

MASTER

Entwicklung von Vakuumschaltkammern mit Hilfe von im CAD integrierten Feldberechnungen

Peters, I.P.

Award date:
1996

[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.

Diplomarbeit:

**Entwicklung von
Vakuumschaltkammern mit
Hilfe von im CAD
integrierten Feldberechnungen.**

I.P. Peters
EH.96.A.147

Begleitung :Ir. J.H.F.G. Lipperts (ACE)
:Dipl.-Ing. D. Gentsch (ACE)
Supervisor :Dr.Ir. J.M. Wetzer (TUE)
:Prof.Dr.Ir. P.C.T. van der Laan (TUE)
Zeitspanne :Mai 1995 - Januar 1996

Diese Arbeit wurde in der Entwicklungsabteilung der Fa. ABB durchgeführt. Dabei sind einige Neuentwicklungen bearbeitet worden. In dieser Ausarbeitung können deshalb die Beschreibungen nicht vollständig und bis ins Detail durchgeführt werden.

Aus diesem Grund sind nicht alle Anhänge bei jedem Exemplar dieser Arbeit beigefügt worden.

Zusammenfassung

ABB Calor-Emag Schaltanlagen AG (ACE) entwickelt und produziert Vakuumschaltkammern für den Mittelspannungsbereich. Diese Kammern werden in Leistungsschalter eingesetzt.

Bei der Konstruktion, Entwicklung und im Betrieb dieser Kammern ist es notwendig die elektrische Feldstärken und Feldlinienverlauf der Kammern zu berechnen. Damit bekommt man ein Feldlinienkennfeld innerhalb und außerhalb der Kammer. Für die dazu notwendige Berechnungen wird das von ABB Forschungsinstitut in Dättwil entwickelte Programm HSSSM4 eingesetzt.

Die einzugebene Daten sind die einzelne Koordinaten einer Geometrie. Dieses bedeutet, es besteht kein Zusammenhang zwischen der Konstruktionszeichnung, die im CAD-System erstellt wird und der Berechnungssoftware für elektrische Felder.

Ziel dieser Arbeit ist die Lücke zwischen den beiden Computersystemen zu schließen, indem man ein Softwareprogramm entwickelt das die Konstruktionszeichnung in Koordinaten zerlegt, die Daten entsprechend des Eingabeformates für HSSSM4 aufbereitet und die Datei bereitstellt.

Ein Zusatz im Softwareprogramm ermöglicht die Ergebnisse aus HSSSM4 direkt zu übersetzen und in das CAD-System rück zu übertragen. Damit wird dem Entwickler ein Werkzeug an die Hand gegeben, mit dessen Hilfe er schon bei der Konstruktion kritische Stellen eines Bauteils im Hochspannungsfeld erkennen kann.

Zum Test des Programms und dessen Wirksamkeit sind drei Kammern im CAD gezeichnet und anschließend berechnet. Dazu gehören die VG2-Kammer (stehende Konstruktion) und die beiden

Neukonstruktionen VG4 und VG2-R-Kammer für 12 und 24 kV. Letztgenannte Kammer ist eine Neuentwicklung. Die Kammer hat zum Verschließen keine metallischen Deckel; die Keramikkörper sind abgerundet. Vorteile dieser Bauart sind: Die Isolationsstrecke verlängert sich, ohne daß die Kammerlänge zunimmt; die Zahl der Bauteile ist geringer, die Kammer ist einfacher zu bauen.

Bei der Konstruktion und Berechnung werden die kritischen Stellen erkennbar. Im Test der drei Kammern ist geprüft, ob die in der Theorie erkannten Stellen ebenfalls in der Praxis als kritisch anzusehen sind. Dazu wurden die Kammern im Hochspannungslabor der ACE bis zum Versagen mit Wechsel- und Stoßspannung beansprucht.

Da die weiterentwickelte VG2-R neue (und besondere) Keramiken und Schirme verlangt, müssen diese extra bestellt werden. Durch die lange Lieferzeiten ist es nicht möglich während der Diplomarbeit die Kammer zu bauen und zu prüfen.

Samenvatting

ABB Calor-Emag Schaltanlagen AG (ACE) ontwikkelt en produceert vakuumschakelbuizen voor middenspanning. Deze schakelbuizen worden in vermogenschakelaars ingebouwd.

Bij de constructie, ontwikkeling en het bedienen van deze schakelbuizen is het nodig de elektrische veldverdeling te berekenen, zodat het veld binnen en buiten de buis bekend is. Voor de berekeningen wordt het door het ABB onderzoeksinstituut in Dättwill ontwikkelde programma HSSSM4 gebruikt. Dit programma maakt gebruik van de surface-charge-simulation-method.

De geometrie van een schakelbuis wordt ingevoerd door het opgeven van de coördinaten van de lijnen in de tekening. Er bestaat geen koppeling tussen de konstruktietekening, die in het CAD-systeem getekend wordt, en de E-veldberekeningsprogrammatuur.

Het doel van het afstudeerwerk was beide computerprogramma's met elkaar te verbinden door een computerprogramma te schrijven dat de coördinaten van de konstruktietekening bepaalt en deze in het invoerformaat van HSSSM4 in een file wegschrijft.

Een toevoeging aan het programma maakt het mogelijk de berekeningsresultaten van HSSSM4 in het CAD-systeem te presenteren. Hiermee heeft de konstrukteur een gereedschap in handen, waarmee hij al bij de ontwikkeling de kritische punten van een schakelbuis kan herkennen.

Als test voor het programma zijn drie schakelbuizen in het CAD-systeem getekend en vervolgens berekend. Dit waren de VG2 (een bestaande buis) en de beide nieuwe ontwikkelingen, de VG4 en VG2-R

voor 12 en 24 kV. Het laatstgenoemde type is een totaal nieuwe ontwikkeling. Dit type heeft ter afsluiting aan de boven- en onderzijde niet een metalen deksel, maar heeft een keramische omhulling die tot de stroomgeleiders doorloopt. Voordelen van deze bouwvorm zijn dat de isolatieafstand toeneemt zonder dat de totale hoogte groter wordt; het aantal onderdelen is kleiner; de schakelbuis is gemakkelijker te bouwen.

Bij de konstruktie en berekening worden de kritische plaatsen herkenbaar. Door de hoogspanningstest van de drie typen is gecontroleerd of de theoretisch als kritische bepaalde punten ook in de praktijk kritisch zijn. Hiertoe werden de buizen bij een hoogspanningsbeproeving bij ACE met stoot- en wisselspanning getest totdat de buizen beschadigd raakten.

De verdere ontwikkeling van de VG2-R vereist nieuwe (en bijzondere) keramische delen en schermen. Door de lange levertijden was het niet mogelijk om tijdens het afstuderen dit nieuwe type te bouwen en te beproeven.

Inhalt

1 Einführung.	3
1.1 Aufgabe von Schaltanlagen im Elektroenergiesystem.	3
1.2 ABB Calor-Emag Schaltanlagen AG.	5
1.3 Konstruktiver Aufbau einer Vakuumschaltkammer.	6
1.4 E-Feldberechnungen (HSSSM4).	9
1.5 Neue Vakuumschaltkammern.	11
2 Vakuum-Isolierung.	13
2.1 Einführung.	13
2.2 Durchschlag durch Elektronenemission.	15
2.2.1 Fowler-Nordheim-Theorie.	16
2.2.2 Durchschlagsmechnismen.	17
2.2.3 Durchschlag durch Verunreinigungen.	19
2.3 Durchschlag durch Teilchen.	21
2.3.1 Kräfte auf Mikroteilchen.	22
2.3.2 Erweiterungen der Theorie.	23
2.4 Konditionierung.	24
2.5 Isolatoreinfluß.	24
2.6 Schlußfolgerung.	27
3 Das HSSSM4.	29
3.1 Methoden zur Berechnung elektrostatischer Felder.	29
3.2 Die Eingabe der Daten.	37
3.3 Ausgabe der Daten.	40
4 Das Euclid3.	45
4.1 Einführung.	45
4.2 Ausgabe der Daten.	46
4.3 Aufbau des Programms.	48
5 Die Kopplung von Euclid und HSSSM4.	51
5.1 Einführung.	51
5.2 Die Schritte.	52

5.3	Das Pre-Processing.	52
5.4	Die Berechnung.	54
5.5	Das Post-Processing.	55
6	Kammeraufbau.	57
6.1	Allgemeine Bauarten.	57
6.2	Die Schirmung.	59
6.3	Der Zentrierring.	61
6.4	Konditionierung.	61
7	Die Hochspannungsprüfungen.	63
7.1	Einführung.	63
7.2	Die Prüfeinrichtung.	64
7.3	Die Prüfung der Kammern bei ACE.	66
8	Die runde Kammer VG2-R.	69
8.1	Einführung.	69
8.2	Die erste Geometrie.	70
8.3	Eine verbesserte Geometrie.	72
8.4	Schlußfolgerung.	73
9	Die VG4.	75
9.1	Einführung.	75
9.2	E-Feldberechnungen.	77
9.2.1	Die Standart VG4.	77
9.2.2	Die VG4 mit Einrollung nach außen, Spalt 4,4 mm.	77
9.2.3	Die VG4 mit Einrollung nach außen, Spalt 6,3 mm.	78
9.3	Prüfung der VG4 (Originalgeometrie).	79
9.4	Schlußfolgerung.	81
10	Die VG2.	83
10.1	E-Feldberechnungen.	83
10.2	Hochspannungsmessungen.	84
10.3	Vergleich Berechnung und Praxis.	86
10.4	Vergleich der VG2 und VG4.	86
11	Schlußfolgerung.	89
11.1	E-Feldberechnungen.	89
11.2	Die VG2-R.	90
11.3	Die VG4.	90
11.4	Die VG2.	91
12	Literaturverzeichnis.	93

Anhang A	
Berechnung VG2-R (1. Variante).	95
Anhang B	
Hochspannungsmessungen an der VG2-R (erste Variante).	96
Anhang C	
Berechnung VG2-R (2. Variante).	97
Anhang D	
Berechnung der VG4-1.	98
Anhang E	
Berechnung der VG4-2 (4,4 mm).	99
Anhang F	
Berechnung der VG4-3 (6,3 m).	100
Anhang G	
Hochspannungsmessungen an der VG4.	101
Anhang H	
Berechnung der VG2.	103
Anhang I	
Hochspannungsmessungen an der VG2.	104

Vorwort.

In Ratingen, einer Kleinstadt gerade nördlich von Düsseldorf, wurde 1925 der Betrieb Calor-Emag gegründet. Mitte der siebziger Jahre erfolgte die Übernahme von Calor-Emag durch BBC. Anfang der neunziger Jahre fand eine Fusion zwischen BBC und Asea statt, mit dem neuen Namen Asea Brown Boveri. 1994 sind dann ABB Schaltanlagen (Mannheim/Groß-Auheim) und Calor-Emag zusammen gegangen in ABB Calor-Emag Schaltanlagen AG (Abkürzung ACE). ACE hat insgesamt etwa 2250 Mitarbeiter, mit Standorten in Ratingen, Mannheim, Groß-Auheim, Ferch und Wentorf.

In Zusammenarbeit mit der Technische Universität Eindhoven wurde diese Diplomarbeit bei ACE ausgeführt.

Ich möchte mich hierbei bei ACE, ins besondere bei der Abteilung EMV, bedanken für die Möglichkeit meine Diplomarbeit hier auszuführen. Ins besondere den Herrn Gentsch bin ich Dank verschuldet für seine Bemühung, die Schreibfehler in dem Text zu verbessern.

1

Einführung.

1.1 Aufgabe von Schaltanlagen im Elektroenergiesystem.

Die Kraftwerke erzeugen elektrische Energie, die von dort aus das Elektrizitätsversorgungsnetz speisen über Hochspannungsleitungen. Von hier aus werden die Mittelspannungs-Verteilungsanlagen versorgt. Die Elektrizität wird dann bei einer Spannung von 10-50 kV über kleinere Abstände verteilt. Nachher wird diese Spannung dann noch erniedrigt bis 400 V, oder die Mittelspannung wird direkt an größeren Abnehmer weitergeleitet.

Beim Betreiben von Elektrizitätsnetzen müssen, zu Wartungszwecken und bei Fehler oder Störungen zielgerichtet Netzteile abgetrennt werden können.

Ein Fehler im Elektrizitätsnetz kann ein Kurzschluß sein. Der Kurzschluß verursacht Spannungsdips in großen Teilen des umliegenden Netzes. Bei viele Benutzer können diese Spannungsänderungen weitere Störungen verursachen. Außerdem können entstehende Lichtbögen Teile des umliegenden Netz beschädigen. Durch die thermische und dynamische Wirkung der Kurzschlußströme können auch in weiter entfernte Netzteile Schäden entstehen. Bei länger dauernde Störungen ist die Stabilität des ganzen Netzes gefährdet. Eine Kurzschluß soll sofort abgeschaltet werden.

Ein andere Art von Fehler ist Überbelastung. In diesem Fall folgt der Strom seinem normalen Weg, ist aber zu groß um längere Zeit zu fließen und muß deshalb abgeschaltet werden bevor ein Netzschaden entsteht.

Fehler können zum Beispiel in elektrischen Geräte oder Anlagen entstehen, durch Beschädigung von Leitungen (zum Beispiel durch Grundarbeiten) oder durch Einschalten nach Wartungsarbeiten von einem Netzteil das sich noch im geerdeten Zustand befindet.

Um einen Schaden einzuschränken muß man so schnell wie möglich die Fehlerstelle von dem Rest des Netzes trennen. Bei Nominalströmen bis 100 A und Spannungen bis 36 kV kann man hierzu eventuell Schmelzsicherungen benutzen. Bei höheren Werten hat man diese Wahl nicht und ist man auf Leistungsschalter angewiesen.

Leistungsschalter können neben den Nennströmen auch Kurzschlußströme entsprechend ihres Leistungspotentiales sicher und zuverlässig vom Primärnetz abtrennen. Außer Leistungsschalter gibt es noch Nennstromschalter die nur den Nominalstrom und kleine Überströme unterbrechen können. Zum Letzten gibt es auch noch Trenner die nur stromlos geöffnet und geschlossen werden können. Zweck der Trenner ist, eine sichere Scheidung zwischen dem Netz und einem Netzteil an dem gearbeitet wird zu haben .

Im Bereich der Mittelspannung gibt es verschiedene Arten von Leistungsschalter. So gibt es luft-, SF₆- und vakuumisolierte Schaltanlagen. Heutzutage finden die Schaltmedien SF₆ und Vakuum am häufigsten Anwendung. In der Zukunft finden wahrscheinlich immer mehr die umweltverträglich und zuverlässig arbeitenden Vakuumleistungsschalter Zugang zu den Verteilungsanlagen.

Vakuumschaltkammern haben gegenüber herkömmlichen Technologien eine ganze Reihe von Vorteilen. Ihre kompakte Bauform ermöglicht eine entsprechende Verkleinerung der Kompletanlage bei gleichzeitiger Erhöhung der Betriebssicherheit. Die geforderten Schaltleistungen bzw.

Isolierfestigkeiten werden dabei durch den Einsatz der Vakuumtechnologie bei sehr geringen Kontaktabständen erreicht. Auf den Einsatz von -aus ökologischer Sicht- bedenklichen Isolierstoffen wie Öl oder Schwefelhexafluorid-Gas (SF_6) kann somit verzichtet werden. Wenn im SF_6 -Gas ein Durchschlag stattgefunden hat, entstehen sehr giftige Gase.

Eine Vakuumschaltkammer ist im Vergleich zum SF_6 -Schalter besser im Stande direkt nach dem Abschalten Überspannungen zu halten, weil das Bogenmedium sehr schnell verschwindet: Sie hat direkt wieder ihres normale Isoliervermögen. Das ist aber auch ein Nachteil: Wenn bei einer Überspannung ein Durchschlag erfolgt, wird die Überspannung begrenzt. SF_6 -Schalter sorgen deshalb im Vergleich zum Vakuumschaltkammern besser für die Begrenzung der Überspannungen.

Vakuumschaltkammern sind sehr kompakt und müssen deshalb innen über kleine Abstände (zirka 8 mm.) große Spannungen (12-24 kV) ohne Durchschlag halten können. Durchschläge können sowohl innen (zwischen den Kontakten oder zwischen einem Kontakt und der Schirmung) als auch außen (über der Isolierungsstrecke) stattfinden. Zum Vermeiden von Durchschläge an der Außenseite wird eine Kammer oft von SF_6 -Gas umgeben. Ein Eingießen in Gießharz ist eine weitere Möglichkeit.

1.2 ABB Calor-Emag Schaltanlagen AG.

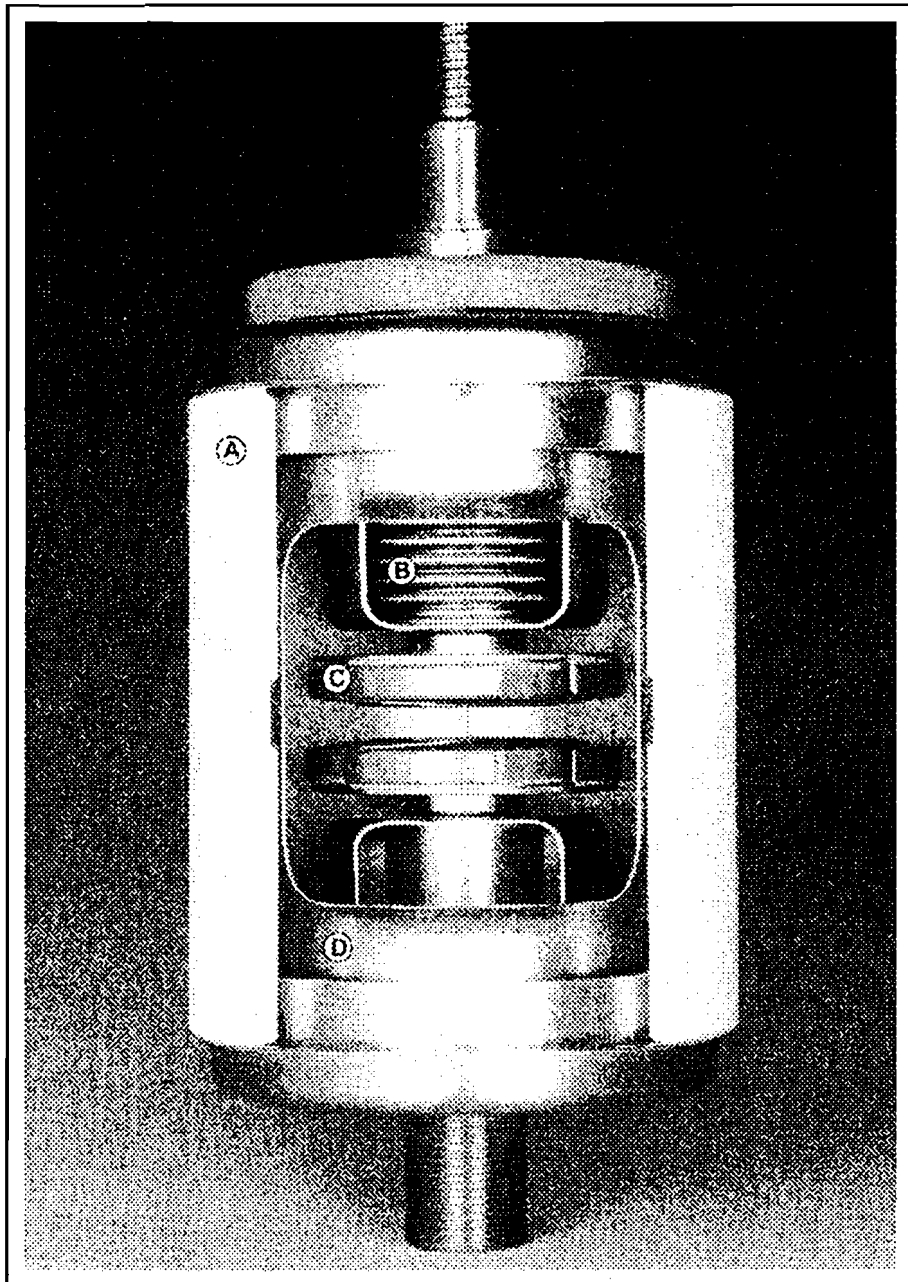
Die ACE (ABB Calor-Emag Schaltanlagen AG) im Standort Ratingen stellt Schaltanlagen, Schalter und Vakuumkammern her. Sie deckt damit das gesamte Gebiet der Mittelspannung ab.

Alle Schaltanlagen und deren Komponenten, sowie kundenspezifische Aufträge entwickelt ACE am Standort. Dazu gehört insbesondere die Entwicklung von Vakuumschaltkammern in der Abteilung EMV (Entwicklung Mittelspannung Vakuum). Dort konzentriert man sich bei Neuentwicklungen auf die elektrischen Eigenschaften, Spannung und Strom. Aus den Ergebnisse der elektrische Feldberechnungen lassen sich kritische Bereiche einer Kammer erkennen und konstruktiv anpassen.

1.3 Konstruktiver Aufbau einer Vakuumschaltkammer.

An Hand der Figur 1.1 wird die Funktion einer Vakuumschaltkammer beschrieben. Die Teile sind hauptsächlich aus den Werkstoffen Keramik, Edelstahl und Kupfer hergestellt [1].

Die Vakuumschaltkammer besteht aus den Komponenten: Kammerdeckel, den Kupferzuleitungen, dem zylindrischen Keramikrohrabschnitt aus hochreinem Al_2O_3 (A) und dem Faltenbalg (B), der eine mechanische Bewegung des Kontaktstücks (C) im Vakuum der Schaltkammer ermöglicht. Der Faltenbalg wird abgeschirmt von dem Balgschirmung. Die Bewegung des aus einem gesinteren CuCr-Verbundwerkstoff bestehenden Kontaktstücks erfolgt durch einen Federspeicherantrieb, der die bei geschlossenem Schalter sich berührenden Kontaktstück sehr rasch auf Abstand bringt. Der Mittenschirm (D) schirmt die Keramik beim Schalten gegen die Bedampfung mit Metall ab. Die metallischen Schirmungen dienen zudem einer optimalen elektrischen Feldsteuerung bei geöffneten Kontakten.



Figur 1.1 Vakuumschaltkammer in geöffneter Darstellung.

Beim Öffnen der Kontakte entsteht, wenn in dem Moment ein Strom fließt, zwischen den Kontakten ein Lichtbogen. Dieses Plasma wird am oder kurz vor dem Stromnulldurchgang gelöscht. Das kommt vom nachstehenden Prinzip. Das Plasma, besteht aus Metaldampf. Die Ladungsträger in dem Bogen sind Elektronen von ionisierten Atomen und die schwereren Ionen.

Das Plasma steht zwischen der Anode und mehreren Kathodenbrennflecken. Auf dem Kathodenbrennflecke zieht der Strom sich zusammen auf einem Gebiet im Größe von 1-10 μm . Wegen der so entstandener große Stromdichtigkeit (10^{12} A/m^2) schmelzt und verdampft an dieser kleinen Stelle Kathodematerial. Wegen der hohe Temperatur ($4-6 \cdot 10^3 \text{ K}$) und der sehr großen elektrischen Feldstärke (10^9 V/m) können die elektronen im Metall austreten in das Vakuum (Tunnel-Effekt). In dem Vakuum können diese Elektronen durch Zusammenstoßen Metaldampf-Atomen ionisieren. Das so entstandene Plasma sorgt für die Stromleitung. Das Plasma ist überigens ladungsneutral.

Der oben beschriebenen Prozess sorgt für die Lieferung des Bogenmaterials. Es verbraucht dabei Kathodematerial. Dieses Material bedampft auf dem Mittenschirm. Der Größe des Kathodematerialverlusts hängt ab von der Stromgröße. (Bei CuCr zirka $35 \mu\text{gr/C}$) [2]. Die Kraters in der Kathodeoberfläche sind die Folgen der Kathodenbrennflecken.

Der Zahl der gleichzeitig brennenden Flecken ist abhängig von der Stromgröße; desto kleiner der Strom, desto weniger Flecken es gibt. Die Leistung des Bogens ist $P=U \cdot I$. U ist die Bogenspannung, I der Strom. Der Wert der Spannung ist ungefähr konstant (für Kurzschlußströme bis zirka 10 kA zirka 30-100 V). Dieses bedeutet, daß die Leistung des Bogens abhängig ist von dem Strom. Der Sinus des Wechselstroms hat die Eigenschaft, daß der Strom Nulldurchgänge hat. Wenn die von außen zugeführte Leistung kleiner ist als die durch Kühlung abgeführte Leistung, wird am Ende auch der letzte Kathodenbrennfleck gelöscht.

Kurz nach dem Abschalten entsteht, aus der induktiven Energie im Netz, über den Kontakten eine Überspannung. Wenn das Plasma dann noch nicht ganz verzvunden ist, ist es möglich, daß durch dem Plasma wieder strom fließen wird. Die Temperatur an den Kontakten nimmt wieder zu und entsteht ein thermische Durchschlag, gefolgt von Wiederzündung.

