

DESY-Bibliothek

30. APR. 1971

Interner Bericht  
DESY H2-71/1  
Februar 1971

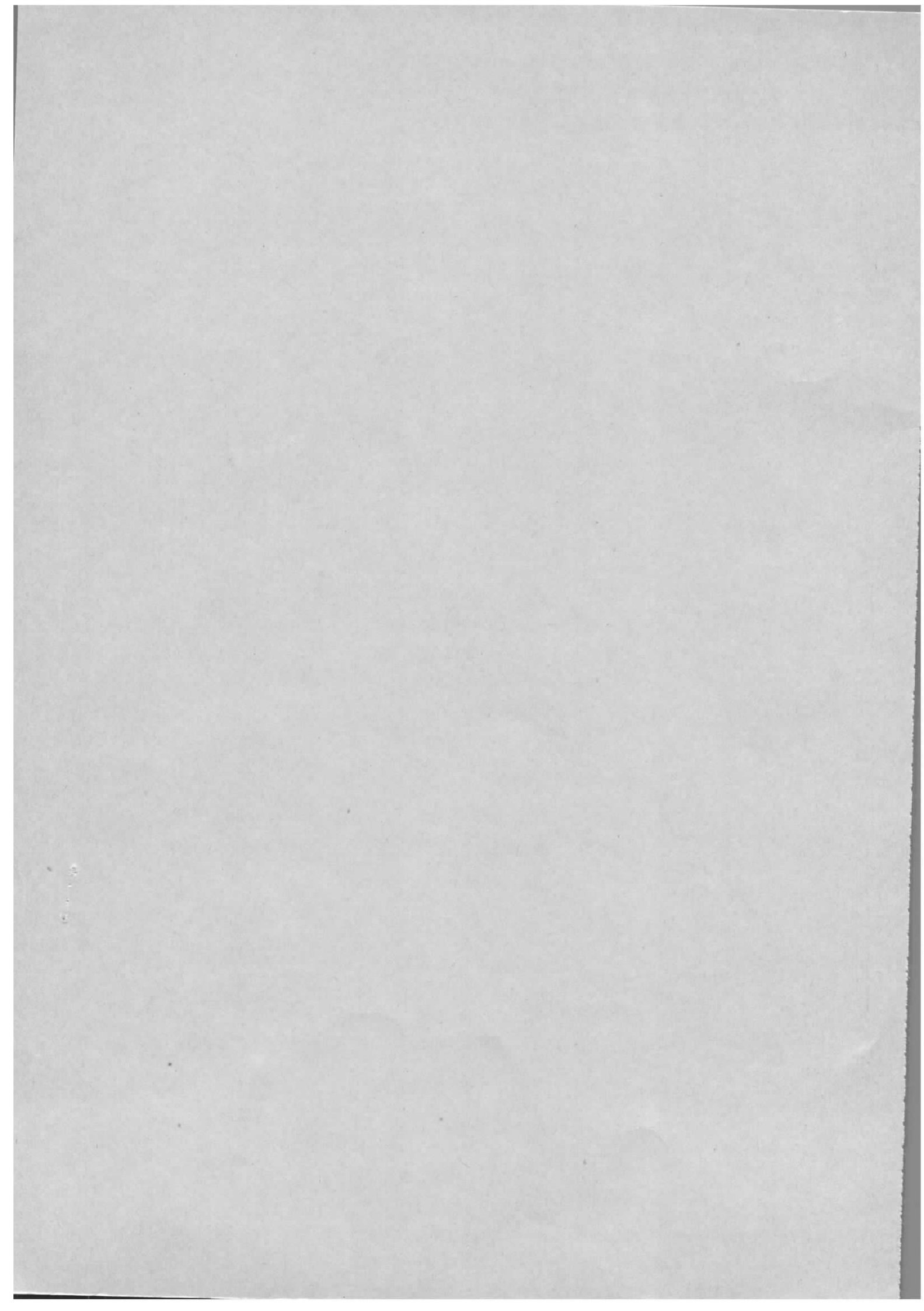
Untersuchungen über den Schutz gegen  
Überspannungen an Speicherringmagneten  
bei Kabelbruch

von

K. Holm

H. Kaiser

K. Wille



## A b s t r a c t

Accidental interruption of a direct current flowing through the coils of one magnet or several magnets in series causes an induced emf that might damage the coil insulation.

The initial objective was to test the effectiveness of protective devices against overvoltage. During this work it became apparent that induced voltages higher than about 500 volts normally are prevented by a stable arc discharge at the break in the circuit. Induced voltages in the kV-range for testing the various protective devices could only be reached by rather artificial devices to destroy the arc. The results of these tests are discussed.

The conditions for the stability of the arc-discharge are examined and explained by a simple model.

Special protective devices against overvoltage are shown to be superfluous since the stable arc in itself is such a device.

As the arc may cause secondary damage its occurrence should be detected, and lead to turning-off the powersupply. Suitable detection devices located directly at the power supplies are proposed for the various electric magnet-circuits of the DESY-Storage Ring.

Inhalt:

1. Problemstellung
2. Stromunterbrechung bei induktiver Last
3. Stabilität des Lichtbogens
4. Überspannungsableiter
  - a) Luftfunkenstrecke
  - b) Funkenstrecke mit Festkörperisolierung (Eloxalschicht)
  - c) Glimmstrecken
  - d) Thyristor
5. Schutzvorrichtungen für Speicherringmagnete
  - a) Abschaltvorrichtung für Stromkreis Nr. 1
  - b) Abschaltvorrichtung für die Stromkreise mit 4, 8 und 16 Magneten

### 1) Problemstellung

Im Speicherring werden mehrere Magnete (bis zu 80) in Serie geschaltet sein, um Stromgleichheit zu garantieren. Fließt durch die Spulen der Magnete ein Strom  $I_0$ , so ist die in den Magnetfeldern gespeicherte Energie

$$E = \frac{I_0^2}{2} \sum_{\mu=1}^n L_{\mu} \quad (1)$$

dabei ist  $n$  die Anzahl und  $L_{\mu}$  die jeweilige Induktivität der Magnete. Im Stromkreis 1 des Speicherrings ist  $n = 80$  und  $\sum_{\mu=1}^n L_{\mu} = 1,72 \text{ H}$ .

Für die höchste vorgesehene Stromstärke  $I_0 = 2000 \text{ A}$  ergibt sich damit eine Energie

$$E = 3,44 \cdot 10^6 \text{ Wsec}$$

Wird nun durch eine mechanische oder thermische Beschädigung der Stromkreis irgendwo unterbrochen (Fig.1), so sinkt der Strom und damit die in den

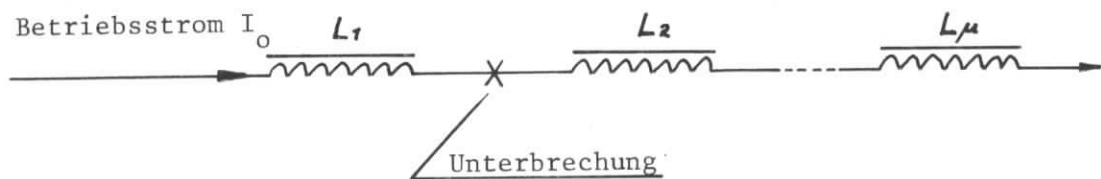


Fig.1

Magneten gespeicherte Energie. Durch Induktion entsteht dann an der Bruchstelle die Spannung

$$U = - \frac{dI}{dt} \sum_{\mu=1}^n L_{\mu} \quad (2)$$

Es wurde untersucht, ob diese induzierte Spannung Werte erreichen kann, die das Isolationsvermögen der Spulen gegen das geerdete Magnetjoch überschreiten, d.h.  $U > 5 \text{ KV}$ . Nach (2) ist die Frage nach der Höhe der Spannung identisch mit der Frage, wie schnell ein Stromkreis mit induktiver Last unterbrochen werden kann.

Zu diesem Problem der Stromunterbrechung wurde in Experimenten empirisches Material gesammelt. Außerdem wurde untersucht, mit welchen Maßnahmen

sich prinzipiell Überspannungen an Magneten vermeiden lassen und welche Eigenschaften derartige Vorrichtungen dabei haben.

## 2) Stromunterbrechung bei induktiver Last

Im Experiment wurde versucht, die Stromunterbrechung möglichst realistisch zu simulieren. Dazu dienten folgende Überlegungen: Im allgemeinen wird ein Kabel nicht in beliebig kurzer Zeit vollständig durchgetrennt sondern durch Einkerbung an einer Stelle verringert sich dort der Leitungsquerschnitt. Der unvermindert weiterfließende Strom erhitzt durch vergrößerten Leiterwiderstand an der beschädigten Stelle das Metall, bis es schmilzt und schließlich verdampft. Schmelzendes Metall tritt immer bei Bruch eines stromdurchflossenen Leiters auf und daher liegt es nahe, die Stromunterbrechung an einem Magneten mit einem schmelzenden Draht entsprechend kleinen Querschnitts zu realisieren. Der Aufbau der Versuchsanordnung ist in Fig. 2 zu sehen.

Zur Stromunterbrechung diente jeweils ein Eisendraht, der je nach Stromstärke einen Durchmesser von  $D = 0,5 - 1 \text{ mm}$  besaß. Seine Länge war  $L \approx 80 \text{ mm}$

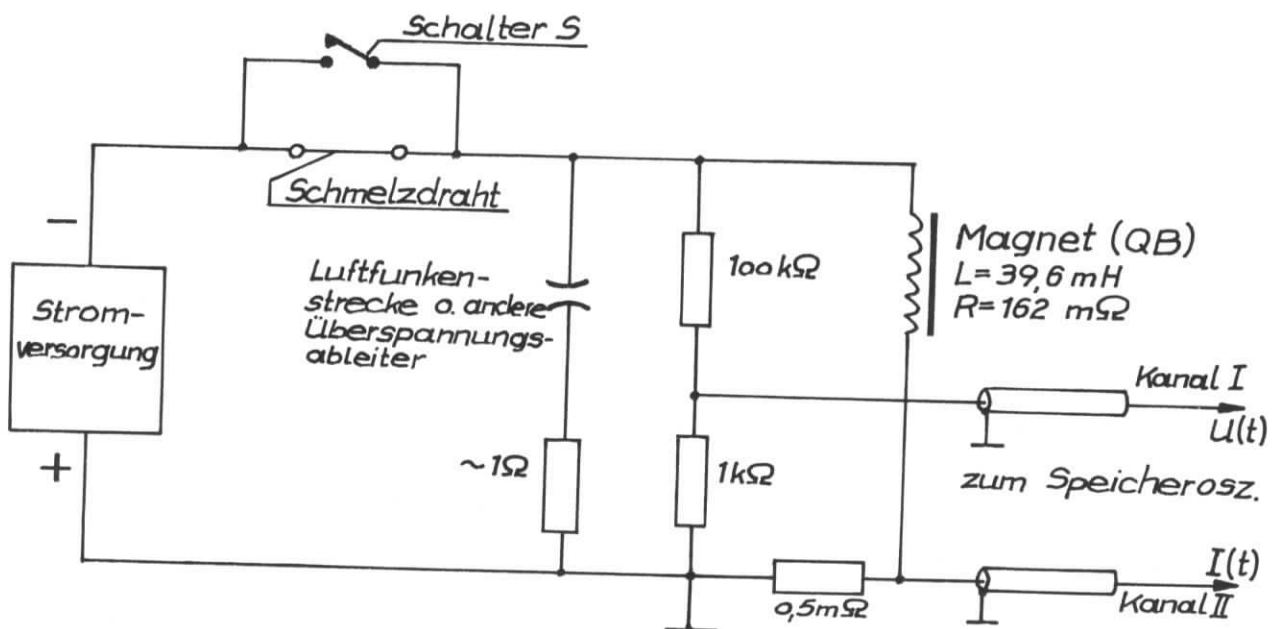


Fig. 2

Aufbau der Versuchsanordnung

Nach Öffnen des Schalters S fließt der Strom über den Schmelzdraht, der dadurch nach etwa 30 msec explosionsartig verdampft. Einen typischen Spannungs-  $U(t)$  und Stromverlauf  $I(t)$ , wie er im Speicheroszillographen registriert wird, zeigt Fig. 3.

