

Schaltelemente für Stoßstromanlagen.
Switches for high current devices.

R. Wilhelm

IPP 1/85

August 1968

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MÜNCHEN

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

IPP 1/85 GARCHING BEI MÜNCHEN high current devices

(In German)

August 1968

Schaltelemente für Stoßstromanlagen.

Switches for high current devices.

R. Wilhelm

IPP 1/85

August 1968

Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem Institut für Plasmaphysik GmbH und der Europäischen Atomgemeinschaft über die Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt.

IPP 1/85

R. Wilhelm

Switches for high current devices

(in German)

August 1968

Abstract

This work reviews the properties of the several switches used in high-current devices. In particular the air-pressured spark-gaps, the ferrite-decoupled crowbar-switches, and a solid dielectric switch are described which are in use at the fast θ -pinch experiment Isar IV.

Zusammenfassung

Ist die verhältnismäßig geringe Größe der erforderlichen Trigger-
Zur Schaltung hoher Stoßströme, wie sie in der Plasmaphysik benö-
tigt werden, steht eine größere Zahl von Schaltelementen zur Ver-
fügung, die den speziellen Verwendungszweck mehr oder weniger gut
erfüllen.

Im folgenden soll auf Eigenschaften und Arbeitsprinzip einiger
wichtiger Schaltertypen eingegangen werden. Dabei werden insbeson-
dere Aufbau und elektrische Daten von Schaltfunkenstrecken, Crow-
barschaltern und Folienschaltern näher diskutiert, die sich an
einer schnellen θ -Pinch Batterie (Isar IV) in z.T. längerem Betrieb
gut bewährt haben.

1. Schaltfunkenstrecken

Die Triggerung einer unter Spannung liegenden Schaltfunkenstrecke
kann bekanntlich auf zwei Weisen erfolgen:

Bei der sogenannten Quertriggerung wird zwischen einem Triggerstift,
eingelassen in eine der Elektroden, und dieser Elektrode ein Fun-
kendurchbruch erzeugt. Das an der Oberfläche der Elektrode entstehen-
de Plasma führt zum anschließenden Durchbruch der Schaltstrecke.
Wesentlicher Vorteil dieser Funkenstrecke, die in Abb. 1 schema-
tisch dargestellt ist,

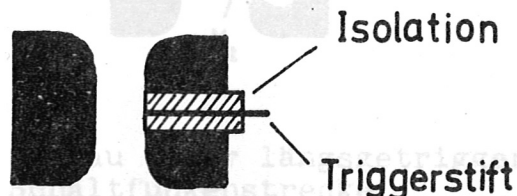


Abb. 1 Aufbau einer quergetriggerten
Schaltfunkenstrecke.

ist die verhältnismäßig geringe Größe der erforderlichen Trigger-
spannung. Als Nachteil muß jedoch eine Schaltzeitstreuung bis zu
wenigen hundert ns in Kauf genommen werden. Infolgedessen kann
eine derartig aufgebaute Funkenstrecke im allgemeinen nur einzeln
(beispielsweise als Mutterfunkenstrecke zur Triggerung einer
größeren Zahl weiterer Schaltfunkenstrecken) verwendet werden.

Sollen mehrere Stoßkondensatoren mit Funkenstrecken auf eine ge-
meinsame Last (Kompressionsspule, Entladungsgefäß) geschaltet wer-
den, so muß eine äußerst kleine Schaltzeitstreuung der Einzelkreise
vorausgesetzt werden. Kann nämlich die Schaltung aller Schaltele-
mente nicht in einer Zeitspanne von der Größenordnung der Impuls-
laufzeit in den Stromzuleitungen erreicht werden, so verhindert
der Spannungsanstieg an der Last die Zündung der noch nicht ge-
schalteten Funkenstrecken. Unter diesen Bedingungen ist die Längs-
triggerung der Schaltfunkenstrecken anzustreben.

Auch die Funkenstrecke mit Längstriggerung kann ähnlich wie in
Abb. 1 aus zwei Elektroden mit eingelassenem Triggerstift aufge-
baut werden.

Wie in Abb. 2 gezeigt, ist in diesem Fall der Triggerstift über
die Strecke X_2

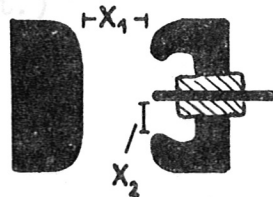


Abb. 2 Aufbau einer längsgetriggerten
Schaltfunkenstrecke.

genügend von der Anelektrode isoliert. Wird jetzt das Potential
des Triggerstiftes durch einen steilen Spannungsstoß auf $-U_T$
abgesenkt, so liegt zwischen Triggerstift und Gegenelektrode die

Spannung $U_T + U_0$, und ein erster Durchbruch erfolgt über die Strecke X_1 . Nach diesem Funkenstreckendurchbruch nimmt der Stift das Potential U_0 an und es folgt die weitere Zündung über die Strecke X_2 .

Nach einer Untersuchung von Kaufmann [1] sollte für die optimale Schaltung dieser Funkenstrecke die stationäre Durchbruchsspannung über die Strecke X_1 den 2-3-fachen Wert annehmen wie über die Strecke X_2 . Wird dieser Faktor wesentlich überschritten, so folgt der Übergang zur Quertriggerung. Dabei zeichnet sich ein Übergangsbereich mit praktisch gleichzeitiger Schaltung der Strecken X_1 und X_2 durch äußerst kurze Schaltzeit aus. Das mögliche Überkippen zur reinen Quertriggerung mit wesentlich größerer Schaltzeit schließt ein Arbeiten in diesem Grenzbereich jedoch weitgehend aus.

Bei dem beschriebenen Aufbau einer längsgetriggerten Funkenstrecke muß einerseits zur Schaltung die Strecke $X_1 + X_2$ überbrückt werden. Andererseits steht zur Isolierung der zuvor anliegenden Spannung U_0 nur die Strecke X_1 zur Verfügung. Damit wird sofort der Vorteil der in Abb. 3 gezeigten Elektrodenanordnung ersichtlich, bei der der Triggerstift aus der einen Elektrode herausgenommen und als dritte Elektrode in der Mitte zwischen den beiden Elektroden angeordnet ist. (Durch einen hochohmigen Spannungsteiler wird die Triggerelektrode dabei stationär auf das halbe Potential $U_0/2$ vorgespannt.)

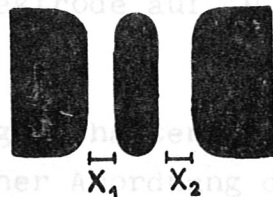


Abb. 3 Schaltfunkenstrecke mit Mittelelektrode.

Auch in dieser Anordnung erfolgt die Schaltung der Funkenstrecke wieder in der beschriebenen Weise. Zur Isolation der Arbeitsspannung U_0 dient jetzt jedoch die Gesamtstrecke $X_1 + X_2$, so daß der erste Durchbruch über den entsprechend verkürzten Weg X_1 wesentlich begünstigt wird. Der erforderliche geringere Wert der Triggerspannungsamplitude ermöglicht die in Abb. 4 angedeutete einfache Triggerung mehrerer solcher Funkenstrecken.

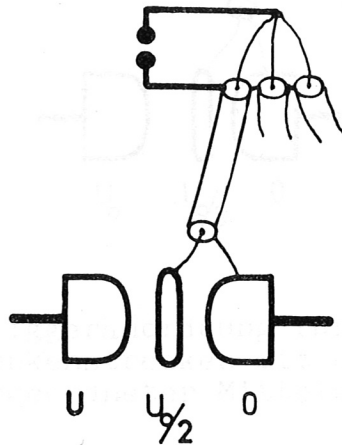


Abb. 4 Triggeranordnung für Schaltfunkenstrecken mit Mittelelektrode.

Durch eine gemeinsame Mutterfunkenstrecke werden zwischen Triggerstift und geerdeter Elektrode angeschlossene (und damit auf $U_0/2$ aufgeladene) Koaxialkabel am Ende kurzgeschlossen. Die in die Kabel einlaufende Spannungswelle mit zu U_0 entgegengerichteter Polarität führt sodann zum Durchbruch der Teilstrecke X_1 . Nach Umladung der Mittelelektrode auf U_0 erfolgt der zweite Durchschlag über X_2 .

Noch bessere Schalteigenschaften dieser Funkenstrecke ergeben sich bei unsymmetrischer Anordnung der Mittelelektrode. Entsprechend den Überlegungen bei der Funkenstrecke mit eingelassener Triggerelektrode sollte auch hier die Strecke X_1 etwa die 2 - 3-fache Größe von X_2 erhalten. Um den schnellen Durchschlag der

größerer Teilstrecke X_1 zu erzwingen, ist in diesem Fall jedoch eine höhere Schaltspannung erforderlich. Entsprechend Abb. 5 wird dazu ein induktivitätsarmer Kondensator, der auf eine mit U_0

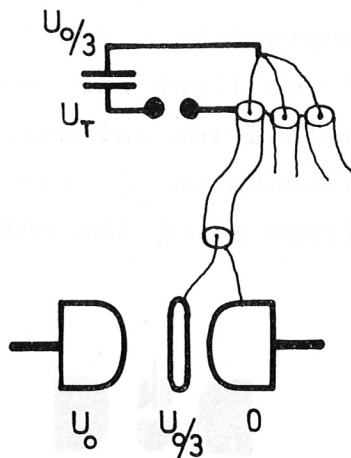


Abb. 5 Triggeranordnung für Schaltfunkenstrecken mit unsymmetrisch angeordneter Mittelelektrode.

vergleichbare Spannung U_T aufgeladen ist, mit der Mutterfunkenstrecke in Reihe geschaltet. Nach Schaltung dieser Funkenstrecke läuft ein hoher Spannungsimpuls mit zu U_0 bzw. U_T entgegengerichteter Polarität in die angeschlossenen Triggerleitungen und der Durchbruch aller Strecken X_1 wird in sehr kurzer Zeit erreicht. Im Anschluß an den ersten Durchbruch über X_1 ist mit der an der Mittelelektrode auftretenden Spannung U_0 nur noch die wesentlich verkürzte zweite Teilstrecke X_2 zu schalten.