Eine andere Möglichkeit ist, daß die Kontaktabstand (noch) zu klein ist für die Überspannung. Es entsteht ein neuer Überschlag (später als ein Viertelperiode nach dem Nulldurchgang) und man hat eine Rückzündung.

Bei beiden Möglichkeiten entsteht ein neuer Bogen und die Unterbrechung der Strom hat nicht gelungen. Wenn dieser Vorgang sich nach den folgenden Nulldurchgängen wiederholt, spricht man von einem Stehbogen. Der Gesamtsystem ist überlastet.

Ein Vorteil der Wiederzündung und Rückzündung ist, daß die Überspannungen auf natürlicher Weise begrenzt werden.

1.4 E-Feldberechnungen (HSSSM4).

Leistungsschalter sind Sicherheitsgeräte. Im geöffneten Zustand der Vakuumkammer, dürfen keine Durchschläge erfolgen, die ein zuverlässiges Trennen des oder der Netzteile reduzieren. Deshalb ist es notwendig bei der Konstruktion und Entwicklung die Ausbildung des elektrischen Kennfeldes zu berechnen, mit der man Stellen mit großer elektrischer Feldstärke vermeiden kann.

Das Programm für Feldberechnungen, HSSSM4, wurde vom ABB Forschungsinstitut in Dättwil (Schweiz) in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich entwickelt.

Die Benutzung dieses Programms ist ziemlich kompliziert da das Programm nur der Berechnung dient. Die zu berechnende Geometrie ist in Einzelkoordinaten zu zerlegen, so daß zu einer Linie die beiden X- und Y-Punkten einzugeben sind. Für einen Kreis die Koordinaten des Mittelpunkts und der Anfangs- und Endwinkel. Dadurch wird die Eingabe der Daten zu einer Geometrie zeitintensiv.

Die Ausgabe der Berechnungsergebnisse erfolgt ebenfalls nicht in graphischer Form. In einer Ausgabedatei, kann zu den Koordinaten die berechnete Feldstärke herausgefunden werden, die an einer bestimmten Stelle der Geometrie herrscht.

Es sind natürlich auch optimierte Programme erhältlich. Wie zum Beispiel das Programm "Ace"¹, das ebenfalls von ABB entwickelt wurde. Dieses Programm ermöglicht eine CAD-Eingabe, also eine graphische Eingabe einer Geometrie zur Berechnung. "Ace" läuft unter dem Betriebssystem Unix und kann deshalb nicht auf einem VMS-Rechner² von ACE benutzt werden. Bei ACE findet seit vielen Jahren das HSSSM4-Programm Anwendung. Die Eingabe einer Geometrie sollte direkt vom CAD-System möglich werden.

Ziel ist, die Ein- und Ausgabeprozesse durch ein Verbinden einer CAD-Zeichnung mit dem Berechnungsprogramm HSSSM4 zu vereinfachen. Vorteil beim Benutzen einer CAD-Anwendung ist, daß man die im CAD-System vorhandenen Zeichnungen direkt benutzen kann, und nicht zuerst mit Hilfe eines anderen Editors die Daten übernehmen muß. HSSSM4 braucht nämlich eine Texteingabedatei, in der alle Linien und Kreibögen umschrieben werden. Wie man eine Geometrie eingibt ist in Paragraph 3.2 beschrieben.

Das zur Zeit von ACE benutzte CAD-Programm ist Euclid3³. Nachdem die beiden Programme verbunden sind, muß eine Zeichnung auf dem CAD-Bildschirm durch nur wenige Handlungen ins HSSSM4-Format umgewandelt werden. Die Berechnung startet vom CAD-Bildschirm aus. Als Zusatz können die Ergebnisse der Berechnung wieder auf dem CAD-Schirm dargestellt werden.

Dies ist der erste Teil der Diplomarbeit. Der zweite Teil enthält die Entwicklung neuer Schaltkammern. Für die dafür erforderliche Berechnungen wird die Verbindung zwischen Euclid3 und HSSSM4 benutzt. Nach der Berechnung und Konstruktion müssen die Testkammern Wechselfpannungs-, Stoßspannungs- und Leistungsgeprüft werden.

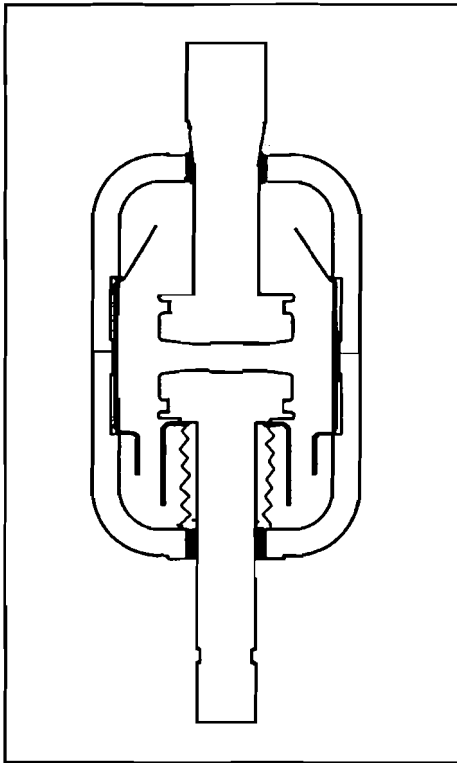
¹ Die Name "Ace" soll nicht verwirrt werden mit die Betriebsname ACE.

² VMS (Virtual Memory System) ist der Betriebssystem der Firma Digital.

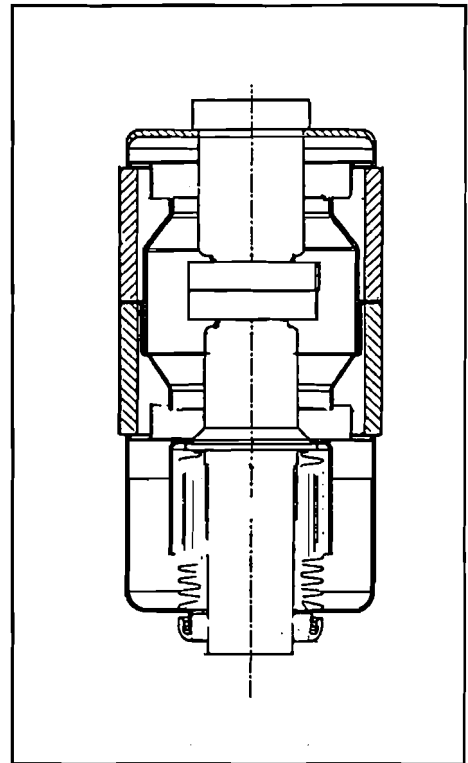
³ Die in 1995 benutzte Version ist Euclid3 1.1 von Oktober 1993, hergestellt von der Firma Matra Datavision.

1.5 Neue Vakuumschaltkammern.

Zu diesem Zeitpunkt sind neue Vakuumschaltkammern in der Entwicklungsphase. Zwei davon sollen im Folgenden betrachtet werden: Die VG4 und die VG2-R. Beide Kammern sind völlige Neukonstruktionen. Die VG4 hat im Gegensatz zu den heute bei ACE üblichen Kammern, eine deutlich kürzere Keramiklänge. Damit ist die äußere Isolationsstrecke deutlich kürzer.



Figur 1.2 VG2-R-Kammer.



Figur 1.3 VG4-Kammer

Die VG2-R besteht fast ausschließlich aus einem Isolationskörper: die Keramik läuft an Ober- und Unterseite bis zu den Stromanschlüssen durch. Damit wird primär die äußere Isolationsstrecke, bei gleichem Stichmaß deutlich verlängert.

An beiden Kammern werden zur Optimierung der Konstruktion Berechnungen an unterschiedlichen Geometrien durchgeführt. Da die äußeren Stichmaße festliegen, beziehen sich die Berechnungen in erster Linie auf die inneren Komponenten, hier speziell der Schirmungsausführung. Die Schirmung dient hauptsächlich zwei Zwecken, der Abschirmung der Keramik gegen Bedampfen und der

elektrischen Feldsteuerung innerhalb und außerhalb der Kammer. Sie steht damit in Zielkonflikt. Die beste Konstruktion in beider Hinsicht wird als Proband erstellt und zuerst im Hochspannungslabor geprüft. Die VG2-R ist in Kapitel 8, die VG4 wird in Kapitel 9 beschrieben.

Die Prüfungsergebnisse werden mit den Berechnungsergebnissen verglichen. Außerdem wird die schon produzierte VG2 zum Vergleich mit der VG4 geprüft. (Kapitel 10).

2

Vakuum-Isolierung.

2.1 Einführung.

Im Laufe der Jahren sind zur Löschung und elektrischen Isolierung in Schaltkammern verschiedene Arten von Löschmedien und Isolierungen eingesetzt worden: flüssige (Öl) und gasförmige (SF_6 , Luft). Zunehmend findet Vakuum Anwendung. Ist Vakuum zwischen den Elektroden vorhanden, kann kein Strom fließen, da kein ionisierbares Medium vorliegt. Obwohl Vakuum vorliegt, besteht die Möglichkeit, daß unvorhersagbare, kurze Entladungen zwischen den Elektroden entstehen. Die dielektrische Festigkeit des Vakuums ist plötzlich aufgehoben, ein elektrischer Durchschlag liegt vor.

Für einen großen Teil der Anwendung von Vakuumkammern oder Dioden sind Durchschläge sehr schädlich; nach einem Durchschlag ist die Leistung von zum Beispiel Vakuumdioden sehr stark verringert. Im Falle einer Vakuumschaltkammer sind Durchschläge zwar unerwünscht, können aber toleriert werden. Sie können sogar benutzt werden für Konditionierung (Verbesserung der Elektrodenoberfläche, siehe weiter).

Um Innendurchschläge zu verringern, kann die Kammer groß dimensioniert sein: bei großen Kontaktabständen sind Durchschläge erst bei entsprechend höheren Spannungen zu erwarten. Im Zuge der Bauteilverkleinerung von Schaltkammern (und damit auch zur Verkleinerung der kompletten Schaltanlagen) zu kommen, ist ein gutes Verständnis

der fundamentalen physischen Prozessen erforderlich. Latham [3] hat hierüber ausführlich berichtet.

Obwohl Vakuum als Löschmedium und Dielektrikum erst seit kürzerer Zeit für Leistungsschalter angewendet wird, wird seit vielen Jahrzehnten das Vakuum als Dielektrikum untersucht. Vakuum wird schon länger angewendet in zum Beispiel Röntgen- und Fernsehrohre. Früher war man durch fehlende Vakuumtechnik, nicht in der Lage für Leistungsschalter genügend niedrige Drücke zu erzielen und zu halten. Es fehlte an guten Pumpen, Dichtungen und gasarmen Werkstoffen. Die Vakuumqualität lag bei $\sim 10^{-3}$ - 10^{-4} mbar. Hinzu kam die Entgasung von Kontakten und Isolatoren.

Wenn der Kammerinnendruck ausreichend groß ist, daß die mittlere freie Weg für Elektronen kleiner ist als der Abstand zwischen den Elektroden, ist die Voraussetzung für einen Durchschlag gegeben. Unter diesem Druck folgt die Durchschlagspannung Paschen's Gesetz. Es definiert den Durchschlagspannung als Funktion des Produkts $p \cdot d$. (p =Druck, d =Abstand).

Heutzutage werden Vakuumschaltkammern mit einem Innendruck von kleiner als 10^{-7} mbar in Serie hergestellt. Durch bessere Entgasung der Werkstoffe bei hohen Temperaturen ist die Gasabgabe in der Vakuumkammer bei Raumtemperatur gering. Deshalb ist der Vakuumkammerinnendruck keine Begrenzung für die Spannungsfestigkeit.

Wenn kein Medium zwischen den Elektroden vorhanden ist, ist für einen Durchschlag ein ionisierbares Medium erforderlich. Dieses kann Material aus der Oberfläche einer metallischen Elektrode stammen. Dieses konnte in Meßreihen nachgewiesen werden. Man hat durch einen Einsatz von Anoden und Kathoden aus unterschiedlichen Materialien gefunden, daß sowohl Anoden- als auch Kathodenmaterial eine Distanz zwischen den Elektroden Falle eines Durchschlag überqueren kann.

1952 beschrieb Cranberg [4] die Mikroteilchentheorie. Diese Theorie sagt aus, daß kleine Teilchen die nicht sehr fest an einer Elektrode haften, von den elektrostatischen Kräften vom Material abgezogen

werden. Durch diese Kräfte werden sie beschleunigt und erreichen die andere Elektrode mit großer Geschwindigkeit. Durch den Einschlag verdampft aus dieser Elektrode etwas Material und/oder das Teilchen selbst verdampft, womit ein Durchschlag entstehen kann.

Mit dieser Theorie konnte erklärt werden, warum ein Durchschlag unabhängig von dem Vordurchschlagstrom ist, und wodurch ein Materialtransport zwischen den Elektroden möglich ist. Eine weitere Erklärung ist im folgenden Paragraphen beschrieben.

Ungefähr gleichzeitig fand Dyke [5],[6],[7] heraus wie Elektronen einen Durchschlag verursachen können. Er stellte fest, daß die scharfkantige Mikrospitzen auf den Elektroden eine wichtige Rolle spielen. Vor einem Durchschlag fließt der Vordurchschlagstrom zwischen der Anode und einer Mikrospitze auf einer Kathode. Die scharfe Spitze sorgt dabei für die notwendige Feldverstärkung. Er hat außerdem festgestellt, daß bei einer kritischen Stromdichte von rund 10^{10} Am^{-2} die emittierende Oberfläche thermisch instabil wird und Kathodmaterial verdampfen kann. Damit ist ein kathodeninitiierte Durchschlag vorhanden.

Hierzu ist es notwendig, daß die Kathodenspitzen scharfkantig sind. Sind sie weniger angespitzt, ist ein anodeninitiiertes Durchschlag möglich. Hierbei erreicht die Stromdichte auf der Anode lokal so hohe Werte, daß an dieser Stelle aus der Elektrode Material verdampft. Zusammen mit dem Metaldampf kann eine Entladung entstehen. Dieses stellte man um 1960 fest.

Der auftretende Elektronenstrom ist unter dem Namen Feld-Elektronen-Emission (FEE) bekannt.

2.2 Durchschlag durch Elektronenemission.

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die physischen Grundlagen der Elektronenemission.

Elektronen können u.a. durch Tunnelung aus einem Metall austreten. Durch Tunnelung können sie den Potentialwall durchtunneln. Die Fowler-Nordheim Gleichung beschreibt die Stromdichte durch

Tunnelung ausgetretener Elektronen. Diese Gleichung ist für Temperaturen kleiner als 300 K anders als für höhere Temperaturen. Ein Grund dafür ist, daß bei höheren Temperaturen mehr Elektronen eine Energie oberhalb der Fermi-Ebene haben.

2.2.1 Fowler-Nordheim-Theorie.

Die Fowler-Nordheim-Theorie geht von der Elektron-Supply-Funktion $N(W_x)dW_x$ aus, die die Zahl der Elektronen mit einer Energie zwischen W_x und $W_x + dW_x$ gibt. $D(W_x)$ ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein Elektron mit Energie W_x über den Potentialwall transportiert wird. Für die Stromdichte ($A.m^{-2}$) folgt dann:

$$j_{FN} = e \int_{\text{Alle Energien}} D(W_x)N(W_x)dW \quad (2.1)$$

e ist hierbei die Elementarladung.

Für $T < 300$ K gilt in vereinfachter Form für die Stromdichte j_{FN} :

$$j_{FN} = C_1 E^2 \exp(-C_2/E) \quad (2.2)$$

Hierbei ist E die elektrische Feldstärke an der Elektrodenoberfläche. Die fundamentalen Konstanten C_1 und C_2 sind:

$$C_1 = 1.54 \cdot 10^{-6} \frac{10^{4.52/\sqrt{\phi}}}{\phi} \quad (2.3)$$

$$C_2 = 6.53 \cdot 10^9 \phi^{1.5} \quad (2.4)$$

ϕ ist hierbei die Austrittsarbeit. Aus Gleichung (2.2) kann man die Fowler-Nordheim-Kurven herleiten. Dazu wird der Strom bestimmt durch:

$$I = A_e j_{FN} = (A_e C_1) \left(\beta \frac{V}{d} \right)^2 \exp\left(-C_2 \frac{d}{\beta V} \right) \quad (2.5)$$

A_e ist hierbei die emittierende Oberfläche, d der Abstand zwischen den Elektroden, V die Spannung und β der Feldverstärkungsfaktor, wofür

gilt, daß $E = \beta E_0$. Wenn diese Gleichung umgeschrieben wird, indem man durch V^2 teilt und den Logarithmus nimmt, folgt

$$\ln\left(\frac{I}{V^2}\right) = \ln\left(\frac{j_{FN} A_e}{V^2}\right) = \ln\left(A_e C_1 \left(\frac{\beta}{d}\right)^2\right) - \left(C_2 \frac{d}{\beta V}\right) \quad (2.6)$$

Wenn man diese Gleichung in einer Graphik darstellt mit $\ln(I/V^2)$ gegen $1/V$ aufgetragen, bekommt man eine gerade Linie.

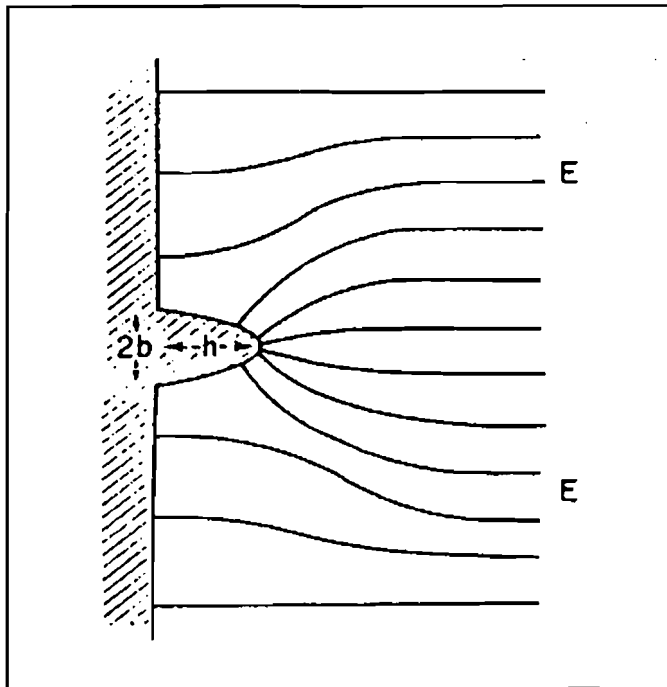
Diese Gleichung wird benutzt um aus Messungen an Elektrodegeometrien den Feldverstärkungsfaktor β und die Oberfläche der emittierende Spitzen bestimmen: Wenn die Austrittsarbeit ϕ bekannt ist, kann aus dem Neigungswinkel mit Hilfe des letzten Gliedes β berechnet werden. Der (extrapolierte) Schnittpunkt mit der vertikalen Achse (V sehr groß) ergibt A_e . Diese Werte sind ein Maß für die Qualität einer Vakuumkammer und deren inneren Komponenten.

2.2.2 Durchschlagsmechanismen.

Warum erfolgt die Emission von Elektronen an einer Mikrospitze der Elektrodenoberfläche? Dieses läßt sich aus der Feldverstärkung erklären die an einer Mikrospitze auftritt. Der Feldverstärkungsfaktor β sorgt dafür, daß Vordurchschlagsströme gesichtet wurden bei Feldstärken bis zwei Ordnungen kleiner als aufgrund der theoretischen Schwellspannung zu erwarten war.

In Figur 2.1 wird gezeigt wie eine spitze Form für Feldverstärkung sorgt. Nicht die Größe der Spitze, sondern ihre Form sorgt für den Wert der Feldverstärkungsfaktor β . Das mikroskopische Feld beträgt β mal der Wert des makroskopischen Feldes.

Obwohl man bestrebt ist Elektroden mit geringer Rauheit zu erstellen, bleiben immer klein Unebenheiten (Mikrospitzen) übrig. Hinzu kommt, daß von elektrostatischen Kräften Metallteilchen von der Metalloberfläche abgezogen werden und sich senkrecht zu einer Mikrospitze stellen können.

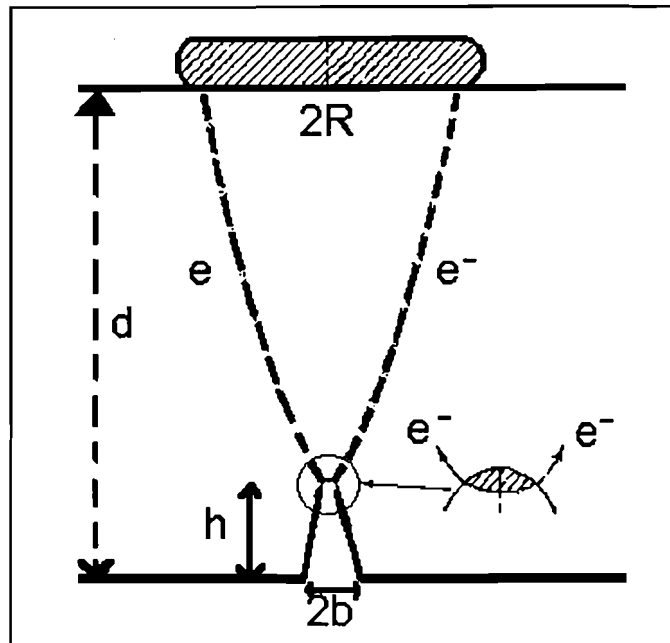


Figur 2.1 Beispiel wie die makroskopische Feldstärke von einer kleinen Unebenheit lokal verstärkt wird.

Die aus der Spitze freigemachten Elektronen folgen den E-Feldlinien zur Anode. Das erklärt weshalb die Anodenflecken größer sind als Kathodenspots (Figur 2.2)

Um einem Durchschlag von der Kathode ausgehen zu lassen, ist es notwendig, daß die Temperatur an einer Mikrospitze stark steigt. Hierbei spielen vielen Energiewechsel eine Rolle. Zum Beispiel ist die innere Heizung durch hohe Stromdichte wichtig. Ebenso die Kühlung durch Wärmeleitung in dem Metall und Kühlung durch Strahlung. Notwendig für den Prozeß ist, daß die Temperatur einen kritischen Wert erreichen kann.

An der Anode spielen sich andere Phänomene ab. Hier wird eine Scheibe erhitzt. Es ist wichtig (vor allem bei Spannungen größer als 25 kV) wie tief Elektronen in ein Metall eindringen. Wenn die Anode ihre kritische Temperatur erreicht, schmilzt die Oberfläche. Teilchen können dann von den elektrostatischen Kräften aus der Elektrode abgezogen werden.



Figur 2.2 Elektronenstrom zwischen einer Kathodeunebenheit und der Anode.

Ob ein Durchschlag von der Kathode oder der Anode ausgeht, hängt davon ab, ob zuerst die Kathode-Mikrospitze bzw. der Anodebrennfleck seinen Schmelzpunkt erreicht.

Wenn die Mikrospitzen scharfkantig sind, hat ein kathodeninitiiertes Durchschlag die größten Chancen, sonst sind die Chancen auf einer instabilen Anode größer.

2.2.3 Durchschlag durch Verunreinigungen.

Die Oberflächen von Elektroden im Vakuum sind immer mit nichtmetallischen Schichten bzw. Fremdkörpern behaftet, sogar bei hochreinen Materialien. Über Emissionsprozesse aus Metalloberflächen in Verbindung mit dielektrischen Schichten berichteten u.a. [8] und [9].

Die Verunreinigungen können zum Beispiel sein:

- isolierende Oxideschichten;
- halbleitende Oxideschichten;
- absorbierte Gasschichten

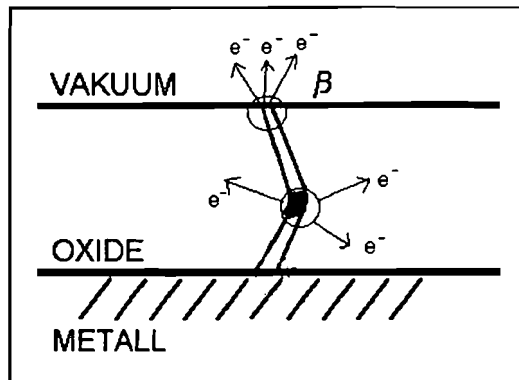
- sorbierte Kohlenwasserstoffe
- Staub (isolierend, halbleitend)

Innerhalb dünner halbleitender oder isolierender Schichten können sich unter Einwirkung eines elektrischen Feldes Bereiche höherer Leitfähigkeit an der Grenzschicht Metall-Dielektrikum bilden. Freie Elektronen in der Oxideschicht, die durch Feldemission aus der Kathodenoberfläche erzeugt wurden, führen zu Ionisationsprozessen. Die dabei entstandene freie Sauerstoff verteilt sich in umliegende Bereiche, wodurch eine lokale Erhöhung der Leitfähigkeit entsteht. Durch die herrschende elektrische Feldstärke wächst dieser Bereich, und bildet ein filigraner leitfähiger Kanal. Wächst dieser Kanal bis an der Grenzschicht Dielektrikum-Vakuum, dann verhält er sich wie eine metallische Spitze, deren feldverstärkende Wirkung ausreicht für die Emission von Elektronen.

