Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 6 (1915)

Heft: 8

Artikel: Die Untersuchungen an Oelschaltern

Autor: Bauer, Bruno

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1059626

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

A. Die Untersuchungen an Oelschaltern. I. Teil.

Von *Bruno Bauer,* dipl. Ingenieur, Zürich.

Einleitung.

Die Untersuchungen bezwecken die Erforschung des Abschaltvorgangs im Oelschalter und dessen Beeinflussung durch die Betriebsverhältnisse zur Gewinnung neuer Gesichtspunkte für die Verbesserung der Konstruktion und der Betriebssicherheit dieses Schaltapparates. Die Kommission hat den geplanten Versuchen ein in diesem Sinne entworfenes Programm zu Grunde gelegt, das im Vorwort im Wortlaut wiedergegeben ist. Dieses konnte, wie der nachfolgende Bericht zeigen wird, in mancher Beziehung erweitert werden, freilich nicht ohne die Untersuchungen im Sinne einer eingehenderen Erforschung des Wechselstromlichtbogens unter Oel vertieft zu haben. In der Literatur sind bis heute tatsächlich nur sehr wenige und lückenhafte Andeutungen über die Vorgänge beim Abschalten zu finden; die angestrebten Resultate für die Praxis wären aber ohne eine auf eingehenden Versuchen basierende physikalische Deutung nicht erhältlich gewesen. Es mag an dieser Stelle erwähnt sein, dass gerade diese mehr wissenschaftlich-technischen Untersuchungen sich zu einer ziemlich mühevollen Arbeit gestalteten, indem aus dem sehr komplexen Vorgang beim Abschalten unter Oel nur schwer die einzelnen beeinflussenden Momente herauszulesen sind. Wenn die gewonnenen Resultate einiges Licht in die verwickelten Erscheinungen bringen dürften, so mag damit der Zeitaufwand, der diesen Versuchen gewidmet worden ist, seine Rechtfertigung finden.

Parallel mit den experimentellen Arbeiten ist der Gegenstand des vorgelegten Berichtes auch einer theoretischen Behandlung unterzogen worden. Wir hatten bis jetzt die Genugtuung, die aufgestellte Theorie durch die gewonnenen Versuchsresultate bestätigt zu sehen, sodass sich aus der erweiterten Erkenntnis mancher Fingerzeig für die Durchführung der rein experimentellen Untersuchung ergab. Es erscheint uns daher als gerechtfertigt, wenn der nachfolgenden Berichterstattung über die Versuchsergebnisse die entwickelten näherungsweisen theoretischen Grundlagen in kurzer Zusammenfassung vorangestellt werden. Andere Punkte des Programms wiederum blieben unerledigt, teils weil sich diese als unwesentlich erwiesen, teils weil die betreffenden Versuche bis heute noch nicht möglich waren. Es wird darüber in einem späteren Bericht Nachricht gegeben.

Um nun in kurzen Worten den Inhalt des auf Grund der gelungenen Vorversuche hin erweiterten Programms unserer Untersuchungen zu umschreiben, sei an die Prinzipien erinnert, nach denen sich die Bemessung eines modernen Oelschalters richtet. Die betriebssichere Abschaltung einer gegebenen Leistung durch den Oelschalter stellt drei Hauptforderungen an dessen Konstruktion:

1. Die stromführenden Teile sollen ohne schädliche Erwärmung dauernd den maximalen stationären Strom ertragen können.
2. Die unter Spannung stehenden Konstruktionsteile sollen mit der für die stationäre Betriebsspannung erforderlichen Sicherheit die Spannung gegenüber ihrer Umgebung halten können.
3. Der Schalter soll die beim Abschaltvorgang in Wärme umgesetzte Energie auch in den, in der Anlage möglichen aussergewöhnlichen Fällen ohne schädliche Erwärmung oder gar explosive Wirkung aufnehmen können, eventl. für mehrere unmittelbar aufeinanderfolgende Schaltungen.

Während die ersten zwei Bedingungen der rechnungsmässigen Behandlung zugänglich sind, stehen wir bis heute bezüglich der dritten und heute wichtigen Forderung noch im Unklaren. Die vom V. D. E. in den Richtlinien für die Konstruktion und Prüfung von Wechselstrom-Hochspannungsapparaten angegebene Serien-Einteilung der Oelschalter versucht allerdings der Forderung einer maximalen Abschaltleistung gerecht zu werden, indessen bleibt aus eben diesem Grunde an dem System eine gewisse Willkür haften, weil nicht

bekannt ist, mit welcher Sicherheit eine Schalterserie die ihr zugeordneten maximalen Abschaltleistungen aufzunehmen vermag. Es kann dies so lange nicht angegeben werden, als wir nicht wissen, *welcher Betrag der abgeschalteten Leistung über die Zeitdauer des Abschaltvorgangs im Schalter in Wärme übergeführt wird und in welchem Masse die entwickelte Wärmemenge dem gegebenen Schalter gefährlich werden kann.* Und damit ist auch das Ziel unserer Untersuchungen näher gekennzeichnet. In einem *I. Teil: Die elektrische Beanspruchung des Oelschalters*, soll untersucht werden, in welcher Beziehung die im Schalter entwickelte Wärmemenge, *die Schalterarbeit*, zur abgeschalteten Leistung steht und welche Rolle hierbei Strom, Spannung und die Konstanten des Stromkreises spielen. Es soll ermittelt werden, welchen Einfluss die Betriebsbedingungen des Oelschalters (Schaltgeschwindigkeit, Oeldruck und Temperatur) und seine Konstruktion (Elektroden-Form und -Grösse) auf die Schalterarbeit ausüben. Die Kenntnis des Zusammenhangs zwischen Abschaltleistung und Schalterarbeit erlaubt alsdann im *II. Teil: Die mechanische Beanspruchung des Oelschalters*, den thermodynamischen Vorgang des Abschaltprozesses zu studieren, indem der Zusammenhang der Schalterarbeit mit der mechanischen Beanspruchung des Schalters durch die Expansionskräfte zu erforschen ist. Es wird sich aus der gewonnenen Erkenntnis dieser Beziehungen die für den gegebenen Schalter *„zulässige Schalterarbeit"* formulieren lassen sowie deren Veränderlichkeit mit der Schaltergrösse und Konstruktion. Ein besonderes Kapitel wird hierbei der Verwendung sog. unverbrennlicher Schalteröle und im gleichen Sinne wirkender Sonderkonstruktionen vorbehalten.

Diese kurze Uebersicht lässt erkennen, dass wir uns im Sinne des allgemeinen Kommissionsprogramms zunächst auf das Studium der *Wärmeerscheinung im Oelschalter* beschränken, bezw. deren Ursache und Wirkung. Die bekannten, den Abschaltvorgang begleitenden charakteristischen *Ueberspannungsphaenomene* sind, von diesem Gesichtspunkte aus betrachtet, von geringer Bedeutung; wir haben daher unsere Untersuchungen nicht nach dieser Richtung ausgedehnt. Die Einschränkung scheint umsomehr gerechtfertigt, als das Gebiet der Ueberspannungserscheinungen durch die mannigfachen theoretischen und experimentellen Arbeiten der letzten Jahre bereits eine bedeutende Klärung erfahren hat.

In diesem Sinne sind auch die von der Kommission für Hochspannungsapparate und Brandschutz aufzustellenden *Leitsätze für Konstruktion und Betrieb von Oelschaltern* aufzufassen. Sie lassen sich, gemäss dem Fortgang unserer Untersuchungen, in drei Gruppen teilen:

1. Leitsätze für Konstruktion und Betrieb im Sinne kleinster Schalterarbeit für die gegebene Abschaltleistung. (Aus den Ergebnissen des I. Teils.)
2. Leitsätze für Konstruktion und Betrieb im Sinne grösster Betriebssicherheit bei gegebener Schalterarbeit. (Aus den Ergebnissen des II. Teils.)
3. Versuch der Aufstellung von Schalterserien auf Grundlage der „zulässigen Schalterarbeit". (Aus den Ergebnissen des I. und II. Teils.)

Wie bereits einleitend dargetan, sind die Versuche zur Zeit der Herausgabe vorliegenden Berichtes noch nicht ganz abgeschlossen. Dieser umfasst gemäss obiger Gruppierung den I. Teil, d. h. das Resultat unserer Untersuchungen über die Schalterarbeit und die daraus abzuleitenden praktischen Ergebnisse für Konstruktion und Betrieb des Oelschalters. Ihre Umformung in Leitsätze soll indessen erst nach vollständigem Abschluss unserer Versuche durchgeführt werden, um für deren Redaktion auch noch das Resultat der wenigen noch ausstehenden Untersuchungen zur Verfügung zu haben und deren Sicherheit zu erhöhen.

I. Untersuchungen des physikalischen Vorgangs beim Abschaltprozess im Oelschalter.

A. Die physikalischen Bedingungen zur Lichtbogenbildung.

Die Jonentheorie über die Stromleitung in Gasen und Dämpfen sieht als Träger der Ladungen die positiven und negativen Jonen, die unter dem Einfluss des elektrischen Fel-

des zwischen den Elektroden wandern. Die Jonisierung der Gasstrecke ist Grundbedingung zur Stromleitung, und diese ist in ihrer Erscheinungsform charakterisiert durch die Art und Weise der Einleitung und Aufrechterhaltung der Jonisierung. Es interessieren uns hier vor allem die Formen der Funkenentladung und Lichtbogenbildung, die von diesem Gesichtspunkt aus kurz umschrieben werden sollen.

Bei der Funkenentladung wird die Jonisierung durch Jonenstoss eingeleitet, man nimmt hiebei an, dass die Wanderungsgeschwindigkeit der freien Jonen im angelegten elektrischen Feld genügend gross sei, um beim Anprall mit neutralen Elektronen des Gases diese zur Spaltung zu bringen. Diese zeitlich rasch anwachsende Bildung freier Jonen durch Spaltung führt das Gas in den jonisierten Zustand über, wodurch die Bedingung zur Stromleitung geschaffen ist. Die Aufrechterhaltung dieser Bedingung erfordert nichts weiter als die Haltung einer genügend hohen Potentialdifferenz zwischen den Elektroden. Der Zusammenhang der erforderlichen Spannungswerte mit der Art und Grösse der Gasstrecke ist heute experimentell bereits festgelegt und allgemein bekannt.

Die Bedingungen zur Stromleitung zwischen zwei Elektroden in Form eines Lichtbogens ist, wie die Erfahrung lehrt, an das Auftreten eines weissglühenden Kraters gebunden. Die von ihm ausgestrahlten negativen Jonen, deren Zahl mit der Temperatur und der Fläche des Kraters wächst, durchsetzen die Gasstrecke und bringen sie in jonisierten Zustand, womit unter dem Einfluss des elektrischen Feldes der Transport der elektrischen Massen eingeleitet ist. Soll der Lichtbogen stationär brennen, so hat offenbar der im Lichtbogen geführte Strom die Temperatur im negativen Krater selbst aufrechtzuerhalten bezw. den hiezu erforderlichen „*Wärmeeffekt*“ selbst aufzubringen. Unter Wärmeeffekt wollen wir die in der Zeiteinheit vom Strom an die Elektroden abzugebende Wärme verstehen. Die Jonentheorie nimmt an, dass die im elektrischen Feld wandernden positiven Jonen beim Auftreffen auf die Kathode ihre kinetische Bewegungsenergie in Wärme umsetzen und so den Wärmeffekt erzeugen. Je nach der Natur des Elektrodenmaterials und der Gasstrecke wird zur Haltung der Temperatur ein grösserer oder kleinerer Betrag an kinetischer Bewegungsenergie der Jonen erforderlich sein. Jedenfalls folgt hieraus eine erste Bedingung für die Existenzmöglichkeit eines Lichtbogens zwischen gegebenen Elektroden, nämlich das Vorhandensein eines dem stets endlichen Wärmeeffekt aequivalenten minimalen elektrischen Effekts. Die Betrachtung der Verteilung des Spannungsgefälles in der jonisierten Gasstrecke führt nun zu einer weiteren Forderung für den Stromdurchgang in Lichtbogenform. Es zeigt sich nämlich, dass der Spannungsabfall in der Gasstrecke linear verläuft, in der Schicht unmittelbar vor den Elektroden jedoch durch Sprung einen relativ grösseren, durch die Natur von Elektrode und Gasstrecke gegebenen Wert annimmt. Die Erscheinung ist unter dem Namen Anodenfall bezw. Kathodenfall bekannt. Die Haltung des Lichtbogens zwischen gegebenen Elektroden bedarf also noch als zweiter Bedingung das Vorhandensein einer minimalen Elektrodenspannung, die indessen im Vergleich zur Funkenentladung bedeutend kleinere Werte annimmt, da eben die Jonisierung des Gases durch den glühenden negativen Krater eingeleitet wird.

Die eingehenden Lichtbogenuntersuchungen von Mrs. Ayrton, die beiläufig gesagt, vor Aufstellung der Jonentheorie durch Thomson von ihr durchgeführt wurden, geben dem oben Abgeleiteten weitern Ausdruck. Mrs. Ayrton hat auf Grund ihrer Versuche die Beziehung aufgestellt:

$$e_i = a + \frac{b}{i} \tag{1}$$

wo i der im stationären Lichtbogen fliessende Strom und e_i die an den Elektroden herrschende Spannung bedeuten. Die Grössen a und b sind von Ayrton als Konstante des Bogens bezeichnet worden; die Jonentheorie erlaubt heute ihre nähere Deutung. Die Formel lässt vorerst erkennen, dass sich die erforderliche Elektrodenspannung aus einem konstanten Betrag a und einem mit i veränderlichen aufbaut; a können wir als die für die gegebenen Verhältnisse notwendige Minimalspannung bezeichnen, d. h. *mit einer Spannung kleiner als a lässt sich in der vorjonisierten Gasstrecke kein selbständiger Lichtbogen erzielen.*

Der Ausdruck des Lichtbogeneffekts wird nach (1) zu:

$$e_i \cdot i = a \cdot i + b$$

d. h. der aufzuwendende Effekt ist gleich dem Effekt zur Uebertragung der elektrischen Massen über das Spannungsgefälle a, plus einem vom Strom unabhängigen Betrag b. Wir deuten b als den für die gegebenen Verhältnisse erforderlichen Wärmeeffekt zur Temperaturhaltung des negativen Kraters. Der Ausdruck sagt dann: *Zur Aufrechterhaltung eines stationären Lichtbogens zwischen den gegebenen Elektroden muss ein minimaler Effekt von der Grösse b zur Verfügung stehen.*

Durch diese beiden Bedingungen, die immer zugleich erfüllt sein müssen, ist das Bereich der Existenzmöglichkeit des Lichtbogens gekennzeichnet, eine einfache Ueberlegung lässt hieraus seine charakteristische Erscheinungsform herleiten. Angenommen ein stationär brennender Lichtbogen mit den Konstanten a und b erleide durch Veränderungen im Stromkreis eine stetige Verminderung der Stromstärke i. Sein Effekt $e_i \cdot i$ wird für $i = 0$ den Wert Null erreichen; es muss daher bei einem *endlichen* Wert von i der Fall eintreten, dass $e_i \cdot i < a \cdot i + b$, d. h. diese Stromstärke wird ausserhalb des Existenzbereichs des Lichtbogens liegen. Wir ziehen hieraus den Schluss, dass der stetig abnehmende Strom bei einem endlichen Grenzwert angelangt, durch Sprung auf Null zurückgehen muss. Siehe die oscillographische Aufnahme in Fig. 1. Dieses „Abreissen" des Lichtbogens ist allgemein bekannt und erklärt die eigenartige *Form des Wechselstromlichtbogens.* Der Wechselstromeffekt ist seiner Natur gemäss eine positive periodisch veränderliche Grösse mit Nullwerten im Zeitpunkt des Stromdurchgangs durch Null. Der in den Kreis geschaltete stationär brennende Lichtbogen untersteht auch hier der Bedingung: $e_i \cdot i = a \cdot i + b$; diese ist nun aber im Verlauf des veränderlichen Effekts jeweilen so lange nicht erfüllt, als der Momentanwert der Spannung kleiner als a bezw. der Momentanwert des Wechselstromeffekts kleiner ist als b. Ueber dieses Bereich wird der Strom auf dem Werte Null bleiben, erst wenn mit ansteigender Spannung die Bedingungen zur Erfüllung obiger Gleichung geschaffen sind, kann der Lichtbogen ansetzen. Hiebei ist Voraussetzung, dass während der verflossenen Ruhepause die Krater-Temperatur nicht wesentlich zurückgegangen bezw. die Gasstrecke noch hinreichend jonisiert ist, um mit der zur Verfügung stehenden Spannung den Stromdurchgang einzuleiten; wir werden auf diese Verhältnisse noch zurückkommen. *Der stationär brennende Wechselstromlichtbogen ist also dadurch charakterisiert, dass sein Strom beim Durchgang von einer Halbperiode zur nachfolgenden über die Zeitdauer der Existenzunmöglichkeit des Lichtbogens auf dem Nullwert verharrt.* Siehe das Oscillogramm Fig. 2.

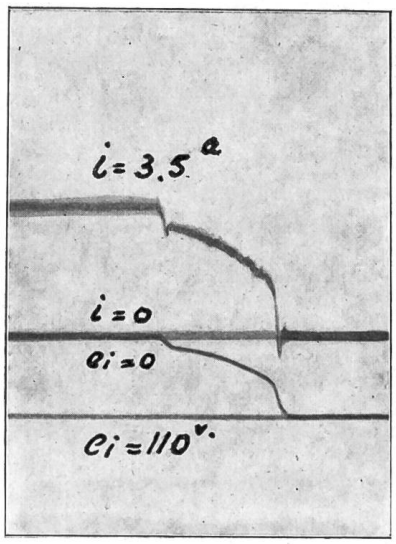


Fig. 1. Unterbrechen eines Gleichstromkreises mit einem kleinen Hebelausschalter.

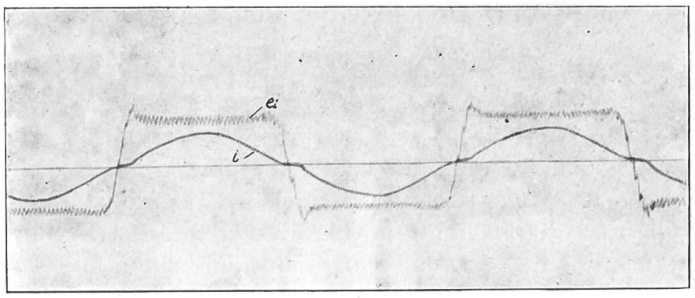


Fig. 2. Stationär brennender Wechselstrom-Lichtbogen zwischen Kohlenelektroden
$i = 11{,}5$ A eff., $e_i = 110$ Volt eff.

Der uns interessierende Abschaltvorgang im Oelschalter verlangt nun aber die Kenntnis des *Wechselstromlichtbogens veränderlicher Elektrodendistanz.* Die Grössen a und b unserer Zustandsgleichung 1) bezeichneten wir allgemein als Konstante des Lichtbogens. Mrs. Ayrton hat indessen auch ihre Veränderlichkeit mit der Lichtbogenlänge experimentell ermittelt und hiefür das Gesetz gefunden:

$$e_i = g + \alpha \cdot s + \frac{\gamma + \delta s}{i} \qquad (2)$$

wo s die Lichtbogenlänge bedeutet. Die Konstanten a und b der allgemeinen Gleichung schreiben sich daher:

$$a = g + \alpha \cdot s \qquad b = \gamma + \delta \cdot s$$

Im Sinne unserer früheren Darlegungen ausgedrückt, heisst dies: Die erforderliche Minimalspannung setzt sich aus der Anfangsspannung g und einem mit der Lichtbogenlänge linear (nach Ayrton) ansteigenden Betrag zusammen. Der dem Wärmeeffekt aequivalente minimale Lichtbogeneffekt wächst, ausgehend vom Anfangsbetrag γ, linear (nach Ayrton) mit der Lichtbogenlänge. Die Berücksichtigung dieser Beziehungen ist nun für unser Abschaltproblem bedeutungsvoll; es folgen hieraus *die Anfangsbedingungen zur Lichtbogenzündung.* Für $s = o$ gehen die Ausdrücke für die allgemeinen Konstanten über in $a = g$; $b = \gamma$, was folgendes besagt: *Zur Lichtbogenzündung ($s = o$) bedarf es einer minimalen Anfangsspannung g und eines minimalen verfügbaren Effektes γ. Sind diese Bedingungen nicht vorhanden, so kann sich kein Lichtbogen bilden, oder in anderen Worten, der Abschaltvorgang vollzieht sich nicht in Lichtbogenform, sondern als Abreissfunke.*

Diese Bedingung hat ganz allgemeine Gültigkeit sowohl für Gleichstrom- wie Wechselstromunterbrechung. Die Konstanten g und γ sind vom Elektrodenmaterial abhängig und wahrscheinlich auch von dessen Formgebung und Temperatur; auch scheint die Natur des Mediums, in dem der Lichtbogen brennen soll, von Einfluss zu sein. Die direkte Bestimmung dieser Konstanten ist schwierig durchzuführen, weil wir uns eben an der Grenze des Existenzbereichs des Lichtbogens befinden. In der Literatur finden sich etwa folgende Daten hierüber:

Elektroden-Material	g in Volt eff.		γ in Watt eff.
	Gleichstrom	Wechselstrom	Gleichstrom
Kohlen	ca. 39	21	12
Kupfer	ca. 24	—	—

Unsere Messungen lassen für Wechselstromabschaltung die Grössen g und γ in folgenden Grenzen bewegen.

Anfangsspannung g: 500—800 Volt*) (Effektivwert) direkte Messung. in Luft**) Kupferelektroden, abgerundet.

Minimaleffekt γ: 6000—10 000 Watt (Effektivwert) indirekt ermittelt in Oeldämpfen, Kupferelektroden in Form eines Abreisskontaktes mit Gegenkontakt. durch Extrapolation.

Im übrigen ist der genaue Wert dieser Konstanten für die uns hier interessierenden Untersuchungen nicht von grosser Bedeutung, da er in seiner Dimension klein ist im Verhältnis zu den Spannungen und Leistungen, die für den Oelschalter betriebsmässig in Frage kommen. Die zur genauen Ermittlung der Konstanten g und γ erforderliche Spezialuntersuchung glaubten wir aus diesem Grunde vorläufig auf spätere Zeit verschieben zu dürfen.

*) Es lassen sich allerdings zwischen Kupferelektroden Lichtbogen äusserst kleiner Bogenlänge schon mit Wechselspannungen von 80 Volt unterhalten, wobei der aufzuwendende Effekt weit unter dem angegebenen Betrag γ liegt. Unsere Grenzbedingungen beziehen sich eben auf die Lichtbogenerscheinung in Luft bezw. Oeldämpfen, eine Bedingung, die bei sehr kleiner Elektrodendistanz kaum mehr zutreffen dürfte, indem hier der Lichtbogen in reinem Metalldampf also in einem Gas grosser Leitfähigkeit brennt.

**) Zur Lichtbogenbildung unter Oel ist der Wert wahrscheinlich bedeutend niedriger, weil sich infolge Abwesenheit des Sauerstoffes keine Oxydschicht an den Elektroden bilden kann. Es ist uns nicht gelungen, die Grösse direkt zu ermitteln.

B. Der Wechselstromlichtbogen im Abschaltvorgang.

Es ist schon im vorangegangenen Abschnitt aus der Grundgleichung des Lichtbogens auf mehr spekulativem Weg dessen charakteristische Erscheinungsform hergeleitet worden; wir müssen aber nun im Hinblick auf das anzustrebende Ziel genau untersuchen, wie diese einerseits durch die Beziehungen des Stromkreises, anderseits durch die Betriebsverhältnisse im Schalter bedingt ist. Letztere finden in der Fixierung der erwähnten Lichtbogenkonstanten ihren mathematischen Ausdruck, wobei wir über deren Veränderlichkeit vorerst noch keinen Aufschluss haben. Wir denken uns die nachfolgenden Untersuchungen an einem gegebenen Oelschalter mit den Konstanten g, γ, α, δ durchgeführt und machen weiterhin die Voraussetzung, dass sich diese über die Zeitdauer des Abschaltvorgangs nicht verändern. Die Annahme trifft, wie die späteren Versuche zeigen, praktisch nicht in vollem Umfange zu, sie ist aber zur qualitativen Beschreibung der Erscheinungen sehr wohl zulässig und bis heute die einzige Möglichkeit, den sehr komplexen Vorgang mathematisch zu umschreiben.*)

Wir wollen annehmen, der einpolig gedachte Oelschalter eines Wechselstromkreises beginne zur Zeit $t = o$ seine normale Abschaltleistung abzuschalten, die gegeben sei durch den Vollaststrom i_0 (Momentanwert) und die Klemmenspannung v_0. Es wird dann eine sehr kleine Zeit Δt dauern, bis die Kontakte vollständig ausser Berührung sind, infolge des Anwachsens des Berührungswiderstandes wird hierbei der Strom um den Betrag Δi_0 gesunken sein und die innere Schalterspannung den Wert Δe_i erreicht haben.

Der Betrag von Δe_i hängt offenbar von den Momentanwerten von i_0 und v_0 zur Zeit $t = o$ ab, ferner von Grösse und Form der Abreisskontakte. Erreicht Δe_i den Wert g Volt, der zur Zündung eines Lichtbogens zwischen Kupferelektroden erforderlich ist, so wird der weitere Verlauf des Abschaltvorgangs unter Lichtbogenbildung vor sich gehen. Wir wollen voraussetzen, dass tatsächlich $\Delta e_i > g$, dann wird offenbar nach der Zeit Δt eine neue Phase des Vorgangs in Erscheinung treten: Der zwischen den vorerst noch unendlich nahen Kontaktflächen herrschende Lichtbogen wird im Verein mit der oben erwähnten Stromübergangswärme die benachbarte Oelmenge verdampfen, so dass sich ohne allen Zweifel der Lichtbogen in einem Gasgemisch entwickeln wird. Mit wachsender Bogenlänge muss auch die elektrische Arbeit des Lichtbogens wachsen, deren Wärmeäquivalent zum grösseren Teil den Elektroden, zum kleineren Teil der den Lichtbogen umgebenden Gasmasse zugeführt wird. Hieraus resultiert eine stetige Vergrösserung des Gasvolumens als Folge der Temperatursteigerung und des Verdampfens neuer Oelmengen. Die Existenzbedingungen der zusammenhängenden Gasmasse sind gegeben durch das Gleichgewicht zwischen dem inneren Gasdruck p_i und dem äusseren Flächendruck p_a der umgebenden Oelmasse. Wird p_i dauernd grösser als p_a, so verläuft der Abschaltvorgang abnormal, der Schalter „raucht", „spritzt" oder „explodiert"; wenn nicht ein rascher Druckausgleich möglich ist. Die diesbezüglichen umfangreichen Untersuchungen sind dem zweiten Teil unserer Arbeit vorbehalten. Wir machen hier die Voraussetzung, dass die Gasmasse bis zum Abschluss des Schaltvorgangs im Gleichgewicht bleibe, was auch für normale Abschaltungen durch die Versuche bestätigt wird. Das Wachsen des Elektrodenabstandes muss nun eine Vergrösserung des scheinbaren Lichtbogenwiderstandes zur Folge haben, so dass bei einer bestimmten Schalterstellung die Bedingungen für das Bestehen des Lichtbogens dauernd nicht mehr erfüllt sind, der Abschaltvorgang ist beendigt.

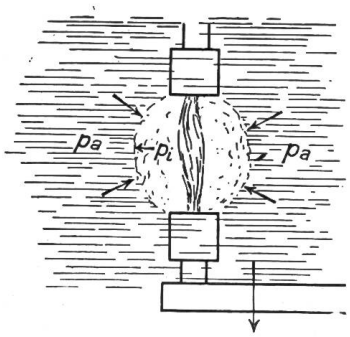


Fig. 3.

*) Die nachfolgenden theoretischen Betrachtungen über den Abschaltvorgang sind auszugsweise im Januarheft des *Bulletin* des S. E. V. 1914 und im Heft 8 1914 *Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen* vom Referenten bekannt gegeben worden.

Die entwickelte Hypothese, wonach der Abschaltvorgang unter der Voraussetzung $\Delta e_i > g$ als Lichtbogenerscheinung im Gasgemisch gedeutet wird, erlaubt nun auf Grund der bisherigen Betrachtungen die näherungsweise mathematische Behandlung des Problems.