Als wesentlicher Vorteil der unsymmetrischen Elektrodenanordnung wird damit eine sehr exakte Triggerung über einen großen Arbeitsbereich möglich. So lassen sich beispielsweise die auf eine stationäre Durchschlagsspannung > 46 kV eingestellten unsymmetrischen Schaltfunkenstrecken an Isar IV noch bei Arbeitsspannungen $U_0 < 25$ kV mit hinreichend kleiner Streuzeit (< 8 ns) schalten.

Im folgenden soll ein Überblick über die Schalteigenschaften der drei diskutierten Funkenstreckentypen gegeben werden. Untersucht

wurde: a) eine Schaltfunkenstrecke mit eingelassenem Triggerstift $\lceil 1 \rceil$, b) die in der MJ-Batterie Isar I verwendete 4-Elektroden-Funkenstrecke⁺) und c) die für die schnelle θ -Pinch-Batterie Isar IV entwickelte unsymmetrische 3-Elektroden-Funkenstrecke.

Die Abb. 6 (a - c) zeigt den Einfluß einer Abstandsvergrößerung von 13 bis 18 mm auf Schaltzeit und Schaltzeitstreuung bei festgehaltener Arbeitsspannung ($U_0 = 30$ kV). Dabei wird auf dem oberen Strahl der wiedergegebenen Oszillogramme jeweils der Stromanstieg j_t des Triggerimpulses und damit der Triggereinsatz angezeigt. Auf den unteren Strahlen ist der Zeitverlauf des dj/dt des geschalteten Stoßstromes j_s aufgezeichnet. Zur Beurteilung der Schaltzeitstreuung sind auf jedem Oszillogramm 10 Entladungen überlagert.

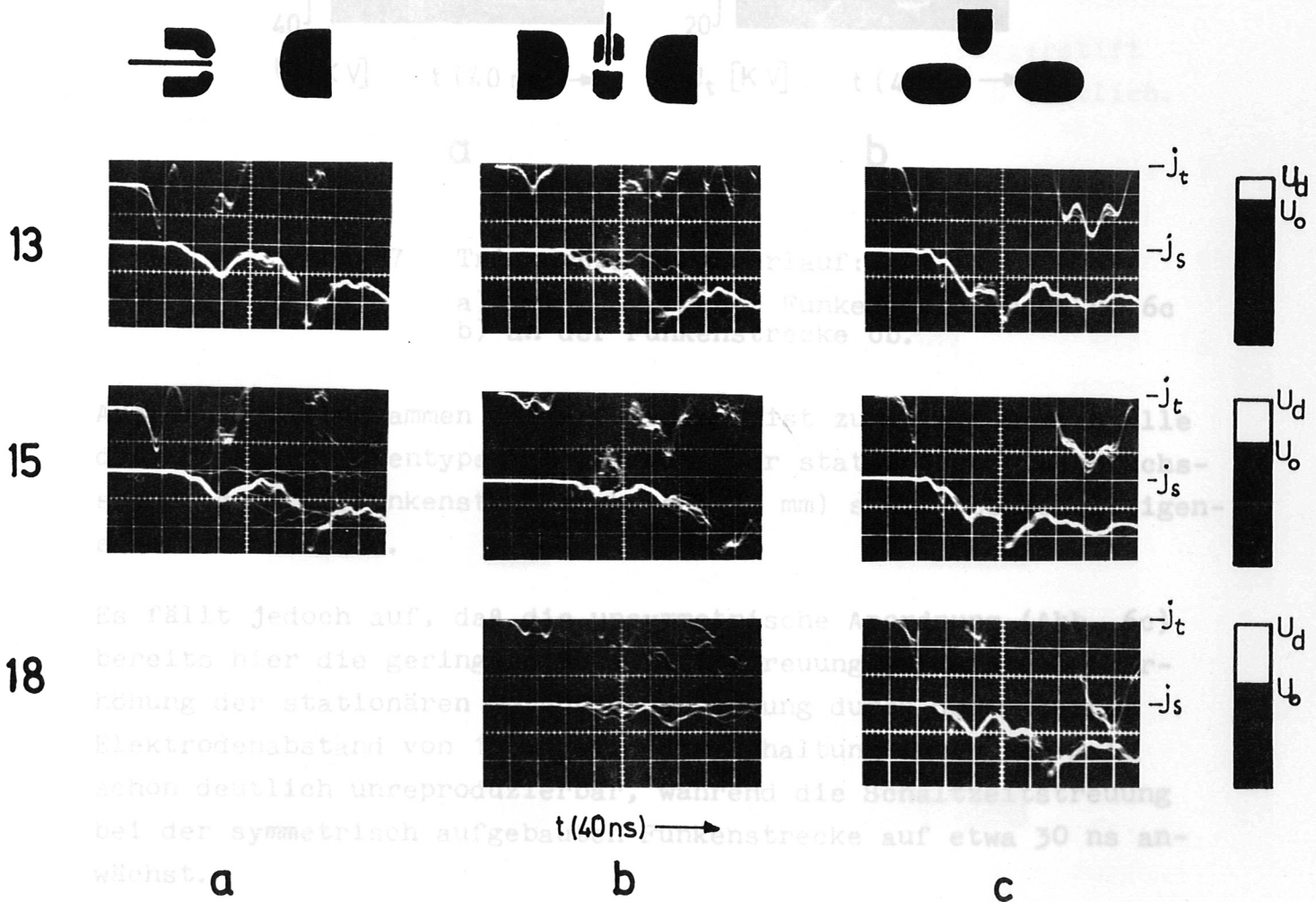


Abb. 6 Zündverhalten von drei Funkenstreckentypen mit Längstriggerung.

+) An einem in der Mittelelektrode eingelassenen Stift (Abb.6b) entsteht bei Anlegen des Triggerimpulses ein kleiner Funke. Dieser kann durch seine UV-Strahlung den ersten Durchbruch begünstigen.

Im ersten und dritten Fall wurde der in Abb. 7a wiedergegebene Spannungsimpuls zur Triggerung der Funkenstrecke verwendet. Bei der symmetrischen Elektrodenanordnung (Abb. 6b) wurde das auf $U_0/2$ aufgeladene Triggerkabel (Länge 5 m) am Ende kurzgeschlossen. Dabei ergab sich der in Abb. 7b gezeigte Verlauf des Triggerimpulses.

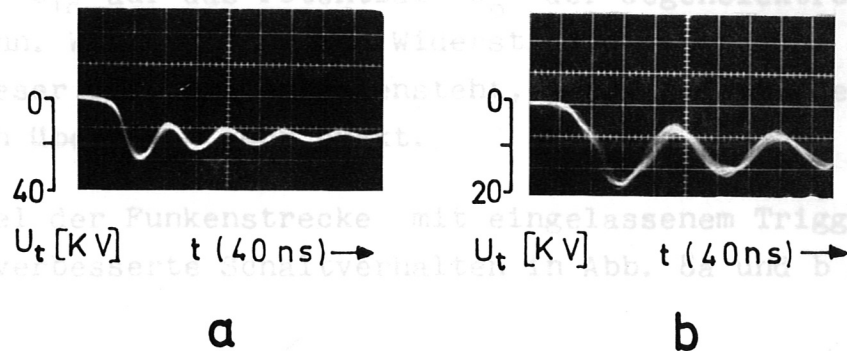


Abb. 7 Triggerspannungsverlauf:
a) zur Zündung der Funkenstrecken 6a u. 6c
b) an der Funkenstrecke 6b.

Aus den Oszillogrammen der Abb. 6 a-c ist zu erkennen, daß alle drei Funkenstreckentypen in der Nähe der stationären Durchbruchspannung U_D (Funkenstreckenabstand 13 mm) sehr gute Schalteigenschaften besitzen.

Es fällt jedoch auf, daß die unsymmetrische Anordnung (Abb. 6c) bereits hier die geringste Schaltzeitstreuung aufweist. Bei Erhöhung der stationären Durchbruchsspannung durch den größeren Elektrodenabstand von 15 mm wird die Schaltung im ersten Fall schon deutlich unreproduzierbar, während die Schaltzeitstreuung bei der symmetrisch aufgebauten Funkenstrecke auf etwa 30 ns anwächst.

Bei 18 mm Funkenstreckenabstand fällt schließlich die Zündung im Fall 6a ganz aus und erfolgt im Beispiel 6b mit großer Schaltzeitstreuung. Die unsymmetrische Elektrodenanordnung ermöglicht dagegen auch jetzt noch die sichere Zündung des Stoßkreises mit einer Schaltzeitstreuung von etwa 8 ns.

Erst eine derartig geringe Streuung des Zündzeitpunktes erlaubt den Einbau extrem kurzer Stromzuleitungen von den Funkenstrecken zum Kollektor. An Isar IV trägt eine Leitungslänge von nur etwa 1 m wesentlich zu der geringen Größe der Außeninduktivität bei.

Durch Einschalten eines spannungsfesten Widerstandes^{+) in die Triggerleitung lassen sich die Schalteigenschaften einer längsgetriggerten Funkenstrecke weiter verbessern. Mit dieser Abkopplung wird erreicht, daß die Triggerelektrode nach dem ersten Funken durchbruch über X_1 wesentlich schneller von der Triggerspannungsamplitude U_{Tr} auf das Potential U_0 der Gegenelektrode umgeladen werden kann. Während ohne den Widerstand die Impedanz des Triggerkabels dieser Umladung entgegensteht, erfolgt jetzt der zweite Durchbruch über X_2 sehr exakt.}

Am Beispiel der Funkenstrecke mit eingelassenem Triggerstift wird das verbesserte Schaltverhalten in Abb. 8a und b deutlich.

