

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

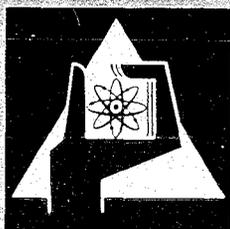
März 1971

KFK 916

Labor für Elektronik und Meßtechnik

Eine Stoßstromanlage mit 57 kW

S. Jacobi, R. Schneider, F. Will



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

März 1971

KFK 916

Labor für Elektronik und Meßtechnik

Eine Stoßstromanlage mit 57 kW

S. Jacobi

R. Schneider

F. Will

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M.B.H., KARLSRUHE



## Zusammenfassung

Die hier beschriebene Stoßstromanlage wird am Teststand für die Untersuchung von Nuklear-Aerosolen (TUNA) eingesetzt.

Sie hat die Aufgabe derart elektrische Leistung bzw. Energie an  $UO_2$ -Proben abzugeben, daß Reaktorexkursionen simuliert werden können. Die Untersuchung der dabei auftretenden nuklearen Aerosole, soll zur Klärung reaktorsicherheitstechnischer Fragen beitragen.

Die TUNA-Stoßstromanlage wurde speziell für den Experimentiereinsatz konzipiert. Die wichtigsten Anlagedaten wie gespeicherte Energie (max. 56 kWsec) und Entladezeit (60 - 180  $\mu$ s/Halbwelle) wurden variabel ausgelegt.

Wegen der hohen Ladespannung der Energie-Speicher Kondensatoren von maximal 18 kV und des daraus resultierenden maximalen Entladestromes von  $0,3 \cdot 10^6$  A wurden erhebliche Sicherheitsvorkehrungen getroffen.

## Abstract

The high-peak current facility described here is used on the test facility for investigation of nuclear aerosols TUNA (Teststand für die Untersuchung von Nuklear-Aerosolen).

It is supposed to release electric power and energy, respectively to  $UO_2$ -samples in such a way that reactor excursions can be simulated. The study of nuclear aerosols so produced is intended to help in clarifying questions of reactor safety technology.

The TUNA high-peak current facility was designed specifically for experimental use. The essential design data, such as stored energy (max. 56 kWsec) and discharging time (60 - 180  $\mu$ sec/half-wave) were made variable.

In view of the high maximum charging voltage of 18 kV of the energy storage capacitors and the resulting maximum discharging current of  $0,3 \cdot 10^6$  A considerable safety precautions were taken.

## 1. Einleitung

Auf Grund früherer Erfahrungen beim Bau von Stoßstromanlagen wurde durch Herrn Dr. Schikarski (IAR) dem LEM die hier beschriebene TUNA-Stoßstromanlage (TUNA = Teststand für die Untersuchung von Nuklear-Aerosolen) in Auftrag gegeben.

Im Rahmen des TUNA-Programmes hat die Stoßstromanlage die Aufgabe, derart elektrische Leistung bzw. Energie an  $\text{UO}_2$ -Proben abzugeben, daß thermodynamisch Reaktorexkursionen simuliert werden können. Die dabei auftretenden nuklearen Aerosole sollen untersucht werden und zur Klärung reaktorsicherheitstechnischer Fragen beitragen [1].

Im Gegensatz zu industriellen Stoßstromanlagen (z. B. für Metallverformung) wurde die TUNA-Stoßstromanlage für Experimentierzwecke konzipiert. Dies bedeutet, daß einerseits aus Kostengründen auf einen gewissen Bedienungskomfort verzichtet wurde, andererseits aber dafür auf die Variation der Anlagendaten hinsichtlich Energie, Entladezeit und Anschlußmöglichkeit für verschiedene Experimente Wert gelegt wurde.

## 2. Theorie der Stoßstromanlage

Die Stoßstromanlage arbeitet nach dem Prinzip einer Kondensator-entladung. Die in einem Kondensator mit der Kapazität  $C$  gespeicherte Energie ist

$$E = \frac{C}{2} \cdot U_C^2.$$

$U_C$  Spannung am Kondensator

Diese Energie wird in sehr kurzer Zeit an einen Verbraucher mit der Impedanz  $Z_A$ , abzüglich der Verluste in der Stoßstromanlage, abgegeben. Es können - je nach der Dimensionierung der Stoßstromanlage und der Explosionsprobe - Stromstärken bis  $10^6$  Ampere bei Frequenzen bis <sup>zu</sup> einigen 100 kHz auftreten.

---

eingegangen am 31. 3. 1971

Die Stoßstromanlage besteht

1. aus dem Kondensator mit der Kapazität  $C$ , dem Innenwiderstand  $R_C$  und der Induktivität  $L_C$ ,
2. der Explosionsprobe mit der Impedanz  $Z_A$ ,
3. einem triggerbaren Schalter  $S$  und
4. den Leitungen  $K_1$  (vom Kondensator zum Schalter  $S$ ) und  $K_2$  (vom Schalter  $S$  zur Explosionsprobe).

In Abb. 1 ist das Ersatzschaltbild der Stoßstromanlage dargestellt.

Durch Zusammenfassung aller Anlagenwiderstände und -Induktivitäten ergibt sich folgendes vereinfachtes Ersatzschaltbild (siehe Abb. 2):

$$R_C + R_{K1} + R_{K2} = R'$$

$$L_C + L_{K1} + L_{K2} = L'$$

Der Strom  $i(t)$  während der Kondensatorentladung ist von dem Verhältnis

$$n = \frac{R}{2\sqrt{\frac{L}{C}}} \text{ abhängig (} R = R' + R_A, L = L' + L_A \text{):}$$

$n < 1$  : periodisch gedämpfte Entladung

$$i(t) = \frac{U}{\omega \cdot L} \cdot e^{-\beta \cdot t} \cdot \sin \omega t$$

$n = 1$  : aperiodischer Grenzfall

$$i(t) = \frac{U}{L} \cdot e^{-\beta \cdot t} \cdot t$$

$n > 1$  : aperiodisch gedämpfte Entladung

$$i(t) = \frac{U}{\beta_1 \cdot L} \cdot e^{-\beta \cdot t} \cdot \sinh \beta_1 \cdot t$$

$$\beta = \frac{R}{2L} \quad \text{Dämpfungs-konstante}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad \text{Kreisfrequenz ohne Dämpfung}$$

$$\beta_1 = \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} \quad \text{zusätzliche Dämpfungs-konstante im aperiodischen Fall}$$

$$\omega = \omega_0^2 - \beta^2 \quad \text{Kreisfrequenz mit Dämpfung}$$

Die theoretische erreichbare Stromstärke bei  $R=0$  ist:

$$\hat{i}_{th} = \frac{U_C}{\sqrt{\frac{L}{C}}}$$

In Wirklichkeit ist immer  $R > 0$  und der theoretische Stromwert  $\hat{i}_{th}$  wird nie erreicht. Abb. 3 zeigt das Verhältnis

$$a(n) = \frac{\hat{i}(n)}{\hat{i}_{th}}$$

$\hat{i}(n)$  ist die höchste auftretende Stromamplitude.

Da im vorliegenden Fall der Verbraucher eine Explosionsprobe ist, werden während der Entladung verschiedene Entladungsformen durchlaufen. Der Grund dafür ist eine Änderung des Probenwiderstandes während der Entladung infolge Temperaturerhöhung. Der Widerstandstemperaturkoeffizient von Uranradioxyd ist negativ, während er bei Metallen meistens positiv ist.

### 2.1. Crowbar-Schaltung

Aus einer periodisch-gedämpften Entladungsform kann man durch eine geeignete Schaltung (Crowbar-Schaltung, siehe Abb. 4) eine Entladungsform mit aperiodischem Merkmal (ohne Überschwingung) erzwingen [2].

Bei einer periodisch-gedämpften Kondensatorentladung findet zwischen dem Kondensator C und der Induktivität L eine Energieschwingung statt. Die im Kondensator C gespeicherte elektrische Energie tritt unter Berücksichtigung der Dämpfung als magnetische Energie an der Induktivität L auf und fließt danach wieder in den Kondensator zurück, wobei sich die Kondensatorspannung umpolt. Wird jedoch dem Kondensator C ein Ignitron (Ignitron 2 in Abb. 4) derart parallel geschaltet, daß es nach dem Nulldurchgang der Kondensatorspannung leitend ist, so wird der Strom nach dem 1. Strommaximum von dem Ignitron 2 übernommen und der Kondensator wird nicht mehr aufgeladen. Damit wird aus der anfangs schwingenden RLC-Entladung eine aperiodische RL-Entladung. Das Ignitron 2 muß im 1. Strommaximum der eigentlichen RLC-Entladung gezündet werden.

### 3. Beschreibung der 57-kWs-Stoßstromanlage (siehe Schaltplan LEM/M-7/20-1, Abb. 17)

#### 3.1. Dimensionierung der Hauptkomponenten

Die Hauptkomponenten der Stoßstromanlage sind die Stoßstromkondensatoren und die Endladeschalter, sie wurden

1. durch den Energiebedarf zur Verdampfung der Urandioxydprobe und
2. durch die geforderte Entladezeit bestimmt.

Die Energie sollte 50 kWs und die Entladezeit  $T/2 = 100 \mu\text{s}$  ( $f = 5 \text{ kHz}$ ) betragen.

Als Energiespeicher wurden niederinduktive Stoßstromkondensatoren für 18 kV Ladespannung ausgewählt. Bei der Konstruktion der Kondensatorschränke ergab es sich, daß 36 Kondensatoren mit je  $9,4 \mu\text{F} \pm 10 \%$  eingebaut wurden. Mit der gemessenen Gesamtkapazität  $C = 352 \mu\text{F}$  beträgt die maximale Energie

$$E = \frac{C}{2} \cdot U_C^2 = 57 \text{ kWs.}$$

Für die Entladezeit  $T/2 = 100 \mu\text{s}$  ist eine Gesamtinduktivität  $L = 3 \mu\text{H}$  erforderlich. Es wurde eine Anlageninduktivität  $L' = 0,4 \mu\text{H}$  erwartet,

sodaß noch eine zusätzliche Abstimminduktivität erforderlich war. Mit  $L' = 0,4 \mu\text{H}$  und einem Anlageninnenwiderstand  $R' \approx 10 \text{ m}\Omega$  ergibt sich für den Kurzschlußfall mit  $R_A = 0$  die maximale Stromamplitude zu:

$$\hat{i} = \frac{U_C}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \cdot a(n) = 416 \cdot 10^3 \text{ A}$$

Mit  $L' = 3 \mu\text{H}$  wird  $\hat{i} = 166 \cdot 10^3 \text{ A}$ .

