Eindhoven University of Technology

MASTER

Experimenteel onderzoek aan installatie-automaten t.b.v. modelvorming

Ritsma, R.J.

Award date:
1988

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.

Download date: 20. Jul. 2025

5381

FACULTEIT DER ELEKTROTECHNIEK

Vakgroep Elektrische Energiesystemen

Experimenteel onderzoek aan installatie-automaten t.b.v. modelvorming

R.J. Ritsma

EG.88.A.10

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

Afstudeerwerk verricht o.l.v.:
Dr.ir. R.P.P. Smeets/Ir. J.G.J. Sloot
Afstudeerhoogleraar:
Prof.dr.ir. W.M.C. van den Heuvel

T E C H N I S C H E U N I V E R S I T E I T E I N D H O V E N

Samenvatting.

Het afstudeerwerk had tot doel het onderbrekingsgedrag van installatie-automaten in het kortsluitstroom gebied te modelleren, zodat dit gedrag gesimuleerd kan worden in een komputerprogramma voor ontwerpers en gebruikers. Dit betekent dat de parameters van het model zowel uit de konstruktieve gegevens van de schakelaar als uit metingen afgeleid moeten kunnen worden.
Een in de literatuur gevonden model, opgesteld door Niemeyer, dat aan deze eis voldoet is door metingen op zijn geldigheid getoetst.
Gebleken is dat de in dit model beschreven spanningsopbouw tijdens de fase van boogbeweging niet goed voldoet. Voor deze fase dient het model aangepast te worden.
Om meer inzicht omtrent het booggedrag te krijgen zijn aan een prototype van een schakelaar in ontwikkeling een aantal metingen uitgevoerd naar het boog"Verharren", het kommutatie proces en de beweging van de boog tussen de runners. Uit de metingen bleek er voor het boog"Verharren" een afhankelijkheid van de stroom en de kontaktopeningssnelheid te bestaan, voor de boogbeweging tussen de runners bleek de gemiddelde snelheid van de boog evenredig te zijn met de stroom. Een volledige karakterisering van beide processen aan de hand van konstruktieve parameters kon echter nog niet gegeven worden.

Summary.

The aim of this work was to make a model of the current interrupting behavior of mini molded case circuit breakers (mmccb's). Based on this model a computer program had to be written, which can be used by designers of mmccb's or just to simulate the current interrupting behavior in a network configuration. This means that the model should describe the current and voltage by means of parameters which can be calculated from both measurements and the construction data of a mmccb.

A model proposed by Niemeyer in literature has been checked by measurements. It became clear that it's partly a good model. The arc elongation phase isn't described satisfactorily.

To get a more complete view of the behavior of the arc in a mmccb measurements have been done to determine the immobility time, the commutation process and the movement of the arc between the two electrodes. From the measurement it was found that the immobility-time is dependent on the contact-separation-velocity and the current. During the arc movement between two electrodes it seemed that the average velocity of the arc is linearly depending on the current. A complete description of these two processes from the construction data of the used mmccb is still lacking.

Gebruikte symbolen.

A - oppervlakte winding rogowskispoel.

A_a - doorsnede slaganker.

B - magnetische inductie.

C_D - dragcoefficient.

D - effektieve boogdiameter.

E - elektrisch veld.

E_0 - elektrisch veld in de boog direkt na kontaktopening.

F_a - magnetische kracht op slaganker.

F_D - wrijvingskracht.

F_L - lorentzkracht.

F_W - kracht van boog op de wand.

H - magnetisch veld.

I_n - effektieve waarde nominale stroom.

I_p - effektieve waarde prospektieve kortsluitstroom.

L - induktiviteit.

M - massa slaganker \ - massa gasbel.

N - aantal windingen rogowskispoel.

P - gasdruk.

R - weerstand \ - universele gaskonstante.

R_m - magnetische weerstand.

R_W - wrijvingsweerstand.

T - temperatuur.

U_{AK} - anode- en kathodeval.

U_b - gemiddelde boogspanning na intrede.

U_N - effektieve waarde van de nominale spanning.

a - elektrodenafstand.

a_{min} - minimale kontaktafstand.

i - momentane waarde stroom.

i_c - stroom op moment van kontaktopening.

i_{kb} - stroom op moment van begin van kommutatie.

$\hat{i}$ - maximale doorlaatstroom.

l - lengte van de boog.

m - molekuulgewicht gas.

n - aantal deelbogen \ - aantal windingen per lengteeenheid rowgowskispoel.

r - straal winding rogowskispoel.

s - wandafstand van de boogkamer.

t_i - tijdstip van inschakeling kortsluitstroom.

t_c - tijdstip van kontaktopening.

t_v - tijdstip van einde boogverharren.

t_k - tijdstip van kommutatie.

t_{kb} - tijdstip van start kommutatie.

t_{ke} - tijdstip van einde kommutatie.

t_b - tijdstip van intrede van de boog tussen de boogplaatjes.

t_e - tijdstip van stroomnul worden.

t_d - kommutatie-vertragingstijd.

t_1 - tijdstip van start kathode-voetpunt beweging.

t_2 - tijdstip van einde kathode-voetpunt beweging.

u - momentane waarde spanning.

u_{boog} - spanning over de boog.

u_{klem} - spanning over de automaat.

u_z - zuilspanning.

v_b - boogsnelheid.

v_k - kontaktopeningssnelheid.

w - aantal windingen motor.

x - plaatscoordinaat slaganker / boog.

x_L - lengte luchtspleet.

ΔL - toename L per lengteeenheid.

ΔR - toename R per lengteeenheid.

Γ_{ic} - dubbelintegraal van de stroom in het kwadraat van t_i tot t_c.

Γ_{cb}, Γ_{vb} - zie Γ_{ic}.

ψ - inschakelhoek stroom ($\psi = 0$ is spanningsnuldoorgang).

α - openingshoek divergerende runners.

δ - Γ_{cb}/i_c^2 of Γ_{vb}/i_v^2.

ϕ - magnetische flux / faseverschil tussen spanning en stroom.

μ - magnetisch permeabiliteit.

ρ - dichtheid gas.

ρ_a - relatieve dichtheid gas.

σ - spreiding.

Inhoudsopgave.

	Blz.
Samenvatting.	1
Summary.	2
Lijst van gebruikte symbolen.	3
1: Inleiding.	8
1.1: Afstudeeropdracht.	8
1.2: Indeling van het verslag.	9
2: Installatie-automaten.	10
2.1: Werkings-principe.	10
2.2: Gedrag van automaten bij kortsluitstromen.	14
2.3: Gebruikte automaten en het meetcircuit.	16
2.3.1: CMC-QL1.	16
2.3.2: SBE.	19
2.3.3: Meetcircuit.	22
3: Model voor het afschakelgedrag van installatie-automaten.	24
3.1: Model van Niemeyer.	24
3.1.1: Beweging van het slaganker en moment van kontakt-opening.	25
3.1.2: Verplaatsing boog van de kontakten tot de boog-plaatjes.	27
3.1.3: Opsplitsen van de boog tussen de boogplaatjes.	30
4: Metingen ter toetsing model van Niemeyer.	32
4.1: Metingen CMC-QL1.	32
4.2: Metingen SBE.	36
4.2.1: Metingen SBE-type 1.	36
4.2.2: Metingen SBE-type 2.	39
4.2.3: Vergelijking SBE-type 1 en SBE-type 2.	40
4.3: Evaluatie model van Niemeyer.	41
4.3.1: Kontaktopening.	42
4.3.2: Verlengen van de boog.	43
4.3.3: Opsplitsen van de boog tussen de boogplaatjes.	45

Blz.

5: Literatuur-overzicht booggedrag. 47
5.1: Boogstartgedrag. 47
5.1.1: Het verharren van de boog. 48
5.1.2: Kommutatie van de boogvoetpunten van het beweegbare kontakt. 52
5.1.3: De "Verweilzeit". 55
5.2: Boogbeweging over de runners. 56
5.2.1: Het geleidende cylindermodel. 56
5.2.2: Parameters welke de boogbeweging beïnvloeden. 60
5.3: Opsplitsen van de boog tussen de boogplaatjes. 67

6: Metingen aan het booggedrag. 69
6.1: Meting van het kommutatietijdstip en de kommutatietijd. 70
6.1.1: Karakteristieke meting van de kommutatie. 71
6.1.2: Kontrole kommutatiemeting. 72
6.1.3: Resultaten kommutatiemeting. 74
6.1.4: Bespreking resultaten. 79
6.1.5: Herkenning kommutatie uit spanningsverloop. 82
6.2: Spanningsmeting over een runner. 84
6.2.1: Praktische uitvoering van de meting. 85
6.2.2: Globale bepaling beweging voetpunt. 86
6.2.3: Resultaten spanningsmeting over runner. 89
6.2.4: Bepaling van gegevens uit de meting. 90
6.2.4.1: Begintijdstip van de voetpuntbeweging. 91
6.2.4.2: Eindtijdstip van de voetpuntbeweging. 92
6.2.4.3: Gemiddelde snelheid kathode-voetpunt. 93
6.3: Optische meting met behulp van fibers. 95
6.3.1: Uitvoering van de meting. 95
6.3.2: Resultaten van de optische meting. 97
6.3.3: Uit fibermeting verkregen gegevens. 99
6.4: Spanningsstijging na kontaktopening. 104
6.5: Evaluatie behaalde resultaten t.a.v. de modellering. 107

7: Konklusies en aanbevelingen. 110

Gebruikte literatuur. 112

Blz.

Bijlagen:

1: Gegevens spoel en instelgebied meetcircuit. 114

2: Meetresultaten CMC-QL1. 115

3: Meetresultaten SBE-type 1. 122

4: Meetresultaten SBE-type 2. 126

5: Bepaling stroomwaarde waarbij SBE in verzadiging gaat. 133

6: Bepaling stroomwaarde waarbij het kontakt van de SBE door de repulsie-kracht geopend wordt. 135

7: Cylinder-model. 139

8: Openingskarakteristiek SBE-type 2. 141

1: Inleiding.

Dit verslag handelt over het afstudeerwerk dat ik in de periode november 1987 tot en met augustus 1988 heb verricht binnen de vakgroep Energie Systemen van de fakulteit Elektrotechniek aan de Technische Universiteit Eindhoven. Het werk vond plaats in het kader van een kontrakt tussen de TU-Eindhoven en Holec B.V.. Doel van dit kontrakt is onderzoek naar kortsluitstroombegrenzing. Hierbij ligt het zwaartepunt op het ontwikkelen van een ontwerp-evaluatieprogramma voor kortsluit- stroombegrenzende komponenten van een nieuwe generatie laagspannings- verdeelinrichtingen op basis van karakteristieke parameters.
Stand van zaken op 1 november was de volgende. Reeds bij het begin van het kontrakt was een student, R.Damstra, begonnen met het bouwen van een meetopstelling en het ontwikkelen van meetprocedures. Dit werk was voor 1 november afgerond. Tevens was er een begin gemaakt met een model voor installatie-automaten, welke een belangrijke rol vervullen binnen de groep van kortsluitstroombegrenzende komponenten. Dit model diende mede aan de hand van metingen nog nader onderzocht te worden.
De situatie tijdens dit afstudeerwerk was dat er door R.Damstra en mijzelf tegelijkertijd aan het zelfde onderwerp gewerkt werd. Dit impliceert dat er in dit verslag een aantal maal naar het verslag van R.Damstra [1] verwezen wordt.

1.1: Afstudeeropdracht.

Puntsgewijs kan de afstudeeropdracht als volgt geformuleerd worden.
1) Voortzetting van de metingen aan installatie-automaten ten behoeve van het model. Bij deze metingen zou een prototype van een nieuwe kortsluitstroombegrenzende schakelaar van de fabrikant Holec B.V. meegenomen worden.
2) Uitgebreidere literatuur studie betreffende de relevante processen in installatie-automaten.
3) Verfijndere beschrijving van de relevante processen in installatie-automaten. Eventueel voorstellen ter verbetering van de modellering van installatie-automaten.
4) Verbetering van het eventueel dan bestaande komputer programma.
5) Selektiviteitsstudie ten opzichte van nader te bepalen komponenten.

1.2: Indeling van het verslag.

In dit verslag wordt in hoofdstuk 2 een bespreking gehouden van de werking en uitvoering van installatie-automaten. Tevens worden de installatie-automaten waaraan metingen zijn verricht nader besproken, alsmede het meetcircuit waarmee de metingen zijn gedaan.
Hoofdstuk 3 gaat nader in op een in de literatuur gevonden model voor installatie-automaten. Met dit model is het mogelijk het afschakelgedrag van installatie-automaten te simuleren.
Ter toetsing van het model zijn in hoofdstuk 4 een aantal metingen beschreven. Deze metingen zijn verricht aan een op de markt verkrijgbare installatie-automaat en aan twee versies van een prototype van een bij Holec B.V. in ontwikkeling zijnde automaat. Aan de hand van deze metingen is de geldigheid van het model onderzocht.
In hoofdstuk 5 wordt nader ingegaan op een aantal processen welke binnen een automaat optreden. Speciale aandacht is besteed aan het zogenoemde boogverharren, het kommuteren van de boogvoetpunten en de beweging van de boog over de runners. Bevindingen uit de literatuur omtrent deze processen zijn uitgewerkt, aangevuld met enkele korte opmerkingen aangaande niet speciaal onderzochte processen.
Ter verbetering van het begrip van een aantal processen binnen het prototype zijn een aantal extra metingen verricht naar de kommutatie en de beweging van de boog. In hoofdstuk 6 worden een drietal metingen beschreven, te weten meting van kommutatietijdstip en -duur met behulp van een rogowski-spoel, meting van de duur van het boogverharren en de gemiddelde snelheid waarmee het kathode-voetpunt over de runner beweegt door middel van een spanningsmeting over een runner en een optische meting met behulp van glasfibers naar de gedragingen van de boog tijdens het afschakelproces.
Tenslotte worden in hoofdstuk 7 konklusies getrokken en aanbevelingen gedaan voor de voortzetting van het onderzoek.

2: Installatie-automaten.

In laagspanningsverdeelsystemen worden de laatste jaren in toenemende mate installatie-automaten toegepast. Deze nemen de funktie van smeltveiligheden (beveiliging) en lastschakelaars (schakelen) over. Een installatie-automaat kombineert deze twee funkties door de mogelijkheid om met de hand in- en uit te schakelen en een automatische beveiliging tegen overstromen. Als toepassingsgebieden voor installatie-automaten kunnen genoemd worden:

- woonhuisinstallaties.
- Utiliteitsbouw.
- Industrie.

In dit hoofdstuk zal een korte uiteenzetting gegeven worden van de bouw en werking van installatie-automaten. Tevens zullen de installatie-automaten, waarvan meetresultaten in dit verslag gebruikt worden, nader beschreven worden.

2.1: Werkings-principe.

In figuur 2.1 is het binnenwerk van een installatie-automaat weergegeven.

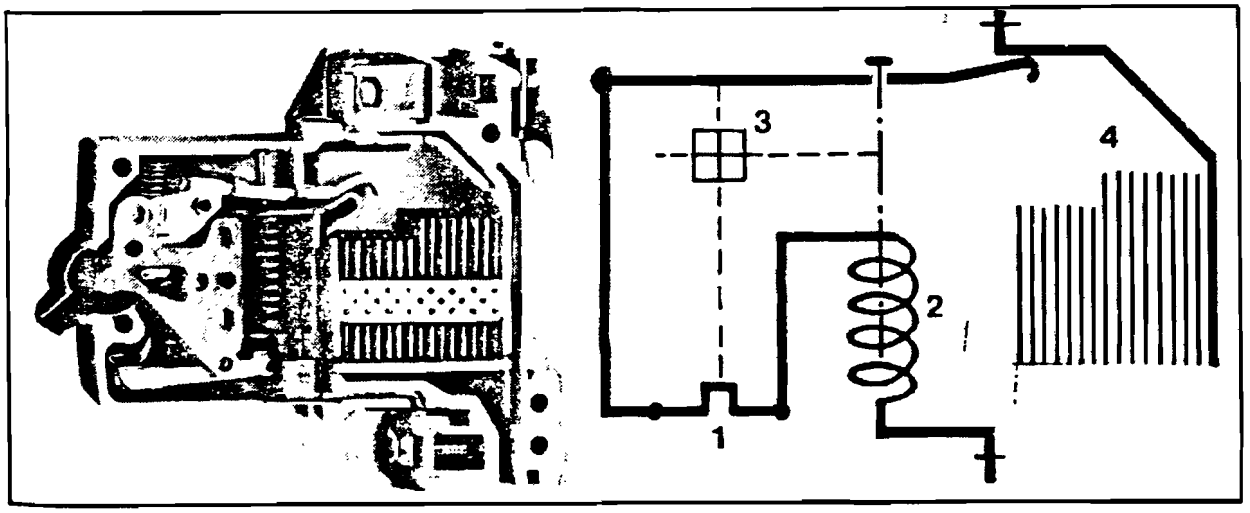


Fig.2.1: Binnenwerk van een installatie-automaat.

1) thermische beveiliging
2) magnetische beveiliging
3) trip-mechanisme
4) boogkamer

Aan de hand van de in figuur 2.1 aangegeven verschillende onderdelen van de installatie-automaat volgt een korte beschrijving van de werking van de automaat.

- het trip-systeem verzorgt het openen van de kontakten. Dit gebeurt met een veer, welke bij het inschakelen van de automaat met de bedieningsknop voorgespannen wordt.
- het trip-systeem kan op twee manieren ontgrendeld worden:

1) door middel van de magnetische beveiliging welke aanspreekt bij grote overstromen. Deze bestaat uit een spoel met daarin een weekijzer anker, zoals in figuur 2.2 is weergegeven.

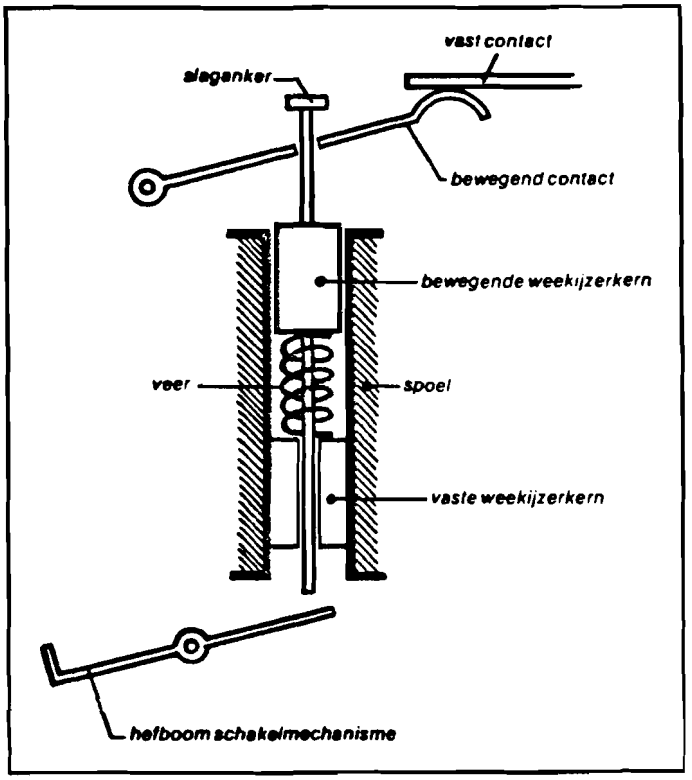


Fig.2.2: Principe magnetische beveiliging.

Bij een grote overstroom wordt de spoel dermate bekrachtigd dat het anker in de spoel naar beneden toe bewogen wordt. Hierbij wordt het trip-systeem ontgrendeld. Vaak wordt er van deze ankerbeweging ook nog gebruik gemaakt door bij het laatste gedeelte van de ankerslag het anker rechtstreeks op de kontakten te laten werken, zoals in figuur 2.2 te zien is. In principe onstaat dan tweeledige werking ter opening van het kontakt, namelijk een trip-systeem werking en een slaganker werking.

2) door middel van de thermische beveiliging welke bij kleine

overstromen (enkele malen I_n) aanspreekt. Deze bestaat uit een bimetaal, welke door een overstroom verwarmd wordt en daardoor krom buigt. Bij dit krombuigen wordt het trip-systeem ontgrendeld. De werking is in figuur 2.3 verduidelijkt.

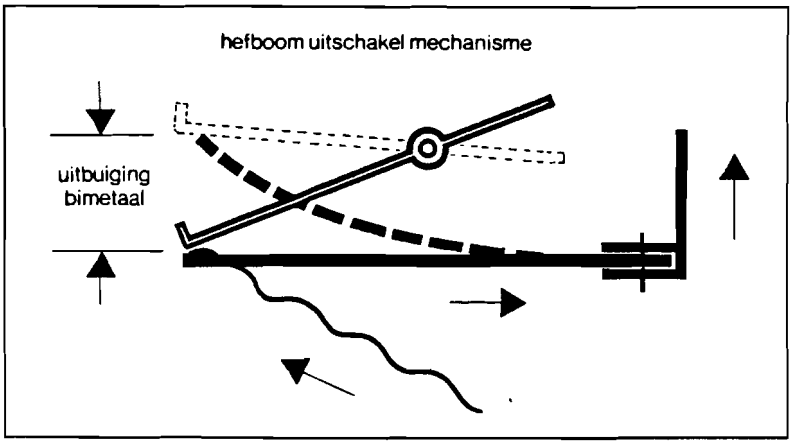
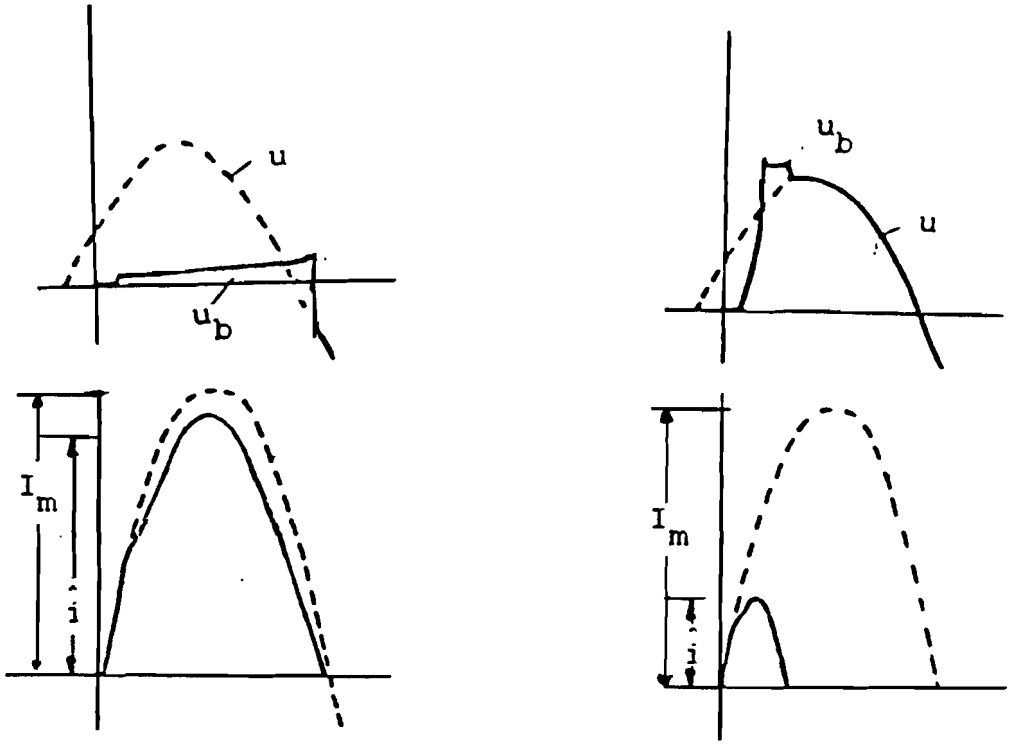


Fig.2.3: Principe thermische beveiliging.

- Na het openen van de kontakten ontstaat er een boogverschijnsel in de boogkamer. Deze boog zal onder invloed van een magnetisch veld naar de boogplaatjes gedreven worden alwaar de boog in deelboogen wordt opgesplitst. Hierdoor ontstaat een sterke spanningsverhoging over de automaat waardoor de stroom naar nul gedreven wordt. In paragraaf 2.2 zal nader op deze boogverschijnselen worden teruggekomen.

De meeste installatie-automaten werken volgens een stroombegrenzend principe, hetgeen betekent dat de stroom naar nul toe gedwongen wordt ten gevolge van een grote spanningsopbouw in de automaat. Een ander principe van stroomonderbreking is de zogenaamde nuldoorgangs-onderbreking. Bij het principe van de nuldoorgangs-onderbreking is vooropgesteld dat de installatie-automaat in een wisselspanningsnet is opgenomen. De stroom wordt dan bij de eerste of tweede nuldoorgang onderbroken. Dit type schakelaar komt hoofdzakelijk in het midden- en hoogspanningsgebied voor, echter kent op laagspanningsgebied ook enige toepassingen. In figuur 2.4 zijn de principes van stroombegenzing en nulpuntsblussing weergegeven aan de hand van een karakteristiek spannings- en stroomverloop voor de beide principes.



nulpuntsblussing stroombegrenzing

Fig.2.4: Stroombegrenzing en nulpuntsblussing.

Uit figuur 2.4 blijkt ook het grote voordeel van stroombegrenzing. Immers $\int i^2dt$ en de top van de doorgelaten stroom is in geval van stroombegrenzing veel kleiner dan voor nulpuntsblussing. Zowel het elektriciteitsnet als ook de schakelaar zelf worden daardoor thermisch en dynamisch minder belast.

Voor selektiviteit ten opzichte van overige beveiligingsapparatuur is een lage waarde van $\int i^2dt$ van groot belang. Zo zal bij toepassing van installatie-automaten in huisinstallaties naast de installatie-automaat tevens een voorgeschakelde smeltpatroon als back-up beveiliging aanwezig zijn, zoals in figuur 2.5 is aangegeven.

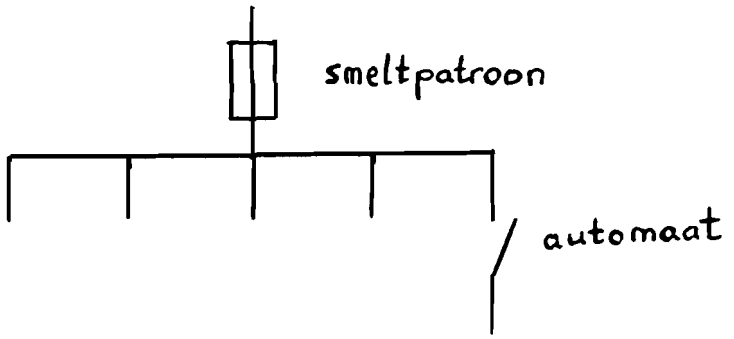


Fig.2.5: Een installatie-automaat met een voorgeschakelde patroon.

Indien er een fout optreedt achter de installatie-automaat dient alleen de installatie-automaat aan te spreken en de smeltveiligheid niet. Met andere woorden: de installatie-automaat dient selektief te zijn ten opzichte van de smeltveiligheid. Om dit te bereiken dient de $\int i^2 dt$ van de installatie-automaat kleiner te zijn dan de smeltintegraal van de patroon.
Uit bovenstaande blijkt dat stroombegrenzing grote voordelen biedt. De installatie-automaten die in dit verslag aan de orde komen werken allen volgens het stroombegrenzende principe.

2.2: Gedrag automaten bij kortsluitstromen.

Bij afschakeling van een kortsluitstroom is het gedrag van een automaat in een aantal fasen onder te verdelen aan de hand van de volgende tijdstippen:

t_i : inschakelen van de kortsluitstroom.
t_c : tijdstip van kontaktopening.
t_v : tijdstip einde boogverharren.
t_k : tijdstip van kommutatie boog van beweegbare kontakt naar vaste runner.
t_b : tijdstip van intrede van de boog tussen de boogplaatjes.
t_e : tijdstip van stroomnul-worden.

Met behulp van de genoemde tijdstippen kunnen de achtereenvolgens optredende fasen tijdens het afschakelen beschreven worden.

$t = t_i$: begin van de kortsluitstroom.
$t_i < t < t_c$: het kontaktopeningsmechanisme detekteert de kortsluitstroom, maar de kontakten zijn nog niet geopend.
$t_c < t < t_v$: de kontakten zijn geopend en de boog blijft gedurende een bepaalde tijdsduur, de "Verharrzeit", op zijn ontstaanspunten staan.
$t_v < t < t_k$: de boog loopt naar de rand van het bewegende kontakt en moet vervolgens van dit beweegbare kontakt op de vaste runner kommuteren. De tijd na kontaktopening t_c totdat de boog op de vaste runner is gekommuteerd wordt wel de "Verweilzeit" genoemd.

$t_k < t < t_b$: de boog loopt over de runners naar het boogplaatjespakket en begint zich op te delen tussen de boogplaatjes.

$t_b < t < t_e$: de boog is opgesplitst tussen de boogplaatjes.

$t = t_e$: de stroom wordt nul.

In figuur 2.6 zijn deze verschillende fasen nader verduidelijkt.

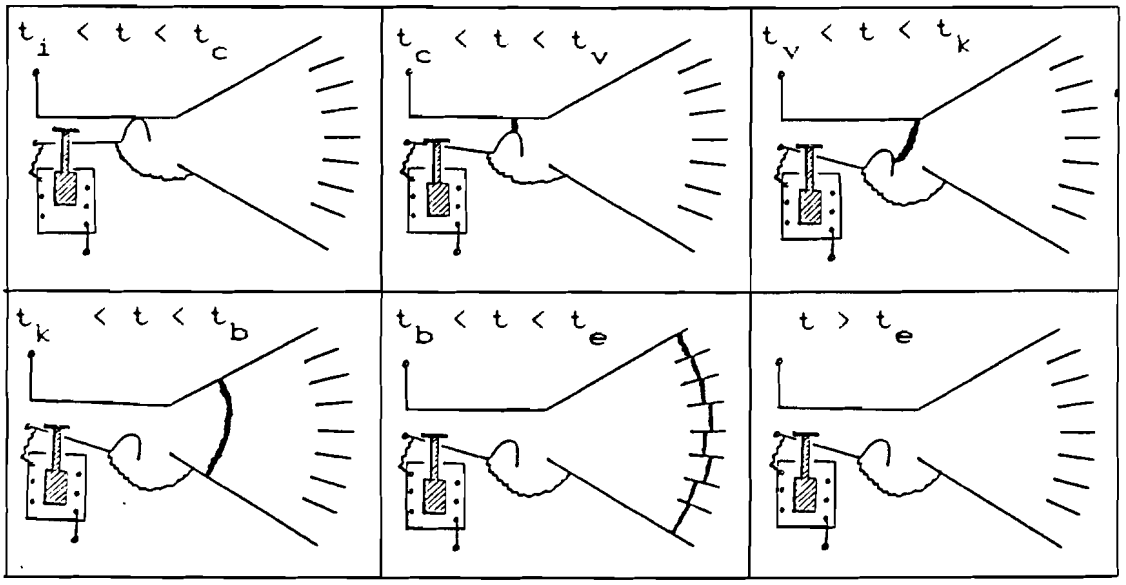


Fig.2.6: Schematische weergave van de verschillende fasen tijdens stroomonderbreking.

In figuur 2.7 is een gestyleerd stroom- en spanningsverloop van een automaat bij afschakeling weergegeven. De verschillende tijdstippen zijn indien mogelijk hierin aangegeven.

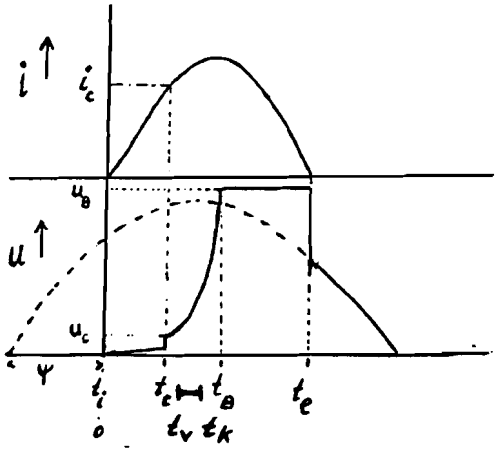


Fig.2.7: Gestyleerd stroom- en spanningsverloop van een automaat bij afschakelen.

Zoals in figuur 2.7 waar te nemen is, zijn de meeste tijdstippen goed uit het stroom- en spanningsverloop af te leiden. Alleen voor t_v en t_k blijkt dit minder goed te kunnen.

2.3: Gebruikte automaten en meetcircuit.

In het kader van dit afstudeerwerk zijn metingen verricht aan twee typen automaten, te weten:

- CMC-QL1
- SBE

Achtereenvolgens zullen deze automaten besproken worden, waarna over het meetcircuit enkele opmerkingen zullen volgen.

2.3.1: CMC-QL1.

Gebruikt is een CMC-QL1 met I_N = 16 A van Carl Maier + Cie AG. Deze automaat is in staat kortsluitstromen af te schakelen tot I_p = 30 kA. In figuur 2.8 is het binnenwerk van een CMC-QL1 weergegeven.

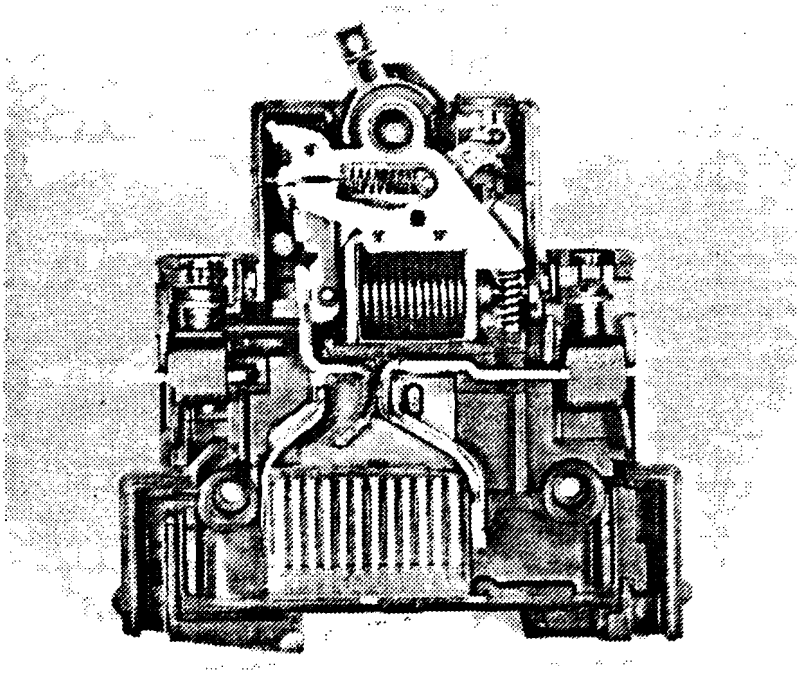
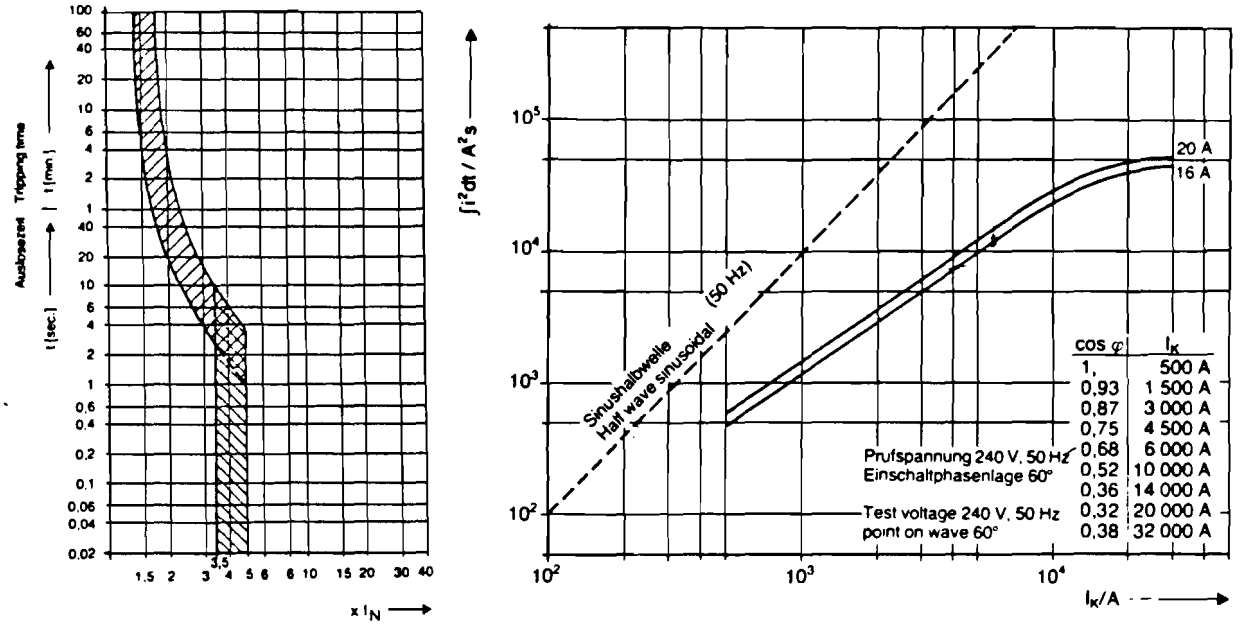


Fig.2.8: Binnenwerk CMC-QL1.

De uitschakel-karakteristiek en doorlaat-karakteristiek van de CMC-QL1 zijn in figuur 2.9 weergegeven.



a b

Fig.2.9: a) Uitschakel- en b) doorlaat-karakteristiek CMC-QL1 (I_N = 16A).

De CMC-QL1 is opgebouwd uit twee identieke boogkamers in serie met in elke boogkamer een kontaktpaar dat door één kontakt-openingsmechanisme geopend wordt. De opbouw van het kontakt-openingsmechanisme is in figuur 2.10 weergegeven.

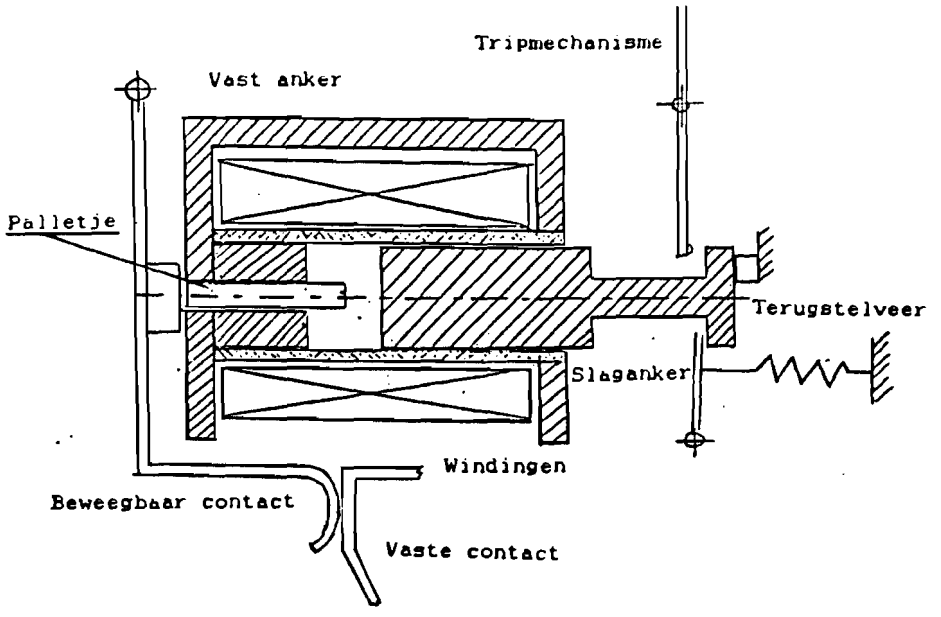


Fig.2.10: Kontakt-openingsmechanisme CMC-QL1.

Bij bekrachtiging van de ankerspoel wordt het anker in de spoel getrokken. Bij deze beweging wordt het trip-systeem ontgrendeld. Bij het laatste gedeelte van de slag van het anker wordt een palletje door het anker tegen de kontakten aangeduwd, zodat er ook nog een slagankerwerking op het beweegbare kontakt onstaat.
De beide boogkamers zijn elk voorzien van van 12 boogplaatjes, waartussen de boog zich zal opdelen.
Een karakteristiek spanningsverloop bij afschakeling van de CMC-QL1 is in figuur 2.11 weergegeven.

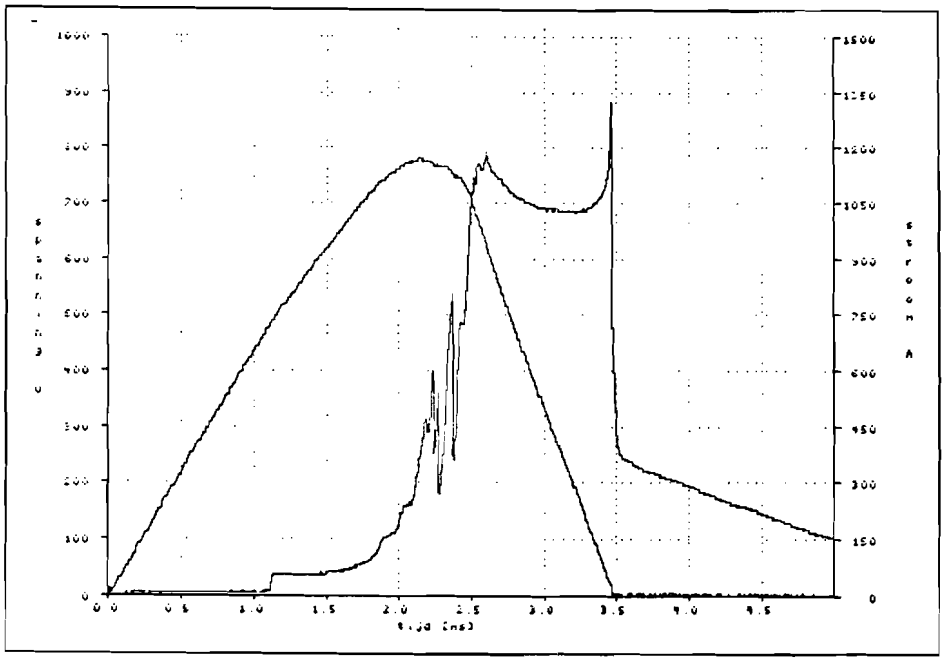


Fig.2.11: Spanningsverloop bij afschakeling CMC-QL1.
(I_p = 1529 A, cos ϕ = 0.35, $\psi = \phi$, U_n= 240 V).

