

# Collegedemonstraties van een piëzo-hoogspanningsgenerator en het skin-effect

**Citation for published version (APA):**

Duwel, E. H. A., van Venrooij, A. H. T. M., van Heesch, B., & Noij, R. G. (1993). *Collegedemonstraties van een piëzo-hoogspanningsgenerator en het skin-effect*. Technische Universiteit Eindhoven.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 29/06/1993

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**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
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

# FACULTEIT ELEKTROTECHNIEK

Vakgroep Hoogspanningstechniek en

Electromagnetic Compatibiliiy (EHC)

## **Collegedemonstraties van een piëzo-hoogspanningsgenerator en het skin-effect**

door: E.H.A. Duwel  
EH.93.A.129 HTS

*De faculteit Elektrotechniek van de  
Technische Universiteit Eindhoven  
aanvaardt geen verantwoordelijkheid  
voor de inhoud van stage- en  
afstudeerverslagen.*

Afstudeerwerk verricht o.l.v.:

Ir. A.H.Th.M. van Venrooij (HTO)  
Dr.ir. E.J.M. van Heesch (TUE)  
Ing. R.G. Noij (TUE)

datum: 29 juni 1993

TECHNISCHE UNIVERSITEIT EINDHOVEN

## Opdracht omschrijving

Het afstudeerwerk heeft plaats gevonden tijdens het laatste studiejaar van de Hogeschool Heerlen op de Technische Universiteit Eindhoven, vakgroep Hoogspanningstechniek en EMC (Electromagnetic Compatibility).

Afstudeeropdracht omschrijving :

Literatuurstudie naar de theorie en grondslagen van het skin-effect. Gevolgd door het begrijpen van het simulatie programma 'kleden kloppen' waarin een simulatie wordt gegeven van het indringen van een magnetisch veld in een vlakke plaat. Vervolgens de toegepaste methode omschrijven en testen op nauwkeurigheid, dit proberen te verbeteren, en daar waar nodig aanpassen om er een demonstratie model van te maken.

De tweede opdracht is het ontwerpen van een piëzo-hoogspanningsgenerator waarmee het principe van magnetisch gekoppelde ketens moet worden aangetoond. Aan deze opdracht is geen literatuurstudie vooraf gegaan maar een op *trial and error* berustende opdracht. Omdat het ontworpen model niet voldeed aan de eisen van een demonstratiemodel zijn er diverse berekeningen en metingen aan het systeem gedaan om te kunnen verklaren waarom het beoogde doel niet kon worden verwezenlijkt.

Een mogelijke uitbreiding van de demonstratie van het skin-effect is het simulatiemodel voor cilindrische materialen aan te passen. Nu de methode bekend is, zal het aanpassen van dit model geen grote problemen opleveren.

## Voorwoord

Voor een succesvolle voltooiing van een studie aan de Hogeschool Heerlen, sector Techniek, moet men in het laatste studiejaar een afstudeerproject uitvoeren. Ik heb gekozen voor een afstudeerproject buiten de provinciegrenzen en wel op de Technische Universiteit in Eindhoven vakgroep EHC. Deze vakgroep houdt zich bezig met onderzoeken op hoogspanningsgebied en electromagnetische compatibiliteit (EMC). In de studie aan de hogeschool wordt hierin, helaas, geen college gegeven. Door het afstudeerwerk van afgelopen jaar is een ruimere kijk ontstaan in het hoogspanningsgebied.

Eindhoven, 29 juni 1993

Erik H.A. Duwel

## Summary

This report is the result of a final study at the Technical University Eindhoven during the last year studying at the Heerlen Polytechnic. The project is called 'Demonstrations of a piëzo-high-voltage generator and the skin effect'.

It deals about the mathematical approximation of the penetration of a magnetic field in a flat plate, called the skin effect. The second part of this report is a description of the study and realisation of the demonstration of the subject magnetically coupled fields.

Using matrix calculations we can apply a computer to simulate the penetration of magnetic fields in a flat plate. A similar approach may be followed to simulate the penetration in cylindrical shell, but this is not added to this report.

## Samenvatting

Het verslag dat nu voor u ligt is het resultaat van een afstudeerproject op de Technische Universiteit Eindhoven vakgroep EHC gedurende het laatste studiejaar van de Hogeschool Heerlen en is getiteld 'Collegedemonstraties van een piëzohoogspanningsgenerator en het skin-effect'.

De inhoud van dit verslag zijn berekeningen voor de wiskundige benadering van de indringing van een magnetisch veld in een vlakke plaat. Dit wordt het skin-effect genoemd. Het tweede gedeelte van het verslag behandelt het onderzoek naar en de realisatie van een demonstratie van magnetisch gekoppelde velden.

Door gebruik te maken van matrices is het mogelijk om met behulp van een computer de indringing van magnetische velden in een vlakke plaat te berekenen. Het is ook mogelijk met soortgelijke berekeningen de indringing in een ronde geleider te simuleren maar dit is niet in dit verslag opgenomen.

## Inhoudsopgave

Opdracht omschrijving	I
Voorwoord	I
Summary	II
Samenvatting	II
Gebruikte symbolen	IV
<b>1</b> Simulatie van het skin-effect	<b>1</b>
1.1 Inleiding	1
1.2 Elektro-magnetische velden	2
1.3 Het skin-effect	4
1.4 Mathematische oplossing	6
1.5 Numerieke oplossing	8
1.5.1 Inleiding	8
1.5.2 Matrix-voorstelling	8
1.5.3 Het Finite Difference algoritme	10
1.5.4 De matrix-oplossing methode	12
1.6 Conclusies en aanbevelingen	18
<b>2</b> Het ontwerpen van een piëzo-hoogspanningsgenerator	<b>19</b>
2.1 Inleiding	19
2.2 Het ontwerp	20
2.4 Meetresultaten	24
2.5 Conclusie	27
Literatuur verwijzingen	28
Literatuurlijst	29
Bijlage 1 Programmalisting Skin-effect in Pascal	30
Bijlage 2 Programmalisting Skin-effect in C	37
Bijlage 3 Oscillogrammen doorslag hoogspanningsgenerator	44

## Gebruikte symbolen

In de tekst gebruikte symbolen zijn hieronder gesommeerd. Hun eenheden staan er achter tussen haakjes.

j	Stroomdichtheid per oppervlakteenheid [ $A/m^2$ ]
B	Magnetische flux dichtheid [ $Wb/m^2$ ]
C	Capaciteit [F]
E	Elektrische veldsterkte [ $V/m$ ]
H	Magnetische veldsterkte [ $A/m$ ]
I	Stroom [A]
L	Inductiviteit [H]
N	Aantal windingen spoel [#]
R	Ohmse weerstand [ $\Omega$ ]
U	Elektrische spanning [V]
Z	Impedantie [ $\Omega$ ]
$\delta$	Indringdiepte (skindiepte) [m]
$\epsilon$	Diëlectrische constante [F/m]
$\mu$	Magnetische permeabiliteit [H/m]
$\rho$	Soortelijke weerstand [ $\Omega m$ ]
$\tau$	Tijdconstante [s]
$\Phi$	Magnetische flux [Wb]
$\sigma$	Soortelijke geleiding [ $1/\Omega m$ ]
$\varphi$	Fasehoek [rad]
$\omega$	Radiale frequentie [rad/s]

# 1 Simulatie van het skin-effect

## 1.1 Inleiding

Het skin-effect is een gevolg van wervelstromen. Wervelstromen ontstaan in een geleider die zich in een wisselend magnetisch veld bevindt. Ten gevolge van het magnetische veld gaan er in de geleider kringstromen lopen die een tegengesteld magnetisch veld veroorzaken omdat zij de oorzaak van hun ontstaan tegen werken. Hierdoor ontstaat een ongelijkmatige verdeling van het resulterende magnetische veld en van de stroom in de geleider. Stroomverdringing cq. veldverdringing zijn dan ook andere benamingen voor het skin-effect.

In dit hoofdstuk 'Simulatie van het skin-effect' wordt eerst een theoretische omschrijving van elektromagnetische velden gegeven waarna een link wordt gelegd naar het fenomeen skin-effect. Hierna volgt de mathematische benaderingsmethode, nodig om met behulp van een computer een simulatie-model te kunnen opzetten.

Er zal blijken dat eenparige golf voortplanting inderdaad bestaat in een niet-verliesvrij medium, maar dat de resulterende golven een amplitude hebben die afneemt, ten gevolge van de verliezen, in de richting van de propagatie.

## 1.2 Elektro-magnetische velden

Bij de studie naar veldverschijnselen in materialen wordt vaak naar ideale, verliesvrije materialen gekeken met een elektrische geleidbaarheid  $\sigma = 0$ . De studie naar veldverzwakking van sinusvormige signalen als gevolg van het skin-effect wordt gekarakteriseerd door constante waarden van  $\epsilon$ ,  $\mu$  en  $\sigma$  bij elke frequentie. De magnetische veldsterkte heeft altijd een tangentiële richting terwijl de elektrische veldsterkte en de stroomdichtheid axiaal, ten opzichte van de voortplantingsrichting, gericht zijn.

Onder deze condities mogen de elektromagnetische velden in lineaire en dissiperende media worden beschreven in de complexe vectornotatie :

$$\vec{E}(t) = \text{Re}(\underline{E}.e^{j\omega t}) \quad (1.1)$$

$$\vec{H}(t) = \text{Re}(\underline{H}.e^{j\omega t}) \quad (1.2)$$

Niet te vergeten zijn de Maxwell vergelijkingen voor quasi-stationaire toestanden van een elektro-magnetische golf :

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1.3)$$

$$\nabla \times H = j \quad (1.4)$$

We beschouwen de volgende situatie weergegeven in onderstaande figuur 1.1 waar loodrecht op het gesloten cirkelloppervlak A een aantal B-lijnen invallen.

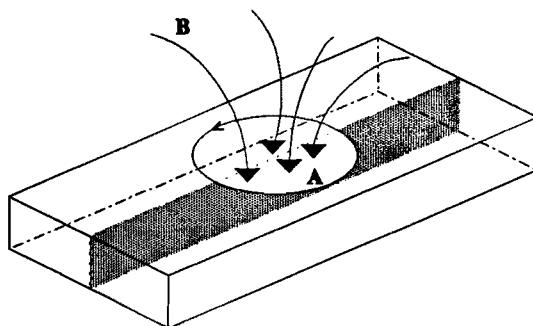


fig. 1.1 Magnetische flux op gesloten oppervlak

Eerst wordt er van uitgegaan dat het materiaal homogeen en een ideaal goede geleider is en de flux loodrecht op het oppervlak A invalt. Er geldt dan het volgende:

$$\oint E \cdot dl = - \frac{\partial \Phi_B}{\partial t} \quad (1.5)$$

$$\Psi_B = \int_S B \cdot ds \approx B \cdot A \quad (1.6)$$

$$2\pi r \cdot E = -j\omega \cdot B \cdot A \quad (1.7)$$

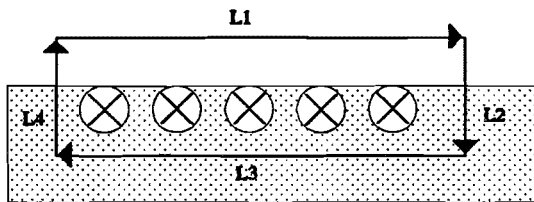


Voor een ideale geleider geldt  $R = 0 \Omega$ . Met behulp van de wet van Ohm  $V = I \cdot R$  of  $E \cdot d = I \cdot R$  volgt hieruit dat  $E = 0$ . Uit formule 1.7 blijkt:  $2\pi r \cdot 0 = -j\omega \cdot B_{\perp} \cdot A$  dat  $B_{\perp} = 0$  als  $\omega \neq 0$

Conclusie *Er kan geen B loodrecht het metaal indringen als  $R = 0$  en  $\omega \neq 0$*

Het is alleen mogelijk dat de magnetische flux parallel aan de geleider loopt voor bovenstaande condities. Deze magnetische flux wordt aangeduid met  $B_{\parallel}$

In de onderstaande figuur 1.2 staat een dwarsdoorsnede van figuur 1.1.



$$\text{Maxwell : } \oint_l H \cdot dl = I_{\text{omsloten}} \quad (1.8)$$

fig. 1.2 Dwarsdoorsnede

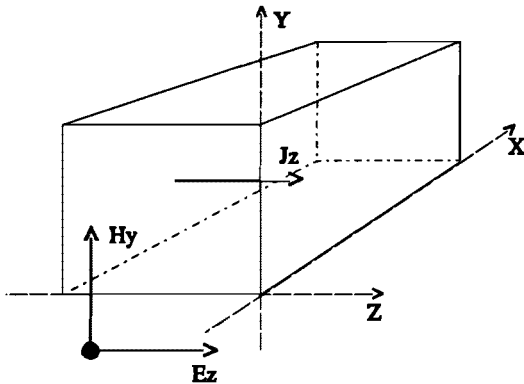
Er geldt nog steeds dat het materiaal ideaal is maar dat er nu een magnetische flux is aangelegd parallel aan het oppervlak.

Met behulp van formule 1.8 geldt dat  $H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + H_3 \cdot l_3 + H_4 \cdot l_4 = I_{\text{omsloten}}$ . Er is geen  $B_{\perp}$  aanwezig waardoor  $H_2 = H_4 = 0$ . Doordat er geen flux het materiaal in kan is  $H_3 = 0$ . Uit het voorgaande volgt dan  $H_1 \cdot l_1 = I_{\text{omsloten}}$ .