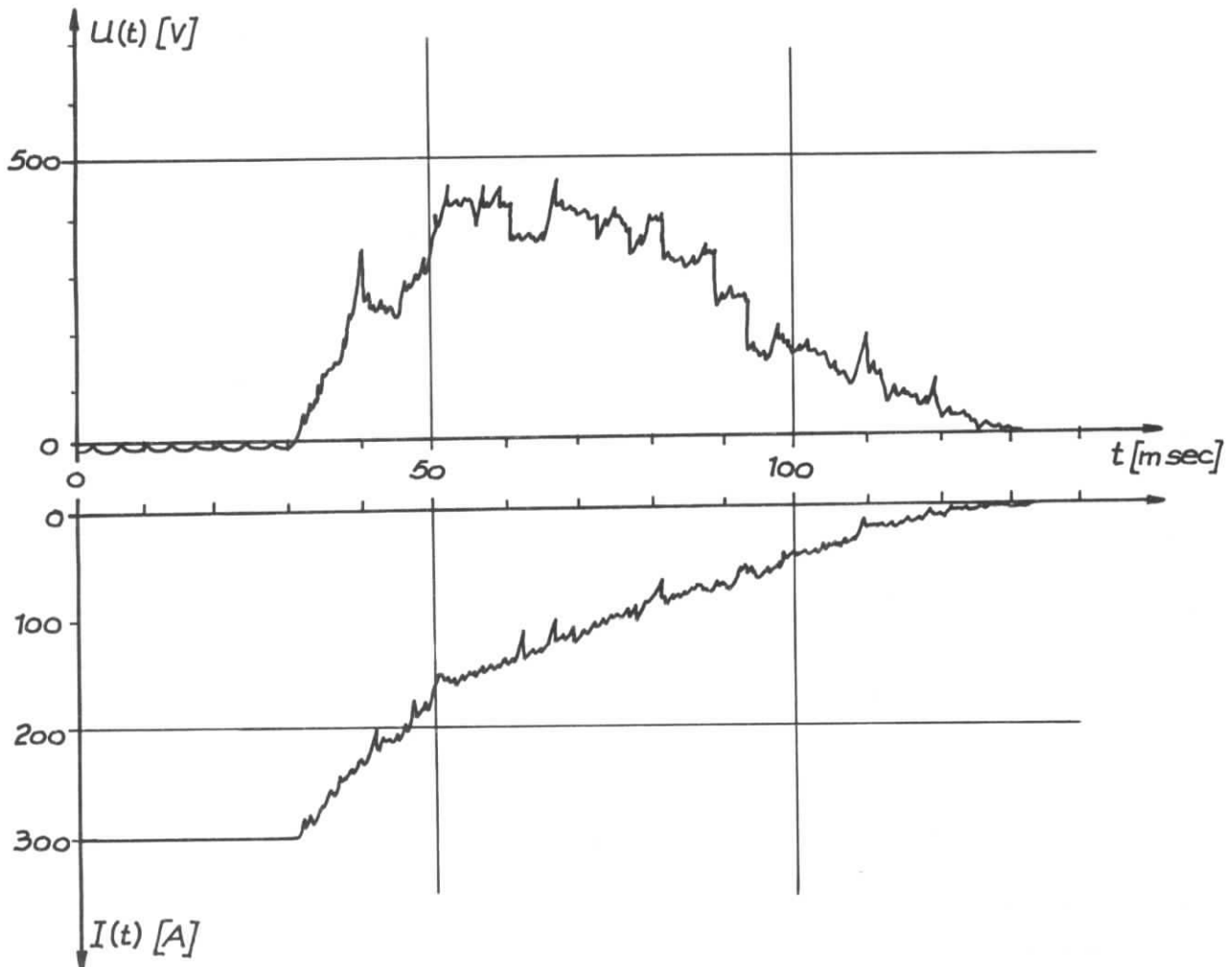


Fig. 3

Bei den Experimenten mit dem Schmelzdraht wurden an den Spulenklammern des Magneten nur einige 100 Volt Spannung gemessen. Versuche, durch Variation der Drahtlänge  $L$  (zwischen 30 - 150 mm) und des Drahtdurchmessers  $D$  die induzierte Spannung zu verändern, brachten kein nennenswertes Ergebnis. Bei Erhöhung des Spulenstromes sank die im Mittel induzierte Spannung.

Nach dem Schmelzen und Verdampfen des Drahtes entsteht ein Lichtbogen, der den Strom nahezu ungehindert weiterfließen läßt, wodurch ein weiterer Anstieg der induzierten Spannung verhindert wird. Der Lichtbogen brennt solange relativ stabil, bis die Energie im Magneten verbraucht ist. Die zur Standardausrüstung

gehörende, auf 1 kV eingestellte Luftfunkenstrecke sprach bei allen Experimenten mit dem einfachen Schmelzdraht nicht an, d.h. die induzierte Spannung blieb stets weit unter dem für die Spulenisolierung kritischen Wert.

Es wurde nun versucht, den Strom in kürzerer Zeit zu unterbrechen. Dazu mußten Maßnahmen ergriffen werden, die den Lichtbogen schneller löschen oder instabil machen. Eine Möglichkeit bestand darin, den Schmelzdraht unter Wasser zu bringen. Das beim Schmelzen des Drahtes verdampfende Wasser verbraucht viel Wärme und löscht dadurch den zunächst brennenden Lichtbogen in etwa 10 msec.

Die Stromunterbrechung ist damit hinreichend schnell, um auch Spannungen  $U > 1$  KV entstehen zu lassen. Trotzdem verbraucht auch in diesem Fall der Lichtbogen im allgemeinen noch mehr als die Hälfte der im Magneten gespeicherten Energie, ehe höhere Spannungen induziert werden. Die schnellste Stromunterbrechung wurde erreicht, indem der Schmelzdraht in ein homogenes Magnetfeld der Flußdichte  $B_0 = 2,2$  K $\Gamma$  gebracht wurde. Die durch das Magnetfeld und den fließenden Strom erzeugte und auf den Lichtbogen wirkende Kraft reichte bei den Experimenten aus, diesen zu zerreißen. Dadurch dauerte die Stromunterbrechung nur noch einige msec, womit eine geeignete Methode gefunden war, relativ hohe Spannungen zum Test der Überspannungsableiter am Magneten zu erzeugen.

### 3) Stabilität des Lichtbogens

Der an der Stelle der Stromunterbrechung entstehende Lichtbogen brennt relativ stabil, bis die Energie des Magneten verbraucht ist, d.h. es wurde nie beobachtet, daß der Lichtbogen ohne äußere Einwirkung (z.B. Magnetfeld) abriß. Dieser empirische Befund soll noch an einem einfachen Modell diskutiert werden.

Dazu wird angenommen, daß der Lichtbogen aus einem Schlauch mit dem Durchmesser  $d = 2 R$  besteht, in dem die den Strom erzeugenden Ladungsträger homogen verteilt sind; außerhalb des Schlauches ( $|x| > R$ ) gibt es keine Ladungen.



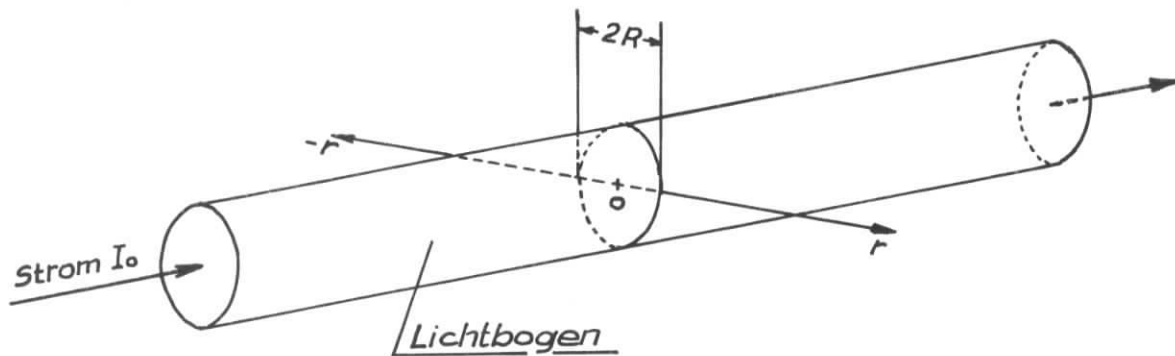


Fig. 4

Ein solcher vom Strom durchflossener Lichtbogen ist von einem kreisförmigen Magnetfeld  $B(I_0, r)$  umgeben, für das gilt:

$$\oint B \, dr = I_0 \mu_0 \quad (3)$$

Daraus folgt für den radialen Feldverlauf außerhalb des Schlauches ( $|r| > R$ )

$$B_a(r) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_0}{r} \quad (4)$$

Innerhalb des Schlauches ist der von einem kreisförmigen Feld mit Radius  $r$  umschlossene Strom  $I = I_0 \frac{r^2}{R^2}$ . Ersetzt man in (3)  $I_0$  durch  $I$ , so folgt für den Feldverlauf im Innern des Schlauches

$$B_i(r) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_0}{R^2} r \quad (5)$$

Den Feldverlauf im Lichtbogen und in seiner Umgebung zeigt Fig. 5

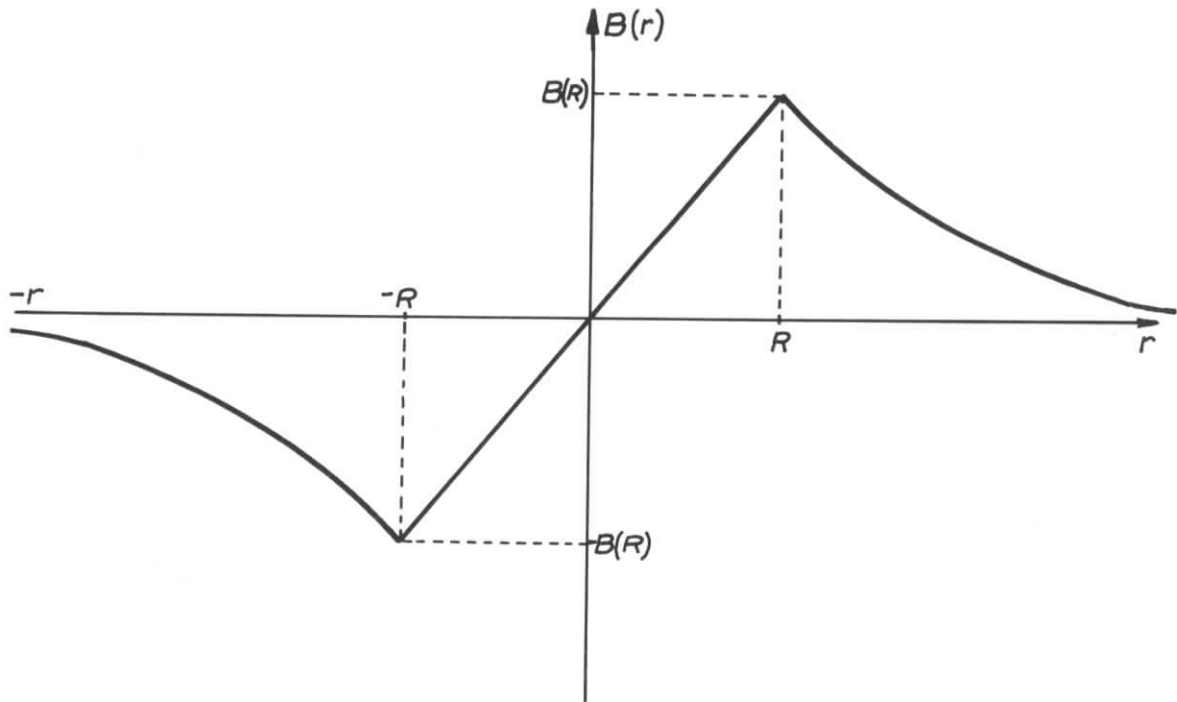


Fig. 5.

Verlauf des Magnetfeldes mit dem Abstand vom Mittelpunkt des Lichtbogens.

Die Gasionen, die den Strom im Lichtbogen aufrechterhalten, spüren ein vom Magnetfeld  $B(r)$  erzeugtes Potential

$$V(r) = \int K(r) dr = v \cdot q \int B(r) dr \quad (6)$$

Dabei ist  $q$  die Ladung der Ionen,  $v$  ihre Geschwindigkeit in Stromrichtung.

Aus (4), (5) und (6) folgt mit der Bedingung  $V_a(R) = V_i(R)$  :

$$V(r) = \begin{cases} \frac{v \cdot q \cdot \mu_0 \cdot I_0}{2\pi} \left( \frac{1}{2} + \ln \frac{r}{R} \right) & \text{für } |r| > R \\ \frac{v \cdot q \cdot \mu_0 \cdot I_0}{2\pi R} \cdot \frac{r^2}{2} & \text{für } |r| \leq R \end{cases} \quad (7)$$

Nun ist  $B_R = \frac{\mu_0 \cdot I_0}{2\pi R}$  das Magnetfeld auf der Oberfläche des Lichtbogens. Damit wird aus (7)

$$V(r) \sim \begin{cases} B_R \left( \frac{1}{2} + \ln \frac{r}{R} \right) R & \text{für } |r| > R \\ B_R \cdot \frac{r^2}{2R} & \text{für } |r| \leq R \end{cases} \quad (8)$$

Nimmt man an, daß der Durchmesser  $d = 2R$  des Lichtbogens 1 mm beträgt und  $I_0 = 100$  A sind, so folgt  $B_R = 4,01 \cdot 10^{-2} \frac{\text{V sec}}{\text{m}^2}$ . Für verschiedene Ströme  $300 \text{ A} \leq I_0 \leq 1000 \text{ A}$  wird der Potentialverlauf in Fig. 6a angegeben.

