

## MASTER

### Een nieuw model voor het verband tussen het geleidingsvermogen en de stroom in een MHD generator

Sars, J.C.W.

*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

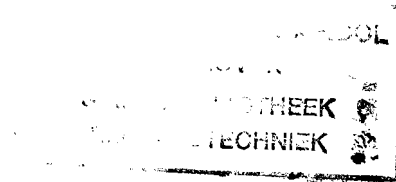
#### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

4068'

TECHNISCHE HOGESCHOOL EINDHOVEN  
AFDELING DER ELEKTROTECHNIEK  
VAKGROEP DER DIRECTE ENERGIEOMZETTING

EG/84/373



Een nieuw model voor het verband  
tussen het geleidingsvermogen en  
de stroom in een MHD generator

J.C.W. Sars

OKTOBER 1984

afstudeerwerk uitgevoerd in  
opdracht van  
Prof. Dr. L.H.Th. Rietjens  
onder begeleiding van  
Dr. ir. P. Masee

## SAMENVATTING

Na een korte inleiding komt in hoofdstuk 2 van dit verslag de opbouw van de MHD generator aan de orde. In het hoofdstuk verliesmechanismen worden een aantal fenomenen behandeld die specifiek zijn voor de MHD generator en die van belang zijn voor een goed begrip van het onderwerp van dit verslag. In hoofdstuk 4 zijn enkele meetgegevens te vinden die in dit werk gebruikt worden.

In hoofdstuk 5 worden de vergelijkingen voor de hoofdstroom en de grenslagen afgeleid. Deze vergelijkingen zijn de basis van het gasdynamische rekenprogramma, waarin de invloed van grenslagen in rekening wordt gebracht; hiermee zijn de in dit werk gepresenteerde resultaten berekend.

In hoofdstuk 6 wordt uit de meetgegevens een nieuw model afgeleid om de opgewekte stroom in een MHD generatorsegment te berekenen. Uitgaande van de zogenaamde spanningsprobe-meting worden de verbanden tussen het geleidingsvermogen en de stroom en de voltagedrop en de stroom opgesteld. Deze verbanden worden ingevuld in de spanningswet van Kirchhoff. Daaruit volgt een model waarmee de opgewekte stroom in een generatorsegment kan worden berekend. Dit model voorspelt onder andere dat voor bepaalde waarden van de snelheid  $v$ , het magneetveld  $B$  en de belastingsweerstand  $R$  een bepaald segment geen stroom kan voeren hoewel de opgewekte spanning niet nul is. Alle spanning valt in eerste orde benadering over de inwendige weerstand.

Bovendien is het mogelijk om met dit model, dat bij de negentiende elektrode is afgeleid, het gehele generator kanaal in de  $x$ -richting door te rekenen. Berekende en gemeten stroomprofielen, als functie van  $x$ , stemmen na invoering van een correctie voor Hallkortsluiting goed overeen.

Uit de berekeningen blijkt dat de drukverhoging, die gekonstateerd is in de tweede helft van de generator, de stroomvermindering in de tweede helft van de generator niet kan verklaren. Hallkortsluiting blijkt hiertoe wel in staat.

LIJST MET GEBRUIKTE SYMBOLEN

A	kanaaldoorsnede
$A_{\text{eff}}$	effectieve kanaaldoorsnede
a	opgewekte spanning in het vereenvoudigd model
$\vec{B}$	magneetveld
B	grootte van het magneetveld
BHS	begin van de Hallkortsluiting
b	coefficient bij vereenvoudigd model
$C^*, C^{**}$	coefficienten in veranderde $\sigma/I$ relatie
C	omtrek van de kanaaldoorsnede
$C_f, C_{f,q}$	wrijvingscoefficient
$C_d, C_{d,q}$	dissipatie integraal
$C_p$	soortelijke warmte bij constante druk
D	logaritmische afgeleide van de wand afstand
$\vec{E}^q$	het elektrisch veld
E	grootte van het elektrisch veld
e	lading van een elektron
H	stagnatie enthalpie
h	hoogte van het kanaal
$H_c$	Hallcorrectiefactor
$h_{\text{eff}}$	effectieve kanaalhoogte
I	elektrische stroom
$\vec{j}$	elektrische stroomdichtheid
j	grootte van de elektrische stroomdichtheid
k	constante van Bolmann
$k_f$	ionisatie coefficient
$k_r$	recombinatie coefficient
LREL	relaxatielengte
M	machgetal
$M_{\alpha\beta}$	Halltensor
m	massa van een deeltje
$\dot{m}$	massastroom
n	aantal deeltjes per volume eenheid
$Pr_t$	turbulent Prantl getal
p	totale statische druk
$\vec{q}$	warmtestroom
R	gasconstante, de belastingsweerstand bij het vereenvoudigd model.
$\dot{R}$	stralingsverliezen

$R_i$	inwendige weerstand
$R_{bel}$	belastings weerstand
$S_t$	Stanton getal
$s$	elektrode pitch
$T$	temperatuur zware deeltjes
$T_e$	temperatuur elektronen
$t$	tijd
$u$	x component van de snelheid
$\vec{u}_e$	elektronen drift snelheids vektor
$V_H$	Hallspanning
$\Delta V$	voltagedrop
$v$	y component van de snelheid
$w$	z component van de snelheid
$x$	Carthesische coördinaat
$y$	Carthesische coördinaat
$z$	Carthesische coördinaat
$\alpha$	coefficient uit vergelijking 6.11
$\beta$	coefficient uit vergelijking 6.11, Hallparameter
$\gamma$	coefficient uit vergelijking 6.11
$\delta$	grenslaagdikte
$\delta_1, \delta_{1,q}$	verplaatsingsdikte
$\delta_2, \delta_{2,q}$	impuls dikte
$\delta_3, \delta_{3,q}$	kinetische energie dikte
$\delta_{5,q}$	dichtheid tekort dikte
$\delta_{Ej,q}$	vermogensdichtheid verplaatsings dikte
$\delta_H$	stagnatie enthalpie dikte
$\delta_{j,q}$	stroomdichtheid verplaatsings dikte
$\delta_T$	dikte van de temperatuurgrenslaag
$\delta_u$	dikte van de snelheidsgrenslaag
$\phi(I)$	functie afgeleid uit de spanningswet van Kirchhoff
$\kappa_t$	turbulente warmtegeleidings coefficient voor de zware deeltjes
$\mu$	macht voor de $\sigma/I$ relatie uit het vereenvoudigd model
$\mu_t$	wrijvingscoefficient voor de zware deeltjes
$\nu_j$	botsingsfrequentie voor de deeltjes j
$\rho$	soortelijke dichtheid
$\rho_i$	soortelijke inwendige weerstand
$\sigma$	elektrisch geleidingsvermogen
$\tau_{xy}$	schuifspanning

SUBSCRIPTS

A	argon
a	atomen
C	cesium
e	elektronen, elektrodedewand
eff	effectieve waarde
i	ionen, isolatorwand
ind	geïnduceerd
inw	inwendige spanning
uit	uitwendige spanning
w	wand
x,y,z	cartesische coördinaten
∞	bulk
$\alpha, \beta$	tensor indices

## HOOFDSTUK 1 INLEIDING

Dit is het verslag van mijn afstudeerwerk, dat is verricht bij de vakgroep der directe energie-omzetting in de periode van 1 oktober 1983 tot 18 oktober 1984. In deze vakgroep is men bezig met de ontwikkeling van een zogenaamde MHD generator. Een MHD generator zet thermische energie direct om in elektrische energie zonder tussenkomst van mechanische onderdelen. Dit voordeel naast het voordeel van een hoger theoretisch rendement dan bij een conventionele stoomcyclus haalbaar is, maakt MHD energieconversie aantrekkelijk.

Onder andere om toekomstige MHD generatoren te dimensioneren bestaat er een grote behoefte aan een goed werkend rekenprogramma dat binnen redelijke rekentijden een MHD generator kan doorrekenen. In een dergelijk programma is een model nodig waarmee de opgewekte stroom per segment kan worden berekend. Zo'n model wordt in dit verslag ontwikkeld en getoetst aan de praktijk.

## HOOFDSTUK 2. MHD-GENERATOR. ALGEMEEN

### 2.1. INLEIDING

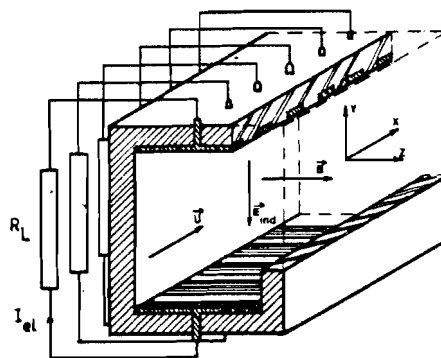
Mede naar aanleiding van de energiecrisis in 1973 is in de jaren zeventig een intensief onderzoek begonnen naar alternatieve energiebronnen en energie-conversieprocessen met een hoger rendement. Ondanks deze inspanningen is fossiele brandstof tot op heden de belangrijkste grondstof voor elektriciteitsopwekking en dit lijkt nog minstens vijftig jaar zo te blijven. Onderzoek naar energie-conversieprocessen met een hoger rendement en met als grondstof fossiele brandstof is daarom zinvol. Hogere rendementen leiden niet alleen tot verminderd brandstof verbruik in de centrales maar ook tot een geringere belasting van het ecologisch evenwicht door thermische vervuiling.

Het ideale rendement van elk omzettingsproces wordt gegeven door het Carnot-kringproces en is gelijk aan één verminderd met de verhouding van de temperaturen waarbij warmte wordt afgevoerd en wordt aangevoerd. De afvoertemperatuur wordt bepaald door het koelmedium. De toevoertemperatuur wordt bepaald door de beperkingen van de installatie. Bij stoomturbinecentrales ligt de toevoertemperatuur rond de 800 K waarbij rendementen van ca. 38% worden gehaald. Bij gebruik van Magneto Hydro Dynamische (MHD) energieomzetting kan de toevoertemperatuur verhoogd worden tot 2000 à 2700 K waarbij de MHD-generator als zogenaamde topping cycle gebruikt wordt. Na volledige ontwikkeling van dit principe lijken rendementen van ca. 55% haalbaar.



2.2 HET PRINCIPE VAN EEN MHD-GENERATOR

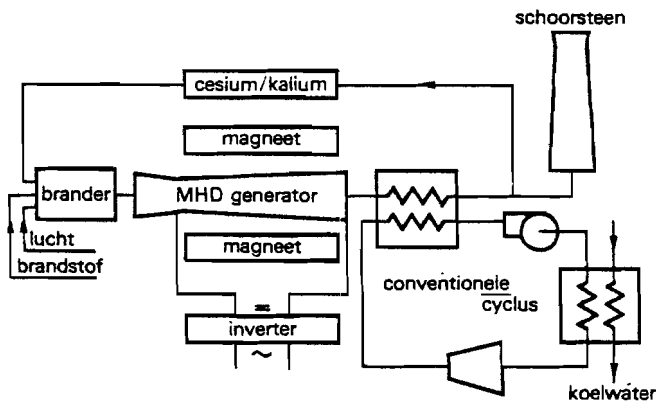
Na de constatering dat in sommige vaste stoffen elektrische stromen werden opgewekt als ze werden bewogen door een magnetisch veld stelde Michael Faraday in 1832 dat soortgelijke effecten ook moesten optreden in deformeerbare media. Ondanks groots opgezette en nauwkeurig uitgevoerde experimenten met deformeerbare media als werkmedium heeft hij bij deze proeven nooit daadwerkelijk stroom kunnen meten. Na de ontdekking van de vierde agregatietoestand, namelijk het gefoniseerde gas (plasma), zijn zijn experimenten opnieuw in de belangstelling geraakt. In een elektrisch geleidend medium dat zich met een snelheid  $v$  door een magnetisch veld  $B$  beweegt ondervinden de geladen deeltjes een Lorentz-kracht. Voor positief en negatief geladen deeltjes is deze kracht tegengesteld gericht zodat scheiding van lading ontstaat en een elektrisch veld  $E_{ind}$  wordt geïnduceerd loodrecht op de bewegingsrichting en loodrecht op de richting van het magnetisch veld. Er ontstaat een elektrisch potentiaalverschil tussen de twee tegenover elkaar liggende wanden. Worden in deze wanden elektroden aangebracht en door middel van een belastingsweerstand met elkaar verbonden dan gaat er een stroom door de weerstand vloeien, zie fig. 2.1.



Figuur 2.1 Principe van een gesegmenteerde Faraday-generator.

Een heet gas, dat deels geïoniseerd is en dus uit neutrale deeltjes, ionen en elektronen bestaat kan als werkmedium voor een MHD-generator fungeren. We onderscheiden twee typen MHD-systemen waarbij heet gas als werkmedium wordt gebruikt namelijk open cyclus MHD-systemen en gesloten cyclus MHD-systemen.

In een open cyclus MHD-generator wordt verbrandingsgas van fossiele brandstof, waaraan ter verbetering van het geleidingsvermogen inzaaimateriaal is toegevoegd, als werkmedium gebruikt. De toevoertemperatuur ligt tussen de 2700 en 3000 K en de afvoertemperatuur is nog hoog genoeg om de stoomproductie van een conventionele centrale te verzorgen. Een warmtewisselaar achter de MHD-generator zorgt voor de warmteoverdracht. Nadat het inzaaimateriaal is teruggewonnen verlaat het verbrandingsgas via de schoorsteen het systeem, zie fig. 2.2.

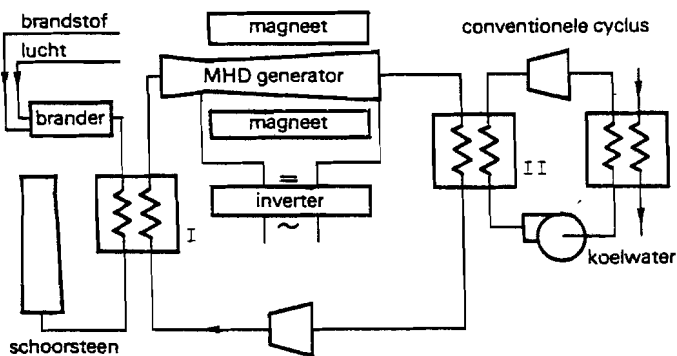


Figuur 2.2 Principe van een open cyclus MHD-systeem

Bij een gesloten cyclus MHD-systeem is het werkmedium edelgas met inzaaimateriaal, bv. cesium. Dit mengsel wordt rondgepompt, neemt warmte op bij de hoge temperatuur warmtewisselaar I, zie fig 2.3, gaat door het MHD-generator kanaal en geeft de restwarmte af bij warmtewisselaar II aan een stoomcyclus.

Een voordeel van gesloten systemen boven open systemen is dat bij gesloten systemen in principe alle warmtebronnen gebruikt kunnen worden die bij voldoende hoge temperatuur voldoende warmte kunnen afleveren. Dit maakt het gebruik van bijvoorbeeld kern- en fusie-energie mogelijk. Een tweede voordeel bij gesloten systemen is de lagere minimaal benodigde temperatuur, ca. 2000 K. Deze minimaal

benodigde gastemperatuur is lager omdat in een gesloten systeem een zogenaamd twee-temperaturen plasma ontstaat. Dankzij het ontstaan van niet-evenwichtsionisatie wordt de elektronentemperatuur, die het geleidingsvermogen bepaald, hoger (ca. 3000 K) dan de gastemperatuur (ca. 2000 K).



Figuur 2.3 Principe van een gesloten cyclus MHD-systeem.

### 2.3. HET MHD-BLOWDOWN EXPERIMENT

De Eindhovense MHD-generator werkt volgens het principe van een gesloten cyclus systeem. Het werkmedium is argon met als inzaaimateriaal cesium. De massastroom is 5 kg/s bij een stagnatie druk van 7 bar en een stagnatiedruk van 2000 K. De magneet is ontworpen voor een magneetveld van 5 T. Tijdens de opwarmcyclus wordt de regeneratieve warmtewisselaar (1) (voor nummering van de componenten en van de systemen zie principe schema in fig. 2.4) met behulp van een propaanbrander opgewarmd tot boven in het bed een temperatuur van bijna 2100 K bereikt is. Met behulp van een speciaal opwarmschema wordt ervoor gezorgd dat de warmte zo diep mogelijk in het bed doordringt. Inmiddels is de kryogene magneet (6) tot 77 K afgekoeld.

Na de opwarmcyclus worden eerst de moleculaire gassen met behulp van een vacuumsysteem (7) uit de warmtewisselaar gepompt. Het hele systeem wordt op een argondruk van 1.2 bar gebracht. Het argon is in vloeibare vorm opgeslagen en wordt met behulp van een

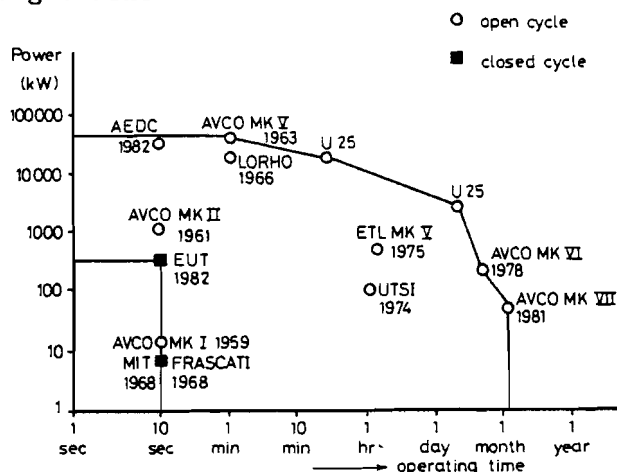
kryogene pomp (8) en een verdamper (9) overgebracht naar een buffervat (10) met een inhoud van  $4 \text{ m}^3$  onder een druk van 100 bar. Deze  $400 \text{ Nm}^3$  voorraad is voldoende voor een run van 60 seconden en doorspoelen met argon bij overschakelen van de cycli. Nadat de "hete klep" (3) geopend is kan de run beginnen. Het opstarten en afschakelen van de run wordt volledig automatisch bestuurd door een programmeerbare bestuurseenheid (P.L.C.).

#### 2.4. RESULTATEN

Het Blowdown experiment heeft tot doel : " De demonstratie van de opwekking van 1 MW elektrisch vermogen, gedurende minstens 10 seconden bij een thermisch ingangsvermogen van 5 MW ".

Tot nu toe zijn 6 meetseries verricht. In mei 1981 werden de eerste vermogensruns uitgevoerd waarbij de MHD-generator een vermogen van 270 kW (5,6 % enthalpie extractie) leverde.

Meetserie 3, in oktober 1981, leverde een maximaal vermogen van 360 kW (7,1 % enthalpie extractie). De meetseries 4,5 en 6 leverden nagenoeg geen vermogen door problemen met het kanaal en de pre-heat loop. De internationale stand van zaken is in fig. 2.5 in kaart gebracht.



Figuur 2.5 Vooruitgang van de belangrijkste MHD-experimenten

De eerste commerciële MHD-stoomcentrale wordt gebouwd in Ryazan, 150 km zuid-oost van Moskou. In 1987 moet deze centrale volgens

planning een vermogen van 500 MW gaan opwekken. Het is een open cyclus systeem met als primaire brandstof aardgas. De helft van het vermogen zal opgewekt worden door het MHD-topping systeem de andere helft door de stoomcentrale. Verwacht wordt dat de volgende generatie MHD-generatoren kolen als primaire brandstof zullen hebben.

## HOOFDSTUK 3. VERLIESMECHANISMEN

### 3.1 INLEIDING

Buiten de verwachte verliezen zoals warmte- en wrijvingsverliezen zijn er bij de werking van de MHD-generator een aantal fenomenen geconstateerd die specifiek zijn voor de MHD-generator en die het rendement van de generator beperken.

De resultaten, die opgenomen zijn in hoofdstuk 7, bestaan voor een groot deel uit grafieken van stroomprofielen als functie van de plaats in het kanaal,  $x$ . Voor een goed begrip van deze stroomprofielen is kennis van de in dit hoofdstuk gepresenteerde verschijnselen noodzakelijk.

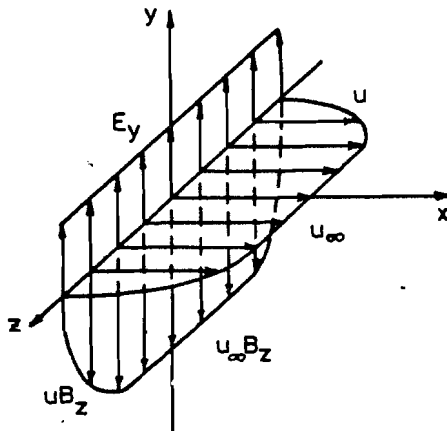
Hoewel deze fenomenen afzonderlijk worden gepresenteerd is er vaak een sterke onderlinge samenhang. Zo zal bij aangroei van de grenslagen de gemeten voltagedrop ook groter worden.

### 3.2 GRENSLAGEN

In de programma's, waarmee de resultaten uit hoofdstuk 7 berekend zijn wordt de invloed van grenslagen steeds in rekening gebracht. Zoals uit het onderstaande zal blijken is de invloed van de grenslagen in een MHD-generator, door de aanwezigheid van het magneetveld, veel groter dan in een gewone gasdynamische stroming.

Een grenslaag is per definitie dat gebied in een fluïdum waarin de overdrachtsverschijnselen naar de wand merkbaar zijn. Doordat bij een MHD-generator naast gasdynamische- ook elektromagnetische verschijnselen een rol spelen kan de invloed van de grenslagen in de MHD-generator aanzienlijk zijn. We onderscheiden elektrodenwandgrenslagen en isolatorwandgrenslagen. Daarnaast kunnen we verschillende typen grenslagen onderscheiden, bijvoorbeeld stagnatietemperatuurgrenslaag en snelheidsgrenslaag.

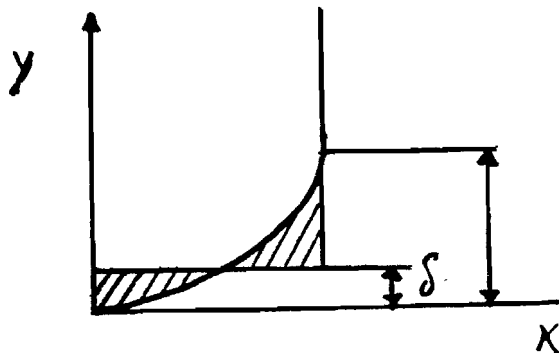
In de isolatorwandgrenslaag komt de aanwezigheid van het magnetische veld duidelijk tot uiting. Door het aanwezige snelheidsprofiel is het opgewekte veld,  $uB$ , in de grenslaag kleiner dan in de bulk. Uit de wetten van Maxwell volgt echter dat  $E_y$  in de grenslagen even groot moet zijn als in de bulk. De term  $(uB - E_y)$  is in de bulk positief maar kan in de grenslagen negatief worden. De stroom zal dan in de grenslaag de andere kant op gaan lopen, zie fig. 3.1. Door omkering van de Lorentz-kracht  $j_y \times B$  kan zelfs een overshoot van de snelheid in de grenslaag optreden. Door deze combinatie van gasdynamische en elektromagnetische effecten is de isolatorwand- grenslaag aanzienlijk dunner dan in een gewone gasstroom (Masl).



Figuur 3.1 Veldverdeling in de isolatorwandgrenslaag.

In de temperatuurgrenslaag die aanwezig is bij de elektrodewand is, door de lagere temperatuur, de geleiding lager dan in de bulk. Hierdoor ontstaat de zogenaamde voltagedrop, zie paragraaf 3.3. Het grootste deel van de voltagedrop staat over de elektrische grenslaag die veel dunner is dan de temperatuurgrenslaag (Masl). In deze elektrische grenslaag is de joulse-dissipatie dus groter waardoor een overshoot in het temperatuurprofiel kan optreden. Ook de elektrodewandgrenslaag verschilt dus duidelijk van de "gewone" gasdynamische grenslagen. Om de invloed van grenslagen in rekening te brengen, bijvoorbeeld bij numerieke berekeningen, wordt een verplaatsingsdikte  $\delta$  gedefinieerd. Deze verplaatsingsdikte is de afstand tussen de wand en een fictieve wand die men zou moeten introduceren om de verliezen als gevolg van de grenslaag te berekenen. De

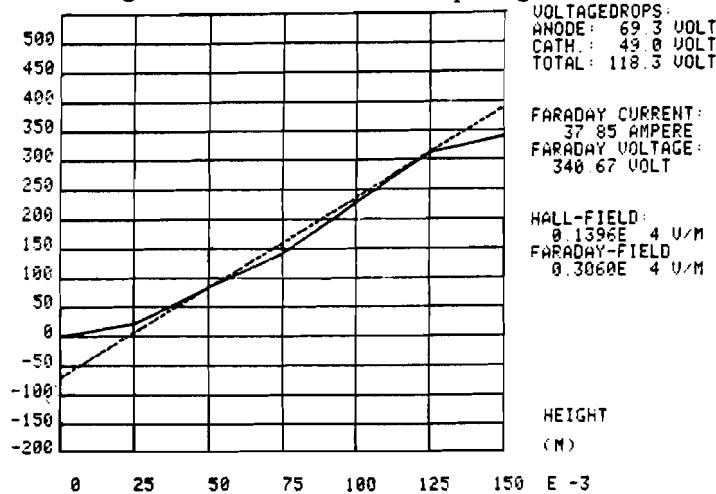
vermindering in massatransport ten gevolge van de grenslaag wordt over een afstand  $\delta$  verdisconteerd waardoor een homogene stroming tussen fictieve wanden wordt aangenomen, zie fig. 3.2.



Figuur 3.2 De verplaatsingsdikte  $\delta$

### 3.3 VOLTAGEDROP

Door de aanwezigheid van een temperatuurgrenslaag bij de elektrode wand is de geleidbaarheid in deze grenslaag kleiner dan in de bulk. Dit komt tot uiting in een extra spanningval over de grenslaag. Deze extra spanningsval of voltagedrop is niet direct meetbaar maar is te bepalen met behulp van spanningsprobes die aangebracht zijn in de isolatorwand. De resultaten van een dergelijke meting zijn te zien in fig. 3.3. De voltagedrop is het verschil tussen de doorgetrokken lijn en de gestippelde lijn. De doorgetrokken lijn is de lijn die de meetpunten verbindt, de gestippelde lijn geeft het veld zoals dat in de bulk bestaat. De meting wordt uitgebreid behandeld in paragraaf 4.4.

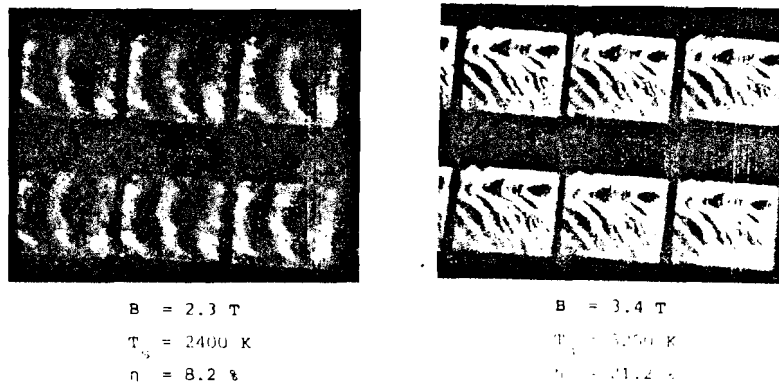


Figuur 3.3 Meting met spanningsprobes bij run 302.



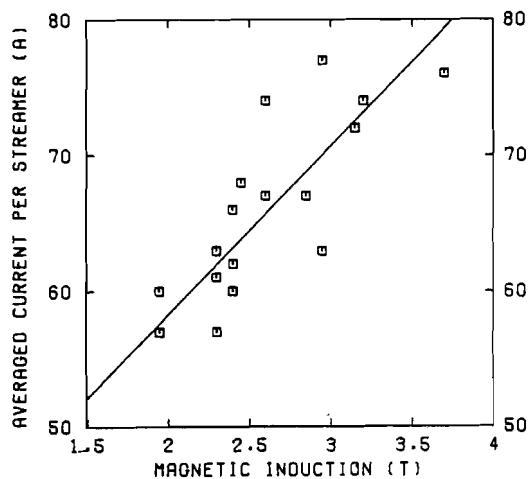
### 3.4 STREAMERS

De stromen in een MHD-generatorkanaal zijn niet homogeen maar vertonen een ontladingachtige structuur. Deze ontladingen worden streamers genoemd en hebben een karakteristieke doorsnee-afmeting van enkele centimeters. Binnen de streamers is een filamentachtige structuur te constateren. Deze filamenten hebben karakteristieke afmetingen in het milimeter gebied (Wetl).



Figuur 3.4 Streamers onder diverse omstandigheden, gefotografeerd bij het schokbuisexperiment

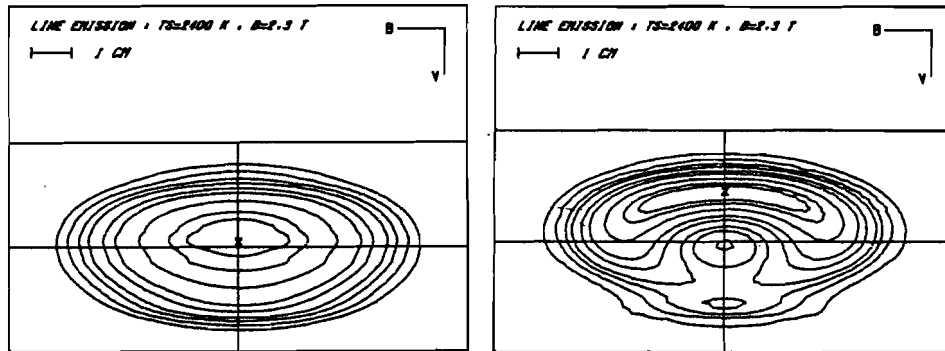
De streamers gaan door het kanaal met een snelheid die ongeveer gelijk is aan de gassnelheid. Bij verhoging van het magneetveld wordt niet alleen het aantal streamers groter maar stijgt ook de gemiddelde stroom per streamer (Wetl).



Figuur 3.5 Gemiddelde stroom per streamer als functie van de magnetische veldsterkte.

Zowel bij schokbuisexperimenten als ook bij het blow-down experiment is een minimaal magneetveld gevonden waaronder geen stroom geleverd wordt. Dit sluit aan bij het ontladingsachtige karakter van de streamers die blijkbaar een minimaal veld nodig hebben om tot ontsteking te komen. Bij het opstellen en onderzoeken van het model voor het verband tussen de elektrische geleidbaarheid en de stroom in hoofdstuk 6 zal onder andere dit gedrag aan de orde komen.

Uit schokbuisexperimenten is gebleken dat streamers een ellipsvormige doorsnede hebben, in het x,z-vlak. De verhouding van de assen is  $2.2 \pm 0.3$ . De lengte van de as in de richting van het magneetveld is ongeveer 4.5 cm, die van de as in de stroomafwaardse richting is ongeveer 2 cm (Wet1).

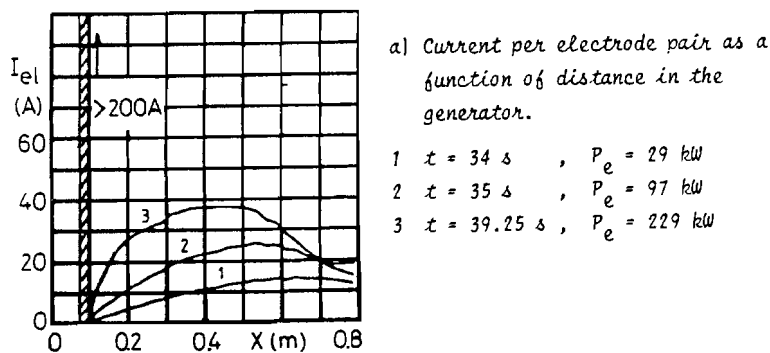


Figuur 3.6 Voorbeelden van streamerdoorsneden.

### 3.5. HET RELAXATIEGEBIED

Bij stroommetingen als functie van de plaats in het kanaal blijkt steeds dat in het begin van het kanaal geen stroom geleverd wordt, zie fig. 3.7. Vanaf een bepaald punt in het kanaal groeit de stroom langzaam aan naar haar maximale waarde. Het gebied van het begin van de generator tot het punt waarbij de stroom haar maximale waarde bereikt noemen we het relaxatiegebied. In dit relaxatiegebied treden twee belangrijke processen op. Het eerste proces treedt op als het plasma door de eerste paar

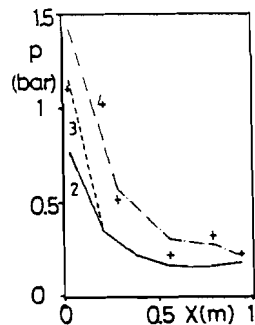
centimeters van de generator stroomt. Daar verandert het plasma van een evenwichtsplasma in een twee-temperaturen plasma (Mas1). Het tweede proces is het langzaam aan groeien van de stroom. Dit proces wordt veroorzaakt doordat de streamers in het relaxatiegebied tot ontsteking komen. Hoe hoger het magneetveld hoe korter de lengte van het relaxatiegebied. De streamers op zich hebben een relatief korte ontstekingstijd en zijn onderling qua omvang ongeveer gelijk. Eenmaal onstoken gaat de streamer met ongeveer de gassnelheid verder door het kanaal (Fl11) (Wet1+2).



Figuur 3.7 Stroom als functie van de plaats in het kanaal bij run 302. N.B. De stroompiek in het begin wordt veroorzaakt door het kortsluiten van de eerste vier elektroden paren ten behoeve van voorionisatie.

### 3.6 DRUKTOENAME IN DE TWEDE HELFT VAN HET GENERATORKANAAL

Berekeningen met de wetten van de gasdynamica als uitgangspunt geven steeds een dalend drukverloop te zien in de stroomafwaardse richting van het kanaal. Bij metingen aan het kanaal onder gasdynamische condities, dat wil zeggen zonder MHD-interactie, blijken berekeningen en metingen goed overeen te komen. Treedt echter interactie op dan blijkt uit de metingen dat er in de tweede helft van de generator een drukverhoging optreedt. Deze drukverhoging is alleen met gasdynamica niet eenvoudig te verklaren. In fig. 3.8 is het drukverloop op verschillende tijdstippen, en dus bij verschillende magneetvelden, te zien.



a) Static pressure under gasdynamic conditions for different measurement series (as indicated by the number; + denotes series 5).

Figuur 3.8 Statische druk bij run 302.

De drukverhoging is groter bij hoger geleverd vermogen en dus bij hogere interactie. De drukverhoging is bij berekeningen te simuleren door dikkere grenslagen in te voeren dan op grond van gasdynamica wordt verwacht. Dit is een indicatie voor een sterke grenslaag aangroei in de tweede helft van het kanaal.

### 3.7. HALLKORTSLUITING

In fig. 3.10 is de stroom als functie van de plaats in het kanaal gegeven met de tijd als parameter. Het verband tussen het aangelegd magneetveld en de tijd is gegeven in fig. 3.9.

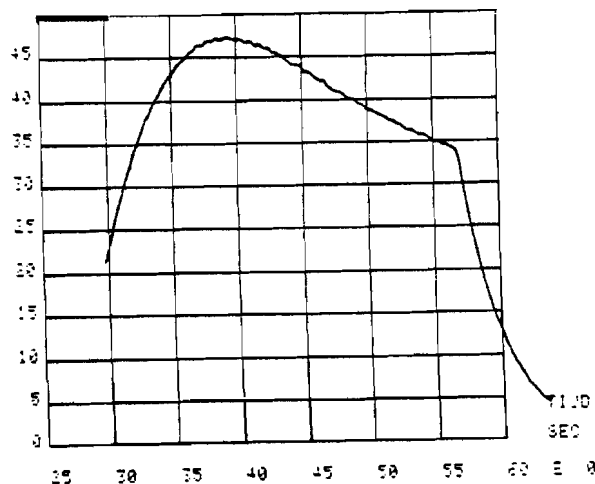
In fig. 3.10 zien we dat de elektrische stromen in de tweede helft van de generator boven een bepaald magneetveld niet meer verder aangroeien met het magneetveld. Bovendien verandert het maximum van de stroom van plaats. Bij een magneetveld van 3,9 T ligt het maximum bij elektrodepaar 32. Bij maximale magnetische inductie treedt het maximum in het stroomverloop op bij elektrodepaar 18, verder stroomafwaarts neemt de elektrische stroom per elektrodepaar snel af.