Als Entladeschalter wurden 4 koaxiale Ignitrons der Firma English Electric Valve vom Typ BK 478 ausgewählt. Die Ignitrons sind bis 25 kV spannungsfest. Die maximale Stromamplitude darf  $10^5 \text{ A}$  je Ignitron betragen.

### 3.2. Blockschaltbild der Stoßstromanlage (siehe Abb. 5)

#### 3.2.1. Einstellbare Hochspannung

Die Hochspannung wird mit einem Hochspannungstransformator erzeugt. Die Einstellung von 0 bis 18 kV geschieht mit einem Stelltransformator, mit dem die Primärspannung des Hochspannungstransformators von 0 bis 250 V (eff) eingestellt werden kann.

#### 3.2.2. Kondensator-Lade- und -Notentladeeinrichtung

Die Kondensatoren werden über Hochspannungsgleichrichter und Ladewiderstände aufgeladen. Für eine Notentladung der Kondensatoren werden die Ladewiderstände über ein hochspannungsfestes Vakuum-Relais als Belastungswiderstände geschaltet.

#### 3.2.3. Kondensatorbänke (siehe Abb. 16)

Die 36 Stoßstromkondensatoren sind in 4 Kondensatorbänke aufgeteilt. Die Kondensatoren einer Kondensatorbank sind niederinduktiv parallel geschaltet und über <sup>ein</sup> koaxiales Stoßstromkabel mit je einem Ignitron verbunden.

### 3.2.4. Entladeschalter (siehe Abb. 15)

Als Entladeschalter werden 4 koaxiale Ignitrons verwendet. Die Ignitrons sind mit den Kathodenanschlüssen auf einer gemeinsamen Cu-Tragplatte befestigt. Die Anoden der Ignitrons sind mit den in Abschnitt 3.2.3. erwähnten Stoßstromkabeln verbunden.

### 3.2.5. Zuleitung zur Explosionsprobe, Abstimminduktivität

Um die Verbindung möglichst niederohmig und niederinduktiv auszuführen, ist die Explosionsprobe über 4 parallel geschaltete koaxiale Stoßstromkabel mit der Stoßstromanlage verbunden. Die Stoßstromkabel werden auf einen Kollektor geführt und können direkt oder über eine zusätzliche Spule mit Anzapfungen mit den Kathoden der Ignitrons verbunden werden. Die Spule dient als Abstimminduktivität für die Entladefrequenz. (siehe Abb. 15 u. Abb. 16)

### 3.2.6. Explosionsprobe

Die Urandioxyd-Explosionsprobe befindet sich in einem Druckkessel, dem die Aerosolproben entnommen werden [1]. Die Stromanschlüsse sind mit einem Kollektor versehen. An den Kollektor werden die von der Stoßstromanlage kommenden 4 koaxialen Stoßstromkabel angeschlossen.

### 3.2.7. Zündeinrichtung

Der Zündkreis für die Ignitrons BK 478 hat folgende Daten:

Zündspannung : 2500 V, Zündkondensator : 0,25  $\mu$ F, Vorwiderstand : 5  $\Omega$ .

Mit diesen Daten zünden alle Ignitrons innerhalb 2  $\mu$ s. Die Brenndauer der Zündstrecke beträgt 2 ms. Diese Zeit reicht aus, um bei einer eventuellenspäteren Crowbarschaltung alle Ignitrons gleichzeitig zu zünden.

Die Ignitrons BK 478 werden mit einem Hilfsignitron, Typ ZX 1000 Valvo, gezündet. Die Zündeinrichtung wird über einen hochspannungsfesten Trenntransformator mit Netzspannung versorgt. 1,2 sec nach-

dem die Netzspannung an die Zündeinrichtung geschaltet wird, erfolgt die Zündung des Hilfsignitrons und damit die Zündung der 4 Hauptignitrons. Die 1,2 sec werden zum Aufladen der Zündkondensatoren benötigt.

### 3.2.8. Kondensator-Ladestrom- und -Spannungsüberwachung

Der Ladestrom für die Kondensatoren ist durch die Leistungsfähigkeit des Hochspannungstransformators auf 100 mA begrenzt. Dieser Stromwert wird mit einem Amperemeter mit einem oberen Grenzwertkontakt überwacht. Die Spannungen der 4 Kondensatorbänke werden mit Hilfe von hochohmigen Spannungsteilern gemessen. Das anzeigende Instrument ist in kV geeicht und hat einen oberen und einen unteren Grenzwertkontakt. Mit den Grenzwertkontakten wird eine 2-Punkt-Regelung für die Kondensatorspannung erreicht. Dieses Voltmeter wird durch Tastendruck wahlweise an eine der 4 Kondensatorbänke geschaltet.

### 3.2.9. Ignitron-Zündanzeige und -Strommessung

Zur Indikation der Zündung dient ein bestimmter Stromwert durch die Ignitrons. Die Ströme durch die Ignitrons werden mit Hilfe von Rogowskispulen mit passiven Integriergliedern gemessen [3]. Als Kriterium für die Zündung wird ein Strom von  $i = 5 \text{ kA}$  durch jedes Ignitron festgelegt. Die Ausgangsspannungen der passiven Integrierglieder steuern für jedes Ignitron einen Schmitt-Trigger an. Die Schmitt-Trigger schalten je eine Lampe innerhalb einer bistabilen Kippstufe ein. Mit den Lampen wird die Zündung der Ignitrons angezeigt. Abb. 15 zeigt eine der verwendeten Rogowski-Spulen.

### 3.3. Mechanischer Aufbau (siehe Abb. 6 und Abb. 16)

Die Bauteile der Stoßstromanlage sind in 4 Metallschränken untergebracht. Die 4 Schränke (2 Schaltschränke und 2 Kondensatorschränke) sind nebeneinander auf 2 U-Trägern montiert. Die Kondensator-

schränke sind rechts und links von den Schaltschränken angeordnet und enthalten je 2 der insgesamt 4 Kondensatorbänke. In dem rechten Schaltschrank befindet sich ein besonders magnetisch abgeschirmter Raum für Einschübe zur Meßwertverarbeitung (siehe Abschnitt 3.2.9. und 6).

#### 3.4. Sicherheitsmaßnahmen

Die Stoßstromanlage arbeitet mit Hochspannung von 18 kV. Darum muß auf die Beachtung der VDE-Vorschriften und der Sicherheitsmaßnahmen besonderer Wert gelegt werden.

Von den VDE-Vorschriften sind die für Anlagen mit Spannungen über 1000 V und mit Frequenzen über 1 kHz besonders zu beachten (VDE 0755).

Als Sicherheitsmaßnahmen gelten:

1. die Erdung der Stoßstromanlage über ein  $50 \text{ mm}^2$  Cu-Kabel,
2. eine mechanische Absperrung der gesamten Anlage bis zur Bedienungsfront der Schaltschränke,
3. die Befestigung der Rückwände der Kondensatorschränke mit Kunststoffschrauben,
4. ein mechanischer Kurzschlußschalter für die Kondensatorbänke und
5. eine gegenseitige Verriegelung der Schaltschranktüren.

Die Erdung der Stoßstromanlage und des Explosionskessels geschieht mit einem  $50 \text{ mm}^2$ -Cu-Kabel von der Erdungsschiene des Sicherungsschranks in der Versuchshalle zur Erdungsschiene der Stoßstromanlage.

Vom Beginn der Aufladung der Kondensatoren bis 10 sec nach ihrer Entladung darf sich niemand innerhalb der mechanischen Absperrung aufhalten, da die Gefahr einer unkontrollierten Entladung besteht. Diese unkontrollierte Entladung kann durch Selbstzündung der Ignitrons erfolgen. Beim Öffnen der Absper-

rung werden Sicherheitsschalter betätigt, die eine Notentladung der Kondensatoren einleiten. Die Absperrung darf nur von außen zu öffnen und zu schließen sein.

Bei Arbeiten am Explosionskessel müssen die parallel geschalteten Innenleiter der 4 Koaxialkabel mit einem Erdungsbügel geerdet werden.

Die Rückwände der Kondensatorschränke sind mit Kunststoffschrauben befestigt. Die Kunststoffschrauben sollen bei einer Explosion eines defekten Kondensators abreißen und der Druckwelle einen ungefährlichen Weg frei machen.

Beim Öffnen des Schaltschranks wird ein mechanischer Kurzschlußschalter für die Kondensatoren betätigt. Die beiden Schaltschranktüren sind so gegeneinander verriegelt, daß zuerst nur die Tür geöffnet werden kann, die den Kurzschlußschalter betätigt. Diese Tür kann auch nur als letzte wieder geschlossen werden. An beiden Türen befinden sich elektrische Türschalter, die die Anlage beim Öffnen abschalten.

#### 4. Eigenwerte der Stoßstromanlage

Unter "Eigenwerte der Stoßstromanlage" werden die Kondensatorkapazität, die Induktivität und der Innenwiderstand der Stoßstromanlage verstanden. Die Induktivität und der Innenwiderstand der Stoßstromanlage gelten bis zum Kollektor für die Anschlußleitungen zur Explosionsprobe.

##### 4.1. Bestimmung der Kondensatorkapazität

Für die Angabe der Entladeenergie ist eine genaue Kenntnis der Gesamtkapazität notwendig. Vom Hersteller werden die Kapazitäten der Stoßstromkondensatoren nur mit  $\pm 10\%$  Genauigkeit angegeben. Daher wurden die Kapazitäten der 36 Stoßstromkondensatoren mit einer Kapazitäts-Meßbrücke bei  $f = 9$  kHz (Entladefrequenz) einzeln bestimmt. Für die Kapazitätsbestimmung einer ganzen Kondensatorbank reichte der Leitwertbereich der verwendeten Meßbrücke nicht aus.