Wir gehen vorerst aus vom einfachen Wechselstromkreis, der gegeben ist durch die Klemmenspannung V eines unendlich grossen Kraftwerks und durch den äussern Widerstand r_a als induktionslose Belastung. Dieser Fall tritt z. B. ein, wenn ein kleiner Bruchteil der Leistung einer sehr grossen Zentrale abgeschaltet wird. Zurzeit $t = o$ möge der Schalter geöffnet werden, bezeichnet dann e_i die innere Schalterspannung, so gilt offenbar jederzeit:

$$V_m \sin \omega t = i_{(t)} r_a + e_{i(t)} \tag{3}$$

Die Beziehung zwischen Elektrodenspannung, Strom und Bogenlänge eines Lichtbogens kann nach früherem. in die Form gebracht werden:

$$e_i = g + \alpha \cdot s + \frac{\gamma + \delta \cdot s}{i}$$

Nach der getroffenen Voraussetzung bezüglich der Konstanten steht prinzipiell nichts im Wege, das Gesetz auf den Wechselstromkreis anzuwenden, nur muss in Berücksichtigung der bereits erwähnten Unstetigkeit in der Stromkurve jede Halbwelle der aufgedrückten Klemmenspannung gesondert der Gleichung unterzogen werden. Wir machen die Annahme, dass s, die Elektrodendistanz, linear mit der Zeit wachse und setzen daher $s = v \cdot t$ wo v = Schaltgeschwindigkeit, dann lautet die Zustandsgleichung des elektrischen Systems im Abschaltvorgang:

$$V_m \sin \omega (t \pm \Delta t) = i \cdot r_a + g + \alpha \cdot v \cdot t + \frac{\gamma + \delta \cdot v \cdot t}{i},$$

wobei wir mit $\pm \Delta t$ die momentane Lage der Stromkurve zu Beginn der Abschaltung ($t = o$) fixieren.

Nach i aufgelöst ergibt sich die Gleichung der Stromkurve:

$$i = \frac{V_m \sin \omega (t \pm \Delta t) - (g + \alpha \cdot v \cdot t)}{2 r_a} \pm$$

$$\pm \sqrt{\frac{\{V_m \sin \omega (t \pm \Delta t) - (g + \alpha \cdot v \cdot t)\}^2 - 4 r_a (\gamma + \delta \cdot v \cdot t)}{4 r_a^2}} \tag{4}$$

Die Diskussion dieser Gleichung lässt sich am besten an Hand des zugehörigen Kurvenbildes durchführen. Fig. 4 ist der graphische Ausdruck der gewonnenen Beziehungen. Wie ersichtlich, ergibt sich der Verlauf des Abschaltstromes durch Superposition zweier Stromwellen, der Grundwelle:

$$\frac{V_m \cdot \sin \omega (t \pm \Delta t) (g + \alpha \cdot v \cdot t)}{2 r_a}$$

und der Zusatzwelle:

$$\sqrt{\frac{\{V_m \cdot \sin \omega (t \pm \Delta t) - (g + \alpha \cdot v \cdot t)\}^2 - 4 r_a (\gamma + \delta \cdot v \cdot t)}{4 r_a^2}}$$

positiv und negativ aufgetragen.

Beachtet man, dass der Schalterstrom vor $t = o$ gleich dem Vollaststrom

$$i_o = \frac{V_m \sin \omega (t \pm \Delta t)}{r_a}$$

ist, so wird die Deutung der Grundwelle einfach, es folgt aus der Gleichung ohne weiteres, dass ihr Wert gleich dem halben Vollaststrom ist, vermindert um das stetig wachsende Glied $\frac{g + \alpha \cdot v \cdot t}{2 r_a}$

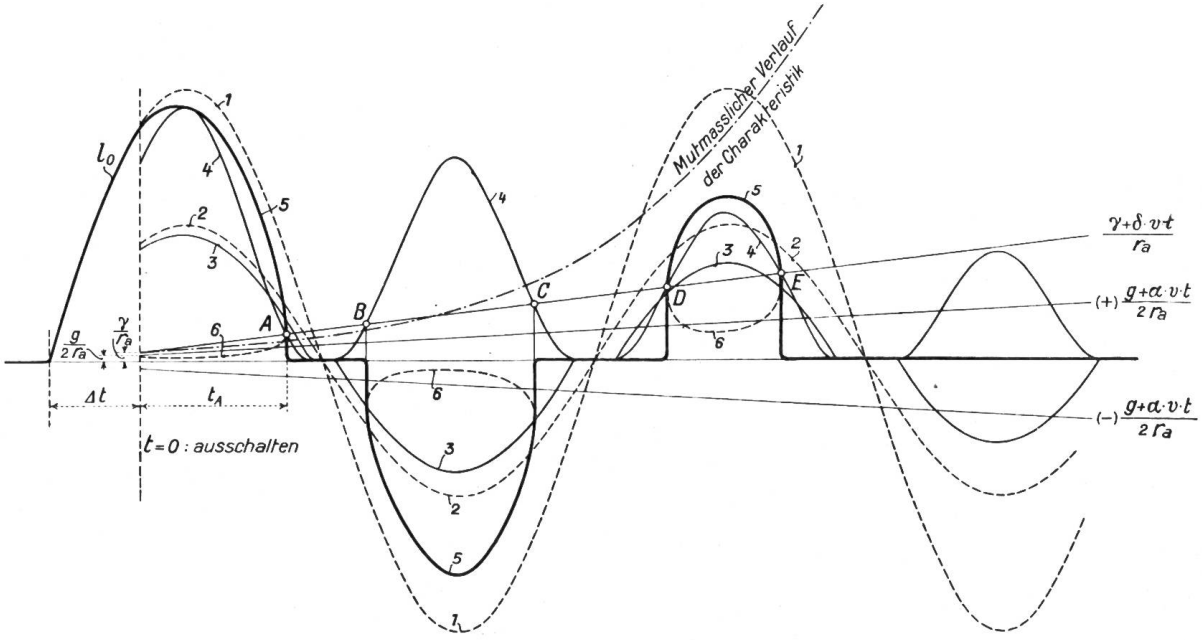


Fig. 4. Legende:

Kurve 1: Verlauf von $\frac{V \sin \omega (t - \Delta t)}{r_a}$

„ 2: „ „ $\frac{V \sin \omega (t - \Delta t)}{2 r_a}$

„ 3: „ „ $\frac{V \sin \omega (t - \Delta t) - (g + \alpha \cdot v \cdot t)}{2 r_a}$

Kurve 4: Verlauf von $\left\{\frac{V \sin \omega (t - \Delta t) - (g + \alpha \cdot v \cdot t)}{2 r_a}\right\}^2$

„ 5: „ „ i reeller Teil.

„ 6: „ „ i imaginärer Teil.

Die Kurve ist in Fig. 4 durch Kombination der $\frac{i_0}{2} \div$ Kurve mit der $\frac{g + \alpha \cdot v \cdot t}{2 r_a} \div$ Geraden konstruiert worden und mit 3 bezeichnet. Sie verläuft nicht kontinuierlich, sondern weist nach jedem Nullwert eine Unstetigkeit auf. Das Zusatzglied ergibt sich durch Quadratur der Grundwelle und nachfolgender Kombination mit der Geraden $\frac{(\gamma + \delta \cdot v \cdot t)}{r_a}$. Die quadratischen Werte der Grundwelle sind in Fig. 4 in anderem Massstabe als Kurve 4 aufgetragen, ihre Schnittpunkte mit der vorerwähnten Geraden geben offenbar die Zeiten an, wo der Wurzelausdruck Null wird. Der Wurzelwert zwischen je zwei solchen Nullpunkten lässt durch dessen Kombination mit der Grundwelle, die Kurven 5 und 6 aufzeichnen, welche nunmehr den Verlauf des Abschaltstromes veranschaulichen. Es ist ersichtlich, dass das negative Wurzelzeichen (Kurve 6) unreelle Werte liefert; der Verlauf des Abschaltstromes erfolgt nach 5 in seinem stetigen Teil, im Uebergang zum unreellen Teil reisst der Strom ab bezw. setzt er ein, die Punkte A, B, C . . . bestimmen daher die Zeiten der Existenzmöglichkeit des Lichtbogens. Der Abschaltstrom verläuft nach Kurve 5 bis zum Zeitpunkt, wo das Zusatzglied zum ersten Male Null wird, die Zeit bestimmt sich aus der Bedingungsgleichung

$$\{V_m \sin \omega (t \pm \Delta t) - (g + \alpha \cdot v \cdot t)\}^2 - 4 r_a (\gamma + \delta \cdot v \cdot t) = 0 \qquad (5)$$

(graphisch ermittelt: Schnittpunkt A). Hier muss der Lichtbogen abreissen, denn der weitere Verlauf der Gleichung liefert unreelle Werte (Kurve 6). Die dem Sinusgesetz folgende Kurve der aufgedrückten Klemmenspannung ist unserer Voraussetzung nach mit i_0 in Phase und kann daher durch die strichpunktierte Kurve 1 dargestellt sein; wie man sieht, geht der Abschaltstrom vor der Spannung durch Null, was übrigens ohne weiteres begreiflich ist. Schaltgeschwindigkeit v und äusserer Widerstand r_a sind in unserem Beispiel so gewählt, dass in der zweiten und dritten Hälfte der Spannungswelle nochmals Lichtbogenmöglichkeit auftritt. Der Zeitraum der Existenzmöglichkeit ist durch die Schnittpunkte B, C, D und E begrenzt, als weitere Lösungen der Bedingungsgleichung.

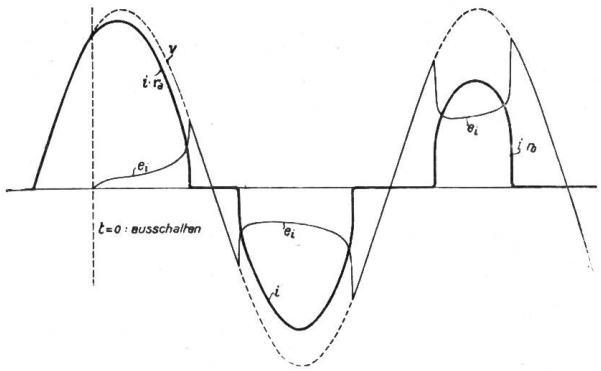


Fig. 5. Theoretischer Verlauf von Strom und Spannung im Wechselstrom-Abschaltlichtbogen.

Die innere Schalterspannung e_i kann graphisch ermittelt werden gemäss der Gleichung:

$$e_i = V - i \cdot r_a$$

Fig. 5 lässt deren charakteristischen Verlauf erkennen; die Kurve ist auch unstetig, indem zurzeit der Existenzunmöglichkeit des Lichtbogens ($i = 0$) die innere Schalterspannung auf der Kurve der aufgedrückten Klemmenspannung verläuft. Mit jeder neuen Halbperiode wächst der Effektivwert von e_i entsprechend dem zunehmendem Bogenwiderstand, bis nach dem letzten endgültigen Abreissen des Lichtbogens e_i dauernd auf der aufgedrückten Spannung V verläuft. Inwieweit das so gewonnene theoretische Bild die wirklichen Verhältnisse wiederzugeben vermag, lehrt die Gegenüberstellung der theoretischen Kurven in Fig. 4 und 5 mit dem Oszillogramm in Fig. 2, Seite 144. Dieses zeigt Strom und Spannung eines Wechselstromlichtbogens zwischen Kohlenelektroden mit Metallsalz-Kern. Die Elektrodendistanz ist konstant gehalten worden ($v = 0$). Das sprunghafte Abreissen und Aussetzen des Bogens tritt der zu klein gewählten Strom-Amplitude wegen nicht ausgeprägt zu Tage, um so deutlicher zeigt sich der typische Verlauf der Spannung e_i.

Es folgt aus den bisherigen Erörterungen, dass der Abschaltvorgang für eine gegebene Abschaltleistung durch die beiden Geraden

$$\frac{(\pm)\, g + \alpha \cdot v \cdot t}{2 r_a} \quad \text{und} \quad \frac{\gamma + \delta \cdot v \cdot t}{r_a}$$

bedingt ist. Wir können sie als *die Charakteristiken des Abschaltbogens* bezeichnen. Sie bestimmen für die gegebene Abschaltleistung das Existenzbereich des Lichtbogens. Der Strom i wird gemäss Fig. 4 offenbar dann *dauernd null*: wenn die Charakteristiken über die Amplitudinal-Ordinaten der zugehörigen Kurven 3 bezw. 4 ansteigen. Die zuletzt geschnittene Halbperiode wird mit ihrem letzten Schnittpunkt die maximale Zeitdauer des Lichtbogens angeben. Diese ist nun aber für sonst gleiche Bedingungen je nach der momentanen Lage der Stromkurve im Ausschaltmoment um den Betrag $\pm \Delta t$ veränderlich. Um hierüber keine Voraussetzung machen zu müssen, suchen wir die für die gegebenen Verhältnisse grösstmögliche Ausschaltzeit. Fig. 4 lässt erkennen, dass diese erreicht ist, wenn $\pm \Delta t$ so gewählt wird, dass der letzte Schnittpunkt der Charakteristiken mit den Kurven 3 bezw. 4 mit deren Amplitudinalwert zusammenfällt. Dies lässt uns die Bedingungen ausschreiben:

$$\mathbf{V_m - (g + \alpha \cdot v \cdot t) = 0} \tag{6}$$

$$\mathbf{\{V_m - (g + \alpha \cdot v \cdot t)\}^2 - 4\, r_a (\gamma + \delta \cdot v \cdot t) = 0} \tag{7}$$

wobei mit V_m der Amplitudinalwert der Spannung bezeichnet sei. Daraus wäre zu schliessen, dass die Kurvenform der Spannungswelle von Einfluss auf die Lichtbogendauer ist, indem sich der Amplitudinalwert bei gleichem Effektivwert mit jener verändert. Wir haben durch unsere Versuche auch tatsächlich konstatiert, dass die Lichtbogendauer umsogrösser wird, je mehr die Spannungskurve von der Sinusform abweicht, wir verweisen hierüber auf Tafel V. Bedingungsgleichung (6) bringt die schon bekannte Forderung der Minimalspannung ($g + \alpha \cdot v \cdot t$) zum Ausdruck, während (7) aussagt, dass die Grenze der Lichtbogenexistenz erreicht ist, wenn der im Stromkreis noch mögliche Maximaleffekt:

$$\frac{\{V_m - (g + \alpha \cdot v \cdot t)\}^2}{4\, r_a} \leqq (\gamma + \delta \cdot v \cdot t)$$

d. h. gleich oder kleiner als der für die zurzeitige Elektrodenstellung erforderliche Wärmeeffekt wird. Die Vergleichung der Bedingungen (6) und (7) lässt erkennen, dass (7) einen

endlichen positiven Wert von $\{V_m - (g + a \cdot v \cdot t)\}$ erfordert, dass also (7) im Verlauf der wachsenden Lichtbogenlänge zeitlich *vor* (6) erfüllt sein wird. Mit anderen Worten: *Die maximale Lichtbogenlänge $s = v \cdot t$ wird nur durch Gleichung (7) bedingt, d. h. sie ist dann erreicht, wenn der zur Lichtbogenexistenz erforderliche im Verlauf des Abschaltvorgangs stets wachsende Wärmeeffekt an den Elektroden gleich oder grösser wird als der zu dessen Erzeugung zur Verfügung stehende elektrische Effekt im Stromkreis.* Die Zeitdauer des Abschaltvorgangs bei der Geschwindigkeit v ergibt sich durch Auflösung der Gleichung (7) nach t.

Die gewonnene Erkenntnis ist insofern von Bedeutung, als der Verlauf des Wärmeeffekts, der durch die Charakteristik $\frac{\gamma + \delta \cdot v \cdot t}{r_a}$ gekennzeichnet ist, für die gegebene Netzbelastung (r_a) nur von den Konstanten des Lichtbogens bezw. der Schalterkonstruktion abhängt. Diese ist also umgekehrt durch den Verlauf des Wärmeeffekts über den Abschaltvorgang charakterisiert, sodass sich damit ein Gesichtspunkt zur Abwägung verschiedener Schalterausführungen ergeben hat. Wir werden bei den Untersuchungen über den Einfluss der Kontaktform hierauf zurückkommen.

Der Verlauf der Charakteristiken ist in Wirklichkeit nicht geradlinig, indem einerseits die Konstanten über den Abschaltvorgang veränderlich sein werden und anderseits auch die Schaltgeschwindigkeit v eine Funktion der Zeit ist. Es ist für die Folge von Interesse, den Einfluss dieser das theoretische Bild komplizierenden Funktionen kennen zu lernen. Indessen wollen wir in unseren weiteren Untersuchungen von der möglichen Veränderlichkeit der Geschwindigkeit während des Abschaltvorgangs absehen und mit einem mittleren Wert $\bar{v}$ rechnen; dies ist zulässig, indem die Versuche zeigen, dass im allgemeinen die Anfangs- und Endgeschwindigkeit über den Zeitraum des Lichtbogens nur wenig varieren. Es bleibt jetzt noch die Veränderlichkeit der Lichtbogenkonstanten bezw. deren Einfluss auf den Verlauf des Wärmeeffekts, der ja nach obigem für die maximale Bogenlänge massgebend ist.

Die Lichtbogen-Hysteresis. In der Grundgleichung:

$$e_i \cdot i = a \cdot i + b$$

haben wir b als denjenigen Betrag des elektrischen Effekts angesprochen, der zur Temperaturhaltung des neg. Kraters erforderlich ist, die hiezu pro Zeiteneinheit nötige Wärmemenge ist als Wärmeeffekt bezeichnet worden. Wenn wir obige Form der Grundgleichung auf den Wechselstromkreis anwandten, ist damit die stillschweigende Voraussetzung gemacht worden, dass in jedem Moment elektrischer und äquivalenter Wärmeeffekt in Phase sind, eine Voraussetzung, die nun aber nicht ganz der Wirklichkeit entspricht. Vielmehr ist ohne weiteres ersichtlich, dass beim stationär brennenden Wechselstromlichtbogen der im Krater auftretende Wärmeeffekt je nach der Wärmekapazität der Elektroden mehr oder weniger hinter dem erzeugenden elektrischen Effekt zurückbleibt. H. Th. Simon hat als Erster der Erscheinung, die er als Lichtbogenhysteresis bezeichnet, eine wissenschaftliche Deutung gegeben. Die analytische Berücksichtigung dieser Phasenverschiebung (z. B. durch Einführung einer neuen Konstanten) würde zu grossen Schwierigkeiten führen, wir überblicken ihren Einfluss weit besser auf graphischem Weg. Die Zeitgrenzen zur Lichtbogenexistenz sind in unserem theoretischen Bild Fig. 4 durch die Bedingungsgleichung (5) gegeben, die wir in der Form schreiben:

$$\frac{\{V_m \cdot \sin \omega (t \pm \Delta t) - (g + a \cdot v \cdot t)\}^2}{4\, r_a} = \gamma + \delta \cdot v \cdot t$$

Nachdem wir nun den Ausdruck $(\gamma + \delta \cdot v \cdot t)$ als Wärmeeffekt lesen müssen, wird auch die linke Seite der Gleichung im selben Sinne zu deuten sein. Die Auflösung der Gleichung nach t liefert alsdann die gleichen Grenzen für das Existenzbereich des Lichtbogens (Punkte A, B, C. . .) Der äquivalente elektrische Effekt wird grundsätzlich die gleiche analytische Form aufweisen, jedoch dem obigen Ausdruck um eine gewisse Phasenverschiebung x voreilen, sodass in Fig. 4 die ursprüngliche Stromwelle in der Form: $\frac{V_m \sin (\omega (t \pm \Delta t) + x)}{r_a}$

einzuzeichnen wäre. Nachdem also die Punkte A, B, C etc. in ihrer gegenseitigen Lage unverändert bleiben, wird auch das Existenzbereich des Lichtbogens zeitlich seine Grösse beibehalten, infolge der eingetretenen Phasenverschiebung mit der Stromwelle jedoch später einsetzen bezw. abbrechen. *Die Berücksichtigung der Lichtbogenhysterese ist demnach bezüglich der maximalen Lichtbogenlänge ohne wesentlichen Einfluss.* Ihre Erscheinung tritt in der Form der Strom- bezw. Spannungskurve des Bogens zu Tage, indem der Grenzwert des Stromes beim Abreissen des Lichtbogens wesentlich näher dem Nullpunkt liegt, also kleiner ist, als der darauffolgende Stromwert zum Lichtbogenansatz. Dieser Unterschied tritt naturgemäss hauptsächlich dort zu Tage, wo im Verlauf des Abschaltvorgangs die Zeiten der Existenzmöglichkeit des Bogens relativ gross ausfallen, also wie wir später sehen, im behandelnden Fall des induktionslosen Stromkreises. Unsere Versuche zeigten, dass hiebei der Stromstoss beim Lichtbogenansatz bis zu 75 + 80 % des Amplitudinalwertes

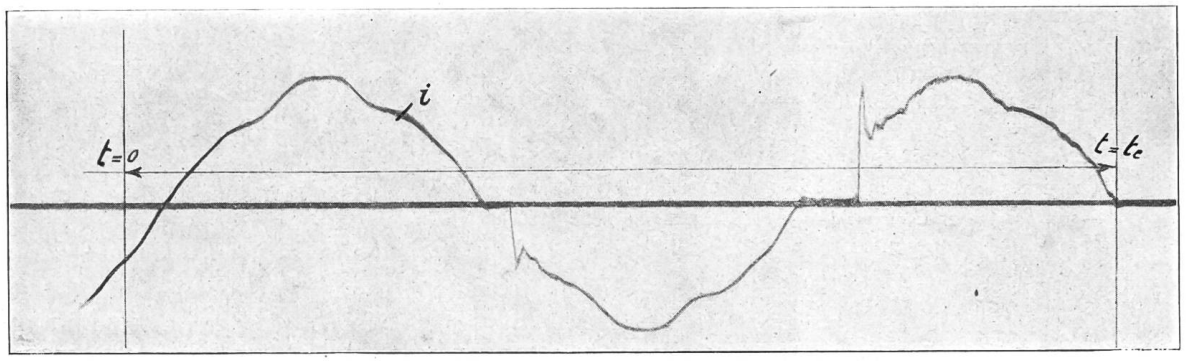


Fig. 6. Abschalten im nahezu induktionslosen Stromkreis $\left(\frac{2\pi f \cdot L}{r} \sim 0\right)$

V = 8100 V	P = 717 W	t_e = 0,0318″
J_0 = 88,5 A	R_a = 91,6 Ω	s = 1.74 cm.

steigt, währenddem der Grenzwert beim Abreissen nahezu den Wert Null erreicht. Das beigegebene Oszillogramm in Fig. 6 mag einen solchen Fall illustrieren. Beachtenswert ist der ausserordentlich steile Anstieg der Stromstärke beim Lichtbogenansatz, der in der Zeit von der Grössenordnung 0.0001″ vor sich geht. Vom Standpunkt der Ueberspannungsgefahr aus betrachtet, dürfte diese Erscheinung jedenfalls ebenso nachteilig sein, wie das gefürchtete Abreissen des Gleichstromlichtbogens.

Dem Bericht über die Untersuchung mit verschiedenen Elektrodenformen vorgreifend, sei erwähnt, dass wir für die verwendeten Elektrodenmaterialien (Kupfer, Bronze und Eisen) keine gesetzmässige Veränderlichkeit der Lichtbogenhysteresis nachweisen konnten; nachdem diese auf die uns später interessierende maximale Lichtbogenlänge ohne wesentlichen Einfluss bleibt, ist dieses Phänomen von uns nicht weiter untersucht worden.

Der Wärmeverlust zur Nullzeit des Stromes. Eine weitere Abweichung von unseren rein theoretischen Voraussetzungen liegt in dem Wärmeverlust der Elektroden zur Zeit der Existenzunmöglichkeit des Lichtbogens. Wir schrieben den erforderlichen Wärmeeffekt mit wachsender Bogenlänge in der Form:

$$b_{(s)} = \gamma + \delta \cdot s$$

wobei wir unter δ den pro Längeneinheit nötigen Mehrbetrag verstehen. Hierbei war Voraussetzung, dass der Jonisierungszustand des Gases über die Zeitdauer des Strom-Nullwertes unverändert bleibe. In Berücksichtigung des Wärmeverlustes während der Ruhepause wird zu Beginn des neuen Lichtbogenansatzes ein entsprechend vermehrter Betrag des Wärmeeffekts erforderlich sein. Wir können dem in erster Annäherung Rechnung tragen, wenn wir schreiben:

$$b_{(s)} = \gamma + \delta \cdot s + \varepsilon \cdot s^2$$

ohne diese Form in den analytischen Ausdruck für i einsetzen zu wollen, kann schon aus unserem graphischen Bild (Fig. 4) deren Einfluss ersehen werden. Das mit s quadratische

Glied lässt die Charakteristik parabolisch nach oben verlaufen, was gemäss der angegebenen Konstruktion der i-Kurve eine Verkleinerung des totalen Existenzbereichs nach sich zieht. Wir konstatieren die selbstverständliche Tatsache, *dass der Wärmeverlust zur Nullzeit des Stromes eine Reduktion der maximalen Lichtbogenlänge zur Folge hat.* Welche Rolle hiebei Grösse und Form der Elektroden spielen, wird in einem späteren Kapitel erläutert.

Wenn wir in der Folge noch weiterhin mit der angegebenen analytischen Formulierung des Abschaltlichtbogens arbeiten, ohne der angedeuteten Veränderlichkeit der Lichtbogenkonstanten Rechnung zu tragen, so geschieht dies aus der Erwägung heraus, dass auf den uns hauptsächlich interessierenden Wert der max. Lichtbogenlänge nur der oben erwähnte Wärmeverlust zur Nullzeit des Stromes von Einfluss ist. Er ist offenbar umso geringer, je kleiner die Nullzeit ausfällt. Diese wird nun aber, wie der folgende Abschnitt zeigt, durch die Anwesenheit von Induktivität im Stromkreis bedeutend reduziert, sodass für diesen Betriebsfall (der weitaus häufigere und auch gefährlichere) die Abweichung der Charakteristik von der Geraden eine relativ geringe sein muss. Wenn wir später aus den gewonnenen Versuchsresultaten die Konstanten unserer Gleichung rückwärts rechnen, sind deren Grössen als mittlere Werte zu verstehen, die uns vorerst mehr als Orientierung dienen mögen.

C. Der Einfluss der Induktivität im Stromkreis.

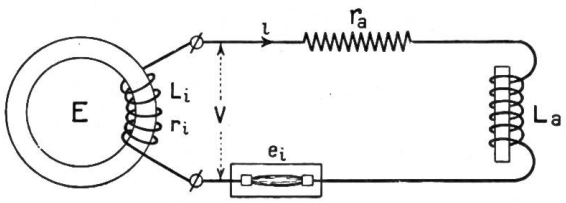


Fig. 7.

Der bis anhin behandelte Fall des absolut induktionslosen Stromkreises ist praktisch nur angenähert wiederzugeben, indem auch bei rein ohmscher Belastung die Induktivität der Maschinenwicklungen in Frage kommt. Es wird sich in der Folge zeigen, dass nämlich Charakter und Grösse der abgeschalteten Leistung den Abschaltvorgang nicht eindeutig bestimmen, sondern *die unterbrochene kVA-Leistung.* Wir wollen nun allgemein den Einfluss der Induktivität im Stromkreis untersuchen, der durch das Schema in Fig. 7 gekennzeichnet sei. Wir nehmen vorerst wieder den Fall des einfachen Wechselstromkreises mit einpoliger Unterbrechung. Es bedeute:

E die einer konstant gedachten Erregung entsprechende Leerlaufs-EMK der Maschine,
V die Klemmenspannung beim Strome J_0 vor dem Abschalten,
L_i bezw. L_a die dem Belastungszustand entsprechende Ersatzinduktivität der Maschinenwicklung, bezw. des Stromverbrauchers,
r_i bezw. r_a die ohmschen Widerstände im Stromkreis.