Je höher der Strom  $I_0$  ist, desto höher sind die Potentialwände, die die Ionen auf die Bahnmitte konzentrieren. Da andererseits  $V(r) \sim v \sim U^a$  ist, ( $U$  ist die über den Lichtbogen abfallende Spannung,  $a \approx 1$ ) ist bei höherer Stromstärke  $I_0$  schon bei kleinerer Spannung  $U$  die Stabilität des Lichtbogens gewährleistet, d.h. bei höheren Stromstärken reduziert sich die am Lichtbogen abfallende Spannung. Dieser Effekt wurde bei den in 2.) beschriebenen Experimenten gefunden.

Bringt man den Lichtbogen in ein homogenes Magnetfeld  $B_0$ , das senkrecht zur Stromrichtung von  $I_0$  steht, wird das Potential beschrieben durch

$$V(r)_{\text{gestört}} \sim \begin{cases} B_R \left( \frac{1}{2} + \ln \frac{r}{R} \right) R + B_0 r & \text{für } |r| > R \\ B_R \frac{r^2}{2R} + B_0 r & \text{für } |r| \leq R \end{cases} \quad (9)$$

Den Verlauf des gestörten Potentials für verschiedene Stromstärken  $I_0$  zeigt Fig. 6b. Die Potentiale für  $I_0 = 300$  A und  $I_0 = 600$  A bewirken stets eine Kraft auf die Ionen, die diese aus der Bahn herausschiebt, d.h. der Lichtbogen ist instabil und reißt ab, was im Experiment bestätigt wurde. Bei  $I_0 = 1000$  A allerdings ergibt sich wieder ein stabilisierendes Potential. Da die Potentialmulde allerdings jetzt recht flach verläuft, muß wegen  $V(r) \sim v \sim U^a$  die am Lichtbogen abfallende Spannung entsprechend erhöht sein, um den Lichtbogen zu stabilisieren.

Selbst bei Anlegen eines Magnetfeldes  $B_0$ , das bei niedrigen Strömen den Lichtbogen abreißen läßt, erhält man bei höheren Strömen wieder einen stabilen Lichtbogen, an dem lediglich eine erhöhte Spannung abfällt.

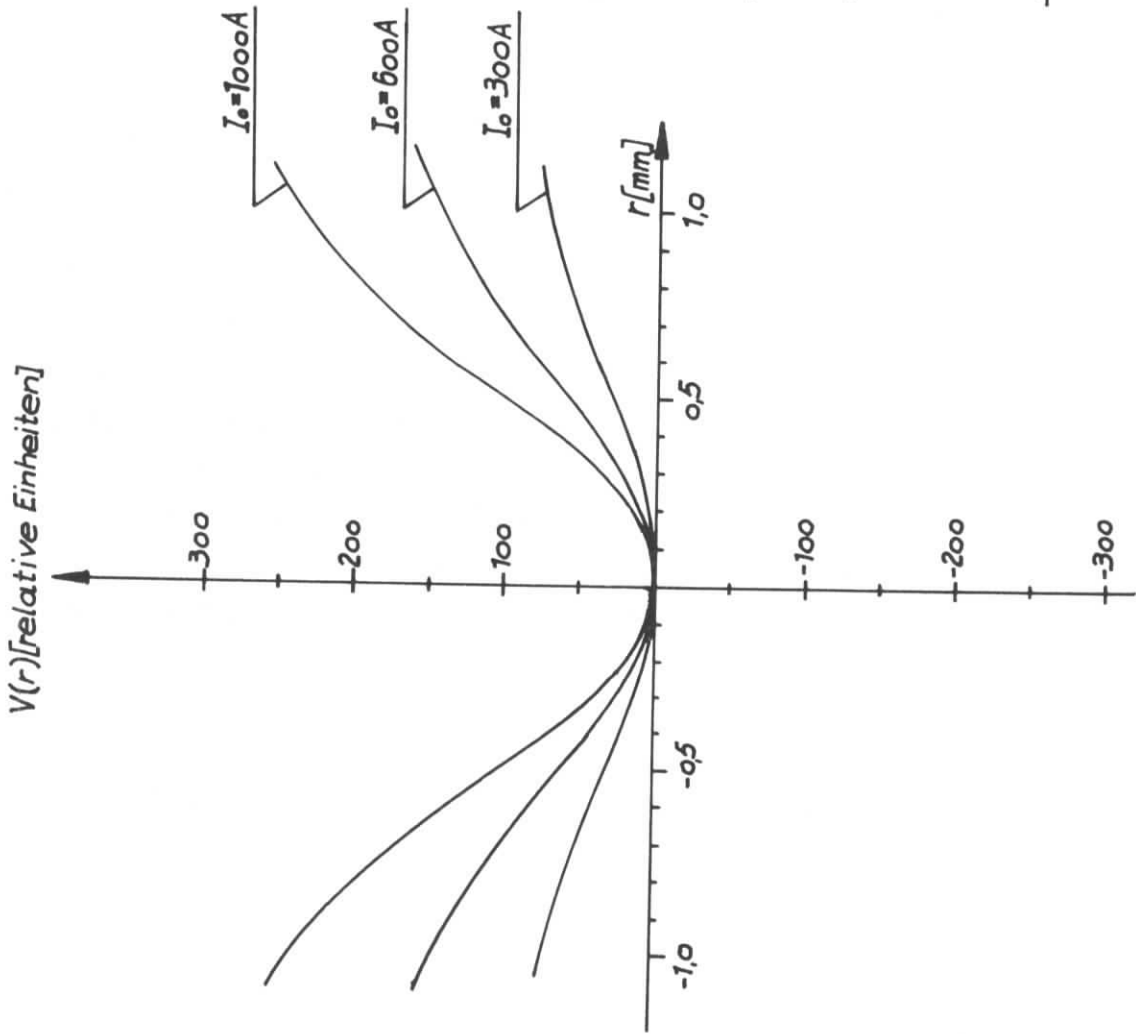


Fig. 6a

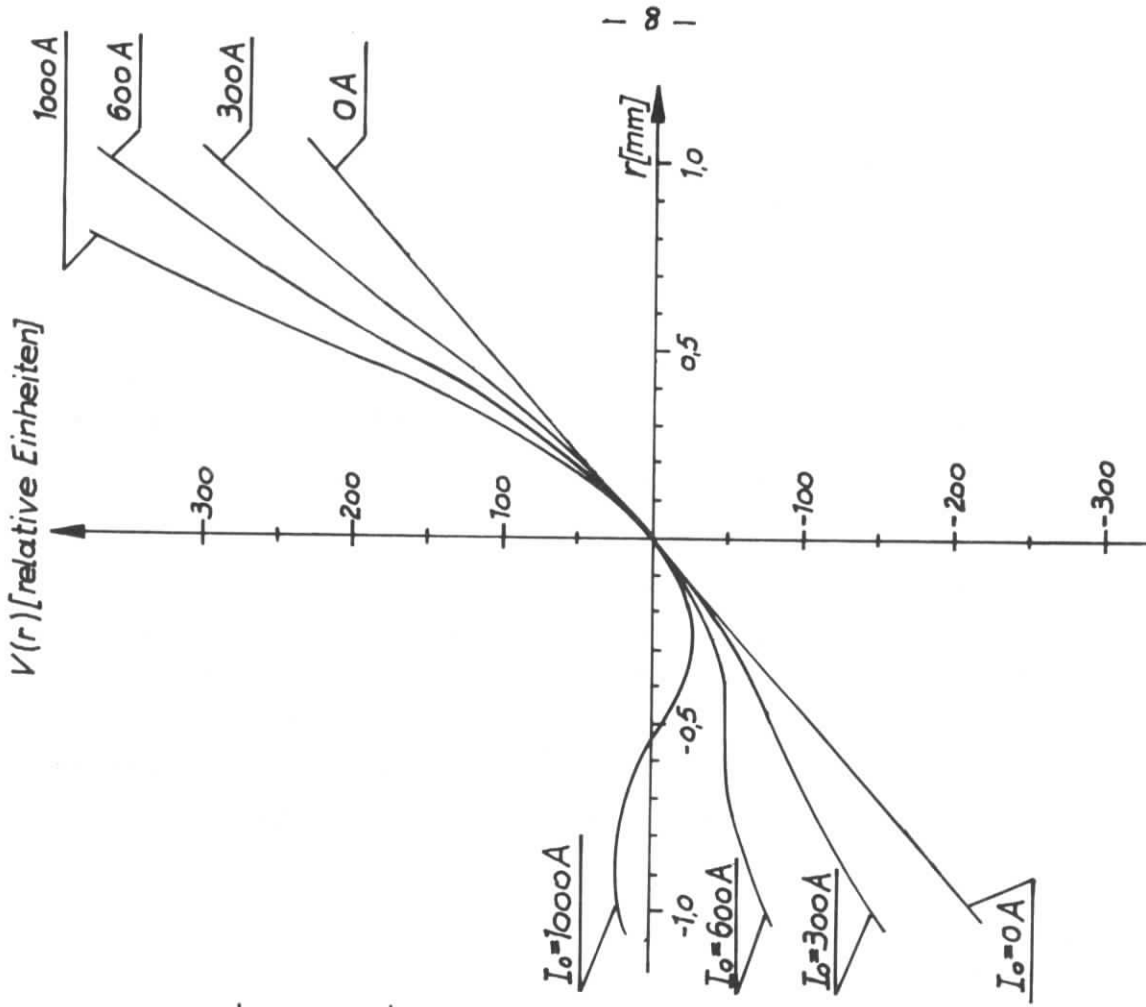


Fig. 6b

Dieser Effekt wurde untersucht, indem für verschiedene Stromstärken  $I_0$  die in der Spule induzierten Spannungen registriert wurden. Das Ergebnis zeigt Fig.7.

Bei  $I_0 = 300$  A und  $I_0 = 500$  A steigt die Spannung schnell an ohne große Schwankungen. Das äußere Magnetfeld  $B_0$  verhindert also ein stabilisierendes Potential. Dieser Effekt verschwindet bei  $I_0 = 750$  A, die induzierte Spannung ist niedriger als bei  $I_0 = 500$  A, außerdem schwankt sie sehr stark, d.h. es brennt wieder ein stabiler Lichtbogen, allerdings bei deutlich erhöhter

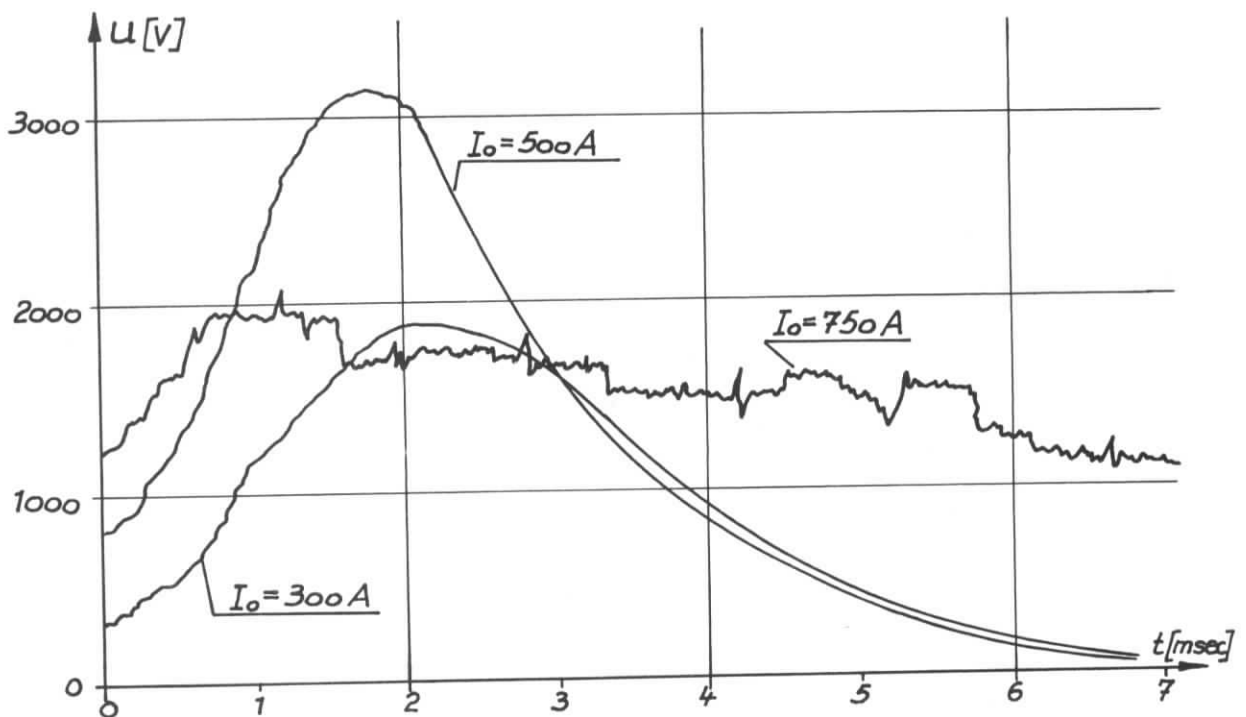


Fig.7.

Spannung (ca. 2 kV gegenüber maximal 500 V ohne das Magnetfeld  $B_0$ ).