Deze effecten geven een mogelijk optreden van Hallkortsluiting aan achter in de generator. Naarmate het magneetveld verder toeneemt schuift de plaats waar de Hallkortsluiting begint verder stroomopwaarts de generator in. Het idee dat er Hallsluiting optreedt wordt verder bevestigd door de gemeten Hallspanning

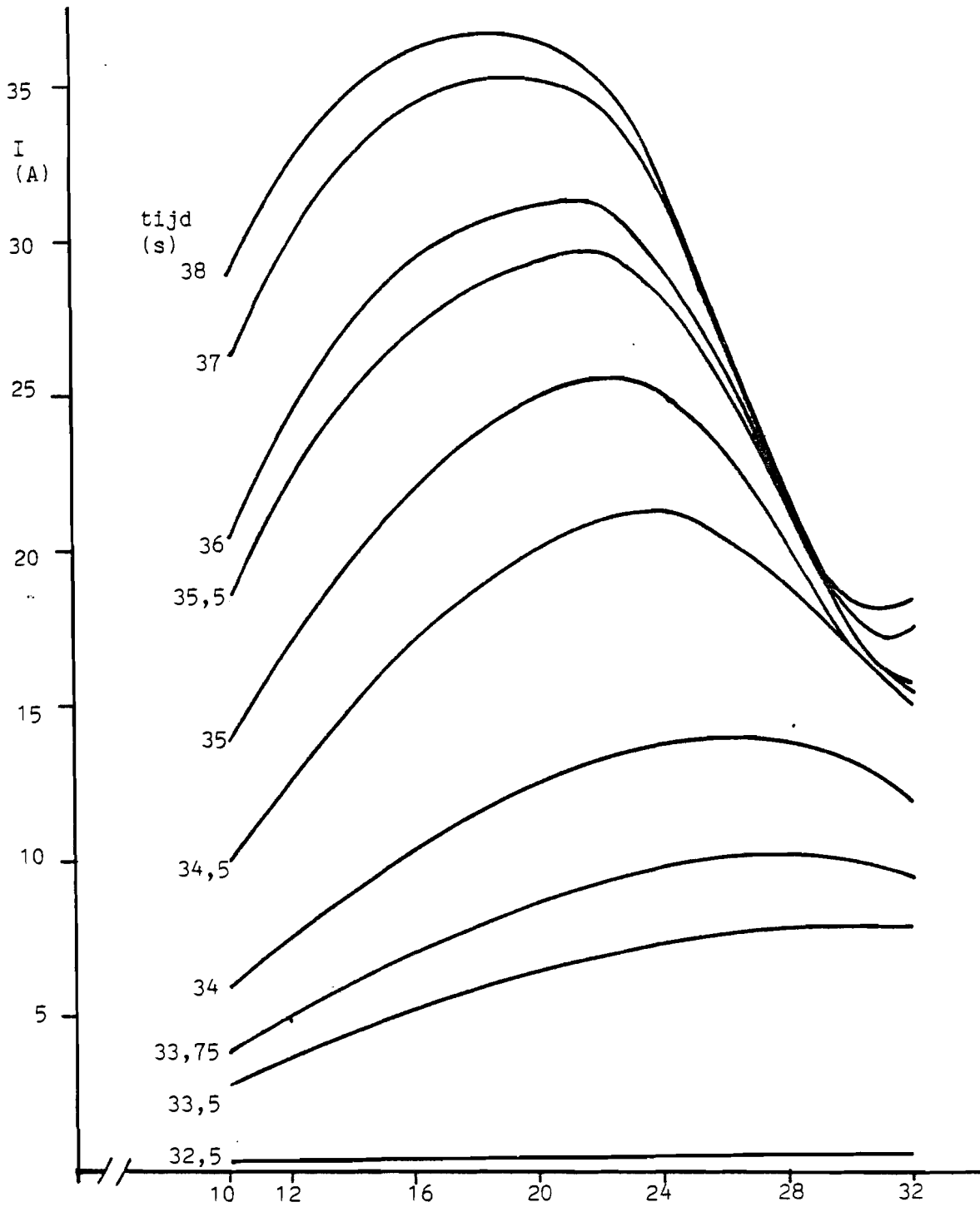
tussen elektrode 24 en 32 zie fig. 3.11. De gemeten Hallspanning tussen elektrode 16 en 24 heeft globaal hetzelfde verloop als het magneetveld, beide als functie van de tijd. Beide hebben een topwaarde rond de 40 s en stijgen en dalen globaal met dezelfde helling, zie fig. 3.11. De grafiek van de Hallspanning tussen elektrode 24 en 32 vertoont hetzelfde verloop alleen is de top duidelijk afgeplat in vergelijking met de grafiek van de Hallspanning tussen elektrode 16 en 24. Dit afplatten van de grafiek wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het optreden van Hallkortsluiting. Hierdoor kan het Hallveld blijkbaar boven een bepaalde waarde niet verder opgebouwd worden.

Bij afnemend magneetveld wordt de Hallkortsluiting opgeheven, en wel zodanig dat bij afnemend magneetveld de afstand waarover Hallkortsluiting optreedt steeds kleiner wordt. Dit is in fig. 3.12 waar te nemen doordat de stroom weer aangroeit. Het weer stijgen van de stroom vangt op een later tijdstip aan naarmate men verder stroomafwaarts komt. Opvallend is dat de stroom toeneemt terwijl het magneetveld daalt (elektrode 30 en 32). Dit is een duidelijke indicatie van het verdwijnen van de Hallsluiting.

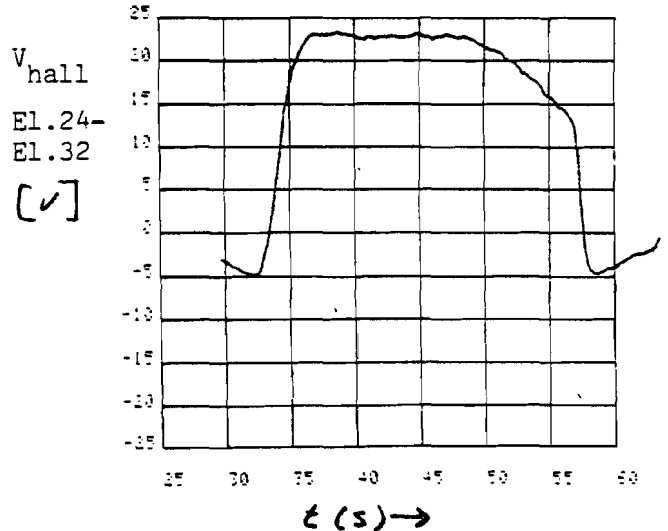
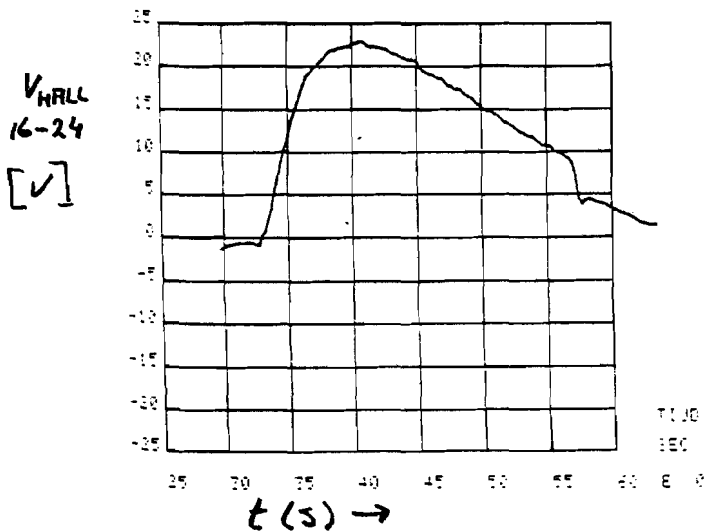
Door Hallkortsluiting ontstaan Lorentzkrachten in de y-richting. Ten gevolge van deze krachten is de druk niet meer constant over de dwarsdoorsnede hetgeen een sterke grenslaagaangroei tot gevolg kan hebben.



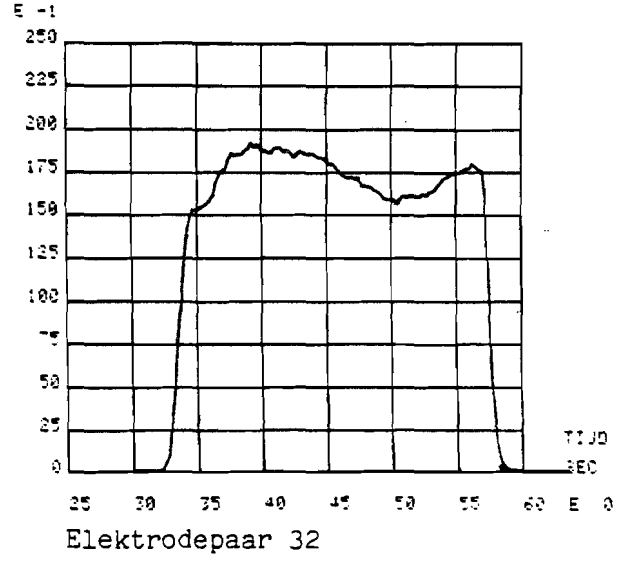
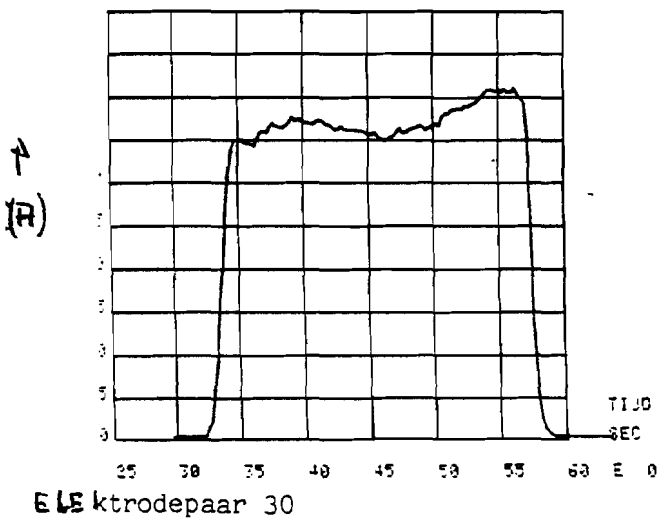
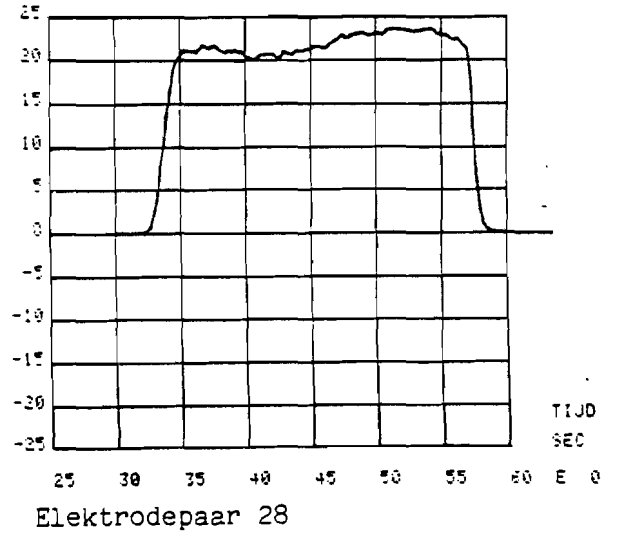
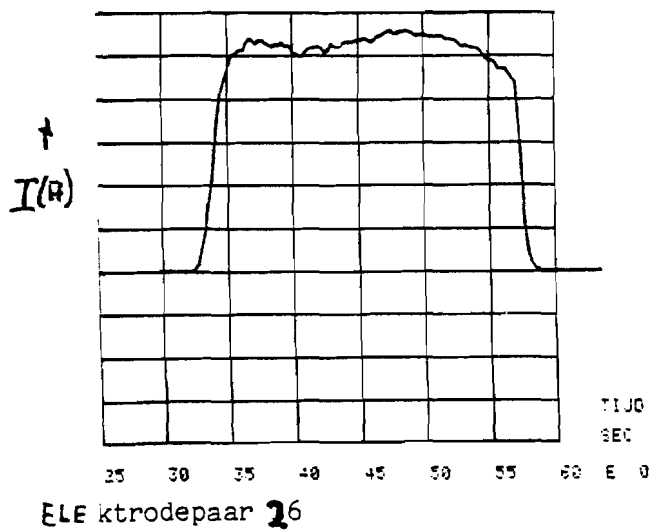
Figuur 3.9 Het aangelegde magneetveld als functie van de tijd



Figuur 3.10 Het verloop van de stroom van elektrodepaar 10 tot en met 32 gedurende het aangroeien van het magneetveld tot op  $t=38$  s, run 302.



Figuur 3.11 De Hallspanning gemeten tussen de elektroden 16 en 24 en tussen de elektroden 24 en 32



Figuur 3.12 De gemeten stroom als functie van de tijd bij de elektroden 26, 28, 30 en 32, run 302.

## HOOFDSTUK 4. GEGEVENS. MEETSERIE 3

### 4.1. INLEIDING

In oktober 1981 werd meetserie 3 uitgevoerd. Meetserie 3 omvatte drie runs. Bij run 303 werd een vermogen van 362 kW opgewekt, het beste resultaat tot nu toe. Bij het bepalen van het verband tussen geleiding en stroom is uitgegaan van run 302 omdat de generator bij deze run optimaal gewerkt heeft. In dit hoofdstuk worden de gegevens van meetserie 3 gepresenteerd. De bijbehorende grafieken en tabellen zijn in de meeste gevallen opgenomen in appendix C.

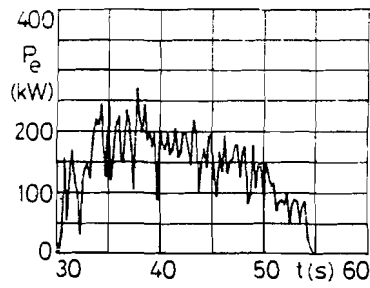
### 4.2. ENKELE ALGEMENE GEGEVENS VAN MEETSERIE 3

In run 301 zijn de open circuit spanningen gemeten. In dit geval is het medium in de generator een recombinerend plasma met een beperkt aantal vrije elektronen en dus een hoge inwendige weerstand. Omdat tijdens deze run geen vermogen is opgewekt blijft deze run verder buiten beschouwing.

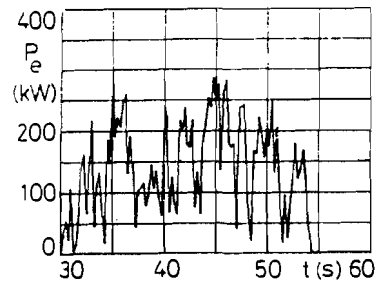
Tijdens de runs 302 en 303 zijn de eerste vier elektrodenparen kortgesloten ter wille van de voorionisatie. Hierdoor zien we in het stroomverloop een stroompiek bij de vierde elektrode. De cesiuminzaai was minimaal 0.1%. De voorionisatie heeft het relaxatieproces niet doen verdwijnen maar heeft vermoedelijk de generatie van streamers wel beter doen verlopen. De grafiek van het opgewekte vermogen fluctueert bij deze runs aanzienlijk minder dan bij andere runs, zie fig. 4.1.

Tijdens run 303 is de magneet uitgeschakeld op  $t=47$  s omdat er Hallkortsluiting naar aarde optrad in de bedrading van het kanaal.

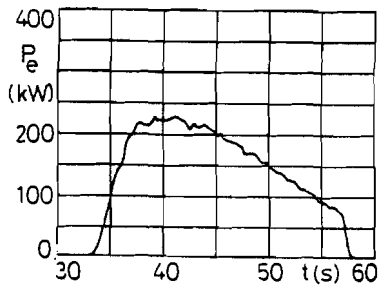




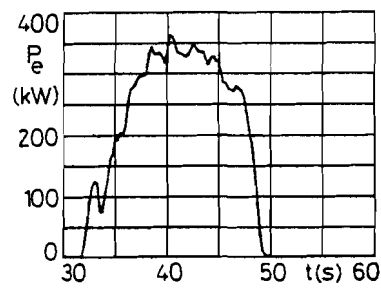
a) run 204,  $R_L = 6 \Omega$



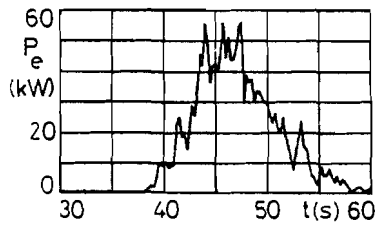
b) run 205,  $R_L = 4 \Omega$



c) run 302,  $R_L = 9 \Omega$



d) run 303,  $R_L = 6 \Omega$



e) run 502,  $R_L = 6 \Omega$

Figuur 4.1 Opgewekt vermogen bij diverse runs.

4.3 RELEVANTE GEGEVENS VAN RUN 302 EN 303

Uit de veelheid van gegevens die gemeten zijn bij run 302 en 303 worden alleen de gegevens gepresenteerd die van belang zijn voor dit werk. In dit verband zijn vooral de gegevens op bepaalde tijdstippen van belang. In tabel 4.1 zijn deze tijdstippen te vinden met de bijbehorende magneetvelden.

tijd (s)	magneetveld (T)
39,25	4,74
45	4,37
50	3,87
55	3,51

Tabel 4.1 Het magneetveld bij run 302 op vier verschillende tijdstippen.

In appendix C, tabel C1, zijn de stroomwaarden te vinden als functie van de plaats op de boven genoemde tijdstippen.

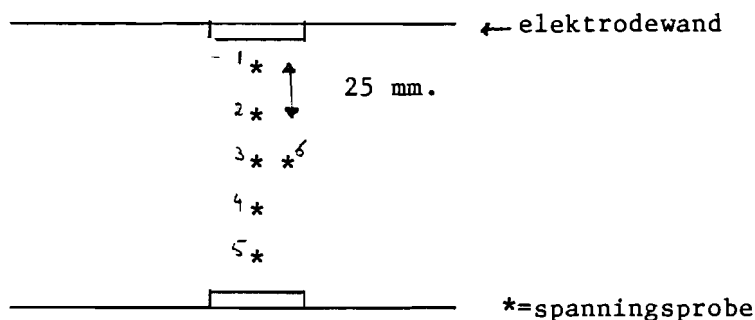
De belastingsweerstand bedragen bij run 302 9  $\Omega$  en bij run 303 6  $\Omega$ , terwijl bij beide runs de eerste vier elektrodenparen waren kortgesloten.

Tabel C2 geeft de positie van de drukmeetpunten en de gemeten drukken op de bovengenoemde tijdstippen.

Tabel C3 bevat een aantal algemene gegevens van diverse runs.

#### 4.4 DE SPANNINGSPROBE-METING

In het kanaal dat gebruikt is bij meetserie 3 zijn ter hoogte van de negentiende en zesentwintigste elektrode spanningsprobes in de zijwand (isolatorwand) aangebracht om de potentiaalverdeling als functie van de hoogte te meten. De spanningsprobes, 6 stuks, hebben steeds een onderlinge afstand van 25 mm, zie fig 4.2. Het einde van de probe valt samen met de rand van het borium-nitride, waarmee de wanden omwille van de thermische isolatie bekleed zijn. De spanning wordt gemeten ten opzichte van de anode.



Figuur 4.2 Situering van de spanningsprobes

De probes 1 tot en met 5 meten de potentiaalverdeling in de y-richting terwijl probe 6 is aangebracht om het lokale Hallveld te kunnen meten. De resultaten van deze meting zijn te vinden in appendix C in de grafieken C4 tot en met C7. Deze metingen zijn gedaan bij elektrodepaar 19. De doorgetrokken lijn is getrokken van meetpunt naar meetpunt terwijl de gestippelde lijn met behulp van de kleinste kwadraten methode is getrokken door de punten die horen bij 25, 50, 75, 100 en 125 mm. De stippellijn geeft het geïnduceerde veld in de bulk van de generator weer. Uit het verschil tussen doorgetrokken en gestippelde lijn bij anode en katode kunnen we de voltagedrop over de grenslagen bepalen.

## HOOFDSTUK 5 VERGELIJKINGEN VOOR DE HOOFDSTROOM EN DE GRENSLAGEN

### 5.1 INLEIDING

Om de hot-flowtrain, het generatordeel van de nozzle tot en met de subsone-diffusor, van toekomstige generatoren te kunnen dimensioneren moet men de beschikking hebben over een goed rekenprogramma. Met behulp van dit rekenprogramma moeten verwachte rendementen en opgewekte vermogens berekend kunnen worden als de thermodynamische en elektrische in- en uitvoergegevens worden ingevoerd. Om de rekentijd enigzins binnen de perken te houden moet men een aantal vereenvoudigende aannamen invoeren.

Uitgaande van de complete set basisvergelijkingen wordt door Masee (Mas1) een set globale driedimensionale vergelijkingen afgeleid waaruit hij vervolgens een quasi-eendimensionaal model opstelt dat het uitgangspunt is voor het MHD-rekenprogramma. De afleiding van het quasi-eendimensionale model komt in dit hoofdstuk aan de orde. In het MHD-rekenprogramma worden de grenslagen door middel van verplaatsingsdikten in rekening gebracht, de aanwezigheid van streamers blijft buiten beschouwing.

In dit hoofdstuk wordt niet beoogd de afleiding van de vergelijkingen voor de hoofdstroom en de grenslagen van begin tot eind compleet weer te geven. Alleen de belangrijkste uitgangspunten en afleidingen zijn in dit werk opgenomen om de grote lijn weer te geven. Voor details wordt verwezen naar de literatuur en vooral naar de dissertatie van Masee (Mas1) en het paper (Mas2).

### 5.2 EERSTE VEREENVOUDIGINGEN VOOR MHD-OMSTANDIGHEDEN

Het werkmedium in de Eindhovense MHD-generator bestaat voor het grootste deel uit het edelgas argon. Ter wille van het geleidingsvermogen is daar een kleine hoeveelheid inzaaimateriaal, cesium, aan toegevoegd. Het plasma heeft een

stagnatietemperatuur van 2000 K en een druk van enkele bars. Onder deze omstandigheden bestaat het plasma uit elektronen, argon ionen en atomen en cesium ionen en atomen. Bij het opstellen van de wetten van behoud van massa, impuls en energie en de wetten van Maxwell worden voor dit specifieke MHD plasma een aantal vereenvoudigende aannamen gemaakt. Deze aannamen zijn nodig om het complexe probleem zover te vereenvoudigen dat de rekentijd binnen redelijke grenzen blijft.

- a) Door de sterke botsingsinteractie worden temperatuur en stromingssnelheid voor alle zware deeltjes, argon en cesium ionen en atomen, gelijk verondersteld.
- b) Doordat het magnetisch Reynoldsgetal laag is mag de magnetische inductie, veroorzaakt door de elektrische stromen in het plasma worden verwaarloosd.
- c) De ruimtelading wordt klein verondersteld.

$$\left| \frac{n_e - n_i}{n_e} \right| \ll 1 \quad (5.1)$$

d) Door de lage waarde van het magnetisch Reynoldsgetal en het feit dat de frequentie van de te bestuderen fenomenen laag is ten opzichte van de plasmafrequentie reduceert de set wetten van Maxwell tot

$$\nabla \cdot \vec{j} = 0 \quad (5.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (5.3)$$

Dit zijn de voornaamste uitgangspunten om te komen tot een set basisvergelijkingen. Deze basisvergelijkingen zijn te vinden in de literatuur, bijvoorbeeld (Sut1) en (Mas1).

### 5.3 DE GLOBALE, QUASI-EENDIMENSIONALE VERGELIJKINGEN

Uit de complete set van basisvergelijkingen leidt Masee een set globale driedimensionale vergelijkingen af (Mas1). Daarbij is er

van uit gegaan dat voor de beschrijving van de grenslagen en de hoofdstroom door een kanaal met een langzaam variërende doorsnede alleen de axiale component van de impuls wet nodig is. De globale driedimensionale vergelijkingen voor het plasma zijn:

$$\frac{\delta}{\delta x}(\rho u) + \frac{\delta}{\delta y}(\rho v) + \frac{\delta}{\delta z}(\rho w) = 0 \quad (5.4)$$

$$\rho u \frac{\delta u}{\delta x} + \rho v \frac{\delta u}{\delta y} + \rho w \frac{\delta u}{\delta z} = - \frac{\delta p}{\delta x} + j_y B_z + \frac{\delta}{\delta y}(\mu_t \frac{\delta u}{\delta y}) + \frac{\delta}{\delta z}(\mu_t \frac{\delta u}{\delta z}) \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\delta H}{\delta x} + \rho v \frac{\delta H}{\delta y} + \rho w \frac{\delta H}{\delta z} = \vec{j} \cdot \vec{E} + \frac{\delta}{\delta y}(\kappa_t \frac{\delta T}{\delta y}) + \frac{\delta}{\delta z}(\kappa_t \frac{\delta T}{\delta z}) \\ + \frac{\delta}{\delta y}(\mu_t u \frac{\delta u}{\delta y}) + \frac{\delta}{\delta z}(\mu_t u \frac{\delta u}{\delta z}) \end{aligned} \quad (5.6)$$

De rechterkant van de vergelijkingen is vereenvoudigd met de aanname dat de snelheidscomponent in de x-richting de grootste snelheidscomponent is en dat de gradienten van u en T de grootste componenten hebben loodrecht op de wand. Er is een stationaire toestand aangenomen en de volgende definities zijn gebruikt.

$$\rho = \sum_j n_j m_j = n_{aA} m_A + n_{aC} m_C \quad (5.7)$$

$$H = \frac{5}{2} RT + \frac{u^2}{2} = C_p T + \frac{u^2}{2} \quad (5.8)$$

$$p = \sum_j n_j kT_j \cong (n_A + n_C)kT = nkT \quad (5.9)$$

$$\vec{j} = en_e(\vec{u} - \vec{u}_e) \quad (5.10)$$

De bijdrage van de elektronen aan  $\rho$ ,  $p$  en  $\rho H$  is verwaarloosd omdat geldt  $n_e \ll n$  en  $m_e \ll m_A, m_C$ . Verder is aangenomen dat de warmtegeleiding door de elektronen te verwaarlozen is ten opzichte van die door de zware deeltjes. De stralingsverliezen zijn verwaarloosd. De turbulentie van de zware deeltjes wordt in rekening gebracht door  $\kappa_t$  en de turbulente wrijving van de zware deeltjes door  $\mu_t$ .

We verkrijgen de quasi-eendimensionale vergelijkingen door aan te nemen dat de doorsnede zo langzaam varieert dat de snelheidscomponenten  $v$  en  $w$  en de afgeleiden in de  $y$  en  $z$  richting verwaarloosd kunnen worden. Wrijvings- en warmtegeleidingseffecten worden nu uitgesmeerd over de omtrek van de doorsnede. Na middeling over de doorsnede vinden we de globale quasi-eendimensionale vergelijkingen:

$$\frac{d}{dx}(\rho u A) = 0 \quad (5.11)$$

$$\rho u \frac{du}{dx} = - \frac{dp}{dx} + j_y B_z + \tau_{xy,w} \frac{C}{A} \quad (5.12)$$

$$\rho u \frac{dH}{dx} = \vec{j} \cdot \vec{E} - q_{y,w} \frac{C}{A} \quad (5.13)$$

#### 5.4. VEREENVOUDIGDE VERGELIJKINGEN VOOR HET ELEKTRONENGAS

In de set basisvergelijkingen staan de vergelijkingen die gebruikt kunnen worden om de grenslagen van  $n_e$  en  $T_e$  langs de wanden te beschrijven. Het oplossen van deze vergelijkingen is echter een dermate complexe zaak dat we met behulp van een aantal aannamen het probleem drastisch gaan vereenvoudigen. Na verwaarlozing van de afgeleiden van  $n_e$ ,  $T_e$  en  $\vec{u}_e$  vinden we de Saha vergelijkingen voor argon en cesium ionen.

$$\frac{n_e n_{iC}}{n_{aC}} = \frac{k_{fC}}{k_{rC}} = 2,42 \cdot 10^{21} T_e^{3/2} \exp\left(\frac{-3,893e}{kT_e}\right) \quad (5.14)$$

$$\frac{n_e n_{iA}}{n_{aA}} = \frac{k_{fA}}{k_{rA}} = 2,42 \cdot 10^{21} T_e^{3/2} \exp\left(\frac{-15,75e}{kT_e}\right) \quad (5.15)$$

De impulsvergelijking voor elektronen kan geschreven worden als een gegeneraliseerde wet van Ohm door gebruik te maken van de definities in formule 5.16 en 5.17.

$$\sigma = \frac{e^2 n_e}{m \sum_j \frac{v_j}{e_j}} \quad (5.16)$$

$$\beta = \frac{eB}{m \sum_j \frac{v_j}{e_j}} \quad (5.17)$$

en de vergelijking 5.10. Zo vinden we:

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) - \frac{\beta}{B}(\vec{j} \times \vec{B}) \quad (5.18)$$

of door gebruik te maken van de Halltensoren  $M_{\alpha\beta}$  :

$$j_\alpha = \sigma \sum_\beta M_{\alpha\beta} (\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B})_\beta \quad (5.19)$$

De Halltensoren kan in matrixvorm geschreven worden als:

$$\left| M_{\alpha\beta} \right| = \frac{1}{1 + \beta^2} \begin{vmatrix} 1 & -\beta & 0 \\ \beta & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 + \beta^2 \end{vmatrix} \quad (5.20)$$

met behulp van 5.10 en 5.16 vinden we voor de elektronenenergiebalans:

$$\frac{|\vec{j}|^2}{\sigma} - 3kn_e m_e (T_e - T) \sum_j \frac{v_j}{m_j} - \dot{R} = 0 \quad (5.21)$$

De eerste term beschrijft de joulse dissipatie, de tweede het energieverlies door elastische botsingen van elektronen met zware deeltjes.  $\dot{R}$  staat voor stralingsverliezen.

### 5.5 VERGELIJKINGEN VOOR DE HOOFDSTROOM

De quasi-eendimensionale benadering van de vergelijkingen 5.11 tot en met 5.13 is niet geldig als de grenslagen een belangrijk

---



deel van de kanaaldoorsnede beheersen. Daarnaast moeten grenslagen en hoofdstroom duidelijk van elkaar te onderscheiden zijn om een aparte beschrijving zinvol te maken. De hoofdstroom is te beschrijven met behulp van de quasi-eendimensionale benadering uit 5.11 tot en met 5.13. De wrijving en warmtegeleiding effecten verdwijnen door het ontbreken van gradienten in de y- en z-richting. We kiezen u en p als onafhankelijke variabelen en met behulp van 5.8, 5.11 en 5.9 die ook kan worden geschreven als 5.22 vinden we de uitdrukkingen 5.23 en 5.24. Het subscript  $\infty$  geeft aan dat het bulkgrootheden betreft.

$$p = \rho RT \quad (5.22)$$

$$\frac{du_{\infty}}{dx} = \frac{u_{\infty}}{1 - M_{\infty}^2} \left( \frac{\vec{E}_{\infty} \cdot \vec{j}_{\infty}}{\rho_{\infty} u_{\infty} C_p T_{\infty}} - \frac{j_{y\infty} B_z}{p_{\infty}} - \frac{1}{A_{\text{eff}}} \frac{dA_{\text{eff}}}{dx} \right) \quad (5.23)$$

$$\frac{dp_{\infty}}{dx} = j_{y\infty} B_z - \rho_{\infty} u_{\infty} \frac{du_{\infty}}{dx} \quad (5.24)$$

$A_{\text{eff}}$  moet berekend worden uit de geometrische gegevens van het kanaal en gecorrigeerd worden voor de aanwezigheid van grenslagen. Op deze wijze komt de koppeling tussen hoofdstroom en grenslagen tot stand. Aan het eind van paragraaf 5.6 komt dit nog aan de orde.

We hebben nu alleen de afgeleiden van  $p_{\infty}$  en  $u_{\infty}$  nodig om de integratie in de x-richting voor de bulk uit te kunnen voeren. Alle andere grootheden kunnen worden berekend. De componenten van  $\vec{j}$  en  $\vec{E}$  moeten worden berekend uit de vergelijkingen van het elektronengas.

## 5.6. INTEGRALVERGELIJKINGEN VOOR DE GRENSLAGEN

Als de basisvergelijkingen vanaf de wand tot het midden van de bulk geïntegreerd worden vinden we de volgende vergelijkingen voor de grenslaagparameters (voor details zie Mas2):

De impuls integraalvergelijking:

$$\frac{d\delta_{2,q}}{dx} + \delta_{2,q} \left( \frac{d \ln \rho_{\infty}}{dx} + \frac{d \ln u_{\infty}}{dx} \left( 2 + \frac{\delta_{1,q}}{\delta_{2,q}} + D_q \right) \right) = \quad (5.25)$$

$$\frac{C_f}{2} + \frac{j_{y\infty} B \delta_{j,q}}{\rho_{\infty} u_{\infty}^2}$$

De kinetische energie integraalvergelijking:

$$\frac{d\delta_{3,q}}{dx} + \delta_{3,q} \left( \frac{d \ln \rho_{\infty}}{dx} + \frac{d \ln u_{\infty}}{dx} \left( 3 - 2 \frac{\delta_{5,q}}{\delta_{3,q}} \right) + D_q \right) = \quad (5.26)$$

$$2C_D + \frac{2j_{y\infty} B \delta_{ju,q}}{\rho_{\infty} u_{\infty}^2}$$

De totale enthalpie integraalvergelijking:

$$\frac{d\delta_{H,q}}{dx} + \delta_{H,q} \left( \frac{d \ln \rho_{\infty}}{dx} + \frac{d \ln u_{\infty}}{dx} + \frac{H_{\infty}}{H_{\infty} - H_w} \frac{d \ln H_{\infty}}{dx} \left( 1 + \frac{\delta_{1,q}}{\delta_{H,q}} \right) \right) \quad (5.27)$$

$$- \frac{H_w}{H_{\infty} - H_w} \frac{d \ln H_w}{dx} + D_q \Big) = S_t + \frac{E_{y\infty} j_{y\infty} \delta_{Ej,q}}{\rho_{\infty} u_{\infty} (H_{\infty} - H_w)}$$

De laatste term in vergelijking 5.27 geeft het speciale MHD effect voor de elektrodewandgrenslaag. In deze vergelijkingen geeft het subscript q aan of de isolatorwand (q=i) of de elektrodewand (q=e) wordt bedoeld. Bovendien zijn de volgende definities gebruikt (voor de elektrodewand spreken we af y=0).

$$\delta_{1,e} = \int_0^{\delta} \left( 1 - \frac{\rho u}{\rho_{\infty} u_{\infty}} \right) dy ; \quad \delta_{2,e} = \int_0^{\delta} \frac{\rho u}{\rho_{\infty} u_{\infty}} \left( 1 - \frac{u}{u_{\infty}} \right) dy ; \quad (5.28)$$

$$\delta_{3,e} = \int_0^{\delta} \frac{\rho u}{\rho_{\infty} u_{\infty}} \left( 1 - \frac{u^2}{u_{\infty}^2} \right) dy ; \quad \delta_{5,e} = \int_0^{\delta} \frac{\rho u}{\rho_{\infty} u_{\infty}} \left( 1 - \frac{T}{T_{\infty}} \right) dy ; \quad (5.29)$$

$$\delta_{H,e} = \int_0^{\delta} \frac{\rho u}{\rho_{\infty} u_{\infty}} \left( 1 - \frac{H - H_w}{H_{\infty} - H_w} \right) dy ; \quad C_f = \frac{2\tau_w}{\rho_{\infty} u_{\infty}^2} ; \quad (5.30)$$

$$C_D = \frac{1}{\rho_{\infty} u_{\infty}^3} \int_0^{\delta} \tau_{xy} \frac{\delta u}{\delta y} dy ; \quad S_t = \frac{q_w}{\rho_{\infty} u_{\infty} (H_{\infty} - H_w)} \quad (5.31)$$

$$D_e = \frac{1}{b} \frac{dh}{dx} ; D_i = \frac{1}{h} \frac{dh}{dx} \quad (5.32)$$

De invloed die de divergentie van de wand heeft op de grenslagen wordt door de parameter  $D_q$  in rekening gebracht. De MHD termen in het rechter gedeelte van de vergelijkingen 5.25 tot en met 5.27 moeten nog wat nader besproken worden omdat ze essentieel verschillen voor de elektrodewand ( $y=0, h$ ) en de isolatorwand ( $z=0, b$ ).

Voor de isolatorwand geldt volgens  $\nabla \times \vec{E} = 0$  dat  $E_y = E_{y\infty}$ . Als gevolg van het aanwezige snelheidsprofiel als functie van  $z$  varieert  $j_y$  sterk in de buurt van de wand. Dit is de oorzaak van het in hoofdstuk 3 besproken speciale MHD effect voor isolatorwandgrenslagen. Alle MHD termen in het rechter gedeelte van de vergelijkingen 5.25 tot en met 5.27 belangrijk zijn voor de isolatorwand volgens de definities:

$$\delta_{j,i} = \int_0^\delta \left(1 - \frac{j_y}{j_{y\infty}}\right) dz ; \delta_{ju,i} = \int_0^\delta \frac{u}{u_\infty} \left(1 - \frac{j_y}{j_{y\infty}}\right) dz ; \quad (5.33)$$

$$\delta_{Ej,i} = \int_0^\delta \left(1 - \frac{\vec{E} \cdot \vec{j}}{\vec{E}_\infty \cdot \vec{j}_\infty}\right) dz \cong \int_0^\delta \left(1 - \frac{E_y j_y}{E_{y\infty} j_{y\infty}}\right) dz = \delta_{j,i} \quad (5.34)$$

Voor de elektrodewand geldt volgens  $\nabla \cdot \vec{j} = 0$ :  $j_y = j_{y\infty}$ . Dit is een redelijke benadering als wordt gemiddeld over de lengte van een elektrode pitch.  $\delta_{j,e}$  en  $\delta_{ju,e}$ , die analoog aan  $\delta_{j,i}$  en  $\delta_{ju,i}$  in vergelijking 5.33 en 5.34 zijn gedefinieerd, verdwijnen omdat  $j_y = j_{y\infty}$  voor de elektrodewandgrenslaag. Voor  $\delta_{Ej,e}$  is het gevolg:

$$\delta_{Ej,i} \cong \int_0^\delta \left(1 - \frac{E_y j_y}{E_{y\infty} j_{y\infty}}\right) dy = \int_0^\delta \left(1 - \frac{E_y}{E_{y\infty}}\right) dz = \frac{\Delta V}{2 E_{y\infty}} \quad (5.35)$$

De koppeling tussen hoofdstroom en grenslagen gebeurt met behulp van de effectieve kanaaldoorsnede  $A_{eff}$  uit vergelijking 5.23. Met effectieve kanaaldoorsnede wordt bedoeld de kanaaldoorsnede gecorrigeerd met de grenslaagverplaatsingsdikte. Voor deze effectieve doorsnede geldt:

$$A_{\text{eff}} = (h - 2\delta_{1,e})(b - 2\delta_{1,i}) \quad (5.36)$$

Voor  $\delta_{1,e}$  en  $\delta_{1,i}$  zijn geen formules gegeven omdat de waarde van deze twee variabelen iteratief wordt aangepast in het programma.

