

Abschaltverhalten der SIEMENS-Vakuum-
schaltröhre VS 10 007 (Typ B 2) in
einer Gleichstrom-Abschalteinrichtung

(DC Interruption Tests With SIEMENS-
Vacuum Interrupter VS 10 007 (Type B2))

D. Dorst

IPP 2/248

Dezember 1979



MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

8046 GARCHING BEI MÜNCHEN

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

Abschaltverhalten der SIEMENS-Vakuum- schaltröhre VS 10 007 (Typ B 2) in einer Gleichstrom-Abschalteinrichtung

(DC Interruption Tests With SIEMENS-
Vacuum Interrupter VS 10 007 (Type B2))

D. Dorst

IPP 2/248

Dezember 1979

*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.*

(in German)

December 1979

ABSTRACT

Measurements are reported which have been carried out with a SIEMENS vacuum circuit breaker, 12 kV (three phase), 2500 A, using a vacuum interrupter VS 10 007 (type B 2). The circuit breaker was installed in an existing DC circuit breaker device. In this device, the current-zero in the vacuum interrupter is achieved by counterpulsing a charged capacitor bank.

It was possible to interrupt 18 kA DC against a voltage of 12 kV (peak) when an axial magnetic field of 0.046 T was applied to the vacuum interrupter. The temperature rise of the interrupter during the pulse tests at 18 kA was less than 20 K. The contact life is expected to be more than 1000 operations.

Inhalt

1. Versuchsaufbau
2. Messungen
 - 2.1. Strom OH-Transformator
 - 2.2. Strom im Vakuumschalter S1
 - 2.3. Spannung über S1
 - 2.4. Spannung über R_{OH}
 - 2.5. Ladespannung für C_c
 - 2.6. Temperatur des anodenseitigen Kontaktbolzens
 - 2.7. Sonstige Temperaturmessungen
3. Versuchsablauf
 - 3.1. Messungen bei Dauerstrom am geschlossenen Schalter S1
 - 3.2. Abschaltversuche
4. Versuchsergebnisse
 - 4.1. Einfluß der Ladespannung für die Kommutierungs-
batterie
 - 4.2. Einfluß der Lichtbogendauer
 - 4.3. Einfluß eines axialen Magnetfeldes
 - 4.4. Berechnung des Energieumsatzes
 - 4.4.1. Energieumsatz im normalen Pulsbetrieb
 - 4.4.2. Dynamische Belastungsgrenzen
 - 4.4.3. Thermische Belastungsgrenzen
 - 4.5. Kontaktabbrand, Lebensdauer
5. Literatur

1. Versuchsaufbau

Zur Verfügung stand eine in ihrer Schaltung im Bild 1 gezeigte Abschaltelinrichtung für Gleichstrom, die im OH-System des Stellarators Wendelstein 7 im IPP Garching installiert ist. In dieser Abschaltelinrichtung konnte der von der Firma SIEMENS kurzfristig zur Verfügung gestellte Vakuumschalter 3 AF 1756-4JA40-OAAO-Z, F.-Nr. 31 136 764, Z = einpolig nach HSS 189728, Nennstr. 2500 A; Nennkurzschlußausschaltstrom 31,5 kA (3 s), bestückt mit einer Vakuumschaltröhre VS 10 007 (Typ B2), erprobt werden.

Für diesen Schalter wurde eine Verzugszeit von 31 ms zwischen dem Anlegen des Auslöseimpulses an die Auslösespule und dem Abheben der Kontakte gemessen. Der Sicherheitsschalter S3 hat einen Schließverzug von (13...14) ms.

Um das Mittelstück der Vakuumschaltröhre wurde eine Spule mit einem Innendurchmesser des Wickelraumes von 180 mm und einer Länge von 70 mm (4000 Windungen CuL-Draht 0,8 mm ϕ) angeordnet (Bild 2 und 3). Diese Spule erzeugt in ihrem Zentrum ein Axial-Magnetfeld von etwa 0,021 T/A.

Mit solchen Axialfeldern läßt sich die Bildung eines Anodenfleckes unterdrücken [1;3] wodurch auch hohe Ströme zuverlässig abgeschaltet werden können. Damit verbunden ist auch die Verringerung der Lichtbogen-spannung (geringere Kontakterwärmung) und eine Erhöhung der Kontaktlebensdauer (geringere Verdampfung von Elektrodenmetall).

Die Axialfeld-Spule wird über einen Isoliertrenntransformator und einen Zweiphasen-Brückengleichrichter erregt (Bild 3). Bei Spulenströmen über 1 A wird die Spule aus Erwärmungsgründen timergesteuert nur für 5 s eingeschaltet, wobei die Abschaltung innerhalb dieses 5-s-Fensters ausgeführt wird.

2. Messungen

2.1. Strom OH-Transformator

Zur Messung des Stromes im OH-Transformator wurde die betriebsmäßig am W7 verwendete Meßeinrichtung benutzt. Sie besteht aus einem Shunt 6000 A/60 mV, - Kl. 0,2 Trennverstärker 60 mV/10 V (Knick, Berlin) Strip-Chart-Recorder 7100 BM (Hewlett-Packard) Die Klassengenauigkeit der gesamten Meßeinrichtung liegt bei etwa 1,5%. Sie eignet sich nur zur Registrierung langsam ablaufender Vorgänge.

2.2. Strom im Vakuumschalter S1

Die Ausgleichsvorgänge laufen mit einer Frequenz von etwa 2 kHz ab. Verwendet wurde zur Beobachtung des Abschaltverlaufes eine Rogowskispule mit nachgeschaltetem elektronischen Integrator, dessen Ausgangssignal einem Speicheroszilloskop zugeführt wurde. Eine Eichung wurde nicht vorgenommen, da nur der prinzipielle Stromverlauf in der Nähe des Nulldurchganges beim Abschalten verfolgt werden brauchte.

2.3. Spannung über S1

Zur Messung des Spannungsverlaufes über S1, und zwar sowohl der Lichtbogenspannung als auch der wiederkehrenden Spannung nach der Abschaltung, wurden 2 ohmisch-kapazitive Spannungsteiler 1:10000, -3 dB:10 kHz, Klassengenauigkeit 1,5 bei 3 kHz in Differenzschaltung benutzt. Die Spannungsteiler wurden an den verrippten Köpfen des Vakuumschalters angeklemmt. Ihre Meßausgänge wurden an die Differenzeingänge eines Speicheroszilloskops angeschlossen (Bild 1, Teiler R3 und R4).

2.4. Spannung über R_{OH}

Zur prinzipiellen Überwachung des Abschaltverlaufes und des Timings wurde ein nicht geeichter Spannungsteiler zwischen dem hochspannungsseitigen Ende des OH-Widerstandes R_{OH} und dem geerdeten Schutzleiter des Niederspannungsnetzes, an dem das registrierende Speicheroszilloskop angeschlossen war, verwendet (Bild 1, Teiler R5).

2.5. Ladespannung für C_c

Die Ladespannung der Kommutierungs-batterie wurde mit dem Zeigerinstrument gemessen, das in der vorhandenen Abschalt-einrichtung eingebaut ist. Die Klassengenauigkeit ist unbekannt. Sie ist auch nicht von Bedeutung, da nur innerhalb der Versuchsreihen die Gleichheit der Ladespannung beobachtet werden muß.

2.6. Temperatur des anodenseitigen Kontaktbolzens

Die Temperatur des anodenseitigen Kontaktbolzens (beweglicher Kontakt) konnte mit einem Cu-Ko-Thermoelement, das an der Klemmschelle des beweglichen Bolzens angebracht war, über einen Trennverstärker 60 mV/10 V (Fa. Knick, Berlin) und einem Kompensations-schreiber registriert werden.

2.7. Sonstige Temperaturmessungen

An mehreren Stellen der Vakuum-Schaltröhre waren zur Temperaturüberwachung Temperatur-Meßstreifen angebracht. Die Stellen sind in Bild 4 angegeben.

Zur Messung der Raumtemperatur diente ein Hg-Thermometer.

3. Versuchsablauf

3.1. Messungen bei Dauerstrom am geschlossenen Schalter S1

Über eine Versuchsdauer von 4 Std. wurde der geschlossene Vakuumschalter mit einem Gleichstrom von etwa 2500 A (Nennstrom) belastet. Die Raumtemperatur betrug 19°C . Aus dem mitgeschriebenen Temperaturverlauf für die Klemmschelle (Thermoelement) war erkennbar, daß bei einer Temperatur von 55°C der Beharrungszustand erreicht war.

Die Strombahnwiderstände betragen:

$$\begin{aligned} \text{Ausgangszustand: } R_k &= 8,4 \mu\Omega \quad \text{bei } \vartheta_k = 24^{\circ}\text{C} \\ \text{Endzustand: } R_w &= 9,56 \mu\Omega \end{aligned}$$

Aus der Widerstandsänderung errechnet sich eine mittlere Temperatur von $\vartheta_w = 55^{\circ}\text{C}$, was der gemessenen Temperatur entspricht.

Die in der Vakuumschaltröhre umgesetzte Verlustleistung beträgt im warmen Zustand

$$P = I^2 \cdot R_w = 60 \text{ W.}$$

3.2. Abschaltversuche

Zunächst wurde eine Ladekennlinie für die Kommutierungs-batterie C_c aufgenommen, indem die geladene Batterie auf den stromführenden, jedoch geschlossenen Schalter entladen wurde. Dabei wird der Stromverlauf im Nulldurchgang des Schalterstromes beobachtet und die Ladespannung der Kondensatoren-batterie für den jeweiligen Strom so lang verändert, bis ein einwandfreier Nulldurchgang ohne "Durchhängen", dh. ohne Überkommutierung erreicht ist. Die auf diese Weise gefundene Ladekennlinie war die Grundlage für Optimierungen bei den Abschaltversuchen (Bild 5).

