \$CONTOURPIECES

- 3800 1(22 RL 23 RL 24 CM-26,25 RL 1 RL 2
- 3900 RL 3 CM-5,4 RL 6 RL 7)
- 4000 2(7 RL 8)
- 4100 3(8 RL 9 RL 10 CM-12,11 RL 13 RL 14
- 4200 RL 15 RL 16 RL 17 CM-19,18 RL 20 RL 21)
- 4300 4(21 RL 22)
- 4400 5(21 RL 27)
- 4500 6(27 CM 28,27)
- 4600 7(22 RL 29)
- 4700 8(29 CM 30,29)
- 4800 9(7 RL 31)
- 4900 10(31 CM 32,31)
- 5000 11(8 RL 33)
- 5100 12(33 CM 34,33)

5200 \$SUBAREA

- 5300 1(1,9,-10,-9,2,11,-12,-11,3,5,-6,-5,4,7,-8,-7)

5400 \$SUBSTRUCTURE

- 5500 FEMSYS 1TRIM3 (1)

5600 \$GRADING

- 5700 G 1.0 RI 11
- 5800 GV .5(27, 29, 31, 33)

5900 \$RENUMBER

- 6000 PROFILE (1CMK14)(1LINE1,16)(1LINE6,23)

6100 \$STOP

```

#B7700:134 CANDE 33.320 (THE RC) ; YOU ARE APL4(5)
#ENTER USERCODE PLEASE
ELERAG1
#ENTER PASSWORD PLEASE.
#####
#IT'S DAYTIME, YOUR BALANCES ARE:
#+2111.11 DPU, #1408.36 DCU, #832.48 NPU, #877.18 NCU
#USER6 SEGMENTS: 98 IN USE, 500 ALLOWED (NOV 30, 1983 @ 00:14:13)
#SESSION 4679 13:18:07 11/30/83

```

```

FA DISK = POOL OTHERWISE DISK
#FAMILY DISK = POOL OTHERWISE DISK

```

```

GET DATAMG
#WORKFILE DATAMG: DATA, 61 RECORDS, SAVED

```

```

LIST
100 #INPUT 'SENSOR PRESS TYPE 2'
200 #BASISPOINTS
300 1: 59, 0;
400 2: 97, 0;
500 3: 97, 38;
600 4:119, 60;
700 5:119, 38;
800 6:156, 60;
900 7:156,105;
1000 8:156,143;
1100 9:156,188;
1200 10:119,188;
1300 11: 97,210;
1400 12:119,210;
1500 13: 97,248;
1600 14: 78,248;
1700 15: 72,248;
1800 16: 59,248;
1900 17: 59,210;
2000 18: 37,188;
2100 19: 37,210;
2200 20: 0,188;
2300 21: 0,143;
2400 22: 0,105;
2500 23: 0, 60;
2600 24: 37, 60;
2700 25: 59, 38;
2800 26: 37, 38;
2900 27: 50,143;
3000 28: 59,143;
3100 29: 50,105;
3200 30: 59,105;
3300 31:106,105;
3400 32: 97,105;
3500 33:106,143;
3600 34: 97,143;
3700 #CONTOURPIECES
3800 1(22 RL 23 RL 24 CM-26,25 RL 1 RL 2
3900 RL 3 CM-5,4 RL 6 RL 7)
4000 2( 7 RL 8)
4100 3( 8 RL 9 RL 10 CM-12,11 RL 13 RL 14
4200 RL 15 RL 16 RL 17 CM-19,18 RL 20 RL 21)
4300 4(21 RL 22)
4400 5(21 RL 27)
4500 6(27 CM 28,27)
4600 7(22 RL 29)
4700 8(29 CM 30,29)
4800 9( 7 RL 31)
4900 10(31 CM 32,31)
5000 11( 8 RL 33)
5100 12(33 CM 34,33)
5200 #SUBAREA
5300 1(1,9,-10, 9,2,11,-12,-11,3,5, 6, 5,4,7,-8, 7)
5400 #SUBSTRUCTURE
5500 FEMSYS 1TRIM3 (1)
5600 #GRADING
5700 G 1.0 RI 11
5800 GV .5(27, 29, 31, 33)
5900 #RENUMBER
6000 PROFILE (1CMK14)(1LINE1,16)(1LINE6,23)
6100 #STOP
#

```

```

E$(WMTGAI) TRIQUAMESH ON USER5;
#RUNNING 4725
#4725 DISPLAY:PLOTNEWG DD 6/24/83.
#BOT 4726 *SERVICE/PLOTTER ON APPL
#4726 DISPLAY: WE HEBBEN HCM WEER EENS AANGEPAST OP DE R.C. GRAPPEN !!!
??? DO YOU WANT PLOT(S) ON DISPLAY ???      #?
NEE

