

Hochspannungs-Impulsgeneratoren

G. Klement, H. Wedler

IPP 4/114

März 1974

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

Hochspannungs-Impulsgeneratoren

G. Klement, H. Wedler

IPP 4/114

März 1974

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

G. Klement, H. Wedler

März 1974

Abstract

Die in diesem Bericht beschriebenen Generatoren wurden als Standardreihe entwickelt. Da der Einsatz der Geräte recht vielfältiger Natur ist, wurde bewußt die Ökonomie und die Zuverlässigkeit besonders berücksichtigt. Dagegen ist, da es sich um Vielzweckgeneratoren handelt, die Induktivität mit 130 nH/Stufe normal. Die Motivation für diese Arbeit ist es, dem Benutzer eine Übersicht über die vorhandenen Bauelemente zu geben.

Von vier verschiedenen Kondensatortypen ausgehend wurden jeweils ein- bis fünfstufige Generatoren entwickelt und getestet. Die Daten der einzelnen Generatortypen sind tabellarisch zusammengefaßt und außerdem sind für typische Anwendungsfälle die Spannungszillogramme abgebildet. Jitter und Delay als Funktion der Ladespannung lassen den Arbeitsbereich erkennen. Einzelne Schaltbilder ergänzen obige Informationen. Die verwendeten Komponenten, wie Funkenstrecken, Pulstrafo, Kurzschließer usw., wurden ebenfalls im IPP entwickelt. Über Puls kabel und Puls kondensatoren sind in je einer Tabelle Herstellerangaben und Testergebnisse aufgelistet.

G. Klement, H. Wedler

März 1974

Abstract

Die in diesem Bericht beschriebenen Generatoren wurden als Standardreihe entwickelt. Da der Einsatz der Geräte recht vielfältiger Natur ist, wurde bewußt die Ökonomie und die Zuverlässigkeit besonders berücksichtigt. Dagegen ist, da es sich um Vielzweckgeneratoren handelt, die Induktivität mit 130 nH/Stufe normal. Die Motivation für diese Arbeit ist es, dem Benutzer eine Übersicht über die vorhandenen Bauelemente zu geben.

Von vier verschiedenen Kondensatortypen ausgehend wurden jeweils ein- bis fünfstufige Generatoren entwickelt und getestet. Die Daten der einzelnen Generatortypen sind tabellarisch zusammengefaßt und außerdem sind für typische Anwendungsfälle die Spannungssoszillogramme abgebildet. Jitter und Delay als Funktion der Ladespannung lassen den Arbeitsbereich erkennen. Einzelne Schaltbilder ergänzen obige Informationen. Die verwendeten Komponenten, wie Funkenstrecken, Pulstrafo, Kurzschließer usw., wurden ebenfalls im IPP entwickelt. Über Puls kabel und Puls kondensatoren sind in je einer Tabelle Herstellerangaben und Testergebnisse aufgelistet.

1.1 Generator D 3

Seite 28

Seite 28

2. Generatorverzeichnis

Seite 29

3. Abbildungen, Tabellen u.s.w.

Seite 30 - 60

The generators described in this report were developed as a standard series. The design was concerned with low inductance, but rather with simple construction and low price.

For each of four different types of capacitors one-to-five-stage generators were developed and tested. The data of the individual types of generators are listed in table form and a few oscillograms for typical applications are presented. The jitter and delay as function of the charging voltage show the range of operation. The above information is completed by individual circuits. The components used, such as spark gaps, pulse transformer, shorting facilities etc. were also developed at IPP. The manufacturer's data and test results are presented in separate tables for the pulse cables and pulse capacitors.

Von vier verschiedenen Kondensatortypen ausgehend wurden jeweils ein- bis fünfstufige Generatoren entwickelt und getestet. Die Daten der einzelnen Generatortypen sind tabellarisch zusammengestellt und außerdem sind für typische Anwendungsfälle die Spannungszeitdiagramme abgebildet. Jitter und Delay als Funktion der Ladungsspannung lassen sich aus den Abbildungen erkennen. Einzelne Schaltbilder ergänzen obige Informationen. Die verwendeten Komponenten, wie Funkenstrecken, Pulstransfo, Kurzschliedler usw., wurden ebenfalls in IPP entwickelt. Über Kabel und Pulskondensatoren sind in je einer Tabelle Herstellerangaben und Testergebnisse aufgeführt.

INHALTSVERZEICHNIS

1.	Einleitung	Seite	1
2.	Wahl eines geeigneten Generators	Seite	2
2.1	Verbraucher mit linearer Charakteristik	Seite	2
2.2	Verbraucher mit nichtlinearer Charakteristik	Seite	2
2.3	Kapazitive Last	Seite	3
2.4	Belastung mit Kabeln	Seite	6
3.	Pulsformung	Seite	11
3.1	Erzeugung steiler Pulse	Seite	11
3.2	Abschneiden bzw. Kurzschließen	Seite	12
4.	Zuverlässigkeit	Seite	13
5.	Einzelne Komponenten	Seite	15
5.1	Funkenstrecken	Seite	15
5.2	Widerstände	Seite	17
5.3	Kondensatoren	Seite	18
5.4	Koaxialkabel	Seite	19
5.5	Pulstrafo	Seite	22
5.6	Kurzschließer	Seite	24
5.7	Meßwiderstand	Seite	24
6.	Generatordaten	Seite	25
6.1	Generator A 1	Seite	25
6.2	Generator A 2	Seite	26
6.3	Generator A 3	Seite	27
6.4	Generator D 2	Seite	28
6.5	Generator D 3	Seite	28
7.	Literaturverzeichnis	Seite	29
8.	Abbildungen, Tabellen u.s.w.	Seite	30 - 60

1. Einleitung

Der Bedarf an Pulsgeneratoren im IPP zum Pumpen von Lasern, Triggern von Funkenstrecken und zum Testen von Bauelementen in der Hochspannungstechnik ist in den letzten Jahren sehr gestiegen.

Wegen dieser starken Nachfrage wurde eine Standardreihe von Generatoren entwickelt, deren Einzelelemente, wie Funkenstrecken, Ladewiderstände, Steuerwiderstände, Kurzschließer, Impulsübertrager und das Gleichspannungs-Meßsystem für alle Generatoren weitgehend identisch sind.

Mit diesem Bericht möchten wir eine Übersicht über diese Standardgeräte geben. Wegen der Fülle des vorliegenden Materials wurde bewußt darauf verzichtet, grundsätzliche Überlegungen zum Bau solcher Generatoren zu diskutieren. Die hier zusammengestellten Informationen sollen vorrangig die Auswahl geeigneter Generatoren erleichtern. Alle Elemente wurden unter den Aspekten

hohe Zuverlässigkeit,
einfacher Aufbau
und geringe Kosten

entwickelt. Zwangsläufig ist aus diesem Grunde die Induktivität/Stufe nicht besonders niedrig. Die erreichbaren Strom- und Spannungsfunktionen genügen aber vielfach den Ansprüchen.

Das System ist weitgehend flexibel. Der Aufbau kann durch entsprechende Anordnung der Kondensatoren liegend oder stehend erfolgen. Für sehr niederinduktive Verbindungen oder dann, wenn der Verbraucher direkt am Generatorausgang liegt (z.B. das Gasentladungsrohr eines CO₂ Lasers), eignen sich Bandleiter. Bei ungünstiger Leitungsführung und wegen der besseren Handhabung werden in den meisten Fällen Kabel verwendet. Da die Spannungsbeanspruchung der

Kabel nicht nur von der Stufenzahl, sondern auch von den Daten der Last abhängt, ist es nicht möglich, für den jeweiligen Generator das entsprechende Kabel generell festzulegen. Für einstufige Generatoren im Leerlauf und für die mehrstufigen im Quasi-Kurzschlußbetrieb können z.B. die Kabel F&G 2,0 L/12 oder HFE 2,3-10B empfohlen werden.

Bei Verwendung von Massewiderständen an Stelle von den meist eingesetzten Wasserwiderständen ist eine Pulsfolgefrequenz bis ca. 0.2 Hz möglich. Allerdings ist zu beachten, daß die mittlere Lebensdauer der Kondensatoren bei Nennspannung und 80 % Durchschwingen 25 000 bis 150 000 Entladungen beträgt.

Zum Großteil sind die Generatoren mit Funkenstrecken in offener Bauweise bestückt. Aus akustischen Gründen können die Generatoren mit entsprechenden Abschirmungen ausgerüstet werden. Die Reihen C und D sind serienmäßig mit Druckfunkenstrecken versehen. Selbstverständlich ist dies bei den Generatoren der Reihe A und B auch möglich.

2. Wahl eines geeigneten Generators

2.1 Verbraucher mit linearer Charakteristik

Bei Verbrauchern mit konstanten Widerständen und Induktivitäten ist je nach erwünschtem Strom- und Spannungsverlauf die Auswahl eines geeigneten Generators mit Hilfe der in den Abb. 13, 14, 15 und 16 (S.31, 32, 33, 34) aufgelisteten Generatordaten leicht zu treffen.

2.2 Verbraucher mit nichtlinearer Charakteristik

Wesentlich schwieriger ist das Problem bei Verbrauchern mit nichtlinearer Charakteristik z.B. bei Glimm- und Bogenentladungen. In diesem Falle kann man Berechnungen

nur unter Einbeziehung experimenteller Ergebnisse bzw. bekannter Gesetzmäßigkeiten durchführen. Zu erwähnen sind hier vor allen Dingen die Funkengesetze von Toepler /1/, Rompe und Weizel /2/ und Braginskii /3/ und für unselbstständige Entladungen das Raumladungsgesetz /13/. Solche Gleichungen sind oft nicht mehr geschlossen lösbar und es müssen mit entsprechenden Programmen /4/ numerische Berechnungen durchgeführt werden.

2.3 Kapazitive Last

In der Impulstechnik - z.B. zum Triggern von Funkenstrecken - werden häufig Kabel eingesetzt, die dann bei langsamen Pulsen wie kapazitive Verbraucher wirken. Es besteht die Gefahr, daß die Generatoren energiemäßig überdimensioniert werden. Dies führt zu unnötig hohen Strom- und Spannungsbelastungen der einzelnen Elemente. Daher ist bei der Dimensionierung der Generatoren darauf zu achten, daß die Generatorkapazität C_1 nicht zu groß bemessen wird.

Unter der Voraussetzung: Anstieg des Pulses $>$ Laufzeit im Kabel gilt für den Generator folgendes Ersatzschaltbild:

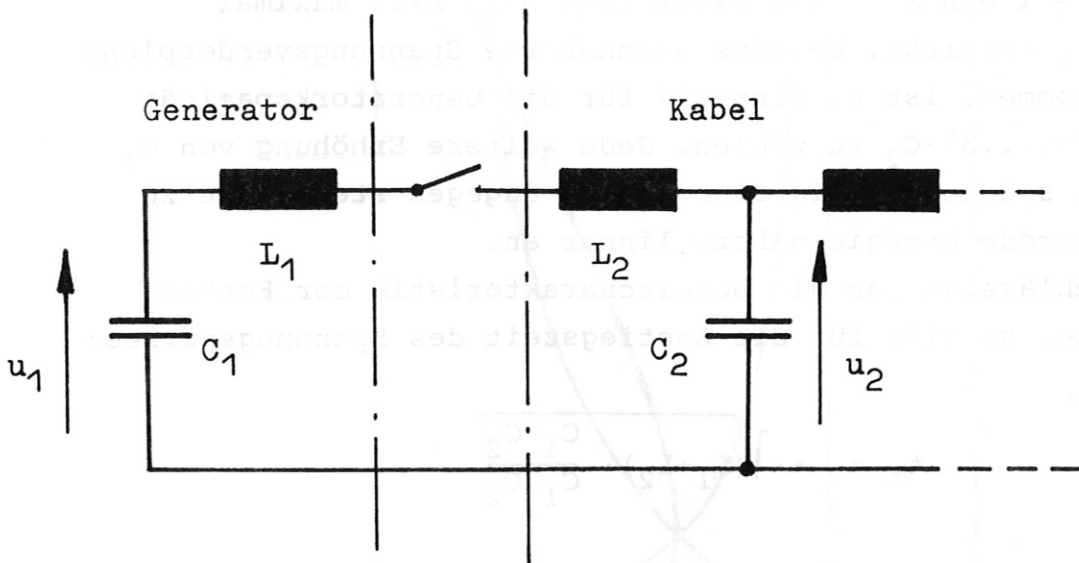


Abb. 1 Ersatzschaltung für einen Generator mit kapazitiver Last (Widerstände vernachlässigt).

Aus der Energie- und der Ladungsbilanz resultiert für die maximale Spannung \hat{U}_2 unter Vernachlässigung von Widerständen:

$$\hat{U}_2 = 2 \cdot U_1 \cdot \frac{A}{A+1} ; \quad A = C_1/C_2$$

Um eine bestimmte Scheitelspannung \hat{U}_2 zu erreichen, benötigt man folgende Generatorladespannung:

$$U_1 = \hat{U}_2 \cdot \frac{A+1}{2A} ;$$

Die Energie zur Erzielung einer bestimmten Spannung \hat{U}_2 beträgt:

$$W_1 = 1/8 \cdot C_2 \cdot \hat{U}_2^2 \cdot \frac{(A+1)^2}{A} ;$$

Diese Funktionen sind in Abhängigkeit von $A = C_1/C_2$ in Abb. 3 (S.4a) dargestellt. Der Ausdruck $W_1 = f(A)$ hat für $A = 1$ ein Minimum, allerdings wird hier maximal $\hat{U}_2 = U_1$ erreicht. Um eine angenäherte Spannungsverdopplung zu bekommen, ist es sinnvoll für die Generatorkapazität $C_1 = (3 \dots 5) \cdot C_2$ zu wählen. Jede weitere Erhöhung von C_1 bringt spannungsmäßig sehr wenig, dagegen steigt die zu speichernde Energie nahezu linear an.

Vernachlässigt man die Schaltcharakteristik der Funkenstrecke, so gilt für die Anstiegszeit des Spannungspulses:

$$t_A = \pi \cdot \sqrt{(L_1 + L_2) \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}}$$

Für Strom und Spannung gelten die üblichen Sinus- bzw. Cosinusfunktionen, die in der Abb. 2 dargestellt sind.

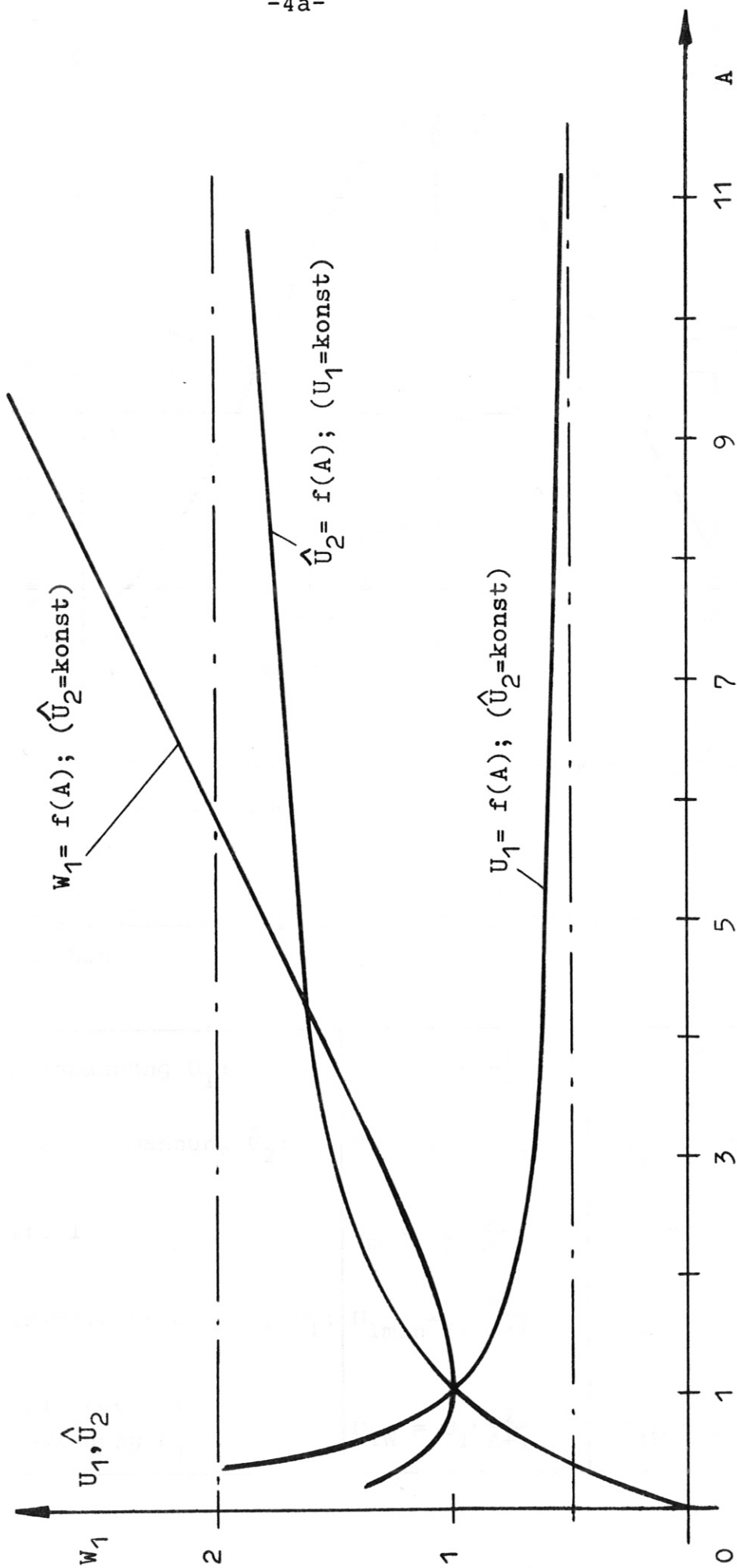


Abb. 3: Die Abhängigkeit der Scheitelspannung \hat{U}_2 , der im Generator zu speichernden Energie W_1 und der Generatorspannung U_1 vom Verhältnis $A = C_1/C_2$.

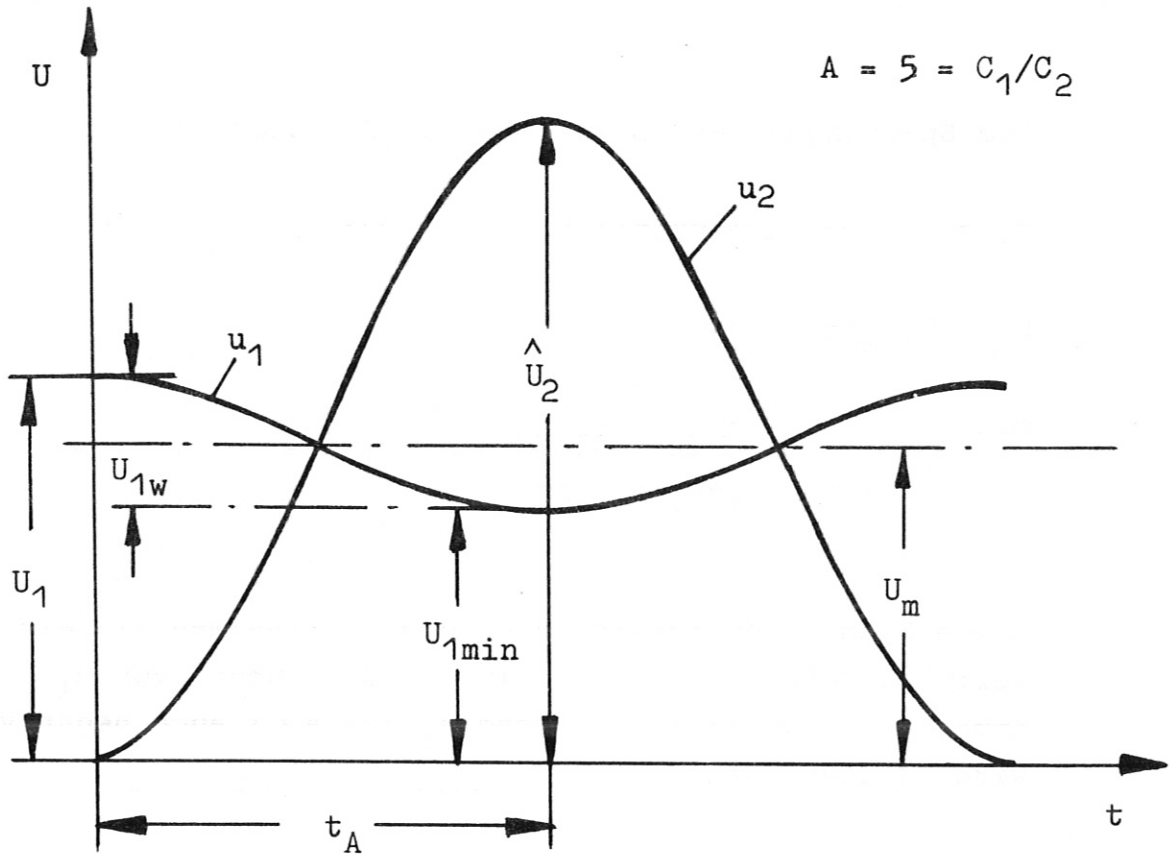


Abb. 2 Verlauf der Spannungen an den Kondensatoren C_1 und C_2 eines Stoßladekreises.

Für die einzelnen Spannungswerte gelten folgende Beziehungen:

Ladespannung U_1 :	$U_1 = \hat{U}_2 \cdot \frac{A+1}{2 \cdot A}$	$U_1 = \hat{U}_2 \cdot \frac{C_1+C_2}{2 \cdot C_1}$
Scheitelspannung \hat{U}_2 :	$\hat{U}_2 = U_1 \cdot 2 \cdot \frac{A}{A+1}$	$\hat{U}_2 = U_1 \cdot 2 \cdot \frac{C_1}{C_1+C_2}$
Mittelwert U_m :	$U_m = U_1 \cdot \frac{A}{A+1}$	$U_m = U_1 \cdot \frac{C_1}{C_1+C_2}$
Minimalwert der Sp. U_{1min} :	$U_{1min} = U_1 \cdot \frac{A-1}{A+1}$	$U_{1min} = U_1 \cdot \frac{C_1-C_2}{C_1+C_2}$
Amplitude der Schwingung U_{1W} :	$U_{1W} = U_1 \cdot \frac{2}{A+1}$	$U_{1W} = 2 \cdot U_1 \cdot \frac{C_2}{C_1+C_2}$

Die Spannungen verlaufen nach den Funktionen:

$$u_1 = U_1 \cdot \frac{1}{A+1} \cdot (A + \cos \omega t);$$

$$u_2 = U_1 \cdot \frac{A}{A+1} \cdot (1 - \cos \omega t);$$

$$\text{mit } \omega = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_1 + L_2) \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}}};$$

Beide Spannungen schwingen um den gemeinsamen Mittelwert U_m , wobei u_2 bei positiver Ladespannung von u_1 immer positiv bleibt, während u_1 für $A < 1$ auch negativ wird. (siehe unter 2.4).