Zwei Effekte bestimmen also die Stabilität des Lichtbogens:

1. Das durch den fließenden Strom erzeugte Magnetfeld  $B(r) \sim I_0$  und
2. die Geschwindigkeit  $V$  der Ladungsträger im Lichtbogen, die im wesentlichen durch die anliegende induzierte Spannung  $U$  bestimmt wird. Näherungsweise ist  $V \sim U^a$ . Die Stabilität des Lichtbogens wird also durch einen Ausdruck  $\sim I_0 \cdot U^a$  bestimmt. Bei gegebenem Strom  $I_0$  steigt  $U$  automatisch soweit an, bis ein stabilisierendes Potential erreicht ist.

#### 4. Überspannungsableiter

Mit der in Fig. 2 gezeigten Versuchsanordnung wurden verschiedene Überspannungsableiter untersucht. Dabei standen folgende Fragen im Vordergrund:

- I) Höhe der Zündspannung  $U_z$
- II) erreichbare Genauigkeit  $\frac{\Delta U_z}{U_z}$  der Zündspannung im Einzelfall, d.h. Streuung der  $U_z$
- III) maximale Strom-Zeitbelastung.

##### a) Luftfunkenstrecke

Zum Test einer Luftfunkenstrecke wurde im Experiment folgender einfacher Aufbau gewählt:

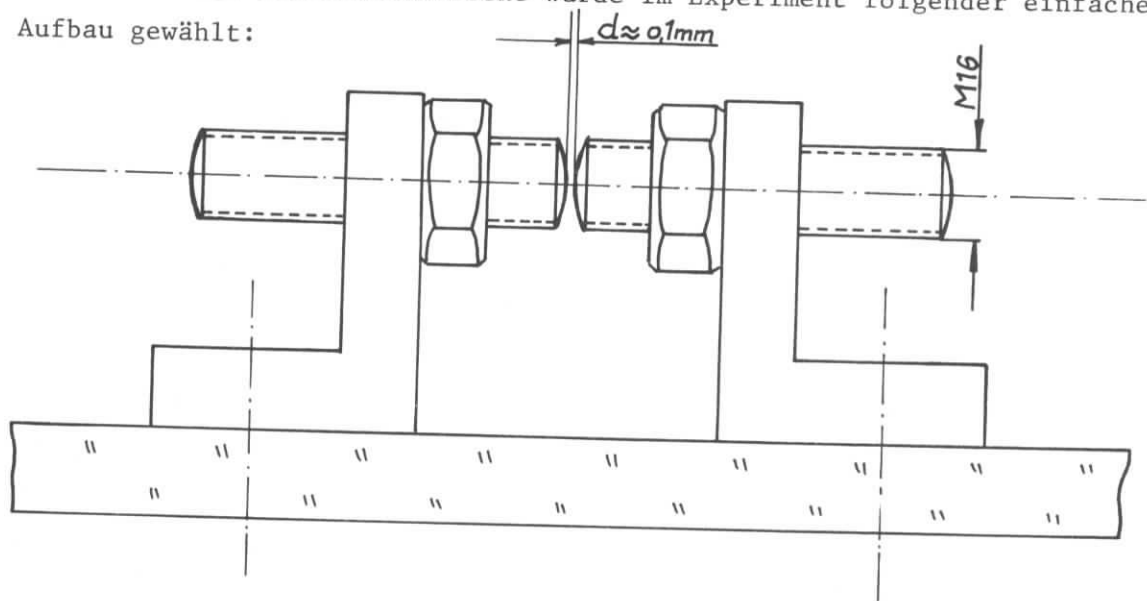


Fig. 8 Aufbau der Testfunkenstrecke

Eine bestimmte Zündspannung  $U_z$  wurde statisch mit einem Hochspannungsgerät eingestellt. Am Magneten wurde dann die jeweilige Zündspannung dynamisch gemessen. Den so gewonnenen Zusammenhang zeigt Fig. 9. Außerdem wurde eine alte Funkenstrecke untersucht, die 1965 auf 1020 V statisch eingestellt worden war.

Ergebnisse:

- I.) Die Funkenstrecke arbeitet nur bei Zündspannungen  $U_z \geq 1 \text{ kV}$  zuverlässig. Bei geringeren Zündspannungen ist der erforderliche Elektrodenabstand  $d$  so klein, daß mechanische oder thermische Verformungen zur Berührung der Elektroden führen können.
- II.) Die statisch eingestellte Zündspannung wird am Magneten nur innerhalb einer Fehlergrenze  $\frac{\Delta U_z}{U_z} = \begin{matrix} +75\% \\ -50\% \end{matrix}$  eingehalten; auch Alterung verändert die Zündspannung.

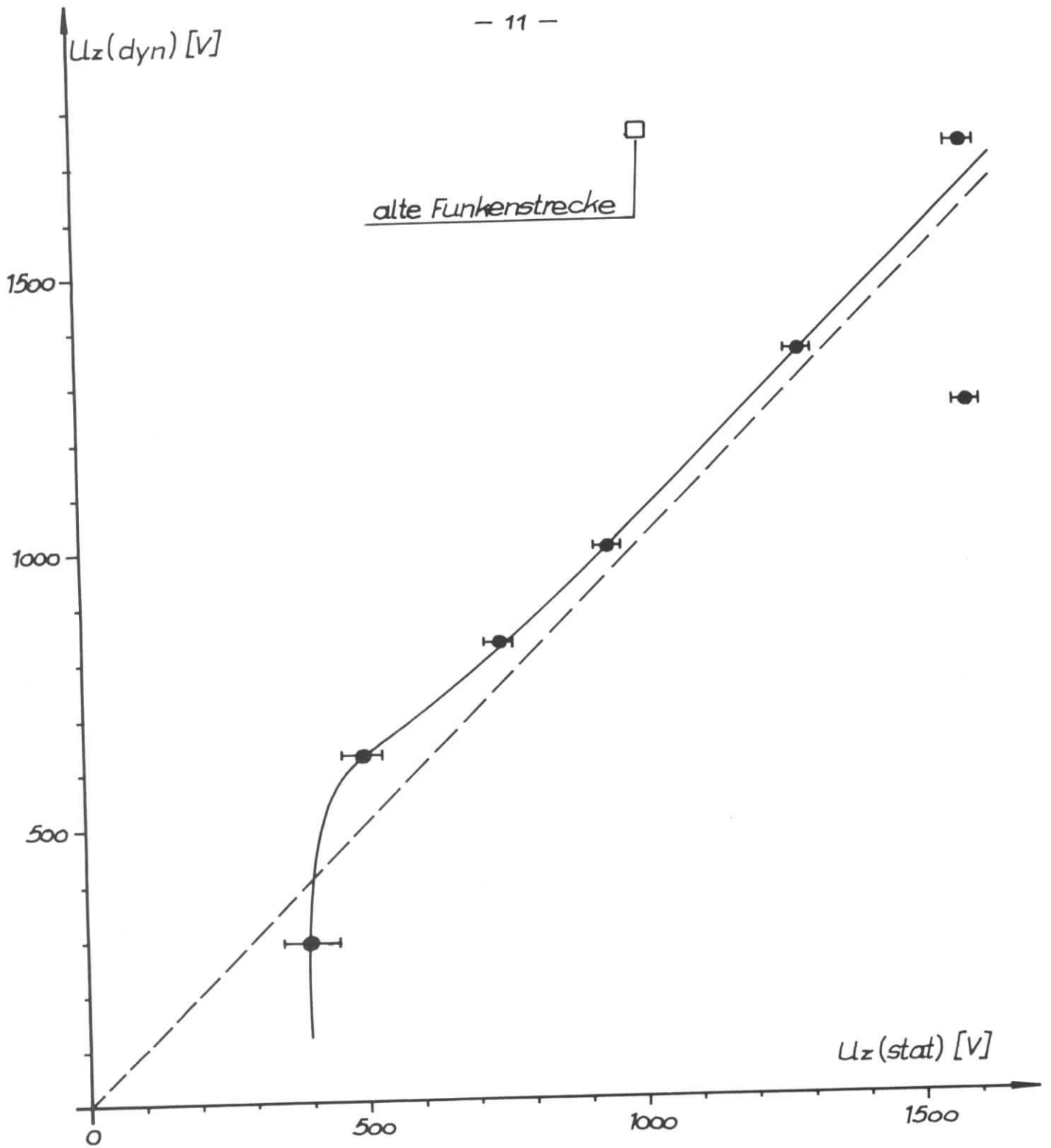


Fig. 9 Zusammenhang von statisch eingestellter und dynamisch gemessener Zündspannung an einer Luftfunkenstrecke

III.) Die Strom-Zeitbelastbarkeit der Funkenstrecke liegt sehr hoch. Bei Strömen bis  $I_0 = 2000 \text{ A}$  besteht daher kein Problem bei der Dimensionierung .

Die relativ hohe Zündspannung der Luftfunkenstrecke ( $U_2 \geq 1 \text{ KV}$ ) macht ihre Verwendung bei in Reihe geschalteten Magneten problematisch, da sich die Zündspannungen addieren und dadurch insgesamt sehr hohe Spannungswerte erreicht werden können. Es ist daher sinnvoll, nach Überspannungsableitern zu suchen, die bei niedrigeren Spannungen zünden.

#### b) Funkenstrecke mit Festkörperisolierung (Eloxalschicht)

Es wurde daran gedacht, die Isolierung der beiden Elektroden statt durch Luft durch geeignete Festkörperschichten zu erzielen. Dadurch lassen sich bei sehr kleinen Schichtdicken entsprechend kleine aber definierte und konstante Elektrodenabstände realisieren, was niedrige Zündspannungen ermöglicht. Der Elektrodenabstand wird durch die Dicke der Festkörperschicht bestimmt, was eine gute mechanische Stabilität des Systems garantiert. Außerdem ist das System weitgehend unabhängig von Umwelteinflüssen (Luftdruck, Temperatur, Luftfeuchtigkeit).

Als Isolation wurde eine Eloxalschicht gewählt, da sie gegenüber organischen Isolatoren (Kunststoffen) eine höhere Strahlungsfestigkeit verspricht. Es wurden Elektroden mit Eloxalschichten verschiedener Dicken benutzt und die Zündspannung am Magneten gemessen. Die Angaben über die Schichtdicke stammen vom Hersteller, sie sind einer Toleranz von ca.  $\pm 10\%$  unterworfen.

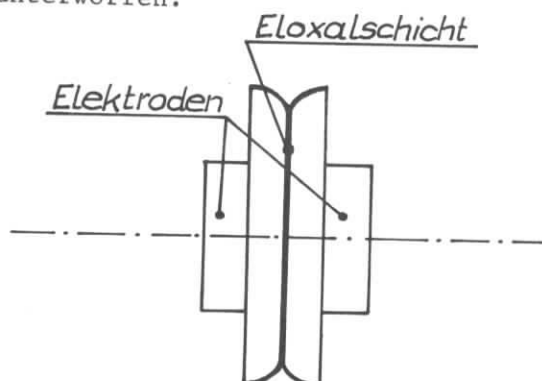


Fig.10  
Prinzipieller Aufbau der Funkenstrecke mit  
Eloxalschichtisolierung



Den Zusammenhang von Schichtdicke und Zündspannung zeigt Fig. 11a .  
Fig. 11b gibt die bei verschiedenen Schichtdicken gemessenen Leckströme an, die bei einer angelegten Gleichspannung von 100 V gemessen wurden.

Ergebnisse:

- I.) Mit Eloxalschichten als Isolator lassen sich Zündspannungen  $U_z \geq 200$  V realisieren.
- II.) Der Zusammenhang von Schichtdicke D (Angaben vom Hersteller) und Zündspannung  $U_z = f(D)$  kann nur grob vorhergesagt werden. Die Toleranzen betragen etwa  $\frac{\Delta U_z}{U_z} = \pm 50\%$  .
- III.) In der Strom-Zeit-Belastung<sup>z</sup> ergeben sich keine Begrenzungen.

Bei angelegter Gleichspannung verringert sich der Leckstrom mit der Zeit. Offensichtlich läuft ein elektrolytischer Prozeß ab. Inwieweit dieser Prozeß bei sehr langen Betriebszeiten die Schichtdicke und damit die Zündspannung verändert oder die Schicht sogar teilweise aufgrund einer inhomogenen Leckstromverteilung zersetzt, konnte nicht untersucht werden.

### c) Glimmstrecken

Es wurden verschiedene Glimmstrecken getestet, die im allgemeinen zum Schutz von Freileitungen vor Überspannungen bei Blitzschlag verwendet werden. Es handelt sich um folgende Typen:

Typ	Zündspannung $U_z$	Nennableitstoßstrom $I_{sn}$	Hersteller
Es sich 35b	600 V	20 kA	Siemens
A2 - B 470	470 V	5 kA	"
S1 - A 230	230 V	20 kA	"

Beim Nennableitstoßstrom  $I_{sn}$  handelt es sich um einen Stromimpuls, dessen Verlauf in Fig. 12 zu sehen ist.