The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that every entry should be supported by a valid receipt or invoice. This ensures transparency and allows for easy verification of the data. The second part of the document provides a detailed breakdown of the financial performance over the last quarter. It includes a comparison of actual results against the budgeted figures, highlighting areas of both strength and weakness. The final part of the document offers recommendations for future actions to improve efficiency and reduce costs.

It is noted that the revenue generated from the new product line has exceeded expectations, contributing significantly to the overall growth of the company. However, the increase in operating expenses, particularly in the marketing department, has offset some of these gains. The management team is committed to finding ways to optimize the marketing budget and improve the return on investment. The document also mentions that the operational costs have remained relatively stable, which is a positive indicator of the company's operational efficiency.

The following table summarizes the key financial metrics for the quarter. The data shows a steady increase in sales volume, which is a testament to the effectiveness of the sales strategy. The gross profit margin has improved, indicating that the company is able to produce goods at a lower cost. The net profit has also shown a significant increase, reflecting the overall success of the business operations.

In conclusion, the company has achieved a strong performance in the first quarter. The management team is pleased with the results and is confident that the company is well-positioned for continued growth. The focus will be on maintaining the current momentum while addressing the challenges identified in the financial review. The document concludes with a statement of appreciation for the hard work and dedication of all employees who have contributed to the company's success.

The information presented in this document is confidential and is intended solely for the use of the designated recipients. It should not be distributed to other personnel without the express written consent of the management team. Any unauthorized disclosure of this information could result in legal action.

The management team is committed to providing accurate and timely financial information to all stakeholders. This document is a key component of that commitment and is intended to provide a clear and concise overview of the company's financial performance. The information is based on the best available data and is subject to audit. The management team will continue to work hard to ensure the highest level of transparency and accountability.

The document is prepared in accordance with the company's financial reporting policies and procedures. It is subject to review and approval by the management team. The information is provided for informational purposes only and should not be used as a basis for investment decisions. The management team is not responsible for any losses or damages resulting from the use of this information.

The management team is committed to providing accurate and timely financial information to all stakeholders. This document is a key component of that commitment and is intended to provide a clear and concise overview of the company's financial performance. The information is based on the best available data and is subject to audit. The management team will continue to work hard to ensure the highest level of transparency and accountability.

Die Messungen erfolgten nach dem Parallel-Ersatzschaltbild. Für die Angabe der Eigenwerte der Stoßstromanlage ist das Reihen-Ersatzschaltbild besser, da dann die inneren und äußeren Widerstände einfach zusammengezählt werden können. Es wurden die folgenden Umwandlungsformeln verwendet (siehe Abb. 7)

$$C_R = \frac{R_P^2 \cdot \omega^2 \cdot C_P^2 + 1}{R_P^2 \cdot \omega^2 \cdot C_P^2} \cdot C_P$$

$$R_R = \frac{1}{R_P^2 \cdot \omega^2 \cdot C_P^2 + 1} \cdot R_P$$

Die Meß- und Umrechnungsergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Bei Messungen mit verschiedenen Frequenzen wurde eine für alle Kondensatoren gleiche Frequenzabhängigkeit der Kapazität festgestellt.

Mit Hilfe von Messungen an einem Kondensator wurde ein frequenzabhängiger Korrekturfaktor  $b(f)$  (siehe Tab. 2) für die Gesamtkapazität ermittelt:

$$b(f) = \frac{C(f)}{C(f=9\text{kHz})}$$

Tabelle 2: Korrekturfaktor  $b = f(f)$

$f$ [kHz]	$b$	$f$ [kHz]	$b$
0	(0,9790)	3	0,9740
0,1	0,978	5	0,9790
0,3	0,9765	9	1,000
0,5	0,9755	12	1,020
1,0	0,9745	14	1,036
2	0,9730	15	1,050

Der Korrekturfaktor  $b = f(f)$  ist in Abb. 8 dargestellt. Der extrapolierte Wert für  $f=0$  wurde für die Angabe der Endladenergie zugrunde gelegt.

$$C(f=0) = 359,6 \mu\text{F} \cdot 0,9790 = 352,2 \mu\text{F}$$

daraus folgt mit  $U_C = 18 \text{ kV}$ :

$$E = \frac{C}{2} \cdot U_C^2 = 57,15 \text{ kWs.}$$

#### 4.2. Bestimmung des Innenwiderstandes und der Induktivität der Stoßstromanlage

Der Innenwiderstand und die Induktivität der Stoßstromanlage wurden mit Hilfe von Kurzschlußversuchen ermittelt. Der Kurzschluß erfolgte im Schaltschrank am Kollektor für die Stoßstromkabel zur Explosionsprobe. Aus den Stromamplituden  $A$ , der Entladefrequenz  $f = \frac{1}{T}$  und der Kapazität  $C$  wurden  $R_i$  und  $L_i$  berechnet:

$$\frac{A_n}{A_{n+1}} = \frac{\sum_{n=1}^{n-1} A_n}{\sum_{n=2}^n A_n}$$

$$\beta = \frac{2}{T} \cdot \ln \frac{A_n}{A_{n+1}}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\omega_o^2 = \omega^2 + \beta^2$$

$$L_i = \frac{1}{\omega_o^2 \cdot C}$$

$$R_i = 2 \cdot L_i \cdot \beta$$

Die Stromamplituden  $A_n$  und die Periodendauer  $T$  wurden Strom-Oszillogrammen entnommen (siehe Abb. 11).

Der Innenwiderstand der Stoßstromanlage wurde

1. für jede Kondensatorbank einzeln und
2. für die Parallelschaltung aller 4 Kondensatorbänke in Abhängigkeit vom Strom bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abb. 9 und Abb. 10 dargestellt.

Die Stromabhängigkeit des Innenwiderstandes wird von den stromabhängigen Innenwiderständen der Ignitrons verursacht. Bei der Berechnung sind im Mittel 4 Stromamplituden erfaßt.

#### 5. Widerstand und Induktivität der Versuchsanordnung zur Erzeugung von Metall- und Metalloxyd-Aerosolen

Die hierfür wichtigen Komponenten der Versuchsanordnung sind die Stoßstromanlage, das Anschlußkabel zur Explosionsprobe und die Probenhalterung. Der Widerstand und die Induktivität der Versuchsanordnung können

1. mit Hilfe von Kurzschlußversuchen mit einem Kurzschluß an der Einspannstelle der Explosionsprobe und
2. durch Ausmessen des Widerstandes und der Induktivität für das Anschlußkabel und die Probenhalterung

bestimmt werden. Bei der 2. Methode werden die gemessenen Werte zu den Eigenwerten der Stoßstromanlage dazugezählt.

Als Anschlußkabel zur Explosionsprobe dienen 4 parallel geschaltete koaxiale Stoßstromkabel. Bei einem Kurzschluß an der Einspannstelle für die Explosionsprobe wurden für das Anschlußkabel und die Probenhalterung (für Cu-Drahtexplosionen)  $R_K = 4,90 \text{ m}\Omega$  gemessen.

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der 1. und der 2. Methode zur Widerstandsbestimmung zusammengestellt.

Tabelle 3: Ergebnisse der Widerstands- und Induktivitätsbestimmung für die Versuchsanordnung zur Erzeugung von Metall- und Metalloxyd-Aerosolen

		1. Methode			2. Methode	
		$\hat{I}$ [kA]	L [ $\mu$ H]	$R_i + R_K$ [m $\Omega$ ]	$R_i$ [m $\Omega$ ]	$R_i + R_K$ [m $\Omega$ ]
alle 4 Kondensatorbänke parallel geschaltet		64	0,968	11,9	6,50	11,4
		90	1,06	10,8	5,90	10,8
		140	1,06	10,6	5,25	10,2
		180	1,05	10,5	4,83	9,8
		230	1,04	10,2	4,72	9,6
		270	1,04	9,7	4,60	9,5
absoluter Fehler		( $\pm 3\%$ )	$\pm 0,02$	$\pm 0,3$	$\pm 0,30$	$\pm 0,3$
Kondensatorbank	$C_1$	60	1,35	22,1	16,1	21,0
	$C_2$	62	1,29	20,6	15,4	20,3
	$C_3$	65	1,17	19,6	15,1	20,0
	$C_4$	60	1,32	21,7	16,8	21,7
absoluter Fehler		( $\pm 3\%$ )	$\pm 0,02$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$
Kondensatorbank						
$C_1$ und $C_2$ parallel		90	1,17	15,9		
$C_3$ und $C_4$ parallel		95	1,08	14,7		
absoluter Fehler		( $\pm 3\%$ )	$\pm 0,02$	$\pm 0,4$		

### 6.1. Strommessung

Der Strom wird mit Hilfe einer Rogowskispule mit nachgeschaltetem passiven Integrierglied gemessen [3]. Als Ausgangssignal erhält man 0,01 V/kA.

### 6.2. Spannungsmessung

Die Spannung an der Explosionsprobe wird mit Hilfe eines Spannungsteilers gemessen. Der Spannungsteiler ist am Kollektor für die 4 Stoßstromkabel zur Explosionsprobe im Schaltschrank angeschlossen. An dieser Stelle, dem Eingang der Stoßstromkabel (K2) zur Explosionsprobe, werden außer der Spannung an der Explosionsprobe noch der induktive und der ohmsche Spannungsabfall der Zuleitung zur Probe gemessen:

$$u = u_{\text{Probe}} + i \cdot R_{K2} + L_{K2} \cdot \frac{di}{dt}$$

Der ohmsche Anteil  $i \cdot R_{K2}$  und der induktive Anteil  $L_{K2} \cdot \frac{di}{dt}$  müssen durch eine geeignete Schaltung von dem Meßwert am Spannungsteiler wieder abgezogen werden. Den abzuziehenden induktiven Anteil erhält man mit Hilfe einer Rogowskispule und den ohmschen Anteil mit Hilfe einer Rogowskispule mit nachgeschaltetem Integrierglied. Abb. 12 zeigt das Grundsaltbild für die Spannungsmessung an der Explosionsprobe.