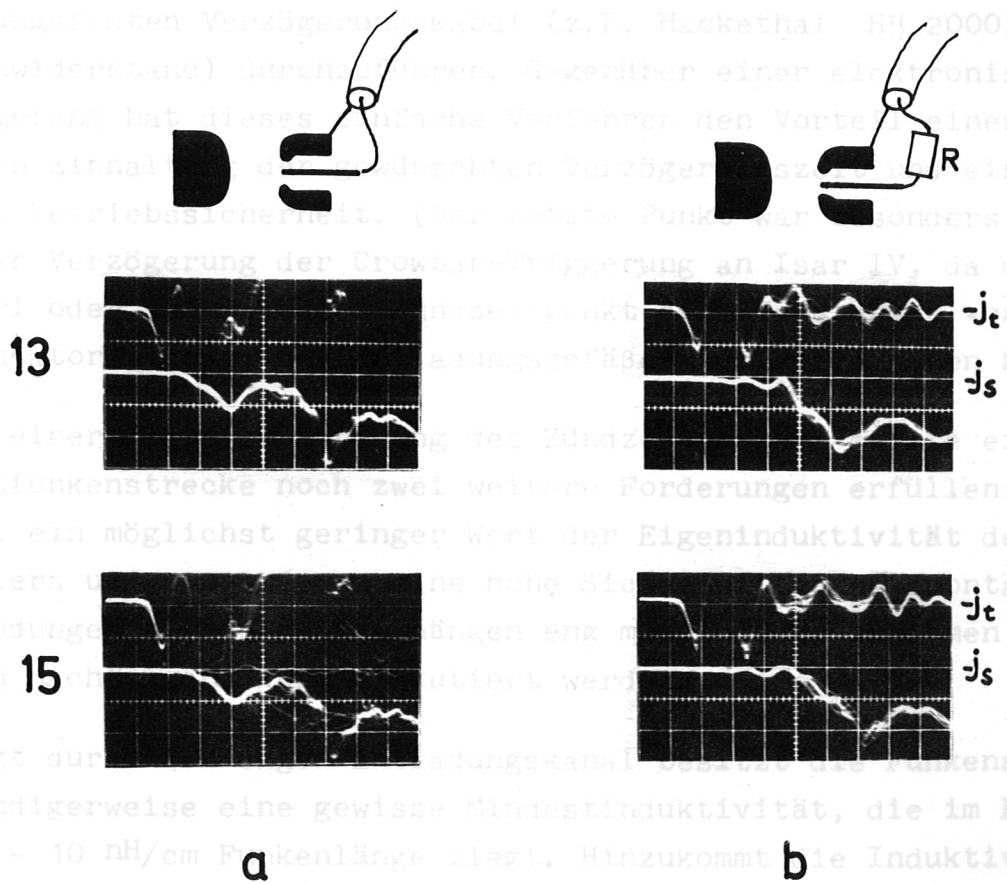


Abb. 8 Einfluß eines Vorwiderstandes auf die Schalteigenschaften einer längsgetriggerten Funkenstrecke.

+) Ein Stück PVC-Schlauch mit zwei Metallstopfen u. Salzwasserfüllung ergibt einen einfachen u. dabei äußerst spannungsfesten Vorwiderstand.

In den Oszillogrammen der Abb. 8 ist der Zündvorgang wieder aus dem dI/dt des Triggerimpulses (oberer Strahl) und dem dI/dt des Stoßstromes (unterer Strahl) zu erkennen. Wie die Abbildung zeigt, tritt bei direktem Anschluß der Triggerleitung bereits eine starke Streuung der Zündung auf (Abb. 8a). Im zweiten Fall mit vorgeschaltetem Widerstand ($R = 450 \Omega$) ist dagegen nur eine geringfügige Schaltzeitstreuung zu beobachten (Abb. 8b).

In diesem Zusammenhang ist zu bemerken, daß nicht nur ein vorgeschalteter Widerstand, sondern auch eine Triggerleitung mit höherem Wellenwiderstand die Zündeigenschaften einer längsgetriggerten Funkenstrecke eher verbessert. Damit wird es möglich, die verzögerte Triggerung einer derartigen Funkenstrecke (beispielsweise die Schaltung des Haupttriggerkreises einer Stoßbatterie nach Ablauf der Vorionisierungsentladung oder die verzögerte Schaltung des Triggerkreises für eine Crowbar-Anordnung) mit einem spannungsfesten Verzögerungskabel (z.B. Hackethal HH 2000, $1,8 \text{ k}\Omega$ Wellenwiderstand) durchzuführen. Gegenüber einer elektronischen Verzögerung hat dieses einfache Verfahren den Vorteil einer äußerst genauen Einhaltung der gewünschten Verzögerungszeit und einer großen Betriebssicherheit. (Der letzte Punkt war besonders wichtig bei der Verzögerung der Crowbar-Triggerung an Isar IV, da deren Ausfall oder ein falscher Zündzeitpunkt eine Zerstörung von Stoßkondensatoren sowie des Entladungsgefäßes zur Folge haben kann.)

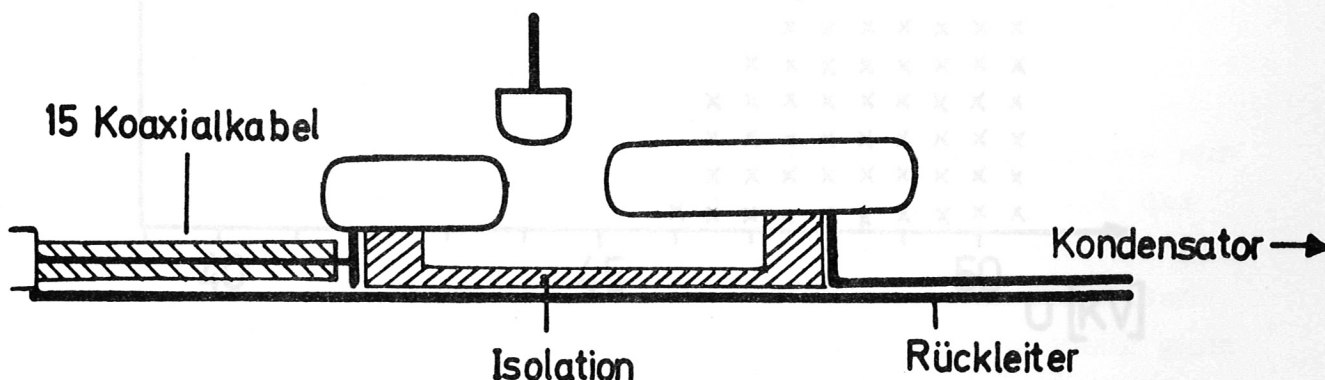
Neben einer geringen Streuung des Zündzeitpunktes sollte eine Schaltfunkenstrecke noch zwei weitere Forderungen erfüllen: Einmal ein möglichst geringer Wert der Eigeninduktivität des Schalters und zum anderen eine hohe Sicherheit gegen spontane Vorzündungen. Beide Punkte hängen eng miteinander zusammen und sollen nachfolgend kurz diskutiert werden.

Bedingt durch den engen Entladungskanal besitzt die Funkenstrecke notwendigerweise eine gewisse Mindestinduktivität, die im Bereich von $5 - 10 \text{ nH/cm}$ Funkenlänge liegt. Hinzukommt die Induktivität in den Elektroden sowie in dem Übergang auf die angeschlossenen Stromleiter.

Ein flacher Aufbau der Elektroden, wie er in der in Abb. 7c dargestellten 3-Elektrodenfunkenstrecke angestrebt wurde, kann die genannten Beiträge zur Funkenstreckeninduktivität auf ein Mindestmaß reduzieren. Dabei sind jedoch zwei Forderungen zu beachten, die hier einen Kompromiß notwendig machen: Um den sich bei homogenem elektrischen Feld ergebenden Mindestabstand der Elektroden nicht wesentlich zu überschreiten und zugleich die Triggereigenschaften zu verschlechtern, muß für ein genügend homogenes Feld in der Funkenstrecke gesorgt werden. Voraussetzung dafür ist, daß die Krümmungsradien der Elektroden mindestens die Größe des Elektrodenabstandes besitzen.

Weiterhin hat ein zu geringer Abstand der Elektroden vom Rückleiter Gleitentladungen auf dem dazwischenliegenden Isoliermaterial zur Folge.

Die zuvor beschriebene unsymmetrische Dreielektroden-Funkenstrecke wurde unter Einhaltung der genannten Forderungen konstruiert. Abb.9 zeigt einen Querschnitt durch diese Funkenstrecke, die bei einer Arbeitsspannung $u_0 > 40$ kV eine Eigeninduktivität von ≤ 40 nH besitzt.



M 1:2

Abb. 9 Unsymmetrische Dreielektroden-Funkenstrecke der θ -Pinch Batterie Isar IV.

Um ein Maß für die Betriebssicherheit dieser Funkenstrecke zu erhalten, wurde in einer Meßserie die Arbeitsspannung über 40 kV hinaus bis zum Durchbruch der Strecke gesteigert. Das Ergebnis wird aus dem in Abb. 10 dargestellten Histogramm deutlich, in dem die jeweils erhaltene Durchbruchsspannung durch ein Kreuz eingetragen ist.