Die Abschaltversuche wurden mit 4 kA beginnend mit unterschiedlichen Strömen bis zu 18 kA durchgeführt. Das Timing war so gewählt, daß die Lichtbogendauer zunächst etwa 4 ms betrug. Für jeden gewählten Strom waren jeweils zu optimieren:

1. Ladespannung der Kommutierungsbatterie U_L
2. Lichtbogendauer t_L
3. Axial-Magnetfeld

Alle Abschaltversuche und ihr Ergebnis sind im beiliegenden Versuchsprotokoll zusammengestellt.

Bei mißlungenen Abschaltversuchen brannte - bedingt durch das für den Sicherheitsschalter S3 gewählte Timing - der Lichtbogen im Vakuumschalter S1 insgesamt etwa 20 ms lang.

4. Versuchsergebnisse

4.1. Einfluß der Ladespannung für die Kommutierungsbatterie

Bei Strömen bis zu 12,5 kA ließen sich ohne besondere Optimierung der Ladespannung einwandfreie Abschaltungen erzielen. Grundlage für die gewählte Ladespannung war die gemäß 3.2. aufgenommene Ladekennlinie (Bild 5).

Bei 15 kA und 18 kA wurde die Ladespannung nur geringfügig ohne wesentlichen Einfluß auf das Abschaltverhalten variiert. Ausgehend von dem Ladezustand, bei dem der Strom im Schalter gerade durch Null gezwungen wird, steht für die Ladespannung nach oben eine Variationsbreite von mehreren hundert Volt zur Verfügung.

Die Einstellgenauigkeit für die Vorwahl der Ladespannung ist in diesem Rahmen ohne besondere Bedeutung für das Abschaltergebnis.

4.2. Einfluß der Lichtbogendauer

Die Lichtbogendauer dient als indirektes Maß für den Kontaktabstand. Ein Diagramm, das die Beziehungen zwischen Lichtbogendauer und Kontaktabstand angibt, wurde unter Benutzung eines geeigneten Weggebers in einer gesonderten Meßreihe aufgenommen (Bild 22).

Bei Strömen bis zu 12,5 kA erwies sich eine Lichtbogendauer von 4 ms als ausreichend. Die wiederkehrende Spannung erreichte bis zu 7 kV (Bild 6 bis Bild 9).

Bei Strömen über 15 kA mußte die Lichtbogendauer auf (4,5...5,5)ms heraufgesetzt werden, um einwandfreie Abschaltungen zu erhalten. Inwieweit die Erhöhung des axialen Magnetfeldes (siehe 4.3.) wieder eine Verringerung der Lichtbogendauer zuläßt, muß noch ermittelt werden.

Die Versuche haben bisher gezeigt, daß die Lichtbogendauer im Bereich von mehr als 1 ms variieren kann, wenn dabei eine Lichtbogendauer von 4,5 ms dh. ein Mindestkontaktabstand von 6,5 mm nicht unterschritten wird.

4.3. Einfluß eines axialen Magnetfeldes

Einen entscheidenden Einfluß auf ein günstiges Abschaltverhalten des Vakuumschalters hat ein axiales Magnetfeld.

Bei 20 Abschaltversuchen mit 15 kA und einer Lichtbogendauer von 5,5 ms trat ohne Axialfeld 1 Fehlabschaltung auf. Mit einem Axialfeld von 0,012 T und einer Lichtbogendauer von (4,5...5,5)ms konnten insgesamt 77 Abschaltungen ohne Fehlabschaltung vorgenommen werden. Bei einer weiteren Steigerung des Axialfeldes auf 0,046 T ist ein deutlicher Einfluß auf die Verringerung der Lichtbogenspannung erkennbar (vergl. Bild 13, Bild 12, Bild 14).

Eine Umkehr des Axialfeldes von 0,012 T brachte dagegen bei 5,5 ms Lichtbogendauer eine wesentliche Verschlechterung des Abschaltverhaltens bei 15 kA.

Die Bedeutung eines ausreichend hohen Axialfeldes für die sichere Abschaltung wird besonders bei Strömen von 18 kA erkennbar. Während bei einem Feld von 0,012 T durchschnittlich 17% Fehlabschaltungen auftraten, konnten bei einem Axialfeld von 0,046 T ohne Fehler 30 Abschaltungen ausgeführt werden. Auch bei diesem Strom geht der wesentliche Einfluß des Axialfeldes auf die Verringerung der Lichtbogenspannung aus dem Vergleich von Bild 17 mit Bild 19 hervor.

Neben der Unterdrückung der Anodenfleckbildung durch das Axialfeld, die sich in der Verringerung der Lichtbogenspannung äußert [1; 3], hat die geringe Lichtbogenspannung den Vorteil, daß der Energieumsatz in der Schaltkammer bei einer Abschaltung verringert wird. Bei den Abschaltversuchen mit 18 kA erreichte infolgedessen die Temperatur der Klemmschelle des beweglichen Kontaktes (Anode) bei etwa 200 s Pulsabstand nur 35 °C (Bild 23).

4.4. Berechnung des Energieumsatzes im Vakuumschalter, Belastungsgrenzen

4.4.1. Energieumsatz im normalen Pulsbetrieb

Zugrundegelegt für die Berechnung wird der bisher größte mit dem Vakuumschalter abgeschaltete Gleichstrompuls.

Für den 18-kA-Puls beträgt $\int i^2 dt \approx 0,35 \cdot 10^9 \text{ A}^2 \text{ s}$.

Bei einem betriebswarmen Schalter mit einem Strombahnwiderstand von $R_w = 9,5 \mu\Omega$ (siehe Abschnitt 3.1.) ergibt sich bei geschlossenen Kontakten eine Energieaufnahme von

$$W_1 = \int i^2 dt \cdot R_w = 0,35 \cdot 10^9 \cdot 9,5 \cdot 10^{-6} = 3330 \text{ Ws}$$

Im Lichtbogen wird bei einer Abschaltung umgesetzt:

$$W_2 = I \cdot \int_{t_L} u_L dt = 18 \cdot 10^3 \cdot 0,2 = 3600 \text{ Ws}$$

(nach Bild 19 ergibt sich bei 0,046 T Axialfeld:

$$\int_{t_L} u dt = 0,2 \text{ Vs})$$

Der Energieumsatz im Schalter pro Puls beträgt demnach

$$W = W_1 + W_2 = 6930 \text{ Ws}$$

Bei einem Pulsabstand von 200 s ergibt sich als mittlere Verlustleistung

$$P = \frac{6930}{200} \approx 35 \text{ W}$$

Diese Leistung ist wesentlich kleiner als die Verlustleistung, die vom geschlossenen Schalter bei Dauerbelastung mit Nennstrom abgeführt werden muß (Abschnitt 3.1.).

Mit einem ausreichend hohen Axial-Magnetfeld dürfte der Schalter in der Lage sein, noch wesentlich höhere Ströme abzuschalten.

4.4.2. Dynamische Belastungsgrenzen

Begrenzend für den höchsten im Pulsbetrieb abschaltbaren Strom dürfte die dynamische Kurzschlußfestigkeit des Schalters und besonders die der Kontaktbolzen in der Vakuumschaltröhre sein.

Bei einer Rückzündung, die nie ausgeschlossen werden kann, überlagert sich im Schalter der abklingende Schwingstrom aus der Kondensatorenbatterie dem abzuschaltenden Gleichstrom. Der resultierende Strom erreicht dabei im 1. Scheitelwert etwa das 2-fache des abzuschaltenden Stromes.

4.4.3. Thermische Belastungsgrenzen

Bei einer fehlgeschlagenen Abschaltung brennt der Lichtbogen im Schalter bis zum Eingreifen des Schutzschalters S3. Die Lichtbogenbrenndauer beträgt bei den vorhandenen Schutzeinrichtungen insgesamt etwa 20 ms. Der Energieumsatz im Lichtbogen ergibt sich für diesen Fall zu

$$W_k \approx 50 \text{ V} \cdot 18 \text{ kA} \cdot 0,02 \text{ s} = 18 \text{ kJ}$$

Bei einer Kurzschlußabschaltung im Netz beträgt demgegenüber die Lichtbogenarbeit bei einer Brenndauer von 10 ms (1 Halbwelle bei 50 Hz).

$$W \approx 30 \text{ kJ}.$$

Die höchst zulässige Lichtbogenarbeit ist nicht bekannt. Sie ist gegeben durch die adiabate Erwärmungsgrenze für die Lichtbogenlaufringe, bei der das verwendete Hartlot noch nicht aufschmilzt. Der Vergleich mit der Lichtbogenarbeit bei einer Kurzschlußabschaltung zeigt jedoch, daß eine schnell und sicher arbeitende Schutzeinrichtung unerlässlich ist.

4.5. Kontaktabbrand, Lebensdauer

Im Verlauf der bisher durchgeführten Abschaltversuche wurde ein Stromvolumen von

$$\sum I \cdot t_L \approx 44\ 000\ \text{As}$$

I: abzuschaltender Strom

t_L : Lichtbogendauer

erreicht.

