

15 kV Triggergerät mit Funkenstrecke

A 15 kV Trigger-Generator with
Spark Gap

R.C. Kunze, E.v.Mark

IPP 4/43

Juni 1967

I N S T I T U T F Ü R P L A S M A P H Y S I K

G A R C H I N G B E I M Ü N C H E N

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

IPP 4/43

R.C. Kunze,

A 15 kV Trigger-Generator

GARCHING BEI MÜNCHEN

June, 1967 (in German)

15 kV Triggergerät mit Funkenstrecke

Abstract:

A 15 kV Trigger-Generator with
Spark Gap

R.C. Kunze, E.v.Mark

In the field of power discharges, for many applications (e.g. triggering of spark gaps or kerr-cells), fast rising, low jitter high voltage pulses are needed. This report describes a developed pulse generator which satisfies the above requirements and, in addition, is unaffected by voltage transients and has a long life.

IPP 4/43

Juni 1967

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.

June, 1967 (in German)

Abstract:

In the field of power discharges, for many applications (e.g. triggering of spark gaps or kerr-cells), fast rising, low jitter high voltage pulses are needed. This report describes a new developed pulse generator which satisfies the above requirements and, in addition, is unaffected by voltage transients and has a long life.

In der Leistungsimpulstechnik wird für viele Anwendungszwecke (z.B. zum Ansteuern von Funkenstrecken oder Kerrzellen) ein Spannungsimpuls möglichst großer Steilheit und kleiner Streuung benötigt. Der vorliegende Bericht beschreibt ein neuentwickeltes Gerät, daß neben den obigen Forderungen auch eine große Rückspannungsfestigkeit und eine hohe Lebensdauer hat.

1) Einleitung

Im IPP wurden bisher zum Ansteuern von Funkenstrecken vorwiegend 14 kV-Triggergeräte eingesetzt, bei denen die Charakteristik und Streuung des abgegebenen Impulses durchaus den Anforderungen genügten (Bild 2). Lediglich die Empfindlichkeit gegen einlaufende Störspannungen führte in vielen Fällen zu Selbstzündungen, die bei den meisten Experimenten unerwünschte Fehlentladungen zur Folge haben. Der Grund dafür liegt in dem geringen Abstand zwischen der Haltespannung des eingebauten Thyatron PL 522 und der Arbeitsspannung von 14 kV. Schon geringe Störspannungsimpulse, die sich der Anodenspannung überlagern (vgl. Bild 1) führen dann zu Selbstzündungen. Eine Abhilfe wurde durch Entkopplungselemente geschaffen (Funkenstrecken, Gasentladungsstrecken) die in Serie zum Ausgang der Geräte geschaltet werden (s. IPP Bericht 4/37).

Es war nun naheliegend, Funkenstrecken die als Entkopplungselement eingesetzt sind, direkt als Schalter zu benutzen. Die Vorteile liegen besonders darin, daß der Aufbau niederinduktiver gestaltet werden kann und damit ein steilerer Anstieg des Pulses erreicht wird. Ausserdem kann die Polarität des Pulses beliebig gewählt werden und ist nicht durch die bei Erde liegende Kathode des Thyatrons bestimmt.

2) Aufbau

Das Gerät setzt sich aus 4 Bausteinen zusammen, von denen jedes in einem 1/4 Einschub (19" rack) untergebracht ist (vgl. Bild 3). Baustein 1, ein übliches Zeitverzögerungsgerät, wird nur zum Triggern des Bausteins 2, einem herkömmlichen 7,5 kV Triggergerät, benutzt. Baustein 3 enthält das eigentliche 15 kV Triggergerät,

bestehend aus einer Vierelektroden Funkenstrecke, den beiden Puls-kondensatoren und den Steuerwiderständen (vgl. Abb. 4). Um einen induktivitätsarmen Aufbau mit entsprechend steilem Spannungsanstieg zu erhalten, sind die Kondensatoren mit der Funkenstrecke coaxial in einem Rohr untergebracht. In Baustein 4 befindet sich das Speisegerät, das sowohl das 7,5 kV Gerät, wie das 15 kV Triggergerät versorgt. Der Gleichrichter ist eine Greinacher-Kaskade (vgl. Abb. 6) und liefert -6, +6 und +9 kV. Der Netztrafo ist für 6 kVeff zwischen Primär- und Sekundärseite, sowie gegen Masse isoliert.