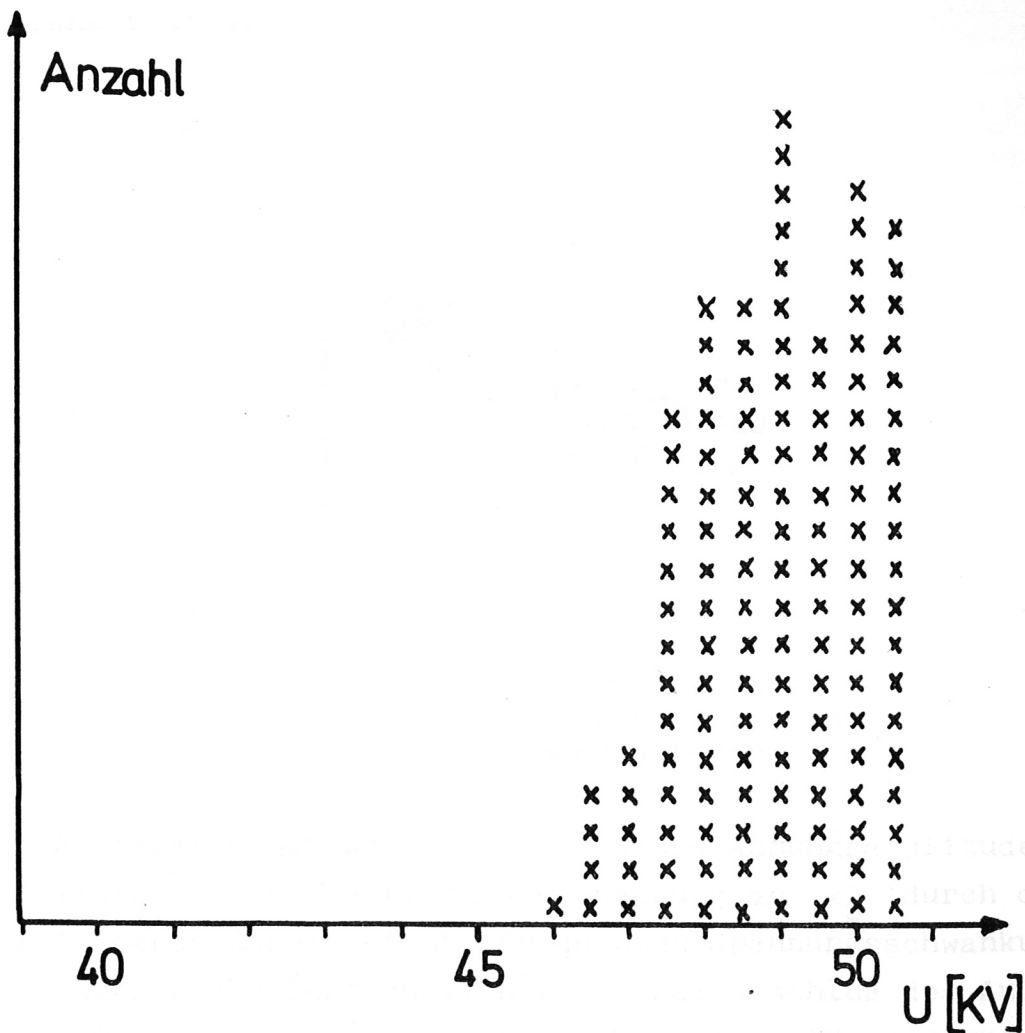


Abb. 10 Spontane Zündung der an Isar IV eingesetzten Dreielektrodenfunkenstrecke ($d = 18$ mm).

Man erkennt, daß die spontane Zündung der Funkenstrecke bei dem gewählten Abstand $x_1 + x_2 = 12 + 6$ mm im Mittel etwa bei 49,5 kV erfolgt. Erste Durchbrüche treten jedoch bereits bei Spannungen um 46 kV auf.

In vielen Fällen (z.B. θ -Pinch Vorentladung) tritt zusätzlich zur Arbeitsspannung eine hochfrequente Spannung $\pm \Delta U$ an den Funkenstrecken auf. Damit ist es nicht mehr möglich, dicht unter der stationären Durchbruchspannung der Funkenstrecke zu arbeiten. Die zulässige Größe dieser Störspannung ΔU soll abschließend für die unsymmetrische Dreielektrodenfunkenstrecke gezeigt werden. Dabei muß zwischen den beiden Anschlußmöglichkeiten des Triggerkabelaußenleiters unterschieden werden, die in Abb. 11 durch die Punkte A und B gekennzeichnet sind.

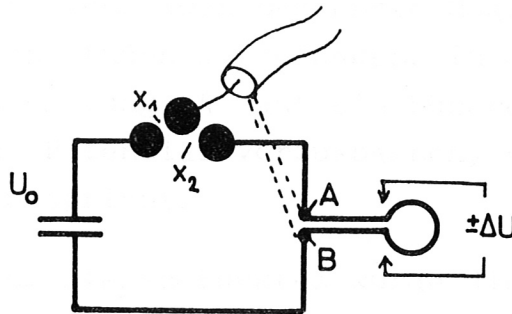


Abb. 11 Anschlußmöglichkeiten des Triggerkabelaußenleiters an die Schaltfunkenstrecke.

Im Fall A tritt praktisch die volle Störspannungsamplitude nur an der Teilstrecke x_1 auf, da die Spannung an x_2 durch das parallel liegende Kabel bei hochfrequenten Spannungsschwankungen an der Funkenstrecke festgehalten wird. Bei Anschluß des Außenleiters an Punkt B liegt dementsprechend die Störspannung ganz an der Strecke x_2 an, da jetzt das Triggerkabel hochfrequenzmäßig die Strecke x_1 kurzschließt.

Im Fall der unsymmetrisch aufgebauten Funkenstrecke sollte der Kabelmantel so angeschlossen werden, daß die Störspannung an der größeren der beiden Teilstrecken x_1 und x_2 auftritt. Da bei der untersuchten unsymmetrischen Schaltfunkenstrecke x_1 den dop-

pelten Wert von x_2 erhält, ist hier die Schaltung A zu wählen. In dieser Anordnung bleibt der Einfluß von ΔU am geringsten, da die Zusatzspannung von $2/3$ der gesamten Schaltstrecke getragen wird⁺⁾ . Als Nachteil bringt die Schaltung A jedoch mit sich, daß der Triggerstrom des ersten Durchbruchs über x_1 als Vorstrom durch die Entladungsstrecke (θ - Pinch-Spule) fließt. Soll dieser oft unerwünschte Strom weitgehend vermieden werden, so ist auch aus diesem Grund der zuvor diskutierte Einbau von Vorwiderständen in die Triggerleitungen angebracht.

Neben der Anschlußweise des Triggerkabels gibt eine von $U_0/3$ (bzw. $U_0/2$) abweichende stationäre Vorspannung U_1 der Mittelelektrode eine weitere wenn auch begrenzte Möglichkeit, besonders große Störspannungsamplituden aufzufangen. In diesem Fall ist die Mittelelektrode in Schaltung A auf ein höheres und bei Anschluß B auf ein geringeres Potential vorzuspannen, als es ihrer geometrischen Anordnung entspricht.

Unter Berücksichtigung dieses Punktes wurde die maximal zulässige Störspannungsamplitude sowie die optimale Einstellung des Mittelpotentials für die an Isar IV eingesetzte Schaltfunkenstrecke experimentell bestimmt.

Als Resultat dieser Untersuchung ergab sich dabei die Variationsbreite von U_1 , in der auch bei Anlegen der Störspannung ΔU keine Vorzündung der Funkenstrecke eintrat. Der so festgelegte Arbeitsbereich der Funkenstrecke ist für die beiden Arbeitsspannungen $U_0 = 30$ und 40 kV sowie einen Funkenstreckenabstand von $7 + 14$ mm in Abb. 12 wiedergegeben.

Das in der Abbildung schraffiert eingezeichnete Gebiet ist in der Vertikalen begrenzt durch die beiden möglichen Extremwerte des Mittelpotentials: Im Fall A erfolgt an der oberen Grenze ($U_1 = 21,5$ kV) die spontane Zündung der Strecke x_2 , während sich in

+) Die Aufteilung der Störspannung auf die gesamte Schaltstrecke $x_1 + x_2$ ist durch dynamische Festlegung des Mittelpotentials möglich. Diese Maßnahme ist im Fall der unsymmetrischen Elektrodenanordnung aber kaum noch angebracht, zumal dadurch eine deutliche Verschlechterung der Schalteigenschaften der Funkenstrecke eintritt.

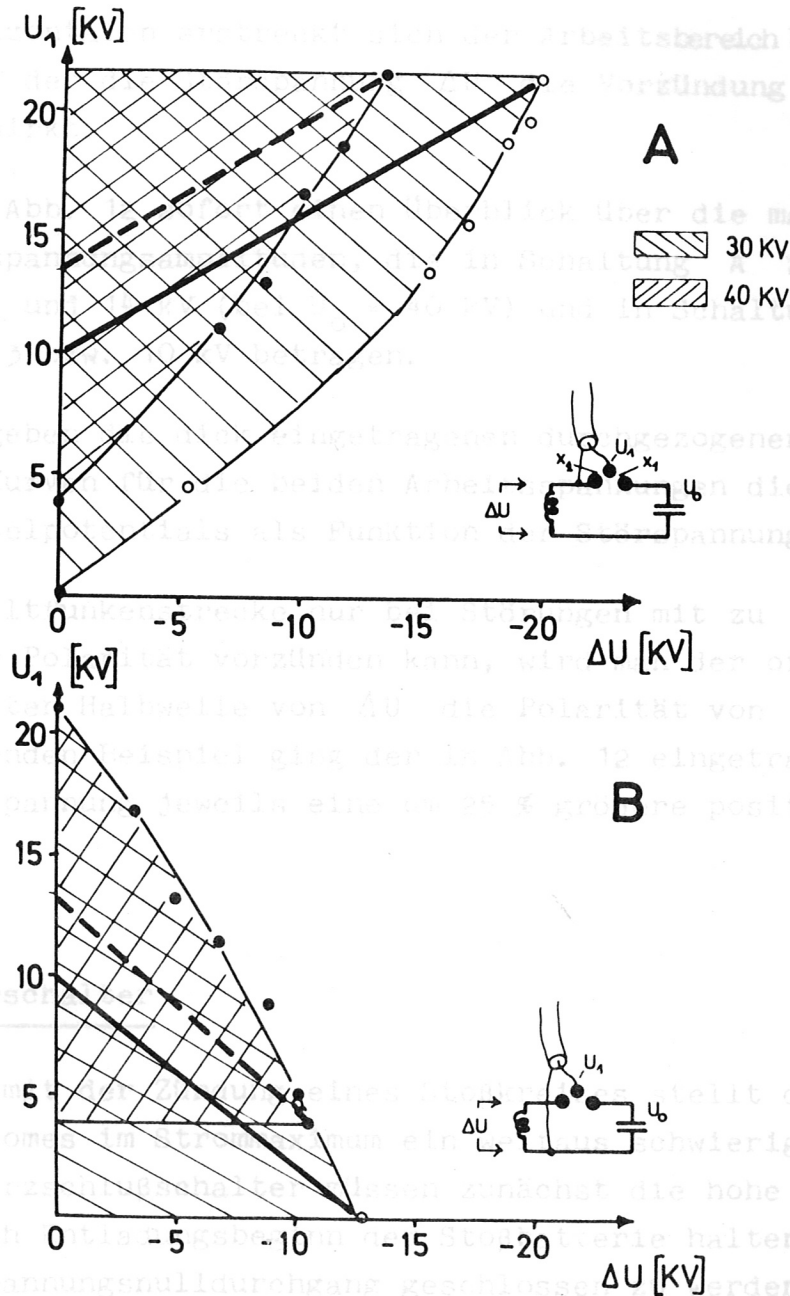


Abb. 12 Arbeitsbereich und optimales Mittelpotential einer Schaltfunkenstrecke (Isar IV) bei überlagerter Störspannung ΔU ($f = 500$ kHz).