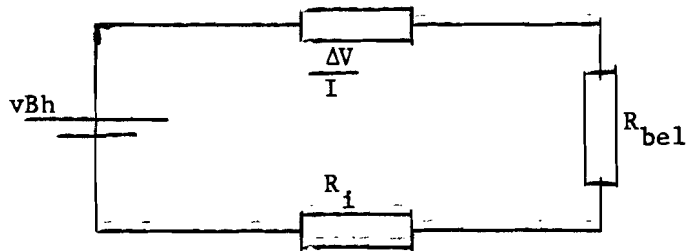
HOOFDSTUK 6. EEN NIEUW MODEL VOOR HET VERBAND TUSSEN HET

ELEKTRISCH GELEIDINGSVERMOGEN EN DE STROOM

6.1 INLEIDING

In de rekenprogramma's, zie appendix B, is steeds een blok opgenomen om de elektrische grootheden, met name de stroom(dichtheid), van het betreffende segment te berekenen. Hiervoor moet de spanningswet van Kirchhoff voor dat segment opgelost worden. In fig 6.1 is het vervangingsschema voor een segment gegeven. Om de spanningswet te kunnen oplossen moeten alle grootheden uit fig 6.1 bekend zijn.

De waarde van de magnetische veldsterkte  $B$  en die van de belastingweerstand  $R_{bel}$  zijn uit de gegevens van de betreffende meetserie bekend. De hoogte  $h$  is bekend uit de geometrie. De waarde van de snelheid  $v$  wordt voor ieder segment berekend waarbij de invloed van grenslagen in rekening wordt gebracht. De bepaling van de inwendige weerstand  $R_i$ , die evenredig is met de geleiding  $\sigma$ , en van de voltagedrop  $\Delta V$  wordt in dit hoofdstuk behandeld.



Figuur 6.1 Het elektrisch vervangingsschema voor een segment

Een groot aantal figuren in hoofdstuk 6 en hoofdstuk 7 zijn getekend met behulp van de computer. Het betreffende computerprogramma tekent de grafieken door lijnen te trekken tussen opgegeven coördinaatpunten in het vlak van tekening. In de grafieken worden daarom bij de coördinaatpunten soms hoeken getekend terwijl de functie op dat punt gewoon "glad" is. Omdat het echter in de meeste gevallen om het globale verloop gaat wordt dit verder voor lief genomen.

6.2. BEPALING VAN GELEIDING EN VOLTAGEDROP MET BEHULP VAN DE

SPANNINGSPROBE-METING

Tijdens run 302 zijn ter hoogte van de negentiende elektrode de spanningsprobenmetingen uitgevoerd die beschreven staan in paragraaf 4.4. De resultaten van deze metingen zijn te vinden in de grafieken C4 tot en met C7 in appendix C. Deze grafieken maken het mogelijk om de geleiding  $\sigma$  en de voltagedrop  $\Delta V$  te bepalen. De voltagedrop  $\Delta V$  is de som van de voltagedrops aan de anode en de cathode. Uit het verschil tussen de gestippelde en de doorgetrokken lijn aan de randen van de grafieken C4 tot en met C7 zijn de voltagedrops aan de anode en de cathode te bepalen en daarmee de totale voltagedrop  $\Delta V$ .

Voor de geleiding leiden we uitdrukking 6.4 af. Uit fig. 6.1 volgt:

$$vBh = R_1 I + \Delta V + R_{bel} I \quad (6.1)$$

Voor  $R_1$  geldt:

$$R_1 = \frac{h}{bs} \rho_1 = \frac{h}{bs\sigma} \quad (6.2)$$

waarin  $\rho_1$  de soortelijke weerstand is. Voor het verband tussen stroom en stroomdichtheid geldt:

$$I = bsj \quad (6.3)$$

Met behulp van 6.1, 6.2 en 6.3 vinden we:

$$\sigma = \frac{-j}{vB - \frac{R_{bel} bsj}{h} - \Delta V} \quad (6.4)$$

De breedte (b), de steek (s) en de hoogte (h) volgen uit de geometrische gegevens van het kanaal. Belastingsweerstand  $R_{bel}$  en

magneetveld B zijn bekend uit de gegevens van run 302. De waarden van de stroomdichtheid  $j$  en de waarde van de voltagedrop  $\Delta V$  zijn gemeten. De snelheid  $v$  is berekend met behulp van een gasdynamisch rekenprogramma waarbij de invloed van grenslagen in rekening is gebracht. Zoals in hoofdstuk 3 is gebleken komt het gemeten drukverloop en het berekende drukverloop in het eerste deel van de generator goed overeen. Daarom hoeft de berekende snelheid bij de negentiende elektrode niet te worden gecorrigeerd voor de geobserveerde drukverhoging in de tweede helft van de generator. Uit deze gegevens is de waarde van de geleiding  $\sigma$  te bepalen.

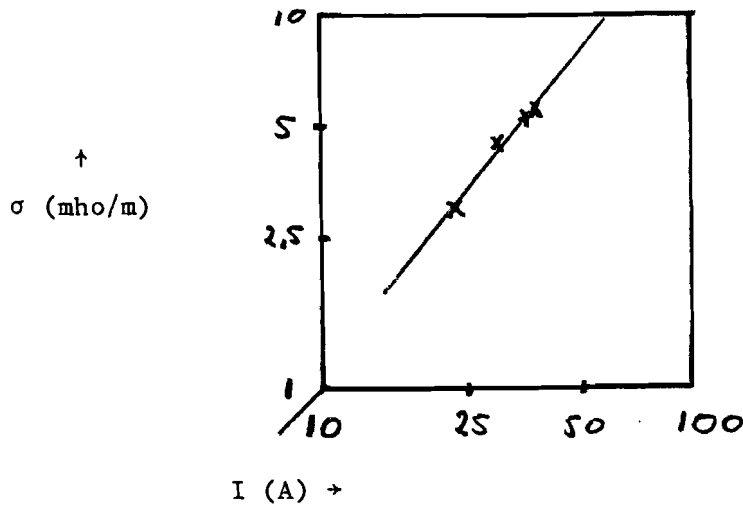
### 6.3 HET VERBAND TUSSEN GELEIDING EN STROOM

In tabel 6.1 zijn de gegevens opgenomen die nodig zijn voor de bepaling van de geleiding  $\sigma$ .

t (s)	39,25	45	50	55	RUN 302  $s = 0,025 \text{ m}$  $b = 0,1231 \text{ m}$  $R_{\text{bel}} = 9 \Omega$
B (T)	4,74	4,37	3,87	3,51	
$\Delta V$ (V)	118,3	95,5	67,3	46,3	
v (m/s)	1107	1126	1153	1169	
$I_y$ (A)	37,85	35,54	30,81	22,58	
$j_y$ (A/cm <sup>2</sup> )	1,23	1,15	1,00	0,73	
$\sigma$ (mho/m)	5,62	5,37	4,61	3,01	

Tabel 6.1 Gegevens run 302, ter hoogte van de negentiende elektrode.

We kunnen  $\sigma$  nu als functie van de stroom  $I$  uitzetten in een log-log grafiek, zie fig. 6.2.



Figuur 6.2 De geleiding  $\sigma$  als functie van de stroom(dichtheid)

De rechte lijn die door de meetpunten loopt heeft de mathematische gedaante van  $CI^M$ . Op deze manier vinden we het verband tussen  $\sigma$  en  $I$ . De helling van de lijn levert de waarde van de macht  $M$  en een punt dat in de formule wordt ingevuld levert de constante  $C$ . Zo vinden we:

$$\sigma = 0,0619 I^{1,25} \quad (6.5)$$

Op dezelfde manier is het verband tussen de geleiding  $\sigma$  en de stroomdichtheid  $j$  af te leiden.

$$\sigma = (4,49_{10^{-5}}) j^{1,25} \quad (6.6)$$

Zolang we op dezelfde plaats in het kanaal blijven, dat wil zeggen bij de negentiende elektrode, geven beide modellen dezelfde resultaten omdat geldt:

$$\sigma = CI^M = C(jbs)^M = C(bs)^M(j)^M = C'j^M \quad (6.7)$$

Gaan we echter het kanaal in de lengte richting doorrekenen dan geven de twee modellen op andere plaatsen in het kanaal dan bij de negentiende elektrode verschillende resultaten omdat door de

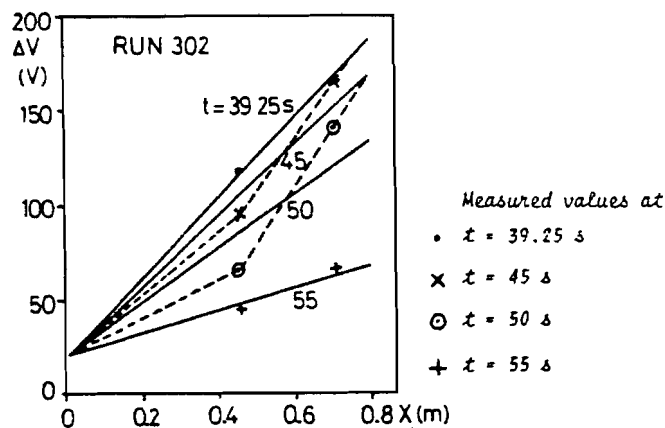


divergentie van het kanaal de breedte als functie van de plaats  $x$  verandert. In het model van formule 6.5 werkt deze breedteverandering direct door, in het model van uitdrukking 6.6 niet. Omdat slechts van één plaats meetgegevens beschikbaar zijn kunnen we niet zonder meer een keuze maken tussen beide modellen. Weliswaar is bij de zesentwintigste elektrode dezelfde meting uitgevoerd maar door het optreden van Hallsluiting en de geobserveerde drukverhoging is de berekende snelheid daar ter plaatse en daardoor het geleidingsvermogen minder betrouwbaar. In eerste instantie was er een voorkeur voor het model volgens uitdrukking 6.6 omdat dit een relatie is tussen lokale grootheden. Naar aanleiding van resultaten die in hoofdstuk 7 behandeld worden is echter gekozen voor het model volgens uitdrukking 6.5.

#### 6.4. HET VERBAND TUSSEN DE VOLTAGEDROP EN DE STROOM

Ook de voltagedrop moet bij de berekeningen per segment bekend zijn om de wet van Ohm op te kunnen lossen.

De eerste mogelijkheid om dit te realiseren is de voltagedrop voor te schrijven volgens een vast profiel als functie van de plaats  $x$ . Bij de bepaling van dit profiel wordt uitgegaan van de voltagedrop die gemeten wordt bij de negentiende en de zesentwintigste elektrode. Door deze beide punten wordt een rechte lijn getrokken die dan de voltagedrop als functie van de plaats beschrijft, zie fig. 6.3.

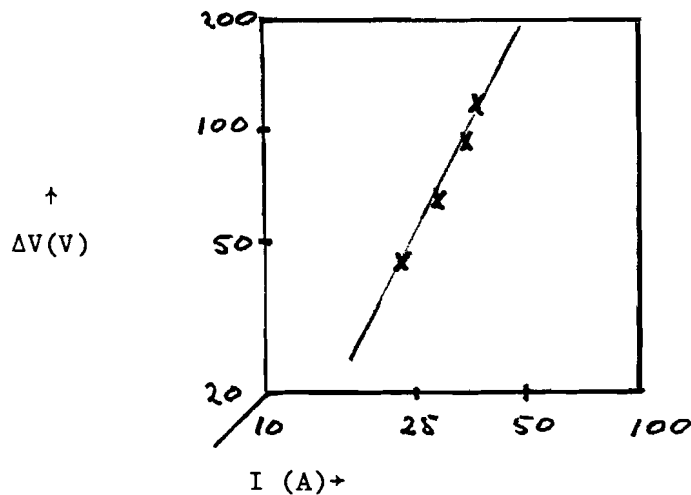


Figuur 6.3 Gemeten voltagedrop profiel als functie van de plaats  $x$  bij verschillende magneetvelden.

Een nadeel van deze methode is dat het profiel zeer onnauwkeurig is door het beperkte aantal meetpunten. Bovendien is de meting bij de zesentwintigste elektrode mogelijk minder betrouwbaar door aanwezigheid van de waargenomen drukverhoging en het mogelijk optreden van Hallsluiting.

Een tweede mogelijkheid is om een verband te zoeken tussen de stroom en de voltagedrop zoals dat gebeurt is in de vorige paragraaf voor het verband tussen  $\sigma$  en  $I$ .

Ook  $\Delta V$  en  $I$  worden daartoe in een log-log grafiek uitgezet, zie fig. 6.4,



Figuur 6.4 De voltagedrop als functie van de stroom(dichtheid)

Met behulp van de grafiek uit fig 6.4 wordt uitdrukking 6.8 gevonden.

$$\Delta V = 0,085 I^{1,99} \quad (6.8)$$

Zo kunnen we indien gewenst ook het verband tussen de voltagedrop en de stroomdichtheid vinden

$$\Delta V = (8,53_{10}^{-7}) j^{1,99} \quad (6.9)$$

Voor de voltagedrop is de stroom  $I$  echter de logische parameter. De stroomdichtheid  $j$  uit de bulk is een grootte die gemiddeld is over de doorsnede van het segment. De doorsnede waardoor de stroom vloeit wordt in de buurt van de wand, waar de voltagedrop optreedt, verkleind tot een zeer klein oppervlak

omdat de stroom zich in de buurt van de wand sterk concentreert (Houl). Naar aanleiding hiervan is gekozen voor het model volgens uitdrukking 6.8.

Door het verband tussen  $\sigma$  en  $I$  en het verband tussen  $\Delta V$  en  $I$  of het gemeten profiel voor  $\Delta V$  als functie van  $x$  in te vullen in de wet van Kirchhoff krijgen we een vergelijking met één onbekende, namelijk de stroom  $I$ , waardoor deze vergelijking oplosbaar wordt als de snelheid  $v$  bekend is. Zowel met het model uit formule 6.8 als ook met het voorgeschreven profiel in de  $x$ -richting zijn berekeningen uitgevoerd waarvan de resultaten te vinden zijn in hoofdstuk 7.

### 6.5. SPANNINGSWET VAN KIRCHHOFF VOOR EEN SEGMENT

Als we de gevonden verbanden invullen in uitdrukking 6.1 dan vinden we:

$$vBh = \frac{hI}{bs \ 0,0619 \ I^{1,25}} + R_{bel} I + 0,085 \ I^{1,99} \quad (6.10)$$

Dit leidt na uitwerking tot de relatie:

$$I - \alpha I^{1,25} + \beta I^{2,25} + \gamma I^{3,24} = 0 \quad (6.11)$$

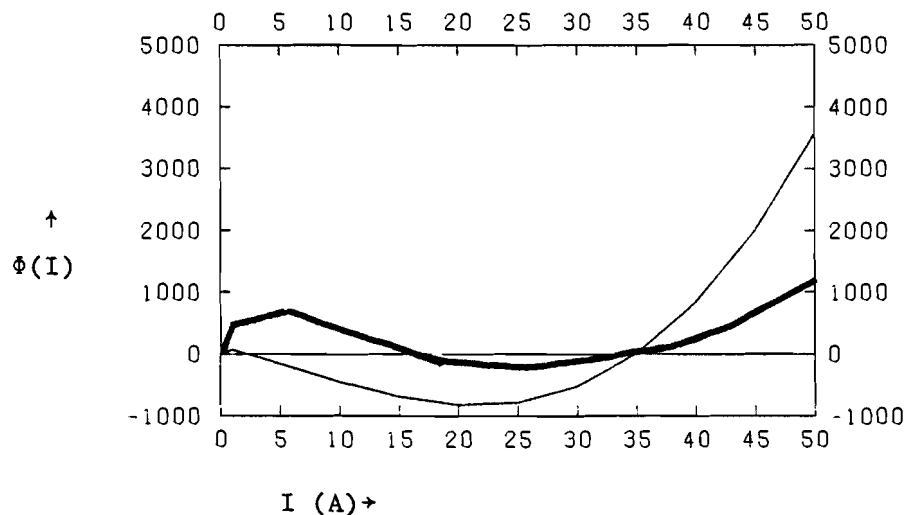
waarin voor  $\alpha$ ,  $\beta$  en  $\gamma$  bij variabel en vast profiel voor de voltagedrop de volgende uitdrukkingen gelden:

$\Delta V = 0,085 \ I^{1,99}$	$\Delta V$ volgens vast profiel als functie van $x$ .
$\alpha = 0,0619 \ vBbs$	$\alpha = 0,0169 \ bs(vB - \frac{\Delta V}{h}) \quad (6.12)$
$\beta = \frac{0,0619 \ R_{bel} \ bs}{h}$	$\beta = \frac{0,0619 \ R_{bel} \ bs}{h} \quad (6.13)$
$\gamma = \frac{0,0619 \ bs \ 0,085}{h}$	$\gamma = 0 \quad (6.14)$

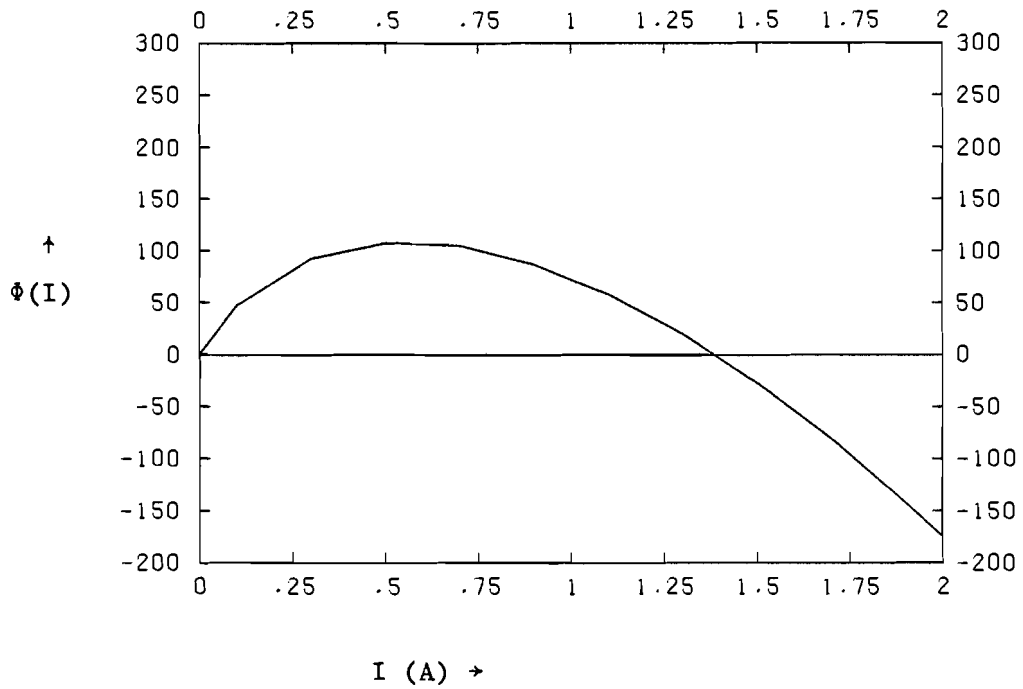
We definiëren nu een functie  $\phi(I)$  om het gedrag van uitdrukking 6.11 verder te onderzoeken. Een van de nulpunten van de functie  $\phi(I)$  moet de stroom voor het betreffende segment opleveren als de gegevens van dat segment in de uitdrukkingen 6.11 tot en met 6.14 invullen.

$$\phi(I) = I - \alpha I^{1,25} + \beta I^{2,25} + \gamma I^{3,24} \quad (6.15)$$

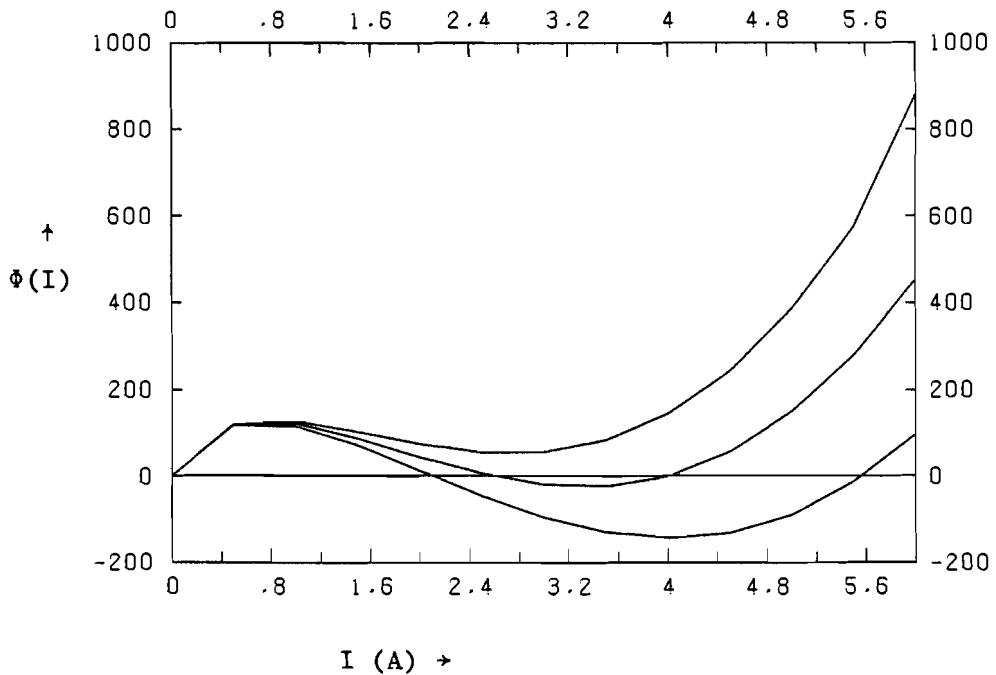
In fig. 6.5 en 6.6 is de functie  $\phi(I)$  getekend als functie van  $I$ , zowel voor voorgeschreven voltagedrop profiel als ook voor variabel voltagedrop profiel, waarbij de gegevens van run 302 op tijdstip  $t=45$  s gebruikt zijn, zie tabel 6.1. De functie heeft drie verschillende nulpunten, namelijk bij 0, 1,35 en 34,91 A. Dit laatste nulpunt komt, op een geringe afwijking na, overeen met de waarde van de gemeten stroom (35,54 A). Deze afwijking wordt vooral veroorzaakt door het model voor de voltagedrop, dat wat onnauwkeurig is omdat de gemeten waarden niet precies op een lijn liggen. Het derde nulpunt, waarbij de grootste waarde hoort, levert in dit geval de juiste oplossing. Om na te gaan of dit altijd het geval is en om het gedrag van  $\phi(I)$  verder te bestuderen wordt de functie opnieuw getekend, zie fig 6.7. De condities blijven hetzelfde, alleen de waarde van de belastingsweerstand is verandert namelijk 40, 45 en 50  $\Omega$ .



Figuur 6.5 De functie  $\phi(I)$  als functie van  $I$  bij een belastingsweerstand van 9  $\Omega$ . De dikke lijn is berekend met voorgeschreven  $\Delta V$  profiel, de dunne met variabel  $\Delta V$  profiel.



Figuur 6.6 De functie  $\Phi(I)$  als functie van  $I$  bij een belastingsweerstand van  $9 \Omega$ , waarbij de schaal voor  $I$  is uitgerek.  $\Delta V = 0,085 I^{1,99}$ .



Figuur 6.7 De functie  $\Phi(I)$  als functie van  $I$  bij drie verschillende belastingsweerstand. Grafieken van boven naar beneden resp.  $50, 45$  en  $40 \Omega$ . elektr.  $19 v=1107$  m/s,  $B=4.74$  T,  $\Delta V = 0,085 I^{1,99}$ .

In fig. 6.7 zijn een drietal opvallende eigenschappen van functie  $\Phi(I)$  te constateren.

a) Bij 40 en 45  $\Omega$  heeft de functie  $\Phi(I)$  naast het punt (0;0) nog twee snijpunten met de I-as. Bij de toename van 40 naar 45  $\Omega$  neemt de waarde van de stroom I die bij het middelste snijpunt hoort toe. Dit gedrag is "onfysisch" en dit wijst erop dat dit nulpunt niet de goede oplossing oplevert, zoals ook al bleek uit fig. 6.5 en 6.6. Met behulp van het gegeven dat voor het middelste snijpunt geldt:  $\frac{d\Phi(I)}{dI} < 0$  is eenvoudig te bewijzen dat dit punt geen stabiele oplossing oplevert. In appendix A wordt het bewijs van de instabiliteit van het middelste snijpunt geleverd. Het rechter snijpunt waarvoor geldt:  $\frac{d\Phi(I)}{dI} > 0$  levert een stabiele oplossing die op een kleine fout na dezelfde waarde heeft als de gemeten stroom. Bovendien wordt de waarde van de stroom die bij deze oplossing hoort kleiner als de waarde van de belastingsweerstand toeneemt van 40 naar 45  $\Omega$  hetgeen het te verwachten fysische gedrag is.

b) Bij een belastingsweerstand van 50  $\Omega$  heeft de functie  $\Phi(I)$ , behalve bij het punt (0;0), geen snijpunten met de I-as. In eerste instantie lijkt dit niet in overeenstemming met de wet van Ohm want de snelheid v en het magneetveld B zijn niet nul dus er wordt in de generator een spanning opgewekt. Alle spanning valt in eerste orde benadering over de inwendige weerstand.

Dit gedrag komt overeen met het gedrag van een boogontlading waar alleen stroom kan lopen als de spanning een waarde heeft die boven een bepaalde ontsteekspanning ligt. Deze ontsteekspanning is ook bij boogontladingen afhankelijk van de belastingsweerstand. Bij te grote belastingweerstand kan de ontsteekspanning groter worden dan de voedingsspanning, de boog ontsteekt niet. In paragraaf 6.6 komt op dit gedrag opnieuw aan de orde; zie ook de dissertatie van Borghi (Borl).

c) Een belangrijke eigenschap van het model is het feit dat er een minimale stroomwaarde is die onder de gegeven

omstandigheden haalbaar is. Bij verhoging van de belastings weerstand schuift de grafiek van  $\Phi(I)$  steeds verder omhoog tot dat ze de I-as alleen nog maar raakt, zie fig. 6.7. Bij dit raakpunt hoort dan de minimaal haalbare stroomwaarde. Onder de gegeven omstandigheden ligt dit punt rond de 3,5 A bij een weerstands waarde van  $\pm 46 \Omega$ . Bij een verdere verhoging van de belastingsweerstand vinden we alleen 0 A nog als oplossing, er kan dan geen stroom meer lopen.

Als bij gelijkblijvende omstandigheden (run 302,  $t = 45s$ , zie tabel 6.1), de snelheid wordt verlaagd dan neemt ook de maximale belastingsweerstand, de weerstand waarbij de grafiek van  $\Phi(I)$  de I-as raakt, af. De minimale stroom die bij dit raakpunt hoort neemt toe, zie tabel 6.2. Dit gedrag is vooral van belang in het relaxatiegebied waar de stroom van nul naar een bepaalde waarde springt onder invloed van het sterk toenemen van de snelheid.

v (m/s)	800	1000	1126
$I_{\min}$ (A)	15,2	5,9	3,5
$R_{\max}$ ( $\Omega$ )	7	25	46

Tabel 6.2 De waarde van  $I_{\min}$  en  $R_{\max}$  bij verschillende snelheden.

Dit betekent dat juist in het relaxatiegebied, waar de snelheid relatief een lage waarde heeft, de minimale stroom hoog is. Van langzaam aangroeien vanaf nul, zoals dat bij de metingen het geval is, zal dus geen sprake zijn.

Resumerend kan worden gesteld dat de functie  $\Phi(I)$ , afhankelijk van de omstandigheden, één ( $I=0$ ), twee of drie oplossingen oplevert. In het geval van twee oplossingen is de oplossing

met de waarde ongelijk nul de juiste. Bij drie oplossingen levert het snijpunt waarvoor geldt  $\frac{d\phi(I)}{dI} > 0$  en  $I \neq 0$  de juiste oplossing.

Met behulp van de gegevens uit tabel 6.1 en het model volgens uitdrukking 6.11 zijn een aantal berekeningen uitgevoerd.

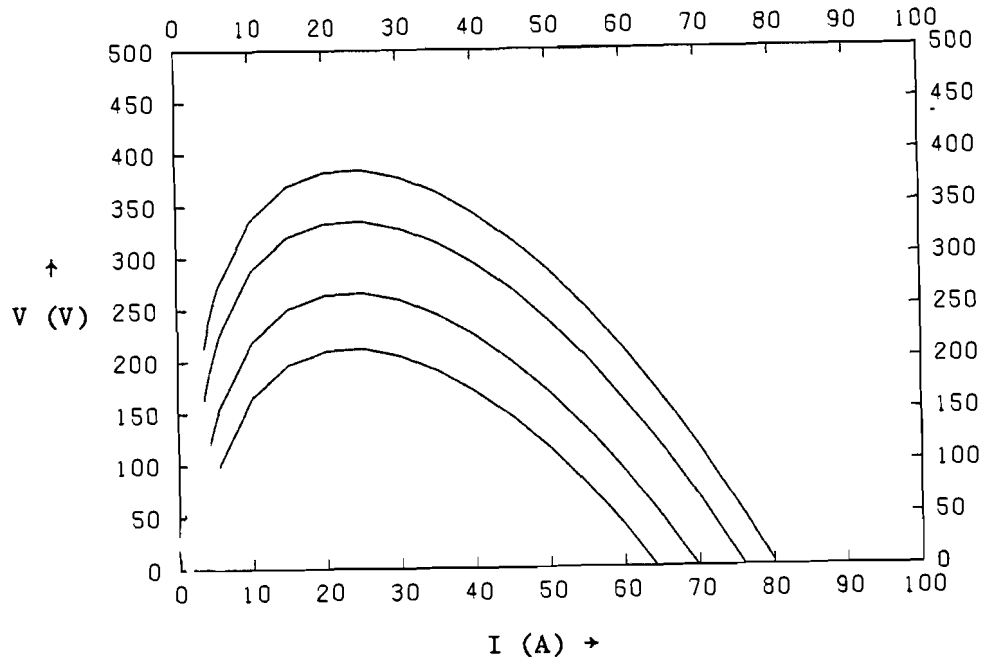
In fig. 6.8 is de uitwendige spanning  $V_{\text{uitw}} = IR_{\text{bel}}$  uitgezet als functie van de stroom bij de vier verschillende magneetvelden uit tabel 6.1. De grafieken zijn op de volgende wijze tot stand gekomen. Vergelijking 6.11 is opgelost voor diverse waarden van de belastingsweerstand,  $R_{\text{bel}}$ . Bij iedere weerstandswaarde vinden we een bepaalde stroom- en dus een spanningswaarde. Vervolgens is de spanning als functie van de stroom uitgezet.

Bij bepaalde stroomwaarden, zie grafiek 6.8, springt de spanning, bij toenemende stroomwaarde, van nul naar een positieve waarde. Bij dit uiterste punt hoort de maximale belastingsweerstand  $R_{\text{max}}$  en de minimaal haalbare stroom  $I_{\text{min}}$ . Vergroten we in dit uiterste punt de weerstand dan springt de stroom en dus de spanning terug naar nul. Verkleinen we de weerstand dan vinden we de grafiekpunten rechts van het uiterste punt. Bij  $R_{\text{bel}}=0$  snijdt de grafiek de I-as. In dit geval valt de opgewekte spanning  $v_{\text{Bh}}$  volledig over de voltagedrop en de inwendige weerstand. Bij dit punt hoort de maximale stroom die volgens dit model haalbaar is. Deze maximale stroom is aanzienlijk kleiner dan de praktijk waarde voor kortgesloten segmenten. In fig 3.7 is te zien dat de kortsluitstroom voor de vierde elektrode experimenteel meer dan 200 A bedraagt. Het model is voor deze extreme waarden blijkbaar minder bruikbaar aangezien het model 80 A voorspelt bij hetzelfde magneetveld.

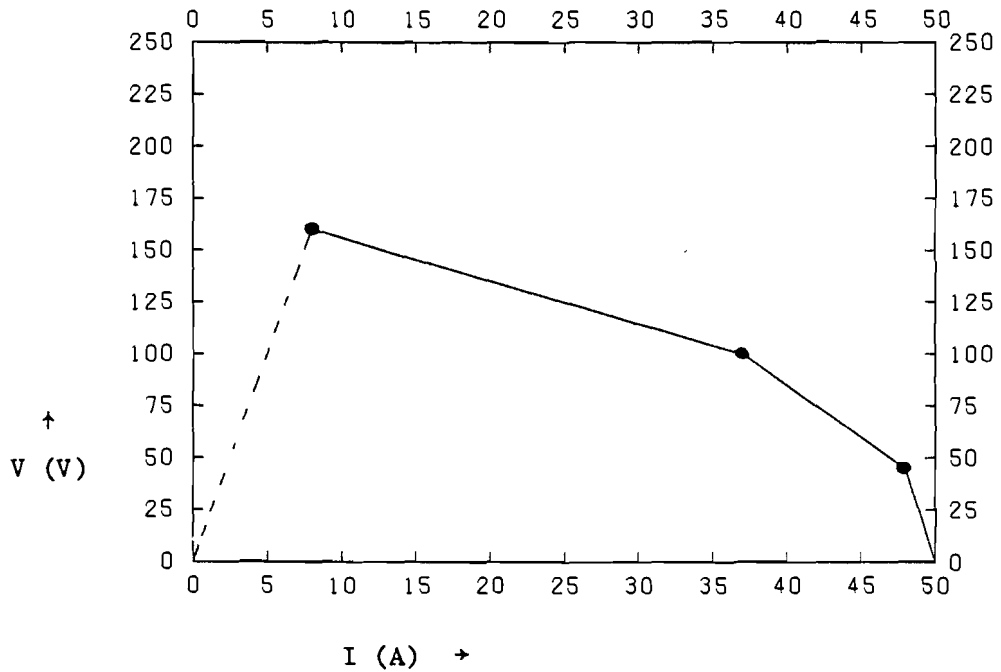
Bij schokbuis-experimenten is  $V_{\text{uitw}}$  gemeten als functie van de stroom I. Deze resultaten zijn te vinden in fig.6.9 (Bor1). De grafieken hebben globaal hetzelfde verloop. Dit is echter wat moeilijk te herkennen omdat in de grafiek van Borghi, fig. 6.9 slechts drie meetpunten staan.

Bij de uiterste punten van de grafieken uit fig. 6.8 horen de waarden van  $R_{\text{max}}$  en  $I_{\text{min}}$  die te vinden zijn in tabel 6.2. De ontsteekspanning is in fig. 6.10 uitgezet als functie van het magneetveld. Het verloop van de grafiek komt globaal overeen met de grafiek die gevonden is bij schokbuis-experimenten zie fig.6.11 (Bor1).

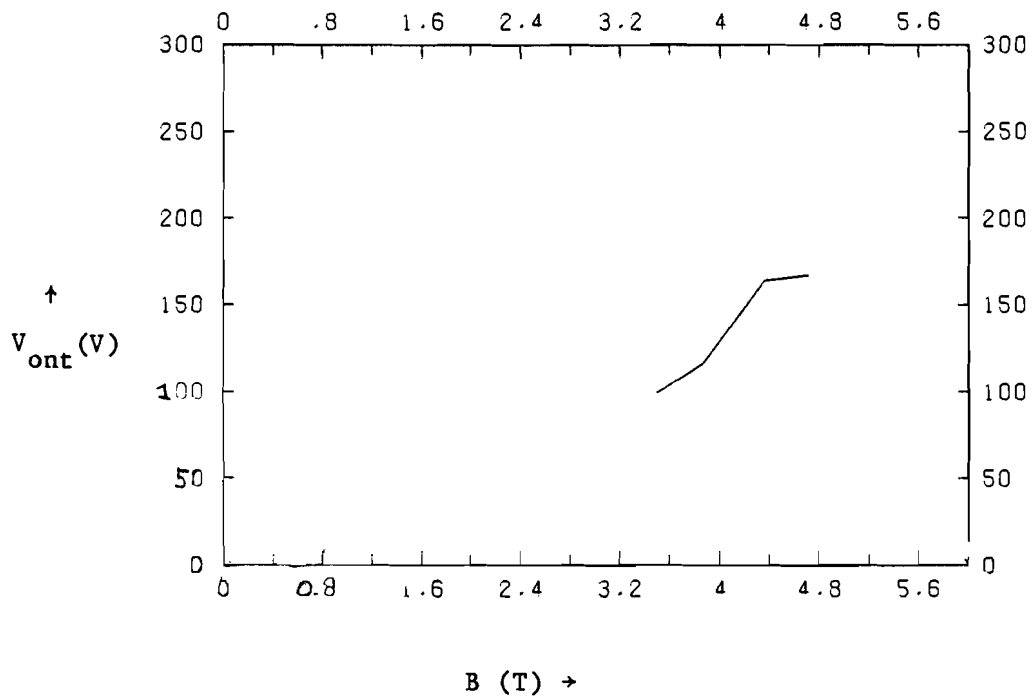




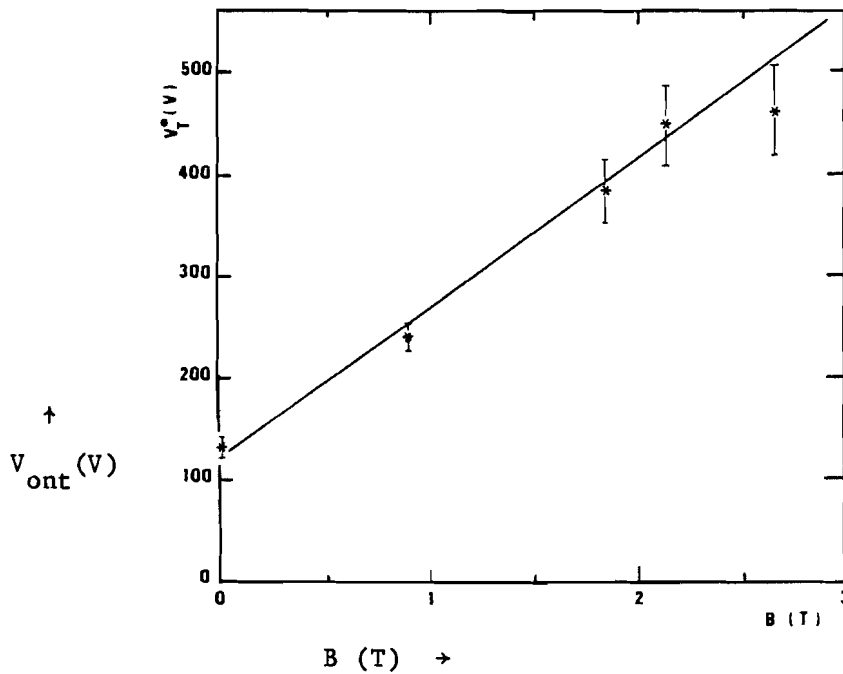
Figuur 6.8 De spanning  $V_{\text{uit}} = IR_{\text{bel}}$  als functie van de stroom I. Het magnetveld behorend bij de bovenste kromme tot de onderste resp.,  $B=4,74; 4,37; 3,87; 3,51$  T,  $\Delta V = 0,085 I^{1,99}$ .