3) Wirkungsweise und Einstellung

Abb. 6 zeigt das Prinzipschaltbild der Funkenstrecke. Es müssen generell zwei Betriebsphasen unterschieden werden. Im stationären Fall, wenn die Funkenstrecke betriebsbereit ist, sind die Kondensatoren C_1 und C_2 so aufgeladen, daß an der Elektrode A +9 kV und an der Elektrode C -6 kV liegen. Die Mittelelektroden B und D sind über Widerstände bzw. den Pulstrafo an Masse gelegt. Die Elektrode D besteht aus einer feinen Spitze, die im Feldschatten der Elektrode B liegt. Beide Elektroden gemeinsam stellen wegen ihrer kleinen Abmessungen nur eine geringe Feldverzerrung des Hauptfeldes dar, da sie fast eine Äquipotentialfläche bilden. So wird die statische Einstellung wie folgt vorgenommen:

$$\begin{aligned} A - B &: 12.5 \text{ kV} \\ B - C &: 7.5 \text{ kV} \\ B - D &: 1 - 1,5 \text{ kV} \end{aligned}$$

Dann ergibt sich für die Durchbruchspannung von A nach C über B eine Haltespannung von 25 kV. Dies ist also nicht die Summenspannung $A \rightarrow B + B \rightarrow C$, bei denen jeweils der kleine Krümmungsradius der Elektrode B wirksam ist, sondern wird von den größeren Elektrodenradien A und C bestimmt, wobei B lediglich eine geringe Absenkung der Durchbruchspannung bewirkt, da sie auf einer Äquipotentialfläche liegt und nur durch ihre endliche Ausdehnung das Feld etwas verzerrt.

Soll nun die Funkenstrecke gezündet werden, so wird der Impuls des 7,5 kV-Geräts über einen Impulstrafo an die Elektrode B gege-

ben. Die Elektrode B fährt entsprechend dem Puls negativ, der Potentialunterschied zu A wird größer, der zu C kleiner. Elektrode D verharrt zunächst noch bei der Spannung Null. Bei ca. 4 kV (Abb. 7, Spur 1) bricht die Strecke B - D durch, der von B nach D fließende Strom wird jedoch durch einen Widerstand von $4,4 \text{ k}\Omega$ begrenzt. Diese Vorfunkkenstrecke hat lediglich die Aufgabe Ladungsträger für die beiden Schaltstrecken AB und BC zu erzeugen, ihr Strom ist daher von untergeordneter Bedeutung. Dagegen bewirken die Strombegrenzungswiderstände, daß der Triggerpuls nicht zusammenbricht und die beiden Elektroden B und D seinem Verlauf gemeinsam folgen (Abb. 7 Spur 2). Die Zündstrecke dieser Glimmstrecke ist in gewissen Grenzen unwichtig, da sie lange vor dem Schaltzeitpunkt der übrigen Strecken gezündet hat.

Der weitere Verlauf des Zündvorgangs läßt sich aus dem Diagramm der Stoßfaktoren (vgl. Abb. 8) erkennen. Bei Erreichen der Durchbruchspannung B - A ist die Spannung zwischen C und B gerade bei etwa Null. Nach der Zündung B - A fährt die Elektrode B schnell auf positives Potential, hier sind die Dämpfungswiderstände von D erneut wichtig, und bricht dann bei etwa +3 kV (vgl. Abb. 7, Spur 2) nach C durch. Damit ist die gesamte Funkenstrecke geschlossen. Die Impulskondensatoren C_1 und C_2 entladen sich über den Ausgangswiderstand ($20 \Omega + 30 \Omega$) und am Eingang des Triggerkabels ($> 10 \text{ m}$) steht der Zündimpuls an.

4) Meßergebnisse

Mit der Meßanordnung nach Abb. 9 wurden am Ausgang des Triggerkabels Jitter, Anstieg und Pulshöhe gemessen. Aus den Oscillogrammen (vgl. Abb. 10 und 11) ergeben sich folgende Werte:

| | |
|----------------------------|----------------------|
| Scheitelspannung der Pulse | $U = -24 \text{ kV}$ |
| Jitter bei 50 Entladungen | 5 ns total |
| Anstieg 10 - 90% | 15 ns |
| Durchlaufverzögerung | 50 ns |

Bei diesen Messungen blieben, wie die Schaltung Abb. 9 zeigt, Jitter und Durchlaufverzögerung der 7,5 kV-Vorstufe unberücksichtigt. Aus den Oscillogrammen (vgl. Abb. 12 und 13) ergeben sich dafür

folgende charakteristische Werte:

| | |
|----------------------------|------------|
| Scheitelspannung der Pulse | 7,5 kV |
| Jitter bei 50 Entladungen | 3 ns total |
| Anstieg 10 - 90% | 11 ns |
| Durchlaufverzögerung | 230 ns |

5) Rückspannungsfestigkeit

Unter Rückspannung soll die Spannung verstanden werden, die als Störimpuls vom Verbraucher, also vom Triggerkabelende über das Triggerkabel in den Generator läuft. Bei betriebsbereitem Gerät überlagert sich dieser Impuls der an der Funkenstrecke anliegenden Spannung und darf nicht zum Durchbruch führen.

Gemäß der in Abschnitt 3 dargestellten Wirkungsweise der Funkenstrecke wurde daher der Ausgangswiderstand so aufgeteilt, daß die Mittelelektroden B und D auf der entsprechend den Teildurchbruchspannungen liegenden Äquipotentialfläche dem Störimpuls folgen und damit wieder die Hauptelektroden A und C mit ihren großen Elektrodenradien für die Durchbruchspannung (25 kV) bestimmend sind.