Der Abgleich für die Kompensation der Spannungsanteile des Zuleitungskabels zur Explosionsprobe einschließlich der Probenhalterung wird bei kurzgeschlossener Probe vorgenommen. Mit dem Widerstand  $R_1$  wird zuerst der induktive Spannungsanteil abgeglichen. Der 0-Durchgang der Spannung muß mit dem 0-Durchgang

des Stromes zeitlich übereinstimmen. Dann wird mit dem Widerstand  $R_2$  die Amplitude des ohmschen Anteils auf 0 abgeglichen. Mit einem bekannten Probenwiderstand kann der Abgleich überprüft werden.

### 6.3. Energiemessung

Es ist von großem Interesse, die von der Explosionsprobe aufgenommene Energie zu kennen. Die aufgenommene Energie soll in Beziehung zu den entstandenen Aerosolen gesetzt werden. Durch Multiplikation der Probenspannung mit dem Strom wird die Leistungsabgabe an die Probe berechnet. Gleichzeitig wird die Leistung über der Zeit integriert und so die Energie berechnet. Abb. 13 zeigt das Blockschaltbild für die Energiemessung. Abb. 14 zeigt die Ergebnisse erster Messungen an einer Urandioxyd-Probe.

Versuchsbedingungen und Daten zu den Ergebnissen in Abb. 14:

Laufende Nr. der Versuche	138
Urandioxyd-Probe	$l = 40 \text{ mm}$
	$d = 4,3 \text{ mm } \varnothing$
Anfangstemperatur der Probe	$T = 1600 \text{ }^\circ\text{C}$
Kondensatorspannung	$U_c = 6 \text{ kV}$
Kondensatorkapazität	$C = 352 \text{ } \mu\text{F}$
Anlageninduktivität	$L = 0,97 \text{ } \mu\text{H}$
Anlagenwiderstand	$R = 11,9 \text{ m } \Omega$

Literatur

- [1] Schikarski, W.  
The Karlsruhe Research Program on Nuclear Aerosols  
and its Relation to the Plutonium Hazard of Fast  
Sodium Reactors  
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Bericht KFK 798,  
Karlsruhe 1968.
  
- [2] Warich, L.P.  
Die Erzeugung hoher quasistationärer Magnetfelder  
Z. Angew. Phys. 17 (1964) S. 348 - 350
  
- [3] Will, F.  
Die Messung großer Stoßströme  
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Bericht KFK 896,  
Karlsruhe 1970, 18 S.