Das Umschalten von isolierendem Bereich (Off-Zustand) in einem leitfähigen Kanal mit gleichzeitigen einsetzendem Emissionsstrom (On-Zustand) wird Switching genannt.

Der Kanal hat eine ungleichmäßige Leitfähigkeit. Durch die beschränkte Erwärmung werden hochenergetische Elektronen in das umliegende Material abgegeben, wobei es durch Anregungsprozessen zur Lichtemission kommt. Ähnlich dem metallischen Emitter wird der Kanal bei einer bestimmten Stromstärke thermisch instabil und explodiert. Das sich ausbildende Plasma führt zur Einleitung eines Durchschlags.

Gegenüber dieser Vorstellung erlaubt das Bändermodell eine genauere Beschreibung. Das anliegende elektrische Feld sorgt für eine Verbiegung der Energiebänder. Elektronen können vom Fermi-Niveau des Metalls in das Leitungsband des Dielektrikums tunneln. Hierin werden diese Elektronen beschleunigt und erreichen Energien genügend groß um den Potentialwall an der Grenze Dielektrikum-Vakuum zu überspringen. Die hintergebliebene Lücke rekombinieren zum Teil. Die Rest sorgt für die Aufbau einer positiven Raumladung, damit die Tunnelwahrscheinlichkeit von Elektronen in das Leitungsband erhöht.



Figur 2.3 Ausbildung des filigranen Kanals
(β : Feldverstärkungsfaktor)

Dieses Modell erklärt anschaulich hohe β -Werte, die nicht von Mikrospitzen stammen.

2.3 Durchschlag durch Teilchen.

Die Durchschläge in dem vorigen Paragraphen entstanden aus Elektronenströmen. Es gibt aber auch die Möglichkeit, daß andere Teilchen als Elektronen einen Spalt überqueren. Diese Teilchen können Verschmutzungen am und in der Oberfläche des Werkstoffs sein, aber auch Reste vom Reinigen der Kontaktoberflächen. Die Teilchen können von elektrostatischen Kräften vom oder aus dem Metall abgezogen werden.

Wenn zwei gleiche Elektroden gegenüber einander symmetrisch plaziert sind, werden beide Flächen pro mm^2 die gleiche Zahl von Mikroteilchen abgeben. Wenn aber zum Beispiel eine flache und eine kugelförmige Elektrode einander gegenüber stehen, ist das elektrische Feld an der Kugel höher. Die Chancen, daß Mikroteilchen von der Kugel abgelöst werden, sind dann größer. (Dies ist nur gültig, wenn die Elektroden aus dem gleichen Werkstoff hergestellt wurden).

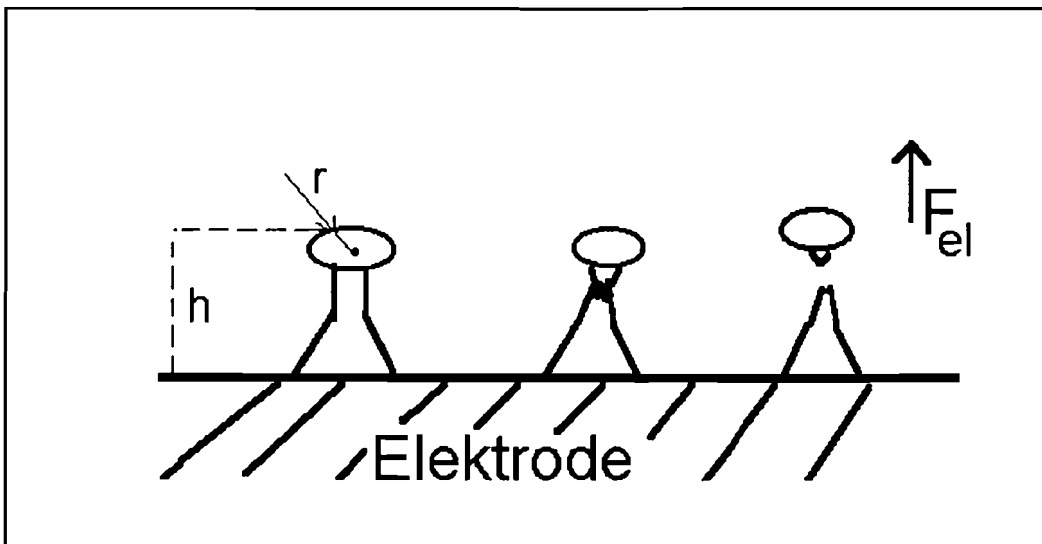
Die Idee hinter der Mikroteilchen-Theorie ist, daß Mikroteilchen von elektrostatischen Kräften vom oder aus der Metalloberfläche abgezogen werden.

Sie überqueren den Raum zwischen den Elektroden und treffen mit

großer Geschwindigkeit auf die andere Elektrode an. Hier überträgt das Teilchen seine kinetische Energie. Diese Energie kann so groß sein, daß die lokale Energiedichte einen kritischen Wert erreicht. Durch Verdampfen von Elektrodematerial oder vom Teilchen entsteht ein Mikroplasma. Dieses Plasma kann für einen Durchschlag ausreichen. Die Energie des Teilchens hängt u.a. von seiner Größe und der Wurzel vom Abstand zwischen den Elektroden ab.

2.3.1 Kräfte auf Mikroteilchen.

Die Frage ist, warum die Mikroteilchen elektrisch geladen sind. Mit Gauß finden wir, daß $\sigma = \epsilon_0 E$, wobei E die lokale Feldstärke ist ($E = \beta E_{\text{Macro}}$). Da sich die Mikroteilchen an der Oberfläche befinden sind sie geladen. Speziell die Teilchen die sich auf Unebenheiten, besonders Mikrospitzen befinden, sind stark geladen, da hier die Feldverstärkungsfaktor β für ein höheres E-Feld sorgt.



Figur 2.4 Die Wirkung der Kräfte auf ein Mikroteilchen.

Für die Ladung auf dieser Spitze gilt laut Rohrbach [10] bei $\gamma = h/r$ (Siehe Figur 2.3)

$$Q_p(\gamma) = 4\pi\epsilon_0 h^2 \frac{(\beta-3)}{(\beta-2)^2} \cdot E \quad (2.7)$$

Die elektrostatische Kraft, die auf das Teilchen wirkt, wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$F(\gamma) = Q(\gamma) \beta E \quad (2.8)$$

Für ein Teilchen entsprechend in Figur 2.3 dargestellt, gilt:

$$F(\gamma) = \frac{4 \pi \epsilon_0 h^2 (\gamma - 1)}{\gamma^2} \cdot E^2 \quad (2.9)$$

Wenn die Feldstärke größer wird, nimmt die Zugkraft am Schaft der Mikrospitze zu. Wenn diese Zugkraft größer ist als die Zugfestigkeit der Verbindung, wird die Verbindung mit der Elektrode verbrochen und das Mikroteilchen ist abgetrennt. Das geladene Teilchen wird im Feld beschleunigt.

2.3.2 Erweiterungen der Theorie.

Bisher wurde angenommen, daß ein Teilchen beim Auftreffen auf eine Elektrode verdampft und/oder Elektrodematerial verdampfen läßt und so ein Plasma entstehen kann. Es ist aber auch möglich, daß durch das Auftreffen auf eine Oberfläche erneut Mikroteilchen freigesetzt werden. Diese Teilchen sind wiederum im Stande einen Durchschlag auszulösen.

Wenig Beacht wurde einer Änderung am Teilchen, während es unterwegs ist, geschenkt. Wenn das Mikroteilchen in die Nähe der Gegenelektrode kommt, wird eine kleine Anoden-Kathoden-Geometrie erkennbar. Ladungsaustausch (partielle Durchschlag) zwischen dem Teilchen und der Elektrode ist dabei möglich.

Ein weiterer Aspekt ist, daß ein positiv geladenes Teilchen sich in entgegengesetzter Richtung zu dem Elektronen bewegt. So daß das Teilchen von dem Impuls der auf das Teilchen treffenden Elektronen gebremst wird. Außerdem kann seine positive Ladung von den Elektronen verringert oder kompensiert werden. Dadurch senkt die elektromagnetische Kraft, die das Teilchen beschleunigt. Beides sorgt für eine längere Verweilzeit im Feld.

Die kinetische Energie der Elektronen wird teilweise in Wärme umgewandelt. Hat ein Mikroteilchen genügend Energie im Feld

bekommen, kann es im Raum zwischen den Elektroden verdampfen. (Dieses erfolgt nur bei langer Verweilzeit). Beim Verdampfen kann der Dampfdruck so steigen, daß ein Durchschlag erfolgt. Dieses ist mit einem Anodeninitiiertem Durchschlag (von Elektronen) vergleichbar, wo bei hier das Mikroteilchen Anode ist.

2.4 Konditionierung.

Greenwood [11] zeigt im Beispiel, daß für eine Geometrie die einen Durchschlag gezeigt hat, eine weiter Durchschlagspannung steigt. Der Grund dafür ist, daß die Anzahl von Mikroteilchen auf einer Elektrodenoberfläche nach einem Durchschlag verringert ist. Ein Durchschlag durch Mikroteilchen verbessert also die Rauigkeit einer Elektrode.

Die gleiche Effekte treten auf, wenn ein Durchschlag von Elektronen initiiert wird. Dabei werden Mikrospitzen beim Durchschlag verrundet: 'weggebrennt'.

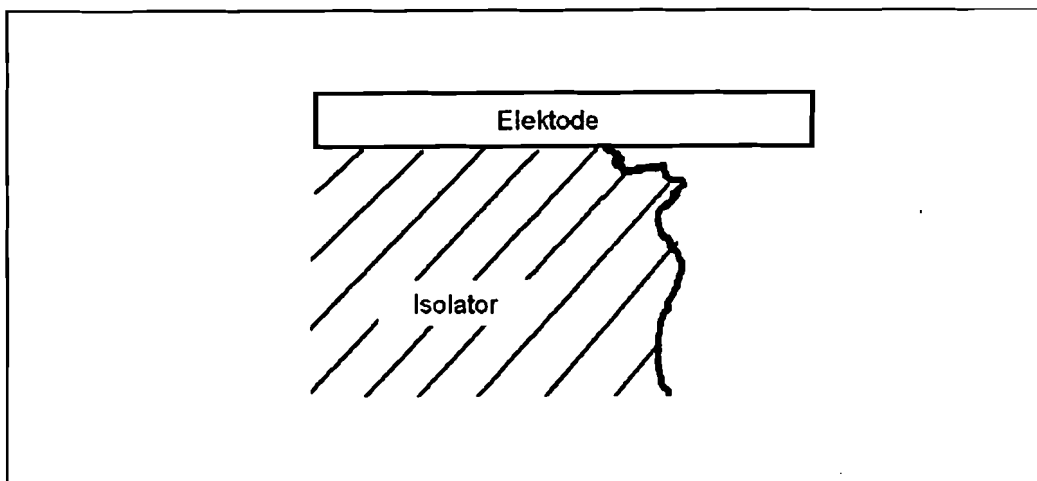
Eine Konditionierung kann aufgehoben werden, wenn die Kontakte geschlossen werden oder wenn ein Vakuumbogen zwischen den Kontakten vorlag. Dabei bilden sich erneut durch zum Beispiel Kaltverschweißungen Mikrospitzen aus.

2.5 Isolatoreinfluß.

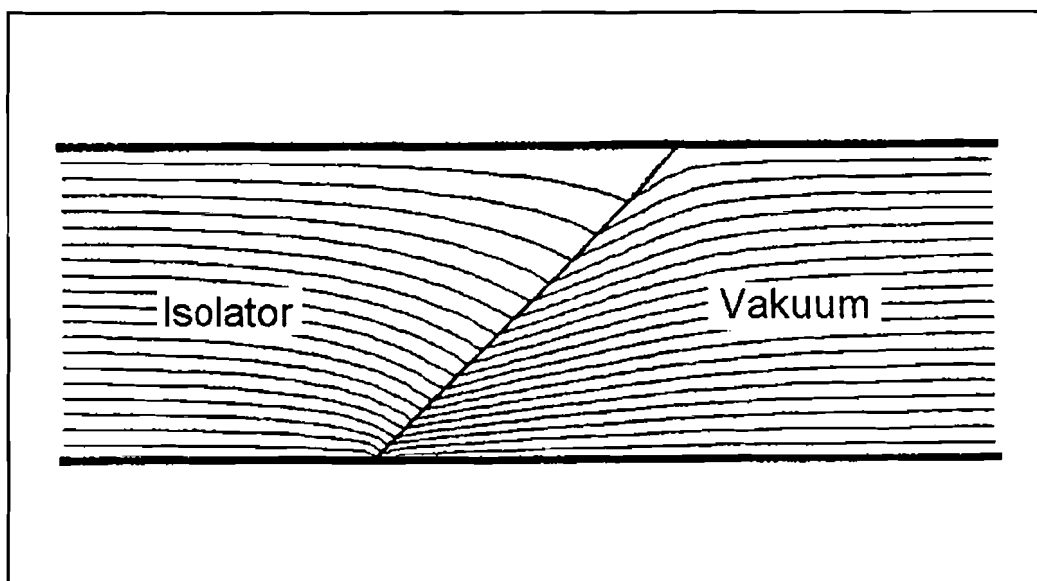
Konstatiert wurde, daß wenn um zwei Elektroden in Vakuum ein Isolator angeordnet wird, sich die Durchschlagspannung erniedrigt. Hierfür werden von Wetzler [12] und Greenwood [11] zwei Gründe angeführt. Erstens kann auf einem Punkt an dem drei Werkstoffe aufeinandertreffen (ein Triple-Punkt) Feldverstärkung auftreten. Makroskopisch Figur 2.6 und mikroskopisch Figur 2.5. Zweitens kann sich ein Isolator durch auftreffende Elektronen elektrisch aufladen und das elektrische Feld stören.

Das Problem beim Zusammentreffen unterschiedliche Werkstoffen ist, daß die nie zenkrecht aufeinander stehen. in Figur 2.5 ist zu sehen wie der Isolator am Eckpunkt ein wenig abgebröckelt ist. In Figur 2.6 ist

gezeigt wie diese Geometrie auch mikroskopisch zur Feldverstärkung leiten kann.



Figur 2.5 Entstehen eines Triple-Punkts

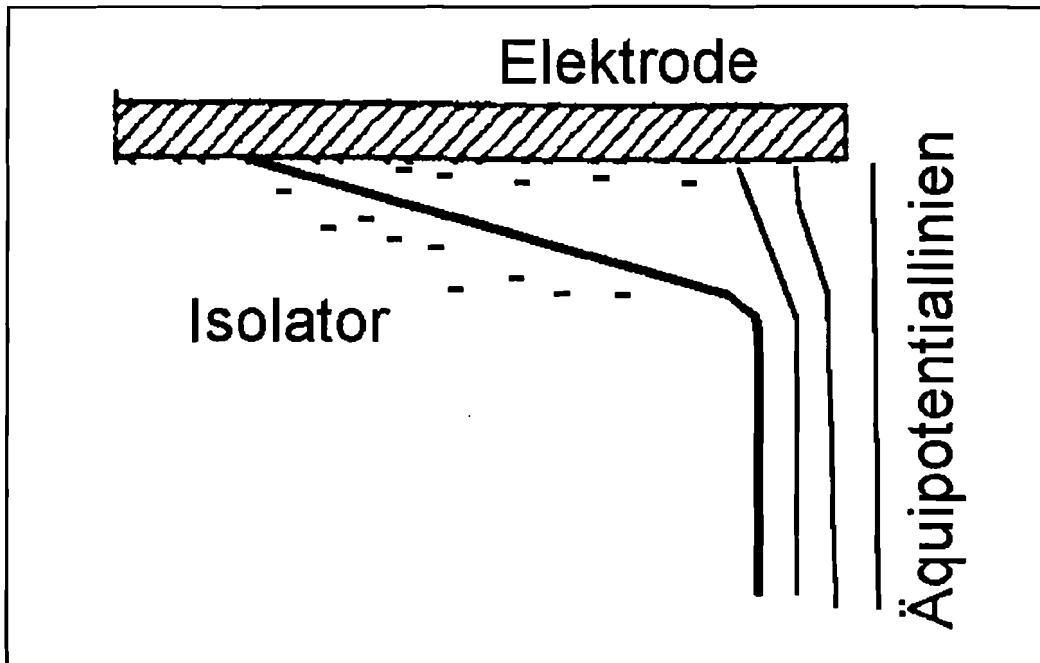


Figur 2.6 Feldverstärkung.

Ziel muß jetzt sein die Triple-Punkten zu entschädigen. Hierzu gibt es zwei Lösungen. Erstens kann man das makroskopische Feld rundum den Triple-Punkt erniedrigen. Das ist zum Beispiel möglich durch die Form der Isolator so zu wählen, wie in Figur 2.6 an der Obenelektrode. Die Verstärkung des erniedrigten Feld ist jetzt mehr so schadvoll.

Die zweite Lösung besteht darin, daß die Isolatorform so gewählt wird, daß durch Aufladung das elektrische Feld kompensiert wird. In Figur 2.7

ist zu sehen wie der Isolator sich auflädt und damit für elektrische Neutralität sorgt.



Figur 2.7 Entschädigung eines Triple-Punkts durch Aufladen.

Man sollte darauf achten, daß die Vakuumschaltkammern unter Wechselspannung eingesetzt werden. Kathode und Anode wechseln einander ab; die Ladung muß deshalb entsprechend wechseln können.

Für die innere (Vakuumseite) und äußere Isolierung von Elektroden werden Keramische Isolatoren eingesetzt. An Keramik sind begrenzte Möglichkeiten um obengenannte Maßnahmen vorzunehmen. Sicher an der Seite wo der Deckel und Zentrierrung angelötet werden, muß die Keramik recht sein für die Bauweise von ACE (Siehe Kapitel 6). In der Mitte wird die Keramik zwischen den zwei Keramikhälften eingeklemmt. Später wird besprochen wie diese Lage verbessert werden kann, indem man die Schirmung in der Mittelnaht hängt.

Ein dritte Stelle wo Triple-Punkte gefährlich sein können (Kapitel 9 und [18]), ist die Zentrierring, ins besondere an den Zentrierlaschen. Eine Lösung hierfür findet man, indem die scharfkantig Zentrierlaschen ersetzt von Zentriernoppen. Diese Noppen sind mehr abgerundet als die Laschen. Außerdem entsteht in diesem Fall kein Loch in der Abschirmung der Zentrierring,

Es gibt eine Reihe von Untersuchungen zu Überschlügen entlang der Oberfläche von Isolationskörpern [13] [14]. Das Isolationsmaterial lädt sich durch Elektronenbeschuß, der meist von der Rändern irgendwelcher metallischer Abschirmungen oder der Metall-Keramiklötstelle ausgeht, positiv auf. Positiv deshalb, weil die Sekundärelektronenausbeute an Isolatoren >1 ist. Das elektrische Feld verzerrt und örtlich verstärkt, bis es zu einem Überschlag an der Oberfläche des Isolators kommt. Dullni [15] berichtet von einer Grenzfeldstärke entlang Aluminiumoxidekeramik von 25 kV/cm.

Kritisch ist bei solchen Überschlügen immer der Metall-Keramikübergang (Triple-Punkt). Wird dieser in einen feldfreien Raum verlagert, oder sorgt man für eine Optimierung wie oben besprochen, kann die Durchbruchsspannung erheblich gesteigert werden. Oberflächenentladungen gehen einher mit Vorströmen und Mikroentladungen, die sehr kurz (200 ns) aber auch viel länger (10 μ s) sein können.

2.6 Schlußfolgerung.

Obwohl Vakuum ein gutes Isoliermedium ist, können Durchschläge über ein Vakuum-Gap entstehen, indem Teilchen (Elektronen oder Mikroteilchen) von oder aus der Oberfläche eines Metalls der Elektroden abgelöst werden.

Die Teilchen werden besonders an Stellen mit einem erhöhten E-Feld abgelöst. Das elektrische Feld erfährt eine Verstärkung an Unebenheiten (Mikrospitzen) auf den Elektroden und an den sogenannten Triple-Punkten. Die Elektroden lassen sich durch Konditionierung verbessern, damit man die Unebenheiten (Spitzen) mit kontrollierten Durchschlägen entfernt.

Die Triple-Punkten sind nicht vermeidbar, können durch eine richtige Auswahl der Isolator- und Elektrodenform verringert werden. Die scharfe Kanten sind auch durch Konditionierung zu verbessern.

3

Das HSSSM4.

3.1 Methoden zur Berechnung elektrostatischer Felder.

Der Durchschlag einer schwach inhomogenen Isolierung findet statt, wenn die Höchstfeldstärke den Wert der Durchschlagfeldstärke erreicht. Deshalb ist es notwendig die Lage der Höchstfeldstärke als auch ihre Wert einer gegebenen Geometrie zu kennen. Die Höchstfeldstärke (bzw. die Feldstärkeverteilung) einer Geometrie findet man durch Berechnung des elektrostatischen, raumladungsfreien Feldes. Es muß die Laplacesche Differentialgleichung

$$\Delta\phi = 0 \quad (3.1)$$

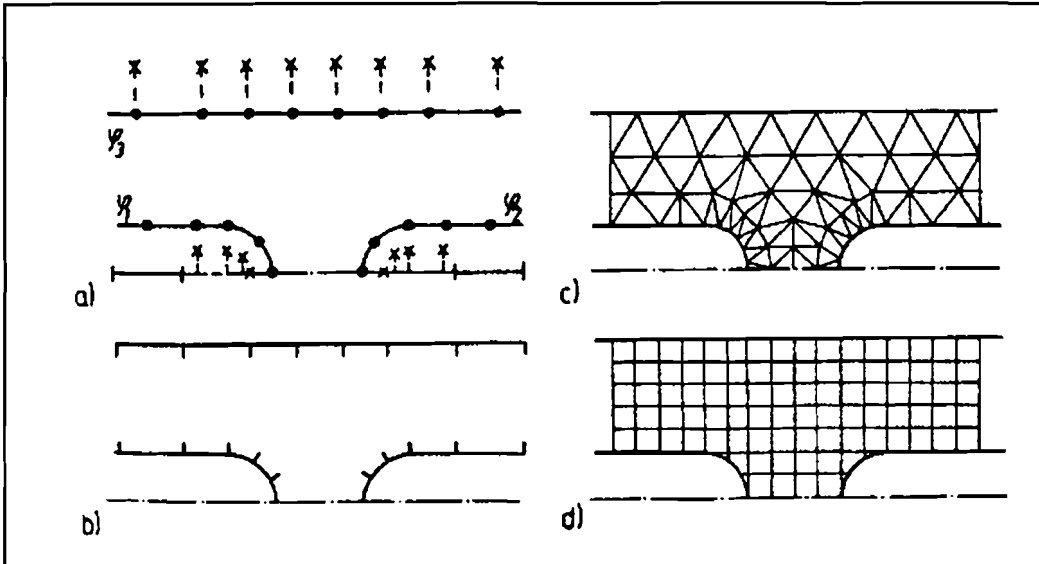
für die Randbedingungen (z.B. Elektrodenformen) gelöst werden. Man kann auch mit Hilfe von Gauß eine Ladungsverteilung in den Elektroden suchen:

$$\oiint D dA = \iiint \rho dV \quad (3.2)$$

Die verschiedene Computer-Programme zur elektrische Feldberechnung basieren laut [16] und [17] alle auf einer (oder mehrere) der unterstehende Methoden.

- Finite Difference Method (FDM)

- Finite Element Method (FEM)
- Ladungsverfahren (Charge Simulation Method)
- Boundary Element Method (BEM)



Figur 3.1 Feldberechnung: a) Ladungsverfahren, CSM b) Surface-Charge-Simulation-Method c) Finite Element Method d) Differenzenverfahren.

Die erste Lösungsmöglichkeit besteht darin, das interessierende Feldgebiet mit einem Gitternetz zu überziehen und die Differentialgleichung in eine Differenzgleichung zu überführen (Figur 3.1d). Das Potential eines Punktes wird bestimmt aus dem Mittelwert der (vier) umliegenden Punkten. Wenn man diesen Vorgang wiederholt, wird das Potential immer besser annähert. Diese sogenannte Differenzenverfahren hat den Nachteil, daß sich nur zweidimensionale Felder mit abgeschlossenem Feldgebiet behandeln lassen. Außerdem sind komplizierte Randbedingungen mit dem starren Gitternetz nur schwer erfaßbar. Deshalb wird dieses verfahren kaum noch angewendet. Die dreidimensionale Variante dieser Methode hat vergleichbare Einschränkungen.