Ausserdem wurde der Ausgangswiderstand dem Zündkabel angepaßt (50Ω), so daß keine Spannungsüberhöhungen durch Reflektionen am Kabelende, also am Ausgang des Generators, auftreten können. Versuche mit Rückspannungsimpulsen in einer Anordnung nach Abb. 12 ergaben, daß Spannungsimpulse bis +9 kV gehalten werden (vgl. Abb. 13). Bei negativer Polarität ist das Verhalten noch weit günstiger, da dann die Spannung über der Funkenstrecke abgebaut wird.

6) Ergebnis

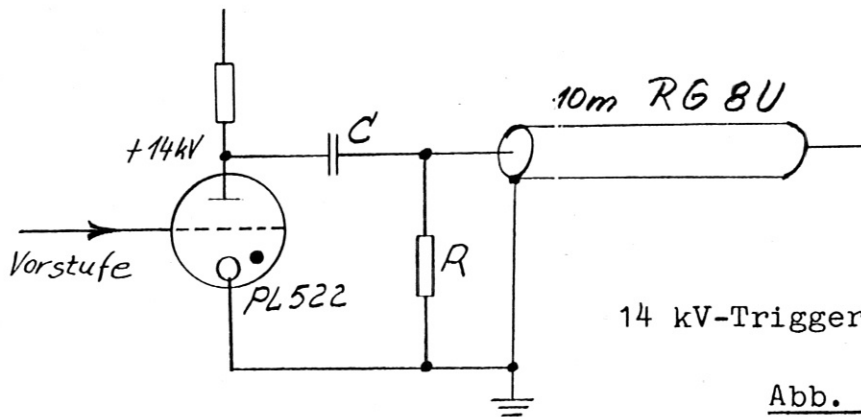
Als Ersatz für das bisher eingesetzte 14 kV-Triggergerät mit Thyatron PL 522 wurde ein Gerät mit Funkenstrecke entwickelt. Die Funkenstrecke wurde einem Dauertest von 30 000 Entladungen unterzogen und änderte dabei ihre Eigenschaften nicht. In der folgenden Tabelle sind die charakteristischen Werte des neuen Gerätes eingetragen und zum Vergleich diejenigen des 14 kV-Generators mit Thyatron hinzugefügt, soweit sie gemessen wurden.

| | 14 kV-Gerät mit Thyatron PL 522 | 15 kV-Gerät mit Funken- strecke |
|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Arbeitsspannung (kV) statisch | +14 | +9, - 6 |
| Ausgangsspannung (kV) am Triggerkabel | -22,5 kV | -24 kV |
| Anstieg (ns) 10-90% | 28 | 15 |
| Jitter (ns) total | 3 | < 5 |
| Rückspannungsfestigkeit (kV) | +1,4 | +9 |
| Lebensdauer (Pulse) | | > 30 000 ⁺⁺ |
| Durchlaufverzögerung (ns) | 395 | 50 ⁺ |

+) ohne 7,5 kV-Vorstufe, deren Durchlaufverzögerung 230 ns beträgt.

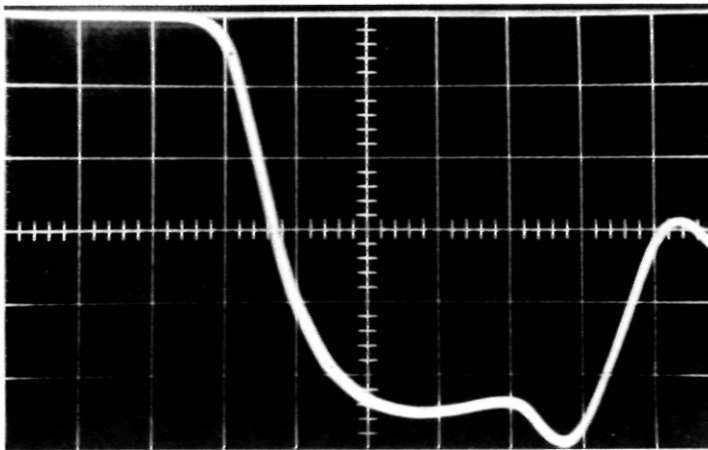
++) wurde mit der Funkenstrecke jedoch noch mit anderen Impuls-kondensatoren durchgeführt.

Abschließend soll noch bemerkt werden, daß das Gerät ohne Schwierigkeiten auch zur Erzeugung positiver Pulsspannungen eingesetzt werden kann. Es ist dann nur erforderlich Mantel und Seele des Triggerkabels zu vertauschen.