Die Gleichung des Stromkreises schreibt sich dann:

$$E_m \cdot \sin \omega t = i\,(r_i + r_a) + (L_i + L_a)\,\frac{di}{dt} + e_i$$

oder durch Einsetzen der Grundformel (1) für e_i, wobei wir schreiben $s = v \cdot t$:

$$E_m \cdot \sin \omega\,(t \pm \Delta t) = i\,(r_i + r_a) + (L_i + L_a) \cdot \frac{di}{dt} + g + \alpha \cdot v \cdot t + \frac{\gamma + \delta \cdot v \cdot t}{i}$$

Leider ist die Auflösung dieser inhomogenen Differenzialgleichung nicht auf einfachem Wege möglich, sodass das nur näherungsweise zu ermittelnde Resultat kaum den gewünschten Ueberblick über die Erscheinungsform des Lichtbogens bieten würde. Der Verfasser ist daher vorerst auf rein spekulativem Weg vorgegangen, welcher, in steter Fühlung mit den experimentellen Untersuchungen, schliesslich den tatsächlichen Vorgang qualitativ näherungsweise zu umschreiben vermag. Wenn wir die diesbezüglichen Ueberlegungen hier zur Kenntnis bringen, so mag dies dadurch gerechtfertigt sein, dass sie uns nach gewonnener Bestätigung durch die Versuche die Erscheinungen beim Unterbrechen eines Kurzschlusses untersuchen lassen, ein Gebiet, das uns aus verschiedenen Gründen experimentell nicht zugänglich war.

Aus den Bedingungsgleichungen zur Lichtbogenexistenz folgt durch Ueberlegung, dass der Wechselstrombogen auch im induktiven Kreis prinzipiell die gleiche Erscheinungsform der unstetig verlaufenden Strom- und Spannungswelle aufweisen muss. Während jedoch im vorangegangenen Fall die innere Schalterspannung e_i über die Nullzeit des Stromes auf der mit ihm phasengleichen Klemmenspannung V verläuft, springt sie bei Anwesenheit einer Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung nach dem Abreissen des Bogens auf die EMK über, die dem Strom um den Betrag

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2 \pi f (L_i + L_a)}{r_i + r_a}$$

voreilt. In Fig. 8 ist dieser Fall angedeutet, die Stromkurve ist für den Fall des absolut induktionslosen Kreises gedacht, wobei dem Einfluss der Bogenhysteresis Rechnung getragen wurde. Mit V ist die phasengleiche Klemmenspannung bezeichnet. Nach Gleichung (5) ist dann das Bereich der Existenzmöglichkeit des Stromes zur Zeit t_x gekennzeichnet durch:

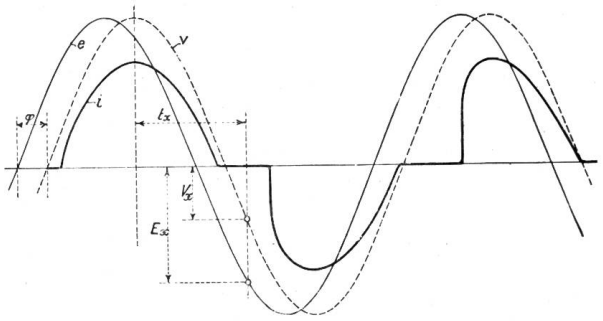


Fig. 8.

$$\{V_x - (g + \alpha \cdot v \cdot t_x)\}^2 < 4 r_a (\gamma + \delta \cdot v \cdot t_x)$$

Verläuft zur betrachteten Zeit im Fall des induktiven Kreises e_i auf der EMK der Maschine, besteht also noch die Nullzeit des Stromes, so gilt ebenso:

$$\{E_x - (g + \alpha \cdot v \cdot t_x)\}^2 < 4 r_a (\gamma + \delta \cdot v \cdot t_x)$$

In Folge der Voreilung der EMK um den Winkel φ wird aber im betrachteten Zeitpunkt E_x grösser als V_x sein müssen, sodass hieraus folgt:

$$\{E_x - (g + \alpha \cdot v \cdot t_x)\}^2 > \{V_x - (g + \alpha \cdot v \cdot t_x)\}^2$$

d. h. ausgehend vom Nullpunkt des Stroms wird *mit wachsender Zeit im Fall des induktiven Kreises die Existenzmöglichkeit des Lichtbogens eher erreicht sein, als im rein ohmschen Kreis, die Nullzeit des Stromes also kürzer ausfallen.* Der Unterschied

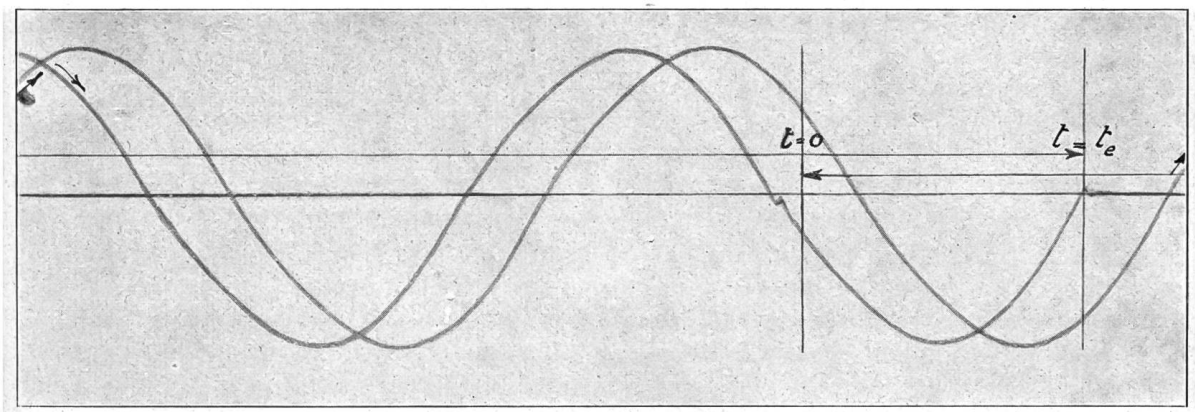


Fig. 9. Abschalten im induktiven Stromkreis.

V = 8050 V	P = 664 kW, L ≃ 0,17 H	t_e = 0,0519″
J_0 = 82,5 A	R_a = 97,6 Ω, φ = 28° 40′	s = 2,85 cm.

gegenüber dem Fall des absolut induktionslosen Kreises ist offenbar umso grösser, je grösser E_x gegenüber V_x. Nebenstehendes Oszillogramm in Fig. 9 zeigt den Abschaltvorgang bei gleicher Last und Spannung wie in Fig. 6, jedoch bei Induktivität im Stromkreis. Sind die Bedingungen derart, dass mit der Klemmenspannung V wie angedeutet in der

nächstfolgenden Halbperiode noch eine Neuzündung des Bogens möglich ist, dass also für die betrachtete erste Nullzeit:

$$\{V_m - (g + \alpha \cdot v \cdot t)\}^2 > 4\, r_a\, (\gamma + \delta \cdot v \cdot t)$$

so folgt hieraus, dass bei der maximalen Voreilung von 90°, wo also E_m mit dem Nullwert des Stromes zusammenfällt, das Bereich der Existenzunmöglichkeit des Bogens unendlich klein wird; die Stromkurve würde in diesem Fall zur stetigen Sinusfunktion. Dieser extreme Fall ist übrigens praktisch nie zu verwirklichen, da der Effekt im Lichtbogen nicht wattlos sein kann, die Phasenverschiebung daher stets kleiner als 90° sein wird. Das stetige Anwachsen des Existenzbereichs des Lichtbogens mit zunehmender Nacheilung des Stromes muss graphisch (Fig. 4) so interpretiert werden, dass wir den Charakteristiken eine mit der Phasenverschiebung in sinngemässem Zusammenhang stehende Verminderung der Neigung gegen die Abscissenaxen erteilen.

Dieser Forderung würde z. B. der Ansatz für die Charakteristiken genügen:

$$\frac{g + \alpha \cdot v \cdot t}{2\, r_a} \cdot (1 - [\sin \varphi]^{k_1}) \text{ bezw. } \frac{\gamma + \delta \cdot v \cdot t}{r_a} \cdot (1 - [\sin \varphi]^{k_2})$$

wobei k_1 und k_2 in erster Annäherung als Konstante betrachtet werden. Die Ausdrücke lassen erkennen, dass mit wachsender Phasenverschiebung φ der Neigungswinkel der Charakteristiken sowie ihr absoluter Wert kleiner werden und für den Grenzfall $\varphi = 90^0$ in Null übergehen, sodass sich für diesen Fall das Existenzbereich des Bogens wie oben schon abgeleitet je über eine vollständige Halbperiode erstreckt.

Die Bedingungen für die maximale Bogenlänge $s = v \cdot t$ bei Induktivität im Kreis können nun mit Hülfe obiger Ansätze ähnlich wie früher (Gleichungen (6) und (7) geschrieben werden:

$$E_m - (g + \alpha \cdot v \cdot t) \cdot (1 - [\sin \varphi]^{k_1}) = o \qquad (8)$$

$$\{E_m - (g + \alpha \cdot v \cdot t) \cdot (1 - [\sin \varphi]^{k_1})\}^2 - 4\, r_a\, (\gamma + \delta \cdot v \cdot t) \cdot (1 - [\sin \varphi]^{k_2}) = o \qquad (9)$$

Es ist wieder die zweite Bedingungsgleichung allein massgebend für die maximale Bogenlänge; wir schreiben sie in der Form:

$$\frac{\{E_m - (g + \alpha \cdot v \cdot t)\,(1 - [\sin \varphi]^{k_1}\}^2}{4\, r_a\, (1 - [\sin \varphi]^{k_2})} \geqq \gamma + \delta \cdot v \cdot t$$

und lesen aus der linken Seite: Das Gleichgewicht zwischen dem zur Lichtbogenbildung erforderlichen stets wachsenden Wärmeeffekt an den Elektroden und dem zu dessen Erzeugung zur Verfügung stehenden elektrischen Effekt wird im Verlauf des Abschaltvorgangs umso später erreicht, je grösser die Phasenverschiebung zwischen der EMK und dem Strom ausfällt. Hieraus folgt, *dass ein gegebener Schalter* (gegebene Konstanten) *eine gegebene Kilovoltampère-Leistung mit einer umso grösseren Lichtbogenlänge unterbricht, je grösser die Phasennacheilung des Stromes hinter der EMK ist.*

Die Zeitdauer des Abschaltvorgangs bei der Geschwindigkeit v würde sich analog wie früher durch Auflösung der Gleichung (9) nach t ergeben, wobei für den Wert $\varphi = o$ der Ausdruck der früheren Bedingungsgleichung (7) (absolut induktionsloser Kreis) genügen muss. Bezeichnen wir mit t_r die Zeitdauer des Abschaltvorgangs einer bestimmten Leistung bei induktionslosem Kreis und mit $t_{r,L}$ die analoge Grösse bei Anwesenheit von Induktivität, so kann offenbar die Gleichung (9) in die Form gebracht werden:

$$f\,(t_{r,L},\, t_r,\, \varphi,\, k_1,\, k_2) = o$$

Die explizite Darstellung würde alsdann erlauben, die Lichtbogenlängen $t_{r,L}$ bei Kenntnis der Konstanten aus der analytisch zu umschreibenden Länge t_r zu ermitteln. Die Grössen k_1 und k_2 mussten durch den Versuch bestimmt werden. Der komplizierte Aufbau von (9) verspricht aber wenig übersichtliche Beziehungen, sodass sich die Berechnung der Konstanten aus den Versuchsreihen nur mühsam durchführen liesse. Wir verlassen daher die Form der Gleichung (9) und wählen den zum gleichen Ziel führenden Ansatz:

$$t_{r,L} = t_r\,(1 + K_1 \cdot \mathrm{tg}\,\varphi + K_2 \cdot \mathrm{tg}\,\varphi^2 + \ldots) \qquad (10)$$

wo nun K_1 K_2... neue, leichter zu bestimmende Konstanten bedeuten. Es wird im spätern ausführlich beschrieben werden, wie die Konstanten unserer Gleichung (10) experimentell zu bestimmen sind. Aus unseren Ueberlegungen heraus kann vorgreifend jetzt schon gesagt werden, dass sie sowohl durch die Konstanten des Oelschalters als durch jene des Stromkreises bedingt sind. Wir schliessen hieraus, *dass der Abschaltvorgang nicht nur von der Grösse der abgeschalteten Leistung und der Schalterkonstruktion abhängt, sondern auch von den elektrischen Konstanten des gesamten unterbrochenen Stromkreises.* (Z. B. Induktivität der Maschinenwicklungen.)

D. Der Einfluss der Kapazität und die Kombinationen von R, L und C im Stromkreis.

Wir bringen die nachfolgende kurze Betrachtung vorerst ohne weitere Begründung durch Versuchsresultate, da wir bis heute keine Gelegenheit fanden, kapazitive Belastungen in unsere Untersuchungen einzubeziehen. Die Ueberlegungen auf Seite 153 über den Einfluss der Phasenverschiebung zwischen dem Strom und der EMK der Maschine (siehe Fig. 8) führen zum Schluss, dass bei *vor*eilendem Strom entgegengesetzt der Wirkung der Induktivität, eine Verlängerung des Bereichs der Existenzunmöglichkeit des Lichtbogens eintreten muss, und auf Grund der weiteren Erörterungen eine dementsprechende Verkleinerung der maximalen Lichtbogenlänge. Die annähernde analytische Formulierung der Verhältnisse hat sinngemäss den gleichen Weg zu folgen, wir gelangen dementspechend zum Ansatz:

$$t_{r,c} = t_r \cdot (1 - K' \,\mathrm{tg}\,\varphi - K'' \,\mathrm{tg}\,\varphi^2 - \ldots) \qquad (11)$$

Die Form folgt ohne weiteres aus Gleichung (10), wenn wir der Phasenvoreilung des Stromes das negative Vorzeichen beigeben. Die Konstanten werden, aus Versuchen ermittelt, nicht mit den Werten für K_1 und K_2 (Gleichung 10) identisch sein, indem in diesem Fall der Wärmeverlust zur Nullzeit des Stromes weit grösseren Einfluss ausübt. Er wird im Sinne einer Verkürzung der totalen Lichtbogenlänge wirken, sodass K' und K'' grösser als K_1 bezw. K_2 ausfallen. Nachdem, wie später gezeigt wird, die angegebene näherungsweise Umschreibung der Erscheinungsform des Lichtbogens bei induktivem Stromkreis durch die Versuchsresultate bestätigt wird, darf auch die Uebereinstimmung des Ansatzes (11) mit den tatsächlichen Verhältnissen als wahrscheinlich bezeichnet werden. Wir ziehen daher den Schluss: *dass im gegebenen Schalter eine gegebene kVA-Leistung mit einer umso kleineren Lichtbogenlänge unterbrochen wird je grösser die durch die Kapazität im Stromkreis gegebene Phasenvoreilung des Stromes vor der EMK ist.*

Das Abschalten rein statischer Kapazitäten (im Gegensatz zu „rotierenden" Kapazitäten) kann unter Umständen zu eigentümlichen Erscheinungen führen, die, ohne wesentlichen Einfluss auf die Grösse der Schalterarbeit, mehr vom Gesichtspunkte der Ueberspannungsphaenomene aus interessant sind. Wir nehmen an, der Schalter habe den Ladestrom eines leerlaufenden Kabelnetzes abzuschalten. Nach erfolgtem Auslöschen des Bogens herrscht am Klemmenpaar auf der Kabelseite des Oelschalters die konstante Ladespannung des Kabels, wie solche durch die letzte Lichtbogenbrücke angelegt worden ist, am anderen Klemmenpaar die periodisch wechselnde Spannung des Generators. Die zwei Spannungen sind im ersten Zeitpunkt nach erfolgtem Löschen einander gleich und zwar nahezu gleich dem Amplitudinalwert, da der Lichtbogen in der Nähe des Stromdurchgangs durch Null abreisst, und somit die Generator- resp. die Kabelspannung infolge der Phasenverschiebung um 90° zur Zeit den Maximalwert durchläuft. Mit wachsender Zeit vergrössert sich aber die Potentialdifferenz zwischen den Schalterklemmen-Paaren; sie kann nach Verlauf einer halben Periode bis zum doppelten Maximalwert der Betriebsspannung ansteigen, was alsdann eine erneute Lichtbogenbildung zur Folge haben kann. In Fig. 10 ist dieser Vorgang angedeutet; OL zeigt die maximale Dauer des Abschaltbogens, der bis dahin den entwickelten Bedingungsgleichungen zur Lichtbogenexistenz genügt, L' den Zeitpunkt, wo die Differenz zwischen Generator- und Kabelspannung genügt, einen weiteren Lichtbogen zu zünden, falls

die Jonisierung des Gases hiefür noch ausreichend ist. Es sei hierüber auf die Versuche von Pfannkuch*) verwiesen. Beim Ausschalten von 60 km eines leerlaufenden Kabels für 30 000 Volt Betriebsspannung zeigten seine Oszillogramme Stromstösse von drei- und vierfacher Amplitude des normalen Leerlaufstroms. Es tritt hier prinzipiell die gleiche Er-

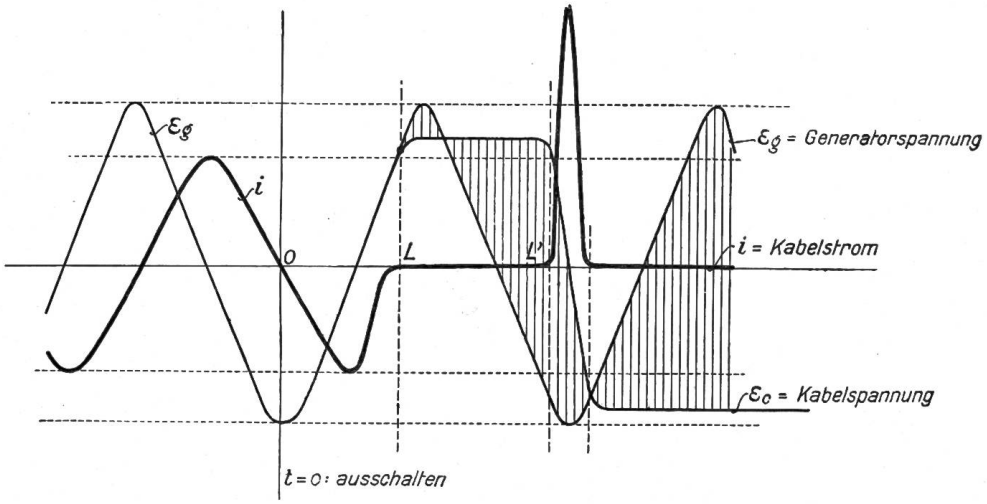


Fig. 10. Abschalten einer rein kapazitiven Belastung.

scheinung des plötzlichen Stromstosses auf, wie solche auf Seite 151 erwähnt wurde, nur ist hier der Vorgang der hohen statischen Spannung wegen ausgeprägter.

Die möglichen Kombinationen von Widerstand, Induktivität und Kapazität im Stromkreis. Die exakte analytische Behandlung dieses allgemeinen Falles bietet der Rechnung noch grössere Schwierigkeiten als der einfache induktive oder kapazitive Stromkreis. Indessen kann auch hier die mutmassliche Erscheinungsform des Lichtbogens angenähert umschrieben werden. Vorerst ist die für unsere weiteren Untersuchungen vor allem wichtige Grösse der maximalen Lichtbogenlänge für die gegebene Abschaltleistung im wesentlichen durch die Phasenverschiebung zwischen Strom und EMK der Maschine bedingt, sodass wir ganz allgemein den Ansatz schreiben können:

$$t_{r,L,c} = t_r (1 \pm K_1 \operatorname{tg} \varphi \pm K_2 \operatorname{tg} \varphi^2 \pm \ldots)$$

Grösse und Richtungssinn der Phasenverschiebung ergeben sich auf bekannte Weise aus dem gegenseitigen Verhältnis der Konstanten des Kreises, womit nach deren Ermittlung bereits ein Kriterium für das Verhältnis der tatsächlichen Lichtbogenlänge zur rechnungsmässig zu bestimmenden Länge t_r bei absolut induktionslosem Kreis gewonnen ist. Zur analytischen Formulierung des Ausdruckes bedarf es der experimentellen Ermittlung der Konstanten K_1, K_2 ... Die Weiterverfolgung der Lichtbogenverhältnisse bei veränderlichem Verhältnis der Induktivität zur Kapazität im Stromkreis wäre ausserordentlich interessant, zumal nach den bisherigen Erfahrungen des Verfassers Aussicht besteht, den tatsächlichen sehr verwickelten Erscheinungen experimentell und analytisch ziemlich nahezukommen. Das weitere Studium dieser Beziehungen ist aber vom Standpunkt des Kommissionsprogramms aus betrachtet insofern nicht zwingende Notwendigkeit, als uns hauptsächlich der Betriebsfall der für die gegebene Abschaltleistung grösstmöglichen Lichtbogenlänge interessiert, nämlich der Fall des induktiven Stromkreises. Wir werden uns in der Folge auf das weitere Studium dieser Verhältnisse beschränken.

*) Drehstromkabel für 30 000 Volt von Dipl. Ing. W. Pfannkuch, ETZ 1912, Heft 43/44.

II. Untersuchungen über die Grösse der Schalterarbeit bei gegebener Kontaktform.

Mit den bis anhin gegebenen mehr theoretischen Erörterungen dürften die Grundlagen für den eigentlichen Zweck der Untersuchungen, das Studium der Schalterarbeit, geschaffen sein. Wenn wir die nunmehr in den Vordergrund tretenden experimentellen Arbeiten auch noch durch parallele mehr theoretische Betrachtungen begleiten lassen, so geschieht dies im Sinne einer Verallgemeinerung der Versuchsresultate. Das von uns experimentell bearbeitete Gebiet ist klein im Vergleich zum Bereich der Anwendungsmöglichkeiten des Oelschalters, es muss daher versucht werden, von den ermittelten Resultaten aus einen allgemeinen Ueberblick über die Arbeitsweise des Schalters zu gewinnen.

A. Formulierung des Ausdrucks für die Schalterarbeit.

Wie in der Einleitung zum vorliegenden Bericht schon gesagt, verstehen wir unter Schalterarbeit die der entwickelten Wärme im Oelschalter während des Abschaltvorgangs äquivalente elektrische Energie. Die Vermutung liegt nahe, dass die Energie mit dem unterbrochenen Energiefluss identisch sei, indem man vorerst glauben könnte, ein Oelschalter, der z. B. 1000 kW abschaltet, hätte eine diesem Betrag äquivalente Beanspruchung zu erleiden. Es ist vielleicht zweckmässig, wenn wir diese Beziehungen an den einfachen Verhältnissen der *Gleichstromunterbrechung* kurz klarlegen.

Der Schalter beginne zur Zeit $t = o$ die Leistung $J_o \cdot E$ zu unterbrechen, der Strom wird alsdann gemäss den Grundgleichungen zur Lichtbogenexistenz nach einer hyperpolischen Kurve bis zu einem, durch die Schalter- (Lichtbogen-) Konstanten gegebenen Grenzwert abfallen und von diesem Punkt durch Sprung auf Null zurückgehen. (Siehe Fig. 1.) Die innere Schalterspannung e_i steigt dementsprechend von Null ausgehend bis zum Endwert E, den sie ebenfalls durch Sprung erreicht. Ohne auf die analytische Formulierung näher eintreten zu wollen, kann in Fig. 11 der mutmassliche Verlauf der Kurven angegeben werden. Wir bilden das Produkt $i \cdot e_i$ in jedem Zeitpunkt und erhalten so die Veränderlichkeit des Lichtbogeneffekts über den Abschaltvorgang. Es ist bemerkenswert, dass dieser Effekt zur Zeit t_e wo der Bogen abreisst nicht Null ist, sondern eine durch den Grenzwert des Stromes gegebene endliche Grösse aufweist.

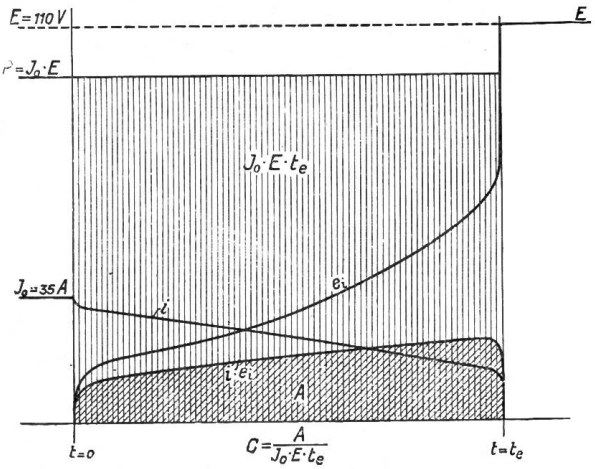


Fig. 11. Schaltarbeit beim Unterbrechen eines Gleichstromkreises.

Die Anwendung der entwickelten Gleichungen, die wir hier nicht zitieren, auf unsern Fall führt für den *Abreiss-Effekt* zum Ausdruck:

$$(e_i \cdot i)_{t_e} = \frac{1}{4\,r_a}\left\{E^2 - (g + \alpha \cdot v \cdot t_e)^2\right\}$$

Unsere früheren Erörterungen legten dar, dass der Wechselstromlichtbogen in Berücksichtigung des nacheilenden Wärmeeffekts stets in der Nähe des Stromdurchgangs durch Null abreisst; der entsprechende Abreisseffekt wird also auf einen Mindestwert beschränkt, im Gegensatz zum Gleichstrombogen. Darin liegt der Hauptgrund für die erfahrungsgemäss bedeutend stärkere Beanspruchung der Schalter bei Gleichstrom-Abschaltung.

Die während dem Abschaltvorgang in Wärme übergeführte elektrische Energie ist offenbar durch den Ausdruck gegeben:

$$A = \int_0^{t_e} i \cdot e_i \cdot dt \text{ in kWh}$$

d. i. graphisch gleich der von der Effektkurve $(i \cdot e_i)$ umschriebenen Fläche.

Wir schreiben diese in der Form:

$$\mathbf{A = c \cdot J_o \cdot E \cdot t_e} \qquad (12)$$

und bezeichnen mit A die Schalterarbeit, mit $J_o \cdot E$ die unterbrochene Leistung im Stromkreis und mit t_e die Zeitdauer des Abschaltbogens. *c ist eine Konstante des Schalters, sie ist gleich dem Verhältnis der Schalterarbeit zur Energie, die mit der unterbrochenen Leistung über die Zeitdauer t_e, von der Energiequelle geliefert würde.* Letztere ist in Fig. 11 durch die vertikal schraffierte Fläche dargestellt. Es sei vorweg genommen, dass sich c für moderne Oelschalter bei Wechselstromabschaltung, 50 ∿, und normalen Beanspruchungen in den Grenzen $c = 0.02 \div 0.07$ bewegt, während z. B. für einen einfachen Hebelausschalter bei normaler Gleichstrombelastung ein Wert von $c = 0.18$ ermittelt wurde. Die Grösse c ist somit ein Mass für die relative Wärmeentwicklung einer Abschaltung. Die Vergleichung der angegebenen Werte für die Konstante zeigt aufs neue die relativ ungünstigen Verhältnisse beim Gleichstrom; immerhin ist auch da die Wärmeentwicklung nur ein kleiner Bruchteil des unterbrochenen Energieflusses.

Obiger Ausdruck der Schalterarbeit ist nun ohne weiteres auch für die *Wechselabstromschaltung* zutreffend. Die Aufzeichnung und Planimetrierung der $(i \cdot e_i)$-Kurven auf den Oszillogrammen wäre aber ausserordentlich mühsam und wenig genau; wir haben daher einen Näherungsweg eingeschlagen, der uns auf relativ einfachem Weg den Wert von c gewinnen lässt.