Die zweite Lösungsweg geht davon aus, daß die im Feld gespeicherte Energie W_e minimal ist. Das heißt statt (3.2) wird das dazu gehörende Variationsproblem gelöst:

$$W_e = \int_V \frac{\epsilon}{2} (\nabla\phi)^2 dV \rightarrow \min \quad (3.3)$$

Hierzu wird das interessierende Gebiet in Dreiecke - sogenannte finite Elemente - unterteilt (Figur 3.1c). Die Größe und der Form der Dreiecke können an die Elektrodengeometrie angepasst werden. Die Energie jedes Dreieck als Funktion der Feldstärke in den Eckpunkten wird bestimmt mit Hilfe einfacher Ansatzfunktionen. Nach Summieren der Teilenergien und Differenzieren nach den unbekanntem Feldstärken ergibt sich ein eindeutig lösbares Gleichungssystem für diese Werte.

Für isoliertechnische Probleme ist vor allem die Methode der finite Elemente mit kubische Ansatzfunktionen (MFEK) geeignet, da außer dem Potential auch die Feldstärke mit hoher Genauigkeit bestimmt werden kann. Dieses Verfahren ist besonders geeignet für Geometrien mit kompliziert geformten dielektrischen Grenzflächen. Die Vorbereitung der Eingabedaten ist wesentlich aufwendiger als bei anderen Methoden und kaum automatisierbar, laut Böhme [17].

Die dritte Gruppe von Verfahren geht nicht von der Differentialgleichung direkt, sondern von der Tatsache aus, daß sich das Potential in einem beliebigen Punkt P mit Hilfe der Quellen des Feldes, d.h. der Ladungen auf den Elektrodenoberflächen, ausdrücken läßt:

$$\phi_P = \int_A \frac{\sigma_X}{4\pi\epsilon r_{XP}} dA \quad (3.4)$$

Wobei:

- σ_X Ladungsdichte im Punkt X der Elektrodenoberfläche.
- r_{XP} Abstand zwischen den Punkten X und P
- A Oberfläche der Elektrode.

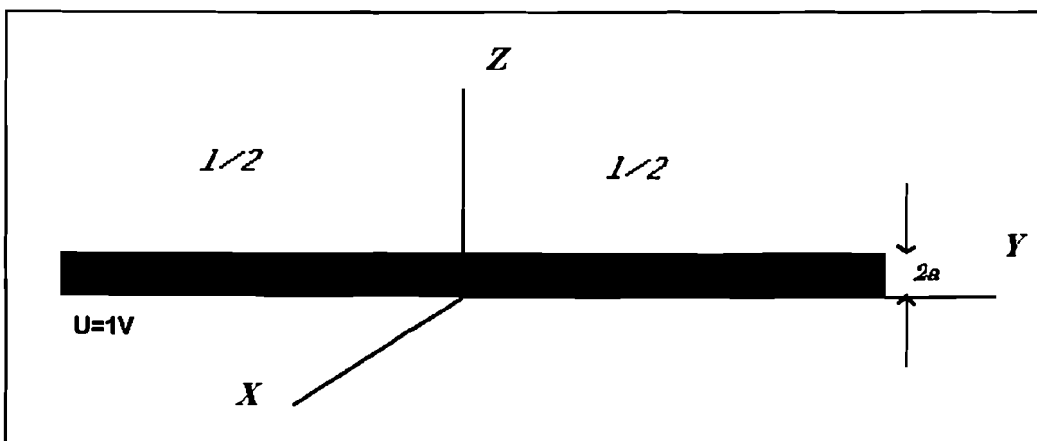
Für die Numerische Lösung werden die realen Ladungsdichten durch endlich viele einfache Ladungsgebilde simuliert. Gleichung (3.4) geht damit in eine Summe von Teilintegralen über, die entweder geschlossen lösbar sind oder mindestens leicht numerisch integriert werden können. Je nach verwendeten Ladungstypen, sind diese Verfahren bekannt als:

- Ladungsverfahren oder Charge-Simulation-Methode (CSM), wenn diskrete Ladungsgebilde (Punkt-, Linien-, Ringladungen), die im Innern der Elektroden angeordnet werden, Verwendung finden.

Innern der Elektroden angeordnet werden, Verwendung finden. (Figur 3.1a).

- Surface-Charge-Simulation-Methode (SCSM), auch bekannt als Integralgleichungsmethode (IGM) oder Flächenladungsverfahren, wenn flächenförmige Ladungen mit konstanter oder linear veränderlicher Ladungsdichte auf den Elektrodenoberflächen angenommen werden. (Figur 3.1b).

Während die Lage der Ladungen vorgegeben wird, ist ihre Größe zunächst noch unbekannt und wird so bestimmt, daß in einer vorgegebenen Anzahl von Punkten auf der Elektrodenkontur das geforderte Potential erzeugt wird. Nach der Ladungsermittlung können dann Potential und Feldstärke in beliebigen Punkten des Feldes berechnet werden. Beide Verfahren sind sowohl für offene als auch für abgeschlossene Feldgebiete geeignet und können auch Elektroden auf unbekanntem Potential und einfach geformte dielektrische Grenzflächen berücksichtigen. Der Aufwand für die Vorbereitung der Eingabedaten ist gegenüber den anderen Verfahren vergleichsweise gering und läßt sich durch automatische Erzeugung der Ladungs-, Konturpunkt-, und Grenzflächenpunktkoordinaten weiter senken.



Figur 3.2 Draht mit endlicher Länge l und Radius a .

Das Programm HSSSM4 basiert auf der letzten Methode. Die Surface-

Tabelle 3-1 Übersicht zur Anwendung von Feldberechnungsmethoden.

	Methode der finiten Elementen (MFEK)	Ladungs- Verfahren (CSM)	Surface- Charge- Simulation- Methode (SCSM)
Berechenbare Feldtypen: -eben/rotationssymm. -echt dreidimensional -offenes Gebiet -abgeschlossenes Gebiet	● ○ ▣ ●	● ● ● ●	● ▣ ● ●
Vorgebbare Randbedingung: -Elektrodepotential -Elektroden mit unbekanntem Potential -Feldstärkerichtung	● ▣ ●	● ● ○	● ● ○
Berücksichtigung Dielktr. Grenzen: -wenige, einfache Form -viele, komplizierte Form	● ●	● ○	● ○
Erzeugung Eingabedaten: -relativer Aufwand -automatisierbar	▣5 ▣	2 ●	1 ●
Ergebnisse: -Potential/Feldstärke -Äquipotentiallinien -Feldlinien	● ● ○	● ● ●	● ● ●

● möglich; ▣ bedingt möglich; ○ nicht möglich Tabelle übernommen aus Böhme [17]

Charge-Simulation-Method wird nachstehend an Hand einer Beispiel erklärt.

Wir betrachten einen Leiter, der bis einer bestimmten Spannung aufgeladen wird. Das Potential auf dem Leiter sei überall gleich, wenn wir das Metall als perfekten Leiter aufnehmen. Die Ladungsverteilung ist aber nicht uniform. An Stellen wo sich scharfe Spitzen auf dem Leiten befinden, kann die Ladungsdichte groß werden. Die Ladung kann sogar von dem Metall durch ein nur schwaches Feld abgezogen werden.

Beispiel: Statische Ladungsverteilung auf einem Draht.

Wir nehmen einen Draht, im freien Raum, mit Radius a und Länge l ($a \ll l$). Der Draht wird auf einem konstanten Potential von 1 Volt gehalten. (Figur 3.2)

Das Potential in einem Feldpunkt $\underline{r} = (x,y,z)$ infolge einer elektrostatischer Linienquelle (in einem Koordinatensystem wie in Figur 3.2) wird gegeben von:

$$\Phi(\bar{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-l/2}^{+l/2} \frac{\rho(\bar{r}')}{R} dy' \int_{-a}^a dx' \int_{-a}^a dz' \quad (3.5)$$

wobei die Ladungsdichte $\rho(\underline{r}) = 0$ wenn der Punkt \underline{r} nicht auf der Drahtoberfläche liegt, l ist die Länge der Linienquelle und ϵ_0 ist die Permeabilität vom Vakuum. R ist dann der Abstand zwischen den Quellpunkten $\underline{r}' = (x',y',z')$ und den Feldpunkten $\underline{r} = (x,y,z)$. (Die Gleichung annähert den runde Draht durch eine vierkantige Draht). Der Radius a wird unendlich klein angenommen. Weil der Draht geleitet, kann die Ladung sich frei bewegen und wird sich auf bestimmte Art verteilen: An Hand des Potentials kann man die Ladungsverteilung $\rho(\underline{r}')$ finden.

Bekannt ist das Potential des Drahts: $\Phi(\underline{r}) = 1$ V (\underline{r} ist ein Punkt auf der Linie). Da die Linie auf dem Y-Achse liegt haben wir nur noch ein 1-dimensionales Problem. Wir haben damit folgende Integralgleichung:

$$\Phi(y) = 1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-l/2}^{+l/2} \frac{\rho(y')}{|y-y'|} dy' \quad (3.6)$$

für $-l/2 < y < l/2$

Diese Gleichung kann numerisch gelöst werden. Hierzu wird sie durch einer endlicher Summierung annähert. Die Linie wird dazu in N Segmenten mit Länge Δ , Mittelpunkt $y=y_k$, und Ladungsdichte ρ_k unterteilt.

So bald man das Potential einer schwebenden Elektrode bestimmt hat, kann man für diese Elektrode das gleich Verfahren anwenden.

unbekannten Veränderlichen (ρ_N). Durch wiederholung dieser Vorgang mit einem Punkt für jedes Segment finden wir N Gleichungen mit N unbekannte Veränderlichen. Die Gleichungen lassen sich am besten als Matrixgleichung schreiben:

$$[A_{mn}] \cdot [\rho_n] = 4\pi\epsilon_0 [V_m] \quad (3.7)$$

Hierbei ist:

$$[A_{mn}] = \frac{\Delta}{|y_m - y_n'|} \quad (3.8)$$

Die Ladungsverteilung findet man mit Hilfe der Inversen von Matrix **A**. Die gesuchte Ladungsverteilung wird dann:

$$[\rho_n] = 4\pi\epsilon_0 [A_{mn}^{-1}] \cdot [V_m] \quad (3.9)$$

Ein Fall braucht noch weitere bearbeitung: Wenn ein Punkt zur Berechnung zusammen fällt mit dem Punkt wo sich eine Punktladung befindet, ist y_m gleich y_n' . In diesem Fall ist die Matrix **A** eine Singuliermatrix. Die Inverse einer Singuliermatrix existiert nicht. Deshalb muß dafür gesorgt werden, daß dieser Fall nicht auftreten kann.

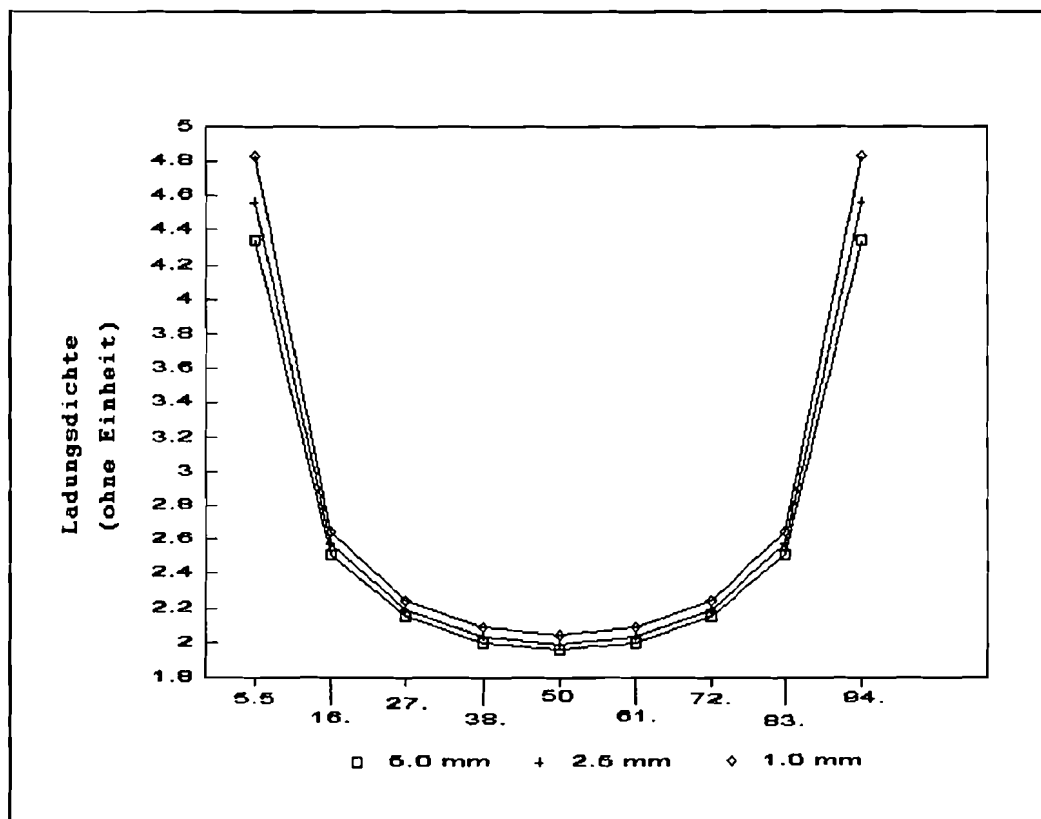
Es ist möglich diesen Fall zu vermeiden durch das Dreidimensionalsein der Draht zu benutzen. Wir betrachten die Draht in diesem Fall als ein hohle Zylinder mit eine uniforme Ladungsdichte auf der Außenseite (ρ_s). Der Wert der ρ_s muß so bestimmt werden, daß er gleich ist an der Wert auf dem Element: $\Delta\rho_k = 2\pi a\rho_s$. Der Punkt liegt noch auf der Symmetrieachse der Zylinder; die Abstand zur Ladung ist jetzt also größer als Null.

Mit Hilfe vom HSSSM4¹ wurde die Ladungsverteilung auf einem Draht berechnet für verschiedene Radien. In Figur 3.3 ist zu sehen, daß bei abnehmendem Radius die Ladungsdichte sich erhöht. Am Ende der Draht nimmt die Ladung höhere Werte an als in der Mitte.

¹ Eine nicht zylindrische Geometrie kann mit HSSSM4 berechnet werden, damit man die Geometrie weit von der Z-Achse eingibt.

daß bei abnehmendem Radius die Ladungsdichte sich erhöht. Am Ende der Draht nimmt die Ladung höhere Werte an als in der Mitte. Wenn der Radius gleich null wird, würde die Ladung am Ende sogar unendlich groß werden. Auch ein eckiges Ende der Linie sorgt für unendlich große Feldstärken und Ladungsdichten. HSSSM4 vermeidet diese Werte, indem es die Ladungen nicht bis zum Ende der Linie berechnet. In Figur 3.3 ist zu sehen wie die 9 Punkte von 5-95% der Drahlänge verteilt sind. Am Ende nehmen die Ladungen deutlich stark zu. An den Punkten 0 und 100 wären die Werte unendlich groß.

Die Länge ist immer 100 mm, die Radius 5,0 bzw. 2,5 bzw. 1,0 mm.



Figur 3.3 Ladungsverteilung auf einem Draht mit verschiedenen Radien.

Das elektrische Feld wird berechnet aus der Summierung der Teilbeiträge an dem Feld der einzelne Ladungsdichten, mit

$$\bar{E}(\bar{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^N \frac{q_k}{|\bar{r}-\bar{r}'|^2} \quad (3.10)$$

q_k ist hierbei die Gesamtladung der k . Oberflächeladung, konzentriert in $\underline{r}' = (x',y',z')$.

3.2 Die Eingabe der Daten.

Zur Eingabe genügt es die Koordinaten eines Halbschnittes einer Kammer einzugeben. Dieser Halbschnitt wird in Kreisbögen und geraden Linien eingegeben. Von jedem Element müssen die Anfangs- und Endkoordinaten bzw. Anfangs- und Endwinkel eingegeben werden.

Die Eingabedatei benötigt pro Element folgende Schritte:

- Von jedem Element ist angegeben in wieviele Streckenabschnitte es zu unterteilen ist.
- Von jedem Element aus Metall, soll die auf den positiven Elektrode normierte Potential angegeben werden: Erdpotential ist 0 oder -1, positives Potential +1. Nicht angeschlossene Metallteile beginnen mit einem Kommando 'FLOAT' und sind zu schließen mit 'END FLOAT'. Die eingegebenen Potentialwert bleibt außer betracht. Falls es ein Teil eines Isolators betrifft, ist statt des Potentials die relative dielektrische Konstante vorzugeben. Diese Konstante wird eingegeben als das Verhalten der dielektrischen Konstanten des Materials links und rechts einer Linie. Dies bedeutet, daß die Kontur eines Isolators immer rechtsum gezeichnet werden muß! Die Zeichenrichtung einer Linie wird definiert durch den Start- und den Endpunkt. Es ist möglich, daß Zwei Isolatoren gegeneinander plaziert sind. Die Grenzlinie hat auch dann den entsprechenden Wert des Verhalten der dielektrischen Konstanten.
- Für jedes Element sollen einige Polygonordnungen gegeben werden. Diese Polygone werden während der Berechnung von HSSSM4 berechnet

Desweiteren sind folgende Daten für eine Datei einzugeben:

- Eine Kommentarzeile.
- Eine DIM-Zeile in der angegeben werden kann, ob eine Geometrie eventuell symmetrisch zur Fläche $z=0$ ist.
- Ein Kontur-Kommando, in dem ein Parallelogramm definiert werden kann. Im Bereich dieser Figur wird dann nach der Berechnung einen Plot der Potentiallinien ausgegeben. In dieser Zeile wird auch angegeben wie fein das Raster sein muß, das während der Berechnung der Äquipotentiallinien benutzt wird. Ein feineres Raster sorgt für eine höhere Auflösung, also genauere Linien. Die Rechenzeit ist aber proportional mit der Rasterverteilung.

Das Programm verfügt auch die Möglichkeit in der Datei Kommentar einzugeben. Eine Kommentarzeile, (außer die erste Zeile einer Datei) fängt immer an mit '*'. Hinter einer Kommandozeile, kann auch Kommentar eingegeben werden.

Ein weiteres wichtiges Kommando ist 'SHIFT', mit dem es möglich ist Teile einer Geometrie zu 'verschieben'. Das ist vorallem günstig wenn man eine Geometrie nur wenig ändert oder wenn man Standardteile aus einer Bibliothek einliest und auf den neuen Stellen plazieren muß. Die 'SHIFT'-Kommandos summieren sich, wenn sie nacheinander benutzt werden. Das Kommando 'Empty' kann die Grundlage wiederherstellen. Nachteil des Kommandos 'SHIFT' ist es, daß eine Datei für den Benutzer undeutlich wird. Die Lesbarkeit ist erforderlich, da der Benutzer oft in dieser Datei nach Koordinaten der Punkte an denen der Wert der elektrischen Feldstärke benötigt wird, suchen muß.

HSSSM4 läßt im Prinzip zu, daß die Elemente alle durcheinander eingegeben werden. Es gibt nur wenige Kommandos die auf die nächste oder vorherige Zeile zugreifen. Nachteil ist, daß es zeitintensiv ist um eine Datei zu ändern, da die einzelne Elementen nicht einfach zu identifizieren sind.

Fazit: es empfiehlt sich also die Elemente systematisch einzugeben und dabei viele Kommentarzeile einzufügen.

Eine Datei ist besser lesbar wenn man Leerzeichen einfügt und verschiedene Werte und Koordinaten übersichtlich eingibt.

Die Zeilen die mit 'L' anfangen definieren eine gerade Linie, die mit 'C' anfangen einen Kreisbogen. Die Bedeutung der Zahlen wird nachstehend erklärt:

```
L, 1, 1., -3, 1,          42.5, 0.,          53., 0.,          9.
C, 5, -1., 3, 1,        42., 197., 12., 0., 180., 1.
```

Obenstehende Zeilen definieren ein gerades Element eines Keramikkörpers bzw. einen Kreisbogen einer positiven Elektrode.

Erklärung der ersten Zeile:

- L : Daten und Koordinaten einer Linien folgen.
- 1 : Zahl der Streckenabschnitte (wichtig für die Rechengenauigkeit)
- 1. : definiert das Verhältnis der Länge der Streckenabschnitte. Ein negativer Wert wird für Metallteile angewendet; ein positiver Wert sorgt für extra Feldberechnungen (normal und Tangentialfeld) für Isolatorteile.
- 3 : Die Ordnung der (Tchebychev) Polynome, die in der Berechnung vorkommen. (Rechengenauigkeit.) Ein negativer Wert deutet auf ein Dielektrikum hin.
- 1 : Die Ordnung der Fourier Polynome.
- 42.5,
0. : Koordinatenpaar vom Anfangspunkt der Linie.
- 53.,
0. : Koordinatenpaar vom Endpunkt der Linie.
- 9. : Dielektrische Konstant des Materials an der linken Seite der Linie relativ zu der dielektrischen Konstante rechts der Linie.

Erklärung der zweiten Zeile vor so weit anders als für die erste Zeile:

- C : Daten und Koordinaten eines Kreisbogens folgen.
 - 5 : Zahl der Streckenabschnitte.
 - 1. : Negativer Wert: Metallteil.
 - 3 : Positiver Wert: Metallteil.
-

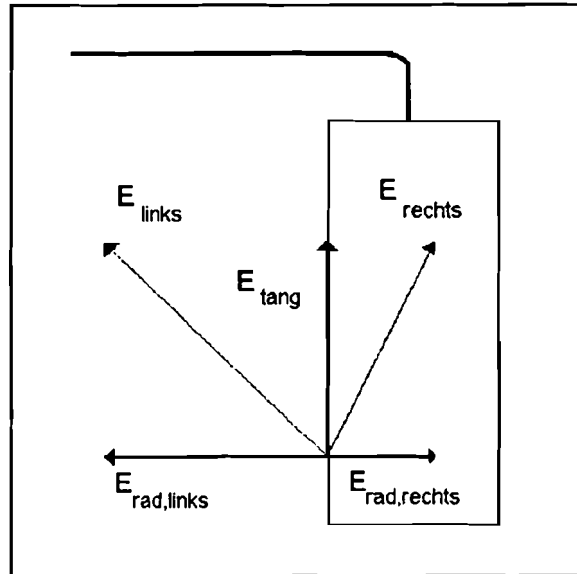
- 1 : Die Ordnung der Fourier Polynome.
- 42.,
- 197.: Der Mittelpunkt liegt bei (42.5,197)
- 12. : Radius = 12.0
- 0. : Anfangswinkel = 0°
- 180.: Endwinkel = 180°. Die Zeichenrichtung ist vom ersten Wert linksherum zu dem Zweiten, wenn der Zweiten der Größere ist.
- 1. : Das normierte elektrische Potential. Dieser Wert liegt immer zwischen -1 und +1.

Vor allem bei den Kreisbögen ist es notwendig die Folge der Anfangs- und Endwinkel zu beachten. Unterläuft ein Fehler, läßt er sich nur durch das Programm 'Check' herausfinden. Man kann dann die Geometrie ausdrucken. Falschherum gezeichnete Kreisbögen sind einfach erkennbar.

3.3 Ausgabe der Daten.

Die HSSSM4-Berechnungsergebnisse bestehen aus zwei Dateien. Eine ausführliche Textdatei mit unter anderen Potentialwerten, Punktladungsverteilung, Feldstärken für die verschiedenen Blöcken und den Potentialen der nicht angeschlossenen Elektroden (Schirm). Die zweite Datei ist eine Plotdatei für einen Plot der Potentiallinien.