14 kV-Triggergerät Ausgangsstufe

Abb. 1



Puls aus dem 14 kV Triggergerät

20 ns/E; 4 kV/E;

10 Pulse.

U : 22,5 kV;

Jitter: 3 ns;

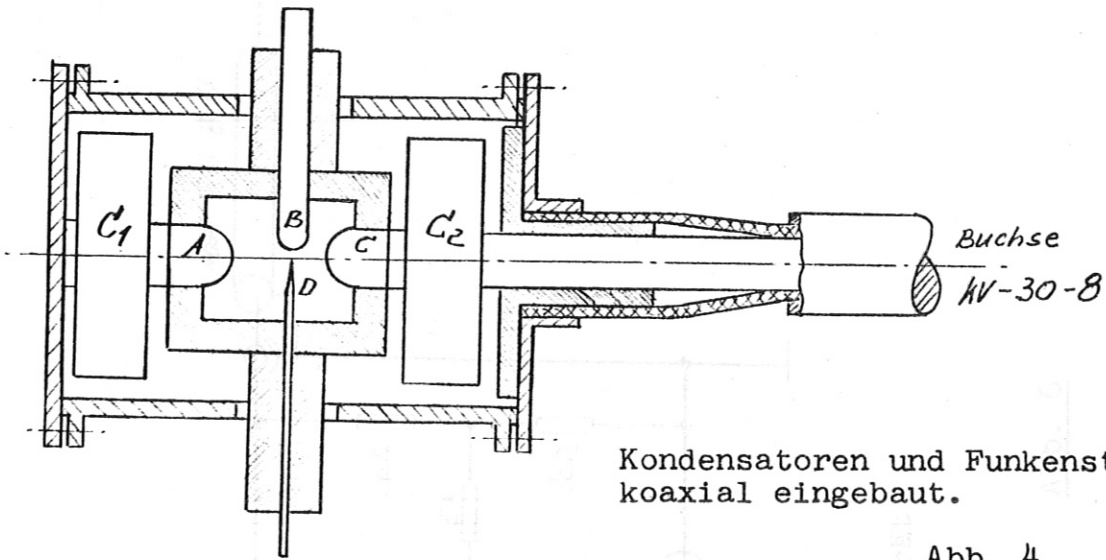
Anstieg: 28 ns;