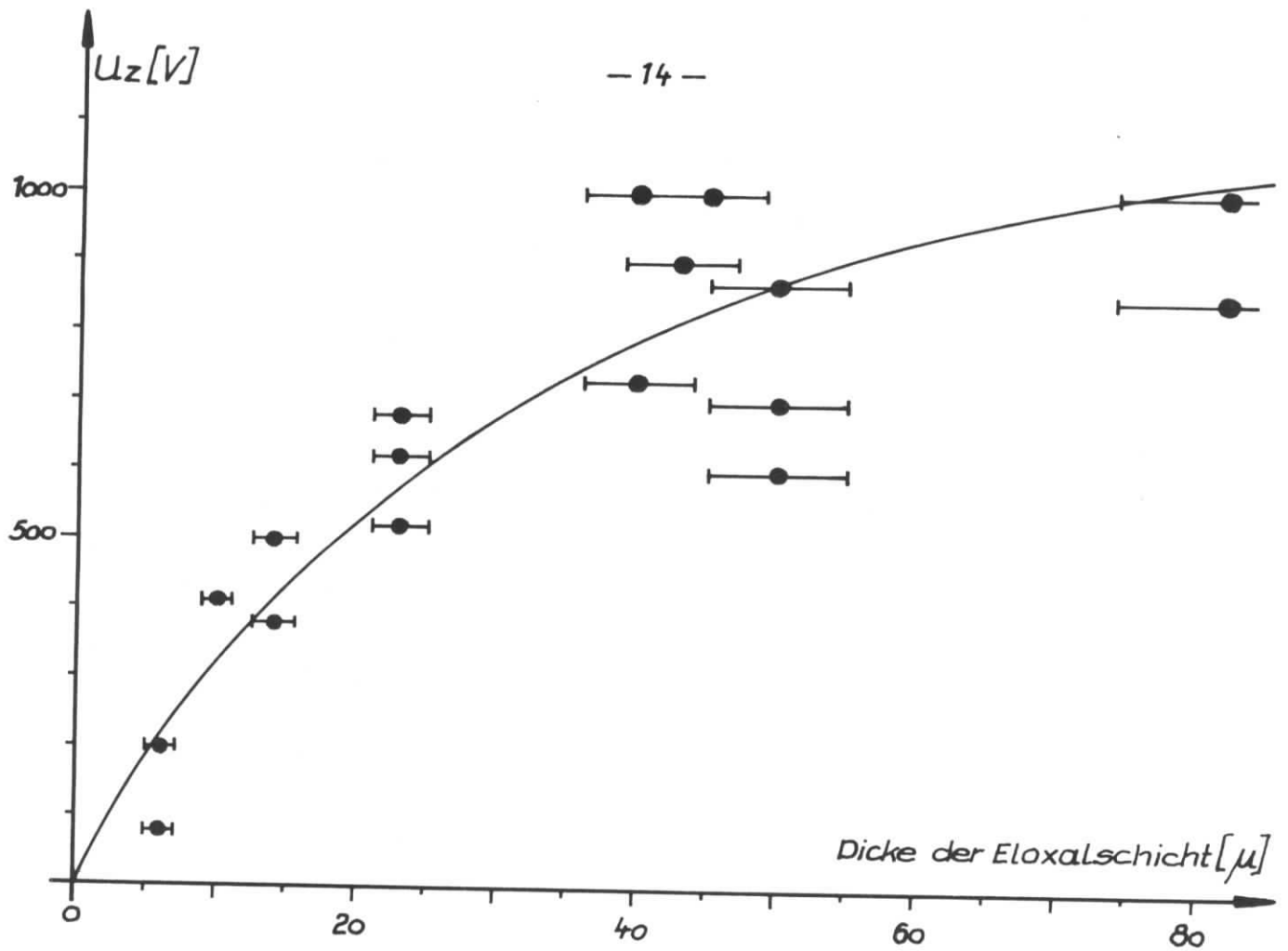


Fig. 11a Zündspannung  $U_z$  als Funktion der Schichtdicke

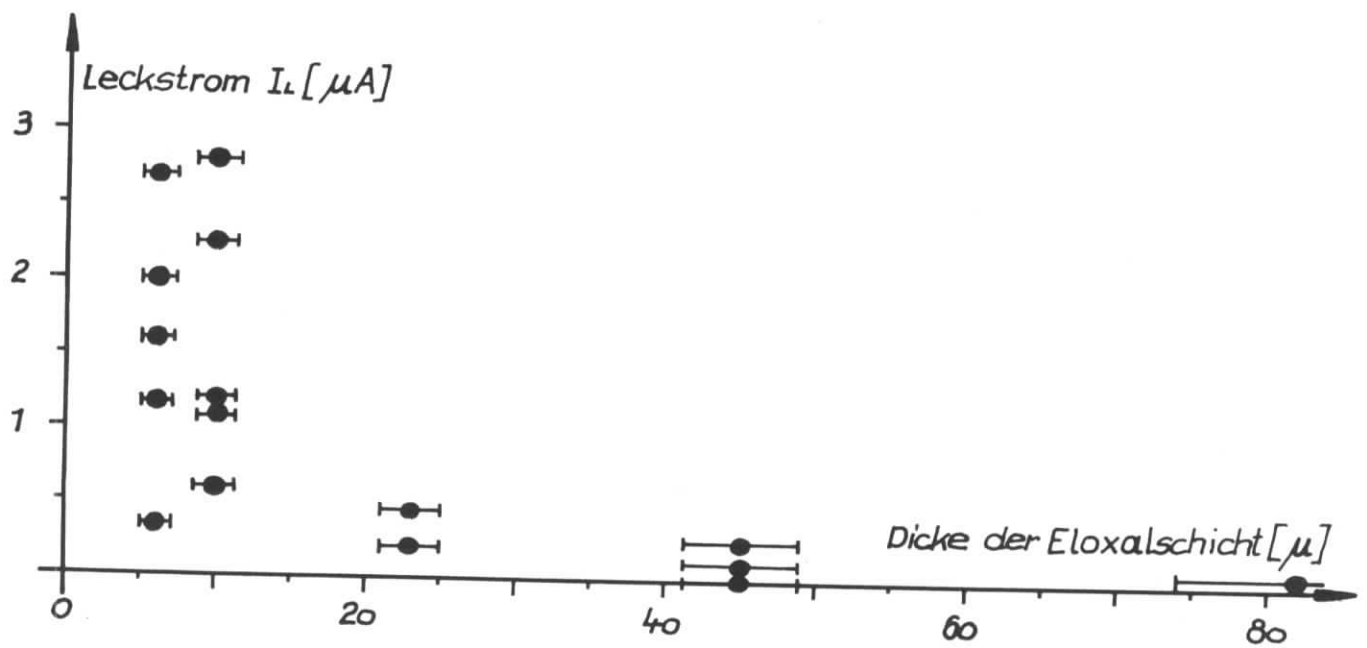


Fig. 11b Leckstrom  $I_L$  als Funktion der Schichtdicke

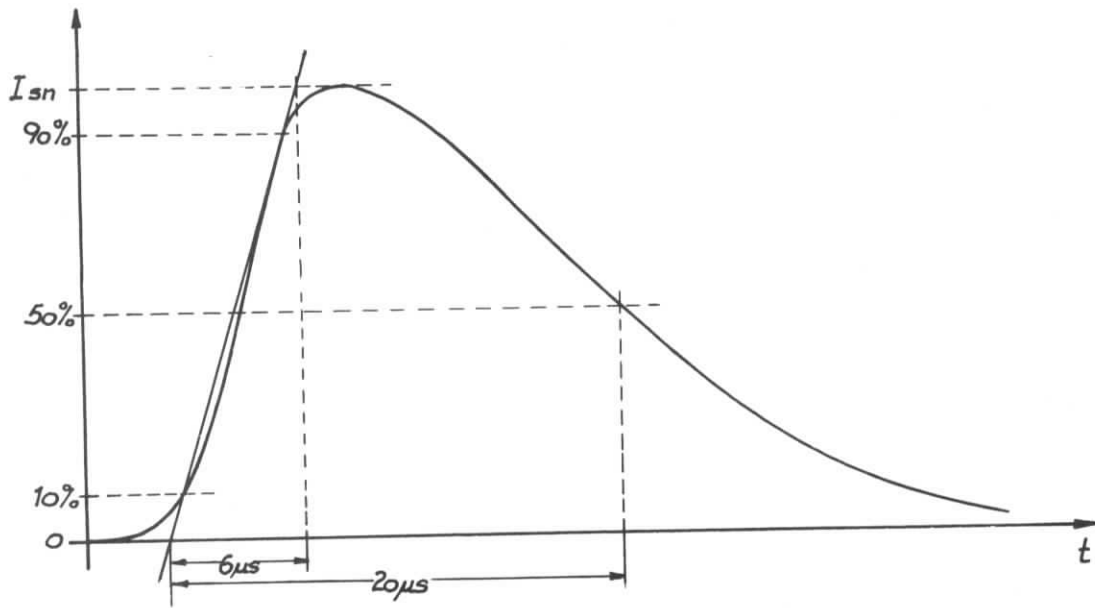


Fig. 12 Zur Definition des Nennableitstoßstroms  $I_{sn}$

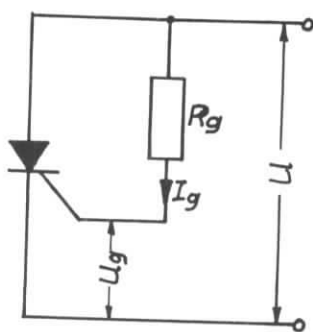
Ergebnisse:

- I.) Die Zündspannung  $U_z$  ist jeweils fest vorgegeben. Es sind Glimmstrecken von  $U_z = 90 \text{ V}$  bis  $U_z = 1400 \text{ V}$  erhältlich.
- II.) Die Genauigkeit der Zündspannung entspricht der vom Hersteller angegebenen Toleranz. Im allgemeinen ist  $\frac{\Delta U_z}{U_z} = \pm 15\%$ .
- III.) Der am Magneten auftretende Stromstoß, der über die Glimmstrecke abfließt, hat eine Halbwertsdauer von etwa 100 msec. Das ist um den Faktor  $5 \cdot 10^3$  länger als die Dauer des Nennableitstoßstroms. Aus diesem Grunde waren alle Glimmstrecken schon bei Übernahme des Stoßstromes, der nach Unterbrechung eines Magnetstroms von  $I_0 = 300 \text{ A}$  auftrat, weit überlastet. Sie erzielten nur bei der ersten Stoßbelastung die Nennzündspannungen. Der Typ A2 - B 470 zeigte daraufhin schwere thermische und mechanische Schäden (durchlöcherete Elektroden, zersprungene Glasisolierung). Die beiden anderen Typen zündeten jeweils beim zweiten Stromstoß erst bei deutlich erhöhten Zündspannungen. Die Elektroden waren an der Oberfläche geschmolzen und hatten dadurch den Druck und die Zusammensetzung des Gases im Innern der Glimmstrecke verändert.

Glimmstrecken sind also in den käuflichen Ausführungen als Überspannungsableiter an Magneten nur einmal verwendbar. Man kann allerdings daran denken, sie als Initialzünder für normale Luftfunkenstrecken zu verwenden, wodurch die Zündspannung  $U_z$  auf einen niedrigen und recht gut definierten Wert festgelegt wird. Nach der Zündung der Glimmstrecke und deren dadurch bedingte Zerstörung übernimmt die normale Funkenstrecke den Strom.

#### d) Thyristor

Die Schalteigenschaft eines Thyristors läßt sich zum Schutz gegen Überspannungen ausnutzen. Die einfache Schaltung zeigt Fig. 13.



Zunächst sei der Thyristor gesperrt. Mit ansteigender Spannung  $U$  steigt auch der durch  $R_g$  fließende Gatestrom  $I_g$ , wobei mit  $U_g \ll U$  ( $U_g \sim 0,5V$ ) folgt

$$I_g = \frac{U}{R_g} \quad (10)$$

Fig.13

In dem Augenblick, wenn  $I_g$  gerade so groß geworden ist, daß die Zündung einsetzt, d.h.  $I_g = I_{gz}$ , wird der Thyristor leitend und schließt die Spannung  $U$  kurz. Die Zündung passiert nach (10) gerade bei der Zündspannung

$$U = U_z = R_g \cdot I_{gz} \quad (11)$$

$I_{gz}$  kann für jedes  $U$  im Labor gemessen werden. Mit  $R_g$  läßt sich dann jede gewünschte Zündspannung einstellen. Den Zusammenhang von  $R_g$  und  $U_z$  zeigt Fig. 14. Die durchgezogene Kurve wurde nach (11) ermittelt. Die Punkte stammen aus Messungen am Magneten. Als Thyristor wurde der Typ SKT 221/08A von der Firma Semikron genommen.

Da der Gatewiderstand  $R_g$  bei jeder Spannung  $U$  einen entsprechenden Strom zieht, ergibt sich bei Betrieb des Magneten durch  $R_g$  ein relativ hoher Leckstrom. Dieser wird vermieden, wenn man  $R_g$  durch eine Zenerdiode ersetzt (Fig.15).