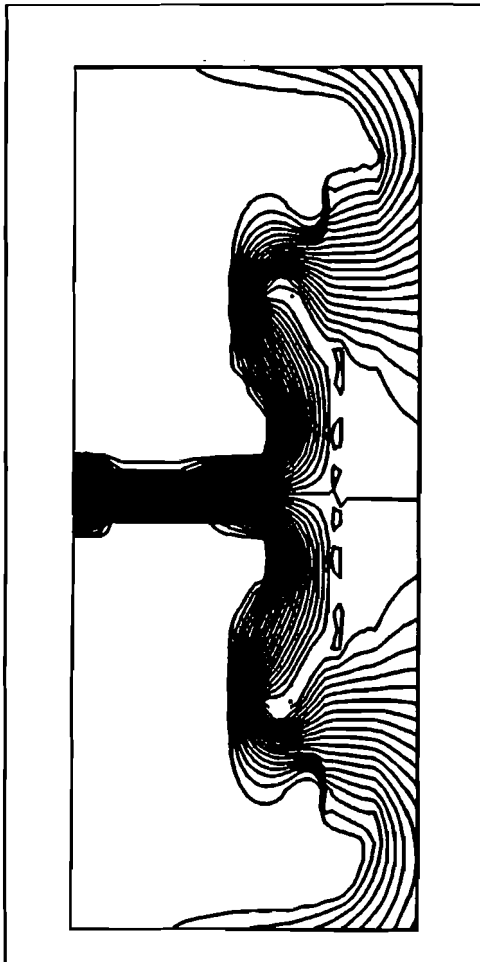
Die Plotdatei kann mit Hilfe des Programms 'PLOT' auf einem Netzdrucker ausgegeben werden. Für die andere Datei gibt es ein Utility: 'LESFELD', der die Feldstärken des Metalls und des Isolator je in eine neue Datei in eine Tabelle wegschreibt. Die Feldstärke am Dielektrikum wird in drei Komponente gegeben: (Figur 3.4)



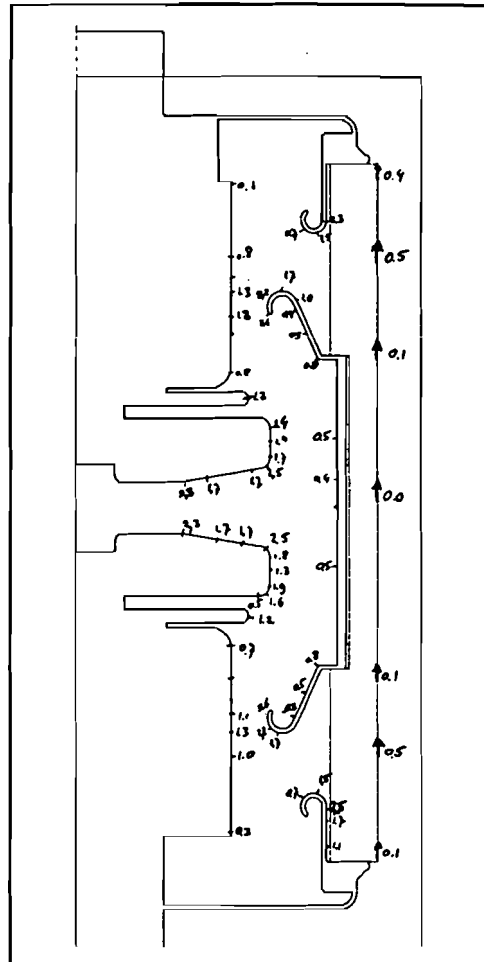
Figur 3.4 Mit Hilfe der Vektoren E_{links} , E_{rechts} und E_{tang} können die radiale Komponente der Feldstärke gefunden werden.

Aus E_{LINKS} , E_{RECHTS} und E_{TANG} sind die andere Feldstärkenkomponenten zu berechnen.

Die Feldstärken sind dann für eine Spannung von 1 kV zwischen den Kontakten normiert. Deshalb müssen die Werte für die später anliegenden Spannung umgerechnet werden. Dazu gibt es das Hilfsprogramm 'Umrechnen'. Dieses Programm multipliziert jeden Wert mit der angelegten Spannung. (Oder mit der Hälfte, wenn Potentialwerte +1 und -1 eingegeben wurden).



Figur 3.5 Beispiel einer Equipotentiallinienplot.



Figur 3.6 Beispiel einer Vakuumschaltkammergeometrie mit vom Hand eingetragenen Feldstärken.

Danach können die Feldstärken in eine Zeichnung der Geometrie eingetragen werden. Beispiele für die Ausgabe von HSSSM4 sind die Figuren 3.5 und 3.6. In der Figur 3.5 kann man die Metallteile der Kammer daran erkennen, daß die Equipotentiallinien um das Metall herum laufen.

Um die Feldstärken herauszufinden, ist die Ausgabedatei zu durchsuchen nach Koordinaten und Punkten an denen die elektrische Feldstärke erforderlich ist. Die Koordinaten der Punkte findet man zum

Beispiel aus der Eingabedatei: Ein Grund weshalb die Datei übersichtlich sein sollte. Um das Suchen zu vereinfachen wurde das Programm 'FELDSTAERKE' geschrieben. Dieses Programm sucht die Feldstärke an oder in der Nähe des eingegebenen Punkt, entweder auf dem Metall oder entlang der Keramik.

Zusammenfassend: Man braucht zur Zeit für das Berechnen einer Geometrie die folgende Programme:

- Ein Editor Eingabe der Datei.
- Check und Plot Kontrolle der Kreisbögen.
- HSSSM4 Die eigentliche Berechnung.
- Plot Drucken der Potentiallinien.
- Lesfeld Auslesen normierte Feldstärken.
- Umrechnen Umrechnen auf den richtigen Potentialwerte (angelegte Spannung).
- Feldstaerke Suchen nach Feldstärken an bestimmten Punkten.

4

Das Euclid3.

4.1 Einführung.

Heutzutage werden immer mehr die Vorteile der Computer-Aided-Design (CAD) erkannt. Das Zeichenbrett wird deshalb in viele Betriebe von Workstations mit Zeichenprogrammen ersetzt. Vorteile sind unter anderem die Möglichkeit effizienter und schneller zu arbeiten. Mit Computer-Aided-Manufacturing (CAM) besteht die Möglichkeit Maschinen direkt vom Rechner anzusteuern. Die Maschine arbeitet anschließend direkt von der Originalzeichnung.

Für das Computer-Aided-Design benutzt man bei ACE das Programm Euclid3 von Matra Datavision. Euclid3, oder kürzer Euclid, läuft bei ACE auf Alpha-Rechnern und VAX-Stationen. Es wird das Open/VMS Betriebssystem benutzt.

Euclid ist fähig 3D-Zeichnungen darzustellen und zu bearbeiten. Es gibt in Euclid zwei verschiedene Umgebungen. Die 3D Entwicklungswelt und die 2D-Zeichnungswelt. Ein Bauteil kann zuerst in 3D in verschiedene Ansichten gezeichnet werden. Nachdem kann es dann in eine Zeichnung (z.B. DIN A4 Format) kopiert werden.

In den 2D-Ansichten können dann eventuell noch kleine Änderungen vorgenommen werden. In den 2D-Ansichten erfolgen die Bemessung, Beschriftung usw. Weiterhin können die Linienart, Farbe und

Strichstärke der Linien geändert werden.

An dieser Stelle soll nicht weiter auf die viele Möglichkeiten von Euclid eingegangen werden. Es ist für die Anwendung, Feldberechnungen, nicht erforderlich zu wissen auf welche Weise eine Zeichnung generiert worden ist.

4.2 Ausgabe der Daten.

Die Zeichnungen können natürlich in eine Datenbasis gespeichert werden. Die Datenbasis ist nicht einfach von anderen Programmen auszulesen. Es gibt die Möglichkeit um die Daten (eines Teils) der Zeichnung mit dem Kommando 'DEKODE' auf dem Bildschirm auszugeben.

Sowohl eine 3D-Darstellung als auch eine Zeichnung sowie Teilen davon können mit dem Kommando `ALG.FNKTIONEN> MESSEN> DEKODE'` dekodiert werden. (Ein Teil kann sowohl eine einzelne Linie als auch eine Komplette Ansicht sein.) Dekodieren heißt, daß eine Beschreibung eines Teiles gegeben wird.

Abgesehen von den Kopfzeilen, in denen das Format der Abbildung gegeben wird, werden die Elemente wie folgt dekodiert. Zuerst werden, falls vorhanden, die graphische Eigenschaften eines Elements gegeben. Es können maximal drei graphische Eigenschaften einem Element zugewiesen werden.

- die Linienart z.B. Volllinie oder gestrichelt.
- die Farbe z.B. Nr. 5, Türkis oder Nr. 2, Rot
- die Strichstärke z.B. 0.500 (mm)

Nachher wird dann das Element selbst dekodiert. Ein 'Polygon, daß aus n Elementen' besteht, ergibt die n Koordinatenpaare die das Polygon formen. Ein 'Zirkulares Element' definiert ein Kreisbogen.

Unterstehender Ausschnitt einer Dekodierdatei zeigt wie zwei türkisarbene geraden Linien und ein Kreisbogen ohne graphische Eigenschaften dekodiert werden.

```

*****
*          GRAPHISCHE EIGENSCHAFTEN          *
*****
* LINIENART NR.           : 1,VOLLINIE       *
* FARBNUMMER             : 5,TUERKIS        *
* STRICHSTAERKE          : 0.500           *
*****
*          OFFENE LINIE AUS                   :   *
*****
*          POLYGON AUS 3 PUNKTEN              *
*****
*      0.000           0.000           25.137   *
*      0.000           16.072          25.137   *
*      0.000           16.072          42.941   *
*****
*          OFFENE LINIE AUS                   :   *
*****
*          ZIRKULARES OBJEKT MIT ZENTRUM IN   *
*      0.000           11.072          42.941   *
*          RADIUS-WERT                        *
*          5.000                               *
*          OEFFNUNGSWINKEL                    *
*          90.000                              *
*          BEGRENZT DURCH PUNKTE              *
*      0.000           16.072          42.941   *
*      0.000           11.072          47.941   *
*****

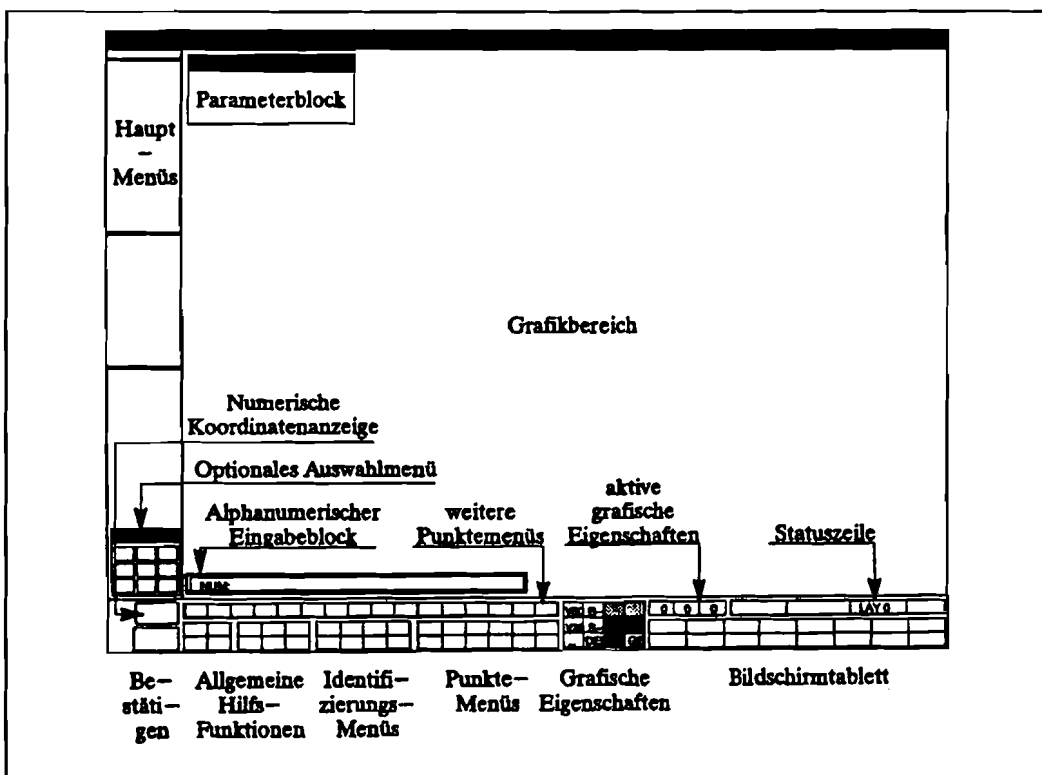
```

Die Dekodierung einer Zeichnung wird ungefähr gleich ausgeführt. Der Unterschied liegt darin, daß die Z-Koordinate nicht angegeben werden. Die erste Zeilen der Dekodierung einer Ansicht oder einer Zeichnung definieren das Format der Zeichnung und/oder der Ansicht.

Die Folge in der die Elementen dekodiert und ausgegeben werden, ist nicht beeinflussbar. Sie sind nicht nach graphischen Eigenschaften sortiert. Deshalb beginnt die Dekodierung mit den graphischen Eigenschaften, auch wenn die Eigenschaften der Vorherigen nicht davon abweicht.

4.3 Aufbau des Programms.

Der Euclid-Bildschirm sieht wie folgt aus. Siehe Figur 4.1. Im Mitten des Schirms ist der Grafikbereich. An der Untenseite gibt es über die volle Schirmbreite einen Balken mit zum Teil selbst definierbaren Funktionstasten. An der linken Seite gibt es die Menüleiste. Hier kann man zuerst eine Hauptmenügruppe wählen. Dann erscheint unter dem Hauptmenü das entsprechende Untermenü, usw. Wenn man eine Funktion gewählt hat und ein Parameterblock erscheint, werden weitere Daten eingegeben. Die meiste Funktionen werden erst dann ausgeführt, nachdem man mit der rechten Maustaste die Eingabe bestätigt.



Figur 4.1 Euclid-Bildschirmaufteilung.

Ein interessantes Menü ist das Menü 'Anwendungen' > 'Benutzeranwendungen'. Hier kann man von dem Benutzer selbst geschriebene Programme oder Routinen aufrufen. Diese Routinen müssen in Fortran geschrieben werden und können die in Euclid vorhandenen Funktionen benutzen. In nachstehendem Beispielen wird zwischen einem Punkt (X,Y,Z) und (10,10,Z) eine Linie gezeichnet.

```
SUBROUTINE BEISPIEL

NBR = RTVTAB('MENU',P) :Übergabe aus Euclid von
                          einem Punkt
CALL COORD(P,X,Y,Z)    :Fragen Koordinaten von P
Ye=10
Ze=Z
Pe=POINT(10,Ye,Ze)    :Definier Pe als Punkt
LIN=OPNLIN(P,Pe)      :Definier Linie P-Pe
CALL NEWOBJ(LIN)      :Zeichen der Linie LIN
RETURN
```

Zu dem o.g. Programm gehört ein zweiter Teil in dem die Menüstruktur definiert wird. Man kann die gleiche Struktur wie in der Standardanwendungen benutzen, inklusive die Eingabefenster und Untereingabefenster.

Meldungen können von dem Programm in verschiedene Arten von aufrufbaren Fenster ausdrückt werden.

Es sind diese Erweiterungsmöglichkeiten die benutzt werden für die Kopplung von Euclid und dem HSSM4.

5

Die Kopplung von Euclid und HSSSM4.

5.1 Einführung.

Ziel ist die Integration von dem Feldberechnungs-programm HSSSM4 und Euclid. Die Idee ist, daß eine Zeichnung in Euclid erstellt wird oder vorhanden ist, zum Beispiel, einer Vakuumschaltkammer. Und daß diese Zeichnung durch nur wenige Kommandos das HSSSM4 die E-Feldstärken und Äquipotentiallinien der Kammer berechnet. Nach den Berechnungen müssen die Ergebnisse einfach auf einem Bildschirm gezeigt werden können.

In dem vorigen Kapitel haben wir gesehen, daß Euclid die Möglichkeit hat Daten in einer Datei auszugeben und, daß es die Möglichkeit gibt Programme in Euclid zu integrieren. In dem Kapitel über HSSSM4 ist beschrieben worden wie die Ein- und Ausgabe der Daten von diesem Programm aussehen.

Das Problem ist, daß diese Formate nicht übereinstimmen. Zuerst müssen wir die Euclid-Daten in das HSSSM4-Format umwandeln. Nach der Berechnung müssen die HSSSM4-Ausgabedaten wieder für Euclid lesbar sein.

5.2 Die Schritte.

Wir können den Prozeß in drei Teile unterteilen. Erstens das Senden der Daten von Euclid zu HSSSM4, zweitens das Berechnen und schließlich das Zurücksenden der Ergebnisse.

- 1 Das wichtigste ist natürlich das Umwandeln der Dekodierdaten in das HSSSM4-Format. Um hierbei die Elektroden und Keramikkörper unterscheiden zu können müssen an der Zeichnung Erkennungsmerkmale gesetzt werden. Dazu werden für die beide Elektroden unterschiedliche Farben gewählt. Für den oder die Keramikkörper gilt das gleiche. Die erforderliche Unterteilung in Streckenabschnitten wird von der Linienart angegeben. Zum Beispiel gestrichelt und punktiert für normale und feine Verteilung. Vorteil dieser Art von Unterscheidung ist, daß auch sichtbar ist, welches Potential vorliegt.
- 2 Als nächste Schritt wird das HSSSM4-Programm gestartet.
- 3 Wenn das HSSSM4 seine Rechenaufgabe erledigt hat, kann die Abbildung der Äquipotentiallinien auf einem Bildschirm dargestellt werden. Anschließend kann durch anklicken von Geometriepunkten die elektrische Feldstärke an diesen Stellen angezeigt werden.

Die Schritte vor der Feldberechnung werden mit Pre-Processing angedeutet. Die Schritte nach der Berechnung heißen Post-Processing.

5.3 Das Pre-Processing.

Das Senden wird über das Kommando 'DECODE' gemacht. Dies bedeutet, daß die Euclid-Dekodierdatei gelesen werden, und daß aus dieser eine Datei im HSSSM4-Format erzeugt wird. Beide Formate kennen nur geraden Strecken und Kreisbögen. Die Bemassung ist nicht von Belang.

Das Umwandlungsprogramm liest von jedem Element zuerst die graphische Eigenschaften ein und vergleicht die mit einer Tabelle in der die Eigenschaften der Materialien stehen. Wenn diese übereinstimmen wird das Element in eine HSSSM4-Datei geschrieben.

Nur die Kreisbögen erfordern einige Rechenarbeit mit goniometrischen Funktionen um das richtige Format zu erreichen. Hierbei ist erforderlich, daß die richtige Folge der Winkel behalten bleibt. Ein Problem bleiben die Kreisbögen von 180° : an der Ausgabe aus Euclid kann man auf keinerlei Weise sehen, ob ein Bogen links oder rechts zum Mittelpunkt orientiert ist. Die Chancen, daß diese Bögen richtig umgewandelt werden ist 50%. Einzige Lösung wäre, keine Kreisbögen von 180° zu benutzen, sondern diese in kleinere Bögen aufzuteilen.

Ein zweite Schwierigkeit entsteht durch die Keramik. Für die dielektrische Konstante des Isolators ist das Verhalten der ϵ_R links und rechts der Linie gegeben. Dies bedeutet, daß der Keramikkörper linksherum gezeichnet werden muß. Hierzu werden alle Linien und Kreisbögen die zur Keramik gehören nicht in eine Datei geschrieben. Wenn die Euclid-Datei ganz gelesen ist, werden die Keramikteile in Folge bearbeitet. Wenn eine geschlossene Kontur vorliegt wird kontrolliert, ob die Orientierung stimmt. Wenn ja erfolgt ein Eintrag, wenn nein dann wird die Reihenfolge zuerst noch geändert.

Diese Vorgangsweise erfordert, daß jeder Keramikkörper als eine geschlossene Kontur gezeichnet wird. Wenn eine Kontur nicht geschlossen ist, gibt das Programm eine Fehlermeldung aus. Die Keramikteile werden dann nicht in eine Datei geschrieben. An Stellen an denen Metallteile auf dem Keramikkörper aufgelötet sind, muß man auch die Keramik zeichnen.

Wenn beide Linien übereinander gezeichnet werden, ist es möglich, daß die Berechnung mit einer Fehlermeldung abgebrochen wird, wegen des Nullsein der Abstand zwischen unterschiedliche Punkten. Das passiert vorallem dann, wenn die beide Linien völlig zusammen fallen. Hierzu gibt es zwei Lösungen: Man kann die Metalllinie entfallen lassen, oder man entnimmt bevor die Berechnung anfängt die jeweilige Keramiklinie. Wenn die Metalllinie nicht lang ist, zum Beispiel bei der Anlötung der Deckel nur 2-3 mm., kann man eventuell diese Linie entfallen lassen. Sonst empfiehlt es sich beide Linien in der Euclid-Zeichnung aufzunehmen und die überflüssige Keramikbeschreibungen vom Hand aus der HSSSM4-Eingabedatei zu entfernen.

Außer den beiden Elektroden befinden sich weitere Metallteile in einer Kammer, besonders die Schirmung. Der Schirm hat meist kein definiertes Potential. Er formt eine floating Elektrode. Diese Elektrode wird in HSSSM4 definiert durch 'FLOAT' und 'END FLOAT'. Überigens werden, wenn es mehrere nicht angeschlossene Teile gibt, diese alle als nur ein Element betrachtet. Das ist eine Beschränkung des Umwandelprogramms. Eine Erweiterung des Programms ist möglich indem man mehrere graphische Eigenschaften für nicht angeschlossene Teile definiert.

5.4 Die Berechnung.

Man kann in Open/VMS ein Programm auf zwei Weisen ausführen lassen. Ersten im Vordergrund (erkennbar) und zweitens kann man das Programm im Hintergrund ausführen lassen. Wegen der langen Rechenzeit mit dem dazu gehörenden Aufenthalt des Rechners (man kann während des Rechnen nicht weiterarbeiten mit Euclid) hat die Hintergrundrechnung den Vorzug. Ein so ausgeführtes Programm läuft mit niedriger Priorität, ohne daß es ein Schirm oder Fenster benötigt. Man sagt, daß das Programm als Batch-Job in den Hintergrund gegeben wurde.

Man kann gleichzeitig mehrere Batch-Jobs vom gleichen Programm ausführen. Findet die gleiche Name für Ein- und Ausgabedateien Anwendung, können diese Dateien nicht mehr auseinander gehalten werden. Deshalb ist das HSSSM4-Programm geändert: Beim Starten wird ein Dateiname abgefragt. Unter diesem Namen werden alle benötigten Dateien geöffnet. Außerdem kann man durch diesen Namen zum Beispiel beim Zeichnen der Äquipotentiallinien auch direkt eindeutig auf die richtigen Dateien zugreifen.

Wegen der Frage von HSSSM nach einem Name der Eingabedatei, muß dieser Name von den Euclidroutinen mitgegeben werden. Erst in der Aufstartprozedur wird den Name der zuletzt angelegten Umwandeldatei zugewiesen.

Wenn die Berechnung abgeschlossen ist, erscheint eine Mitteilung auf dem Bildschirm und der Rechner gibt ein akustisches Signal ab.

5.5 Das Post-Processing.

Die Feldberechnung generiert zwei Dateien:

1. Die elektrische Feldstärken;
2. Eine Zeichnung der Äquipotential- und E-Feldlinien.

Dies bedeutet, daß für das Post-Processing zwei Schritte benötigt werden.

Zuerst können die Potentiallinien in die Originalzeichnung gezeichnet werden. Hierzu mußte das Feldberechnungsprogramm geändert werden, da der Plot in einem unbekanntem Format gespeichert wurde. Jetzt werden statt dessen nur Koordinaten gespeichert. Ein Menü-Item innerhalb vom Euclid-Programm liest diese Koordinaten ein und verbindet sie durch Linien. Das Programm ist in der Lage, Potential- und E-Feldlinien zu unterscheiden. Diese können in verschiedenen Farben gezeichnet werden. Es ist ebenfalls möglich nur Potentiallinien, oder nur E-Feldlinien darstellen zu lassen.

Die elektrische Feldstärken werden wie folgt gezeigt. Zuerst muß man einen Namen der Berechnung eingeben, als auch die Spannung, die über den Kontakten anliegt. Anschließend wird die, zu dieser Berechnung gehörende Ausgabedatei geöffnet. Die E-Feldwerte sind aber normiert auf 1 kV. Deshalb werden die Werte mit der Spannung (in kV) multipliziert und in zwei Dateien gespeichert, eine für die Feldstärken auf dem Metall und eine für die Werte auf der Keramik.

Durch Angabe von Punkten in der Euclid-Zeichnung werden die Dateien nach ortsnahe Koordinaten durchsucht für die die Feldstärke bekannt ist. Der Wert vom nächst gelegenen Punkt wird im alpha-numerischen Fenster angezeigt. An der Stelle dieses Punktes wird eine Markierung eingesetzt. Es ist möglich die gefundenen Werten mit einem Bezugssymbol in die Zeichnung zu schreiben.

Zusätzlich gibt es noch die Möglichkeit das Potential der schwebenden Elektrode in dem Meldungsfenster zu schreiben. Dieser Wert wird sowohl in kV als auch in Prozent der Nominalspannung angegeben.