```

```

>>> START *** WRITE INPUT TO DISK*** <<<
TRIQUAMESH:  C.P.U. TIME :  0.207 SEC I/O.P.U. TIME :  0.42 SEC
0 COMMENT(S), 0 WARNING(S), 0 ERROR(S), NO FATAL ERROR;STOP AT: 100
??? DO YOU WANT AN ECHO OF THE SPECIFIED INPUT ???      NEE
DATABLOK BASISPOINTS  RECORD  0 TO 33 SAVED
=====
DATABLOK CONTOURPIECES RECORD 34 TO 47 SAVED
=====
DATABLOK SUBAREAS  RECORD 48 TO 48 SAVED
=====
DATABLOK SUBSTRUCTURES RECORD 49 TO 49 SAVED
=====
DATABLOK GRADING  RECORD 50 TO 51 SAVED
=====
DATABLOK RENUMBER  RECORD 52 TO 52 SAVED
=====

```

```

>>> START *** MAKE INT *** <<<
TRIQUAMESH:  C.P.U. TIME :  0.873 SEC I/O.P.U. TIME :  1.50 SEC
0 COMMENT(S), 0 WARNING(S), 0 ERROR(S), NO FATAL ERROR;STOP AT: 100

```

```

>>> START *** FILL TRIQUAMESH *** <<<
TRIQUAMESH:  C.P.U. TIME :  1.135 SEC I/O.P.U. TIME :  1.54 SEC
0 COMMENT(S), 0 WARNING(S), 0 ERROR(S), NO FATAL ERROR;STOP AT: 100
* OUTPUT IS EMPTY

```

>> COMMENT << *

>>> YOUR OUTPUT ONLY ON DISK AVAILABLE

```

>>> START *** GONPOS 1 *** <<<
TRIQUAMESH:  C.P.U. TIME :  1.487 SEC I/O.P.U. TIME :  1.74 SEC
1 COMMENT(S), 0 WARNING(S), 0 ERROR(S), NO FATAL ERROR;STOP AT: 100

```

```

>>> START *** GONPOS 2 *** <<<
TRIQUAMESH:  C.P.U. TIME :  1.663 SEC I/O.P.U. TIME :  1.74 SEC
1 COMMENT(S), 0 WARNING(S), 0 ERROR(S), NO FATAL ERROR;STOP AT: 100

```

```

>>> START *** DIVAREA *** <<<
TRIQUAMESH:  C.P.U. TIME :  2.331 SEC I/O.P.U. TIME :  1.77 SEC
1 COMMENT(S), 0 WARNING(S), 0 ERROR(S), NO FATAL ERROR;STOP AT: 100

```

```

>>> START *** REPOSITION *** <<<
TRIQUAMESH:  C.P.U. TIME : 30.470 SEC I/O.P.U. TIME :  1.77 SEC
1 COMMENT(S), 0 WARNING(S), 0 ERROR(S), NO FATAL ERROR;STOP AT: 100
??? DO YOU WANT TO SPECIFY SMAX AND EPC ???
>> DEFAULT GIVEN BY TRIQUAMESH: SMAX: 20 EPS: 0.000100000 <<
#?
NEE

```

```

>>> START *** RENUMPOINT *** >>>
TRIQUAMESH:  C.P.U. TIME : 32.573 SEC I/O.P.U. TIME :  2.04 SEC
1 COMMENT(S), 0 WARNING(S), 0 ERROR(S), NO FATAL ERROR;STOP AT: 100
??? DO YOU WANT PRINTED OUTPUT ???      JA
??? PRINTED ON YOUR TERMINAL ???      JA

```

```

MATRIX CHARACTERISTICS BASED ON CORNER POINTS
SUBSTRUCTURE 1 CMK RENUMBERED. STARTING POINT P= 14
BRUTO MATRIX CHARACTERISTICS BASED ON ONE DEGREE OF FREEDOM PER POINT
NUMBER OF DEGREES OF FREEDOM IN THE SUBSTRUCTURE,NDF : 459
BANDWIDTH BW : 30
CRITERION C1(CHOLESKI-BAND DECOMPOSITION) : 3.387E+05
CRITERION C2(CHOLESKI BAND-PROFILE DECOMPOSITION) : 1.246E+05
SUBSTRUCTURE 1 LINE RENUMBERED.P= 1 Q= 16
BRUTO MATRIX CHARACTERISTICS BASED ON ONE DEGREE OF FREEDOM PER POINT
NUMBER OF DEGREES OF FREEDOM IN THE SUBSTRUCTURE,NDF : 459
BANDWIDTH BW : 63
CRITERION C1(CHOLESKI BAND DECOMPOSITION) : 3.378E+05
CRITERION C2(CHOLESKI BAND-PROFILE DECOMPOSITION) : 1.850E+05
SUBSTRUCTURE 1 LINE RENUMBERED.P= 6 Q= 23
BRUTO MATRIX CHARACTERISTICS BASED ON ONE DEGREE OF FREEDOM PER POINT
NUMBER OF DEGREES OF FREEDOM IN THE SUBSTRUCTURE,NDF : 459
BANDWIDTH BW : 53
CRITERION C1(CHOLESKI BAND DECOMPOSITION) : 3.274E+05
CRITERION C2(CHOLESKI BAND-PROFILE DECOMPOSITION) : 1.252E+05