Gebleken is dat de indringdiepte van het magnetische veld  $B$  is gelijk aan 0 bij een ideale geleider. Vandaar dat bij studies naar het skin-effect er van uit moet worden gegaan dat het materiaal niet ideaal is en er een verliesweerstand  $R \neq 0$  aanwezig is.

### 1.3 Het skin-effect

Het skin-effect is een verschijnsel dat optreedt in een geleidend materiaal en een gevolg is van wervelstromen. Het heeft als gevolg dat de voortplantende golf uitdempt dus het signaal een afnemende amplitude heeft in de richting van de propagatie met die hoeveelheid welke nodig is om aan de ohmse verliezen, Joulese warmte verliezen, te voldoen.



In de nevenstaande figuur 1.3 is weergegeven de definitie van de aangelegde E en H velden buiten het materiaal met betrekking tot het X-Y-Z vlak en de daarbij aanwezigheid van de stroomdichtheid  $J_z$  in het materiaal.

In het vervolg van het verslag wordt deze definitie aangehouden met betrekking tot de positie van de velden en het materiaal.

fig. 1.3 Definitie van aangelegde velden

Er geldt een gesloten keten van effecten voor magnetische velden welke hieronder is weergegeven.

-- Flux --	-- E --	-- J --	-- (extra) flux --
Inductie	Ohm	Maxwell	
$\nabla_x \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\vec{E} = \rho \vec{j}$	$\nabla_x \vec{B} = \mu \vec{j}$	

Verder geldt :  $B = \mu \cdot H$  met  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$   $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  [H/m]

$$\rho(\nabla \times \vec{j}) = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad \leftrightarrow \quad \nabla \times \nabla \times \vec{H} = -\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \tag{1.9}$$

Hetzefde geldt voor het E-veld :  $\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \tag{1.10}$$

In het materiaal geldt :  $\nabla \cdot \vec{H} = 0$  en  $\nabla \cdot \vec{E} = 0$

$$\text{En dus : } -\nabla^2 \cdot \vec{H} = -\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad \text{en} \quad -\nabla^2 \cdot \vec{E} = -\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \tag{1.11}$$

Uit formule 1.11 kan voor een carthesisch coördinatenstelsel de differentiaalvergelijking worden geschreven als:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial t} \quad (1.12)$$

De indringdiepte is gedefinieerd als de afstand waarin de amplitude van het signaal afneemt tot 1/e maal de oorspronkelijke. De indringdiepte bedraagt:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \omega}} \quad (1.13)$$

Verder wordt er een sinusvormig veld aan de buitenkant van het materiaal aangelegd.  $H_y = \sin \omega t$  en  $B_y = \mu H_y$

De uitwerking voor het opstellen van de differentiaalvergelijking 1.12 is als volgt:

$$(\nabla \times E)_y = -\frac{\partial B_y}{\partial t} = -\frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (1.14)$$

$$(\nabla \times B)_z = \frac{\partial B_y}{\partial x} = \mu j_z = \frac{\mu}{\rho} E_z \Leftrightarrow \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial x} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial B_y}{\partial t} \quad (1.15)$$

Deze differentiaalvergelijking is de basis van het mathematisch beschrijven van het skin-effect. Er zijn verschillende methoden om deze vergelijking om te zetten in een voor de computer oplosbaar probleem. Allereerst wordt in de volgende paragraaf deze vergelijking mathematisch opgelost. In de paragraaf 1.5 komt de benaderingsmethode aan de orde waarmee de computer aan het werk moet.

## 1.4 Mathematische oplossing

In de vorige paragraaf is gebleken dat de grondvergelijking van het systeem de warmtegeleidingsdifferentiaalvergelijking is. Hieruit volgt dan de voor het probleem aangepaste versie, wat betreft randvoorwaarden, formule 1.10. Met deze gegevens wordt de differentiaal vergelijking als volgt wiskundig opgelost:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + bU + c \qquad \frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial t}$$

Deze vergelijking voor  $E_z$  wordt tijdsafhankelijk door invulling van  $e^{j\omega t}$  en neem voor  $k^2 = j\omega\mu/\rho$  om het geheel overzichtelijk te houden en krijgt hierdoor

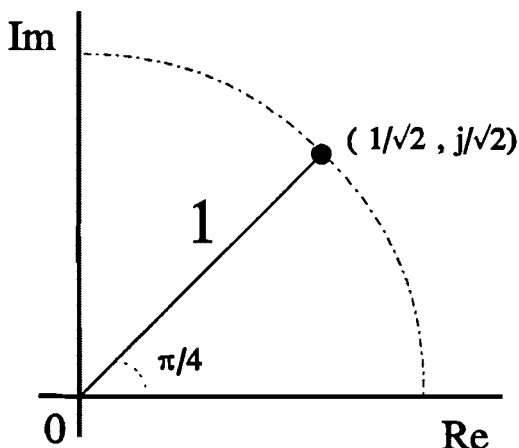
$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} = j\omega \frac{\mu}{\rho} E_z = k^2 E_z$$

Voor de oplossing van de differentiaalvergelijking wordt  $E_z = a \cdot e^{-bx}$  ingevuld. Een mogelijkheid is  $E_z = a \cdot e^{+bx}$  maar dit leidt, op oneindige diepte in het materiaal, tot een oneindige  $E_z$ , en is dus geen acceptabele oplossing.

Substitutie levert :

$$k^2 = b^2$$

Voor  $k^2$  geldt het volgende:



$$k^2 = j\omega \frac{\mu}{\rho} \Leftrightarrow k = \sqrt{j} \cdot \sqrt{\omega \frac{\mu}{\rho}}$$

$$\sqrt{j} = \left( e^{\frac{\pi}{2}j + 2\pi nj} \right)^{\frac{1}{2}} \Leftrightarrow$$

$$e^{\frac{\pi}{4}j} \cdot e^{\pi nj} = \pm e^{\frac{\pi}{4}j} = \frac{1 + j}{\sqrt{2}}$$

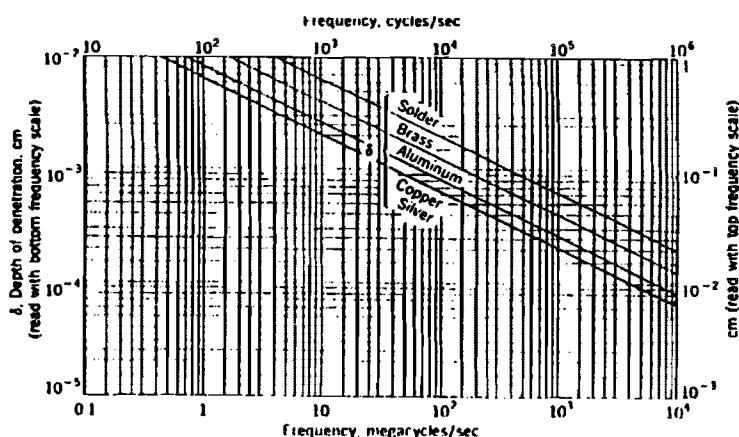
$$k = \pm \sqrt{\omega \frac{\mu}{\rho}} \cdot \frac{1+j}{\sqrt{2}} \quad \text{en} \quad \delta = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{\omega \cdot \rho}} \quad \Leftrightarrow \quad k = \frac{1+j}{\delta}$$

Oplossing van de differentiaal vergelijking met de randvoorwaarde  $a = E(t=0) = E_0$

$$E_z = E_0 \cdot e^{-\left(\frac{1+j}{\delta}\right)x} \cdot e^{j\omega t} = E_0 \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} \cdot e^{j\left(\omega t - \frac{x}{\delta}\right)}$$

$$E_z = E_0 \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} \cdot \left( \cos\left(\omega t - \frac{x}{\delta}\right) + j \sin\left(\omega t - \frac{x}{\delta}\right) \right) \quad (1.16)$$

De bovenstaande oplossing laat een signaal zien dat volgens een e-macht uitdempt. In de onderstaande figuur staat de skindiepte weergegeven als functie van de frequentie en het soort materiaal.



Met deze oplossing van de differentiaalvergelijking kan de numerieke oplossing, die in de volgende paragraaf wordt behandeld, worden getest op nauwkeurigheid. Een verdere uitwerking van de mathematische oplossing is voor dit probleem niet van toepassing en is achterwege gelaten.

## 1.5 Numerieke oplossing

### 1.5.1 Inleiding

Het zoeken naar de juiste numerieke oplossing heeft in mijn afstudeerproject de meeste tijd in beslag genomen. In deze paragraaf zal van dit gedeelte van het onderzoek worden beschreven wat belangrijk wordt geacht. Mogelijke oplossingen die tot een dood spoor leiden zijn niet opgenomen in deze verslaglegging.

Het is mogelijk om met behulp van de gevonden oplossing in de voorgaande paragraaf een simulatie-model te maken geschikt voor de computer. Een nadeel van een dergelijk simulatie-model is het grote aantal rekenhandelingen en hierdoor een grote bezetting van de processor waardoor het simulatie-model traag wordt en ongeschikt voor een demonstratie. Het is wel de meest nauwkeurige methode maar door het vinden van een numerieke oplossings-methode wordt het mogelijk een snel doch nauwkeurig, afhankelijk van de toegepaste methode, simulatie model op te zetten.

### 1.5.2 Matrix-voorstelling

In deze paragraaf wordt het toegepaste numerieke model beschreven en de aanpassing hierop om een beter simulatie-model te krijgen. Er wordt weer van de tijdsafhankelijke differentiaalvergelijking uitgegaan en geprobeerd deze te benaderen met behulp van numerieke methoden. De in het programma toegepaste notaties zijn :

$$\text{skindiepte } \delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}}$$

$$p = -(2 + \frac{\mu}{\rho} \frac{dx^2}{dt}) ; \quad r = \frac{\rho}{\mu} \frac{dt}{dx^2}$$

$$dx = \frac{\text{breedte materiaal}}{\text{matrix lengte}} ; \quad dt = \frac{dt}{2\pi\rho\delta}$$

Het programma vult een matrix volgens de volgende vergelijking:

$$E_{0,1} - (2 + \frac{\mu}{\rho} \frac{dx^2}{dt}) E_{1,1} + E_{2,1} = -(\frac{\mu}{\rho} \frac{dx^2}{dt}) E_{1,0} \quad (1.17)$$

en krijgt dan de volgende matrix invulling met horizontaal de positie van het te bepalen punt, en verticaal 'Number of equation' rond dit punt. Horizontaal in de matrix staat de vergelijking ingevuld.

\	1	2	3	4	5	6	7	⇒	matrix-1	0
1	1	p	1	-	-	-	-	⇒	-	-H/r
2	-	1	p	1	-	-	-	⇒	-	-H/r
3	-	-	1	p	1	-	-	⇒	-	-H/r
4	-	-	-	1	p	1	-	⇒	-	-H/r
5	-	-	-	-	1	p	1	⇒	-	-H/r
6	-	-	-	-	-	1	p	⇒	-	-H/r
7	-	-	-	-	-	-	1	⇒	-	-H/r
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	⇒↓	↓	↓
n	-	-	-	-	-	-	-	⇒	1	-H/r

Omdat deze matrix voor het grootste gedeelte niet wordt gevuld met data wordt de matrix veranderd in een tri-angulaire matrix en komt dan uit te zien zoals weergegeven in onderstaande matrix. Deze matrix wordt door het algoritme gebruikt om de uitdemping van het signaal in het materiaal te berekenen. In de onderstaande matrix staat in verticale richting de vergelijking tegen horizontaal de positie van het punt van deze vergelijking.

\	1	2	3	4	5	6	7	⇒	matrix-1
0	-H/r	-H/r	-H/r	-H/r	-H/r	-H/r	-H/r	⇒	-H/r
1	1	1	1	1	1	1	1	⇒	1
2	p	p	p	p	p	p	p	⇒	p
3	1	1	1	1	1	1	1	⇒	1

Voordat deze link kon worden gelegd tussen de  $4*n$  en  $n*n$  matrix en de daaraan verbonden toegepaste numerieke methode zijn er verschillende foutieve methodes op het probleem losgelaten. Een van de mogelijkheden was de Crank-Nicolson methode, die in de volgende paragraaf wordt behandeld omdat dit algoritme de oplossing het meest benaderde. De methode van Euler werd ook onderzocht.

De matrix wordt voor ieder nieuw tijdstip opnieuw berekend. Een enkele matrix berekening geeft het verloop weer van het indringende signaal op een bepaald moment.

Er is nog geen rekening gehouden met de invulling van de randvoorwaarden. Deze worden in de volgende matrix-voorstelling ingevoerd.

De randvoorwaarden die in het programma gelden zijn :

- $E [0,1] = H [0,1] = \hat{u} \cdot \sin (2\pi \cdot t)$      $E [1,0] = E [1,0] - H [0,1]$
- $E [\text{matrix}-1,2] = p+1$
- $E [1,1] = 0$
- $E [\text{matrix}-1,3] = 0$

De eerste randvoorwaarde is het bekende aangelegde sinusvormig veld dat in de tijd in het materiaal in amplitude varieert. De derde en vierde randvoorwaarden veronderstellen dat de intredende en uittredende golf loodrecht op het materiaal staan. Deze, door de programmeur gemaakte veronderstelling, is niet correct als het materiaal niet vele malen dikker is dan de skindiepte. Hierop is een aanpassing gemaakt, maar hierover later meer.