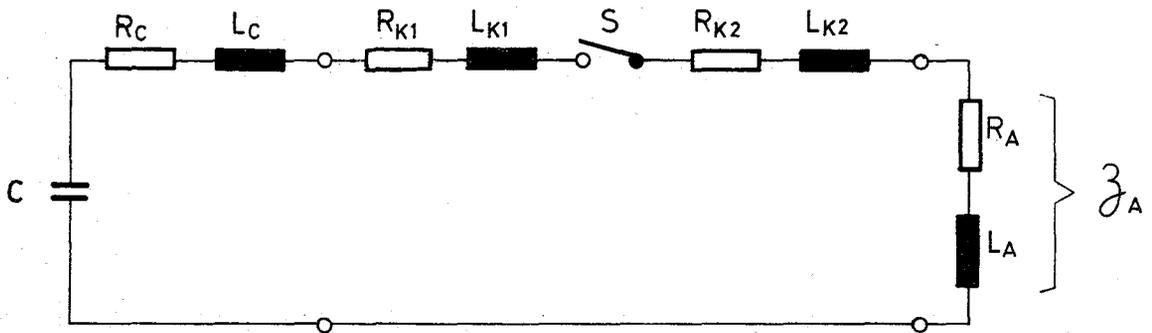


Abb.1. Ersatzschaltbild der Stoßstromanlage

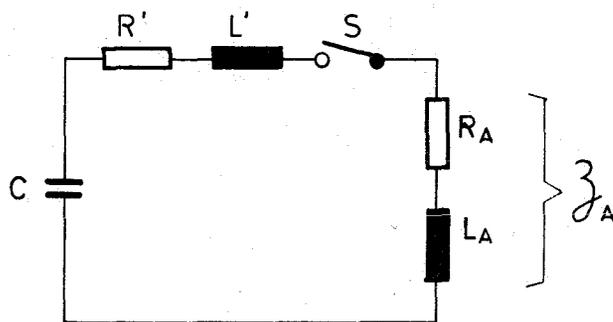


Abb.2. Vereinfachtes Ersatzschaltbild d. Stoßstromanlage

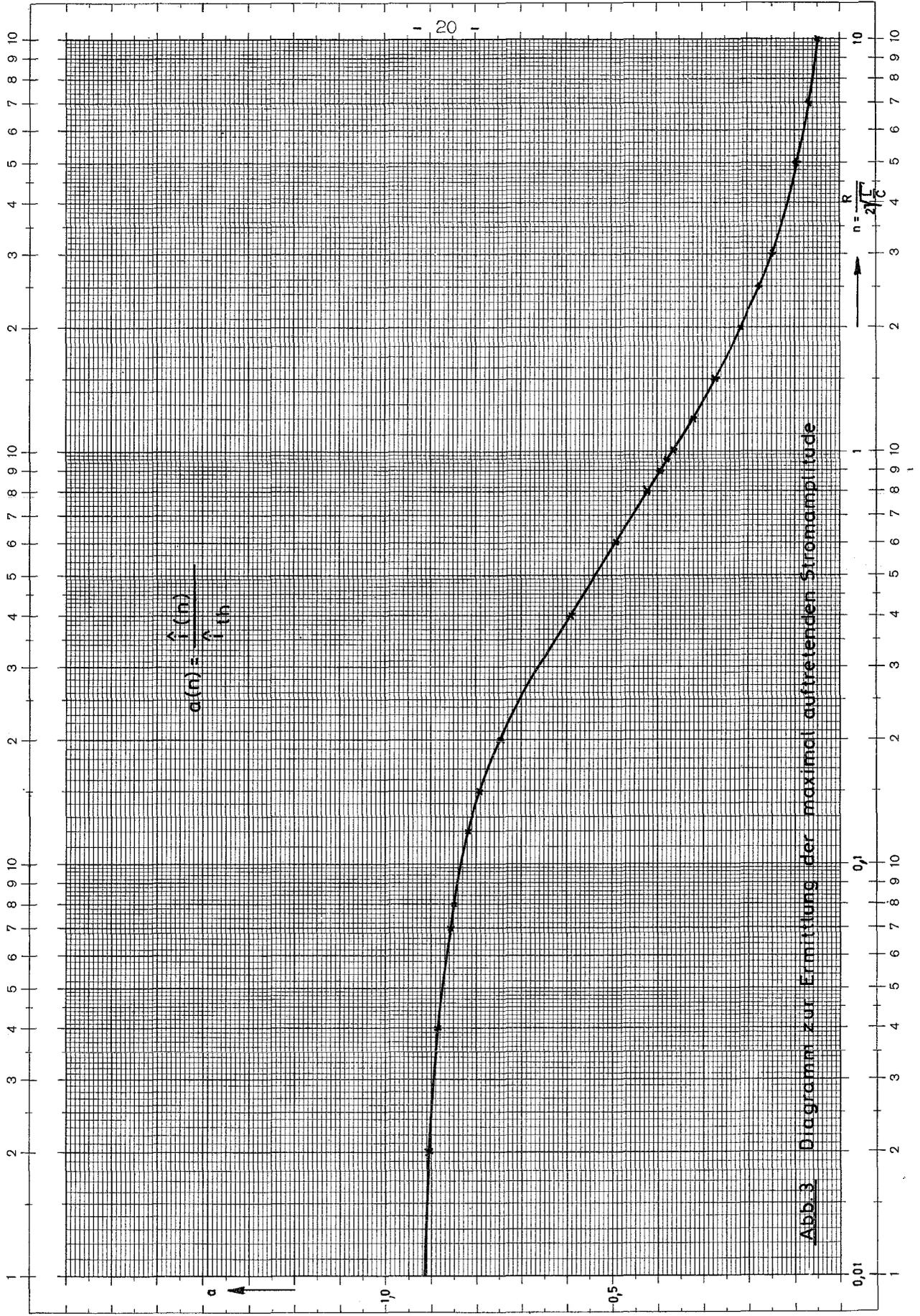


Abb. 3 Diagramm zur Ermittlung der maximal auftretenden Stromamplitude

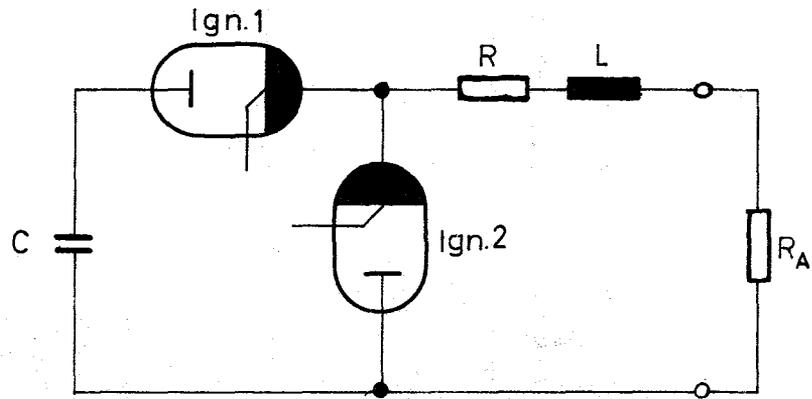


Abb.4. Crowbar - Schaltung

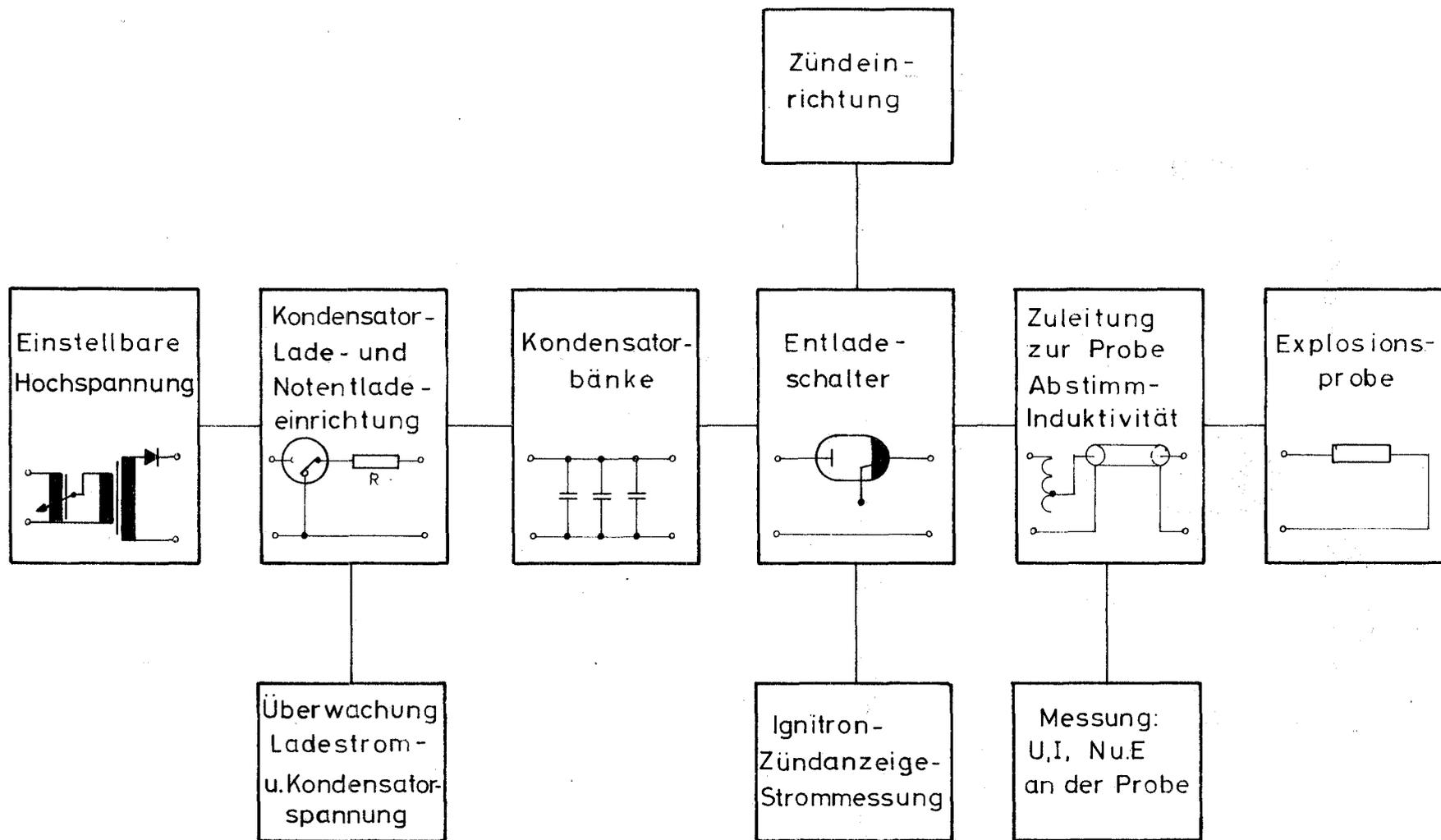


Abb.5. Blockschaltbild der Stoßstromanlage

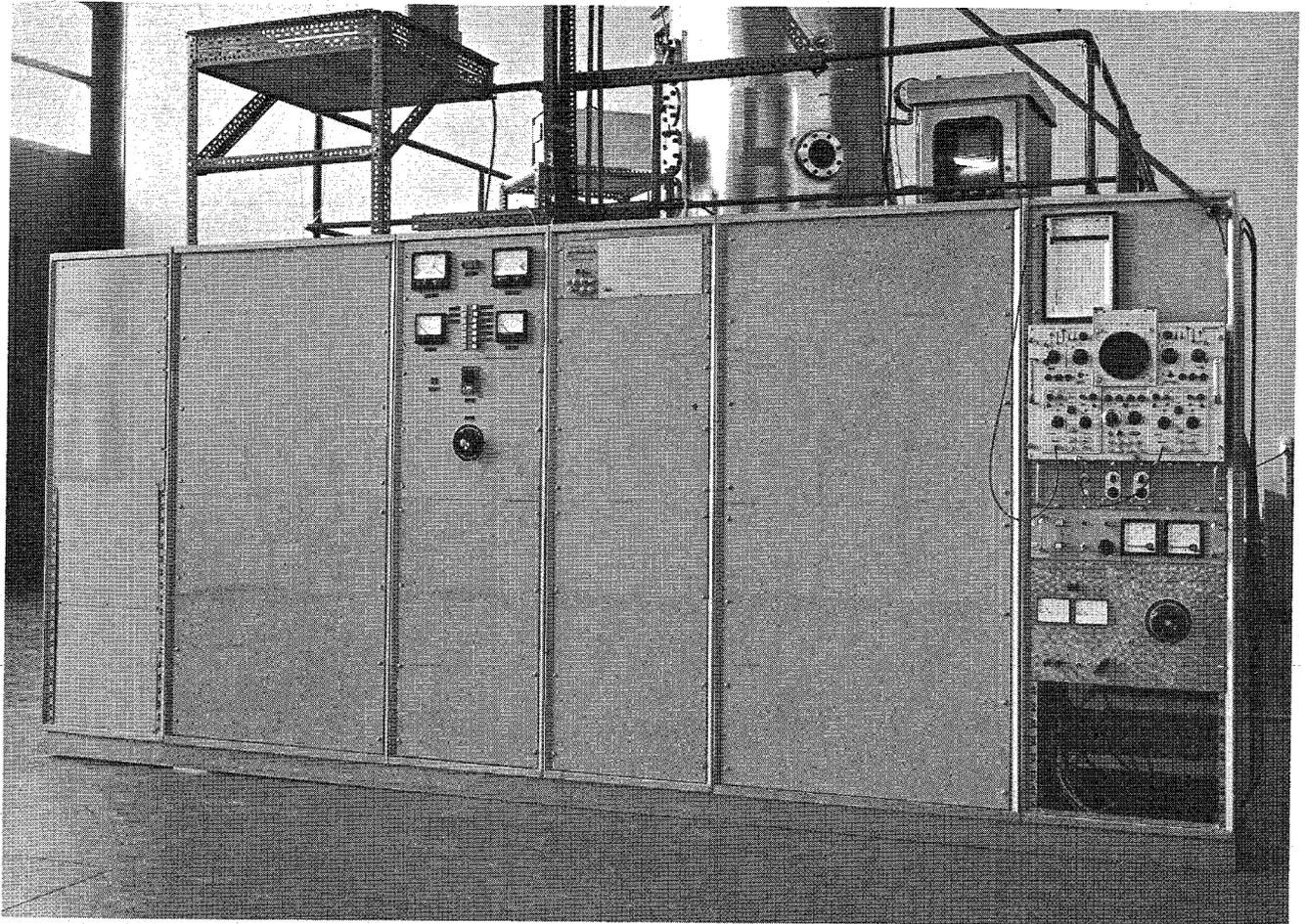
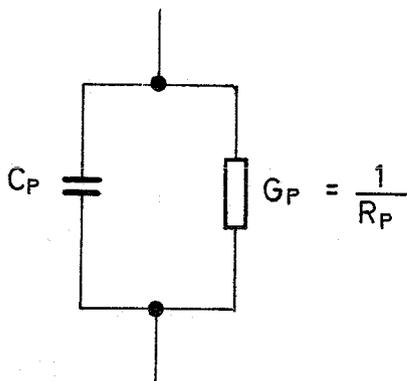