Abb. 2



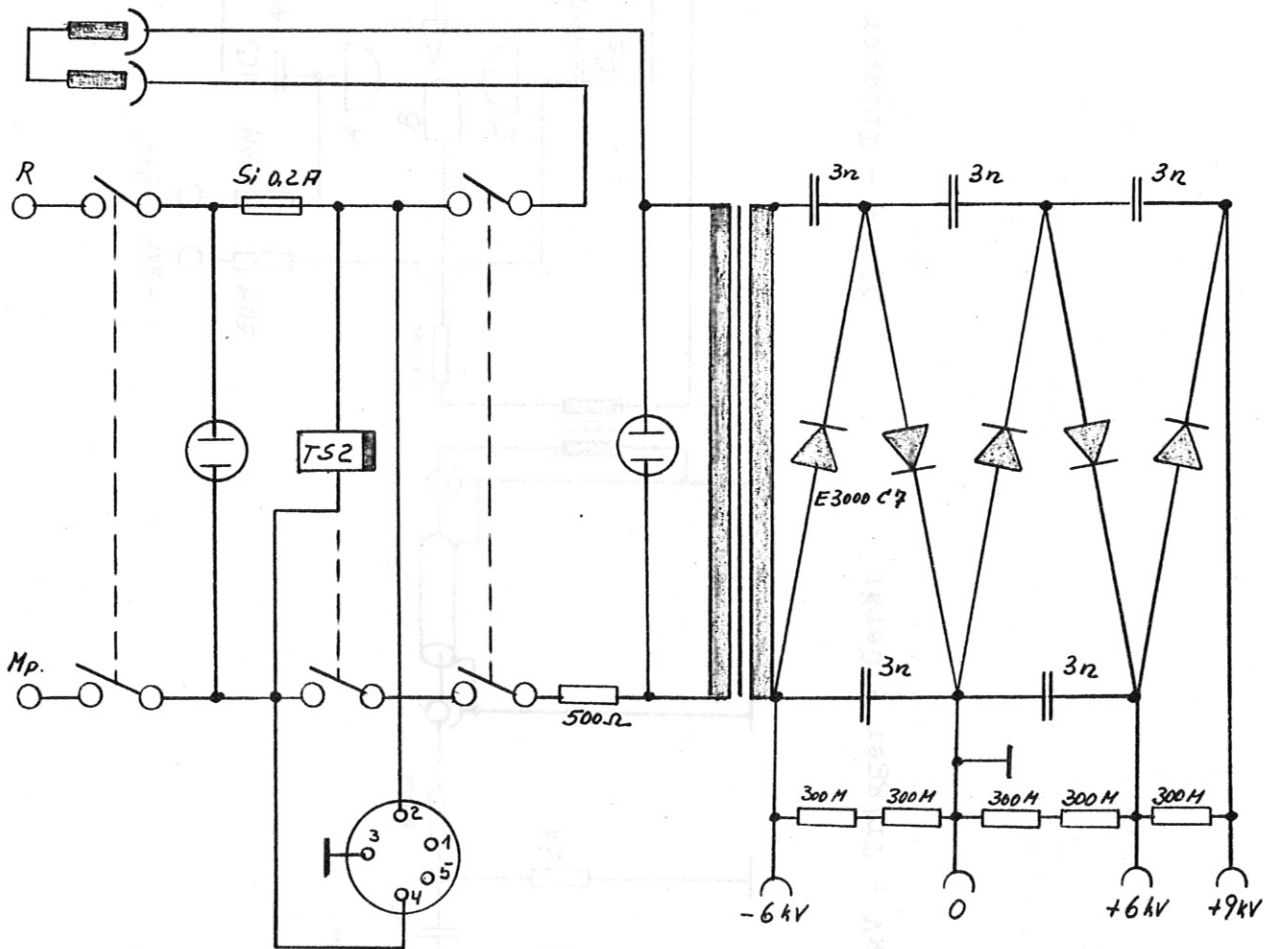
Aufbau des
15 kV Triggergerätes

Abb. 3



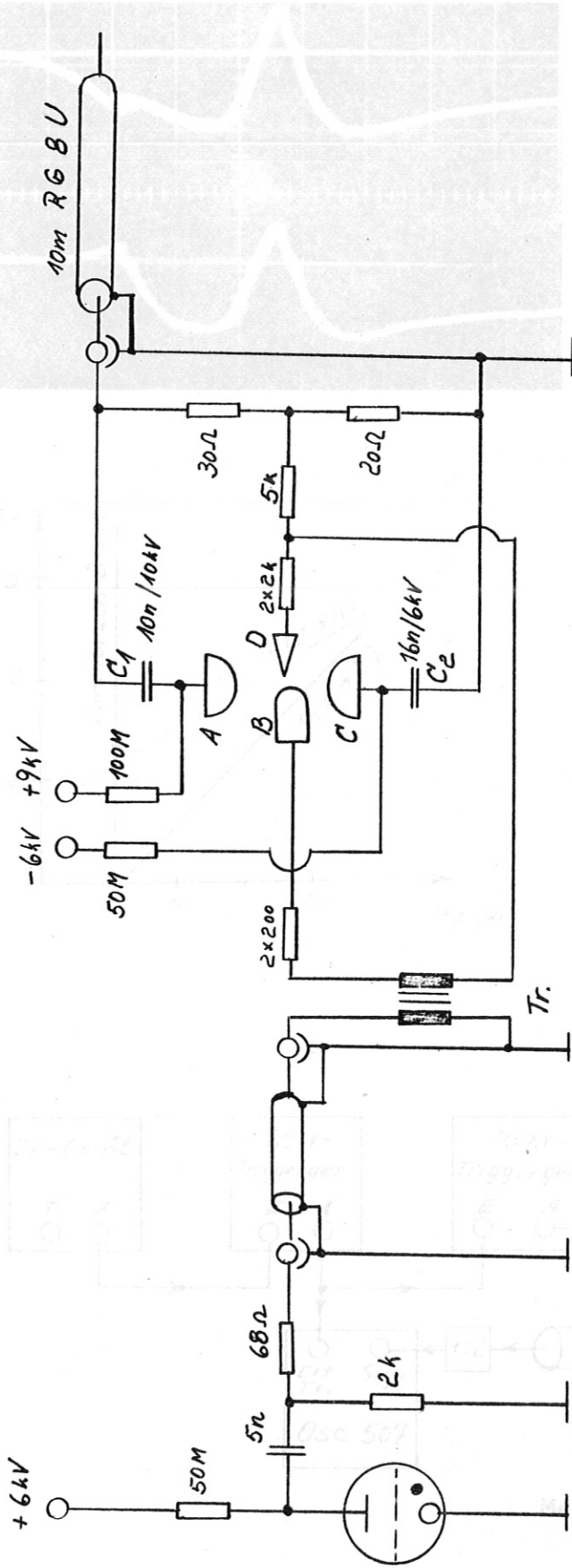
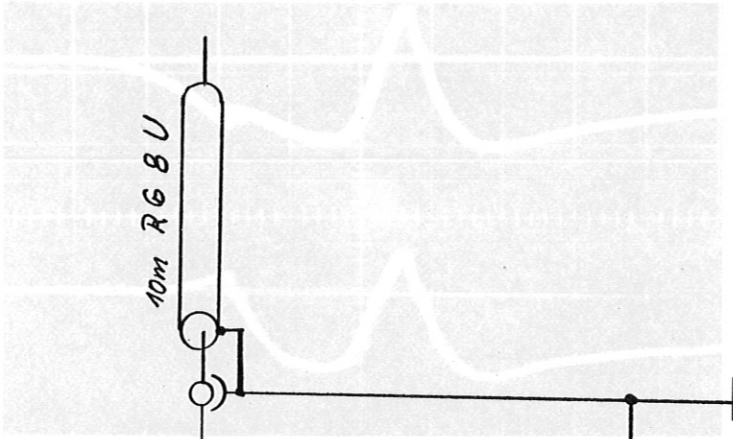
Kondensatoren und Funkenstrecke
koaxial eingebaut.