In figuur 2.11 valt op dat na kontaktopening (ca. 1.2 ms) de spanning korte tijd konstant blijft alvorens op te lopen. In het tijdinterval van 2.0 ms tot 2.5 ms daalt de spanning een paar keer, hetgeen wijst op herontstekingen in de automaat. Na ca. 2.5 ms is de boog opgesplitst tussen de boogplaatjes. De spanning blijft vervolgens hoog (ca. 700 V) totdat de stroom nul wordt.

2.3.2: SBE.

De SBE is een prototype van een schakelaar die bij HOLEC in ontwikkeling is. SBE staat voor Stroom Begrenzende Eenheid. Er is tijdens dit afstudeer-projekt aan twee typen van de SBE gemeten, welke gemakshalve met SBE-type 1 en SBE-type 2 aangeduid zullen worden. De opbouw van de SBE-type 1 in figuur 2.12 weergegeven.

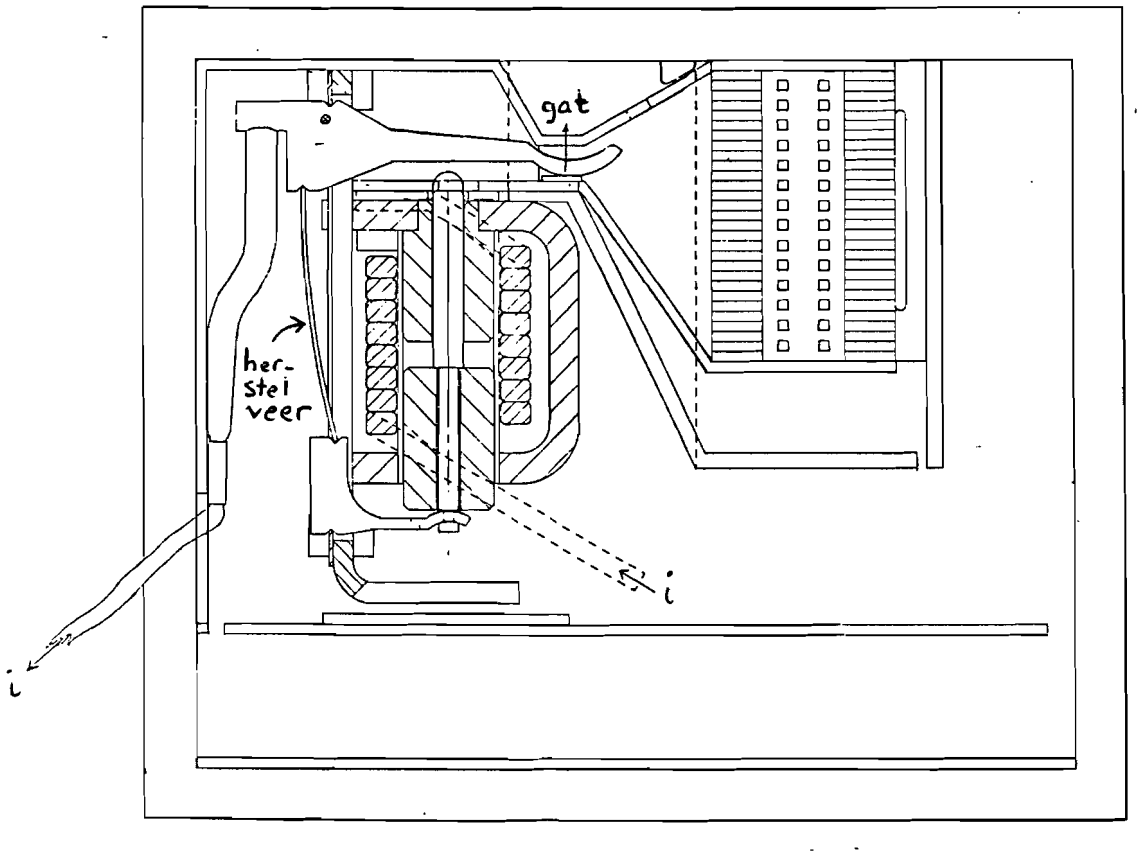
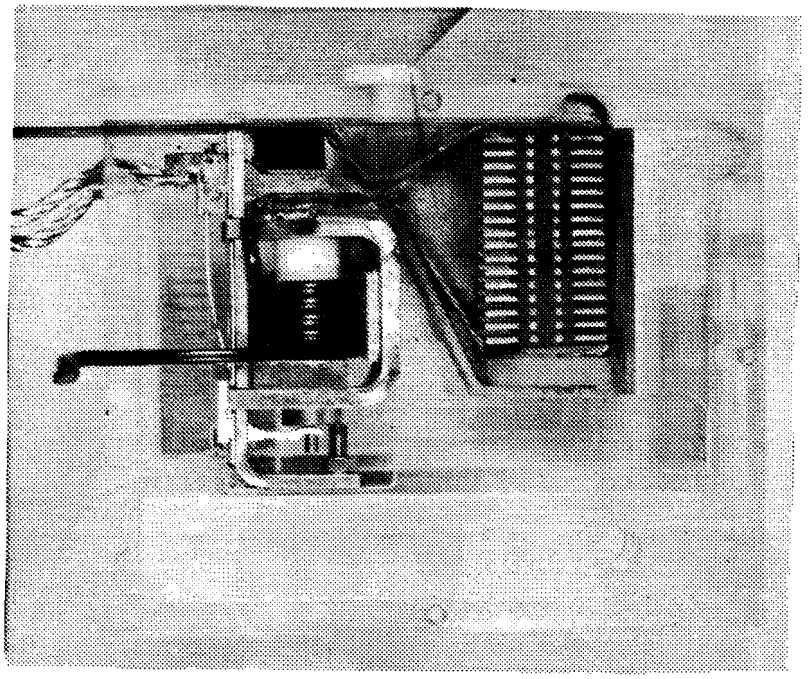


Fig.2.12: Opbouw SBE-type 1.

De werking van de SBE is erop gebaseerd dat na afschakeling automatisch weer ingeschakeld wordt. Daartoe is een vaste veer aangebracht welke het bewegende kontakt op het vaste kontakt drukt. Het bewegende kontakt wordt geopend met behulp van een slaganker. De ankerspoel bevat 8 windingen. De boogkamer is voorzien van 14 boogplaatjes.
De SBE-type 2 wijkt op drie punten van de SBE type 1 af, te weten:

- het bewegende kontakt is iets korter.
- het aantal windingen van de ankerspoel is 5.
- het aantal boogplaatjes is 16.

In figuur 2.13 is een foto en de opbouw van de SBE-type 2 weergegeven.



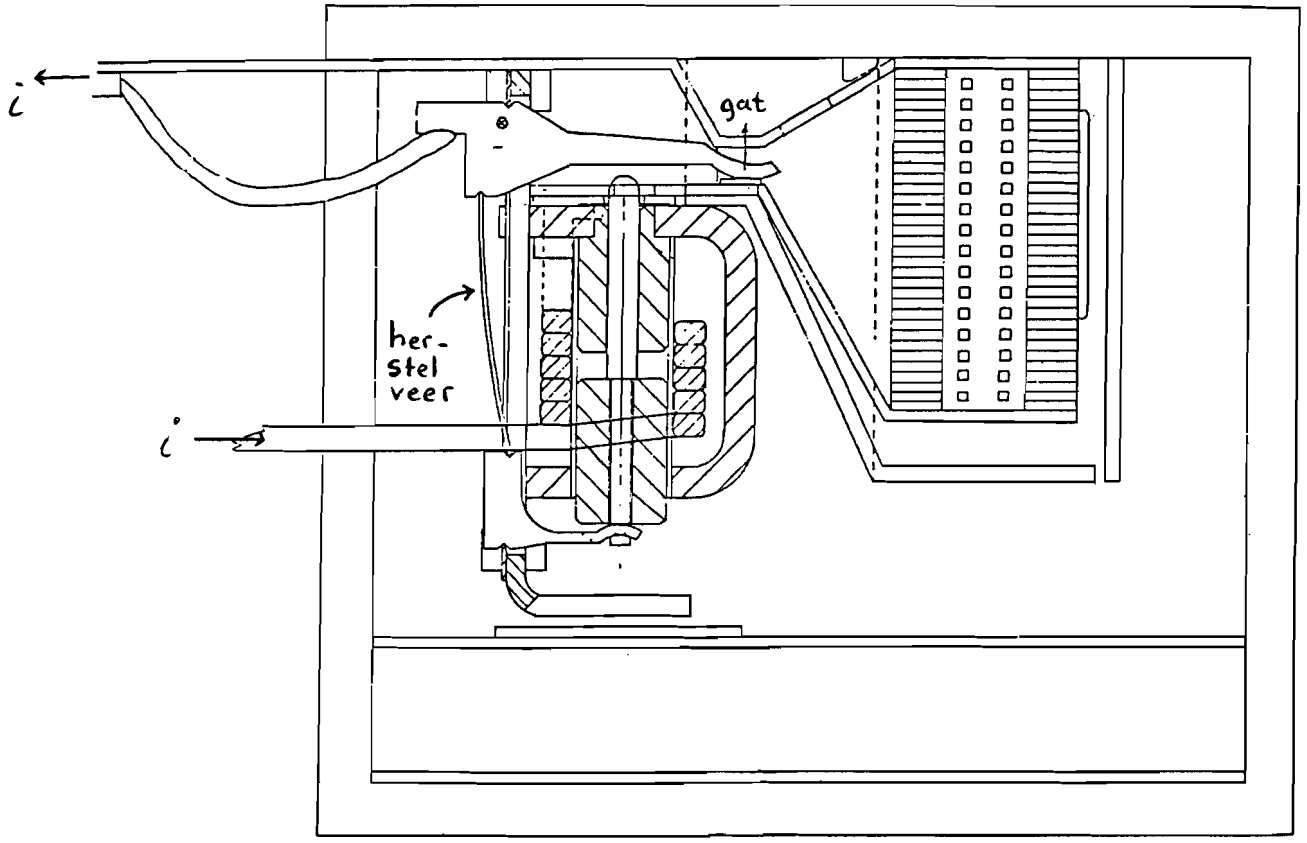
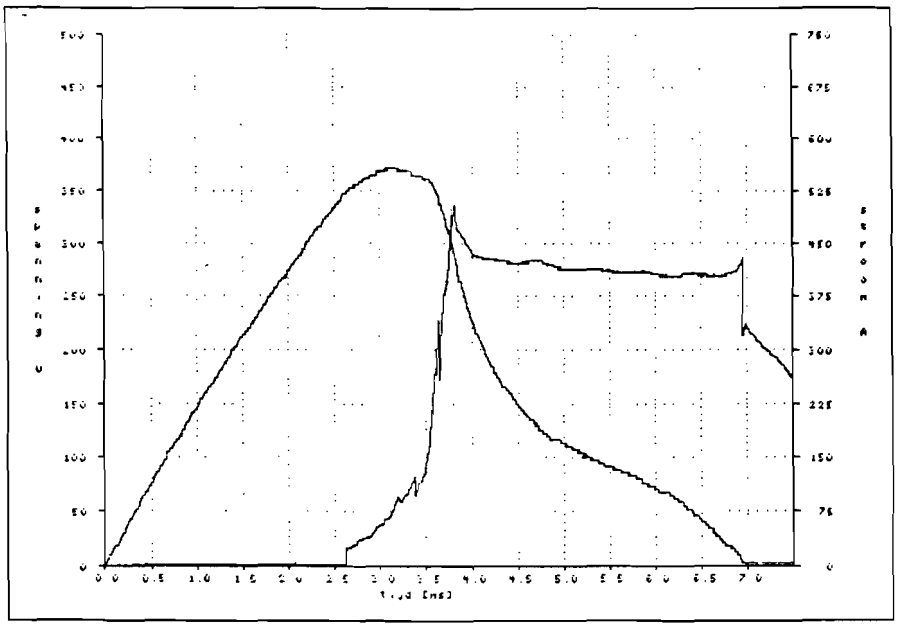
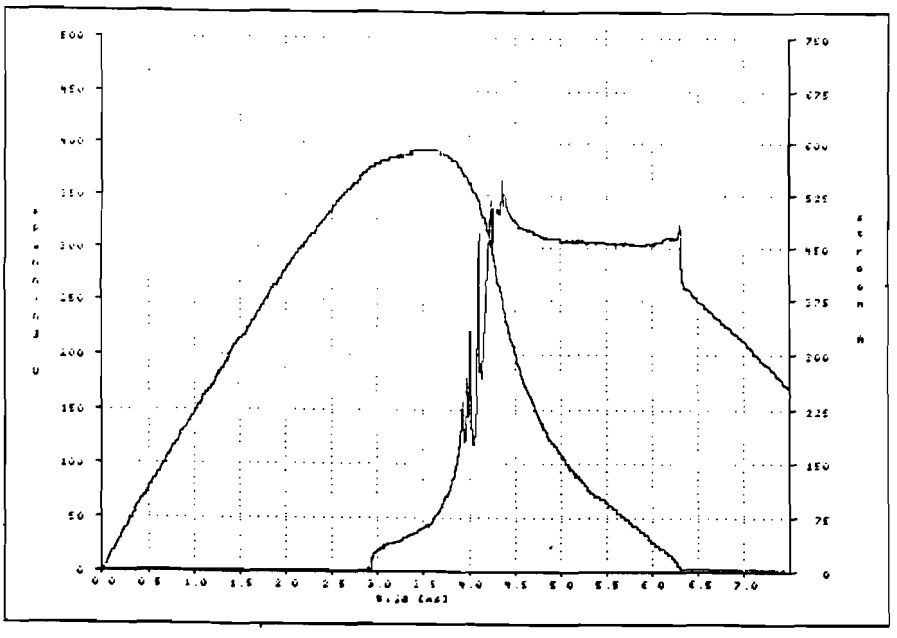


Fig.2.13: Opbouw SBE-type 2.

Bij één dezelfde circuitinstelling is in figuur 2.14.a een karakteristiek stroom- en spanningsverloop van de SBE-type 1 en in figuur 2.14.b voor de SBE-type 2 weergegeven.



a



b

Fig.2.14: Karakteristiek stroom- en spanningsverloop SBE-type 1 (a) en SBE-type 2 (b) (I_p = 495 A, cos ϕ = 0.97, $\psi = \phi$, U_n= 240 V).

Vergelijking van de in figuur 2.14 weergegeven spannings- en stroomverlopen levert op dat het kontakt van de SBE type 1 eerder

opent dan het kontakt van de SBE type 2.(2.61 ms tegen 2.93 ms) Nadat de boog tussen de boogplaatjes is opgesplitst is de spanning over de SBE type 2 (gemiddeld ca. 310 V) hoger dan de spanning over de SBE type 1 (gemiddeld ca. 278 V).

2.3.3: Het meetcircuit.

Het circuit waarmee de metingen zijn uitgevoerd is in [1] uitgebreid aan de orde geweest, zodat hier slechts met een korte bespreking volstaan kan worden.
In figuur 2.15 is schematisch de meetopstelling weergegeven.

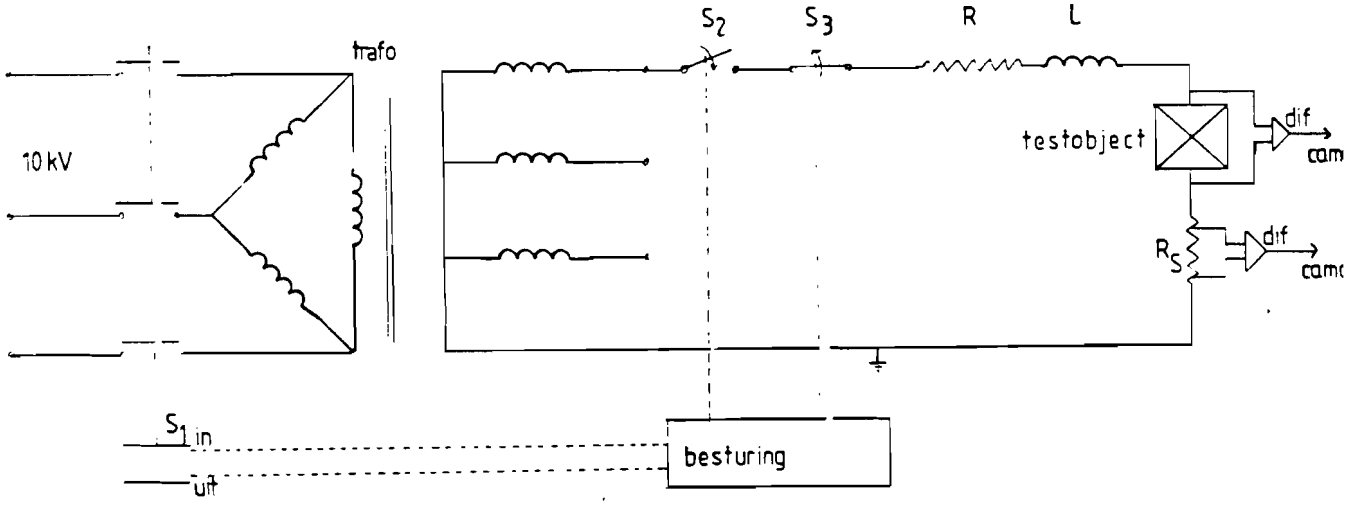


Fig.2.15: Meetopstelling.

In figuur 2.15 is:

S_1	:	10 kV SF_6 puffer vermogensschakelaar
S_2	:	Pameco inschakelaar
S_3	:	Torsimat uitschakelaar
L	:	luchtspoel (instelbaar)
R	:	weerstandsbank
R_s	:	shunt-weerstand voor meting stroom
trafo	:	10 kV / 380 V ; 800 kVA
besturing	:	MC-85 kontroller

De SF_6 puffer schakelaar (24 kV/1250 A, BBC type HB 2412) schakelt de transformator in en uit. Tevens dient deze schakelaar als back-up

schakelaar voor eventueel falen van de Torsimat uitschakelaar.
Met de pameco inschakelaar kan op een van te voren gekozen tijdstip ingeschakeld worden. De spreiding in het inschakelmoment bedraagt circa 0.25 ms.
Met de Torsimat uitschakelaar wordt na een in te stellen tijdsduur na het inschakelen van de Pameco inschakelaar weer uitgeschakeld. Dit is met name voor meting aan de SBE van belang, daar deze schakelaar na onderbreking automatisch weer inschakelt, wat voor de metingen niet van belang en voor de levensduur van de schakelaar ongewenst is.
De luchtspoel bestaat uit een opgerolde kabel, waarin 16 aftakkingen aanwezig zijn. De induktieviteit kan ingesteld worden tussen 36 µH en 1.84 mH. In tabel 1 van bijlage 1 zijn de instelmogelijkheden van de luchtspoel weergegeven.
De weerstandbank bestaat uit een rek waarop tussen koperen strippen weerstanden gemonteerd kunnen worden. Deze weerstanden bestaan uit gewonden konstantaandraad.
De shuntweerstand wordt gebruikt voor het meten van de stroom. De waarde bedraagt 2.56 mΩ. De shuntweerstand is aan aarde gelegd om de common-mode spanning voor de differentiaalversterker zo laag mogelijk te houden.
De besturing van de schakelaars vind plaats met behulp van een MC-85 controller. Hiermee kunnen gewenste in- en uitschakeltijden voor de schakelaars nauwkeurig ingesteld worden.
Het werkgebied van het meetcircuit is in figuur 1 van bijlage 1 weergegeven
Met behulp van het CAMAC-systeem (Computer Aided Measurement And Control system) worden stroom en spanning digitaal gemeten (gebruikte sampletijd 5 µs). Na afloop van een meting worden de gesampelde waarden naar een PC overgeseind en opgeslagen voor verdere verwerking.

3: Model voor het afschakelgedrag van installatie-automaten.

In het algemeen heeft een model als funktie het beschrijven van een proces zodat aan de hand van het model het proces geanalyseerd kan worden. De wijze waarop het proces in het model beschreven wordt, is afhankelijk van de eisen die aan het model gesteld worden. Zo kan men met een model slechts de hoofdzaken van het proces beschrijven, soms met behulp van anologieën welke schijnbaar geen enkele overeenstemming met het proces zelf vertonen. Men kan bij de modelbeschrijving ook uitgaan van de fysische achtergronden van het proces zelf, zodat het model fysisch gezien een (gedeeltelijke) representatie van het proces is. Verder kan men zich bij een model afvragen: wat is de nauwkeurigheid van het model, voldoet het model in alle situaties of zijn er grenzen aan het model verbonden. Men zal uit een model nooit meer kunnen halen dan dat er in de modelbeschrijving is opgenomen.
Ten aanzien van het modelleren van het afschakelgedrag van installatie-automaten zijn een aantal de doelstellingen nagestreefd, te weten:

- het model dient opgebouwd te zijn uit parameters, welke in nauw verband staan met de konstruktieve gegevens van een bepaalde installatie-automaat.
- deze parameters dienen zowel uit metingen als uit de konstruktieve gegevens van de automaat te bepalen zijn.

In dit hoofdstuk wordt een model besproken dat aan deze doelstellingen voldoet.

3.1: Model van Niemeyer.

Als eerste aanzet tot realisering van een model om het afschakelgedrag van een automaat te simuleren is een in de literatuur [2] gevonden model nader uitgewerkt en op bruikbaarheid onderzocht. In het vervolg van dit verslag zal dit model met "model van Niemeyer" aangeduid worden, genoemd naar de auteur van het bronartikel.
Er wordt door Niemeyer een kwantitatief rekenmodel ontwikkeld, dat door de volgende punten gekenmerkt is:

- numerieke berekening met absolute stroom- en spanningswaarden.
- karakterisering van de maatgevende komponenten van de automaat

door grootheden, die direkt met de konstruktieve gegevens van de stroombegrenzende automaat samenhangen.

- gebruik van een eenvoudig fysisch model voor de berekening van de kontaktopening en het verloop van de spanningsopbouw uit het stroomverloop en de konstruktieve gegevens.
- beperking tot hoge kortsluitstromen (> 1kA) waarbij de snelle kontaktopening primair door het eigen slaganker tot stand gebracht wordt.

Voor het schakelgedrag worden 3 perioden apart beschouwd, te weten:

1) beweging van het slaganker en moment van kontaktopening.
2) verplaatsing boog van de kontakten tot de boogplaatjes.
3) het opsplitsen van de boog tussen de boogplaatjes.

Achtereenvolgens zullen genoemde 3 perioden beschreven worden.

3.1.1: Beweging van het slaganker en moment van kontaktopening.

Uitgangspunt vormt de in figuur 3.1 schematisch weergegeven konfiguratie.

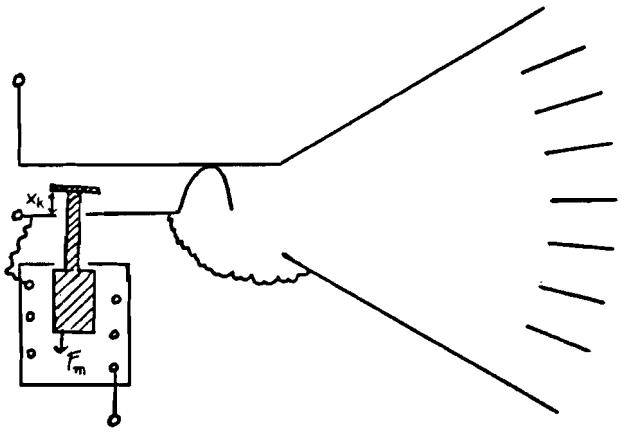


Fig.3.1: Schematische weergave kontaktopeningsmechanisme.

Zoals uit figuur 3.1 blijkt wordt het kontakt direkt door het slaganker geopend. De beweging van het slaganker kan, indien de wrijvingskracht verwaarloosd wordt, beschreven worden door:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = F_a(i(t)) \qquad (3.1)$$

met: M : massa van het slaganker.
$x(t)$: plaatscoördinaat van het slaganker.
$F_a(i(t))$: magnetische kracht werkzaam op het slaganker.

Voor $F_a(i(t))$ kan geschreven worden:

$$F_a(i(t)) = \frac{B^2.A}{2.\mu} = \frac{\phi^2}{2.\mu.A_a} = \frac{(wi)^2}{2.\mu.R_m^2.A} = C_k.i^2 \qquad (3.2)$$

met: B : magnetische induktie
μ : magnetische permeabiliteit van lucht
A_a : doorsnede slaganker
ϕ : magnetische flux
R_m : magnetische weerstand $\simeq \frac{x_l}{\mu A_a}$
x_l : totale lengte van de luchtspleten
w : aantal windingen spoel
C_k : $\frac{w^2}{2.\mu.R_m^2.A_a} \simeq \frac{w^2 \mu A_a}{2 x_l}$

Uit (3.1) en (3.2) kan $x(t)$ bepaald worden:

$$x(t) = \frac{C_k}{M} \int_{t_i}^{t} \int_{t_i}^{t'} i^2(t'') \, dt'' \, dt' \qquad (3.3)$$

De kontakten van de automaat zullen gaan openen indien het slaganker een afstand x_k doorlopen heeft, dus als $x(t) = x_k$ zoals weergegeven in figuur 3.1. Bij een bekend verloop van $i(t)$ kan het moment van kontaktopening, t_c, bepaald worden uit:

$$\int_{t_i}^{t_c} \int_{t_i}^{t'} i^2(t'') \, dt'' \, dt' = \frac{m.x_k}{C_k} \qquad (3.4)$$

De klemspanning U_{klem} van de automaat wordt in deze fase alleen bepaald door de inwendige weerstand, immers de kontakten zijn nog gesloten. Voor u_{klem} geldt:

$$u_{klem} = R_i . i \qquad (3.5)$$

Hiermee is de eerste fase omschreven. De verplaatsing van het slag anker is evenredig met de dubbelintegraal over i^2. Als deze dubbelintegraal een bepaalde waarde heeft bereikt openen de kontakten.

3.1.2: Verplaatsing boog van de kontakten tot de boogplaatjes.

Op de plaats van de boog ontstaat een magnetisch veld B_t loodrecht op de boog als gevolg van de toe en afvoerstromen. Dit magnetisch veld is afhankelijk van de plaats van de boog in de boogkamer en de plaats op de boog. Indien met het gemiddelde magnetisch veld over de boog gerekend wordt, geldt:

$$B_t = g_b . i \qquad (3.6)$$

met: g_b : geometriefaktor

Dit magnetisch veld veroorzaakt een Lorentzkracht op de boog:

$$F_L = l . i . B_t = g_b . l . i^2 \qquad (3.7)$$

met: F_L : Lorentzkracht
l : lengte van de boog

Onder invloed van deze kracht zal de boog zich in de richting van de boogplaatjes gaan bewegen. Bij deze beweging zal de boog hoeveelheid lucht met massa M moeten wegduwen, zoals weergegeven in figuur 3.2.
Er wordt aangenomen dat de boog ten gevolge van zijn hoge temperatuur en daarmee samenhangende geringe dichtheid nagenoeg geen massa heeft. De boog wordt massaloos verondersteld. Indien de wrijvingskracht wordt verwaarloosd, kan voor de gasbel een bewegingsvergelijking opgesteld worden, welke tegelijkertijd de bewegingsvergelijking van de "schuivende" lichtboog voorstelt:

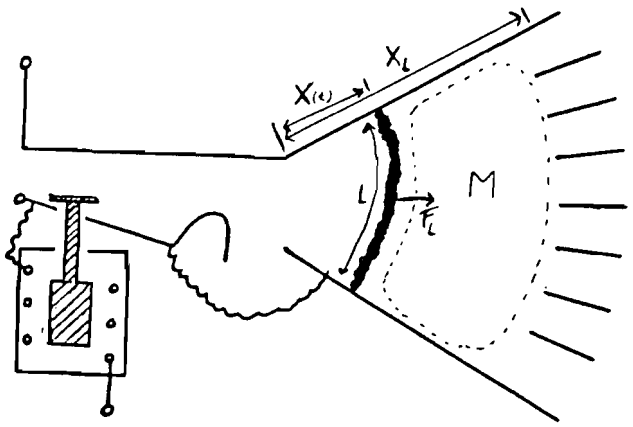


Fig.3.2: Schematische weergave schakelaar met lichtboog en gasbel.

$$M \frac{d^2x(t)}{dt^2} = F_L = g_b . l . i^2 \qquad (3.8)$$

met: $\ddot{x}(t)$: plaatscoördinaat van de boog
M : massa gasbel

De massa M van de gasbel is geen konstante grootheid, maar hangt van de doorsnede van de boog af. Aan de hand van figuur 3.3 kan dit verduidelijkt worden.

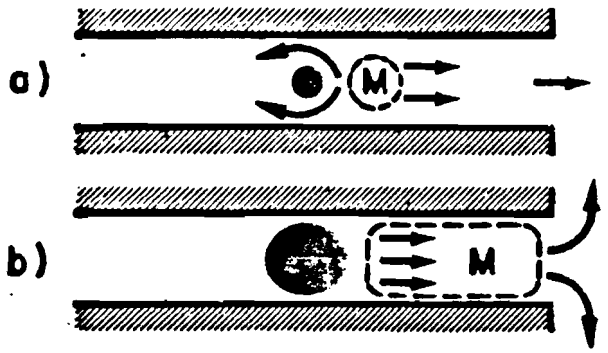


Fig.3.3: Schematische voorstelling lichtboog en gasbel.

De doorsnede van de boog is een functie van de stroom door de boog. Bij kleine stromen (figuur 3.3 a) is de doorsnede van de boog klein, zodat bij de beweging van de boog een deel van de te verplaatsen

gasbel tussen de wand van de boogkamer en de boog door naar dat deel van de boogkamer achter de boog kan ontsnappen. Een relatief kleine gasmassa M dient dan nog door de boog verplaatst te worden in de richting van de boogbeweging. Bij grotere stromen (figuur 3.3 b) bezit de boog een grotere doorsnede en kan het de boogkamer grotendeels verstoppen. In dit geval zal een relatief grote gasmassa M door de boog verplaatst moeten worden.
Het verband tussen de gasmassa M en de stroom door de boog kan volgens Niemeyer met een kwadratische relatie worden benaderd. De stroom door de boog verandert weliswaar tijdens het verlengen, in eerste instantie kan deze benaderd worden door de stroom op het moment van kontaktopening. Dus:

$$M(i) \propto C_M \cdot i^2 \propto C_M \cdot i_c^2 \qquad (3.9)$$

met: C_M : faktor welke de stroom-mechanische eigenschappen van de bluskamer beschrijft.

Substitutie van (3.9) in (3.8) en de resulterende vergelijking oplossen naar X(t) geeft:

$$x(t) = \frac{g_b \cdot l}{C_M \cdot i_c^2} \int_{t_c}^{t} \int_{t_c}^{t'} i^2(t'') \, dt'' \, dt' \qquad (3.10)$$

De boog heeft de boogkamer bereikt als $x(t) = x_L$, waarin x_L de afstand tussen de kontakten en de boogplaatjes is. Het moment van intrede kan dan gevonden worden uit:

$$\int_{t_c}^{t_b} \int_{t_c}^{t} i^2(t') \, dt' \, dt = \frac{C_M \cdot x_L}{g_b \cdot l} i_c^2 = \delta \cdot i_c^2 \qquad (3.11)$$

$$\text{met: } \delta = \frac{C_M \cdot x_L}{g_b \cdot l}$$

De boogspanning u_{boog} zal tijdens het verlengen van de boog van ca 20 V (anode- en kathodeval), direkt na de contactopening, oplopen tot de blusspanning, bij intrede in de boogkamer. Volgens Niemeyer is de

spanning kwadratisch evenredig met de afgelegde afstand, welke met behulp van (3.10) bepaald kan worden. Voor u_{boog} geldt dan:

$$u_{boog} = U_c + \left[\frac{x(t)}{x_L} \right]^2 (U_{blus} - U_c) \qquad (3.12)$$

met: U_c : de boogspanning direkt na kontaktopening.
U_{blus}: de blusspanning.

De klemspanning van de automaat is dan te beschrijven als de spanningsverhoging ten gevolge van de inwendige weerstand plus de boogspanning:

$$u_{klem} = u_{boog} + R_i . i \qquad (3.13)$$

3.1.3: Opsplitsen van de boog tussen de boogplaatjes.

Door de boogplaatjes wordt de boog opgesplitst in een aantal deelbogen. De boogspanning is praktisch stroomonafhankelijk en bedraagt:

$$u_{boog} = n (U_{AK} + u_z) \qquad (3.14)$$

met: n : aantal deelbogen.
U_{AK} : anode- en kathodeval.
u_z : zuilspanning.

Bij kleine afstand tussen de boogplaatjes (d ≤ 1mm) kan gerekend worden met de vuistregel:

$$u_{boog} = n \ (28 \ V) \qquad (3.15)$$

Voor de klemspanning over de automaat geldt (3.13) met daarin voor de boogspanning (3.15) gesubstitueerd.

N.B. In het vervolg van dit verslag worden dubbelintegralen over de stroom in het kwardraat aangegeven met de letter Γ . Dus:

$$\Gamma_{ic} = \int_{t_i}^{t_c} \int_{t_i}^{t} i^2(t') \, dt' dt$$

$$\Gamma_{cb} = \int_{t_c}^{t_b} \int_{t_c}^{t} i^2(t') \, dt' dt$$

4: Metingen ter toetsing model van Niemeyer.

Met de twee in paragraaf 2.3 beschreven automaten, CMC-QL1 en SBE, zijn metingen uitgevoerd om na te gaan, in hoeverre het beschreven model van Niemeyer voldoet. Bij verwerking van de meetresultaten is gebruik gemaakt van het programma LOOK, waarvan in [1] nadere informatie is te vinden. Met dit programma kunnen op eenvoudige wijze de voor het model van Niemeyer relevante tijdstippen, alsmede dubbelintegralen en gemiddelde boogspanning na opsplitsing van de boog tussen de boogplaatjes bepaald worden.

4.1: Metingen CMC-QL1.

Met de CMC-QL1 zijn 5 meetseries uitgevoerd. Iedere meetserie omvatte 10 schoten bij één vaste circuit-instelling. Bij de metingen is getracht de circuit-instellingen zo te kiezen, dat er zo groot mogelijke verschillen in i_c ontstonden. Alle metingen zijn met één automaat uitgevoerd. Om na te gaan of er ook veranderingen in het gedrag van deze automaat opgetreden waren ten gevolge van het vele schakelen zijn een aantal extra metingen gedaan, te weten:

- 3 schoten met de gebruikte automaat bij de eerste meetinstelling.
- 3 schoten met een nieuwe automaat bij deze zelfde meetinstelling.

De resultaten van deze extra schoten bleken zowel bij de oude als de nieuwe automaat niet wezenlijk van de origenele schoten af te wijken.
In tabel 4.1 zijn de voor het model van Niemeyer van belang zijnde meetresultaten weergegeven. De in deze tabel gegeven waarden zijn de gemiddelde meetresultaten met bijbehorende spreiding bepaald uit de 10 schoten bij dezelfde meetinstelling. In bijlage 2 is een volledig overzicht van de meetresultaten gegeven. Ook de resultaten van de extra metingen ter kontrole zijn in bijlage 2 opgenomen.

Tabel 4.1: Meetresultaten CMC-QL1 (U_n = 240 V).

I_p [A]	cos ϕ	ψ [°]		Γ_{ic} [A^2s^2]	i_c [A]	Γ_{cb} [A^2s^2]	Γ_{cb}/i_c^2 [$x10^{-6}s^2$]	U_b [V]
891	0.20	0		0.043	405	0.37	2.26	543
			σ =	0.003	8	0.08		31
1640	0.26	0		0.044	502	0.55	2.18	541
			σ =	0.003	13	0.07		41
1529	0.35	ϕ		0.058	730	0.88	1.65	600
			σ =	0.005	17	0.18		73
2686	0.35	ϕ		0.065	998	1.18	1.18	619
			σ =	0.007	26	0.18		19
5524	0.54	ϕ		0.083	1469	2.56	1.19	639
			σ =	0.023	114	0.41		94

Aan de hand van de meetresultaten uit tabel 4.1 kan ten aanzien van van de drie fasen van het model van Niemeyer het volgende opgemerkt worden:

1) kontaktopening.

Volgens het model dient Γ_{ic} konstant te zijn. Gezien de meetresultaten blijkt dit in orde groote zo te zijn. Opgemerkt dient te worden dat het model uitgaat van grote kortsluitstromen, waarbij de snelle kontaktopening primair door het eigen slaganker tot stand gebracht wordt. De CMC-QL1 is echter uitgerust met een trip-systeem, zodat het anker eerst van het trip-systeem ontgrendelt en vervolgens ook nog als slaganker werkt.

In [1] is voor deze fase een parameterafschatting gemaakt aan de hand van de konstruktieve gegevens van de CMC-QL1. Voor deze parameterafschatting is de slag van het anker tot ontgrendeling van het trip-mechanisme beschouwd. Gevonden werd Γ_{ic} = 0.023 A^2s^2. Deze waarde komt in grootte orde met de uit de metingen bepaalde waarden van Γ_{ic} overeen.

2) verlengen van de boog.

Uit tabel 4.1 blijkt dat δ (= Γ_{cb}/i_c^2) in grootte orde gelijk blijft in het onderzochte meetgebied.

Aan de hand van de resultaten in tabel 4.1 is in figuur 4.1 het

verband tussen Γ_{cb} en i_c op logarithmische schaal uitgezet.

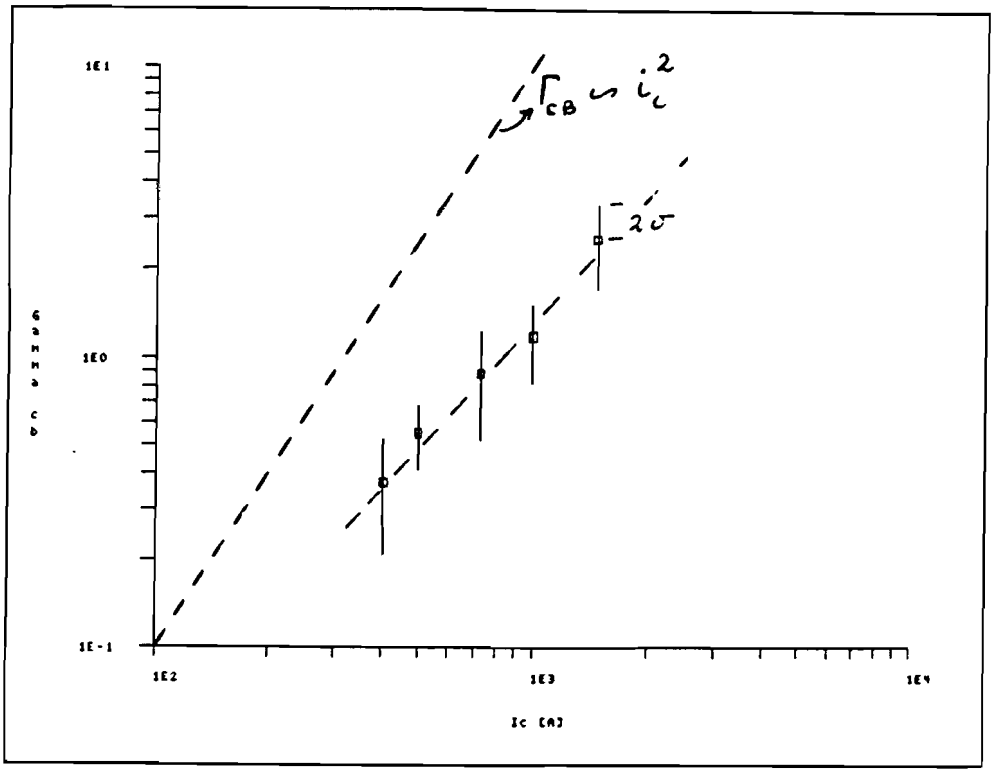


Fig.4.1: Verband Γ_{cb} en i_c.

In figuur 4.1 valt op dat de resultaten een redelijk rechtlijnig verband vertonen, echter met helling 1.5 op logarithmische schaal (grafisch bepaald), wat betekent dat voor het verband tussen Γ_{cb} en i_c geschreven kan worden:

$$\Gamma_{cb} \propto \delta . i_c^{1.5}$$

In [1] is ook voor deze fase van het model een parameter afschatting gemaakt. Indien alle lucht voor de boog weggeduwd wordt werd voor Γ_{cb} 0.10 A^2s^2 gevonden. Deze waarde, die als bovengrens gezien kan worden, is aanmerkelijk kleiner dan de gemeten waarden van Γ_{cb}.

3) opsplitsen van de boog tussen de boogplaatjes.

In tabel 4.1 is de gemiddelde boogspanning U_b gegeven in het tijdinterval t_b tot t_e. Uit de metingen blijkt deze spanning niet konstant te zijn in het onderzochte meetbereik, maar een verloop te vertonen dat op het eerste gezicht stroomafhankelijk lijkt. Uit tabel

4.1 blijkt dat U_b , op één uitzondering na, lichtelijk toeneemt bij verhoging van de bij de onderbreking optredende stroom. Overigens dient opgemerkt te worden dat het spanningsverloop in het genoemde tijdsinterval bij de CMC-QL1 niet bepaald konstant te noemen is. In figuur 4.2 is een voorbeeld gegeven van een afschakeling waarin dit goed waar te nemen is.