Dabei ist berücksichtigt, daß der Lichtbogen bei einer fehlgeschlagenen Abschaltung insgesamt etwa 20 ms in der Vakuumschaltröhre brennt.

Der bisher beobachtbare Kontaktabbrand liegt innerhalb der Meßgenauigkeit ($< 0,5\ \text{mm}$). Damit ergibt sich eine Lebensdauer von mindestens 500 normalen Abschaltungen bei 18 kA.

SHIMADA und Mitarb. [2] berichten über Kontaktlebensdauern von einigen tausend Abschaltungen bei Vakuumschaltern mit axialem Magnetfeld. Nach den bisherigen Erfahrungen scheint dies mit der Vakuumschaltröhre VS 10 007 auch erreichbar zu sein.

Wegen der gleichbleibenden Stromrichtung im Schalter ist wahrscheinlich mit Materialwanderungen von Kontakt zu Kontakt zu rechnen. Wie groß dieser Anteil ist, kann erst nach Öffnen der Vakuumschaltröhre festgestellt werden.

5. Literatur

- [1] WARREN, R.W.
Experiments with vacuum interrupters used
for large DC-current interruption
Report No LA-6909-MS; UC 20. Oct. 1977
Los Alamos Sc. Lab.
- [2] SHIMADA, R.; TANI, K.; TAMURA, S.;
YANABU, S.; MATSUSHITA, T.; MURANO, M.
Development of high current DC circuit
breaker for large Tokamak device
Proc. 10th SOFT Padova/Italy, Sept. 1978,
Paper D-9.
- [3] RONDEEL, W.G.J.
The confinement of a vacuum arc in an axial
magnetic field
Proc. VL Symp. on Discharges and Electr. Insul.
in Vacuum, Swansea July 1974, 241-246.

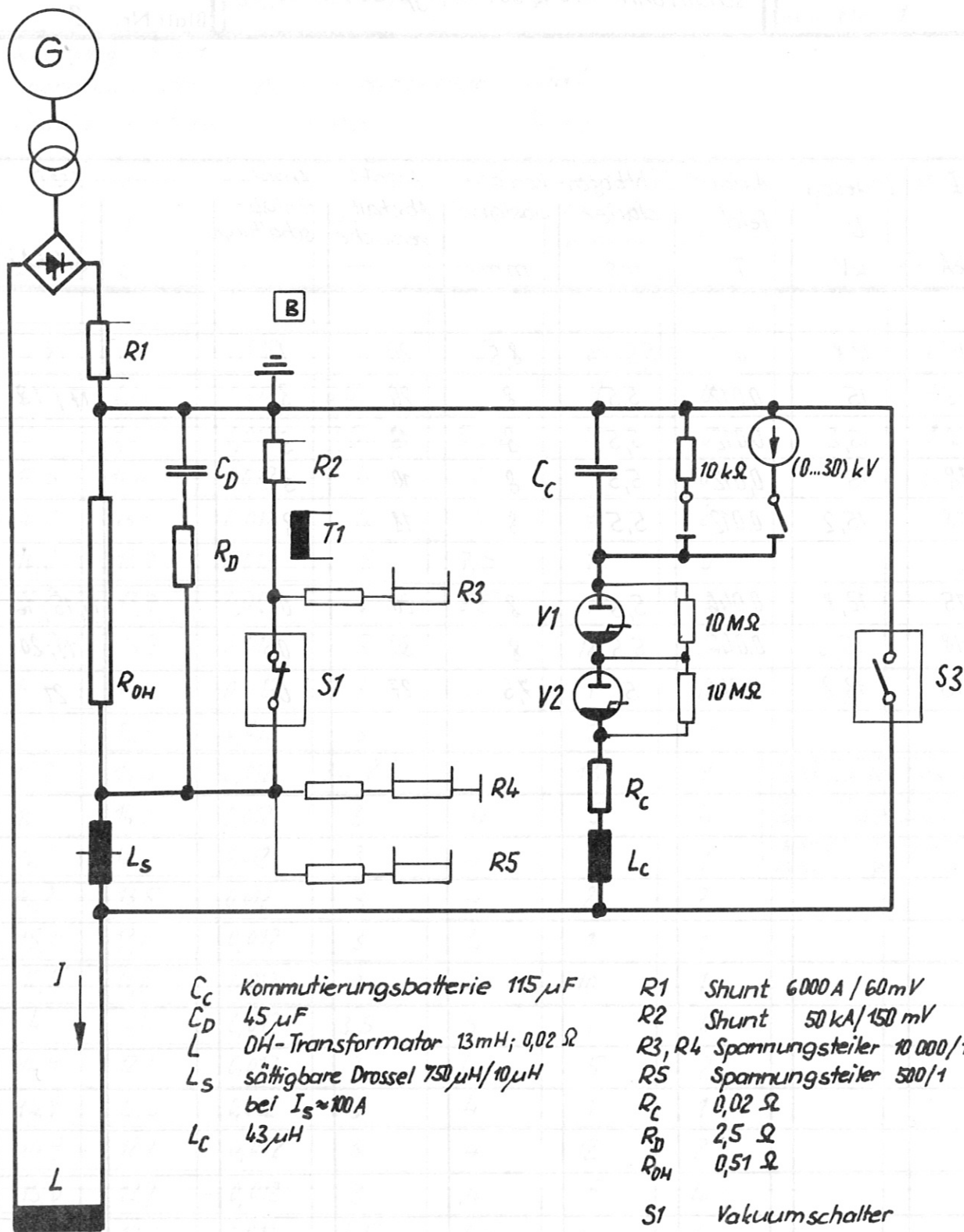
IPP - E 2	Versuchsprotokoll		Datum Okt.-Dez. 1979
	Abschaltversuche mit SIEMENS - Vakuum- schalttröhre VS 10 007 (Typ B2)		Name Dorst
			Blatt Nr. 1

Schaltung: Bild 1

Anordnung der Temperatur-Meßpunkte: Bild 4

Positive Richtung des Axialfeldes: Bild 4

I kA	Ladespg. U kV	Axial- feld T	Lichtbogen- dauer ms	Kontakt- abstand mm	Anzahl Abschalt- versuche	Anzahl Fehl- abschaltgn.	Oszillogr. Bild Nr.
	4	4,5	0,012	4	6	5	0
6,25	6,4	0,012	3,5... 4	5... 6	9	0	7
10	9,0	0,012	3,5... 4	5... 6	11	0	8
12,5	11,0	0,012	4	6	9	0	9
16,2	13,7	0,012	4	6	7	2	
16,2	13,7	0,012	5	7,5	1	0	
16,2	13,7	0,012	6	8,5	1	1	
16,2	13,7	0,012	3	4	18	5	
16,2	13,8	0,012	3	4	1	0	
16,2	13,5	0,012	3	4	1	0	
16,2	14,4	0,012	3... 2,5	4...	13	7	Temperaturen nach 8 Fehlabsch. bei 9 Abschalt- versuchen in 18 min: Meßst. 1: 50°C; Streifen < 55°C Meßst. 2,3: Streifen > 710°C Meßst. 4: Streifen < 55°C
16,2	14,0	0,012	3	4	5	4	
16,2	13,2	0,012	3	4	1	1	
16,2	13,5	0,012	3	4	2	2	
15,0	12,8	0,012	3	4	1	1	
12,5	11,0	0,012	3	4	10	1	
4	4,4	0,012	3,5	5	1	0	
14,9	12,7	0,012	3	4	5	2	
14,9	12,5	0,012	3	4	1	1	
14,9	12,7	0,012	3	4	12	2	
15,0	12,7	- 0,012	3	4	5	4	
15,0	12,7	- 0,012	4,5	6,5	14	4	
15,0	12,7	0,012	4,5	6,5	20	0	10
15,0	12,7	0,012	3,5	5	20	2	11
15,0	12,5	0,012	4,5	6,5	20	0	
15,0	12,5	0,012	3	4	3	2	
15,0	12,8	0,012	4,5	6,5	17	0	
15,0	12,8	0,012	5,5	8	20	0	12
15,0	12,7	- 0,012	5,5	8	5	2	



I
↓
 L

- | | | | |
|-------|------------------------------------------------------------------------|------------|--------------------------|
| C_c | Kommutierungsbatterie 115 μ F | R_1 | Shunt 6000 A / 60 mV |
| C_D | 45 μ F | R_2 | Shunt 50 kA / 150 mV |
| L | OH-Transformator 13 mH; 0,02 Ω | R_3, R_4 | Spannungsteiler 10 000/1 |
| L_s | sättigbare Drossel 750 μ H / 10 μ H
bei $I_s \approx 100$ A | R_5 | Spannungsteiler 500/1 |
| L_c | 43 μ H | R_c | 0,02 Ω |
| | | R_D | 2,5 Ω |
| | | R_{OH} | 0,51 Ω |
| | | S_1 | Vakuumschalter |
| | | S_3 | Sicherheitsschalter |
| | | T_1 | Rogowski spule |