Sowohl den Aufbau wie im Betrieb erfordern die erstgenannten Schaltertypen einen höheren technischen Aufwand. Infolgedessen

Schaltung B eine untere Begrenzung mit dem Durchbruch der Teilstrecke x_1 bei $U_1 \approx 0$ ($U_0 = 30$ kV) bzw. $U_1 \approx 4$ kV ($U_0 = 40$ kV) einstellt.

In der Horizontalen erstreckt sich der Arbeitsbereich bis zu der Grenze, auf der die Störspannung ΔU die Vorzündung der Funkenstrecke bewirkt.

Damit gibt Abb. 12 sofort einen Überblick über die maximal zulässigen Störspannungsamplituden, die in Schaltung A 20 kV (bei $U_0 = 30$ kV) und 14 kV (bei $U_0 = 40$ kV) und in Schaltung B entsprechend 13 bzw. 10 kV betragen.

Weiterhin geben die dick eingetragenen durchgezogenen bzw. unterbrochenen Kurven für die beiden Arbeitsspannungen die Optimalwerte des Mittelpotentials als Funktion der Störspannung ΔU wieder.

Da die Schaltfunkenstrecke nur bei Störungen mit zu U_0 entgegengerichteter Polarität vorzünden kann, wird man der oft wesentlich höheren ersten Halbwelle von ΔU die Polarität von U_0 geben. Im vorliegenden Beispiel ging der in Abb. 12 eingetragenen negativen Störspannung jeweils eine um 25 % größere positive Halbwelle voraus.

2. Crowbarschalter

Verglichen mit der Zündung eines Stoßkreises stellt der Kurzschluß des Stoßstromes im Strommaximum ein weitaus schwierigeres Problem dar. Die Kurzschlußschalter müssen zunächst die hohe Spannungsamplitude nach Entladungsbeginn der Stoßatterie halten, um dann meist im Spannungs nulldurchgang geschlossen zu werden.

Bei Arbeitsspannungen von 40 kV und darüber sowie bei Stoßströmen im Bereich von $10^5 - 10^7$ A kommen hier als Schaltelemente Vakuumschalter [2], Folienschalter [3], [4] sowie ferritentkoppelte Zweielektrodenfunkenstrecken in Frage.

Sowohl den Aufbau wie im Betrieb erfordern die erstgenannten Schaltertypen einen höheren technischen Aufwand. Infolgedessen

kommt den ferritentkoppelten Crowbarschaltern eine gewisse Bedeutung zu, da sie bei einfachstem Aufbau wartungsfrei und sicher arbeiten.

Diese Schalter wurden speziell für eine Theta-Pinch Anordnung mit einem Stoßstrom von $1,5 \cdot 10^6$ A entwickelt [5] und sind jetzt in ähnlichem Aufbau an mehreren Stoßbatterien, wie der MJ-Batterie Isar I, in Betrieb.

Im folgenden soll die Funktion des ferritentkoppelten Crowbarschalters am Beispiel des an Isar IV eingebauten und gegenüber der ersten Form [5] wesentlich verbesserten Typs erläutert werden.

Aus Abb. 13 wird das einfache Prinzip der von Frügel [6] für eine normale Schaltfunkenstrecke vorgeschlagenen Ferritentkopplung deutlich.

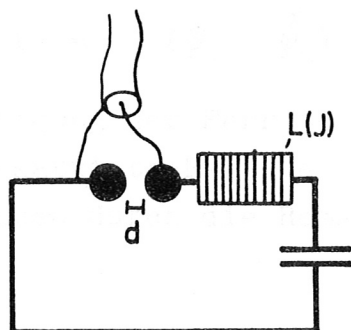


Abb. 13 Prinzip der Ferritentkopplung

Durch Ferritrings, die über den rechten Stromleiter geschoben sind, erhöht sich dessen Induktivität infolge der hohen Permeabilität der Ringe etwa um den Faktor 10^3 . Mit dieser Induktivitätsvergrößerung wird es möglich, durch einen Spannungsimpuls den Durchschlag der Schaltstrecke d zu erzwingen.

Dabei tritt bereits während der Impulsdauer durch den über $L(J)$ fließenden Triggerstrom eine Teilsättigung der Ringkerne ein.

Nach Schaltung der Strecke d und Beginn des Stoßstromes wird dann die vollständige Sättigung der Ferrite erreicht. Da hierzu bereits Ströme von 20 - 50 A genügen, nimmt die Induktivität $L(I)$ in äußerst kurzer Zeit den Grenzwert (entsprechend dem Fall ohne Ringkerne) an.

Bei Anwendung dieses Prinzips auf einen Crowbarschalter ergeben sich sofort technische Schwierigkeiten, die gewisse Änderung der zunächst beschriebenen einfachen Anordnung erfordern. Ein wesentlicher Punkt ist dabei die benötigte hohe Triggerspannungsamplitude, die weit über der Arbeitsspannung der Stoßbatterie liegen muß. Diese an der Ferritinduktivität abfallende Triggerspannung ist gegeben durch:

$$U = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Φ = Kraftfluß durch die Querschnittsfläche der Ferritringe.
Damit kann der Spannungstoß einen Maximalwert von:

$$\int_0^{t_s} U dt = - (\Phi_s - \Phi_0)$$

t_s = Zeit bis zur Sättigung der Ferrite

Φ_s = Fluß durch die gesättigten Ferrite

Φ_0 = Anfangsfluß, gegeben durch die Remanenz des Ferritmaterials

annehmen.

Als Folge der schnellen Sättigung der Ringkerne lassen sich bei nicht extrem großem Ferritvolumen nur geringe Werte für $\int U dt$ realisieren. So konnte bei der zuerst benutzten Anordnung bei äußerst steilem Spannungsanstieg an der Ferritinduktivität bis zur Sättigung der Ferrite gerade eine Maximalspannung von 40 kV erreicht werden.

Der notwendige schnelle Anstieg der Triggerspannung ergab sich durch Einbau einer Vorfunkstrecke am Ende der Triggerspannung. Um in der zur Verfügung stehenden kurzen Zeitphase t_s die sichere Schaltung der Crowbarstrecke zu erzwingen, wurde weiterhin der Crowbarschalter mit der Schaltfunkenstrecke zu einer Einheit zusam-

mengefaßt. So konnte die intensive UV-Strahlung der Schaltfunkenstrecke zum schnellen Durchbruch des Crowbarschalters ausgenutzt werden. Die koaxiale Anordnung der Kurzschlußleitung brachte schließlich den günstigsten Kompromiß zwischen möglichst großem Ferritvolumen und möglichst geringer Kurzschlußinduktivität nach Sättigung der Ferrite.

Abb. 14 zeigt den Aufbau des koaxialen, mit Ferritringen gefüllten Kurzschlußbeckers, dessen Innenleiter zu der Kurzschlußelektrode K führt.

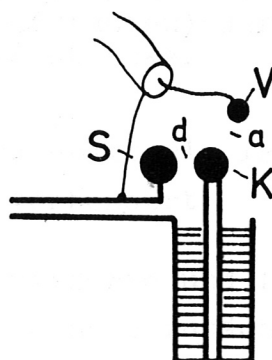


Abb. 14 Aufbau der Kurzschlußleitung des ferritentkoppelten Crowbarschalters.

Als zweite Kurzschlußelektrode dient die eine Kalotte S der Schaltfunkenstrecke. Über die auf eine Durchbruchsspannung von 100 kV eingestellte Vorfunkkenstrecke V wird der Triggerimpuls zugeführt.

In Abb. 15 ist der zeitliche Verlauf dieses Impulses vor der Aufstellfunkenstrecke wiedergegeben (oberer Strahl). Wie dies Oszillogramm erkennen läßt, steigt der Triggerimpuls in etwa 200 ns auf über 100 kV an. Dann erfolgt der Durchbruch der Vorfunkkenstrecke und an der Crowbarelektrode K tritt ein steiler Spannungsimpuls auf (unterer Strahl). Die an dieser Anordnung erreichte Triggerspan-

nungsamplitude von etwa 40 kV ermöglicht die Schaltung einer Strecke d von 12 mm.

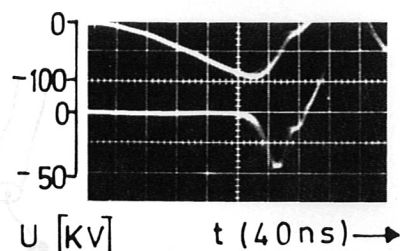


Abb. 15 Impulsverlauf vor (oben) und hinter (unten) der Aufsteilfunkenstrecke.

Für den Einsatz an der θ -Pinch-Batterie Isar IV wurde der Schalter in wesentlichen Punkten weiter verbessert.

Durch Wahl der optimalen Ferritsorte und feinere Unterteilung der Ringe (geringere Ringbreite) konnte zunächst die bei dem steilen Triggerimpuls starke Wirbelstromdämpfung wesentlich vermindert werden. Zusätzlich wurden Innen- und Außendurchmesser der Ringkerne um den Faktor zwei vergrößert, so daß sich bei gleicher Induktivität (pro Längeneinheit) der Kurzschlußleitung ein entsprechend größeres Ferritvolumen ergab⁺⁾ . Schließlich brachte die in [5] vorgeschlagene Methode der Vormagnetisierung der Ringkerne bis zur Sättigung mit $-\bar{\Phi}_S$ die Verdopplung des erreichbaren Spannungstoßes, gemäß:

$$\int_0^{t_s} U dt = -2 \cdot \bar{\Phi}_S \cdot$$

Dabei konnte der zur Vormagnetisierung notwendige Strom von etwa 50 A und geeigneter Polarität in einfacher Weise von dem Stoßstrom der Batterie abgezweigt werden.

⁺⁾ 35 Ringkerne 72 x 30 mm \emptyset , 5 mm Breite Siemens 0007-X026/N22.

Dies wird aus Abb. 16 deutlich, in der der schematische Aufbau eines der 2 x 48 Einzelstoßkreise der Stoßbatterie Isar IV dargestellt ist.