Abb. 4



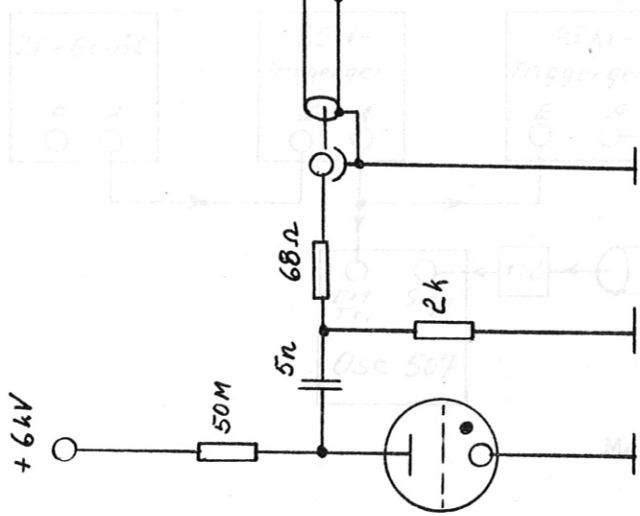
Spisegerät.

Abb. 5



15 kV - Trigger - Gerät

Abb. 6



7,5 kV - Trigger - Gerät

Abb. 9

Spannung an Elektrode B
 Spannung an Elektrode D
 10 μs
 10 μs

$(B-A) \cdot A$
 $(B-C)$
 von B in Momentanwert für Spannung an B ($\frac{1}{2}$)

$$\frac{100 - 1100}{100(10-1)}$$

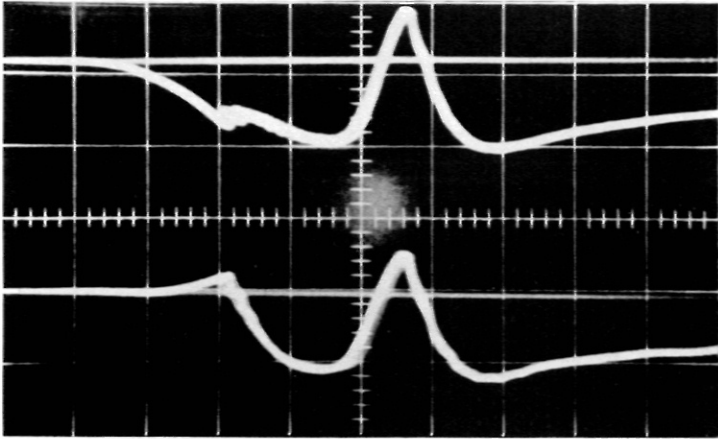
$$\frac{100 - 1100}{100(10+1)}$$

Abb. 7

10m R G B U

$$= 75 \Omega$$

ManorCing

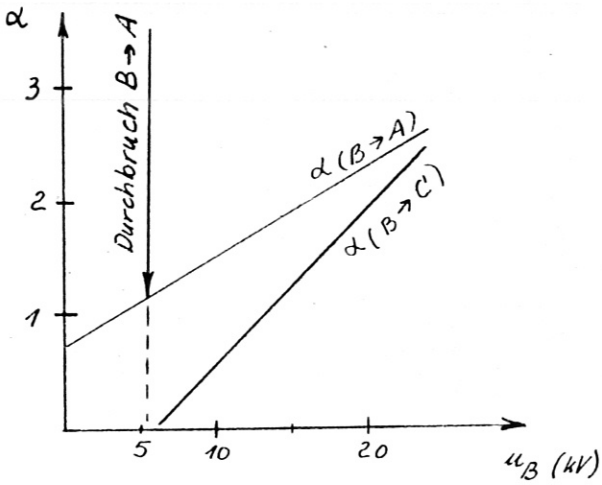


Spur 1
Spannung an Elektrode B

Spur 2
Spannung an Elektrode D

je Spur 10 Pulse
20 ns/E; 4,5 kV/E;