Figuur 6.9 De spanning  $V_{\text{uit}} = IR_{\text{bel}}$  als functie van de stroom I, gemeten bij schokbuis-experimenten (Bor1) (assen omgewisseld t.o.v. het origineel)



Figuur 6.10 De berekende ontsteekspanning als functie van het magneetveld,  $\Delta V = 0,085 I^{1,99}$ .



Figuur 6.11 De ontsteekspanning als functie van het magneetveld, gemeten bij schokbuisexperimenten (Borl)

### 6.6 HET VEREENVOUDIGD MODEL

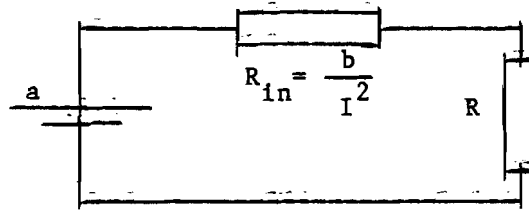
Om het gedrag van de functie  $\Phi(I)$  verder te bestuderen wordt een vereenvoudigd model opgesteld. We verwaarlozen de voltagedrop en nemen even aan dat geldt  $\sigma = cI^\mu$ . Uitdrukking 6.10 reduceert dan tot:

$$v_{Bh} = \frac{-hI}{cbsI^\mu} + R_{bel} I \quad (6.16)$$

Als  $\mu$  kleiner is dan één dan is het rechter gedeelte van uitdrukking 6.16 een functie die voor  $I = 0$  begint bij nul en voor toenemende waarden van  $I$  monotoon stijgt. Omdat de grafiek van de functie de lijn  $v_{Bh}$  maar een keer snijdt zal uitdrukking 6.16 voor deze waarden van  $\mu$  dus precies één oplossing hebben.  $\mu=1$  is een speciaal geval dat niet verder wordt bekeken.

Als geldt dat  $\mu$  groter is dan één dan is de eerste term van het rechter gedeelte van 6.16 een functie die monotoon daalt van uit oneindig voor  $I=0$  naar nul voor  $I=\infty$ . De tweede term is een stijgende functie die bij nul begint. Het rechter gedeelte van 6.16 is dus een functie die vanuit oneindig, voor  $I = 0$ , daalt tot een minimale waarde om vanuit dat punt te stijgen naar oneindig, voor  $I = \infty$ . Dit verloop maakt het mogelijk dat er geen, één of twee oplossingen zijn, namelijk de snijpunten met de horizontale lijn ter hoogte van  $v_{Bh}$ . Als we voor het vereenvoudigde geval een geschikt gekozen macht nemen die groter is dan één dan blijft dit speciale karakter van de functie  $\Phi(I)$  behouden.

We stellen nu het vereenvoudigde model op volgens fig. 6.12 waarbij we, om analytische resultaten te verkrijgen,  $\mu=2$  hebben genomen.



Figuur 6.12 Vereenvoudigd model voor een segment.

Volgens Kirchhoffs spanningswet geldt voor het bovenstaande netwerk:

$$a = \frac{b}{I^2} I + R I \quad (6.17)$$

Waaruit de functie  $\phi(I)$  is af te leiden:

$$\phi(I) = RI^2 - aI + b \quad (6.18)$$

De nulpunten van functie  $\phi(I)$  moeten de oplossing opleveren. Vanwege het kwadratische karakter van de functie  $\phi(I)$  zijn er voor  $\phi(I) = 0$  drie mogelijkheden:

$$a^2 - 4bR < 0 \quad \text{geen oplossingen} \quad (6.19)$$

$$a^2 - 4bR = 0 \quad \text{één oplossing} \quad (6.20)$$

$$a^2 - 4bR > 0 \quad \text{twee oplossingen} \quad (6.21)$$

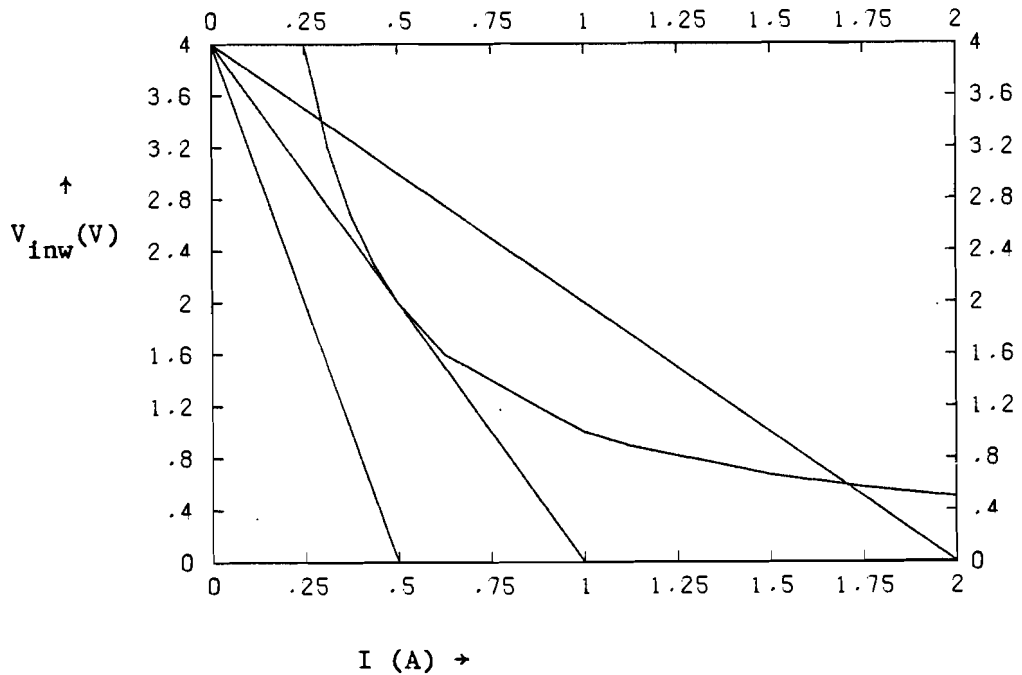
Voor bepaalde waarden van R zal ook in dit model geen stroom lopen hoewel er wel een spanning a in het netwerk aanwezig is. Voor  $I = 0$  is de inwendige weerstand oneindig groot en zal de spanning a helemaal over deze weerstand vallen.

Voor de spanning over de inwendige weerstand,  $R_{inw} = \frac{b}{I^2}$ , gelden de volgende twee uitdrukkingen:

$$V_{inw} = \frac{b}{I^2} I = \frac{b}{I} \quad (6.22)$$

$$V_{inw} = a - IR \tag{6.23}$$

In fig. 6.13 zijn deze uitdrukkingen uitgezet voor drie verschillende waarden van de weerstand R namelijk : 2, 4 en 8 Ω. Voor a en b zijn, bij wijze van voorbeeld, resp. de waarden 4 V en 1 W arbitrair gekozen.



Figuur 6.13 De spanning over de inwendige weerstand,  $V_{inw}$ , als functie van de stroom  $I$  bij verschillende weerstandswaarden. Rechte lijnen:  $V_{inw} = a - IR$ , voor de weerstandswaarden  $R = 8, 4, 2 \Omega$ . van links naar rechts. Kromme lijn  $V_{inw} = b/I$ .

De snijpunten van de rechte lijnen, 6.23, met de kromme, 6.22, leveren de oplossingen. Bij  $2 \Omega$  vinden we twee oplossingen waarvan de kleinste instabiel is. Bij  $4 \Omega$  en  $8 \Omega$  vinden we resp. één en geen oplossing(en).

In fig. 6.14 en 6.15 is te zien wat er gebeurt als de weerstand bij  $4 \Omega$  een klein beetje verhoogd wordt naar bijvoorbeeld  $4,25 \Omega$ . In fig. 6.14 zijn de uitwendige spanning,  $RI$ , de inwendige spanning,  $b/I$ , en de som van beide spanningen,  $RI + b/I$ , getekend als functie van de stroom  $I$ . De grafiek van de totale spanning raakt in het minimum aan de horizontale lijn die de

voedingsspanning aangeeft. In fig. 6.15 is hetzelfde nog eens getekend maar na bij een weerstand van  $4,25 \Omega$ . We zien dat de grafiek van de totale spanning de spanningslijn nu net niet meer raakt. Er is onvoldoende spanning in het netwerk aanwezig om de beide weerstanden te voeden.

Als we uitdrukking 6.18 differentieëren naar de weerstand R dan vinden we een uitdrukking voor  $\frac{dI}{dR}$ .

$$I^2 + 2RI \frac{dI}{dR} - a \frac{dI}{dR} = 0 \quad (6.24)$$

waaruit volgt:

$$\frac{dI}{dR} = \frac{I^2}{a-2RI} \quad (6.25)$$

Als er maar één oplossing is dan geldt  $a^2 - 4Rb = 0$  dus :

$$I = \frac{a}{2R} \quad (6.26)$$

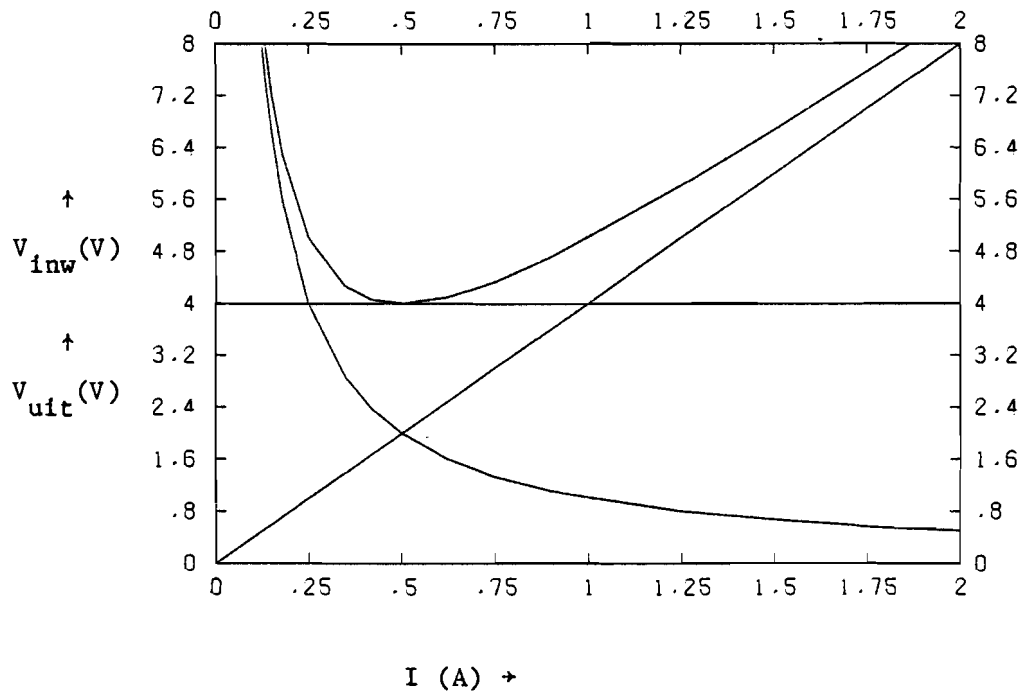
6.26 ingevuld in 6.25 levert op:

$$\frac{dI}{dR} = -\infty \quad (6.27)$$

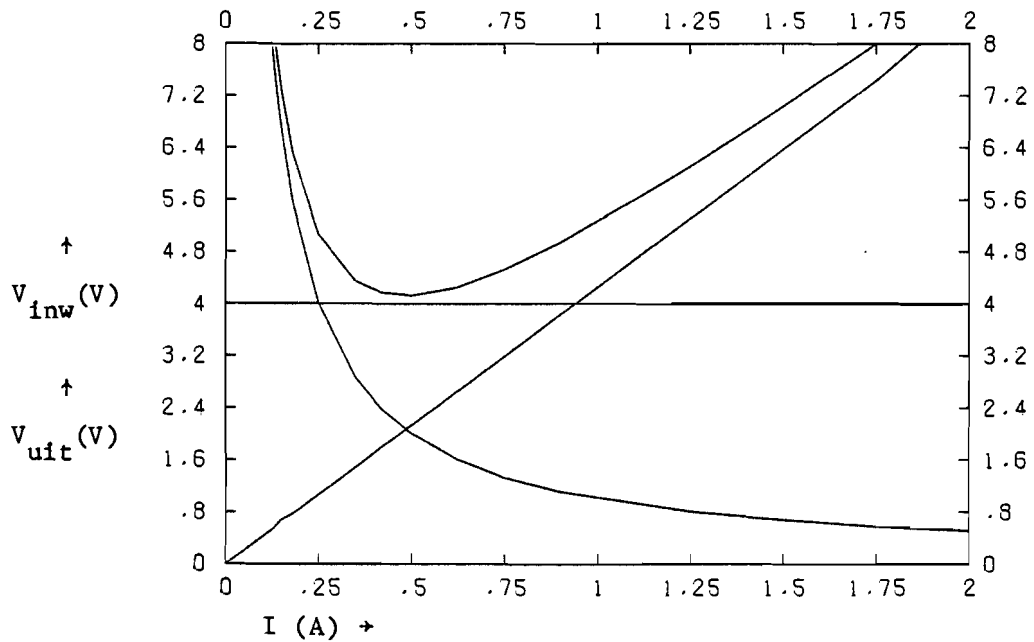
als er nog maar één oplossing is. Een kleine toename van R zal in dat geval leiden tot een oneindig sterke afname van I, de boog dooft uit.

### 6.7 HET INVOEREN VAN DE CORRECTIE VOOR HALLKORTSLUITING

Zoals in paragraaf 3.7 al aan de orde is gekomen trad bij run 302 in de tweede helft van de generator waarschijnlijk Hallsluiting op. In deze paragraaf wordt afgeleid hoe deze Hallsluiting in het model kan worden ingevoerd. Het is niet de bedoeling om het stroomverloop in het tweede deel van de generator precies



Figuur 6.14 Inwendige spanning (stippellijn) en uitwendige spanning (doorgetrokken lijn) als functie van de stroom  $I$  bij  $R=4 \Omega$



Figuur 6.15 Inwendige spanning (stippellijn) en uitwendige spanning (doorgetrokken lijn) als functie van de stroom  $I$  bij  $R=4,25 \Omega$ .

te berekenen, daarvoor is nog te weinig bekend van wat er precies gebeurt achter in de generator. Het is echter de bedoeling om te onderzoeken of, als gevolg van het invoeren van Hallkortsluiting, de berekende stroom in het tweede deel van de generator zodanig afneemt dat gemeten en berekende waarden globaal overeen komen. Hieruit kunnen we dan concluderen of Hallkortsluiting wel of niet een verklaring kan zijn voor het afnemen van de elektrische stroom in het tweede deel van de generator.

We gaan uit van de wet van Ohm:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}^* - \frac{\beta}{B} (\vec{j} \times \vec{B}) \quad (6.28)$$

waarin geldt:

$$\vec{E}^* = \vec{E} + u \times \vec{B} \quad (6.29)$$

Zo vinden we:

$$j_y = \sigma E_y^* + \beta j_x \quad (6.30)$$

$$j_x = \sigma E_x^* - \beta j_y \quad (6.31)$$

We gaan uit van de volgende veronderstellingen:

- 1) De Hallkortsluiting neemt toe bij toenemend magneetveld.
- 2) De plaats waar de Hallsluiting begint ligt verder naar achteren in de generator naarmate het magneetveld kleiner is, zie tabel 6.4.

B (T)	4,74	4,37	3,87	3,51
x (cm)	45	50	55	60

Tabel 6.4 Plaats waar de Hallkortsluiting begint bij verschillende magneetvelden.



3) Bij het maximale magneetveld is de Hallkortsluiting aan het einde van de generator volledig dat wil zeggen:  $E_x^* = 0$ . Op het punt van aanvang van de Hallsluiting geldt  $j_x = 0$ . De helling waarmee de Hallkortsluiting toeneemt als functie van  $x$  is voor iedere waarde van het magneetveld hetzelfde genomen. Veronderstellingen 1 en 2 zijn ingegeven door wat experimenteel is geobserveerd. Veronderstelling 3 is een vereenvoudiging die is bedoeld als eerste orde benadering. Als aanname 3 wordt ingevuld in de uitdrukkingen 6.30 en 6.31 dan vinden we voor 4,74 T de volgende uitdrukkingen:

$$\text{bij } x=45 \text{ cm } j_x = 0 \text{ dus } \beta j_y = \sigma E_x^* \quad (6.32)$$

$$\text{bij } x=80 \text{ cm } E_x^* = 0 \text{ dus } j_x = -\beta j_y \quad (6.33)$$

Dus  $\sigma E_x^*$  neemt af van  $\beta j_y$  tot 0 en  $j_x$  neemt toe van 0 tot  $-\beta j_y$ . We nemen aan dat deze afname lineair verloopt en voeren de correctiefactor  $H_c$  in, nog steeds voor 4,74 T:

$$\sigma E_x^* = \beta j_y \left(1 + \frac{0,45-x}{0,35}\right) = \beta j_y (1+H_c) \quad \text{voor } 0,45 \leq x \leq 0,8 \quad (6.34)$$

Als dit wordt ingevuld in 6.30 en 6.31 onder de aanname dat bovendien geldt  $\beta=1$  dan vinden we:

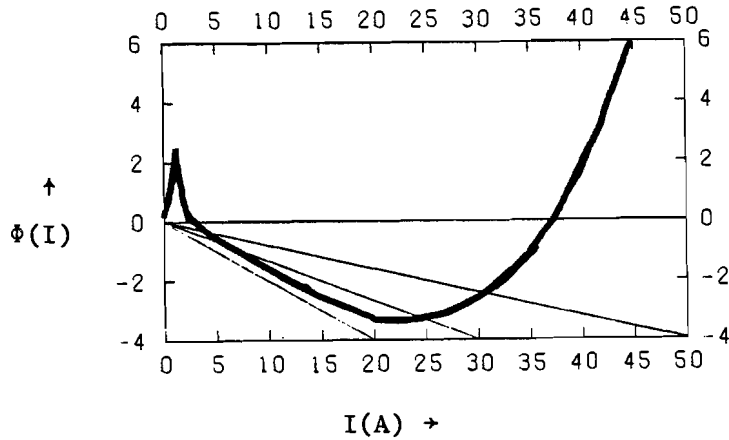
$$j_x = H_c j_y \quad (6.35)$$

$$(1-H_c) j_y = \sigma E_y^* \quad (6.36)$$

Als deze uitdrukking wordt ingevuld in formule 6.1 dan vinden we de volgende uitdrukking die sterk lijkt op 6.11 :

$$I - \alpha I^{1,25} + \beta I^{2,25} + \gamma I^{3,24} = H_c I \quad (6.37)$$

In uitdrukking 6.37 herkennen we in het linker lid weer de functie  $\Phi(I)$ . Door invoering van de Hallcorrectiefactor  $H_c$  is  $\Phi(I)$  echter niet meer gelijk aan nul. Om dit grafische te onderzoeken is fig. 6.16 getekend.



Figuur 6.16 De invloed van de invoering van  $H_c$ . Rechte lijnen vanuit (0;0) zijn de lijnen  $H_c I$  voor diverse waarden van  $H_c$ .

De oplossingen van vergelijking 6.37 zijn de snijpunten van de grafiek van de functie  $\Phi(I)$  met de schuine lijnen  $H_c I$ . Als geldt  $H_c = 0$  dan wordt er niet gecorrigeerd voor Hallkortsluiting en leveren de snijpunten met de I-as de oplossingen.

De correctiefactor  $H_c$  is afgeleid voor de magneetveldwaarde 4,74 T. Voor lagere magneetvelden begint de Hallkortsluiting verder stroomafwaarts in het kanaal. Om dit in rekening te brengen wordt  $H_c$  als volgt herschreven.

$$H_c = \frac{BHS-x}{0,35bs} \quad \text{voor } BHS \times 0,8 \quad (6.38)$$

$$H_c = 0 \quad \text{voor } 0 \times BHS \quad (6.39)$$

Voor BHS geldt:

$$BHS = -0,125B + 1.0375 \quad (6.40)$$

Uitdrukking 6.40 is afgeleid uit de gemeten stromen. Als begin van de Hallkortsluiting is de plaats genomen waar de stroom maximaal is.

## HOOFDSTUK 7 RESULTATEN VAN HET MODEL

### 7.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk worden de resultaten gepresenteerd van de berekeningen die uitgevoerd zijn met de programma's VAS/PR, VIP/PR en DRUK/PR. VIP/PR en VAS/PR zijn magneto-gasdynamische programma's waarbij de invloed van de grenslagen in rekening wordt gebracht. De ontwikkelde stroommodellen zijn ingevoerd, bij VAS/PR het model met het vaste voltagedropprofiel en bij VIP/PR het model met variabele voltagedrop. Bij het programma DRUK/PR wordt de verplaatsingsdikte interaktief gevarieerd zodat het berekende drukverloop gelijk gemaakt kan worden aan het gemeten verloop. (Voor een gedetailleerde beschrijving van de programma's zie appendix B).

In paragraaf 7.2 komen de berekeningen met acht verschillende modellen aan de orde. Deze resultaten moeten leiden tot de keuze van een model om de stroom in een segment te beschrijven. In dezelfde paragraaf staan de resultaten aan de hand waarvan de gevoeligheid van het model is onderzocht.

In paragraaf 7.3 wordt run 302 met behulp van het gekozen model nagerekend voor de vier verschillende magneetvelden uit tabel 6.1. In het tweede deel van de generator blijkt een aanzienlijk verschil tussen gemeten en berekende stromen op te treden. Dit verschil zou mogelijk kunnen worden verklaard door Hallkortsluiting of door druktoename achter in het kanaal. Voor onderzoek van de invloed van deze fenomenen worden correcties in het programma aangebracht. De resultaten van deze berekeningen staan in paragraaf 7.4.

In paragraaf 7.5 worden tot slot de resultaten van berekeningen met verschillende waarden voor de belastingsweerstand en berekeningen met de gegevens van run 303 gepresenteerd.

In de figuren die opgenomen zijn in dit hoofdstuk wordt het gemeten profiel steeds aangegeven met de letter "g".

## 7.2 KEUZE VAN HET MODEL

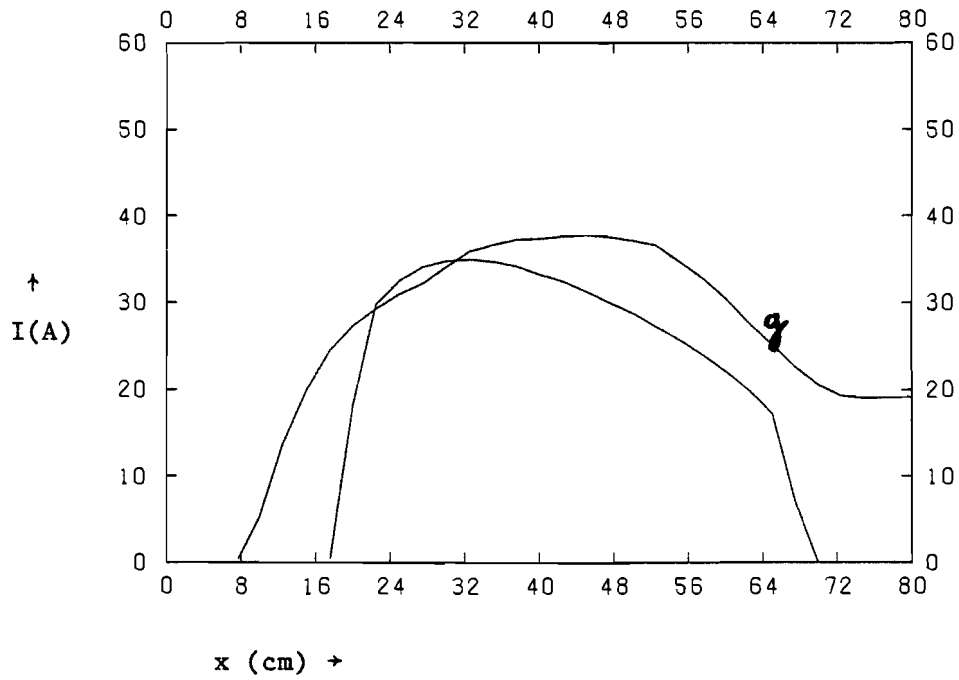
Er zijn berekeningen uitgevoerd met acht verschillende modellen, waarvan vier berekeningen met vast voltagedropprofiel als functie van de plaats  $x$  en vier berekeningen met variabel profiel volgens  $\Delta V = 0,085I^{1,99}$ . Beide series van vier berekeningen bevatten ieder twee berekeningen met  $\sigma = 0,0619I^{1,25}$  en twee berekeningen met  $\sigma = (4,49 \cdot 10^{-5}) j^{1,25}$ . De relaxatielengte LREL wordt in Masl gebruikt om het relaxatieeffect in rekening te brengen. Voor het gecorrigeerde geleidingsvermogen  $\sigma^*$  geldt bij gebruik van een relaxatielengte, LREL, ongelijk nul:

$$\sigma^* = \sigma(1 - \exp(\frac{-x}{LREL})) \quad (7.1)$$

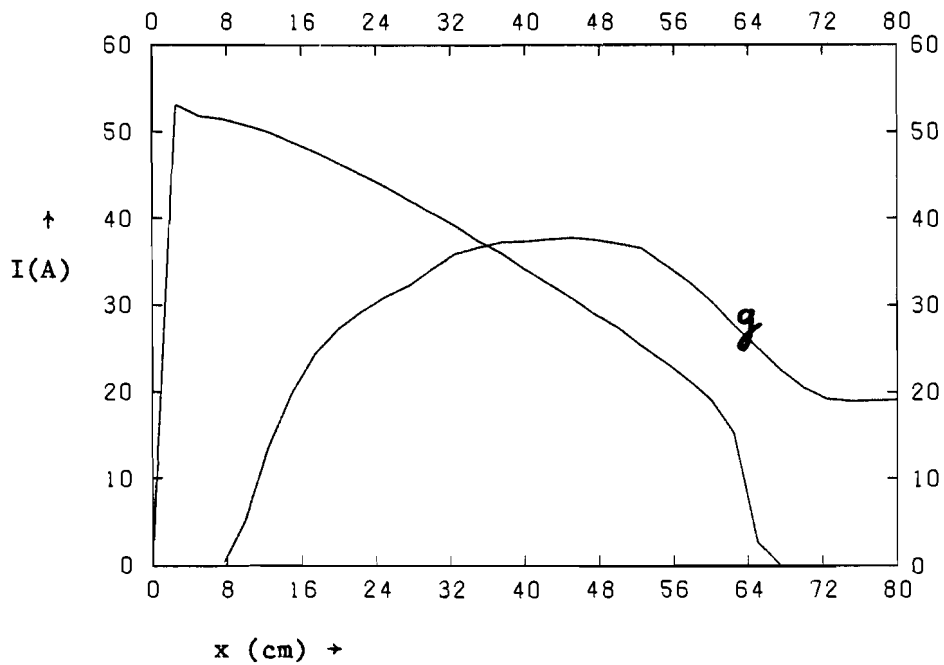
Deze setjes van twee berekeningen bestaan telkens uit een berekening met en een berekening zonder extra geïntroduceerd relaxatieeffect volgens 7.1, zie tabel 7.1.

Alleen de berekende profielen van de elektrische stroom volgens figuur 7.4 en 7.8 vertonen een goede overeenkomst met het gemeten profiel. Bij beide berekeningen wordt de geleidbaarheid beschreven volgens het model:  $\sigma = C_3 I^{1,25}$ . Op grond van deze resultaten wordt gekozen voor dit model. Bij beide berekeningen geldt bovendien dat LREL=0 zodat de aanpassing volgens 7.1 in het vervolg niet meer toegepast wordt. Op grond van de figuren 7.4 en 7.8 kan geen keuze gemaakt worden tussen het vast voorgeschreven profiel en het variabele profiel voor de voltagedrop. Omdat we in verband met het dimensioneren van toekomstige generatoren sterk geïnteresseerd waren in een verband tussen  $\Delta V$  en  $I$  wordt het variabele profiel verder onderzocht.

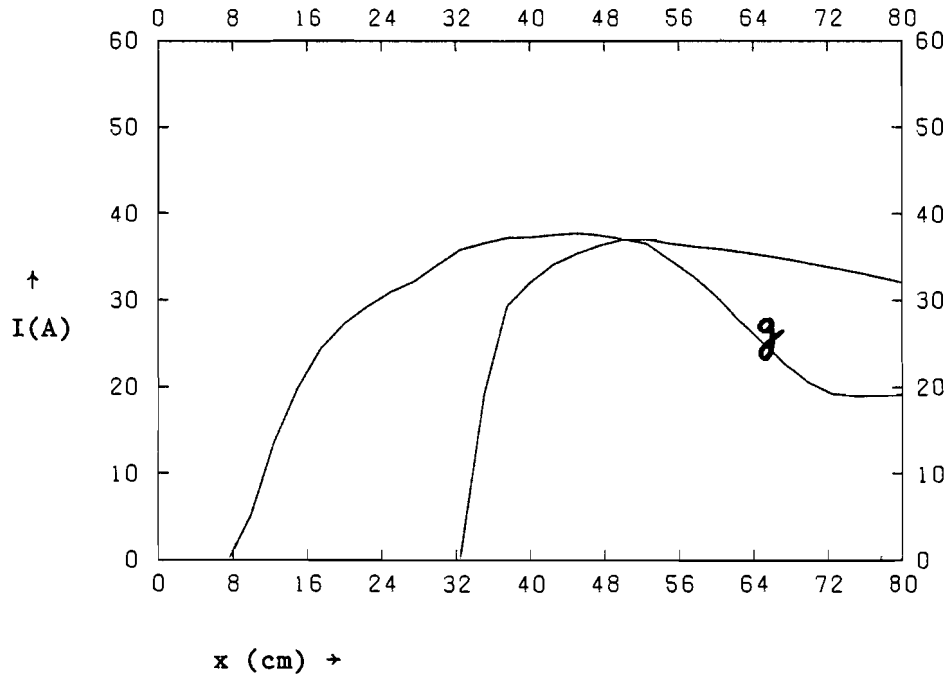
Er is een groot verschil tussen de berekende en de gemeten stroom in de tweede helft van de generator voor de modellen uit fig, 7.4 en 7.8. Dit verschil kan mogelijk worden verklaard door de drukverhoging of de Hallkortsluiting. In de volgende paragraaf komen we hierop terug.



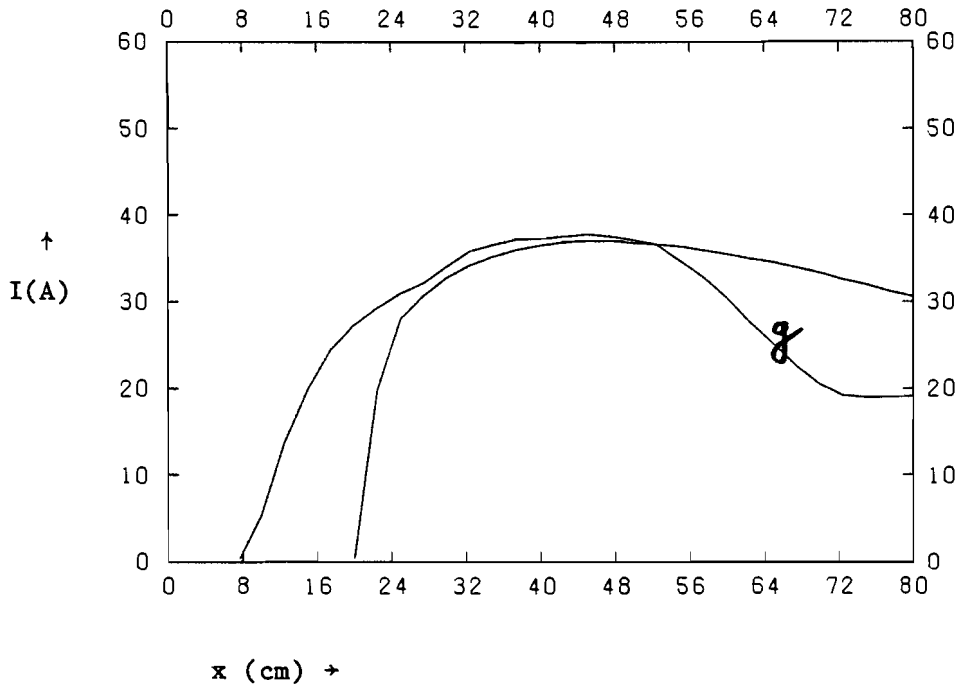
Figuur 7.1 Berekende en gemeten stroom als functie van x.  
 $\sigma = C_2 j^{1,25}$ ,  $\Delta V$  vastprofiel, LREL = 19,4 cm.



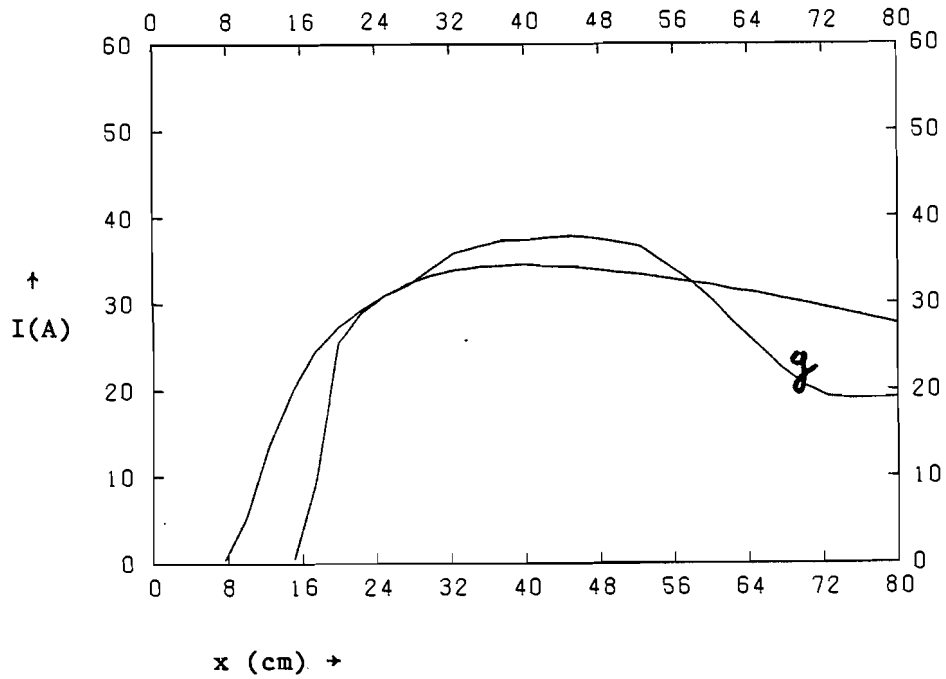
Figuur 7.2 Berekende en gemeten stroom als functie van x.  
 $\sigma = C_2 j^{1,25}$ ,  $\Delta V$  vastprofiel, LREL = 0 .