Die pro Halbperiode im Abschaltbogen aufgewendete Arbeit ist offenbar:

$$A_{\frac{\tau}{2}} = \int_0^{\frac{\tau}{2}} i \cdot e_i \cdot dt$$

Sind die Effektivwerte J und E_i über die Halbperiode bekannt, so kann obiger Wert geschrieben werden:

$$A_{\frac{\tau}{2}} = \frac{\tau}{2} \cdot J \cdot E_i$$

Wir bezeichnen mit n die Anzahl der Halbwechsel im Abschaltlichtbogen, wobei wir in erster Annäherung die Nullzeit des Stromes vernachlässigen und können so die gesamte Schaltarbeit ansetzen zu:

$$A = \int_0^{n_e} \frac{\tau}{2} \cdot J \cdot E_i \cdot dn \qquad (13)$$

Ueber die Veränderlichkeit der Effektivwerte von J und E_i mit fortschreitender Zeit lehren uns die aufgenommenen Oszillogramme eine Annahme treffen, die den wirklichen Verhältnissen sehr nahe kommt. Es zeigt sich nämlich, dass J bezw. E_i über den Abschaltvorgang nahezu linear abnimmt, bezw. anwächst (siehe z. B. das Oszillogramm in Fig. 15) sodass wir setzen können:

$$J = J_0 - \alpha \cdot n; \quad E_i = \beta \cdot n$$

ist n_e die totale Anzahl der Halbperioden, so ergeben sich die Faktoren α und β zu:

$$\alpha = \frac{J_o - J_{min}}{n_e}; \qquad \beta = \frac{E_{i\,max}}{n_e}$$

J_{min} ist der Effektivwert der letzten und kleinsten Halbperiode des Stromes; die Versuche zeigen, dass dieser bei Oelschaltern nur wenige Prozent unter dem Anfangswert J_o liegt. $E_{i\,max}$ soll analog dem Effektivwert der inneren Schalterspannung in der letzten Halbperiode entsprechen. Diese zwei Grössen lassen sich leicht aus dem Oszillogramm entnehmen, wir setzen sie in Beziehung mit J_o bezw. E indem wir schreiben

$$J_{min} = \frac{q}{100} J_o \qquad E_{i\,max} = \frac{p}{100} E$$

wobei J_o und E auch aus dem Oszillogramm zu greifen sind. Unser Ausdruck für die Schalterarbeit schreibt sich jetzt:

$$A = \frac{\tau}{2} \cdot \int_{o}^{n_e} (J_o - \alpha \cdot n) \cdot \beta \cdot n \cdot dn$$

und wenn wir obige Substitutionen einführen und das Integral auflösen:

$$A = J_o \cdot E \cdot \frac{\tau}{2} \cdot n_e \left(\frac{p}{600} + \frac{p \cdot q}{30\,000} \right)$$

$\frac{\tau}{2} \cdot n_e$ ist gleich der Abschaltzeit t_e, sodass wir dadurch den Ausdruck für A auf die ursprüngliche Form bringen

$$\mathbf{A = J_o \cdot E \cdot t_e \cdot \left(\frac{p}{600} + \frac{p \cdot q}{30\,000} \right)} \tag{14}$$

Die Grösse C wird also aus dem Oszillogramm bestimmt durch

$$C = \frac{p}{600} + \frac{p \cdot q}{30\,000} \tag{15}$$

Wir erblicken im Ausdruck (14) die Basis aller weitern Untersuchungen. Unsere Aufgabe ist darin näher gekennzeichnet, indem wir nun ermitteln müssen, welchen Wert die Grössen C und t_e für die gegebene zu unterbrechende Leistung ($J_o \cdot E$) einnehmen und in welcher Abhängigkeit sie zu den veränderlichen Betriebsverhältnissen im Stromkreis und im Schalter stehen.

B. Die experimentelle Bestimmung der Grössen C und t_e.

Dem Charakter der Versuche gemäss kam als eigentliches Mess-Instrument der Blondel'sche Oszillograph zur Anwendung, indem uns jede oszillographische Aufnahme gleichsam einen Ablesungspunkt bedeutet. Die äusserst kurze Zeitspanne, in der sich alle uns interessierenden Vorgänge des Abschaltbogens abspielen, verlangte indessen besondere Vorkehrungen zur Eliminierung störender Nebenerscheinungen; zumal die Resultate quantitativ ausgewertet werden müssen. Es bedurfte zeitraubender Voruntersuchungen, bis die systematisch geordneten Versuche in ihrem Resultat überhaupt nur eine Gesetzmässigkeit erblicken liessen. Wenn heute die gewählte Versuchsanordnung in allen Punkten befriedigende Resultate fördert, so muss doch gleich gesagt sein, dass diese nicht die Genauigkeit moderner Laboratoriumsmessungen erreichen können. Die stete Fehlerquelle liegt hierbei weniger in der Messanordnung als im Versuchsobjekt selbst. Der Abschaltvorgang ist kein stationärer Prozess, bei dem die Nebenbedingungen im Verlaufe des Versuchs kontrolliert werden können, es hält daher äusserst schwer, die aufeinanderfolgenden Punkte einer Mess-Serie unter stets gleichen Bedingungen aufzunehmen. Um die manigfachen unkontrollierbaren Störungserscheinungen in der Lichtbogenbildung nach Möglichkeit zu beschränken, sind bis heute alle Messungen bei *einpoliger Unterbrechung* des Stromkreises durchgeführt worden. Es zeigte sich auch, dass sich die Stetigkeit der Resultate erst nach mehrfachen vorangegangenen Schaltungen einstellte, es wurde daher vor jeder Aufnahme einer Versuchs-Serie der Schalter „eingebrannt". Zum Schluss sei noch erwähnt, dass prinzipiell jeder Versuchspunkt der quantitativ ausgewertet wurde, doppelt aufgenommen worden ist.

Die Versuchsanlage und die Organisation der Versuche.

Wie im Vorwort zum Bericht schon erwähnt, steht uns im Kraftwerk Beznau einer der 12 Drehstrom-Generatoren, Maschine 11, (1 000 kW, 8 000 V. 50 ∼) für die Vornahme der Versuche zur Verfügung. Die Maschine ist im Verlauf der Versuche durch Verdrehung der Pole auf rein sinusförmige EMK umgebaut worden, sodass sich daraus gegenüber der früheren Form (fünfte Harmonische 13 %) ein Vergleich über den Einfluss der Kurvenform

ergab. Die provisorische Schaltanordnung ermöglicht andererseits auch den Anschluss der Versuchsanlage an das ganze Netz oder an die Parallelschaltung zweier Aggregate (Maschine 11 und 9, beide heute mit nahezu reiner Sinusform der EMK-Kurve). Die Einstellung der Maschinenspannung geschieht durch einen besonders fein gestuften Regulierwiderstand im Erregerstrom des Generators am Aufstellungsort der Maschine. Für die Aufstellung der eigentlichen Versuchsanlage ist uns im Kesselhaus ein breiter Raum zur Verfügung gestellt worden, während der Belastungswiderstand in nächster Nähe als schwimmender Wasserwiderstand im Oberwasserkanal untergebracht ist. Das generelle Schaltschema der Versuchsanlage ist auf Fig. 12 aufgezeichnet, und bedarf wohl keiner weiteren Erläuterung. Die Bilder auf Tafel I illustrieren einige Details, die nachfolgend

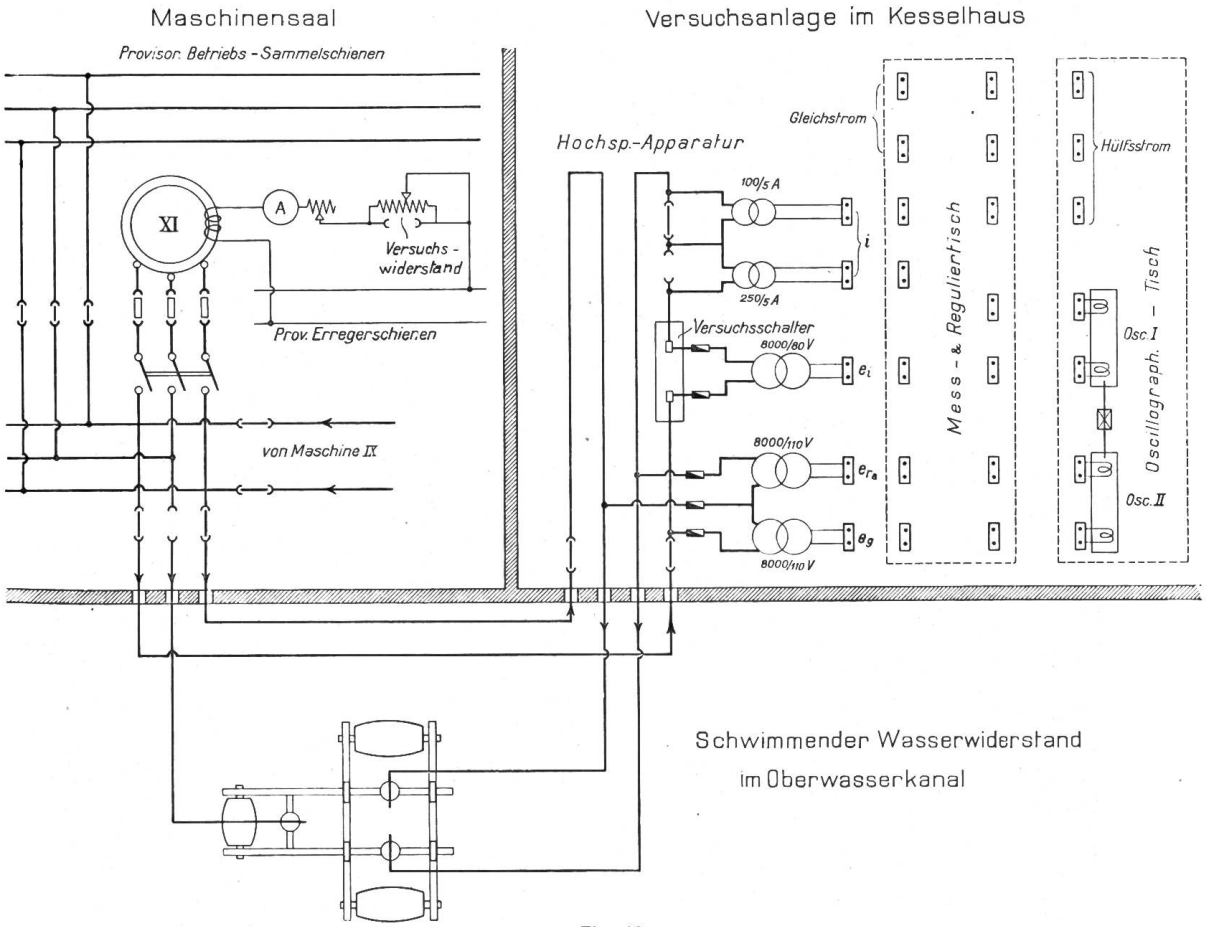


Fig. 12.

näher besprochen werden. Die Manigfaltigkeit der stets notwendigen Kontrollmessungen benötigte eine möglichst grosse Beweglichkeit der eigentlichen Versuchsanlage. Diese ist daher in ihrer Disposition in 3 Teile aufgelöst worden: Die Hochspannungsanlage mit dem Versuchsschalter und den Messwandlern, der Mess- und Reguliertisch und der Oszillographentisch. Die drei Apparatengruppen sind räumlich getrennt und durch verschiedenfarbige bewegliche Leitungen vermittelst Steckern mit einander zu verbinden, sodass dadurch in kürzester Zeit und in übersichtlicher Weise alle wünschbaren Messungen und Aufnahmen durchgeführt werden können. Zum Betrieb der verschiedenen Hilfstromkreise und der Bogenlampen der Oszillographen ist eine kleine Umformergruppe aufgestellt, während eine Batterie die Signaleinrichtung nach dem Maschinenhaus speist. Das Entwickeln der aufgenommenen Oszillogramme wird in einer in unmittelbarer Nähe befindlichen transportablen Dunkelkammer besorgt. Zum Schluss sei noch erwähnt, dass der Versuchsanlage ein wohlassortiertes Lager aller notwendigen Werkzeuge nebst einer kleinen Drehbank beigegeben wurde, was nicht zuletzt auch zum Gelingen der Untersuchungen beigetragen hat.

Zur Durchführung der normalen Versuche sind drei Mann erforderlich, wovon einer dauernd im Maschinensaal Aufstellung hat und nach Massgabe der vereinbarten Signale Turbine und Generator reguliert, die übrigen zwei teilen sich in die Bedienung des Messtisches bezw. der Oszillographen. Nach erfolgter Aufnahme des Abschaltvorgangs werden sogleich die Oszillogramme entwickelt und auf das vorläufige Gelingen des Versuches hin geprüft und in der Zwischenzeit der neue Belastungszustand eingestellt. Wir gewinnen so bei vollständiger Organisation jeder Manipulation 12 bis 15 Ablesungspunkte innerhalb 6 Versuchsstunden, vorausgesetzt, dass keine Störungen in der Anlage eintreten. Der Rest des Arbeitstages ist den vorbereitenden Arbeiten und Messungen für die folgende Versuchs-Serie vorbehalten.

Die oszillographischen Messungen. Die experimentelle Aufgabe ist durch Gleichung (14) näher gekennzeichnet. Diese benötigt zur Berechnung der Schalterarbeit beim Unterbrechen der Leistung ($J_0 \cdot E$) im Stromkreis die Kenntnis der Grössen t_e, p und q; d. h. die Aufnahme der Lichtbogenlänge, die Kenntnis der Stromkurve i und der Kurve der inneren Schalterspannung e_i. Um zugleich auch einen Einblick in den Verlauf der Schaltgeschwindigkeit zu gewinnen, wird zur *Ermittlung der Lichtbogenlänge* der Schalterweg bezw. der zurückgelegte Weg des Abreisskontaktes auf mechanischem Weg auf die eine Messschleife des Oszillographen übertragen. Zu diesem Zweck ist an der drehbaren Messschleifenhülse ein Hebel angebracht, der seitlich aus dem Oszillographenkasten herausragt und dort vermittelst eines Mitnehmers über einen straff gespannten Stahldraht mit der beweglichen Kontaktbrücke im Schalter in Verbindung steht. Auf diese Weise beschreibt der Mess-Schleifenspiegel auf der rotierenden Trommel eine dem Schalterweg proportionale Auslenkung aus der Null-Linie, welche der Schalterstellung in geschlossenem Zustand entspricht. Die relativ grosse Beschleunigung zu Beginn des Ausschaltweges verlangt für diese an sich einfache mechanische Uebertragung besondere Vorkehrungen. Der Stahldraht muss aus dem Schalterinnern kommend, über zwei Leitrollen geführt werden, was ein sehr straffes Anspannen benötigt. Dies wird durch eine Stufenscheibe mit Rillen besorgt, die durch eine auf ihrer Axe sitzende kräftige Uhrfeder die regulierbare Drahtspannung aufrechterhält. Die Stufenscheibe, in Fig. 13 als Detail angegeben, führt so die Schalterbewegung in eine mit ihr absolut synchrone Drehbewegung über. An ihr greift je nach der gewünschten Uebersetzung auf einer der drei Stufen-Rillen der eigentliche Transport-Draht an, der an seinem äussern Ende durch eine regulierbare Spiralfeder gespannt ist. Der eigentliche Abschaltvorgang entfällt im Allgemeinen nur auf ein relativ kleines Bereich des totalen Schalterweges; in dem einerseits der Schalter beim Verlassen der Kontakte beinahe schon seine volle Geschwindigkeit erreicht und also Weg zurückgelegt hat und anderseits nach dem entgültigen Abreissen des Lichtbogens je nach Belastung ein grösseres oder kleineres Wegstück leer läuft. Dieser vor- und nachliegende tote Weg bedeutet auf dem Oszillogramm verlorener Platz, indem sich der eigentliche Abschaltvorgang auf das Zwischenstück beschränken muss, das je nach der Belastung grösser oder kleiner ausfällt. Um dieses auf die ganze nützliche Oszillogrammbreite ausdehnen zu können, haben wir den Mitnehmer am Transportdraht verstellbar angeordnet,

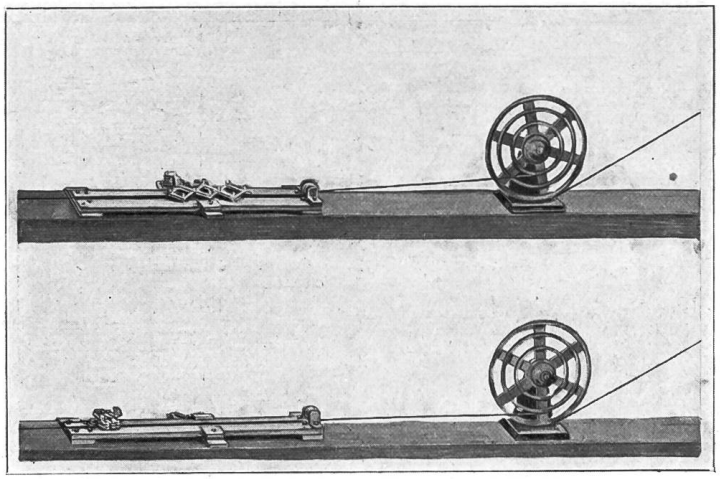


Fig. 13. Anordnung der Stufen-Rillenscheibe und Schlittenvorrichtung mit Schere.
oben: Schere geöffnet.
unten: Schere gespannt.

sodass er den Hebel, der die Messschleifenhülse bewegt, erst kurz vor dem Lichtbogenbeginn anfasst. Der Schlag wird durch eine Filzscheibe als Zwischenglied wirksam aufgenommen. Das Bild auf Tafel I lässt die Anordnung erkennen. Der tote Weg nach dem Abreissen des Lichtbogens wird dadurch abgeschnitten, dass in den Transportdraht ein Schlitten in Form einer Schere eingebaut ist, die sich im Verlauf der Bewegung durch einen verstellbaren Anschlag öffnet und dadurch den Rest des Schalterweges nicht mehr überträgt; das gezogene Ende des Transportdrahtes wird gleichzeitig fixiert. Der Apparat ist in Fig. 13 wiedergegeben. Durch Aenderung der Uebersetzung der Mitnehmer- und der Anschlagstellung kann so *beinahe jede beliebige Lichtbogenlänge innerhalb des totalen Schalterweges über die nützliche Oszillogrammbreite verteilt werden, sodass für alle Messungen die gleiche Genauigkeit vorliegt.* Indessen müssen noch Anfang und Endstellung des eigentlichen Abschaltvorgangs auf der Wegkurve fixiert werden. An der beweglichen Schaltertraverse ist eine Stange befestigt, die den Schalterdeckel vertikal durchstösst und ein an diesem vertikal aufgestelltes Kontaktsystem steuert. Der Apparat ist in Fig. 14 ersichtlich, siehe auch Gesamtansicht auf Tafel I. Er trägt u. a. eine Moment-Kontaktgebung, die so eingestellt ist, dass sie im Moment, wo sich die Kontakte im Schalter verlassen, einen Stromkreis über die oben gesagte Messschleife schliesst. Diese vollführt so in Folge des kurzzeitigen Stromstosses innerhalb ihrer Hülsendrehung eine Relativbewegung, womit der Anfangspunkt auf die Wegkurve im Oszillogramm markiert ist. Der Stromstoss ist in Fig. 16 auf der $s = v \cdot t \div$ Kurve ersichtlich. Die Zeitdauer t_e ist nun auf einfache Weise aus dem Oszillogramm zu lesen, wenn wir gleichzeitig auf diesem noch eine der veränderlichen elektrischen Grössen aufnehmen. Im Oszillogramm in Fig. 16 ist mit der Wegkurve die Kurve der Spannung am Generator oszillographisch aufgezeichnet. Diese geht im Abreisspunkt des Lichtbogens auf die EMK der Maschine über, was aus dem Oszillogramm sehr deutlich zu Tage tritt. Damit sind Anfangs- und Endstellung festgelegt, die Anzahl der Halbperioden lässt bei Kenntnis der Periodenzahl direkt die Zeitdauer in Sekunden herauslesen; während die Auslenkung der Wegkurve zwischen diesen Punkten durch Multiplikation mit dem Uebersetzungsverhältnis die Lichtbogenlänge bestimmen lässt und damit die mittlere Schaltgeschwindigkeit $v = \frac{s}{t_e}$

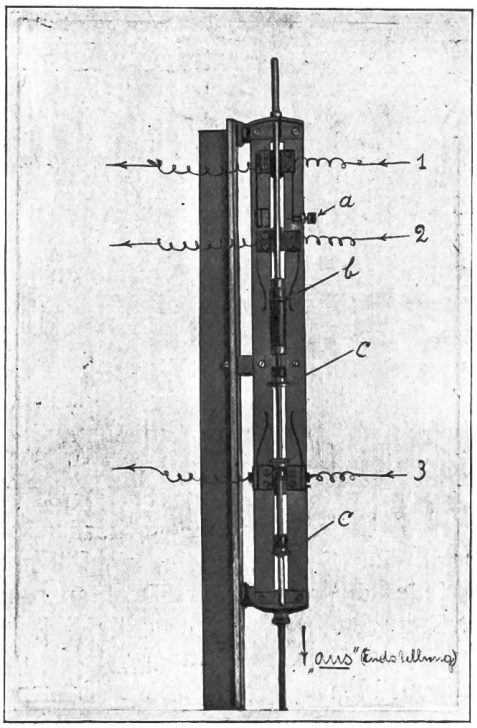


Fig. 14. Kontaktsystem zum Versuchschalter. (Endstellung „aus")

Legende: 1 Stromkreis der Messschleife II_2 (Auslöse-Signal)
2 Stromkreis „auf" } des Oszillographen-
3 Stromkreis „zu" } Verschlusses.
a Kontaktgeber des Momentkontaktes.
• b Momentkontakt.
c Schliesskontakte f. d. Verschluss-Steuerung.

Eines der empfindlichsten Organe der Versuchsanlage ist der Momentkontakt zur Fixierung der Angangsstellung. Seine Stellung wird vor und nach jeder Versuchs-Serie neu kontrolliert; wir verfahren hierbei so, dass wir den Versuchsschalter in den Stromkreis einer Glühlampe einschalten und die Kontakte so weit ausser Berührung bringen, bis die Lampe rot flakert, in dieser Lage, die wir als Nullstellung ansprechen, wird der Schalter fixiert und der Momentankontakt hiefür eingestellt. Einer aufmerksamen Kontrolle bedarf auch das Uebersetzungsverhältnis des Schalterweges auf die Auslenkung im Oszillogramm. Wir ermitteln den Wert durch den Versuch, indem wir die an einer Skala die auf den Millimeter genau abzulesende Weglänge im Schalter mit der oszillographischen Angabe ver-

Versuche vom 28. 8. 14, 10^{50} an Maschine XI.
MFO-Schalter 10 000 V. 200 A. Einpolige Unterbrechung, Bürstenkontakte. Oel: Oil Comp. Druck und Temp. normal.

No. 7 a

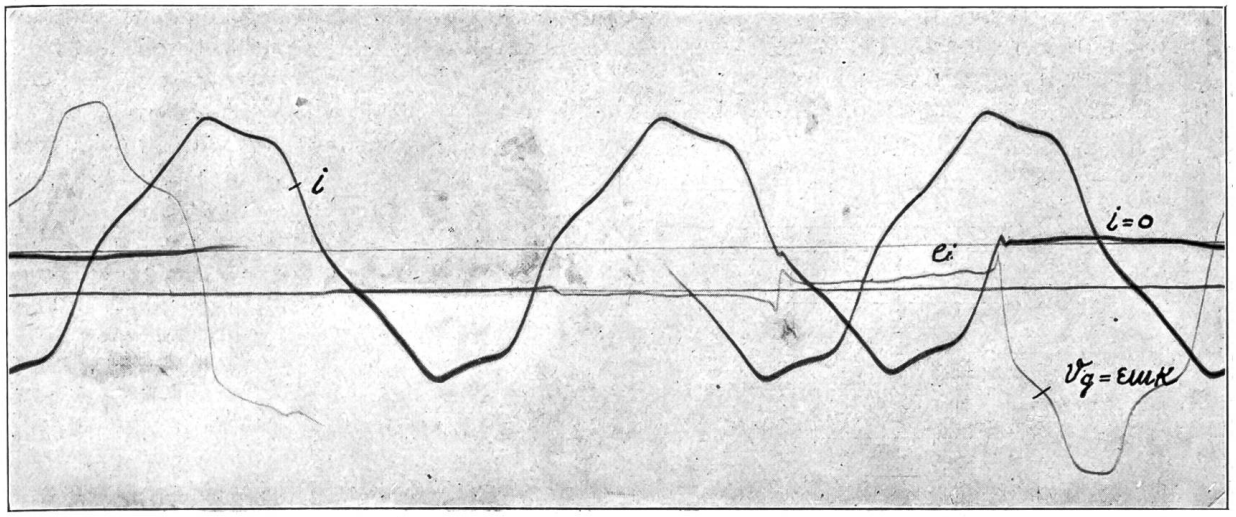


Fig. 15. Aufnahme der i — und e_i - Kurve.

No. 7 b

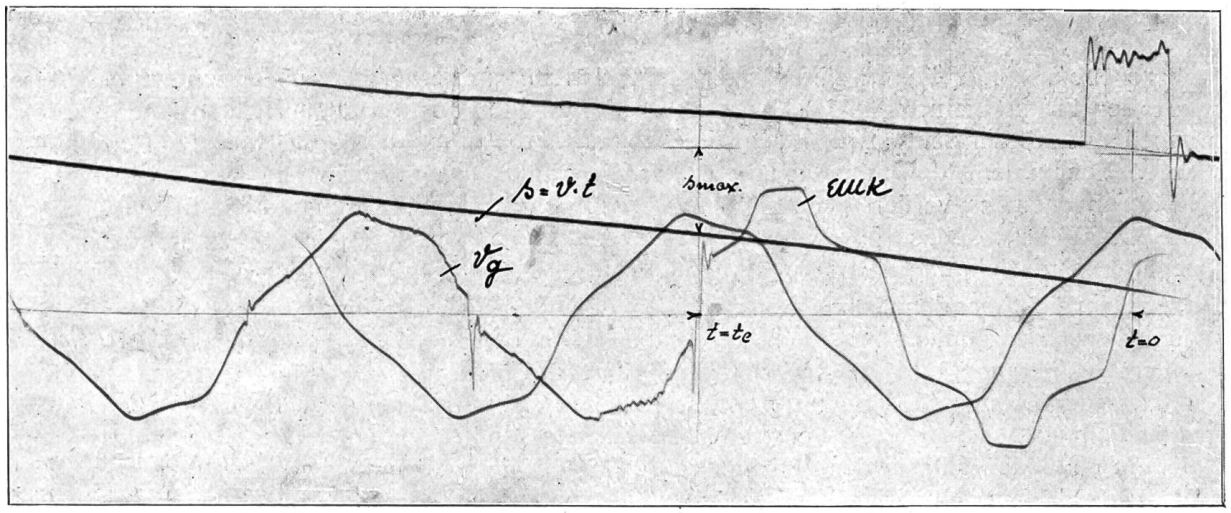


Fig. 16. Aufnahme der Vg — und · s-Kurve.

V = 4950 V, J_0 = 71.5 A.	S = 21.6 mm
R_a = 67.5 Ω P = 354 kW.	t_e = 0.035 mm
	v = 61.8 cm/sec.
A = 0.61 kWsec.	q = 95,5 %
p = 9,0 %	c = 4,3 %

gleichen; es zeigte sich, dass für das für uns in Frage kommende Bereich Proportionaliät der Wege besteht. Als versuchstechnisches Detail sei noch der Steuerung der Expositionszeit im Oszillographen Erwähnung getan. Die bekannte Anordnung für Moment- und Zeitbelichtung der von Siemens gebauten Oszilliographen wurde von uns dahin ergänzt, dass wir die Einstellung auf Zeitbelichtung beliessen und durch einen elektromagnetisch gesteuerten Verschluss die Beleuchtung regelten. Die Steuerung besorgt das oben erwähnte mit dem Schalter zusammengebaute Kontaktsystem. Die Kontaktgeber sind so regulierbar, dass der Verschluss kurz vor dem Verlassen der Schalter-Kontakte geöffnet und wenige Halbperioden nach dem letzten Abreissen des Lichtbogens wieder geschlossen wird. Dies erlaubt, ohne die Uebersichtlichkeit zu schmälern, den Abschaltvorgang je nach der gewählten Trommelgeschwindigkeit über zwei und mehr Umdrehungen erstrecken zu lassen.

Die Aufnahme der Strom- und Spannungskurven geschah für die normalen Versuche in der bekannten Weise durch Vermittlung von Präzisions-Stromwandlern bezw. Spannungswandlern, an die zugleich die erforderlichen Messinstrumente angeschlossen sind. Das generelle Messschema für die Versuche mit Ohmscher Belastung ist in Fig. 17 ersichtlich. Oszillograph I nimmt den Verlauf von i und e_i auf zur Ermittlung der Grössen p und q. Die Lichtbogenlänge und der Schalterweg werden im Apparat II aufgezeichnet. Ein regulierbarer Gleichstrommotor mit veränderlichem Vorgelegesatz treibt die beiden Apparate über Gelenkkupplungen an. Der Abschaltvorgang ist somit, soweit er uns heute interessiert, auf zwei Oszillogrammen vollständig aufgezeichnet. Zwei typische Vertreter sind auf Seite 163 wiedergegeben. Im späteren Verlauf der Versuche mussten wir den uns freundlicher Weise von der Firma Siemens & Halske geliehenen Oszillographen an seinen Eigentümer zurückgeben; wir beschränkten uns von hier ab auf die Aufnahme der e_i-Kurve mit der Wegkurve zusammen, die mit Ausnahme der Grösse q alles Notwendige auswerten lassen. Erfahrungsgemäss variiert q für die in Betracht kommenden Stromstärken in den Grenzen 96 % bis 99 %, sodass jeweilen pro Versuchsreihe die Aufnahme einiger Stichproben durch separate Aufzeichnung der i-Kurve genügte.