Abb. 7

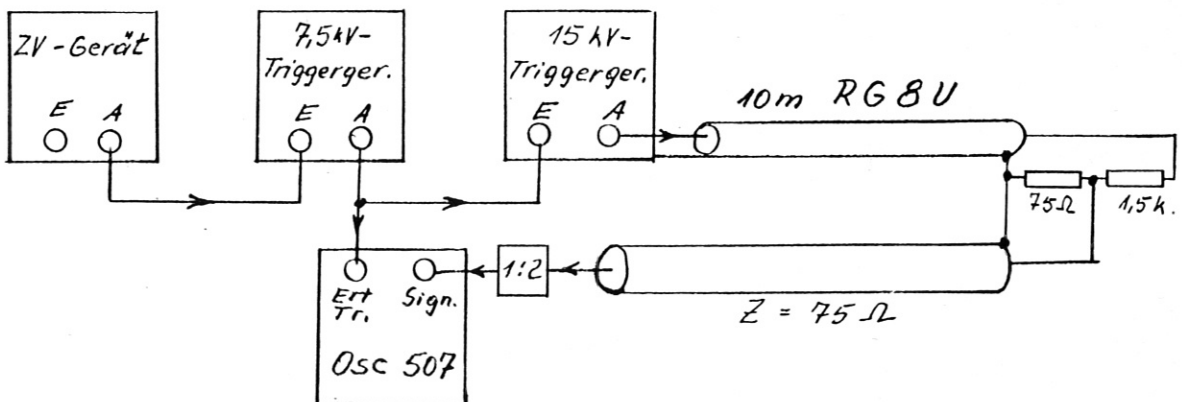


Stoßfaktor $\alpha_{(B-A)}$ u. $\alpha_{(B-C)}$
abhängig von dem Momentanwert der Spannung an B (u_B)

$$\alpha_{(B \rightarrow A)} = \frac{u_B - U_{C1}}{U_D(B \rightarrow A)} ;$$

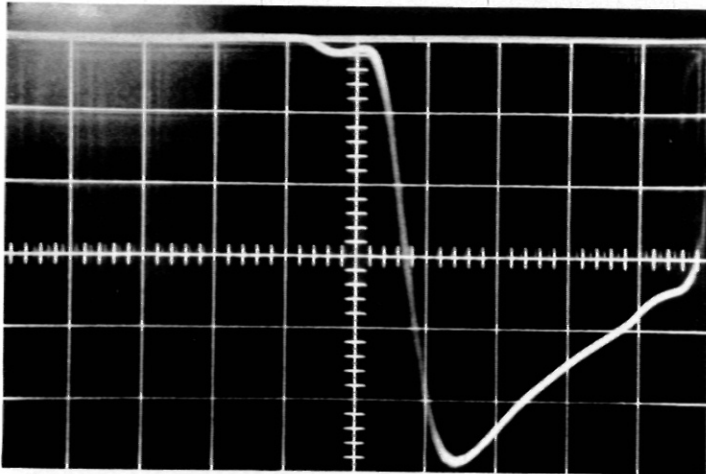
$$\alpha_{(B \rightarrow C)} = \frac{u_B - U_{C2}}{U_D(B \rightarrow C)} ;$$

Abb. 8



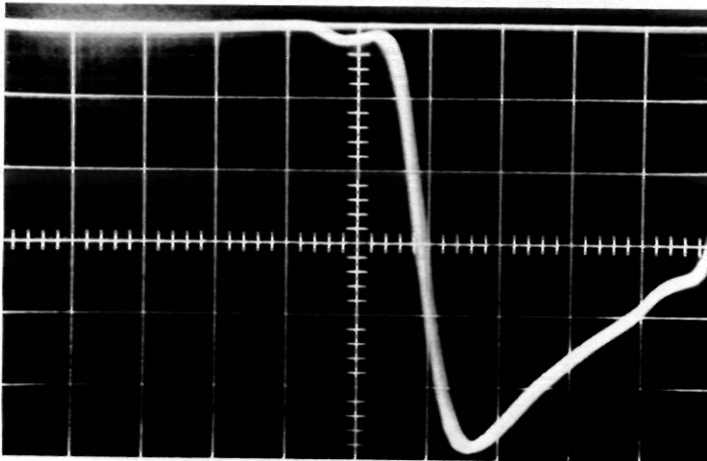
Meßanordnung

Abb. 9



Puls am Kabelende
20 ns/E; 4 kV/E
10 Pulse
U : 24 kV
Anstieg: 15 ns

Abb. 10



Puls am Kabelende
20 ns/E; 4 kV/E
50 Pulse
Jitter: 4 ns abs.

Abb. 11

Durchlaufverzögerung
des 7,5 kV-Triggergerätes

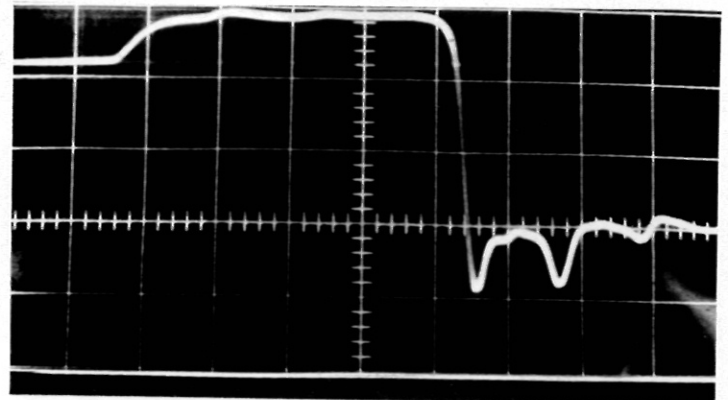
$U_L = + 7,5 \text{ kV};$

$U_{G_1} = - 20 \text{ V}$

50 ns/E

$t_D = 230 \text{ ns}$

Abb. 12



7,5 kV - Triggerpuls

20 ns/E; 2,5 kV/E;