# Zündspannung $U_z$ als Funktion des Gatewiderstandes $R_g$

Thyristor: Typ SKT 221/08 A

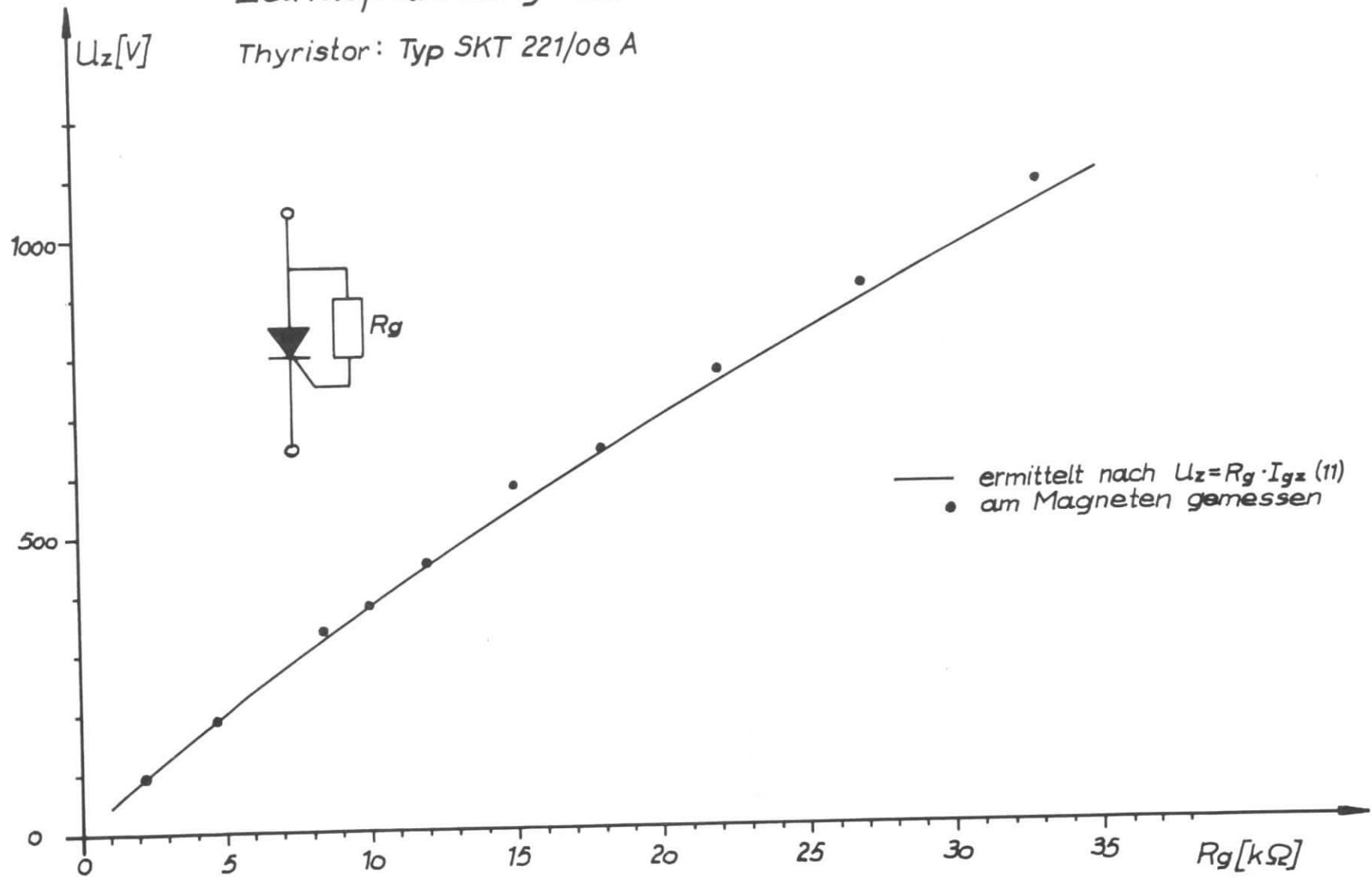


Fig. 14

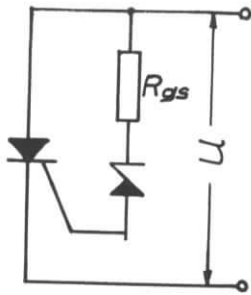


Fig.15

$R_{gs}$  ist ein Schutzwiderstand, um Überlastungen der Zenerdiode zu vermeiden. Sein Wert beträgt einige 100 Ohm. Die Zündspannung ist jetzt

$$U_z = U_{zener} + I_{gz} \cdot R_{gs} \quad (12)$$

Da  $I_{gz} \cdot R_{gs} \ll U_{zener}$  wird die Zündspannung im wesentlichen durch die Zenerdiode bestimmt.

Nachdem der Thyristor am Magneten gezündet hat, fließt der Strom durch ihn zunächst weiter. Der Strom nimmt dabei exponentiell ab. Im gezündeten Zustand gilt das Schaltbild Fig. 16. Der zeitliche Verlauf des Stromes ist

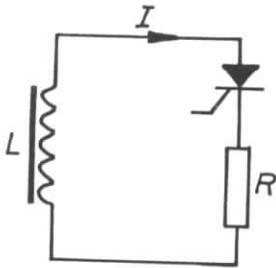


Fig.16

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} \quad (13)$$

Der Thyristor wird also durch einen Stromimpuls belastet, der sehr schnell (d.h. einige  $\mu\text{sec}$ ) den Scheitelwert  $I_0$  erreicht und der dann mit einer Zeitkonstanten  $\tau = L/R$  exponentiell abklingt.

Um den Thyristor nicht zu überlasten, d.h. um das Grenzlastintegral  $I^2 t$  nicht zu überschreiten, ist es zweckmäßig, die Abklingzeit  $\tau$  des Stromes möglichst klein zu machen. Das geschieht durch Wahl eines entsprechend großen Kreiswiderstandes  $R$ .  $R$  setzt sich dabei zusammen aus dem Widerstand der Spule  $R_{sp}$  und einem zusätzlich in den Kreis eingeführten ohmschen Widerstand  $R_K$ , d.h.  $R = R_{sp} + R_K$ .

$R_{sp}$  ist fest vorgegeben. Der Größe von  $R_K$  sind gewisse Grenzen gesetzt. Nach dem Zünden des Thyristors fließt kurze Zeit der Magnetstrom  $I_0$  durch  $R_K$  und erzeugt an  $R_K$  den Spannungsabfall  $U_R = I_0 \cdot R_K$ . Es ist nun nicht vernünftig,  $U_R > U_z$  zuzulassen. Der maximal zulässige Wert von  $R_K$  ergibt sich mit der Bedingung  $U_R = U_z$

$$R_K = \frac{U_z}{I_{0 \max}} \quad (14)$$

Das Abklingverhalten des Stromes und der Verlauf der Spannung bei verschiedenen  $R_K$  wurde am Magneten gemessen. Die Resultate sind in Fig. 17 zu sehen.

Nachdem mit  $R_K$  die Abklingzeit  $\tau$  des Stromes festgelegt ist, muß ein Thyristor gesucht werden, dessen Grenzlastintegral bei dem maximalen Magnetstrom  $I_{O \max}$  nicht überschritten wird. Setzt man in Anlehnung an die DM-Magneten des Speicherrings  $I_{O \max} = 2000 \text{ A}$ , so wird mit  $U_z = 200 \text{ V}$   $R_K = 0,1 \Omega$ . Da  $L = 27,3 \text{ mH}$ , folgt für die Abklingzeit des Stromes  $\tau = 230 \text{ msec}$ . Für Stromstöße dieser Art ist der Thyristor Typ SKT 221 ausreichend. Dieser Typ wurde auch bei den Messungen verwendet.

#### Ergebnisse:

- I) Die Zündspannung  $U_z$  kann Werte bis unter einhundert Volt erreichen, wobei die Zündeigenschaften des Thyristors erhalten bleiben.
- II) Die Einstellung einer vorgegebenen Zündspannung  $U_z$  kann sehr genau erfolgen. Sowohl bei Verwendung eines Gatewiderstandes (Fig.13) als auch einer Zenerdiode (Fig.15) werden die gewünschten Zündspannungen mit einer Toleranz von  $\frac{\Delta U_z}{U_z} < 5\%$  erreicht. Die Reproduzierbarkeit eines an einem Thyristor eingestellten Wertes von  $U_z$  bei mehreren Zündungen am Magneten ist besser als  $\pm 2,5\%$ .
- III) Bei der Wahl des Thyristors muß beachtet werden, daß sein Grenzlastintegral groß genug ist. Durch Einfügen eines zusätzlichen Widerstandes  $R_K$  in Serie mit dem Thyristor läßt sich das auftretende Grenzlastintegral verkleinern, wobei allerdings  $R_K$  nicht größer sein darf als  $U_z/I_{O \max}$  (s.o.)  
Weist der verwendete Thyristor ein ausreichendes Grenzlastintegral auf, so bleibt er nach der Zündung voll funktionsfähig, wobei sich  $U_z$  nicht mehr ändert als  $\pm 2,5\%$ .

### 5. Schutzvorrichtungen für Speicherringmagnete

Wie in Abschnitt 2) und 3) gezeigt, tritt bei Unterbrechung eines stromführendes Kreises mit induktiver Last an der Bruchstelle stets ein Lichtbogen auf, der über die an ihm abfallende Spannung  $U$  bei gegebenem Strom  $I_O$  einen stabilen Zustand erreicht. Dieser Lichtbogen brennt solange, bis die Energie im Magneten verbraucht ist. Die am Lichtbogen abfallende Spannung