Tot zover is het programma, wat betreft de beginsituatie, op te splitsen in kleinere stukjes. Hierop volgt het algoritme om een in tijd en plaats veranderende oplossing te elimineren. Voordat verdere uitleg hierover wordt gegeven, eerst het onderzoek naar het algoritme voor het invullen van de matrix. Als eerste is de Cranck-Nicolson methode nader bekeken waarna de uiteindelijke juiste oplossing, de Finite-Difference methode. Deze laatste methode wordt in de volgende paragrafen beschreven.

### 1.5.3 Het Finite Difference algoritme

De in deze paragraaf beschreven methode lijkt op de Cranck-Nicolson methode, echter mider nauwkeurig. De methode wordt weergegeven in de onderstaande figuur 1.5

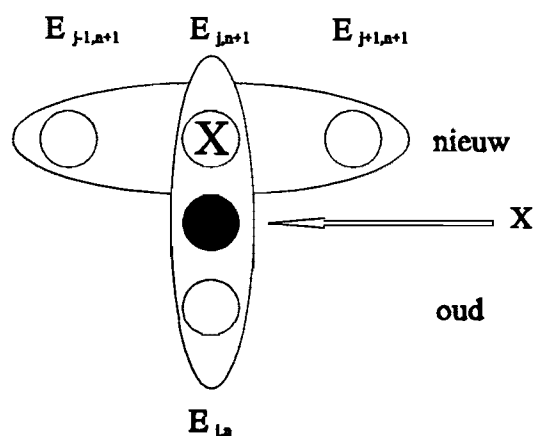


fig. 1.5 Finite Differences methode

De in de nevenstaande figuur afgebeelde Finite-Difference methode kent enige gelijkenis met de Crank-Nicolson methode. Het punt in het midden, dat nu wordt bepaald uit het gelijk stellen van 2 vergelijkingen (aangegeven met een ellips), zal niet precies in het midden liggen zoals weergegeven, maar iets dichterbij de waarden van de nieuwe vergelijking.



Voor het vertalen van de schematische voorstelling van het algoritme naar de wiskundige omschrijving gaan we uit van de differentiaalvergelijking (1.12):

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{E_{j,n+1} - E_{j,n}}{dt} \quad \text{en} \quad \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{E_{j-1,n+1} - 2E_{j,n+1} + E_{j+1,n+1}}{dx^2} \quad (1.18)$$

$$\frac{\mu}{\rho} \frac{E_{j,n+1} - E_{j,n}}{dt} = \frac{E_{j-1,n+1} - 2E_{j,n+1} + E_{j+1,n+1}}{dx^2} \quad (1.19)$$

Na uitwerken van de vergelijking geldt het volgende:

$$E_{j-1,n+1} - \left(2 + \frac{\mu}{\rho} \frac{2dx^2}{dt}\right) E_{j,n+1} + E_{j+1,n+1} = -\left(\frac{\mu}{\rho} \frac{dx^2}{dt}\right) E_{j,n} \quad (1.20)$$

In het programma noemen we:

$$p = -\left(2 + \frac{\mu}{\rho} \frac{dx^2}{dt}\right) \quad \text{en} \quad r = \frac{\rho}{\mu} \frac{dt}{dx^2}$$

waardoor de matrix gevuld wordt met de volgende vergelijkingen: (zoals te zien is in paragraaf 1.5.2.)

$$1 E_{j-1,n+1} + p E_{j,n+1} + 1 E_{j+1,n+1} = -\frac{1}{r} E_{j,n} \quad (1.21)$$

In paragraaf 1.5.2 is al een begin gemaakt met het invullen van de matrix. Nu de methode bepaald is, kan verder worden gegaan en dit staat beschreven in de volgende paragraaf 1.5.5. Verder komt in deze paragraaf ook aan bod de interpretatie van de randvoorwaarden met de daaraan gemaakte wijzigingen zoals al eerder vermeld.

### 1.5.4 De matrix-oplossing methode

Het te onderzoeken algoritme maakt gebruik van een tri-angulaire matrix, beschreven met vergelijking 1.21, welke het resultaat is van de finite-difference methode. Het oplossen van een dergelijke matrix waarvan enkel de randvoorwaarden bekend zijn, kan met behulp van een ADI-methode (lit 5). ADI is de afkorting voor Alternating Direction Implicit methode hetgeen betekent terug substitutie van de matrix. Dit wordt gebruikt na een Gauss-eliminatie of na de methode van Crout. Voordat de oplossingsmethode wordt behandeld, moeten eerst de randvoorwaarden op de juiste manier worden geïnterpreteerd en ingevuld. Er gelden twee verschillende soorten randvoorwaarden, namelijk het intredende (links) en het uittredende vlak (rechts).

Het intredende signaal aan de linkerzijde van de matrix levert de volgende vergelijking op :

$$0 E_{0,1} - (2 + \frac{\mu}{\rho} \frac{dx^2}{dt}) E_{1,1} + 1 E_{2,1} = -\frac{\mu}{\rho} \frac{dx^2}{dt} - \hat{u} \cdot \sin(2\pi f \cdot t) \tag{1.22}$$

Hier is voor  $E_{0,1}$  de aangelegde sinus ingevuld en naar de rechterkant van het is-gelijk teken gebracht. Hiervoor moet voor de  $E_{0,1}$  een nul staan.

Voor de rechterzijde van het materiaal en dus van de matrix wordt aangenomen dat het uittredende signaal geen amplitude meer heeft en de afgeleide hiervan gelijk is aan nul.

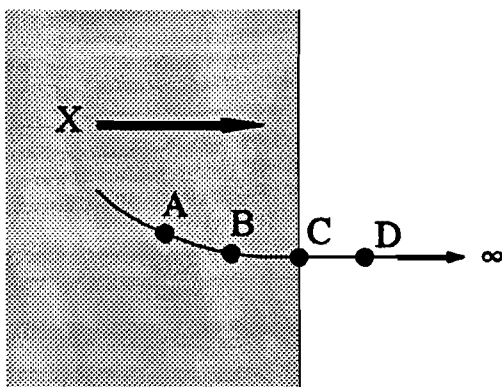


fig. 1.5 Enkelzijdige intreding signaal

In figuur 1.5 staat het signaal weergegeven. Deze aanname in het programma mag alleen als er van wordt uitgegaan dat het materiaal vele malen dikker is dan de skindiepte zodat de afgeleide van het signaal op het verste punt gelijk is aan 0. Is dit niet het geval of is er een dubbelzijdige intreding van het signaal dan mag deze aanname niet worden gemaakt.

$$\frac{\frac{D - C}{dx} - \frac{C - B}{dx}}{dx} \rightarrow -\frac{C - B}{dx^2} = 0$$

Als aan de eisen van dikte en enkelzijdige intreding van het signaal wordt voldaan mag hiervan worden uitgegaan en geldt de volgende vergelijking :

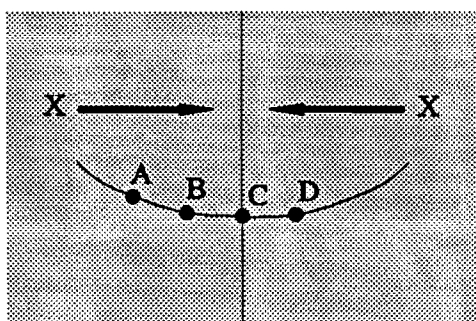
$$1 E_{0,1} + ((- (2 + \frac{\mu}{\rho} \frac{dx^2}{dt})) + 1) E_{1,1} + 1 E_{2,1} = -\frac{\mu}{\rho} \frac{dx^2}{dt}$$

Het uitwerken van deze vergelijking levert de onderstaande formule en laat zien dat er wordt uitgegaan van de situatie zoals in figuur 1.5 is geschetst.

$$\frac{E_{0,1} - E_{1,1} + 0}{dx^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{E_{1,1} - E_{1,0}}{dt}$$

Als het materiaal niet dik is ten opzichte van de skindiepte en/of als er is sprake van twee-zijdige indringing van een signaal dan mag niet meer van bovenstaande oplossingsmethode worden uitgegaan. Er geldt dan niet meer dat het signaal geen amplitude meer heeft en dat de afgeleide van het signaal daarom nul is. Figuur 1.6 geeft weer het signaalverloop indien niet aan bovenstaande voorwaarden wordt voldaan.

In deze afbeelding wordt aangenomen dat punt B en D dezelfde amplitude hebben waardoor de volgende oplossing geldt :



$$\frac{D-C}{dx} - \frac{B-C}{dx} \Rightarrow \frac{B-D}{dx^2} = 0$$

De tweede afgeleide van het gespiegelde signaal is nul.

fig. 1.6 Dubbelzijdige intrede van het signaal

In het programma is een verandering aangebracht om aan beide oplossingsmethoden te kunnen voldoen door het toevoegen van:

```
IF mirror THEN E[matrixlength-1,1] := 2 * E[matrixlength-1,1]
ELSE E[matrixlength-1,2] = p+1
```

Deze uitbreiding maakt het programma veelzijdiger en nauwkeuriger. Wordt een materiaaldikte kleiner dan 3 à 4 keer de skin-diepte gekozen dan wordt er een fout gemaakt bij het uittreden van het signaal. Dit signaal is dan niet meer nul in de tijd en varieert waardoor niet meer aan figuur 1.5 wordt voldaan.

In bijlage 1 is het pascal programma *MAGNKOPP.PAS* opgenomen. Dit programma is het resultaat van de studie naar het skin-effect. Het is aangepast zodanig dat het programma overzichtelijk is, gemakkelijk te begrijpen en geschikt voor een demonstratie.

De matrix die in het begin is ontstaan, kent  $N-2$  vergelijkingen voor  $N$  onbekenden. Na het invullen van de randvoorwaarden van het aangelegde signaal en de situatie aan de andere zijde van het materiaal wordt de matrix oplosbaar. Het oplossen van de matrix is in het programma in stukken opgedeeld. Om het programma te kunnen begrijpen worden nu de diverse delen van de oplossingsmethode elk afzonderlijk besproken.

Om te beginnen wordt een tri-diagonale matrix geïnitieerd en ingevuld volgens vergelijking 1.17 of 1.21 afhankelijk van de dikte van het materiaal en de skindiepte. Deze matrix is in paragraaf 1.5.2 beschreven. Daarna worden de randvoorwaarden in de matrix verwerkt en kan de matrix opgelost worden, de eerste en laatste term zijn immers bekend.

De volgende stap is het maken van een eenheidsmatrix door partial pivoting.

FOR x = 1 TO matrixlength-2 DO

○  $E[x,3] = E[x,3] / E[x,2]$

○  $E[x,0] = E[x,0] / E[x,2]$

Hierdoor wordt :

○  $E[x,2] = 1$

Door de volgende regels in de zelfde FOR-lus wordt de eenheidsmatrix compleet :

○  $E[x+1,2] = E[x+1,2] - E[x+1,1] * E[x,3]$

○  $E[x+1,0] = E[x+1,0] - E[x+1,1] * E[x,0]$

○  $E[x+1,1] = 0$

In werkelijkheid, gezien vanuit de eigenlijke vierkante matrix, ziet de oplossing van de matrix er als volgt uit:

0.x1	p.x2	1.x3	-	-	-	-	y1
-	1.x2	p.x3	1.x4	-	-	-	y2
-	-	1.x3	p.x4	1.x5	-	-	y3
-	-	-	1.x4	p.x5	1.x6	-	y4
-	-	-	-	1.x5	(p+1).x6	0.x7	y5

Met behulp van de methode van Gauss, delen door de pivot en van de onderstaande vergelijking aftrekken, ontstaat de volgende matrix :

0	1.x2	1/p.x3	-	-	-	-	y1/p
-	0	1.x3	1/p.x4	-	-	-	y2/p
-	-	0	1.x4	1/p.x5	-	-	y3/p
-	-	-	0	1.x5	1.x6	-	y4/p
-	-	-	-	0	a.x6	0	y5/p

Eerst wordt met de methode van Gauss de matrix vereenvoudigd. Nu is het mogelijk met behulp van een ADI-methode, dit wil zeggen terug-substitutie, de matrix te berekenen en dan zijn voor dit bepaalde tijdstip de waarden van het signaal op de desbetreffende plaats bekend. Afhankelijk van de gekozen methode, enkelzijdige of dubbelzijdige intreding, ontstaat de variabele a.X6, maar is voor de oplossingsmethode niet van belang.

Nu de matrix opgelost is kan de matrix worden uitgelezen en worden afgebeeld op het beeldscherm.

Het simulatieprogramma zal de gebruiker een aantal parameters vragen. Deze zijn de frequentie van het signaal, het soort materiaal (zie onderstaande tabel) en welke oplossingsmethode de gebruiker wil zien (enkelzijdige of gespiegeld).