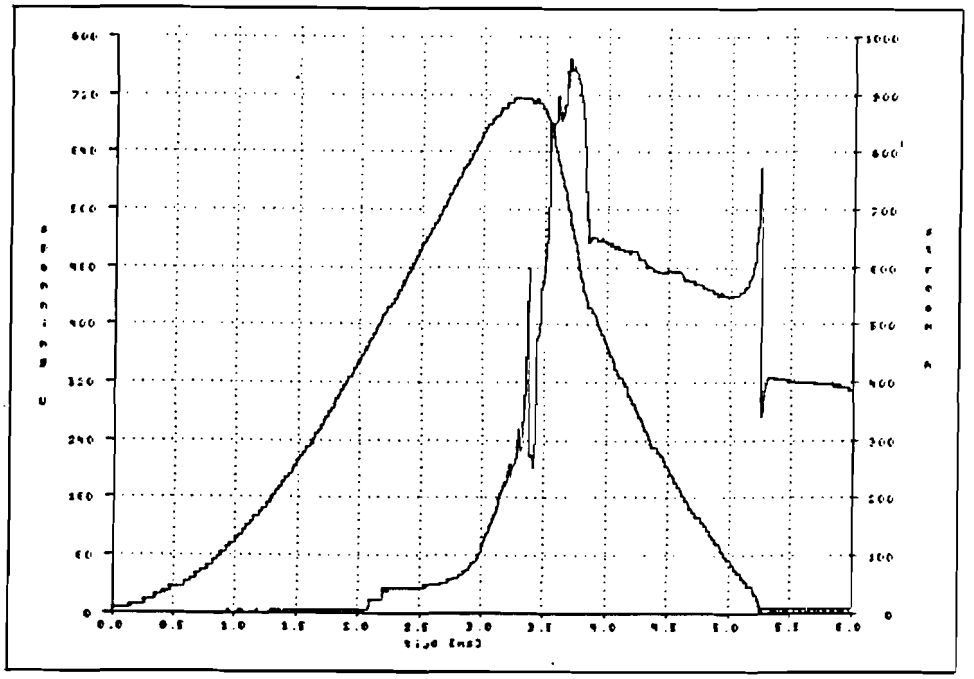


Fig.4.2: Spanning en stroom CMC-QL1 bij afschakeling.

In figuur 4.2 is een plotselinge spanningsdaling waar te nemen nadat de boog reeds tussen de boogplaatjes is opgesplitst. Een verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat de boog in één of beide boogkamers gedeeltelijk terugspringt of aan de achterzijde van het bluspakket uittreedt en vervolgens niet meer opnieuw intreedt. Dit verschijnsel werd nagenoeg bij alle metingen in meer of mindere mate waargenomen. Gemiddeld over de 5 meetseries wordt voor U_b een waarde gevonden van 588 V. Volgens Niemeyer zou dit gelijk moeten zijn aan n. 28 V (n = aantal deelbogen). Voor de CMC-QL1, met 2 boogkamers met 12 boogplaatjes, leidt dit tot 26 x 28 V = 728 V. Dit is aanmerkelijk hoger dan de gemeten waarde van 588 V.

4.2: Metingen SBE.

Met beide typen SBE zijn metingen uitgevoerd waarmee het model van Niemeyer getoetst kan worden.

4.2.1: Metingen SBE-type 1.

Met de SBE-type 1 zijn 6 meetseries uitgevoerd. Iedere meetserie omvatte 5 schoten bij één vaste circuitinstelling. De voor het model van Niemeyer van belang zijnde gemiddelde meetresultaten zijn in tabel 4.2 weergegeven. Een totaaloverzicht van de meetwaarden is in bijlage 3 opgenomen.

Tabel 4.2: Meetresultaten SBE-type 1 (U_n = 240 V).

I_p [A]	cos ϕ	ψ [°]		Γ_{ic} [A^2s^2]	i_c [A]	Γ_{cb} [A^2s^2]	Γ_{cb}/i_c^2 [$x10^{-6}s^2$]	U_b [V]
495	0.97	ϕ		0.16	508	0.21	0.81	277
			σ =	0.02	17	0.04		10
495	0.97	ϕ+30		0.13	570	0.26	0.80	268
			σ =	0.002	8	0.08		11
495	0.97	ϕ+55		0.15	613	0.24	0.64	265
			σ =	0.02	17	0.07		17
1460	0.87	ϕ		0.13	859	0.27	0.37	293
			σ =	0.004	15	0.06		1
1460	0.87	ϕ+20		0.16	1015	0.47	0.46	292
			σ =	0.002	10	0.03		5
1460	0.87	ϕ+60		0.17	1072	0.44	0.38	264
				0.001	3	0.09		2

Bij een circuitinstelling met I_p = 3 kA begaf de schakelaar het. Het bewegende kontakt zat aan de vaste runner waarop de boog moet kommuteren vastgesmolten. In figuur 4.3 is het spanningsverloop bij deze afschakeling weergegeven.

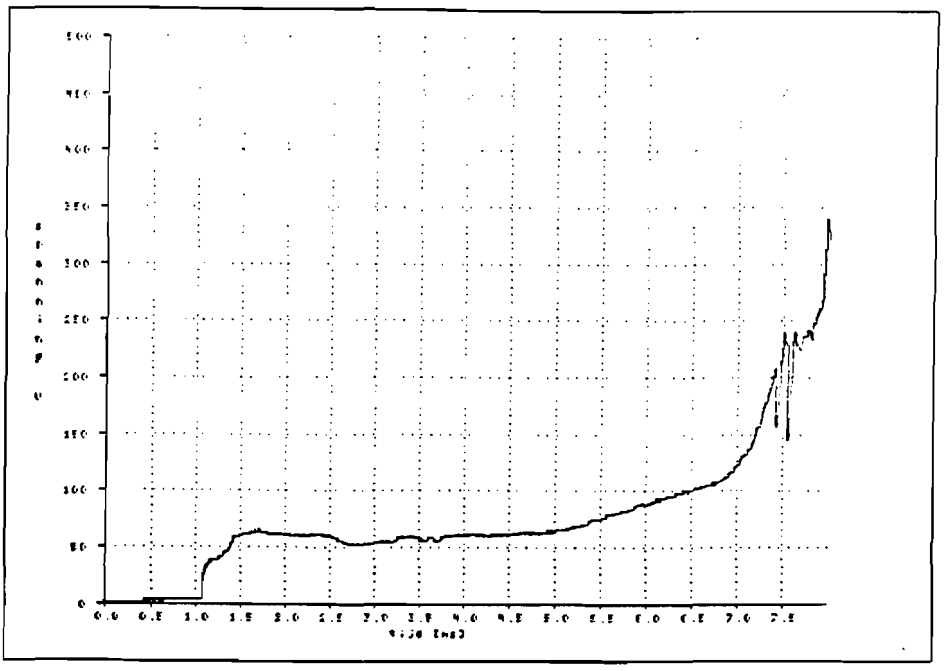


Fig.4.3: Spanningsverloop bij afschakeling waarbij de schakelaar het begaf.

Uit figuur 4.3 en het feit dat het bewegende kontakt aan de vaste runner zat vastgesmolten valt af te leiden dat de boog niet van de kontaktplaats is weggelopen. Oorzaak hiervan zou kunnen zijn dat er bij een voorgaand schot een stukje gesmolten kontaktmateriaal zich in het gat in de runner, waar het bewegende kontakt doorheen dient te bewegen, heeft vastgezet, zodat het bewegende kontakt niet meer door dit gat heen kon. Een andere mogelijkheid is dat de boog ten gevolge van herontstekingen niet over de divergerende runners heeft kunnen weglopen.
Vergelijking van de in tabel 4.2 genoemde resultaten met het model van Niemeyer levert het volgende op:

1) kontaktopening.

Uit de metingen blijkt dat Γ_{ic} redelijk konstant te noemen is. Gezien het feit dat de SBE is uitgerust met een slaganker en er geen trip-systeem aanwezig is voldoet het kontaktopeningsmechanisme goed aan de uitgangspunten van het model van Niemeyer. Voor de SBE-type 1 is geen parameter-afschatting uitgevoerd, hetgeen overigens wel tot aanbeveling strekt.

2) verlengen van de boog.

Uit tabel 4.2 blijkt dat Γ_{cb}/i_c^2 niet konstant blijft over het beschouwde meetgebied. In figuur 4.4 is het verband tussen Γ_{cb} en i_c op logarithmische schaal weergegeven.

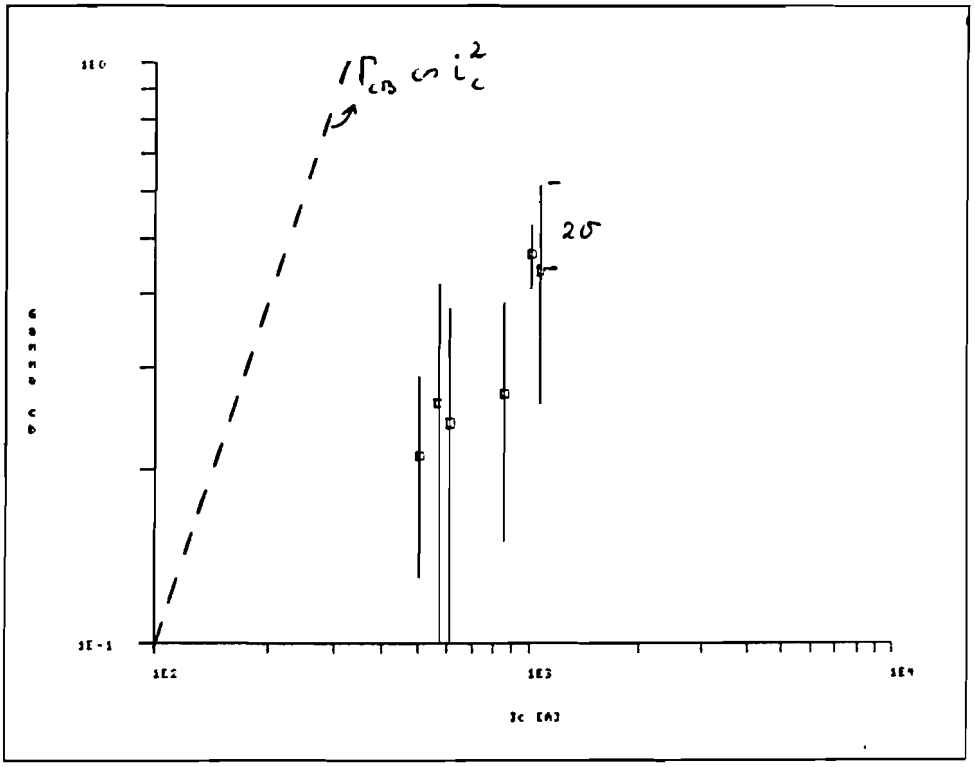


Fig.4.4: Verband Γ_{cb} en i_c.

In figuur 4.4 geeft de gestreepte lijn het kwadratische tussen Γ_{cb} en i_c weer. Uit de metingen blijkt dat er geen kwadratisch verband tussen Γ_{cb} en i_c aanwezig is.

3) opsplitsen van de boog tussen de boogplaatjes.

Als de boog eenmaal is ingetreden en opgesplitst tussen de boogplaatjes blijft de spanning goed konstant. Grootte van de spanning verieert enigszins bij verschillende I_p en inschakelhoek ψ. De SBE-type 1 heeft 14 boogplaatjes, dus maximaal ontstaan er 15 deelbogen. Volgens de vuistregel zou de boogspanning na intrede 15 x 28 V = 420 V moeten bedragen. Dit blijkt niet goed te voldoen. De gemiddelde boogspanning na intrede bedraagt bij de SBE-type 1 277 V. Hiermee rekenend zou per deelboog een spanning van 277 V / 15 = 18.5 V ontstaat.

4.2.2: Metingen SBE-type 2.

Met de SBE-type 2 zijn 6 meetseries uitgevoerd. Bij iedere meetinstelling zijn 6 schoten gedaan, waarvan na 3 schoten de schakelaar omgepoold werd. Dit ompolen is van belang voor metingen die in hoofdstuk 6 worden besproken, er is hier echter geen aandacht besteed aan eventuele hierdoor ontstane verschillen.
In tabel 4.3 zijn de meetresultaten weergegeven. Een totaal overzicht van de metingen is te vinden in bijlage 4.

Tabel 4.3: Meetresultaten SBE-type 2 (U_n = 212 V).

I_p [A]	cos ϕ	ψ [°]		Γ_{ic} [A^2s^2]	i_c [A]	Γ_{cb} [A^2s^2]	Γ_{cb}/i_c^2 [$x10^{-6}s^2$]	U_b [V]
302	0.99	ϕ		0.37	409	0.25	1.49	301
			σ =	0.01	0	0.04		43
444	0.98	ϕ		0.30	542	0.29	0.99	305
			σ =	0.004	2	0.11		12
800	0.98	ϕ		0.24	730	0.24	0.45	317
			σ =	0.03	25	0.04		5
1070	0.91	ϕ		0.26	870	0.22	0.29	316
			σ =	0.04	29	0.03		3
1390	0.86	ϕ		0.24	989	0.22	0.22	311
			σ =	0.03	32	0.08		5
2030	0.82	ϕ		0.27	1215	0.30	0.20	308
				0.05	67	0.17		6

Vergelijking van de in tabel 4.3 genoemde resultaten met het model van Niemeyer levert het volgende op:

1) kontaktopening.
Uit de metingen blijkt dat Γ_{ic} redelijk konstant is. Alleen bij kleine stroominstellingen neemt Γ_{ic} enigszins toe.

2) verlengen van de boog.
Uit tabel 4.3 blijkt dat Γ_{cb}/i_c^2 niet konstant blijft over het beschouwde meetgebied. In figuur 4.5 is het verband tussen Γ_{cb} en i_c op logarithmische schaal weergegeven.

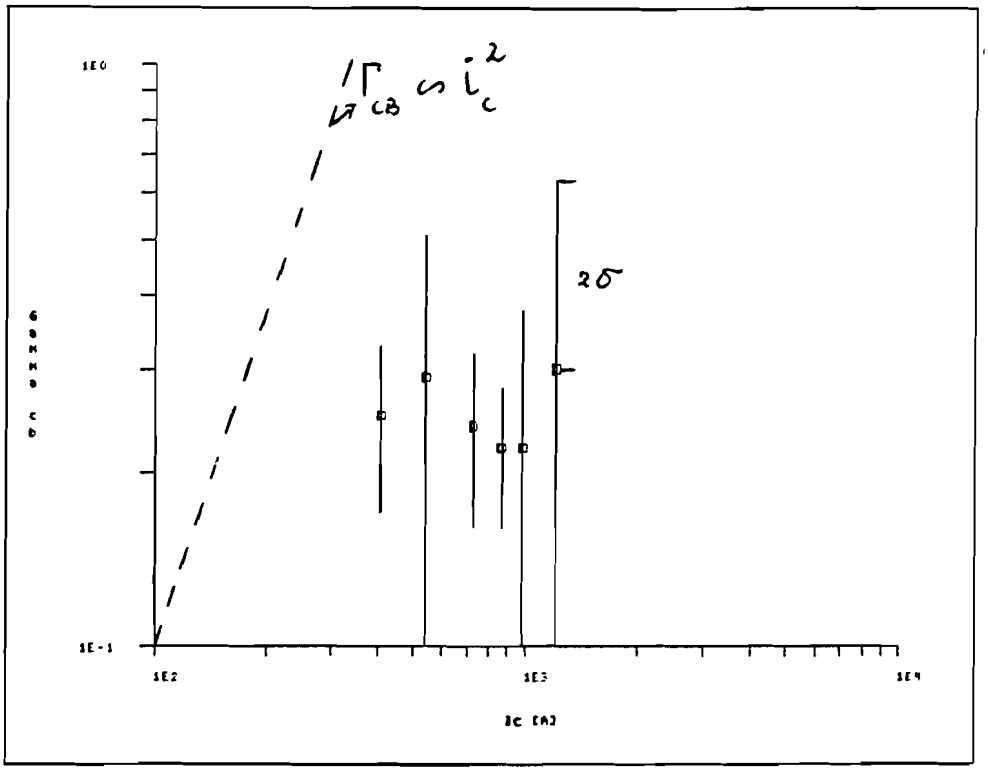


Fig.4.5: Verband Γ_{cb} en i_c.

Uit figuur 4.5 blijkt dat er geen sprake is van een kwadratisch verband tussen Γ_{cb} en i_c. Er is zelfs geen direkte invloed van i_c op Γ_{cb} vast te stellen.

3) opsplitsen van de boog tussen de boogplaatjes.

Als de boog eenmaaal is ingetreden en opgesplitst tussen de boogplaatjes blijft de spanning redelijk konstant. De SBE-type 2 heeft 16 boogplaatjes, dus maximaal ontstaan er 17 deelbogen. Ook hier leidt de vuistregel n.28 V tot een te hoge waarde, immers 17x28 V = 476 V. Uit de metingen volgt dat de gemiddelde boogspanning na intrede circa 310 V bedraagt. Hiermee rekenend zou per deelboog een spanning van 310 V / 17 = 18.2 V onstaan.

4.2.3: Vergelijking SBE-type 1 en SBE-type 2.

In paragraaf 2.4 zijn de verschillen tussen de SBE-type 1 en de SBE-type 2 genoemd. Twee van de verschillen zijn direkt in de

afleiding van het model van Niemeyer terug te vinden, te weten:

	SBE-type 1	SBE-type 2
aantal windingen w :	8	5
aantal boogplaatjes:	14	16

Interessant is het nu na te gaan in hoeverre het verschil in schakelgedrag ten gevolge van deze verschillen aan het model van Niemeyer voldoen.

1) aantal windingen spoel.

Indien Niemeyer letterlijk geïnterpreteerd wordt volgt volgens (3.4) dat Γ_{ic} evenredig is met $1/w^2$. Dit betekent dat indien w van 8 naar 4 teruggebracht wordt Γ_{ic} met een faktor $8^2/5^2 = 2.56$ moet toenemen. Gezien de meetresultaten in tabel 4.3 en tabel 4.4 blijkt dit in grootte orde te voldoen. De uit deze tabellen af te leiden faktor bedraagt circa 2.

2) aantal boogplaatjes.

Met vergroting van het aantal boogplaatjes zou de spanning na intrede van de boog moeten stijgen. Niemeyer stelt dat de spanning evenredig is met het aantal deelbogen waarbij hij een waarde van 28 V per deelboog noemt. In het voorgaande is reeds gebleken dat deze waarde van 28 V niet goed voldoet. Echter de evenredigheid van de spanning met het aantal deelbogen kan wel getoetst worden. Dit houdt in dat bij vergroting van het aantal boogplaatjes van 14 naar 16 de spanning na intrede met een faktor 17/15 = 1.13 moeten stijgen. Voor de SBE-type 1 was deze spanning gemiddeld over de 6 meetseries 277 V. Met de genoemde faktor zou deze spanning voor de SBE-type 2 1.13x277 = 313 V moeten zijn. Uit de metingen werd gemiddeld over de 6 meetseries 310 V gevonden. Dit voldoet goed aan de te verwachten waarde.

4.3: Evaluatie model van Niemeyer.

Aan de hand van de meetresultaten kan voor de 3 fasen van het model van Niemeyer het volgende gesteld worden:

4.3.1: Kontaktopening.

Gebleken is dat Γ_{ic} bij de CMC-QL1 toeneemt bij toenemende stroom. Bij de SBE type 1 en type 2 werd dit niet waargenomen en lijkt Γ_{ic} redelijk konstant. Echter uit het model bleek Γ_{ic} voor de SBE-type 2 niet precies te voorspellen uit Γ_{ic} van de SBE-type 1.
Ten aanzien van de modellering voor de kontaktopening kunnen een aantal opmerkingen gemaakt worden omtrent:

1) gedrag trip-mechanisme.
2) afhankelijkheid van de kracht op het anker van de ankerpositie.
3) verzadiging van het ijzer en invloed herstelveer.
4) invloed repulsie-kracht.

1) Indien een automaat is uitgerust met een trip-mechanisme zal na ontgrendeling van dit trip-mechanisme enige vertraging optreden voordat het kontakt geopend wordt. In eerste benadering lijkt het aannemelijk voor het trip-mechanisme een vaste vertragingstijd in het model op te nemen indien de kontakten door het trip-mechanisme geopend worden.

2) Uit het door Niemeyer afgeleidde kriterium voor kontaktopening blijkt dat de magnetische weerstand R_m konstant verondersteld is. Dit is niet korrekt, immers voor R_m kan geschreven worden:

$$R_m \propto \frac{x_l}{\mu_o A_a}$$

met: x_L : lengte luchtspleet
A_a : doorsnede slaganker

Hieruit blijkt dat R_m evenredig is met x_L. Deze afhankelijkheid is in het model niet meegenomen. Kwalitatief leidt dit tot een verlaging van R_m bij kleiner wordende x_L, hetgeen een kleinere waarde van Γ_{ic} tot gevolg zal hebben.

3) Verzadiging van het ijzer en invloed van de herstelveer zijn in [1] aan de orde geweest. Beide verschijnselen zullen tot een hogere waarden van Γ_{ic} leiden. Een kwantificering van deze invloed op Γ_{ic} heeft niet plaatsgevonden. Voor de SBE is in bijlage 5 een afschatting

gemaakt voor welke waarde van de stroom verzadiging gaat optreden. Met de aanname dat dit het geval zal zijn indien het B-veld groter wordt dan 1.6 T bleek dit voor de SBE type 1 bij een stroom van circa 400 A het geval te zijn. Voor de SBE type 2 was dat bij een stroom van circa 640 A.

4) Op het beweegbare kontakt wordt bij zowel de CMC-QL1 als de SBE ten gevolge van de stroombanen een afstotende kracht uitgeoefend. Immers de stroom door het beweegbare kontakt is tegengesteld gericht aan de stroom door de vaste runner. De invloed van deze repulsiekracht op het model laat zich dan pas gelden indien de kontakten door deze kracht geopend worden voordat de opening door middel van het trip-mechanisme dan wel slaganker plaatsvindt. Dit zal pas bij hoge momentane stroomwaarden het geval zijn. Voor de SBE is een ruwe schatting van deze momentane stroomwaarde gemaakt, welke in bijlage 6 is weergegeven. Hieruit blijkt dat bij een momentane stroomwaarde van circa 3 kA het beweegbare kontakt onder invloed van de repulsie-kracht geopend wordt.

4.3.2: Verlengen van de boog.

Gezien de mate van spreiding die in de metingen optrad blijkt dat het gedrag van de boog in deze fase niet eenvoudig te beschrijven is. De spreiding onstaat door herontstekingen die tijdens het verlengen van de boog optreden. Dit maakt de modellering lastig, omdat het aantal heronstekingen tijdens het verlengen van de boog alleen statistisch beschreven kan worden.
Ten aanzien van het model van Niemeyer kunnen een aantal opmerkingen gemaakt worden. In het model wordt de gehele fase van moment van kontaktopening tot de intrede van de boog tussen de boogplaatjes beschreven aan de hand van de boogbeweging. Dit is niet korrekt, daar na opening van de kontakten de boog gedurende de "Verharrzeit" op zijn ontstaanplaats blijft staan, en gedurende deze tijd wordt het gedrag van de boog door de voetpunten van de boog bepaald . Na de "Verharrzeit" begint de boog pas te bewegen. Het is dus korrekter het door Niemeyer voorgestelde kriterium voor het verlengen van de boog op t_v te laten beginnen. Bij alle metingen aan de CMC-QL1 is dit getest

door t_v uit de oscilogrammen te bepalen. Bij benadering is dat bij de CMC-QL1 goed mogelijk, immers zoals in paragraaf 2.3 is opgemerkt blijft de spanning over de CMC-QL1 direkt na kontaktopening gedurende korte tijd nagenoeg konstant. Daarna begint de spanning op te lopen waarbij de mate van stijging steeds toeneemt. t_v Wordt nu bepaald als zijnde dat tijdstip waarop de spanningsstijging een bepaalde waarde bereikt. Voor deze waarde is 120 V/ms aangehouden.
In tabel 4.6 zijn de resultaten weergegeven.

Tabel 4.6: Meetresultaten CMC-QL1, bepaling t_v en Γ_{vb}.

I_p [A]	cos ϕ	ψ [°]		i_v [A]	Γ_{vb} [A^2s^2]	Γ_{vb}/i_v^2 [$\times 10^{-6}s^2$]
891	0.20	0		571	0.19	0.58
			σ =	6	0.06	
1640	0.26	0		734	0.29	0.54
			σ =	16	0.07	
1529	0.35	ϕ		1020	0.42	0.40
			σ =	7	0.13	
2686	0.35	ϕ		1420	0.60	0.30
			σ =	32	0.15	
5524	0.54	ϕ		2064	1.66	0.39
			σ =	25	0.13	

Ook in tabel 4.6 blijkt Γ_{vb}/i_v^2 niet konstant te zijn over het onderzochte meetgebied. In figuur 4.6 is analoog aan figuur 4.1 het verband tussen Γ_{vb} en i_v weergegeven.

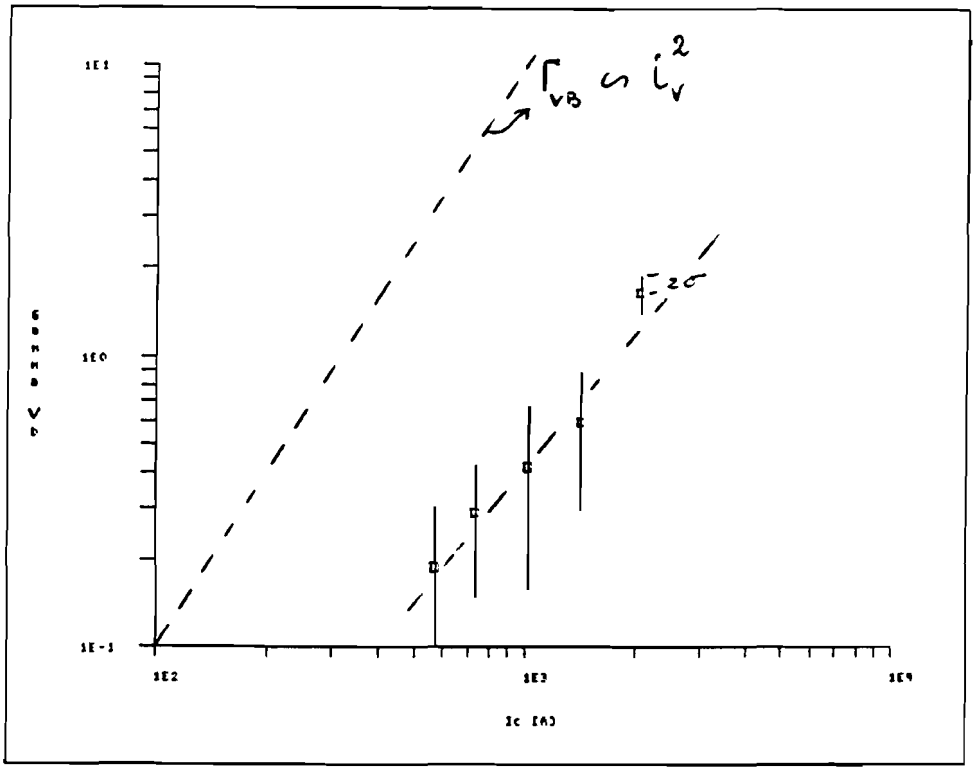


Fig.4.6: Verband Γ_{vb} en i_v.

In figuur 4.6 valt op dat de meetpunten bij benadering op een rechte lijn liggen, waarvan de helling ongeveer 1.6 bedraagt (grafisch bepaald). Het verband tussen Γ_{vb} en i_v blijkt dus ongeveer van een zelfde vorm te zijn als dat tussen Γ_{cb} en i_c, te weten:

$$\Gamma_{vb} \simeq \delta . i_v^{1.6}$$

Konkluderend kan worden opgemerkt dat aan de hand van de metingen geen bevestiging van het door Niemeyer voorgestelde kriterium gevonden is. Voor de CMC-QL1 bleken de meetresultaten bij benadering nog wel te voldoen, echter voor de SBE bleken de meetresultaten sterk afwijkend. Gezien het feit dat ook de in [1] uitgevoerde parameterafschatting voor de CMC-QL1 sterk afweek van de gemeten waarden, verdient het aanbeveling voor dit gedeelte van het model naar nieuwe kriteria te zoeken.

4.3.3: Opsplitsen van de boog tussen de boogplaatjes.

De aanname dat de boogspanning na opsplitsing van de boog tussen de

boogplaatjes konstant blijft blijkt voor de SBE redelijk goed te voldoen. Welliswaar werd er tussen metingen bij verschillende stromen enige verschillen gekonstateerd en bleek ook vaak in één dezelfde meting de boogspanning iets af te nemen bij het naar nul toe gaan van de stroom, in het algemeen waren deze afwijkingen relatief klein. Voor de CMC-QL1 is dit niet het geval, hetgeen waarschijnlijk te wijten is aan gedeeltelijk terugspringen van de boog. De door Niemeyer voorgestelde waarde van 28 V per deelboog lijkt aan de hoge kant. Voor de SBE werd een spanning van circa 18 V per deelboog gevonden. Daar bij de SBE op alle boogplaatjes voetpuntsporen werden aangetroffen, kan gesteld worden dat de boog zich volledig heeft opgedeeld.
Ten aanzien van de spanning per deelboog dient bedacht te worden dat deze spanning is opgebouwd uit een anode- en kathodeval, circa 15 tot 20 V, en een zuilspanning. De bijdrage van de zuilspanning zal afhankelijk zijn van de afstand tussen twee opeenvolgende boogplaatjes terwijl de anode- en kathodeval enigszins materiaalafhankelijk zullen zijn. Het verdient aanbeveling deze invloeden nader te beschouwen.

5: Literatuur-overzicht booggedrag.

Zoals uit hoofdstuk 4 gebleken is verdient het aanbeveling het gedeelte van het model van Niemeyer van kontaktopening tot intrede van de boog tussen de boogplaatjes nader te herzien. Gepoogd is om een ander model voor het verlengen van de boog te vinden. Hiertoe werd de boog in de boogkamer vergeleken met een zuiger in een cylinder met onder in de cylinder een uitstroomopening. In bijlage 7 is deze konfiguratie nader weergegeven. Deze vergelijking leidde in beginsel niet tot gewenste resultaten.
Om andere modelkriteria te ontwikkelen is het goed eerst de van belang zijnde processen in de periode van kontaktopening tot intrede van de boog tussen de boogplaatjes zoals boogverharren, kommutatie en boogbeweging over de runners nader te beschouwen. In dit hoofdstuk zal enige achtergrond informatie en bevindingen uit de literatuur met betrekking tot de genoemde processen gegeven worden.

5.1: Boogstartgedrag.

Zoals in paragraaf 2.2 opgemerkt is kan de tijdsduur dat de boog op de kontakten verblijft in 3 fasen verdeeld worden:

1) het verharren van de boog op zijn ontstaanspunten.
2) het lopen van de boog naar de rand van het beweegbare kontakt.
3) het kommuteren van het boogvoetpunt van het beweegbare kontakt naar de vaste runner.

Er zijn een tweetal hoofdredenen te noemen waarom deze tijd in de praktijk zo kort mogelijk dient te zijn, namelijk:

- een langere verblijftijd van de boog op de kontakten heeft een negatieve invloed op de doorlaatintegraal.
- een langere verblijftijd van de boog op de kontakten vergroot de mate van erosie van kontaktmateriaal en verkort daarmee de levensduur van de schakelaar.

In deze paragraaf zal een overzicht gegeven worden van wat in de literatuur over het boogverharren en over het kommuteren van het boogvoetpunt is gevonden. Omtrent het lopen van de boog naar de rand van het kontakt wordt naar paragraaf 5.2 verwezen. Overigens kan opgemerkt worden dat in het algemeen de tijdsduur van het lopen van de

boog naar de rand van het kontakt kort is ten opzichte van de tijdsduur van het boogverharren en het kommuteren.

5.1.1: Het verharren van de boog.

Indien de kontakten gesloten zijn loopt de stroom door een groot aantal gebiedjes waar de kontakten elkaar raken. Immers microskopisch gezien zijn de kontakten niet vlak maar enigszins ruw en hobbellig. Bij het openen van de kontakten neemt dit aantal gebiedjes snel af totdat er nog een enkel gebiedje over is. Ten gevolge van de grote stroomsterkte door dit enkele gebiedje zal de temperatuur sterk toenemen en mogelijk zal het kontaktmateriaal plaatselijk smelten. De voetpunten van de boog, die direkt na kontaktscheiding ontstaat, grijpen aan op deze sterk verwarmde dan wel gesmolten gebiedjes. Vervolgens zullen de voetpunten van de boog een bepaalde tijdsduur, de "Verharrzeit", op hun oorspronkelijke ontstaanplaats blijven staan.
Een fysische verklaring voor het optreden van het boogverharren leidde Burkhard [4] uit de beweging van het kathode-voetpunt af. Op het kathode-voetpunt van de boog worden door veldemissie elektronen uit het kontaktmateriaal vrijgemaakt. Het existeren van een door veldemissie bepaalde boog is afhankelijk van een aantal omstandigheden die de emissie bevorderen, zoals oppervlakte ruwheid en oxidatie van het oppervlak. Deze omstandigheden zijn optimaal op niet-gesmolten kontaktmateriaal. Indien echter een boog gedurende enige tijd op een plaats blijft staan, smelt het kontaktmateriaal zodat de omstandigheden voor veldemissie verslechteren. Zolang het kathode-voetpunt op een gesmolten stukje kontaktmateriaal blijft staan, is een snelle beweging van het kathode-voetpunt niet mogelijk.

Hoe het kathode-voetpunt nu wel een stuk niet-gesmolten kontaktmateriaal kan bereiken waar wel aan de voorwaarden voor een snelle voetpuntbeweging is voldaan kan aan de hand van figuur 5.1 verduidelijkt worden.

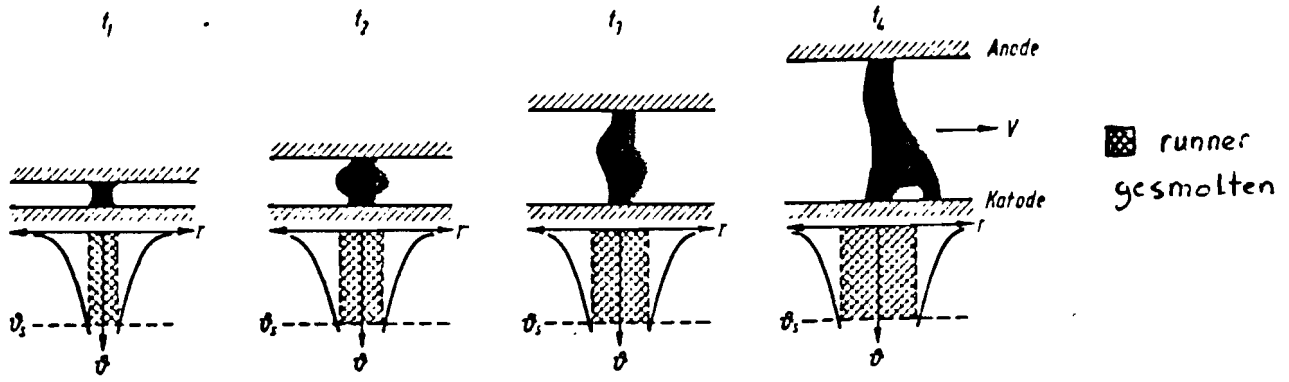


Fig.5.1: Schematische weergave kontaktopening [4].

In figuur 5.1 is schematisch het openen van de kontakten weergegeven. Op t = t_1 zijn de kontakten net geopend en heeft zich een boog gevormd waarvan de voetpunten in een smeltbad staan. Voor het kathode-voetpunt is de breedte van het smeltbad geaceerd weergegeven. Op tijdstip t = t_2 zijn de kontakten verder uit elkaar. Tevens is de breedte van het smeltbad toegenomen. Immers het kathode-voetpunt van de boog verhit het kontaktmateriaal steeds verder. Bij toenemende kontaktafstand snoeren de voetpunten van de boog in. Door het hierdoor ontstane axiale drukverval in de boog worden er plasmastralen gevormd welke vanuit zowel de anode als kathode worden weggeschoten. Vanwege hun hoge ionisatie-coefficient bepalen deze plasmastralen nu de vorm en de plaats van de boog (t = t_3). Door het aanwezige B-veld worden deze plasmastralen afgebogen totdat ze kontakt maken met verderop gelegen, niet-gesmolten kontaktmateriaal (t = t_4). Op het vaste elektrodenmateriaal wordt vervolgens een nieuw voetpunt gevormd. Op dit vaste elektrodenmateriaal is beter aan de voorwaarden voor veldemissie voldaan en zijn wel mogelijkheden aanwezig voor een snelle boogbeweging.

Onderzoek naar het boogverharren heeft zich in hoofdzaak gekoncentreerd op het vaststellen van de invloed die een aantal parameters op het boogverharren hebben.

Zo'n 30 jaar geleden kwamen Eidinger en Rieder [5] met de aanname dat voor een boogbeweging het B-veld een minimale kritische waarde B_{min} diende te overschreiden. Deze kritische waarde B_{min} zou afhankelijk zijn van:

- de elektrode-afstand a
- de stroom i
- elektrode materiaal en oppervlakte kondities

Getracht werd B_{min} te meten. Het bleek echter niet eenvoudig om deze waarde te definieren, omdat onder bepaalde omstandigheden geen eenduidig gedrag van de boog gevonden werd. Voor lage stromen (< 60 A) werd gevonden dat het produkt $B.I.a^2$ groter diende te zijn dan een konstante C, welke afhankelijk bleek van het elektrodenmateriaal en de tijdsduur tussen kontaktscheiding en het beginnen te bewegen van de boogvoetpunten. Voor boogbeweging op koper werd gevonden dat $B.a^3 > 3.10^{-4} T\ cm^3$. Hieruit werd afgeleid dat de boog niet kan gaan bewegen, zolang de afstand tussen de kontakten kleiner is dan een minimale afstand $a_{min}(B,I,..)$.
Bovenstaande resulteert in een "verharrzeit" t_v, volgens:

$$t_v = \frac{a_{min}}{v_k} \qquad (5.1)$$

met: a_{min} : minimale kontaktafstand
v_k : kontaktopeningssnelheid

Deze voorwaarde werd later door Müller [6] en Drücker [7] bevestigd aan de hand van door hun uitgevoerde experimenten. Anderen vonden echter dat a_{min} niet konstant is, maar afhankelijk is van de kontaktsnelheid v_k.
Hirose [9] mat (met gelijkstroom I = 0.9 ... 8.6 kA, B = 10 ... 100 mT, v_k = 0.3 ... 3.5 m/s) een sterke afname van a_{min} bij toenemende v_k voor v_k < 1 m/s, echter een kleine toename van a_{min} voor waarden van v_k groter dan 2 m/s.
Ten aanzien van het boogverharren wordt door Unger [10] opgemerkt dat t_v voor het anode- dan wel kathode-voetpunt ongeveer even lang is. Analoog aan de boogbeweging tussen runners, waarbij aangenomen wordt dat het gedrag van het kathode-voetpunt bepalend is voor de boogbeweging, beschouwt Unger voor het verharren ook het kathode-voetpunt als bepalend voetpunt. Uit de metingen van Unger (met gelijkstroom I = 90 ...1100 A, B = 30 ...350 mT, v_k = 0.1 ...1.6 m/s) bleek dat bij vergroting van het B-veld boven een bepaalde waarde t_v niet wezenlijk meer afneemt. Bij kleine waarden van het B-veld neemt t_v sterk toe. De waarde van het B-veld, waarboven t_v niet wezenlijk meer afneemt, hangt af van v_k. Bij toenemende waarde van v_k neemt deze

waarde van het B-veld af. Unger onderzocht het gedrag van t_v voor een aantal kontaktmaterialen, te weten Ag, AgCdO, AgNi, AgC, Cu en V. Ten aanzien van de afhankelijkheid van t_v van de stroom I bleek dat voor de materialen Cu en V voor $v_k > 0.25$ m/s t_v nagenoeg onafhankelijk van I was. Voor de overige materialen nam t_v toe met toenemende I (B-veld konstant). Voor t_v leidt Unger empirisch voor de kontaktmaterialen Ag, AgCdO, AgNi en AgC de volgende vergelijking af:

$$t_v = \text{konstante} \left[\frac{v_k . B}{I} \right]^{-\tau} \qquad (5.2\ a)$$

met konstante en τ van kontaktmateriaal afhankelijk.

Voor de kontaktmaterialen Cu en V:

$$t_v = \text{konstante} \left[v_k . B \right]^{-\tau} \qquad (5.2\ b)$$

met konstante en τ van kontaktmateriaal afhankelijk.

Belbel en Lauraire [11] onderzochten de invloed van v_k en het kontaktmateriaal op t_v voor installatie-automaten. Zij definieerde t_v als de tijdsduur tussen kontaktopening en een scherpe knik in de spanning over de automaat, zoals weergegeven in figuur 5.2.