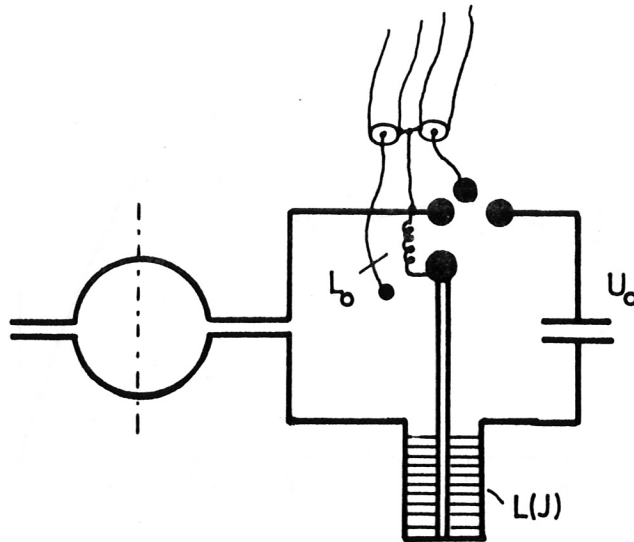


Abb. 16 Einzelstoßkreis der Theta-Pinch Batterie Isar IV.

Nach Zündung der Schaltfunkenstrecke S fließt ein geringer Bruchteil des Stoßstromes über die aus Widerstandsdraht gewickelte Spule L_0 durch den Innenleiter der Kurzschlußinduktivität $L(I)$. Bei geeigneter Dimensionierung von Induktivität L_0 und ohmschen Widerstand (in diesem Fall $40 \mu H$, 60Ω) nimmt dieser Strom im Bereich des Stoßstrommaximums gerade den geforderten Wert von etwa 50 A an.

Mit der in Abb. 17 dargestellten Anordnung läßt sich der Stoßstrom über eine Schaltstrecke d von maximal 22 mm kurzschließen. Im endgültigen Aufbau wurden die 96 Crowbarschalter auf 18 mm eingestellt, so daß die Schaltung aller Strecken mit genügend großer Sicherheit erfolgt. Zugleich liegt dieser Abstand hinreichend über dem zu 15 mm bestimmten Minimalwert, der nötig ist, um auch bei maximaler Arbeitsspannung von 40 kV das Vorzünden der Kurzschlußstrecken auszuschließen.

Abb. 17 zeigt den erhaltenen Verlauf des Stoßstromes nach Kurzschluß am Strommaximum.

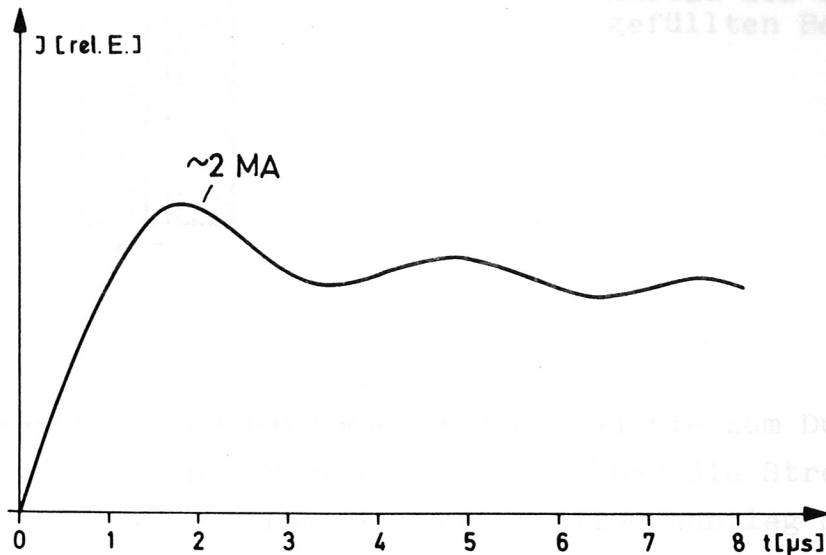


Abb. 17 Zeitlicher Verlauf des Stoßstromes.

Aus der Amplitude wie auch aus der Frequenz der Restwelligkeit des Kurzschlußstromes läßt sich sofort die Induktivität der Crowbarschalter abschätzen. Man erhält einen Wert von etwa 80 nH pro Schalter, so daß die Induktivität dieses Kurzschlußschalters nurmehr um den Faktor zwei über der einer normalen Schaltfunkenstrecke liegt.

Abschließend soll noch auf einige Punkte hingewiesen werden, die beim Aufbau des ferritentkoppelten Schalters zu beachten sind.

Dies ist zunächst die äußerst hohe Dielektrizitätskonstante ($\epsilon = 10^3 - 10^5$) des Ferritmaterials. Bei völliger Ausfüllung der Koaxialleitung mit Ferriten ergibt sich damit eine so hohe Querkapazität der Kurzschlußleitung, daß der ankommende Triggerimpuls weitgehend kurzgeschlossen wird.

Wie in Abb. 18 angedeutet, muß deshalb diese Kapazität durch den Zwischenraum δ so weit reduziert werden, daß sie keine wesentliche Belastung für den Wellenwiderstand z der Triggerleitung darstellt.

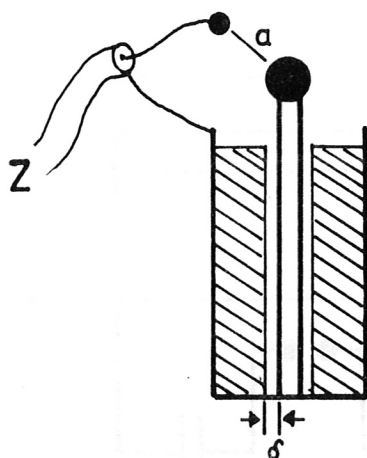


Abb. 18 Aufbau des ferrit-
gefüllten Bechers.

Als weiterer Punkt ist zu berücksichtigen, daß bis zum Durchbruch der Vorfunkstrecke ein Verschiebungsstrom über die Strecke a (Abb. 18) fließt. Dieser Strom kann bei steilem Anstieg des Triggerimpulses an der Vorfunkstrecke bereits zu einer teilweisen Sättigung der Ferrite führen. Um dies zu vermeiden, sollte die Anstiegszeit der Triggerspannung den aus Abb. 15 zu entnehmenden Wert von etwa 200 ns nicht wesentlich unterschreiten.

Die notwendige Begrenzung des Spannungsanstieges in der Triggerleitung bringt dabei den Vorteil mit sich, daß eine große Zahl von Crowbar-Schaltern aus einem nicht extrem induktivitätsarmen Triggerkreis versorgt werden kann.

Im vorliegenden Fall werden jeweils 48 Triggerkabel durch einen zweistufigen Marxgenerator aufgeladen, dessen Aufbau in Abb. 19 schematisch wiedergegeben ist.

Bei einer Stoßspannung von 80 kV läßt sich am zunächst offenen Ende der 10 m langen Triggerleitungen eine Spannungsamplitude von weit über 100 kV erreichen. Die auftretenden hohen Spannungsspitzen erfordern sehr spannungsfeste Kabel⁺⁾ sowie eine genügende Abisolierung des Innenleiters an den Kabelenden ($C \approx 40$ cm). Die Verwendung von Kunstharz-Endverschlüssen erwies sich jedoch als überflüssig.

^{+) 60 Ω - Koaxialkabel, Hackethal HFE 3,9/17,3.}

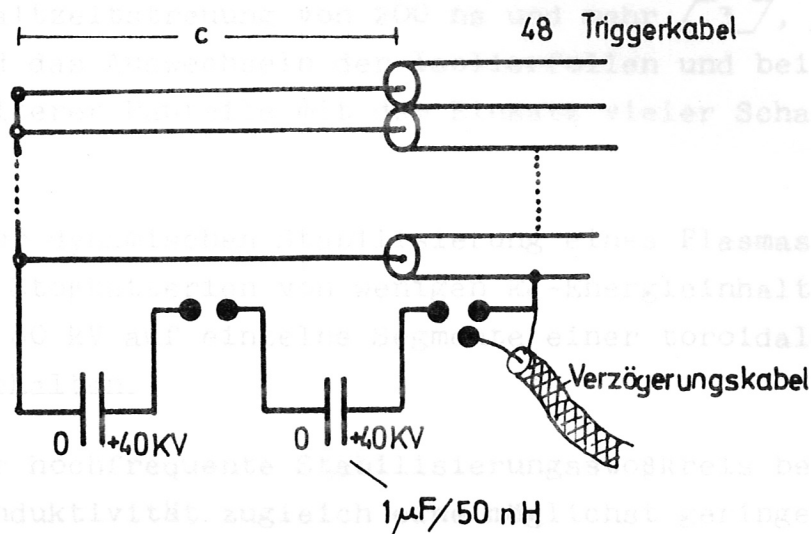


Abb. 19 Triggerkreis für die Crowbar-Anordnung an Isar IV.

In der beschriebenen Form arbeitet die Crowbaranlage an Isar IV zu mehreren tausend Entladungen ohne einen Ausfall und ohne Wartung.

3. Folienschalter

Im Spannungsbereich um 40 kV lassen sich mit offenen Funkenstrecken Schalterinduktivitäten von 40 nH kaum unterschreiten. Bei Betrieb unter Überdruck von einigen Atmosphären liegt die Induktivität einer längsgetriggerten Schaltfunkenstrecke jedoch noch bei Arbeitsspannungen von 100 kV in der genannten Größenordnung. Die Verwendung eines festen Dielektrikums gibt schließlich die Möglichkeit, einen extrem induktivitätsarmen Schalter auch für höchste Spannungen aufzubauen.

Derartige Folienschalter besitzen als weiteren Vorteil einen sehr geringen ohmschen Widerstand und können auch ohne anliegende Spannung geschaltet werden. Sie eignen sich daher insbesondere für Crowbarschaltungen [3], [4].

Der wesentliche Nachteil des Folienschalters liegt jedoch in der großen Schaltzeitstreuung von 200 ns und mehr [3], [4]. Weiterhin wird das Auswechseln der Isolierfolien und bei hohen Stoßströmen weiterer Bauteile mit dem Einsatz vieler Schalter sehr aufwendig.