\	$\rho$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$\mu_r$	$\delta$ [m]	$\delta(f=50 \text{ Hz})$	$\mu/\rho$
Cu	$1,75 \cdot 10^{-8}$	1	$0,066/\sqrt{f}$	$9,42 \cdot 10^{-3}$	71,8
Fe	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^3$	$0,005/\sqrt{f}$	$7,12 \cdot 10^{-4}$	12566,4
Aarde	100	1	$5033/\sqrt{f}$	712	$1,257 \cdot 10^{-8}$

In de onderstaande figuur is een samengesteld beeld te zien van het skin-effect direct na opleggen van het signaal. De figuur laat een inschakelverschijnsel zien dat na enkele perioden uitdempt. Het beeld komt er dan als volgt uit te zien met :

- Aantal matrixpunten = 200
- $\mu/\rho = 73$
- $f = 50$  Hz
- Enkelzijdige intreding van het signaal
- $\delta = 0,00934$  m, de gekozen materiaaldikte = 0,03 m

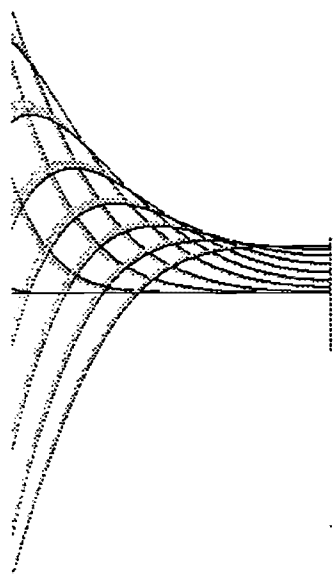


fig. 1.8a Inschakelverschijnsel

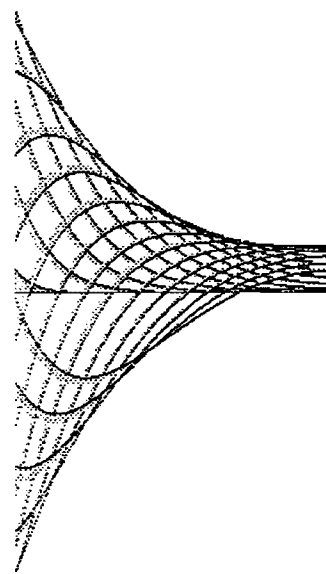


fig. 1.8b Inschakelverschijnsel

In het tweede beeld is het skin-effect zichtbaar gemaakt in de quasi-stationaire toestand met dezelfde uitgangsgrootheden als in de vorige figuur. Het signaal kan tijdens het actief zijn van het programma worden veranderd in frequentie waardoor het signaal in het materiaal van vorm verandert.

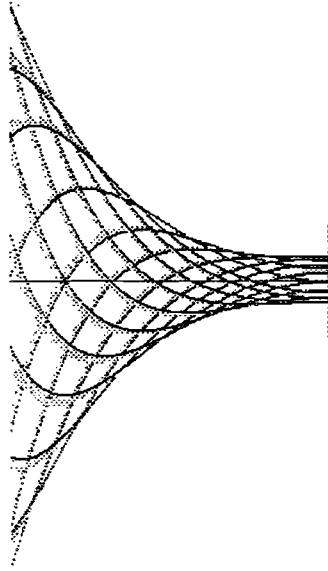


Fig 1.9 Quasi-stationaire toestand van het signaal

Wordt de frequentie van het signaal groter dan zal de skin-diepte afnemen. Het signaal dringt minder diep in het materiaal door. In de onderstaande afdruk van het computer-beeld is afgebeeld een frequentieverhoging na de quasi-stationaire toestand van de bovenstaande figuren. Te zien is dat het materiaal een soort geheugenwerking heeft. Het duurt enkele perioden, afhankelijk van de frequentie-verhoging, voordat het voorgaande signaal geheel is uitgedempt.

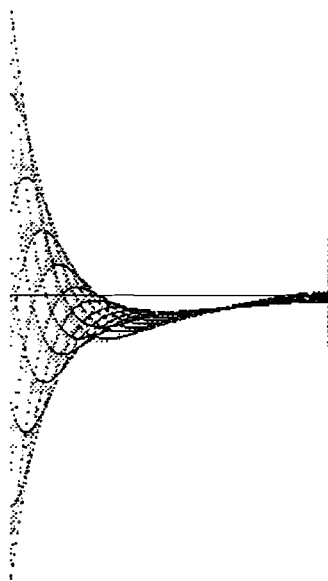


fig. 1.10 Frequentie-verandering

## 1.6 Conclusies en aanbevelingen

In dit eerste gedeelte van het rapport is het simulatie-programma van het skin-effect uitvoerig onderzocht. In het begin van het project was het programma nog niet goed bruikbaar voor demonstraties. Er zat vrijwel geen structuur in en was hierdoor zeer moeilijk te begrijpen. Het is van belang dat de werking van het programma enigszins bekend is om het te kunnen herschrijven.

Het programma is nu gestructureerd herschreven, aan variabelen is een herkenbare naam gegeven en het programma is voorzien van enig commentaar om de leesbaarheid van het programma te vergroten. Met dit verslag naast het programma is snel duidelijk wat er wordt berekend, en is het mogelijk het programma snel uit te breiden of de oplossingsmethode uit te filteren en te gebruiken voor andere toepassingen met gelijksoortige problemen.

Verder is het programma uitgebreid met een keuze voor enkelzijdige of dubbelzijdige indringing van het signaal in het materiaal. Dit maakt het programma nauwkeuriger voor die gevallen waarin de materiaal-dikte kleiner is dan 3 maal de indringdiepte. Voor deze gevallen gelden andere randvoorwaarden waardoor de oplossing verandert en voor deze gevallen nauwkeuriger wordt. In het programma is de keuze *Simulatie spiegelen (j/n)* voor een dergelijke situatie.

Door een uitbreiding van het simuleren van het skin-effect is naast het geval van een indringing in een vlakke plaat ook mogelijk een model te maken van het skin-effect in een cilindrische vorm. Het programma moet dan van andere randvoorwaarden worden voorzien, maar de oplossingsmethode blijft identiek. Er is een versie in het bezit van de TU-EHC maar deze is nog niet gecontroleerd op juistheid en nauwkeurigheid. Daarnaast zal deze versie ook geheel moeten worden herschreven om het programma leesbaar te maken.

Een verbetering van de executie-tijd wordt bereikt door het herschrijven van het programma in de programmeertaal C. Een eerste versie blijkt ongeveer een factor 3 sneller te simuleren. Een mogelijke versnelling is het gebruiken van pointers, vooral in de programmeertaal C, maar dit is nog niet onderzocht.



## 2 Het ontwerpen van een piëzo-hoogspanningsgenerator

### 2.1 Inleiding

Het tweede gedeelte van het afstudeerproject is het ontwerpen van een demonstratiemodel om het fenomeen magnetisch gekoppelde velden aan te tonen. Het ontwerp zal worden gebruikt op VWO-dagen waar deelnemers een dergelijk model zelf kunnen maken en dan mogen meenemen. Het is noodzaak dat het ontwerp eenvoudig is en niet veel geld kost. Het project is gebaseerd op de trial and error methode. Bert van Heesch had vooraf al enige berekeningen uitgevoerd naar de haalbaarheid van het project en geconcludeerd dat het mogelijk moest zijn. Het was niet nodig om vooraf een literatuurstudie naar het onderwerp te doen. Toen uiteindelijk bleek dat het ontwerp niet aan de verwachtingen voldeed, zijn er metingen verricht en enkele berekeningen gemaakt om dit te kunnen verklaren.

In dit hoofdstuk wordt het verloop van het ontwerp van een piëzo-hoogspanningsgenerator stap voor stap beschreven in de volgende volgorde : eerst de ontwerpfase, de realisatie van het model, de metingen, enkele berekeningen en de conclusie.

## 2.2 Het ontwerp

Het ontwerp van de piëzo-hoogspanningsgenerator moet aan een paar eisen voldoen. Ten eerste moet het model de demonstratie zijn in het kader van magnetisch gekoppelde ketens en het moet door deelnemers aan de VWO-dagen zelf gebouwd kunnen worden. Dit model mogen zij dan behouden. Daarom mogen de kosten van het model niet te hoog zijn.

Ten grondslag aan het model ligt het fenomeen magnetisch gekoppelde ketens en hoogspanning. Deze hoogspanning wordt gegenereerd door een piëzo-elektrische gasaansteker die in veel huishoudens wordt gebruikt.

Om aan te kunnen tonen dat er magnetisch gekoppelde ketens bestaan, is het idee ontstaan om door een spoel een stroom te laten vloeien door een spoel waardoor er een magnetisch veld ontstaat. Op deze spoel bevindt zich een kortgesloten ring die de magnetische flux van de spoel omsluit en waardoor er in de ring een tegengestelde stroom gaat vloeien. Deze stroom zal in de ring een tegengesteld magnetisch veld opwekken waardoor de ring en de spoel elkaar zullen afstoten. Eerste berekeningen wezen uit dat bij ongeveer 10 kV de ring 150 mm de lucht in zou worden geschoten en hiermee zou het bewijs zijn geleverd. Het ontwerpen kon beginnen.

De spanning afkomstig van een piëzo-element is nietsinusvormig maar kent positieve en negatieve perioden. Het in elkaar drukken van het element geeft een positieve spanning, het in rusttoestand komen een negatieve spanning. Een eigenschap van een piëzo-element is zijn hoge spanning maar dit wel bij een onbelaste toestand. Zodra het element wordt belast en er een stroom gaat vloeien, zakt de spanning in elkaar. Toch wordt er een stroom gewenst om een magnetisch veld op te kunnen wekken. Om toch een hoge spanning en een forse stroom op te wekken wordt de energie van het piëzo-element in een condensator gepompt via een diode-brug om zowel de positieve als negatieve spanning te kunnen gebruiken. Bij iedere indrukking wordt er lading aan de condensator toegevoegd en de condensatorspanning zal oplopen. In de onderstaande figuur is een oscillogram weergegeven van een opstelling gemaakt met een differentiërende meetprobe met daarnaast het geïntegreerde signaal van een indruk-rust periode van een piëzo-element.

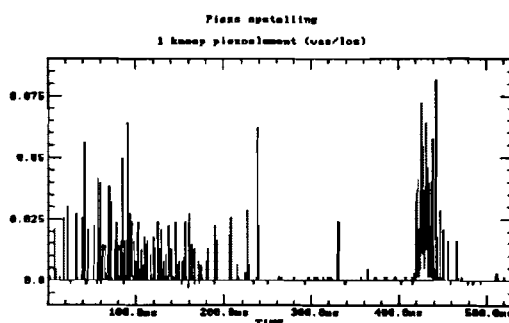


fig. 2.1a Gedifferentieerd gemeten signaal

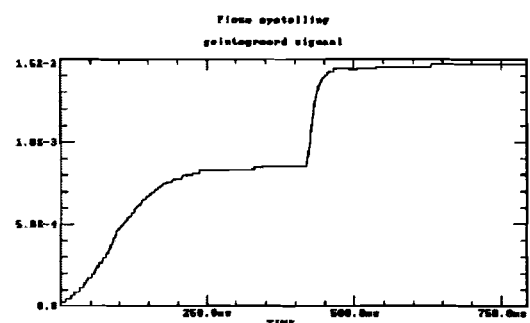


fig. 2.1b Geïntegreerd signaal

Als de condensator genoeg energie bevat, dus als de condensatorspanning hoog genoeg is, dan zal een vonkbrug ontstoken worden, spontaan of gedwongen, en de condensator ontlaaft zich over een in serie geschakelde spoel. Tijdens de doorslag bestaat een gesloten LC-kring en hierdoor zal de stroom met de systeem-frequentie  $\omega_0$  gaan vloeien.

Het onderstaande principe schema toont de schakeling met de benodigde componenten. Als eerste werd gelijkgericht door de schakeling met een enkele diode uit te voeren maar al snel blijkt dat de haalbare spanning met behulp van een diode-brug veel hoger is, enwel 14 kV in plaats van 8 kV.

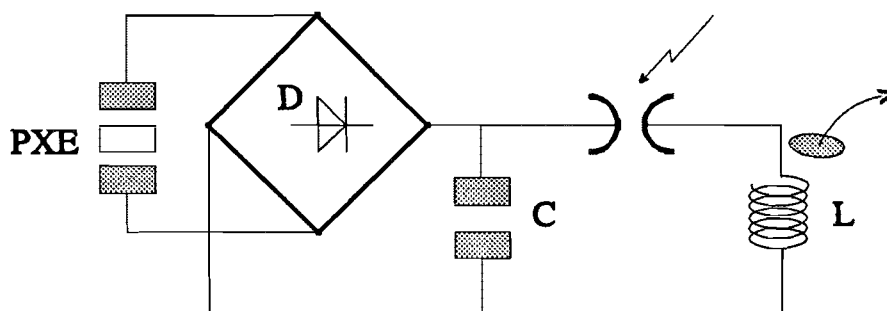


fig. 2.2 Principe schema piëzo-hoogspanningsgenerator

Bij de eerste ontwerpen varieerde het aantal windingen van de spoel van 1 tot 100. Verder is spoel uitgevoerd met een ferrietkern om de flux te bundelen. Maar het model voldeed niet aan de belangrijkste eis : het aantonen van het aanwezig zijn van een magnetisch gekoppelde keten. Deze modellen zijn uitgevoerd met relatief lange draden tussen de vonkbrug en de spoel waardoor veel verliezen ontstaan.

In de onderstaande figuren is een cyclus gemeten van pompen met het piëzo-element tot de doorslag. Links is het oscillogram weergegeven gemeten met een differentiërende meetprobe met rechts het geïntegreerde signaal. De doorslag, de negatieve piek, loopt echter buiten de meetgrens waardoor het geïntegreerde signaal een rest lading laat zien na de doorslag. Maar metingen tonen dat de C zich geheel ontlaaft tijdens de doorslag.