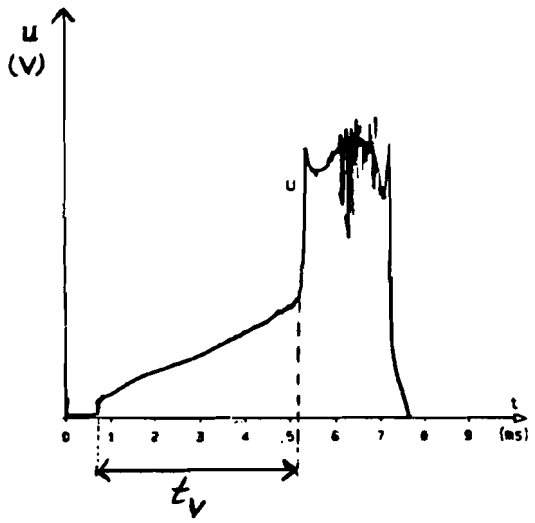


Fig.5.2: Bepaling t_v [11].

Beschouwd werden 3 soorten kontaktmateriaal, namelijk AgCdO, Ag en Cu. De kleinste waarden van t_v bleken op te treden voor Cu, de grootste voor AgCdO. Ten aanzien van de invloed van v_k op t_v werd gevonden dat

voor v_k < 3 m/s t_v sterk afneemt bij toenemende v_k. Echter voor v_k > 6 m/s neemt t_v nog maar weinig af bij verdere vergroting van v_k en blijkt t_v nagenoeg onafhankelijk te zijn van het kontaktmateriaal. Ten aanzien van de invloed van de stroom I op t_v bij v_k = 2.2 m/s bleek dat voor Cu t_v nagenoeg onafhankelijk van I is. Daarentegen bleek voor AgCdO t_v zeer sterk toe te nemen. Indien v_k werd vergroot tot 6 m/s bleek deze toename van t_v met I voor AgCdO nagenoeg verdwenen.

Uit genoemde resultaten blijkt dat t_v niet geheel bepaald is door de tijd die nodig is om een bepaalde minimale kontaktafstand a_{min} te bereiken. Naast dat a_{min} afhankelijk is van B, I en elektrode materiaal, blijkt er ook een afhankelijkheid van v_k te bestaan. In [12] wordt als verklaring hiervoor gegeven dat bij lage kontaktsnelheden de tijdsduur om een bepaalde a_{min} te bereiken relatief lang is, met gevolg een sterkere aantasting van het kontaktmateriaal door de boogvoetpunten. Hierdoor zal een grotere minimale kontaktafstand benodigd zijn om de boogbeweging te laten starten. Een groter kontaktsnelheid leidt tot geringere aantasting van het kontaktmateriaal waardoor de boogbeweging reeds bij kleinere waarden van a_{min} kan starten.

5.1.2: Kommutatie van de boogvoetpunten van het beweegbare kontakt.

Bij kommutatie van de boog van het bewegende kontakt naar de vaste runner moet het voetpunt van de boog ofwel een stap naar beneden maken (CMC-QL1) ofwel over een gat heen springen (SBE). Uit de literatuur is slechts weinig bekend over dergelijke kommutatieverschijnselen.
Uit het werk van Edinger en Rieder [5] blijkt dat het voor een anode-voetpunt geen probleem is over een gat in de runner heen te springen. Dit in tegenstelling tot het kathode-voetpunt, dat bij een ongehinderde voortbeweging over een runner een veel kontinuere voortbeweging te zien geeft dan het anode-voetpunt, welke zich springend voortbeweegt. Indien het kathode-voetpunt over een gat in de runner moet springen, treedt er als het ware een aarzeling op in de voortbeweging en klimt het kathode-voetpunt langs het gat naar beneden, totdat de boogzuil het stuk runner aan de andere zijde van het gat bereikt en er een nieuw kathode-voetpunt gevormd kan worden. In figuur

5.3 is het bovenstaande voor het anode- en kathode-voetpunt nader verduidelijkt.

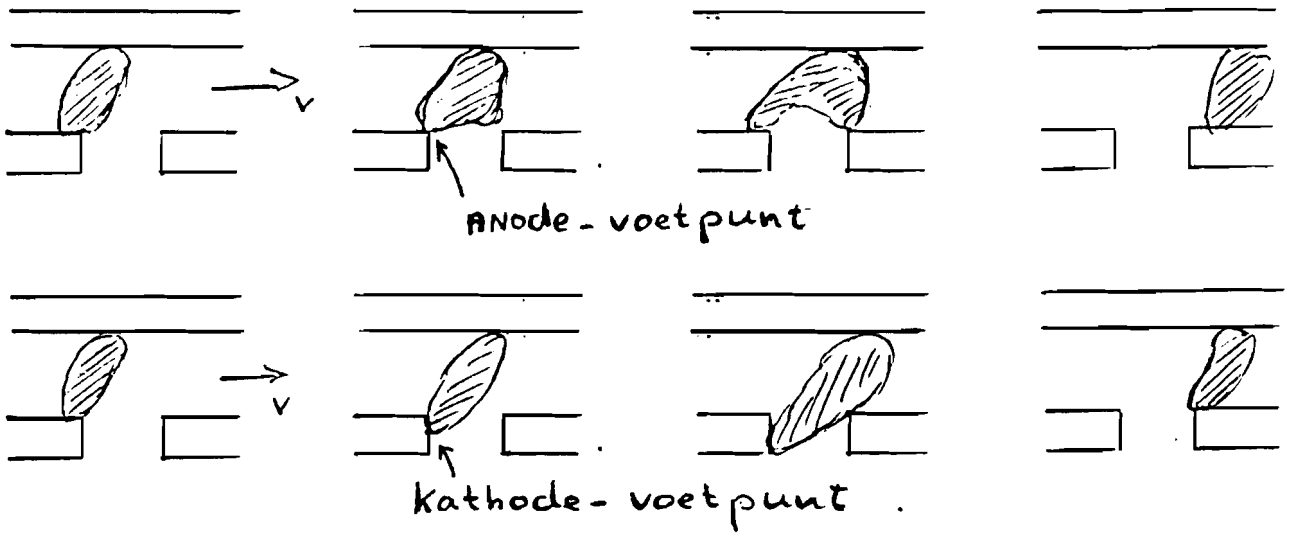


Fig.5.3: Passeren van een gat in de runner van anode- en kathode-voetpunt.

Behrens [13] beschouwde de invloed van de kommutatie aan de hand van de vergelijking van het schakelgedrag van de in figuur 5.4 weergegeven schakelaars.

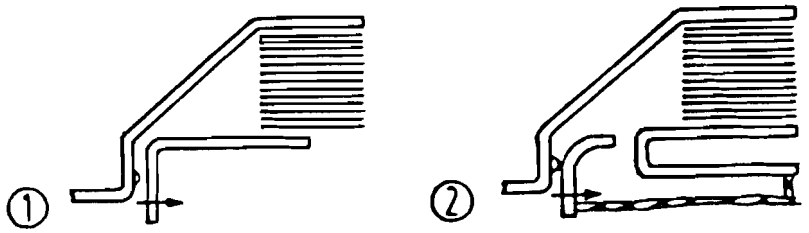


Fig.5.4: Schakelaar zonder kommutatie ① en met kommutatie ② [13].

Uit zijn experimenten (met I = 1 ... 10 kA) bleek dat indien de boog moest kommuteren er een vertraging van circa 0.1 ms optrad. Gesteld wordt dat dit ontstaat doordat het boogvoetpunt over een gat van 4 mm moet "springen" en doordat er bij het kommuteren een extra induktiviteit door de verandering van de stroombanen ingeschakeld wordt.

Een recentelijke beschouwing van kommutatie-verschijnselen is uitgevoerd door Wildmann [14]. Kommutatie van zowel het anode- als kathode-voetpunt over een stap op een runner of een gat in een runner werden onderzocht (runnermateriaal koper). In dit onderzoek wordt een

zogenoemde kommutatie-vertragingstijd t_d ingevoerd, gedefinieerd als het verschil in tijd t_κ die de boog nodig heeft om een bepaald interval te passeren, als het in dat interval over een stap of een gat moet kommuteren en de tijd $t_{||}$, die de boog nodig heeft om dat zelfde interval zonder obstakels te passeren:

$$t_d = t_\kappa - t_{||}$$

Daarbij wordt nog gesteld dat het beschouwde interval lang genoeg dient te zijn zodat de boogbeweging konstant zal zijn zowel voor als na de kommutatie over een stap of een gat.
Indien een boogvoetpunt over het midden van de runner naar een gat in of een stap op de runner toeloopt onderkent Wildmann twee kommutatie-principes, te weten:

- de boog-voetpunt beweegt naar de buitenkant van de runner en kommuteert.
- de boog-voetpunt kommuteert vanaf het midden van de runner.

Indien de boog-voetpunt naar de buitenkant van de runner beweegt en kommuteert is t_d wezenlijk groter dan indien het boog-voetpunt vanaf het midden van de runner kommuteert.
Ten aanzien van het kommuteren over een stap op de runner vindt Wildmann in het algemeen dat t_d voor kommutatie van het anode-voetpunt kleiner is dan t_d voor kommutatie van het kathode-voetpunt. t_d Lag in de grootte orde van 0.1 ms. Verder bleek uit zijn metingen (met staphoogte = 0.5 ... 3 mm, I = 0.2 ... 1 kA, B = 10 ... 50 mT):
- Bij vergroting van de hoogte van de stap nam zowel voor het anode- als voor het kathode-voetpunt de kans toe dat de kommutatie vanaf de buitenkant van de runner plaatsvond met tot gevolg een toename van t_d.
- Bij vergroting van het B-veld nam t_d af.
- Bij vergroting van de stroom I met B/I = konstant, nam t_d af.

Ten aanzien van kommutatie over een gat in de runner bleek ook dat t_d voor het anode-voetpunt kleiner was dan t_d voor het kathode-voetpunt. Ook hier lag t_d in de orde groote van 0.1 ms. Andere opvallende waarnemingen waren (breedte gat 1 ... 5 mm, diepte gat 2 ... 7 mm, I = 0.2 ... 1 kA, B = 10 ... 50 mT):
- Voor vergroting van de breedte van het gat van 1 tot 5 mm bleek t_d voor het kathode-voetpunt niet wezenlijk te veranderen, terwijl voor het anode-voetpunt bij vergroting van de breedte boven 3 mm t_d

toeneemt.
- Vergroting van de diepte bleek alleen invloed te hebben op t_d voor het kathode-voetpunt. Bij kleinere diepten bleek t_d kleiner dan bij wat grotere diepten.
- Vergroting van het B-veld leidde tot kleinere waarden voor t_d.
- Bij vergroting van de stroom I met B/I = konstant, nam t_d af.

Resumerend kan opgemerkt worden dat er ten gevolge van de kommutatie een vertraging optreedt, welke in de orde grootte van 0.1 ms ligt. Verandering van parameters, zoals door Wildmann is gedaan, heeft invloed op de door de kommutatie veroorzaakte vertragingstijd t_d, echter deze blijft in het gebied tussen 0.01 ms en 1 ms.

5.1.3: De "Verweilzeit".

In de literatuur zijn metingen naar de zogenoemde "Verweilzeit" t_w te vinden. Met t_w wordt de totale tijdsduur vanaf het ontstaan van de boog tot de definitieve afvoer van de boog uit de kontaktzone. t_w Omvat dus de "Verharrzeit" en de initiële boogbewegingstijd, inklusief kommutatie van het bewegende kontakt.
Lindmayer [15] bekeek de invloed van het B-veld, de stroom, het materiaal van de kamerwanden en het kontaktmateriaal op t_w. Uit zijn metingen (met I = 1 ... 10 kA, B = 0 ... 100 mT) bleek:
- t_w neemt af bij vergroting van het B-veld.
- t_w neemt toe bij vergroting van de stroom.
- bij materiaal van de kamerwanden wordt onderscheid gemaakt tussen gassende materialen en niet-gassende materialen. Het al dan niet gassen van het wandmateriaal heeft nauwelijks invloed op t_w.

Op zich zijn deze resultaten niet verrassend, immers bij vergroting van het B-veld nemen zowel t_v als t_d af, met gevolg dat t_w afneemt en bij vergroting van de stroom (B-veld konstant) neemt t_v toe wat tot een grotere t_w leidt.

5.2: Boogbeweging over de runners.

Na het boogverharren en het kommuteren beweegt de boog tussen twee runners onder invloed van een door de stroom toe- en afvoer opgewekt magneetveld naar de boogplaatjes. In deze paragraaf zal getracht worden deze fase nader te belichten. Eerst zal een eenvoudige modellering van de boogbeweging besproken worden. Daarna zal kort de kwalitatieve invloed die een groot aantal parameters op de boogbeweging hebben belicht worden. De voor deze paragraaf gebruikte achtergrondinformatie is, tenzij anders opgemerkt, te vinden in [16].

5.2.1: Het geleidende cylindermodel.

Een eenvoudig model voor de beweging van de boog is het zogenoemde "geleidende cylindermodel". De beweging van de boog wordt hierbij vergeleken met het gedrag van een vaste cylinder in een transversale gasstroom. In de meest eenvoudige vorm wordt de boogbeweging bepaald door de drijvende Lorentzkracht F_L en de remmende wrijvingskracht F_D:

$$F_L = F_D \qquad (5.3)$$

Voor F_L kan geschreven worden:

$$F_L = B.i.l$$

met: B : magnetische induktie ter plaatse van de boog
i : stroom door de boog
l : lengte van de boog

Voor F_D kan analoog aan de stromingsweerstand van een starre cylinder in een transversale gasstroom geschreven worden:

$$F_D = \frac{1}{2}\,\rho.v_b^2.D.l.C_d$$

met ρ : dichtheid omringende gas
v_b: snelheid van de boog
D : effektieve boogdiameter
l : lengte van de boog
C_d: dragcoefficient (0.3 - 1 voor lucht)

Substitutie van deze uitdrukkingen voor F_L en F_D in (5.3):

$$v_b = \sqrt{\frac{2.B.i.}{\rho.D.C_d}}$$

$$= K.i^{0.5}.B^{0.5}.D^{-0.5}.\rho^{-0.5} \qquad (5.4)$$

met: K : konstante

Uit (5.4) volgt dat voor een boogbeweging waarbij het B-veld door de aan- en afvoer van de stroom i wordt opgewekt v_b lineair van i afhangt. Immers in dat geval is B evenredig met i.
Experimenteel is (5.4) geverifieerd en in grote lijnen bevestigd. Zo werd door Guile en Sloot [17] gevonden:

$$v_b = K.i^{0.4}.B^{0.6}.a^{-0.4}.\rho_a^{-0.5} \qquad (5.5)$$

met: K : konstante (4.6 voor lucht)
a : elektrodenafstand
ρ_a: $\frac{\text{dichtheid bij gegeven druk}}{\text{dichtheid bij atmosferische druk}}$

Uit het bovengenoemde zou afgeleid kunnen worden dat de voortbeweging van de boog in een transversaal B-veld goed te doorgronden is. Dit is echter geenszins het geval, in het bijzonder niet indien men de boogverschijnselen in een schakelaar beschouwt en bedenkt dat:
- de boog zich slechts zelden kontinu met dezelfde snelheid voortbeweegt. Ten gevolge van heronstekingen wisselen voortbeweging en stilstand van de boog elkaar vaak af.
- ten gevolge van de geometrie van runners en stroomvoerende delen van een schakelaar zal het B-veld ter plaatse van de boog niet homogeen zijn.
- in installatie-automaten is de boogkamer met wanden afgeloten. Afhankelijk van de wandafstand en het wandmateriaal wordt de boogbeweging hierdoor beïnvloed. Vooral de remmende stromingsweerstand is afhankelijk van de wandafstand. Onderscheid kan gemaakt worden tussen die situaties, waarbij de wandafstand s groter is dan de diameter D van boog, zoals die zou zijn indien er geen kamerwanden aanwezig waren, en waarbij de wandafstand s kleiner is dan deze

diameter D.

1) s > D

Bij de voortbeweging moet de boog een met de boogdiameter D evenredige hoeveelheid lucht voor zich uit schuiven en gelijktijdig lucht van achteren af aan zuigen. Hierdoor ontstaan een stromingsweerstand. Tevens zal er lucht tussen de boog en de kamerwand door kunnen stromen hetgeen ook een stromingsweerstand veroorzaakt.

2) s < D

Indien de wandafstand s klein is, wordt de boogdoorsnede bandvormig zoals in figuur 5.5 is weergegeven.

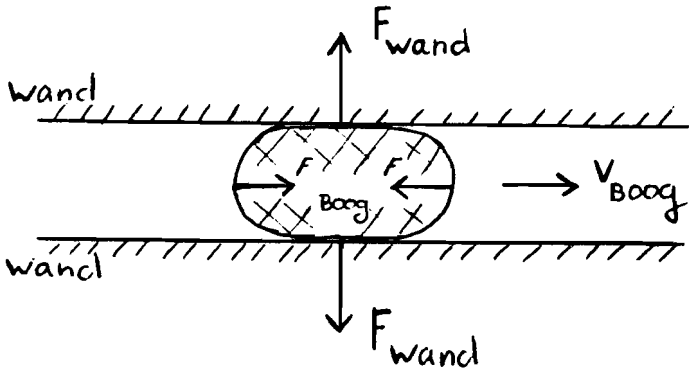


Fig.5.5: Bandvormige boog tussen wanden [16].

Ten gevolge van het elkaar aantrekken van de stroombanen ontstaat er een kracht F_W op de de wanden, zoals in figuur 5.5 is aangegeven. Hiervoor kan bij benadering volgens Burkhard [18] geschreven worden:

$$F_W \propto \frac{\mu_0}{8} . l . \frac{i^2}{s} \qquad (5.5)$$

met: l : lengte van de boog
s : wandafstand

Volgens Amft [19] treedt nu in plaats van de stromingsweerstand ten gevolge van de luchtstroom tussen de boog en de wand een door de kracht F_W veroorzaakte wrijvingsweerstand tussen de boog en de wand op. Voor de wrijvingsweerstand R_W kan geschreven worden:

$$R_W \simeq \mu_W . F_W \qquad (5.6)$$

met: μ_W: wrijvingscoëfficient

Substitutie van (5.5) in (5.6) levert voor de wrijvingsweerstand R_W op:

$$R_W \simeq \mu_W . \frac{\mu_0}{8} . l . \frac{i^2}{s} = c_W . \frac{i^2}{s} \qquad (5.7)$$

met: c_W: konstante

Als gevolg van dit effekt kan in eerste benadering voor de gekorrigeerde boogsnelheidsvergelijking genomen worden:

$$v_b \simeq K \sqrt{B.i - c_W \frac{i^2}{s}} \qquad (5.8)$$

met: K : konstante

Uit dit verband volgt dat in die gevallen, waarbij de boog door een permanent B-veld wordt voortbewogen, de boogsnelheid bij grote stromen naar nul gaat. Bij die konstrukties, waarbij het B-veld door de stroom zelf wordt opgewekt en het B-veld dus evenredig is met i, zal dit probleem veel minder spelen.
Het verband volgens vergelijking (5.8) is door experimenten kwalitatief bevestigd. Zo werd door Tajev [20] empirisch gevonden:

$$v_b \simeq 5. \sqrt{H.i - 0.08. \frac{i^2}{s}} \qquad (5.9)$$

met: H : magnetisch veld

Door Guile en Sloot [17] werd (5.8) weliswaar deels kwalitatief bevestigd, echter uit hun experimenten bleek dat de boogsnelheid soms plotseling afnam bij toename van de stroom. Gezien het feit dat dit verschijnsel zowel bij elektrodenkonfiguraties met en zonder wanden optrad, suggereerden zij dat plasmastralen vanuit de voetpunten een sterke rol van betekenis zouden spelen.

5.2.2: Parameters welke de boogbeweging beïnvloeden.

De beweging van een boog tussen twee elektroden is van een aantal parameters afhankelijk, zoals:

- de optredende boogbewegingsvorm
- gasdruk
- boogstroom
- elektrodenafstand
- elektrodenmateriaal
- elektroden-oppervlak kondities
- elektrodenkonfiguratie
- heronstekingen

Om de lezer een idee te geven omtrent de optredende beïnvloeding van de boogbeweging door de genoemde parameters wordt in het volgende een korte bespreking gehouden over de kwalitatieve invloed van de parameters.

Boogbewegingsvormen.

Bij de beweging van de boog kunnen meerdere bewegingsvormen optreden. Ruwweg zijn deze in 5 groepen te verdelen, te weten:

- high velocity mode
- medium velocity mode
- discontinuous velocity mode
- low velocity mode
- retrograde velocity mode

Bij de high velocity mode treden de hoogste snelheden op. Op de kathode wordt een fijn vertakt spoor achtergelaten, waarbij nauwelijks smeltresten aanwezig zijn. Op de anode wordt (mits de boogbeweging in atmosferische lucht plaatsvindt) een gelijkmatig dun oxidespoor achtergelaten. Hoogstwaarschijnlijk wordt het kathode-mechanisme hoofdzakelijk bepaald door veldemissie. De voetpuntbeweging vormt hier geen belemmering voor de totale boogbeweging, zodat de boogbeweging bepaald wordt door de verplaatsingsmogelijkheden van de boogzuil. Het geleidende cylindermodel voldoet dan ook goed.
Bij de medium velocity mode zijn na boogpassage verscheidene smalle evenwijdige smeltsporen op de kathode te onderkennen. Vermoedelijk is

hier sprake van thermo-veldemissie. Het anodespoor is gelijk aan dat bij de high velocity mode. Ook nu voldoet het geleidende cylindermodel goed.

De discontinuous velocity mode kenmerkt zich door een onregelmatige boogbeweging, waarbij de voetpunten met sprongen voortbewegen. Karakteristiek voor deze bewegingsvorm is het optreden van sterke plasmastralen, welke wegschieten vanuit de voetpunten. Terwijl een voetpunt gefixeerd is, wordt de zuil en de plasmastralen afgebogen door het transversale magneetveld, totdat er een nieuw voetpunt gevormd is. Bij overgang van de medium velocity mode naar de discontinuous velocity mode treedt de sprongvormige voetpuntsbeweging het eerst aan de anode op, terwijl het kathode-voetpunt nog kontinu beweegt. Ondanks de onregelmatige bewegingsvorm blijkt het geleidende cylindermodel voor de discontinuous velocity mode nog vaak op te gaan.

Bij de low velocity mode wordt de boog weer op een kontinue manier verplaatst, met snelheden welke grootte-ordes lager liggen dan de waarden welke volgens het geleidende cylindermodel verwacht zouden worden. Op beide elektroden wordt nu een kontinu breed smeltspoor achtergelaten.

Tenslotte treedt bij de retrograde velocity mode het opmerkelijke verschijnsel op dat de boog tegen de lorentzkracht in beweegt. Deze bewegingsvorm treedt voornamelijk op bij lage drukken van het omgevingsgas.

Gasdruk.

Uit de bespreking van het geleidende cylindermodel volgt uit (5.4) voor het verband tussen de boogsnelheid v_b en de gasdruk P:

$$v_b \sim \left[P \right]^{-0.5}$$

Dit is gemakkelijk in te zien indien men bedenkt dat voor een gas in eerste benadering geldt:

$$P = \frac{\rho}{m} R.T$$

met: ρ : dichtheid gas
m : molekuulgewicht gas
R : universele gaskonstante
T : temperatuur

Omschrijven van deze vergelijking naar ρ en substitutie in (5.4) levert het genoemde verband tussen de boogsnelheid v_b en de gasdruk P op. Overigens dient opgemerkt te worden dat bij afnemende druk de boogsnelheid niet onbeperkt blijft toenemen. Beneden een kritische druk zal de boogbewegingsvorm overgaan in de low velocity mode of zelfs in de retrograde velocity mode, hetgeen tot een sterke verlaging van de boogsnelheid leidt.
Drukverhoging in de boogkamer kan ontstaan door een tweetal verschijnselen, te weten drukgolven welke ontstaan ten gevolge van de boogbeweging en drukverhoging welke plaatsvindt als gevolg van luchtverhitting door de boog. In installatie-automaten zal de boogsnelheid niet al te hoog zijn, zodat het optreden van drukgolven ten gevolge van de boogbeweging beperkt zal zijn.

Boogstroom.

Volgens het geleidende cylindermodel zou de boogsnelheid moeten toenemen bij verhoging van de stroom. Dit blijkt echter niet in alle gevallen op te gaan. Soms leidt stroomverhoging tot lagere waarden van de boogsnelheid. Dit hangt samen met het feit dat het optreden van diverse boogbewegingsvormen afhangt van een kombinatie van het magneetveld en de stroom.
In figuur 5.6 is schematisch weergegeven hoe het B,i-diagram kan worden verdeeld in gebieden met verschillende boogbewegingsvormen.

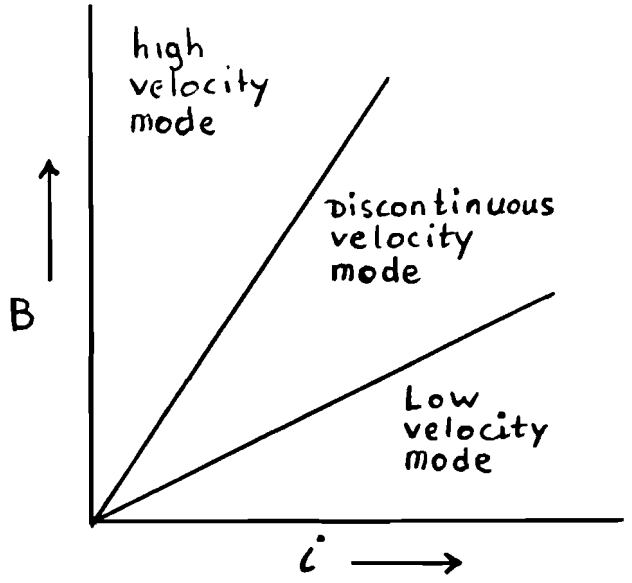


Fig.5.6: B,i-diagram met verschillende boogbewegingsvormen [16].
(medium velocity mode bij high velocity mode gevoegd)

Elektrodenafstand.

Volgens (5.5) neemt de boogsnelheid toe bij afnemende elektrodenafstand. Immers de lengte l van de boog is een maat voor de elektrodenafstand. Oorzaak hiervan is daarin gelegen, dat bij afnemende elektrodenafstand ook de effektieve boogdiameter afneemt, hetgeen leidt tot een kleinere remmende wrijvingskracht. Tevens zal, in die gevallen waarbij het magneetveld door de elektrodenstroom zelf wordt opgewekt, bij afnemende elektrodenafstand het gemiddelde magneetveld toenemen.
Echter beneden een kritische elektrodenafstand zal een overgang optreden naar de low velocity mode, met een sterke vermindering van de boogsnelheid tot gevolg.

Elektrodenmateriaal.

Het blijkt niet mogelijk een indeling te maken naar elektrodenmaterialen en bijbehorende boogsnelheden. Dit wordt veroorzaakt door de sterke invloed van de oppervlakte kondities van het elektrodenmateriaal. Globaal kan gezegd worden dat boogbewegingen onder invloed van een extern veld sneller blijken op dia-magnetisch materiaal dan op ferro-magnetisch materiaal. Wordt de boogbeweging daarintegen door het eigen veld van de runners veroorzaakt, dan blijkt de snelheid op ferro-magnetisch materiaal het grootst.

Elektroden-oppervlak kondities.

Bij oppervlakte kondities kan gedacht worden aan oppervlakte ruwheid en oppervlakte lagen.
Ten aanzien van oppervlakte ruwheid kan opgemerkt worden dat de boogbeweging door enige oppervlakte ruwheid bevorderd wordt. Op gepolijste dan wel zeer ruwe oppervlakken neemt de beweeglijkheid van de boogvoetpunten weer af. Kwalitatief is het verband tussen oppervlakte ruwheid en voetpuntsnelheid in figuur 5.7 weergegeven.

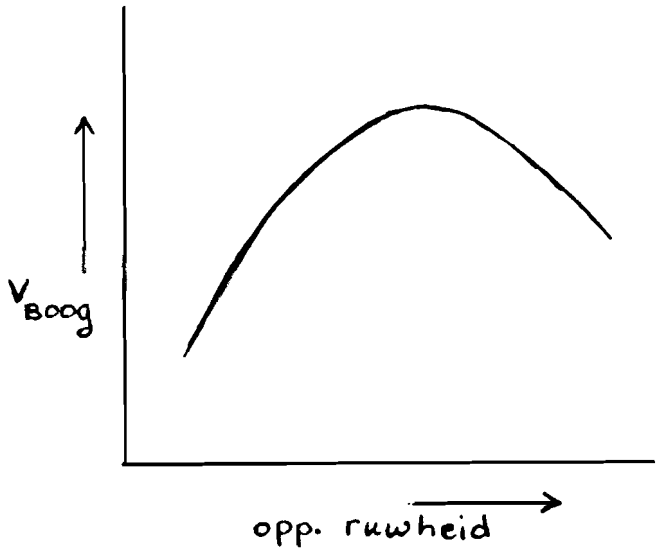


Fig.5.7: Kwalitatief verband oppervlakte ruwheid en voetpuntsnelheid [3].

Bij oppervlakte lagen op het elektrodenmateriaal kan gedacht worden aan oxidelagen. In het algemeen kan gesteld worden dat oxidelagen de boogvoetpuntsbeweging begunstigen.

Elektrodenkonfiguratie.

Vooral in situaties waarbij het drijvende magneetveld door de stroom door de elektroden zelf wordt opgewekt, wordt de boogbeweging sterk beïnvloed door de elektrodenkonfiguratie. Hierbij kan gedacht worden aan de vorm en afmetingen van de elektroden en de plaatsing van de elektroden ten opzichte van elkaar.
Bij een boogbeweging tussen twee koperen runners met rechthoekige doorsnede hebben de voetpunten vaak de neiging om langs de rand van de runner te gaan lopen, hetgeen resulteert in een lagere voetpuntsnelheid. De reden hiervan kan aan de hand van figuur 5.8 verduidelijkt worden.

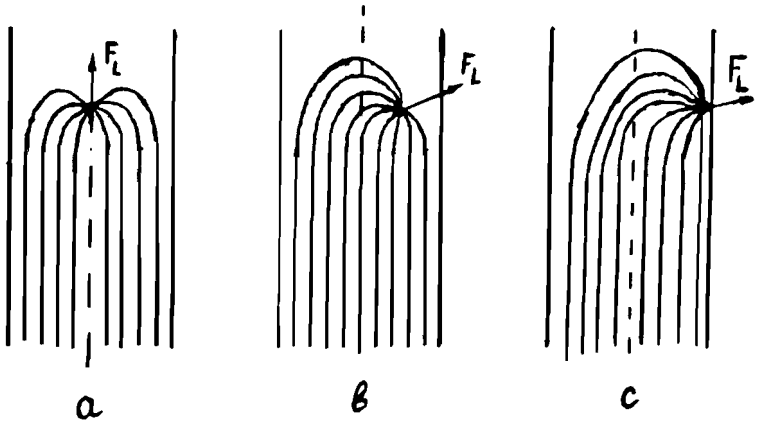


Fig.5.8: Invloed stroombanen op drijvende lorentzkracht dichtbij de voetpunten [8].

Zolang het voetpunt zich over het midden van de runner beweegt (figuur 5.8.a) is de lorentzkracht in de bewegingsrichting van het voetpunt gericht. Beweegt het voetpunt zich echter niet in het midden van de runner (figuur 5.8.b) dan onstaat er tengevolge van de stroombanen een lorentzkracht welke naast een komponent in de richting evenwijdig aan de runner een komponent heeft welke naar de rand van de runner gericht is. Het voetpunt zal dan verder naar de rand gedreven worden. Beweegt het voetpunt zich vervolgens over de rand (figuur 5.8.c) dan kan aan de hand van de lorentzkracht afgeleid worden dat de snelheid van het voetpunt in de gewenste richting over de runner afneemt ten opzichte van de situatie dat het voetpunt in het midden van de runner loopt.
Door het toepassen van speciale runnervormen kan men bereiken dat het voetpunt altijd stabiel ongeveer in het midden van de runner blijft lopen.
Bij installatie-automaten worden vaak divergerende runners toegepast, om de booglengte en daarmee de boogspanning te vergroten. Om de boogspanning zo snel mogelijk te doen stijgen, ligt een grote openingshoek α voor de hand. Echter met vergroting van de openingshoek α neemt de kans op herontstekingen toe, zoals in figuur 5.9 is verduidelijkt.

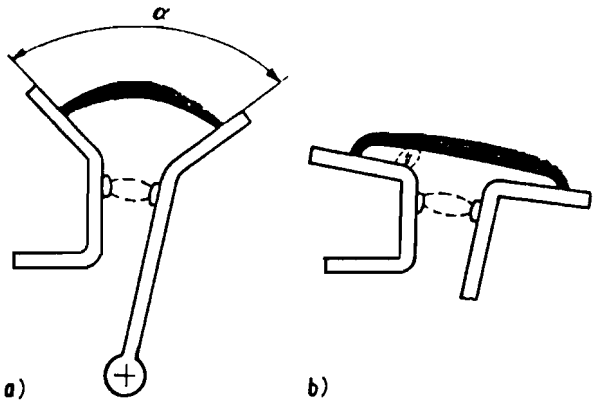


Fig 5.9: Herontsteking bij divergerende runners [18].

De mate van heronstekingen is naast de openingshoek α ook afhankelijk van de stroom I. Vergroting van I leidt tot een vergrote kans op heronstekingen. In figuur 5.10 is de spanningsstijging in een boogkamer met divergerende runners weergegeven als funktie van de stroom I met de openingshoek α als parameter. Hieruit blijkt dat vergroting van α tot lagere waarden van de stroom I leidt waarbij door herontstekingen nagenoeg geen spanningsstijging kan plaatsvinden.

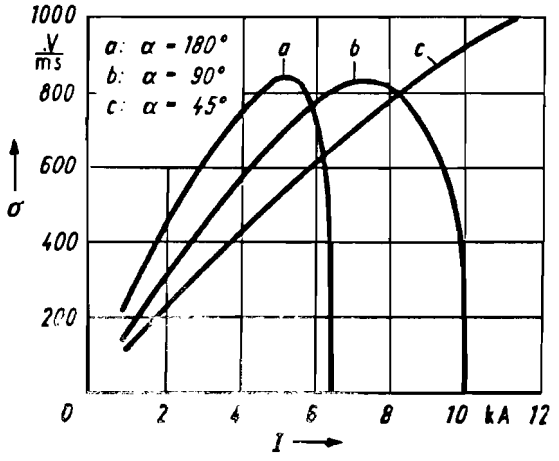


Fig.5.10: Spanningsstijging in een boogkamer met divergerende runners bij verschillende waarden van de openingshoek α [18].

Herontstekingen.

De gemiddelde snelheid waarmee de boog over de runners loopt wordt vaak verlaagd door het optreden van herontstekingen in de achter de boog liggende ruimte. Vooral bij divergerende runners neemt de kans op heronstekingen toe. Om de kans op heronstekingen te verkleinen dient er een snelle deionisering plaats te vinden in de door de boog doorlopen ruimte. Dit kan gebeuren door het toevoeren van koele lucht of door de gassen achter de boog zo snel mogelijk af te koelen door het aanbrengen van zijwanden. Globaal kan gesteld worden dat de karakteristieke tijd welke nodig is voor het afkoelen van de hete gassen die in de door de boog doorlopen ruimte aanwezig zijn evenredig is met het kwadraat van de wandafstand.

5.3: Opsplitsen van de boog tussen de blusplaatjes.

Om de boog tussen de boogplaatjes te doen opsplitsen, zijn extra krachten nodig, die de boog als het ware het bluspakket indrijven. Om dit te bewerkstelligen, wordt meestal gebruik gemaakt van ijzeren boogplaatjes. Dat hierdoor extra krachten ontstaan laat zich verklaren uit het feit dat het magnetische veldlijnen rond een stroomvoerende geleider (de boog) door het magnetisch veel beter dan lucht geleidende ijzer gaan lopen. Als het ware wordt de boog door het bluspakket aangezogen.
De opsplitsing van de boog kan aan de hand van een aantal stappen beschreven worden. Als de boog het bluspakket bereikt heeft leidt kontakt tussen de boog en de relatief koude boogplaatjes tot extra koeling. Hierdoor snoert de boog enigszins in en de spanning over de boog stijgt. Deze insnoering zal het sterkst plaatsvinden op die plaatsen waar de boog met de boogplaatjes in kontakt komt, terwijl de boogdelen tussen de boogplaatjes neigen zich tussen de boogplaatjes uit te bollen. Hierdoor ontstaat een plasmastroming welke in de ruimte tussen de plaatjes gericht wordt, zoals in figuur 5.11 is weergegeven.

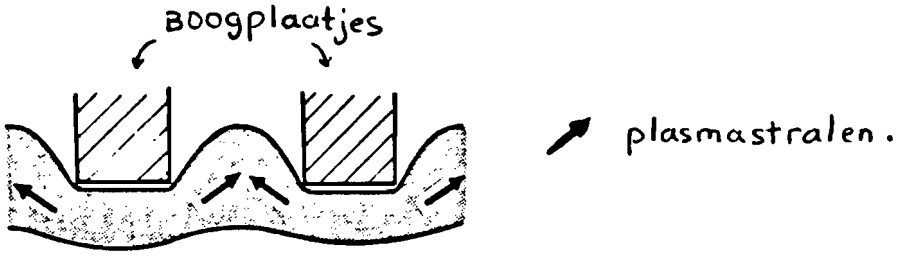


Fig.5.11: Schematische weergave ontstaan plasmastromen [18].

Ten gevolge van deze plasmastralen onstaat er een lusvorming van de boog in de ruimte tussen de boogplaatjes, zoals in figuur 5.12 aangegeven is.

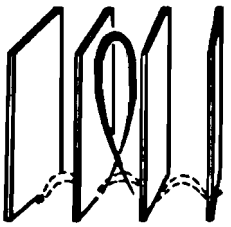


Fig.5.12: Lusvorming van de boog tussen de boogplaatjes [18].

Op het moment dat de spanningsval over de lus groter is geworden dan de spanning welke nodig is voor de vorming van een anode- en kathode-voetpunt op de boogplaatjes, wordt de lus onder vorming van nieuwe voetpunten kortgesloten.
Uit het bovenstaande blijkt dus dat de boog pas opsplitst tussen de boogplaatjes, indien de spanning over de boog tussen twee boogplaatjes groter is dan de spanning over de opgesplitste boog. Dit blijkt ook uit het spanningsverloop over de installatie-automaten, immers bij opsplitsing van de boog werd steeds een piek waargenomen waarna de spanning naar een iets lagere waarde zakt.

6: Metingen naar het booggedrag.

In dit hoofdstuk worden een aantal metingen besproken welke zijn verricht aan de SBE-type 2 naar het booggedrag. Aanleiding tot deze metingen vormde onvoldoende bekendheid met een aantal boogverschijnselen als boogverharren, kommuteren van het boogvoetpunt van het bewegende kontakt op de vaste runner en de voortbeweging van de boog over de runners. Ten behoeve van de modellering is meer bekendheid met deze processen gewenst, gezien de beinvloeding hiervan op het spanningsverloop over de automaat.

Een drietal meetmethoden zijn toegepast, te weten:

1) Met behulp van een rogowskispoel is het kommutatietijdstip en de kommutatieduur gemeten.
2) Door de spanning over een runner te meten bleek het mogelijk de start en het einde van de boogbeweging te bepalen, waarmee de gemiddelde snelheid van een boogvoetpunt berekend kon worden.
3) Met een set van vier optische fibertjes is nagegaan of er op optische wijze aan de boogbeweging gemeten kon worden.

Achtereenvolgens zullen deze drie meetmethoden nader uitgewerkt en de resultaten besproken worden.

6.1: Meting van het kommutatietijdstip en de kommutatieduur.

Met behulp van een rogowskispoel is het kommutatietijdstip en de kommutatieduur gemeten volgens de in figuur 6.1 weergegeven opstelling.

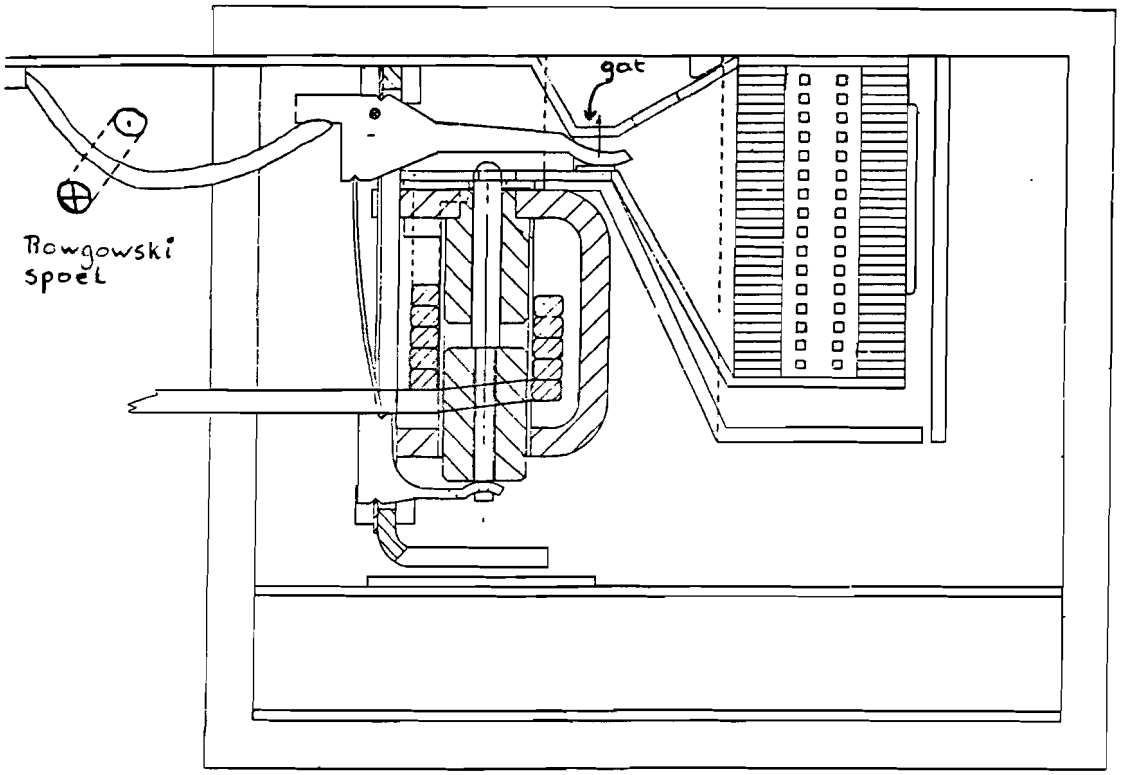


Fig.6.1: Meting kommutatie.