6

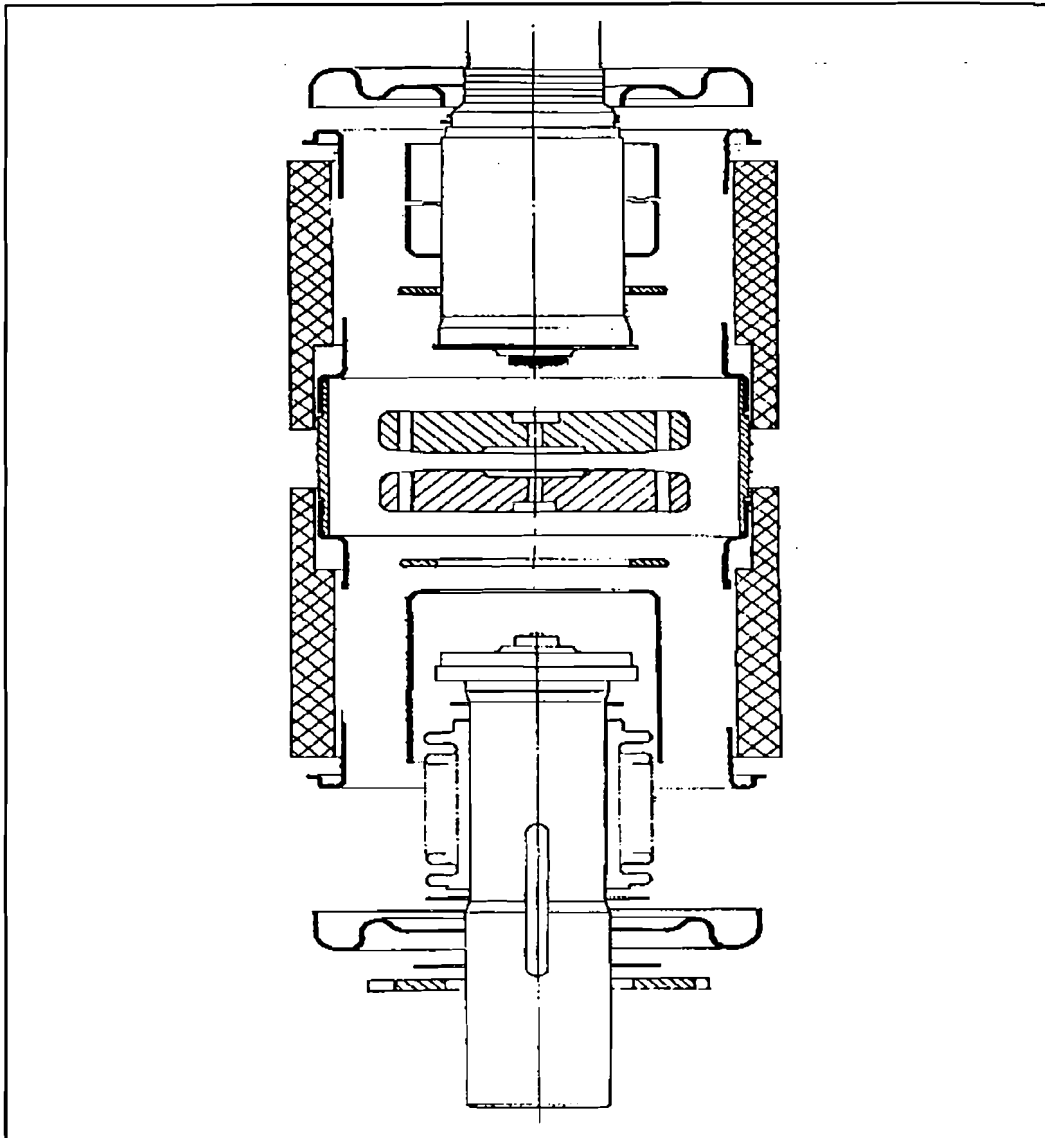
Kammeraufbau.

6.1 Allgemeine Bauarten.

Eine Vakuumschaltkammer besteht aus den Bauteile gezeigt in Figur 6.1. Die Bauteile sind meist aus Edelstahl, Kupfer, Kupfer-Chrom und Keramik hergestellt. Bei dem Bau einer Kammer wird zwischen die Bauteile Vakuumlot an geordnet. Im Vakuumofen werden die Teile mit einander verlötet.

Zum Verlöten gibt es zwei verschiedene Verfahren. Man kann zuerst Baugruppen mit einem höherschmelzender Lot zusammen löten. Danach werden die Baugruppen unter zwischenfügen einer Keramik zu einer Vakuumkammer zusammengesetzt und nochmals mit einem Lot mit kleinerem Schmelzpunkt als das der Baugruppe in einem Vakuumofen eingesetzt. Dieser Technik war bis vor kurzem üblich.

Diese Vorgangsweise ist vorallem dann einzusetzen, wenn die Kammer nicht komplett montiert werden kann. Es ist zum Beispiel möglich, daß das Kontaktstück der Schaltkontaktseite einer vormontierten Baugruppe von der Schwerkraft beansprucht, aus einander fällt. Nachteil dieses Verfahrens ist, daß der Vakuumofen zwei mal evakuiert und erhitzt werden muß bis zur fertigen Vakuumkammer. Deshalb wird versucht die Kammern nach dem sogenannten O.S.B.-Verfahren (O.S.B. = One Shot Braze) zu bauen. Hierbei sind die Bauteile so konstruiert, daß die Kammer in einem Prozeßschritt gelötet werden kann. Zur Zeit findet



Figur 6.1 Explosiv-Zeichnung einer Vakuumschaltkammer.

dieses Verfahren vorallem bei kleinere Kammern Angewendung.

Bei ACE sind beim Bau zwischen der Keramik und dem Deckel an der Festkontaktseite kleine Lötplättchen vorhanden, damit die Luft in der Kammer bei der Evakuierung des Vakuumofens aus der Kammer entweichen kann. Wenn die Temperatur im Ofen steigt, schmilzt das Lot am Deckel zusammen mit den Lotplättchen. Die Kammer ist dann luftdicht abgeschlossen und evakuiert.

Andere Hersteller haben auf einem der beiden Deckel ein Pinch-off Rohr angebracht. Durch dieses Rohr wird die Kammer nach dem Bau evakuiert während sie nochmals erhitzt wird. Nach der Evakuierung wird

das Rohr zusammengedrückt (Pinch-off) und vakuumdicht verschlossen. Vorteil des, von ACE angewendeten, Verfahrens ist, daß die Kammer bei einer höheren Temperatur evakuiert wird (bei der späteren Evakuierung kann die Temperatur natürlich nicht höher sein als die Löttemperatur). Bei höheren Temperaturen wird eine Kammer besser entgast. Zudem hat die ACE-Kammer keine scharfkantigen Resten des abgepinchten Rohres, die für das elektrische Verhalten unerwünscht sind. Diese Resten können eventuell durch Lötten verrundet werden.

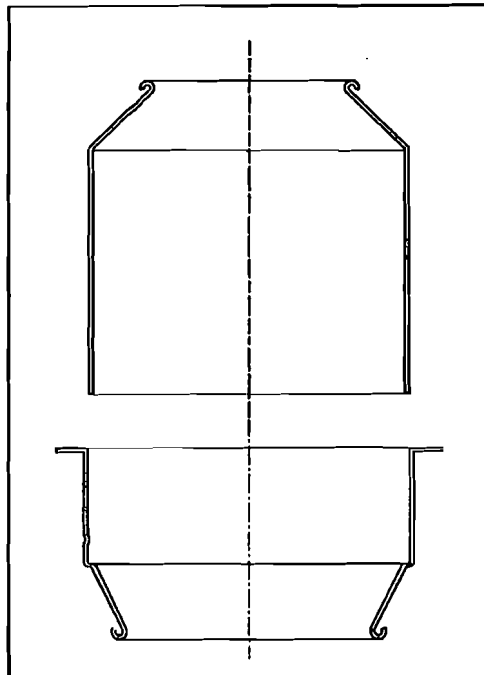
6.2 Die Schirmung.

Zum Schutz der Keramikkörper gegen Bedampfung und Hitze werden in Vakuumschaltkammern ein oder mehreren Schirme eingesetzt. Diese Schirme können ein definiertes Potential haben (zum Beispiel die VG3) oder sie können nicht angeschlossen bleiben. In diesem Fall sorgt die Symmetrie der Kammer dafür, daß der Schirm ungefähr, so lange er nicht elektrisch aufgeladen ist, die Mittelwert der Potentiale der Kontakte hat. Eine Toleranz bis 40/60% (statt 50/50%) ist meistens erlaubt.

Die Mittenschirmung wird bei ACE meist wie folgt gebaut. Der Keramikkörper besteht aus zwei Teilen. Die Teile werden so aufeinander gestellt, daß in der Mitte ein vergrößerter Raum entsteht. In diesem Raum wird dann der Schirm eingesetzt. Der Schirm besteht in der Regel aus drei Bauteilen. Diese klemmen so ineinander und in der Keramik, daß die Teile nicht gelötet werden müssen. (Figur 6.1).

Es gibt auch ältere Bauweisen, bei denen die Schirmung teil der Kammeraußenseite ist. Nachteil dieser Bauart ist die größere Kammerlänge, weil die erforderlichen Keramikteile weiter auseinander stehen. Diese Bauweise wird bei ACE nicht mehr angewendet.

Statt die Mittenschirmung zwischen die Keramikteile zu setzen, ist es auch möglich die untere Hälfte zwischen die beiden Stirnflächen der Keramik zu löten. Die obere Hälfte wird dann in dem so entstandenen Becher gestellt. (Figur 6.2) Um die obere Hälfte gerade zu stellen, hat die Unterseite eine Stufe. Die Oberseite hat außerdem Ausdrückungen (Noppen) zum Zentrieren. Durch einen Lötring werden die Teile im Ofen miteinander verlötet.



Figur 6.2 Ineinandersteckbare Schirmung.

Vorteile der Konstruktion dieser Bauart sind klar: Erstens besteht die Schirmung nur aus zwei statt aus drei Bauteilen. Zweitens können die Keramikkörper einfacher hergestellt werden; es ist nicht mehr notwendig die Aussparung einzubauen.

Ein wesentlicher Vorteil betrifft den Triple-Punkt (Kapitel 2). Befand sich dieser Punkt bei der "normalen" Bauweise oben und unten an der Aussparung, gibt es nur noch einen Punkt an der Anlötungsstelle. Diese Stelle ist so weit wie möglich von den Deckel entfernt. Durchschläge entlang der Keramikinnenseite sind so weniger wahrscheinlich.

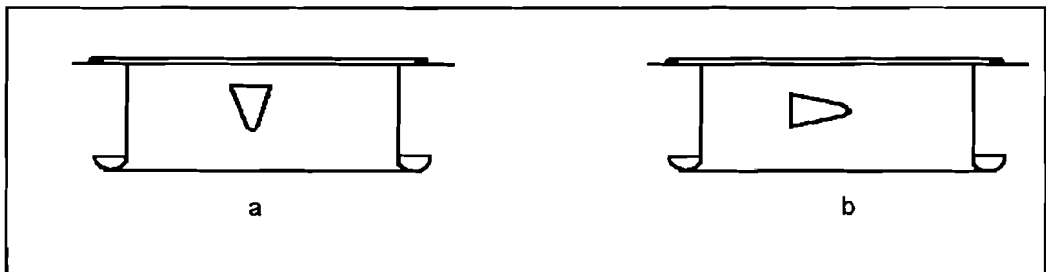
Die Enden der Schirmung sind meist nach innen gebogen, damit die Keramikteilen besser für den heißen Bogen, vorallem entstanden bei der Unterbrechung von Kurzschlußströme, geschützt werden. Bekannt ist, daß spitze Punkte nicht gut für die Spannungsfestigkeit sind. Deshalb wird der Schirm an den Enden ggf. eingerollt. Es ist sowohl möglich die Einrollung nach innen als auch nach außen zu legen. Wie man den Schirm konstruiert, hängt davon ab wie sich die elektrischen Feldstärken um diesen Punkt verhalten.

Wenn man die Einrollung nach außen bevorzugt, ist darauf zu achten, daß die scharfkantigen Enden der Einrollung, bei hoher Spannung über den Kontakten, sehr starke Röntgenstrahlung hervorrufen können. Man achte deshalb darauf die Einrollung so weit zu drehen, daß das Blechende nicht nach außen gerichtet wird.

6.3 Der Zentrierring.

Um die Deckel (und damit auch die anderen Teile) zu zentrieren, wird ein Zentrierring eingesetzt. Dieser Ring hat an der Oberseite eine Rand, der genau zum Deckel paßt. Der Ring wird zentriert von drei sogenannten Zentrierlaschen. Um den Raum um die Laschen elektrisch zu entlasten wird hier eine kleine Schirmung (mit Einrollung) eingesetzt. Die Länge der Schirmung muß in Abstimmung mit dem Mittenschirm ausgelegt werden.

Die Zahl der Zentrierlaschen ist drei, weil drei Punkte am einfachsten zu einem Kreis (Keramikkinnenseite) passend gemacht werden können. Die Laschen können auf verschiedenen Weisen gebaut werden. Obwohl werden die Laschen von oben aus dem Metall geschnitten und vertikal nach außen gebogen, obwohl werden sie horizontal aus der Zentrierringschirmung geschnitten. (Figur 6.3a und b).



Figur 6.3 Zentrierring mit vertikalen (a) und horizontalen Zentrierlaschen (b).

6.4 Konditionierung.

Zur Konditionierung wird an der Kammer bei einem kleinen Kontakthub (3 mm.) eine Wechselspannung (50 Hz) angelegt. Diese Spannung wird langsam hochgeführt bis einem vorgeschriebenen Wert erreicht ist. Der Wert der Spannung ist zirka 70 kV. Während das Hochführen soll es zu

kleinen Durchschlägen kommen. Wenn die Maximalspannung erreicht ist soll diese Spannung während einer vorgeschriebenen Zeit (1-2 Minuten) ohne Durchschläge durchstanden werden.

In der Periode während dem Hochführen sollen die Durchschläge dafür sorgen, daß Mikrospitzen auf den Elektroden weggebrennt werden. Die Zeit mit konstanter Spannung ist eine Kontrolle um zu prüfen ob die Spannung auch wirklich längere Zeit gehalten werden kann.

7

Die Hochspannungsprüfungen.

7.1 Einführung.

Wenn neue Kammergeometrien entwickelt werden, müssen die auf ihren Spannungsfestigkeit geprüft werden. Für die Prüfung gibt es vorgeschriebene Vorgänge, nach den DIN- und IEC-Normen.

Die Kammern werden sowohl mit Wechselspannung als auch mit Stoßspannung geprüft. Bei der Wechselspannungsprüfung muß die Leistungskammer, bei normaler Kontakthub, eine Wechselspannung, ungefähr zweimal so groß wie die Nominalspannung, 60 Sekunden ohne Durchschläge halten. Die Größe der Wechselspannung findet man in Tabelle 7-1. Die entfallenden Blitzstoßspannung (Stirnzeit 1,2 μ s; Rückenhalbwertzeit 50 μ s) sind auch in Tabelle 7-1 aufgeführt (für Kammern die außerdem als Trennkammern eingesetzt werden, gelten höhere Werten).

Die Stoßspannungsprüfung gilt als bestanden wenn von 15 Stößen je Polarität 13 oder mehr gehalten werden. Durchschläge können sowohl an der Innenseite als auch an der Außenseite der Kammer auftreten.

Die Stoßspannung wird einmal positiv an der Festkontaktseite angeboten mit der Schaltkontaktseite am Erde, und einmal negativ. Danach wird die Kammer gedreht und wird die Spannung noch mal positiv und negativ an der andere Seite angeboten. Hierdurch möchte

Tabelle 7-1 Prüfspannungen nach DIN 57670, Teil 1000

Nominalspannung (kV)	Wechselspannung (kV)	Stoßspannung (kV)
12	28	75
24	50	125
36	70	170
52	95	250

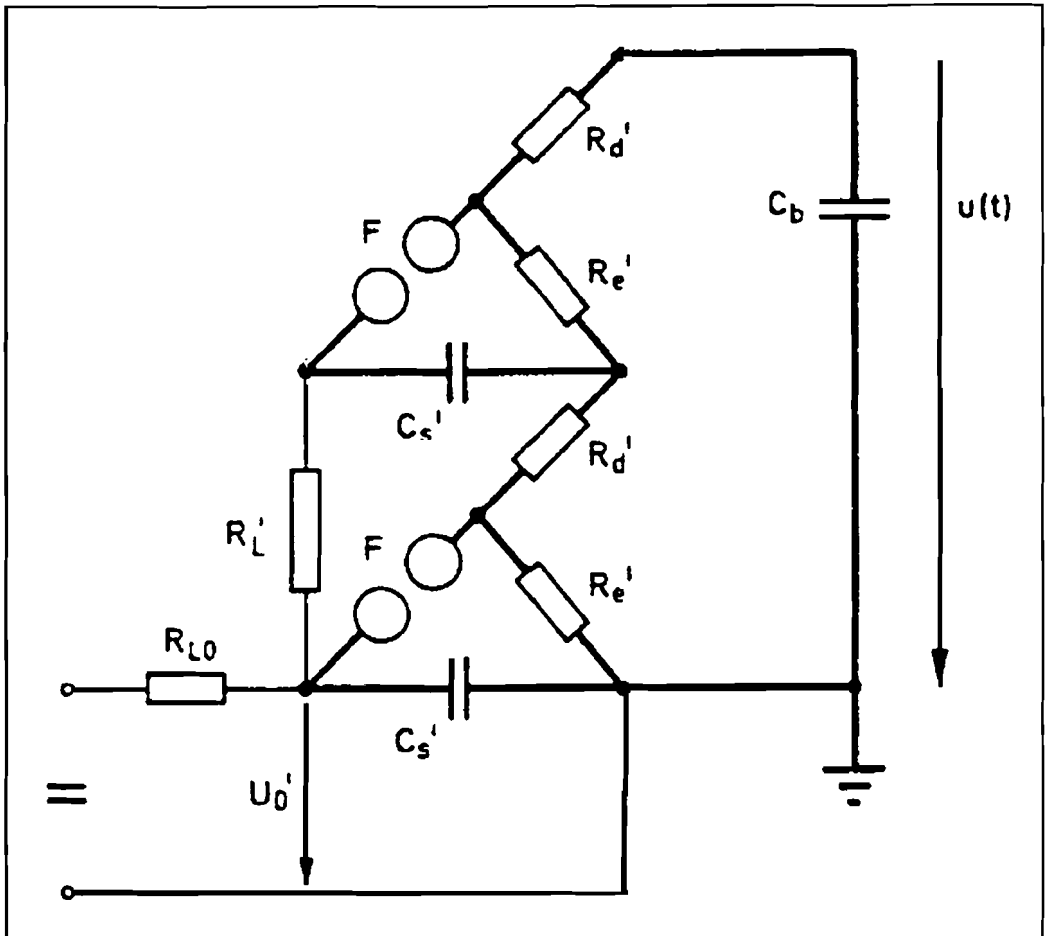
man entsprechende Konstruktionsunterschiede der jeweiligen Kammerseite überprüfen und die Einfluß der Umgebung der Prüfling ausschließen.

7.2 Die Prüfeinrichtung.

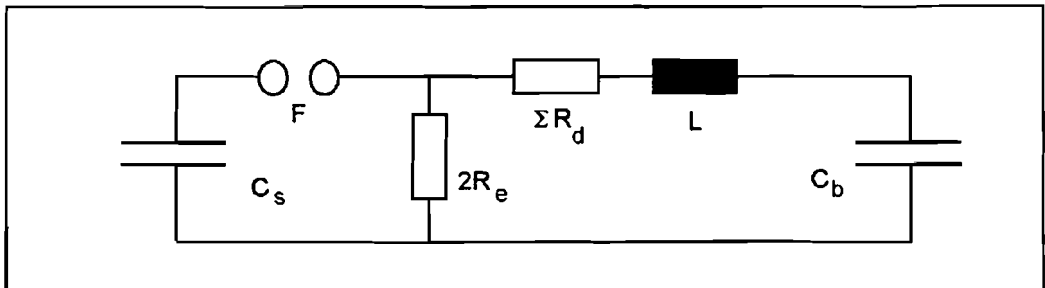
Die Stoßspannungsimpuls wird von einem Stoßspannungsgenerator von Haefely generiert. Seinem Aufbau liegt die Marx'sche Vervielfacher-schaltung zugrunde. In dieser Schaltung werden die Energiespeicher-kondensatoren (600 nF) parallel geschaltet aufgeladen und durch Funken-strecken in Serie geschaltet entladen. Dadurch erhöht sich die Ausgangsspannung bei n Stufen etwa um die Faktor n . Durch widerständen werden die Zeitparameter der erzeugten Impulses eingestellt. In Figur 7.1 ist das Prinzipschema einer Stoßspannungsprüfanlage angegeben.

Beim Stoßspannungsgenerator von ACE handelt es sich um eine 2-stufige Ausführung, die die Ladespannung verdoppelt. (maximum Ladespannung: 100 kV, maximum Energie: 6 kJ) Die Stufen werden vom Ladegleichrichter in Parallelschaltung aufgeladen, dann durch Zünden der Funkenstrecken (F) in Serie geschaltet und gleichzeitig über die Parallelwiderstände R_p (115 Ω) entladen. In Figur 7.2 wird ein brauchbares Ersatzbild für die Anlage dargestellt. L ist die totale Serie-induktivität von dem Stoßspannungsgenerator, der Serienwiderstand R_s und den Verbindungselementen.

Um die gewünschte Spannungsform am Prüfling, d.h. über C_b zu erhalten, müssen gewisse Beziehungen zwischen den elektrischen



Figur 7.1 Prinzipschema einer 2-Stufigen Prüfanlage.



Figur 7.2 Ersatzbild von Figur 7.1

Größen eingehalten werden. Die Frontzeit des Impulses ist beträchtlich kürzer als die Rückenzeit (bei Normstößen 3- bis 70 mal), und in den meisten Fällen ist auch C_b wesentlich kleiner als C_s . Deshalb wird die Rückenzeit im wesentlichen von der linken Masche in Figur 7.2 bestimmt, während die Frontzeit hauptsächlich vom rechten Zweig abhängt. Stoßkapazität C_s und Parallelwiderstände R_e können deshalb für ein und dieselbe Impulsform konstant gehalten werden, während der Seriewiderstand R_d der Lastkapazität C_b angepaßt werden muß.

7.3 Die Prüfung der Kammern bei ACE.

Die Prüfling wird, mit geöffneten Kontakten, in einem durchsichtigem Rohr plaziert, dessen Grundflach geerdet ist. Die Oberseite des Rohrs wird abgeschlossen. Das Rohr kann eventuell durch einem Ventil an der Untenseite gefüllt werden mit einem Isoliergas (SF_6). Die Luft kann dann durch einem Entlass an der Oberseite entkommen.

Die Oberseite der Kammer wird mit dem Stoß- bzw. dem Wechselfspannungsgenerator verbunden. Die Polarität der Stoßspannung wird bestimmt durch die zwei Dioden. Diese können dazu ausgenommen und umgedreht werden.

Es gibt einige unterschiedliche Methoden um einem Kammer zu Prüfen. Man kann einfach mit Stoßspannungen bestimmter Größen auf der Kammer stoßen, oder man benutzt die so genannten Up-down-Methode. Bei dieser Methode fängt man mit einer bestimmten Spannung an. Man stoßt ein oder einige malen. Wenn die Stöße gehalten werden erhöht man die Spannung immer mit dem gleichen Wert (z.B. 5 kV). Wenn die Stöße nicht gehalten werden erniedrigt man die Spannung wieder.

Dieses Verfahren erreicht, daß die Kammer sich weiter konditionieren kann, bis ihre Elektroden glatt genug geworden für erhöhte Spannungen.

Es gibt zwei möglichen Endpunkten an dieser Methode. Ersten kann es sein, daß bei einer großen Spannung die Kammer wirklich beschädigt wird. (Die Kammer ist beluftet, die Isolierungsstrecke bedampft oder glatte Oberflächen sind von Bögen so stark beschädigt worden, daß die sich nicht mehr durch Konditionierung erholen.) In diesem Fall werden keine Stöße mehr gehalten und man muß die Spannung stets weiter zurückdrehen, bis ein viel niedrigeren Wert erreicht wird.

Die zweite Möglichkeit ist, daß einfach einem Maximum erreicht wird. Die Spannung wird nicht gehalten und man muß ein oder zwei Schritten zurück. Dann werden die Stöße wieder gehalten, und kann man die Spannung wieder erhöhen, bis das gleiche Maximum erreicht wird.

Vorteil dieser Up-down-Methode ist, daß sie einfach und deutlich graphisch zu präsentieren ist. Man liest einfach das Maximum oder eine Band rund dem Maximum ab. Es gibt keine Gefahr, daß man durch zu große Spannungserhöhung an dem Maximum vorbei geht.

Nachteil ist, daß sehr viele Spannungstöße aufgegeben werden müssen, wenn das Maximum viel höher liegt als der Ausgangspunkt. Die Methode kann dazu führen, daß die Kammer bei der Prüfung so konditioniert wird, daß ein Spannungsniveau erreichbar ist, daß großtechnisch nur mit erheblichem Aufwand erreichen läßt. Deshalb ist die Art der Konditionierung nach der Fertigung der Kammer vor dem Test entscheidend für das erreichbare Spannungsniveau.

8

Die runde Kammer VG2-R.

8.1 Einführung.

Die 'normale' Bauart einer Vakuumschaltkammern ist, daß sie aus einem oder mehreren keramischen Rohrabschnitten aufgebaut ist. Die Öffnungen der keramischen Rohrabschnitte werden durch metallische Deckel verschlossen. Das Verschließen der Kammer und das Verbinden von Teilen untereinander erfolgt durch zwischengefügte Lotfolien bzw. Lotdrahringe.

Die Benetzung der Keramikstirnflächen durch das Lot ist so vollständig, daß eine etwas in Umfang vorhandene Metallisierung mitbenetzt wird. Dadurch entstehen an der Außenseite oft scharfe Ränder. An diesen Stellen sind die Feldstärken hoch.