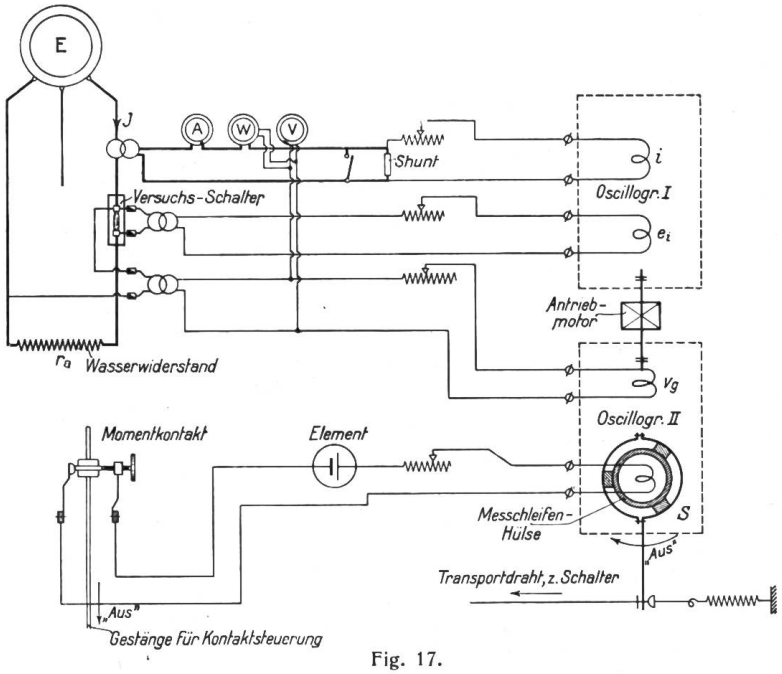


Fig. 17.

Um sich über den Genauigkeitsgrad der oszillographischen Aufzeichnungen unter Verwendung von Messwandlern zu orientieren, haben wir eingehende *Untersuchungen mit direkter Messung* durchgeführt. Der Stromwandler ist zu diesem Zweck durch einen Shunt ersetzt worden, an den sich unter Zwischenschaltung eines Regulierwiderstandes die Messschleife anschloss. Die Betriebssicherheit der Messanordnung bedingte hiebei die Erdung der betreffenden Phase der Maschine. An Stelle des Spannungswandlers ist ferner die Messschleife zur Aufnahme der e_i-Kurve über eine Serieschaltung von bifilar gewickelten Vorschaltwiderständen passender Grösse direkt an die Schalterklemmen angelegt worden. Die e_i-Kurve in Fig. 15 ist z. B. nach dieser Methode gewonnen. Die Vergleichung mit den Resultaten unter Verwendung der Präzisions-Messwandler zeigt, dass diese gewisse Details in der Kurvenform nicht mehr wiederzugeben vermögen. Dies trifft besonders für die Stromwandler zu, bei denen jede durch die Einstellung eines passenden Messstroms bedingte Veränderung des Widerstandes im sekundären Kreis in einer grösseren oder kleineren Verzerrung der Kurvenform zu Tage tritt. Andererseits zeigten die Oszillogramme in der e_i-Kurve unter gewissen Verhältnissen eigentümliche Schwingungserscheinungen, deren Sitz, wie die direkten Aufnahmen zeigten, nicht im Lichtbogen, sondern im Messkreis liegt. Die experimentellen Grundlagen zu den theoretischen Erörterungen im ersten Kapitel dieses Berichtes sind daher vorzugsweise nach der angegebenen Methode gewonnen worden. Indessen muss gesagt sein, dass zur Ermittlung der Grössen t_e, p und q die indirekten Messungen wie in obigem Schema angegeben, vollauf genügen, wir zogen daher vor, nach gewonnenem Einblick in die möglichen Fehler die weiteren Untersuchungen unter Verwendung von Messwandlern vorzunehmen, zumal diese ein bedeutend rascheres Fortschreiten der Versuche erlauben.

III. Untersuchungen über die Veränderlichkeit der Schalterarbeit bei gegebener Kontaktform mit der abgeschalteten Leistung und den elektrischen Daten des unterbrochenen Stromkreises.

Nachdem im vorangegangenen Kapitel der Begriff der Schalterarbeit und der von uns eingeschlagene Weg zur experimentellen Bestimmung dieser Grösse erläutert worden ist, kommen wir nun zur Beantwortung der wichtigen Frage: Wie variiert die Schalterarbeit, d. h. die Beanspruchung eines gegebenen Schalters mit den veränderlichen Betriebsbedingungen im Stromkreis? Der einzuschlagende Weg ist nach dem Vorangegangenen eindeutig festgelegt: Die Ermittlung der Grössen C und t_e für verschiedene Abschaltleistungen unter verschiedenen Bedingungen im Stromkreis. Das Resultat unserer diesbezüglichen Versuche ist durch die Messungen an mehr als tausend Abschaltungen niedergelegt, die Werte finden sich in den Tafeln im Anhang aufgezeichnet. Bevor wir jedoch die gefundenen Beziehungen einer Diskussion unterziehen, soll untersucht werden, welcher Zusammenhang der veränderlichen Grössen sich aus der eingangs entwickelten Theorie herauslesen lässt. Die Gegenüberstellung mit den „Versuchskurven" wird uns dann auf leichte Weise die Erklärung für diese und jene scheinbar paradoxe Erscheinung zu geben vermögen.

Um diesen Bericht nicht unnötigerweise mit mathematischen Erörterungen zu belasten, beschränken wir uns auf die Aufstellung der Beziehungen über die Veränderlichkeit der maximalen Lichtbogendauer t_e indem die Versuche zeigten, dass die Grösse C *für die gegebene Kontaktform* in weitaus engeren Grenzen variiert, eine Tatsache, die übrigens auch aus deren analytischer Formulierung zu ersehen wäre. Nachfolgend ist als Kopie von Protokoll No. 26 eine Zusammenstellung der aus den Oszillogrammen berechneten C-Werte für eine Versuchs-Serie wiedergegeben, woraus deren Veränderlichkeit mit der Leistung zu ersehen ist. Vernachlässigt man die unwahrscheinlichen Werte, so wäre ein Anstieg von C mit der Leistung zu konstatieren. Andererseits zeigt sich auch eine kleine Vergrösserung mit abnehmender Spannung und zurückgehender Induktivität des Stromkreises. Die nachfolgende Tabelle lässt die zahlenmässigen Verhältnisse erkennen.

Versuche an Normal-Kontakten.
(Mittelwerte der Grösse C)

Spannung bei J = o ÷ 150 A	Starke Kurvenverzerrung im induktiven Kreis C in %	Induktionsloser Kreis C in %	Induktiver Kreis C in %
3000 V	3,2	—	3,1
6000 V	4,1	—	3,0
8000 V	3,3	1,5	2,7

Diese Angaben lassen indessen keinen Schluss ziehen, wie sich der Wert von C bei sehr grossen Abschaltleistungen und extremen Phasenverschiebungen einstellt. Andernorts vorgenommene Kurzschlussversuche an grossen Maschineneinheiten zeigen aber, dass C auch in diesem Fall unter Verwendung gebräuchlicher Kontaktformen 5 ÷ 7 % nicht übersteigt, *sodass wir für normale Betriebsverhältnisse mit einem mittleren Wert von C als Konstante rechnen können.*

Die nachfolgenden Untersuchungen beziehen sich alle auf die konstant gedachte Schaltgeschwindigkeit v. Der Einfluss ihrer Veränderlichkeit wird im folgenden Kapitel erörtert. Wir beginnen zuerst mit dem Fall des absolut induktionslosen Stromkreises, weil er uns das erste Glied t_r im allgemeinen Ausdruck für die Lichtbogendauer liefert: Gleichung (10).

$$t_{r,L} = t_r (1 + K_1 \operatorname{tg} \varphi + K_2 \operatorname{tg} \varphi^2 + \ldots)$$

Maschine 11. Carl Maier-Elektroden.

Protokoll der 8000 Volt-Serie.

Blatt No. 26: Carl Maier-Schalter. Einfache Unterbrechung. Datum: 18. V. 1915. Sinusförmige EMK

No.	V_g Volt	J_o Amp.	P kW	s mm	gemessen t_e Sek.	gemessen v cm/sek.	umgerechnet t_e sek. $v_1 t_1 = vt \pm \Delta$	umgerechnet v cm/sek.	gemessen p %	gemessen q % ca.	gerechnet c %
1	8050	22	177	15,2	0,0374	40,7	0,0282	$v_1 = 55$ cm/sek.	4,0	—	2,0
2	8050	21	169	8,1	0,0222	36,5	0,0160		3,0	—	1,5
3	8100	23	186	17,3	0,0379	45,6	0,0317		—	99	—
4	8000	31,2	249	12,6	0,0328	38,4	0,0244		4,0	—	2,0
5	7900	30,5	241	13,0	0,0327	39,9	0,0245		5,0	—	2,5
6	8100	39,5	320	11,7	0,0305	38,4	0,0250		4,0	—	2,0
7	8300	41,4	344	14,2	0,0352	40,5	0,0270		5,0	—	2,5
8	8000	47,2	378	13,0	0,0326	40,0	0,0250		2,0	—	1,0
9	8000	47,0	376	17,6	0,0400	43,9	0,0332		5,0	—	2,5
10	8100	55,5	450	13,5	0,0347	38,9	0,0258		6,0	—	3,0
11	8000	54,8	439	14,9	0,0376	39,5	0,0281		6,0	—	3,0
12	8050	67,0	540	23,4	0,0465	50,3	0,0425		6,0	—	3,0
13	8025	66,5	535	18,9	0,0415	45,6	0,0345		5,0	—	2,5
14	7980	78,8	630	11,7	0,0308	38,06	0,0226		6,0	—	3,0
15	7900	74,6	590	19,4	0,0432	44,7	0,0351		6,0	—	3,0
16	8000	75,5	612	17,1	0,0390	43,8	0,0312		—	97,0	—
17	8000	66,5	532	16,0	0,0380	42,2	0,0295		7,5	—	3,7
18	8200	67,5	554	25,6	0,0478	53,6	0,0466		7,5	—	3,7
19	7800	75,0	585	15,8	0,0363	43,4	0,0292		7,0	—	3,4
20	8300	90,0	747	22,3	0,0453	49,3	0,0406		6,0	—	3,0
21	8200	88,3	725	25,2	0,0489	51,5	0,0458		7,5	—	3,7
22	7980	96,5	770	14,4	0,0345	41,7	0,0272		7,5	—	3,7
23	7975	96,8	772	24,5	0,0482	50,8	0,0445		7,5	—	3,7
Mittel:	8050								5,6	98	2,8

A. Der absolut induktionslose Stromkreis.

Wie eingangs schon erwähnt, ist dieser Fall praktisch nicht rein herzustellen, indem im Ausdruck für die Phasenverschiebung:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2 \pi f (L_i + L_a)}{r_i + r_a}$$

L_i, die Induktivität der Maschinenwicklungen, nicht Null gemacht werden kann. Um die zu untersuchenden Verhältnisse experimentell wenigstens annähernd wiederzugeben, verteilten wir die Abschaltleistungen, die 2000 kW nicht überstiegen, auf eine grössere Anzahl parallel arbeitender Generatoren (10 Maschinen im Beznau-Werk zu 1000 kW + 4 (5) Maschinen zu 4200 kW im Löntschwerk). Als Belastung diente ein Wasserwiderstand. Bei den Versuchen mit 1 Maschine ist die im Stromkreis herrschende Phasenverschiebung auf einfache Weise zwischen dem Strom und der Maschinen-EMK experimentell durch oszillographische Aufnahme der Strom- und Maschinenspannungskurve über den Abschaltvorgang ermittelt worden. Im Moment, wo der Lichtbogen endgültig abreisst, springt die Klemmenspannung auf die EMK über, deren relative Lage zum Strom auf dem Oszillogramm direkt in Grad abgemessen werden kann. In unserem Fall tritt an Stelle der EMK die Sammelschienenspannung, die, wie die Messungen ergaben, nach erfolgter Abschaltung um weniger

als 1 % anstieg; die Phasenverschiebung dieser höheren Spannung gegenüber dem abgeschalteten Strom war bei 250 Amp., entsprechend 2000 kW bei 8000 Volt, noch nicht nachweisbar, sodass wir diese Versuche praktisch als den Fall des absolut induktionslosen Stromkreises wiedergebend, betrachten können.

Wir stellen nun die erste Frage:

1. Wie variiert die maximale Lichtbogendauer, bezw. die Lichtbogenlänge $s = v \cdot t_e$, mit der abgeschalteten Leistung P?

Lassen wir vorerst die Betriebsspannung V konstant, so ist die Abschaltleistung definiert durch:

$$P = J_o \cdot V = \frac{V^2}{r_a} \text{ in kW}$$

Gleichung (7) Seite 149 gibt uns die Bedingung für die max. Lichtbogendauer, nämlich es muss sein wenn wir mit Effektivwerten rechnen:

$$\{V - (g + \alpha \cdot v \cdot t_e)\}^2 = 4\, r_a\, (\gamma + \delta \cdot v \cdot t_e)$$

setzen wir

$$v \cdot t_e = s; \quad \frac{V^2}{r_a} = P,$$

so schreibt sich die Gleichung nach P geordnet:

$$P\{(V - g) - \alpha \cdot s\}^2 = 4\,(V - g)^2 \cdot (\delta \cdot s + \gamma) \qquad (16)$$

Der Zusammenhang zwischen P und s ergibt eine hyperbolische Kurve dritten Grades, die durch folgende Merkmale gekennzeichnet ist:

Wir setzen in (16) $s = o$ und erhalten: $P = 4\gamma$, *d. h. der Grenzwert der Abschaltleistungen, die in einem gegebenen Schalter ohne Lichtbogenbildung unterbrochen werden können, ist unabhängig von der Betriebsspannung gleich dem Betrag 4γ, einer Konstanten des Schalters.*

Setzen wir $P = \infty$, so ergibt sich für die Lichtbogenlänge: $s = \frac{V - g}{\alpha}$

d. h. mit wachsender Abschaltleistung strebt die Lichtbogenlänge einem durch die Betriebsspannung und die Konstanten des Schalters bedingten endlichen Grenzwert entgegen, der theoretisch für unendlich grosse Abschaltleistung erreicht wird. Um einen Ueberblick über den Einfluss der Betriebsspannung zu gewinnen, ist in Fig. 18 die Schar der (P, s)-Kurven nach Gleichung (16) für verschiedene Werte von V aufgezeichnet. Um die Vergleichung mit den Versuchswerten zu erleichtern, ist hiebei neben der Bogenlänge s die Zeitdauer des Lichtbogens $t_e = \frac{s}{v}$ aufgetragen. Wie ersichtlich, sind die Kurven für höhere Spannungen steiler ansteigend, um für den unendlich grossen Grenzwert in die Gerade überzugehen. Bevor wir weitere Schlüsse aus den gewonnenen Beziehungen ableiten, sei das Resultat der diesbezüglichen Abschaltversuche gegenüber gestellt. Als Beispiel sind in Fig. 19 die Messungen an einem 45 000 Volt-Oelschalter der Firma Carl Maier, Schaffhausen mit eingebauter „Normalelektrode"*) für die Betriebsspannung 8000 Volt eingetragen.**) Die Werte verstehen sich für einpolige Abschal-

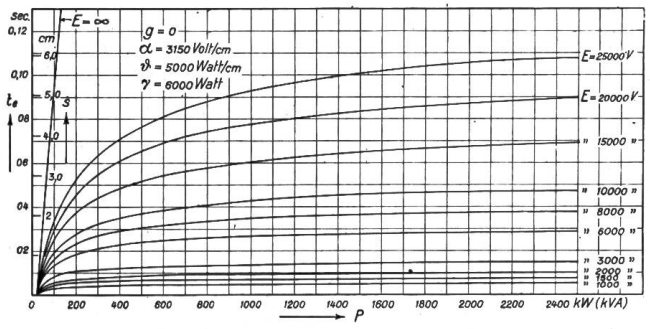


Fig. 18.

*) Siehe hierüber in Kapitel IV über die Untersuchungen an verschiedenen Elektrodenformen
**) Weitere Versuchskurven siehe Tafel II im Anhang.

tung, einfache Unterbrechung mit $v = 55$ cm/Sek. Schaltgeschwindigkeit. Es sei hier bemerkt, dass wir alle Versuche mit konstanter Schaltgeschwindigkeit mit letzterem Wert durchführten, bezw. auf diesen umrechneten, um für die Schaltzeiten t_e nicht zu kleine Werte zu erhalten. Die betriebsmässigen Schaltgeschwindigkeiten liegen meist höher (60—100 cm/Sek.) und demgemäss die Werte für t_e tiefer. Der gesetzmässige Zusammenhang wird eingehend in Kapitel IV behandelt. Wir lesen aus dem gewonnenen Verlauf der Lichtbogenlänge, dass diese schon von relativ kleiner Leistung an nur noch unwesentlich ansteigt, indem schon bei 1000 kW die Bogenlänge nur ca. 18% unter dem theoretischen Maximalwert liegt. Dieser berechnet sich mit den nachfolgend ermittelten Konstanten bei 8000 Volt zu ca. 2,5 cm. Praktisch ist dieser Wert nicht zu erreichen, weil bei sehr grosser Last die später zu behandelnde Induktivität der Maschinen nicht mehr zu vernachlässigen ist. Die Vergleichung der Versuchskurve mit dem theoretischen Verlauf zeigt, dass die entwickelte Theorie den Vorgang mit guter Annäherung wiederzugeben vermag. Wir können daher versuchen, aus der Kurve die uns noch fehlenden Konstanten zu ermitteln. Der Schnittpunkt der Kurve mit der Abszissenaxe muss nach obigem den Wert 4γ ergeben. In Fig. 19 liegen nun freilich gerade für dieses Leistungsbereich keine Messungen vor, indessen lassen die auf den Tafeln im Anhang wiedergegebenen (P, t_e)-Kurven für die Versuche mit Normalelektroden die Grösse 4γ zwischen 24000 und 35000 Watt eff. variieren. Wir rechnen für die Normalelektrode mit einem Mittelwert von $\gamma = 6000$ Watt (effektiv). Die Anfangsspannung g ist äusserst unsicher festzulegen. Wie im ersten Kapitel erwähnt, dürfte ihr Wert unter dem für Cu-Elektroden in Luft ermittelten liegen, (600 — 800 Volt) weil wir hier nicht mit der Oxidation der Elektrodenoberfläche zu rechnen haben. Damit tritt aber g gegenüber der Betriebsspannung V in den Hintergrund, zumal dessen Einfluss auf die Kurvenform, wie wir gleich sehen werden, von geringer Bedeutung ist. Nach Festlegung von γ und g können wir nun mit Hülfe der Gleichung (16) aus den Versuchswerten in Fig. 19 die übrigen Konstanten herausrechnen. Die Berechnungen sind ziemlich umständlich und zeitraubend; es mag genügen, wenn wir hier das Resultat festlegen, das folgende Werte ergab:

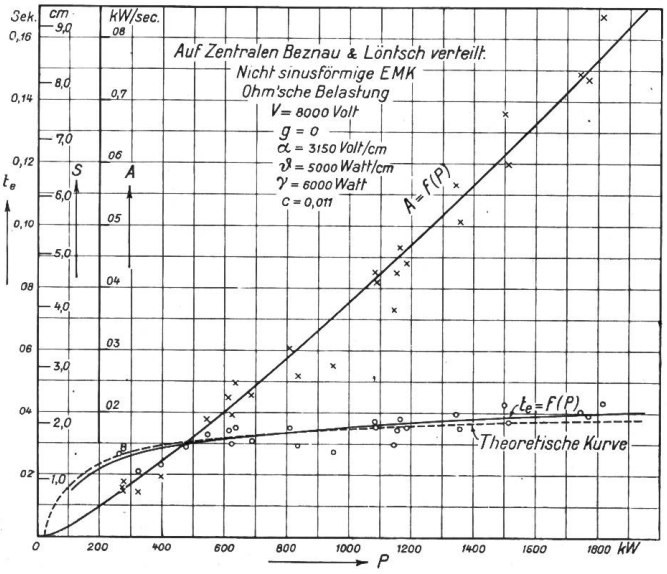


Fig. 19.

Normalelektrode, einfache Unterbrechung. Oel: Oil Comp., Druck und Temperatur normal.

Angenommen:	$g \sim o$ (< 100)	$g \sim 500$ Volt	Effektiv-Werte
Gemessen:	$\gamma = 6000$	$\gamma = 6000$ Watt	
Berechnet:	$a = 3150$	$a = 2900$ Volt/cm	
Berechnet:	$\delta = 5000$	$\delta = 4200$ Watt/cm	

Die Daten sind, wie oben gesagt, aus den Messungen mit der Betriebsspannung 8000 Volt und 55 cm/Sek. Schaltgeschwindigkeit hervorgegangen, nach früherem sind sie als Konstante des Schalters, bezw. der Elektroden zu bezeichnen und demnach von der Spannung unabhängig; inwieweit dies zutrifft, konnten wir leider nicht untersuchen, da der Betrieb der Kraftwerke natürlich nicht zuliess, eine andere Spannung einzustellen. Es mag vielleicht interessieren, die Konstanten eines Gleichstromlichtbogens zwischen Kohlenelektroden gegen-

über zu stellen. Diese sind in der Literatur schon längst bekannt und werden wie folgt angegeben*):

$$g = 39 \text{ Volt} \qquad \alpha = 20 \text{ Volt/cm}$$
$$\gamma = 12 \text{ Watt} \qquad \delta = 100 \text{ Watt/cm}$$

Nehmen wir nun in erster Annäherung an, dass die Veränderlichkeit der Konstanten innerhalb gewisser Grenzen der Betriebsspannung zu vernachlässigen sei, so können wir mit Hülfe der errechneten Werte die für die Normalelektrode gültigen Kurven für ihr ganzes Anwendungsbereich aufzeichnen. Fig. 18 ist auf diese Weise entstanden. Das Bild gibt die Veränderlichkeit von t_e mit P von $o \div 2500$ kW für verschiedene Betriebsspannungen von $o \div 25000$ Volt. Nachdem wir bei Anlass der Ableitung der analytischen Form der Stromkurve die Bedingung machten, dass sich die den Lichtbogen umgebende Gasmasse bis zum endgültigen Abreissen des Bogens im Gleichgewicht halte (eine Voraussetzung, die für normale Abschaltung zutrifft), so sind offenbar die Konstanten und die damit aufgebauten Beziehungen ein Charakteristikum der Elektroden allein. Sie sind ganz unabhängig davon, ob die Elektroden in einen Schalter höherer oder kleinerer Betriebsspannung eingebaut sind, da die durch die verschiedenen Oelhöhen hervorgerufene Differenz im statischen Druck ohne nennenswerten Einfluss ist. Die nachfolgenden Untersuchungen sind daher in ihrem qualitativen Resultat von allgemeiner Gültigkeit, wobei die zahlenmässigen Angaben jeweilen eine gegebene Elektrodenkonstruktion kennzeichnen. Wir untersuchen nun weiterhin:

2. Wie verhält sich der Schalter, wenn er eine bestimmte Last unter verschiedenen Betriebsspannungen abzuschalten hat?

Ausgehend von der Bedingungsgleichung (7) erhalten wir nach V geordnet die Beziehung:

$$(V - g)^2 \{P - 4(\gamma + \delta \cdot s)\} - (V - g) P \cdot 2 \cdot s \cdot \alpha + P \cdot s^2 \cdot \alpha^2 = o \qquad (17)$$

woraus sich die Grenzbedingungen ableiten lassen:

$$V = o : s = \frac{P - 4\gamma}{4\delta}; \quad s = o : P = 4\gamma \text{ oder } V = g.$$

Die (V, t_e)-Kurve zeigt somit ähnlichen Charakter, wie der voran behandelte Fall, wo wir t_e in Abhängigkeit der Leistung aufzeichneten. *Die Abschaltzeit bezw. die Lichtbogenlänge wächst mit steigender Spannung ebenfalls asymptotisch einem endlichen grössten Wert entgegen, der durch die gegebene Abschaltleistung und die Konstanten des Schalters bedingt ist.* Die Kurven steigen umso steiler an, je grösser der Wert der Abschaltleistung ist. In Fig. 20 ist der Zusammenhang für verschiedene Abschaltleistungen als Parameter graphisch dargestellt, das Bild kann unter Führung obiger Grenzbedingungen ohne weitere Rechnungen aus der Kurvenschar in Fig. 18 umgezeichnet werden. Ihr Verlauf zeigt, dass die Lichtbogenlänge für grössere Leistungen nahezu proportional mit der Spannung wächst; im Gegensatz zum Fall der veränderlichen Belastung bei konstanter Betriebsspannung. Die Vergleichung der beiden Kurvenbilder lässt uns übersehen, wie sich die Lichtbogenlänge eines gegebenen Schalters ändert, wenn seine betriebsmässige Spannung oder seine betriebsmässige Abschaltleistung um einen gegebenen Prozentsatz vergrössert wird. Nehmen wir die betriebsmässigen Daten an zu:

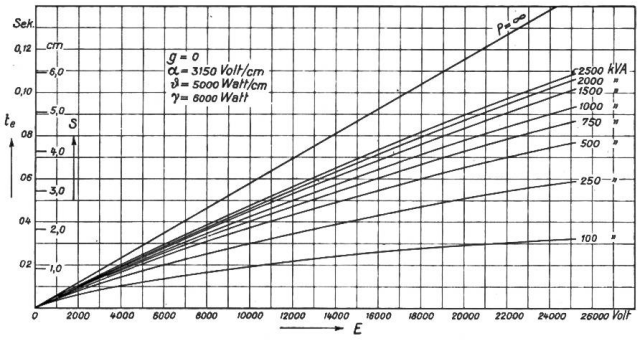


Fig. 20.

$$V = 8\,000 \text{ V}; \; P = 8\,000 \text{ V} \times 200 \text{ A} = 1\,600 \text{ kW}.$$

Aus Fig. 19 ergibt sich dann bei einfacher Unterbrechung mit $v = 55$ cm/Sek. eine Lichtbogenlänge von rund 2,04 cm entsprechend einer Abschaltzeit von $t_e = 0{,}037$ Sek. Ver-

*) Mrs. Ayrton: the electric arc.

wenden wir nun die Elektrode im Schalter höherer Spannung, oder belasten den Schalter mit höheren Leistungen, so steigt die Lichtbogenlänge gemäss den Kurven in Fig. 18 und 20 um Beträge, die in der nachfolgenden Tabelle aufgezeichnet sind.

Einpolige Abschaltung mit Normalelektrode auf ganze Zentrale verteilt.
8000 Volt, 1600 kW (einphasig) (berechnete Werte).

Steigerung der Spannung in % bei 1600 kW konstant	Steigerung der Lichtbogenlänge in %	Steigerung der Leistung in % bei 8000 V konstant.	Steigerung der Lichtbogenlänge in %
50	44	50	2.8
100	87	100	3.9
150	127	150	4.8
200	160	200	5.5

Diese Zusammenstellung zeigt schon, dass die verwendete Normalelektrode, die für 350 Amp. dauernde Belastung gebaut ist, bei einer normalen Betriebsspannung von 8000 Volt gegen Spannungssteigerungen bedeutend empfindlicher ist als gegen Belastungsänderungen. Der Grund liegt darin, dass wir uns in der (V, s)-Kurve bei 8000 Volt noch auf dem steil ansteigenden Ast befinden, während die Leistung von 1600 kW schon auf dem flach verlaufenden Teil der (P, s)-Kurve liegt, ein Charakteristikum aller gebräuchlichen Elektroden-Grössen und -Formen. Es liegt nun nahe die Beziehung zwischen der Abschaltleistung und den Betriebsspannungen für konstante Bogenlängen zu suchen. Wir bringen Gleichung (17) auf die Form:

$$(V - g)^2 \cdot (4\,\delta \cdot s + 4\,\gamma) - (V - g)^2 \cdot P + (V - g)\,P \cdot 2\,\alpha \cdot s - P \cdot \alpha^2 \cdot s^2 = o$$

und lesen hieraus für s = konstant einen hyperbolischen Zusammenhang zwischen P und V. Die nähere Untersuchung zeigt, dass für eine gegebene Bogenlänge s die asymptotischen Grenzwerte lauten:

$$P = \infty : V = \alpha \cdot s + g; \quad V = \infty : P = 4\,(\gamma + \delta \cdot s)$$

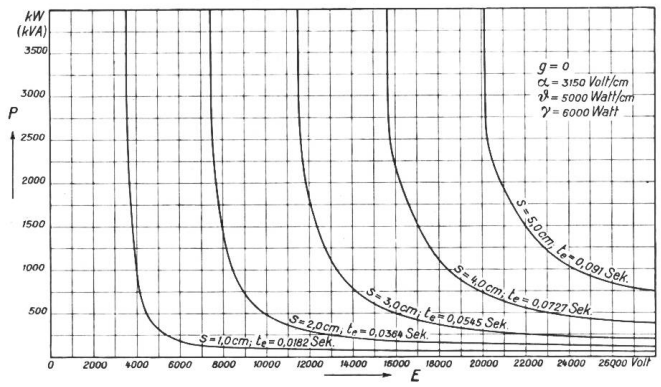


Fig. 21.