```

??? DO YOU WANT TO CONTINUE ??? JA

E(RCLC4) USER/INTERFACE ON USER1;
#RUNNING 4802

* USER/INTERFACE HEEFT (D.D. 17 MRT '83) WAT WIJZIGINGEN ONDERGAAN :

* U KUNT NU IN EEN RUN MEERDERE INVOERFILES MAKEN.
* DAT IS OOK ALDUS TE GEBRUIKEN ;
* INDIEN U IN HET NAVOLGENDE EEN ONHERSTELBARE FOUT MAAKT
* DOORLOOP DAN HET PROGRAMMA ZO SNEL MOGELIJK EN BEGIN OPNIEUW

* VERDERE WIJZINGEN C.Q. UITBREIDINGEN :
* ER WORDT EEN FILE REPORT GEMAAKT ALS VERSLAG VAN DE RUN.
* BIJ TRIAX4 KUNNEN DE TANGENTIELE VRIJH.GR. ONDERDRUKT WORDEN.
* LOADS T.P.V. ONDERDRUKTE VRIJHEIDSGR. WORDEN NIET MEER GEACCEPTEERD.

? TITEL VAN FILE DATAMG

*?

DATAMG

? TITEL VAN FILE MESH (DE GEGENEREERDE MESH)

MAAS

? TITEL VAN FILE F (DE TE GENEREREN INVOERFILE VOOR FEMSYS

INREADFEM

? IDENTIFICATIEREGEL VOOR FEMSYS UITVOER

* (WANNEER DEZE REGEL NIET LEEG IS DAN WORDEN DE EERSTE 6 KARAKTERS

* GECREEERDE FILES; GEBRUIK BIJ VOORKEUR EEN SPREKENDE TEXT,

* ZO NODIG AANGEVULD TOT 6 KARAKTERS)

UITVOER

? IEDERE SUBCONTOUR IN EEN APARTE GROUP (Y/N)

Y

? AANTAL KNOOPPUNTEN, AANTAL ELEMENTEN (BOVENSCHATTINGEN)

460,020

? COORDINATEN VAN DE BASISPUNTEN (Y/N)

N

? IS DE CONSTRUCTIE AXISYMMETRISCH (Y/N)

N

*- STRUCTURE 1

* 1 GROUP(S)

* GROUP 1 : 819 ELEMENTEN, 3 KNOPEN PER ELEMENT

* GROUP 1

? ELEMENTNAAM

TRIM3

? AANTAL CHARACTERISTICS PER ELEMENT

3

? 3 CHARACTERISTICS

210000, 0.3, 1

* U WORDT DADELIIK (WAARSCHIJNLIJK) VERZOCHT WAARDEN IN TC TIKKEN

* VOOR : RAND, VAN, VIA, NAAR

* VOOR 'RAND' KUNT U BIJNA ALTIJD VOLSTAAN MET DE WAARDE 0 (NUL)

* ALLEEN WANNEER EEN BASISPUNT OP GROND VAN ZIJN COORDINATEN NIET EENDUIDIG

* GELOCALISEERD KAN WORDEN, MOET EEN WAARDE GROTER DAN NUL INGEVOERD WORDEN.

* HET TOTAAL AAN RANDPUNTEN IS VERDEELD IN EEN AANTAL RANDEN, GENUMMERD VANAF 1 (EEN).

* IEDERE RAND EINDIGT MET HETZELFDE KNOOPNUMMER ALS WAARMEE HIJ BEGINT.

* RAND 1 BEVAT HET LAAGST BESCHIKBARE RANDKNOOPNUMMER, RAND 2 HET LAAGST

* OVERGEBLEVEN RANDKNOOPNUMMER ENZ.

* U KUNT EEN OVERZICHT VAN ALLE RANDKNOOPNUMMERS KRIJGEN.

*

* 'VAN', 'VIA' EN 'NAAR' ZIJN BASISPUNTNUMMERS

* U GEEFT DAARMEE EEN GEDEELTE VAN DE RAND AAN.