2.4 Belastung mit Kabeln

In allen Fällen mit schnellem Pulsanstieg bzw. mit entsprechend langen Laufzeiten in den Kabeln, also für: Anstieg des Impulses $t_A \ll$ Laufzeit im Kabel τ gilt folgende Ersatzschaltung:

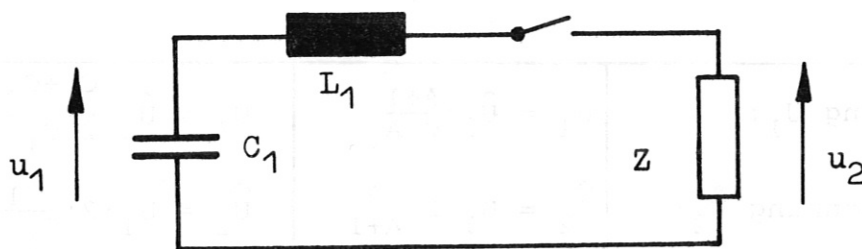


Abb. 4 Ersatzschaltung für einen Generator mit sehr langen Kabeln ($t_A \ll \tau$).

Für Zeiten $t < 2\tau$, d.h. ohne Berücksichtigung von Reflexionen, gelten für den Kabeleingang - am offenen Kabelende wird der Spannungspuls verdoppelt - die Gleichungen für eine gedämpfte Schwingung.

Aus der Differentialgleichung:

$$i \cdot Z + L \frac{di}{dt} + 1/C \int i dt = 0$$

läßt sich für $Z < 2 \sqrt{L/C}$, das ist für Spannungsgeneratoren uninteressant, da die an Z auftretenden Spannungen $< 0.73 U_1$ sind, die folgende Beziehung ableiten:

$$u_Z = U_1 \frac{Z}{\omega L} e^{-\delta t} \sin \omega t \quad /14/$$

mit $\delta = Z/2L$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{Z^2}{4L^2}}$$

$U_1 =$ Ladespannung von C_1 .

Für den aperiodisch gedämpften Fall - dieser ist besonders für Spannungsgeneratoren relevant - mit $Z \geq 2 \sqrt{L/C}$ gilt:

$$u_Z = U_1 \cdot \frac{Z}{\gamma \cdot L} e^{-\delta t} \gamma \sin \gamma t \quad /14/$$

mit $\gamma = \sqrt{\frac{Z^2}{4L^2} - \frac{1}{L \cdot C}}$

Funktionen dieser Art mit verschiedenen γ -Werten sind in Abb. 5 dargestellt.

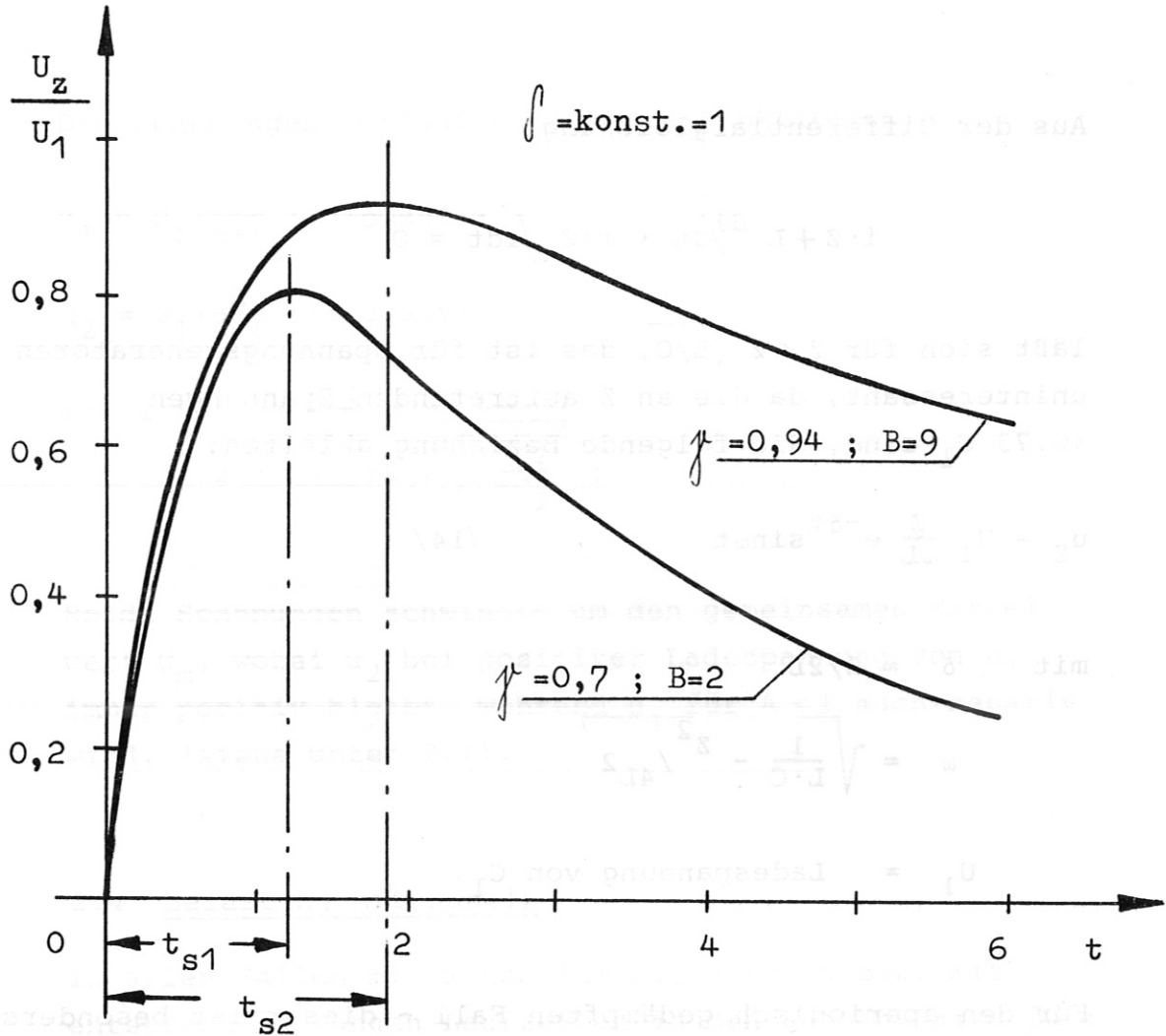


Abb. 5 Spannungsverlauf am Wellenwiderstand Z eines RLC-Kreises, mit den Parametern f_1 und f_2 .

Über $\frac{du_z}{dt} = 0$ erhält man ^{die} für die Bestimmung des Scheitelwertes maßgebende Zeit t_s :

$$t_s = 1/2 f \ln \frac{1+f}{1-f}$$

Normiert man C analog zu 2.3 mit $4LB/Z^2$, so erhält man für das Verhältnis Scheitelwert zu Ladespannung:

$$\hat{U}_z/U_1 = 2 \sqrt{\frac{B}{B-1}} e^{-\rho t_s} \quad f \text{ in } f t_s$$

$$\text{mit } \delta t_s = 0.5 \sqrt{\frac{B}{B-1}} \ln \left\{ 2B-1+2 \sqrt{B^2-B} \right\}$$

$$\gamma t_s = 0.5 \ln \left\{ 2B-1+2 \sqrt{B^2-B} \right\}$$

Diese Funktion $\hat{U}_z/U_1 = f(B)$ ist in Abb. 6 dargestellt. Unabhängig von γ und δ Werten ergibt sich eine Kurve, die ihren kleinsten Wert für $B=1$ hat, d.h. bei aperiodischen Entladungen ($B \geq 1$) ist die an Z auftretende Spannung in jedem Falle $> 0.73 U_1$.

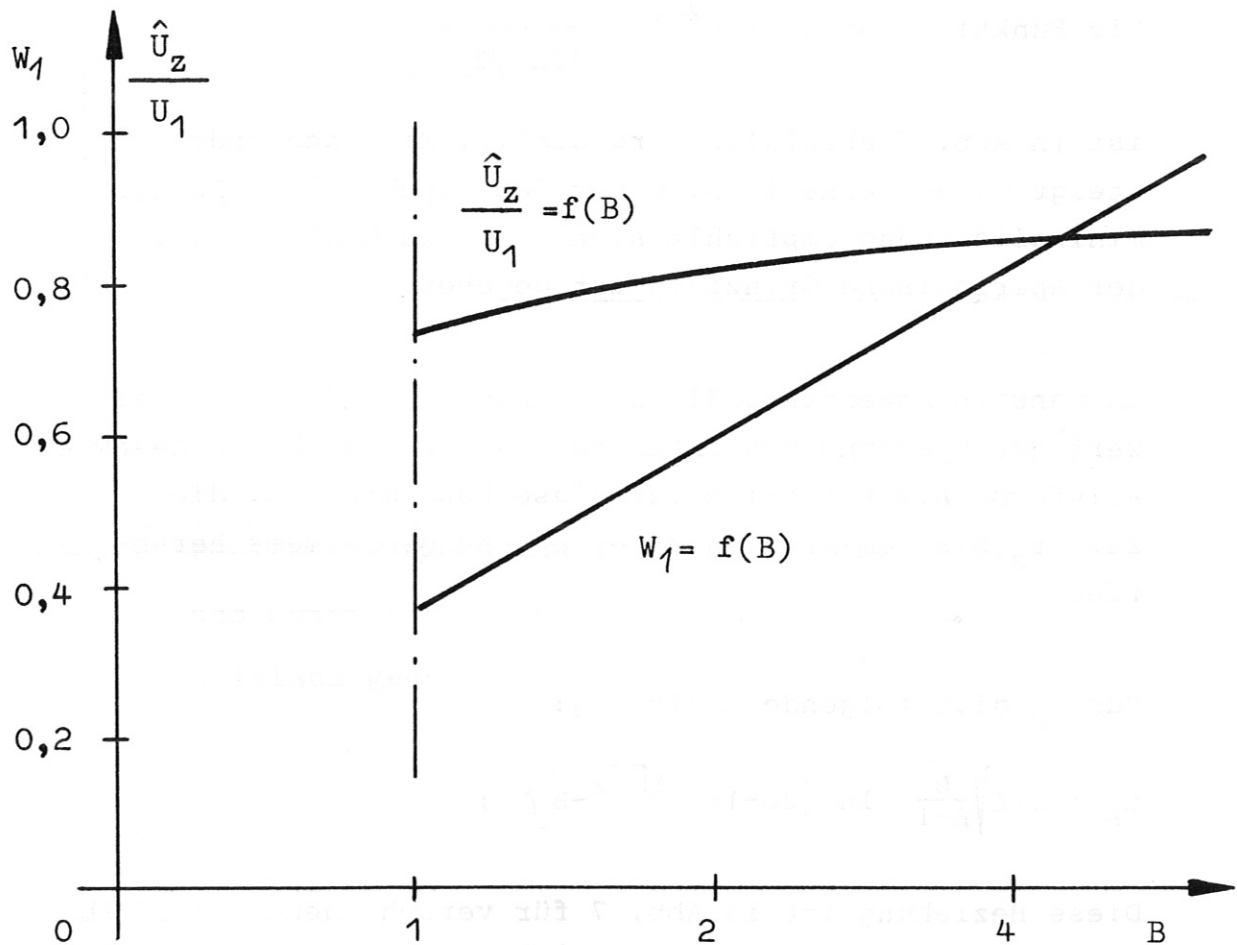


Abb. 6 : Die Abhängigkeit der Scheitelspannung U_z/U_1 und der Energie von $B = C \cdot Z^2 / 4L$ für aperiod. gedämpfte Entladungen.

Auch bei dieser Betrachtung steigt, ähnlich wie bereits unter 2.2. diskutiert, die Scheitelspannung \hat{U}_Z mit steigendem B nur langsam an.

Geht man von der an Z benötigten Scheitelspannung \hat{U}_Z aus, so gilt für die in C_1 zu speichernde Energie:

$$W = 0.5 L/Z^2 (\hat{U}_Z)^2 \cdot (B-1) e^{2\delta t_s} \cdot \frac{1}{(\delta \text{in } \mu\text{t}_s)^2}$$

Die Funktion $W \approx (B-1) \cdot e^{2\delta t_s} \cdot \frac{1}{(\delta \text{in } \mu\text{t}_s)^2}$

ist in Abb. 6 ebenfalls dargestellt. Mit wachsendem B steigt diese schnell an. Unter dem Aspekt einer Energie-minimalisierung empfiehlt sich B = 1 zu wählen, d.h. der aperiodische Grenzfall ist gegeben.

In manchen Anwendungsfällen ist nicht nur der Scheitelwert der Spannung von Interesse, sondern auch die gesamte Pulsform. Als Kriterium für diese kann man z.B. die Zeit t_s bis zum Erreichen des Spannungsmaximums heranziehen.

Für t_s gilt folgende Gleichung:

$$t_s = L/Z \sqrt{\frac{B}{B-1}} \ln \left\{ 2B-1+2 \sqrt{B^2-B} \right\} ;$$

Diese Beziehung ist in Abb. 7 für verschiedene $\delta = Z/2L$ Werte dargestellt.

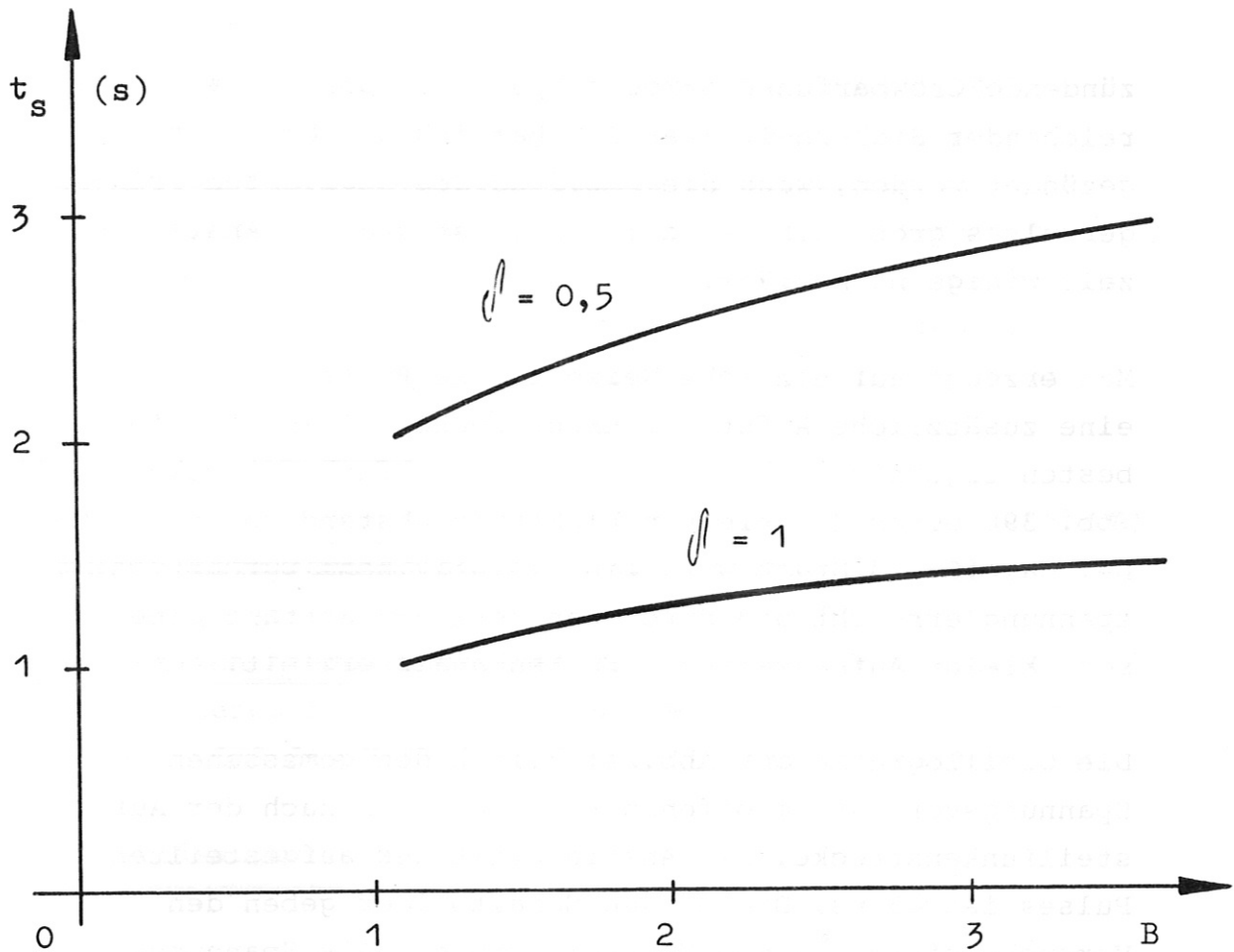


Abb. 7 Die Abhängigkeit der Zeit t_s bis zum Erreichen des Spannungsmaximums von B bzw. C_1 , für überkritisch gedämpfte Entladungen.

3. Pulsformung

3.1. Erzeugung steiler Pulse

Mit den verwendeten Kondensatoren ergibt sich für die Generatoren eine relativ hohe Eigeninduktivität und damit ein entsprechend langsamer Spannungspuls am offenen Kabelende des mit n parallelen Kabeln bestückten Generators. Für verschiedene Anwendungsfälle werden aber extrem schnelle Pulse benötigt. Zum Beispiel können simultan

zündende Crowbarfunkenstrecken /5/ nur dann mit ausreichender Sicherheit (Parallelbetrieb und Unsymmetrie) gezündet werden, wenn die Amplitud des angelegten Triggerpulses groß, d.h. etwa 100 kV, ist und die Anstiegszeit wenige ns beträgt.

Man erzeugt auf einfache Weise solche Pulse, indem man eine zusätzliche Aufsteilfunkenstrecke verwendet. Die besten Ergebnisse erzielt man mit Druckfunkenstrecken (Abb. 39). Durch den kleinen Elektrodenabstand von ca. 3 mm bei ca. 10 atü Druck wird eine relativ hohe Durchbruchspannung erreicht und durch den geringen Abstand eine sehr kleine Aufbauzeit des Funkenkanals erzielt.

Die Oscillogramme der Abb. 41 zeigen den gemessenen Spannungsverlauf am offenen Kabelende und nach der Aufsteilfunkenstrecke. Die Anstiegszeit des aufgesteilten Pulses ist < 5 ns. Die beiden Schaltbilder geben den Versuchsaufbau und den Meßkreis wieder. Als Spannungsquelle diente der zweistufige Marx-Generator Type A 2.

3.2 Abschneiden bzw. Kurzschließen

In einigen Fällen, z.B. bei der Spannungsversorgung von Elektronenkanonen, ist es notwendig, den Spannungspuls, der bei hochohmigen Verbrauchern ($R \gg 2\sqrt{L/C}$) mit der Zeitkonstante $R C$ abfällt, rechtzeitig abzuschalten und die Kanone vor Bogenentladungen zu schützen. Dies ist durch eine zusätzliche Funkenstrecke parallel zum Ausgang des Generators möglich, sofern die momentane Spannung nicht unterhalb des Arbeitsbereiches des Abschneideschalters liegt. Niederohmige Widerstände in diesem Schneidesystem erlauben ein sehr schnelles Abschalten und begrenzen den Scheitelstrom und die wiederkehrende Spannung auf zulässige Werte.

Bei induktiven Verbrauchern möchte man dagegen den Stromimpuls häufig verlängern. Dies kann durch Kurzschließen des Generatorausganges im Strommaximum (Spannungs nulldurchgang) erreicht werden. Allerdings sind für diesen Zweck spezielle Crowbarfunkenstrecken, die im Spannungs nulldurchgang exakt schalten müssen, so z.B. Funkenstrecken mit Ferritentkopplung /9/ oder mit Simultananzündung /5/, notwendig.

Schaltkreise zum Abschneiden oder Kurzschließen (Crowbar) müssen entsprechend den Verbraucherdaten (L und R) dimensioniert werden, d.h. der Kurzschlußkreis muß wesentlich niederinduktiver sein als der Verbraucher. Ein sicheres Arbeiten der Abschneidfunkenstrecke setzt voraus, daß das Verhalten der Lastparameter bekannt ist.

4. Zuverlässigkeit

Für den praktischen Betrieb ist die Zuverlässigkeit dieser Geräte von großer Bedeutung. Daher haben wir alle bisher ausgelieferten Generatoren in der Tabelle 1, S.14, aufgelistet und die bisher durchgeführten Entladungen - soweit bekannt - angegeben. Weiter wurden Schwierigkeiten wie Vorzündungen und dergleichen aufgeführt.

Im großen und ganzen sind die bisherigen Erfahrungen recht erfreulich. Lediglich beim Wechsel des Kondensatorherstellers der Reihe A, der bisherige Hersteller hat sehr lange Lieferzeiten und ist teurer, traten Schwierigkeiten auf, da fälschlicherweise Phasenschieber anstelle der bestellten Impulskondensatoren geliefert wurden. Wasserwiderstände sind zwar preisgünstig und bieten hochspannungstechnisch Vorteile, haben aber den Nachteil, daß sie nicht wartungsfrei sind, weil gelegentlich Flüssigkeit nachzufüllen ist.