Setzen wir s = o, so gehen diese Ausdrücke in die unter 1. und 2. behandelten Grenzwerte über. In Fig. 21 sind für verschiedene Bogenlängen die Kurven für die Normalelektrode dargestellt. Das in obiger Tabelle zahlenmässig angedeutete Verhalten ist nun durch das graphische Bild allgemein zu überblicken. Wir sehen, wie bei kleineren Betriebsspannungen selbst für sehr grosse Leistungen mit relativ kleinen Bogenlängen auszukommen ist, während bei hohen Spannungen zur Einhaltung der gleichen Leistungen ganz bedeutende Lichtbogenlängen zu erwarten wären. Es ergibt sich daraus von selbst die Notwendigkeit der von den Konstruktionsfirmen bei Schaltern hoher Betriebsspannung schon längst eingeführten mehrfachen Unterbrechung zur Unterteilung des Lichtbogens. Wir möchten übrigens die angegebenen s-Kurven nicht ohne weiteres zahlenmässig auf sehr hohe Spannungen ausdehnen, weil wir vermuten, dass die zu Grunde liegenden Konstanten nicht über ein sehr grosses Bereich konstant bleiben, sondern sich vielmehr im Sinne kleinerer Lichtbogenlängen konstellieren. Die noch vorzunehmenden Versuche mit 27 000 Volt bezw. 45 000 Volt werden hierüber weiteres Material liefern. Desgleichen werden sich auch bei hohen Leistungen praktisch zahlenmässige Verschiebungen in unseren Angaben einstellen, weil sich für jene die Voraussetzung des absolut induktionslosen Stromkreises nicht mehr rekonstruieren lässt. Der Ein-

fluss der Phasenverschiebung im Kreis auf die vorliegenden Kurven wird im nächsten Abschnitt angegeben. Immerhin dürfen wir aus den abgeleiteten Kurven das Gesetz herauslesen, *dass ein Oelschalter niedriger Betriebsspannung relativ grössere Ueberlastungen abzuschalten vermag, ohne seine zulässige Lichtbogenlänge zu überschreiten, als der Oelschalter hoher Betriebsspannung.*

Indessen ist nicht die Lichtbogenlänge allein massgebend für die Beanspruchung des Schalters, sondern seine Schalterarbeit. Wir fragen daher weiterhin:

3. Wie wächst die Schalterarbeit mit steigender Abschaltleistung bei gegebener Betriebsspannung?

Es ist schon angedeutet worden, dass sich die im Ausdruck für die Schalterarbeit eingeführte Konstante C für die gegebene Elektrode nur innerhalb enger Grenzen mit den elektrischen Daten des Kreises verändere; wir haben hierüber einleitend im vorliegenden Kapitel zahlenmässige Angaben gemacht, aus denen sich das Gesagte herleitet. Es kann daher C trotz der theoretischen Veränderlichkeit in den nachfolgenden Rechnungen als Konstante eingeführt werden, womit wir zugleich den Nachteil einer weiteren Komplizierung der Ausdrücke vermeiden. Aus der Gleichung: $A = C \cdot J_o \cdot E \cdot t_e$ setzen wir t_e in Gleichung (17) ein, indem wir berücksichtigen, dass $s = v \cdot t_e$ und gewinnen nach einigen Umformungen:

$$A^2 \frac{v^2 \cdot \alpha^2}{C^2} - 2\,APV\frac{v \cdot \alpha}{C} - 4\,AV^2\frac{v \cdot \delta}{C} - 4\,V^2 P \cdot \gamma + V^2 P^2 = o \qquad (18)$$

als Beziehung zwischen der Schaltarbeit und der Abschaltleistung. Die Diskussion der Gleichung ergiebt für konstante Spannung einen mit P parabolischen Verlauf von A. Die Kurve geht für $P = 4\gamma$ durch Null und erreicht für $P = \infty$ einen unendlich grossen Wert, im Gegensatz zur Lichtbogenlänge, die wie auf Seite 170 erläutert asymptotisch einem endlichen Grenzwert zustrebt. In Fig. 19 ist der Verlauf der Schalterarbeit, wie er sich aus den dort beschriebenen Versuchen ergab, eingetragen. Für veränderliche Spannung V würde sich analog wie früher eine Kurvenschar aufzeichnen lassen.

4. Die Abhängigkeit der Schalterarbeit mit der veränderlichen Betriebsspannung für eine gegebene Abschaltleistung folgt gleicher Weise aus Gleichung (18). Interessant ist, dass hier der Grenzwert für unendlich grosse Spannung einen endlichen Wert von A zulässt, nämlich:

$$V = \infty : A = \frac{C \cdot P}{v} \cdot \left(\frac{P - 4\gamma}{4\delta}\right)$$

Die Kurve nähert sich in ähnlichem Verlauf wie die (V, s)-Kurve asymptotisch dieser maximalen Schalterarbeit. Die Theorie würde also ergeben, dass die Abschaltung einer gegebenen Leistung P bei unendlich grosser Betriebsspannung noch immer eine endlich grosse Schalterarbeit zur Folge hat, während umgekehrt die unendlich grosse Abschaltleistung bei jeder Spannung V grösser als g den Schalter mit unendlich grosser Schalterarbeit beansprucht. Dies hat vorerst rein theoretisches Interesse und darf jedenfalls zahlenmässig nicht ausgewertet werden; die Verhältnisse gewinnen aber an Bedeutung, wenn wir nach dem Zusammenhang zwischen Spannung und Abschaltleistung für eine gegebene (höchstzulässige) Schalterarbeit fragen. Die analytische Form ist durch Gleichung (18) gegeben, wobei A als Parameter der (P, V)-Kurvenschar auftritt. Die Grenzwerte bestimmen sich zu:

$$P = \infty : V = o; \quad V = \infty : P = 2\gamma + 2\sqrt{\gamma^2 + \frac{A \cdot v \cdot \delta}{C}}$$

Die hyperbolischen Kurven nähern sich demnach alle asymptotisch der Ordinate $V = o$, während für $V = \infty$ jede Kurve obigen Grenzwert erreicht. Fig. 22 gibt das Bild der Kurvenschar.

Wir sind damit der praktischen Frage der *Schalternormalisierung* einen Schritt näher gekommen, indem uns diese *Kurven gleicher Schalterarbeit* das Verwendungsbereich einer gegebenen Elektrodenkonstruktion umschreiben. Ist z. B. deren normale Schalterarbeit mit

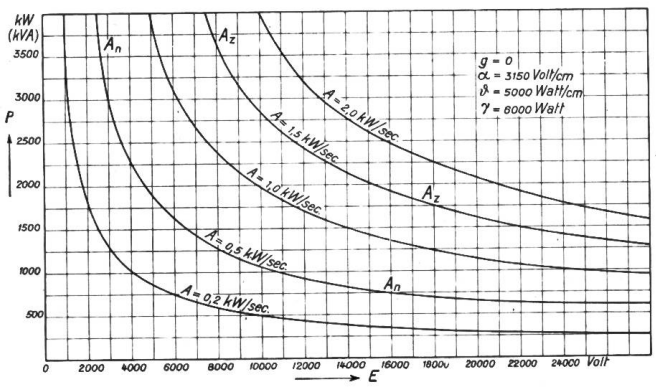


Fig. 22.

A_n bezeichnet und mit A_z der um einen bestimmten Prozentsatz höchstzulässige Wert, so gibt die (A_n)-Kurve das normale Verwendungsgebiet der Elektroden an und die (A_z)-Kurve die höchstzulässigen Grenzwerte bezüglich der Ueberlastung bezw. der Abweichung von der normalen Betriebsspannung. Vorerst ist zu ersehen, dass die Schalterarbeit für eine gegebene Abschaltleistung ungefähr proportional mit der Betriebsspannung wächst. Angenommen, ein Schaltermodell sei für eine einpolige Abschaltleistung von 4000 kW ($\cos \varphi = 1$) bei 2500 V Betriebsspannung gebaut. Die in Wärme übergeführte Schalterarbeit wird dann bei Verwendung der Normalelektrode als Abreisskontakt rund 0,5 kWSek. betragen. Das gleiche Modell würde bei gleicher Abschaltleistung bei 5000 Volt, 1,05 kWSek. $\cong$ 200 %; bei 7500 Volt, 1,5 kWSek. = 300 % und endlich bei 1000 Volt, 2,0 kWSek. = 400% der obigen Schalterarbeit in Wärme umsetzen.

Anderseits zeigt sich auch bezüglich der ansteigenden Belastung bei gegebener Betriebsspannung ungefähre Proportionalität, zumal bei niedriger Spannung. Immerhin kommen wir auch hier zum Schluss, *dass ein Oelschalter mit gleichem Abreisskontakt bei niedriger Betriebsspannung relativ grössere Ueberlastungen abzuschalten vermag, ohne seine zulässige Schalterarbeit zu überschreiten, als der Oelschalter hoher Betriebsspannung.* Wir geben zur zahlenmässigen Erläuterung noch folgende Zusammenstellung, die freilich des engen Verwendungsbereichs unseres Zahlenmaterials wegen, diese Verhältnisse nicht sehr ausgeprägt erscheinen lässt.

Einpolige Abschaltung mit Normalelektrode, konstante Schalterarbeit, ohm'sche Belastung, (gerechnete Werte).

Schalterarbeit 0,5 kWSek. = . . .	100 %	200 %	300 %	400 %
Abschaltleistung in % bei 8000 V .	100	186	284	435
Abschaltleistung in % bei 24000 V .	100	176	224	280

Wenn wir im Interesse der Betriebssicherheit für jeden Schalter ein gleiches Mass von Sicherheit bezüglich der höchstzulässigen Schalterarbeit fordern, so liesse sich ein und dieselbe Abreiss-Elektrode nur innerhalb gewisser Grenzen der Betriebsspannung bezw. der Abschaltleistung verwenden; innerhalb dieses Bereichs sind aber dann die Differenzen unbedeutend, so dass man daran denken könnte, auf Grund der angegebenen Kurven gleicher Schalterarbeit eine Serieneinteilung der Oelschalter aufzubauen. Die Ausführung moderner Konstruktionen in Hochspannungsölschaltern zeigt übrigens bereits die Verwendung normalisierter Elektroden, soweit die Bedingung der mit Sicherheit zu ertragenden höchstzulässigen Erwärmung der dauernd stromführenden Teile des Schalters nicht zu Sonderkonstruktionen führt.

Wir bezwecken mit diesen kurzen Erörterungen vorerst lediglich auf die Möglichkeit einer, auf Grund unserer Studien aufzubauenden Systematisierung der Schaltertypen hinzuweisen. Wir hoffen nach erledigtem zweiten Teil der Versuche eingehend hierauf zurückkommen zu können.

B. Die Veränderlichkeit der Schalterarbeit im induktiven Stromkreis.

In Gleichung (10) des vorangegangenen Abschnittes ist der Vergrösserung der Lichtbogendauer bei Anwesenheit von Induktivität im Stromkreis durch den Ansatz Rechnung getragen worden:

$$t_{r,L} = t_r (1 + K_1 \operatorname{tg} \varphi + K_2 \operatorname{tg} \varphi^2 + \ldots)$$

wobei wir über die Grösse der Konstanten und ihre Beziehung zu den übrigen Grössen des Stromkreises vorerst nicht unterrichtet sind. Zur experimentellen Bestimmung können wir so vorgehen, dass wir für den gegebenen Belastungsfall für verschiedene Werte der Phasenverschiebung die maximale Lichtbogendauer ermitteln und diese mit den entsprechenden Werten t_r im induktionslosen Stromkreis aufgenommen, in Beziehung bringen. Wir bezeichnen das experimentell einfach zu bestimmende Differenzglied $t_{r,L} - t_r$ mit Δt_e und schreiben damit Gleichung (10)

$$t_{r,L} = t_r + \Delta t_e$$

Δt_e ist der Mehrbetrag der Lichtbogendauer bei Anwesenheit von Induktivität im Stromkreis, sein Zusammenhang mit den gegebenen Belastungsverhältnissen ist nach (10) durch die Form ausgedrückt:

$$\Delta t_e = t_r (K_1 \operatorname{tg} \varphi + K_2 \operatorname{tg} \varphi^2 + \ldots)$$

womit nach ermitteltem Δt_e die Konstanten K_1, K_2 ... zu berechnen wären. Wir schreiben daher den Ansatz für $t_{r,L}$ in die endgültige Form:

$$t_{r,L} = t_r + t_r (K_1 \operatorname{tg} \varphi + K_2 \operatorname{tg} \varphi^2 + \ldots) \qquad (19)$$

Wir haben uns damit von der Vorstellung der graphischen Konstruktion der Lichtbogenlänge mittels der Charakteristiken in Fig. 4 losgelöst. Wir gewinnen in Zukunft die Veränderlichkeit der Lichtbogendauer mit irgend einer veränderlichen elektrischen Grösse des Stromkreises durch Superposition der theoretisch zu ermittelnden t_r-Kurve mit der Kurve des Zusatzgliedes Δt_e, das für den gegebenen Stromkreis durch die Konstanten K_1, K_2 .... gekennzeichnet ist.

1. Die Abschaltung einer Generatorbelastung bei konstanter Betriebsspannung.

(Verhältnisse des Generatorschalters.)

Der Oelschalter möge eine vorerst *rein ohm'sche Belastung* $P = J_o \cdot V$ in kW abschalten, wobei wir mit V die Klemmenspannung des Generators beim Strom J_o bezeichnen. Am Ende jeder Halbperiode zur Nullzeit des Stromes wird alsdann an den Klemmen des Schalters, bezw. des Generators, der Momentanwert der Leerlaufspannung E herrschen, sodass der Lichtbogenansatz mit dieser Spannung vor sich geht. Gemäss den früheren Erörterungen muss daher zur Ermittlung der maximalen Lichtbogenlänge die Leerlaufspannung in die Bedingungsgleichung eingeführt werden. Für die Berechnung von t_r tritt damit an Stelle der Abschaltleistung P die zugehörige kVA-Leistung $J_o \cdot E$. Wir treten dem Wesen des Abschaltvorgangs näher, wenn wir an Stelle der „Abschaltleistung P" die „unterbrobrochene Leistung $J_o \cdot E$" einführen. Wenn wir im Nachfolgenden trotzdem die Resultate in Funktion von P auftragen, so geschieht dies zum Zweck einer direkten Vergleichung mit den Kurven des vorangegangenen Abschnittes. Das Verhältnis der beiden Leistungen ist durch den cosinus der Phasenverschiebung gegeben, welche definiert ist durch

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{2 \pi f \cdot L_i}{r_a}$$

Die im vorangegangenen Abschnitt behandelte Berechnung der Schalterarbeit, bezw. der maximalen Lichtbogendauer, hat sich demnach auf den Fall bezogen, wo $J_o \cdot E$ identisch ist mit $J_o \cdot V$, d. h. wo $\operatorname{tg} \psi$, bezw. die innere Phasenverschiebung, = o ist.

Unsere nächste Aufgabe ist nun *die Bestimmung des Verlaufs der Lichtbogenlängen mit veränderlicher Abschaltleistung unter Voraussetzung konstanter Klemmenspannung.* Die Phasenverschiebung zwischen dem Strom und der Leerlaufspannung ist abhängig von der Grösse der Belastung. Nachdem wir diese als induktionslos voraussetzten, kann näherungsweise die innere Phasenverschiebung ψ des Generators durch den Quotient definiert werden: $\operatorname{tg} \psi = \frac{J_o \cdot x_a}{V}$ wobei wir unter x_a die totale Induktanz des Ge-

nerators verstehen. Wir ersetzen J_o durch den Ausdruck $J_o = \frac{P}{V}$ und gewinnen für die Lichtbogenlänge:

$$t_{r,L} = t_r + t_r \left\{ K_1 \left(\frac{P}{V^2} \cdot x_a \right) + K_2 \cdot \left(\frac{P}{V^2} \cdot x_a \right)^2 + \ldots \right\} \tag{20}$$

Die Zeiten t_r ermitteln sich hiebei für jede Grösse der unterbrochenen kVA-Leistung gemäss den Gleichungen des vorangegangenen Abschnittes. Ist für die gegebene Elektrode die Schar der t_r-Kurven bekannt, wie durch Fig. 18 z. B., so kann für die gegebene Maschine der für sie charakteristische t_r-Verlauf unter Berücksichtigung der Beziehung zwischen $J_o \cdot E$ und P bei konstanter Klemmenspannung leicht graphisch gewonnen werden. Der Verlauf von $t_{r,L}$ ergibt sich dann durch Superposition der so ermittelten t_r-Kurve mit der Kurve des Zusatzgliedes Δt_e. In Fig. 23 sind die experimentell bestimmten Verhältnisse für Maschine 11, 8 000 Volt Betriebsspannung bei einpoliger Abschaltung mit Normalelektroden, dargestellt. Das Bild lässt nun in übersichtlicher Weise den vielleicht etwas verwickelt scheinenden gedanklichen Aufbau unserer Theorie erkennen. Die mit $t_{r,o}$ bezeichnete Kurve zeigt den Anstieg der Lichtbogendauer mit der unterbrochenen Leistung für den induktionslosen Kreis, würde also den Fall wiedergeben, wo der Spannungsanstieg und damit die innere Phasenverschiebung in der Maschine zu vernachlässigen wären, also den Fall der sehr grossen Zentrale. Die zugehörigen Werte haben wir, wie im vorangegangenen Kapitel erläutert, versuchsmässig ermittelt und in diese Figur herübergenommen. Die Berücksichtigung des Spannungsanstiegs ε führt zur eigentlichen t_r-Kurve, die um einen entsprechenden Betrag höher verläuft als erstere. Durch Zusammensetzung mit der Δt_e-Kurve, die der Beeinflussung der Phasenverschiebung Rechnung trägt, gelangen wir endlich zum wirklichen Verlauf der Lichtbogenlänge $t_{r,L}$. In Fig. 23 ist der Verlauf von Δt_e rückwärts aus den Versuchswerten konstruiert worden, um die Konstanten $K_1, K_2 \ldots$ gewinnen zu lassen. Bevor wir jedoch hierauf näher eintreten, sei der gewonnene Einblick in die Beeinflussung des Lichtbogens durch die Phasenverschiebung näher diskutiert. Das Bild lässt erkennen, dass der analytische Ausdruck für den Verlauf von Δt_e gemäss Gleichung (19) die wirklichen Verhältnisse wiederzugeben vermag. Δt_e nimmt mit wachsender Leistung sehr rasch grössere Werte an, sodass die resultierenden Bogenlängen die entsprechenden Werte des induktionslosen Stromkreises im Gebiet der Ueberlastung der Maschine bereits um das Doppelte übersteigen. In

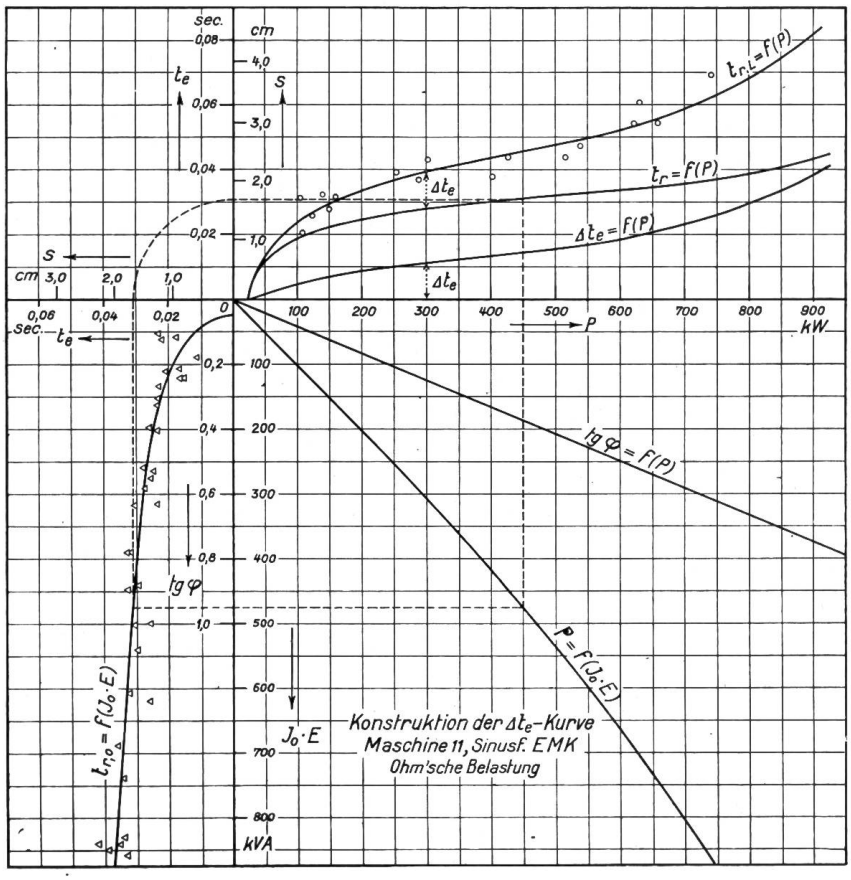


Fig. 23.

den Grössen K_1, K_2 . . . sind für die gegebene Maschine vermutlich auch Konstanten des Schalters eingeschlossen. Indessen sind diese offenbar nicht von wesentlicher Bedeutung auf den Verlauf der Δt_e-Kurve, indem die auf Tafel III zusammengestellten Messergebnisse mit der gleichen Maschine 11 und verschiedenen Elektroden erkennen lassen, dass sich bei grösseren Leistungen, soweit sie als normale Abschaltleistung bei konstanter Betriebsspannung in Frage kommen, für die untersuchten Kontakte nahezu die gleichen Lichtbogenlängen ergeben. Wir haben hier der Einfachheit halber die Δt_e-Werte aus der zur Elektrode gehörenden t_r-Kurve konstruiert, wie solche auf Tafel II niedergelegt sind; haben also dem Spannungsanstieg in der Maschine keine Rechnung getragen, da wir hier nur eine gegenseitige Vergleichung erzielen.

Interessant ist nun die Mitwirkung des Generators am Verlauf von Δt_e. In (19) ist dieser durch seine totale Induktanz x_a vertreten, welche annähernd ein Mass des Spannungsanstiegs bei Entlastung bedeutet. Δt_e ist offenbar umso grösser, je grösser dieser für den betr. Generator gewählt werden musste. Es müssen sich daraus z. B. besonders ungünstige Verhältnisse für Turbogeneratoren herleiten. Unsere Versuchsmaschine nähert sich diesem Fall, in dem infolge der einphasigen Belastung eine relativ grosse Induktanz resultierte. Zahlreiche Messungen ergaben für Maschine 11 bei Belastung einer Phase einen Mittelwert für x_a von 53 Ω. Unsere Versuchsresultate illustrieren daher die Verhältnisse einer Maschine relativ grossen Spannungsabfalls. Wir folgern daraus das interessante Gesetz, *dass eine Maschine eine gegebene Leistung bei konstanter Betriebsspannung mit umso grösserer Bogenlänge abschaltet, je grösser die Spannungsänderung des Generators gewählt wurde.*

Parallel arbeitende Maschinen können wie eine grosse Einheit entsprechend kleinerer Induktanz betrachtet werden, in welchem Fall sich infolge der kleineren Werte in der Zusatzkurve geringere Lichtbogenlängen ergeben. In Fig. 24 sind den Messungen an Maschine 11 bei 3000 Volt Spannung die Versuchswerte der gleichen Serie an den parallel arbeitenden Maschinen 11 und 9 gegenübergestellt. Wie ersichtlich, verringern sich für gleiche Abschaltleistungen die Lichtbogenlängen auf nahezu die Hälfte der Werte beim Betrieb mit einer Maschineneinheit. Die Vergleichung der beiden Versuchskurven zeigt nebenbei bemerkt genau gleiche Werte von $t_{r,L}$ für gleiche innere Phasenverschiebung in den zwei Betriebsfällen (beim Betrieb mit zwei Maschinen bei doppelter Leistung). Wir schliessen daraus gemäss Gleichung (19), dass sich die t_r-Werte trotz Verdoppelung der Leistung gleichgeblieben sein müssen. Dies trifft für den (t_r, P)-Verlauf in Fig. 18 bei 3000 Volt auch beinahe zu; ein indirekter Beweis für die annähernde Richtigkeit dieser theoretisch berechneten Kurven. Der Grenzfall $x_a = o$ einer Gruppe gleicher, parallel arbeitender Generatoren führt auf die Verhältnisse des vorangegangenen Kapitels, der unendlich grossen Zentrale, indem nach Gleichung (20) $\Delta t = o$ wird. Wir ziehen aus obigem den weiteren Schluss, *dass eine gegebene Abschaltleistung bei konstanter Betriebsspannung eine umso kleinere Lichtbogenlänge zur Folge hat, je grösser die Zahl der die Leistung übernehmenden Maschineneinheiten gewählt wird.*

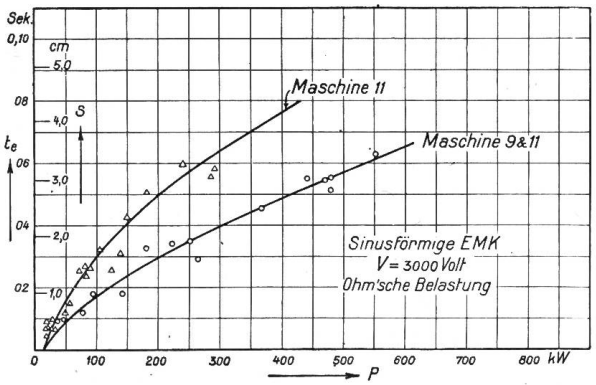


Fig. 24.

Die bis anhin gewonnenen Versuchsresultate mit ohm'scher Belastung der Maschine lassen die theoretisch abgeleiteten Ansätze als zulässig erscheinen, sodass wir versuchen können, daraus Schlüsse über die *Verhältnisse bei induktiver Belastung herzuleiten,* die wir experimentell nicht im gleichen Umfang untersuchen konnten. Es interessiert vor allem der Fall, wo ein Generator oder eine Gruppe paralleler Einheiten bei konstanter Betriebsspannung eine veränderliche Belastung mit konstant gedachtem Leistungsfaktor $\cos \varphi_n$ im Netz zu übernehmen hat. Die Belastung sei gegeben durch:

$$P = J_o \cdot V \cdot \cos \varphi_n$$

Die totale Phasenverschiebung zwischen dem Strom und der Leerlauf-EMK schreibt sich gemäss dem vereinfachten Diagramm:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{J \cdot x_a + V \sin \varphi_n}{V \cos \varphi_n}$$

und nach Einführung der veränderlichen Abschaltleistung $P = J_o \cdot V \cdot \cos \varphi_n$:

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \varphi_n + \frac{P \cdot x_a}{V^2 \cos \varphi_n^2}$$

Der Verlauf der $t_{r,L}$-Kurve wird damit durch die Form gekennzeichnet:

$$t_{r,L} = t_r + t_r \left\{ K_1 \left(\operatorname{tg} \varphi_n + \frac{P \cdot x_a}{V^2 \cos \varphi_n^2} \right) + K_2 \left(\operatorname{tg} \varphi_n + \frac{P \cdot x_a}{V^2 \cos \varphi_n^2} \right)^2 + \ldots \right\} \qquad (21)$$

Die Werte von t_r bestimmen sich wie früher auf Grund der unterbrochenen kVA-Leistung ($J_0 \cdot E$) auf bekannte Weise. Die Gleichung (21) lässt erkennen, dass der Verlauf von $t_{r,L}$ qualitativ der gleiche geblieben ist; nur zeigt sich, dass schon eine kleine Phasenverschiebung im Netz infolge der Rückwirkung auf die innere Phasenverschiebung in der Maschine ein rasches Ansteigen der Δt_e-Kurve zur Folge haben muss. Die Nachprüfung dieser Beziehung durch den Versuch war uns bis heute nicht im vollen Umfange möglich, da wir in der uns zur Verfügung stehenden Drosselspule keine regulierbare Induktivität zur Konstanthaltung des Leistungsfaktors im Netz besitzen.