Bild 1: Schaltung Gleichstromabschalteinrichtung

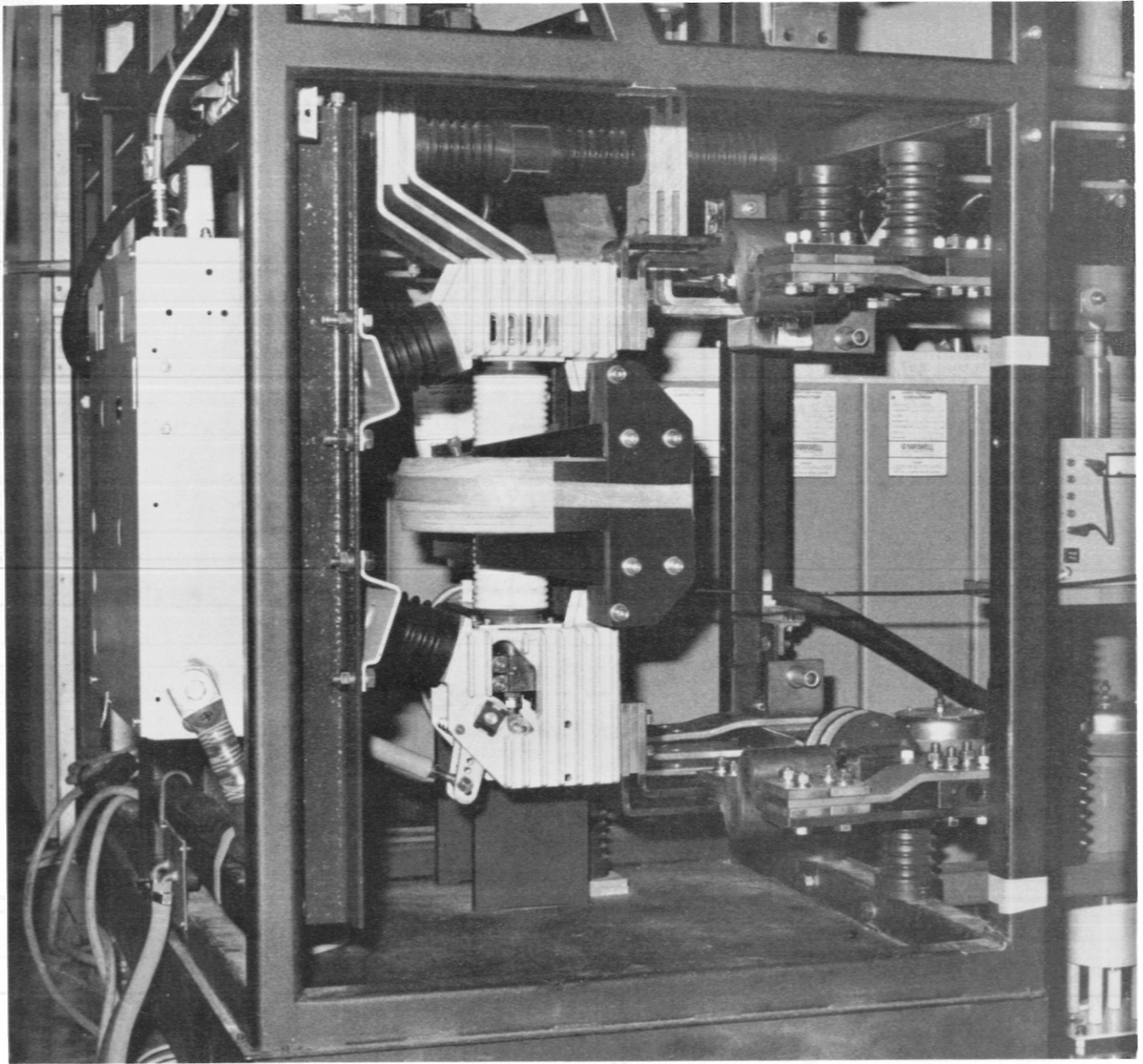


Bild 2 : Vakuumschalter mit Axialfeldspule

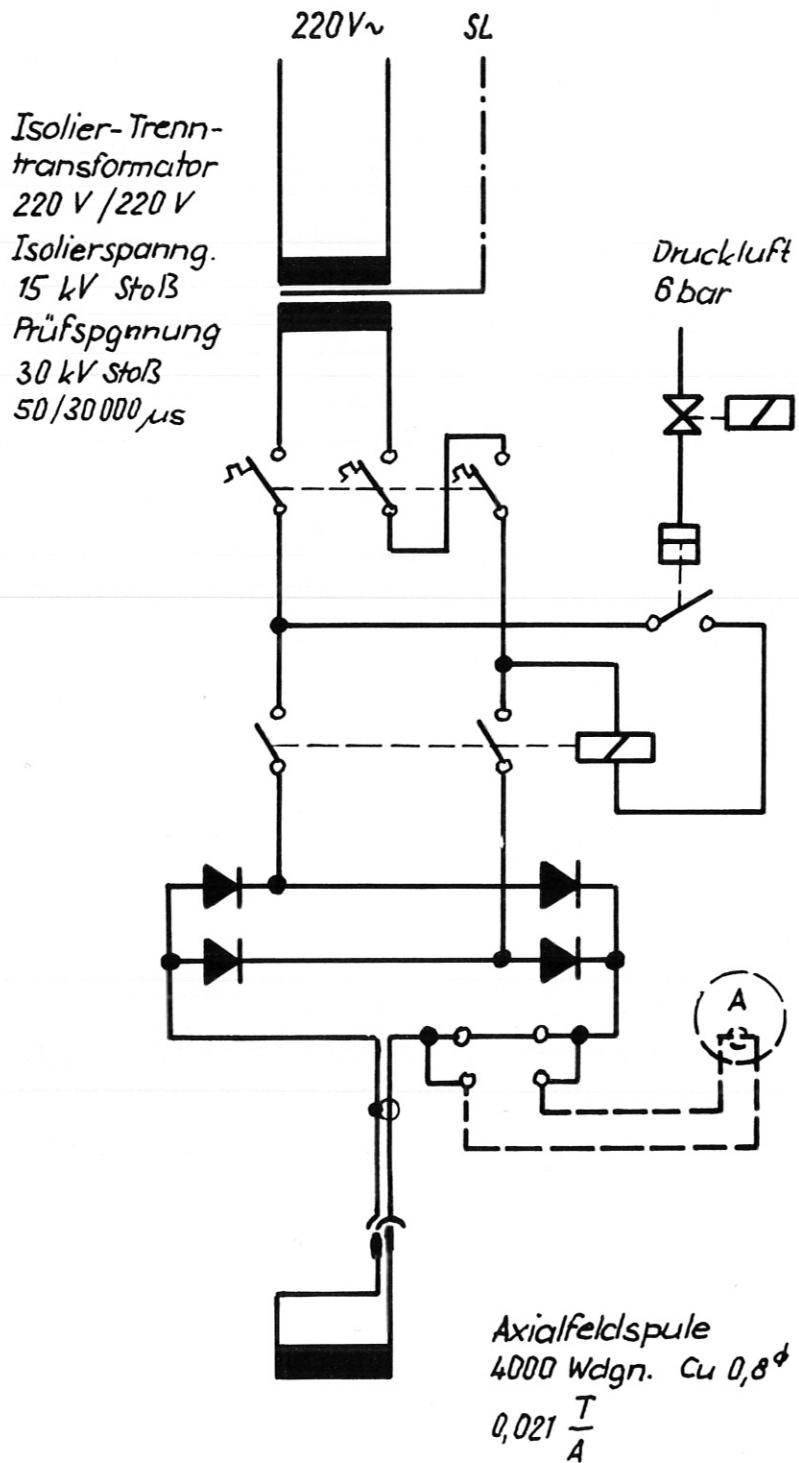
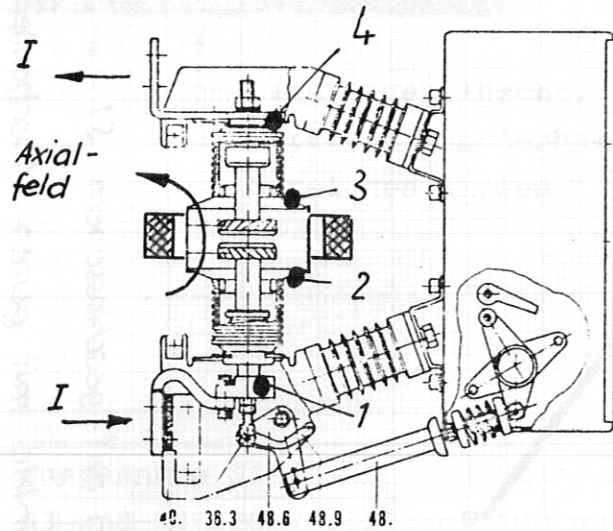


Bild 3: Stromversorgung Axialfeldspule



- | | | | |
|-----|-----------------------|------|-------------------|
| 31. | Feststehender Kontakt | 48.6 | Hebel |
| 36. | Bewegbarer Kontakt | .9 | Lenker |
| .3 | Adapter | 49. | Kontaktdruckfeder |
| 40. | Unterer Polträger | 63. | Schalterwelle |
| 48. | Isolierkoppel | 63.7 | Hebel |
| | | 64.2 | Auslösekinke |