In einem einzigen Falle wurde die Funkenstrecke beanstandet und durch eine Druckfunkenstrecke ersetzt. Leider war es nicht möglich diesen Fall zu klären. Es ist bis

Type	Stückzahl	Anlage, Versuch	Institut	Verwendung	Ladespg. (kV)	Bish. Entladungen	Inbetr. - nahme	Bemerkungen	Kabel- type	Kabel- scheitel- spannung Uss (kV)
A 1	1	Technik Test	IPP	Dauerversuch	45	30 000	Mai 72	ohne Störungen bzw. Ausfälle	2.OL/12	74
A 1	1	Asterix II	IPP	Triggern von Funkenstr.	40	≈1000	Feb. 73	Wasserwiderst. nachgefüllt	2.OL/12	74
A 1	1	Asterix III	IPP		40	100	Dez. 73	keine Ausfälle	2.OL/12	74
A 2	1	Technik Test	IPP	Testversuch	45	5000	April 73		2.OL/12	125
A 2	1	Plasma Fokus	IPF	Triggern v. Funkenstr.	40		Dez. 72	2 Kondensatoren fielen bish. aus; Benutzer reklam. Funkenstrecken	RG 213 U	125
A 2	1	CO ₂ -Laser	IPF	Pumpen von Lasern	40		Mai 73	ohne Beanstandg. o. Kabel		
A 3	1	HF-Laser	IPP	"	40	4000	72	ohn. Beanstand.	2.OL/12	64
A 5	1	HF-Laser	IPP	"	40	4000	73	"	2.OL/12	64
D 2	18	Isar I	IPP	Triggern v. FE-Crowbar-	37	5000	Feb. 65	ca. 20% Kabel u. PE-Endverschluß Ausfälle	4.9/17.3	140
D 2	10	Isar II	IPP	Funkenstr.	35	10000	Nov. 68	ca. 20% Kabel u. Gießharzendver- schluß-Ausfälle Trigatrons durch Kaskaden ersetzt	6.5/18.6	140
D 3	20	500 kV Theta Pinch	IPP	Pulsladung	45/35	500/10000	Herbst 71	ohne Ausfälle		

Tabelle 1 : Liste der bisher eingesetzten Generatoren

heute nicht klar, wie es zu diesen Schwierigkeiten kommen konnte. Hierbei darf nicht übersehen werden, daß offene Funkenstrecken von atmosphärischen Bedingungen abhängig sind, die gegebenenfalls durch eine Korrektur des Abstandes berücksichtigt werden müssen. Auch können beim Transport, in diesem Falle wurde der Generator nach auswärts geliefert, die Abstände verstellt werden. Manchmal wird beim Aufstellen des Gerätes übersehen, daß in der Nähe befindliche scharfkantige Gegenstände sprühen und die Funkenstrecken dadurch vorzeitig ausgelöst werden. Auch ist das Triggerverhalten der Funkenstrecken sehr stark von der jeweiligen Belastung (hochohmig/niederohmig) abhängig. Die Erfahrungen zeigen immer wieder, daß derartige Schwierigkeiten nur durch einen engen Kontakt zwischen Entwickler und Benutzer behoben werden können.

5. Einzelne Komponenten

5.1. Funkenstrecken

Die Zündmechanismen von Funkenstrecken möchte wir an dieser Stelle nicht eingehend diskutieren. Weil jedoch häufig Kritik an diesen Bauelementen geäußert wird, wurden in Abb. 17 die Zündkennlinien von Trigatronfunkenstrecken - das sind 3-Elektrodenfunkenstrecken, deren Triggerelektrode stationär auf dem Potential einer der beiden Hauptelektroden liegt - zusammengestellt. Bei den hier beschriebenen Generatoren wurden ausschließlich die konventionellen 3-Elektrodenfunkenstrecken - in diesem Falle liegt die Triggerelektrode auf $1/3$ bis $2/3$ des Potentials der Hochspannungselektrode - eingesetzt. Deren Zündkennlinien sind in Abb. 18 dargestellt. Grundsätzlich handelt es sich in allen Fällen um Kennlinien mit konstantem Druck und Abstand. Die starken Abweichungen der Kennlinien in Abb. 18 sind darauf zurückzuführen, daß diese Messungen an verschiedenen Instituten vorgenommen wurden. Äußere Parameter, wie z.B. Lastimpedanz, Triggerpulsform u.s.w. differieren

sehr stark, während die Kennlinien für Trigatrons aus Braunschweig/Jülich stammen und hier ähnliche Kreisbedingungen gegeben waren. Es kommt hinzu, daß bei den Kurven der Abb. 18 teilweise der Delay t_d (z.B. Kurve 1) und nicht der Zündverzug t_z veröffentlicht wurde, was natürlich zu etwas längeren Zeiten führt. Kurve 5 der gleichen Abb. wurde mit extrem scharfen Nadelelektroden aufgenommen, eine Technik, die für Kreise mit Energien >100 J uninteressant ist. Es ist weiter anzunehmen, daß in diesem Falle ein sehr langsamer Kreis getestet wurde. Wie weitere eigene Messungen in den letzten Jahren gezeigt haben, ist prinzipiell eine Erweiterung des Arbeitsbereiches durch entsprechend höheren Triggeneraufwand (Steilwellentriggerung, kap. Beschaltung u.s.w.) möglich /5/.

Das Wesentliche soll an Hand der Abb. 19 herausgestellt werden. Hier sind typische Zündkennlinien von 3-Elektrodenfunkenstrecken eingetragen. Zusätzlich sind in diesem Diagramm einige experimentelle Ergebnisse über die Vorzündrate von Funkenstrecken bei verschiedenen Belastungen ausgewertet. Beachtenswert ist, daß nach diesen Messungen bei 80 % der statischen Durchbruchspannung die Vorzündrate in der Größenordnung 0.5 % liegt (10 kJ). Berücksichtigt man weiterhin die Luftdruck-, Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen, ferner Toleranzen der Abstände, Spitzen, Fasern und Staubpartikel und zusätzlich noch einen kleinen Reservebereich, so bleibt zum Triggern von offenen Funkenstrecken nur ein schmales Fenster übrig, in dem diese einwandfrei arbeiten. Die Streuzeitmessungen, die an den hier entwickelten Generatoren durchgeführt wurden (siehe unter 6.), zeigen, daß der Arbeitsbereich dieser Generatoren für normale Ansprüche vollkommen ausreicht. Ohne Berücksichtigung der bereits erwähnten atmosphärischen Störungen arbeiten die Generatoren mit offener Funkenstrecke bzw bei konstantem Druck in einem Bereich 30 - 45 kV. Für Untersuchungen mit kleiner Streuzeit ist der Bereich auf $>=35$ kV einzuschränken.

In der Standardreihe A wurden einfache, offene Funkenstrecken, bestehend aus ca. 40 mm \emptyset Messing-Kugeln eingesetzt. Die erste Stufe ist eine übliche Kaskade wahlweise in 1 : 1 oder 2 : 1 Einstellung. In der 2 : 1 Anordnung ist der Arbeitsbereich größer, dafür wird ein zusätzlicher Spannungsteiler oder Ladegerät benötigt. Um den angegebenen Jitter von 20 ns zu erreichen, ist eine zusätzliche Bestrahlungsstrecke erforderlich. Über den Triggerpuls der anzusteuernenden Funkenstrecke wird unter 'Pulstrafo' berichtet. Alle Funkenstrecken in den weiteren Stufen sind Zweielektrodenfunkenstrecken, die z.T. mit einer Hilfselektrode ausgerüstet sind.

Die Teile der Druckfunkenstrecke, wie sie im Generator D 3 verwendet wurden, sind einfache Drehteile, die triggerbare Kaskade der ersten Stufe ist so konstruiert, daß die Mittelelektrode das Isoliermaterial abschirmt, damit am Nylon keine Gleitentladungen auftreten, die dann zu Vorzündungen der Funkenstrecke führen. Den konstruktiven Aufbau zeigt die Abb. 42.

5.2 Widerstände

Üblicherweise werden die Generatoren mit Wasserwiderständen ausgerüstet. Diese sind im Aufbau einfach und in hochspannungstechnischer Hinsicht zweckmäßig. Für eine Dimensionierung gelten folgende Richtwerte:

Stoßdurchbruchspannung für dest. Wasser: 1 mm \sim 28 kV

Spezifischer Widerstand ρ :

Dest. Wasser: $10^4 \dots 10^6 \Omega \text{ cm}$

Leitfähigkeitswasser: $10^6 \Omega \text{ cm}$

Leitungswasser: 1000 $\Omega \text{ cm}$

Lösung gesättigt mit CuSO_4 : $\rho = 70 \Omega \text{ cm}$

Lösung gesättigt mit Kochsalz: $\rho = 70 \Omega \text{ cm}$

1000 g H_2O dest. }
40 g CuSO_4 } $\rho = 10 \Omega \text{ cm}$
10 g H_2SO_4 }

Der Nachteil dieser Widerstände ist, daß sie bei längerem Betrieb nachgefüllt werden müssen. Möchte man diese Wartungsarbeiten vermeiden, dann verwendet man besser Massewiderstände (Hersteller: Allen Bradley (Morganite)Carbone, Erie usw.). Dabei sind folgende Punkte zu beachten:

1. Die Dauerbelastung ist durch die Oberfläche des Widerstandes limitiert. Als Anhaltswert kann man etwa 0.5 W/cm^2 in Luft annehmen.
2. Die Pulsbelastung ist, wenn es sich um einen adiabatischen Prozeß handelt, durch das Volumen gegeben. Im Mittel sind etwa 200 J/cm^3 zulässig.
3. Die Spannungsfestigkeit ist in erster Linie von der Pulsdauer und dem umgebenden Medium abhängig. In Luft kann man pauschal für den msec-Bereich mit 4 kV/cm rechnen.

5.3 Kondensatoren

Aus der Vielzahl der auf dem Markt erhältlichen Stoßstrom-Kondensatoren wurden vier Standardtypen ausgewählt. Als Auswahlkriterien sind die Eigendaten wie Induktivität (d.h. Eigenfrequenz), Strombelastbarkeit usw. anzusehen. Entscheidend für die Verwendung eines bestimmten Kondensators ist natürlich der Herstellerpreis, da der spezifische Preis (DM/J) wesentlich die Gesamtkosten des Generators beeinflusst.

Die mittlere Lebensdauer, die vom Hersteller angegeben wird, bezieht sich auf Nennspannung und 80 % voltage reversal im durchschwingenden Betrieb.

Wie bei der Dimensionierung der Kondensatorbatterie für das 1000 J-Jodlaserexperiment bereits berichtet wurde (MM 56/1973), hängt die Lebensdauer von der Scheitel-Scheitel-Beanspruchung ab, so daß bei geringem Durchschwingen

und wenn Effekte wie höhere Strombelastung oder Überschläge nicht dagegen sprechen, die Ladespannung entsprechend höher gewählt werden kann. Diese Betrachtung ist im Hinblick auf die gespeicherte Energie interessant, da sie ja quadratisch mit der Spannung steigt. Bei einer aperiodischen Entladung könnte also ein Kondensator mit 40 kV Nennspannung mit 72 kV betrieben werden. Die hier eingesetzten Kondensatoren der Reihe A, B, D können wegen ihrer äußeren Überschlagspannung maximal mit 55 kV betrieben werden. Der Kondensator der Reihe C wird wegen seiner höheren Überschlagspannung in den Laseranlagen Asterix II und III mit 60 kV betrieben.

In der Tabelle auf Abb. 12 sind die Daten der Kondensatoren, die in den Generator-Standardreihen verwendet wurden, aufgeführt. Die Type A wurde im 0,2 Hz-Takt ohne Ausfälle bis 30 000 Entladungen getestet. Alle anderen Typen sind im 0,1 Hz-Takt verwendbar. Bei höheren Pulsfolgen ist aber die Ladespannung zu verringern damit eine zu starke Erwärmung vermieden wird.

5.4 Koaxialkabel

Im Abschnitt I wurde bereits darauf hingewiesen, daß die Auswahl geeigneter Lastkabel problematisch ist, da die Spannungsbeanspruchung von den Verbrauchereigenschaften abhängt.

Grundsätzlich sind besonders 3 Belastungsfälle zu diskutieren:

1. Betrieb mit offenen Kabeln: $\tau \gg t_A$

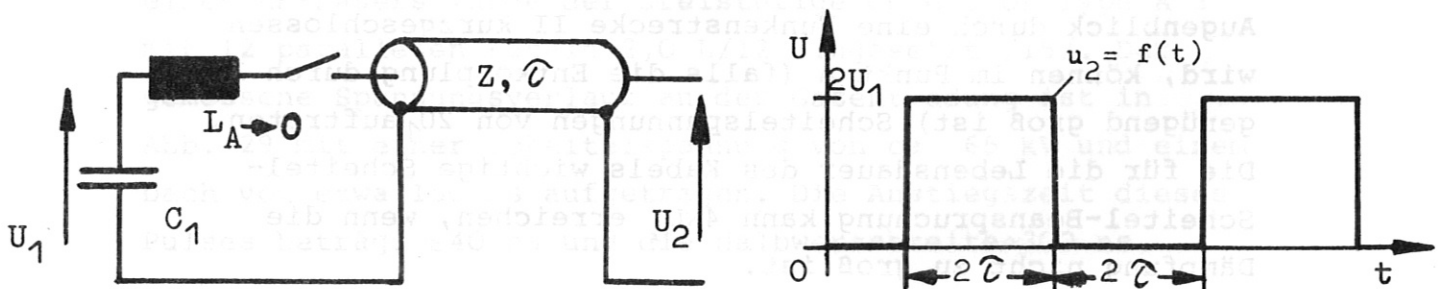


Abb. 8: Erzeugung von Spannungspulsen mit offenen Kabeln

In diesem Falle treten wegen der Verdopplung am Kabelende bzw. wegen des Überschwingens der Kabelkapazität bei langsamen Pulsen maximal Scheitelspannungswerte bis zur 2-fachen Generatorleerlaufspannung auf.

2. Betrieb mit zunächst offenen Kabeln, die durch das Zünden einer Entladungsstrecke kurzgeschlossen werden.

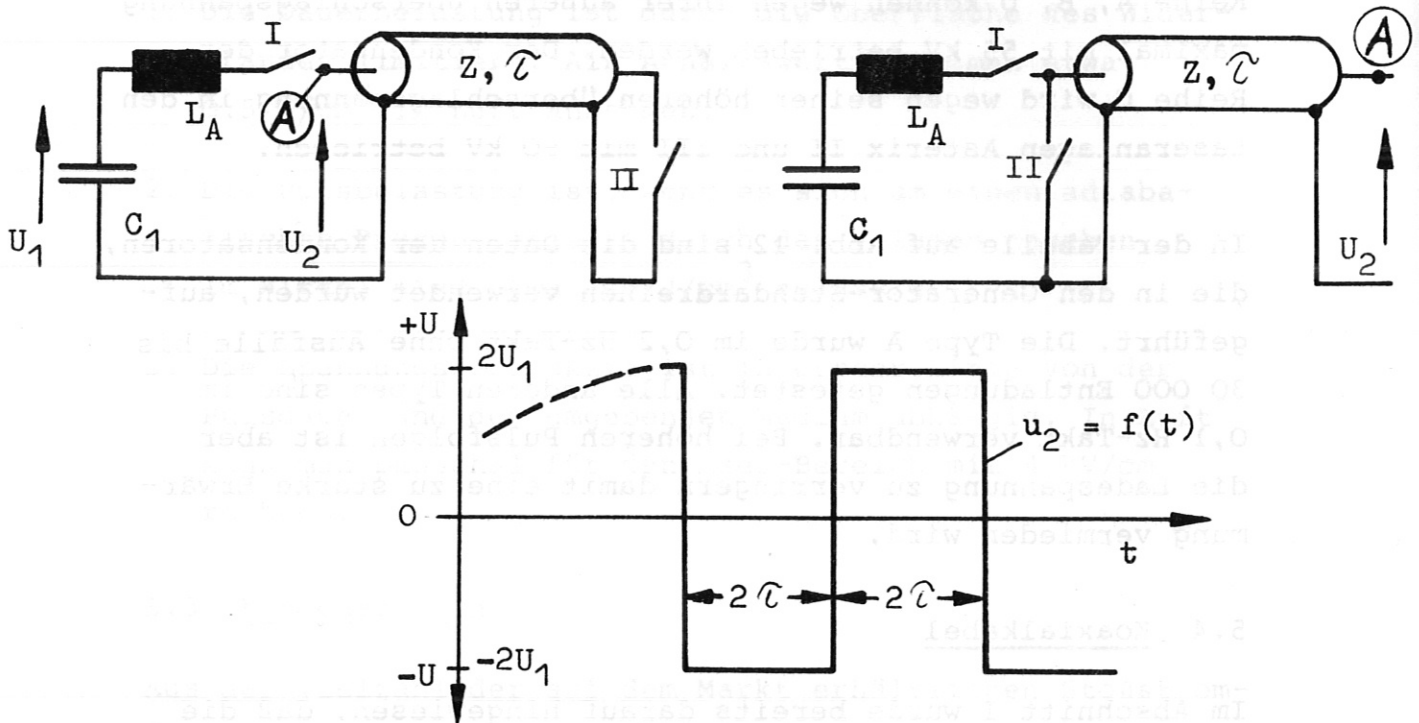


Abb. 9: Erzeugung von Spannungspulsen durch Pulsladung und Kurzschließen der Kabel im Spannungsmaximum

Das Kabel wird bei entsprechender Dimensionierung der Generatorkapazität bis zur 2-fachen Generatorleerlaufspannung aufgeladen (Pulsladung). Wenn das Kabel in diesem Augenblick durch eine Funkenstrecke II kurzgeschlossen wird, können im Punkt A (falls die Entkopplung durch L_A genügend groß ist) Scheitelspannungen von $2U_1$ auftreten. Die für die Lebensdauer des Kabels wichtige Scheitel-Scheitel-Beanspruchung kann $4xU_1$ erreichen, wenn die Dämpfung nicht zu groß ist.

3. Bei kurzgeschlossenen Kabeln dagegen und bei Pulsanstiegen, die im Verhältnis zur Kabellaufzeit groß sind, teilt sich die Generatorleerlaufspannung im Verhältnis der Generatorinduktivität zur Kabelinduktivität auf. Bei kurzen Kabeln beträgt die Spannungsbeanspruchung dann nur Bruchteile der Generatorleerlaufspannung.

Belastungswerte, wie sie bereits von einigen Kabel-Typen vorliegen, sollen als Hilfe für die Auswahl geeigneter Kabel dienen.

Mit dem Generator A 1 konnten ca. 30 000 Entladungen bei einer Scheitelspannung von $U_{ss} > 74$ kV, $T_A \approx 110$ ns mit dem Kabel 2,0L/12 durchgeführt werden (siehe Generator A 1 und Oscillogramm). Als Vergleichskabel dazu kann die Type HFE 2,3/10 B angesehen werden. Verschiedene Generatoren vom Typ D 2 wurden mit den Kabeltypen 4,9/17,3 ($Z = 52 \Omega$) und 6,5/18,6 ($Z = 45 \Omega$) ausgerüstet. Die Scheitel-Scheitelwerte lagen in obigen Fällen bei ca. 120 ... 180 kV, $T_A \approx 250$ ns.

Hier scheint für diese Kabel die Belastungsgrenze zu liegen, da bisher ca. 10 % der eingesetzten Kabel ausfielen. (Durchschlag Seele - Mantel). Für das Vergleichskabel HFE 3,9/17,3 wurden ähnliche Erfahrungen gemacht.

Im Fall 2 bei Betrieb mit einer Gasentladung am Kabelende hängt die Spannungsbelastung des Kabels von der Zündspannung ab und weiter von der Entladungsart (Volumen- oder Bogenentladung), vom Druck und dem verwendeten Gas. Zum Pumpen eines HF-Lasers wurde der dreistufige Generator Type A 3 mit 12 parallelen Kabeln 2,0 L/12 eingesetzt /15/. Der gemessene Spannungsverlauf an der Gasentladung ist in Abb. 29 mit einer Scheitelspannung von ca. 65 kV und einem Dach von etwa 150 ns aufgetragen. Die Anstiegszeit dieses Pulses beträgt ≈ 40 ns und die Halbwertsbreite ≈ 300 ns.

Um die Auswahl geeigneter Kabel zu erleichtern, wurden in der Zusammenstellung von Koaxialkabeln (Tabelle II, S. 60), die im IPP bisher Verwendung fanden, die charakteristischen Daten sowie zusätzliche Meßwerte eingetragen. Die Gleichstromwiderstände von Innenleitern und Außenleitern sind dem IPP Bericht 4/42 entnommen. Dort sind auch weitere Meßwerte über Gleich- und Wechselspannungsprüfungen zu finden. Der Wechselstromwiderstand bei 100 kHz wurde von einigen Kabeln in der Tabelle eingetragen, da diese Werte zur Zeit für blitzlichtgepumpte Jod-Laser aktuell sind. Widerstände bei entsprechenden Frequenzen sind an Hand von Herstellerangaben (Dämpfung als Funktion von der Frequenz) nach $R' = 2\alpha Z$ zu berechnen.

Die innere, äußere und mittlere Feldstärke (E_i , E_a und E_m) im Kabeldielektrikum ist für die einzelnen Kabel auf 1 bezogen angegeben. Als normierter Wert ist die Güte G eingetragen.

$$G = \frac{a}{E_i} \quad (\text{Güte})$$

a = Stärke des Dielektrikums

E_i = Feldstärke am Innenleiter

Die verschiedenen Spannungswerte und die von den einzelnen Herstellern angegebenen Daten wie u_{eff} 50 Hz, 1 MHz Dauer, Spitze HF, Spitze Puls, Gleichspannungs- und Koronafestigkeit sind leider nur unvollständig.

5.5 Pulstrafo

Zum Ansteuern der getriggerten Funkenstrecke (1. Stufe) in den einzelnen Generatoren eignet sich besonders das 15 kV Triggergerät (siehe IPP 4/43). Die Amplitude des Ausgangspulses ist aber nicht groß genug um bei entsprechendem Arbeitsbereich den Jitter klein zu halten. Deshalb erschien es vernünftig, mit einem Trafo den zur Verfügung stehenden Puls hoch zu transformieren und gleichzeitig eine galvanische Trennung zwischen Triggergerät und Generator zu erreichen.

Der Trafo ist auf Abb. 40 zu sehen. Die Oscillogramme der Abb. 38 zeigen die gemessenen Spannungspulse. Der Test erfolgte über 30 000 Entladungen.

Elektrische Daten

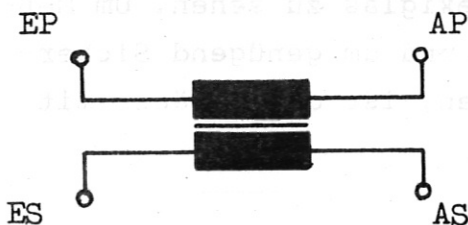
Permeabilität :	$\mu_E = 2250$
Sättigungsinduktion :	4000 G
Fläche :	4,2 cm ²
Fluß :	16,8 · 10 ³ G · cm ²
Spannungszeitfläche, p.:	670 kVns
Windungsverhältnis :	9,5:4
Übertragungsverhältnis :	2
Pulsanstieg, p. (10 % - 90 %) :	20 ns
Pulsanstieg, s. (10 % - 90 %) :	30 ns
Scheitelspannung, p.:	19,6 kV
Scheitelspannung, s.:	41,5 kV
Koppelkapazität :	50 pF
Induktivität, p.:	400 μ H
Induktivität, s.:	1,55 mH
Streuinduktivität, p.:	2 μ H
Streuinduktivität, s.:	8,8 μ H

Konstruktive Daten

Ferritkerne:	4xValvo: FXC-3E1/K300501
Wicklung:	Lupolen/3,2 ϕ außen 0,8 ϕ innen
Drahtisolation:	1,2 mm PE
Primärseitiger Anschluß:	2 Gewindebuchsen M4
Sekundärseitiger Anschluß:	2 Lupolendrähte mit Schrumpfschlauch ver- stärkt
Eingegossen in Dobikangießharz betragen die Abmessungen:	50 ϕ x 120 mm

Anschlüsse und Polarität

Die Polarität des Ausgangspulses ist durch entsprechenden Anschluß



nach nebenstehender Skizze wählbar, d.h. bei Anlegen eines negativen Pulses an EP erhält man an ES ebenfalls einen negativen Puls.