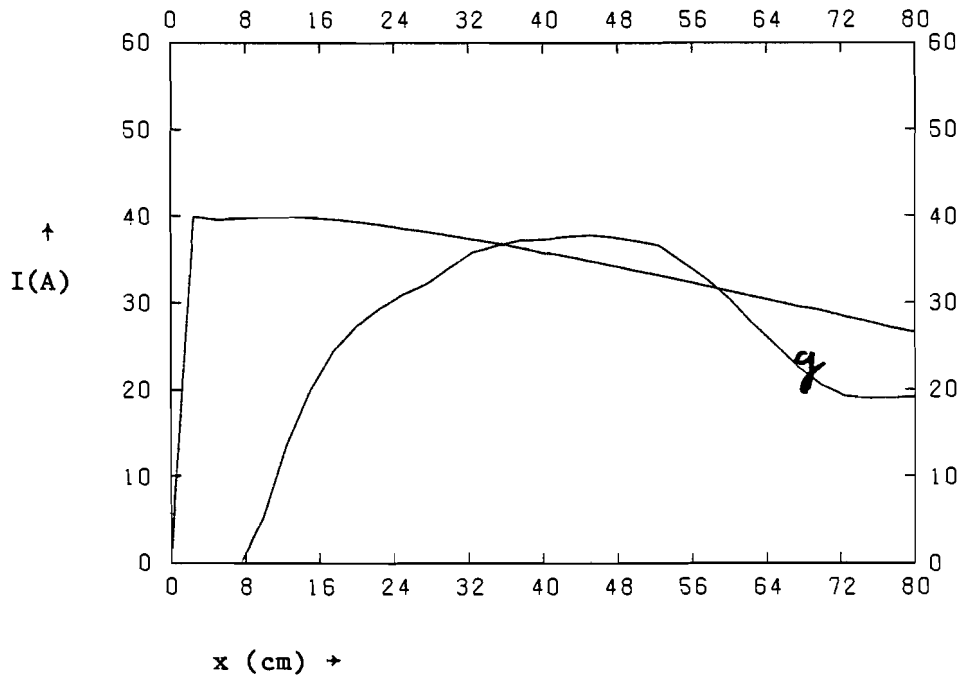
Figuur 7.3 Berekende en gemeten stroom als functie van x.  
 $\sigma = C_3 I^{1,25}$ ,  $\Delta V$  vastprofiel, LREL = 19,4 cm.



Figuur 7.4 Berekende en gemeten stroom als functie van x.  
 $\sigma = C_3 I^{1,25}$ ,  $\Delta V$  vastprofiel, LREL = 0 .

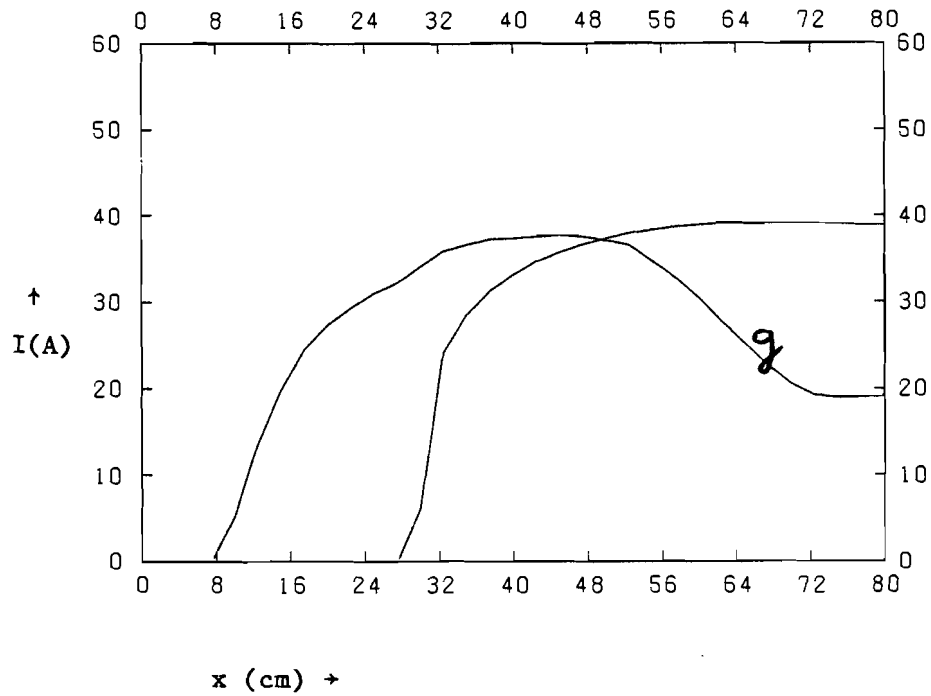


Figuur 7.5 Berekende en gemeten stroom als functie van x.  
 $\sigma = C_2 j^{1,25}$  ,  $\Delta V = C_1 I^{1,99}$  , LREL = 19,4 cm.

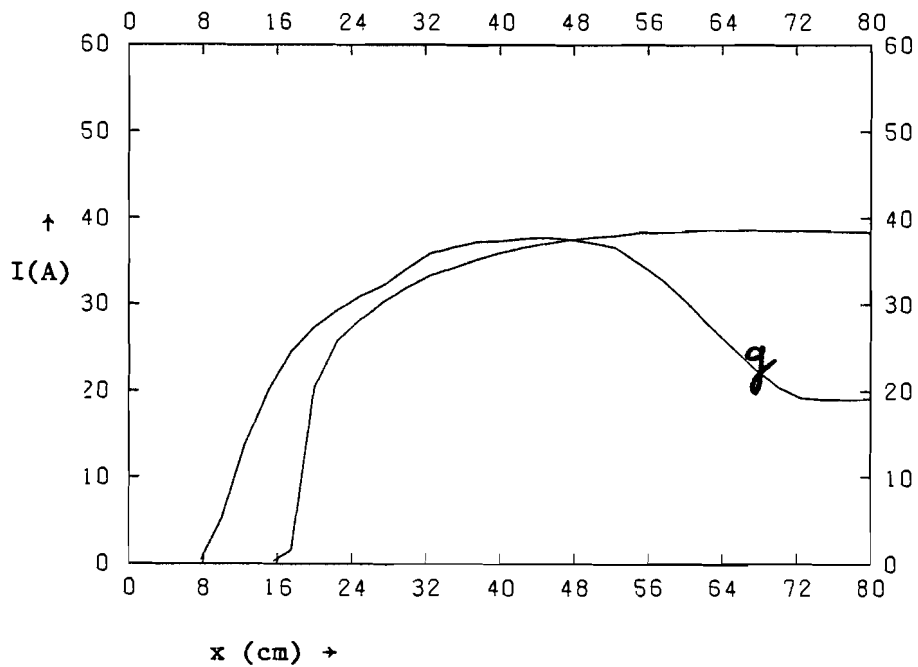


Figuur 7.6 Berekende en gemeten stroom als functie van x.  
 $\sigma = C_2 j^{1,25}$  ,  $\Delta V = C_1 I^{1,99}$  , LREL = 0 .





Figuur 7.7 Berekende stroom als functie van de afstand x.  
 $\sigma = C_3 I^{1,25}$  ,  $\Delta V = C_1 I^{1,99}$  , LREL = 19,4 cm.



Figuur 7.8 Berekende stroom als functie van de afstand x.  
 $\sigma = C_3 I^{1,25}$  ,  $\Delta V = C_1 I^{1,99}$  , LREL = 0 .

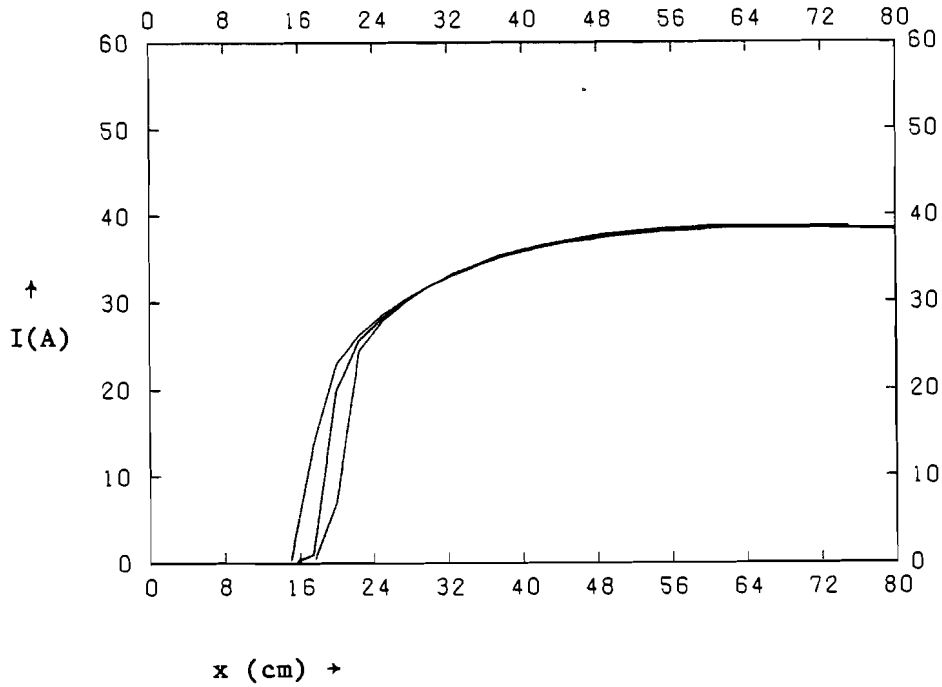
In fig. 7.9 zijn de resultaten te vinden van berekeningen die zijn uitgevoerd om de gevoeligheid van het model te testen. Bij het trekken van een lijn door vier meetpunten wordt namelijk gemakkelijk een fout geïntroduceerd omdat de vier punten niet precies op één lijn liggen. Er zijn berekeningen uitgevoerd met de volgende twee modellen :

$$\sigma = C^* I^{1,2}, \quad \sigma = C^{**} I^{1,3} \quad (7.2)$$

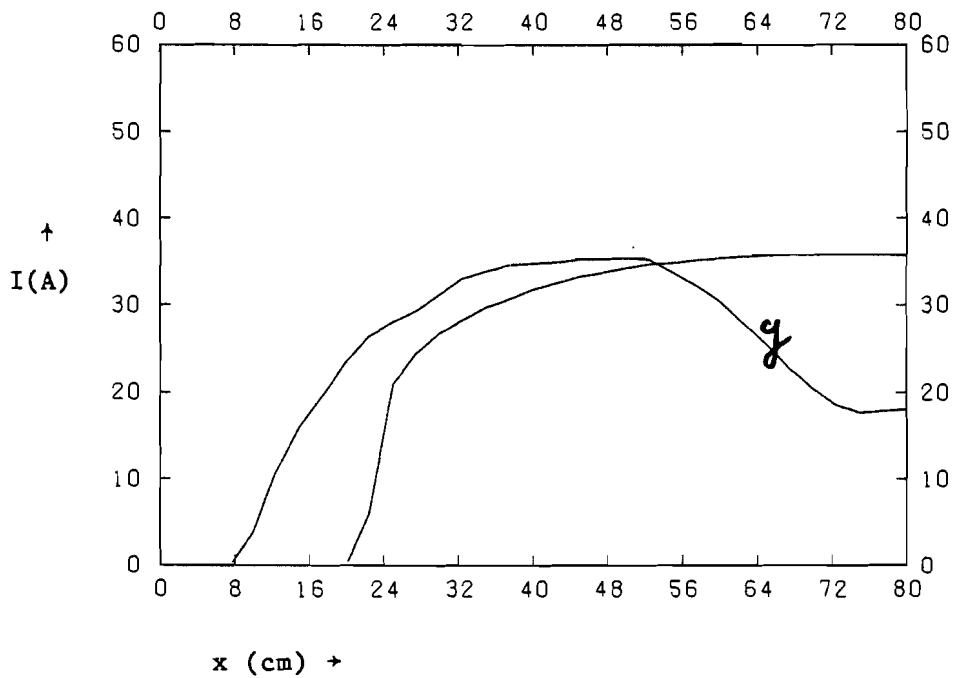
De coëfficiënten  $C^*$  en  $C^{**}$  zijn aangepast aan de veranderde macht door bij een bepaalde stroomwaarde de waarde van het geleidingsvermogen in te vullen. In fig. 7.9 zijn ook de resultaten van de berekeningen met coëfficiënt 1,25 zoals gebruikt in hoofdstuk 6 nog eens opgenomen. Afgezien van kleine verschillen in het relaxatiegebied liggen de berekende profielen praktisch op elkaar ondanks vrij grote verschillen in de coëfficiënten van de relatie volgens 7.2. De gevoeligheid voor fouten in de coëfficiënten van de relatie 7.2 is dus gering.

### 7.3. RESULTATEN RUN 302

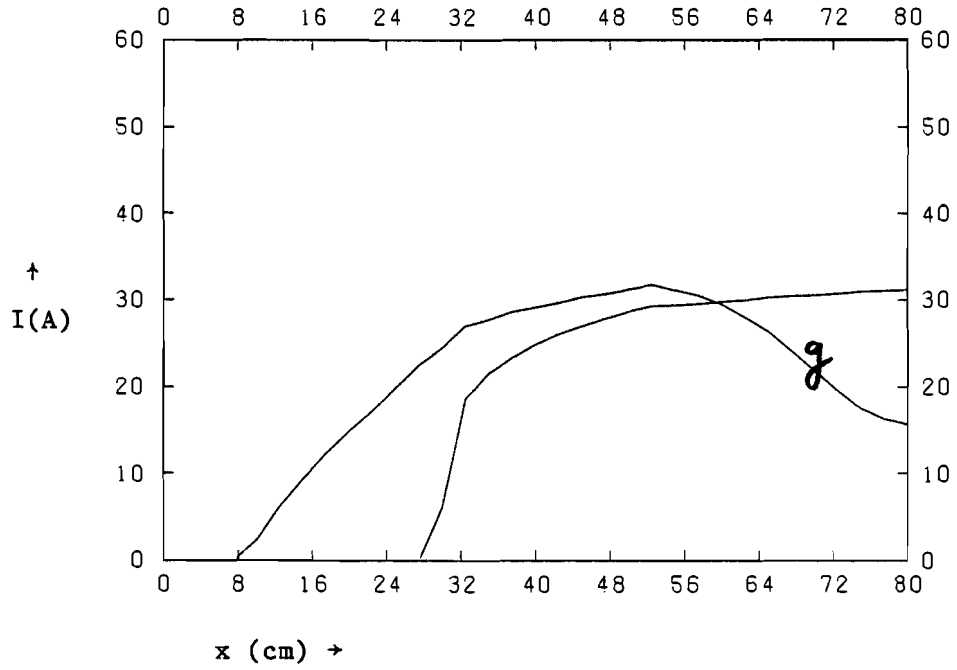
In de figuren 7.8 en 7.10 tot en met 7.12 zijn de berekende profielen van de stroom als functie van de plaats  $x$  bij de vier magneetvelden uit tabel 6.1 voor run 302 getekend. De overeenkomst tussen de gemeten en de berekende profielen in het eerste deel van het kanaal is goed. Zowel bij de gemeten als ook bij de berekende profielen neemt de relaxatielengte toe bij dalend magneetveld. Wel is het stroomprofiel in het relaxatiegebied anders van karakter. Bij de gemeten profielen stijgt de stroom, als functie van de plaats  $x$ , vanaf een vast punt langzaam in waarde. Het langer worden van de relaxatielengte, bij lager magneetveld, komt tot uiting doordat de stroom verder stroomafwaarts zijn maximale waarde bereikt. Bij de berekende profielen springt de stroom, als functie van  $x$ , op een bepaald punt plotseling van nul naar een bepaalde waarde. Het punt waar de stroom begint ligt verder stroomafwaarts bij een lager magneetveld. In de tweede helft van de generator zijn de berekende stromen in alle gevallen te hoog in vergelijking met de gemeten stromen.



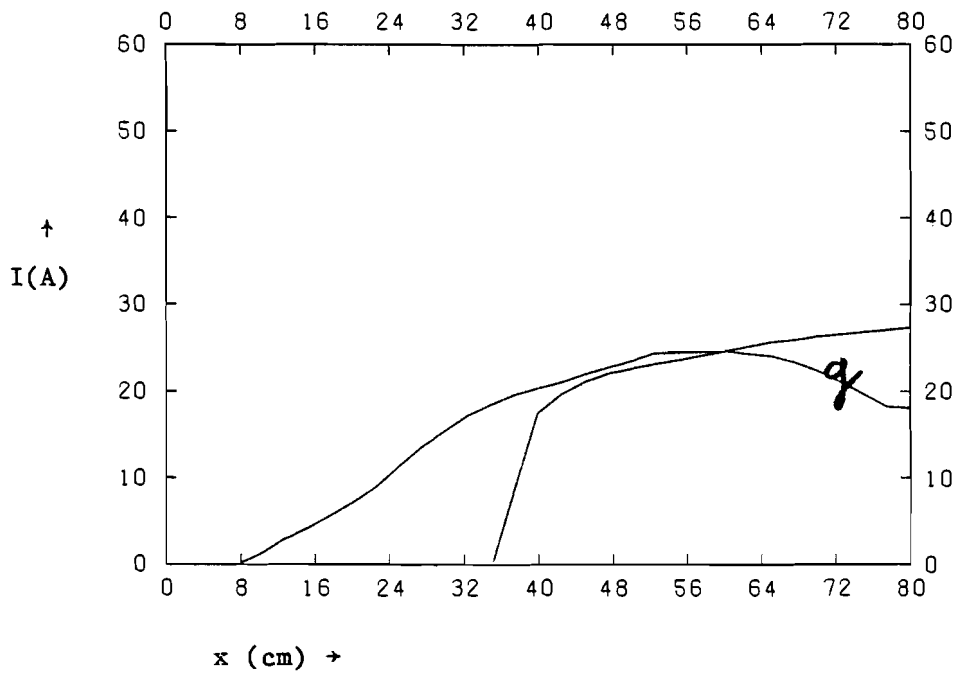
Figuur 7.9 Berekende stroom bij drie verschillende modellen v.l.n.r.  $\sigma = C^* I^{1,2}$  ,  $C_3 I^{1,25}$  ,  $C^{**} I^{1,3}$  ,  $\Delta V = 0,085 I^{1,99}$  .



Figuur 7.10 Berekende en gemeten stroom als functie van x.  $\sigma = C_3 I^{1,25}$  ,  $\Delta V = C_1 I^{1,99}$  , LREL = 0 , B = 4,37 T



Figuur 7.11 Berekende en gemeten stroom als functie van x.  
 $\sigma = C_3 I^{1,25}$  ,  $\Delta V = C_1 I^{1,99}$  , LREL = 0 , B = 3.87 T



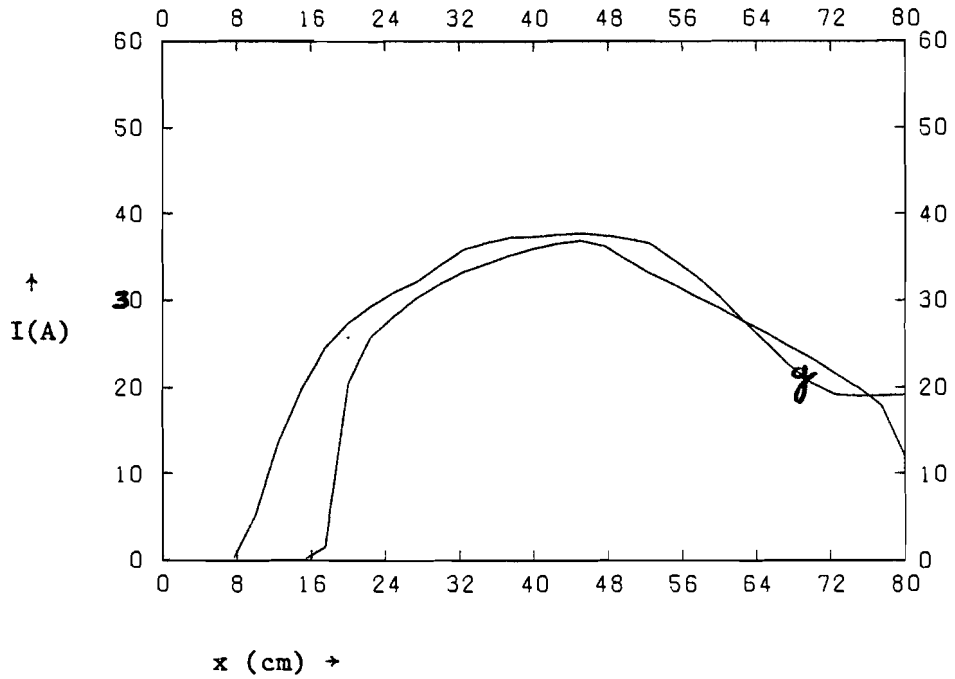
Figuur 7.12 Berekende en gemeten stroom als functie van x.  
 $\sigma = C_3 I^{1,25}$  ,  $\Delta V = C_1 I^{1,99}$  , LREL = 0 , B = 3,51 T

#### 7.4 INVLOED VAN HALLCORRECTIE OF OPLOPENDE DRUK

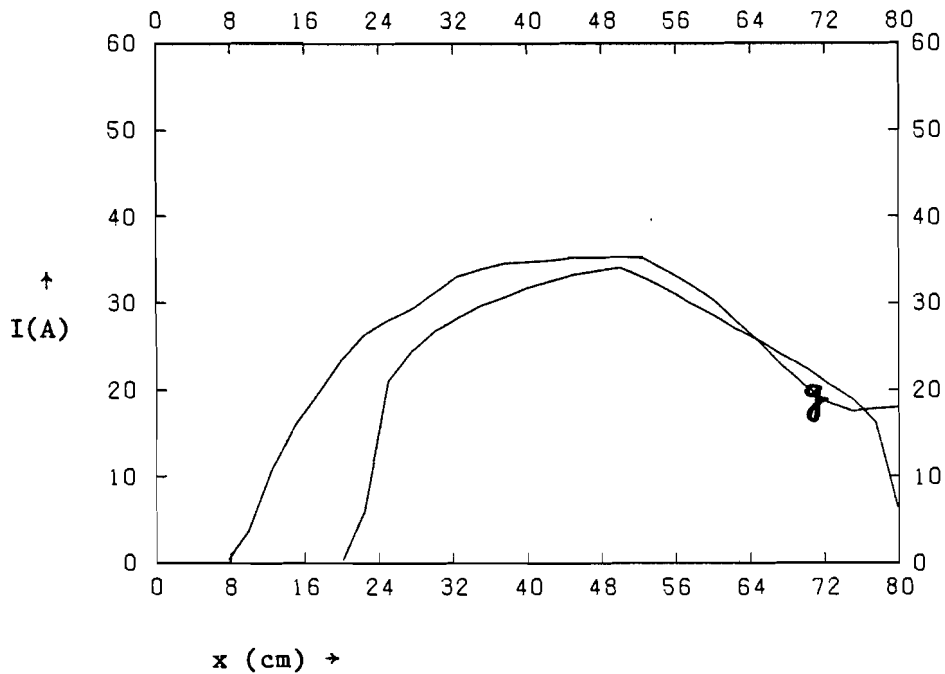
In deze paragraaf wordt onderzocht of de afname van de stroom in het tweede gedeelte van de generator mogelijk kan worden verklaard door Hallkortsluiting of door de geobserveerde oplopende druk in de tweede helft van de generator. Het is niet de bedoeling om de gemeten en de berekende profielen met behulp van aanpassingen precies op elkaar te laten vallen. Door de genoemde fenomenen te simuleren wordt onderzocht of deze verschijnselen verantwoordelijk kunnen zijn voor de stroomafname in het tweede deel van de generator.

In de figuren 7.13 tot en met 7.16 staan de gemeten en berekende stroomprofielen bij de vier magneetvelden uit tabel 6.1 voor run 302. De berekeningen zijn uitgevoerd met een correctie voor Hallkortsluiting zoals beschreven in paragraaf 6.7. De overeenkomst tussen de berekende en de gemeten profielen is bij alle vier de waarden van het magneetveld goed. Bij de resultaten in fig. 7.15 en 7.16 is de Hallcorrectie voor de laatste centimeters blijkbaar te groot geworden omdat dit deel van de generator, volgens de berekeningen, geen stroom meer voert. Bij verdere verfijning van de Hallcorrectiefactor kan dit worden verbeterd. Uit deze resultaten blijkt dat Hallkortsluiting een mogelijke verklaring van de afname van de stroom in het tweede deel van de generator is.

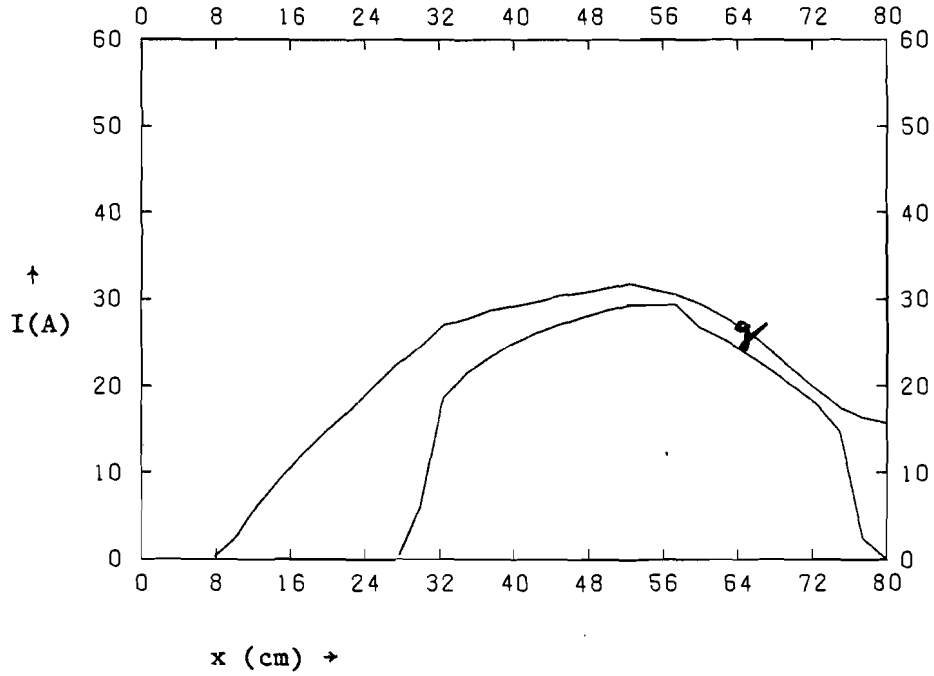
In de figuren 7.17 en 7.18 zijn drie berekende profielen, onder de condities van run 302 en 303 bij maximaal magneetveld, te zien namelijk 1) Het stroomprofiel zonder correcties, 2) het stroomprofiel met Hallcorrectie en 3) het stroomprofiel met drukcorrectie. Dit laatste stroomprofiel is berekent met behulp van het programma DRUK/PR dat beschreven wordt in appendix B. Bij het programma DRUK/PR wordt de berekende druk interactief gelijk gemaakt aan de gemeten druk door aanpassing van de verplaatsingsdikte als functie van de plaats  $x$  in het kanaal zodat op deze wijze gecorrigeerd wordt voor de druktoename in de tweede helft van de generator. De druktoename leidt tot een snelheidsafname waardoor de opgewekte spanning en dus de geleverde stroom in de tweede helft van de generator verminderd. Uit de resultaten blijkt dat de afname van stroom na drukcorrectie te klein is in vergelijking met de metingen.



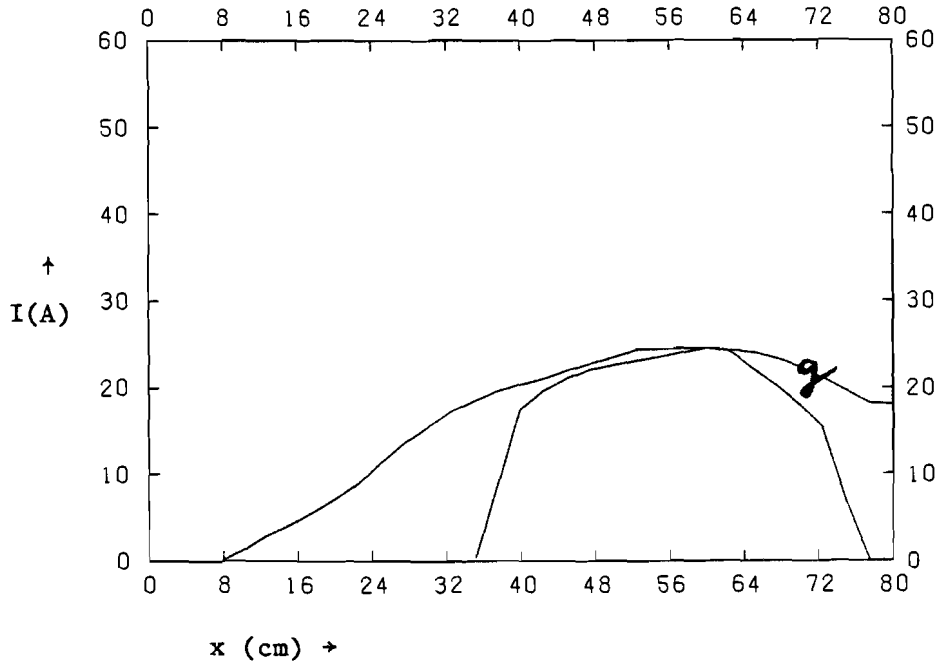
Figuur 7.13 Berekende en gemeten stroom als functie van  $x$ .  
Gekozen model met Hallcorrectie,  $B = 4,74$  T ,  $\Delta V = 0,085$  I<sup>1,99</sup>



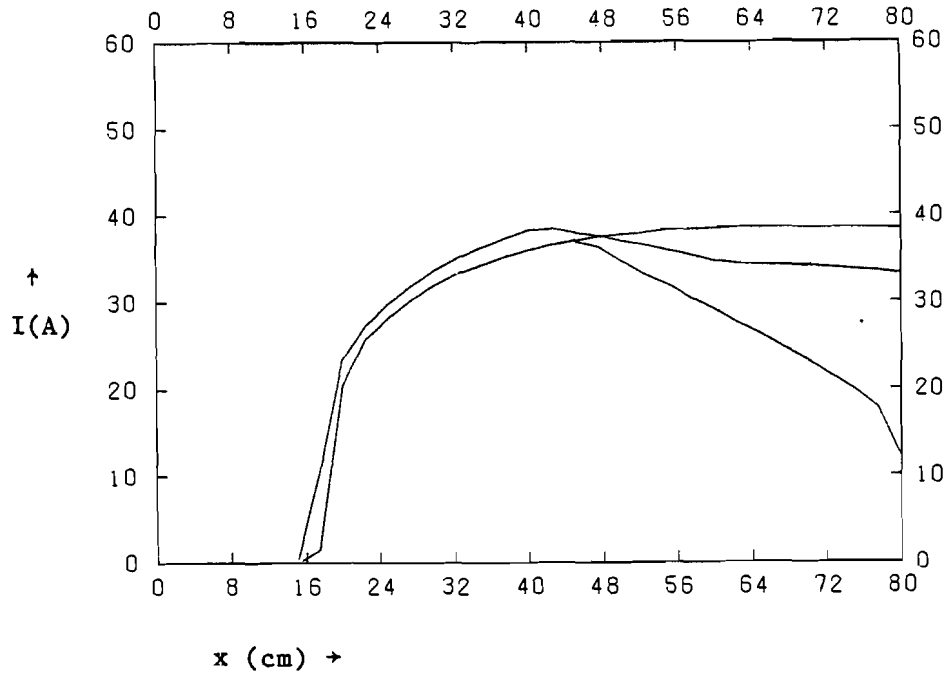
Figuur 7.14 Berekende en gemeten stroom als functie van  $x$ .  
Gekozen model met Hallcorrectie,  $B = 4,37$  T ,  $\Delta V = 0,085$  I<sup>1,99</sup>.



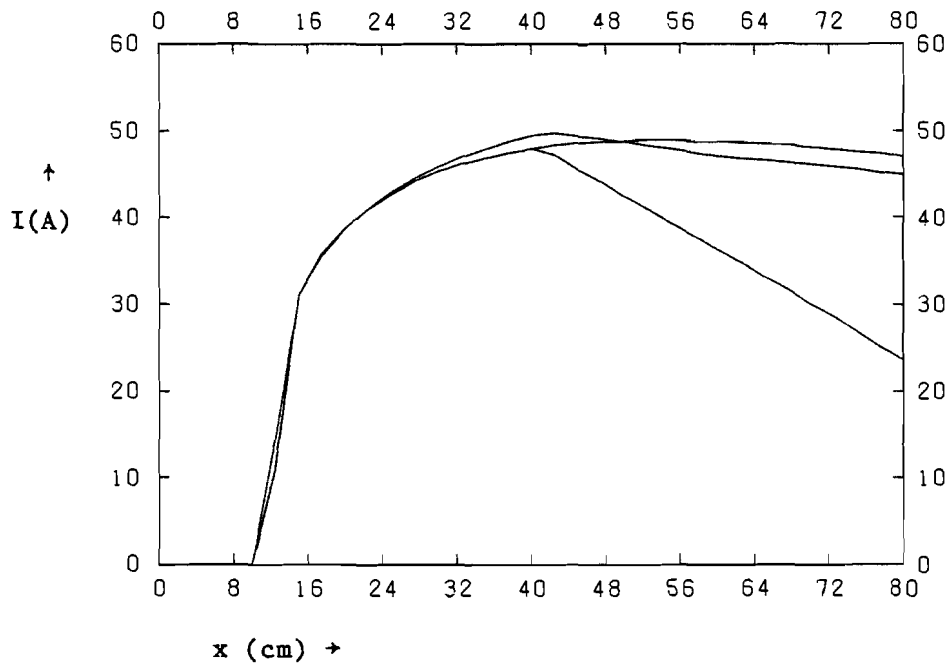
Figuur 7.15 Berekende en gemeten stroom als functie van  $x$ .  
Gekozen model met Hallcorrectie,  $B = 3,87$  T,  $\Delta V = 0,085 I^{1,99}$ .



Figuur 7.16 Berekende en gemeten stroom als functie van  $x$ .  
Gekozen model met Hallcorrectie,  $B = 3,51$  T,  $\Delta V = 0,085 I^{1,99}$ .



Figuur 7.17 Berekende stroom, zonder corr., met drukkorr., met Hallcorr. ( resp. bovenste, middelste en onderste grafiek).  
 $B = 4,74 \text{ T}$ ,  $R = 9 \text{ } \Omega$ .  $\Delta V = 0,085 I^{1,99}$ .



Figuur 7.18 Berekende stroom, zonder corr., met drukkorr., met Hallcorr. ( resp. bovenste, middelste en onderste grafiek).  
 $B = 5,10 \text{ T}$ ,  $R = 6 \text{ } \Omega$ .  $\Delta V = 0,085 I^{1,99}$ .



#### 7.4 OVERIGE RESULTATEN

In fig. 7.19 is de berekende voltagedrop en het gemeten profiel uitgezet als functie van de plaats  $x$ . Vooral aan het eind van de generator zijn de verschillen erg groot. De berekende voltagedrop is hier veel te laag.

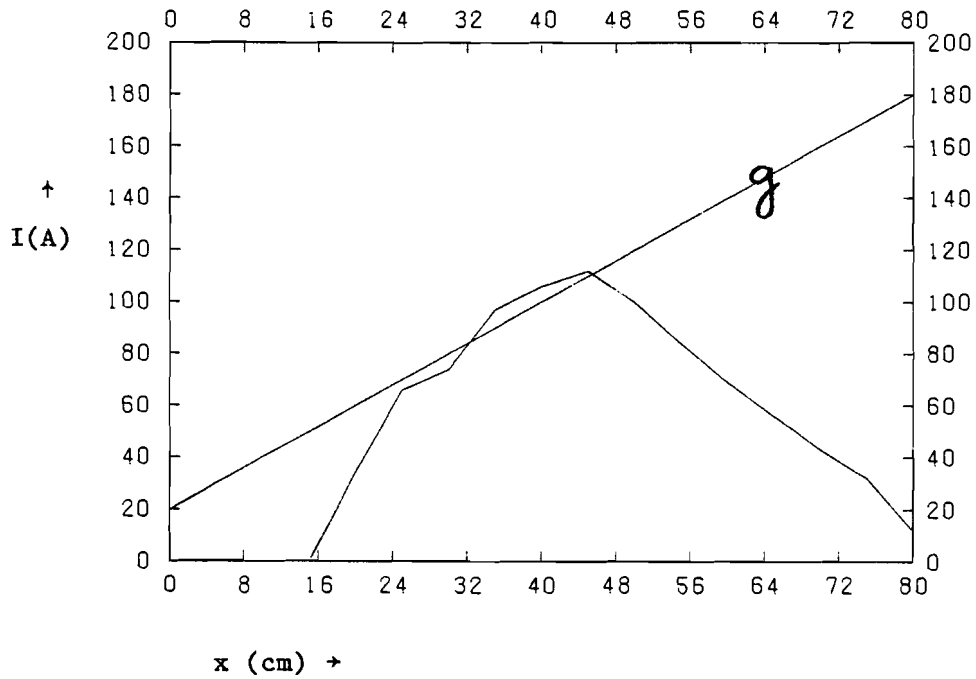
In tabel 7.1 is het berekende opgewekte elektrische vermogen bij verschillende waarden van de belastingweerstand te zien. Voor allebei de voltagedrop profielen zijn deze berekeningen opgenomen. Bij variabel  $\Delta V$  profiel is er een maximaal opgewekt vermogen bij  $7 \Omega$ . Bij berekeningen met een vast voorgeschreven profiel neemt het opgewekte vermogen toe bij verlaging van de weerstand. Het laatste is ook het geval bij de meetresultaten uit meetserie 3. Daarom en omdat de berekende voltagedrop aan het eind van de generator veel te laag is moeten we tot de conclusie komen dat het variabele profiel voor de voltagedrop niet voldoet.

In fig. 7.20 is de berekende stroom te zien bij vier verschillende waarden van de belastingsweerstand  $R$ ,  $B=4,74T$ . Bij toenemende waarde van de weerstand neemt de relaxatielengte toe.