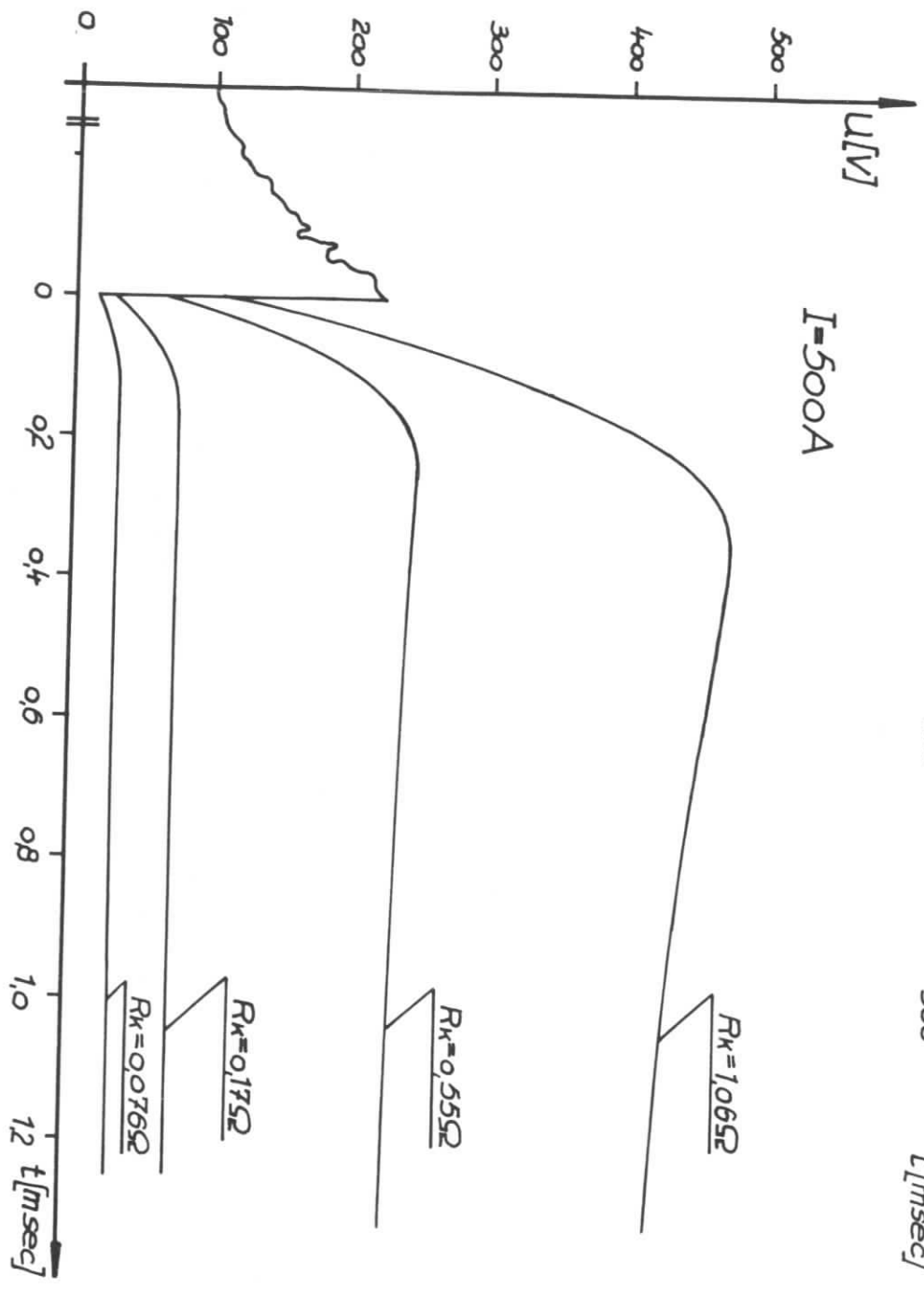
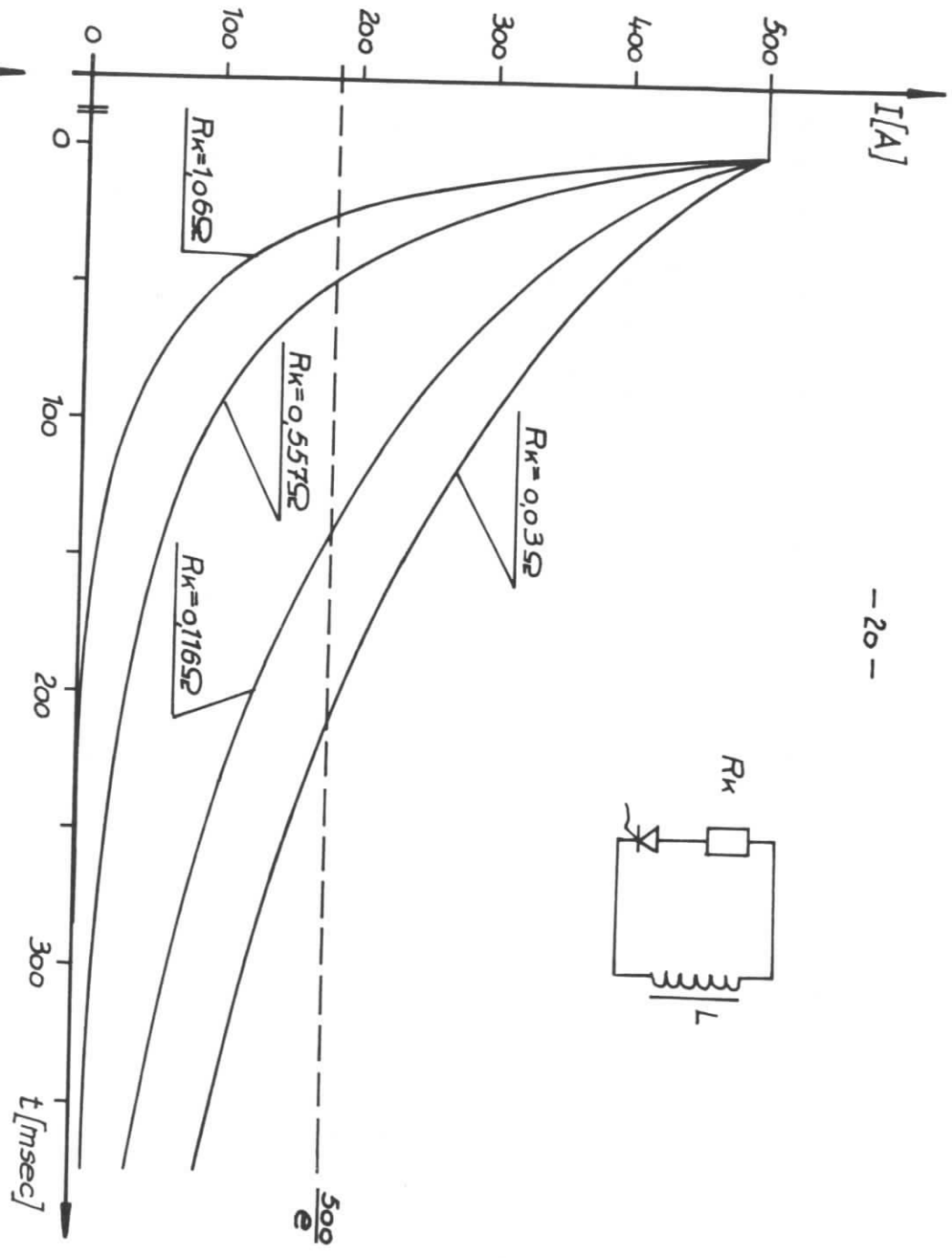
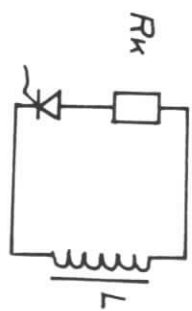


Fig 17



bleibt mit höchstens einigen hundert Volt weit unterhalb der für die Spulenisolation kritischen Werte. Die Bruchstelle selbst wirkt also als Schutzvorrichtung. Aus diesem Grunde kann auf spezielle Starkstromüberspannungsableiter, wie sie in Abschnitt 4) beschrieben wurden, verzichtet werden.

Darüberhinaus kann man zeigen, daß bei Kreisen, bei denen mehrere Magneten in einer Reihe geschaltet sind, solche Überspannungsableiter sogar im allgemeinen im Falle eines Kabelbruchs unwirksam bleiben, wenn sie, wie üblich, jeweils die Spulenanschlüsse eines Magneten überbrücken. Das gilt besonders für den Stromkreis Nr. 1, der 80 Magnete enthält.

Wird der Stromkreis unterbrochen, so entsteht an der Bruchstelle ein Spannungsimpuls  $U(t)$ , der eine Anstiegszeit von einigen msec hat. Dieser Spannungsimpuls läuft durch alle Magnete, die auf Grund ihrer Induktivität  $L_\mu$  und der Kapazität  $C_\mu$  der Spulen gegen das Magnetjoch wie eine Laufzeitkette wirken. Die Verzögerungszeit  $\tau$  über alle Magnete ist

$$\tau = \sum_{\mu=1}^n \sqrt{L_\mu C_\mu} \quad (15)$$

Setzt man für alle  $L_\mu = 27\text{mH}$  (Induktivität der DM-Magnete) und alle  $C_\mu = 50\text{nF}$ , so wird

$$\tau \approx 1,5 \text{ ms} .$$

Dabei wurde  $n = 40$  gesetzt, da sich der Impuls von der Bruchstelle nach beiden Seiten ausbreitet. Die Anstiegszeit des Spannungsimpulses ist also höchstens so kurz wie die Ausbreitungsdauer über alle Magneten. Man kann also sagen, daß die an der Bruchstelle auftretende Spannung  $U$  durch Induktion von allen Magneten erzeugt wird. Nimmt man für  $U$  einen extrem hohen Wert von 1 kV an, so ergeben sich pro Magnet nur etwa 10-15 V. Da die maximale Spannung, die bei  $I_0 = 2000 \text{ A}$  am DM-Magneten abfällt 36 V beträgt, muß die Zündspannung  $U_z$  eines Überspannungsableiters auf einen deutlich höheren Wert eingestellt werden, um zufällige Auslösung mit Sicherheit zu vermeiden, d.h.  $U_z > 50 \text{ V}$ . Die geringe Spannung, die pro Magnet induziert wird, reicht also nur mit geringer Wahrscheinlichkeit aus, den Überspannungsableiter zu zünden.

Im realistischen Fall ist die Wahrscheinlichkeit noch geringer als hier dargestellt, da  $U$  deutlich kleiner ist als 1 KV, außerdem regeln die Stromversorgungsgeräte sehr schnell, so daß von ihnen ein Teil dieser Spannung  $U$  schon kompensiert wird. Starkstromüberspannungsableiter sind also praktisch unwirksam.

Andererseits muß aber dafür gesorgt werden, daß bei Kabelbruch die Stromversorgungsgeräte abgeschaltet werden, denn, weil diese relativ schnell regeln, kann das dazu führen, daß sie die Spannung  $U$  am Lichtbogen ausgleichen und damit den Sollstrom  $I_0$  im Kreis wieder herstellen. Der Lichtbogen an der Bruchstelle wird dann direkt aus dem Netz versorgt und brennt lange weiter, wodurch Sekundärschäden entstehen können.

Es werden daher im folgenden Vorschläge für derartige Abschaltvorrichtungen unterbreitet, die im einzelnen noch überarbeitet werden müssen.

a) Abschaltvorrichtung für Stromkreis Nr. 1 \*

Zur Vermeidung zu hoher Spannungen gegen Masse ist der Stromkreis Nr. 1 aufgeteilt in eine Art Brückenschaltung mit zwei getrennten erdfreien Stromversorgungsgeräten. Dabei bietet sich folgende Schaltung an: (Fig. 18)

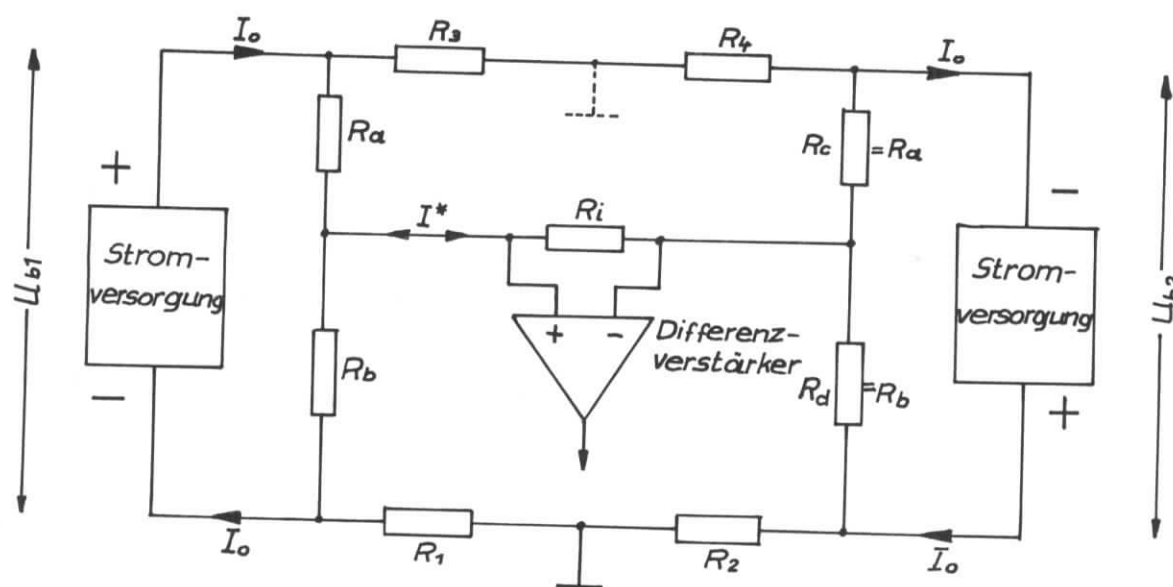


Fig.18. Prinzip der Abschaltvorrichtung für Stromkreis Nr. 1

\* Die Grundidee zu diesem Vorschlag stammt von Herrn Bothe - K -

Die Widerstände  $R_1, R_2, R_3$  und  $R_4$  repräsentieren die Magnete. Sie haben zusammen einen Wert von ca.  $1,5 \Omega$ . Mit den Widerständen  $R_a$  und  $R_b$  bzw.  $R_c$  und  $R_d$  wird ein erdfreier Bezugspunkt eingestellt, so daß im normalen Betrieb  $I^* = 0$  ist, d.h. der Differenzverstärker mit dem Eingangswiderstand  $R_i$  gibt keine Ausgangsspannung. Damit der Strom durch  $R_a$  und  $R_b$  bzw.  $R_c$  und  $R_d$  den von den Stromversorgungsgeräten gelieferten Strom  $I_o$  nicht spürbar verändert, muß  $R_{a,b,c,d} \gg R_{1,2,3,4}$  sein, d.h. genauer

$$R_a > 10^5 R_1 \text{ usw.}$$

Mit  $R_{a,b,c,d} \approx 10^7 \Omega$  ist diese Bedingung beliebig gut erfüllt.

Nach Fig. 18 läßt sich folgende Beziehung entwickeln:

$$I^* \left\{ R_i (R_a + R_b) + 2R_a R_b \right\} = (U_{b1} + U_{b2}) R_b - I_o (R_1 + R_2) (R_a + R_b) \quad (16)$$

Dabei ist schon einschränkend  $R_a = R_c$  und  $R_b = R_d$  gesetzt. Der Strom  $I_o$  im Kreis ist

$$I_o = \frac{U_{b1} + U_{b2}}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad (17)$$

in (16) einsetzen ergibt:

$$I^* = \frac{(U_{b1} + U_{b2}) \left\{ \frac{R_b}{R_a + R_b} - \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \right\}}{R_i + 2 \cdot \frac{R_a R_b}{R_a + R_b}} \quad (18)$$

Der Abgleich  $I^* = 0$  läßt sich für alle Betriebsspannungen  $U_{b1} + U_{b2}$  stets erreichen mit der Bedingung

$$\frac{R_b}{R_a + R_b} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad (19)$$

Bei Unterbrechung des Kreises tritt an der Bruchstelle eine zusätzliche Spannung  $U$  auf, die nach kurzer Zeit von den Stromversorgungsgeräten ausgeglichen

wird, indem  $U_{b1} + U_{b2}$  auf  $U_{b1}' + U_{b2}'$  erhöht wird, so daß

$$U_{b1}' + U_{b2}' = U_{b1} + U_{b2} + U \quad (20)$$

Der Strom  $I_o$  erreicht damit wieder seinen Sollwert.

$$I_o = \frac{U_{b1}' + U_{b2}' - U}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad (21)$$

Dabei ist es gleichgültig, wo die Unterbrechung passiert. Setzt man (21) in (16) ein, so wird

$$I^* \left\{ R_i + 2 \frac{R_a R_b}{R_a + R_b} \right\} = [U_{b1}' + U_{b2}'] \left\{ \frac{R_b}{R_a + R_b} - \frac{(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} + U \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \right\} \quad (22)$$

Der erste Term auf der rechten Seite verschwindet wegen der Abgleichbedingung (19) so daß aus (22) folgt

$$I^* = U \frac{(R_1 + R_2) (R_a + R_b)}{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) \left\{ (R_a + R_b) R_i + 2 R_a R_b \right\}} \quad (23)$$

Bei Kabelbruch tritt also am Verstärkereingang ein von 0 verschiedener Strom  $I^*$  auf, der ein Ausgangssignal erzeugt, das zum Abschalten der Stromversorgungsgeräte benutzt werden kann.