5.6 Kurzschließer

Aus Sicherheitsgründen werden die einzelnen Kondensatoren in den Generatoren über einen Kurzschließer, bzw. bei Kondensatoren, bei denen das Gehäuse auf halber Ladepannung liegt, über zwei zusammengeschaltete Einheiten kurzgeschlossen. Die n-stufigen Generatoren der Typen A und B werden über die Ladewiderstände von einem zentralen Kurzschließer erfaßt.

Der Kurzschließer besteht aus einem Plexiglasgehäuse mit einer festen und einer beweglichen Elektrode. Das Öffnen der Kontakte geschieht durch Anlagen von Druckluft mit etwa 4 bis 5 atü. Durch den kleinen Elektrodenabstand sind auch die Gesamtabmessungen rel. klein. Der auf Abb. 36 gezeigte Schalter arbeitet bis etwa 60 kV, die Prüfspannung beträgt ca. 80 kV. Als Öffner und Schließer findet die beschriebene Konstruktion auch in anderen Schaltungen der Hochspannung Anwendung. Zum Betätigen von Mikroschaltern, die auf der Steuer- und Überwachungsseite die jeweilige Schaltstellung angeben, kann ein zusätzliches Isolierstoffteil an der beweglichen Elektrode befestigt werden.

5.7 Meßwiderstand

Zur Überwachung der Kondensatorladespannung dienen hochohmige Metallschichtwiderstände. Standardeinheiten mit z.B. $2 \times 100 \text{ M}\Omega$ und für 20 kV Betriebsspannung geeignet können durch Reihenschaltung für die gewünschte Ladespannung eingesetzt werden. Als Anzeige eignet sich z.B. schon ein einfaches $100 \mu\text{A}$ Drehspulinstrument. Für die Steuerung mit automatischer Abschaltung bzw. Nachladung empfiehlt sich statt dessen ein im IPP entwickelter Spannungswächter EL 138.

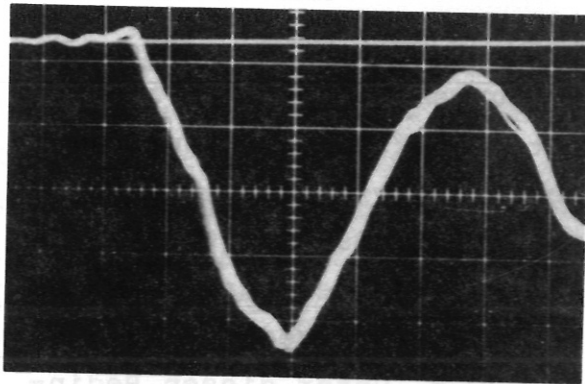
Auf Abb. 37 ist eine $200 \text{ M}\Omega$ Einheit mit den beiden Anschlußplatten und dem Isolierrohr aus Plexiglas zu sehen. Um Meßfehler durch Sprühen zu verhindern und um genügend Sicherheit gegen Überschlägen zu erreichen, ist das Gehäuse mit Isolieröl gefüllt.

6. Generatordaten

Das breite Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten bietet für den Benützer interessante Aspekte. Als Hinweis sei hier ein Beispiel herausgegriffen, wie es beim Pumpen von chem. Lasern durch eine Gasentladung auftritt. Wie der Spannungsverlauf auf Abb. 29 (an der Laserkammer gemessen) zeigt, ist die Entladung stark gedämpft und die wiederkehrende Spannung ist $< 20 \%$. Unter diesen Bedingungen ist der Betrieb mit einer höheren als der Nennspannung zulässig. Die Generatoren sind bezüglich Isolationsstrecken sicher genug ausgelegt und die Funkenstreckenabstände können erforderlichenfalls zusätzlich leicht vergrößert werden. Im Abschnitt über Kondensatoren wurde dieser Belastungsfall schon ausführlich diskutiert.

6.1 Generator A 1

Dieser einstufige Generator, z.B. mit 32×6 m langen Kabeln ($2,0 \text{ L}/12$, $Z = 70 \Omega$) bestückt, eignet sich speziell zum Triggern von Funkenstrecken. Wie das Schaltbild in Abb. 21 zeigt, ist im Generatorausgang eine zusätzliche Funkenstrecke angeordnet. Diese Trennung erlaubt es, mit dem Triggerkabel das Potential der Triggerelektrode der zu triggernden Funkenstrecken zu steuern. Die stat. Durchbruchspannung des Generators beträgt 60 kV , wenn die Triggerelektrode anteilmäßig hochgefahren wird. Bei konstanter Vorspannung (13 kV) liegt die Durchbruchspannung bei 54 kV und der vorgesehene Arbeitspunkt ($U_0 = 40 \text{ kV}$) ist mit $U_A/U_S = 0,66$ ausreichend niedrig. Wie der Abb. 22 zu entnehmen ist, beträgt die zeitliche Streuung (Jitter) in einem Bereich von $30 \dots 45 \text{ kV}$ ca. 10 ns und die Durchlaufverzögerung entsprechend $150 \dots 120 \text{ ns}$.



$$U_0 = 40 \text{ kV}$$

$$t = 50 \text{ ns/E}$$

$$u = 16 \text{ kV/E}$$

$$\text{Scheitelspannung} = 74 \text{ kV}$$

$$\text{Anstiegszeit} = 110 \text{ ns}$$

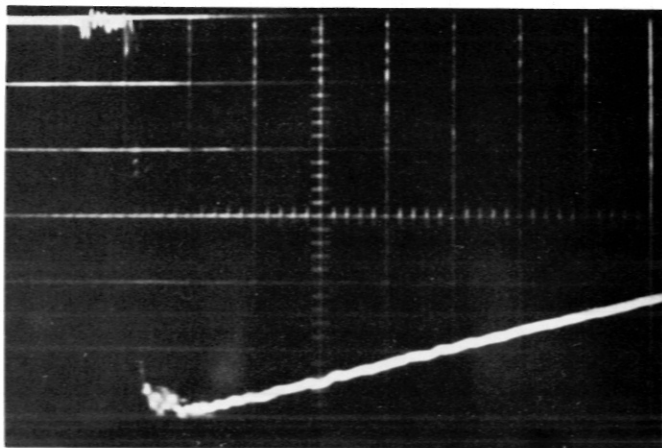
$$\text{Steilheit } S = 0,67 \text{ kV/ns}$$

Abb. 10: Spannungspuls am offenen Kabelende
(n=32) gemessen

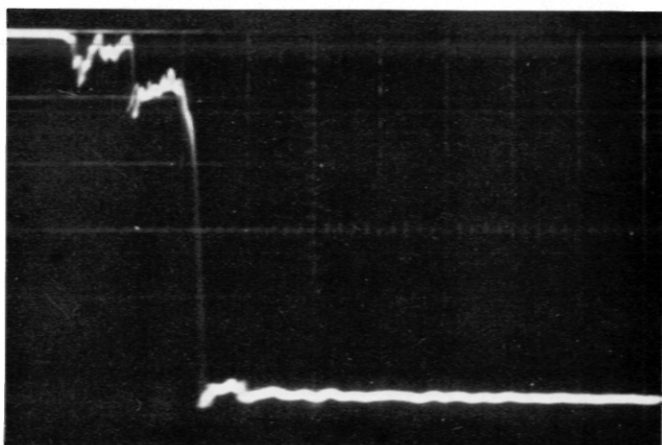
Auf der Abb. 20 ist die Trennfunkenstrecke mit den Kabelausgängen und rechts der Pulstrafo des Generators A 1 zu sehen. Hinweise über die Spannungsbelastbarkeit des verwendeten Koaxialkabels siehe unter Abschnitt 'Kabel'.

6.2 Generator A 2

Wie aus dem Schaltbild Abb. 24 hervorgeht, handelt es sich hier prinzipiell um die gleiche Schaltung. Die Triggerelektrode liegt jedoch auf der halben Ladespannung (Kondensatorgehäuse), da keine Spannung von außen zugeführt wird. An der Funkenstrecke der zweiten Stufe bewirkt eine zusätzliche Elektrode eine Bestrahlung dieser Strecke. Mit dieser Schaltung wurde die zeitliche Streuung und Durchlaufverzögerung entsprechend dem Verlauf in Abb. 25 aufgenommen. Den Spannungsverlauf am Generatorausgang mit verschiedenen Belastungswiderständen zeigen die beiden Oscillogramme der Abb. 11.



$R = 130 \text{ Ohm}$
+ 6 kOhm Teiler
(parallel)
 $t = 50 \text{ ns/E}$
 $\hat{U} = 80 \text{ kV}$
 $s = 2 \text{ kV/ns}$



$R = 8 \text{ kOhm}$
+ 6 kOhm Teiler
 $t = 50 \text{ ns/E}$
 $s = 1 \text{ kV/ns}$

Abb. 11: Spannungsverlauf am Ausgang des zweistufigen Marx-Generators mit verschiedenen Belastungswiderständen R

6.3 Generator A 3

Das Schaltbild dieser dreistufigen Marxschaltung ist in Abb. 28 dargestellt und der Aufbau ist auf Abb. 26 zu sehen. Mit 12 Koaxialkabeln bestückt eignet sich der Generator zum Pumpen eines 10-J Fluorwasserstoff-Lasers [15]. Den Aufbau des 3 m langen HF-Laserexperiments zeigt die Abb. 27. Die Plexiglashaube auf dem Generator dient zur akustischen Abschirmung und gleichzeitig als Berührungsschutz. Der Verlauf von Strom, Spannung, Widerstand und Leistung an der Laserkammer in Abhängigkeit von der Zeit, ist in den Diagrammen der Abb. 29 aufgetragen.

6.4 Generator D 2

Zum Triggern von ferritentkoppelten Funkenstrecken dient z.B. der Generator mit offenen Funkenstrecken nach Abb. 32. Am Ausgang liegen 24 parallele Koaxialkabel (F.u.G. 6,5/18,6, $Z = 45\Omega$) je 12 m lang. Mit einer Stufenladespannung von ca. 35 kV erreicht der Spannungspuls am offenen Kabelende 120...140 kV mit einer Anstiegszeit von ca. 250 ns. Die zeitliche Streuung und die Durchlaufverzögerung dieses Generators als Funktion der Ladespannung sind in Abb. 33 aufgetragen.

6.5 Generator D 3

In einem gemeinsamen Gestell aus glasfaserverstärkten Polyesterprofilen sind zwei Generatoren, Abb. 34, mit Druckfunkenstrecken installiert. Das Schaltbild Abb. 35 zeigt eine ansteuerbare Kaskade (Abb. 42) in der ersten Stufe und zwei weitere Funkenstrecken mit zusätzlicher Bestrahlung. In dieser Ausführung dienen die Generatoren als Pulsladebatterie für das 500 kV-Theta-Pinch-Experiment. Die auf 125 kV aufzuladende Stoßbatterie besteht aus Blumleinbandleitern unter Wasser.

Die Entwicklung der Generatoren und Komponenten wurde durch die sorgfältige Arbeit und Vorschläge der Herren Franz Eder und Franz Hauck sehr unterstützt. Ihnen, sowie Herrn Ertl für die konstruktive Ausarbeitung sprechen wir hiermit unseren Dank aus.

LITERATUR

- / 1 / Toepler M.: Arch. f. Elektrotechnik, Bd. 18 (1972)
S. 328 - 339
- / 2 / Rompe R, Weizel W.: Ann. d. Phys., 6. Folge,
Bd. 1 (1947), S. 285
- / 3 / Braginskii S.J.: Soviet Physics JETP Bd. 7 (1958),
S. 1068
- / 4 / Preis H.: IPP 4/87, 1971
- / 5 / Klement G., Wedler H.: Proc. 6. Sympos. Fus. Techn.,
Aachen 1970, S. 241
- Proc. 7. Sympos. Fus. Techn.,
Greenoble 1972, S. 372
- / 6 / Bohn F.H.: Proc. 3. Symp. Fus. Techn.,
München 1964, S. 95
- / 7 / Petersen C.: Diss. TH Braunschweig, 1963
- / 8 / Pillsticker M.: ETZ-A, Bd. 89, 1968, H.2, S. 44
- / 9 / v. Mark E., Wedler H.: IPP 4/54, 1968
- /10 / Barnes P.M., Gruber J., James T.F.:
Culham, CLM-R71, 1967
- /11 / Klement G., Müller G.: IPP 4/28, 1966
- /12 / Klement G.: Lab. Not. 1969
- /13 / Kupfmüller K.: " Einführung in die theoret. Elektro-
technik ", Springer 1959, S. 139
- /14 / Gruber J.: Labor. Ber. Nr. 22, MPI 1961
- /15 / Pummer, Breitfeld, Klement, Wedler, Kompa:
Appl. Phys. Letters, Vol. 22, No 7,
1973, S. 319
- /16 / Friedrich J.: Proc. 6. Symp. Fus. Techn., Aachen 1970,
S. 378
- /17 / James T.: Proc. 7. Symp. Fus. Techn., Greenoble 1972,
S. 393
- /18 / Klement G., Wedler H.: Laborbericht v. 8.5.1972
- /19 / Hirano K., Nakano Y.: Jap. J. Appl. Phys. 6, 1967, S. 894,
- /20 / v. Mark E., Wedler H.: Lab. Bericht Feb. 1966

Kondensator		A	B	C	D
<u>Energie/Kondensator</u>	(J)	80/150	400/760	1060/2400	1375/1660
<u>Nennladespannung</u> (v.r. < 80 %)	(kV)	40	40	40	50
<u>Max. Betriebsspannung</u> (v.r. < 20 %)	(kV)	55	55	60	55
<u>Eigeninduktivität</u>	(nH)	70	50	200	41
<u>Innenwiderstand</u>	(mΩ)	155		41	38
<u>Kapazität</u>	(μF)	0,1	0,5	1,33	1,1
<u>Eigenfrequenz</u>	(MHz)	1,9	1,0	0,3	0,74
<u>Lebensdauer</u> (80 % v.r.)		25 000		100 000	25 000
<u>Bruttoenergiedichte</u>	(J/cm ³)	0,033	0,033	0,079	0,061
<u>Abmessungen</u> einschl. Klemmen	(cm)	34x20x13	36x34x14	49x25x14	56x35x134
<u>Gewicht</u>	(kp)	13	23	22	46
<u>Klemmen</u>		6 offen	6 offen	2 offen	1 koaxial
<u>Hersteller-Firma</u>		Hydra / Esta	Ero/Esta	BICC	Siemens (Esta/BICC)

Abb. 12: Daten von Kondensatoren, die in den Generator-Standardreihen verwendet werden.

1. Kondensator	2. Type	Type A				
		A 1	A 2	A 3	A 5	
3. Generator-Stufenzahl		1	2	3	5	
4. Generator-Energie (J)		80/150	160/300	240/450	400/750	
5. Nennladespannung (kV)		40/55	40/55	40/55	40/55	
6. Leerlaufspannung (kV)		40/55	80/110	120/165	200/275	
7. Kurzschlußstrom (kA)		32	30	30	30	
8. Kurzschlußfrequenz (MHz)		1,4	1,3	1,3	1,3	
9. Arbeitsbereich mit Jitter 20 nsec		30 bis 45 kV (a = const.)				
10. Innenwiderstand (mΩ)		135	250	375	625	
11. Induktivität (nH)		125	300	450	750	
12. Reihen-Kapazität (nF)		100	50	33	20	
13. Abmessungen	Höhe = 30 (cm) Länge = 75 (cm)	55	75	95	130	

Abb. 13 : Generatortype A

	Type B				
	B 1	B 2	B 3	B 5	B 5
1. Kondensator					
2. Type					
3. Generatorsufenzahl	1	2	3	5	5
4. Generator-Energie (J)	400/760	800/1520	1200/2280	2000/3800	2000/3800
5. Nennladespannung (kV)	40 / 55	40/55	40/55	40/55	40/55
6. Leerlaufspannung (kV)	40/55	80/110	120/165	200/275	200/275
7. Kurzschlußstrom (40 kV) (kA)	80	73	73	82	82
8. Kurzschlußfrequenz (KHz)	712	650	651	581	581
9. Arbeitsbereich Jitter 20 < ns	30 bis 45 kV				
10. Innenwiderstand					
11. Induktivität (nH)	100	240	360	600	600
12. Reihenkapazität (nF)	500	250	166	125	125

Abb. 14: Generatortype B

1. Kondensator	Type C				
	C 1	C 2	C 3	C 5	C 5
2. Type	1	2	3	5	5
3. Generatorstufenzahl					
4. Generator-Energie (kJ)	1.06/2.4	2.1/4.8	3.2/7.2	5.3/12	
5. Nennladespannung (kV)	40/60				
6. Leerlaufspannung (kV)	40/60	80/120	120/180	200/300	
7. Kurzschlußstrom (40 kV) (kA)		75			
8. Kurzschlußfrequenz (kHz)		253			
10. Innenwiderstand (mΩ)		100			
11. Induktivität (nH)		600			
12. Reihenkapazität (μF)	1.33	0.66	0.44	0.26	

Abb. 15: Generatortype C

		Type D				
		D 1	D 2	D 3	D 5	
1. Kondensator						
2. Type		1	2	3	5	
3. Generatorstufenzahl		1	2	3	5	
4. Generator-Energie (kJ)		1375/1660	2.75/3.32	4.12/5	6.81/8.3	
5. Nennladespannung (kV)		50	50/55	50/55	50/55	
6. Leerlaufspannung (kV)		50/55	100/110	150/165	250/275	
7. Kurzschlußstrom (kA)		120	100	100	100	
8. Kurzschlußfrequenz (KHz)		400	340	340	340	
9. Arbeitsbereich (Jitter 20 ns)		32 bis 48 kV				
10. Innenwiderstand (mΩ)		27	55	75	125	
11. Induktivität (uH)		140	400	600	1000	
12. Reihenskapazität (μF)		1,1	0,550	0,366	0,220	

Abb. 16 : Generatortype D

- 1: $U_S=50$ kV, $a=5$, $b=2.75$, $p=2.7$ atm, $L=15$ nH /6/
- 2: $U_S=27.5$ kV, $a=9$, $b=4.75$ /7/
- 3: $U_S=104$ kV, $a=6.5$, $b=2.5$, $p=6$ kp/cm², $L=20$ nH /8/
- 4: $U_S=60$ kV, $a=7$, $b=4$, $p=3.5$ atm, $L=15$ nH /16/

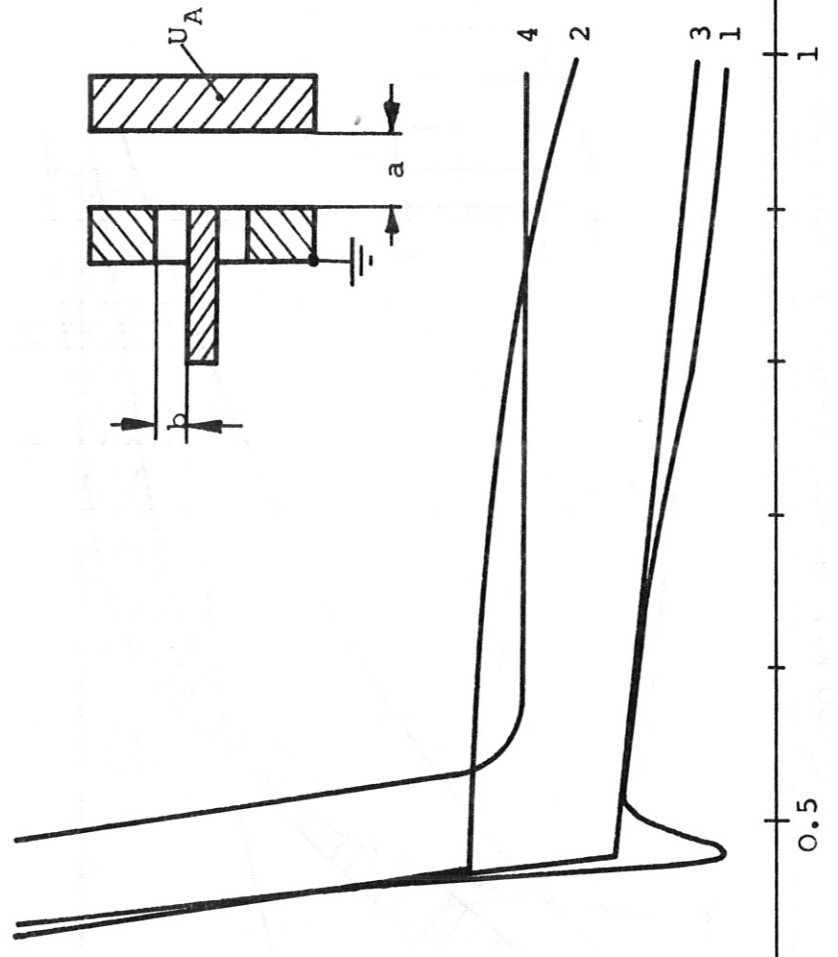
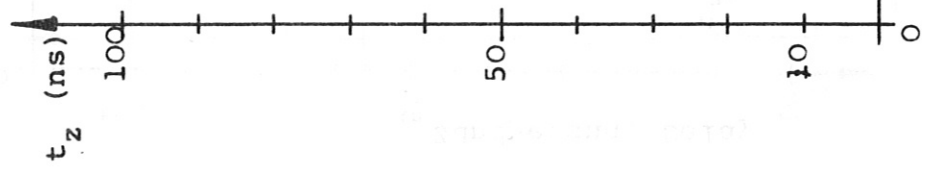
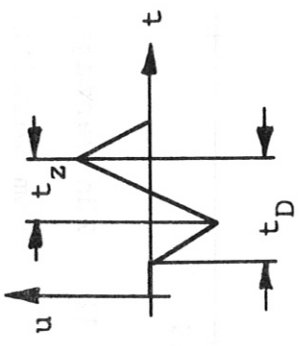


Abb. 17 Zündverzugszeit t_z von Trigatronfunkenstrecken abhängig vom
 Verhältnis $\frac{\text{Arbeitsspannung } U_A}{\text{Stat. Durchbruchspg. } U_S}$