Abb. 6. Vorderansicht der Stoßstromanlage

Parallel-Ersatzschaltbild



Reihenersatzschaltbild

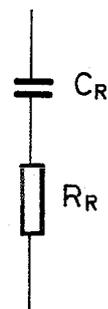


Abb. 7. Kondensator - Ersatzschaltbilder

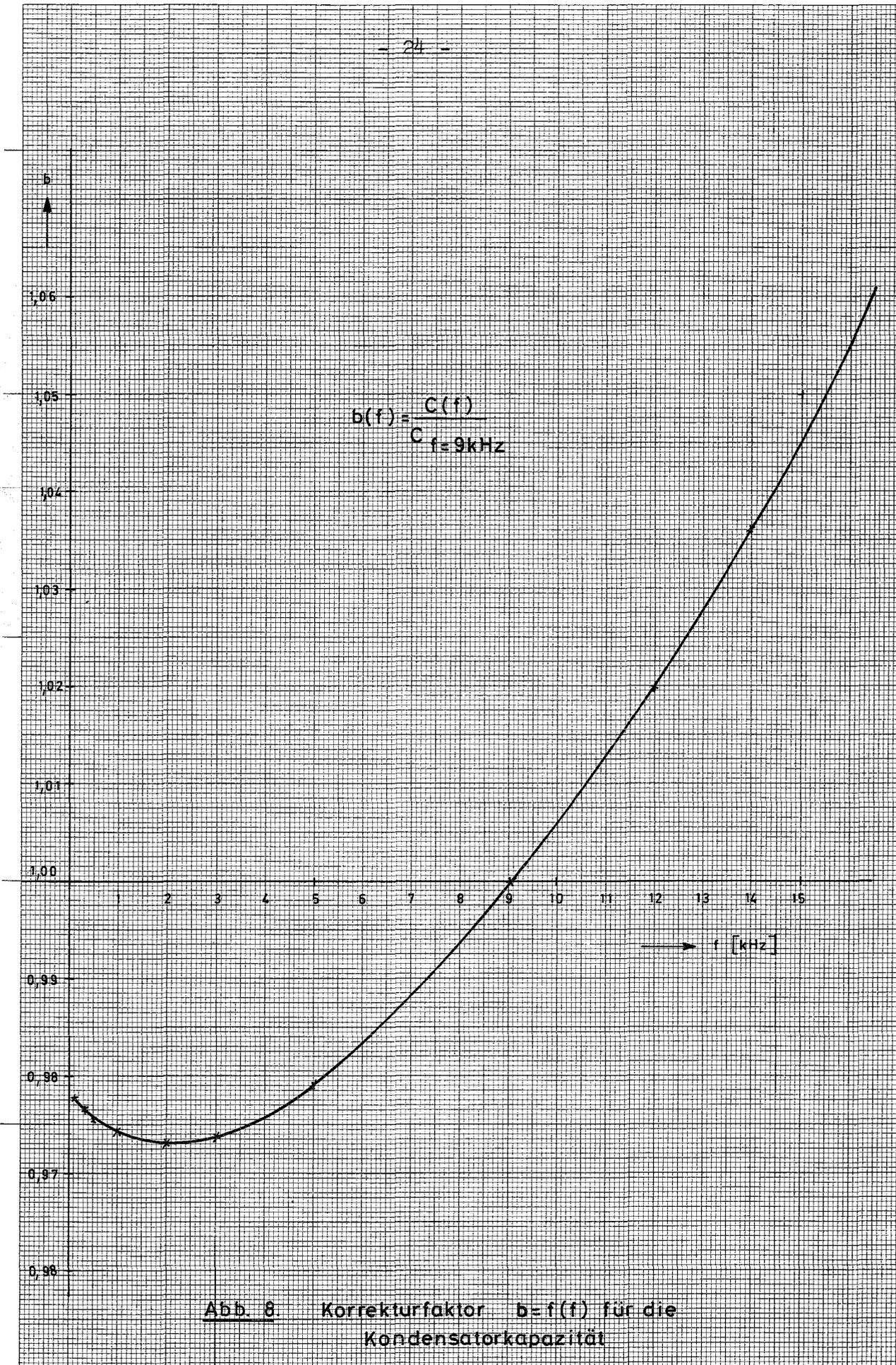


Abb. 8 Korrekturfaktor  $b=f(f)$  für die Kondensatorkapazität

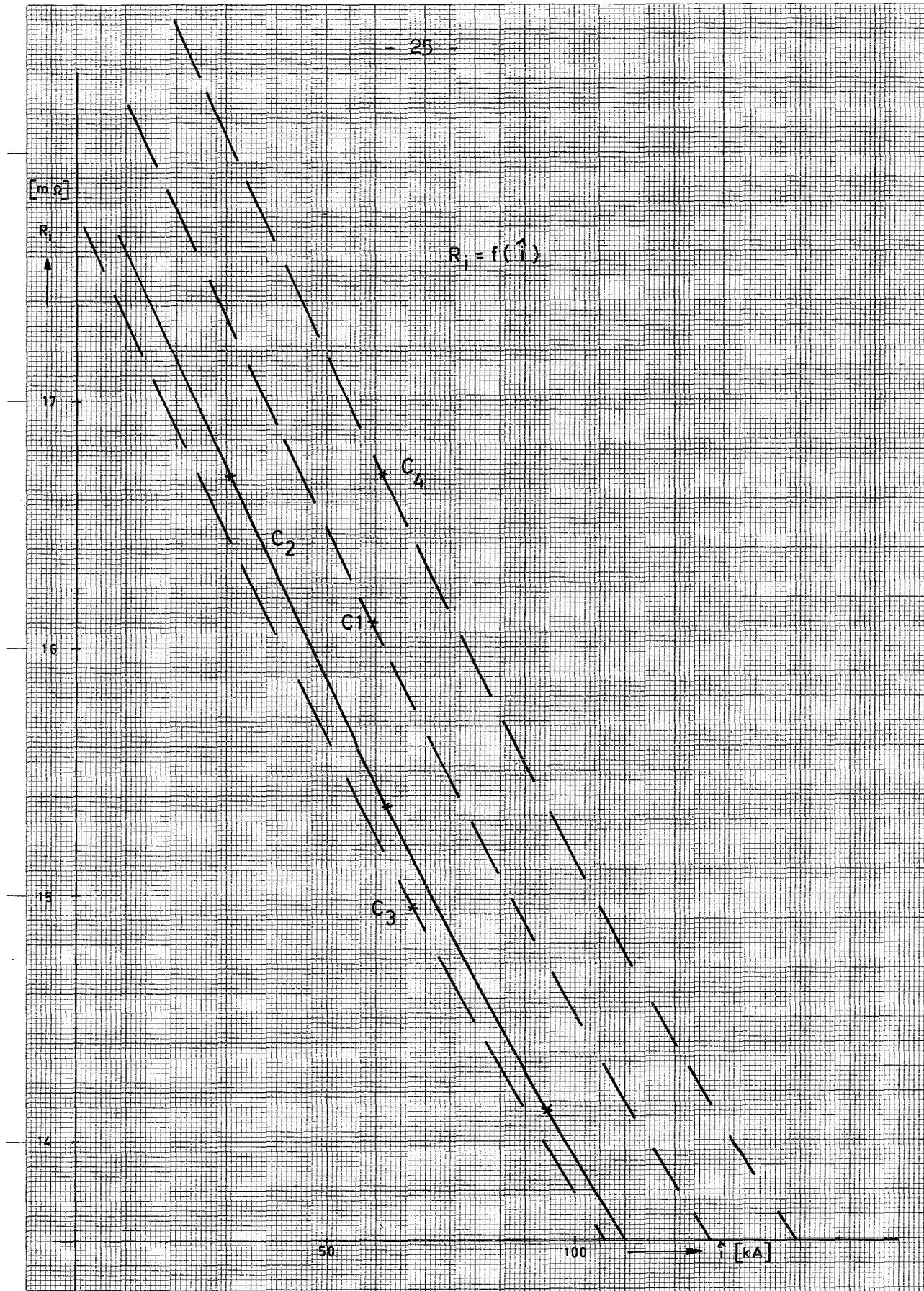


Abb.9 Innenwiderstand der Stoßstromanlage mit einer Kondensatorbank  
(Kurzschluß im Schaltschrank,  $f = 22\text{kHz}$ )

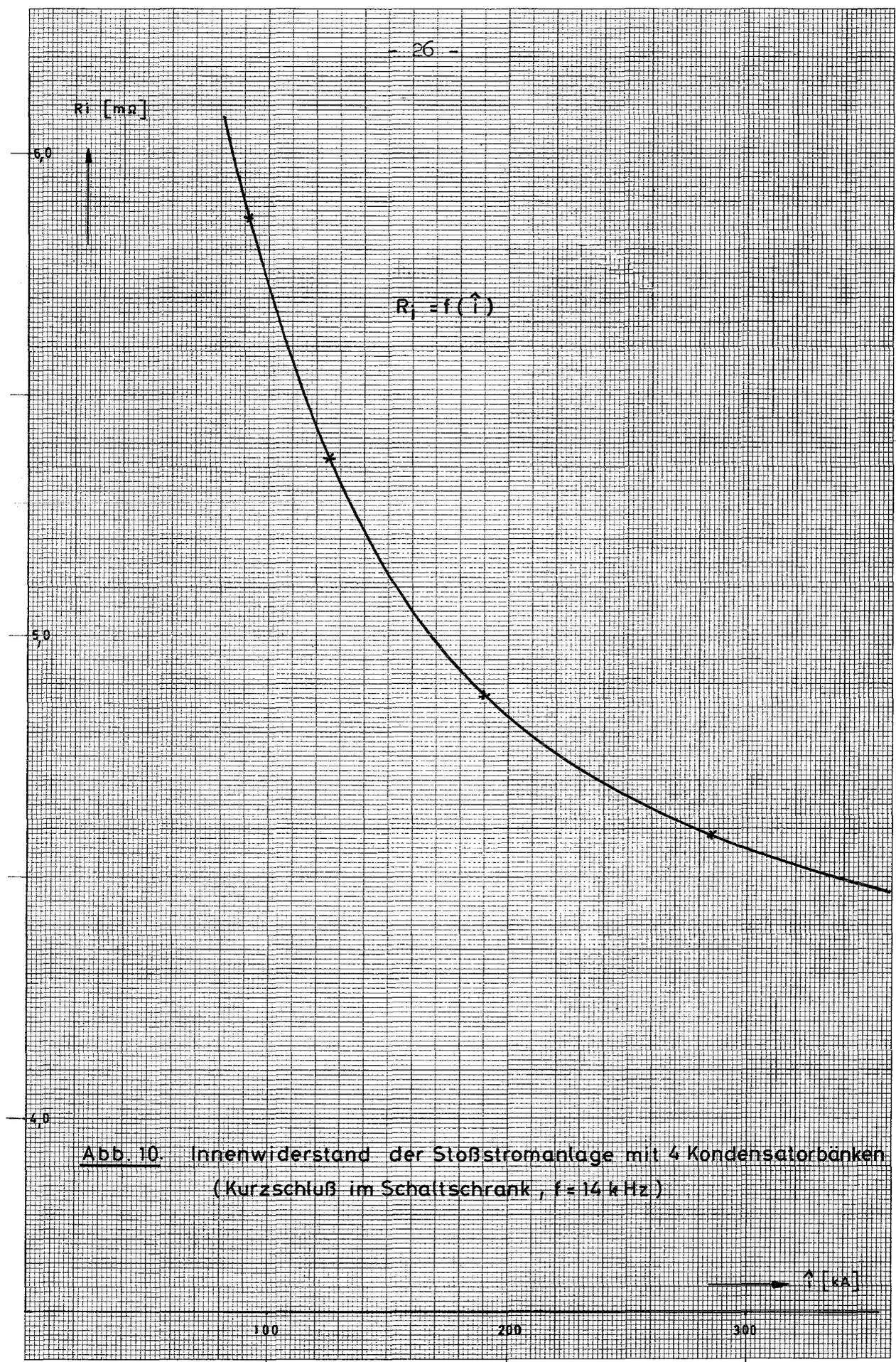
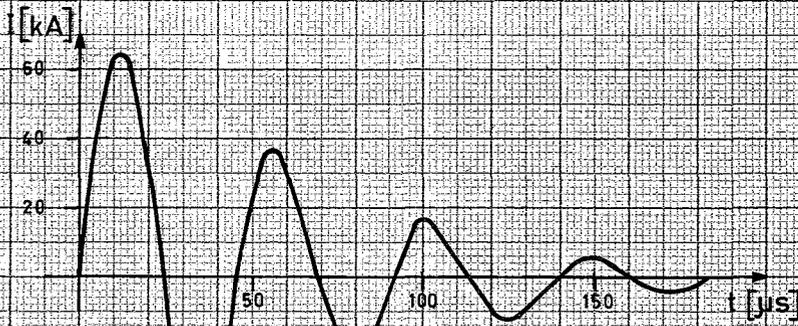