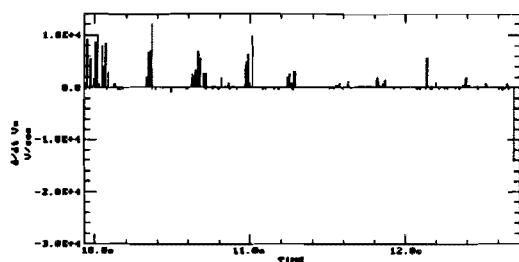


fig. 2.3a Oscillogram systeem-cyclus

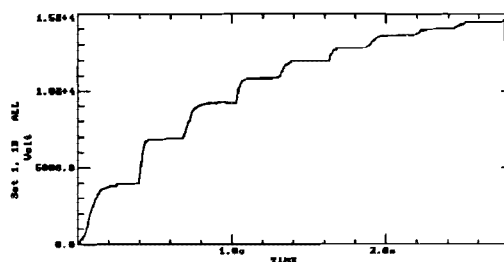
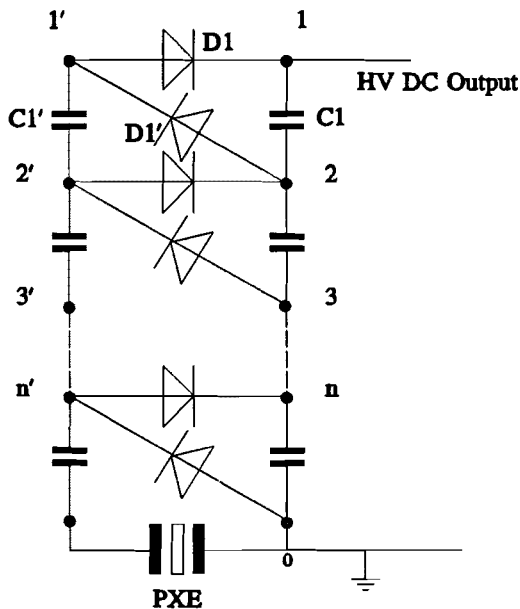


fig. 2.3b Geïntegreerd signaal

Een andere poging is het verhogen van de spanning omdat de energie in het systeem als volgt is gedefinieerd :

$$\text{Energiebeschouwing} \leftrightarrow \frac{1}{2} C.U^2 = m.g.h \tag{2.1}$$

Een methode om de spanning te verhogen is met behulp van een cascade schakeling, ook wel de Greinacher-schakeling genoemd. In figuur 2.2 is het schema van een cascade-schakeling getekend.



Met behulp van een dergelijke schakeling kan de spanning afhankelijk van het aantal trappen worden verdubbeld volgens de volgende vergelijking :

$$U_{\text{max}} = 2 * n * U_{\text{source}}$$

met : n = aantal trappen

Deze formule geldt alleen voor een ideale situatie omdat er geen rekening is gehouden met verliezen en lekweerstand van de condensatoren.

fig. 2.2 Greinacher cascade schakeling

In de gebouwde 3-traps cascade-schakeling wordt echter maar een maximale spanning bereikt van ongeveer 18 kV welke zeer snel weglekte. Tevens zijn er duidelijk hoorbaar corona-verliezen aanwezig.

Het ontwerp moet dus compact zijn, vooral de weg tussen de condensator, vonkbrug en de spoel. Hierdoor is een zo inductie-arm mogelijke schakeling met zo laag mogelijke transport verliezen van de stroom ontstaan. Deze eisen zijn verwerkt in het huidige model, weergegeven in figuur 2.4.

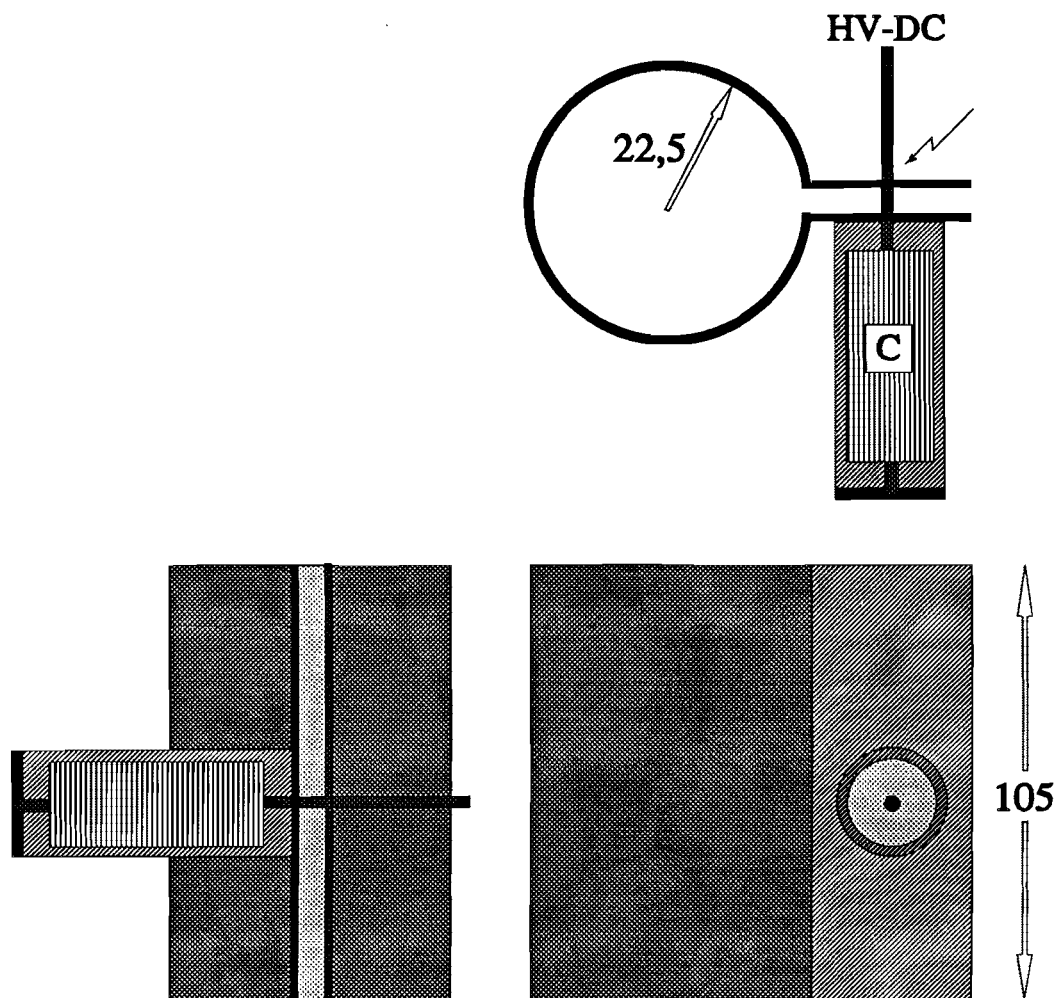


fig. 2.4 Projectie inductie-arm model

Van dit systeem is de inductie te berekenen met de volgende formule :

$$L \approx \frac{\mu_0 \cdot A \cdot n^2}{l} \approx \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot (22,5 \cdot 10^{-3})^2}{105 \cdot 10^{-3}} \approx 19,034 \text{ nH}$$

Maar ook dit model is niet in staat om de afstotende kracht tussen de spoel en de ring te laten zien. Wel zijn aan dit model diverse metingen en berekeningen gedaan. Deze gegevens worden in de volgende paragraaf behandeld.

## 2.4 Meetresultaten

De metingen die in deze paragraaf worden behandeld, zijn met behulp van een Nicolet geheugen oscilloscoop gedaan. Deze oscilloscoop heeft de mogelijkheid om zeer snelle signalen te meten en de meetresultaten op diskette vast te leggen en achteraf, met het programma VU-POINT, de data te kunnen analyseren.

De metingen zijn gericht om te kunnen bepalen wat voor stromen er gaan vloeien op het doorslag moment. Aan de hand van deze stroom kan berekend worden waarom het model het ringetje niet kan laten wegschieten.

De metingen zijn gemaakt door op het model een één-winding differentiërende meetlus geïsoleerd te monteren. De meetwaarden worden via een passieve integrator naar de oscilloscoop gevoerd en opgeslagen. De integratietijd van de integrator is te berekenen uit  $\tau_i = R.C = 9,72 \text{ k}\Omega * 9,856 \text{ nF} = 95,80 \mu\text{s}$ .

Hierdoor wordt de maximale meettijd  $0.1 * \tau_i = 9,580 \mu\text{s}$ . Tijdens het meten moet er op worden gelet dat deze tijd niet wordt overschreden omdat anders de meetresultaten niet correct zijn. De metingen die betrekking hadden op de doorslag van de piëzo-hoogspanningsgenerator liggen in de orde van 500 ns.

De oscillogrammen zijn met behulp van VU-POINT bewerkt. Het eerste resultaat is een oscillogram van een doorslag (zonder een ring) en is weergegeven in onderstaande figuur.

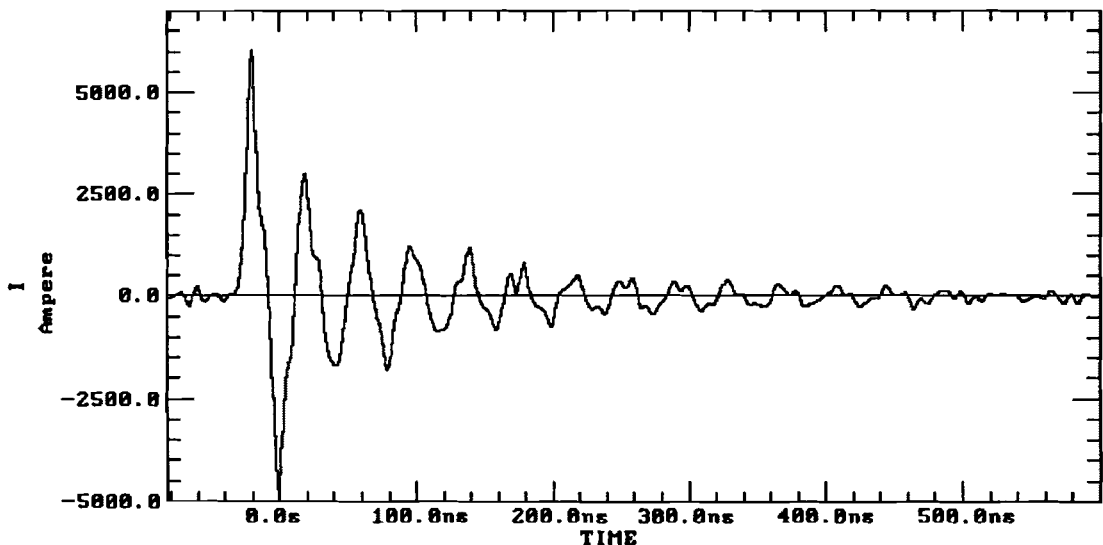


fig. 2.5 Oscillogram doorslag I [A]

Uit de bovenstaande oscillogram is de systeem-frequentie te bepalen en hiermee nog enkele belangrijke parameters namelijk :

$$T = 51,33 \cdot 10^{-9} \text{ s} \quad \leftrightarrow \quad f = 19,482 \text{ MHz} \quad \leftrightarrow \quad \omega = 122,408 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$$

Uit de systeem-frequentie is onder andere de inductie van het gehele systeem te bepalen door :

$$Vu = \frac{d\phi}{dt} = \omega \cdot B \cdot A \quad \leftrightarrow \quad B = \frac{14 \cdot 10^3}{122,4 \cdot 10^6 * \pi * (22,5 \cdot 10^{-3})^2} = 71,91 \text{ mT}$$

$$I \approx \frac{B \cdot h}{\mu_0} \approx \frac{71,91 \cdot 10^{-3} * 105 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \approx 6008,75 \text{ A}$$

$$\phi = B \cdot A = 71,91 \cdot 10^{-3} * \pi * (22,5 \cdot 10^{-3})^2 = 114,368 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}$$

$$L_1 \approx \frac{\phi}{I} \approx \frac{114,368 \cdot 10^{-6}}{6008,75} \approx 19,033 \text{ nH}$$

$$L_2 = \mu_0 \cdot R_0 \left\{ \ln \left( \frac{8 \cdot R_0}{a} \right) - 2 \right\} \quad \leftrightarrow \quad M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

$$I_2 = M \cdot \frac{I_1}{L_2} \quad \leftrightarrow \quad F(t) = B_{12} \cdot I_2 \cdot 2\pi r \quad \leftrightarrow \quad F(t) = I_1^2 \cdot \frac{2\pi r \cdot \mu_0}{h} \cdot k \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}$$

In de onderstaande tabel zijn de berekende en gemeten gegevens van de gebruikte ringetjes weergegeven. Met deze gegevens kan verder worden gerekend en de oscillogrammen verder worden bewerkt.