- 1: $U_S=52$ kV, $a=3$, $b=2$, $p=4.3$ kp/cm², $L=35$ nH, 30:50 /11/
- 2: $U_S=57$ kV, $a=14$, $b=8.5$, $L=40$ nH, 50:23 \emptyset /12/
- 3: $U_S=55$ kV, $a=b=9$, $L=60$ nH, 50 \emptyset /20/
- 4: $U_S=60$ kV, $a=4.8$, $b=3.2$, $L=15$ nH, $S=4$ kV/ns, $r=0.5$ /10/
- 5: $U_S=60$ kV, $a=b=15$, $S=0.35$ kV/ns, Nadeln /19/



Abb.: 18 Zündverzugszeit t_z oder Delay t_D von 3-Elektrodenfunkenstrecken abhängig vom Verhältnis Arbeitsspannung U_A / Stat.Durchbruchspannung U_S

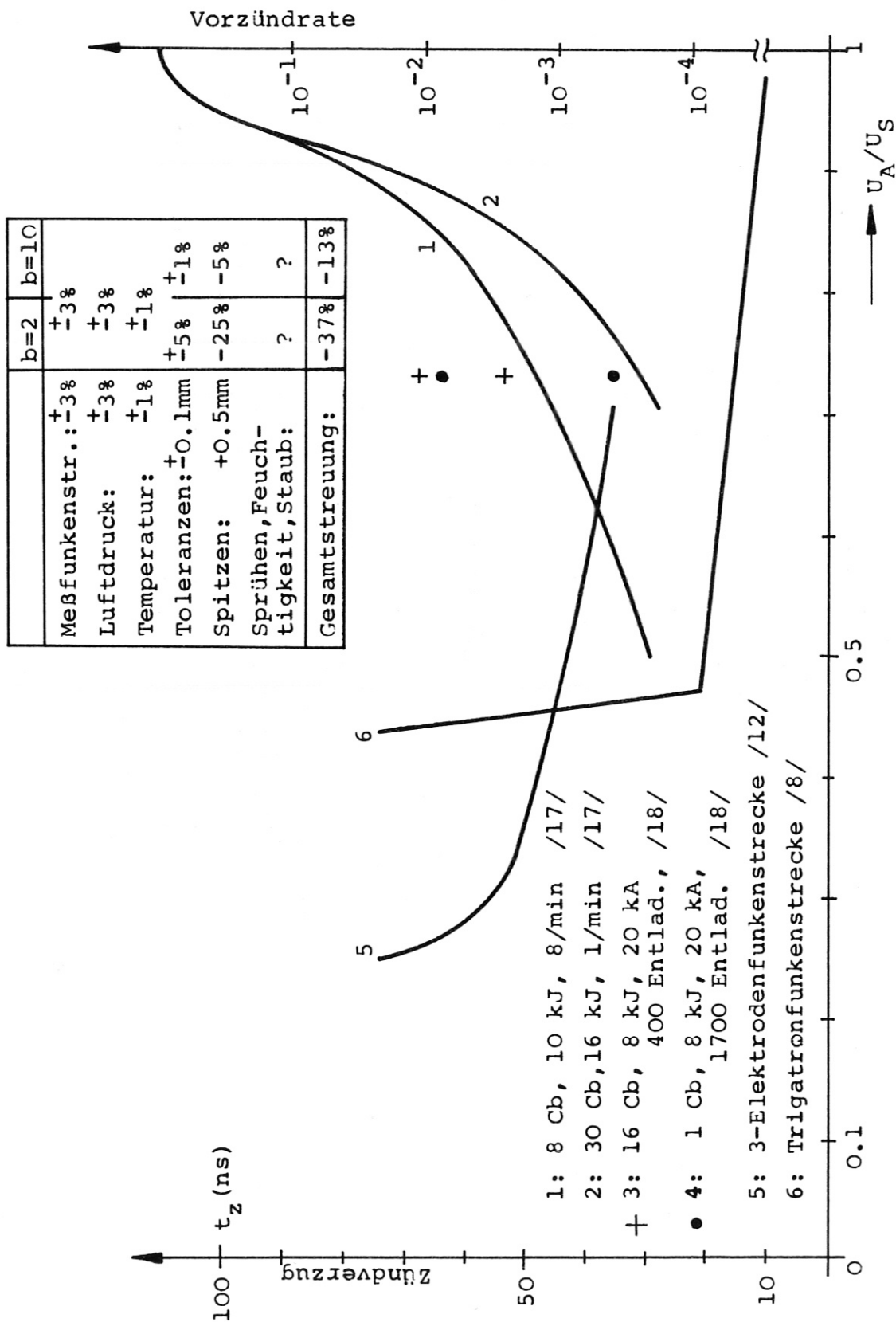


Abb.: 19 Die Vorzündrate und der Zündverzug einzelner Funkenstrecken abhängig vom Verhältnis Arbeitsspannung U_A / Stat. Durchbruchspannung U_S

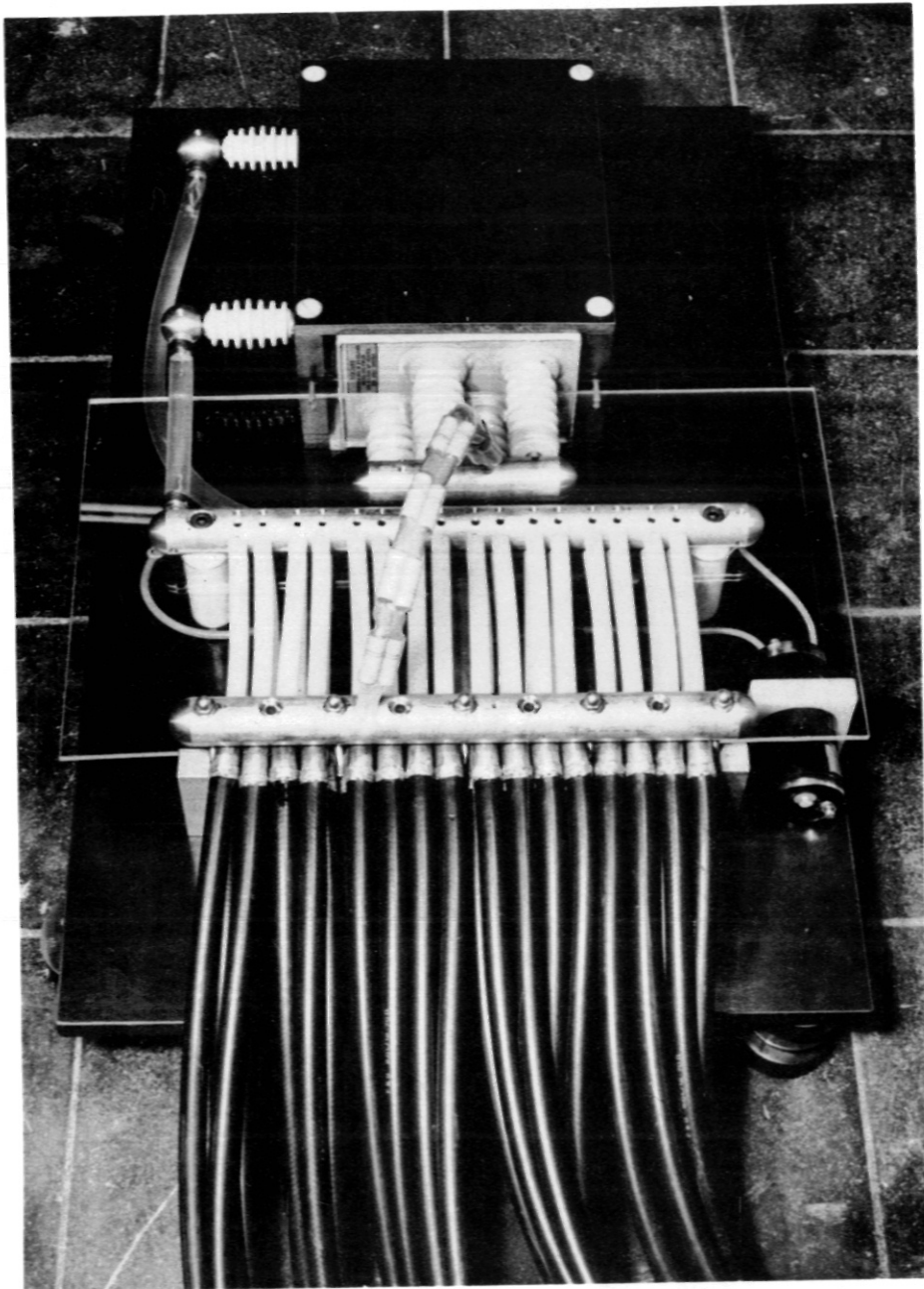


Abb. 20 Puls-Generator Type A 1

Stufenzahl 1, Energie 80 J, Innenwiderstand 135 mOhm

Nennladespannung 40 kV, Leerlaufspannung 40 kV

Kurzschlußstrom 32 kA, Induktivität 125 nH

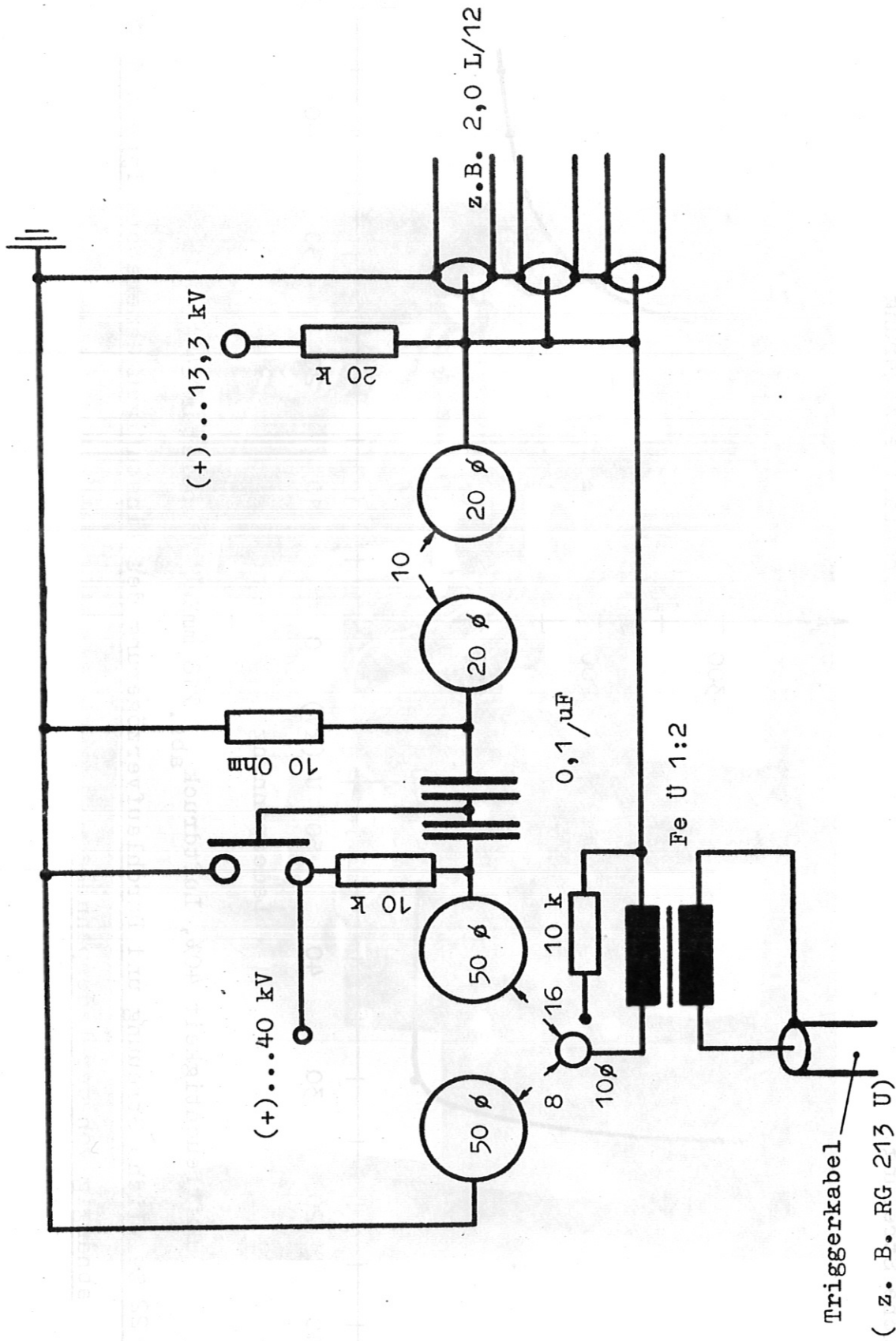
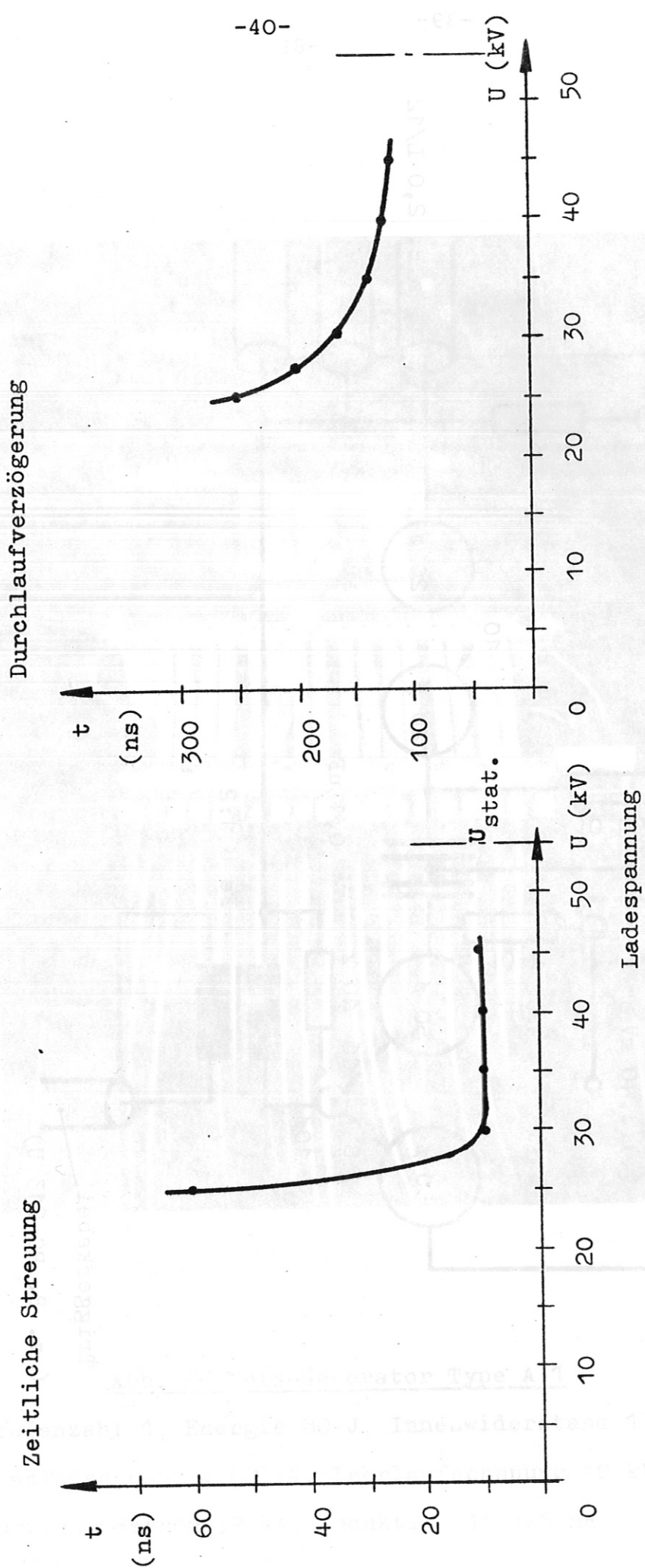


Abb. 21 Schaltbild des einstufigen Generators Type A 1

mit Trennfunktenstrecke im Ausgang



Luftfeuchtigkeit 40%, Luftdruck abs. 716 mmHg, Temperatur 24 °C

Abb. 22 Zeitliche Streuung und Durchlaufverzögerung des einstufigen Generators Type A 1
abhängig von der Ladespannung

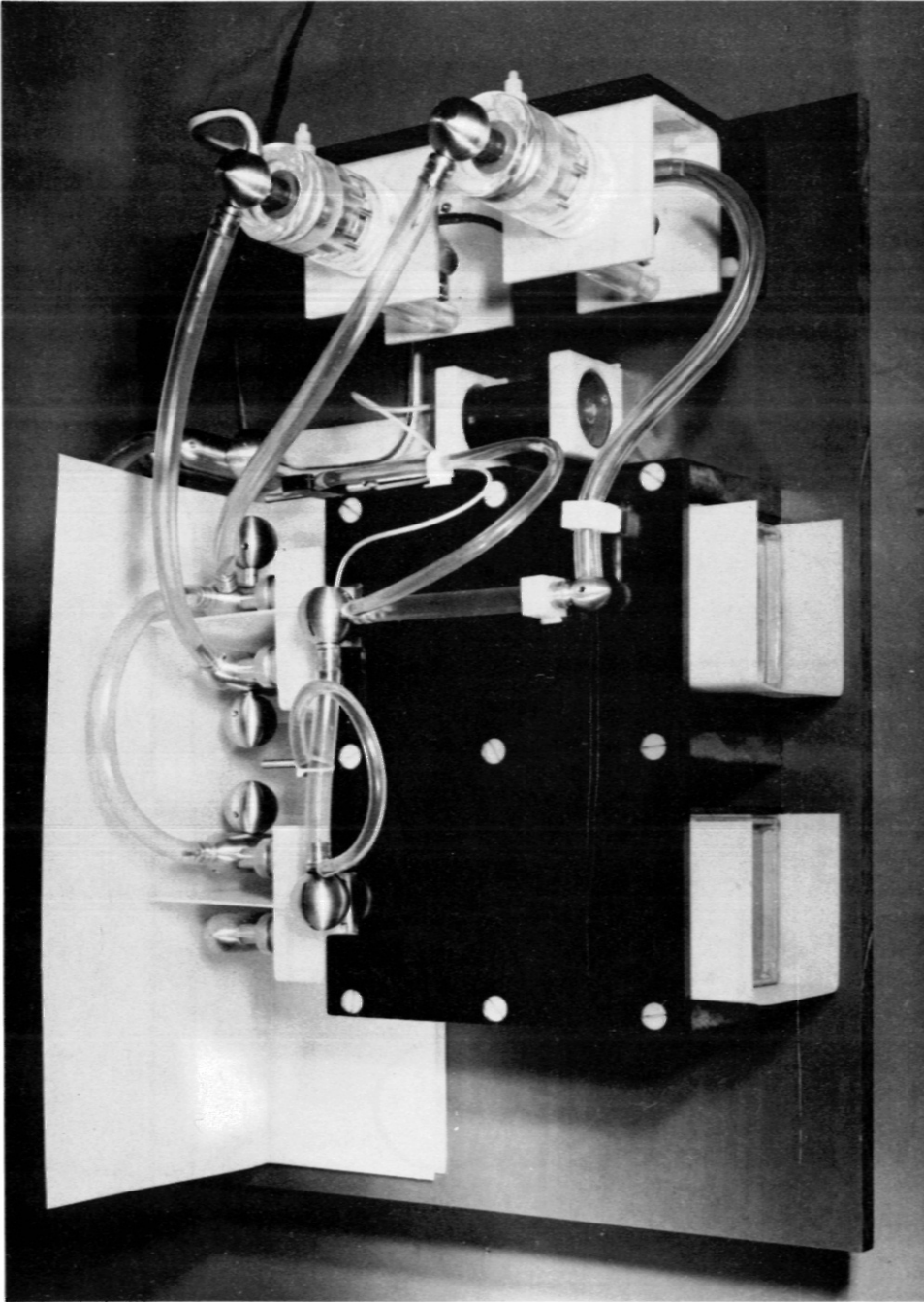


Abb. 23 Marx-Generator Type A 2

Stufenzahl 2, Energie 160 J, Nennladespannung 40 kV, Leerlaufspannung 80 kV
Kurzschlußstrom 80 kA, Induktivität 300 nH, Innenwiderstand 135 mOhm