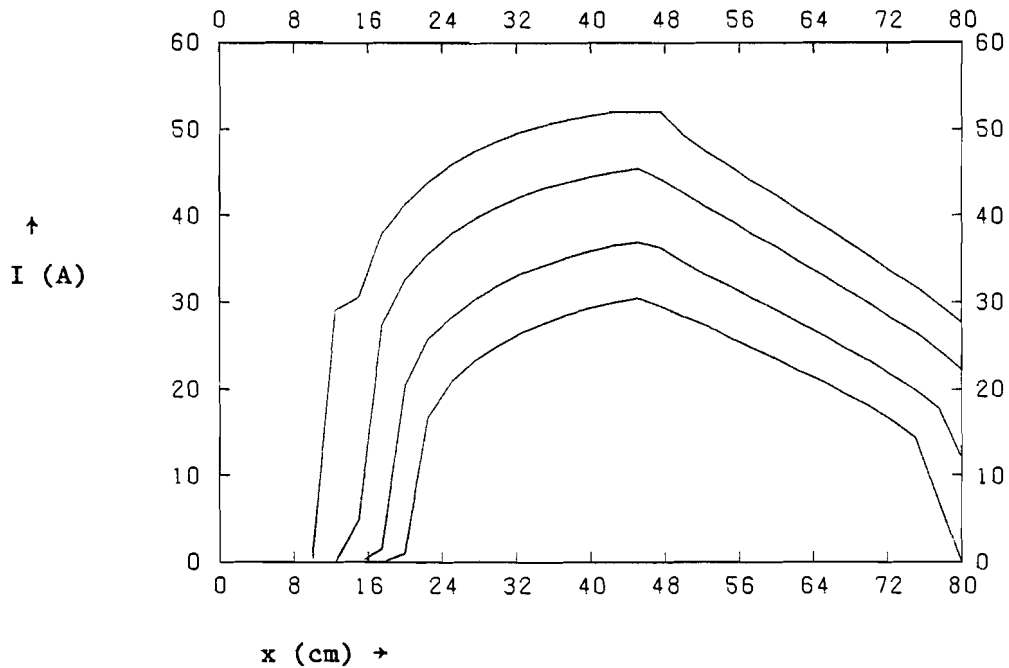
Bij toenemende waarde van de belastingsweerstand neemt de spanning  $\frac{b}{I}$  over de inwendige weerstand toe.

Door de divergentie van het kanaal neemt de snelheid, vooral in het begin van het kanaal, als functie van  $x$  toe. De opgewekte spanning  $v_{Bh}$  neemt dus ook toe als functie van  $x$ . Bij een hogere waarde van de weerstand wordt het punt waar het eerste segment stroom gaat leveren dus ook later bereikt. Dit heeft een langere relaxatielengte tot gevolg.

In fig. 7.22 zijn de berekende en de gemeten stromen, als functie van de plaats  $x$ , bij run 303 te zien bij maximaal magneetveld. De overeenkomst is goed. Dit is een goede bevestiging voor het ontwikkelde model omdat het model onder andere omstandigheden, namelijk die van run 302, is afgeleid. Voor de Hallcorrectie is de correctiefactor genomen die is afgeleid uit de gegevens van run 302. We zien dat de afname van de elektrische stroom door Hallkortsluiting iets te vroeg begint.



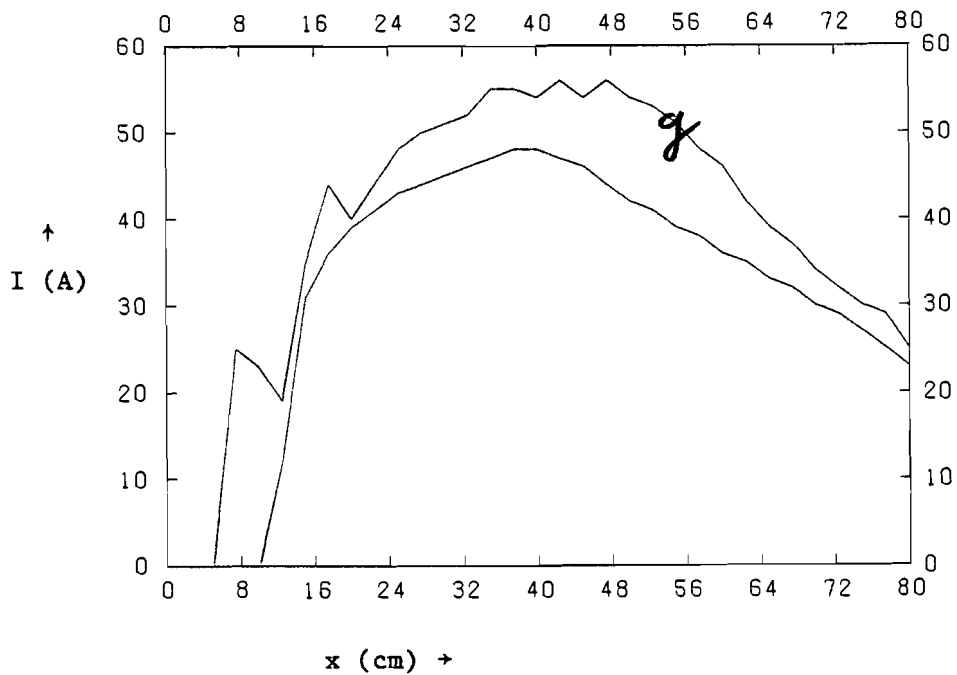
Figuur 7.19 Berekende voltagedrop als functie van de stroom. Rechte lijn: gemeten voltagedrop, kromme lijn berekende voltagedrop,  $\Delta V = 0,085 I^{1,99}$ .



Figuur 7.20 De berekende stromen bij vier verschillende waarden van de belastingsweerstand. Van boven naar beneden:  $R = 4, 6, 9$  en  $12 \Omega$ .  $B = 4,74 T$ ,  $v = 1107 m/s$  zie tabel 6.1

$R_{\text{bel}} (\Omega)$	$\Delta V = CI^{1,99}$	$\Delta V$ volgens vast profiel
4	296	548
6	336	470
7	343	-
9	338	348

Tabel 7.1 Het berekende opgewekte vermogen in kW bij verschillende waarden voor de belastingsweerstand en bij de twee profielen voor de voltage-drop  $\Delta V$ .



Figuur 7.21 De berekende en de gemeten stroom als functie van de plaats  $x$  bij run 303,  $B=5.1$  T,  $R=6 \Omega$ .

## HOOFDSTUK 8 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### Conclusies

- 1) De met het ontwikkelde model voor het verband tussen geleiding en stroom,  $\sigma=CI^{1,25}$ , berekende stromen voor run 302 en 303 stemmen goed over een met de gemeten stromen.
- 2) De drukverhoging die wordt geconstateerd in de tweede helft van de generator kan, volgens de berekeningen, niet de enige oorzaak zijn van de verlaging van de stroom in het achterste stuk van de generator.
- 3) De Hallkortsluiting die optreedt in de tweede helft van de generator kan, volgens de berekeningen, de enige verklaring zijn van de verlaging van de stroom in het achterste stuk van de generator.
- 4) De berekende resultaten van de ontsteekspanning als functie van het magneetveld komen goed overeen met gemeten ontsteekspanningen bij het schokbuis experiment.
- 5) Het ontwikkelde verband tussen de voltagedrop en de stroom,  $\Delta V=CI^{1,99}$ , voldoet niet.

### Aanbevelingen

- 1) De aard van het stroomprofiel in het relaxatiegebied als functie van  $x$  is bij de berekeningen anders dan bij de metingen. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door dat de coëfficiënten van de  $\sigma-I$  en de  $\Delta V-I$  relaties in het relaxatiegebied anders zijn dan bij de negentiende elektrode. Voor een verdere verfijning van het model moet dit worden onderzocht.

2) De relatie tussen het geleidingsvermogen en de stroom is bepaald over een traject van 5,62 tot 3,01. Voor een betere onderbouwing van het gevonden model zullen meer metingen moeten worden verricht.

HOOFDSTUK 9. REFERENTIES

- Bor1 Borghi, C.A., "Discharges in the inlet region of a noble gas MHD generator", dissertatie, Technische Hogeschool Eindhoven, (1982)
- Fl11 Flinsenbergh, H.J., "Fossil fired closed cycle MHD power generating experiments", dissertatie, Technische Hogeschool Eindhoven, (1983)
- Hou1 Houben, J.W.M.A., "Loss mechanics in an MHD generator", dissertatie, Technische Hogeschool Eindhoven, (1973)
- Huy1 Huygen, G., "Het gasdynamische gedrag van MHD generatoren in relatie tot het opgewekte elektrische vermogen", afstudeerverslag, Technische Hogeschool Eindhoven, (1983)
- Kra1 Krause, J.C., "Gasdynamisch gedrag van MHD generatoren", afstudeerverslag, Technische Hogeschool Eindhoven, (1981)
- Mas1 Masee, P., "Gasdynamic performance in relation to the power extraction of an MHD generator", dissertatie, Technische Hogeschool Eindhoven, (1983)
- Mas2 Masee, P., "Gasdynamic performance in relation to the power extraction of the Eindhoven MHD blow-down facility", paper voor de achtste internationale MHD conferentie in Moskou, deel 1, pag. 192, Moskou, (1983)
- Wet1 Wetzler, J. M., "Spatially resolved determination of plasma parameters of a noble gas linear MHD generator", dissertatie Technische Hogeschool Eindhoven, (1983)

HOOFDSTUK 10. NAWOORD

In het laatste hoofdstuk van dit verslag wil ik diegenen bedanken die in belangrijke mate hebben bijgedragen aan het tot stand komen van dit werk.

Allereerst Prof. Dr. L. H. Th. Rietjens die mij de mogelijkheid heeft geboden af te studeren op een erg interessant onderwerp uit de deels fysische, deels elektrotechnische wereld van de MHD energieconversie. Ik ben hem zeer erkentelijk voor zijn stimulerende bijdrage tijdens de diverse besprekingen waarbij hij telkens opnieuw wist door te dringen tot de essentie van het werk.

Dr. Ir. P. Masee wil ik bedanken voor zijn voortdurende aandacht voor de voortgang van mijn afstudeerwerk. Ondanks drukke werkzaamheden was er altijd tijd te vinden om urgente vragen en probleempjes door te spreken. Ik dank hem voor de kritische kanttekeningen bij mijn werk waarbij hij nooit de grote lijn uit het oog verloor.

Mijn ouders wil ik van harte bedanken omdat zij mij in de gelegenheid hebben gesteld aan deze studie te beginnen en hem met succes af te ronden. Ik ben hun zeer erkentelijk voor hun voortdurende steun en begrip de afgelopen 27 jaar.

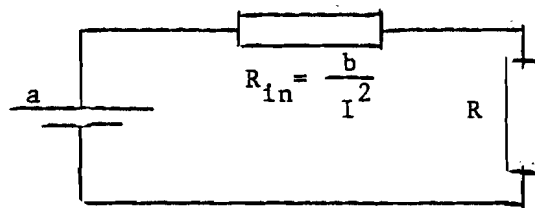
Tot slot wil ik mijn lieve vriendin Karien van Bommel bedanken voor haar trouwe vriendschap en voor de vanzelfsprekende manier waarop ze de afgelopen 5 jaar lief en leed met mij gedeeld heeft.

APPENDIX A HET BEWIJS VAN INSTABILITEIT

In de formules A.1 en A.2 staan twee verschillende uitdrukkingen voor de spanning over de weerstand  $\frac{b}{I^2}$  uit het vereenvoudigde model, zie fig. A.1

$$V_1 = a - RI \quad (A.1)$$

$$V_2 = \frac{b}{I} \quad (A.2)$$



Figuur A.1 Vereenvoudigd model voor een segment.

De spanningen  $V_1$  en  $V_2$  zijn in fig. A.2 uitgezet als functie van de de stroom  $I$ . Voor  $a$ ,  $b$  en  $R$  zijn bij wijze van voorbeeld arbitrair gekozen resp. 4 V, 1 W en 2  $\Omega$ .

Het linkersnijpunt vertoont een niet fysisch gedrag. Bij het verhogen van de weerstand  $R$  neemt de stroomwaarde die dit snijpunt als oplossing geeft toe, zie fig.6.13. In het vervolg wordt bewezen dat dit snijpunt een instabiele oplossing oplevert. Het linker snijpunt wordt aangegeven met het subscript 1, het rechter met  $r$ .

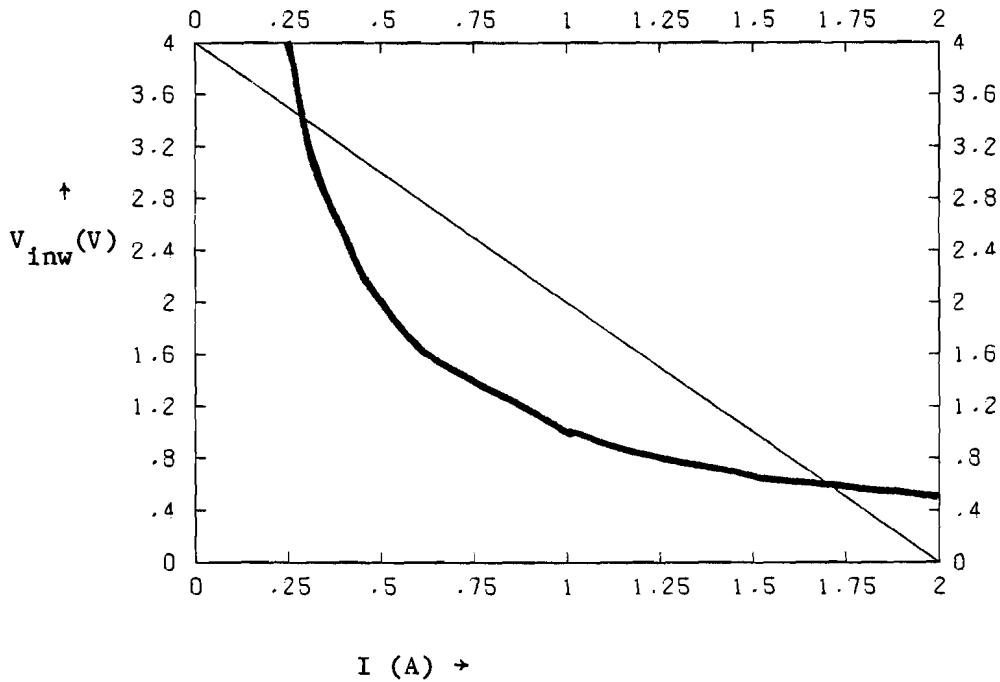
Voor de spanning  $V$  als functie van  $I$  geldt de volgende benadering:

$$V = V_0 + \left(\frac{dV}{dI}\right)_0 \Delta I = V_0 + \rho_0 \Delta I \quad (A.3)$$

Daarin is  $\rho_0$  de differentiele weerstand:



$$\rho_0 = \left(\frac{dV}{dI}\right)_0 \quad (\text{A.4})$$



Figuur A.2 De spanning over de inwendige weerstand,  $V_{inw}$ , als functie van de stroom  $I$ . Rechte lijn:  $V_1 = a - IR$ ,  
Kromme lijn:  $V_2 = b/I$ .

Als er een variatie in de stroom optreedt ontstaat er een extra spanning  $\Delta e$  in het circuit waarvoor geldt:

$$\Delta e = a - V_{inw} - V_{uit} = -(\rho_0 + R)\Delta I \quad (\text{A.5})$$

waarin  $V_{inw}$  en  $V_{uit}$  de spanningen resp. over de inwendige weerstand  $b/I^2$  en over de uitwendige weerstand  $R$ . Als  $\rho_0 + R > 0$  dan is  $\Delta e$  tegengesteld aan  $\Delta I$  en zal  $\Delta e$  de verstoring tegenwerken, de oplossing is stabiel. Als  $\rho_0 + R < 0$  dan wordt de verstoring versterkt en zal de oplossing instabiel zijn. Voor het linkersnijpunt geldt:

$$\rho_1 = \left(\frac{dV_2}{dI}\right)_1 \quad (\text{A.6})$$

Voor de weerstand R geldt:

$$R = - \frac{dV_1}{dI} \quad (\text{A.7})$$

Bij het linkersnijpunt tussen  $V_1$  en  $V_2$  geldt:

$$\frac{dV_2}{dI} < \frac{dV_1}{dI} \quad (\text{A.8})$$

zodat we voor  $\rho_1 + R$  vinden:

$$\rho_1 + R = \left(\frac{dV_2}{dI}\right)_1 - \left(\frac{dV_1}{dI}\right)_1 < 0 \quad (\text{A.9})$$

In dit geval wordt een verstoring  $\Delta I$  dus versterkt. De oplossing die bij het linker snijpunt hoort is dus instabiel. Voor het rechter snijpunt geldt:

$$\rho_r + R = \left(\frac{dV_2}{dI}\right)_r - \left(\frac{dV_1}{dI}\right)_r > 0 \quad (\text{A.10})$$

Een verstoring wordt in dit geval tegengewerkt. De oplossing is dus stabiel. Op dezelfde manier is te bewijzen dat de snijpunten van de functie  $\Phi(I)$  met de I-as stabiele oplossingen leveren als de afgeleide in het snijpunt positief is. Een snijpunt met een negatieve afgeleide levert een instabiele oplossing.

APPENDIX B DE REKENPROGRAMMA'S

Er zijn berekeningen uitgevoerd met drie verschillende programma's, die te vinden zijn onder de namen VIP/PR, VAS/PR en DRUK/PR. Deze programma's zijn reeds bestaande magneto-gasdynamische programma's waarin de invloed van grenslagen in rekening wordt gebracht en waarbij het ontwikkelde stroommodel is ingevoerd. De programma's VIP/PR en VAS/PR zijn identiek op de beschrijving van de voltage drop  $\Delta V$  na. In het programma VIP/PR wordt de voltage drop beschreven door een relatie tussen  $\Delta V$  en de stroom  $I_y$  terwijl in het programma VAS/PR de voltage drop wordt beschreven door een gemeten profiel als functie van de plaats  $x$ . Voor een gedetailleerde beschrijving wordt verwezen naar hoofdstuk 6. Een listing van beide programma's is te vinden in deze appendix. Voor ieder blok is een stukje commentaar opgenomen dat de functie van het betreffende blok aangeeft. Beide programma's worden opgestart met behulp van een sequence-file en maken voor de invoer gebruik van invoerfile VIP/QV.

De werking van de programma's is als volgt. Met als uitgangspunt de berekende waarden van het vorige segment wordt een segment doorgerekend en worden de berekende waarden uitgeschreven. Daarna begint de berekening van het volgende segment. De grootheden die worden uitgeschreven zijn te vinden in appendix B waarin een deel van een uitvoerlisting is opgenomen.

Het derde programma DRUK/PR is een interactief programma (ontwikkeld door ir. G. Huygen, voor listing Huyl). Telkens wordt een deel van het kanaal doorgerekend waarna de druk aan het eind gegeven wordt. Vervolgens kan men DDEL1DX, de verplaatsingsdikte van de grenslagen, aanpassen waarna het laatst doorgerekende deel opnieuw kan worden doorgerekend. Door de verplaatsingsdikte te vergroten wordt de effectieve doorsnede,  $A_{eff}$ , kleiner waardoor de druk aan het eind van het doorgerekende gedeelte stijgt. Op deze manier kan men de berekende druk precies gelijk krijgen met de gemeten druk en zo een idee krijgen van de grenslaag aangroei in het kanaal. Bovendien kan de druktoename achter in het kanaal in rekening gebracht worden, met name de invloed van de druktoename op de snelheid. Ook van dit programma is een listing te vinden in deze appendix.

```

100  %##### VERANDERINGEN NA VERSIE 840313 #####
200  %
300  %
400  % *****REGELS DIE ZIJN TOEGEVOEGD AAN DE VERSIE ZOALS IK
500  %          DIE ONTVANGEN HEB AAN HET BEGIN VAN MIJN AFSTUDEREN
600  %          WORDEN AANGEGEVEN MET %%%%% AAN HET EIND VAN DE
700  %          REGEL !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
800  %
900  % ***** REGELS WAARIN VERANDERINGEN ZIJN AANGEBRACHT WORDEN DOOR
1000 %          %%%%%%%%%%% COMMENTAAR %%%%%%%%%%%
1100 %          VOORAF GEGAAN
1200 %
1300 %
1400 %
1500 %
1600 %
1700 %
1800 %
1900  %#####
2000  %## Dit programma voert streamer model voor sigma ##
2100  %## effectief in en maakt interactief veranderen ##
2200  %## van de belastingsweerstand mogelijk. 840404 ##
2300  %$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
2400  %## Grenslaagberekening volgens GERTZ/PIAN(18th SEAM) vanaf nu met ##
2500  %## MHD effecten in de grenslaagvergelijkingen. ##
2600  %#####
2700  %#####
2800  % LIJST VAN GEBRUIKTE VARIABELEN
2900  %*****
3000  % D: aantal integratiestappen waarbij de geeiste nauwkeurigheid niet is
3100  %   gehaald;
3200  % I: integratiestap-index;
3300  % IO,IM: start- en eindwaarde van I voor het betreffende gebied;
3400  % J: Jensen's parameter voor Runge-Kutta integratieprocedure;
3500  % KK: hulpindex
3600  % NOR: aantal gebieden waarin verschillende geometrische parameters
3700  %       heersen (zoals kanaal, supersone diff., subsone diff.);
3800  % RBELVAR: aantal verschillende waarden van belastingsweerstand die
3900  %          moeten worden ingevoerd (1: voor alle segmenten dezelfde;
4000  %          2: verschillende waarden voor en na de schok; 32: voor elk
4100  %          segment een andere waarde);
4200  % REG: index voor het betreffende gebied;
4300  % RUN: nummer van de run;
4400  % DEFINITE: kiest uitgebreide (T) of beperkte (F) output;
4500  % GDP: rekt met gemeten (T) of berekende (F) stromen;
4600  % PCURVE: rekt met gemeten (T) of berekend (F) drukverloop;
4700  % STL1: interne stapgrootte voor Runge-Kutta integratieprocedure;
4800  % A,B,P1,Q1,R1R1,PHI: hulpvariabelen;
4900  % A1: oppervlakte kanaal in yz-vlak;
5000  % ALFAX: warmteoverdrachtscoefficient;
5100  % AE,BE: elektrische, resp. magnetische verliesfactor;
5200  % BV,EV: rechterlid bewegings-, resp. energievergelijking;
5300  % B1: magnetische inductie;
5400  % BK: kanaalbreedte in z-richting (afstand isolatorwanden);
5500  % ..I,..IN,..0: grootheid aan de ingang van de generator;
5600  % C1: kanaalomtrek in yz-vlak;
5700  % CA: 4/hydraulische diameter;
5800  % CF: wrijvingscoefficient;

```

5900 % C1P: soortelijke warmte bij constante druk;  
6000 % DELTA: grenslaagdikte;  
6100 % DU: snelheidsgradient in x-richting (du/dx);  
6200 % DX: stapgrootte in x-richting;  
6300 % DIVH,DIVB: divergentie van de hoogte, resp. breedte;  
6400 % EXPA: divergentie van de oppervlakte (dlnA/dx);  
6500 % EKT1E: e/kTe;  
6600 % ELLOS: verliesterm elastische botsingen;  
6700 % EE: elementaire lading;  
6800 % G: veldsterkteverlies t.g.v. voltage drop;  
6900 % G1: voltage drop;  
7000 % HK: kanaalhoogte in de y-richting (afstand elektrodewanden);  
7100 % HP,HPI,HPCRIT: effectieve, ideale, kritieke Hallparameter;  
7200 % DQ: warmteverlies per volume-eenheid;  
7300 % IL: inlooptlengte;  
7400 % IY,IV,ISEGM: stroom in de y-richting;  
7500 % JIJ: stroomdichtheid in de y-richting;  
7600 % JHEAT: Joulese dissipatie;  
7700 % JH1: Hall-stroomdichtheid;  
7800 % JPIIN: ingangsvermogen (isentropische correctie);  
7900 % KB: belastingsfactor;  
8000 % KFl: uitwendige "soortelijke weerstand";  
8100 % K: constante van Boltzmann;  
8200 % DS: entropietoename;  
8300 % MA1,MC1: atoommassa van Argon, resp. Cesium;  
8400 % MF: massastroom;  
8500 % ME: massa van een elektron;  
8600 % M1: Machgetal;  
8700 % N: deeltjesdichtheid;  
8800 % NA1,NC1: Argon-, resp. Cesiumdichtheid;  
8900 % NIS,NLOK,NPOL: isentropisch, lokaal, polytropisch rendement;  
9000 % NE: elektronendichtheid;  
9100 % NIA1,NAAl,NIC1,NAC1: dichtheid van ionen/atomen Argon/Cesium;  
9200 % NU..: botsfrequentie;  
9300 % NIUX: Nusseltgetal;  
9400 % P,PS: statische resp. stagnatiedruk;  
9500 % PlE: elektrische vermogensdichtheid;  
9600 % ..T: gesommeerde grootte;  
9700 % PIIN: thermisch ingangsvermogen;  
9800 % QW: warmtestroomdichtheid door de wand;  
9900 % QA: botsingsdoorsnede van Argon;  
10000 % RO: massadichtheid;  
10100 % ROU: RO\*U;  
10200 % ROUK: RO\*U\*\*2;  
10300 % ROCP: RO\*U\*C1P;  
10400 % RBEL,R1BEL: belastingsweerstand;  
10500 % R1,R1A: specifieke resp. universele gasconstante;  
10600 % R1EX: Reynoldsgetal voor de grenslaag;  
10700 % SP: seed ratio;  
10800 % S: elektrode afstand;  
10900 % S1A1,S1C1: Saha voor Argon, resp. Cesium;  
11000 % SIG,SIG1: effectief, ideaal el. geleidingsvermogen;  
11100 % ST: staplengte voor integratie;  
11200 % T1,TS: statische resp. stagnatietemperatuur;  
11300 % T10,T1B: onder-/bovengrens zoekinterval voor elektronentemperatuur;  
11400 % TW: schuifspanning;  
11500 % T1E: elektronentemperatuur;  
11600 % T1W,TWAND,TADW: gewone resp. adiabatische wandtemperatuur;  
11700 % T1EM: (Te)\*\*(3/2);  
11800 % ADIVAI: verhouding der oppervlakten van nozzle-keel en ingang;  
11900 % U: snelheid in de x-richting;  
12000 % UB1: geïnduceerde elektrische veldsterkte;

```

12100 % UF: (1-M1**2)/U;
12200 % URO1A1,URC1: constanten in de Sahavergelijkingen;
12300 % VOL: volume van een integratie-interval;
12400 % VIS: viscositeitscoefficient;
12500 % VDLOS: verlies t.g.v. voltage drop per volume-eenheid;
12600 % XS: schoklocatie;
12700 % X: x-coördinaat;
12800 % XG: lengte van de grenslaag;
12900 % XX: Tstagn/Tgas;
13000 % R1EH,R1EX: Reynoldsgetal van de bulk, resp. van de grenslaag;
13100 % SIH: magnetisch drukgetal;
13200 % RAD: stralingsverliezen per volume-eenheid;
13300 % E1: (1-Ts/Ts,in);
13400 % R1MH: magnetisch Reynoldsgetal;
13500 % I1MH: magnetisch interactiegetal;
13600 % VX: spanning in de x-richting;
13700 % EX: el. veldsterkte in de x-richting;
13800 % TFILM: filmtemperatuur;
13900 % ...BULK: grootheden in de bulk van het kanaal;
14000 % LABDA: warmtegeleidingscoefficient;
14100 % ITERO,ITERB: elektronenenergiebalans voor T10, resp. T1B;
14200 % HKX0,BKX0: hoogte,breedte voor X=X0;
14300 % FACTOR: 1-voltage drop verliesfactor;
14400 % TIJD: tijdstip in de run;
14500 % Y: dimensieloze druk / snelheid;
14600 % H1: dY/dx;
14700 % AF,RF: absolute/relatieve fout per integratiestap;
14800 % PC: precisie;
14900 % LENGTE: lengte van een gebied;
15000 % HKA,BKA: hoogte, breedte aan de uitgang van een gebied;
15100 % IBEL: ingelezen waarde van de stroom door de belastingsweerstand;
15200 % CTW: correctiefactor voor wrijvingsverliezen;
15300 % NOS: aantal integratiestappen per gebied;
15400 % PX: ingelezen waarden voor de statische druk;
15500 %
15600 %*****NIEUW TOEGEVOEGDE VARIABELEN*****
15700 %
15800 % JX: Hallstroom in de x-richting; %%%%%%%%%%%
15900 % MHS: Variabele waarvoor geldt MHS*Xeind=maximale Hallstroom %%%%%%%%%%
16000 %      aan het eind van het kanaal; %%%%%%%%%%%
16100 % BHS: Waarde van X waar de Hallstroom begint; %%%%%%%%%%%
16200 % BETA: Hallcoefficient %%%%%%%%%%%
16300 %FUNC: FUNCTIE DIE HET VERBAND TUSSEN JY,UB1 EN dV VASTLEGT %%%%%%%%%%%
16400 %AFGL: AFGELEIDE VAN FUNC %%%%%%%%%%%
16500 % TEL:Hulpvariabele in het gedeelte dat de stroom berekent %%%%%%%%%%%
16600 %HHQA3:Hulpvariabele in het gedeelte dat de stroom berekent %%%%%%%%%%%
16700 %OBJ: hulpvariabele voor het plotprogramma %%%%%%%%%%%
16800 %HIK: hulpvariabele voor het plotprogramma %%%%%%%%%%%
16900 %RARY,TRARY: arrays voor het plotprogrammama %%%%%%%%%%%
17000 % HALLCORR Correctie vanwege hallstromen %%%%%%%%%%%
17100 %MACHT: DE MACHT VOOR DE SIGMA-IY-RELATIE,INLEZEN REMOTE%%%%%%%%%%
17200 %*****
17300 %
17400 %          DECLARATIES
17500 %=====
17500 $SET INSTALLATION
17600 BEGIN
17700 $ INCLUDE "PLOT " %%%%%%%%%%%
17800 FILE PLOTF(KIND=PREVIEWER); %%%%%%%%%%%
17900 FILE INB;
18000 LABEL NUTS;%%%%%%%%%%
18100 BOOLEAN OPNIEUW,KLAAR,TEST,PARABOOL,EERSTE;
18200 DOUBLE ARRAY M[1:20],MHD[1:60],MHX[1:60];

```

```

18300 FILE INA,OUTA;
18400 INTEGER D,I,IO,IM,MMM,J,KK,NOR,RBELVAR,REG,RUN,QQ,KQ,KQK,KKK,QQQ,NOSQQ,
18500 OBJ,HIK,TEL,NOP,HIL,NIK,HOK; %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
18600 BOOLEAN DEFINITE,GDP,PCURVE,ONDERWEG,PRINT;
18700 REAL STL1,DX,T1E,T1O,T1B,X,MI,KSI,SNELH,TEMP,TTQ,KSIX;
18800 REAL ISF,ISFO,XI,NN,CMT,CMT0,INT1,INT2,CDT,CSF,MM,HEFF,BEFF,A12,
18900 JX,MHS,BHS,BETA,HALLCORR,MACHT,%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
19000 DEL2DEL1,X2X1,X2X3,DEL2X1,DEL3X1,COEFF1,COEFF2,COEFF3,
19100 DDEL1DX,HELPER,AEFF,DIVTW,
19200 NNE,DEL3E,DEL2E,DELPRIMEE,REYDEL2E,KVISF,CFSE,CFE,RFE,
19300 USTERE,ULT,STANLAME,KE,ALFAE,DELQQO,DELHEO,F0,F1,F2,
19400 F3,QWE,STANE,DELBAR2E,DELBAR3E,NACCE,BETATE,CDSE,CDE,
19500 HELPER3,F01,F02,F11,F12,F22,F32,
19600 DEL5E,COEF1,COEF2,COEF3,REYDEL2I,DEL2I,CFSI,ALFAI,DELHI,
19700 RRI,DELPRIMEI,CFI,RFI,USTERI,STANLAMI,KI,DELHIO,STANI,
19800 QWI,XBSE,XBSI,KSE,KSIX,XBRE,XBRI,DELBAR2I,DELBAR3I,
19900 DEL1I,DEL1IO,DEL2IO,DEL1E,DEL1EO,DEL2EO,DEL3EO,DELHE,
20000 DDEL1EDX,DDEL1IDX,DELJ,DELJU,DTWDX,DELV,DELTA1I,DELTA1E,
20100 A25,A32,A42,A45,DCSFDI,A51,A52,DCSFDN,A53,A54,A55,Y1,Y2,Y3,Y4,
20200 EXPARM,HHQ,COEFA,COEFB,LREL,DELTAPRIME,CDT0,DAEFFDX,DELTA1,
20300 XOS,XOR,HELPER2,XXI,HKX,BKX,NNI,DEL3IO,T1O,DEL4E,
20400 DDELVIDX,DDELV2DX,DRVELD,XGR,XGEM,JTOT,JGEM,
20500 Y5,X1,X2,X3,X4,X5,A10,DCSFDI,TTW,HHQA1,HHQA2,HHQA3,FUNC,AFGL;
20600 DOUBLE A,A1,ALFAX,AE,BV,B,B1,BE,BK,BKIN,C1,CA,CF,C1P,DELTA,DU,
20700 DIVH,DIVB,EXPA,EV,EKT1E,ELLOS,EE,G,G1,HPCRIT,HK,HP,
20800 HPI,HKIN,DQ,IL,IY,JIJ,JHEAT,JH1,JP1IN,JHT,KB,KF1,K,
20900 DS,MA1,MC1,MF,ME,M1,N,NA1,NC1,NIS,NLOK,NPOL,NE,NIA1,NA1,
21000 NIC1,NAC1,NUAA1,NUA1,NUAC1,NUIC1,NUA1,NUC1,NU,N1UX,PHI,P,
21100 PS,P1E,P1,P1ET,PSIN,P1IN,PO,QW,QWT,QA,Q1,RO,ROU,ROUK,ROCP,
21200 RIBEL,R1R1,R1A,R1,R1EX,SP,S,S1A1,S1C1,SIG,ST,SIGI,T1,T1W,
21300 TW,T1EM,TSIN,TS,ADIVAI,UO,U,UB1,UF,UR01A1,URC1,PSTAV,TSTAV,
21400 VDT,VOL,VIS,VDLOS,XS,XG,XX,R1EH,S1H,RADT,RAD,E1,R1MH,
21500 I1MH,VX,EX,TADW,TFILM,ROUBULK,ROBULK,ROUKBULK,ROCPBULK,
21600 LABDA,ITERO,ITERB,HKXO,BKXO,XO,FACTOR,ISEGM,IV,TIJD;
21700 REAL ARRAY Y,H1,AF,RF[1:9],PC[1:4];
21800 READ(INA,/,RBELVAR,NOR,ONDERWEG);
21900 BEGIN DOUBLE ARRAY RBEL[1:RBELVAR],LENGTE,CTW[1:NOR],HKA,BKA[0:NOR];
22000 INTEGER ARRAY NOS[1:NOR]; DOUBLE ARRAY TWAND[1:NOR];
22100 READ(INA,/,NOS[*]); KK:=0;HIK:=0;
22200 FOR REG:=1 STEP 1 UNTIL NOR DO KK:=KK+NOS[REG];
22300 BEGIN DOUBLE ARRAY IBEL[1:NOS[1]],PX[1:KK],HELPH[0:100];
22400 REAL ARRAY RARY[0:NOS[1]],TRARY[0:1,0:NOS[1]]; %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
22500 REAL ARRAY GEMI[0:NOS[1]]; %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
22600 LABEL MAGHET;
22700 %*****
22800 % SCHRIJFO schrijft de aan het systeem opgelegde grootheden, zoals
22900 % ingangscondities, belasting, kanaalgeometrie en dergelijke uit.
23000 %=====
23100 PROCEDURE SCHRIJFO;
23200 BEGIN
23300 % WRITE(OUTA,<"PRINT?">);READ(INB,/,PRINT);
23400 IF PRINT THEN
23500 BEGIN WRITE(OUTA,</,17("*")," QUASI-EENDIMENSIONALE GENERATORMODEL "
23600 ,17("*")>);
23700 IF DEFINITE THEN WRITE(OUTA,<X8,"GRENSLAAG-BEREKENING VOLGENS ",
23800 "GERTZ/PIAN(18TH SEAM)">);
23900 WRITE(OUTA,<X8,"NU MET SIGMA VOLGENS STREAMER MODEL">);
24000 IF RUN NEQ 0 THEN WRITE(OUTA,</,X21,"RUN : ",I3,X5,"TIJD : ",F5.2,
24100 " SEC">,RUN,TIJD);
24200 IF GDP THEN WRITE(OUTA,</,X28,"GEMETEN STROMEN">);
24300 IF PCURVE THEN WRITE(OUTA,</,X26,"GEMETEN DRUKVERLOOP">);
24400 IF DEFINITE THEN