Man kann statt diese zylindrischen Rohrabschnittstücke bei einer zweiteiligen Ausführung an der Ober- und Unterseite runde Keramikteile mit Boden benutzen. Vorteile sind folgende: Geringere Bauteilzahl. Es entfallen zum Beispiel die Deckel und die Dazu gehörenden Lotringen. Zweitens verlängert man die Isolationsstrecke ohne daß man die Kammerlänge vergrößert. Die Feldstärken entlang der Keramik sind dadurch mehr verstreut.

Für optimale Isolierung und somit maximale Spannungsfestigkeit, folgt die Krümmung der Keramikkörper den E-Feldlinien. Vorteil ist, daß auf

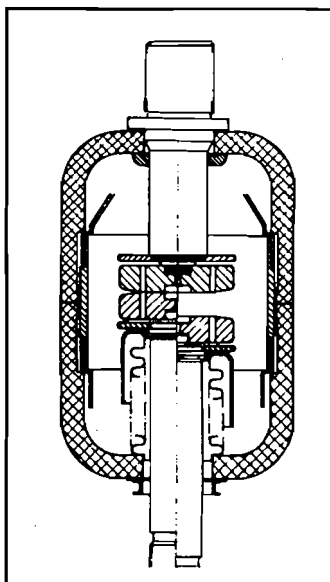
den Ladungsträger im oberflächennahen Bereich der Keramik keine Kräfte nach außen entstehen. Es können von diesen Kräften keine Ladungsträger ausgelöst werden. Durch Berechnungsversuche mit verschiedenen Radien der Keramikkörper ist den optimalen Radius bestimmt. Im vorliegenden Fall liegt er um 20 mm.

8.2 Die erste Geometrie.

Während des Praktikums im letzten Jahr wurde schon die elektrische Feldstärken der VG2-R berechnet [18]. (R steht für 'Rund'). Diese Geometrie basiert auf einer Technik wobei der Mittenschirm durch eine Keramikstufe gehalten wird.

In Anhang A sind die Berechnungsergebnisse gegeben. Zu sehen ist wie die E-Feldlinien fast in die Rundung der Keramik eintreffen. Die Feldstärkeverteilung zeigt an, daß die Höchstwerte zu finden sind an den Seitenkanten der Kontaktstücken. Auch rund die Einrollungen des Mittenschirms sind hohe Feldstärken zu finden. Diese sind aber deutlich geringer als an der Kontaktseiten.

Nach dieser Geometrie wurden Anfang 1995 einige Kammern gebaut. (Figur 8.1)



*Figur 8.1 Die VG2-R,
94-er Geometrie.*

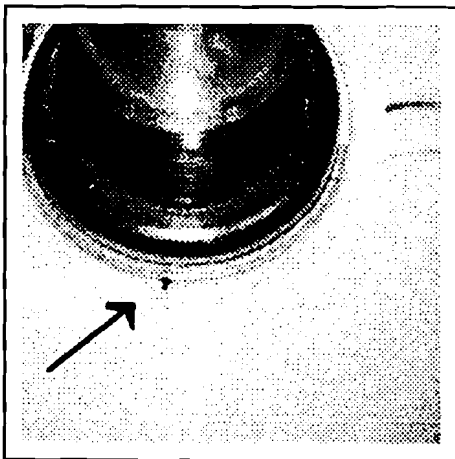
Im Hochspannungslabor standen diese Kammern zur Stoßspannungs-

prüfung an. Die Prüfungsergebnisse sind in Anhang B aufgeführt. Die Kammer hat eine Nennspannung von 24 kV (in SF₆), sie muß also eine Stoßspannung von 125 kV (+10%) halten können. In Kapitel 7 sind die Prüfverfahren beschrieben.

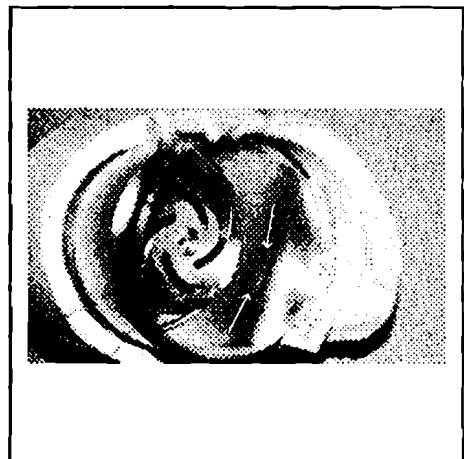
Zu sehen ist, daß bei allen Tests die 125 kV-Stoßspannung gehalten wurde. Auch 138 kV-Stoßspannungen werden mit nur wenigen Durchschlägen gehalten. Nur bei der 3. Prüfung zeigen sich bei der ersten 138 kV-Prüfung Durchschläge.

Zusammenfassend, hält die VG2-R Stoßspannungen bis zirka 150 kV ohne Probleme. Bei größeren Spannungen kommt es sowohl an der Innen- als auch an der Außenseite der Kammer zu Durchschlägen. Spuren von Außendurchschlägen wurden an den Metallisierungen der Stromdurchführungen an Ober- und Unterseite der Kammer erkennbar. Die Mittelnäht zeigt ebenfalls Durchschlagspunkte.

Nach dem Öffnen der Kammer finden wir Spuren auf den Kontaktstücken und dem Mittenschirm gegenüber den Kontakten. Die größten Spuren sind an der Schaltkontaktseite erkennbar. Genau an den Stellen wo sie aufgrund der Berechnungen zu erwarten waren.



Figur 8.2 Durchschlagspur an Durchfuhranlötung.



Figur 8.3 Durchschlagspure auf dem Mittenschirm (Sehrichtung: auf dem Schaltkontaktstück)

8.3 Eine verbesserte Geometrie.

Aufgrund der vorgenannten Paragraphen wird die Geometrie weiterentwickelt. In dem neuen Entwurf ist der Mittelschirm nicht mehr durch eine Stufe zwischen den Keramikteilen gehalten, sondern wie in Kapitel 6 beschrieben in die Mittelnaht eingelötet.

Außerdem wurde die Einrollung des Mittenschirms nach außen gelegt. Bei anderen Kammern hat sich gezeigt, daß das für die elektrischen Feldstärken zwischen der Einrollung und den Teilen innerhalb der Kammer günstig ist. [18]

Die Keramikteile sind in diesem Fall etwas einfacher, da auf die Stufung für die Schirmung verzichtet werden kann. Kostenvorteile bringt außerdem die Verwendung von zwei Baugleichen Keramikhälften.

Im Gegensatz zu den üblichen Kammerentwürfen, muß man bei der VG2-R darauf achten, daß die Keramik beim Leistungsschalten bis zum Kontakträger bzw. bis zum Faltenbalg bedampfen kann. Um Durchschläge entlang der Keramikinnenseite zu vermeiden, bringt eine Stufe in der Keramik isolationstechnische Vorteile. In der Anhang ist auf der Festkontaktseite eine Stufe gezeigt. An der Schaltkontaktseite ist an der Anlotung der Faltenbalg eine Fase der Keramik notwendig. Deshalb muß auch die Festkontaktseite eine Fase haben (Symmetrie).

Am sichersten ist eine Stufe mit geraden Seiten. Eine Fase ist aber einfacher herzustellen.

In Anhang C ist eine Berechnung der VG2-R gegeben. Die höchsten Feldstärken herrschen wie bei der ersten Varianten an den Rand der Kontaktstücke und an den Abschirmplatten. Bei der Prüfung der VG2-R der vorigen Paragraphen ist gezeigt worden, daß gerade zwischen den Kontakten und dem Mittelschirm die Durchschläge stattfanden. Die Feldstärken an den obenere Einrollung des Mittenschirms haben sich ein wenig verringert. An der Schaltkontaktseite haben sie aber zugenommen. Die Grund dafür ist die Verengung der Spalt zwischen dem Mittenschirm und dem Balgschirm.

Die neue Geometrie zeigt auch einige Asymmetrie, indem das Potential des Schirms um 810 V aus dem Mittelwert liegt gegen nur 420 V für die alte Geometrie.

Verbesserung hat aber diese Geometrie gebracht für die Verteilung der E-Feldlinien über den Keramikkörper. Verbesserung der Geometrie ist eventuell noch möglich durch Verringerung des Balgschirm-durchmessers. Eine Prüfung soll zeigen ob dieses notwendig ist.

8.4 Schlußfolgerung.

Die im letzten Jahr gebaute VG2-R-Kammer hat sich in der Prüfung sehr stoßspannungsfest gezeigt. Die Normprüfung von 125 kV wurde ohne Probleme gehalten. Die 10%-Reserve von ACE bringt noch wenige Schwierigkeiten.

Die Berechnungen an neuen Geometrien weisen auf Verbesserungen an der Kammer hin. Die aus Erfahrung bekannten schwachen Stellen, Mittenschirmwulz, Triple-Punkt Mittenschirm-Keramik, wurden geändert. Dies deutet auf eine zu erwartene Verbesserung der Kammer. Verschlechterungen sind zu erwarten für das Mittenbereich des Mittenschirms gegenüber die Kontaktstücke.

Die Prüfungsergebnisse der alten Geometrie in betracht genommen, muß die neue Geometrie ausreichen um die Stoßspannungsprüfung inklusiv die 10%-Reserve zu bestehen.

9

Die VG4.

9.1 Einführung.

Die VG4 ist eine neue Kammer, mit einem, im Vergleich mit den heutigen Kammern, neuen Aussehen. Die Kammer hat nicht, wie üblich, einen Isolator, der von oben bis unten geht. An der Schaltkontaktseite hat die Kammer eine metallische Zylinderaußenseite. Es ist möglich zu verzichten auf eine ganz keramische Außenseite, da die zwei mal 45 mm genügen als Außenisolierung.

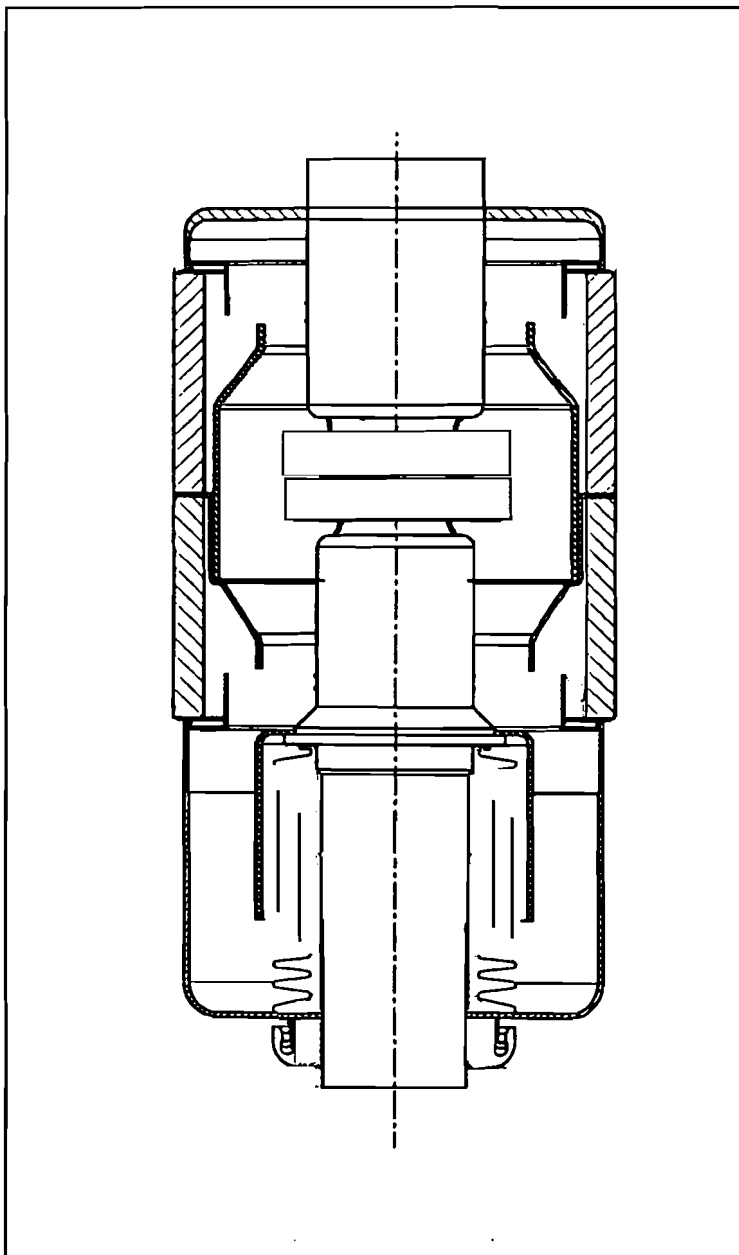
Vorteil dieser Bauart ist, daß ein Teil des teureren Keramikkörper entfällt.

Die VG4 soll geeignet sein für: 12 kV/ 25 kA und 24 kV/ 16 kA. Ein Querschnitt der Kammer ist gegeben in Figur 9.1. Zu sehen ist, daß die Innenseite der Kammer elektrisch fast symmetrisch ist. Denn die Teile in dem Raum innerhalb der großen Deckel sind alle auf der gleichen Spannung und deshalb ist dieses Raum Feldfrei.

Einige Asymmetrie ist noch zu finden in dem Durchmesser der Festkontaktträger und der Zuleitung. Der Festkontaktträger ist stärker, weil dieser benutzt wird um die Wärme (entstanden aus I^2R -Verlusten) abzuführen. Die Festkontaktseite ist hierzu besser geeignet als die Schaltkontaktseite, da dieser Weg der kürzeste ist. Außerdem hat man an der Schaltkontaktseite auch noch zu tun mit dem Schaltmechanismus, was ein extra Widerstand bedeutet für die Wärmeleitung. Für den Strom braucht man nicht so viel Kupfer, da

wegen des Skin-Effekts die Innenseite des Leiters nicht mal benutzt wird.

Der Mittenschirm ist wie in der VG2-R montiert: beide Hälften sind in einander geklemmt und werden zwischen den zwei Keramikteilen festgehalten. Vorteil ist, wie in Kapitel 2 beschrieben, daß man gefährliche Triplepunkte vermeidet. Die Triplepunkte mitten in der Kammer sind weniger gefährlich, da dieses Gebiet fast feldfrei ist. Nebenbei ist ein gerader Keramikkörper auch einfacher herzustellen.



Figur 9.1 Querschnitt der VG4-Kammer.

9.2 E-Feldberechnungen.

9.2.1 Die Standart VG4.

Für die standard Geometrie wurde eine E-Feldberechnung ausgeführt. Die Ergebnisse sind in Anhang D. (Die Berechnungen sind ausgeführt bei einem Kontakthub von 7 mm., weil dies übereinstimmt mit der ungünstigsten Toleranz.)

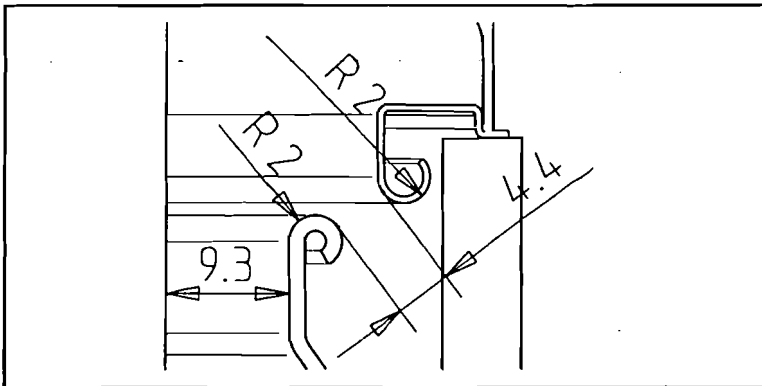
Wir finden die größten Feldstärken zwischen den Kontakten. Andere Stellen mit hohen Feldstärken befinden sich an der Ober- und an der Unterseite des Mittenschirms. An der Einrollung steigt die Feldstärke bis zirka 4 kV/mm. Auch an der Einrollung der Zentrierring sind die Feldstärken hoch. Glücklicherweise sind beide Einrollungen an einander vorbei verschoben. Wenn beide sich gegenüber einander befunden, wäre das kritischer für die Spannungsfestigkeit.

Die Abstand zwischen der Zentrierring und dem Schirm beträgt 5 mm. Die Durchgang zwischen dem Schirm und der Zuleitung ist 11,2 mm. und zwischen dem Schirm und dem Festkontaktträger ist 9,3 mm. Die Größe der Feldstärken bei diesen Abständen ist nicht außergewöhnlich hoch.

9.2.2 Die VG4 mit Einrollung nach außen, Spalt 4,4 mm.

Um die Feldstärke auf der Einrollung zu verringern ist es möglich diese nach außen statt nach innen zu drehen. Es hat sich bei der Entwicklung der VG3 schon gezeigt [18], daß durch die Vergrößerung der Durchgang rund um der Einrollung die Feldstärken verringert werden können.

In diesem Fall könnte das ebenwel weniger günstig sein wegen der kurzen Abstand zu der Zentrierring. Deshalb muß die Zentrierring eingekürzt werden. Außerdem wird der Schirm ein wenig weiter nach innen gebogen. In Figur 9.2 wird ein Ausschnitt der so entstanden Geometrie gezeigt.

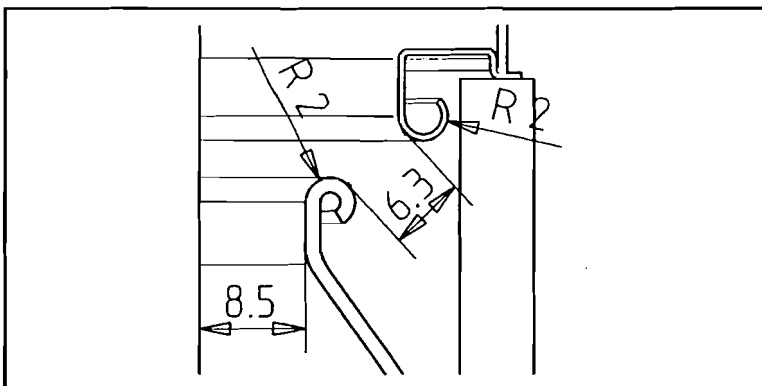


Figur 9.2 VG4 mit Einrollung nach außen bei 4,4 mm Spalt.
(Vergrößerung.)

Die so entstandene Geometrie wurde benutzt für eine neue Feldberechnung. Die Ergebnisse findet man in Anhang E. Nicht erstaunlich ist es zu sehen, daß die Werte rund dem Schirm und die Zentrierringen sich verschlechtert haben. Denn die Durchgang zwischen den Teilen hat sich verringert (von 5.0 mm. auf 4.4 mm.) und jetzt sind beide Einrollungen gegenüber einander plaziert.

9.2.3 Die VG4 mit Einrollung nach außen, Spalt 6,3 mm.

Eine Lösung um den Durchgang zwischen den beiden Einrollungen zu vergrößern ist dann noch das Verkürzen des Schirms. Wenn man die geraden Strecke des Mittenschirms der letzten Geometrie etwas verkürzt, kann man die Durchgang auf 6,3 mm. vergrößern (Figur 9.3).



Figur 9.3 VG4 mit Einrollung nach außen, Spalt 6,3 mm.
(Vergrößerung)

Die Berechnungsergebnisse dieser Geometrie sind in Anhang F gegeben. Die Werte haben sich jetzt tatsächlich erniedrigt bis unter den Werten der Originalgeometrie. Man sollte aber wohl darauf achten, daß

die Einrollungen noch immer gegenüber einander liegen, was bei der erste Geometrie nicht der Fall war. Ob diese Geometrie besser ist als die Originalgeometrie muß deshalb eine Prüfung beweisen.¹

9.3 Prüfung der VG4 (Originalgeometrie).

Die Originalgeometrie wurde gebaut und im Hochspannungslabor auf ihre Spannungsfestigkeit geprüft. Die Ergebnisse sind in Anhang G. Die Wechselfspannungsprüfung (60 Sekunden 50 kV) wurde ohne Durchschlägen durchstanden.

Die Normen fordern, daß eine 24 kV-Kammer bei einer Stoßspannungsprüfung von 15 Stößen von 125 kV minimal 13 halten muß. Wir lesen in den Tabellen, daß das für beide Polaritäten und für beide Positionen gelungen ist. Hierbei muß aber aufgemerkt werden, daß es für Stoßspannungen von etwa 120 kV auch schon einige malen zu Durchschlägen gekommen ist. Eine offizielle Prüfung hätte diese Kammer also nicht bestanden,

Aus Sicherheitsgründen versucht man bei ACE immer eine 10% höhere Spannung zu bestehen. Wenn man die Stoßspannung mit kleinere Schritte erhöht ist es möglich diese Spannung zu widerstehen. Eine direkte Erhöhung von 125 auf 138 kV kann die Kammer nicht bestehen. Durch Erhöhung mit kleinen Schritten kann die Kammer sogar Stöße von 146 kV halten.

Nach dieser Prüfung wurde die Polarität der Spannung gewechselt. Nun aber hat die Kammer Spannungen über 130 kV nicht mehr halten können. Weil das deutet auf einer Dekonditionierung der Kammer, wurde sie erneut konditioniert (70 kV Wechselfspannung bei 3,3 mm. Kontakthub, 60 Sekunden). Dies ist eine Normalkonditionierung für diesen Kammertyp. Hierbei wurde der Deckel an der Festkontaktseite heiß.

Nach dieser Konditionierung wurde die Kammer nochmal geprüft mit

¹ Die Schirmung wurde bestellt. Wegen der langen Lieferzeit konnte noch nicht eine Kammer mit diese Schirmung gebaut und geprüft werden. Diese Schirmung ist außerdem selbstzentrierend.

positive Stoßspannung am Schaltkontaktseite. Hierzu wurde die Up-down-Methde benutzt. Die Spannung konnte mit Schritte von zirka 4 kV erhöht werden bis 142 kV. Dann aber erfolgten nur Durchschläge bis die Spannung auf zirka 100 kV gesenkt wurde. Die Kammer hat sich sehr stark dekonditioniert oder ist beschädigt worden. Deshalb wurde die Prüfung abgebrochen.

Nach dem Prüfung wurde die Kammer geöffnet durch dem Absägen der Kammerdeckeln. Außer kleine Kathodespots auf der Einrollung des Mittenschirms gibt es auf dem Metall keine Spuren von Durschlägen. An der Innenseite der Zentrierring gibt es zwar eine schwarze Spur, aber es ist wahrscheinlich nur eine Verschmutzung des Kupfers, schon anwesend bei der Bau der Kammer.

Die wichtigste Fehlerstelle ist aber an einem ganz anderen Platz: Von einer der Zentrierlaschen an der Schaltkontaktseite ist ein Bedapfungsspur über der Keramikunterseite zum Mittenschirm entstanden. An der Festkontaktseite ist eine kleinere Bedampfungsstelle entstanden in der Nähe eines Lasches. Diese Bedampfungsspuren sorgen für eine starke Verringerung der Spannungsfestigkeit der Kammer.

Auch bei der Entwicklung der VG3 waren die Zentrierlaschen ein Problem [18]. Da die Laschen nicht zylindrisch sind werden die nicht von der Berechnung berücksichtigt. Außerdem ist die Form der Laschen nicht immer gleich, da sie vom Hand positioniert werden.

Gefährlich sind die Laschenweil weil die scharfkantig sind und gegen dem Keramikkörper gedruck werden. So entsteht hier ein Triple-Punkt. In diesem Prototyp der VG4 sind die Laschen extra scharfkantig, weil die vom Hand gemacht wurden. So bald die Kammern produziert werden, werden die Zentrierringen mit spezielle Werkzeuge gemacht und haben auch die Laschen eine genauer zu bestimmen Form.

Da die Laschen aus dem Zentrierring gedrukt werden, entsteht hier ein Loch in der Ring. Wenn die Laschen klein sind, ist das nicht direkt ein Problem. Bei dieser Version der VG4 sind die Löcher viel größer als

sonst. Dieses bedeutet, daß die Laschen nicht elektrisch abgeschirmt sind. Kleinere Laschen waren, bei den handproduzierten Prototypen, nicht stark genug und sind abgerispen.

9.4 Schlußfolgerung.

Die VG4-Kammer hat ohne richtige Probleme die Normen geschafft: 125 kV Stoßspannung hat es ohne weiteres gehalten. Die 10%-Reserve, von ACE befördert, bring noch einige Probleme mit sich. Wenn man aber die Kammer durch langsam hochführen der Stoßspannungswert die Kammer weiter konditioniert, kann die 138 kV auch erreicht werden.

Die Laschen an den Zentrierring verursachen für Spannungen größer als 140 kV Probleme. Diese Laschen sind vom Hand gemacht worden. Deshalb sind die scharfkantig geworden, Da die Laschen groß sind, sind auch die Löcher in der Zentrierring groß. In der Berechnung scheinen diese Stelle aber feldfrei zu sein, da die Löcher nicht im Rechnung genommen werden.

Die beste Lösung wäre eine Zentrierring ohne Laschen. Sonst muß man sorgen für kleine Löcher in der Zentrierring.

Wenn diese Laschenprobleme gelöst werden, muß die Kammer die Prüfung für 24 kV bestehen können.

10

Die VG2.