Bij de SBE is dit mogelijk daar het bewegende kontakt door een gat in de runner, waarop de boog moet kommuteren, heen beweegt zonder met deze runner elektrisch kontakt te maken.
Een rogowskispoel is een lange toroidale spoel die rondom een geleider wordt gebogen, zodat begin en einde elkaar ontmoeten. Daarvoor geldt:

- de windingen hebben een konstant oppervlak A.
- de windingen liggen op gelijke afstand van elkaar.
- het primaire H-veld verandert weinig van winding tot winding noch over het oppervlak A.

Onder deze voorwaarden kan de uitgangsspanning u van de rogowskispoel geschreven worden als een som van individuele induktie-spanningen:

$$u = - \sum_{1}^{N} A \frac{dB}{dt}$$

met: u : uitgangsspanning

N : aantal windingen

A : oppervlak winding

Daar de spoel rondlopend en gesloten is kan hiervoor bij benadering geschreven worden:

$$u = - \frac{d \oint A\, n\, \bar{B}.d\bar{l}}{dt}$$

met: n dl : aantal windingen per spoelelement dl

n : aantal windingen per lengte-eenheid ($N/2\pi r$)

ofwel:

$$u = - n A \mu_o \frac{d}{dt} \oint \bar{H}.d\bar{l} = - n A \mu_o \frac{d}{dt} \left[i_{omsloten} \right] \qquad (6.1)$$

Met een rogowskispoel wordt dus (mits er geen integrator gebruikt wordt) de stroomverandering di/dt gemeten. Voor de meting van kommutatie van de boog van het bewegende kontakt naar de vaste runner is dit uitermate geschikt, daar de kommutatie gepaard zal gaan met een grote di/dt-waarde.

6.1.1: Karakteristieke meting van de kommutatie.

In figuur 6.2 is de uitgangsspanning van de rogowskispoel bij een afschakeling van de SBE weergegeven.

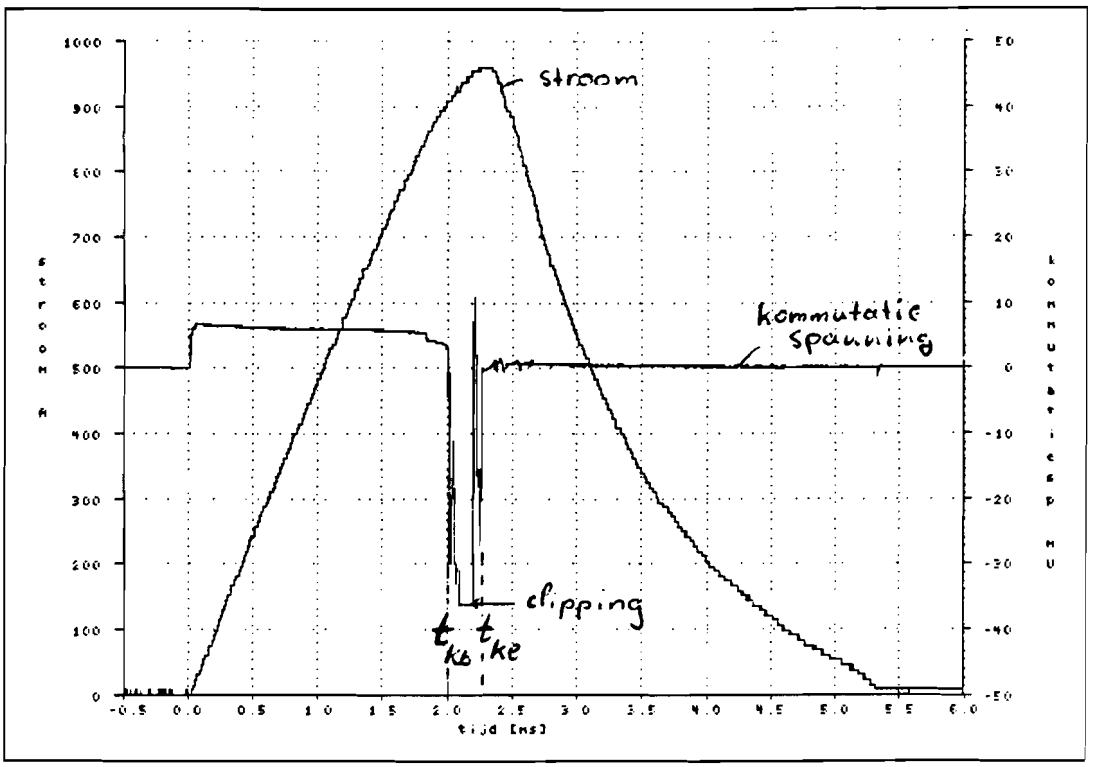


Fig.6.2: Uitgangspanning rogowskispoel alsmede stroom door de SBE bij afschakeling (t_{kb} = begin kommutatie, t_{ke} = eind kommutatie).

In figuur 6.2 valt het volgende op:

- op moment van inschakelen van de stroom is het kontakt nog gesloten en zal het stroom gaan voeren, waarvan de di/dt door de rogowskispoel wordt gedetekteerd.
- op moment van kommutatie vertoont de uitgangsspanning van de rogowskispoel een grote waarde (welke overigens uit het bereik van de versterker loopt) in het tijdsinterval t_{kb} tot t_{ke} korresponderend met een grote di/dt verandering.

6.1.2: Kontrole kommutatiemeting.

Of de meting met het rogowskispoeltje korrekt is, is met behulp van het gemeten stroomverloop op twee manieren getoetst.

1) Aan de hand van het gemeten signaal op moment van stroominschakeling.
2) Aan de hand van het kommutatieproces zelf.

1) Op moment van inschakelen dient de uitgangsspanning van de spoel aan (6.1) te voldoen. Met de gegevens van de rogowskispoel kan dit nagegaan worden. Hiervoor is:

$N = 35$

$A = 2.0\ 10^{-5}\ m^2$

$r = 1.4\ 10^{-2}\ m$

$\mu_o = 4\pi\ 10^{-7}\ Vs/Am$

waarmee voor (6.1) geschreven kan worden:

$$u = -1.0\ 10^{-8}\ di/dt \qquad (6.2)$$

Op moment van stroominschakeling (t = 0 ms) wordt een uitgangsspanning van de rowkowskispoel gemeten van 5.8 mV. Di/dt op moment van stroominschakeling kan bepaald worden en bedraagt:

$$(di/dt)_{t=+0} = 5.1\ 10^{5}\ A/s$$

Deze waarde gesubstitueerd in (6.2) geeft als uitgangsspanning van de rowgowskispoel:

$$u = -5.1\ mV$$

Dit resultaat stemt goed overeen met de gemeten waarde van 5.8mV.

2) Door de versterkingsfaktor van de meetversterker kleiner te maken is het mogelijk de gehele door de kommutatie veroorzaakte piek te meten. In figuur 6.3 is dit weergegeven.
Integratie van (6.2) geeft:

$$\int_{t_{kb}}^{t_{ke}} u\ dt = -\ 1.0\ 10^{-8} \left[i_{t_{ke}} - i_{t_{kb}} \right] \qquad (6.3)$$

Met t_{kb} het begintijdstip van de kommutatie en t_{ke} het eindtijdstip van de kommutatie volgt uit (6.3) dat het oppervlak onder de piek gelijk dient te zijn aan $1.0\ 10^{-8} * i_{t_{kb}}$ ($i_{t_{ke}} = 0$).

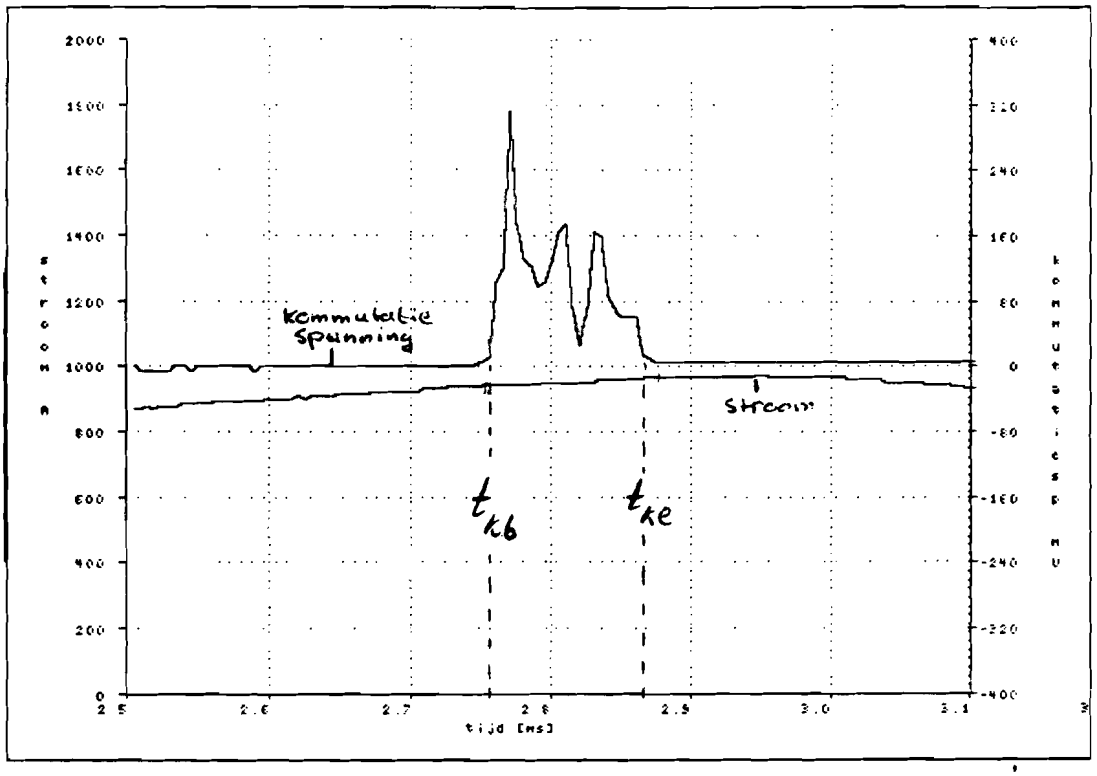


Fig.6.3: Kommutatiemeting.

Uit de meting, weergegeven in figuur 6.3, wordt gevonden:

$$\int_{t_{kb}}^{t_{ke}} u\,dt = 1.24\ 10^{-5}\ Vs$$

Uit (6.3) volgt met $i_{t_{kb}} = 942$ A :

$$\int_{t_{kb}}^{t_{ke}} u\,dt = 0.94\ 10^{-5}\ Vs$$

Dit stemt redelijk met de uit de meting bepaalde waarde overeen.

6.1.3: Resultaten kommutatie-meting.

Bij 6 circuit-instellingen, weergegeven in tabel 6.1, is de

kommutatietijd gemeten:

Tabel 6.1: Circuit-instellingen.

meetserie	1	2	3	4	5	6
I_p	302	444	800	1070	1390	2030
cos ϕ	0.99	0.98	0.98	0.91	0.86	0.82
ψ	ϕ	ϕ	ϕ	ϕ	ϕ	ϕ

Bij iedere circuit-instelling zijn 6 metingen verricht, waarvan 3 metingen waarbij het anode-voetpunt van het beweegbare kontakt af kommuteert en 3 metingen waarbij het kathode-voetpunt van het beweegbare kontakt af kommuteert. In bijlage 4 zijn de meetresultaten weergegeven in tabel 1...6, waarbij het tabelnummer korrespondeert met de in tabel 6.1 vermelde meetserie.

In figuur 6.4 is het verband tussen stroom op moment van kommutatiebegin i_{kb} en het begin-, t_{kb}, en eindtijdstip, t_{ke}, van kommutatie weergegeven waarbij het anode-voetpunt kommuteert.

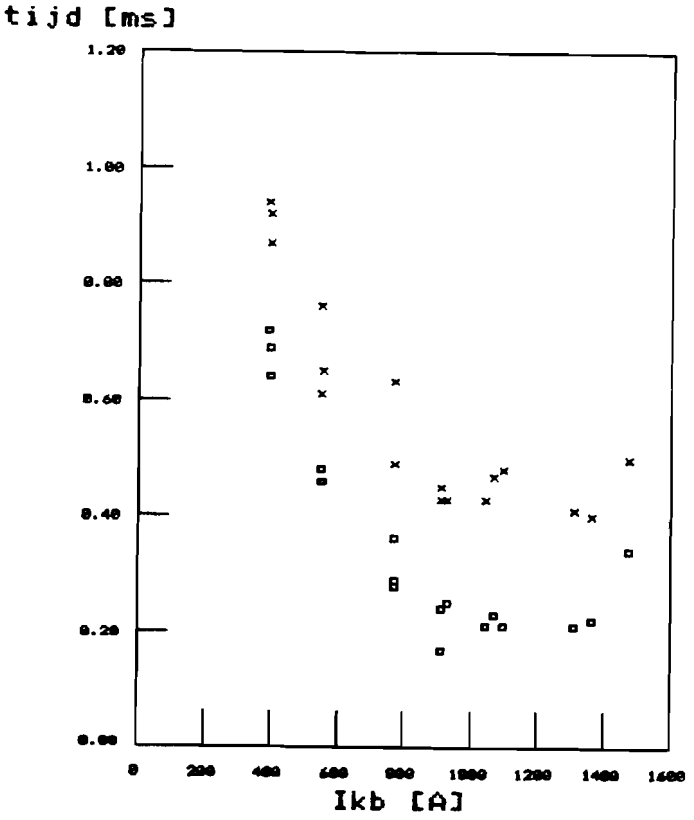


Fig.6.4: Verband i_{kb}/ t_{kb}, t_{ke}; anode-voetpunt kommuteert.
o : t_{kb}, x : t_{ke} , t_c = 0 ms.

In figuur 6.5 is ditzelfde gedaan voor kommutatie van het kathode-voetpunt.

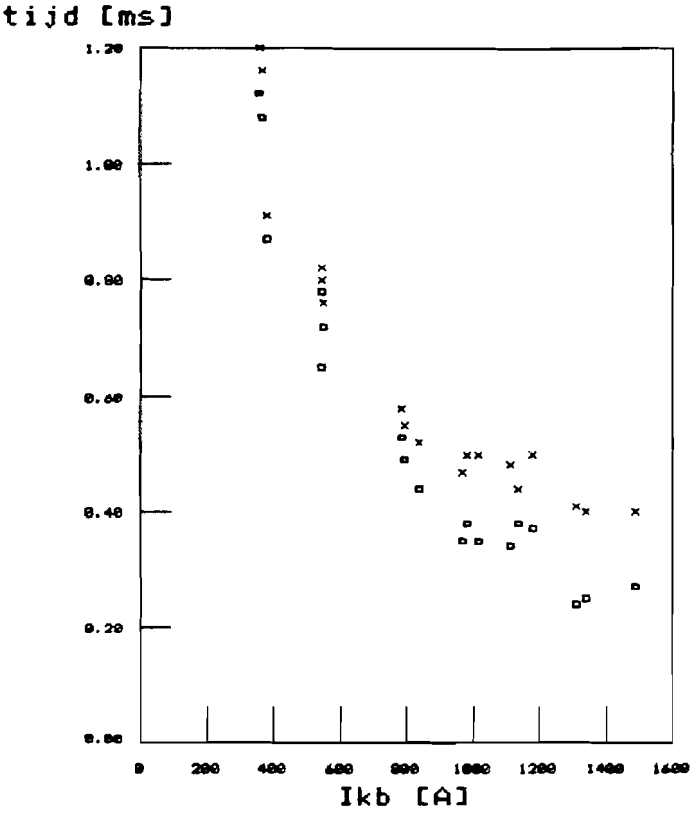


Fig.6.5: Verband i_{kb}/ t_{kb}, t_{ke}; kathode-voetpunt kommuteert.
o : t_{kb} , x : t_{ke} , t_c = 0 ms.

Nadere bestudering van de figuren 6.4 en 6.5 levert de volgende waarnemingen op:

1) Zowel t_{kb} als t_{ke} nemen af bij toenemende i_{kb}, waarbij opgemerkt dient te worden dat deze tendens bij kommutatie van het anode-voetpunt bij grotere waarden van i_{kb} niet meer op gaat. Uit figuur 6.4 blijkt dat t_{kb} rond 0.2 ms blijft voor i_{kb} > 1 kA. Voor t_{ke} blijkt deze tendens minder nadrukkelijk.

2) Er blijkt dat de kommutatieduur in geval van kommutatie van het anode-voetpunt groter is dan bij kommutatie van het kathode-voetpunt. Aan de hand van figuur 6.6, waarin t_{ke}- t_{kb} tegen i_{kb} is uitgezet. kan dit verduidelijkt worden:

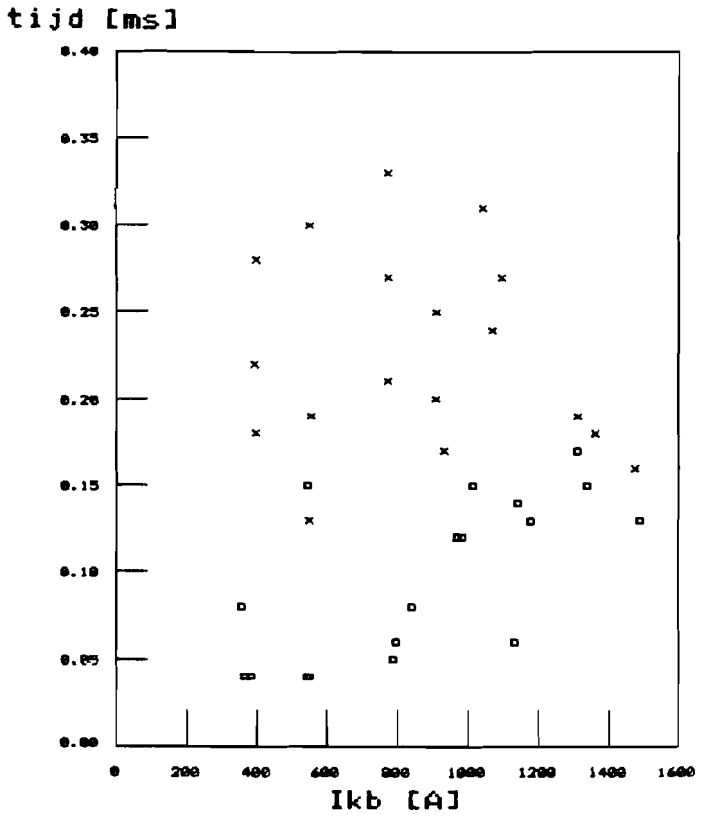


Fig.6.6: Verband i_{kb} / t_{ke}-t_{kb}.
o : kathode-voetpunt, x : anode-voetpunt

Uit figuur 6.6 blijkt dat er sprake is van een evident verschil, waarbij opgemerkt dient te worden dat de verschillen kleiner worden bij toenemende i_{kb}.

3) In geval van kommutatie van het anode-voetpunt blijkt dat t_{kb} kleiner is dan bij kommutatie van het kathode-voetpunt. Voor t_{ke} blijkt er, vooral bij grotere waarden van i_{kb}, minder evident verschil te zijn tussen kommutatie van anode- dan wel kathode-voetpunt.

4) Interessant is het om een schatting te maken van de kontaktverplaatsing op tijdstip t_{kb} en t_{ke}. Bij HOLEC zijn metingen gedaan naar de gemiddelde kontaktsnelheid over de eerste milimeter kontaktverplaatsing. Bij deze metingen voerde het kontakt zelf geen stroom. In bijlage 8 is deze snelheid als funktie van I_p weergegeven. Resultaten met betrekking tot de 6 meetseries zijn in tabel 6.2 weergegeven.

Tabel 6.2: Gemiddelde kontaktsnelheid over eerste millimeter kontaktverplaatsing.

meetserie	1	2	3	4	5	6
snelheid [m/s]	2.18	2.85	3.80	4.20	4.50	5.05

Bij de SBE wordt het kontakt geopend door een stootimpuls van het slaganker. In dit geval is het geoorloofd in eerste benadering te stellen dat de kontaktverplaatsing lineair van de tijd afhangt.
Met behulp van de in tabel 6.2 genoemde waarden is in figuur 6.7 de kontaktverplaatsing op de tijdstippen t_{kb} en t_{ke} uitgezet tegen i_{kb} voor kommutatie van het anode-voetpunt. Dit zelfde is in figuur 6.8 gedaan voor kommutatie van het kathode-voetpunt.

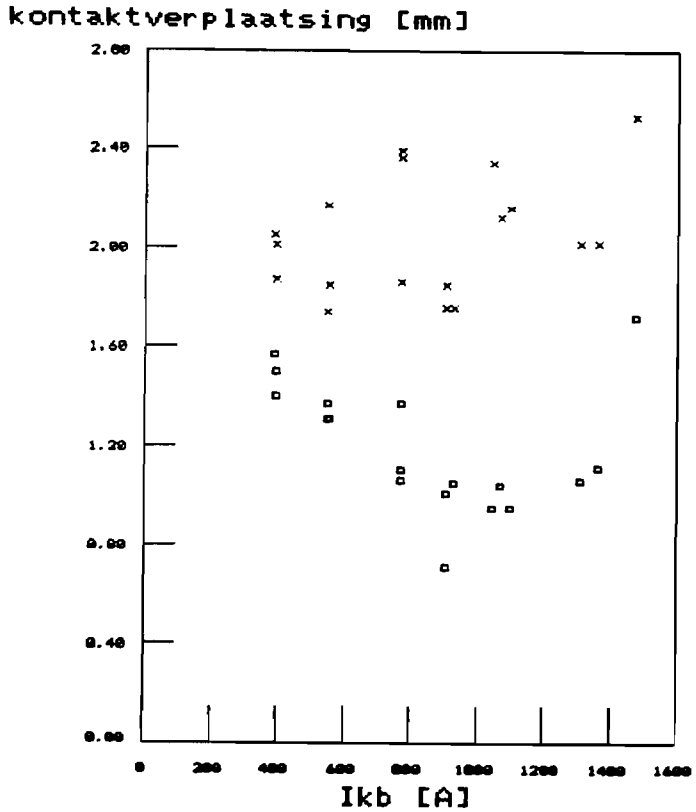


Fig.6.7: Verband i_{kb} / kontaktverplaatsing opt$_{kb}$, t_{ke}.
anode-voetpunt kommuteert.
o : t_{kb}, x : t_{ke}.

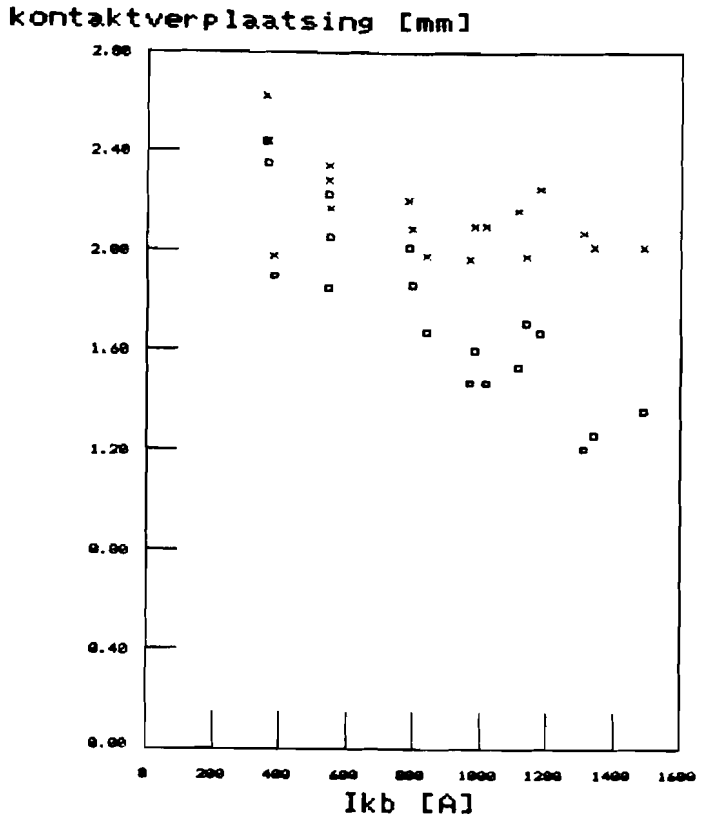


Fig.6.8: Verband i_{kb} / kontaktverplaatsing op t_{kb}, t_{ke}.
kathode-voetpunt kommuteert.
o : t_{kb} , x : t_{ke}.

In de figuren 6.7 en 6.8 valt het volgende op:
- In geval van kommutatie van het kathode-voetpunt blijkt de kontaktverplaatsing op tijdstip t_{kb} af te nemen bij toenemende i_{kb}, terwijl de kontaktverplaatsing op tijdstip t_{ke} met name voor i_{kb} > 800 A geen evidente toe- dan wel afname te zien geeft.
- Voor kommutatie van het anode-voetpunt valt voor de kontaktverplaatsing op tijdstip t_{kb} in eerste instantie een afname waar te nemen bij toenemende i_{kb}, echter voor i_{kb} > circa 1100 A lijkt deze afname over te gaan in een toename van de kontaktverplaatsing. De kontaktverplaatsing op tijdstip t_{ke} geeft weliswaar een vrij grote spreiding te zien, echter geen aanwijsbare toe- of afname bij toenemende i_{kb}.

6.1.4: Bespreking resultaten.

Uit de metingen bleek dat het anode-voetpunt eerder begint te

kommuteren dan het kathode-voetpunt. Dit is in overeenstemming met de in paragraaf 5.1.2 aan de hand van figuur 5.3 besproken mechanismen voor kommutatie van anode- en kathode-voetpunt over een gat in de runner. Immers het anode-voetpunt "springt" over het gat heen, terwijl het kathode-voetpunt eerst langs het gat naar beneden kruipt totdat de boogzuil kontakt maakt met de runner aan de overzijde van het kontakt. Hiermee zou verwacht worden dat t_{kb} voor het anode-voetpunt eerder plaatsvindt dan t_{kb} voor het kathode-voetpunt. Alhoewel deze verklaring voor de hand ligt dient er toch opgemerkt te worden dat deze aan een aanname verbonden is, namelijk dat de "Verharrzeit" voor zowel het anode- als het kathode-voetpunt even lang is.
Tevens bleek uit de metingen dat de kommutatieduur, $t_{ke} - t_{kb}$, voor het anode-voetpunt langer is dan voor het kathode-voetpunt. De verklaring hiervoor kan daarin gelegen zijn dat in geval van het anode-voetpunt het zeer wel mogelijk dat deze uit meerdere voetpunten bestaat, zodat in geval van kommutatie reeds een nieuw voetpunt op de vaste runner gevormd is terwijl het nog even duurt voordat het voetpunt op het bewegende kontakt verdwenen is.
Voordat er nadere konklusies aan de metingen verbonden worden is het goed bij de vraag stil te staan welk proces bepalend is. Immers zoals in paragraaf 5.1 is opgemerkt omvat de meting 3 verschijnselen:

- het verharren van de boog op zijn ontstaanspunten.
- het lopen van het voetpunt naar de rand van het beweegbare kontakt
- het kommuteren van het voetpunt.

Gesteld kan worden dat de tijdsduur van het bewegen van het voetpunt naar de rand van het beweegbare kontakt verwaarloosbaar zal zijn ten opzichte van de tijdsduur die het boogverharren in beslag neemt.
Voor kommutatie van het anode-voetpunt wordt tevens aangenomen dat indien het voetpunt op de rand van het kontakt is aangekomen, het meteen zal beginnen te kommuteren. Dit betekent dat t_{kb} gezien kan worden als maat voor de "Verharrzeit" t_v.
Met deze aanname kan in eerste benadering nagegaan worden van welke parameters t_v afhankelijk is. Unger [10] leidde uit zijn metingen voor t_v voor koper af (5.2.b):

$$t_v = \text{konstante} \left[v_k . B \right]^{-\tau} \qquad \text{met } \tau = 0.35.$$

Ter toetsing van deze relatie dient er bekendheid te zijn met het verloop van het B-veld over de boog. Dit veld is echter veranderlijk tijdens het boogverharren. In eerste benadering kan echter wel met een gemiddelde waarde gerekend worden. Gesteld wordt:

$$B \simeq c\, i_{kb}$$

met c : konstante

Hiermee gaat de uitdrukking voor t_v over in:

$$t_v \simeq \text{konstante} \left[v_k . i_{kb} \right]^{-\tau} \qquad (6.4)$$

Deze uitdrukking is getoetst aan de gemeten waarden voor t_{kb} voor het anode-voetpunt. Hierbij bleek de door Unger voorgestelde waarde 0.35 voor τ niet goed te voldoen. Voor τ = 0.7 voldoet de uitdrukking afgezien van de grootste waarde voor i_{kb}(> 1200 A) goed. In figuur 6.10 zijn de resultaten weergegeven.

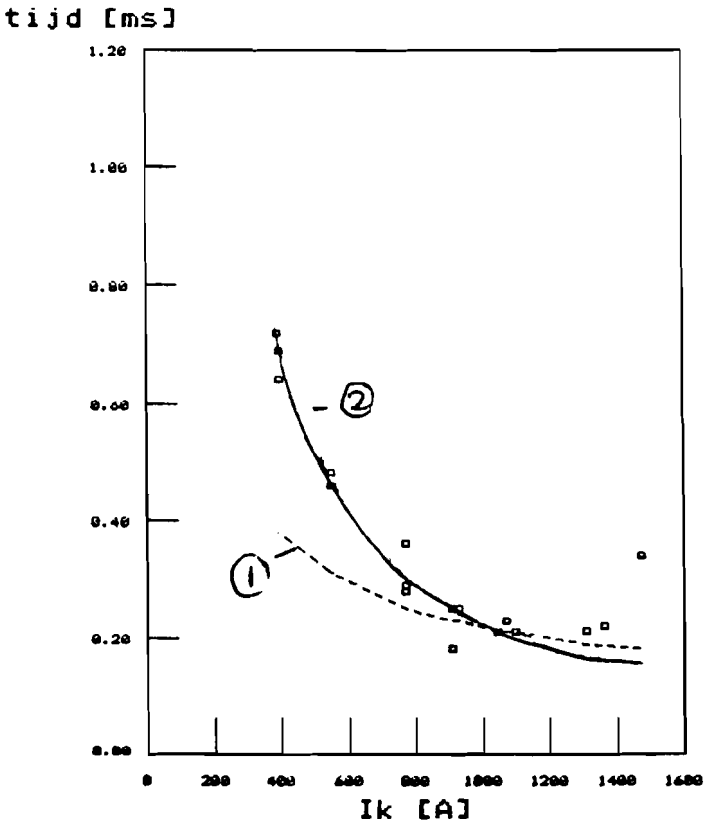


Fig.6.10: Gemeten waarden voor t_{kb} en benaderde volgens (6.4).

1) $t_v = 4.07 \left[v_k . i_{kb} \right]^{-0.35}$, 2) $t_v = 78.9 \left[v_k . i_{kb} \right]^{-0.7}$

Blijkbaar is t_v van de kontaktopeningssnelheid v_k en de stroom i afhankelijk. t_v Kan voor deze metingen weliswaar door een vergelijking benaderd kan worden, er is geen aanwijzing dat voor een andere kontaktkonfiguratie de zelfde vergelijking geldt. Hoe en door welke parameters de waarde van τ en de konstante uit (6.4) beïnvloed wordt is niet bekend.

6.1.5: Herkenning kommutatie uit spanningsverloop.

De spanningskarakteristiek van de SBE geeft in de meeste gevallen na kontaktopening een redelijk lineair toenemende spanning te zien. Alleen bij de metingen met de laagste waarde van I_p bleek dit minder goed waarneembaar. Op een geven moment neemt de spanning plots sterker toe. Als het ware treedt er een knikpunt op in de spanningskarakteristiek. Zowel ingeval van kommutatie van het anode- als kathode-voetpunt blijkt dit meestal op tijdstip t_{kb} plaats te vinden (anode kom.: 73 % van de metingen, kathode kom.: 80 % van de metingen). Indien dit niet het geval is treedt de knik tussen t_{kb} en t_{ke} op. Na de eerste knik trad er vaak een tweede knik op. Vooral bij kommutatie van het anode-voetpunt bleek deze tweede knik vaak op tijdstip t_{ke} plaats te vinden (77 % van de metingen).
Ter illustratie is in figuur 6.11 zijn een drietal spanningsverlopen rond de gemeten kommutatietijden weergegeven waarbij het anode-voetpunt kommuteerd.

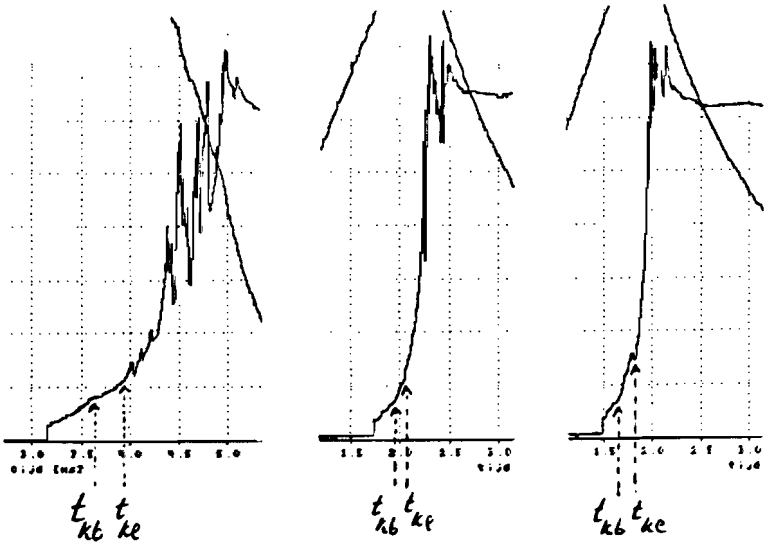
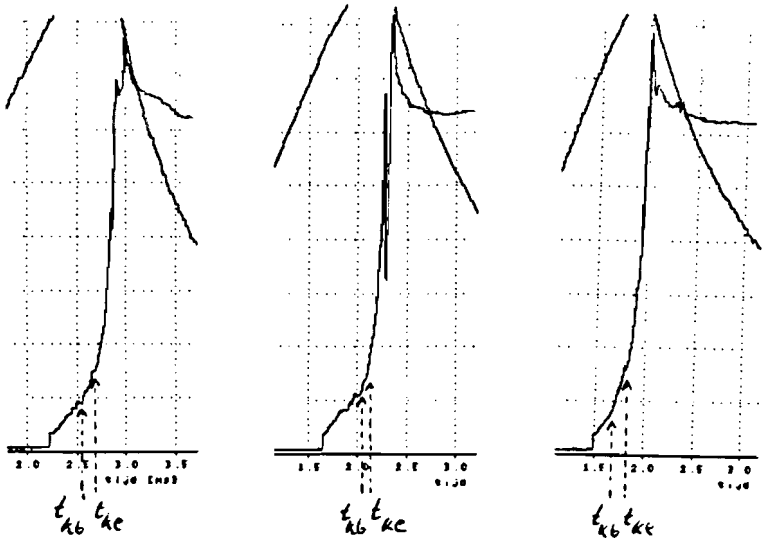


Fig.6.11: Spanningsverlopen rond t_{kb} en t_{ke} (anode kommuteert).

In figuur 6.12 is ditzelfde gedaan ingeval van kommutatie van het kathode-voetpunt.



a b c

Fig.6.12: Spanningsverlopen rond t_{kb} en t_{ke} (kathode kommuteert).

In de figuren 6.11.a en 6.12.a is geen knik waar te nemen. In de b-delen van de figuren is de knik in het spanningsverloop duidelijk waarneembaar en in de figuren 6.11.c en 6.12.c is een situatie aangegeven dat er ook rond t_{ke} een soort knik in het spanningsverloop te detekteren valt.

Konkluderend kan opgemerkt worden dat het kommutatieproces in de meeste gevallen in het spanningsverloop is terug te vinden. Pas na t_{kb} en in sommige gevallen na t_{ke} treedt er een sterke spanningsstijging over de automaat op.

6.2: Spanningsmeting over een runner.

In principe is het mogelijk om door het spanningsverschil tussen het begin van een runner en het einde van de zelfde runner te meten de positie van het voetpunt van de boog te bepalen. Aan de hand van figuur 6.13 zal dit nader verduidelijkt worden.

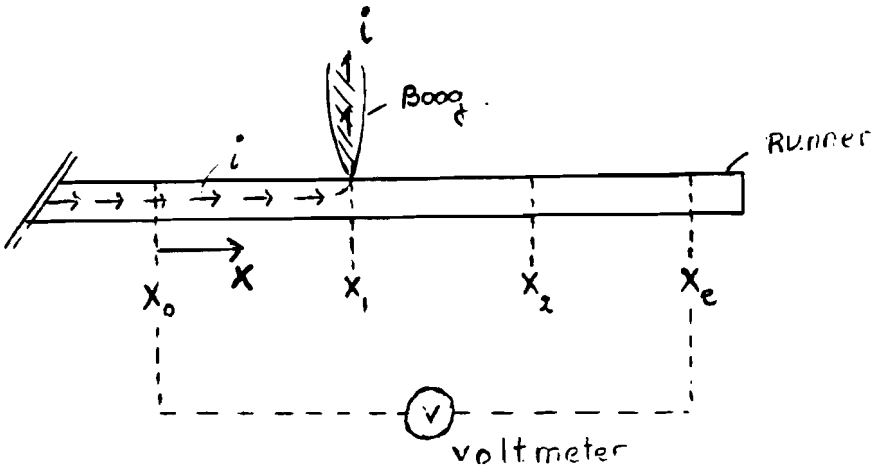


Fig.6.13: Potentiaalmeting over een runner.

Indien het voetpunt van de boog zich in figuur 6.13 op positie x_1 bevindt voert de runner van x_0 tot x_1 een stroom i. Door de weerstand van de runner zal er tengevolge van de stroom een spanningsverschil onstaan tussen x_0 en x_1, welke tevens gelijk zal zijn aan het spanningsverschil tussen x_0 en x_e. Immers van x_1 tot x_e is de runner stroomloos. Aangenomen dat de weerstand van de runner per lengteeenheid in de richting x, $\Delta R''$ bedraagt, dan geldt voor de gemeten spanning:

$$u_1 = \Delta R'' (x_1-x_0)\, i$$

Bevind het voetpunt van de boog zich nu op positie x_2, dan zal er weer een spanningsverschil tussen x_0 en x_e gemeten worden, welke nu gelijk zal zijn aan:

$$u_2 = \Delta R'' (x_2-x_0)\, i$$

Uit het bovenstaande kan afgeleid worden dat, indien de weer stand per lengteeenheid $\Delta R''$ en de stroom i bekend zijn, de plaatsvariabele x bepaald kan worden.

6.2.1: Praktische uitvoering van de meting.

Uitvoering van de bovenbeschreven meting leidt in de praktijk tot enkele problemen. Zo zal er door de meetdraden een lus gevormd worden, zoals in figuur 6.14 is weergegeven, waardoor naast de eigen induktieviteit van de runner een mutuele induktieviteit ontstaat. De meting zal dus door induktieverschijnselen beïnvloed worden.

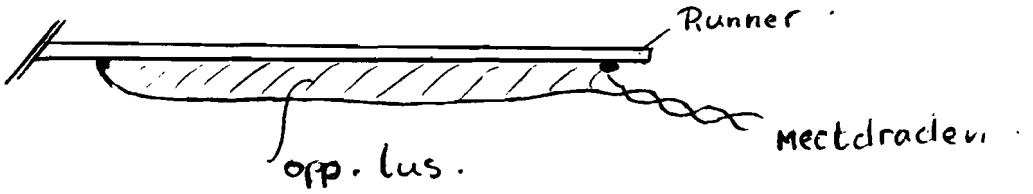


Fig.6.14: Lusvorming door meetdraden.

Daar komt nog bij dat deze induktieverschijnselen meerdere oorzaken kunnen hebben, te weten:

- di/dt
- beweging van de voetpunten van de boog
- bewegingen van de boogzuil

Tevens blijkt dat deze induktieverschijnselen moeilijk te kwantificeren zijn, immers het gedrag van de stroom i is weliswaar door meting bekend, het gedrag van de boog is dit niet, met name de snelle bewegingen van de boogzuil.
Een tweede verschijnsel dat de meting beïnvloedt is de temperatuur afhankelijkheid van de runner weerstand. Hierop wordt in het volgende nader terug gekomen.
Geprobeerd is om de spanning over de beide runners gelijkertijd te meten. Dit bleek niet mogelijk. Zoals in figuur 2.14 (meetcircuit) te zien is is één van de beide runners via de shunt-weerstand met aarde verbonden. De spanning ten opzichte van aarde van deze runner zal tijdens de meting niet veel veranderen. De spanning van de andere runner zal dit wel, immers deze runner zal tijdens het afschakelen in korte tijd (orde grootte 1 ms) met circa 300 V toenemen. Het bleek niet mogelijk een differentiaal-versterker te bouwen waarvan de commen-mode verzwakking groot genoeg was zodat de meting niet door deze snelle spanningsstijging beïnvloed werd.

6.2.2: Globale bepaling beweging voetpunt.