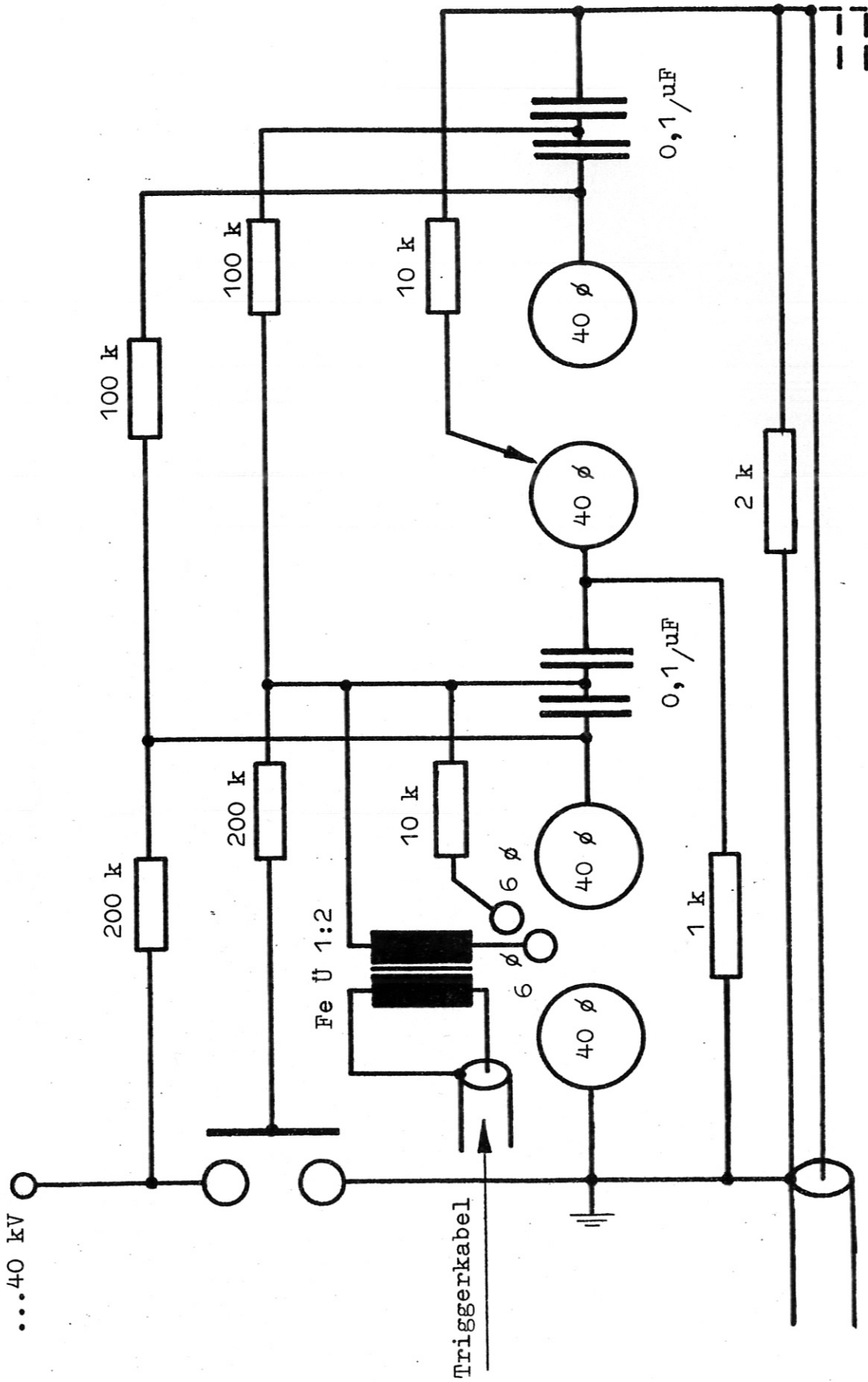
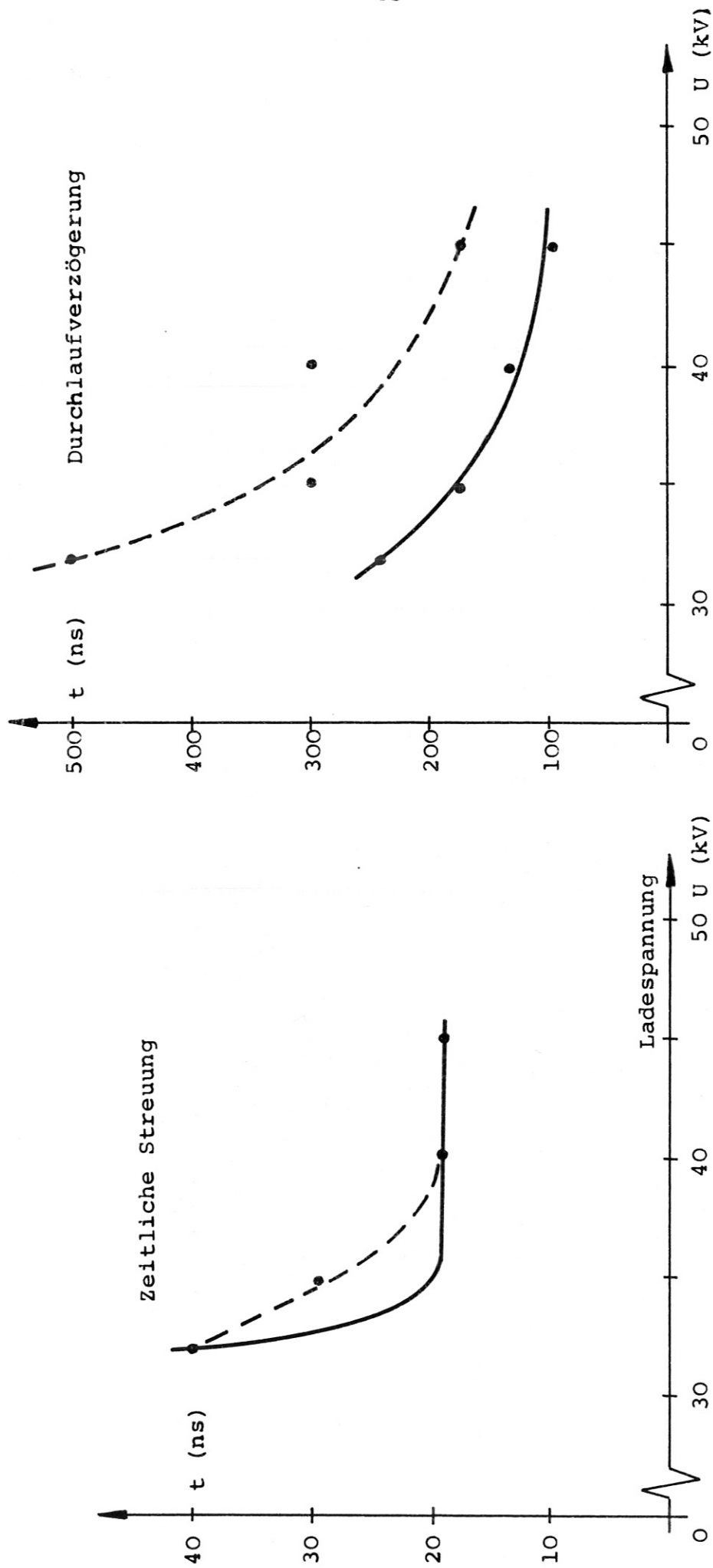


Abb. 24 Schaltbild des zweistufigen Marx-Generators Type A 2



— $R = 130 \text{ Ohm}$ - - - $R = 8 \text{ kohm}$, jeweils 6 kohm-Teiler parallel
Luftfeuchtigkeit 40%, Luftdruck 716 mmHg abs., Temperatur 24 °C

Abb. 25 Zeitliche Streuung und Durchlaufverzögerung des zweistufigen Marx-Generators A 2 abhängig von der Ladespannung

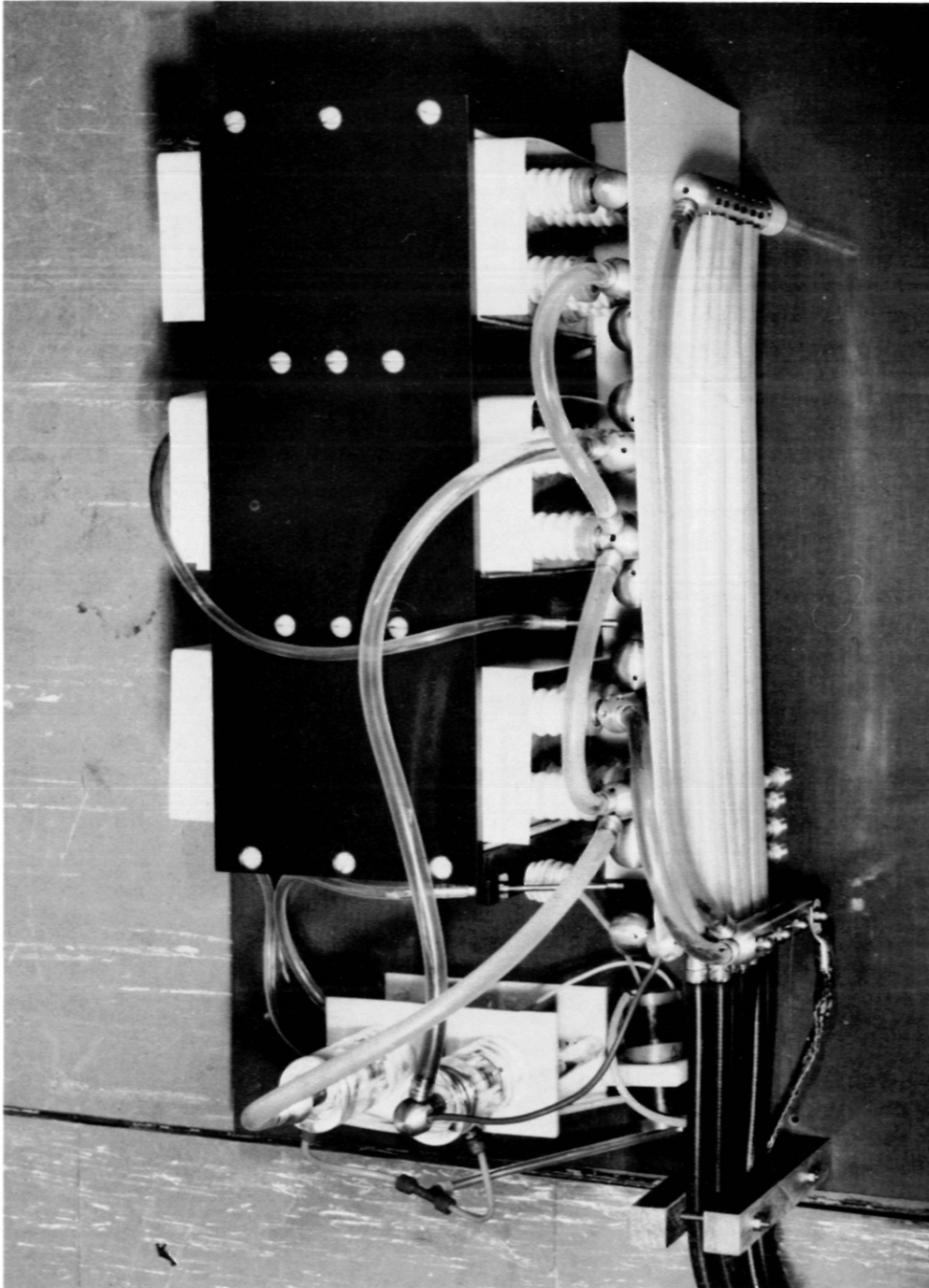


Abb. 26 Marx-Generator Type A 3

Stufenzahl 3, Energie 240 J, Nennladespannung 40 kV, Leerlaufspannung 120 kV
Kurzschlußstrom 30 kA, Induktivität 450 nH, Innenwiderstand 375 mOhm

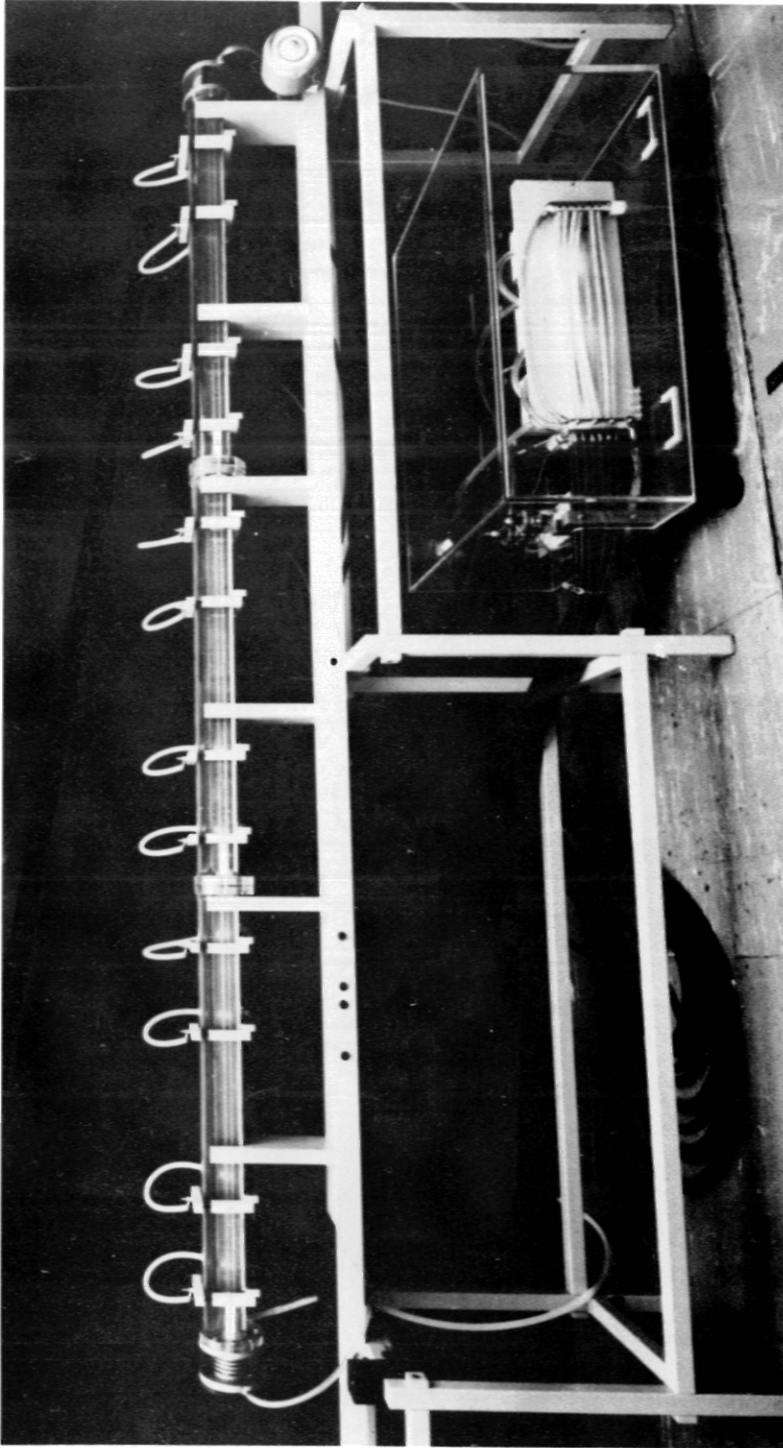


Abb. 27 Marx-Generator Type A 3 mit akustischer Abschirmung
zum Pumpen eines 3 m langen Fluor-Wasserstofflasers

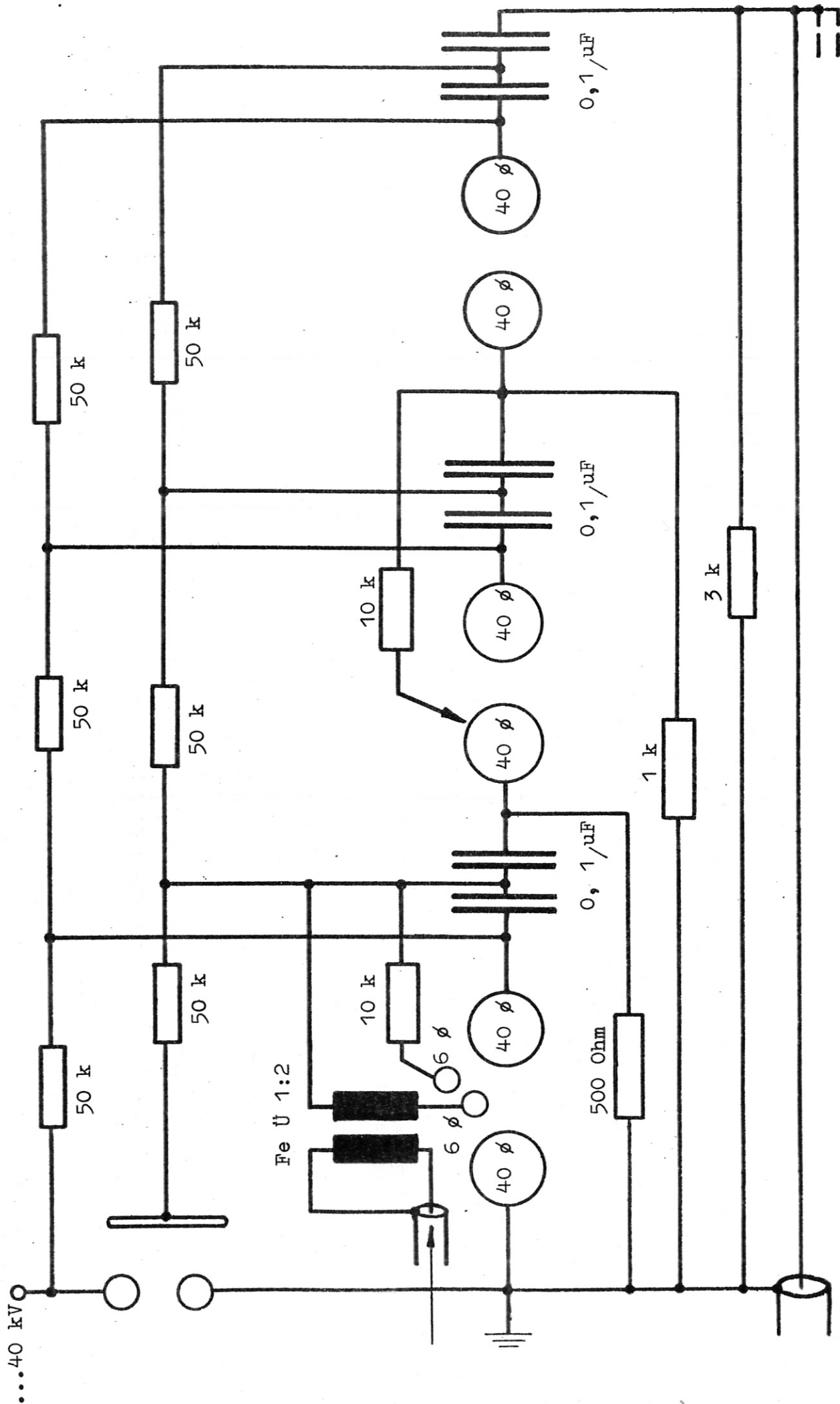


Abb. 28 Schaltbild des dreistufigen Marx-Generators Type A 3

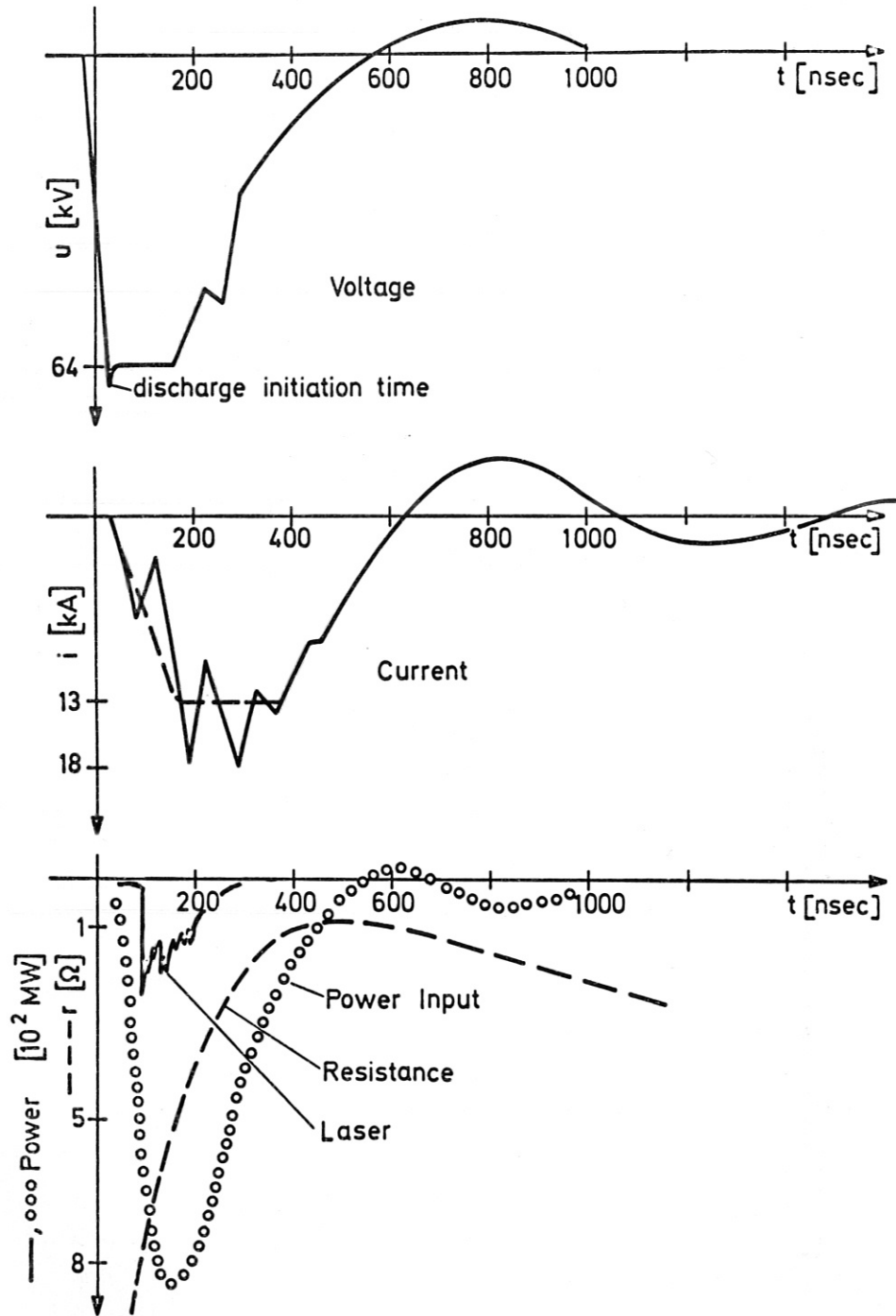


Abb. 29 Typischer Verlauf des Stromes, der Spannung, des Widerstandes und der Leistung, beim Pumpen eines HF-Lasers, mit einem dreistufigen Marx-Generator Type A 3