A [mm <sup>2</sup> ]	m [g]	a [mm]	L <sub>2</sub> [nH]	M/k [nH]	Φ <sub>1</sub> /Φ <sub>2</sub> []	I <sub>2 max</sub> [A]
0,75	0,95	0,489	110,5	45,86	0,792	1975,06
1,50	1,90	0,691	100,7	43,78	0,570	1489,04
2,50	3,16	0,892	93,5	42,19	0,862	2337,16

Gekoppelde flux  $\phi_{12} \approx B \cdot A$

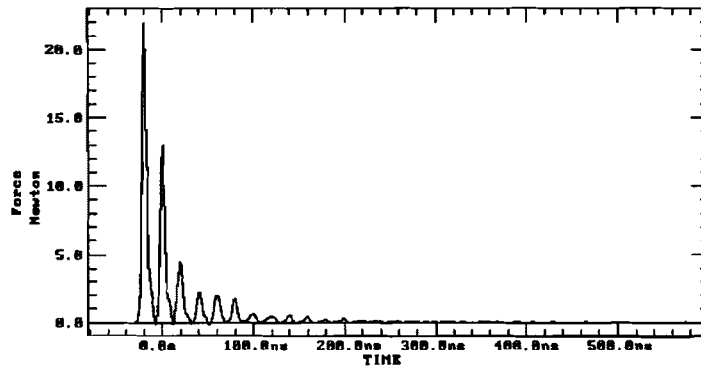
$$F(t) \approx \phi_{12}(t) \cdot I_2(t) \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot R_0}{\pi \cdot R_0^2} = \hat{F} \cdot e^{-2\frac{t}{\tau}} \cdot \sin^2(\omega \cdot t)$$

$$F(t) = m \cdot a(t) \quad \leftrightarrow \quad a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

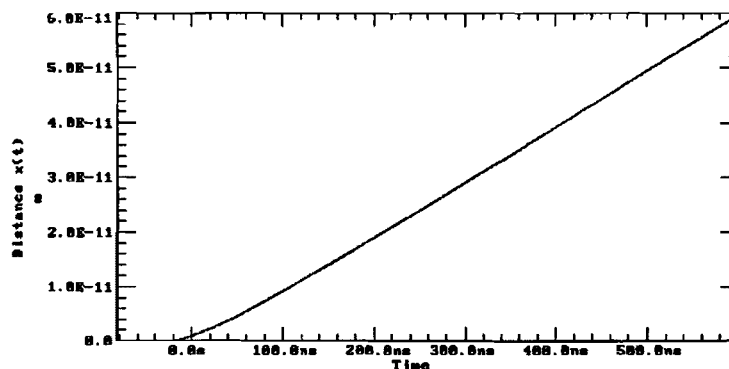
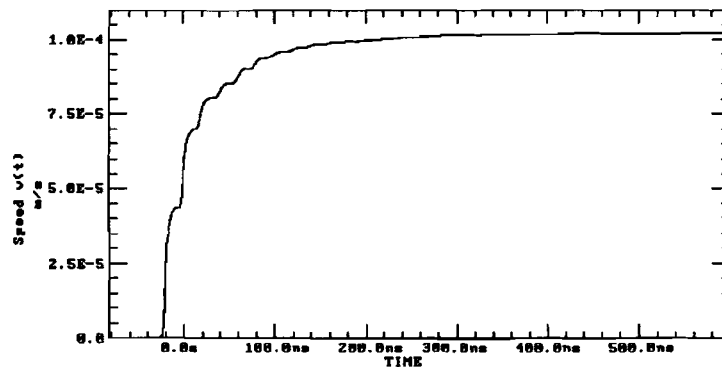
$$v(t) = \frac{dx}{dt} = \int_t a(t) \cdot dt$$

$$x(t) = \int_t v(t) \cdot dt = \int_t \left\{ \int_t a(t) \cdot dt \right\} dt$$

Aan de hand van voorgaande berekeningen is met behulp van VU-Point de onderstaande oscillogram berekend. Voor deze oplossing is gekozen omdat het analoog berekenen uitgaande van de formule voor de kracht erg ingewikkeld wordt. Het afgedrukte diagram is de kracht die een koperen ring met een doorsnede van  $2,5 \text{ mm}^2$  ondervindt.



Aan de hand van deze kracht op de ring kan de versnelling, snelheid en afgelegde afstand van het ringetje worden bepaald. In de onderstaande oscillogrammen staan de snelheid  $v(t)$  en afgelegde weg  $x(t)$  afgebeeld.



Deze metingen zijn ook gemaakt voor een  $1,5 \text{ mm}^2$  en een  $0,75 \text{ mm}^2$  ring en deze meetresultaten zijn in bijlage 3 afgedrukt.



## 2.5 Conclusie

Het tweede gedeelte van dit rapport is het ontwerpen van een piëzo-hoogspanningsgenerator beschreven. Het ontwerp is bedoeld om te dienen als demonstratiemodel op VWO-dagen. De demonstratie toont het bestaan van magnetisch gekoppelde ketens. De grondgedachte is dat de deelnemers aan deze VWO-dagen dit model na bouwen en het dan mee naar huis mogen nemen. Het moet een eenvoudig en niet te kostbaar model worden.

Eerste berekeningen, aan de hand van de energiebalans, toonde aan dat een op een spoel rustende kortgesloten ring wordt weg geschoten als er door de spoel een stroom gaat vloeien. De hoogte zou ongeveer 10 cm bedragen, niet rekening houdende met verliezen, luchtweerstand en de zwaartekracht die op het ringetje werken. Naar aanleiding van deze berekeningen is een model ontworpen.

Het model is opgebouwd uit een gasaansteker met een piëzo-element die het systeem van energie moet voorzien. De energie van het piëzo-element wordt met behulp van een diodebrug gelijk gericht waarmee een condensator wordt opgeladen. Bij voldoende lading, voldoende hoge spanning, ontsteekt een vonkbrug spontaan en de condensator wordt over een spoel ontladen. Het ontstaan van een tegengestelde stroom in het ringetje, door de opgewekte magnetische flux van de spoel, zal een tegenpool vormen.

Bij het eerste ontwerp moest de stroom tijdens een ontlading een lange weg afleggen door draden waardoor het systeem een hoge zelfinductie had. Het systeem werd verbeterd door een zelfinductie-arm ontwerp waarbij de weg tussen condensator, vonkbrug en spoel zo klein mogelijk is gemaakt. Door het verlagen van de zelfinductie wordt de stroom groter maar ook de systeemfrequentie. Ook werd er een Greinacher-cascade schakeling gebouwd om de spanning te verhogen omdat de energie van het systeem  $Q = \frac{1}{2} C \cdot U^2$ . Door grote lekverliezen, in de condensatoren en diodes, en het ontstaan van corona is ook dit ontwerp niet geschikt.

Omdat bij geen van de modellen het ringetje werd weggeschoten zijn er metingen verricht om dit te kunnen verklaren. In de één-winding spoel ontstaat een hoogfrequente (ongeveer 20 Mhz) stroom van ruim 6000 Ampère. In het 2,5 mm<sup>2</sup> ringetje een tegengestelde stroom van ruim 2000 A. Berekeningen wijzen uit dat de kracht op het ringetje een maximale waarde bereikt van 22 Newton, maar in 250 ns geheel is uitgedempt. Uit deze kracht is de snelheid en de afgelegde weg van het ringetje te berekenen. Maar door de korte duur van de kracht wordt het ringetje niet (zichtbaar) verplaatst.

## Literatuur verwijzingen

- 1     Auteur :  
      Inleiding in de numerieke methoden (TU-dictaat 2N210)  
      1.5    Tri-angulaire stelsels (p. 1.16 ev.)  
      7.1    Crank-Nicolson methode (p. 7.4 ev.)
  
- 2     Auteur : Prof. Dr. G.W. Veltkamp  
      Numerieke methoden (TU-dictaat 2.211 1972)  
      2.2    Directe methoden    Triangulaire stelsel (p. 29 ev.)  
                                  Eliminatiemethode van Gauss (p. 31 ev.)  
                                  Algoritme van Crout (p. 41 ev.)
  
- 3     Auteur : K. Kūpfmüller  
      Einführung in die theoretische Elektrotechnik (p. 308..350)
  
- 4     Auteur : L. Magid  
      Electro-magnetic Fields, Energy and Waves  
      A4    Uniform plane waves in lossy media (p. 763..773)
  
- 5     Auteur : E. Kreyszig  
      Advanced Engineering Mathematics (p. 299 ev. p. 503 ev.)
  
- 6     Auteur : S. Ramo  
      Fields and Waves in Communications Electronics (TU- LSE65RAM)  
      4    Maxwell's equations (p. 228..254)
  
- 7     Auteur : Jiří Lammeraner / Miloš Štafl  
      Eddy Currents  
      2    Skin effect (p. 15..44)

## Literatuurlijst

### Boeken

- Titel Einführung in die theoretische Electrotechnik  
 Auteur K. Küpfmüller  
 Uitgever Springer Verlag (1984)
- Titel Electro-magnetic Fields, Energy and Waves  
 Auteur L. Magid  
 Uitgever John Wiley & Sons Inc. New York
- Titel Advanced Engeneering Mathematics  
 Auteur E. Kreyszig  
 Uitgever John Wiley & Sons Inc. New York
- Titel Fields and Waves in Communications Electronics  
 Auteurs S. Ramo / J.R. Whinnery / T. v. Duzer  
 Uitgever John Wiley & Sons Inc. New York
- Titel Eddy Currents  
 Auteurs Jiří Lammeraner / Miloš Štafl  
 Uitgever SNTL Technical Literature, Prague
- Titel Piezoxide (PXE) Eigenschaften und Anwendungen  
 Auteur J. Koch  
 Uitgever Philips Bauelemente Valvo

### Handleidingen en databoeken

- Titel Turbo C++ (version 3.0)  
 Users-guide  
 Uitgever Borland International Inc.
- Titel Components and materials  
 Piezoelectric ceramix (Book c19)  
 Uitgever Philips Electronic Components and Materials Division
- Titel Turbo-Pascal  
 (1)  
 (2)  
 (3)  
 (4)  
 Uitgever Microsoft Corporation

## Bijlage 1 Programmaling Skin-effect in Pascal

Programma naam	:	MAGNKOPP.PAS
Programmeertaal	:	Turbo Pascal
Auteur	:	E.H.A. Duwel
Datum eerste opzet	:	03-aug-1992
Datum laatste revisie	:	15-sept-1992
Programma beschrijving	:	Het programma MAGNKOPP.PAS is een simulatieprogramma voor het indringen van een magnetische golf in een vlakke plaat. Het programma biedt de gebruiker de keuze van de gebruikte frequentie, soort materiaal, enkelzijdige of dubbelzijdige indringing. Tijdens de simulatie kan de gebruiker de frequentie van de intredende magnetische golf variëren zodat een duidelijk beeld ontstaat van de gevolgen van het skin-effect op het signaal.

.....

```
program MAGNKOPP (input,output);
```

```
{ Het programma h_solve_matrix_fast geeft de indringing weer van een Elektro-
Magnetische Golf in een plaat (bv. transformator blik). }
```

```
USES
```

```
  crt,graph;
```

```
CONST
```

```
  max_length = 320;
```

```
TYPE
```

```
  matrix_type = array[0..max_length,0..3] of REAL;
```

```
VAR
```

```
  h, e                : matrix_type;
  color, matrix_length : INTEGER;
  draw, mirror        : BOOLEAN;
  U, mu_rho, time, period,
  skinddepth, freq, width,
  speed, dt, dx       : REAL;
```

```
PROCEDURE var_init;
```

```
{initialisatie van de constanten en variabelen }
```

```
BEGIN
```

```
  U:=200;
  mu_rho:=1;
  draw:=true;
  speed:=1;
  color:=1;
  mirror:=false;
```

```
END;
```

```

PROCEDURE explanation;
{ Geeft aan de gebruiker uitleg over het programma}

BEGIN
  CLRSCR;
  WRITELN ('Het programma h_solve_matrix_fast geeft de indringing weer van een Elektro-');
  WRITELN ('Magnetische Golf in een plaat (bv. transformator blik).');
  WRITELN ('Het aantal punten maakt voor simulatiekwaliteit niet uit, veel punten');
  WRITELN ('is gewoon trager. De breedte van het blok waar het veld in wordt bekeken');
  WRITELN ('moet minstens twee keer zo breed zijn als de skindiepte, anders worden');
  WRITELN ('de waarden te groot. De grootte van de tijdstap dt wordt berekend aan de');
  WRITELN ('hand van de snelheid van de EM-golf in het materiaal. Bij grote waarden');
  WRITELN ('worden de afwijkingen groot. Bij kleinere waarden is het resultaat beter. ');
  WRITELN; WRITELN;
  WRITELN ('De mogelijke commando's in dit programma zijn de volgende :');
  WRITELN ('-Q- Quit program. ');
  WRITELN ('-C- Clear screen. ');
  WRITELN ('-T- Teken aan/uit. ');
  WRITELN ('-S- Skindiepte bepalen. ');
  WRITELN ('-<- Golfrequentie halveren. ');
  WRITELN ('->- Golfrequentie verdubbelen. ');
  WRITELN ('-(- ' + chr(235) + 't halveren. ');
  WRITELN ('-)- ' + chr(235) + 't verdubbelen. ');
  WHILE keypressed = false DO;
  WRITELN (readkey);
END;

```

```

PROCEDURE user_input ;
{ Deze procedure stelt de gebruiker in staat de simulatie grootheden in te
voeren}

```

```

BEGIN
  CLRSCR;
  WRITELN(' skindiepte animatie (elektro-magnetische wisselvelden). ');
  WRITELN;
  WRITE('Hoeveel punten (5..',max_length,') ?           : ');
  READLN(matrix_length);
  IF matrix_length < 5 THEN matrix_length:=5;
  IF matrix_length > (max_length) THEN matrix_length:=max_length;
  WRITELN;
  WRITE('Frequentie van inkomende EM-golf [Hz] ?           : ');
  READLN(freq); freq:=abs(freq);
  WRITELN;
  WRITE('Waarde van ',chr(230),'/p voor de materie van het blok ?           : ');
  READLN(mu_rho);
  skindiepte:=sqrt(1/(mu_rho*pi*freq));
  WRITELN;
  WRITELN('De skindiepte is voor deze waarden: ',skindiepte:7:5, '. ');
  WRITELN;
  WRITE('Wat is de breedte van het te simuleren materiaal [m] ?           : ');
  READLN(width);
  dx:=width/matrix_length;
  dt:=dx/(2*pi*freq*skindiepte);
  WRITELN;WRITELN;WRITELN;
  WRITELN('dx = ',dx:7:6);
  WRITELN('dt = ',dt:7:6);