Abb. 10. Innenwiderstand der Stoßstromanlage mit 4 Kondensatorbänken  
(Kurzschluß im Schaltschrank,  $f = 14 \text{ kHz}$ )

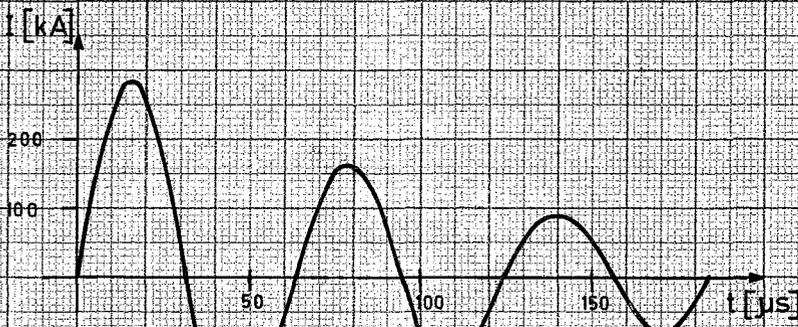
$\hat{I}$  [kA]



Kondensatorbank  
 $C_2$

Kurzschluß im  
Schaltschrank

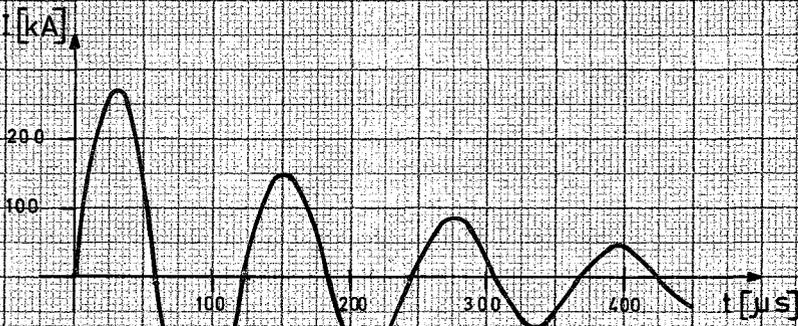
$U_c = 6 \text{ kV}$



Kondensatorbank  
 $C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4$

Kurzschluß im  
Schaltschrank

$U_c = 9 \text{ kV}$



Kondensatorbank  
 $C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4$

Kurzschluß an der  
Explosionsprobe

$U_c = 18 \text{ kV}$

Abb. 11 Stromoszillogramme von Kurzschlußversuchen

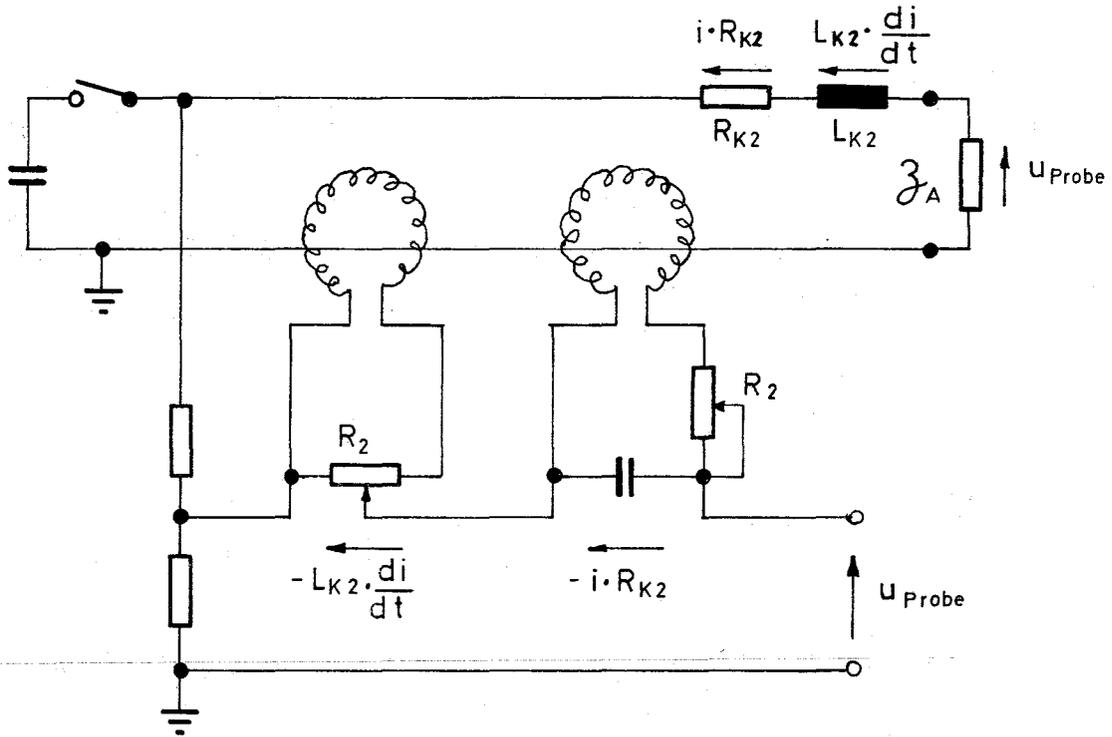


Abb.12. Grundschriftbild für die Spannungsmessung an der Explosionsprobe

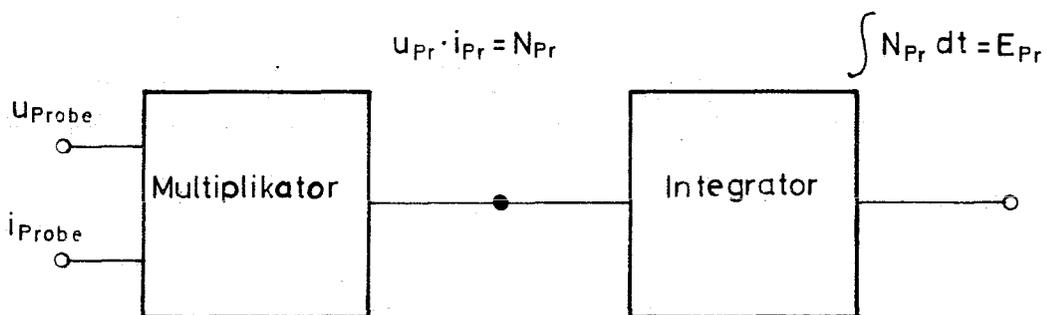
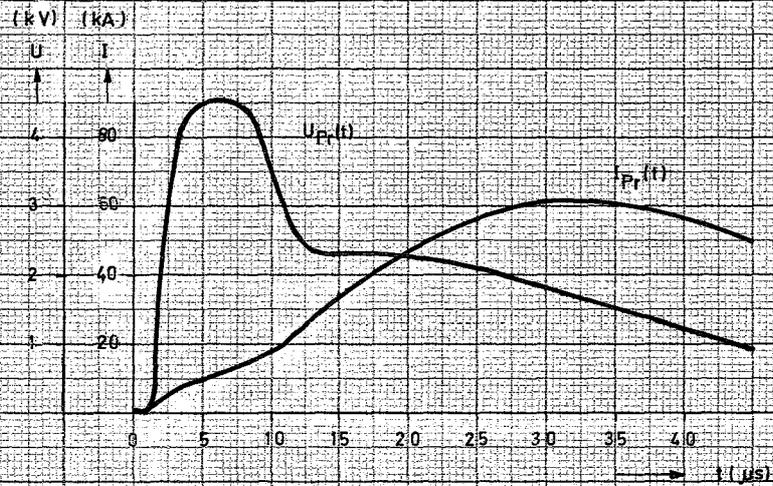
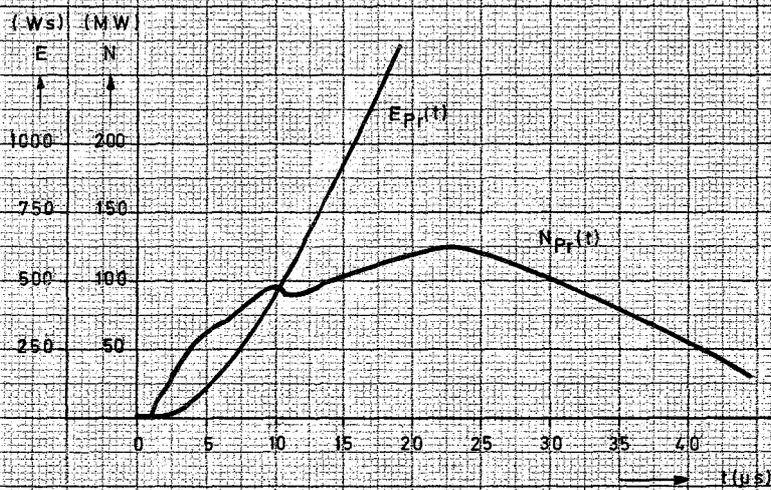