Bij de bepaling van de globale beweging van het voetpunt is de induktieve beïnvloeding van de meting tengevolge van de bewegingen van de boogzuil verwaarloosd. De induktieve beïnvloeding door de beweging van het voetpunt is wel meegenomen, zij het gedeeltelijk. Een beweging van het voetpunt leidt tot een fluxverandering in de door de meetdraden gevormde lus. Aangenomen wordt nu dat deze fluxverandering lineair met met de verplaatsing van het voetpunt toeneemt, dus dat $d\phi/dx$ = konstant.
Bij de bepaling van de voetpuntplaats uit de spanningsmeting over de runner wordt er ter kompensatie gerekend met een lineair met de voetpuntplaats toenemende L, welke bestaat uit de eigen induktieviteit van de runner en de mutuele induktieviteit ten gevolge van de lus. Met verwaarlozing van de term i.dL/dt kan dan voor de meting geschreven worden:

$$u(t) = i(t).(R_0 + x(t).\Delta R) + di(t)/dt.(L_0 + x(t).\Delta L) \qquad (6.4)$$

met: ΔR : toename R per lengteeenheid
ΔL : toename L per lengteeenheid.
$x(t)$: plaats boogvoetpunt.

Hieruit kan de plaats x (t) van het voetpunt bepaald worden:

$$x(t) = \frac{u(t) - i(t).R_0 - di(t)/dt.L_0}{i(t).\Delta R + di(t)/dt.\Delta L} \qquad (6.5)$$

Voor de bepaling van x(t) uit de meting is bekendheid met het verloop van zowel R als L als funktie van x vereist. In figuur 6.16 is de aansluiting van de meetdraden in de SBE aangegeven.

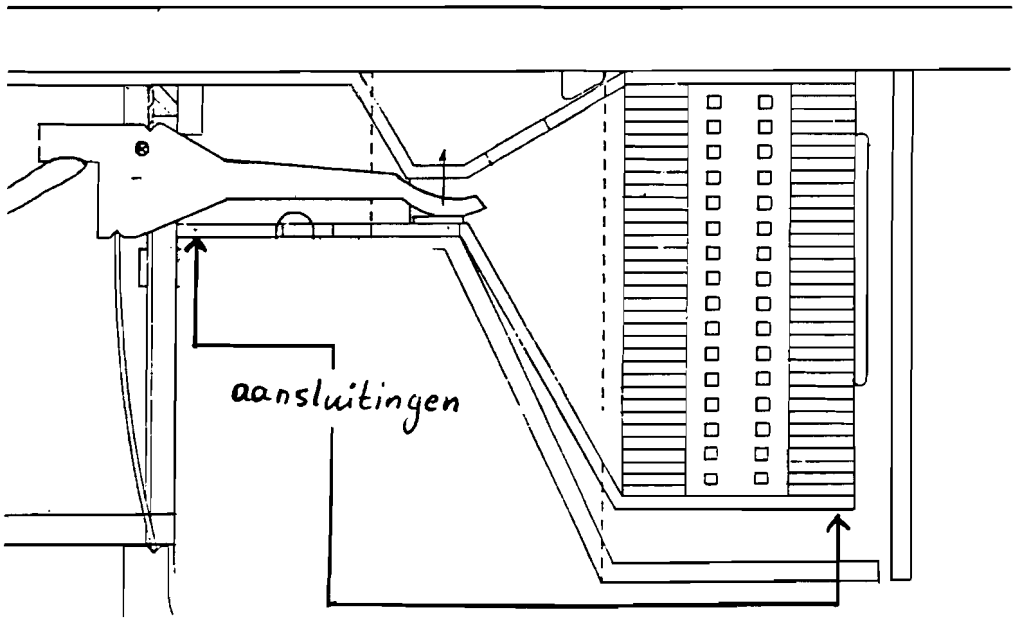


Fig.6.16: Aansluiting meetdraden in SBE.

Het deel van de runner dat door het boog voetpunt doorlopen wordt heeft een vorm zoals geschetst in figuur 6.17.

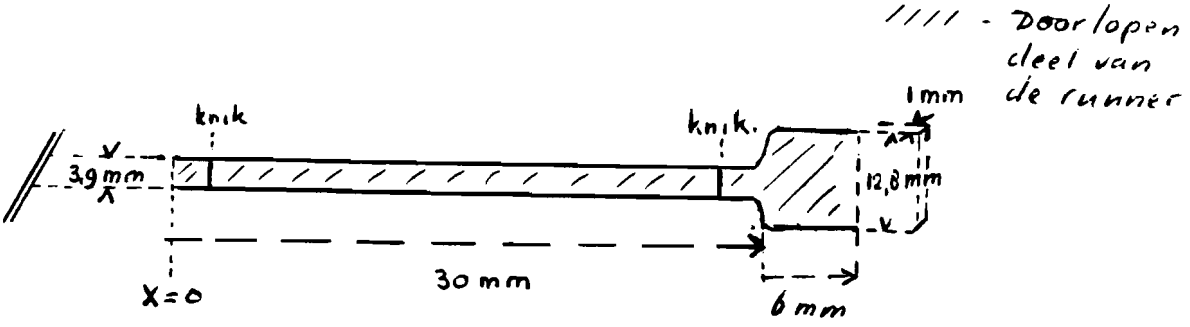


Fig.6.17: Vorm runnerdeel dat door boogvoetpunt doorlopen wordt.

Aan de hand van weerstandsmeting is het verloop van R als funktie van x te bepalen. Dit verloop is grafisch in figuur 6.18 weergegeven.

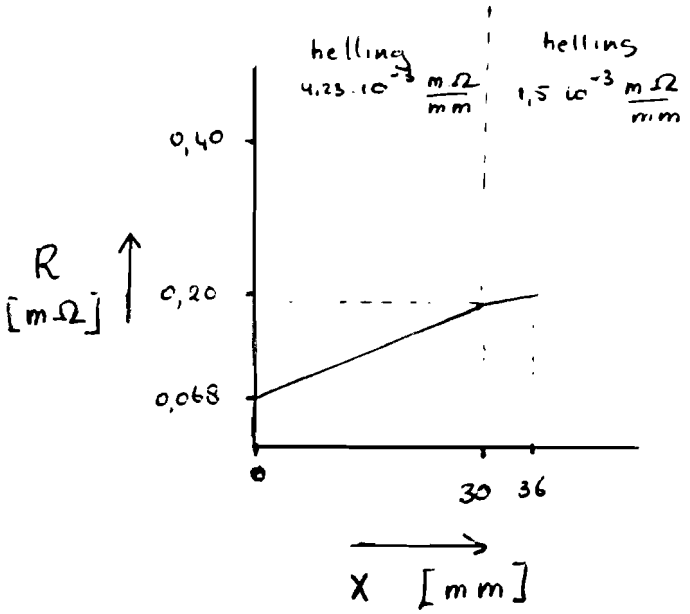
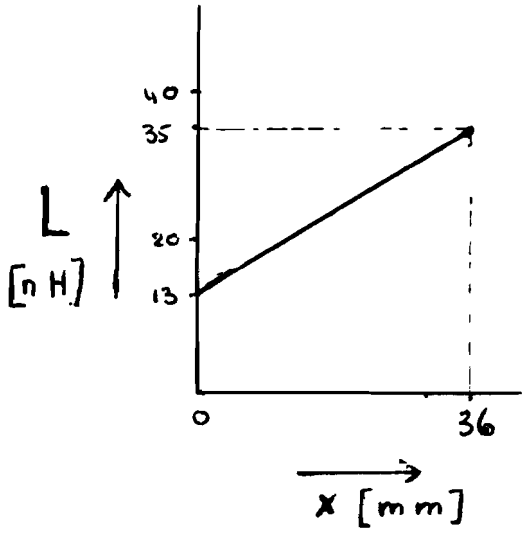
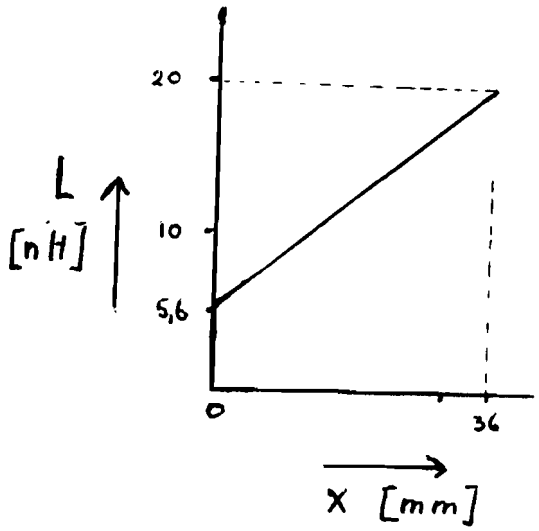


Fig.6.18: R(x) (gemeten; T ≈ 290 K).

Het verloop van L als funktie van x, dat lineair verondersteld is, kan aan de hand van de meting zelf afgeschat worden. Dit gebeurt in de tijdsintervallen, dat de kontakten nog gesloten zijn en dat de boog geheel is opgesplitst tussen de boogplaatjes. In deze intervallen geldt dat x(t) konstant is en, gesteld dat zowel R als L in deze intervallen konstant zijn , kan van L een schatting gemaakt worden. Grafisch is de schatting van het verloop van L(x) in figuur 6.19 weergegeven, waarbij onderscheidt gemaakt is tussen de meetseries 1 en 2 en de meetseries 3 ... 6. Dit laatste omdat de meetdraden bij de laatste meetserie iets anders gelegd zijn met tot gevolg een verandering van de lus.



meetserie 1,2



meetserie 3 ... 6

Fig.6.19: L(x)

Tenslotte dient er nog een opmerking gemaakt te worden ten aanzien van de temperatuurafhankelijkheid van de runnerweerstand. Temperatuurverhoging van de runner kan door twee oorzaken optreden, te weten:

- verwarming door warmtedissipatie t.g.v. i^2R.
- verwarming door de boogvoetpunten.

Gebleken is dat de verwarming t.g.v. i^2R niet veel invloed op de weerstand van de runner heeft. Tot het openen van de kontakten kan geen noemenswaardige toename waargenomen worden. Verwarming door de boogvoetpunten blijkt echter wel een weerstandstoename te veroorzaken. Hiermee is bij de berekening rekening gehouden door de weerstanden aan de hand van de meetgegevens zo te schalen, dat de verplaatsing na intrede van de boog in de bluskamer 36 mm bedraagt

6.2.3: Resultaten spanningsmeting over runner.

Bij de uitgevoerde metingen is alleen de verplaatsing van het kathode voetpunt gemeten. In figuur 6.20 is een gemeten spanning over de runner weergegeven met bijbehorend stroomverloop.

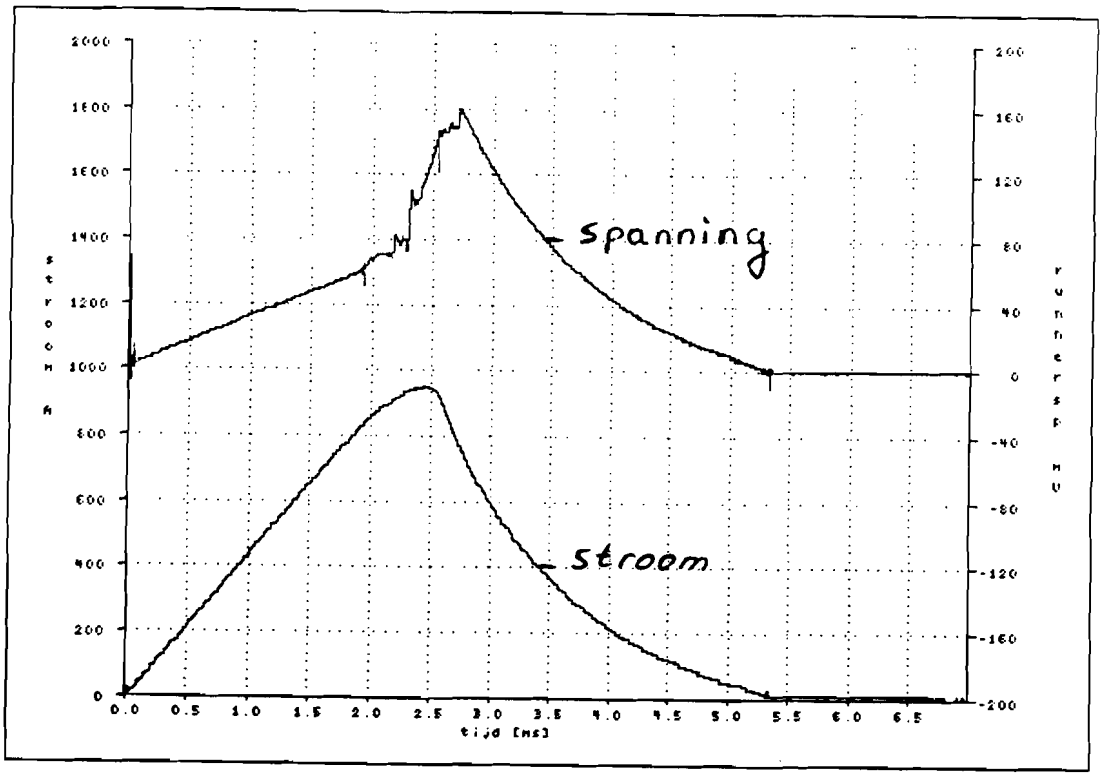


Fig.6.20: spanning over runner en stroom tijdens afschakeling SBE (Ieff 1390 A, cos ϕ = 0.86, $\psi = \phi$, U_n = 212 V).

Met behulp van (6.5) en de verlopen R(x) en L(x) wordt voor de verplaatsing van het kathode voetpunt het in figuur 6.21 weergegeven verloop gevonden.

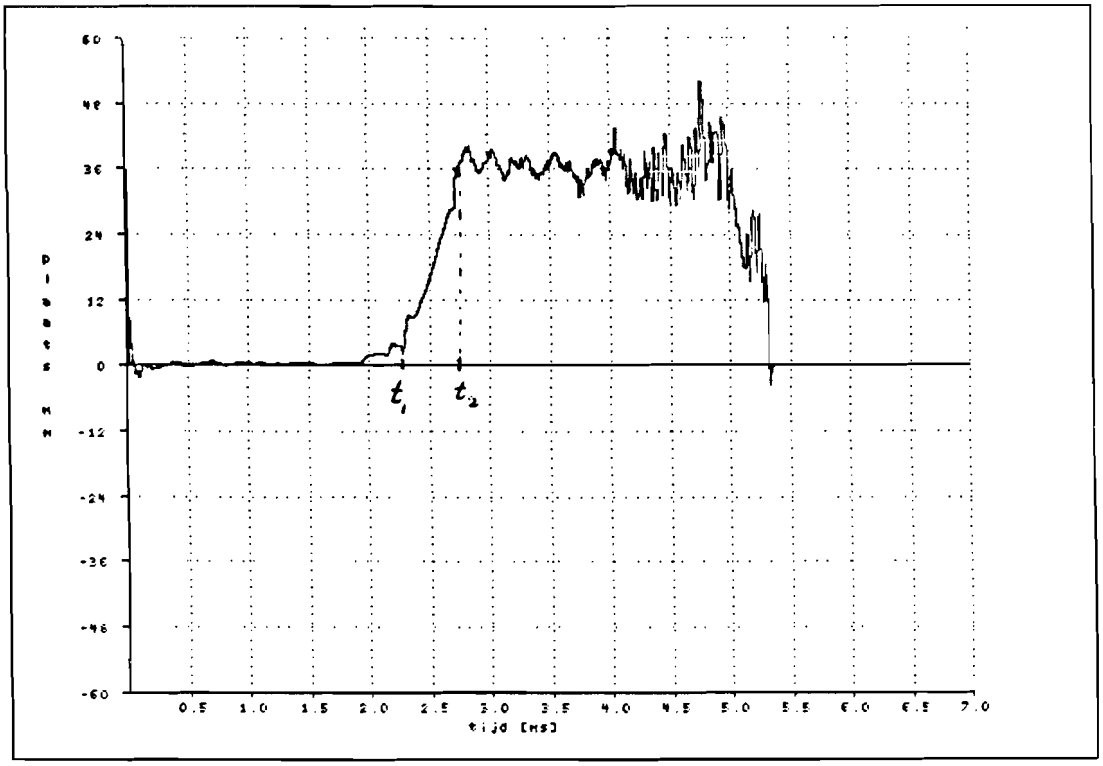


Fig.6.21: Verplaatsing kathodevoetpunt.

In figuur 6.21 valt het volgende op :
- tot kontaktopening (t_c) blijft de verplaatsing nagenoeg nul.
- direkt na t_c neemt de verplaatsing toe. Dit is te wijten aan de opwarming van de runner door het boogvoetpunt. Vanaf tijdstip t_1 valt een extra toename van de verplaatsing waar te nemen welke op t_2 eindigt op 36 mm.
- de verplaatsing blijft konstant rond 36 mm, waarbij bij nadering tot stroomnulworden de berekening instabiel wordt.

6.2.4: Bepaling van gegevens uit de meting.

Bij het trekken van konklusies uit de spanningsmeting over de runner dient men rekening te houden met de genoemde beperkingen van de meting. Zo is het niet gerechtvaardigd uitspraken te doen over het preciese verloop van het kathode-voetpunt tijdens de beweging hiervan

over de runner. Wel is het mogelijk het tijdstip t_1 van de start van de beweging en het tijdstip t_2 van het eind van de beweging te bepalen, zoals in figuur 6.21 gedaan is. Hieruit kan de gemiddelde snelheid van het kathodevoetpunt afgeleid worden: 36 / (t_2-t_1) m/s.
In bijlage 4 zijn de tijdstippen t_1 en t_2 gerelateerd aan t_c vermeld, alsmede de gemiddelde snelheid van het kathode-voetpunt.

6.2.4.1: Begintijdstip van de voetpuntbeweging.

Het tijdstip t_1 kan gezien worden als het einde van het verharren van het kathode-voetpunt. Interessant is om na te gaan hoe deze tijdstippen t_1 zich verhouden tot t_{kb}. In figuur 6.22 zijn t_{kb} en t_1, beide uit één dezelfde meting bepaald, gerelateerd aan t_c tegen i_{kb} uitgezet.

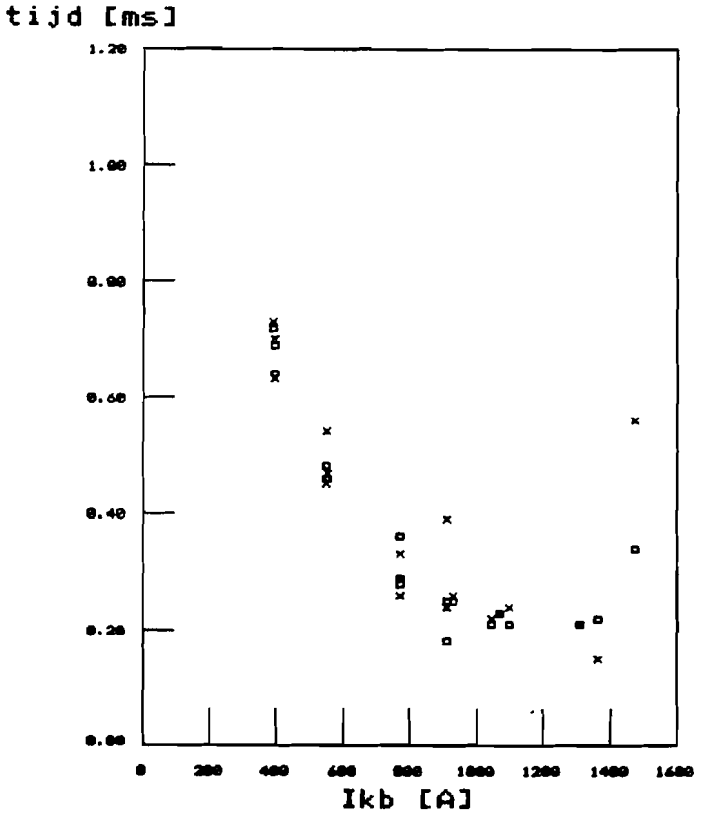


Fig.6.22 : t_{kb} en t_1 als funktie van i_{kb}.
o : t_{kb}, x : t_1, t_c = 0 ms.

Uit figuur 6.22 blijkt dat t_1 in het algemeen nagenoeg gelijk is aan t_{kb}. Dit is volgens verwachting indien één van de voetpunten, waarschijnlijk het anode-voetpunt, bepalend is voor het einde van het

boogverharren.

6.2.4.2: Eindtijdstip van de voetpuntbeweging.

In figuur 6.23 is zowel t_b als t_2 gerelateerd aan t_{kb} tegen i_{kb} uitgezet. i_{kb} Kan gezien worden als de stroom op het moment van het begin van de boogbeweging.

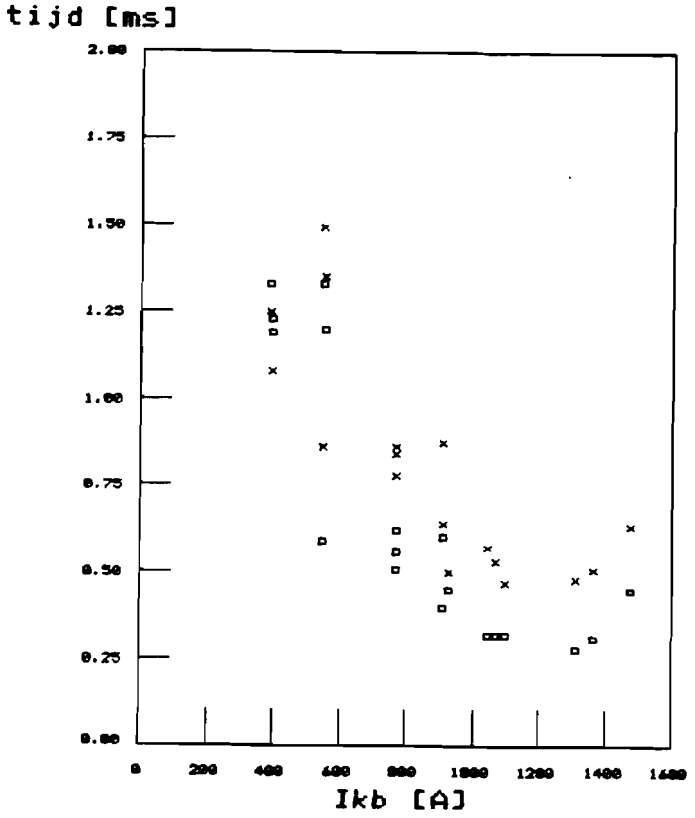


Fig.6.23: t_b en t_2 als funktie van i_{kb}.
o : t_b, x : t_2, t_c = 0 ms.

Vergelijking van de tijdstippen t_b en t_2 levert op dat (afgezien van de meting bij de laagste stroominstelling) t_2 groter is dan t_b. Dit is volgens verwachting, indien men in figuur 6.24 de boogposities en het bijbehorende spanningsverloop beschouwd.

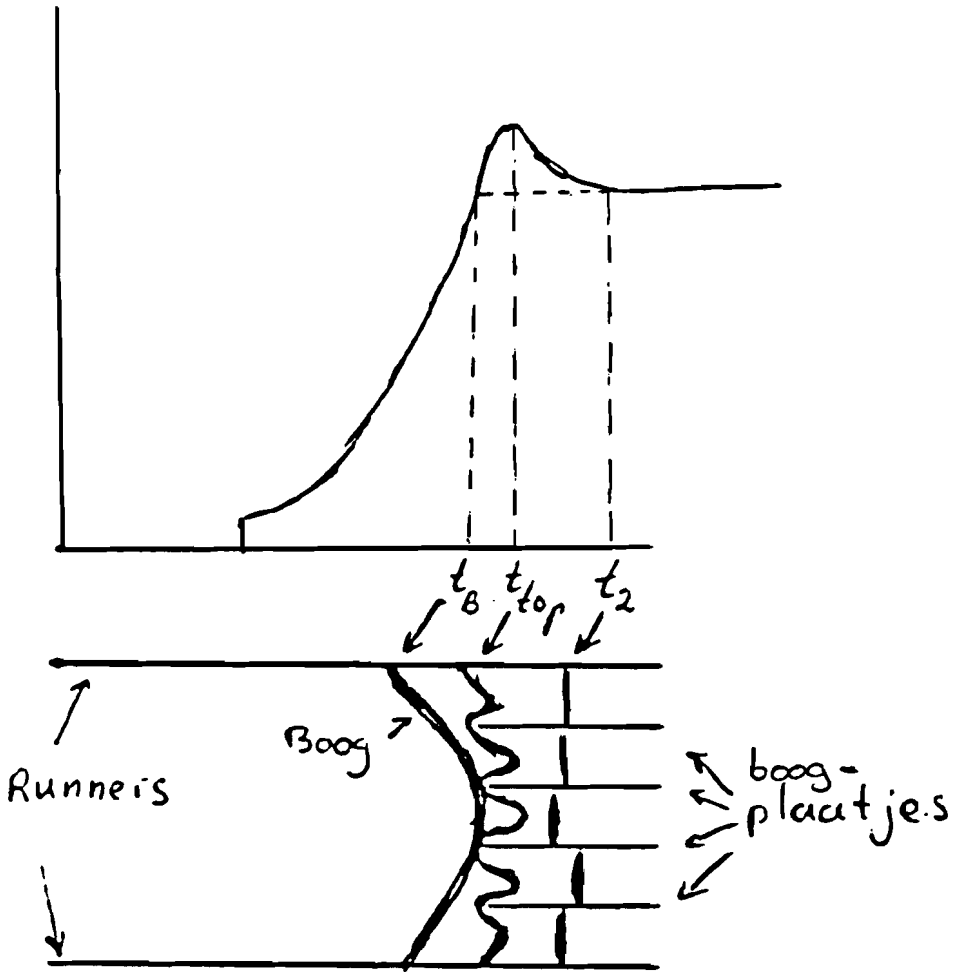


Fig.6.24: Schematische weergave boogposities en bijbehorend spanningsverloop.

6.2.4.3: Gemiddelde snelheid kathode-voetpunt.

Uit de beschreven spanningsmeting over de runner is een schatting gemaakt van de gemiddelde snelheid van het kathode-voetpunt. In figuur 6.25 zijn de verkregen resultaten uitgezet tegen de stroom i_{kb}. De waarden zijn in tabel 1 ... 6 in bijlage 4 weergegeven.

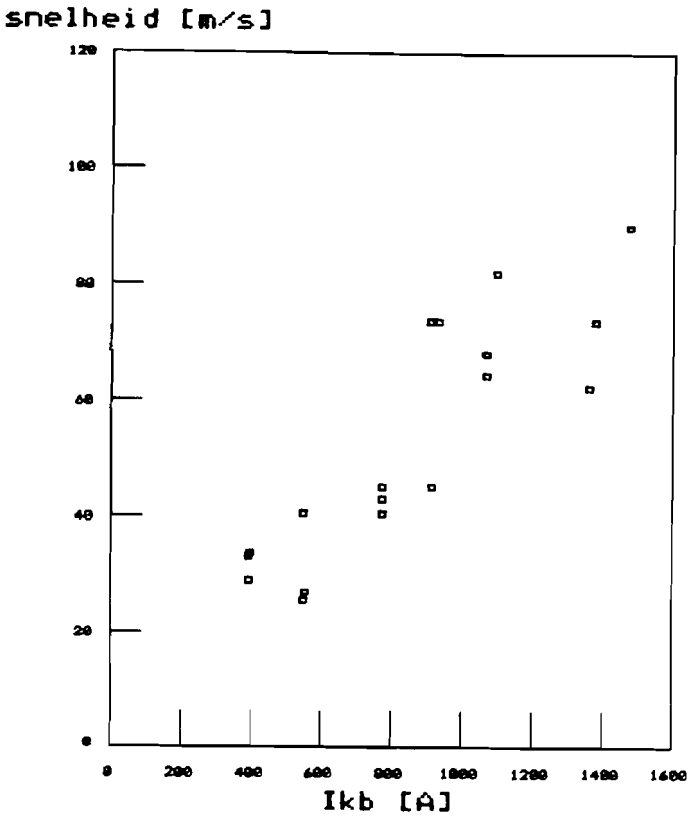


Fig.6.25: Verband i_{kb} / gemiddelde snelheid kathode-voetpunt.

In figuur 6.25 valt het volgende op:

1) de bepaalde snelheden van het kathode-voetpunt geven een redelijke spreiding te zien. Oorzaak is gelegen in het optreden van herontstekingen welke in de bepaling van de gemiddelde snelheid zijn meegenomen.

2) uit figuur 6.25 is een lineaire verband tussen de gemiddelde snelheid van het kathode-voetpunt en de stroom i_{kb} waar te nemen. Dit is een interessant gegeven. Immers volgens het in paragraaf 5.2.2 besproken geleidende cylindermodel zou dit het geval moeten zijn. Gezien het feit dat er bij de SBE op dé runners een puntvormig spoor van het anode-voetpunt en een kontinu spoor van het kathode-voetpunt waargenomen is, betekent dit dat een boogbewegingvorm volgens de "discontinuous mode" optreedt. Voor de SBE blijkt deze boogbewegingsvorm dus wat betreft de afhankelijkheid van de boogsnelheid van de stroom en het magneetveld te voldoen aan het geleidende cylindermodel. Immers voor de SBE geldt dat het magneetveld evenredig is met de stroom zodat de boogsnelheid volgens het model evenredig is met de stroom.

6.3: Optische meting met behulp van fibers.

Met een set van 4 fibertjes met bijbehorende optische / elektrische omzetters, zijn enkele metingen aan de SBE uitgevoerd. Deze metingen hadden in eerste instantie een oriënterend karakter met een tweeledig doel, te weten:

1) om na te gaan of er m.b.v. optische fibers aan de boogverschijnselen in de SBE, en daarmee andere automaten, gemeten kan worden.
2) om te trachten de uit de spanningsmeting over de runner bepaalde snelheid van het kathodevoetpunt te kontroleren.

Voordat er nader op de metingen zelf zal worden ingegaan dienen een paar overwegingen vooraf genoemd te worden. Ten aanzien van de lichtmeting met de fibers kan ruwweg gesteld worden dat de fibers onder een tophoek van ca. 10° meten, zoals weergegeven in figuur 6.26.

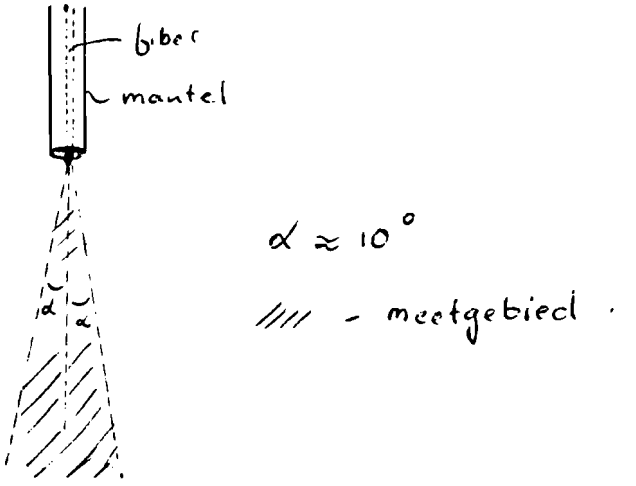


Fig.6.26: Meetgebied van de gebruikte fibers.

Naast dat de fibers een bepaald meetgebied bestrijken, zal ook de verschijningsvorm van de boog van belang zijn. Immers de boog zal gekarakteriseerd zijn door een lichtgevende ontladingswolk, waarvan mij de preciese verschijningsvorm met betrekking tot dikte, lichtintensiteit en lichtintensiteitsvariaties niet bekend is.

6.3.1: Uitvoering van de meting.

In de SBE zijn de 4 fibers geplaatst op de in figuur 6.27 aangegeven plaatsen.

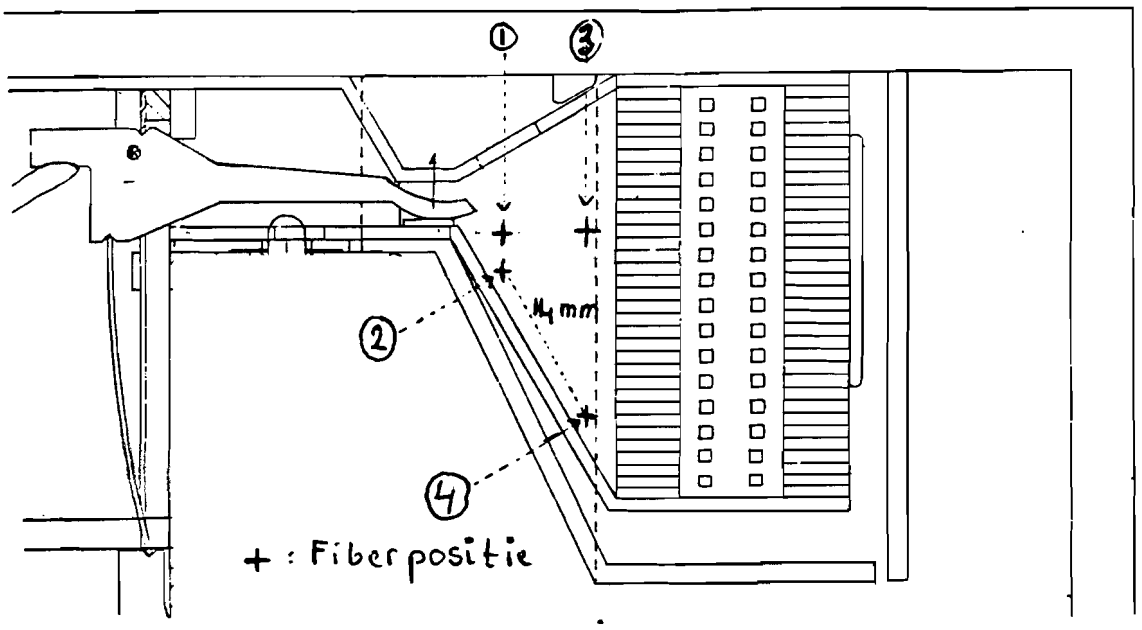


Fig.6.27: Fiberposities in SBE.

De fibers zijn alsvolgt geplaatst:

- met mantel en al door de deksel van de SBE.
- de fiberkern zelf in kleine gaatjes in de afschermdeksel op de boogkamer zelf gestoken. Deze gaatjes waren geheel door de afschermdeksel van de boogkamer geboord, daar aan de binnenkant van deze afschermdeksel een plaatje keramiek geplaatst is, dat geen licht doorlaat.

Bij metingen bij I_p = 1390 A bleek dat de optische omzetter overstuurd werd. Om de gevoeligheid van de meting te verminderen zijn de fibertjes direkt bij de mantel afgesneden en zo mogelijk enigszins in de mantel zelf verzonken. Zodoende bleek het inderdaad mogelijk de gevoeligheid wat te verkleinen, waarbij nog niet alle kanalen binnen het bereik van de omzetter gehouden konden worden. Bij lagere waarden van I_p bleek dit beter mogelijk, omdat de lichtintensiteit van de boog stroomafhankelijk is.

Bij een drietal stroominstellingen, genoemd in tabel 3.1, zijn metingen verricht.

Tabel 6.3: Stroominstellingen

meetserie	1	2	3
I_p [A]	425	770	1390
cos ϕ	0.99	0.96	0.86
ψ	$\phi + 5^o$	ϕ	ϕ

Bij iedere instelling zijn 3 metingen verricht.

6.3.2: Resultaten van de optische meting.

In figuur 6.28 zijn de signalen van de 4 fibertjes weergegeven voor I_p = 770 A.

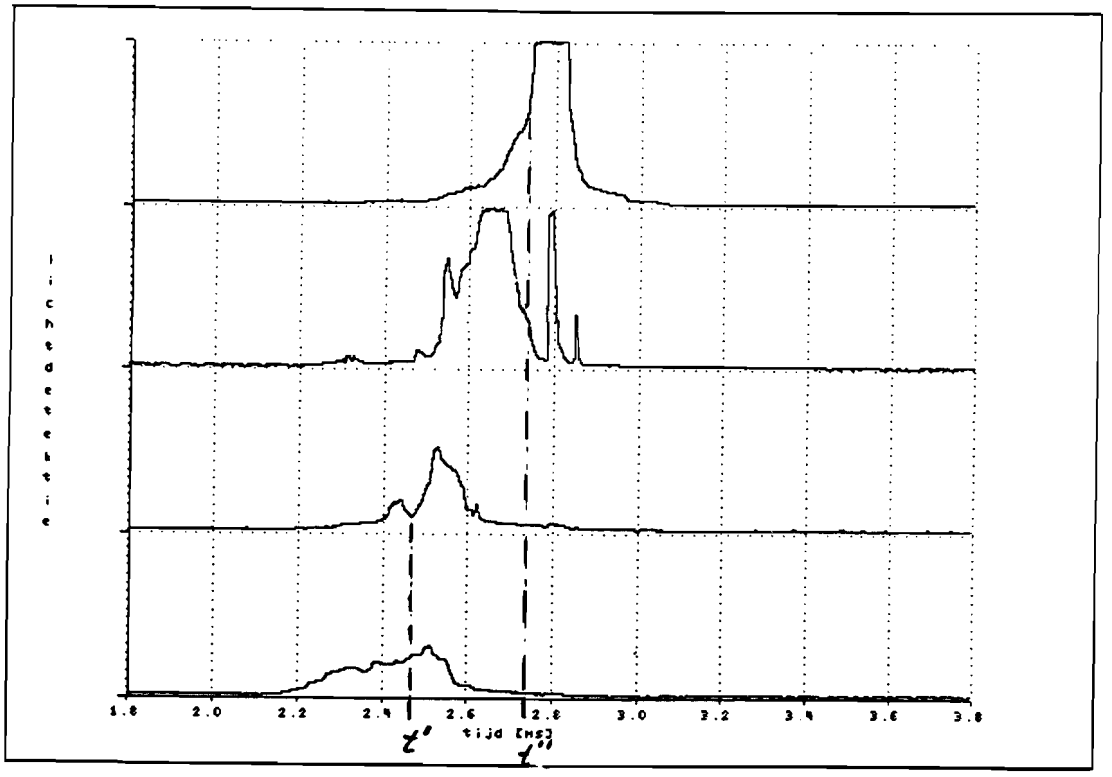


Fig.6.28: Gemeten signalen (meetserie 1, stroom ingeschakeld op t = 0 ms).

(In figuur 6.28 lopen de kanalen 3 en 4 uit het bereik.)

In figuur 6.28 valt het volgende op:

- op tijdstip t = 2.07 ms openen de kontakten. Op dit tijdstip en

direkt daarna wordt geen signaal gemeten. op t = 2.17 ms begint fiber 1 licht te signaleren.

- op t = 2.41 ms begint fiber 2 duidelijke respons te vertonen. op t = 2.56 ms is de boog klaarblijkelijk fiber 1 gepasseerd, terwijl op t = 2.53 ms fiber 3 reeds signaal afgeeft.
- op t = 2.56 ms vertoont het signaal van fiber 2 een duidelijke top, op t = 2.59 ms lijkt de boog fiber 2 gepasseerd.
- op t = 2.66 ms lijkt het signaal van fiber 3 een maximum te hebben (welke buiten meetbereik valt). Op t = 2.79 ms treedt er een tweede piek op met een zeer steile beginhelling. Dit zou kunnen wijzen op een heronsteking van de boog in het meetgebied van fiber 3. Op t = 2.85 ms treedt nog een klein piekje op.
- Het signaal van fiber 4 kenmerkt zich door een in eerste instantie langzaam oplopend signaal, waarvan de helling steeds steiler wordt en helaas vrij snel uit het bereik van de meetapparatuur loopt. Geschat kan worden dat op t = 2.80 ms een maximum in het signaal zal optreden.

Om na te gaan hoe de waarnemingen uit de fibersignalen zich verhouden met de spanning over de SBE is in figuur 6.29 het spanningsverloop van de zelfde meting als getoond in figuur 6.28 weergegeven.

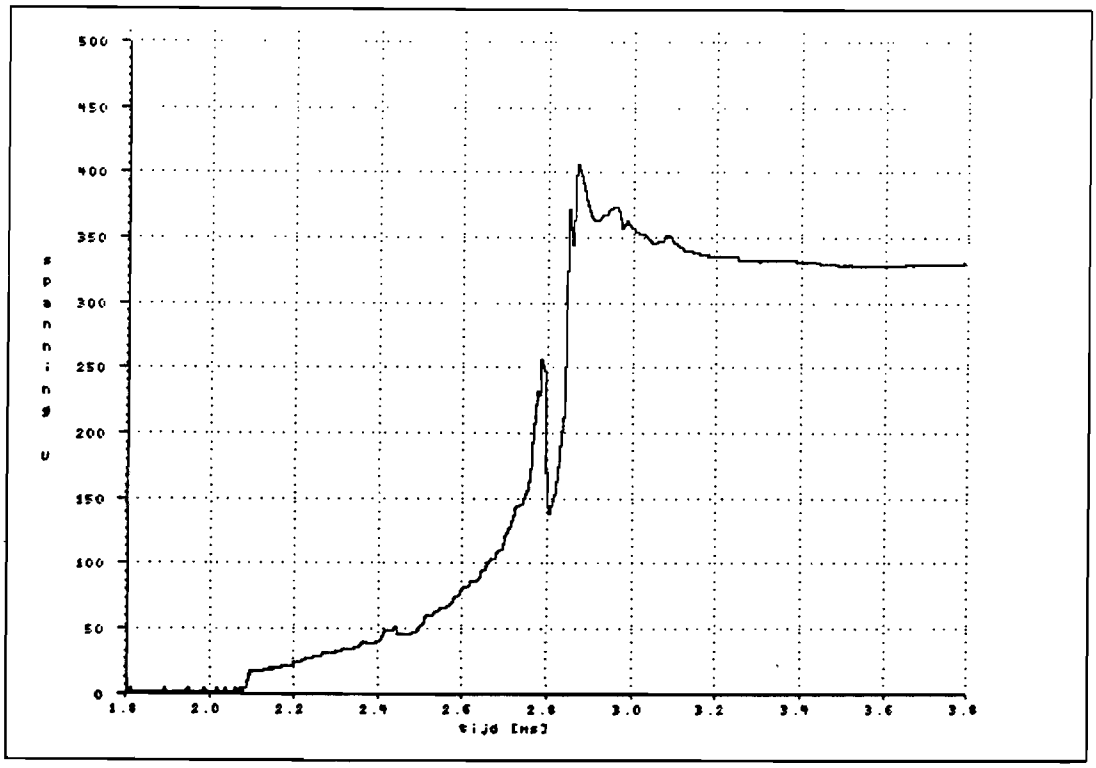


Fig.6.29: Spanningsverloop over SBE, analoog aan de getoonde periode in figuur 6.28.