10.1 E-Feldberechnungen.

Die VG2 wird schon seit einigen Jahren produziert. Sie ist geeignet für 12 kV/25 kA. Bei der Entwicklung hat man zwar untersucht, ob die Kammer auch für 24 kV geeignet ist, aber die Kammer hat die 125 kV Stoßspannungsprüfung nicht bestanden.

Zum Vergleich der Berechnungs- und Messergebnisse der VG4-Kammer, habe ich auch Berechnungen und Messungen an der VG2 durchgeführt. Bei der Berechnungen sind die Werte der Feldstärken bewertet für 24 kV (zum Vergleich mit den Werte der VG4). Die Berechnungsergebnisse sind in Anhang H gegeben.

Nur die höhere Feldstärken auf dem Metall sind angegeben.

Es gibt drei Stellen an den es möglich zu Durchschlägen kommen kann:

- zwischen den Kontakten;
- unten am Mittenschirm;
- oben am Mittenschirm.

Wir merken auf, daß die Feldstärke zwischen den Kontaktoberflächen 3,9 kV/mm beträgt. Der Durchgang zwischen dem Balgschirm und dem Mittenschirm ist 5 mm. Die Feldstärken hier sind in der gleichen Größenordnung als zwischen den Kontaktstücken.

Da die Abstand zwischen die beide Elektroden hier so klein ist, ist diese Stelle sehr kritisch.

An der Oberseite ist der Durchgang zwischen dem Schirm und dem Festkontaktträger zirka 7 mm. Außerdem sind die Feldstärken hier erheblich niedriger.

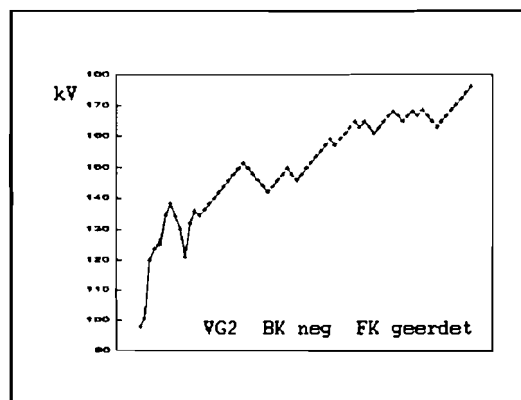
Der Durchgang zwischen der Zentrierring und dem Mittenschirm an der Oberseite ist 5 mm. Die Unterschied zu der unterseite ist aber, daß hier ein glattes Flach gegenüber ein Einrollung von dem Flach weg liegt. Die Feldstärke an der flachen Innenseite der Zentrierring sind dann auch erheblich niedriger.

Fazit: Auf Grund der Berechnungen ist die Stelle zwischen dem Balgschirm und dem Mittenschirm am schwachsten.

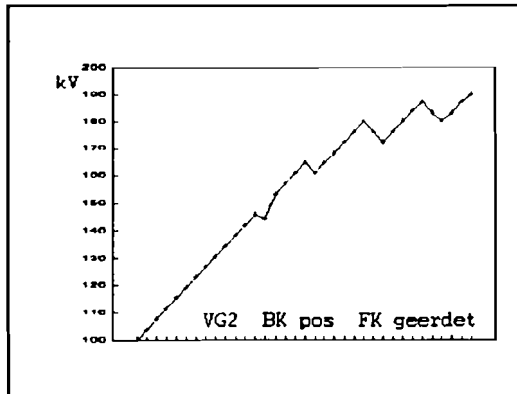
10.2 Hochspannungsmessungen.

Die VG2, die für die Prüfung benutzt wurde, hat die Nummer 7499/1. Die Innendruck betrug $3,25 \cdot 10^{-7}$ mbar.

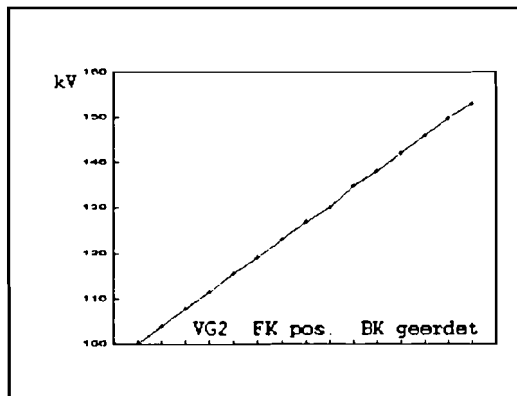
Die Kammer wurde teilweise geprüft mit der Up-down-Methode, teilweise durch Erhöhen mit größeren Schritten. Die Prüfungsergebnisse sind in Anhang I gegeben. Die Ergebnisse der Up-down-Methode sind in den nachstehenden Figuren graphisch wiedergegeben.



Figur 9.4 Prüfung VG2 Festkontaktseite geerdet, negative Stoßspannung an bewegliches Kontakt.



Figur 9.5 Festkontaktseite geerdet,
positive Stoßspannung an bewegliches
Kontakt.



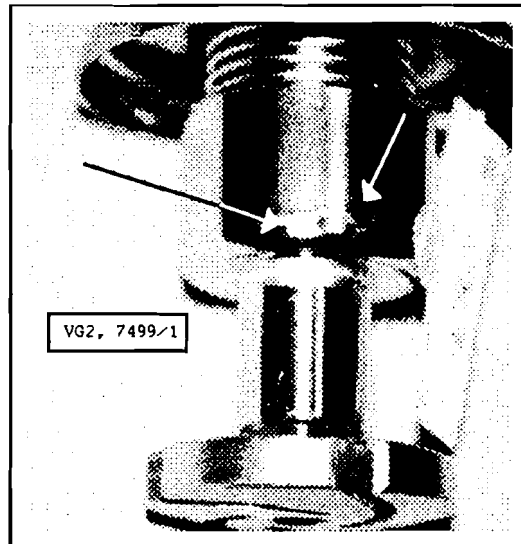
Figur 9.6 Bewegliches Kontakt geerdet,
positive Stoßspannung an Festkontakt.

Die Figuren zeigen an, daß die Kammer zuerst einige Durchschläge hatte beim Hochführen der Spannung. Das die Spannung nachher aber einfacher hochzuführen ist. (Merke auf, daß bei der letzten Figur die Spannung nur bis 150 kV erhöht wurde). Offenbar wird die Kammer immer weiter konditioniert durch den Stoßspannungsversuchen.

Auf Grund der Prüfungsergebnisse ergibt sich die Schließung, daß die VG2, nach eventuelle Konditionierung durch Stoßspannung, die Prüfung für 24 kV sehr gut bestehen könnte.

10.3 Vergleich Berechnung und Praxis.

Nach den Prüfungen wurde die VG2-Kammer geöffnet. Es zeigten sich Spuren von Durchschläge auf den Kontaktoberflächen, ein auf dem Mittenschirm und sehr deutlichen auf der Oberabrundung des Balgschirms.



Figur 9.7 Durchschlagspuren auf dem Balgschirm der VG2.

Im Vergleich mit den Berechnungen sehen wir dann, daß die Durchschläge genau da stattgefunden haben wo die auf Grund der Berechnung zu erwarten waren: zwischen dem Balgschirm und dem Mittenschirm.

Vielleicht ist es möglich die Kammergeometrie zu verbessern, z.B. durch die Einrollung des Mittenschirms nicht nach innen sondern nach aussen zu drehen. Aber auch ohne diese Verbesserung müßte diese Kammer für 24 kV geeignet sein.

10.4 Vergleich der VG2 und VG4.

Obwohl für unterschiedliche Spannungen geeignet, sind die Innenmaßen der beiden Kammern vergleichbar. Wenn man die Festkontaktseite der Schirmung der VG2 betrachtet, sieht man, daß die Werte beinahe gleich sind an die Werte der VG4. Sowohl die Abmessungen als auch die Feldstärken stimmen ungefähr überein.

Die VG2 hat bei den Prüfungen nur Durchschläge zwischen den Kontaktstücken und dem Mittelschirm gezeigt. Die VG4 hat vor allem Problemen gehabt mit Bedampfung der Keramik wegen der Laschen.

Wenn diese Durchschläge entlang die Keramik nicht stattgefunden hatten, hätte die Kammer sich wahrscheinlich so benommen wie die VG2. Das heißt, die Prüfung mit 125 kV würde ohne weiteres bestanden und die Prüfung mit 138 kV hätte nur kleine Probleme gegeben.

Ziel ist also die VG4 so zu konstruieren, daß die Laschen entweder viel kleiner oder weniger scharfkantig oder ganz entfallen, damit Durchschläge entlang dieser Strecke nicht stattfinden können.

Ob die geänderte VG4-Geometrie (mit eingekürztem Mittelschirm) positiv beiträgt zu der dielektrischen Spannungsfestigkeit ist abzuwarten.

11

Schlußfolgerung.

11.1 E-Feldberechnungen.

Obwohl das Isolierungsmedium in Vakuumschaltkammern Vakuum ist, ist es trotzdem möglich, daß es bei Beanspruchung mit Stoß- oder Wechselfspannung zu Durchschlägen kommt. Die elektrische Feldstärke an der Elektrodenoberfläche ermöglicht zusammen mit der Feldverstärkung an den Mikrospitzen auf der Oberfläche kleine Ströme. Diese Ströme können auf verschiedenen Weisen die Ansatz zu Durchschlägen formen.

Beim Entwurf Vakuumschaltkammern ist es deshalb notwendig Kenntnis vom elektrischen Feld zu haben. Hierzu sind unterschiedliche Berechnungsmethoden brauchbar. Das bei ACE benutzte Feldberechnungsprogramm basiert auf dem Oberflächenladungungsverfahren. Diese Methode simuliert das elektrische Verhalten der Elektroden, indem Ladung auf den Oberflächen plaziert wird.

Durch das Verbinden dieses Berechnungsprogramms mit dem bei ACE üblichen CAD-Programm Euclid ist erreicht, daß die Bedienung sehr viel Einfacher geworden ist. Statt Stunden an Hand einer Zeichnung eine Kammergeometrie einzuführen, genügt es jetzt in der CAD-Zeichnung die Elektroden und die dielektrische Konstant der Isolatoren einzugeben als auch die erwünschte Rechengenauigkeit (Arbeitszeit 10-15 Minuten).

Die Berechnungsergebnisse können ebenso im CAD-System dargestellt werden. Die Verteilung der Äquipotentiallinien und das elektrische Kennfeld sind so in direkte Verbindung mit der Originalzeichnung abzulesen. Mit der Maus können die elektrische Feldstärken auf der Geometrie abgefragt werden. Das Potential des Mittenschirms kann auf dem Bildschirm gezeigt werden.

Zur Test des Programms wurden drei verschiedene Kammertypen berechnet und geprüft, die VG2-R, die VG4 und die VG2.

11.2 Die VG2-R.

Die VG2-R hat einen geschlossenen Keramikkörper. Dies ermöglicht eine bessere Feldverstreung über die Keramik und hat eine längere Isolierungsstrecke bei gleichbleibender Kammerlänge zur Folge. Die elektrischen Feldstärken in der Kammer sind günstiger als bei einer gleichen Kammer mit Deckelverschluß.

Prüfung einer vorhandenen VG2-R-Kammer zeigte gute Ergebnisse. Mit Hilfe von Feldberechnungen ist eine verbesserte Geometrie entstanden. Diese neue Geometrie sorgt für eine bessere Verteilung der E-Feldlinien. An der Festkontaktseite rundum der Mittenschirmeinrollung hat sich das elektrische Feld verbessert. An der Schaltkontaktseite ist aber der Durchgang zwischen dem Mittenschirm und dem Balgschirm verringert. Die Feldstärken haben sich dann auch entsprechend erhöht. Auch an der Seitenkante der Kontaktstücke hat sich die elektrische Feldstärke erhöht.

Ein Hochspannungstest muß angeben, ob diese neue Geometrie eine Verbesserung ist, oder daß die Verstärkung der elektrische Feldstärken zwischen den Schirmen zur Verschlechterung leitet.

11.3 Die VG4.

Bei der Prüfung hat die VG4-Kammer ohne Probleme die 125 kV Stoßspannung gehalten. Erhöhung bis 138 kV war nicht für alle Polarität direkt erreichbar.

Die geänderte Geometrie gibt ein etwas geändertes Feldbild: Die

Feldstärken rundum die Einrollungen des Mittenschirms haben sich deutlich verringert. Eine negative Folge ist aber die Erhöhung der Feldstärken zwischen dem Mittenschirm und den Kupferzentrierringen. Tests müssen angeben ob diese Geometrie eine Verbesserung oder eine Verschlechterung zu der Originalgeometrie ist.

Die Zentrierlaschen haben gezeigt zu Problemen zu leiten. Die scharfkantige Enden der Laschen liegen gegen der Keramik und lassen so einen Triple-Punkt entstehen. Wenn die Keramikinnenseite einmal bedampft ist, ist die Spannungsfestigkeit stark verringert. Zur Verbesserung des Zentrierrings kann man am besten verzichten auf den Laschen und sie ersetzen von Eindrückungen in dem Ring.

11.4 Die VG2.

Die VG2-Kammer wird produziert für eine Nennspannung von 12 kV. Zum Vergleich mit der VG4 wurde sie geprüft für eine Nennspannung von 24 kV. Die Wechselfspannungsprüfung konnte die Kammer ohne Problemen halten. Die Stoßspannungsprüfung mit dem Up-Down-Verfahren war auch kein Problem. Die Stoßspannung konnte bis 200 kV (die Maximalspannung der Stoßspannungsgenerator) hochgeführt werden. Durch Weiterkonditionierung und Aufladen der Schirmung verbessert die Spannungsfestigkeit der Kammer sich.

12

Literaturverzeichnis.

- [1] *Fink, H.; Gentsch, D.; Lipperts, J.:* Qualitätssicherung durch quantitative Restgasanalyse in Vakuumschaltkammern. ABB Technik, Vol. 6/7, 39-46, (1995)
- [2] *Smeets, R.P.P.:* Vermogensschakelaars in Elektriciteitsnetten. Eindhoven: TU Eindhoven, Vorlesungsskript PATO-Kurs, (1994)
- [3] *Latham, R.V.* High Voltage Vacuum Insulation. London: Academic Press, (1981)
- [4] *Cranberg, L.,* J. Applied Physics, 23, 518-522, (1952)
- [5] *Dyke, W.P., Trolan, J.K.,* Phys. Rev., 89, 799-808, (1953)
- [6] *Dyke, W.P., Trolan, J.K., Dolan, W.W., Barnes, G.,* J. Applied Physics, 24, 570-576, (1953)
- [7] *Dyke, W.P., Trolan, J.K., Martin, E.E., Barbour, J.P.,* Phys. Rev., 91, 1043-1054, (1953)
- [8] *Kahl, B.,* Zur elektroischen Festigkeit von Dreielektroden-Anordnungen im Hochvakuum, Düsseldorf: VDI, Diss. TU Braunschweig, (1993)
- [9] *Gollor, M.,* Der zeitliche Ablauf des Vakuumdurchschlags unter Impulsbeanspruchung, Diss. TU Braunschweig, (1990)
- [10] *Rohrbach, F.,* Rpt CERN, 71-38 (NTIS), (1971)
- [11] *Greenwood, A.,* Vacuum Switchgear. London: IEEE, (1994)

- [12] *Wetzer, J.M., Wouters, P.A.A.F.*, The Effekt of Insulator Charging on Breakdown and Conditioning, IEEE Transactions EI, Vol. 28, No. 4, 681-691, (1993)
 - [13] *Gleichauf, P.H.*, Electrical breakdown over insulators in high vacuum, J. Applied Physics, Vol. 22, 535+766, (1951)
 - [14] *Anderson, R.A., Brainard, J.P.*, Mechanism of pulsed surface flashover involving electron-stimulated desorption, J. Applied Physics, Vol. 51, 1414, (1980)
 - [15] *Dullni, E.*, Wiederverfestigung von Kontaktstücken nach Hochstromabschaltung im Vakuum und Ursache von Spannungsdurchschlägen, ABB Research Center Baden, (1990)
 - [16] *Jeuken, M.E.J.*: Elektromagnetisme voor Energietechnik. Eindhoven: TU Eindhoven, Vorlesungsskript, (1991)
 - [17] *Böhme, H.*: Mittelspannungstechnik. München: Verlag Technik GmbH Berlin, (1992)
 - [18] *Peters, I.P.*: Elektrische Feldberechnungen an Vakuum-schaltkammern von ABB Calor-Emag Schaltanlagen. Eindhoven: TU Eindhoven, Praktikumbericht, (1994)
-

Anhang B

Hochspannungsmessungen an der VG2-R (erste Variante).

Tabelle B-1 Prüfungsergebnisse VG2-R 35/95

VG2R 36/95 23/11/95 x:Durchschlag a:Außendurchschlag n:Zahl der gehalten Stöße							
Festkontakt geerdet				Bewegliches Kontakt geerdet			
U negativ (kV)		U positiv (kV)		U negativ (kV)		U positiv (kV)	
96.8	1	100.1	xx3	100.2	5	100.1	5
100.7	5	103.9	3	125.0	x14	125.0	15
121.8	1	107.8	3	138.0	xxxxx	138.0	15
125.4	15	111.5	3	134.4	3	153.4	xxxx
135.0	1	115.5	xx3	138.3	x5	146.0	5
138.8	5	119.3	3	142.0	2xx4	153.4	3x3
148.2	x	123.2	x2	146.0	4	168.7	xxxxx
138.8	2	127.0	xx13	149.7	4	176.4	xxxxx
142.5	3	130.8	5	153.4	xx3	138.0	5
146.4	2	134.6	xx3	157.4	4		
150.2	3	138.4	5	161.2	4		
154.0	2axx	142.2	5	164.9	xxx		
150.2	3	146.0	3	161.2	2		
154.0	6	149.7	5	164.9	3		
157.6	3	153.4	xxxxx	168.7	3		
161.5	1xxx	149.7	xxx	172.6	xax3		
157.6	2	146.0	3	176.4	xxaaa		
161.5	4	149.7	x4	168.7	1xxa		
165.0	xxx	153.4	xx3	164.9	a		
161.5	axxx	157.4	3	161.2	a		
157.6	xx	161.2	xxx	142.0	1		
154.0	xx	157.4	xx	149.8	1		
150.2	x2	153.4	x2	153.6	1		
154.0	2	157.4	3	157.4	1		
157.6	2	161.2	xxx	161.2	2		
161.5	2	157.4	xx2	164.9	2		
165.0	axaaa	161.2	xx3	168.7	2		
161.5	xx	164.9	3	172.6	xxx		
142.4	1	168.8	xxx				
165.0	xx						
145.0	1x2						
165.0	xxx						

Anhang G

Hochspannungsmessungen an der VG4.

Tabelle F-1 Prüfungsergebnisse VG4 112/95 bis 125 kV.

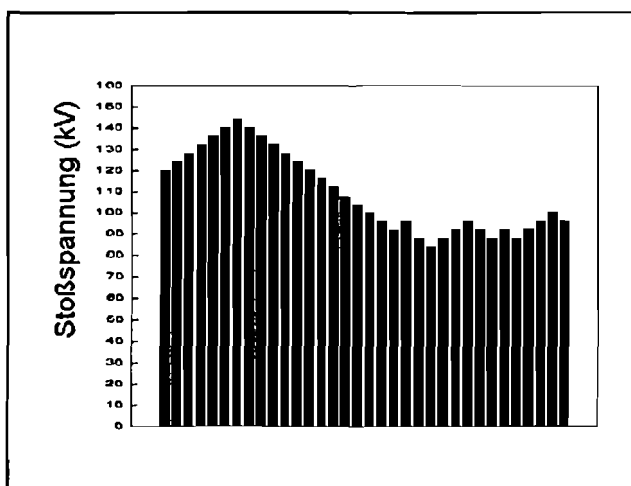
Prüfung VG4		x:Durchschlag a:Außendurchschlag		n:Zahl der gehalten Stöße			
Bewegliches Kontakt geerdet				Festkontakt geerdet			
U positiv (kV)		U negativ (kV)		U negativ (kV)		U positiv (kV)	
85	1	100	5	100	x	82	x1
90	1	119	1	87	1	102	5
95	1	125	9x10	100	10	120	xxx
100	10			119	x1	118	3
119	x1			125	x15x4	120	1
122	xx1					123	1
125	4xx14					125	16

Tabelle F-2 Prüfungsergebnisse VG4 112/95 bis 125 kV +10%.

Prüfung VG4		x:Durchschlag a:Außendurchschlag		n:Zahl der gehalten Stöße			
Festkontakt geerdet				Bewegliches Kontakt geerdet			
U positiv (kV)		U negativ (kV)		U negativ (kV)		U positiv (kV)	
129	1	100	x2	97	x	100	1
130	1	108	x	100	x1	106	1
130	15	118	3	105	1	120	1
137	xxx	122	3	119	x1	123	1
128	3	126	3	125	5	129	1
132	3	130	6	134	5	135	5
136	3	133	xx	137	2	138	6
138	17	130	1	139	16	139	10
		134	3				
		137	1				
		138	x				
		136	xx				
		135	2				
		136	1				
		137	1				
		138	12				
		139	5				

Tabelle F-3 Prüfungsergebnisse VG4 112/95.

Prüfung VG4 x: Durchschlag a: Außendurchschlag n: Zahl der gehaltenen Stöße					
Festkontakt geerdet					
U negativ (kV)		Fortsetzung		U positiv (kV)	
100	x1			102	1
115	1	141	2xxx	118	x2
119	1	140	x1	128	1
123	1	141	1xxxx	131	x
134	1	142	1xxx	134	xx
137	x3	142	xx	132	1
139	1	140	xx	134	x3
140	2	119	1	136	3xxxx
142	x1x	127	1	135	xx
140	x	134	1	133	xx2
132	x	138	1	135	3xx
119	x1	139	1		
133	x4	140	x		
137	2	139	1		
139	1	140	2x3		
139	1	141	2		
140	1	142	3		
141	x1	143	3		
138	1x	144	5		
133	1	145	5		
139	2	146	5		
140	1				



Figur 9.8 Graphische Darstellung der Prüfung der VG4 mit der Up-Down-Methode bis zum Versagen bei 144 kV.

Anhang I

Hochspannungsmessungen an der VG2.

Tabelle H-1 Prüfungsergebnisse VG2 7499/1

Prüfung VG2		x: Durchschlag a: Außendurchschlag n: Zahl der gehaltenen Stöße					
Festkontakt geerdet				Bewegliches Kontakt geerdet			
U positiv (kV)		U negativ (kV)		U negativ (kV)		U positiv (kV)	
Messung 1		Messung 2		Messung 3		Messung 4	
97,1	1	98,0	1	121,0	x1	100,0	3
101,2	5	100,8	5	130,0	1	103,9	3
120,3	xx3	120,0	1	141,9	x2	107,8	3
125,0	2x12	123,6	1	150,8	xxx	111,5	3
129,7	x2	125,0	15	145,9	2	115,5	3
134,0	xxx4	134,5	1	149,5	3	119,0	3
137,3	x14	138,2	1xx	153,5	x2	123,0	x2
		134,0	x	155,7	x2	127,0	3
		130,0	xx			130,0	3
		121,0	1			135,0	3
100,0	3	132,0	1			138,0	3
103,8		135,9	x			142,0	3
107,8		134,4	3			145,9	3
111,6		136,3	3			149,7	3
115,4		138,3	15			153,0	15
119,3		140,1	3				
123,1		142,0	3				
126,9	15	143,9	3				
130,7	3	145,8	3				
134,6	3	147,8	3				
138,2	11x4	149,7	3				
142,0	5	151,6	xxx				
145,8	5	149,7	xx				
144,6	x5	147,8	xx				
153,3	5	145,8	xx				
157,2	2x2	143,9	xx				
160,8	5	142,0	3				
164,7	2xxx1x2	144,0	3				
160,8	5	145,8	3				
164,7	x9	147,7	3				
168,2	1xx4	149,7	xxx				
172,2	2xx2x3	147,7	xx				
176,0	5	145,8	3				
180,0	x1xxx	147,7	3				

176,0	xxx	149,7	3				
172,0	3	151,6	3				
176,0	5	153,4	3				
180,0	x2xxx9	155,2	3				
183,8	1x5	157,1	3				
187,1	1x1x1xx xxxx	159,0	xxx				
183,0	xx	157,1	x2				
180,0	3	159,0	3				
183,0	4	160,9	3				
187,0	5	162,8	3				
190,0	5	164,7	1xx				
		162,8	xxx				
		164,7	x				
		162,8	xx				
		160,9	3				
		162,8	2				
		164,7	x2				
		166,6	3				
		168,1	xxx				
		166,6	xx				
		164,7	2				
		166,6	3				
		168,1	xx				
		166,6	2				
		168,5	xx				
		166,6	xx				
		164,7	x1x				
		162,8	2				
		164,7	2				
		166,6	2				
		168,5	3				
		170,3	3				
		172,2	3				
		174,1	2				
		176,0	1				

Tabelle H-2 Schnelle Spannungserhöhung.

	BK/-FK=	FK/-BK=
100.0	5	xx4
125.0	5	5
138.0	8	x6
176.0	5	xxx
138.0		1
176.0		xx
157.0		x5