1 Temperaturmessung mit Cu-Ko-Thermoelement und Meßstreifen

2, 3, 4 Temperaturmessung mit Meßstreifen

Bild 4: Anordnung der Temperatur-Meßpunkte und der Axialfeldspule

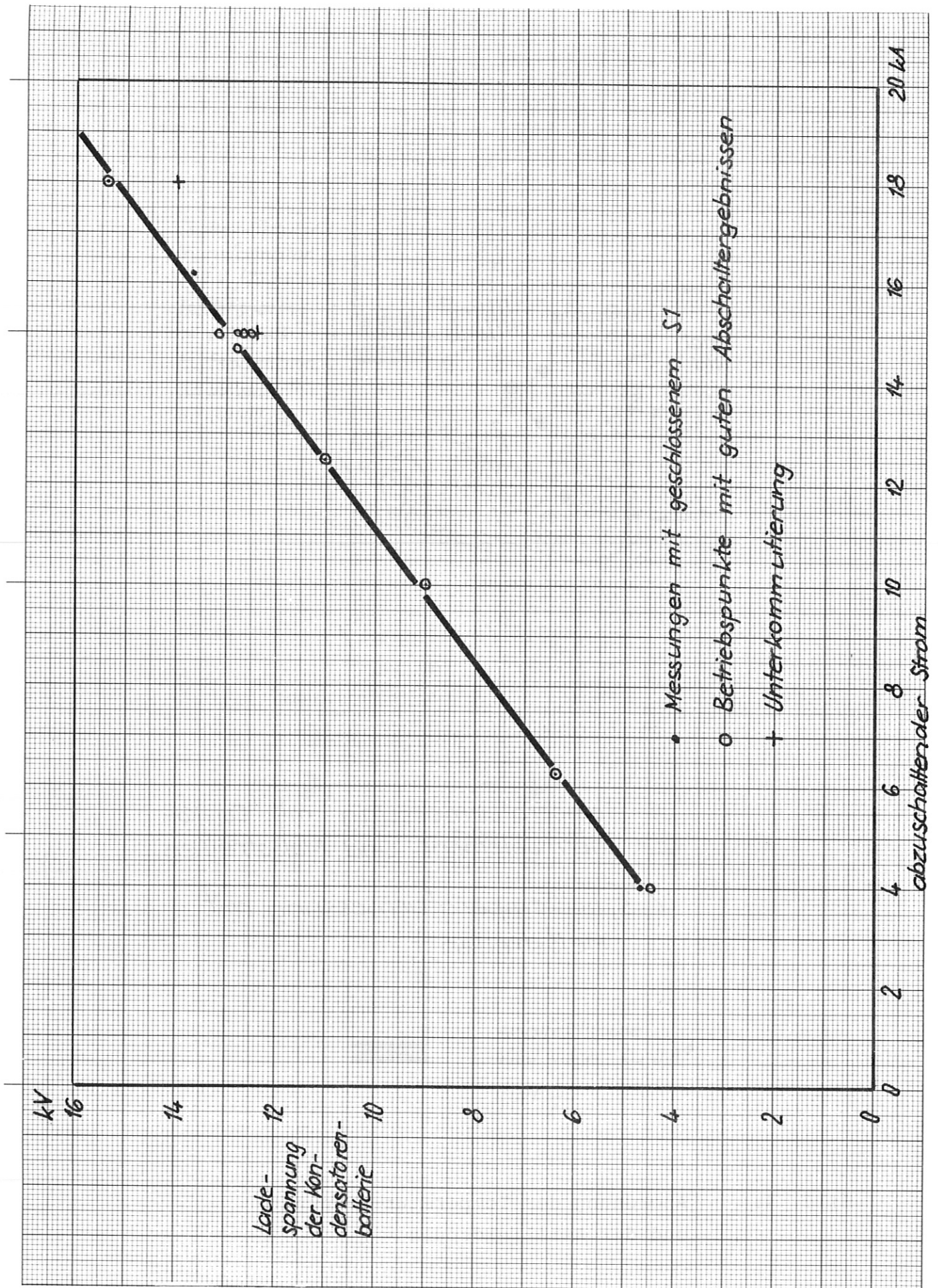
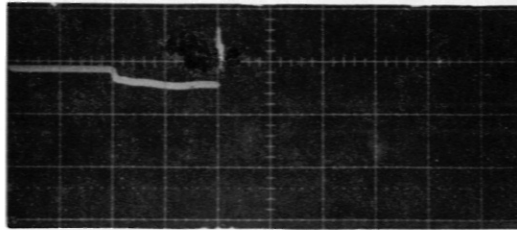


Bild 5: Ladediagramm

Spannung über OH-Widerstand

(Teiler R5; ≈ 100 V/Teilung; 2 ms/Teilung)

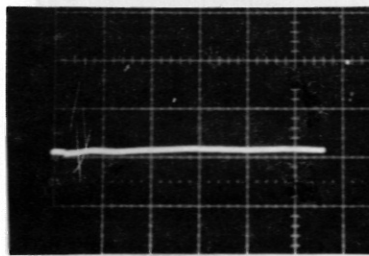


S1 öffnet

Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen

Lichtbogenspannung S1

(Teiler R3 und R4; 20 V/Teilung; 100 μ s/Teilung)

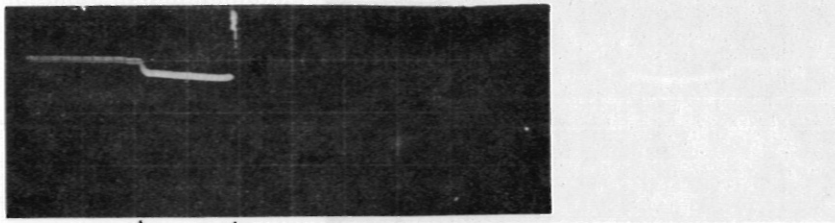


$U_{S1}=0$

Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen

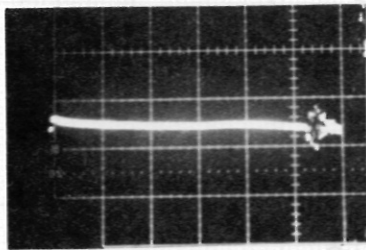
Bild 6: Abgeschalteter Strom 4 kA
 Axialfeld 0,012 T
 Stromversorgung: Hg-Anlagen

Spannung über OH-Widerstand
 (Teiler R5; ≈ 100 V/Teilung; 2 ms/Teilung)



S1 öffnet \rightarrow \leftarrow Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen

Lichtbogenspannung S1
 (Teiler R3 und R4; 20 V/Teilung; 100 μ s/Teilung)

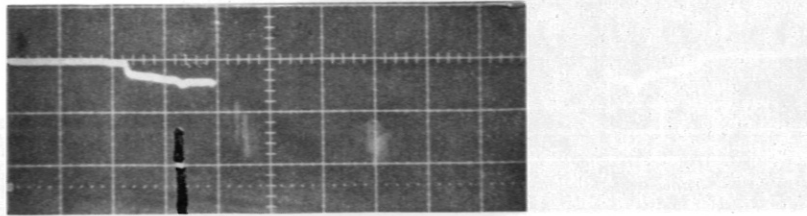


$U_{S1} = 0$

Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen

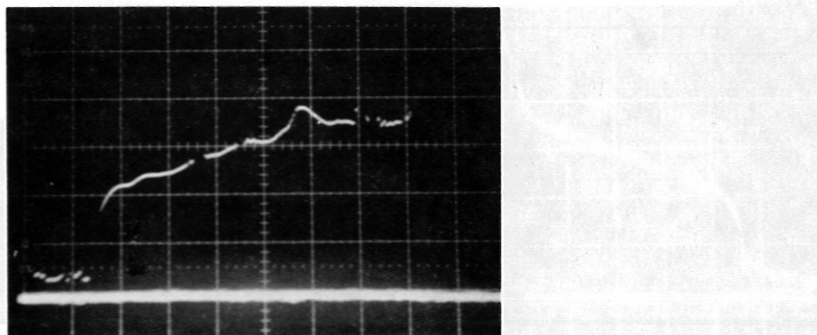
Bild 7: Abgeschalteter Strom 6,25 kA
 Axialfeld 0,012 T
 Stromversorgung: Hg-Anlagen

Spannung über OH-Widerstand
(Teiler R5; ≈ 100 V/Teilung; 2 ms/Teilung)



S1 öffnet — Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen

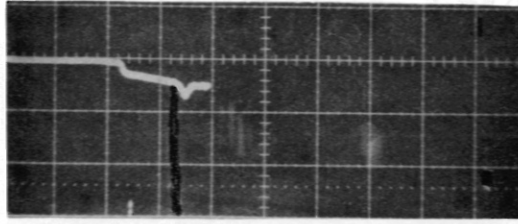
Lichtbogenenspannung S1
(Teiler R3 und R4; 10 V/Teilung; 500 μ s/Teilung)



S1 öffnet — Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen

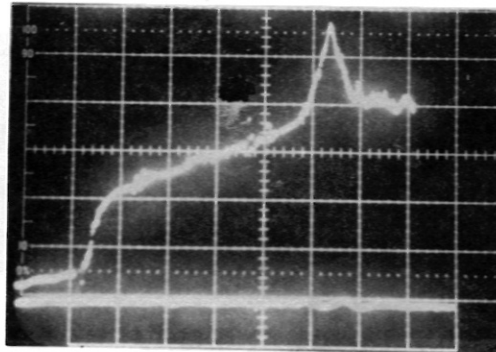
Bild 8: Abgeschalteter Strom 10 kA
Axialfeld 0,012 T
Stromversorgung: Hg-Anlagen

Spannung über OH-Widerstand
(Teiler R5; ≈ 100 V/Teilung; 2 ms/Teilung)



S1 öffnet \uparrow \uparrow Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen