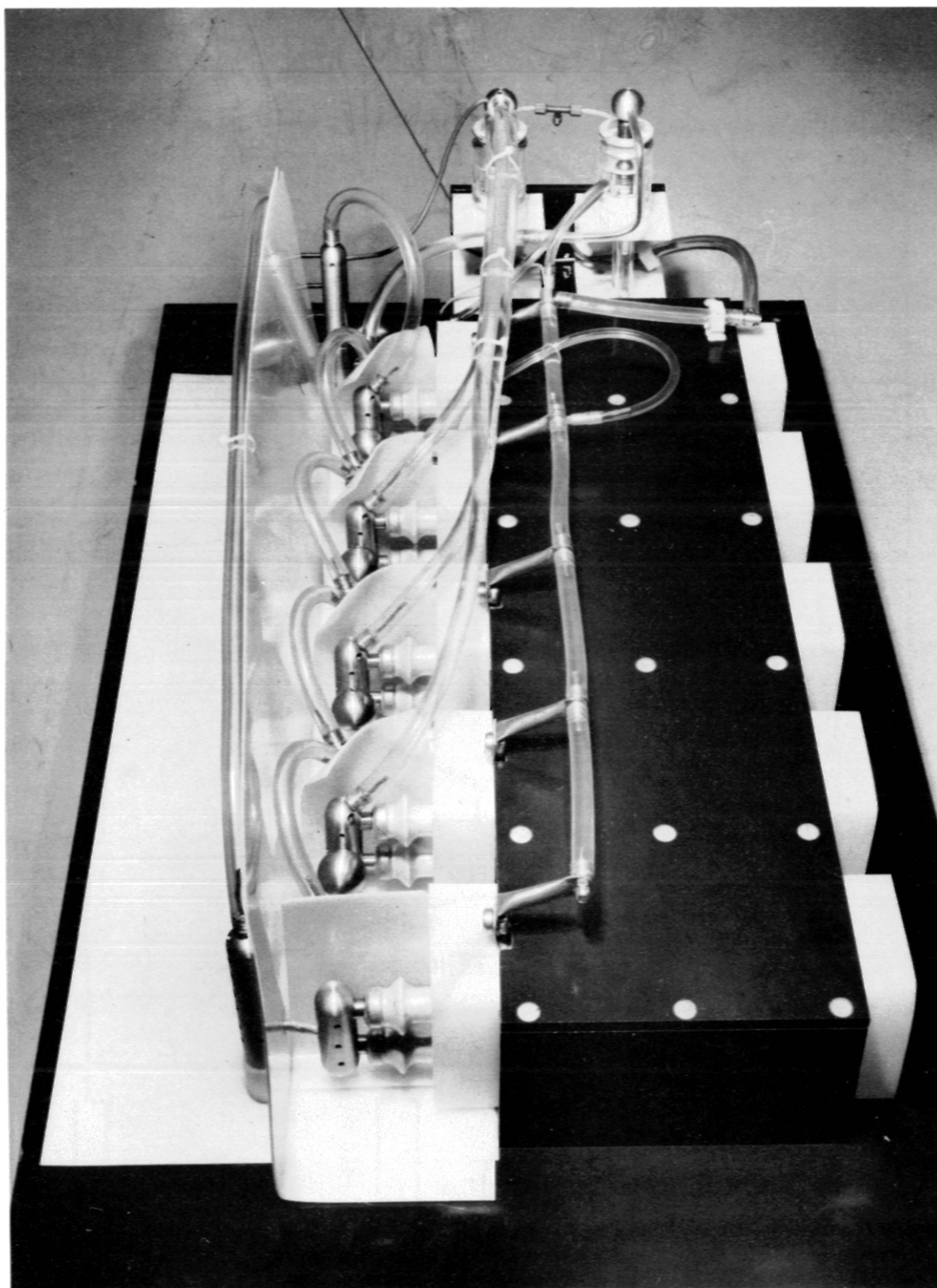


Abb. 30 Marx-Generator Type A 5

Stufenzahl 5, Energie 400 J, Innenwiderstand 625 mOhm

Nennladespannung 40 kV, Leerlaufspannung 200 kV

Kurzschlußstrom 30 kA, Induktivität 750 nH

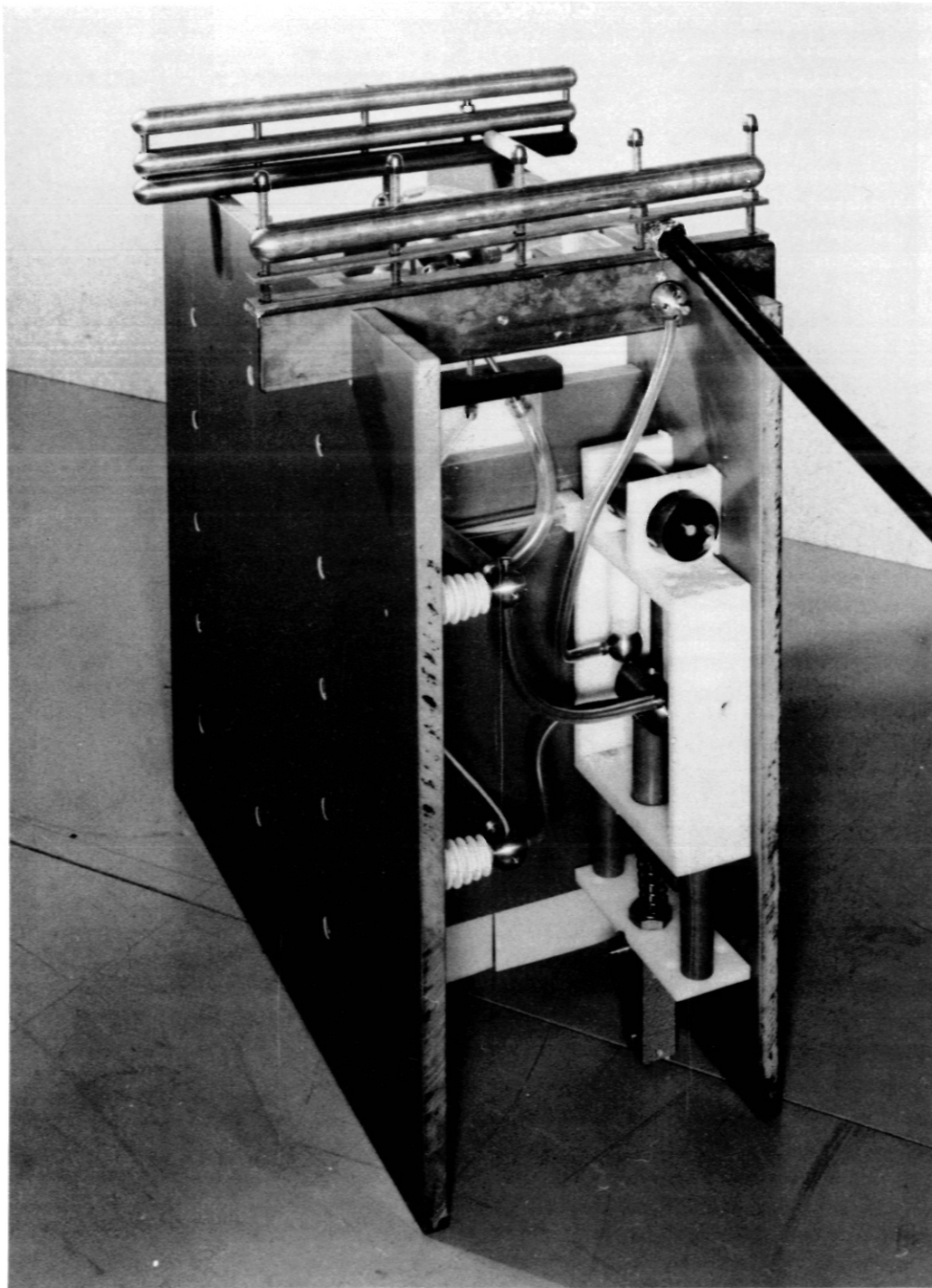


Abb. 31 Marx-Generator Type C 2

Stufenzahl 2, Energie 2,1 kJ, Innenwiderstand 100 mOhm

Nennladespannung 40 kV, Leerlaufspannung 80 kV

Kurzschlußstrom 75 kA, Induktivität 600 nH

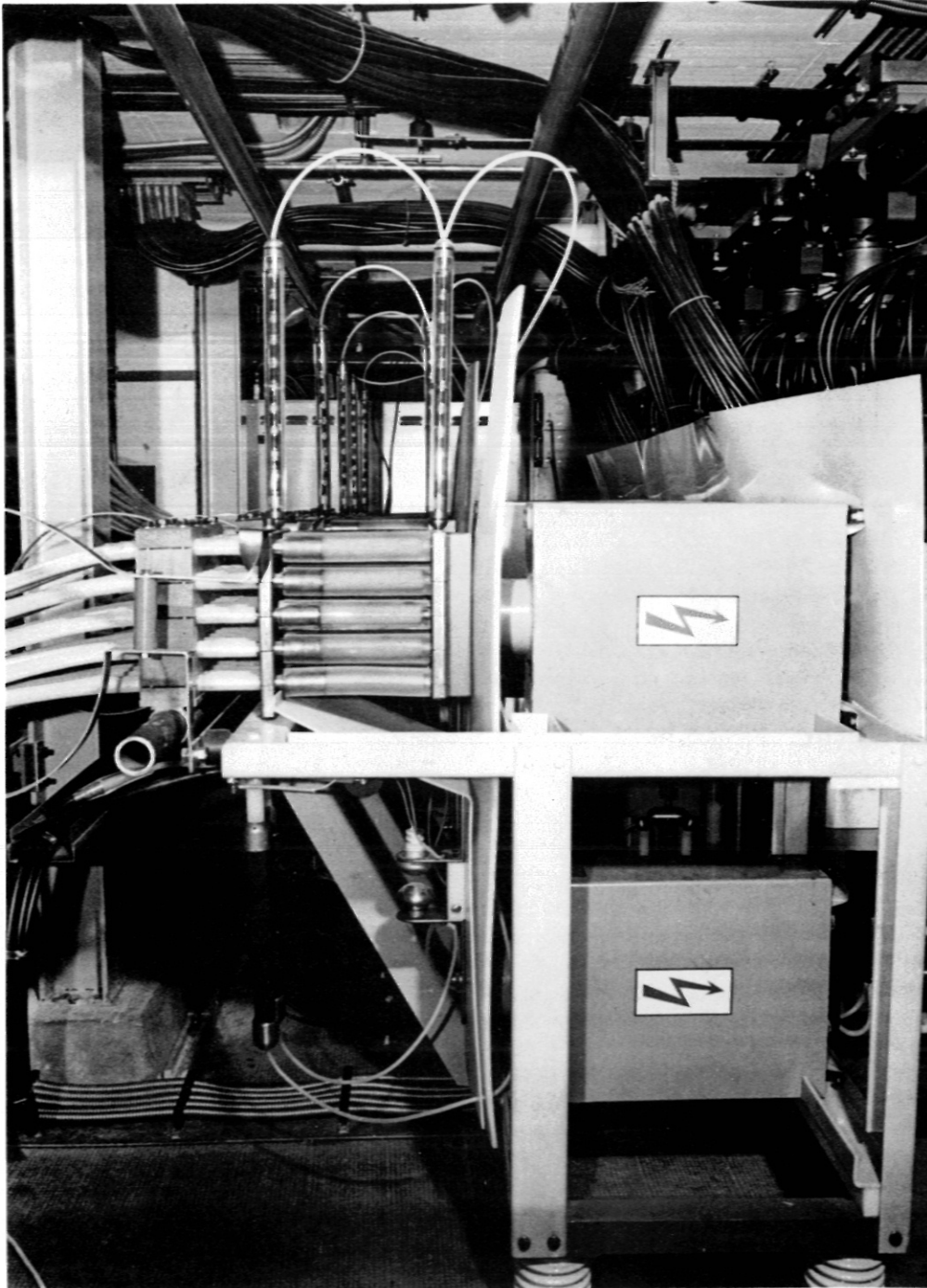
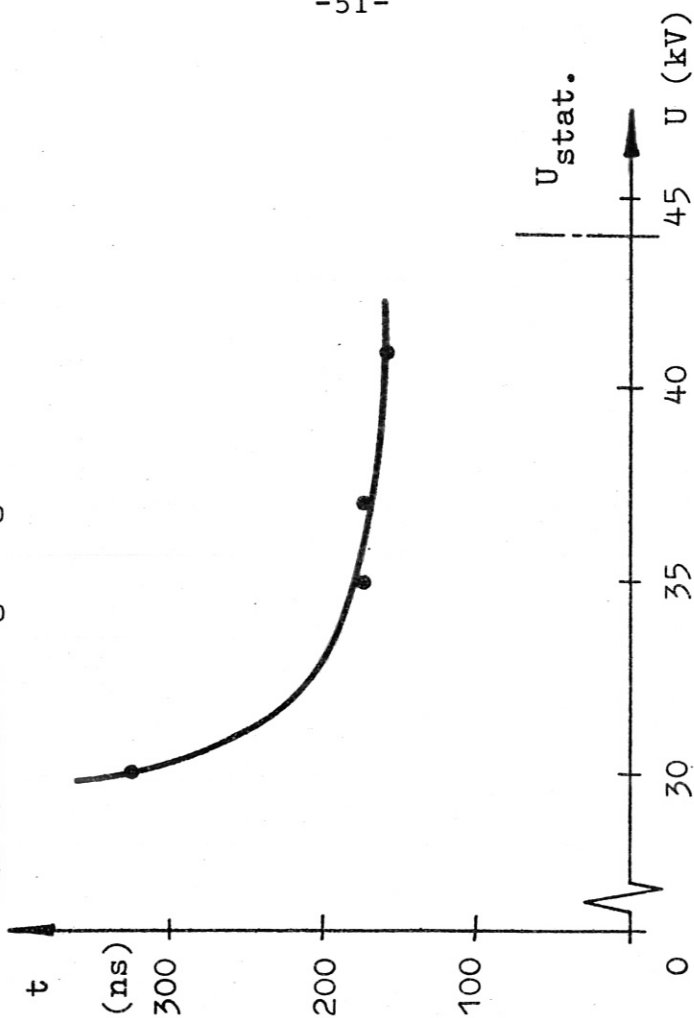


Abb. 32 Marx-Generator Type D 2

Stufenzahl 2, Energie 2,5 kJ, Innenwiderstand 55 mOhm
Nennladespannung 48 kV, Leerlaufspannung 96 kV
Kurzschlußstrom 100 kA, Induktivität 400 nH

Durchlaufverzögerung



Zeitliche Streuung

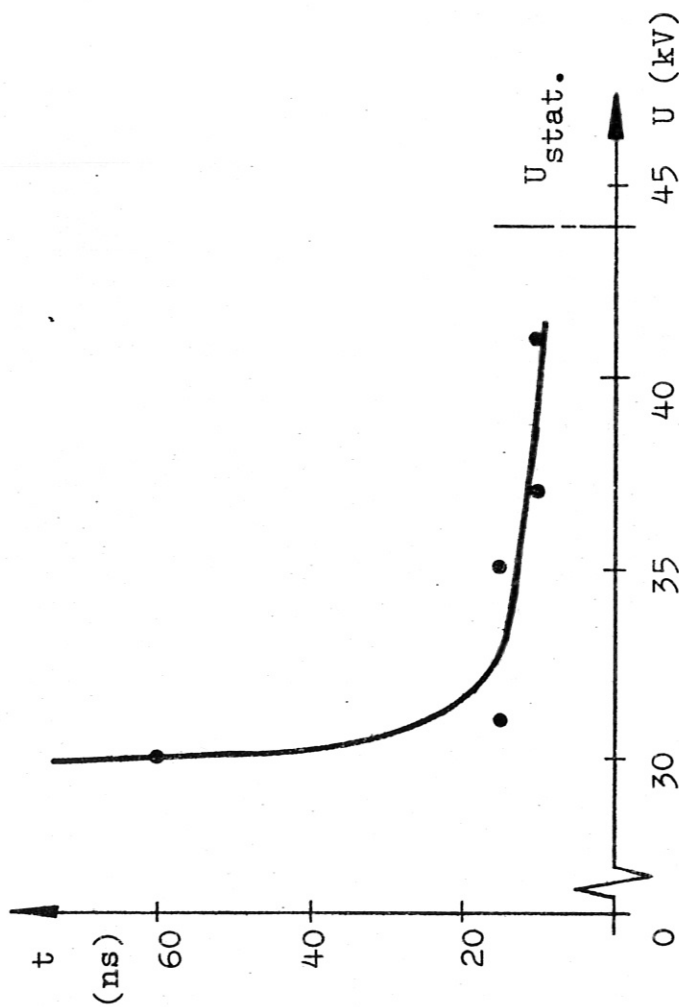


Abb. 33 Zeitliche Streuung und Durchlaufverzögerung des zweistufigen Marx-Generators

Type D 2, abhängig von der Ladespannung

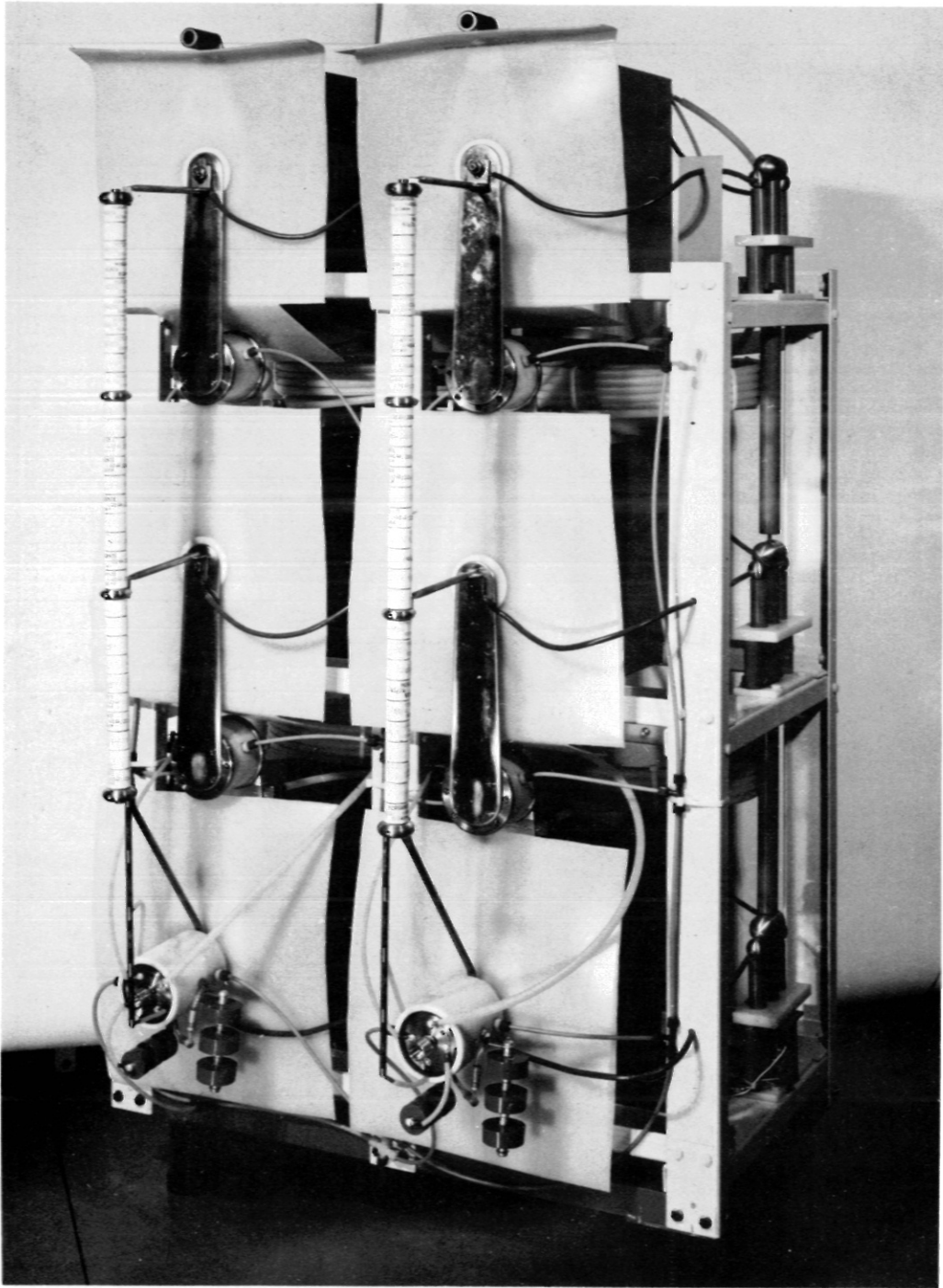


Abb. 34 Marx-Generator Type D 3

Stufenzahl 3, Energie 3,75 kJ, Innenwiderstand 75 mOhm

Nennladespannung 48 kV, Leerlaufspannung 144 kV

Kurzschlußstrom 100 kA, Induktivität 600 nH

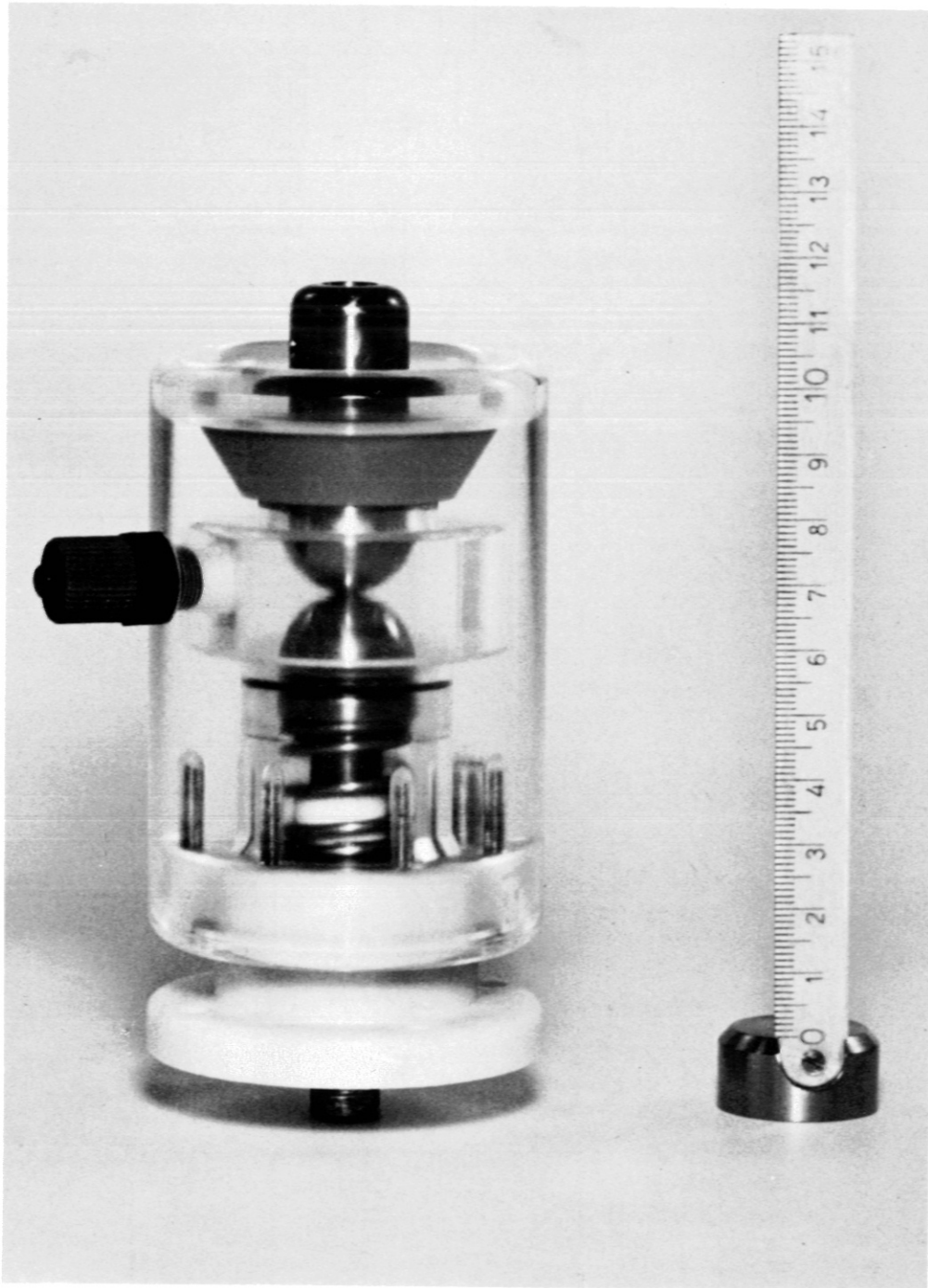


Abb. 36 Druckluftschalter.