Versuche zur dynamischen Stabilisierung eines Plasmas machen es notwendig, Stoßbatterien von wenigen kJ-Energieinhalt bei Ladespannungen bis 80 kV auf einzelne Segmente einer toroidalen θ -Pinch-Spule zu schalten.

Da der sehr hochfrequente Stabilisierungsstoßkreis bei sehr geringer Eigeninduktivität zugleich eine möglichst geringe Dämpfung aufweisen soll, schien der Folienschalter auch hier ein geeignetes Schaltelement zu sein.

Als Voraussetzung für den Einsatz dieses Schalters mußte jedoch eine Schaltzeitstreuung erreicht werden, die klein gegen die angestrebte Dauer der Viertelperiode der HF-Entladung von 100 - 200 ns war.

Zu diesem Zweck wurde ein Folienschalter nach dem zuvor diskutierten Prinzip einer längsgetriggerten Funkenstrecke entwickelt, der bei Schaltzeiten von 20 - 100 ns einen Streubereich von weniger als 10 ns aufweist. Im Folgenden soll über die an diesem ersten Probemuster gewonnenen Meßresultate berichtet werden.

Eine Voruntersuchung mit den zur Verfügung stehenden Isoliermaterialien hatte gezeigt, daß bestimmte Kunststoff-Folien (Mylar, Makrofol) in Stärken von 50 - 130 μ elektrische Feldstärken von über 400 kV/cm halten. Bei sehr steil ansteigenden Spannungsimpulsen tritt dagegen in äußerst kurzer Zeit ein Durchbruch bei weit geringeren Feldstärken ein.

Mit dieser Eigenschaft sollten sich die genannten Isolationsfolien besonders gut als Dielektrikum in einem Folienschalter eignen, der nicht wie in den zitierten Arbeiten durch mechanische Zerstörung sondern durch Überspannungsdurchschlag des Dielektrikums geschaltet wird.

Während der erstgenannte Schaltmechanismus der Quertriggerung einer Funkenstrecke gleichzusetzen ist, entspricht der zweite Fall genau einer längsgetriggerten Schaltfunkenstrecke. Demzufolge konnten in diesem zweiten Fall auch die günstigen Schalteigenschaften der Längstriggerung erwartet werden.

Bei dem ersten Versuchsaufbau erwies sich zunächst der extrem hohe Oberflächenwiderstand von Mylar oder Makrofol als äußerst nachteilig. Er führte beim Anlegen einer Arbeitsspannung von 40 kV bereits zu Außenüberschlägen über Folienstrecken von 50 cm und mehr. Durch das in Abb. 20 gezeigte Umgießen der Elektrodenplatten mit Silikonkautschuk konnte dieses Problem jedoch gelöst werden.

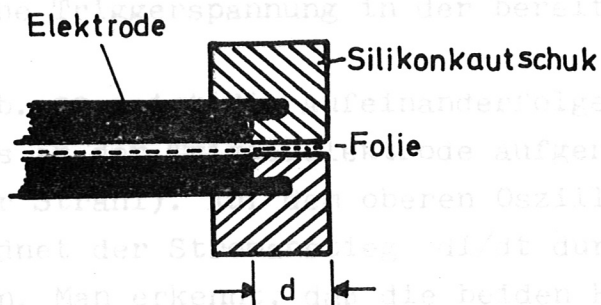


Abb. 20

Gleitentladungsschutz am Folienschalter.

Wird der Kautschukring gut auf die Folien aufgepreßt, so reicht ein Isolationsweg d von weniger als 5 cm zur Isolation einer Arbeitsspannung von 80 kV aus. Die gesamte Anordnung des verwendeten Folienschalters ist in Abb. 21 schematisch dargestellt.

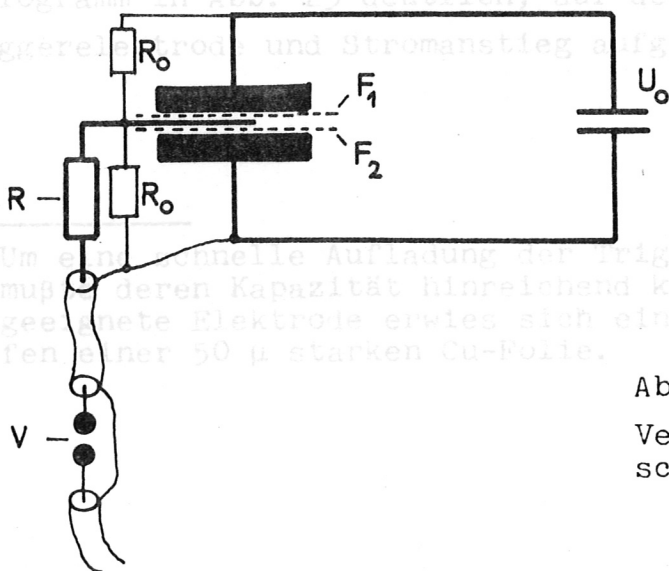


Abb. 21

Versuchsaufbau des Folienschalters.

Zwischen zwei Metallplatten liegen zwei Isolationsfolien als Dielektrikum. Zwischen den beiden Folien befindet sich die Trigger-
elektrode, die durch die Widerstände R_0 auf ein halbes Potential vorgespannt ist. Die Zündung des Folienschalters erfolgt durch einen Triggerimpuls mit zur Arbeitsspannung entgegengerichteter Polarität. Dieser Impuls wird an der Vorfunkstrecke V (Durchbruchsspannung 100 kV) aufgestellt und der Trigger-
elektrode über den Widerstand R (300Ω) zugeführt.

Während der Umladung der Trigger-
elektrode von $U_0/2$ in Richtung des entgegengesetzten Potentials tritt der Durchbruch der Folie F_1 ein. Im Anschluß daran erfolgt der zweite Durchschlag durch F_2 . Die schnelle Folge dieses weiteren Durchschlags wird allerdings erst durch den Vorwiderstand R ermöglicht, der die hier äußerst hohe Triggerspannung in der bereits erläuterten Weise abkoppelt.

Abb. 22 zeigt die Aufeinanderfolge der beiden Durchschläge anhand des an der Trigger-
elektrode aufgenommenen Spannungsverlaufs (unterer Strahl). Auf dem oberen Oszillographenstrahl ist zeitlich zugeordnet der Stromanstieg dI/dt durch den Folienschalter wiedergegeben. Man erkennt, daß die beiden Foliendurchschläge (markiert durch Pfeile) in dem äußerst kurzen Zeitraum von etwa 100 ns eintreten. Dabei lag die stationäre Durchbruchsspannung der Folien mit etwa 90 kV wesentlich über der verwendeten Arbeitsspannung von 35 kV.

Geht man mit der Arbeitsspannung dichter an die Durchbruchsspannung des Schalters, so läßt sich erreichen, daß beide Durchschläge (F_1 und F_2) praktisch gleichzeitig erfolgen. Dies wird aus dem Oszillogramm in Abb. 23 deutlich, auf dem wieder Spannung an der Trigger-
elektrode und Stromanstieg aufgezeichnet sind.

+) Um eine schnelle Aufladung der Trigger-
elektrode zu erhalten, mußte deren Kapazität hinreichend klein gehalten werden. Als geeignete Elektrode erwies sich ein etwa 1 mm breiter Streifen einer 50μ starken Cu-Folie.

In diesem Fall ist keine Umladung der Triggerelektrode sichtbar und der vollständige Durchschlag tritt in etwa 30 ns ein.

Die Anordnung ein...
 mit einer...
 zu...
 Abb. 24 Schalt...
 Arbeitsspannung

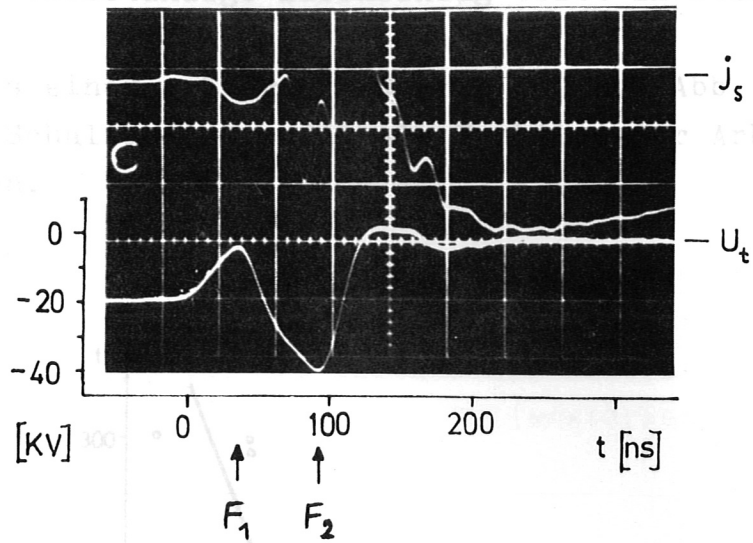


Abb. 22 Zündung des Folienschalters
 ($U_0 = 35 \text{ kV}$, $2 \times 130 \mu \text{ Mylar}$).

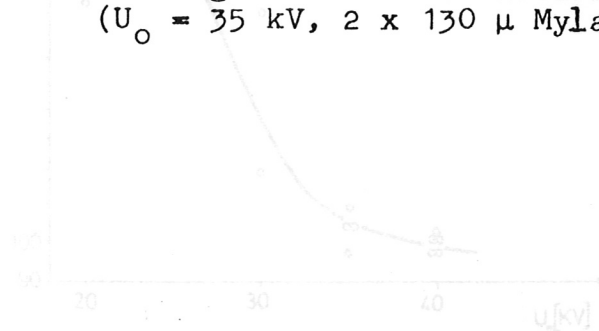


Abb. 24

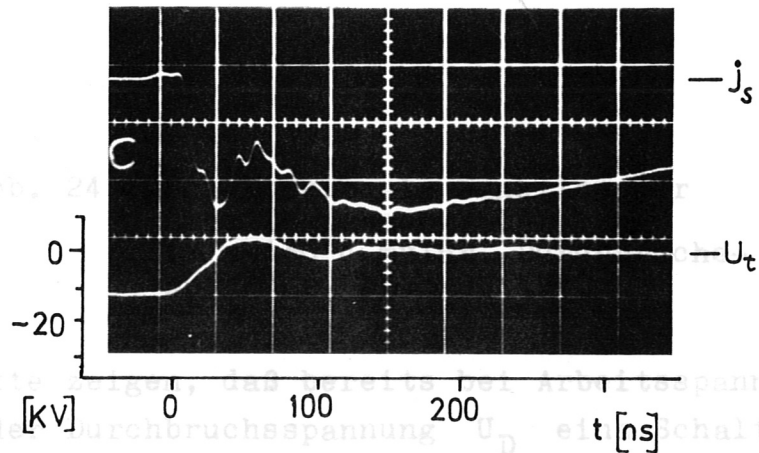


Abb. 23 Zündung des Folienschalters
 ($U_0 = 35 \text{ kV}$, $2 \times 55 \mu \text{ Makrofol}$).