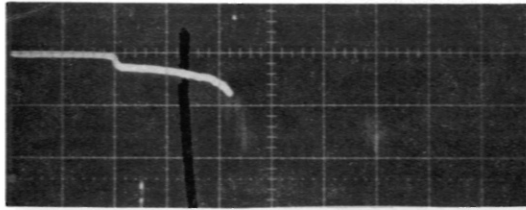
Lichtbogenspannung S1
(Teiler R3 und R4; 10 V/Teilung; 500 μ s/Teilung)



S1 öffnet \uparrow \uparrow Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen

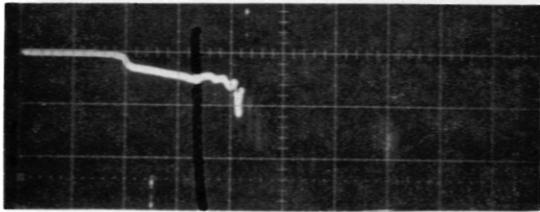
Bild 9: Abgeschalteter Strom 12,5 kA
 Axialfeld 0,012 T
 Stromversorgung: Hg-Anlagen

Spannung über OH-Widerstand
(Teiler R5; ≈ 100 V/Teilung; 2 ms/Teilung)



S1 öffnet

Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen

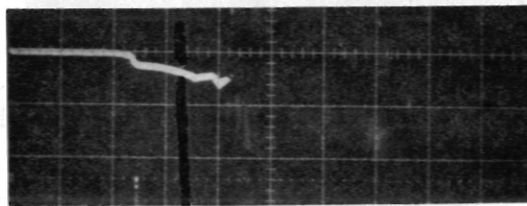


S1 öffnet

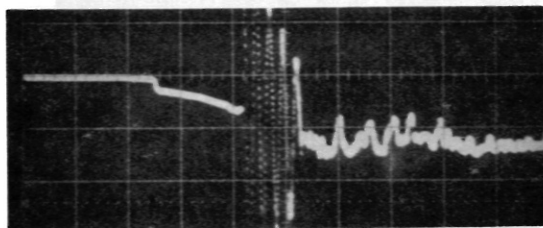
Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen

Bild 10: Abgeschalteter Strom 15 kA
Axialfeld 0,012 T
Stromversorgung: Hg-Anlagen

Spannung über OH-Widerstand
(Teiler R5; ≈ 100 V/Teilung; 2 ms/Teilung)



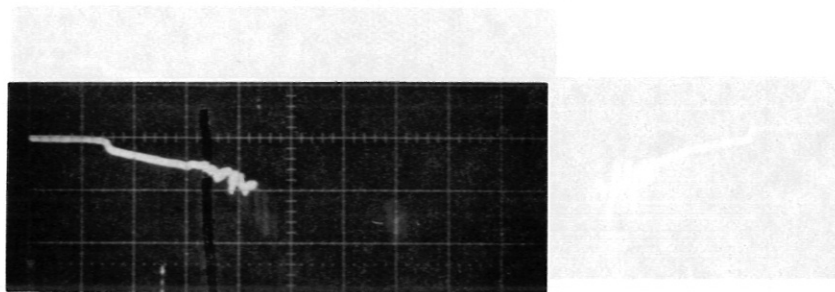
S1 öffnet ———
Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen



S1 öffnet ———
Rückzündung im Spannungsanstieg

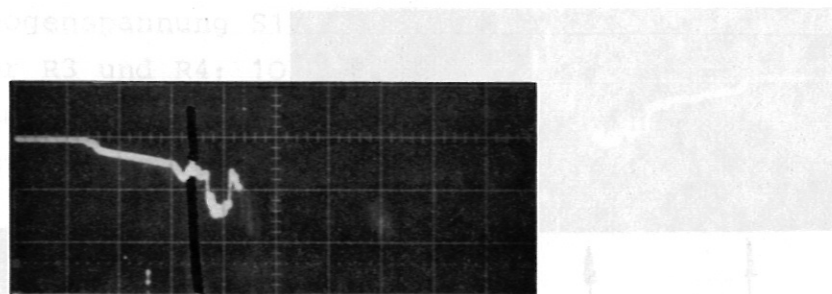
Bild 11: Abgeschalteter Strom 15 kA
 Axialfeld 0,012 T
 Stromversorgung: Hg-Anlagen

Spannung über OH-Widerstand
(Teiler R5; ≈ 100 V/Teilung; 2 ms/Teilung)



S1 öffnet

Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen

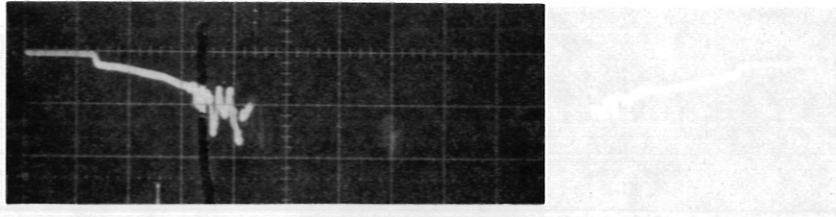


S1 öffnet

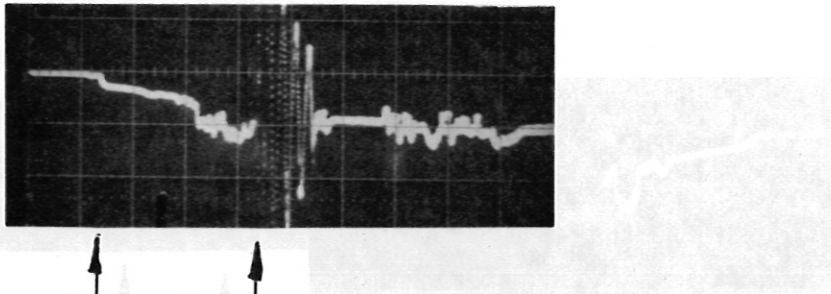
Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen

Bild 12: Abgeschalteter Strom 15 kA
Axialfeld 0,012 T
Stromversorgung: Hg-Anlagen

Spannung über OH-Widerstand
(Teiler R5; ≈ 100 V/Teilung; 2 ms/Teilung)



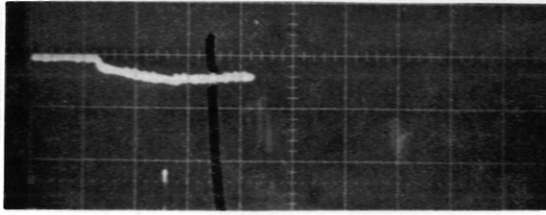
S1 öffnet — Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen



S1 öffnet — Rückzündung im Spannungsanstieg

Bild 13: Abgeschalteter Strom 15 kA
Axialfeld O T
Stromversorgung: Hg-Anlagen

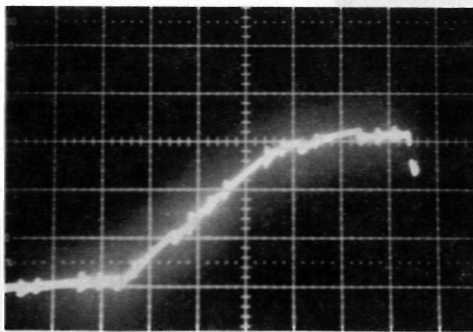
Spannung über OH-Widerstand
 (Teiler R5; ≈ 100 V/Teilung; 2 ms/Teilung)



S1 öffnet

Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen

Lichtbogenspannung S1
 (Teiler R3 und R4; 10 V/Teilung; 1 ms/Teilung)
 Die überlagerten Schwingungen sind durch die Thyristor-Stromversorgung verursacht

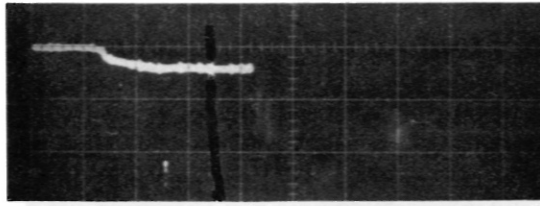


S1 öffnet

Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen

Bild 14: Abgeschalteter Strom 15 kA
 Axialfeld 0,046 T
 Stromversorgung: Thyristor-Anlagen

Spannung über OH-Widerstand (Teiler R5; ≈ 100 V/Teilung; 2 ms/Teilung)



S1 öffnet

Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen

Strom in S1 bei der Abschaltung (Rogowskispule T1 mit Integrator; ≈ 5 kA/Teilung; 100 μ s/Teilung)

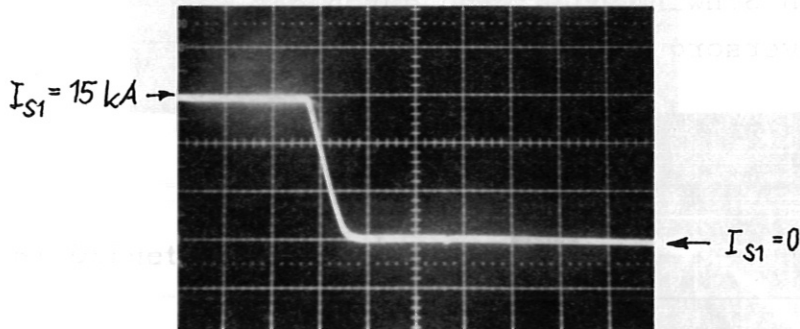
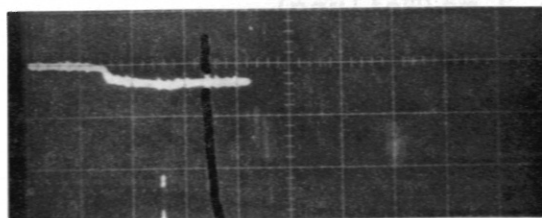