Abb.13. Blockschriftbild für die Energiemessung



$U_p(t)$  = Spannung an der Probe  
 $I_p(t)$  = Strom durch die Probe



$N_p(t)$  = Leistungsaufnahme der Probe  
 $E_p(t)$  = Energieaufnahme der Probe

Abb 14 Erste Messungen an einer  
Urandoxyd - Probe

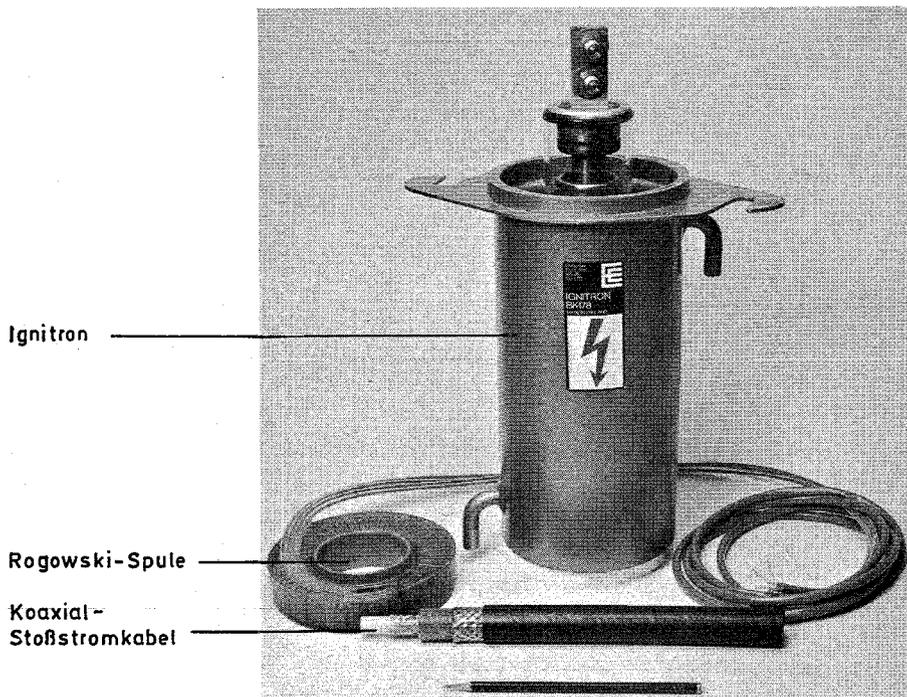


Abb.15 Bauteile der Stoßstromanlage

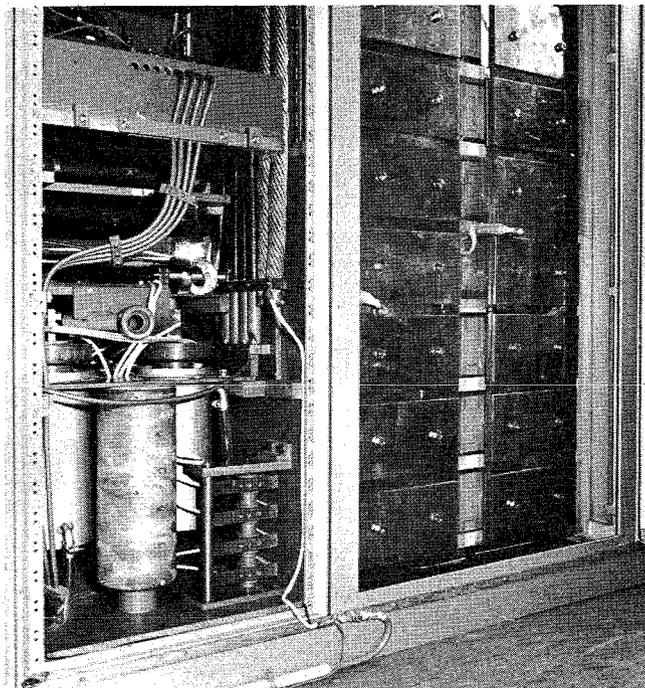


Abb.16 links: Schaltschrank mit Ignitrons und Spule mit Anzapfungen  
rechts: Kondensatorschrank mit 2 Kondensatorbänken

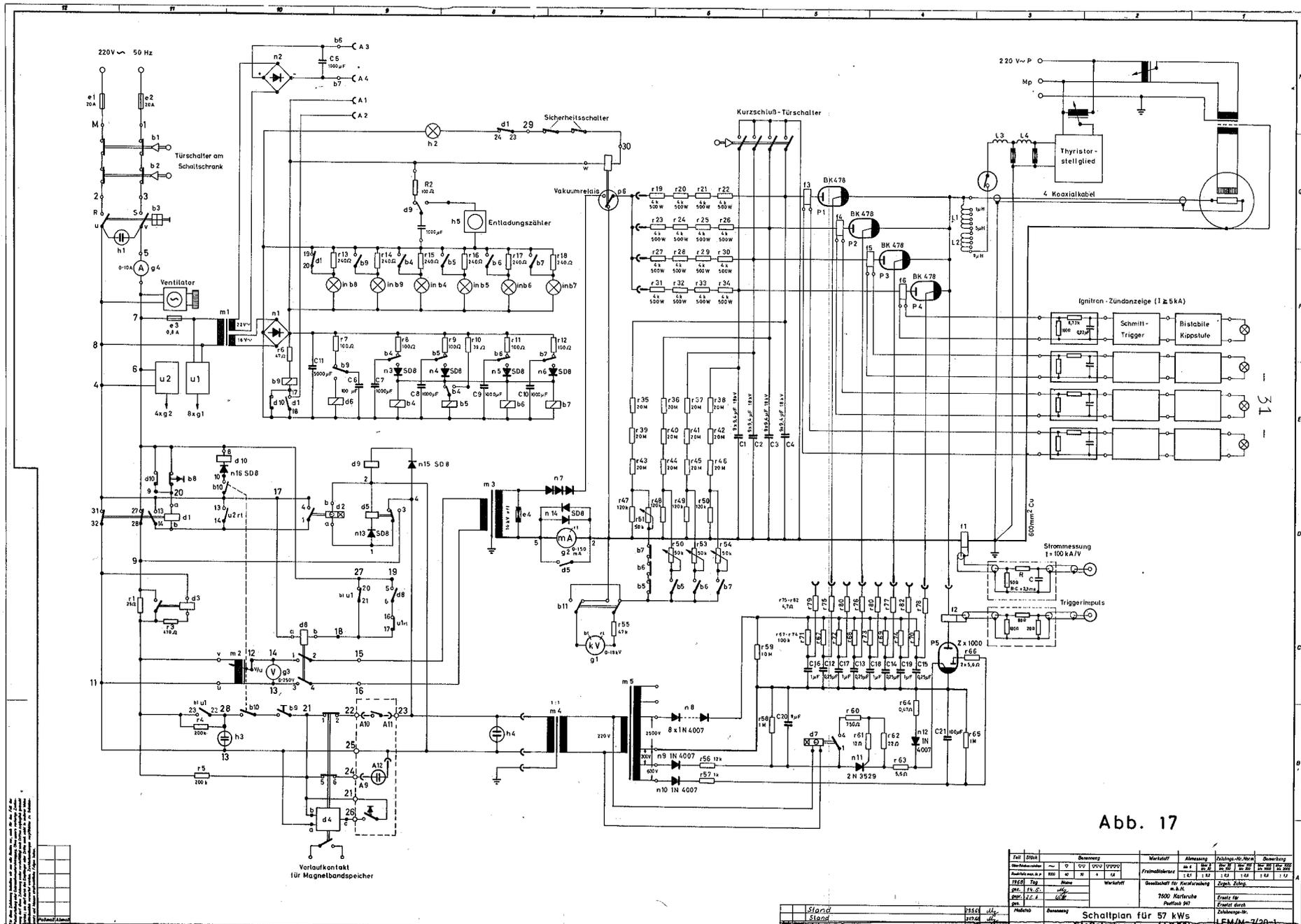


Abb. 17

Teil	Stück	Bezeichnung	Werkstoff	Abmessung	Festigkeit-Norm	Bezeichnung
1	1	CV2 100V 10000				
2	1	CV2 100V 10000				
3	1	CV2 100V 10000				
4	1	CV2 100V 10000				
5	1	CV2 100V 10000				
6	1	CV2 100V 10000				
7	1	CV2 100V 10000				
8	1	CV2 100V 10000				
9	1	CV2 100V 10000				
10	1	CV2 100V 10000				
11	1	CV2 100V 10000				
12	1	CV2 100V 10000				
13	1	CV2 100V 10000				
14	1	CV2 100V 10000				
15	1	CV2 100V 10000				
16	1	CV2 100V 10000				
17	1	CV2 100V 10000				
18	1	CV2 100V 10000				
19	1	CV2 100V 10000				
20	1	CV2 100V 10000				
21	1	CV2 100V 10000				
22	1	CV2 100V 10000				
23	1	CV2 100V 10000				
24	1	CV2 100V 10000				
25	1	CV2 100V 10000				
26	1	CV2 100V 10000				
27	1	CV2 100V 10000				
28	1	CV2 100V 10000				
29	1	CV2 100V 10000				
30	1	CV2 100V 10000				
31	1	CV2 100V 10000				
32	1	CV2 100V 10000				
33	1	CV2 100V 10000				
34	1	CV2 100V 10000				
35	1	CV2 100V 10000				
36	1	CV2 100V 10000				
37	1	CV2 100V 10000				
38	1	CV2 100V 10000				
39	1	CV2 100V 10000				
40	1	CV2 100V 10000				
41	1	CV2 100V 10000				
42	1	CV2 100V 10000				
43	1	CV2 100V 10000				
44	1	CV2 100V 10000				
45	1	CV2 100V 10000				
46	1	CV2 100V 10000				
47	1	CV2 100V 10000				
48	1	CV2 100V 10000				
49	1	CV2 100V 10000				
50	1	CV2 100V 10000				
51	1	CV2 100V 10000				
52	1	CV2 100V 10000				
53	1	CV2 100V 10000				
54	1	CV2 100V 10000				
55	1	CV2 100V 10000				
56	1	CV2 100V 10000				
57	1	CV2 100V 10000				
58	1	CV2 100V 10000				
59	1	CV2 100V 10000				
60	1	CV2 100V 10000				
61	1	CV2 100V 10000				
62	1	CV2 100V 10000				
63	1	CV2 100V 10000				
64	1	CV2 100V 10000				
65	1	CV2 100V 10000				
66	1	CV2 100V 10000				

Stand: 1974  
 Stand: 1974  
 Stand: 1974  
 Schaltungsplan für 57 kW  
 Stoßstromanlage (AFYS)  
 LEMM-7/20-1