Meteen valt in figuur 6.29 de spanningssprong rond t = 2.8 ms op. Nadere vergelijking met figuur 6.28 levert een tijdsovereenkomst op met de tweede piek in het signaal van fiber 3, hetgeen betekent dat de boog in de buurt van fiber 3 terugspringt of herontsteekt. Gezien de aanvangssteilheid van de piek lijkt een herontsteking voor de hand te liggen. Ook het derde piekje in het signaal van fiber 3 rond 2.85 ms lijkt in het spanningsverloop terug te vinden in de vorm van een kleine spanningsterugval.

6.3.3: Uit fibermeting verkregen gegevens.

Uit de optische metingen zijn een aantal gegevens bepaald, te weten:
1) de uit de spanningsmeting over de runner bepaalde gemiddelde snelheid van het kathodevoetpunt is gekontroleerd.
2) er is nagegaan op welk moment het kathodevoetpunt ongeveer begint te bewegen.
3) er is nagegaan of de boog in het midden van de boogkamer eerder de boogplaatjes bereikt dan dat het kathodevoetpunt dat doet.

1) Met behulp van de optische meting van de fibers 2 en 4 kan gemiddelde snelheid van het kathodevoetpunt geschat worden over de weg die van fiber 2 naar fiber 4 afgelegd dient te worden. Daar de top van het signaal van fiber 4 buiten het meetbereik valt is deze snelheid bepaald als het quotient van de af te leggen weg (14 mm, zie figuur 2) en de tijdverschil dat fiber 2 de boog begint te detekteren en dat fiber 4 de boog begint te detekteren. In figuur 6.28 is dit tijdverschil gelijk aan $t'' - t'$. Er wordt een gemiddelde snelheid gevonden van 54 m/s.
In figuur 6.30 is het bijbehorende resultaat van de spanningsmeting over de runner weergegeven.

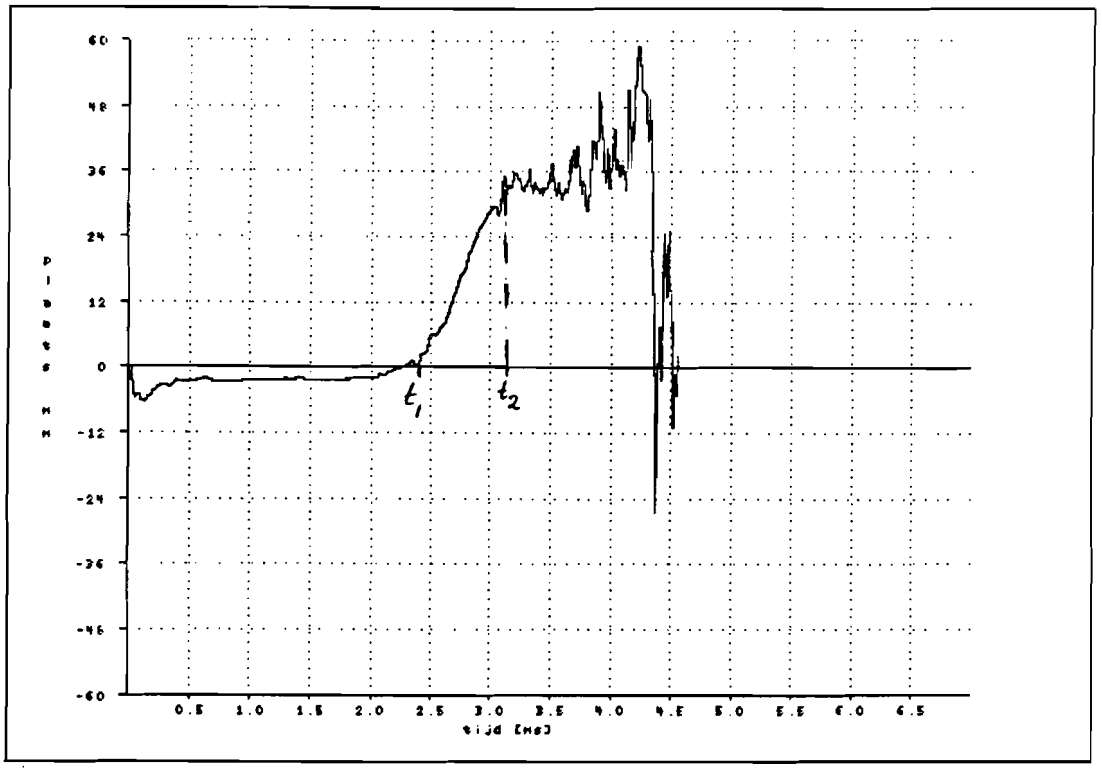


Fig.6.30: Bepaalde verplaatsing kathodevoetpunt uit spanningsmeting over de runner.

Hieruit wordt een gemiddelde snelheid van het kathodevoetpunt van beginpunt tot eindpunt gevonden van 51 m/s. Dit resultaat stemt goed overeen met de uit de optische meting bepaalde snelheid.
Bij de overige optische metingen is deze bepaling ook gedaan. De resultaten staan vermeld in tabel 6.5.

Tabel 6.5: Bepaalde snelheden kathode-voetpunt.
o.m. : optische meting.
s.m. : spanningsmeting over runner.

meetserie	1	1	1	2	2	2	3	3	3
i_{kb}[A]	529	534	529	777	791	777	1051	1104	1089
$v_{(o.m.)}$ [m/s]	36	39	31	37	54	41	58	58	58
$v_{(s.m.)}$ [m/s]	-	43	40	40	51	43	62	62	62

In figuur 6.31 zijn de waarden uit tabel 6.5 tegen i_{kb} uitgezet. Tevens is in deze figuur een rechte opgenomen welke het gemiddelde verband

geeft tussen de gemiddelde boogsnelheid en i_{kb} bepaald uit figuur 6.25.

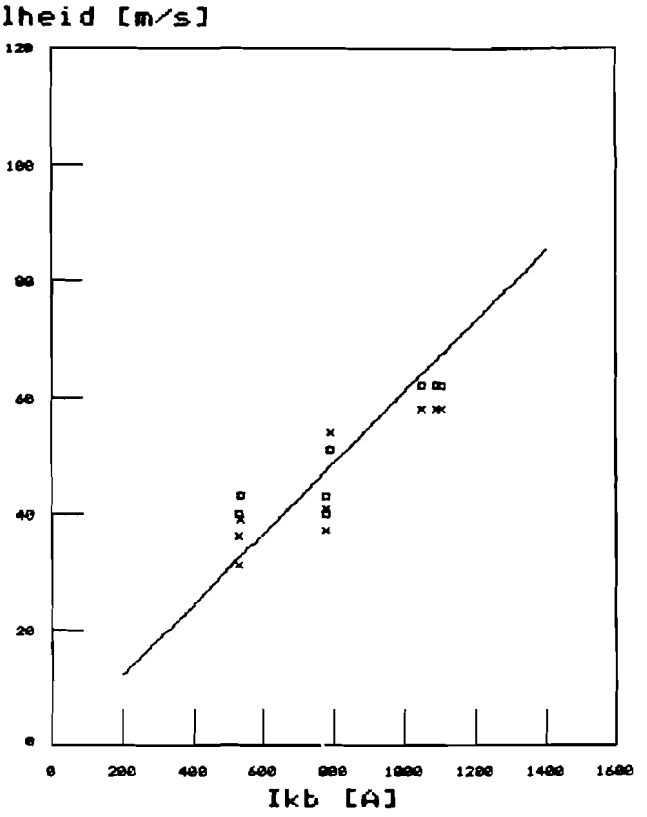


Fig.6.31: Gemiddelde boogsnelheden uit tabel 6.5.
x : $v_{(o.m.)}$, o : $v_{(s.m.)}$, rechte: $v = 0.061\ i_{kb}$.

Uit tabel 6.5 en figuur 6.31 volgt dat de resultaten redelijk goed met elkaar overeenstemmen en geen ontoelaatbare afwijkingen vertonen.

2) Uit de optische meting is nagegaan wanneer er door fiber 2 signaal afgegeven wordt. Immers dan kan gesteld worden dat het kathode voetpunt in beweging is. Deze tijden zijn bepaald en in tabel 6.5, tezamen met de tijdstippen t_{kb} van begin van kommutatie en t_1 van begin van de boogbeweging uitgezet.

Tabel 6.5: Tijdstip t_{d2} begin detektie fiber 2, t_{kb} en t_1.

meetserie	1	1	1	2	2	2	3	3	3
t_{d2}[m/s]	3.74	3.88	4.09	2.43	2.40	2.43	1.88	1.93	1.86
t_{kb}[m/s]	3.75	3.81	4.02	2.38	2.40	2.33	1.93	1.89	1.93
t_1 [m/s]	-	3.85	4.13	2.46	2.40	2.31	1.90	1.90	1.90

Uit tabel 6.5 blijkt dat zowel t_{kb} als t_1 steeds zeer dicht in de buurt van t_{d2} ligt, zodat met het fibertje de boogbewegingsstart goed te bepalen is.

3) Uit de optische metingen bleek zonder uitzondering dat de boog fiber 3 eerder passeerde dan fiber 4. Dit bevestigt het vermoeden, dat de boog in het middelste deel van het bluspakket het eerst intreedt. Tevens is nagegaan of uit de metingen ook aangetoond kan worden dat het kathode-voetpunt van de boog nog niet bij de boogplaatjes is aangekomen ten tijde van de top van de spanningspiek veroorzaakt door het opsplitsen van de boog tussen de plaatjes. In figuur 6.32 is een meting gegeven waarin dit inderdaad na te gaan is.

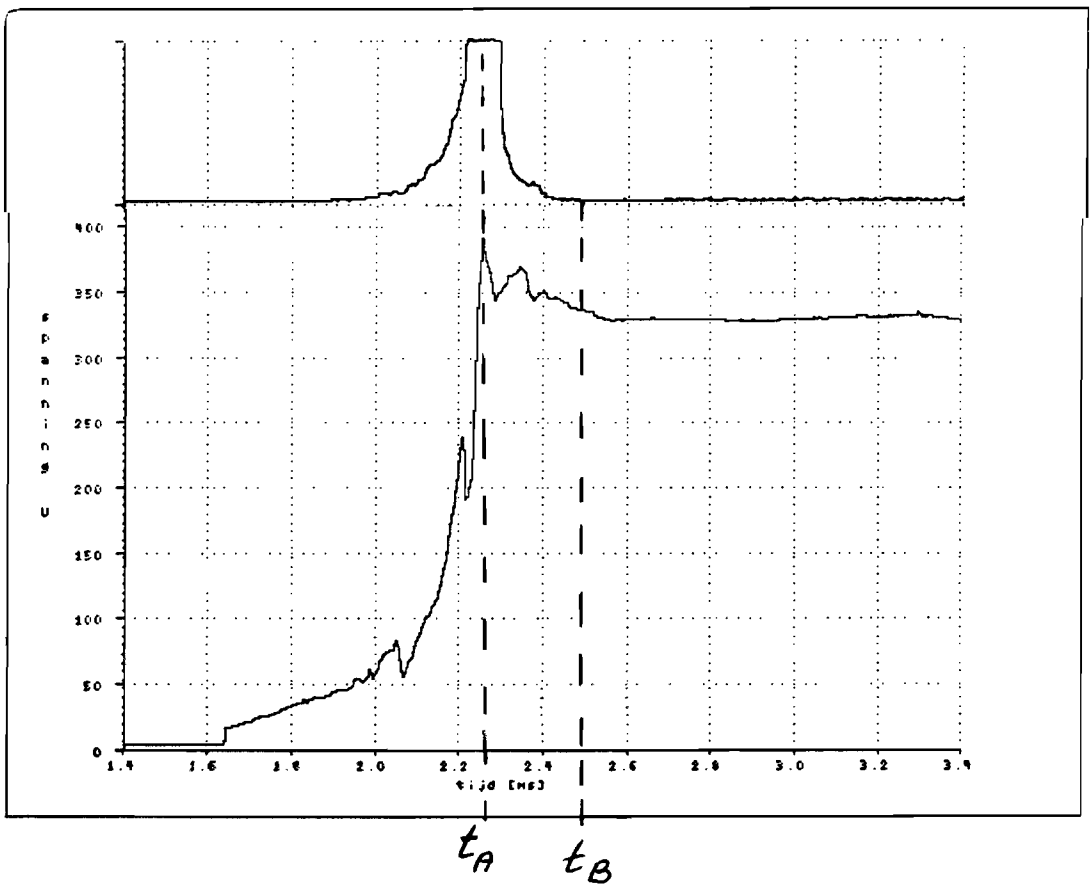


Fig.6.32: Spanningsverloop over de SBE en signaal fiber 4.

6.4: Spanningsstijging na kontaktopening.

In de spanningskarakteristiek van de SBE bij afschakeling valt direkt na kontaktopening een lineaire spanningstijging waar te nemen (dit in tegenstelling tot de CMC-QL1). Om na te gaan of deze lineaire spanningstijging direkt van de kontaktopeningssnelheid v_k afhangt is uit alle metingen met de SBE type 2 de grootte van deze spanningstijging direkt na kontaktopening op grafische wijze bepaald. Voor de spanning na kontaktopening geldt:

$$u(t) = U_{ka} + u_z(t) = U_{ka} + E.l(t) \qquad (6.6)$$

met: $u(t)$: spanning over de kontakten

U_{ka} : kathode- en anodeval

$u_z(t)$: zuilspanning van de boog

E : elektrische veldsterkte in de boog

$l(t)$: lengte van de boog

Bepaling van de spanningstijging du(t)/dt direkt na kontaktopening levert volgens (6.6):

$$du(t)/dt = E.dl(t)/dt = E.v_k \qquad (6.7)$$

met: v_k: kontaktsnelheid

Immers direkt na kontaktopening zal de boog nog niet uitgelust zijn zodat de lengte van de boog gelijk zal zijn aan de afstand van de kontakten tot elkaar. Met de in bijlage 8 vermelde gegevens omtrent de openingssnelheid van het bewegende kontakt kan uit (6.7) een schatting gemaakt worden van elektrisch veld E_0 direkt na kontaktopening:

$$E_0 = \frac{1}{v_k} \frac{du(t)}{dt}$$

waarbij du(t)/dt op de in figuur 6.33 weergegeven wijze bepaald is.

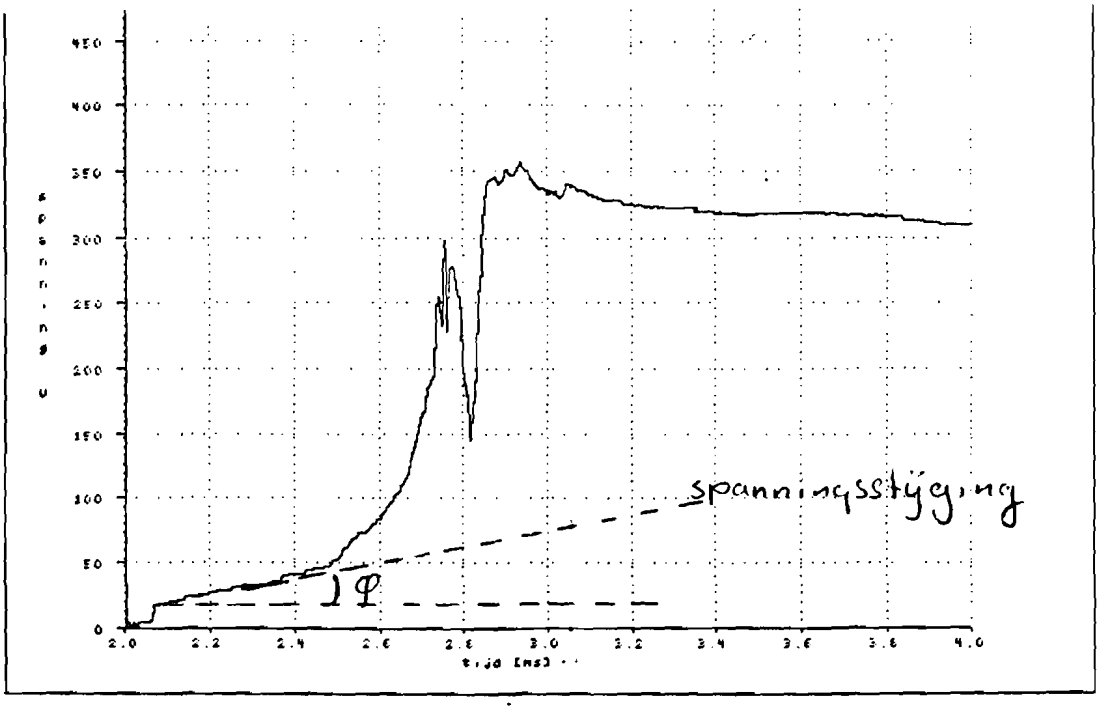


Fig.6.33: Bepaling du(t)/dt.

Voor alle metingen met de SBE type 2 is deze schatting gemaakt en in tabel 1 ... 6 in bijlage 4 opgenomen. In figuur 6.34 zijn de gevonden waarden van E_0 tegen i_c uitgezet.

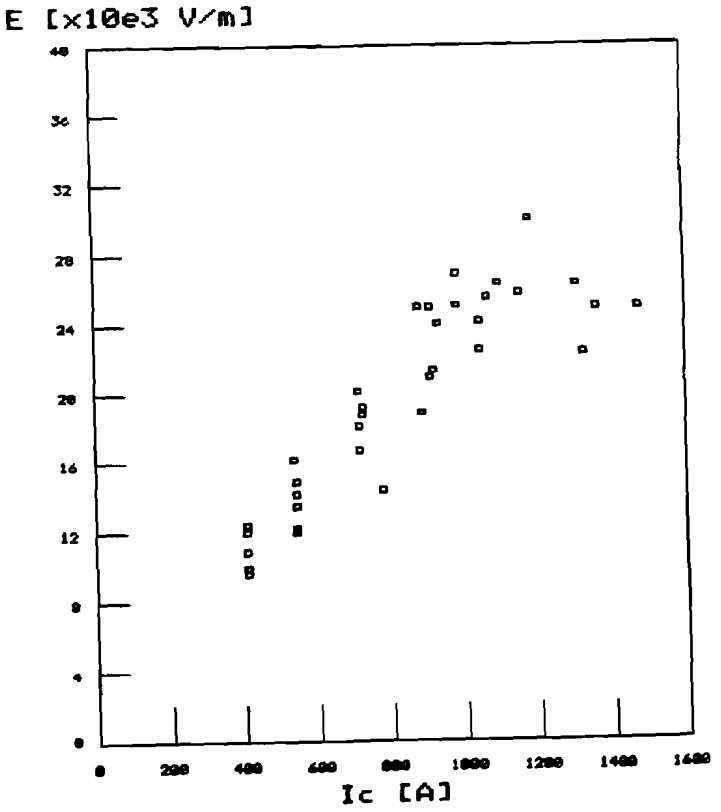


Fig.6.34: E_0 als funktie van i_c.

Uit figuur 6.34 valt waar te nemen dat E_0 bij benadering lineair met i_c toeneemt, waarbij opgemerkt dient te worden dat de gevonden waarden van E_0 voor de grootste waarden van i_c van dit lineaire verband afwijken.
Door het toenemen van het E-veld met de stroom is de lineaire spanningstijging na kontaktopening dus niet alleen door v_k bepaald.

6.5: Evaluatie behaalde resultaten ten aanzien van modellering.

Ten aanzien van de resultaten kunnen voor de modellering de volgende opmerkingen gemaakt worden:

Boogverharren en start kommutatie.

Gebleken is dat t_v en t_{kb} voor het anode-voetpunt nagenoeg aan elkaar gelijk is. t_v Voor het kathode-voetpunt op de vaste runner blijkt ook nagenoeg geen afwijking hierop te vertonen. In geval van de SBE is het gerechtvaardigd bij benadering voor het verharren van de beide voetpunten en de start van het kommutatieproces van het anode-voetpunt over één tijdstip te spreken.

Gebleken is dat de tijd van kontaktopening tot het einde van het boogverharren ten opzichte van de totale tijd van kontaktopening tot het opsplitsen van de boog tussen de boogplaatjes niet verwaarloosbaar is. Gezien het feit dat de boogspanning pas na het boogverharren een sterke stijging te zien geeft, is het van belang deze periode in het model op te nemen. Daartoe zal een kriterium voor de duur van het boogverharren gevonden moeten worden, alsmede een kriterium voor de spanningsopbouw over de automaat gedurende deze periode.

Ten aanzien van de duur van het boogverharren kan in eerste benadering gesteld worden dat deze afhankelijk is van de stroom en de kontaktopeningssnelheid. Voor de SBE bleek het mogelijk in het onderzochte meetgebied empirisch een vergelijking hiervoor op te stellen.

De spanningsopbouw over de automaat tijdens deze periode blijkt voor de SBE redelijk lineair met de tijd toe te nemen. Dit lineaire verband wordt niet alleen door de kontaktopeningssnelheid bepaald, ook het E-veld is van de stroom afhankelijk.

Kommutatie.

Het ligt voor de hand het kommutatieproces in het boogverlengen op te nemen. Dit omdat de duur relatief kort is, de beïnvloeding van het spanningsverloop niet zo groot is en de gemiddelde snelheid van het kathode-voetpunt vanaf t_{kb}, dus inklusief kommutatie, tot t_2 evenredig met de stroom is.

Verlengen van de boog.

Gekonstateerd is dat voor de SBE de gemiddelde snelheid van het kathode-voetpunt evenredig is met de stroom. Uit de metingen bleek echter dat het kathode-voetpunt nog niet geheel aan het eind van de runner is aangekomen op moment t_b dat de boogspanning zijn hoge waarde bereikt heeft. Dit betekent dat de gevonden gemiddelde snelheid niet direkt toepasbaar is voor het model. Immers dan zou aan de voetpuntbeweging een spanningsopbouw over de automaat gekoppeld moeten worden. Daarom gaat de voorkeur uit naar de beschouwing van het tijdsinterval $t_b - t_v$ in plaats van $t_2 - t_v$. Uit de metingen kan het verloop van $t_b - t_{kb}$ (met $t_{kb} \simeq t_v$) bepaald worden. Om na te gaan of in dit tijdsinterval ook van een gemiddelde snelheid evenredig met de stroom i_{kb} gesproken kan worden is in figuur 6.35 $1/(t_b - t_{kb})$, een maat voor de snelheid, tegen i_{kb} uitgezet.

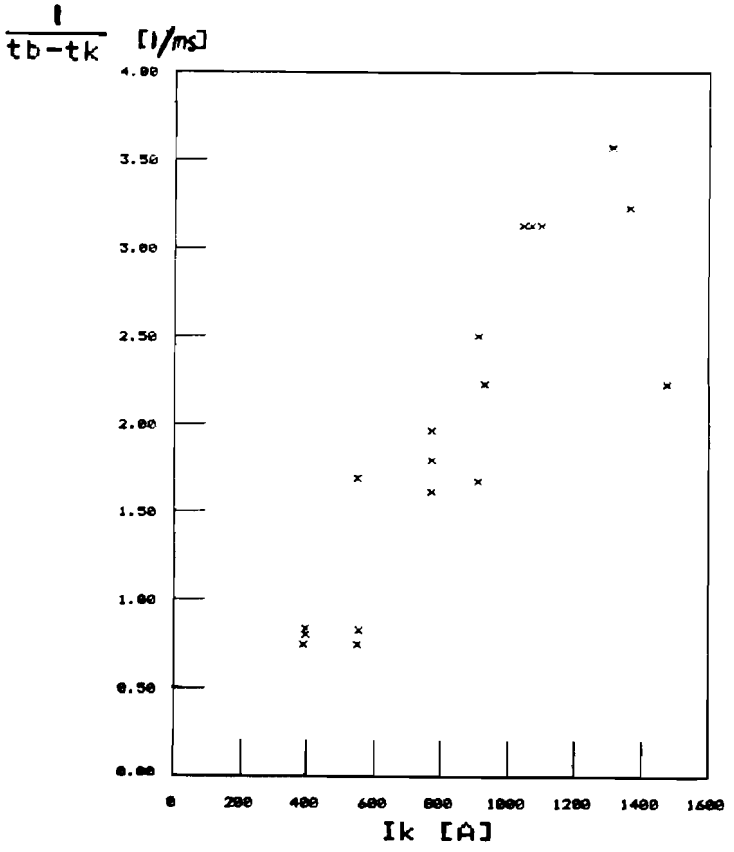


Fig.6.35: Verband tussen $\frac{1}{t_b - t_{kb}}$ en i_{kb}.

Uit figuur 6.35 blijkt dat indien het tijdsinterval $t_b - t_{kb}$ beschouwd wordt ook gesproken kan worden van een lineair veband tussen de gemiddelde snelheid en de stroom i_{kb} Dit kan voor de modelvorming in

7: Konklusies en aanbevelingen.

Ten aanzien van het model van Niemeyer kan het volgende gekonkludeerd worden:

- het kriterium voor het openen van de kontakten voldoet in beginsel goed. Indien het kriterium gebruikt wordt voor de modellering van kontaktopeningssystemen met een trip-mechanisme, dient dit trip-mechanisme in het model opgenomen te worden. In eerste instantie lijkt de invoering van een vaste vertragingstijd hiervoor te voldoen. Overigens dient in die gevallen waarin het anker ook rechtstreeks op de kontakten werkt te worden nagegaan waar de kontaktopening initieel door veroorzaakt wordt, door de anker-werking of door het trip-mechanisme. Dit zal afhankelijk zijn van de grootte van de te onderbreken kortsluitstroom.
Tevens is het van belang de verwaarlozingen zoals verzadiging, invloed van de herstelveer en afhankelijkheid van de kracht op het anker van de luchtspleetbreedte nader te kwantificeren. Dit om na te gaan in welke mate het al dan niet meenemen van deze verwaarlozingen de theoretisch af te leiden waarde beinvloedt.
- Voor de fase van het afschakelproces van kontaktopening tot het opsplitsen van de boog tussen de kontakten is door meting geen bevestiging voor het door Niemeyer voorgestelde kriterium gevonden. De afleiding van dit kriterium is niet volledig, daar direkt na kontaktopening de boog zich gedurende de "Verharrzeit" niet zal voortbewegen, hetgeen door Niemeyer niet meegenomen is. Uit metingen is gebleken dat de tijdsduur van het boogverharren ten opzichte van de tijd van kontaktopening tot opsplitsen van de boog tussen de boogplaatjes niet verwaarloosbaar is.
Uit metingen aan de SBE-type 2 bleek dat de "Verharrzeit" als een funktie van de kontaktopeningssnelheid en de stroom tijdens het boogverharren te beschouwen is. Voor de SBE-type 2 kon empirisch een kwantitatief verband hiervoor afgeleid worden. De spanningsopbouw van kontaktopening tot het einde van het boogverharren kan in eerste benadering als lineair met de tijd toenemend beschouwd worden, waarbij gebleken is dat de helling niet eenduidig door de kontaktopeningssnelheid bepaald wordt, maar dat er tevens sprake was van een toenemend E-veld met de stroom.
Ten aanzien van de beweging van de boog tussen de runners bleek uit

metingen aan de SBE-type 2 naar de beweging van het kathode-voetpunt dat de gemiddelde snelheid evenredig was met de stroom. Dit is niet direkt bruikbaar voor het model daar de spanning over de automaat reeds een hoge waarde heeft bereikt voordat de beweging van het kathode-voetpunt is voltooid. Indien echter de tijdsduur van het einde van het boogverharren tot het bereiken van de boogzuil van de boogplaatjes beschouwd wordt kan ook van een gemiddelde snelheid evenredig met de stroom gesproken worden. Dit is voor de modellering beter bruikbaar. Nagegaan dient te worden welke parameters bepalend zijn voor dit proces.

- Indien de boog tussen de boogplaatjes is opgesplitst blijft de spanning bij de SBE redelijk konstant en voldoet het model kwalitatief goed. De aanname van 28 V per deelboog is in geval van de SBE te hoog. Voor de CMC-QL1 werd geen konstant spanningsverloop gekonstateerd. Een mogelijke reden hiertoe is het niet geheel opgesplitst blijven van de boog tussen de boogplaatjes. Dit is een aanname, die nader gekontroleerd dient te worden.

Ten aanzien van dit gedeelte van het model is nader onderzoek naar de spanning per deelboogje, afhankelijk van materiaalsoort, afstand van de boogplaatjes tot elkaar en stroomsterkte van belang.

Uit metingen bleek dat er vrij grote verschillen bestonden in het afschakelgedrag van de CMC-QL1 en de SBE. Gezien de afwijking in konstrukties (kontaktopeningskarakteristiek, al dan niet gassende wanden, 1 of 2 boogkamers) zijn deze automaten ook niet goed met elkaar te vergelijken. Ten aanzien van de verdere modelvorming is het gewenst over meer metingen aan verschillende typen automaten te beschikken. Daartoe dienen de automaten eerst in groepen onderverdeeld te worden op overeenkomst in konstruktie, kontaktopenings-karakteristiek en het al dan niet toepassen van gassende wanden in de boogkamer.

Gebruikte literatuur.

[1] R.Damstra / Het modelleren van laagspanningsautomaten / afstudeerverslag TU-Eindhoven, EG-88A-11 (1988)

[2] L.Niemeyer / Berechnung des Schaltverhaltens von Strombegrenzenden Selbstschaltern / etz Archiv (1979) H.6

[3] H.C.Spink, A.E.Guile / The movement of high current arcs in transverse external and self magnetic fields in air at atmospheric pressure / ARC-CP-77 (1965)

[4] G.Burkhard / Über den Zusammenhang zwischen Verharrzeit un Wanderung von Schaltlichtbogen und ihrem Kathodemechanismus / Elektrie 24 (1970)

[5] A.Eidinger, W.Rieder / Das Verhalten des Lichtbogens im transversalen Magnetfeld / Archiv Elektrotechnik 43 (1957)

[6] L.Müller / Wanderungsvorgangen von kurzen Lichtbogen im eigenerregten Magnetfeld zwischen ruhenden Laufschienen und zwischen sich trennenden kontaktstücken / Thesis Techn. Univ. Braunsweig (1957)

[7] U.Drücker / Über die Lichtbogenbewegung im Magnetfeld von Kontaktanordnungen während des Öffnungsvorganges / Thesis Techn. Univ. Hannover (1973)

[8] A.Erk, M.Schmelzle / Grundlagen der Schaltgeratetechnik / Springer Verlag, Berlin, 1974

[9] K.Hirose / Immobility phenomena of the d.c. elektric arc of large current driven by magnetic field / Electrotechn. J. Japan 7 (1962)

[10] G.Unger / Verharrungszeit der Fusspunkte von Gleigstrom-schaltlichtbogen und Abbrand bei verschiedenen Kontaktwerkstoffen / ETZ-A 88 (1967)

[11] E.M.Belbel, M.Lauraire / Behavior of switching arc in low-voltage limiter circuit breakers / IEEE Transactions on components, hybrids, and manufacturing technology, vol. CHMT-8, NO.1, march 1985

[12] Interaction between magnet-blast arcs and contacts / W.Rieder / Proc. 28th Holm conference on electrical contacts 1982

[13] N.Behrens / Lichtbogenwanderung in Leitungsschutzschaltern / Thesis Techn. Univ. Braunsweig (1980)

[14] W.Wildmann / Arc commutation across a step or a gap in one or two parallel copper electrodes / IEEE Transactions on components, hybrids, and manufacturing technology, vol. CHMT-8, NO.1, march 1985

[15] M.Lindmayer / Über die Vorgange bei der Lichtbogeloschung in

kompakten Löschblechkammern bei Wechselströmen zwischen 2.5 und 8.5 kA / Thesis Techn. Univ. Braunsweig (1972)
[16] Bewegende boogontladingen in schakelaars / J.G.J.Sloot / Holec rapport RA 76.03.08
[17] A.E.Guile, J.G.J.Sloot / Magnetically driven arcs with combined column and electrode interactions / Proc. IEE, vol 12, No.6, june 1975
[18] G.Burkhard / Schaltgeräte der Elektroenergietechnik / VDE-Verlag GmbH Berlin (boek) blz.70
[19] D.Amft / Zur Wanderung des Lichtbogens auf Laufschienen und in Isolierstoffspaltkammern / Elektrie 21(1967) 3
[20] I.S.Tajev / Elektrischer Lichtbogen in Niederspannungsapparaten / Ausg. Energie, Moskou (1965)

Bijlage 1: Gegevens spoel en instelgebied meetcircuit.

tabel 1: Instelmogelijkheden spoel.

Aansluiting	Weerstand	Induktiviteit
0-16	56,6 mΩ	1,84 mH
0-15	53,0 mΩ	1,63 mH
0-14	49,4 mΩ	1,42 mH
0-13	45,9 mΩ	1,42 mH
0-12	42,4 mΩ	1,07 mH
0-11	38,8 mΩ	919 µH
0-10	35,3 mΩ	770 µH
0-9	31,8 mΩ	642 µH
0-8	28,2 mΩ	531 µH
0-7	24,7 mΩ	408 µH
0-6	21,2 mΩ	305 µH
0-5	17,7 mΩ	220 µH
0-4	14,1 mΩ	153 µH
0-3	10,6 mΩ	88 µH
0-2	7,1 mΩ	39 µH

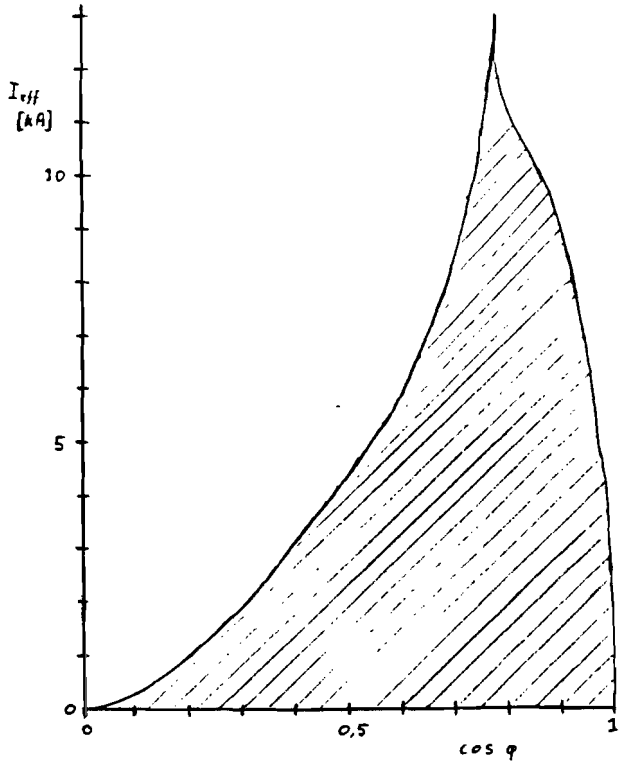


Fig.1: Instelgebied meetcircuit.

Bijlage 2: Meetresultaten CMC-QL1.

In tabel 1 ... 5 zijn de meetresultaten van de CMC-QL1 weergegeven. Tabel 6 en 7 zijn kontrole-metingen. Circuitinstellingen hiervan zijn identiek aan die van tabel 3.

Circuitinstellingen voor de 5 meetseries:

Tabelnr.	U_n [V]	I_p [A]	cos ϕ	ψ [°]	R [mΩ]	L [μH]
1	240	891	0.20	0	54	840
2	240	1640	0.26	0	38	450
3	240	1529	0.30	ϕ	47	477
4	240	2686	0.35	ϕ	31	266
5	240	5524	0.54	ϕ	23	116

Tabel 1: I_p = 891 A; cos φ = 0.20; ψ = 0.

file		m13s0	m13s1	m13s2	m13s3	m13s4
i_c	[A]	409	396	414	414	409
i_v	[A]	580	575	566	570	580
$\hat{i}$	[A]	690	699	695	695	695
Γ_{ic}	[A^2s^2]	0.044	0.041	0.047	0.047	0.045
Γ_{cb}	[A^2s^2]	0.26	0.48	0.28	0.32	0.36
Γ_{vb}	[A^2s^2]	0.11	0.26	0.13	0.16	0.017
U_b	[V]	562	513	534	519	535
i^2dt	[A^2s]	819	921	845	878	852
t_c	[ms]	2.43	2.36	2.56	2.60	2.48
t_v	[ms]	3.06	3.02	3.13	3.18	3.11
t_b	[ms]	3.79	4.13	3.95	4.05	4.03
t_e	[ms]	5.86	6.33	6.17	6.36	6.17

file		m13s5	m13s6	m13s7	m13s8	m13s9
i_c	[A]	391	405	396	409	409
i_v	[A]	561	575	570	566	566
$\hat{i}$	[A]	695	695	685	704	690
Γ_{ic}	[A^2s^2]	0.038	0.042	0.039	0.044	0.044
Γ_{cb}	[A^2s^2]	0.49	0.35	0.33	0.36	0.46
Γ_{vb}	[A^2s^2]	0.28	0.16	0.15	0.19	0.26
U_b	[V]	519	616	557	528	546
i^2dt	[A^2s]	878	831	838	889	888
t_c	[ms]	2.36	2.45	2.42	2.38	2.43
t_v	[ms]	3.00	3.09	0.33	2.96	3.02
t_b	[ms]	4.17	3.98	3.95	3.92	4.14
t_e	[ms]	6.17	5.57	5.94	6.16	6.09

Tabel 2: I_p = 1640 A; cos φ = 0.26; ψ = 0.

file		m12s0	m12s1	m12s2	m12s3	m12s4
i_c	[A]	515	476	497	506	488
i_v	[A]	736	696	741	731	750
$\hat{i}$	[A]	925	892	906	906	911
Γ_{ic}	[A^2s^2]	0.047	0.038	0.043	0.045	0.041
Γ_{cb}	[A^2s^2]	0.50	0.57	0.55	0.51	0.58
Γ_{vb}	[A^2s^2]	0.26	0.32	0.29	0.26	0.29
U_b	[V]	519	505	521	527	536
i^2dt	[A^2s]	1169	1176	1234	1156	1217
t_c	[ms]	2.08	2.08	2.00	2.03	1.97
t_v	[ms]	2.63	2.66	2.60	2.60	2.62
t_b	[ms]	3.49	3.65	3.50	3.47	3.51
t_e	[ms]	5.04	5.25	5.07	4.96	4.99

file		m12s5	m12s6	m12s7	m12s8	m12s9
i_c	[A]	511	497	515	501	511
i_v	[A]	745	741	745	722	731
$\hat{i}$	[A]	911	911	915	906	915
Γ_{ic}	[A^2s^2]	0.046	0.044	0.049	0.044	0.047
Γ_{cb}	[A^2s^2]	0.70	0.62	0.48	0.50	0.52
Γ_{vb}	[A^2s^2]	0.39	0.34	0.24	0.27	0.28
U_b	[V]	612	524	624	518	525
i^2dt	[A^2s]	1188	1207	1161	1158	1194
t_c	[ms]	2.08	2.06	2.08	2.02	2.04
t_v	[ms]	2.68	2.67	2.63	2.57	2.60
t_b	[ms]	3.73	3.64	3.46	3.46	3.49
t_e	[ms]	4.65	5.03	4.54	5.03	5.03

Tabel 3: I_{rms} = 1529 A; cos φ = 0.30; ψ = φ.

file		mxxs0	mxxs1	mxxs2	mxxs3	mxxs4
i_c	[A]	751	726	748	741	726
i_v	[A]	1024	1005	1021	1021	1028
$\hat{i}$	[A]	1195	1172	1157	1179	1172
Γ_{ic}	[A^2s^2]	0.066	0.056	0.065	0.058	0.054
Γ_{cb}	[A^2s^2]	1.18	0.87	0.72	1.04	0.94
Γ_{vb}	[A^2s^2]	0.64	0.43	0.31	0.54	0.44
U_b	[V]	722	709	625	528	525
i^2dt	[A^2s]	2225	2013	1985	2094	2000
t_c	[ms]	1.16	1.11	1.16	1.11	1.10
t_v	[ms]	1.69	1.65	1.68	1.65	1.68
t_b	[ms]	2.69	2.48	2.41	2.58	2.52
t_{ar}	[ms]	3.61	3.47	3.66	4.00	3.98

file		mxxs5	mxxs6	mxxs7	mxxs8	mxxs9
i_c	[A]	711	726	696	733	741
i_v	[A]	1021	1021	1013	1013	1028
$\hat{i}$	[A]	1172	1164	1164	1172	1179
Γ_{ic}	[A^2s^2]	0.054	0.056	0.048	0.058	0.060
Γ_{cb}	[A^2s^2]	0.78	0.67	1.03	0.93	0.63
Γ_{vb}	[A^2s^2]	0.34	0.28	0.52	0.48	0.25
U_b	[V]	551	609	634	536	559
i^2dt	[A^2s]	1975	1958	1947	2008	1906
t_c	[ms]	1.11	1.11	1.07	1.12	1.14
t_v	[ms]	1.69	1.66	1.65	1.64	1.67
t_b	[ms]	2.43	2.33	2.58	2.53	2.31
t_{ar}	[ms]	4.03	3.69	3.63	3.97	3.85

Tabel 4: $I_{\ddot{u}} = 2686$ A; $\cos\varphi = 0.35$; $\psi = \varphi$.

file		m14s0	m14s1	m14s2	m14s3	m14s4
i_c	[A]	960	1036	983	1021	1021
i_v	[A]	1421	1406	1414	1391	1429
i	[A]	1724	1731	1724	1716	1739
Γ_{ic}	[A^2s^2]	0.055	0.075	0.061	0.071	0.070
Γ_{cb}	[A^2s^2]	1.19	1.25	1.12	1.02	1.57
Γ_{vb}	[A^2s^2]	0.58	0.71	0.55	0.53	0.91
U_b	[V]	609	627	600	651	639
i^2dt	[A^2s]	3636	3684	3599	3453	3849
t_c	[ms]	0.83	0.90	0.86	0.89	0.88
t_v	[ms]	1.31	1.29	1.31	1.28	1.31
t_b	[ms]	1.98	2.04	1.97	1.94	2.14
t_w	[ms]	3.22	3.23	3.23	3.04	3.17

file		m14s5	m14s6	m14s7	m14s8	m14s9
i_c	[A]	1001	967	1024	979	990
i_v	[A]	1411	1388	1423	1502	1411
i	[A]	1730	1673	1684	1718	1707
Γ_{ic}	[A^2s^2]	0.067	0.059	0.073	0.061	0.063
Γ_{cb}	[A^2s^2]	1.38	1.00	1.05	1.07	1.12
Γ_{vb}	[A^2s^2]	0.77	0.49	0.52	0.39	0.57
U_b	[V]	608	607	610	620	619
i^2dt	[A^2s]	3620	3296	3401	3519	3457
t_c	[ms]	0.87	0.87	0.90	0.85	0.86
t_v	[ms]	1.29	1.30	1.31	1.40	1.29
t_b	[ms]	2.07	1.94	1.96	1.94	1.97
t_w	[ms]	3.19	3.11	3.13	3.11	3.11

Tabel 5: $I_{r.}$ = 5524 A; cos φ = 0.54; ψ = φ.

file		m15s0	m15s1	m15s2	m15s3	m15s4
i_{c}	[A]	1231	1505	1520	1535	1505
i_{v}	[A]	2006	2082	2067	2067	2052
i	[A]	2645	2751	2614	2660	2706
Γ_{ic}	[A^2s^2]	0.041	0.088	0.091	0.101	0.088
Γ_{cb}	[A^2s^2]	2.91	2.64	1.95	2.58	2.67
Γ_{vb}	[A^2s^2]	1.81	1.71	1.18	1.71	1.79
U_{b}	[V]	685	522	683	706	717
i^2dt	[A^2s]	6920	8142	6410	6812	7256
t_{c}	[ms]	0.56	0.66	0.67	0.69	0.67
t_{v}	[ms]	0.97	0.98	0.98	0.99	0.97
t_{b}	[ms]	1.77	1.73	1.63	1.75	1.74
t_{w}	[ms]	2.43	3.08	2.33	2.37	2.37

file		m15s5	m15s6	m15s7	m15s8	m15s9
i_{c}	[A]	1550	1505	1490	1566	1322
i_{v}	[A]	2082	2082	2052	2082	2082
i	[A]	2706	2706	2675	2706	2766
Γ_{ic}	[A^2s^2]	0.102	0.084	0.083	0.102	0.048
Γ_{cb}	[A^2s^2]	2.65	1.75	2.99	1.82	2.85
Γ_{vb}	[A^2s^2]	1.77	1.01	2.05	1.11	1.78
U_{b}	[V]	718	698	505	490	673
i^2dt	[A^2s]	6897	6670	7346	7548	7244
t_{c}	[ms]	0.69	0.65	0.66	0.69	0.56
t_{v}	[ms]	0.98	0.96	0.96	0.97	0.94
t_{b}	[ms]	1.76	1.55	1.79	1.59	1.71
t_{w}	[ms]	2.34	2.29	3.00	3.14	2.43

Tabel 6: I_{p} = 1529 A; cos φ = 0.30; ψ = φ; kontrôlemeting met originele schakelaar.

file	kmxx0	kmxx1	kmxx2
i_{c} [A]	703	726	718
i_{v} [A]	975	998	998
Γ_{ic} [A^2s^2]	0.050	0.056	0.055
Γ_{cb} [A^2s^2]	0.90	0.70	0.86
Γ_{vb} [A^2s^2]	0.47	0.32	0.43
i^2dt [A^2s]			
t_{c} [ms]	1.07	1.11	1.10
t_{v} [ms]	1.58	1.64	1.63
t_{b} [ms]	2.50	2.38	2.48
t_{ie} [ms]	3.53	3.60	3.48

Tabel 7: I_{p} = 1529 A; cos φ = 0.30; ψ = φ; kontrôlemeting met nieuwe schakelaar.

file	knmxx0	knmxx1	knmxx2
i_{c} [A]	726	703	711
i_{v} [A]	1005	990	990
Γ_{ic} [A^2s^2]	0.056	0.049	0.050
Γ_{cb} [A^2s^2]	1.04	0.87	0.77
Γ_{vb} [A^2s^2]	0.54	0.42	0.37
i^2dt [A^2s]			
t_{c} [ms]	1.10	1.07	1.07
t_{v} [ms]	1.65	1.63	1.61
t_{b} [ms]	2.61	2.48	2.41
t_{ie} [ms]	3.55	3.54	3.73

Bijlage 3: Meetresultaten SBE-type 1.