```

```

WRITELN;
WRITELN;
WRITE('Simulatie spiegelen (j/n) ? ');
WHILE keypressed=false DO;
  IF readkey='j' THEN mirror:=true;
END;

```

```

PROCEDURE init_screen;
{ Deze procedure initialiseert het grafische scherm }

```

```

VAR
  graph_driver, graph_mode : INTEGER;

BEGIN
  graph_mode := 2;
  graph_driver := 9;
  initgraph (graph_driver,graph_mode,'d:\prog\tp\bgi');
  setcolor (15);
END;

```

```

PROCEDURE init_matrix_E_H;
{ Procedure maakt de matrix H en E leeg }

```

```

VAR
  a,b: INTEGER;

BEGIN
  FOR a:=0 TO max_length DO
    FOR b:=0 TO 3 DO BEGIN
      h[a,b]:=0;
      e[a,b]:=0;
    END;
  END;
END;

```

```

procedure hirestekst;
var q3: string;
begin
  setcolor(14);
  outtextxy(00,470,'< "=f/2');
  outtextxy(80,470,'> "=f*2');
  q3:="'(" = ' + chr(235) + 't/2';
  outtextxy(160,470,q3);
  q3:="'")" = ' + chr(235) + 't*2';
  outtextxy(260,470,q3);
  outtextxy(400,470,'C = Clear');
  outtextxy(500,470,'Q = Einde');
end;

```

```

PROCEDURE draw_solution(code1,code2: INTEGER);
{ De indringing van de EMG wordt op het beeldscherm weergegeven na het te
  hebben berekend }

VAR
  x,t : INTEGER;

BEGIN
  x:=0;
  IF mirror THEN x:=1;
  setcolor(5); line(320-matrix_length,240,320+x*matrix_length,240); line(320,200,320,280);
  FOR t:=0 TO matrix_length DO BEGIN
    x:=t+320-matrix_length;
    putpixel(x,round(240-h[t,code1]),color);
    putpixel(x,round(240-h[t,code2]),15);
    IF mirror THEN BEGIN
      x:=320+matrix_length-t;
      putpixel(x,round(240-h[t,code1]),color);
      putpixel(x,round(240-h[t,code2]),15);
    END;
  END;
END;

PROCEDURE solve_matrix;

VAR
  r,p : REAL;
  x : INTEGER;

BEGIN
  {eerst een mooie diagonaal matrix maken}

  r:=dt/(mu_rho*SQR(dx));
  p:=-(-2+1/r);
  time:=time+dt*freq;
  period:=period+dt*freq;
  h[0,1]:=U*sin(2*pi*time);

  FOR x:=1 TO matrix_length-1 DO BEGIN
    e[x,2]:=p;
    e[x,1]:=1;
    e[x,3]:=1;
    e[x,0]:=-h[x,0]/r;
  END;

  e[1,0]:=e[1,0]-h[0,1];
  IF mirror
  THEN e[matrix_length-1,1]:=2*e[matrix_length-1,1]
  ELSE e[matrix_length-1,2]:=p+1;
  e[1,1]:=0; e[matrix_length-1,3]:=0;

```

{daarna elimineren tot eenheidsmatrix}

```
FOR x:=1 TO matrix_length-2 DO BEGIN
  e[x,3]:=e[x,3]/e[x,2];
  e[x,0]:=e[x,0]/e[x,2];
  e[x,2]:=1;
  e[x+1,2]:=e[x+1,2]-e[x+1,1]*e[x,3];
  e[x+1,0]:=e[x+1,0]-e[x+1,1]*e[x,0];
  e[x+1,1]:=0;
END;

FOR x:=matrix_length-1 downto 2 DO BEGIN
  e[x,0]:=e[x,0]/e[x,2];
  e[x,2]:=1;
  e[x-1,0]:=e[x-1,0]-e[x-1,3]*e[x,0];
  e[x-1,3]:=0;
END;
```

{nieuw waarden in de machine}

```
FOR x:=1 TO matrix_length-1 DO
  h[x,1]:=e[x,0];

h[matrix_length,1]:=h[matrix_length-1,1];

FOR x:=0 TO matrix_length DO BEGIN
  IF h[x,1]>h[x,2] THEN h[x,2]:=h[x,1];
  IF h[x,1]<h[x,3] THEN h[x,3]:=h[x,1];
END;
END;

PROCEDURE draw_skindepth;

VAR
  a,b,x,y : INTEGER;
  r,s      : REAL;
  text     : STRING;
  letter   : CHAR;

BEGIN
  draw_solution(0,2);
  draw_solution(0,3);
  setcolor(15);
  r:=0.36787944117*U;
  y:=round(r);

  line(310-matrix_length,240-y,330+matrix_length,240-y);
  line(310-matrix_length,240+y,330+matrix_length,240+y);
  FOR a:=1 TO matrix_length DO
  FOR b:=2 TO 3 DO
  IF (abs(h[a,b])<r) and (abs(h[a-1,b])>r) THEN BEGIN
    s:=(a-1)*dx+dx*((abs(h[a-1,b])-r)/(abs(h[a-1,b]-h[a,b])));
    str(s:7:5,text); text:='skin: '+text+' m';
    outtextxy(270,204-5*y+b*(13+2*y),text);
  END;
END;
END;
```



```

PROCEDURE do_run;

VAR
  a,b,t   : INTEGER;
  stop    : BOOLEAN;
  letter  : CHAR;

BEGIN
  stop := false;
  time  := 0;
  period := 0;
  WHILE stop = false DO BEGIN
    solve_matrix;
    IF draw THEN draw_solution(0,1)
    ELSE BEGIN
      putpixel(320,round(240-h[0,0]),0);
      putpixel(320,round(240-h[0,1]),15);
    END;
    FOR t:=0 TO matrix_length DO
      h[t,0]:=h[t,1];
    IF keypressed THEN BEGIN
      letter:=readkey;
      IF (letter='t') and draw THEN
        draw:=false
      ELSE
        IF (letter='t') THEN BEGIN
          draw:=true;
          putpixel(320,round(240-h[0,0]),0);
        END;
        IF letter='q' THEN stop:=true;
        IF letter=',' THEN freq:=freq/2;
        IF letter='.' THEN freq:=freq*2;
        IF letter='0' THEN dt:=dt*2;
        IF letter='9' THEN dt:=dt/2;
        IF (letter='s') and (period > 1) THEN BEGIN
          draw_skindepth;
          WHILE keypressed = false DO;
            letter:='c';
          END;
          IF letter='c' THEN BEGIN
            clearviewport;
            period:=0;
            FOR a:=0 TO 320 DO
              FOR b:=2 TO 3 DO
                h[a,b]:=0;
                hirestekst; { display_options;}
              END;
            END;
          END;
        END;
      END;
    END;
  END;
END;

```

---

```
{ = = = = = = = H O O F D P R O G R A M M A = = = = = = = = = = }
```

```
BEGIN
```

```
  var_init;  
  init_matrix_E_H;  
  explanation;  
  user_input;  
  init_screen;  
  hirestekst;  
  do_run;  
  restorecrtmode;
```

```
END.
```

## Bijlage 2 Programmaling Skin-effect in C

Programma naam	:	MGNKP2f.CCP
Programmeertaal	:	C++
Auteur	:	Ruud Noij
Datum eerste opzet	:	13-aug-1992
Datum laatste revisie	:	15-sept-1992
Programma beschrijving	:	Het programma MGNKP2F.CCP is een simulatie-programma voor het indringen van een magnetische golf in een vlakke plaat. Het programma is een vertaling van de in pascal geschreven versie MAGNKP.PAS en heeft dezelfde functies met dit verschil dat het programma ca. 3 * sneller simuleert.

```

.....
// MAGNKP2F.CPP-
// aangepast R

// #include <stdio.h>
#include <graphics.h>           // For graphics library functions
#include <stdlib.h>             // For exit()
#include <iostream.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <string.h>

#define matrix 320
#define U 230

int set_graph(void);           // Initialize graphics
void calc_coords(void);       // Scale distances onscreen
void get_key(void);
void draw_tekst(void);
void vraag_gegevens(void);    // vraag TE BEREKENEN GEGEVENS
void tialiseer(void);
void teken_oplossing(int,int);
void hirestekst(void);
void matrix_solve_Ha(void);
void do_run(void);

// globale variabelen
float H [matrix*2+2] [4]; // array declaratie
float e [matrix*2+2] [4];
int poetskleur, maxx, rubbish;
float C,tijd,periode,skindiepte,freq,breedte,speed,dt,dx;
int t,x,y;
float q,v,w;
float ii,r,p,s;
char letter,toetsdruk;
char q3[35];
char qq4[35];
int spiegelbeeld,teken;
int code1,code2,stoppen;
int y1,y2;

// constantes
int testpunt = 0;

// *****
int max_x,max_y,y_orig;
int size = 1;
int style;

```

```

// HOOFD *****
int main()
{
    C = 1;
    teken = 1;
    speed = 1;
    poetskleur = 1;
    spiegelbeeld = 0;
    tialiseer();
    vraag_gegevens();

    // stoppen bij afstand=0
    if (breedte == 0)
    {
        cout << "Jammer ..... \n";
        get_key();
        exit(0);
    }

    // Stoppen als er geen EGA of VGA scherm is
    // uitzoeken welk schermtype gebruikt wordt
    if (set_graph() != 1) {
        textcolor(YELLOW);
        cprintf("Dit programma vereist een EGA of VGA adapter");
        get_key();
        exit(0);
    }

    setcolor(EGA_YELLOW);
    calc_coords();

    teken = 1;
    speed = 1;
    poetskleur = 1;
    spiegelbeeld = 0;

    hirestekst();
    do_run();
    get_key(); // Display message and wait for key press
    closegraph(); // Close graphics system
    return 0;
}
// einde *****
void vraag_gegevens(void)
{
    // vraag gegevens
    // definiëren tekst-window
    // window(2,2,78,22);
    // textcolor(EGA_BLACK);
    // textbackground(EGA_WHITE);

    clrscr();
    cout << "\nSKINDIEPTE SIMULATIE (elektro-magnetische wisselvelden).\n";
    cout << "\n";
    cout << "Hoeveel punten (5 .. " << matrix << " ) : ";
    cin >> maxx;
    if (maxx < 5)
        maxx=5;
    if (maxx > matrix)
        maxx=matrix;
    cout << "Frequentie van de inkomende EM-golf [Hz] : ";
    cin >> freq;
    freq=abs(freq);
    cout << "Waarde van  $\mu/p$  voor de materie van het blok : "; // alt+230
    cin >> C;
    skindiepte = sqrt(1/(C*M_PI*freq));
    cout << "\n *** De skindiepte voor deze waarden : " << skindiepte << " **** \n\n";
    cout << "Wat is de breedte van het te simuleren materiaal [m] : ";
}

```

```

    cin >> breedte;
    dx = breedte/maxx;
    dt = dx/(2*M_PI*freq*skindiepte);
    cout << "\n\n Punten: " << maxx;
    cout << "\n Frequency: " << freq;
    cout << "\n    μ/p : " << C;
    cout << "\nSkindiepte: " << skindiepte;
    cout << "\n Breedte: " << breedte;
    cout << "\n    dx : " << dx;
    cout << "\n    dt : " << dt;
    cout << "\n\n";
    cout << "Druk op een toets ....";
    getch();
}

int set_graph(void)
{
    int graphdriver = DETECT, graphmode, error_code;
    initgraph(&graphdriver, &graphmode, "c:\\tc\\bgi");
    error_code = graphresult();
    if (error_code != grOk)
        return(-1);           // geen grafische kaart

    if ((graphdriver != EGA) && (graphdriver != VGA))
    // if (graphdriver != VGA)
    {
        closegraph();
        return 0;
    }
    return(1);           // Graphics OK, so return "true"
}

void calc_coords(void)
{
    // Set global variables for drawing
    max_x = getmaxx();      // Returns maximum x-coordinate
    max_y = getmaxy();      // Returns maximum y-coordinate
    y_orig = max_y / 2;    // Set Y coord for all objects
}

void get_key(void)
{
    size = 1;
    setcolor(EGA_YELLOW);
    settextstyle(DEFAULT_FONT, HORIZ_DIR, size);
    outtextxy(50, max_y - 20, "Druk op een toets(je) om te stoppen ...");
    getch();
}

void tialiseer(void)
{
    int a,b;
    for (a = 0; a <= matrix; a++)
    {
        for (b = 0; b <= 3; b++)
        {
            H[a][b] = 0;
            e[a][b] = 0;
        }
    }
    C = 1;
    teken = 1;
    speed = 1;
    poetskleur = 1;
    spiegelbeeld = 0;
}

void teken_oplossing(int code1, int code2)