Es muß nun noch untersucht werden, inwieweit die Abgleichbedingung (19) auch bei Stromänderung erhalten bleibt. Ändert sich der Strom mit der Zeit, so machen sich die Induktivitäten bemerkbar. Da wegen des praktisch rein ohmschen Verhaltens von  $R_a$  und  $R_b$

$$\frac{R_b}{R_a + R_b} = \text{const} \quad (24)$$

so muß auch

$$\frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \text{const} (t) \quad (25) \text{ verlangt werden.}$$

Bei Stromänderung geht (25) über in

$$\frac{(R_1 + \omega L_1) + (R_2 + \omega L_2)}{(R_1 + \omega L_1) + (R_2 + \omega L_2) + (R_3 + \omega L_3) + (R_4 + \omega L_4)} =$$

$$\frac{(R_1 + R_2) \cdot \left( 1 + \omega \frac{L_1 + L_2}{R_1 + R_2} \right)}{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) \left( 1 + \omega \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \right)} \quad (26)$$

Sind die Zeitkonstanten  $\tau$  der vier Zweige gleich groß, was ziemlich gut erfüllt ist, d.h.  $L_1/R_1 = L_2/R_2 = L_3/R_3 = L_4/R_4$ , so wird

$$\frac{L_1 + L_2}{R_1 + R_2} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad (27)$$

und (26) geht in (25) über. Der Abgleich (19) ist auch bei Stromänderung erhalten.

Lediglich unterschiedliche Zeitkonstanten in den einzelnen Zweigen verletzen bei Stromänderung die Bedingung (25) und stören den Abgleich. Nimmt man an, daß z.B. ein Zweig eine um 10% höhere Zeitkonstante hat als die drei anderen, was angesichts der hohen Genauigkeitsforderungen unrealistisch hoch ist, so wird in diesem Zweig eine um  $\Delta U$  höhere Spannung induziert als in den anderen. Der Differenzverstärker spürt am Eingang einen Strom  $I^*$ , der durch die Gleichung (23) gegeben wird, indem man  $U$  durch  $\Delta U$  ersetzt.

Die Induktivität eines Zweiges ist  $L \approx 0,43$  H. Mit der Stromänderung  $\frac{dI}{dt} = 10$  A/sec ergibt sich pro Zweig die Spannung  $U_{\text{ind}} \approx 4$  V. Für  $\Delta U$  erhält man damit  $\Delta U \approx 0,4$  V. Das ist sehr klein gegenüber den bei Kabelbruch induzierten Spannungen  $U$  von einigen 100 V.

Bei diesem System kann man also stets eine Ansprechschwelle finden, die sicher einen Kabelbruch anzeigt und die andererseits weit über den Spannungswerten liegt, die beim Betrieb (z.B. Stromänderung) auftreten. Das System erfüllt also die Forderungen nach sicherer Funktion bei Kabelbruch und

Unempfindlichkeit gegenüber Effekten, die sich aus der Stromregelung ergeben.

Da die Meßgrößen direkt an den Anschlußklemmen der Stromversorgungsgeräte abgenommen werden, ist keine kostspielige Verkabelung im Ring erforderlich.

Außerdem wird vorgeschlagen, im Stromkreis Nr. 1 eine zweite unabhängige Sicherung vorzusehen, die jeweils die Widerstände  $R_1 + R_2$  bzw.  $R_3 + R_4$  überwacht. Ein Kabelbruch macht sich dann durch eine scheinbare Widerstandserhöhung bemerkbar. Auch bei diesem Prinzip werden die Meßgrößen an den Stromversorgungsgeräten abgenommen.

b) Abschaltvorrichtung für die Stromkreise mit 4, 8 und 16 Magneten

Das Prinzip zeigt Fig.19

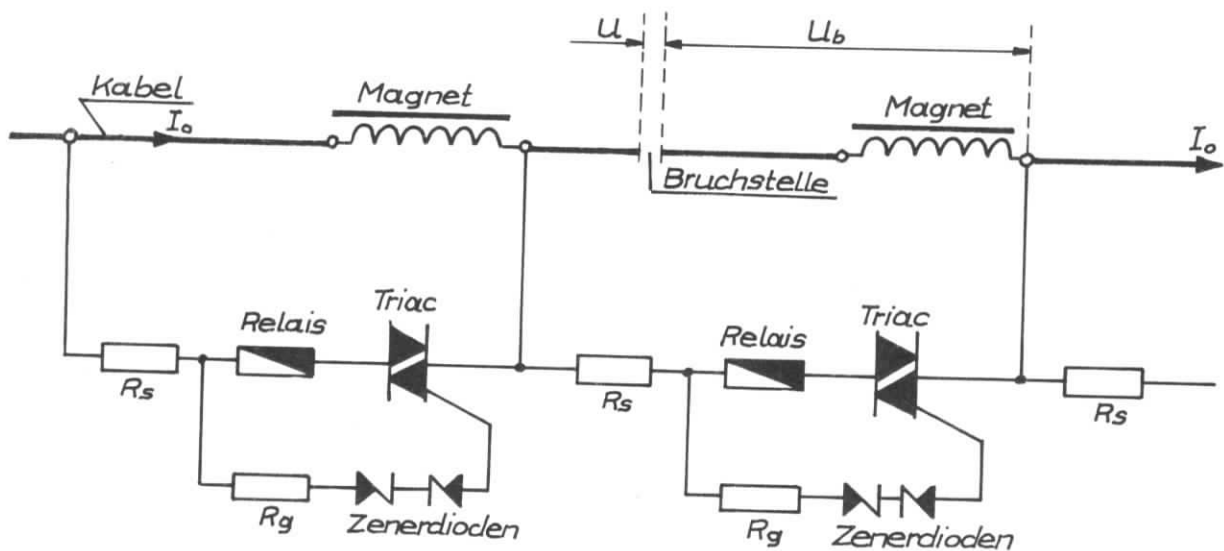


Fig.19

Da vorgesehen ist, die Richtung des Stromes  $I_o$  in beiden Richtungen fließen zu lassen, werden jeweils ein Triac und zwei gegeneinander geschaltete Zenerdioden verwendet. In Reihe zum Triac liegt ein Schwachstromrelais und ein Schutzwiderstand  $R_s$ , der den Strom durch den Triac und das Relais begrenzt. Von dieser Schaltung wird jeweils ein Magnet und das Kabel zum

nächsten überbrückt. Dadurch wird mit Sicherheit die Bruchstelle erfaßt.

Im statischen Betrieb steht am Triac die Spannung  $U_b$ , die über den Magneten und das Kabel abfällt. Die Zündspannung  $U_z$  des Triacs muß deutlich höher liegen. Dabei muß man noch berücksichtigen, daß während der Stromänderung noch zusätzlich Spannung induziert wird, also

$$U_z > U_b + L \frac{dI}{dt} \quad (28)$$

Nach dem Kabelbruch entsteht an der Bruchstelle die Spannung  $U$ , die nach einigen msec vom Stromversorgungsgerät nachgeregelt wird, so daß wieder der Sollwert  $I_o$  fließt. Der Triac spürt jetzt die Spannung  $U_b + U$ , bei der er sicher zünden muß, d.h.

$$U_z \leq U_b + U \quad (29)$$

Hat der Triac gezündet, so zieht das Relais an und schaltet die Stromversorgung ab.

Es ist denkbar, mit jeweils einem Triac nicht nur einen Magneten und ein Kabel sondern gleich mehrere zu überbrücken, um den Schaltaufwand zu reduzieren. Dabei wird aus (28)

$$U_z > \sum_{\mu=1}^n \left( U_{b\mu} + L_{\mu} \frac{dI}{dt} \right) \quad (30)$$

wobei  $U_{b\mu}$  die Spannung am Magneten und  $L_{\mu}$  die jeweilige Induktivität bedeutet.  $n$  ist die Anzahl der Magneten. Aus (29) wird

$$U_z \leq \sum_{\mu=1}^n U_{b\mu} + U \quad (31)$$

Um für  $U_z$  einen Wert zu finden, der sowohl (30) als auch (31) mit gutem Sicherheitsabstand erfüllt, muß das Verhältnis

$$\xi = \frac{U + \sum_{\mu=1}^n U_{b\mu}}{\sum_{\mu=1}^n \left( U_{b\mu} + L_{\mu} \frac{dI}{dt} \right)} \quad (32)$$

deutlich größer sein als 1. Um festzustellen, wieviel Magnete mit dieser Bedingung maximal pro Triac erfaßt werden können, werden Reihenschaltungen bei maximalem Strom betrachtet. Dann ist nämlich  $U_{b\mu}$  am größten und  $U$ , wie in Abschnitt 3 gezeigt, am kleinsten, man hat also den ungünstigsten Fall.

Für die Kreise mit je 4 Magneten ergibt sich:

Tabelle 1 Verhältnis  $\xi$  von Spannung bei Kabelbruch zu normaler Betriebsspannung. Die an der Bruchstelle auftretende Spannung  $U$  wurde  $U = 100 \text{ V}$  angenommen, außerdem  $L_{\mu} \frac{dI}{dt} = 0,1 U_{b\mu}$ .

Nr. des Stromkreises	$\sum U_{b\mu}$ bei maximaler Stromstärke [V]	$\xi$
2	280	1,23
3	180	1,41
5, 6, 7, 8	135	1,60
9, 10	178	1,42
11, 12	205	1,35
16 bis 23	242	1,29
24, 25	99	1,81

Wie in Abschnitt 4d) gezeigt, ist die Zündspannung bei Thyristoren (dasselbe gilt auch für Triacs) auf  $\pm 5\%$  definiert, die Reproduzierbarkeit von  $U_z$  ist besser als  $\pm 2,5\%$ . Legt man die Zündspannung 20% höher als die maximal im Betrieb auftretende Spannung, d.h.

$$U_z = 1,2 \sum_{\mu=1}^n \left( U_{b\mu} + L_{\mu} \frac{dI}{dt} \right) \max \quad (33)$$

so ist ausreichend Sicherheit gegeben, daß der Triac bei normalem Betrieb nicht zündet. Da der Zündpunkt im wesentlichen durch die Zenerdioden bestimmt wird, die nur eine sehr geringe Temperaturdrift aufweisen, ist die Schwelle  $U_z$  auch über lange Zeiten gut definiert und stabil. Aus (33) folgt für den kleinsten zulässigen Wert von  $\xi$

$$\xi_{\min} = 1,2$$





Der Stromkreis 2 erfüllt diese Bedingung gerade noch. Man kann also bei allen Stromkreisen mit 4 Magneten mit einem Triac auskommen, der direkt die Klemmen des Stromversorgungsgerätes überbrückt. Dadurch entfallen zusätzliche Verkabelungen im Ring.

Die Kreise 4, 13 und 14, bei denen je 8 Magnete in Reihe geschaltet sind, können nur mit je 2 Triacs, d.h. je einem pro 4 Magnete die Bedingung (33) erfüllen. Es ist also je eine Mittelanzapfung des Kreises in Schwachstromverkabelung zum Stromversorgungsgerät zu führen, in dem zweckmäßig die beiden Triacs sitzen.

Der Kreis Nr. 15 mit 16 Magneten wird nur maximal mit 560 A betrieben.

$\sum U_{b\mu}$  ist also entsprechend klein. Daher kann die Bedingung (33) eingehalten werden, indem je 8 Magnete von einem Triac überwacht werden. Es ist also auch hier nur eine Mittelanzapfung zum Stromversorgungsgerät zu legen.

Es wird erwogen, als Alternative bei den Kreisen mit 8 und 16 Magneten (Nr.4,13,14 und 15) die Überwachung durch eine Widerstandsmessung vorzunehmen, wie für Kreis Nr. 1 vorgesehen. Inwieweit der dadurch erforderliche elektronische Aufwand (Analogrechner zur Bildung des Quotienten  $U_b/I_o$ ) Vorteile bringt gegenüber den hier vorgeschlagenen vier einfachen Schwachstromkabeln zu den Mittelanzapfungen, muß noch untersucht werden.