Bild 15 : Abgeschalteter Strom 15 kA
 Axialfeld 0,046 T
 Stromversorgung: Thyristor-Anlagen

Spannung über OH-Widerstand

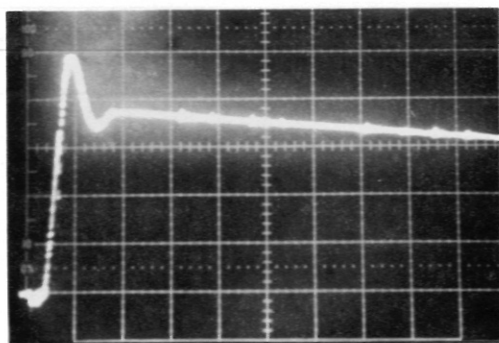
(Teiler R5; ≈ 100 V/Teilung; 2 ms/Teilung)



S1 öffnet

Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen

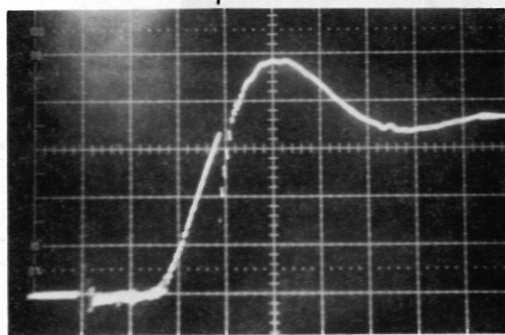
Spannung über S1 (Teiler R3 und R4; 2 kV/Teilung)



Zeitmaßstab:

500 μ s/Teilung

Stromnulldurchgang der Ausgleichsschwingung
(Ignitrons löschen und zünden in Gegenrichtg.)



Zeitmaßstab:

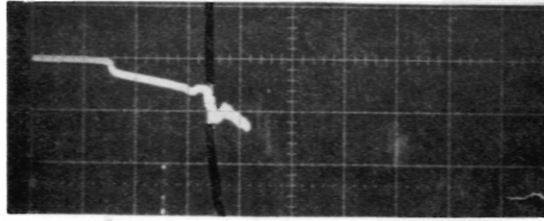
100 μ s/Teilung

Lichtbogen löscht

Draufschalten der Kommutierungsbatterie

Bild 16 : Abgeschalteter Strom 15 kA
Axialfeld 0,046 T
Stromversorgung: Thyristor-Anlagen

Spannung über OH-Widerstand
 (Teiler R5; $\approx 100 \text{ V/Teilung}$; 2 ms/Teilung)



S1 öffnet

Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen

Strom in S1 bei der Abschaltung
 (Rogowskispule T1 mit Integrator;
 $\approx 5 \text{ kA/Teilung}$; $100 \mu\text{s/Teilung}$)

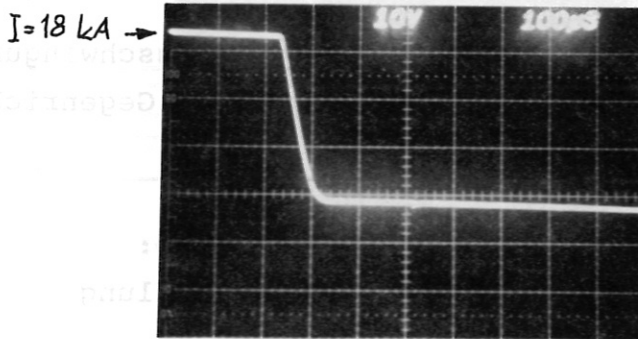
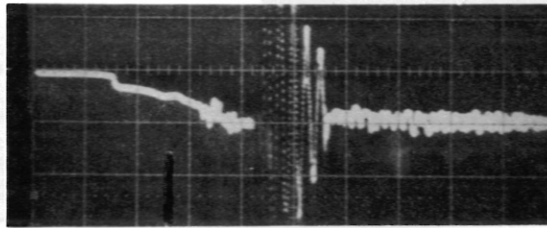


Bild 17 : Abgeschalteter Strom 18 kA
 Axialfeld $0,012 \text{ T}$
 Stromversorgung: Hg-Anlagen

Spannung über OH-Widerstand

(Teiler R5; $\approx 100 \text{ V/Teilung}$; 2 ms/Teilung)

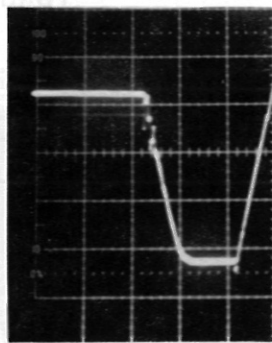


S1 öffnet

Rückzündung im Spannungsanstieg

Strom in S1

(Rogowskispule T1 mit Integrator;
 $\approx 5 \text{ kA/Teilung}$; $100 \mu\text{s/Teilung}$)

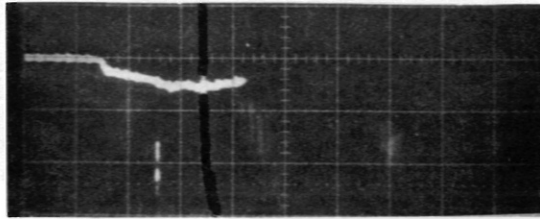


Rückzündung im Spannungsanstieg

Bild 18: Abgeschalteter Strom 18 kA
Axialfeld 0,012 T
Stromversorgung: Hg-Anlage

Spannung über OH-Widerstand

(Teiler R5; ≈ 100 V/Teilung; 2 ms/Teilung)



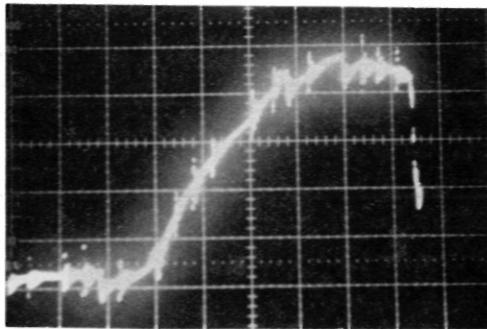
S1 öffnet

Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen

Lichtbogenspannung S1

(Teiler R3 und R4; 10 V/Teilung; 1 ms/Teilung)

Die überlagerten Schwingungen sind durch die Thyristor-Stromversorgung verursacht



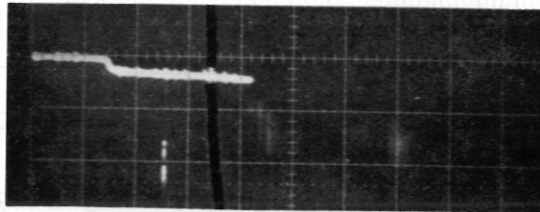
S1 öffnet

Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen

Bild 19: Abgeschalteter Strom 18 kA
 Axialfeld 0,046 T
 Stromversorgung: Thyristor-Anlagen

Spannung über OH-Widerstand

(Teiler R5; ≈ 100 V/Teilung; 2 ms/Teilung)



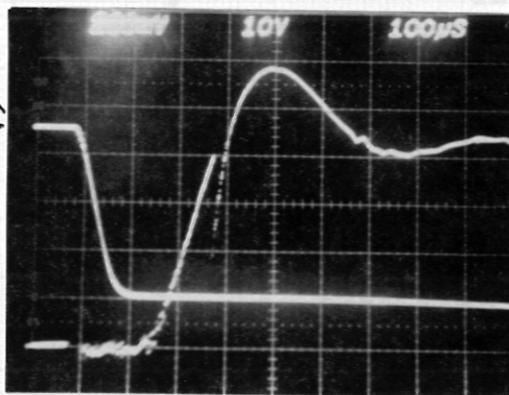
S1 öffnet

Lichtbogen löscht, Spannung steigt auf Werte, die außerhalb des Registrierbereiches liegen

Strom in S1 bei der Abschaltung
(Rogowskispule T1 mit Integrator;
 ≈ 5 kA/Teilung)

Spannung über S1
(Teiler R3 und R4;
2 kV/Teilung)

$I_{S1} = 18$ kA

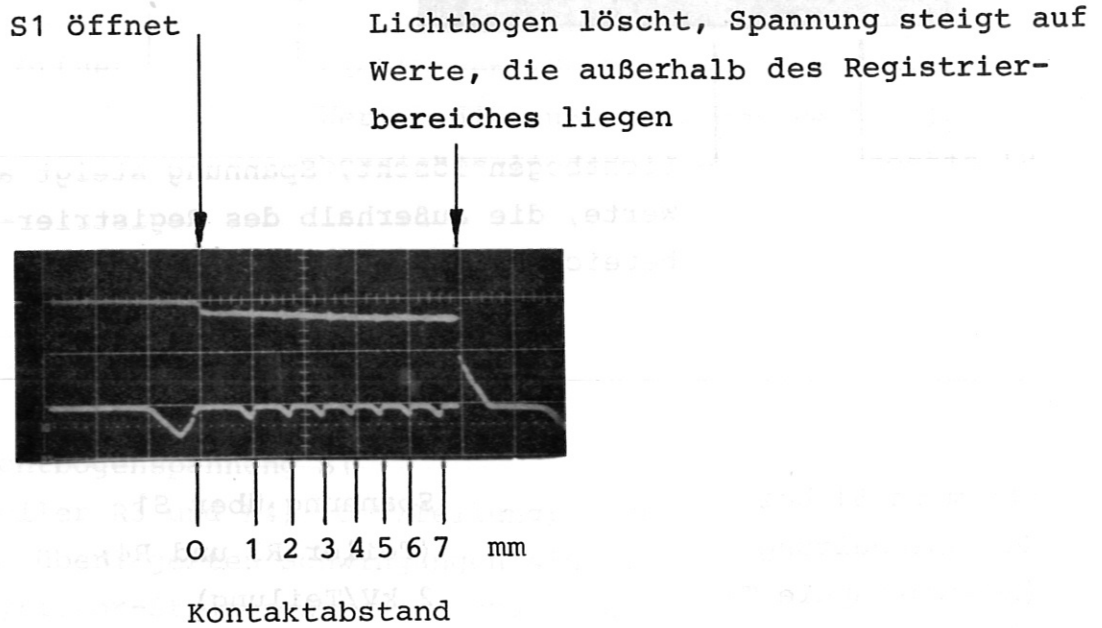


Zeitmaßstab:
 $100 \mu\text{s}/\text{Teilung}$

Stromnulldurchgang der Ausgleichsschwingung
(Ignitrons löschen und zünden in Gegenrichtg.)