Wir können nun aber auf Grund der aus den Versuchskurven gewonnenen Δt_e-Werte die Verhältnisse doch zahlenmässig erläutern. Nach (20) schreibt sich der Ausdruck für Δt_e zu:

$$\Delta t_e = t_r \left\{ K_1 \cdot \left(\frac{P \cdot x_a}{V^2} \right) + K_2 \cdot \left(\frac{P \cdot x_a}{V^2} \right)^2 + \ldots \right\}$$

wobei der Ausdruck $\frac{P \cdot x_a}{V^2} = \operatorname{tg} \varphi$,

dem Phasenwinkel zwischen Strom und EMK. Aus den Versuchskurven lässt sich die Phasenverschiebung für jeden Wert von P berechnen, wenn man die Grösse der totalen In-

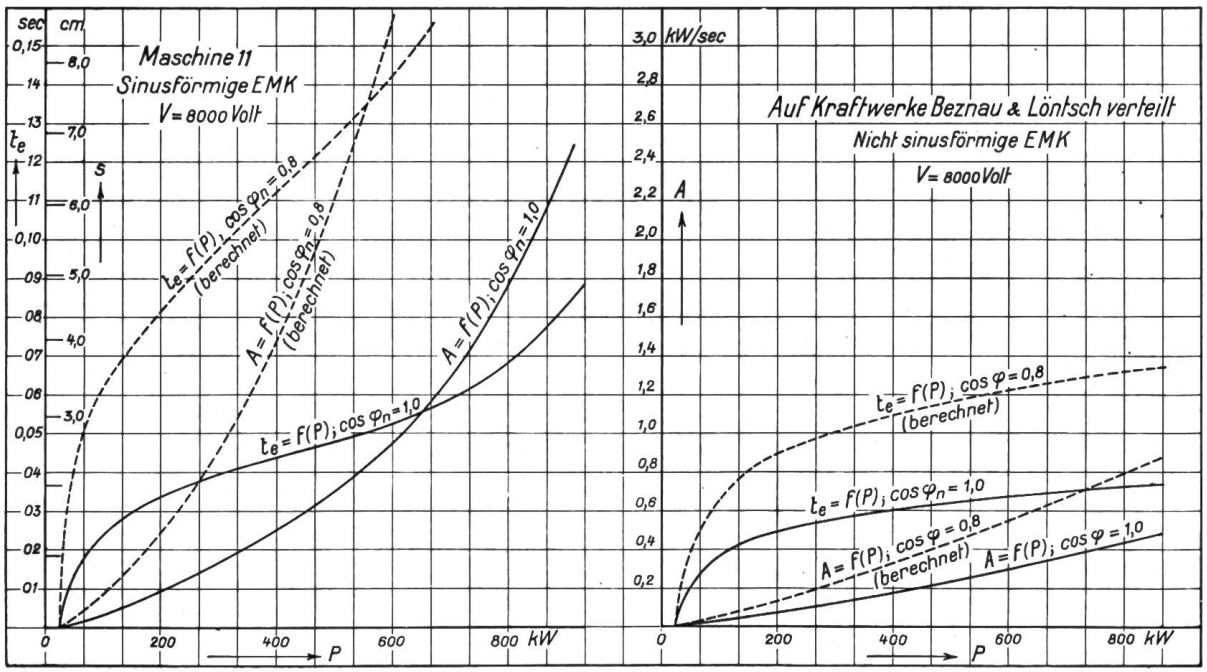


Fig. 25.

duktanz der Maschine kennt. Wir haben mit dessen Mittelwert von $x_a = 53\ \Omega$ in Fig. 27 links diese Beziehung zwischen Δt und $tg\,\varphi$ für verschiedene Betriebsspannungen graphisch dargestellt, vorerst interessiert uns nur der Fall der normalen Klemmenspannung 8000 Volt. Der Einfluss des Netzleistungsfaktors kann jetzt auf einfache Weise zahlenmässig bestimmt werden, indem wir nach Gleichung (21) die totale Phasenverschiebung ermitteln und mit Hilfe der erwähnten Kurve den Betrag für Δt_e bestimmen. t_r berechnet sich nach Massgabe der unterbrochenen kVA-Leistung, womit sich die wirkliche Lichtbogenlänge ergibt zu:

$$t_{r,L} = t_r + \Delta t_e$$

Auf diesem Weg sind in Fig. 25 links die Verhältnisse für eine Phasenverschiebung von $\cos\varphi_n = 0{,}8$ für Abschaltungen mit Maschine 11, 8000 V Betriebsspannung rechnungsmässig ermittelt, um wenigstens qualitativ den Einfluss der induktiven Belastung zu erläutern. Weitere Werte sind in folgender Zusammenstellung gegeben.

Einpolige Abschaltung an Maschine 11 bei 8000 Volt Betriebsspannung, Normal-Elektroden (berechnete Werte für $\cos\varphi < 1$).

Belastung in kW		200	400	600	750
$t_{r\,L}$ in Sec.	bei $\cos\varphi_n = 1$	0,0335	0,0435	0,0525	0,0620
	bei $\cos\varphi_n = 0{,}9$	0,0565	0,0780	0,0100	0,0130
	bei $\cos\varphi_n = 0{,}8$	0,0810	0,1120	0,1420	0,175

Die Zahlen können nicht Anspruch auf grosse Genauigkeit erheben, lassen aber immerhin erkennen, *dass für eine gegebene Abschaltleistung bei konstanter Betriebsspannung die Lichtbogenlängen umso grösser werden, je kleiner der Leistungsfaktor im Netz ist; die Verhältnisse werden besonders ungünstig, wenn sich die Leistung im Ueberlastungsbereich des Generators befindet.*

Aus Gleichung (21) lässt sich nun auch der Fall ableiten, wo in einer sehr grossen Zentrale eine relativ kleine induktive Belastung abgeschaltet wird. Hier ist die innere Phasenverschiebung ψ zu vernachlässigen, sodass sich die Gleichung schreibt:

$$t_{r,L} = t_r + t_r\{K_1 \cdot tg\,\varphi_n + K_2\,(tg\,\varphi_n)^2 + \ldots\}$$

wobei nun $tg\,\varphi_n$ für alle Belastungen als konstant zu betrachten ist. Die Zusatzkurve wird in diesem Fall nach Massgabe der veränderlichen $t_{r,0}$-Werte ansteigen. Bilden wir den Quotienten:

$$\frac{t_{r,L}}{t_r} = 1 + (K_1 \cdot tg\,\varphi_n + K_2\,tg\,\varphi_n^2 + \ldots)$$

so ist ersichtlich, dass dessen Wert unabhängig von der Grösse der Abschaltleistung ist, im Gegensatz zu den Verhältnissen beim Betrieb mit einer Maschine. Die Grösse des Klammerausdrucks kann aus dem in Fig. 27 berechneten Zusammenhang zwischen Δt_e und $tg\,\varphi$ gewonnen werden, indem wir noch die zugehörigen t_r-Werte (z. B. aus Fig. 23 für 8000 V) heranziehen und das Verhältnis $\frac{\Delta t_e}{t_r}$ bilden. In der nachfolgenden Tabelle sind auf diese Weise den Lichtbogenlängen bei Abschaltung einer bestimmten Leistung bei $\cos\varphi_n = 1$ die entsprechenden Werte für $\cos\varphi_n = 0{,}8$ gegenüber gestellt.

Einpolige Abschaltung a. d. Sammelschienen der Kraftwerke Beznau-Löntsch bei 8000 Volt Betriebsspannung.

Normal-Elektroden (berechnete Werte für $\cos\varphi_n = 0{,}8$).

Belastung in kW		100	250	500	750	1000
Lichtbogenlänge in cm	$\cos\varphi_n = 1$	1,00	1,46	1,73	1,93	2,10
	$\cos\varphi_n = 0{,}8$	1,82	2,66	3,15	3,51	3,82
Zuschlag in %		ca. 82				

Die Verhältnisse sind übrigens auch in Fig 25 rechts graphisch dargestellt. Der Zuschlag für $\cos \varphi_n = 0{,}8$ beträgt demnach beim Betrieb mit den zwei Kraftwerken für die betrachteten Leistungen ca. 82 %. Die obige Tabelle zeigt, dass die Abschaltung mit nur einer Maschine bei Normal-Last (600 kW) rund 270 % beträgt. Es ergibt sich daraus die Folgerung, *dass ein Feeder-Schalter einer grossen Zentrale bei gleicher Abschaltleistung in weiteren Grenzen überlastbar ist als der Generatorschalter unter gleichen Bedingungen.*

Die behandelte Veränderlichkeit der Lichtbogenlänge (bezw. Lichtbogendauer) mit den elektrischen Daten des Stromkreises schliesst zugleich *die Verhältnisse der Schalterarbeit* in sich ein. Nur ist nun diese besser nicht mehr mit der Abschaltleistung in Beziehung zu bringen, sondern mit der unterbrochenen Leistung $J_0 \cdot E$ in kVA, indem der Endzustand durch die Leerlaufspannung E gekennzeichnet ist. Wir schreiben in Uebereinstimmung mit Gleichung (12)

$$A = C \cdot J_0 \cdot E \cdot t_e \quad \text{in kWSek.}$$

wobei sich C wie angegeben aus den Werten p und q des Oszillogramms ermittelt. Nachdem das Produkt $J_0 \cdot E$ eine kVA-Leistung bedeutet, spielt C die Rolle eines Leistungsfaktors, der definiert werden kann als Verhältnis der im Schalter in Wärme übergeführten Wattenergie zum Produkt: unterbrochene kVA-Leistung mal Lichtbogendauer.

Wie früher nachgewiesen, stellt sich die Konstante C nach unseren Messungen im induktiven Stromkreis etwas höher ein, wobei über das praktische Leistungsbereich der Maschine mit einem Mittelwert gerechnet werden kann. Mit veränderlicher Abschaltleistung wird daher die Schalterarbeit nach Massgabe des Produkts $J_0 \cdot E \cdot t_e$ ansteigen. Wir zeichnen die unterbrochene Leistung in Funktion der Abschaltleistung auf gemäss der Beziehung $P = J_0 \cdot E \cdot \cos \varphi$ und können durch Heranziehung der $t_{r,L}$-Kurve die Veränderlichkeit der Schalterarbeit graphisch darstellen. Ihr Verlauf wird ähnlich der A-Kurve, welche wir für den Fall des induktionslosen Kreises abgeleitet und experimentell ermittelt haben (siehe Fig. 19), nur wird sie der charakteristischen Form der $t_{r,L}$-Kurve gemäss im Gebiet der Ueberlastung sehr rasch ansteigen. In Fig. 25 ist der Verlauf für Maschine 11, 8000 Volt Betriebsspannung, Abschaltung mit Normalelektroden eingezeichnet. Eine Vergleichung mit den Werten für induktionslosen Stromkreis zeigt den grossen Einfluss der inneren Phasenverschiebung der Maschine, was auch in der folgenden Tabelle zum Ausdruck kommt.

Normale einphasige Maschinenleistung: 600 kW = 100 %, cos φ = 1 im Netz, Betriebsspannung 8000 Volt; einpolige Abschaltung.

Versuchswerte.						
Abschaltleistung in % der Normalen	25%	50%	75%	100%	125%	150%
Auf Beznau-Löntsch verteilt, Schalterarbeit in kWSek.	0,05	0,13	0,21	0,30	0,40	0,50
Auf 1 Generator verteilt, Schalterarbeit in kWSek.	0,12	0,33	0,60	0,95	1,48	ca. 2,40
Prozentueller Mehrbetrag	140	154	186	217	270	ca. 380

Auf Seite 177 ist der *Einfluss der induktiven Netzbelastung* auf Grund der aus den Versuchen hergeleiteten theoretischen Erwägungen diskutiert; es ergab sich der Schluss, dass dieser im Sinne eines raschen Anstiegs der Lichtbogenlängen mit der Abschaltleistung wirkt. Es ist hiefür die rechnungsmässige Kurve für 8000 Volt Betriebsspannung aufge-

stellt worden (Fig. 25), mit welcher sich nun auch die entsprechende Veränderlichkeit der Schalterarbeit gewinnen lässt. Die zusätzliche Lichtbogenlänge bezw. Schalterarbeit beim Betrieb mit beiden Kraftwerken kann mit Hülfe der dort ermittelten Werte berechnet werden, sodass sich daraus wieder der Einfluss der Induktanz des Generators herauslesen lässt. Die nachfolgende Zusammenstellung zeigt die zahlenmässigen Verhältnisse bei $\cos \varphi_n = 0{,}8$.

Einphasige Maschinenleistung 600 kW = 100 % cos φ = 0,8 im Netz.
Normale Betriebsspannung 8000 Volt, einpolige Abschaltung (berechnete Werte).

Abschaltleistung in % der Normalen	25%	50%	75%	100%	125%	150%
Auf Beznau-Löntsch verteilt, Schalterarbeit in kWSek. ca.	0,09	0,23	0,34	0,55	0,73	0,92
Auf 1 Generator verteilt, Schalterarbeit in kWSek. ca.	0,30	0,90	1,82	3,14	5,00	8,00
Prozentueller Mehrbetrag ca.	233	291	435	471	585	770

Aus den kurzen Zusammenstellungen ist ersichtlich, dass wir bezüglich der Veränderlichkeit der Schalterarbeit eines Generatorschalters die gleichen Gesichtspunkte geltend machen können, wie wir solche für die Lichtbogenlänge ableiteten. Wir stellen daher auf Grund der gewonnenen Beziehungen folgende Gesichtspunkte über die Abschaltung einer Generatorbelastung auf:

Die Lichtbogenlänge bezw. die Schalterarbeit eines Generatorschalters oder eines Gruppenschalters paralleler Einheiten ist nicht allein abhängig von der Grösse der Abschaltleistung und den Konstanten des Schalters, sondern auch beeinflusst durch die Konstanten der abgeschalteten Maschine. Die Schalterarbeit ist für die gegebene Abschaltleistung umso grösser, je grösser die totale Induktanz des Generators (der Spannungsabfall) gewählt wurde. Der Einfluss wächst mit steigender Abschaltleistung, besonders im Gebiet der Ueberlastung der Maschine. Die Lichtbogenlänge und Schalterarbeit werden für die gegebene Abschaltleistung umso kleiner, je grösser die Anzahl der parallel arbeitenden Generatoren ist, der kleinste Wert wird erreicht, wenn die Belastung von einer unendlich grossen Zentrale übernommen wird. Bei induktiver Belastung summiert sich zur Wirkung der Maschineninduktivität der Einfluss der Phasenverschiebung im Netz derart, dass bei gleicher Maschine und Abschaltleistung die Schalterarbeit mit der Netz-Phasenverschiebung rasch anwächst.

Wir möchten jetzt schon auf den Einfluss des Spannungsabfalls hinweisen, der vielleicht mit gewissen heute geltenden Anschauungen über die Abschaltung gefährlicher Leistungen im Betrieb in Widerspruch steht. Die Zulassung eines grösseren Spannungsabfalls der Generatoren scheint vom Standpunkt des Apparatenkonstrukteurs aus insofern wünschenswert, als damit die Abschaltleistung eine gewisse Reduktion erfährt und bei kleinerer Spannung abgeschaltet wird. Unsere Formel (20) auf Seite 174 lehrt nun gerade das Gegenteil, indem einerseits durch die grössere Induktanz der Maschine die Werte der Zusatzkurve eine Vergrösserung erfahren und andererseits im Ausdruck für die Phasenverschiebung diese trotz kleinerer Leistung infolge des quadratischen Gliedes im Nenner gewachsen ist. Wir haben diese Tatsache im folgenden Abschnitt über die Abschaltung im Kurzschluss ausführlich durch Versuche belegt, an welchem Ort die Frage auch näher beleuchtet werden soll.

2. Die Abschaltung einer Generator-Leistung bei konstanter Erregung und die Verhältnisse beim Unterbrechen eines Kurzschlusses.

Die bis anhin behandelten Beziehungen betrachten die Veränderlichkeit der Schalterarbeit mit der Grösse der Abschaltleistung bei konstanter Betriebsspannung, umfassen also den Fall der Abschaltung einer betriebsmässigen Generator- bezw. Zentralen-Belastung. Hat indessen der Schalter kurzschlussähnliche Ueberlastungen zu unterbrechen, so ist die Voraussetzung unveränderter Klemmenspannung nicht mehr erfüllt; dies trifft besonders für den Fall des Kurzschlusses zu, wo die Klemmenspannung dem Werte Null zustrebt. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Schalterbeanspruchung hiebei ihr Maximum erreicht; es ist daher das Studium dieser Verhältnisse vom Standpunkt unseres Kommissionsprogramms aus von besonderem Interesse. Die nachfolgenden Untersuchungen werden erkennen lassen, dass nun gerade im vollständigen Kurzschluss der Abschaltvorgang einem Unendlichkeitswert zustrebt, sodass die Resultate sog. Kurzschlussversuche, als in dieses unstabile Gebiet fallend, hierüber kein eindeutiges Kriterium zulassen; vielmehr kann der Einblick in die Verhältnisse dieses Grenzfalls nur durch sukzessive Annäherung gewonnen werden. In diesem Sinne haben wir auch unsere diesbezüglichen Untersuchungen durchgeführt, freilich ohne den theoretischen Erwägungen, besonderer Verhältnisse wegen, mit dem Experiment bis in das Gebiet des Kurzschlusses folgen zu können.

Wir benötigen als erste Grundlage *die Veränderlichkeit der Schalterarbeit bezw. Lichtbogendauer mit der Generatorspannung.*

Die gesuchten Beziehungen sind bereits in Gleichung (20) ausgedrückt, diese lautet:

$$t_{r,L} = t_r + t_r \left\{ K_1 \left(\frac{P}{V^2} \cdot x_a \right) + K_2 \left(\frac{P}{V_2} \cdot x_a \right)^2 + \ldots \right\}$$

Wir denken uns die Abschaltleistung P konstant und fragen nach der Veränderlichkeit von $t_{r,L}$ mit V; wobei uns vorerst unbekannt, ob und in welcher Abhängigkeit die Konstanten K_1, K_2 . . . mit der Spannung stehen. Ohne hierüber allzu spekulativ vorgehen zu müssen, können uns doch folgende Ueberlegungen den Weg weisen. Gemäss früheren Eröterungen muss die Grösse Δt_e für $\operatorname{tg} \varphi = 0$, in unserem Fall $\frac{P \cdot x_a}{V^2} = 0$, zu Null werden, indem uns diese den Zuschlag an der Lichtbogenlänge bei Anwesenheit von Induktivität im Stromkreis bedeutet. Bei konstantem P ist dieser Grenzfall theoretisch nicht erzielbar, indessen ergibt sich für V = max. (grösste Erregung) bei kleinen Leistungen ein minimaler Wert für φ, der z. B. oszillographisch nicht mehr nachweisbar ist. Umgekehrt soll Δt_e bei $\varphi = 90^0$ unendlich werden, um der früher aufgestellten Forderung der unendlich grossen Bogenlänge zu genügen. Für P = konstant ist die Bedingung bei V = 0 erfüllt (Kurzschluss mit P). Berücksichtigt man, dass t_r in beiden Grenzfällen einen endlichen Grenzwert besitzen muss, so können die Konstanten obiger Gleichung nur innerhalb folgender zwei Möglichkeiten mit V veränderlich sein, entweder K_1, K_2 . . . sind von V unabhängig, oder K_1, K_2 . . . wachsen nach einem vorerst unbekannten Gesetz mit sinkendem V. Diese Erkenntnis genügt, um aus (20) zu ersehen, dass bei konstanter Abschaltleistung der Klammerausdruck $\left(= \frac{\Delta t}{t_r}\right)$ mit zurückgehender Klemmenspannung rascher als linear ansteigt. Nachdem endlich aus Fig. 20 folgt, dass sich t_r bei konstantem P nahezu direkt proportional mit der Spannung bewegt, müssen wir die Folgerung ziehen, dass $\frac{\Delta t}{t_r}$ schneller wächst, als die t_r-Werte mit der Spannung zurückgehen; d. h. *die Lichtbogenlänge wird für die gegebene Abschaltleistung eines Generators umso grösser, je kleiner seine Betriebspannung eingestellt wird.*

Dieses auf den ersten Blick paradox scheinende Gesetz bestätigt sich in vollem Umfang durch die Versuche. Auf Tafel IV sind die Messungen an Maschine 11 mit den

Klemmenspannungen 3000 Volt und 6000 Volt unter Anwendung verschiedener Elektroden zusammengestellt. Die Gegenüberstellung mit den Resultaten der 8000 Volt-Serie ist in nebenstehender Figur 26 für die Normalelektrode durchgeführt; wir entnehmen den Versuchskurven zur weiteren Illustration des Gesagten folgende Zahlenwerte.

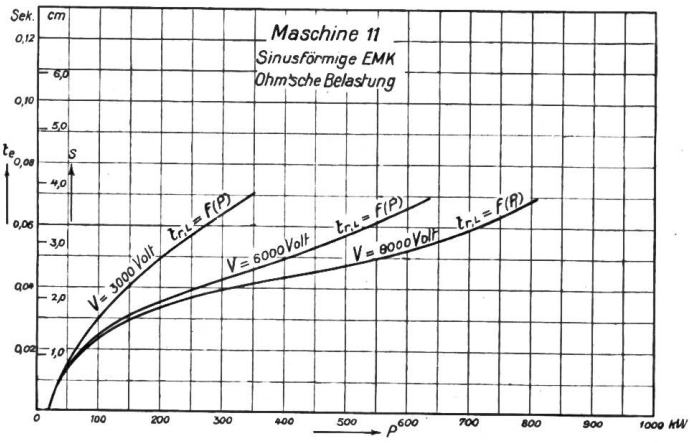


Fig. 26.

Einpolige Abschaltung an Maschine 11; v = 55 cm/Sek. mit Normalelektroden, ohm'sche Belastung. (Versuchswerte.)

Abschaltleistung in kW	Lichtbogendauer in Sek. bei der Betriebspannung:		
	3000 Volt	6000 Volt	8000 Volt
100	0,0300	0,0245	0,0230
250	0,0570	0,0390	0,0368
350	0,0705	0,0460	0,0413
500	0,0948	0,0570	0,0473
600	0,1150	0,0653	0,0524

Die gewonnene Tatsache lässt bereits eine erste Vermutung über die Verhältnisse im Kurzschluss ziehen. Da dieser durch die rasch ansteigende Belastung bei gleichzeitigem Spannungsrückgang gekennzeichnet ist, muss die Lichtbogenlänge notwendigerweise einem Maximum entgegengehen. Um die Gesetzmässigkeit der Erscheinung zu erforschen, könnten wir, wie früher angegeben, für jede Betriebsspannung aus den t_r- und $t_{r,L}$-Kurven durch Bildung der Δt_r-Werte die Konstanten K_1, K_2 . . . berechnen; wie unsere Berechnungen

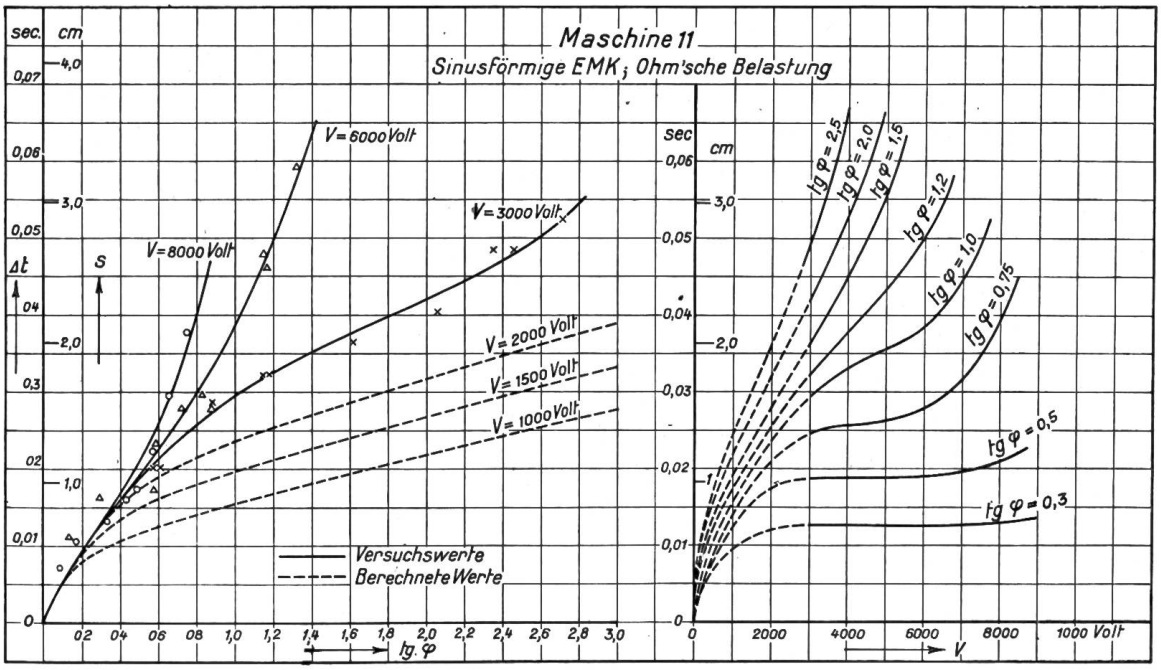


Fig. 27.

lehren, wachsen diese nach einem noch nicht analytisch festgelegten Gesetz mit kleinerer Spannung an. Indessen sind diese Rechnungen derart umständlich, dass wir hier vorziehen, den Zusammenhang vorerst rein graphisch festzulegen, zumal es uns zuerst darauf ankommt, die Verhältnisse qualitativ zu umschreiben. Wir bilden für jede Spannung gleicherweise wie auf Seite 177 für die 8000 Volt-Serie angegeben, den Verlauf von Δt_e in Funktion der Phasenverschiebung auf der linksliegenden Graphik in Fig. 27 und konstruieren hieraus die Veränderlichkeit von Δt_e mit der Spannung bei gegebener Phasenverschiebung als Parameter (rechtsstehende Graphik in Fig. 27). Durch die Wegleitung der experimentell ermittelten Δt_e-Kurven für 8000, 6000 und 3000 Volt war so mit ziemlich grosser Wahrscheinlichkeit durch Extrapolation ihr Verlauf auch für kleinere Spannungen aufzustellen, da in den Kurven $\Delta t = f(V)$ für alle Phasenverschiebungen als Parameter der Grenzwert für $V = 0$ zu Null wird. Damit konnte die Schar der $t_{r,L}$-Kurven für das ganze Spannungsbereich gewonnen werden, indem nun wieder rückwärts jeder Phasenverschiebung bei gegebener Klemmenspannung die entsprechende Abschaltleistung zugeordnet wurde. Die Figuren 28 und 29 illustrieren den Verlauf der Bogenlängen in Funktion der Abschaltleistung bezw. der Betriebspannung. Ersteres Bild zeigt besonders deutlich, wie die Lichtbogenlängen bei konstanter Leistung für kleine Betriebspannung sehr rasch ansteigen, um für $V = 0$ unendlich grosse Werte anzunehmen.

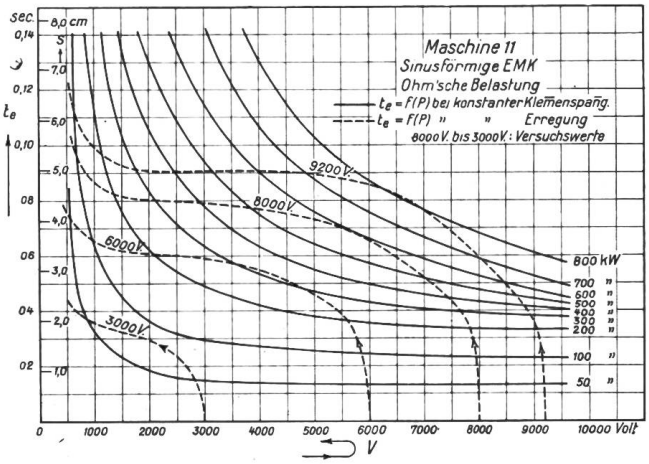


Fig. 28.