* IS GEEN TUSSEN PUNT BESCHIKBAAR OM DE RICHTING VAST TE LEGGEN DAN

* TREEDT DE VOLGENDE REGELING IN WERKING :

* MET 'VAN, VAN, NAAR' BEDOELEN WE HET TRAJECT MET DE

* MINSTE KNOOPPUNTEN VAN 'VAN' NAAR 'NAAR' ,

* MET 'VAN, NAAR, NAAR' HET TRAJECT MET DE MEESTE KNOOPPUNTEN.

* SUCCES !

? WILT U OPEENVOLGENDE RANDPUNTNUMMERS ZIEN (Y/N)

Y

```
*RANDEN          OK
*      1      2      3      4      9      14      19      23      27      36
*      37      38      39      56      89      121      167      206      257      310
*      341      375      401      427      426      425      424      431      437      442
*      447      451      457      458      457      456      455      450      446      441
*      436      430      423      422      421      420      400      374      340      295
*      258      205      152      120      88      55      32      33      34      35
*      28      24      18      13      8      1      128      129      144      159
*      173      170      187      172      158      143      128      130      131      146
*      161      175      192      191      174      160      145      130      270      271
*      289      302      317      332      331      316      301      288      270      272
*      273      291      304      319      334      333      318      303      290      272
```

? RAND ELEMENTEN (Y/N)

N

? KOPPELEN (Y/N)

N

? SUPPRESSED FREEDOMS (Y/N)

Y

? RAND, VAN, VIA, NAAR

0,1,1,2

*KNOOPNUMMERS

```
*      4      3      2      1
? RICHTING (X=1, Y=2, BEIDE=0)
```

0

? SUPPRESSED FREEDOMS (Y/N)

N

? AANTAL LOADS

1

*LOAD 1

? VERDEELDE BELASTING (Y/N)

N

? GECONCENTREERDE BELASTING (Y/N)

Y

? BASISPUNT, RICHTING (X=1, Y=2), WAARDE

14, 2, 1

* 457

? GECONCENTREERDE BELASTING (Y/N)

N

? MOETEN DE RESULTATEN GEPLUOT WORDEN (Y/N)

Y

? MEER INVOERFILES TE MAKEN (Y/N)

N

*ET=5:59.5 PT=9.2 IO=3.7

FILES

(ELCRAG1) ON POOL

```
. G1
. . COORD : DATA
. . COMPNODES : DATA
. MAAS : DATA
. DATAMG : DATA
. REPORT : DATA
. INREADFEM : DATA
. TRIQUAMESH113083
. . SENSOR
. . . JOBREPORT : DATA
#
```

MA FEM

*WORKFILE FEM: SEQ

SEQ

100E(RCLC4) PROG2 ON USER1;Z

200FILE AUTO(DISK),OUTREADFEM(DISK)

300

#

CA

*UPDATING

*WORKSOURCE FEM SAVED

```
DO FEM
#FILE (ELERAG1)FEM ON POOL
#
E(RCLC4) PROG2 ON USER1;%
FILE OUT0(DISK),OUTREADFEM(DISK)
#RUNNING 4917
#ET=1:09.2 PT=38.3 IO=12.9
```

```
GET OUTREADFEM
#WORKFILE OUTREADFEM: DATA, 1058 RECORDS, SAVED
```

```
FIND LIT .*.IT
#WORKFILE OUTREADFEM
#
```

```
FILES
(ELERAG1) ON POOL
. G1
. . COORD : DATA
. . COMPNODES : DATA
. FEM : SEQDATA
. MAAS : DATA
. OUT0 : DATA
. DATAMG : DATA
. OUTLOG : DATA
. REPORT : DATA
. UITVOE
. . S
. . . GROUP
. . . . 1
. . . . . COORD : DATA
. . . . . COMPCHAR : DATA
. . . . . COMPNODES : DATA
. . X1
. . . S
. . . . GROUP
. . . . . 1
. . . . . NODEDER : DATA
. . . . . LHV : DATA
. INREADFEM : DATA
. OUTREADFEM : DATA
. TRIQUAMESH113083
. . SENSOR
. . . JOBREPORT : DATA
#
```

```
WR OUT0 TO PR
#RUNNING 4935
#
```

```
WR REPORT TO PR
#RUNNING 5005
#
```

```
WR DATAMG TO PR
#RUNNING 5016
#
```

```
DYE
#END SESSION 4699 ET=23:14.1 PT=52.4 IO=31.4
#USER = ELERAG1 13:41:24 11/30/83
```

APPENDIX B Afmetingen van een lamel van de sensor

Maten in millimeters. Dikte van een lamel: 0,4 mm