Nennspannung 60 kV, Prüfspannung 80 kV

Betriebsdruck 5 atü

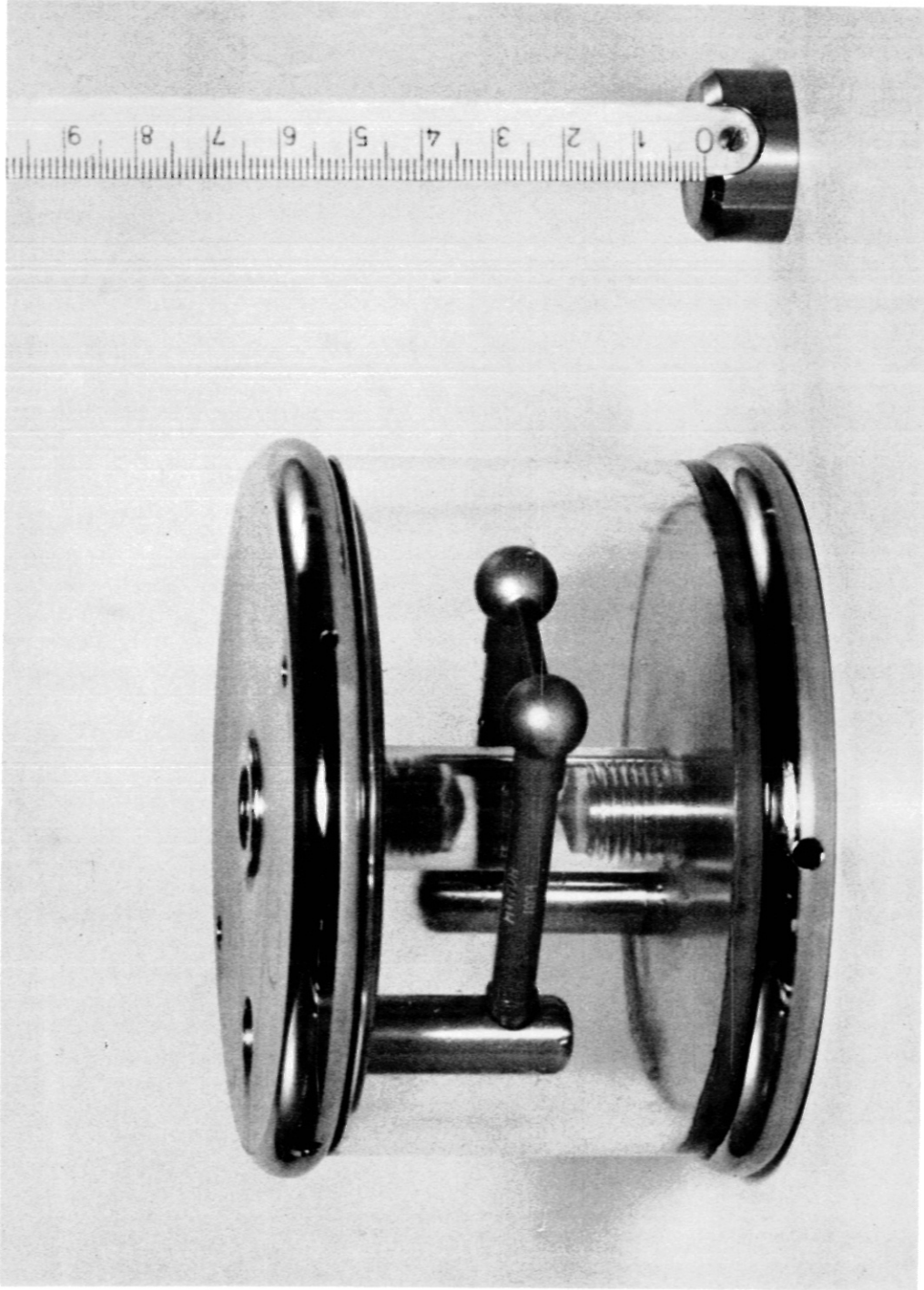
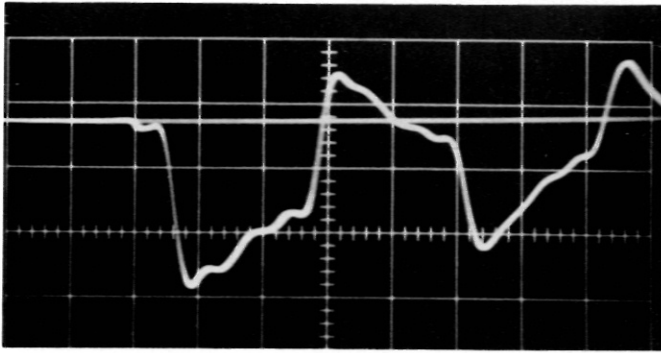


Abb. 37 Meßwiderstand, 200 MOhm, 20 kV.



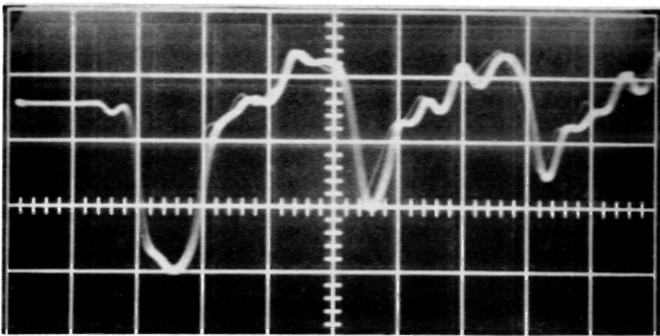
Puls am offenen Kabelende

$$\hat{U} = 20,4 \text{ kV}$$

$$T_{A10/90} = 15 \text{ ns}$$

$$T_A 0/100 = 25 \text{ ns}$$

$$t = 50 \text{ ns/E}$$



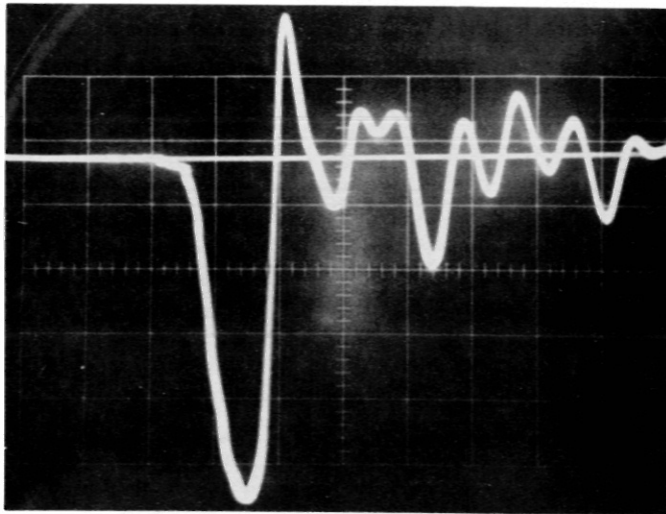
Puls am Trafo primärseitig

$$\hat{U} = 19,6 \text{ kV}$$

$$T_{A10/90} = 20 \text{ ns}$$

$$T_A 0/100 = 45 \text{ ns}$$

$$t = 50 \text{ ns/E}$$



Puls am Trafo sekundärseitig

$$\hat{U} = 41,5 \text{ kV}$$

$$T_{A10/90} = 30 \text{ ns}$$

$$T_A 0/100 = 45 \text{ ns}$$

$$t = 50 \text{ ns/E}$$

Abb. 38 Gemessener Spannungsverlauf am Pulstrafo
mit Ferritringkernen, Übertragungsverhältnis 2



Abb. 39 Druckaufsteilfunkenstrecke

Betriebsdruck max. 15 atü

Elektrodenabstand 3 mm

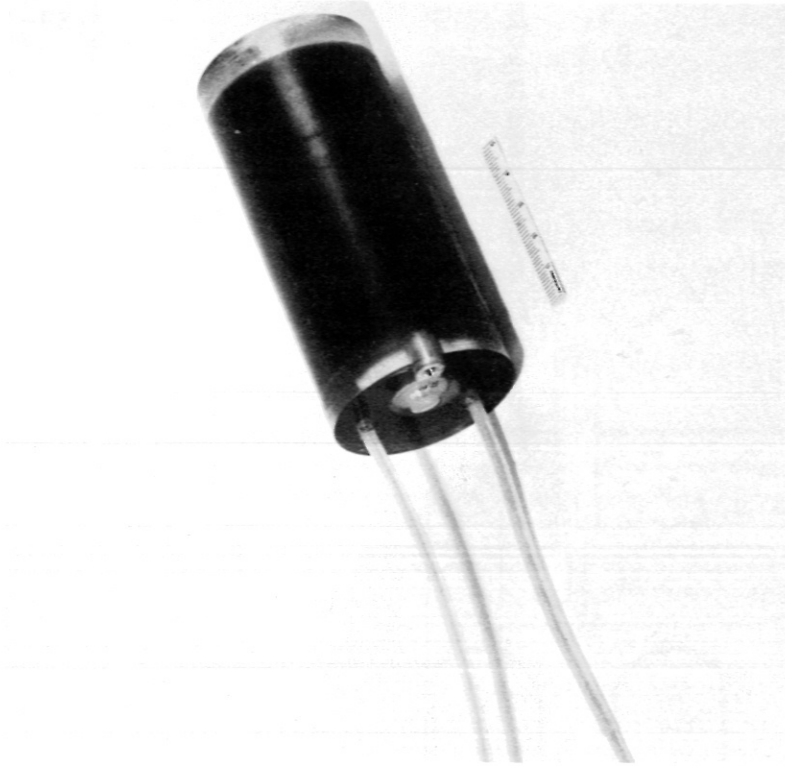
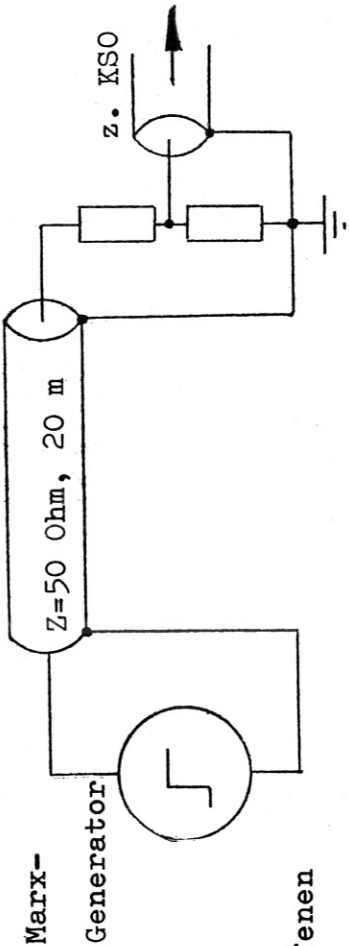
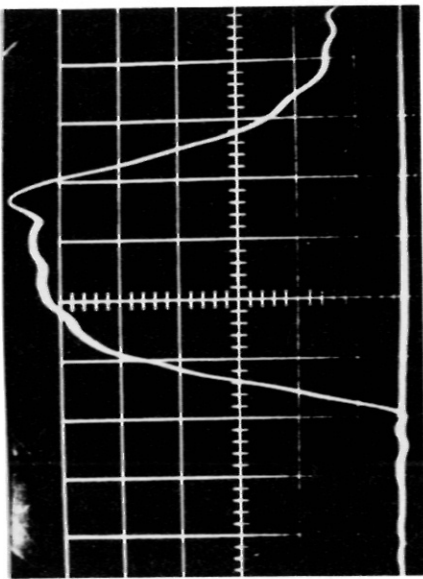


Abb. 40 Pulstrafo mit Ferritringkernen

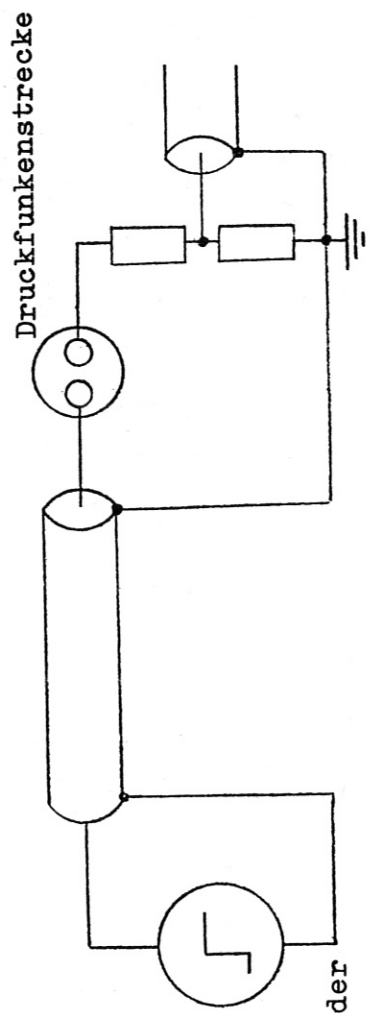
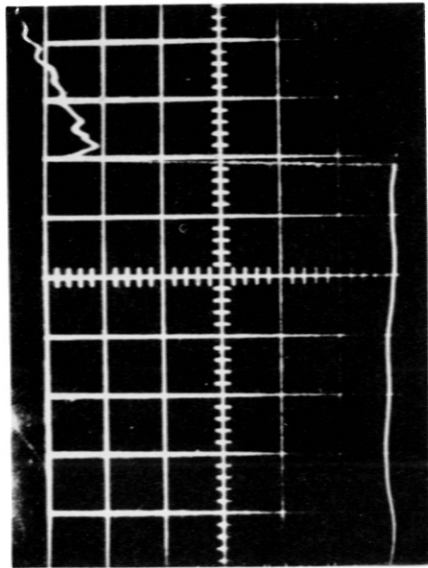
Übertragungsverhältnis = 2

prim. 19,6kV/20ns; sek. 41,5kV/30ns



$t = 50 \text{ ns/E}$
 $u = 16 \text{ kV/E}$

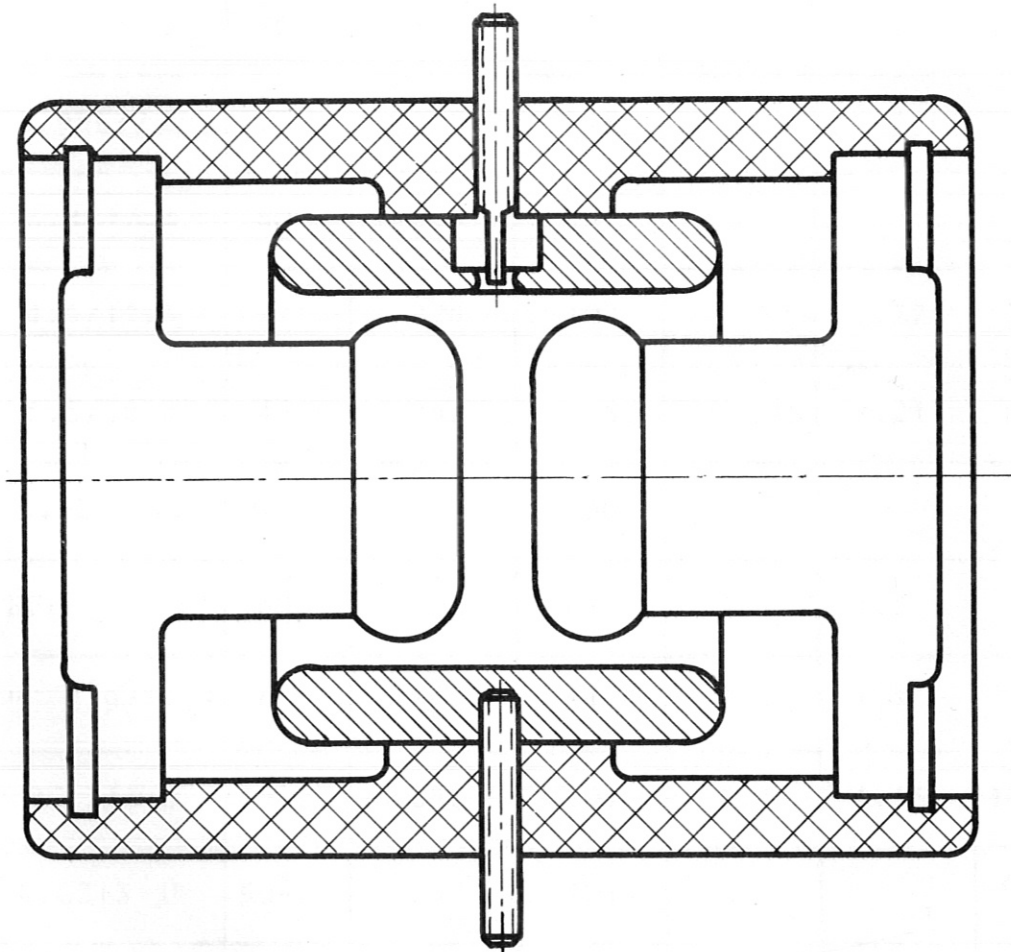
Spannung am offenen
 Triggerkabel



$t = 20 \text{ ns/E}$
 $u = 16 \text{ kV/E}$

Spannung nach der
 Aufsteilfunkenstrecke

Abb. 41 Spannungsverlauf am offenen Kabelende und nach der Aufsteilfunkenstrecke gemessen



$$U_A = 60 \text{ kV}$$
$$L = 50 \text{ nH}$$

$$W = 5 \text{ kJ}$$
$$f = 100 \text{ kHz}$$

$$U_T = 0.5 U_A$$

Abb. 42 3-Elektroden-Druckfunkenstrecke

Firma	Type	Z (Ω)	L (nH/m)	C (pF/m)	$R_i =$ (m Ω /m)	$R_a =$ (m Ω /m)	$R_{ges} =$ (m Ω /m)	$\alpha_{1,10}$ (100k (N/
F u. G.	1,5L/6.6	60 ^{+5%}	306	85	11.6	6.55	18.15	
"	1.5 / 6.6	60 ^{+2%}	306	85	9.8	4.7	14.50	0.2
"	2.1L/7.3	50 ⁺⁴	250	100				
"	2.0L / 12	70	352	72	7.2	4.8	12.0	
"	0.95L/2.2	35	177	145				
"	3.8/17.3	60	306	85				0.0
"	4.9/17.3	52	278	102	1.27	1.37	2.64	0.0
"	6.5/18.6	45	262	128	0.545	1.24	1.785	
"	4.6L/13.2	~40	210	130				
Kabelmet.	HFE 2.3/10B	60	302	84	4.5	4.5	90	0.2
"	" 3.9/17.3	60	302	84	1.46	1.3	2.76	
"	RG 213 U	50 ⁺²	252	101	6.1	4.15	10.25	
F u. G	R.G213 U	50 ⁺²	252	101				
Fileca	Abt. 1	30	160	178				
Suhner	RG 8A/U	52 ⁺²	262	97	6.1	4.15		
"	RG 164 U	75 ⁺³	379	67.5				
"	RG 213 U	50 ⁺²	252	101			10.25	
"	RG 220 U	50 ⁺²	252	101	0.51	1.08	1.59	

$R_{=}$ = Gleichstromwiderstand

gr = graphitie

Tabelle II : Daten verschiedener Puls kabel

$\alpha_1 \cdot 10^{-3}$ (100kHz) (N/m)	$R = \alpha_1 \cdot 2Z$ (100kHz) (m Ω /m)	Seele \emptyset (mm)	PE \emptyset (mm)	Außen \emptyset (mm)	U_{eff} Liste 50 Hz (kV)	a (mm)	E_i (kV/cm)	E_a (kV/cm)
		1.5	6.6	9.0	4.5	2.55	8.99	2.04
0.22	26.4	1.5	6.6	9.0	4.5	2.55	8.99	2.04
		2.3	7.3	10.3	5.4	2.5	7.53	2.37
		2.0	12.0	15.6	7.0	5.0	5.58	0.93
		0.95	2.2	4.2	1.5	0.62	25	10.8
0.082	9.84	3.85	17.3	22		6.72	3.35	0.77
0.08	8.32	4.9	17.3	23.1		6.2	3.23	0.916
		6.5 gr	18. gr	23.5		6.05	2.93	1.02
		4.6 gr	13.2 gr	16.6		4.3	4.12	1.43
0.2	24.0	2.3	10	12.5		3.85	5.92	1.36
		3.9	17.3	23		6.7	3.44	0.78
		2.3	7.3	10.3	5	2.5	7.53	2.37
		2.25	7.25	10.3		2.5	7.60	2.36
		3.6	8.0			2.2	6.96	3.13
		2.3	7.25	10.3	5	2.5	7.57	2.40
		2.65	17.3	22	10	7.32	4.02	0.62
		2.3	7.25	10.3	5	2.5	7.57	2.40
		6.6	23.1	28.4	14	8.25	2.42	0.69

ntiert

a = Stärke des Die

	$G = \frac{a}{E_i}$ (mm/kV)	E_m (kV/cm)	Gewicht (p/m)	Biege- Radius (mm)	Preis 1973 o.Cu.Zuschl. (DM/m)	U_{Spitze} HF (kV)	U_{Spitze} Puls (kV)	$U_{=}$ (kV)
	2.84	3.33	114	90	1.15			
	2.84	3.33	124	90	0.98			
	3.32	3.61	175	100				
	8.96	1.59	306	160	3.18			
	0.25	7.56	31	40				
	20	1.26	780	300				
6	19.2	1.42	650	220	5.12			
	20.6	1.52	670					
	10.4	2.13			4.10			
	6.5	2.21	220	65	2.61	9.5	19	55
	19.5	1.27	651	110	6.58	17	34	100
	3.32	3.61	159	50	1.43	6	12	38
	3.3	3.60	157		1.52			
	3.2	4.32			3.50			
	3.3	3.65	160		1.92			
	18.2	1.07	570		8.15			
	3.3	3.65			2.85			
	34	1.08	1140		14.35			

ielektrikums

Korona- festigk. (kV)	U_{eff} 1MHz Dauer (kV)	Innen- leiter Cu
		Litze
3.5	2.7	massiv
5	3.5	Litze
		Litze
		Litze
9	6.3	
11	7	massiv
		7x2.15
		massiv
		massiv
		Litze
		Litze
		7x0.72
		massiv
		7x0.75
		massiv