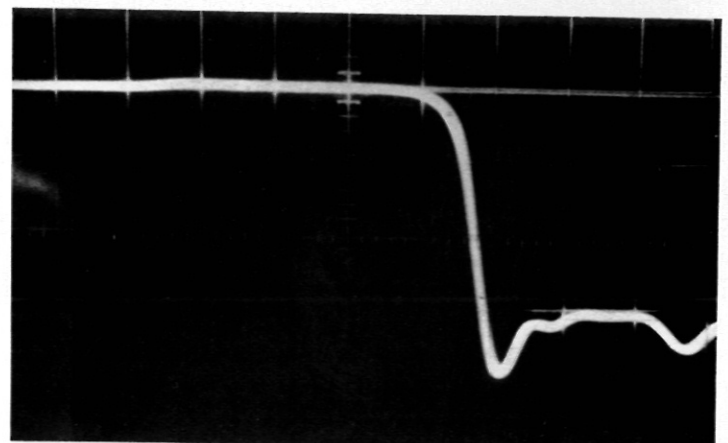
50 Pulse

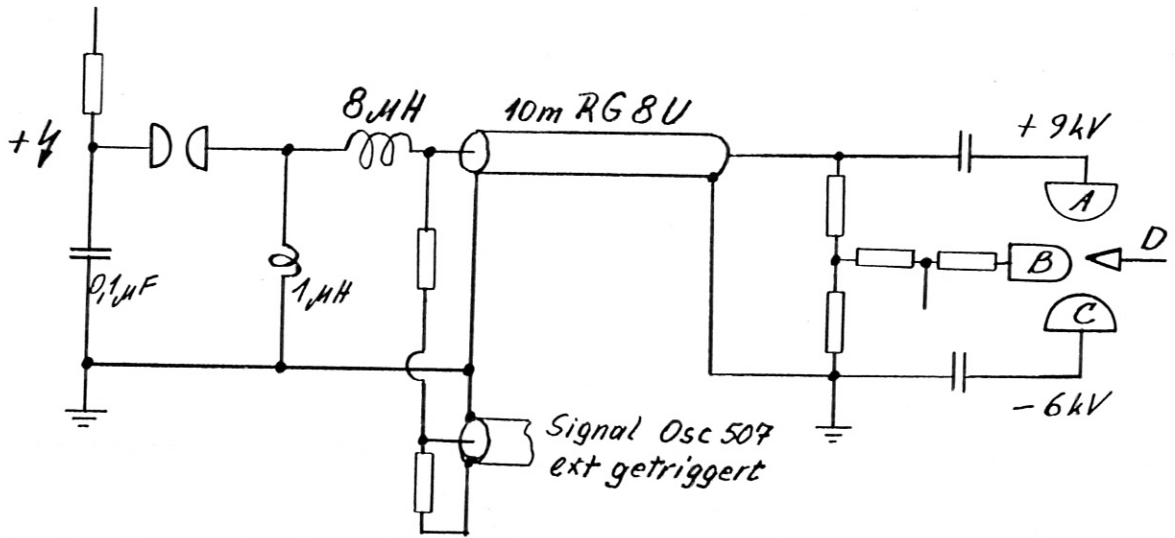
Jitter: 3 ns abs.

Anstieg: 11 ns

U = 7,5 kV

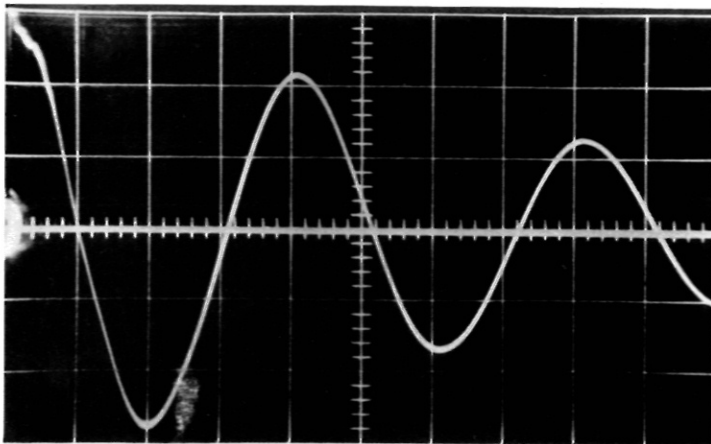
Abb. 13





Anordnung zur Messung der Rückspannung

Abb. 14



Rückspannung

500 ns/E; 3 kV/E;

U = + 9 kV

Abb 15