```





```

30700 IF REG=1 AND X<0.85 THEN %%%%%%%%%%%
30800 BEGIN %%%%%%%%%%%
30900 JIJ:=JGEM; %%%%%%%%%%%
31000 IY:=(XGR-XGEM)*(BK)*JIJ; %%%%%%%%%%%
31100 END; %%%%%%%%%%%
31300 % WRITE(OUTA,<5(E10.3,X2),/>,I,X,RBEL[IF I=0 THEN 1
31400 % ELSE I],M1,P);
31500 % WRITE(OUTA,<"PRINT?">);READ(INB,/,PRINT);
31600 IF PRINT THEN
31700 BEGIN IF I=IO THEN
31800 BEGIN IF REG=1 THEN WRITE(OUTA,</,"GENERATOR KANAAL",/>) ELSE
31900 IF REG=2 THEN WRITE(OUTA,</,"SUPERSONE DIFFUSOR 1",/>) ELSE
32000 IF REG=3 THEN WRITE(OUTA,</,"SUPERSONE DIFFUSOR 2",/>) ELSE
32100 WRITE(OUTA,</,"SUBSONE DIFFUSOR",/>);
32200 END;
32300 IF NOT DEFINITE THEN
32400 BEGIN IF I < 32 AND I MOD 8=0 THEN WRITE(OUTA,<X5,"X",X3,"I",X5,"M1"
32500 ,X5,"U",X10,"P",X9,"PS",X4,"T1",X4,"TS",X3,"T1E",X4,"HENT">);
32600 IF REG NEQ 1 AND I=IO THEN WRITE(OUTA,<X5,"X",X3,"I",X5,"M1",X5,"U"
32700 ,X10,"P",X9,"PS",X4,"T1",X4,"TS">);
32800 IF REG=1 THEN WRITE(OUTA,<F6.3,X2,I2,X2,F5.2,X2,I4,X2,E9.2,X2,
32900 E9.2,X2,I4,X2,I4,X2,I4,X2,F6.4>,X,I,M1,U,P,PS,T1,TS,T1E,
33000 P1ET/P1IN)
33100 ELSE WRITE(OUTA,<F6.3,X2,I2,X2,F5.2,X2,I4,X2,E9.2,X2,
33200 E9.2,X2,I4,X2,I4>,X,I,M1,U,P,PS,T1,TS)
33300 END ELSE
33400 BEGIN WRITE(OUTA,<X4,"X ",F11.4,X2," T1W ",E10.3,X5,"QQ ",E10.3,
33500 "PRCTIME ",E10.3,5("$"),/,X3,"HK ",E10.3,X5,"BK ",E10.3,X5,
33600 "PS ",E10.3,X6,"P ",E10.3,/,X1,"DPDX ",E10.3,X6,"U ",E10.3,X3,
33700 "DUDX ",E10.3,X5,"TS ",E10.3,/,X4,"T ",E10.3,X5,"M1 ",E10.3,X5,
33800 "RO ",E10.3,X6,"N ",E10.3,/,X3,"DS ",E10.3," DELPRE ",E10.3,X3,
33900 "R1EH ",E10.3,X3,"R1EX ",E10.3>,X,T1W,QQ,TIME(2)/60,HK,BK,PS,P,
34000 H1[1]*P0,U,
34100 H1[2]*U0,TS,T1,M1,ROBULK,N,DS,DELPRIMEE,R1EH,R1EX);
34200 IF REG NEQ 1 OR B1=0 THEN WRITE(OUTA,<X2,"QWT ",E10.3,X5,"CF ",
34300 E10.3>,QWT,CF)
34400 ELSE WRITE(OUTA,<X2,"QWT ",E10.3,X5,"QW ",E10.3,X2,
34500 "JHEAT ",E10.3,X2,"ELLOS ",E10.3,/,X2,"RAD ",E10.3,X3,"RBEL ",
34600 E10.3,X5,"KB ",E10.3,X5,"TE ",E10.3,/,X2,"KKK ",E10.3,X1,"HLP[K] ",
34700 E10.3,X5,"HP ",E10.3,X4,"HPI ",E10.3,/,X3,"NE ",E10.3,X4,"NAA ",
34800 E10.3,X4,"SIG ",E10.3,X4,"NAC ",E10.3,/,X2,"NIC ",E10.3,X3,"VBEL ",
34900 E10.3,X5,"VX ",E10.3,X5,"IY ",E10.3,/,X4,"E ",E10.3,X5,"JY ",E10.3,
35000 X5,"JH ",E10.3,X5,"PE ",E10.3,/,X3,"AE ",E10.3,X5,"BE ",E10.3,X3,
35100 "NENT ",E10.3,X3,"NPOL ",E10.3,/,X2,"NIS ",E10.3,X3,"NLOK ",E10.3,
35200 X4,"PET ",E10.3,X3,"DELV ",E10.3,/,X2,"JHT ",E10.3,X5,"SH ",E10.3,
35300 X4,"RMH ",E10.3,X4,"IMH ",E10.3>,QWT,QW,JHEAT,ELLOS,RAD,R1BEL,KB,
35400 T1E,KKK,HELP[KKK],HP,HPI,NE,NAA1,SIG,NAC1,NIC1,ISEGM*R1BEL,VX,IY,
35500 E1,JIJ,JH1,P1E,AE,BE,P1ET/P1IN,NPOL,NIS,NLOK,P1ET,DELV,JHT,S1H,R1MH,
35600 I1MH);
35700 END;
35800 WRITE(OUTA,<"ISOLATOR WAND GRENSLAAG",49("-"),/,
35900 X1,"DEL1 ",E10.3,X1,"DELTA1 ",E10.3,X3,"DEL2 ",E10.3,X3,
36000 "DELH ",E10.3,/"DELBAR2",E10.3,"HBAR32 ",E10.3,
36100 X4,"CFS ",E10.3,X5,"RF ",E10.3,/,X3,"RR ",E10.3,X3,"ALFA ",
36200 E10.3,X4,"XBS ",E10.3,X4,"XBR ",E10.3,/"USTER",E10.3,
36300 "STANLAM ",E10.3,X3,"STAN ",E10.3,X5,"QW ",E10.3,/,
36400 "PSTAV ",E10.3,X2,"TSTAV ",E10.3,X3,"DELJ ",E10.3,X1,
36500 "DELPRI ",E10.3,/"DDEL1",E10.3,X2,"DDEL2",E10.3,X2,
36600 "DDELH ",E10.3,X2,"DAEFF ",E10.3,/>,DEL1I,DELTA1I,DEL2I,
36700 DELHI,DELBAR2I,DELBAR3I/DELBAR2I,CFSI,RFI,RR1,ALFAI,
36800 (XBSI+XOS)*VIS/(RO*U),(XBRI+XOR)*KSE,
36900 USTERI,STANLAMI,STANI,QWI,PSTAV,TSTAV,DELJ,DELPRIMEI,

```

```
37000 DDEL1IDX,H1[4]*DEL2IO,H1[5]*DELHIO,DAEFFDX);
37100 WRITE(OUTA,<"ELECTRODEWANDGRENslaag",48("-"),/,X1,
37200 "DEL1 ",E10.3,X1,"DELTA1 ",E10.3,X3,"DEL2 ",E10.3,X3,
37300 "DEL3 ",E10.3,/,X1,"DELH ",E10.3,"DELBAR2 ",E10.3,X1,
37400 "HBAR32 ",E10.3,X5,"NN ",E10.3,/,X2,"CFS ",E10.3,X5,
37500 "RF ",E10.3,X4,"XBS ",E10.3,X4,"XBR ",E10.3,/,
37600 "STANLAM",E10.3,X2,"ALFA ",E10.3,X2,"USTER ",E10.3,X1,
37700 "DELQQO ",E10.3,/,X3,"FO ",E10.3,X5,"F1 ",E10.3,X5,"F2 ",
37800 E10.3,X5,"F3 ",E10.3,/,X1,"NACC ",E10.3,X2,"BETAT ",E10.3,
37900 X4,"CDS ",E10.3,X3,"DEL5 ",E10.3,/, "DDEL1 ",E10.3,X2,
38000 "DDEL2 ",E10.3,X2,"DDEL3 ",E10.3,X2,"DDELH ",E10.3,/>,
38100 DEL1E,DELTA1E,DEL2E,DEL3E,DELHE,DELBAR2E,DELBAR3E/DELBAR2E,
38200 NNE,CFSE,RFE,(XBSE+XOS)*VIS/(RO*U),(XBRE+XOR)*KSE,
38300 STANLAME,ALFAE,USTERE,DELQQO,FO,
38400 F1,F2,F3,NACCE,BETATE,CDSE,DEL5E,DDEL1EDX,H1[7]*DEL2EO,
38500 H1[8]*DEL3EO,H1[9]*DELHEO);
38600 END ELSE
38700 BEGIN WRITE(OUTA,<"OPNIEUW?">);READ(INB,/,OPNIEUW);
38800 IF OPNIEUW THEN
38900 BEGIN RECALL;WRITE(OUTA,<"RBEL?">);
39000 READ(INB,/,RBEL[IF I=0 THEN 1 ELSE I+1]);
39100 END;
39200 END;
39300 IF TEL>5 THEN BEGIN WRITE(OUTA,</", "ITERATIE AFGEbROKEN %%%%%%%%%%
39400 ER ZIJN GEEN NULPUNTEN!!!!!!!!",/>); %%%%%%%%%%
39500 TEL:=0; %%%%%%%%%%
39600 END; %%%%%%%%%%
39700 IF AFGL<0 THEN
39800 WRITE(OUTA,<"** WAARSCHUWING:AFGL<0 **",/>);
39900 IF REG=1 AND JIJ<0 THEN BEGIN
40000 WRITE(OUTA,</", "HHQA1=",E10.3,X2,"HHQA2=",E10.3,X2,"HHQA3",E10.3,
40100 />,HHQA1,HHQA2,HHQA3);
40200 WRITE(OUTA,</", "UB-G=",E10.3,X2,"JIJ*KF1=",E10.3,X2,"JIJ/SIG=", %%%%
40300 E10.3,/>,DRVELD,JIJ*KF1,JIJ/SIG); %%%%%%%%%%
40400 WRITE(OUTA,<"VOLTAGEDROP:"",E10.3,X2,"RELL=",E10.3,X2,/>, %%%%%%%%%%
40500 (5.485@-5*((-JIJ*BK)**1.99)),(1-DEXP(-X/LREL)); %%%%%%%%%%
40600 WRITE(OUTA,<"HALLCORR",E10.3,X2,/>,HALLCORR); %%%%%%%%%%
40700 END; %%%%%%%%%%
40800 IF REG=1 THEN BEGIN %%%%%%%%%%
40900 RARY[HIK]:=X; %%%%%%%%%%
41000 TRARY[0,HIK]:=-IY; %%%%%%%%%%
41100 TRARY[1,HIK]:=GEMI[HIK]; %%%%%%%%%%
41200 HIK:=HIK+1; %%%%%%%%%%
41300 IF REG=1 AND HIK=33 THEN BEGIN %%%%%%%%%%
41400 % MPDRAW(PLOTF,0,0,15,16,0,NOS[1],0,1,RARY,TRARY,FALSE,FALSE,4); %
41500 END; %%%%%%%%%%
41600 END;
41800 WRITE(OUTA,<"X=",E10.3,X2,"IY=",E10.3,X2,/>,X,IY); %%%%%%%%%%
41900 END SCHRIJFI;
42000 %$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
42100 % SCHRIJFS print grootheden by expansie na schokgolf
42200 % totdat voorgeschreven massaflux is bereikt
42300 %$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
42400 PROCEDURE SCHRIJFS;
42500 BEGIN WRITE(OUTA,<X1,"QQQ",I3,X2,"PSTAV",E10.3,X2,"M1",
42600 E10.3,X2,"P",E10.3,X2,"PS",E10.3,/,X1,"DEL1E",E10.3,X2,
42700 "AEFF",E10.3,X2,"TS",E10.3,X2,"T1",E10.3,/,X1,"DEL1I",
42800 E10.3,X2,"DELTA1I",E10.3,X2,"MHELP",E10.3,X2,"MF",E10.3,/>,
42900 QQQ,PSTAV,M1,P,PS,DEL1E,AEFF,TS,T1,DEL1I,DELTA1I,HELPER,MF);
43000 END SCHRIJFS;
43100 %$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
43200 % ITER(TIE) berekent bij gegeven electronentemperatuur TIE de daarvan
```

```

43300 % afhankelijke grootheden, alsmede de electronenenergiebalans ITER.
43400 %=====
43500
43600 REAL PROCEDURE ITER(T1E);
43700
43800 REAL T1E;
43900 BEGIN T1EM:=(DSQRT(T1E))**3; EKT1E:=EE/(K*T1E);
44000 S1A1:=UR01A1*4.825@21*T1EM*DEXP(-15.75*EKT1E);
44100 S1C1:=(4.825@21/URC1)*T1EM*DEXP(-3.893*EKT1E);
44200 Q1:=S1A1*S1C1-NA1*S1A1-NC1*S1C1; P1:=S1A1+S1C1;
44300 R1R1:=-(NA1+NC1)*S1A1*S1C1; A:=(3*Q1-P1**2)/3;
44400 B:=(2*P1**3-9*P1*Q1+27*R1R1)/27;
44500 PHI:=DARCCOS(-B/(2*DSQRT(-(A**3)/27)));
44600 NE:=2*DSQRT(-A/3)*DCOS(PHI/3)-P1/3; NIA1:=NA1*S1A1/(NE+S1A1);
44700 NAA1:=NA1-NIA1; NIC1:=NC1*S1C1/(NE+S1C1); NAC1:=NC1-NIC1;
44800 QA:=.279841@-20*(1.46*T1E/1000-.535);
44900 NUAC1:=DSQRT(8*K*T1E/(3.1415926*ME)); NUAA1:=QA*NAA1*NUAC1;
45000 NUAC1:=.5@-17*NAC1*NUAC1;
45100 NUIA1:=3.64@-6*NIA1*LN(1.24@7*T1EM/DSQRT(NE))/T1EM;
45200 NUIC1:=NIC1*NUIA1/NIA1; NUA1:=NUAA1+NUIA1; NUC1:=NUAC1+NUIC1;
45300 NU:=NUA1+NUC1; SIGI:=EE**2*NE/(ME*NU); HPI:=EE*B1/(ME*NU);
45400 IF HPI GTR HPCRIT THEN
45500 BEGIN HP:=HPCRIT; SIG:=HP*SIGI/HPI END ELSE
45600 BEGIN HP:=HPI; SIG:=SIGI END ;
45700 JIJ:=(-SIG*(UB1-G))/(1+SIG*KF1);
45800 JHEAT:=(JIJ**2)/SIG;
45900 ELLOS:=1.5*K*NE*ME*(T1E-T1)*(2*NUA1/MA1+2*NUC1/MC1);
46000 RAD:=(NAC1/DSQRT(BK))*(3.06@-14*DEXP(-1.64@4/T1E)
46100 +9.32@-12*DEXP(-3.79@+4/T1E)); ITER:=JHEAT-ELLOS-RAD;
46200 END ITER;
46300 %*****
46400 % FINDZEROINITER(T1E) zoekt een nulpunt voor de electronenenergiebalans
46500 % bij variatie van T1E, controleert de stabiliteit van het gevonden
46600 % nulpunt en constateert evt. het ontbreken van een stabiel nulpunt of
46700 % het bestaan van twee stabiele nulpunten, waarop de berekening wordt
46800 % afgebroken.
46900 %=====
47000
47100 PROCEDURE FINDZEROINITER(T1E);
47200
47300 REAL T1E;
47400 BEGIN IF ITER(250)*ITER(9000) GTR 0 AND ABS(T1E-T1) LSS 25 AND I NEQ 0
47500 THEN BEGIN T1E:=T1; ITER(T1E) END ELSE
47600 BEGIN ITERO:=ITER(T10); IF ITERO LSS 0 THEN
47700 BEGIN T10:=T10-25; T1B:=T10+25; ITERB:=ITERO; ITERO:=ITER(T10);
47800 END ELSE
47900 BEGIN T1B:=T10+25; ITERB:=ITER(T1B);
48000 END;
48100 WHILE ITERO*ITERB GTR 0 AND T10 GTR 250 AND T1B LEQ 9000 DO
48200 BEGIN IF ITERO GTR 0 THEN
48300 BEGIN T10:=T10+25; T1B:=T1B+25; ITERO:=ITERB; ITERB:=ITER(T1B);
48400 END ELSE
48500 BEGIN T10:=T10-25; T1B:=T1B-25; ITERB:=ITERO; ITERO:=ITER(T10);
48600 END;
48700 END;
48800 IF T10 GTR 250 AND T1B LEQ 9000 THEN ZEROINAB(ITER(T1E),T1E,T10,
48900 T1B,@-2,@-4) ELSE
49000 BEGIN T1E:=T1; ITER(T1E);
49100 END;
49200 END;
49300 T10:=T1E;
49400 END FINDZEROINITER;

```





```

61900
62000 REAL PROCEDURE FUN(X,Y,J);
62100
62200 REAL X; ARRAY Y[1]; INTEGER J;
62300 BEGIN LABEL VERDER; Y[1]:=ABS(Y[1]); Y[2]:=ABS(Y[2]);
62400 P:=Y[1]*PO;U:=Y[2]*UO;DELI:=Y[3]*DELIIO;
62500 DEL2I:=Y[4]*DEL2IO;DELHI:=Y[5]*DELHIO;
62600 DEL1E:=Y[6]*DEL1EO;DEL2E:=Y[7]*DEL2EO;
62700 DEL3E:=Y[8]*DEL3EO;DELHE:=Y[9]*DELHEO;
62800 HK:=HKXO*(1+DIVH*(X-XO));BK:=BKXO*(1+DIVB*(X-XO));C1:=2*(HK+BK);
62900 CA:=C1/HK/BK;HEFF:=HK-(2*DEL1E);BEFF:=BK-(2*DELI);
63000 T1:=P*U*HEFF*BEFF/(MF*R1); N:=P/(R1*T1*(MA1*(1-SP)+MC1*SP));
63100 IF REG=1 THEN T1W:=TWAND[1]*(1+DIVTW*(X-XO));
63200 TADW:=T1+.435*U**2/C1P; TFILM:=(T1W+TADW)/2;
63300 NC1:=SP*N; NA1:=N-NC1; RO:=P/(R1*TFILM);
63400 UB1:=U*B1*HEFF/HK;
63500 ROBULK:=P/(R1*T1); ROUBULK:=ROBULK*U; ROUKBULK:=ROUBULK*U;
63600 ROCPBULK:=ROUBULK*C1P;
63700 IF X LEQ 0.4625 THEN DELV:=G1+DDELVIDX*(X-XO) ELSE
63800 DELV:=G1+DDELVIDX*(0.4625-XO)+DDELV2DX*(X-0.4625);
63900 ROU:=RO*U; ROUK:=ROU*U; ROCP:=ROU*C1P; G:=DELV/HK;
64000 EXPA:=(DIVH+DIVB+2*DIVH*DIVB*(X-XO))/((1+DIVH*(X-XO))*(1+DIVB*
64100 (X-XO)));
64200 %
64300 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% COMMENTAAR %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
64400 %
64500 % HET GEDEELTE DAT DE ELEKTRISCHE GROOTHEDEN BEREKENT IS
64600 % VOLLEDIG VERANDERD !
64700 %
64800 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
64900 %
65000 %----- Berekening elektrische grootheden -----
65100 IF B1>0.5 AND REG=1 THEN
65200 BEGIN
65300 KF1:=(BK)*S*RBEL[IF I=0 THEN 1 ELSE I]/HK;
65400 RBEL:=RBEL[IF I=0 THEN 1 ELSE I];
65500 RAD:=ELLOS:=JHEAT:=0;
65600 % COEFA:=(2.4899@-5)*(BK**1.74);CONSTANTE COEFA INLEZEN Q1D/VAR
65700 COEFB:=COEFA*(1-DEXP(-X/LREL))*(BK**MACHT);
65800 IF X=0 THEN
65900 BEGIN JIJ:=-0.5;
66000 COEFB:=6.505@-7;GO VERDER;
66100 END;
66200 % IF X<0.45 THEN JX:=0
66300 JX:=0;
66400 % ELSE JX:=14268*(X-0.45);
66500 %----- MODEL MET VARIABELE VOLTAGEDDROPP -----
66600 HHQA1:=COEFB*UB1;
66700 HHQA2:=COEFB*KF1;
66800 HHQA3:=(5.485@-5)*COEFB*((BK)**1.99)/HK;
66900 BHS:=-0.125*B1+1.0375;
67000 IF X<=BHS THEN HALLCORR:=1;
67100 % HALLCORR:=1;
67200 IF X>BHS THEN HALLCORR:=1+((X-BHS)/0.35);
67300 DRVELD:=UB1-((5.485@-5*(-JIJ*(BK))**1.99))/HK;
67400 HHQ:=HELP[1]:=HHQA1/HHQA2;
67500 FOR KKK:=2 STEP 1 UNTIL 99 DO
67600 BEGIN
67700 IF KKK=95 THEN WRITE(OUTA,<"KKK=95">);
67800 FUNC:=HALLCORR*HHQ-(HHQA1*(HHQ**MACHT))+
67900 (HHQA2*(HHQ**(MACHT+1)))+(HHQA3*(HHQ**(MACHT+1.99)));
68000 AFG:=HALLCORR-(HHQA1*MACHT*(HHQ**(MACHT-1)))+

```

```

68100          (HHQA2*(MACHT+1)*(HHQ**MACHT))+
68200          (HHQA3*(MACHT+1.99)*(HHQ**(MACHT+0.99)));
68300  %----- MODEL MET VOLTAGEPROFIEL -----
68400  %      HHQA1:=COEFB*(UB1-G);
68500  %      HHQA2:=COEFB*KF1;
68600  %      IF X<LREL OR HELP[KKK]<=0 THEN HHQ:=HELP[1]:=HHQA1/HHQA2
68700  %      ELSE HHQ:=HELP[1]:=HELP[KKK];
68800  %      DRVELD:=UB1-G;
68900  %      FOR KKK:=2 STEP 1 UNTIL 99 DO
69000  %      BEGIN
69100  %          FUNC:=HHQ-(HHQA1*(HHQ**1.74))+(HHQA2*(HHQ**2.74));
69200  %          AFGL:=1-(HHQA1*1.74*(HHQ**0.74))+(HHQA2*2.74*(HHQ**1.74));
69300  %----- BEGIN GEZAMELIJK GEDEELTE -----
69400          HELP[KKK]:=HHQ-FUNC/AFGL;
69500          IF(ABS(HELP[KKK]-HHQ)/HHQ)<@-3 THEN
69600          BEGIN JIJ:=-HELP[KKK];
69700              GO VERDER;
69800          END ELSE HHQ:=HELP[KKK];
69900          IF HHQ<0 OR AFGL<=0 THEN
70000          BEGIN JIJ:=-0.5;
70100              TEL:=10;
70200              GO VERDER;
70300          END;
70400          END;
70500          VERDER:
70600          IF X<0.85 AND HIL<HIK THEN
70700          BEGIN
70800              HIL:=HIK;XGEM:=10;XGR:=NIK:=JTOT:=JGEM:=0;
70900          END;
71000          IF X<0.85 THEN
71100          BEGIN
71200              IF JIJ<-10 AND X>XGR THEN XGR:=X;
71300              IF JIJ<-10 AND X<XGEM THEN XGEM:=X;
71400              IF JIJ<-10 THEN
71500              BEGIN
71600                  JTOT:=JTOT+JIJ;
71700                  NIK:=NIK+1;
71800                  JGEM:=JTOT/NIK;
71900              END;
72000          END;
72100          IY:=JIJ*(BK)*S;
72200          SIG:=COEFB*(-JIJ)**MACHT;
72300          END ELSE KF1:=JIJ:=RAD:=ELLOS:=JHEAT:=0;
72400  %----- Berekening warmte- en wrijvingsverliezen -----
72500          VIS:=1.218@-6*(TFILM-102)**.553789;
72600          XG:=X+IL; R1EX:=RO*U*XG/VIS; DELTA:=0.04*XG/R1EX**0.2;
72700          KVISF:=VIS/RO;
72800          R1EH:=R1EX/XG*HEFF; IF REG=1 AND B1>0.5 THEN
72900          BEGIN S1H:=B1**2/(4*3.1415926*@-7*ROUK);
73000              R1MH:=4*3.1415926*@-7*SIG*U*HEFF; I1MH:=R1MH*S1H;
73100          END;
73200  %-----
73300          IF B1>0.5 AND REG=1 THEN
73400          BEGIN VDLOS:=-JIJ*G;PIE:=JIJ**2*KF1;
73500              KB:=(G-(JIJ*KF1))/U/B1;
73600          END          ELSE KB:=PIE:=IY:=RAD:=0;
73700          BV:=JIJ*B1; EV:=-PIE-RAD-(FACTOR*JIJ*G);
73800          M1:=U/SQRT(5/3*R1*T1);XX:=1+M1**2/3;
73900          UF:=(1/U)+(U/C1P/T1)-(ROUBULK/P);
74000          TTW:=T1W/T1;
74100          DAEFFDX:=(BKXO*DIVB/BEFF)+(HKXO*DIVH/HEFF)
74200          -(2*DDEL1IDX/BEFF)-(2*DDEL1EDX/HEFF);

```

```

74300      A12:=ROUBULK;A25:=1/UF;
74400      Y1:=BV;Y2:=(EV/ROCPBULK/T1-(BV/P))/UF;
74500      X2:=Y2-(A25*DAEFFDX);
74600      X1:=Y1-(A12*X2);H1[1]:=X1/PO;H1[2]:=X2/UO;
74700      H1[3]:=DDEL1IDX/DEL1IO;ISWGRENSLAAG;ELWGRENSLAAG;
74800      H1[4]:=((CFI/2)+(JIJ*B1*DELJ/ROUKBULK))/DEL2IO
74900      -((HKXO*DIVH/HK)-DAEFFDX+((X2/U)*
75000      (1+(DEL1I/DEL2I))))*DEL2I/DEL2IO;
75100      IF REG=1 THEN DTWDX:=TWAND[1]*DIVTW ELSE DTWDX:=0;
75200      TS:=T1*XX;
75300      H1[5]:=(STANI-(PIE*DELJ/(ROUBULK*(C1P*(TS-T1W))))
75400      +(DAEFFDX-(HKXO*DIVH/HK)+(DTWDX/(TS-T1W))
75500      -((1+(DEL1I/DELHI))* (U*X2+C1P*T1*((X1/P)+(X2/U)
75600      +DAEFFDX))/C1P/(TS-T1W))*DELHI)/DELHIO;
75700      H1[6]:=DDEL1EDX/DEL1EO;
75800      H1[7]:=((CFE/2)-((BKXO*DIVB/BK)-DAEFFDX+((X2/U)*
75900      (1+(DEL1E/DEL2E))))*DEL2E/DEL2EO;
76000      H1[8]:=(2*CDE+(DAEFFDX-(BKXO*DIVB/BK)-((2*X2/U)*
76100      (1-(DEL5E/DEL3E))))*DEL3E/DEL3EO;
76200      % IF REG NEQ 1 OR B1=0 THEN H1[9]:=0 ELSE
76300      H1[9]:=(STANE+(JIJ*DELV/(ROCPBULK*2*(TS-T1W)))
76400      +(DAEFFDX-(BKXO*DIVB/BK)+(DTWDX/(TS-T1W))
76500      -((1+(DEL1E/DELHE))* (U*X2+C1P*T1*((X1/P)+(X2/U)
76600      +DAEFFDX))/C1P/(TS-T1W))*DELHE)/DELHEO;
76700      FUN:=H1[J];
76800      END FUN;
76900      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
77000      % INGANG berekent de relevante grootheden aan de ingang van het kanaal,
77100      % stelt somgrootheden gelijk aan nul, etc.
77200      %=====
77300
77400      PROCEDURE INGANG;
77500      BEGIN IF I=0 THEN
77600          BEGIN M1:=MI; XX:=1+M1**2/3; T1:=TSIN/XX; P:=PSIN/XX**2.5;
77700          U:=M1*SQRT(5/3*R1*T1); PO:=P; UO:=U; A1:=BKA[0]*HKA[0];
77800          TADW:=T1+.435*(U**2)/C1P;TFILM:=(TWAND[1]+TADW)/2;
77900          NNE:=NNI:=7;RRI:=DELQQO:=0;
78000          DELPRIMEE:=DELPRIMEI:=3@-3;
78100          DEL2I:=DEL2E:=DEL2IO:=DEL2EO:=NNE*DELPRIMEE/(NNE+1)/(NNE+2);
78200          DEL3E:=DEL3IO:=DEL3EO:=2*NNE*DELPRIMEE/(NNE+1)/(NNE+3);
78300          Y[3]:=Y[4]:=Y[5]:=Y[6]:=Y[7]:=Y[8]:=Y[9]:=1;
78400          ADIVAI:=9*XX**2/16/MI;
78500          RO:=P/(R1*TFILM);VIS:=1.218@-6*(TFILM-102)**.553789;
78600          KVISF:=VIS/RO;ROBULK:=P/(R1*T1);
78700          X:=CF:=N1UX:=PIET:=QWT:=VDT:=RADT:=JHT:=0; KK:=1;
78800          TS:=TSIN; JIJ:=JH1:=JHEAT:=RAD:=ELLOS:=0; PS:=PSIN; VX:=EX:=0;
78900          AF[1]:=PC[1]; RF[1]:=PC[2]; AF[2]:=PC[3];RF[2]:=PC[4]; T10:=2800;
79000          AF[4]:=AF[5]:=AF[7]:=AF[8]:=AF[9]:=@-4;
79100          AF[3]:=RF[3]:=AF[6]:=RF[6]:=1;
79200          RF[4]:=RF[5]:=RF[7]:=RF[8]:=RF[9]:=@-4;
79300          Y[1]:=Y[2]:=1; NIS:=D:=0;
79400      END;
79500      END INGANG;
79600      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
79700      % AANVANG berekent ae, be, nlok en npol.
79800      %=====
79900
80000      PROCEDURE AANVANG;
80100
80200      BEGIN IF REG=1 THEN
80300          BEGIN IF EV=0 THEN AE:=0 ELSE AE:=-PIE/EV;
80400          IF BV=0 THEN BE:=0 ELSE BE:=JIJ*B1/BV;

```



```
80500      IF JIJ =0 OR B1=0 THEN NLOK:=NPOL:=0 ELSE
80600      BEGIN NLOK:=-PIE/JIJ/UB1;
80700          IF AE NEQ 0 THEN NPOL:=BE*NLOK/(1+(XX-1)*(1-BE*NLOK/AE))
80800      END ;
80900      END;
81000      END AANVANG;
81100      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
81200      %PARBFTbepaalt afgeleide ddeltal/dx uit drie vooraf-
81300      %gaande waarden van deltal mbv. parabolic fit hierdoor
81400      %=====
81500      PROCEDURE PARBFT;
81600      BEGIN DEL2DEL1:=MHD[KQK-1]-MHD[KQK-2];
81700          X2X1:=MHX[KQK-1]-MHX[KQK-2];
81800          X2X3:=MHX[KQK-1]-MHX[KQK];
81900          DEL2X1:=DEL2DEL1/X2X1;
82000          DEL3X1:=(MHD[KQK]-MHD[KQK-2])/(MHX[KQK-2]
82100              -MHX[KQK]);
82200          COEFF1:=(DEL2X1+DEL3X1)/X2X3;
82300          COEFF2:=DEL2X1-((MHX[KQK-1]+MHX[KQK-2])*COEFF1);
82400          COEFF3:=MHD[KQK-2]-((MHX[KQK-2]*DEL2X1)
82500              +(MHX[KQK-1]*MHX[KQK-2])*COEFF1);
82600      END PARBFT;
82700      PROCEDURE RKTAIL;FORWARD;
82800
82900      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
83000      % SCHOKGRENSL berekent op de plaats van de schok uit de
83100      % grootheden vlak voor de schok de grootheden direct
83200      % na de schok inclusief de grenslaaggrootheden
83300      % volgens recept van Carl Pian
83400      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
83500      PROCEDURE SCHOKGRENSL;
83600
83700      BEGIN WRITE(OUTA,</,32(">")," SCHOK ",32("<"),/>);
83800          PSTAV:=((4/(5*(M1**2)-1))**1.5)*
83900              ((4*(M1**2)/(3+(M1**2)))**2.5)*PSTAV;
84000          M1:=DSQRT((M1**2)+3)/(5*(M1**2)-1));
84100          XX:=1+((M1**2)/3);
84200          FOR QQQ:=1 STEP 1 UNTIL 1500 DO
84300              BEGIN P:=PSTAV*(1-(QQQ/1500));
84400                  PS:=P*(XX**2.5);
84500                      DEL1E:=((PS-PSTAV)/2/(PS-P))-(DEL1I/BK)*HK;
84600                      AEFF:=(HK-(2*DEL1E))*(BK-(2*DEL1I));
84700                      HELPER:=(DEL1E/HK)+(DEL1I/BK);
84800                      TS:=(TSTAV-(2*T1W*HELPER))/(1-2*HELPER);
84900                      T1:=TS/XX;
85000                      ROBULK:=P/(R1*T1);
85100                      U:=M1*DSQRT(5*R1*T1/3);
85200                      ROUBULK:=ROBULK*U;
85300                      DELTA1I:=DELPRIMEI*((T1W/T1)-(7*(1+RRI)/8)
85400                          +(RRI/2.08)+((1-ALFAI/8)*(1-(T1W/T1)
85500                          +(M1**2/3)))-(M1**2/3)*((7*(1+RRI)**2
85600                          /9)-(14*RRI*(1+RRI)/15.56)+(RRI**2
85700                          /3.16)));
85800                      HELPER:=ROBULK*U*AEFF;
85900                      IF ABS((MF-HELPER)/MF)LEQ 2.5@-3 THEN QQQ:=1500;
86000              IF(TEST AND QQQ MOD 25=0) OR QQQ=1500 THEN SCHRIJFS;
86100                  DEL1I:=DELTA1I;
86200              END;M[1]:=Y[1]:=P/PO;M[2]:=Y[2]:=U/UO;
86300              M[3]:=Y[3]:=DEL1I/DEL1IO;M[6]:=Y[6]:=DEL1E/DEL1EO;
86400              QQ:=0;M[17]:=X:=XS+0.00002;
86500              TADW:=T1+.435*U**2/C1P;TFILM:=(T1W+TADW)/2;
86600              VIS:=1.218@-6*(TFILM-102)**.553789;
```

```

86700 KVISF:=VIS*R1*TFILM/P;
86800 REYDEL2E:=U*DEL2E/KVISF;
86900 CFSE:=.246*EXP(-1.561*(NNE+2)/NNE)/(REYDEL2E
87000 **.268)*(T1/TFILM)**1.268;
87100 RFI:=ROUGHNESS;CFE:=CFSE*RFE;
87200 USTERE:=SQRT(TFILM*CFE/2/T1);
87300 ULT:=11.8*USTERE;
87400 STANLAME:=2.766/((USTERE*U*KE/KVISF)**.45);
87500 ALFAE:=1/(1+(USTERE/STANLAME));
87600 FO1:=1-ALFAE;
87700 FO2:=FO1*(1-2*ULT)/((1-ULT)**2);
87800 F11:=ALFAE;
87900 F12:=(ALFAE*(1-2*ULT)+(1-F11)*2*ULT)
88000 /((1-ULT)**2);
88100 F22:=((2*F11*ULT)-1+F11)/((1-ULT)**2);
88200 F32:=-F11/((1-ULT)**2);
88300 FO:=FO1+(FO2*DELQO);F1:=F11+(F12*DELQO);
88400 F2:=F22*DELQO;F3:=F32*DELQO;
88500 HELPER2:=((T1W/T1)+((1-(T1W/T1)+((M1**2)/3))*
88600 (FO+(F1*NNE/(NNE+1)))+(F2*NNE/(NNE+2)))+(F3*NNE
88700 /(NNE+3))))-(NNE*(M1**2)/3/(NNE+2))-
88800 (NNE/(NNE+1));
88900 DELPRIMEE:=DEL1E/HELPER2;
89000 DEL2E:=DELPRIMEE*NNE/(NNE+1)/(NNE+2);
89100 DEL3E:=2*DELPRIMEE*NNE/(NNE+1)/(NNE+3);
89200 M[7]:=Y[7]:=DEL2E/DEL2EO;
89300 M[8]:=Y[8]:=DEL3E/DEL3EO;
89400 DEL4E:=3*DELPRIMEE*NNE/(NNE+1)/(NNE+4);
89500 TTQ:=((1-ULT)**2)/((ALFAE*((DEL4E/DEL2E)
89600 -(2*ULT*((DEL3E/DEL2E)-1))-1))
89700 +((1-ALFAE)*((DEL3E/DEL2E)-
89800 (2*ULT))));
89900 DELHE:=(ALFAE-(DELQO/TTQ))*DEL2E;
90000 M[9]:=Y[9]:=DELHE/DELHEO;
90100 REYDEL2I:=U*DEL2I/KVISF;
90200 CFSI:=.246*EXP(-1.561*9/7)/(REYDEL2I
90300 **.268)*(T1/TFILM)**1.268;
90400 USTERI:=SQRT(TFILM*RFI*CFSI/2/T1);
90500 STANLAMI:=2.766/((USTERI*U*KI
90600 /KVISF)**.45);
90700 ALFAI:=1/(1+(USTERI/STANLAMI));
90800 DELHI:=DELPRIMEI*ALFAI*((7*(1+RRI)
90900 /8/9)-(RRI/2.08/15.56));
91000 M[5]:=Y[5]:=DELHI/DELHIO;
91100 CFI:=RFI*CFSI*((1+RRI)**2);
91200 STANI:=ALFAI*CFI*(1+RRI)/2;
91300 QWI:=ROUBULK*CIP*STANI*(TADW-T1W);
91400 SCHRIJFI;
91500 ELWGRENSLAAG;FUN(X,Y,1);SCHRIJFI;
91600 END SCHOKGRENSL;
91700 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
91800 % RKTAIL lost de vergelijking dY[J]/dX=FUN(X,Y,J) op voor Y[J] resp.
91900 % de dimensieloze druk of gastemperatuur, door stapsgewijs te integre-
92000 % ren over een interval DX; berekent na de integratiestap nieuwe som-
92100 % grootheden en diverse andere grootheden ter plaatse X+DX.
92200 %=====
92300
92400 PROCEDURE RKTAIL;
92500
92600 BEGIN FUN(X,Y,1); IV:=IY; IF I MOD NOP = 0 THEN ISEGM:=0;
92700 RKIN(IF REG NEQ 1 OR B1=0 THEN 9 ELSE 9,IF J=1 THEN FUN
92800 (X,Y,1) ELSE H1[J],X,Y,J,DX,STL1,AF,RF,D);