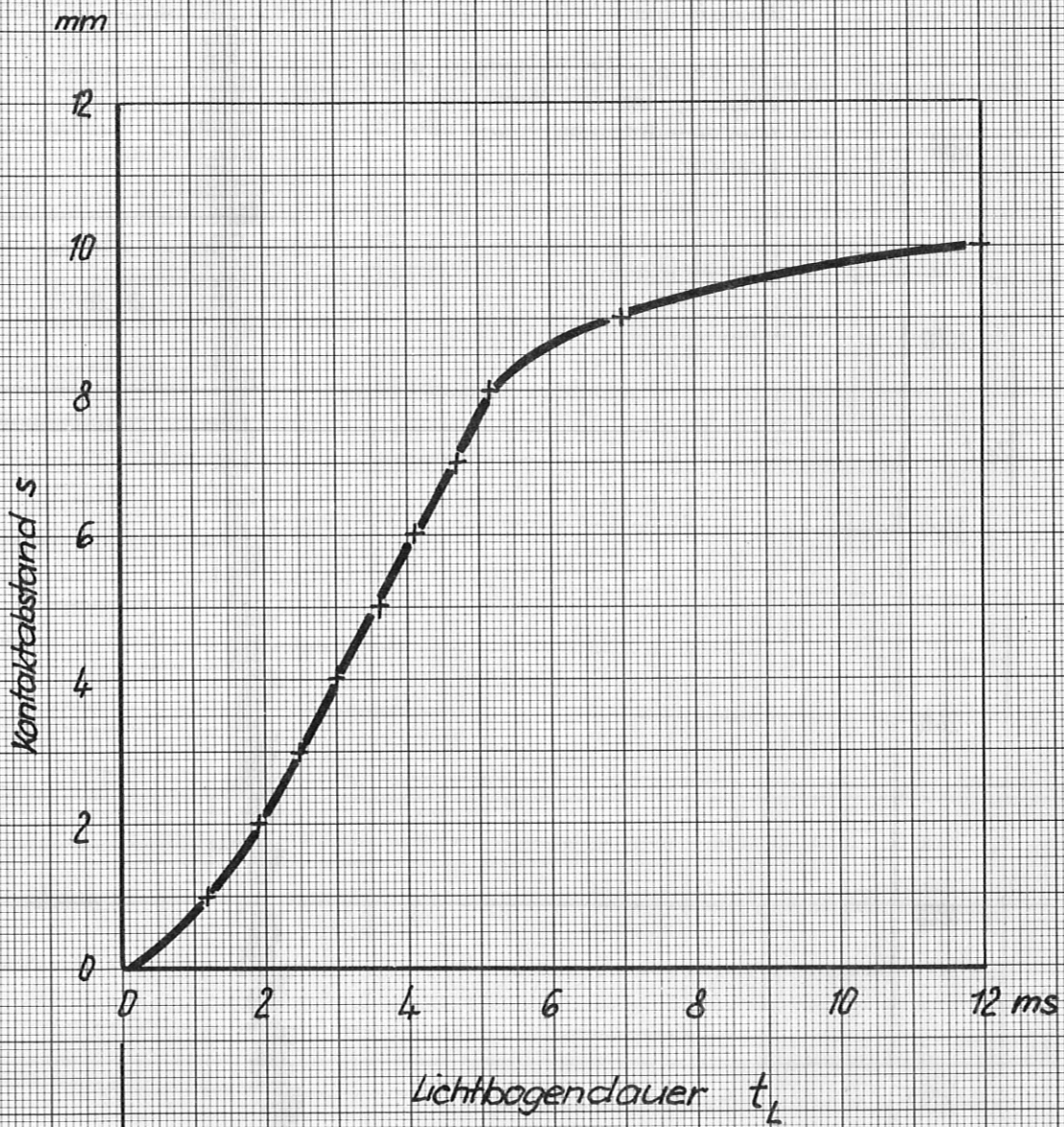
Bild 20 : Abgeschalteter Strom 18 kA
Axialfeld 0,046 T
Stromversorgung: Thyristor-Anlagen

Obere Spur: Spannung über OH-Widerstand
(Teiler R5; ≈ 100 V/Teilung; 1 ms/Teilung)



Untere Spur: Weggebersignal

Bild 21: Abgeschalteter Strom 15 kA
Axialfeld 0,046 T



Diagrammanfang: Abheben der Kontakte

Bild 22: Kontaktabstand als Funktion der Lichtbogendauer

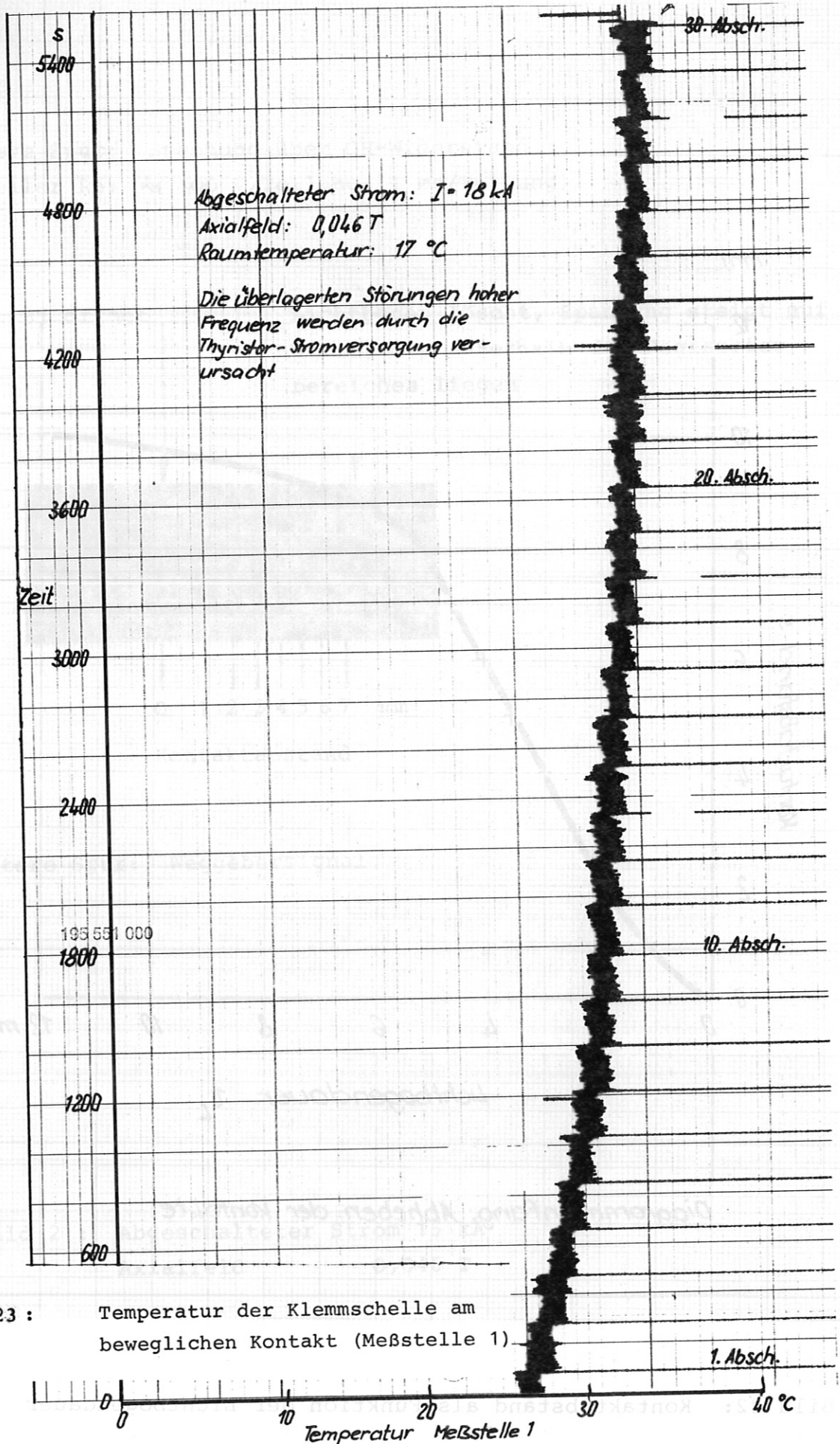


Bild 23 : Temperatur der Klemmschelle am beweglichen Kontakt (Meßstelle 1)