```

```

{
    setcolor(5);
    // setcolor(EGA_MAGENTA);
    line((320-maxx),240,(320+maxx),240);
    // line(320,200,320,280);
    line(320,150,320,330);
    for (t = 0; t <= ((maxx*2)+1);t++)
    {
        x = t+320-maxx;
        y1 = (240 - (int) H[t][code1]);
        y2 = (240 - (int) H[t][code2]);

        putpixel( x , y1, EGA_BLUE);
        putpixel( x , y2, EGA_WHITE);
    }
}

void hirestekst(void)
{
    setcolor(EGA_YELLOW); // COLOR 14
    outtextxy(10,10,"Q Quit program.");
    outtextxy(10,22,"C Clear screen.");
    outtextxy(10,34,"T Tekenen aan/uit.");
    outtextxy(10,46,"S Skindiepte bepalen.");
    outtextxy(10,70,"< Golfrequentie halveren.");
    outtextxy(10,82,"> Golfrequentie verdubbelen.");
    outtextxy(10,100,"(δ halveren."); // alt 235
    outtextxy(10,112,") δ verdubbelen."); // alt 235
}

void matrix_solve_Ha(void)
{
    int a;
    // eerst een mooie diagonaal matrix maken
    r = dt / (C*pow(dx,2));
    p = -(2+(1/r));
    tijd = tijd + (dt * freq);
    periode = periode + (dt * freq);
    H[0][1] = U * sin(2 * M_PI * tijd);
    H[(maxx*2)+1][1] = H[0][1];
    for (a = 1; a <= (maxx*2); a++)
    {
        e[a][2] = p;
        e[a][1] = 1;
        e[a][3] = 1;
        e[a][0] = -H[a][0]/r;
    }
    e[1][0] = e[1][0] - H[0][1];
    e[(maxx*2)][0] = e[(maxx*2)][0] - H[(maxx*2)+1][1];
    e[1][1] = 0;
    e[(maxx*2)][3] = 0;

    // daarna elimineren tot eenheidsmatrix
    for (x = 1; x <= ((maxx*2)-1); x++)
    {
        e[x][3] = e[x][3] / e[x][2];
        e[x][0] = e[x][0] / e[x][2];
        e[x][2] = 1;
        e[x+1][2] = e[x+1][2] -(e[x+1][1] * e[x][3]);
        e[x+1][0] = e[x+1][0] -(e[x+1][1] * e[x][0]);
        e[x+1][1] = 0;
    }
    for (x = (maxx*2); x >= 2; x--)
    {
        e[x][0] = e[x][0] / e[x][2];
        e[x][2] = 1;
        e[x-1][0] = e[x-1][0] - (e[x-1][3] * e[x][0]);
        e[x-1][3] = 0;
    }
}

```

```

}
// nieuwe waarden in de machine
for (x = 1; x <= (maxx*2);x++)
{
    H[x][1] = c[x][0];
}
for (x = 0; x <= ((maxx*2)+1); x++)
{
    if (H[x][1] > H[x][2])
    {
        H[x][2] = H[x][1];
    }
    if (H[x][1] < H[x][3])
    {
        H[x][3] = H[x][1];
    }
}
}

void do_run(void)
{
    // do_run
    int a,b;
    stoppen = 0;
    tijd = 0;
    periode = 0;
    while (stoppen == 0)
// do
    {
        // while stoppen
        if ( !kbhit() )
        {
            matrix_solve_Ha0;
            if (teken == 1)
            { // 1
                teken_oplossing(0,1);
            } // 1
            else
            { // 2
                putpixel(320,(240-(int) H[0][0]),0); // EGA_BLACK
                putpixel(320,(240-(int) H[0][1]),EGA_WHITE); // EGA_BLUE
            } // 2

            for (t=0; t <=((maxx*2)+1); t++)
            { // 3
                H[t][0] = H[t][1];
            } // 3

            continue;
        }
        else
        { // kbhit else
            letter = getch();
            switch( letter )
            {
                case 't': if (teken == 1)
                    {
                        teken = 0;
                    }
                    else
                    {
                        teken = 1;
                        putpixel(320, int(240-H[0][0]),0);
                        putpixel(320, (240-(int) H[0][0]),0);
                    }
                    break;
                case 'T': if ( teken == 1)
                    {
                        teken = 0;
                    }
            }
}
}

```

```

else
{
    teken = 1;
    putpixel(320,(240-(int)H[0][0]),0);
}
break;

case 'q': stoppen=1;
break;
case 'Q': stoppen=1;
break;
case ',': freq = freq / 2;
break;
case '<': freq = freq /2;
break;
case '.': freq = freq * 2;
break;
case '>': freq = freq * 2;
break;
case '0': dt = dt * 2;
break;
case ')': dt = dt * 2;
break;

case '9': dt = dt / 2;
break;
case '(': dt = dt / 2;
break;
case 's': if (periode > 1)
{
    teken_oplossing(0,2);
    teken_oplossing(0,3);
    setcolor(EGA_WHITE);
    r = 0.36787944117*U;
    y = (int) r;
    line((310-maxx),(240-y),(330+maxx),(240-y));
    line((310-maxx),(240+y),(330+maxx),(240+y));
    for (a = 1; a <= maxx; a++)
        { // 12
            for (b=2;b <=3;b++)
                { // 13
                    if ((abs(H[a][b]) < r) &&
(abs(H[a-1][b]) > r))
                        { // 14
                            s = ((a-1)
* dx) + (dx * ((abs(H[a-1][b])-r) / (abs(H[a-1][b]-H[a][b])));
                            g=s&.qf);
                            // conversie float -> string
                            setcolor(EGA_YELLOW);
                            sprintf(sir
");
                            strcat(qq4,
m.");
                            outtextxy(220,(204-(5*y)+b*(13+2*y)),qq4);
                        } // 14
                    } // 13
                } // 12
            while (!kbhit());
            clearviewport();
            hirestekst();
            for (a = 0; a <= 320; a++)
                { // 16
                    for (b=2; b <=3;b++)
                        { // 17
                            H[a][b] = 0;

```



```
        } // 17
    } // 16
    periode = 0;
    letter = ('c');
}
break;

case 'c':
{
    clearviewport();
    hirestekst();
    for (a = 0; a <= 320; a++)
    { // 16
        for (b=2; b<=3;b++)
        { // 17
            H[a][b] = 0;
        } // 17
    } // 16
    periode = 0;
} // 15
break;

} // switch

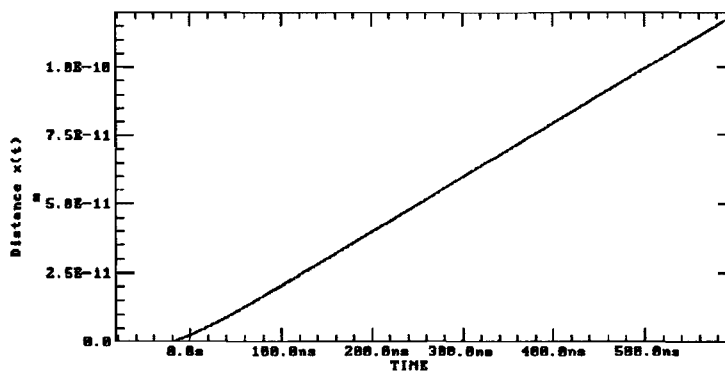
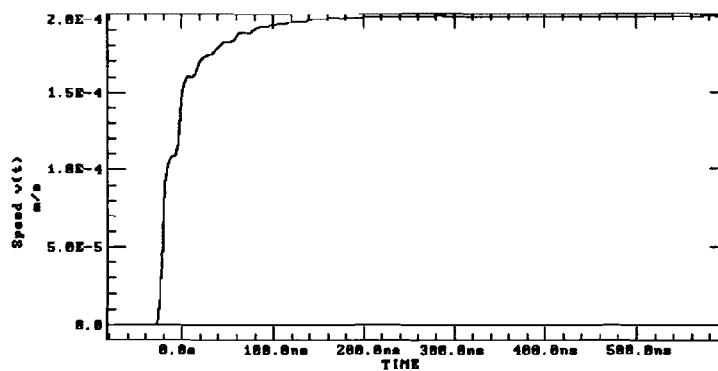
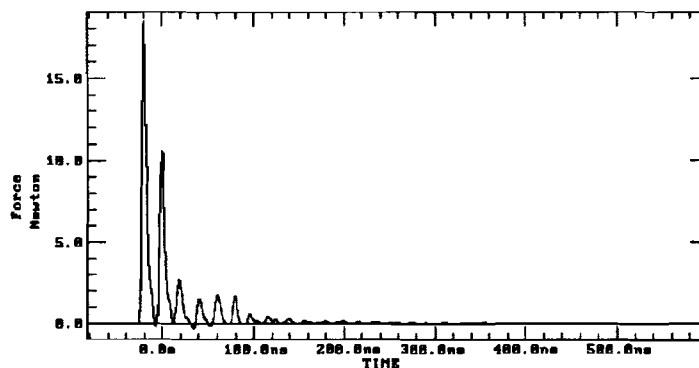
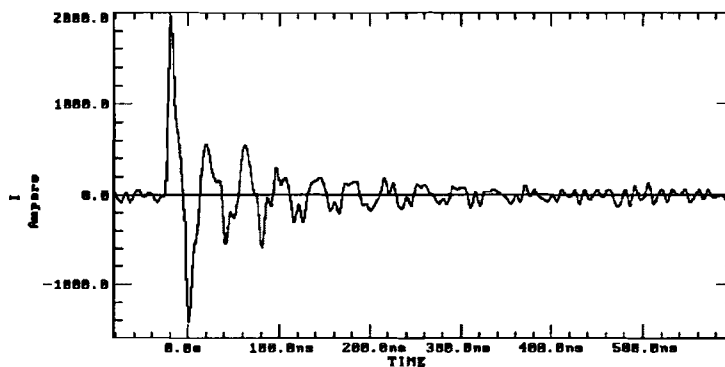
} // kbhit else

} // !kbhit

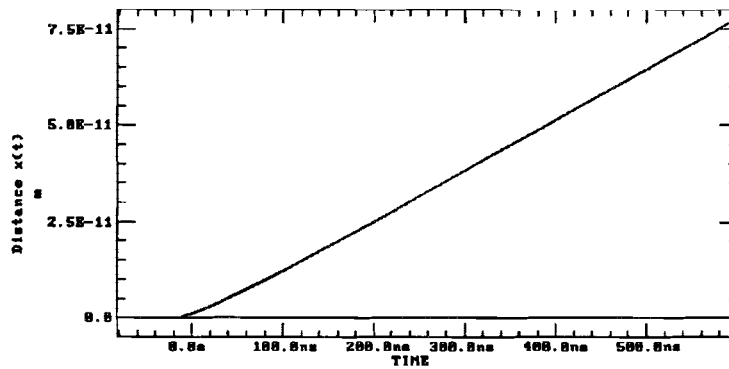
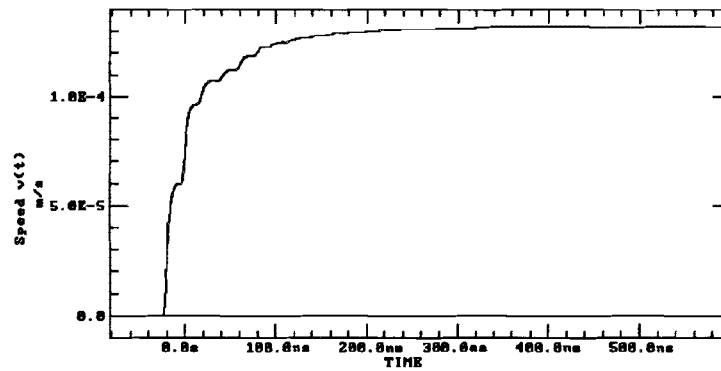
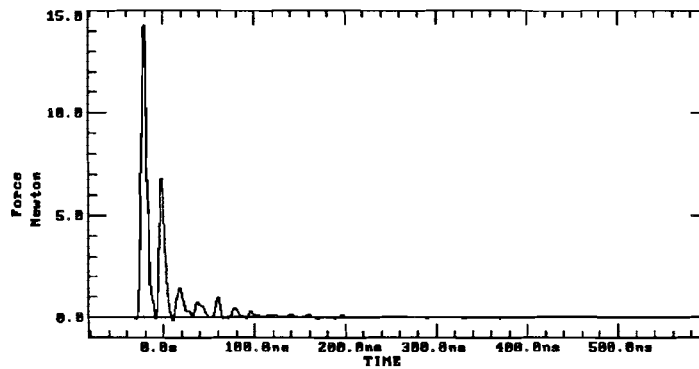
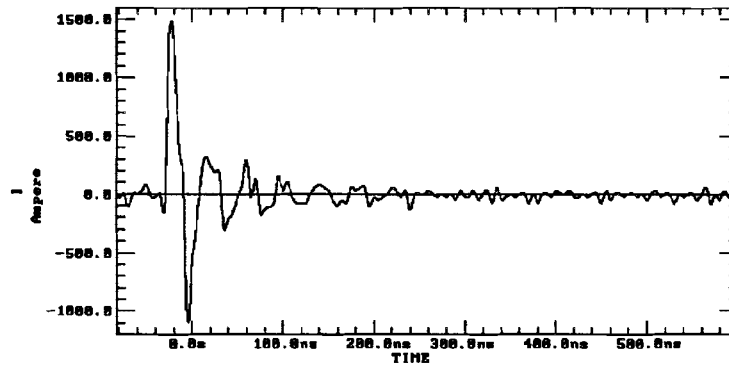
} // do_run
```

## Bijlage 3 Oscillogrammen doorslag hoogspanningsgenerator

Metingen met een  $0,75 \text{ mm}^2$  ring



## Vervolg bijlage 3

Metingen met een 1,5 mm<sup>2</sup> ring

## Vervolg bijlage 3

Metingen met een 2,5 mm<sup>2</sup> ring