```

```
92900      FUN(X,Y,1);
93000      VOL:=DX*(1+(DIVH+DIVB)*(X-X0-DX/2)+DIVH*DIVB*((X-X0)**2-DX*
93100      (X-X0)+DX**2/3))*HKX0*BKX0;
93200      QW:=QWE+QWI;
93300      QWT:=QWT+QW*CA*VOL;
93400      IF REG=1 THEN
93500      BEGIN PIET:=PIET+((IV+IY)*DX/2/S)**2*R1BEL;
93600      RADT:=RADT+RAD*VOL;
93700      ISEGM:=ISEGM+(IV+IY)*DX/2/S;
93800      IF I MOD NOP = 0 THEN ISEGM:=ISEGM/NOP;
93900      END      ELSE RAD:=HP:=EX:=0; M1:=U/DSQRT(5/3*R1*T1);
94000      XX:=1+M1**2/3; PS:=P*XX**2.5; TS:=T1*XX; E1:=1-TS/TSIN;
94100      PSTAV:=PS-(2*(PS-P)*((DEL1E/HK)+(DEL1I/BK)));
94200      TSTAV:=TS-(2*(TS-T1W)*((DEL1E/HK)+(DEL1I/BK)));
94300      JPLIN:=PLIN*(1-(PSTAV/PSIN)**0.4); NIS:=PIET/JPLIN;
94400      DQ:=(QW*CA+RAD)*VOL; DS:=DS+(-DQ/TS+DQ/T1W)/MF;
94500      IF SIG=0 THEN EX:=0 ELSE EX:=-HP*U*B1*(1-KB); VX:=VX+(EX*DX);
94600      END RKTAIL;
94700      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
94800      % REGPARAM berekent PARAmeters die van het door te rekenen gebied
94900      % (REGion) afhankelijk zijn.
95000      %=====
95100
95200      PROCEDURE REGPARAM;
95300
95400      BEGIN IF REG=1 THEN
95500      BEGIN IO:=X0:=0; HKX0:=HKA[0]; DIVH:=(HKA[1]-HKA[0])/
95600      LENGTE[1]/HKX0;
95700      END      ELSE
95800      BEGIN IO:=IM; X0:=X0+LENGTE[REG-1]; HKX0:=HKA[REG-1];
95900      DIVH:=(HKA[REG]-HKX0)/LENGTE[REG]/HKX0;
96000      END; T1W:=TWAND[REG];
96100      KLAAR:=TRUE;
96200      IF REG=2 AND X>.79 AND X<.81 THEN
96300      BEGIN DELHE:=NNE*DELPRIMEE*ALFAE/(NNE+1)/(NNE+2);
96400      Y[9]:=DELHE/DELHEO;
96500      END;
96600      IM:=IO+NOS[REG]; BKX0:=BKA[REG-1]; DIVB:=(BKA[REG]-BKA[REG-1])/
96700      LENGTE[REG]/BKX0; ST:=LENGTE[REG]/NOS[REG]; DX:=STL1:=ST;
96800      END REGPARAM;
96900      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
97000      PROCEDURE STORE;
97100      BEGIN FOR KQK:=1 STEP 1 UNTIL 9 DO M[KQK]:=Y[KQK];
97200      M[10]:=PIET;M[11]:=QWT;M[12]:=RADT;M[13]:=VX;
97300      M[15]:=IY;M[16]:=T10;M[17]:=X;
97400      M[18]:=I;
97500      QQ:=0;
97600      END STORE;
97700      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
97800      PROCEDURE RECALL;
97900      BEGIN FOR KQK:=1 STEP 1 UNTIL 9 DO Y[KQK]:=M[KQK];
98000      PIET:=M[10];QWT:=M[11];RADT:=M[12];VX:=M[13];
98100      IY:=M[15];T10:=M[16];X:=M[17];
98200      IF ONDERWEG AND I=0 THEN
98300      BEGIN DDEL1IDX:=M[19];DDEL1EDX:=M[20];
98400      END;I:=M[18];
98500      END RECALL;
98600      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
98700      % FUNCTIE berekent de integrand voor verschillende
98800      % numeriek te berekenen integralen in BLOK
98900      %=====
99000      REAL PROCEDURE FUNCTIE(NOSQQ,KSI);
```

```
99100 REAL KSI; INTEGER NOSQQ;
99200 BEGIN SNELH:=((1+RRI)*(KSI**(1/7)))-(RRI*(KSI**1.08));
99300 TEMP:=(T1W/T1)-(((SNELH*M1)**2)/3)+((1+(M1**2)/3)
99400 -(T1W/T1))*(1-ALFAI+(ALFAI*(KSI**(1/7))));
99500 IF NOSQQ=1 THEN
99600 BEGIN IF (SNELH-KB) < 0 THEN
99700 FUNCTIE:=TEMP*(1+(((KB-SNELH)/(1-KB))**6))
99800 ELSE
99900 FUNCTIE:=TEMP*(1-(((SNELH-KB)/(1-KB))**6))
100000 END ELSE
100100 IF NOSQQ=2 THEN FUNCTIE:=SNELH*TEMP ELSE
100200 IF NOSQQ=3 THEN FUNCTIE:=SNELH;
100300 END FUNCTIE;
100400 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
100500 % BLOK activeert voor elke situatie de juiste procedures teneinde een
100600 % interval te kunnen doorrekenen en de grootheden aan het einde daarvan
100700 % te kunnen uitschrijven
100800 %=====
100900
101000 PROCEDURE BLOK;
101100
101200 BEGIN IF I=IO THEN
101300 BEGIN INGANG;AANVANG;
101400 END ELSE
101500 BEGIN KLAAR:=FALSE; IF X LSS XS AND XS-X LEQ @-4
101600 THEN SCHOKGRENSL;RKTAIL;AANVANG;
101700 END;
101800 ISWGRENSLAAG;ELWGRENSLAAG;
101900 DELTA1E:=DELPRIMEE*((T1W/T1)+((1-(T1W/T1)+M1**2/3)*
102000 (FO+(F1*NNE/(NNE+1))+(F2*NNE/(NNE+2))+(F3*NNE
102100 /(NNE+3))))-(NNE*(M1**2)/3/(NNE+2))-
102200 (NNE/(NNE+1)));
102300 DELTA1I:=DELPRIMEI*((T1W/T1)-(7*(1+RRI)/8)+(RRI/2.08)+((1-
102400 ALFAI/8)*(1-(T1W/T1)+(M1**2/3)))-(M1**2/3)
102500 *((7*(1+RRI)**2/9)-(14*RRI*(1+RRI)/15.56)+(
102600 RRI**2/3.16)));
102700 IF I=0 AND REG=1 THEN
102800 BEGIN DEL1E:=DEL1E0:=DELTA1E;
102900 DEL1I:=DEL1I0:=DELTA1I;
103000 HEFF:=HKA[0]-(2*DEL1E);BEFF:=BKA[0]-(2*DEL1I);
103100 MF:=P*U*HEFF*BEFF/(R1*T1);P1IN:=MF*C1P*TSIN;
103200 SCHRIJFO;FUN(X,Y,1);
103300 END;
103400 IF (ABS((DELTA1E-DEL1E)/DEL1E) >@-3
103500 OR ABS((DELTA1I-DEL1I)/DEL1I) >@-3)
103600 AND I NEQ IO THEN
103700 BEGIN
103800 DDEL1EDX:=(DELTA1E-(M[6]*DEL1E0))/ST;
103900 DDEL1IDX:=(DELTA1I-(M[3]*DEL1I0))/ST;
104000 QQ:=QQ+1;RECALL;FUN(X,Y,1);
104100 END ELSE
104200 BEGIN KLAAR:=TRUE;
104300 IF ONDERWEG AND I=0 THEN
104400 BEGIN RFI:=ROUGHNESS;
104500 READ(INA,/,M[*]);
104600 WRITE(OUTA,<4(E10.3,X2),/>,M[*]);
104700 RECALL;ISWGRENSLAAG;ELWGRENSLAAG;
104800 END;
104900 IF REG NEQ 1 OR B1=0 THEN DELJ:=DELJU:=0 ELSE
105000 BEGIN
105100 %
105200 %%%%%%%%%%% COMMENTAAR %%%%%%%%%%%
```



KKK

DATE & TIME PRINTED: FRIDAY, OCTOBER 12, 1984 @ 11:50:57.

```

58800 %$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
58900 % FUN(X,Y,J) berekent de afgeleiden van
59000 % p,u,delli,del2i,delhi,delle,del2e,
59100 % del3e en in de generator -mits B1 neq 0- delhe ,die in rktail
59200 % simultaan worden geïntegreerd;
59300 %=====
59400
59500 REAL PROCEDURE FUN(X,Y,J);
59600
59700 REAL X; ARRAY Y[1]; INTEGER J;
59800 BEGIN LABEL VERDER; Y[1]:=ABS(Y[1]); Y[2]:=ABS(Y[2]);
59900 P:=Y[1]*PO;U:=Y[2]*UO;DEL1I:=Y[3]*DEL1IO;
60000 DEL2I:=Y[4]*DEL2IO;DELHI:=Y[5]*DELHIO;
60100 DEL1E:=Y[6]*DEL1EO;DEL2E:=Y[7]*DEL2EO;
60200 DEL3E:=Y[8]*DEL3EO;DELHE:=Y[9]*DELHEO;
60300 HK:=HKXO*(1+DIVH*(X-XO));BK:=BKXO*(1+DIVB*(X-XO));C1:=2*(HK+BK);
60400 CA:=C1/HK/BK;HEFF:=HK-(2*DEL1E);BEFF:=BK-(2*DEL1I);
60500 T1:=P*U*HEFF*BEFF/(MF*R1); N:=P/(R1*T1*(MA1*(1-SP)+MC1*SP));
60600 IF REG=1 THEN T1W:=TWAND[1]*(1+DIVTW*(X-XO));
60700 TADW:=T1+.435*U**2/C1P; TFIEM:=(T1W+TADW)/2;
60800 NC1:=SP*N; NA1:=N-NC1; RO:=P/(R1*TFIEM);
60900 UB1:=U*B1*HEFF/HK;
61000 ROBULK:=P/(R1*T1); ROUBULK:=ROBULK*U; ROUKBULK:=ROUBULK*U;
61100 ROCPBULK:=ROUBULK*C1P;
61200 IF X LEQ 0.4625 THEN DELV:=G1+DDELVIDX*(X-XO) ELSE
61300 DELV:=G1+DDELVIDX*(0.4625-XO)+DDELV2DX*(X-0.4625);
61400 ROU:=RO*U; ROUK:=ROU*U; ROCP:=ROU*C1P; G:=DELV/HK;
61500 EXPA:=(DIVH+DIVB+2*DIVH*DIVB*(X-XO))/((1+DIVH*(X-XO))*(1+DIVB*
61600 (X-XO)));
61700 %----- Berekening elektrische grootheden -----
61800 IF B1>0.5 AND REG=1 THEN
61900 BEGIN
62000 KF1:=(BK)*S*RBEL[IF I=0 THEN 1 ELSE I]/HK;
62100 RIBEL:=RBEL[IF I=0 THEN 1 ELSE I];
62200 RAD:=ELLOS:=JHEAT:=0;
62300 % COEFA:=(2.4899@-5)*(BK**1.74);CONSTANTE COEFA INLEZEN Q1D/VAR
62400 COEFB:=COEFA*(1-DEXP(-X/LREL))*(BK**1.25);
62500 IF X=0 THEN
62600 BEGIN JIJ:=-0.5;
62700 COEFB:=6.505@-7;GO VERDER;
62800 END;
62900 % IF X<0.45 THEN JX:=0
62950 JX:=0;
63000 % ELSE JX:=14268*(X-0.45);
63100 %----- MODEL MET VARIABLELE VOLTAGEDDROPP -----
63200 % HHQA1:=COEFB*UB1;
63300 % HHQA2:=COEFB*KF1;
63400 % HHQA3:=(5.485@-5)*COEFB*((BK-2*DELJ)**1.99)/HK;
63500 % DRVELD:=UB1-((5.485@-5*(-JIJ*(BK-2*DELJ)**1.99))/HK;
63600 % IF X<LREL OR HELP[KKK]<=0 THEN HHQ:=HELP[1]:=HHQA1/HHQA2
63700 % ELSE HHQ:=HELP[1]:=HELP[KKK];
63800 % FOR KKK:=2 STEP 1 UNTIL 99 DO
63900 % BEGIN
64000 % FUNC:=HHQ-(HHQA1*(HHQ**1.74))+(HHQA2*(HHQ**2.74))+
64100 % (HHQA3*(HHQ**3.73))+JX;
64200 % AFGL:=1-(HHQA1*1.74*(HHQ**0.74))+(HHQA2*2.74*(HHQ**1.74))+
64300 % (3.73*HHQA3*(HHQ**2.73));
64400 %----- MODEL MET VOLTAGEPROFIEL -----

```

```
64500      HHQA1:=COEFB*(UB1-G);
64600      HHQA2:=COEFB*KF1;
64700      IF X<LREL OR HELP[KKK]<=0 THEN HHQ:=HELP[1]:=HHQA1/HHQA2
64800      ELSE HHQ:=HELP[1]:=HELP[KKK];
64900      DRVELD:=UB1-G;
65000      FOR KKK:=2 STEP 1 UNTIL 99 DO
65100      BEGIN
65200          FUNC:=HHQ-(HHQA1*(HHQ**1.25))+(HHQA2*(HHQ**2.25));
65300          AFGL:=1-(HHQA1*1.25*(HHQ**0.25))+(HHQA2*2.25*(HHQ**1.25));
65400      %----- BEGIN GEZAMELIJK GEDEELTE -----
65500          HELP[KKK]:=HHQ-FUNC/AFGL;
65600          IF (ABS(HELP[KKK]-HHQ)/HHQ)<@-3 THEN
65700          BEGIN JIJ:=-HELP[KKK];
65800              GO VERDER;
65900          END ELSE HHQ:=HELP[KKK];
66000          IF HHQ<0 THEN
66100          BEGIN JIJ:=-0.5;
66200              TEL:=10;
66300              GO VERDER;
66400          END;
66500      END;
66600      VERDER:
66700      IF X<0.85 AND HIL<HIK THEN
66800      BEGIN
66900          HIL:=HIK;XGEM:=10;XGR:=NIK:=JTOT:=JGEM:=0;
67000      END;
67100      IF X<0.85 THEN
67200      BEGIN
67300          IF JIJ<-10 AND X>XGR THEN XGR:=X;
67400          IF JIJ<-10 AND X<XGEM THEN XGEM:=X;
67500          IF JIJ<-10 THEN
67600          BEGIN
67700              JTOT:=JTOT+JIJ;
67800              NIK:=NIK+1;
67900              JGEM:=JTOT/NIK;
68000          END;
68100      END;
68400      IY:=JIJ*(BK)*S;
68500      SIG:=COEFB*(-JIJ)**1.25;
68600      END ELSE KF1:=JIJ:=RAD:=ELLOS:=JHEAT:=0;
68700      %----- Berekening warmte- en wrijvingsverliezen -----
68800      VIS:=1.218@-6*(TFILM-102)**.553789;
68900      XG:=X+IL; R1EX:=RO*U*XG/VIS; DELTA:=0.04*XG/R1EX**0.2;
69000      KVISF:=VIS/RO;
69100      R1EH:=R1EX/XG*HEFF; IF REG=1 AND B1>0.5 THEN
69200      BEGIN S1H:=B1**2/(4*3.1415926*@-7*ROUK);
69300          R1MH:=4*3.1415926*@-7*SIG*U*HEFF; I1MH:=R1MH*S1H;
69400      END;
69500      %-----
69600      IF B1>0.5 AND REG=1 THEN
69700      BEGIN VDLOS:=-JIJ*G;P1E:=JIJ**2*KF1;
69800          KB:=(G-(JIJ*KF1))/U/B1;
69900      END
70000      ELSE KB:=P1E:=IY:=RAD:=0;
70100      BV:=JIJ*B1; EV:=-P1E-RAD-(FACTOR*JIJ*G);
70200      M1:=U/SQRT(5/3*R1*T1);XX:=1+M1**2/3;
70300      UF:=(1/U)+(U/C1P/T1)-(ROUBULK/P);
70400      TTW:=T1W/T1;
70500      DAEFFDX:=(BKXO*DIVB/BEFF)+(HKXO*DIVH/HEFF)
70600          -(2*DDEL1IDX/BEFF)-(2*DDEL1EDX/HEFF);
70700      A12:=ROUBULK;A25:=1/UF;
70800      Y1:=BV;Y2:=(EV/ROCPBULK/T1-(BV/P))/UF;
70900      X2:=Y2-(A25*DAEFFDX);
```

```
70900      X1:=Y1-(A12*X2);H1[1]:=X1/PO;H1[2]:=X2/UO;
71000      H1[3]:=DDEL1IDX/DEL1IO;ISWGRENSLAAG;ELWGRENSLAAG;
71100      H1[4]:=((CFI/2)+(JLJ*B1*DELJ/ROUKBULK))/DEL2IO)
71200      -((HKXO*DIVH/HK)-DAEFFDX+((X2/U)*
71300      (1+(DEL1I/DEL2I))))*DEL2I/DEL2IO;
71400      IF REG=1 THEN DTWDX:=TWAND[1]*DIVTW ELSE DTWDX:=0;
71500      TS:=T1*XX;
71600      H1[5]:=(STANI-(PIE*DELJ/(ROUBULK*(C1P*(TS-T1W))))
71700      +(DAEFFDX-(HKXO*DIVH/HK)+(DTWDX/(TS-T1W))
71800      -((1+(DEL1I/DELHI))*(U*X2+C1P*T1*((X1/P)+(X2/U)
71900      +DAEFFDX))/C1P/(TS-T1W)))*DELHI)/DELHIO;
72000      H1[6]:=DDEL1EDX/DEL1EO;
72100      H1[7]:=((CFE/2)-((BKXO*DIVB/BK)-DAEFFDX+((X2/U)*
72200      (1+(DEL1E/DEL2E))))*DEL2E)/DEL2EO;
72300      H1[8]:=(2*CDE+(DAEFFDX-(BKXO*DIVB/BK)-((2*X2/U)*
72400      (1-(DEL5E/DEL3E))))*DEL3E)/DEL3EO;
72500      % IF REG NEQ 1 OR B1=0 THEN H1[9]:=0 ELSE
72600      H1[9]:=(STANE+(JLJ*DELV/(ROCPBULK*2*(TS-T1W)))
72700      +(DAEFFDX-(BKXO*DIVB/BK)+(DTWDX/(TS-T1W))
72800      -((1+(DEL1E/DELHE))*(U*X2+C1P*T1*((X1/P)+(X2/U)
72900      +DAEFFDX))/C1P/(TS-T1W)))*DELHE)/DELHEO;
73000      FUN:=H1[J];
73100      END FUN;
```



VIP/R

DATE & TIME PRINTED: FRIDAY, OCTOBER 12, 1984 @ 11:47:06.

```
100 E VIP/PR;%  
200 FILE INA(KIND=PACK,PACKNAME=USER2,TITLE=VIP/QV,UNITS=WORDS,%  
300 FILETYPE=7),%  
400 INB(KIND=REMOTE),%  
500 OUTA(KIND=REMOTE,MAXRECSIZE=22)
```

VIP/QV

DATE & TIME PRINTED: FRIDAY, OCTOBER 12, 1984 @ 11:43:34.

100 32,4,F,  
 200 32,3,10,5,  
 300 8,8,8,8,8,8,8,8,8,8,8,8,8,8,8,  
 400 8,8,8,8,8,8,8,8,8,8,8,8,8,8,8,  
 500 .154,.154,.154,.154,.23,.05,.18,.18,.18,.256,  
 600 0.8,0.15,2.075,0.971,.09,.025,3.219,  
 700 1100,700,400,400,1.25,1.25,1.25,1.25,@-3,@-4,5@-5,3@-4,2@-4,  
 800 20,0,1,1880,7.3@5,  
 900 1.71,5.10,T,F,F,302,39.25,  
 1000 6.15@-4,1.25,1@-15,208.75,208.75,  
 1100 1,1,1,1,14,30,40,50,52,60,62,52,65,34,47,54,  
 1200 58,57,56,54,49,46,47,48,48,48,22,31,34,37,38,33,  
 1300 .56424,.90987,2.48861,2.95111,3.20234,13.6781,5.2532,4.9414,-14.6098,  
 1400 5.278@5,1.78@5,0,-695.8,0,-76,2930,.35,14,1.452@-3,7.99@-3,  
 1500 .9,.75,.65,.58,.53,.49,.46,.44,.43,.44,.46,.49,.53,.57,.61,.63,  
 1600 .65,.658,.663,.666,.67,.673,.683,.691,.7,.71,.72,.73,.745,.76,.773,.79,  
 1700 .85,.81,.795,.7,.54,.56,.67,.78,.89,1,  
 1800 2.3@-3,0.21,145,145,

Voor berekening van de opgewekte stroom in een segment voor bepaalde waarden van de grootheden B, v, b, s, h en R is een basicprogramma geschreven dat onder ander kan worden uitgevoerd met een Casio FX-700P. De grafieken uit fig. 6.8 en fig. 6.10 zijn met behulp van dit programma gemaakt.

```
10  input "R",R
20  E=1
30  if abs(E) 1E-5 then 110
40  D=J
50  F=D-A*D+1.25+B*R*D+2.25+C*D+3.24
60  G=1-1.25*A*D+0.25+2.25*B*R*D+1.25+3.24*C*D+2.24
70  J=D-F/G
80  if J 0 then 300
90  E=(J-D)/J
100 goto 30
110 print "I:=";J
120 goto 10
130 print "J 0"
140 goto 10
```

Als invoerwaarden voor A en C worden de waarden van  $\alpha$  en  $\gamma$  uit de functie  $\Phi(I)$  (zie 6.11 t/m 6.14) gebruikt. Voor B geldt  $B=\beta/R$  omdat R in dit programma apart wordt ingelezen.

APPENDIX C

ELEKTRODE PAAR NO.	I (A) 4,74 T	I (A) 4,37 T	I (A) 3.87 T	I (A) 3,51 T
AG 5	10,5	7,5	4,6	2,3
AG 6	16,8	14,1	7,9	3,3
AG 7	23,0	17,9	10,8	4,8
AG 8	26,1	21,3	13,7	6,4
AG 9	28,5	25,6	16,2	7,9
AG 10	30,2	27,2	18,1	9,9
AG 11	31,7	28,8	21,8	12,9
AG 12	32,7	29,9	23,2	14,3
AG 13	35,4	32,6	25,9	16,5
AG 14	36,3	33,6	27,3	17,9
AG 15	37,1	34,3	28,3	19,1
AG 16	37,5	34,8	29,1	20,1
AG 17	37,4	34,7	29,3	20,7
AG 18	37,9	35,2	30,1	21,5
AG 19	37,7	35,4	30,6	22,5
AG 20	37,2	35,3	30,9	23,1
AG 21	37,0	35,4	31,6	23,9
AG 22	36,2	35,0	31,9	24,6
AG 23	33,3	32,6	30,3	24,1
AG 24	32,2	31,9	30,6	25,0
AG 25	28,8	28,8	28,5	24,2
AG 26	26,6	26,9	27,4	24,4
AG 27	23,7	23,9	25,3	23,7
AG 28	21,3	21,5	23,2	23,0
AG 29	19,7	19,2	20,7	21,8
AG 30	18,8	17,8	18,4	20,3
AG 31	18,9	17,6	16,6	18,8
AG 32	19,2	18,2	15,9	17,5

Tabel C1 De gemeten stroomwaarden I (A) bij run 302

N.B. De elektrode paren AG 1 t/m 4 waren kortgesloten.

APPENDIX C

SONDE	POSITIE X (mm)	P (bar)	P (bar)	P (bar)
		302 39.25 s	302 55 s	303s 40 s
PG 1	-340	7,30	7,30	7,25
PG 2	38	1,15	1,15	1,15
PG 3	213	0,45	0,4	0,54
PG 4	388	0,35	0,29	0,46
PG 5	563	0,55	0,26	0,61
PD 3	934	0,87	0,58	0,85

Tabel C2 Posities en waarden van de gemeten drukken gebruikt bij programma DRUK/PR.

RUN	T <sub>s</sub>	P <sub>s</sub>	Mass flow	B <sub>max</sub>	R <sub>L</sub>	Cs	P <sub>th</sub>	P <sub>e max</sub>	η <sub>ent</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>
	K	bar	kg/s	T	Ω	%	kW	kW	%	ppm	ppm
301	1900	7,4	5,1	5,25	-	0,09	5030	-	-	-	-
302	1910	7,4	5,2	4,74	9	0,10	5155	230	4,5	50	80
303	1900	7,4	5,1	5,1	6	0,14	5030	362	7.1	50	200

Tabel C3 Algemene gegevens van de runs bij meetserie 3

VOLTAGEDROP ELECTRODE 19

RUN: 302

(VOLT)

TIME : 39.25 SEC  
AVERAGED: 0.00 SEC

E 0

550

500

450

400

350

300

250

200

150

100

50

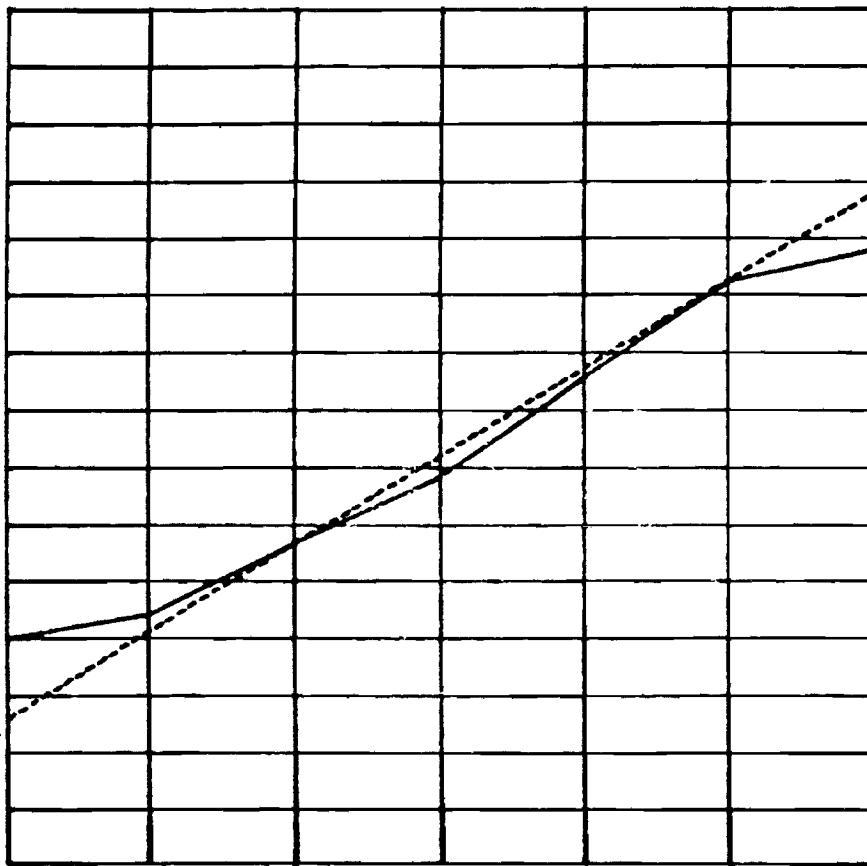
0

-50

-100

-150

-200



VOLTAGEDROPS:  
ANODE: 69.3 VOLT  
CATH.: 49.0 VOLT  
TOTAL: 118.3 VOLT

FARADAY CURRENT:  
37.85 AMPERE  
FARADAY VOLTAGE:  
340.67 VOLT

HALL-FIELD:  
0.1396E 4 U/M  
FARADAY-FIELD:  
0.3060E 4 U/M

HEIGHT  
(M)

0 25 50 75 100 125 150 E -3

Grafiek C4 Potentiaalmeting bij 19<sup>e</sup> elektrode; t=39,35 s

- 03 -

Grafiek 05 Potentiaalmeting bij 19<sup>e</sup> elektrode; t=45 s

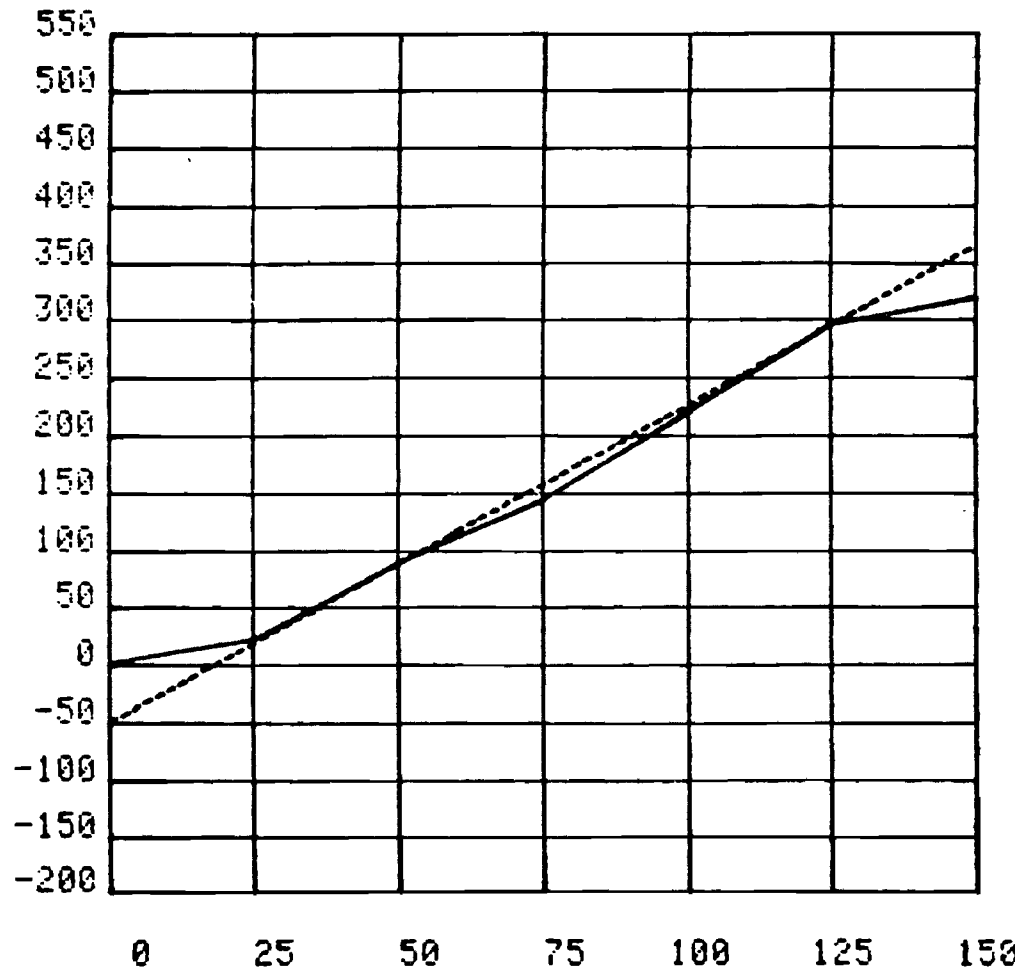
VOLTAGEDROP ELECTRO: 19

RUN: 302

(VOLT)

TIME : 45.00 SEC  
AVERAGED: 0.00 SEC

E 0



VOLTAGEDROPS:  
ANODE: 51.1 VOLT  
CATH.: 44.4 VOLT  
TOTAL: 95.5 VOLT

FARADAY CURRENT:  
35.54 AMPERE  
FARADAY VOLTAGE:  
319.84 VOLT

HALL-FIELD:  
0.1175E 4 U/M  
FARADAY-FIELD:  
0.2769E 4 U/M

HEIGHT  
(M)

E -3

04-

VOLTAGEDROP ELECTRO: 19

RUN: 302

(VOLT)

TIME : 50.00 SEC  
AVERAGED: 0.00 SEC

E 0

550

500

450

400

350

300

250

200

150

100

50

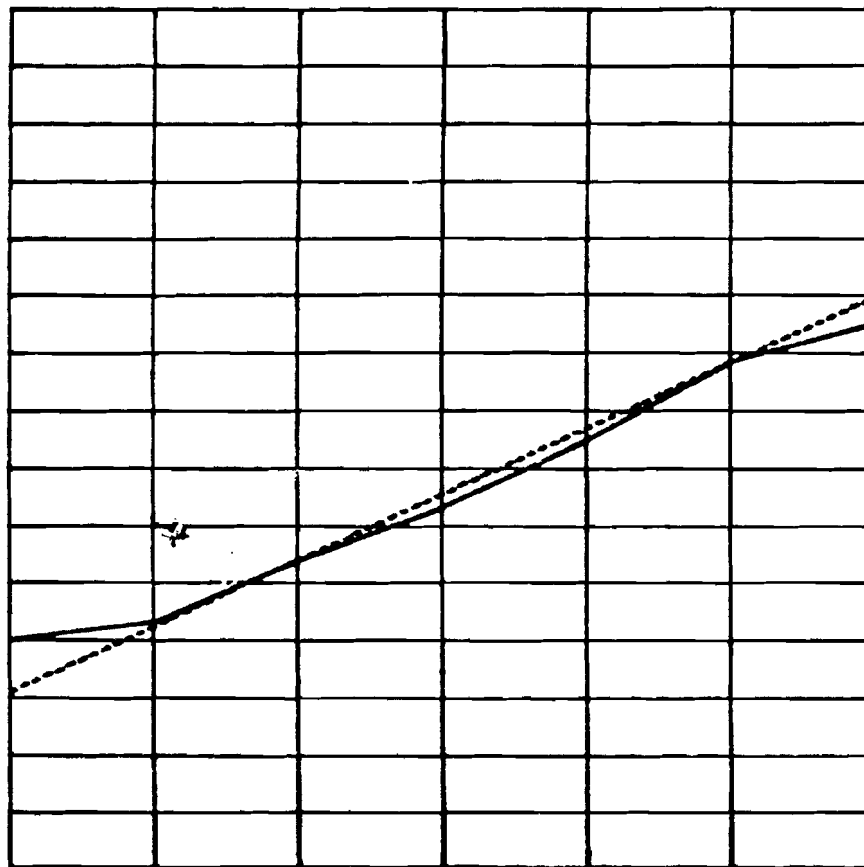
0

-50

-100

-150

-200



VOLTAGEDROPS:

ANODE: 45.4 VOLT

CATH.: 22.0 VOLT

TOTAL: 67.3 VOLT

FARADAY CURRENT:

30.81 AMPERE

FARADAY VOLTAGE:

277.25 VOLT

HALL-FIELD:

0.9066E 3 V/M

FARADAY-FIELD:

0.2297E 4 V/M

HEIGHT

(M)

0

25

50

75

100

125

150

E -3

Grafiek C6 Potentiaalmeting bij 19<sup>e</sup> elektrode; t=50 s

105



VOLTAGEDROP ELECTR: 19

RUN: 302

(VOLT)

TIME : 55.00 SEC  
AVERAGED: 0.00 SEC

E 0

550

500

450

400

350

300

250

200

150

100

50

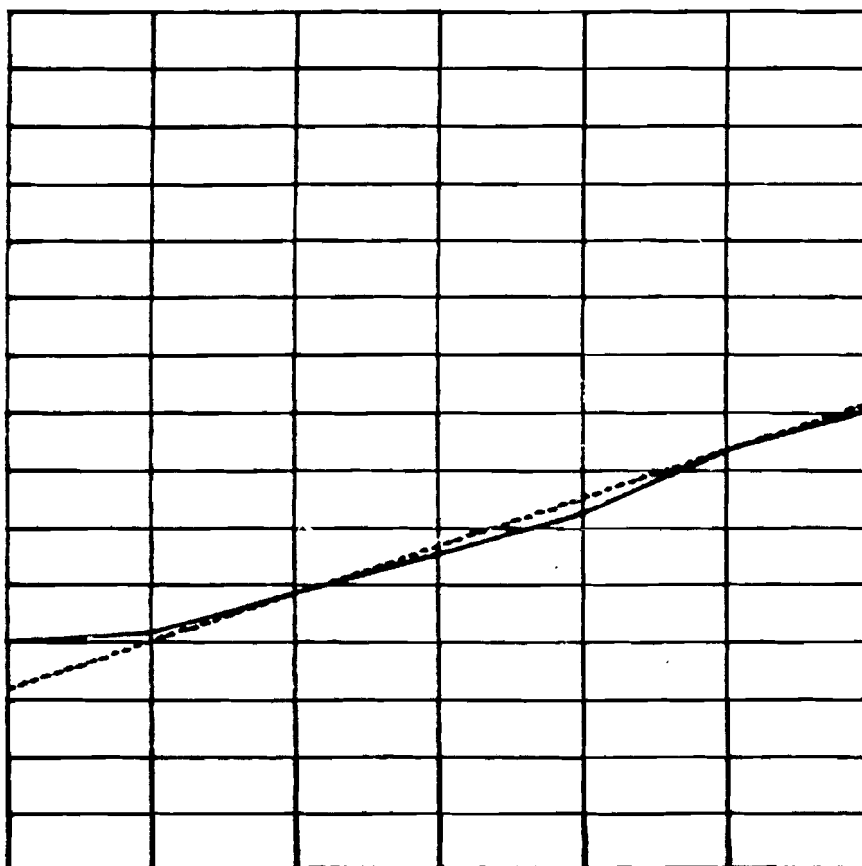
0

-50

-100

-150

-200



VOLTAGEDROPS:  
ANODE: 40.6 VOLT  
CATH.: 5.7 VOLT  
TOTAL: 46.3 VOLT

FARADAY CURRENT:  
22.58 AMPERE  
FARADAY VOLTAGE:  
203.19 VOLT

HALL-FIELD:  
0.6961E 3 V/M  
FARADAY-FIELD:  
0.1663E 4 V/M

HEIGHT  
(M)

0 25 50 75 100 125 150 E -3

Grafiek C7 Potentiaalmeting bij 19<sup>e</sup> elektrode; t=55 s