Metingen zijn gedaan bij 2 verschillende circuitinstellingen. Bij iedere instelling is bij drie inschakelhoeken gemeten.

Circuitinstellingen:

Tabelnr.	U_n [V]	I_p [A]	cos ϕ	ψ [°]	R [mΩ]	L [μH]
1	240	495	0.97	ϕ	470	375
2	240	495	0.97	ϕ + 30	470	375
3	240	495	0.97	ϕ + 55	470	375
4	240	1460	0.87	ϕ	143	258
5	240	1460	0.87	ϕ + 20	143	258
6	240	1460	0.87	ϕ + 60	143	258

Tabel 1: I_{rms} = 495 A; cos φ = 0.97; ψ = φ.

file		m21s1	m21s3	m21s4	m21s5	m21s6
i_c	[A]	511	520	515	515	478
$\hat{i}$	[A]	543	543	547	538	515
Γ_{ic}	[A^2s^2]	0.16	0.18	0.17	0.17	0.12
Γ_{cb}	[A^2s^2]	0.15	0.19	0.23	0.25	0.24
U_b	[V]	260	278	280	286	281
i^2dt	[A^2s]	707	706	710	727	638
t_c	[ms]	2.56	2.61	2.66	2.53	2.42
t_b	[ms]	3.57	3.75	3.91	3.85	3.77
t_w	[ms]	7.15	6.94	7.00	6.76	6.95

Tabel 2: I_{rms} = 495 A; cos φ = 0.97; ψ = φ + 30°.

file		m21s31	m21s32	m21s33	m21s34	m21s35
i_c	[A]	575	580	570	561	561
$\hat{i}$	[A]	593	593	580	589	593
Γ_{ic}	[A^2s^2]	0.13	0.13	0.12	0.12	0.12
Γ_{cb}	[A^2s^2]	0.29	0.20	0.31	0.35	0.16
U_b	[V]	249	266	274	275	275
i^2dt	[A^2s]	825	742	764	741	701
t_c	[ms]	1.65	1.60	1.65	1.70	1.67
t_b	[ms]	2.94	2.68	3.00	3.17	2.65
t_w	[ms]	5.83	5.35	5.36	5.51	5.45

Tabel 3: I_p = 495 A; cos φ = 0.97; ψ = φ + 55°.

file		m21s61	m21s62	m21s63	m21s64	m21s65
i_c	[A]	607	621	621	607	607
$\hat{i}$	[A]	621	626	626	616	616
Γ_{ic}	[A^2s^2]	0.13	0.17	0.17	0.13	0.13
Γ_{cb}	[A^2s^2]	0.23	0.22	0.19	0.36	0.22
U_b	[V]	277	280	252	274	240
i^2dt	[A^2s]	740	779	771	777	755
t_c	[ms]	1.47	1.60	1.62	1.46	1.46
t_b	[ms]	2.57	2.68	2.62	2.87	2.56
t_w	[ms]	4.12	3.93	4.07	4.08	4.13

Tabel 4: I_p = 1460 A; cos φ = 0.87; ψ = φ.

file		m22s1	m22s2	m22s3	m22s4	m22s5
i_c	[A]	877	869	854	854	839
$\hat{i}$	[A]	1104	1081	1066	1081	1058
Γ_{ic}	[A^2s^2]	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13
Γ_{cb}	[A^2s^2]	0.37	0.21	0.25	0.26	0.28
U_b	[V]	294	295	292	292	292
i^2dt	[A^2s]	2448	2201	2237	2314	2251
t_c	[ms]	1.46	1.41	1.46	1.50	1.51
t_b	[ms]	2.33	2.07	2.19	2.25	2.30
t_w	[ms]	6.35	6.24	6.46	6.55	6.57

Tabel 5: I_p = 1460 A; cos φ = 0.87; $\psi = \varphi + 20°$.

file		m22s31	m22s32	m22s33	m21s34	m21s35
i_c	[A]	1021	1028	1013	1005	1005
$\hat{i}$	[A]	1255	1240	1232	1210	1225
Γ_{ic}	[A^2s^2]	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15
Γ_{cb}	[A^2s^2]	0.47	0.46	0.51	0.48	0.43
U_b	[V]	291	287	289	298	296
i^2dt	[A^2s]	3092	2930	3099	2980	2910
t_c	[ms]	1.22	1.22	1.24	1.25	1.24
t_b	[ms]	2.06	2.05	2.12	2.11	2.05
t_e	[ms]	5.44	5.44	5.57	5.54	5.41

Tabel 6: I_p = 1460 A; cos φ = 0.87; $\psi = \varphi + 60°$.

file		m22s61	m22s62	m22s63	m22s64	m22s65
i_c	[A]	1066	1074	1074	1074	1074
$\hat{i}$	[A]	1240	1240	1240	1232	1255
Γ_{ic}	[A^2s^2]	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
Γ_{cb}	[A^2s^2]	0.54	0.41	0.30	0.49	0.45
U_b	[V]	262	262	264	264	266
i^2dt	[A^2s]	2532	2429	2422	2437	2531
t_c	[ms]	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
t_b	[ms]	2.04	1.92	1.81	2.00	1.95
t_e	[ms]	3.99	3.94	3.93	3.92	4.04

Bijlage 4: Meetresultaten SBE-type 2.

Bij 6 circuitinstellingen zijn metingen verricht:

Tabelnr.	U_n [V]	I_p [A]	cos ϕ	ψ [^{o}]	R [mΩ]	L [μH]
1	212	302	0.99	ϕ	695	315
2	212	444	0.98	ϕ	468	302
3	212	800	0.98	ϕ	260	168
4	212	1070	0.91	ϕ	180	261
5	212	1390	0.85	ϕ	131	248
6	212	2030	0.82	ϕ	86	190

In de tabellen is in de kop "pol" van polariteit opgenomen. Deze heeft de waarde "A" ingeval het anode-voetpunt van het bewegende kontakt af kommuteert of "K" indien het kathode-voetpunt kommuteert.

Tabel 1: I_b=302 A, cos φ = 0.99, $\psi = \varphi$.

file	sbe51s1	sbe51s3	sbe51s4	sbe51t7	sbe51t8	sbe51t9
pol	A	A	A	K	K	K
i_c [A]	409	409	409	409	409	409
i_k [A]	391	396	396	382	354	363
i [A]	409	409	409	409	409	414
Γ_{ic} [A^2s^2]	0.36	0.37	0.37	0.37	0.37	0.36
Γ_{cb} [A^2s^2]	0.31	0.26	0.26	0.24	0.24	0.19
Γ_{kb} [A^2s^2]	0.111	0.099	0.091	0.051	0.022	0.014
Γ_{keb} [A^2s^2]	0.071	0.052	0.061	0.045	0.016	0.012
$\bar{v}_b$ [V]	326	328	343	314	266	231
i^2dt [As^2]	568	557	552	542	559	570
t_c [ms]	4.07	4.29	4.27	4.21	4.22	4.27
t_k-t_c [ms]	0.72	0.64	0.69	0.87	1.12	1.08
$t_{ke}-t_k$ [ms]	0.22	0.28	0.18	0.04	0.08	0.04
t_b-t_c [ms]	2.05	1.87	1.88	1.81	1.77	1.56
t_b-t_k [ms]	1.33	1.23	1.19	0.94	0.64	0.48
t_b-t_{ke} [ms]	1.11	0.95	1.01	0.90	0.55	0.44
t_e-t_b [ms]	0.40	0.50	0.43	0.52	1.02	1.65
t_e [ms]	6.53	6.67	6.59	6.54	7.01	7.49
t_1 [ms]	0.73	0.63	0.70	-	-	-
t_2 [ms]	1.97	1.72	1.77	-	-	-
V_{keth} [m/s]	29.0	33.0	33.6	-	-	-
E_o[10^3 V/m]	9.6	12.0	9.6	10.9	10.9	12.4

Tabel 2: I_b = 444 A, cos φ = 0.98, $\psi = \varphi$.

file	sbe41s5	sbe41s6	sbe41s8	sbe41t5	sbe41t6	sbe41t8
pol	A	A	A	K	K	K
i_c [A]	543	538	543	543	543	543
i_k [A]	547	547	552	547	543	543
i [A]	547	547	552	552	552	552
Γ_{ic} [A^2s^2]	0.30	0.30	0.30	0.29	0.30	0.30
Γ_{cb} [A^2s^2]	0.17	0.45	0.39	0.21	0.22	0.28
Γ_{kb} [A^2s^2]	0.050	0.237	0.190	0.029	0.028	0.073
Γ_{keb} [A^2s^2]	0.030	0.132	0.126	0.024	0.022	0.043
$\bar{v}_b$ [V]	303	311	312	316	281	308
i^2dt [As^2]	714	819	789	733	801	754
t_c [ms]	3.13	3.13	3.29	3.20	3.15	3.16
t_k-t_c [ms]	0.48	0.46	0.46	0.72	0.78	0.65
$t_{ke}-t_k$ [ms]	0.13	0.30	0.19	0.04	0.04	0.15
t_b-t_c [ms]	1.07	1.79	1.66	1.18	1.23	1.40
t_b-t_k [ms]	0.59	1.32	1.19	0.45	0.44	0.74
t_b-t_{ke} [ms]	0.46	1.02	1.00	0.41	0.40	0.59
t_e-t_b [ms]	1.84	1.17	1.26	1.57	1.72	1.50
t_e [ms]	6.04	6.09	6.22	5.95	6.10	6.06
t_1 [ms]	0.45	0.54	0.47	-	-	-
t_2 [ms]	1.34	1.95	1.81	-	-	-
V_{kath} [m/s]	40.4	25.5	26.9	-	-	-
E_o[10^3 V/m]	12.0	16.2	13.5	14.2	12.2	14.9

Tabel 3: I_p = 800 A, cos φ = 0.98, $\psi = \varphi$.

file	sbe61s2	sbe61s3	sbe61s4	sbe61t1	sbe61t2	sbe61t3
pol	A	A	A	K	K	K
i_c [A]	711	726	718	779	726	718
i_k [A]	771	771	771	839	794	786
i [A]	786	794	786	839	794	794
Γ_{ic} [A^2s^2]	0.22	0.22	0.22	0.30	0.23	0.22
Γ_{cb} [A^2s^2]	0.21	0.18	0.28	0.25	0.22	0.29
Γ_{kb} [A^2s^2]	0.094	0.079	0.120	0.059	0.045	0.061
$\Gamma_{k\bullet b}$ [A^2s^2]	0.015	0.027	0.038	0.036	0.031	0.047
$\bar{v}_b$ [V]	326	320	315	317	313	313
i^2dt [As^2]	1022	965	1092	1138	997	1040
t_c [ms]	2.21	2.05	2.25	2.24	2.15	2.19
$t_k - t_c$ [ms]	0.29	0.28	0.36	0.44	0.49	0.53
$t_{k\bullet} - t_k$ [ms]	0.33	0.21	0.27	0.08	0.06	0.05
$t_b - t_c$ [ms]	0.85	0.79	0.98	0.87	0.88	0.99
$t_b - t_k$ [ms]	0.55	0.50	0.62	0.42	0.38	0.45
$t_b - t_{k\bullet}$ [ms]	0.22	0.29	0.35	0.34	0.32	0.40
$t_\bullet - t_b$ [ms]	1.46	1.66	1.87	1.83	1.93	1.87
$t_\bullet$ [ms]	4.52	4.50	5.10	4.94	4.96	5.06
t_1 [ms]	0.29	0.26	0.33	-	-	-
t_2 [ms]	1.13	1.06	1.22	-	-	-
$V_{k\bullet th}$ [m/s]	42.9	45.0	40.4	-	-	-
E_0[10^3 V/m]	20.1	19.2	16.7	14.4	18.7	18.0

Tabel 4: I_p = 1070 A, cos φ = 0.91, ψ = φ.

file	sbe71s1	sbe71s2	sbe71s3	sbe71t1	sbe71t2	sbe71t3
pol	A	A	A	K	K	K
i_c [A]	832	854	854	915	885	877
i_k [A]	907	907	930	1013	983	968
$\hat{i}$ [A]	945	960	968	1021	998	990
Γ_{ic} [A^2s^2]	0.22	0.22	0.22	0.30	0.30	0.30
Γ_{cb} [A^2s^2]	0.16	0.25	0.21	0.24	0.24	0.20
Γ_{kb} [A^2s^2]	0.066	0.153	0.091	0.066	0.061	0.050
Γ_{keb} [A^2s^2]	0.016	0.050	0.034	0.021	0.026	0.019
$\bar{v}_b$ [V]	319	314	316	315	321	312
i^2dt [As^2]	1396	1430	1451	1778	1668	1618
t_c [ms]	1.92	1.82	1.80	1.98	2.16	2.21
t_k-t_c [ms]	0.24	0.17	0.25	0.35	0.38	0.35
$t_{ke}-t_k$ [ms]	0.20	0.25	0.17	0.15	0.12	0.12
t_b-t_c [ms]	0.64	0.77	0.70	0.71	0.73	0.67
t_b-t_k [ms]	0.39	0.59	0.44	0.35	0.35	0.32
t_b-t_{ke} [ms]	0.20	0.33	0.27	0.20	0.22	0.19
t_e-t_b [ms]	2.77	2.72	2.77	2.76	2.60	3.05
t_e [ms]	5.33	5.31	5.27	5.45	5.49	5.93
t_1 [ms]	0.39	0.24	0.26	-	-	-
t_2 [ms]	0.88	1.04	0.75	-	-	-
V_{keth} [m/s]	73.5	45.0	73.5	-	-	-
E_0[10^3 V/m]	20.9	24.9	24.0	21.3	18.8	24.9

Tabel 5: I_b = 1390 A, cos φ = 0.86, $\psi = \varphi$.

file	sbe81s1	sbe81s2	sbe81s3	sbe81t1	sbe81t2	sbe81t3
pol	A	A	A	K	K	K
i_c [A]	1006	953	968	1043	983	983
i_k [A]	1096	1043	1066	1179	1134	1111
i [A]	1164	1104	1126	1202	1164	1142
Γ_{ic} [A^2s^2]	0.23	0.23	0.23	0.31	0.23	0.23
Γ_{cb} [A^2s^2]	0.17	0.15	0.16	0.35	0.26	0.24
Γ_{kb} [A^2s^2]	0.066	0.058	0.062	0.093	0.058	0.060
$\Gamma_{k\ddot{u}b}$ [A^2s^2]	0.022	0.007	0.004	0.038	0.035	0.018
$\bar{v}_b$ [V]	320	310	307	312	309	305
i^2dt [As^2]	2077	1895	2012	2481	2209	2148
t_c [ms]	1.61	1.74	1.69	1.82	1.64	1.67
$t_k - t_c$ [ms]	0.21	0.21	0.23	0.37	0.38	0.34
$t_{k\ddot{u}} - t_k$ [ms]	0.27	0.31	0.24	0.13	0.06	0.14
$t_b - t_c$ [ms]	0.53	0.53	0.55	0.74	0.66	0.64
$t_b - t_k$ [ms]	0.32	0.31	0.32	0.36	0.29	0.30
$t_b - t_{k\ddot{u}}$ [ms]	0.05	0.10	0.08	0.23	0.23	0.17
$t_{\ddot{u}} - t_b$ [ms]	3.05	3.47	3.53	3.13	3.25	3.40
$t_{\ddot{u}}$ [ms]	5.20	5.74	5.77	5.68	5.55	5.71
t_1 [ms]	0.24	0.22	0.23	-	-	-
t_2 [ms]	0.68	0.78	0.76	-	-	-
$V_{k\ddot{u}th}$ [m/s]	81.8	64.3	67.9	-	-	-
E_o[10^3 V/m]	26.3	22.4	25.4	24.1	26.8	25.0

Tabel 6: I_p = 2030 A, cos φ = 0.82, $\psi = \varphi$.

file	sbe91s1	sbe91s3	sbe91s4	sbe91t1	sbe91t2	sbe91t3
pol	A	A	A	K	K	K
i_c [A]	1262	1164	1210	1323	1149	1179
i_k [A]	1474	1308	1361	1489	1308	1338
i [A]	1566	1383	1429	1542	1376	1391
Γ_{ic} [A^2s^2]	0.32	0.24	0.24	0.33	0.23	0.23
Γ_{cb} [A^2s^2]	0.64	0.20	0.25	0.31	0.18	0.22
Γ_{kb} [A^2s^2]	0.240	0.072	0.098	0.089	0.053	0.067
$\Gamma_{k\bullet b}$ [A^2s^2]	0.103	0.007	0.018	0.024	0.004	0.013
$\bar{v}_b$ [V]	318	302	303	309	305	309
i^2dt [As^2]	4124	2902	3180	3890	2849	2922
t_c [ms]	1.56	1.47	1.40	1.48	1.47	1.44
t_k-t_c [ms]	0.34	0.21	0.22	0.27	0.24	0.25
$t_{k\bullet}-t_k$ [ms]	0.16	0.19	0.18	0.13	0.17	0.15
t_b-t_c [ms]	0.79	0.49	0.53	0.55	0.48	0.52
t_b-t_k [ms]	0.45	0.28	0.31	0.27	0.24	0.27
$t_b-t_{k\bullet}$ [ms]	0.29	0.08	0.13	0.14	0.06	0.11
$t_\bullet-t_b$ [ms]	3.24	3.88	3.70	3.46	3.86	3.69
$t_\bullet$ [ms]	5.60	5.84	5.63	5.50	5.81	5.65
t_1 [ms]	0.56	0.21	0.15	-	-	-
t_2 [ms]	0.97	0.69	0.73	-	-	-
V_{kath} [m/s]	90.0	73.5	62.1	-	-	-
E_o[10^3 V/m]	24.8	26.2	24.8	22.2	25.7	30.0

Bijlage 5: Bepaling stroomwaarde waarbij SBE in verzadiging gaat.

Nagegaan is bij welke momentane stroomwaarde de SBE type 1 en type 2 in verzadiging gaan. Uitgangspunt bij de schatting vormt het magnetisch circuit van de SBE type 1, zoals weergegeven in figuur 1.

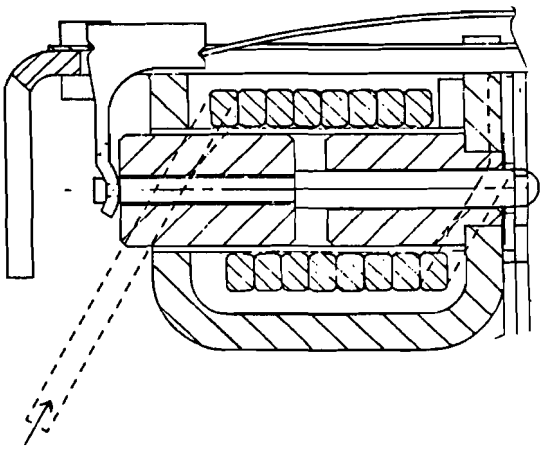


Fig.1: Magnetische circuit SBE type 1.

Indien B niet in verzadiging is, geldt voor B:

$$B = \frac{w.i}{\frac{l_{FE}}{\mu_R.\mu_0} + \frac{x_L}{\mu_0}} \simeq \frac{\mu_0.w.i}{x_L} \qquad (1)$$

met: w : aantal windingen.
l_{FE}: ijzerweg.
x_L : lengte luchtspleet.

Gesteld dat het B-veld bij 1.6 T in verzadiging gaat, kan met behulp van (1) en relevante gegevens van de SBE een schatting gemaakt worden. Met (1) volgt:

$$i = \frac{1.6\ x_L}{w\ \mu_0} \qquad (2)$$

Voor de SBE type 1 geldt:

w = 8

$x_L = 2.5\ 10^{-3}$ m

Met $\mu_0 = 4.\pi\ 10^{-7}$ volgt uit (2) dat het B-veld bij een stroom i van circa 400 A in verzadiging gaat.

Voor de SBE type 2 is het magnetische circuit op het windingenaantal w gelijk aan dat van de SBE type 1. Er geldt:

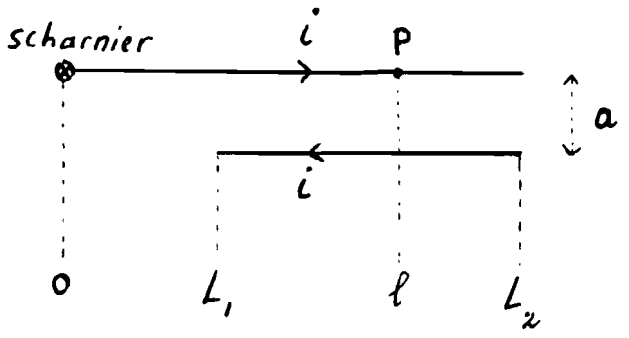
$w = 5$

$x_L = 2.5\ 10^{-3}$ m

Uit (2) dat het B-veld bij een stroom i van circa 640 A in verzadiging gaat.

Bijlage 6: Bepaling stroomwaarde waarbij het kontakt van de SBE door de repulsie-kracht geopend wordt.

Uitgangspunt bij deze schatting zijn twee evenwijdige lijnstukken, waarvan 1 lijnstuk aan het eind een scharnier heeft. Dit lijnstuk met scharnier staat voor het bewegende kontakt, het andere lijnstuk voor de vaste runner. Aangenomen wordt dat bijde lijnstukken stroom voeren. In figuur 1 is deze konfiguratie weergegeven.



$L_1 = 6\ 10^{-3}$ m
$L_2 = 24\ 10^{-3}$ m
$a = 2\ 10^{-3}$ m

Fig. 1: Schematische weergave vaste runner en beweegbare kontakt.

Om te bepalen bij welke momentane stroomwaarde het beweegbare kontakt door de repulsie-kracht geopend wordt dient het moment van de repulsie-kracht ten opzichte van het scharnier bepaald te worden. Daartoe zal eerst een uitdrukking voor het B-veld ter plaatse van lijnstuk 1 bepaald moeten worden. Hieruit kan vervolgens de kracht en het moment ten opzichte van het scharnier bepaald worden.
Het B-veld als funktie van l voor lijnstuk 1 in figuur 1 ten gevolge van de stroom i door lijnstuk 2 kan met behulp van de wet van Biot-Savart bepaald worden. Deze stelt aan de hand van de konfiguratie weergegeven in figuur 2 dat voor het B-veld in punt P ten gevolge van een stroom i in het interval dl geldt:

$$d B_P = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{\bar{dl} \times \bar{r}}{r^3} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{\sin \phi \, dl}{r^2} \qquad (3)$$

In (3) kan geschreven worden:

$$r^2 = a^2 + l^2$$

$$\sin \phi = \frac{a}{\sqrt{a^2 + l^2}}$$

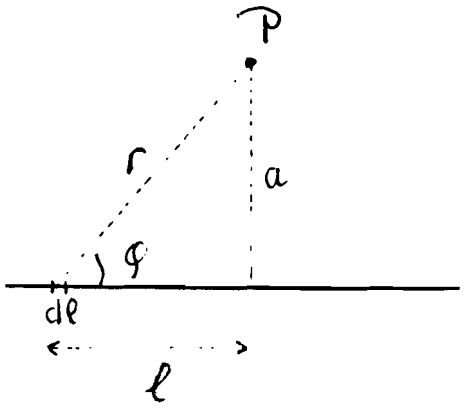


Fig.2: Konfiguratie voor bepaling (3)

zodat (3) overgaat in:

$$d\,B_P = \frac{\mu_0\, i}{4\,\pi}\,\frac{a\;dl}{\left[\,a^2 + l^2\,\right]^{3/2}} \qquad (4)$$

Met (4) kan B(l) voor lijnstuk 1 bepaald worden:

$$d\,B_P = \frac{\mu_0\, i}{4\,\pi}\int_{L_1-1}^{L_2-1}\frac{a}{\left[\,a^2 + l^2\,\right]^{3/2}}\,dl$$

$$= \frac{\mu_0\, i}{4\,\pi\, a}\left[\,\frac{l}{\sqrt{a^2+\,l^2}}\,\right]_{L_1-1}^{L_2-1}$$

$$= \frac{\mu_0\, i}{4\,\pi\, a}\left[\,\frac{L_2-1}{\sqrt{a^2+\,(L_2-1)^2}} - \frac{L_1-1}{\sqrt{a^2+\,(L_1-1)^2}}\,\right] \qquad (5)$$

Met de uitdrukking voor B(l) kan het moment ten opzichte van het scharnier bepaald worden. Immers voor de lorenzkracht op plaats l op lijnstuk 1 over een interval dl, $dF_L(l)$, geldt:

$$dF_L(l) = B(l)\; i\; dl$$

Voor het moment dM(l) ten gevolge van $dF_L(l)$ geldt:

$$dM(l) = dF_L(l)\ l = B(l)\ i\ l\ dl \qquad (6)$$

Integratie van (6) van l = 0 tot l = L_2 levert het totale moment M ten opzichte van het scharnier op:

$$M = \int_0^{L_2} dM(l) = \int_0^{L_2} B(l)\ i\ l\ dl \qquad (7)$$

Substitutie van (5) in (7) levert een integraal op die weliswaar analytisch oplosbaar is, echter weinig inzicht verschaft. Daar er een schatting van het moment gemaakt wordt en de modelvorming volgens figuur 1 al een benadering is, is het gerechtvaardigt met een benadering voor B(l) verder te rekenen. In figuur 3 is het verloop van $B(l)/\frac{\mu_0\ i}{4\ \pi\ a}$ volgens vergelijking (5) uitgezet. De stippellijn in deze figuur geeft de waarde aan die zou ontstaan indien lijnstuk 2 oneindig lang zou zijn.

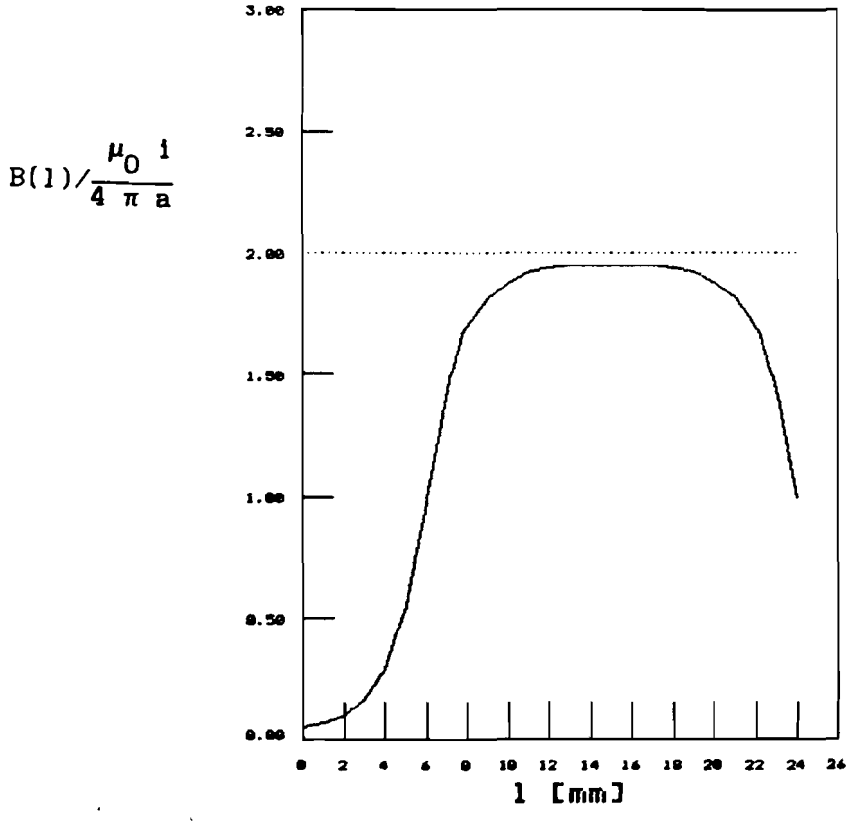


Fig.3: Verloop $B(l)/\frac{\mu_0\ i}{4\ \pi\ a}$.

Uit figuur 3 blijkt dat het verloop van het B-veld redelijk te benaderen is door:

$$B(l) / \frac{\mu_0 \, i}{4 \pi a} = 1.9 \text{ voor } 6 \text{ mm} \leq l \leq 24 \text{ mm}$$

$$B(l) / \frac{\mu_0 \, i}{4 \pi a} = 0 \text{ voor } l < 6 \text{ mm en } l > 24 \text{ mm}$$

Hiervan gebruik makend gaat (7) over in:

$$M = \int_{L_1}^{L_2} \frac{\mu_0 \, i}{4 \pi a} \, 1.9 \, i \, l \, dl$$

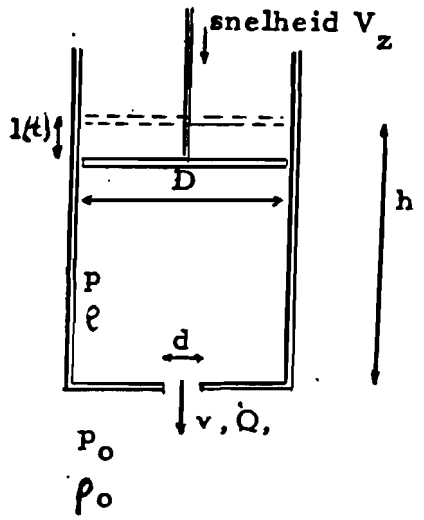
$$= \frac{\mu_0 \, i^2}{4 \pi a} \, 1.9 \, 0.5 \left[L_2^2 - L_1^2 \right]$$

$$\simeq 2.6 \, 10^{-8} \, i^2 \qquad (8)$$

Bij zowel de SBE type 1 als type 2 bedraagt de kontaktdruk in rust ten gevolge van de veer circa 9 N. Dit betekent ten opzichte van het scharnier een moment van $9 \times 24 \, 10^{-3} = 0.216$ Nm. Het kontakt zal door de repulsie-kracht geopend worden indien het door deze kracht veroorzaakte moment volgens (8) groter is dan 0.216 Nm. Dit is het geval indien de momentane stroomwaarde i groter wordt dan circa 2.9 kA.

Bijlage 7: Cylindermodel.

De boog wordt voorgesteld als een zuiger welke zich in een cylinder beweegt, waarbij de cylinder aan de onderzijde op een uitstroomopening na is afgesloten. In figuur 1 is deze konfiguratie weergegeven.



v : gasuitstroomsnelheid
Q : gasuitstroomdebiet
P_o, ρ_o: omgevingsdruk /-dichtheid
P, ρ : druk/dichtheid in cylinder
l(t) : verplaatsing zuiger
D : doorsnede zuiger
d : doorsnede uitstroomopening
h : maximale slag zuiger
v_z: snelheid zuiger

Fig. 1: Model-konfiguratie.

Indien de zuiger in figuur 1 naar beneden bewogen wordt zal de lucht in de cylinder gekomprimeerd worden en dientengevolge zal er door de uitstroomopening een luchtuitstroom plaatsvinden. De beweging van de zuiger zal samenhangen met de mate van uitstroming. De berekening van de zuigerbeweging zal dan ook afgeleid kunnen worden uit berekeningen aan de gasuitstroom.
Indien v < c (geluidssnelheid) gelden onderstaande vergelijkingen:

$$Q(t) = a.\sqrt{\frac{2k}{k-1}\ P.\rho.\left[\left[\frac{P_o}{P}\right]^{2/k} - \left[\frac{P_o}{P}\right]^{(k+1)/k}\right]} \qquad (1)$$

$$v(t) = \sqrt{\frac{2k}{k-1}\ \frac{P}{\rho}\left[1 - \left[\frac{P_o}{P}\right]^{(k-1)/k}\right]} \qquad (2)$$

$$P(t) = P_o\left[\frac{\rho}{\rho_o}\right]^k \qquad (3)$$

$$\rho(t) = \frac{\rho_o.A.h - \int_0^t Q\ dt}{A.h - A.l(t)} \qquad (4)$$

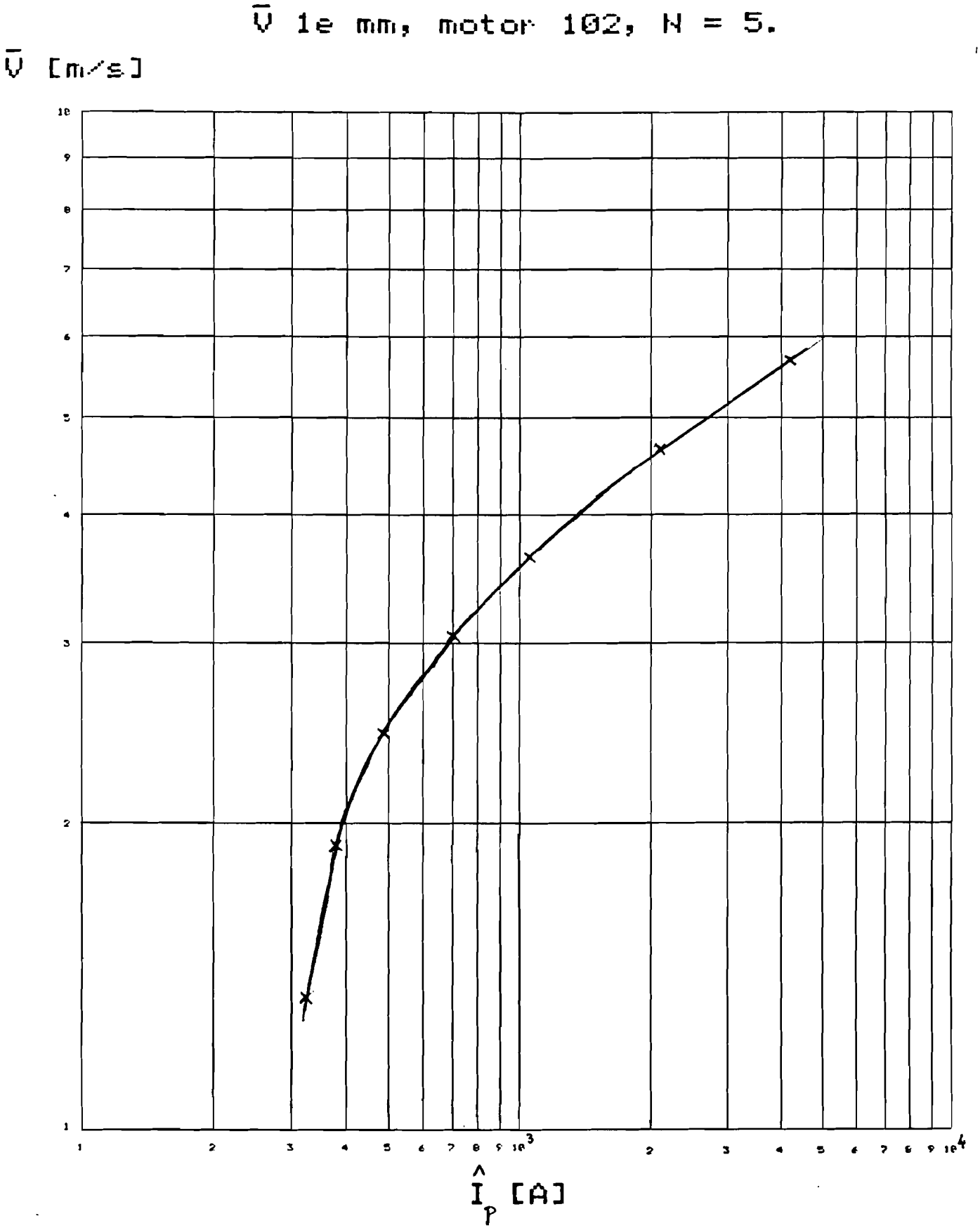
Hierin is:

A : oppervlakte zuiger ($\pi.D^2$)

a : oppervlakte uitstroomopening ($\pi.d^2$)

k : $\frac{c_p}{c_v}$ met c_p = specifieke warmte medium bij konstante druk

c_v = specefieke warmte medium bij konstant volume

In vergelijking (1) is een relatie voor het uitstroomingsdebiet Q gegeven, in vergelijking (2) een relatie voor de uitstroomsnelheid v. Het gehele proces is isentroop verondersteld, hetgeen inoudt dat er geen warmte-uitwisseling met de omgeving plaatsvindt. Er geldt dan P/ρ^k = konstant, waarmee de vorm van vergelijking (3) verklaart is. Tenslotte is in vergelijking (4) ρ gegeven aan de hand van het quotient van de momentane gasmassa in de cylinder en het momentane volume van de cylinder.

Bijlage 8: Openingskarakteristiek SBE-type.