Die Meßpunkte zeigen, daß bereits bei Arbeitsspannungen von etwa 40 % der Durchbruchspannung U_D eine Schaltzeit von 100 ns und eine Schaltzeitstreuung von etwa 10 ns erreicht wird. Damit ist dieser Folienschalter hinsichtlich seiner Schalteigenschaften...
 zusetzen.

In diesem Fall ist keine Umladung der Triggerelektrode sichtbar und der vollständige Durchschlag tritt in etwa 30 ns ein.

Als Ergebnis einer größeren Meßserie ist aus Abb. 24 Schaltzeit sowie Schaltzeitstreuung als Funktion der Arbeitsspannung zu entnehmen.

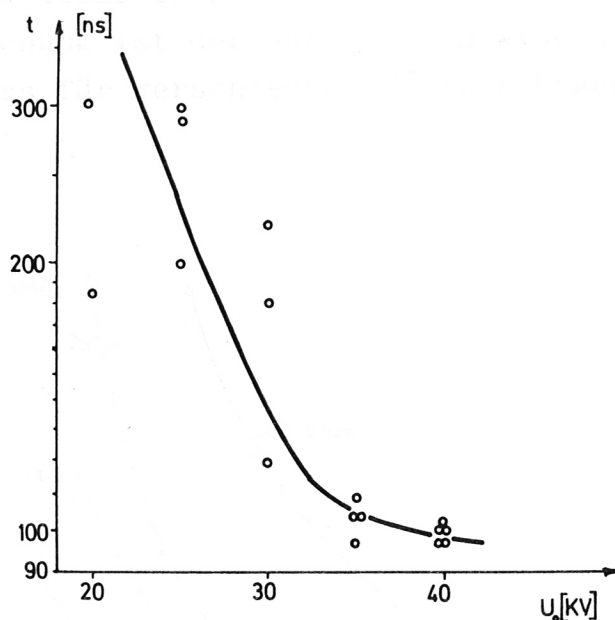


Abb. 24 Schaltzeit als Funktion der Arbeitsspannung U_0 .
(2 x 130 μ Mylar, Durchbruchspannung $U_D \approx 90$ kV).

Die Meßpunkte zeigen, daß bereits bei Arbeitsspannungen von etwa 40 % der Durchbruchspannung U_D eine Schaltzeit von 100 ns und eine Schaltzeitstreuung von etwa 10 ns erreicht wird. Damit ist dieser Folienschalter hinsichtlich seiner Schalteigenschaften einer normalen Schaltfunkenstrecke gleichzusetzen.

Die Induktivität des Schalters läßt sich praktisch kaum messen. Bei einer Schaltstrecke von weniger als 300 μ dürfte sie nach einfacher Abschätzung jedoch noch unter 1 nH liegen. Mit diesem Wert kann der bei 80 kV betriebene Folienschalter etwa 100 offene oder 50 Druckfunkenstrecken ersetzen.

Für den geplanten Verwendungszweck ist neben Induktivität und Schalteigenschaften der ohmsche Widerstand des Schalters von Bedeutung. Durch Messung von Stoßstrom und Spannungsabfall an der Schaltstrecke wurde diese Größe experimentell bestimmt. Als Resultat dieser Untersuchung ist der Verlauf des Widerstandes als Funktion des Stoßstromes für verschiedene Foliendicken in Abb. 25 aufgetragen.

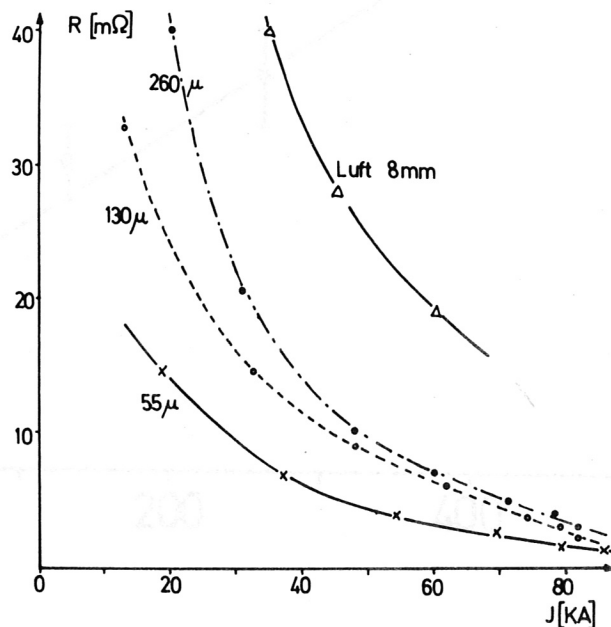


Abb. 25 Widerstand als Funktion des Stoßstromes.

Der Vergleich mit dem gleichfalls eingezeichneten Widerstand einer unter Atmosphärendruck betriebenen Schaltfunkenstrecke zeigt, daß insbesondere bei geringen Folienstärken erheblich kleinere Widerstandswerte erreicht werden.

Die Zunahme des ohmschen Widerstandes des Folienschalters als Funktion der Folienstärke ist aus Abb. 26 zu erkennen.

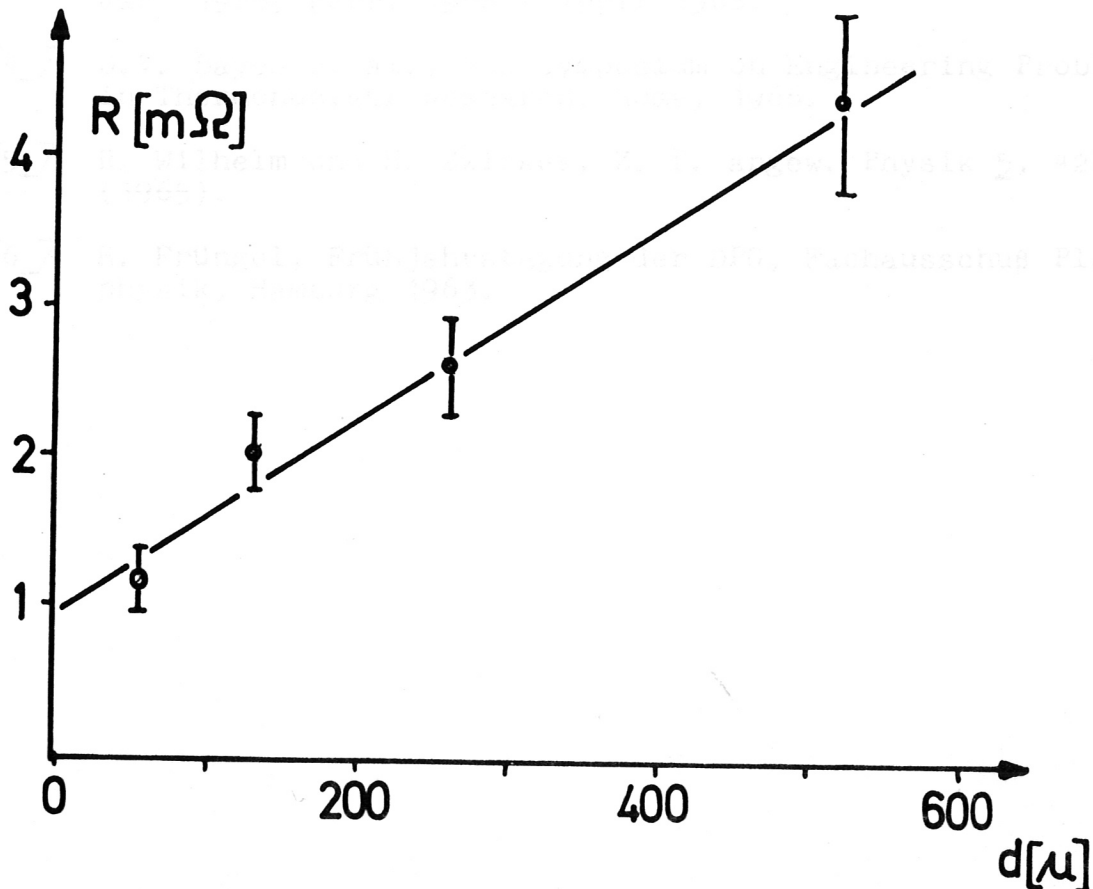


Abb. 26 Widerstand als Funktion der Folienstärke (Stoßstrom 80 kA).

Die Meßkurve, aufgenommen für einen Stoßstrom von 80 kA, zeigt die etwa lineare Zunahme des Schalterwiderstandes mit der Folienstärke. Extrapoliert man die Kurve auf die Folienstärke Null, so bleibt ein Restwiderstand. Diese Größe R_0 ist offenbar als Übergangswiderstand an den Oberflächen der Elektroden des Folienschalters zu deuten.

Literatur

- [1] M. Kaufmann und H. Zwicker, Z. f. Physik 180, 255 (1964).
- [2] M.P. Young, 3rd. Symposium on Engineering Problems in Thermonuclear Research, München 1964.
- [3] Finlayson et al., Los Alamos, Quarterly Report, Nov. 1967 - Jan. 1968, Febr. 1968 - April 1968.
- [4] D.V. Bayes et al., 4th Symposium on Engineering Problems in Thermonuclear Research, Rome, 1966.
- [5] R. Wilhelm und H. Zwicker, Z. f. angew. Physik 5, 428 (1965).
- [6] H. Früangel, Frühjahrstagung der DPG, Fachausschuß Plasma-physik, Hamburg 1963.