Wir haben mit diesem Material die Grundlage gewonnen zur Lösung unserer Hauptfrage: *wie verläuft die Lichtbogenlänge bei konstanter Maschinenerregung mit der Abschaltleistung?* Einleitend sei bemerkt, dass wir hier vorerst nur ohm'sche Belastungen ins Auge fassten, von der Erwägung ausgehend, dass der direkte Kurzschluss im gleichen Sinne aufzufassen ist. Vorerst muss bekannt sein, wie sich Spannung und Leistung der Maschine bei konstanter EMK verändern. Das Diagramm kann durch sukzessive Belastung des Generators auf bekannte Weise experimentell ermittelt werden. Wir haben in neben-

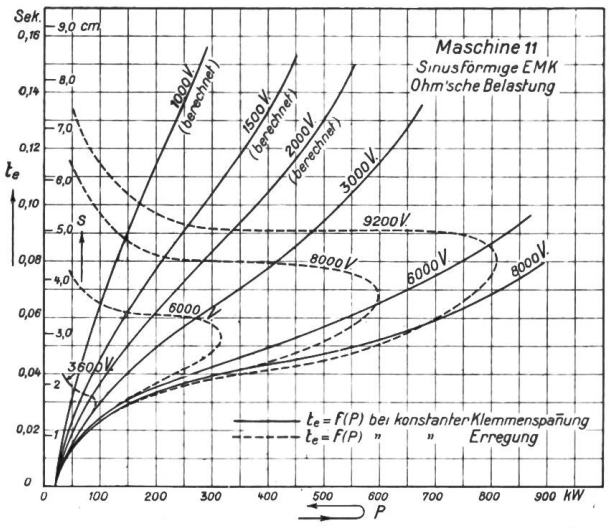


Fig. 29.

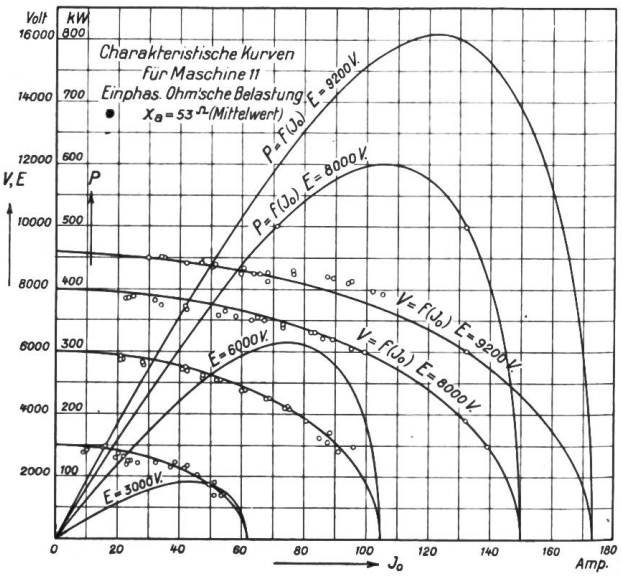


Fig. 30.

stehender Figur 30 für verschiedene Erregungen die Verhältnisse auf Grund von Messungen an Maschine No. 11 aufgezeichnet. Die Graphik gibt uns den Zusammenhang zwischen Abschaltleistung (ohm'scher Belastung) und zugehöriger Klemmenspannung mit ansteigendem Maschinenstrom. Mit Hülfe dieser Beziehungen haben wir dann auf Grund obiger Erörterungen für jeden Belastungsfall die zugehörige Abschaltbogenlänge in Figur 28 und 29 eingezeichnet. Die so entstandenen Umkehrkurven zeigen nun in sehr schöner Weise den Verlauf des Abschaltvorganges der Maschine mit ansteigender Belastung bei konstanter Erregung. Die Kurven folgen für kleinere betriebsmässige Ströme dem $t_{r,L}$-Verlauf für konstante Betriebsspannung, sie weichen indessen mit zunehmender Strombelastung immer mehr von dieser ab. Trotzdem die Klemmenspannung zurückgeht, nehmen die Bogenlängen stetig grössere Werte an als jene; eine Folge der anwachsenden Phasenverschiebung in der Maschine. Mit weiterer Steigerung der Stromstärke geht die Nutzleistung infolge des grossen Spannungsabfalls nach erreichtem Maximum auf Null zurück, die Bogenlängen steigen indessen noch weiter an, um von einer gewissen Spannung an sehr rasch einen sehr hohen, durch die Kurzschlussleitung bestimmten Wert zu erreichen. Die genaue Ermittlung dieses Grenzwertes entzieht sich der Rechnung, solange nicht das Gesetz der mit der Spannung veränderlichen Konstanten bekannt ist. Die graphische Konstruktion lässt indessen schon erkennen, dass wir auch in diesem Falle nicht zum Ziele gelangen würden, da im Bereich kleinster Klemmenspannung die Lichtbogendauer asymptotisch einem unendlich hohen Wert zustrebt. Der Abschaltvorgang spielt sich daher im vollständigen Kurzschluss in einem unstabilen und daher äusserst gefährlichen Gebiet ab. Dies lehren auch andernorts vorgenommene Kurzschlussversuche. Anderseits zeigt aber unser Bild in Figur 29, dass in unserem Fall schon bei Kurzschlusspannungen von wenigen hundert Volt die Lichtbogenlängen sich in einem wohl definierten endlichen Bereich bewegen, das der Rechnung und dem Versuch zugänglich ist und damit auch der systematischen Dimensionierung des Schalters. *Wir können uns die Bedingung einer endlichen Kurzschluss-Spannung bestimmter Grösse durch den Einbau eines Vorschaltwiderstandes schaffen, womit dieser den Schalter für die gegebene Kurzschlussleistung vom unstabilen Kurzschlussgebiet ausschliesst.*

Wie schon bemerkt, waren wir nicht in der Lage, Abschaltversuche im Kurzschlussgebiet des Versuchsgenerators durchzuführen, sodass wir die aufgestellten Beziehungen nicht im vollen Umfang durch das Experiment bestätigen können. Immerhin sind in Fig. 31 die Resultate von zwei Versuchsserien mit konstanter Erregung aufgezeichnet, die den Umkehrpunkt der charakteristischen $t_{r,L}$-Kurve deutlich aufweisen und daher den theoretisch ermittelten Verlauf als zutreffend erscheinen lassen. Es stellt sich nun die Frage auf, welche Veränderungen die Umkehrkurve erfährt, wenn wir die Abschaltungen an einer *gleichen Type grösserer Normallast* vornehmen.

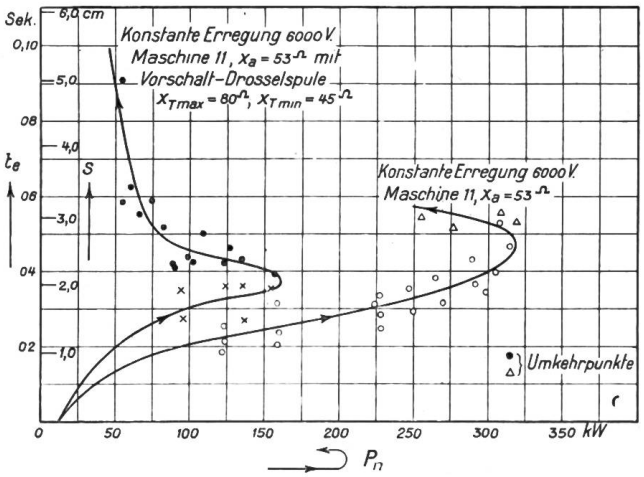


Fig. 31.

Die Belastbarkeit des Generators bei gegebener Erregung E ist durch die Grösse des Kurzschluss-Stromes gekennzeichnet, wobei $x_a = \frac{E}{J_k}$. Setzen wir diesen Ausdruck für die Induktivität in Gleichung (20) ein, so ergibt sich:

$$t_{r,L} = t_r \left\{ 1 + K_1 \cdot \frac{P \cdot E}{J_k \cdot V^2} + K_2 \cdot \left(\frac{P \cdot E}{J_k \cdot V^2} \right)^2 + \ldots \right\}$$

Berücksichtigt man, dass t_r mit ansteigendem P sehr langsam wächst (wir verweisen auf die Erörterungen auf Seite 185), so folgt aus obiger Gleichung, dass die wirkliche Licht-

bogenlänge für gleiches Verhältnis $\frac{P}{J_k}$ annähernd konstant bleibt. Die Kurvenscharen in Fig. 29 sind daher innerhalb gewisser Grenzen unabhängig von der Maschinenleistung, sie sind z. B. näherungsweise für eine Maschine doppelter Leistung gültig, wenn wir den Abszissenmassstab verdoppeln. Daraus entspringt die Folgerung, *dass die Lichtbogenlänge beim Abschalten einer relativen Generatorbelastung nahezu unabhängig ist von der absoluten Grösse der abgeschalteten Leistung.* Wir lassen zur Illustration des Gesagten in nachfolgender Tabelle einige Werte der Lichtbogenlängen bei kurzschlussähnlicher Belastung folgen, die auf Grund der t_r-Kurven in Fig. 19 und der Umkehrkurven in Fig. 29 berechnet worden sind. Die Angaben können als extrapolierte Werte keine grosse Genauigkeit aufweisen, dürften aber immerhin mit den andernorts experimentell ermittelten Daten näherungsweise übereinstimmen.

Lichtbogenlängen bei $v = 55$ cm/Sek. beim einpoligen Abschalten kurzschlussähnlicher Belastung verschiedener Generatoren (berechnete Näherungswerte).

E in Volt	J_k A	Abschalt-Strom J_A	t_r Sek.	$t_{r,L}$ Sek.	S cm
8000	150	137,5	0,035	0,079	4,350
8000	300	275,0	0,038	0,085	4,675
8000	450	412,5	0,040	0,090	4,950
8000	600	550,0	0,041	0,092	5,060
8000	750	687,5	0,041(5)	0,093	5,110
8000	1000	917,5	0,041(7)	0,093(4)	5,130

3. Die Verhältnisse mehrerer paralleler Einheiten und der Einfluss der Maschinen-Induktanz.

Durch die Scharen der $t_{r,L}$-Kurven konstanter Betriebspannung und konstanter Erregung, wie wir sie in Fig. 29 gewonnen haben, darf unsere vorliegende Aufgabe als allgemein gelöst betrachtet werden, indem damit das Verhalten eines gegebenen Oelschalters für alle möglichen Betriebsbedingungen eines Generators oder einer Gruppe paralleler Einheiten umschrieben ist. Wir gewinnen damit nun auch den Zusammenhang zwischen den Verhältnissen einer Maschine und der ganzen Zentrale. Diese kann wie eine grosse Einheit entsprechend kleiner Induktanz betrachtet werden; bezeichnen wir mit m die Zahl der Einheiten, so gelten nach früherem folgende Beziehungen:

1. Abschaltung einer gegebenen Leistung P:

an einer Maschine:

$$t_{r,L} = t_{r(1)} \cdot \left(1 + K_1 \frac{P \cdot x_a}{V^2} + K_2 \left(\frac{P \cdot x_a}{V^2}\right)^2 + \ldots\right)$$

an ganzer Zentrale:

$$t_{r,L} = t_{r(m)} \cdot \left(1 + K_1 \cdot \frac{P \cdot x_a}{V^2 \cdot m} + K_2 \cdot \left(\frac{P \cdot x_a}{V^2 \cdot m}\right)^2 + \ldots\right)$$

2. Abschaltung einer gegebenen relativen Belastung (z. B. Halblast):

an einer Maschine:

$$t_{r,L} = t_{r(1)} \cdot \left(1 + K_1 \cdot \frac{P \cdot x_a}{V^2} + K_2 \cdot \left(\frac{P \cdot x_a}{V^2}\right)^2 + \ldots\right)$$

an der ganzen Zentrale:

$$t_{r,L} = t_{r(m)} \cdot \left(1 + K_1 \cdot \frac{m \cdot P \cdot x_a}{V^2 \cdot m} + K_2 \left(\frac{m \cdot P \cdot x_a}{V^2 \cdot m}\right)^2 + \ldots\right)$$

Den ersten Betriebsfall haben wir auf Seite 175 schon behandelt, und können das dort Gesagte ohne weiteres auch auf die Maschine konstanter Erregung anwenden. Im *Fall der gleichen relativen Belastung* ist, wie die Gegenüberstellung der zwei Gleichungen lehrt, der Wert des Klammerausdruckes unverändert geblieben. Die Lichtbogenlängen $t_{r,L}$ verhalten sich daher wie $\frac{t_{r(m)}}{t_{r(1)}}$. Dieses Verhältnis, das wir mit z bezeichnen, ist nun aber bei nicht zu hoher Beriebsspannung des flachen Verlaufs der t_r-Kurven wegen (siehe Fig. 19) relativ klein. In unserem Fall ergibt sich z. B. folgender Wert für z:

Maschine 11: 8000 Volt Vollast (600 kW): $t_{r(1)} = 0{,}033$
10 Maschinen wie 11: 8000 Volt Vollast (6000 kW): $t_{r(10)} = 0{,}039$ $\Big\}\ \frac{t_{r(10)}}{t_{r(1)}} = 1{,}18$

Die Betrachtung des t_r-Verlaufs für 8000 Volt zeigt ohne weiteres, dass dieser Wert bei weiterer Steigerung der Zentralenleistung nunmehr äusserst langsam anwächst und damit auch der Wert der wirklichen Bogenlänge. Bei hoher Betriebspannung ändern sich indessen diese Verhältnisse, indem für diese die t_r-Kurve für das gleiche Leistungsbereich steiler ansteigt, was im gleichen Sinne auf den $t_{r,L}$-Verlauf bei der Abschaltung mehrerer Einheiten rückwirkt. Dies ist im Besondern für das Verhalten eines Hochspannungs-Feederschalters von Bedeutung. Ist das Verhältnis z bekannt, so können damit aus den $t_{r,L}$-Kurven *einer* Maschine die Verhältnisse mehrerer paralleler Einheiten berechnet werden, sowohl für den Fall konstanter Betriebsspannung wie konstanter Erregung. In Fig. 32 sind z. B. die Umkehrkurven für 8000 Volt Leerlaufspannung für einen bezw. zwei Generatoren aufgezeichnet entsprechend einer totalen Induktanz von 53 Ω bezw. 26,5 Ω. Die Gegenüberstellung der zwei Kurven bringt das oben gesagte noch deutlicher zum Ausdruck. Wir erkennen, dass die $t_{r,L}$-Werte für entsprechende Leistungen (gleicher Belastungsgrad) nur wenig von einander abweichen, besonders im Fall hoher Ueberlastung, wo wir uns auf dem flach verlaufenden Ast der t_r-Kurve bewegen. Wir müssen daraus die interessante Folgerung ziehen, *dass bei den gebräuchlichen Generatorspannungen die Lichtbogenlänge eines gegebenen Generatorschalters in der Hauptsache vom Belastungsgrad der generatorischen Anlage abhängt; die absolute Grösse der unterbrochenen Leistung ist hierbei ohne wesentlichen Einfluss.* Das gleiche Resultat haben wir auf Seite 184 bezüglich der Grösse der Generatoren erhalten.

Die Abwägung der beiden Betriebsfälle bezüglich der Grösse der *Schalterarbeit* führt naturgemäss zu einem andern Bild. Betrachten wir gleich den Fall des Kurzschlusses. Die maximalen Kurzschluss-Ströme beim Betrieb mit einer Maschine bezw. der ganzen Zentrale seien mit $J_{K(1)}$ bezw. $J_{K(m)}$ bezeichnet. Wenn alle Maschinen gleicher Grösse sind, gilt alsdann die Beziehung $J_{K(m)} = m \cdot J_{K(1)}$. Unter Berücksichtigung obiger Erörterungen schreiben sich damit die Ausdrücke für die Schalterarbeit:

$$A_{(1)} = J_{K(1)} \cdot E \cdot t_{r,L} \cdot C; \qquad A_{(m)} = m \cdot J_{K(1)} \cdot E \cdot z \cdot t_{r,L} \cdot C$$

und daraus:

$$A_{(m)} = m \cdot z \cdot A_{(1)}$$

das lässt uns folgenden Schluss ziehen:

Die Schalterarbeit ist im Generatorschalter beim Unterbrechen einer gegebenen relativen Belastung der generatorischen Anlage annähernd proportional der Zahl der parallelen Einheiten; bei hoher Betriebsspannung wächst im gleichen Leistungsbereich die Schalterarbeit mit letzterer rascher an, nach Massgabe der mit der Spannung ansteigenden Verhältniszahl z.

Die hier erörterten Beziehungen zwischen der Abschaltung einer Generator- und Zentralenbelastung lassen zugleich die *Frage über den Einfluss der Spannungsänderung des Generators* erledigen. Für diese ist die gewählte totale Induktanz Xa eine charakteristische Grösse. Die Kurven in Fig. 32 geben daher auch die Verhältnisse zweier Maschinen gleicher Normalleistung aber verschiedener Induktanz bezw. Spannungsänderung wieder. Der Faktor m bedeutet hier das Verhältnis der Induktanzen oder Kurzschluss-

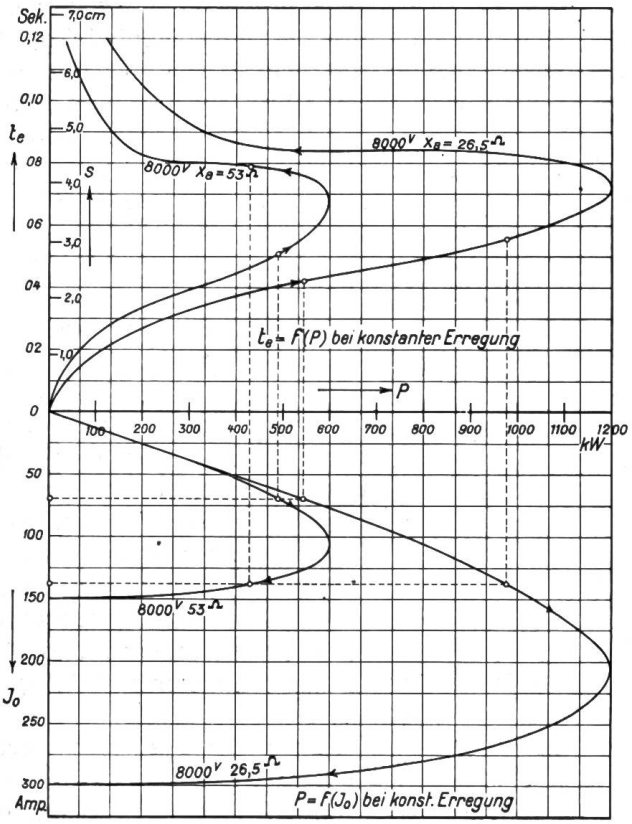


Fig. 32.

Ströme unter Voraussetzung gleicher Erregung. Wir wollen nun annehmen, die beiden Maschinen seien gleich belastet mit je P kW bei gleicher Betriebspannung V. Der Generator grösseren Spannungsabfalls wird dann auf eine höhere Erregung eingestellt sein; im Vergleich zur zweiten Maschine sei diese auf dem Betrag $E + \Delta E$, das Verhältnis der Kurzschluss-Ströme muss daher auf den Betrag $m - \Delta m$ zurückgegangen sein. Tritt nun ein Kurzschluss in der Belastung ein, so verändern sich die Abschaltlichtbogenlängen mit der Grösse der Kurzschluss-Leistung nach Massgabe der oben behandelten Umkehrkurven. Da die Verhältniszahl z für die hier in Frage kommende Grösse von m nahezu eins wird, zumal im Kurzschlussgebiet, so muss für die gegebene relative Ueberlastung die Bogenlänge bei der Maschine grösseren Spannungsabfalls (der grösseren Erregung wegen) höher liegen. Wir setzen diese im Vergleich zur zweiten Maschine zu $t_{r,L} + \Delta t_{r,L}$ an und schreiben damit die Ausdrücke für die Schalterarbeit:

$$A_1 = J_K \cdot (E + \Delta E) \cdot (t_{r,L} + \Delta t_{r,L}) \cdot C$$ (Maschine grossen Spannungsabfalls)

$$A_2 = (m - \Delta m)\, J_K \cdot E \cdot t_{r,L} \cdot C$$ (Maschine kleinen Spannungsabfalls)

Welcher der beiden Werte für die Schalterarbeit grösser ist, hängt vom Belastungsgrad der Generatoren ab, von dem aus wir uns den Kurzschluss eingetreten denken. Die grösste Differenz tritt offenbar dann ein, wenn der Kurzschluss beide Maschinen auf gleicher Erregung trifft, also im Leerlauf, es ergibt sich dann:

$$\left.\begin{aligned} A_1 &= J_K \cdot E \cdot t_{r,L} \cdot C \\ A_2 &= m \cdot J_K \cdot E \cdot t_{tr,L} \cdot C \end{aligned}\right\} A_2 = m \cdot A_1$$

Indessen ist dieser Fall praktisch kaum in Frage kommend, viel mehr wird man für gebräuchliche Grenzwerte der Spannungsänderung bei Vollast die Produkte:

$$\{J_K \cdot (E + \Delta E)\} \text{ bezw. } \{(m - \Delta m) \cdot J_K \cdot E\}$$

das sind die Kurzschluss-Leistungen, ungefähr auf gleicher Höhe finden. Daraus resultiert aber dann: *dass für gleiche relative Ueberlastungen (bezogen auf den Kurzschluss-Strom) die Induktanz bezw. die Spannungsänderung des Generators ohne wesentlichen Einfluss auf die Grösse der Schalterarbeit ist.*

Die Verhältnisse gestalten sich aber anders, wenn wir *Belastungsänderungen, bezogen auf die normale Maschinenleistung,* ins Auge fassen. Es mögen z. B. die beiden Vergleichsmaschinen, ausgehend vom Vollast-Strom entsprechend P kW bei der Betriebspannung V, durch Ueberlastung mit dem doppelten Strom $2\,J_0$ belastet werden, bei welchem das Relais den Schalter zur Auslösung bringen mag. Der Generator (1) wird dabei infolge des grösseren Spannungsabfalls relativ mehr belastet sein als die zweite Maschine, die Abschaltbogenlänge wird daher nach dem charakteristischen Verlauf der Umkehrkurven höher liegen. Wir erhalten daher so nach Obigem:

$$\left.\begin{aligned} A_1 &= 2\,J_0 \cdot (E + \Delta E) \cdot (t_{r,L} + \Delta t_{r,L}) \cdot C \\ A_2 &= 2\,J_0 \cdot E \cdot t_{r,L} \cdot C \end{aligned}\right\} A_1 > A_2$$

Gehen wir vom Leerlauf mit dem gleichen Wert der Erregung aus, so ist immer noch $A_1 > A_2$ infolge der grösseren Lichtbogenlänge im Fall grösserer Maschineninduktanz. Wir haben diese Verhältnisse in Fig. 32 angedeutet, indem für zwei Belastungsfälle die zugehörigen $t_{r,L}$-Werte für die Induktanzen 53 Ω und 26,5 Ω bei 8000 Volt Erregung konstruiert sind. Obiger Satz bedarf daher eine Ergänzung indem wir folgern, *dass für die gegebene relative Ueberlastung, bezogen auf die normale Maschinenleistung, der Generator in seinem Schalter eine umso grössere Schalterarbeit erzeugt, je grösser seine Spannungsänderung gewählt werden muss.*

Der gewonnene Einblick in den Einfluss der Induktanz des Generators bietet nun zugleich ein Kriterium für den *Schutzwert der Vorschalt-Reaktanzen* bezüglich des Abschaltvorgangs. Wir gedenken über solche Schutzvorkehrungen im allgemeinen einen besonderen Bericht unserer diesbezüglichen Untersuchungen bekannt zu geben, möchten aber immerhin an dieser Stelle schon auf die Frage hinweisen. Die Vorschalt-Drosselspule des Generatorschalters kann in ihrer Wirkung bezüglich des Abschaltvorganges als vorgrösserte Maschinen-Induktanz aufgefasst werden. Sie vermag daher für relative Ueberlastungen, bezogen auf den normalen Kurzschluss-Strom der Maschine allein, die Kurzschluss-Leistung herabzusetzen und kann im Sinne unserer Erörterungen auf Seite 185 auf eine Verkleinerung der Schalterarbeit hinwirken. Wenn jedoch die automatische Schalterauslösung, die auf absolute Ueberlastungen als Vielfaches des Vollast-Stroms eingestellt ist, bei einem bestimmten Grenzwert des Ueberstroms abzuschalten vermag, ehe der vollständige Kurzschluss erreicht ist, bedeutet die Vorschalt-Drosselspule eine Verschlechterung der Abschaltbedingungen, indem sie nach obigem bei gleicher unterbrochener kVA-Leistung eine Vergrösserung der Lichtbogenlänge und damit der Schalterarbeit zur Folge hat.

Die obigen Erörterungen scheinen bezüglich des Schutzwertes der Induktanz der generatorischen Anlage, sei es die eigene Induktanz oder eine zusätzliche Drosselung in Reaktanzspulen, keine eindeutige Stellungsnahme zu gestatten, da je nach der Definition der Ueberlastung ein Für oder Wider aus den Beziehungen folgt. Wir können die Frage klären, wenn wir uns die Ueberlastung bis zum Kurzschluss einmal durch sukzessive Steigerung der Stromstärke um gleiche Beträge herbeigeführt denken, ein andermal durch sukzessive Verminderung des äusseren Widerstandes um gleiche Beträge. Als Vergleich stellen wir wieder die beiden Generatoren grosser bezw. kleiner Spannungsänderung sich gegenüber. Nach früherem gibt dann im ersten Fall die Maschine kleiner Induktanz günstigere Verhältnisse, indem sie bei *gleichem* Abschalt-Strom im Schalter eine kleinere Schalterarbeit zur Folge hat, während umgekehrt für ein und denselben äusseren Widerstand die kleinere Induktanz beim Abschalten infolge der grösseren unterbrochenen Leistung eine grössere Schalterarbeit aufweist. Mit welchem Fall ist nun im Betrieb zu rechnen? Offenbar hängt dies von der Art der Schalter-Auslösesteuerung ab. Denken wir uns den Schalter mit einem der bekannten Relais für Maximalstrom mit Zeitauslösung versehen, so wird dieses bei *langsam ansteigender Ueberlastung* bei einem gewissen Ueberstrom, der ein vielfaches des normalen Vollastromes sein wird, den Schalter zur Auslösung bringen; es liegt dann der erste Fall vor, wo der Generator kleiner Induktanz die kleinere Schalterarbeit bedingt. Wird andererseits die Maschine durch *plötzlichen Kurzschluss* überlastet, so ist die maximale Kurzschluss-Stromstärke in den meisten Fällen erreicht, bevor das Relais den Ueberstrom auf einen bestimmten vielfachen Betrag des normalen Stromes zu beschränken vermag. Der Schalter hat demnach die Kurzschluss-Leistung zu unterbrechen, die umso kleiner ist, je grösssr die Induktanz gewählt wurde. Indessen geht heute allgemein das Bestreben dahin, den Schalter überhaupt nicht im Fall des Kurzschlusses zur Auslösung zu bringen; sei es vermittels blockierter Relais oder Rückwirkung auf die Erregung, sodass auch hier wieder die Auslösestromstärke einen bestimmten Wert nicht überschreiten kann. *Wird daher durch geeignete Auslösevorrichtungen der Schalter mit einer bestimmten, nicht überschreitbaren Auslösestromstärke als Vielfaches des Normalstromes ausgeschaltet, so ist die Schalterarbeit umso kleiner, je kleiner der Wert der totalen Induktanz im Stromkreis ausfällt. Von diesem Gesichtspunkt aus betrachtet, verschlechtern die Wahl einer grossen Spannungsänderung oder die Anwendung von Vorschaltdrosselspulen die Bedingungen des Ausschaltvorganges.*

* * *

Es ist aus dem bis jetzt Gesagten ersichtlich, dass die Grösse der Schalterarbeit für die gegebene Abschaltleistung mit den Betriebsbedingungen des Oelschalters in enger Beziehung steht. Wir haben vorerst nur die Verhältnisse des Generatorschalters behandelt und es verbliebe nun noch die Untersuchung des Feederschalters, bei dem andere Bedingungen vorliegen. Die Berücksichtigung der zusätzlichen Induktanzen in den Transformatoren und der Fernleitung bringen wie leicht ersichtlich neue Momente hinzu, die einer eingehenden Behandlung bedürfen. Wir müssen uns indessen versagen, diese im vorliegenden Berichte zur Sprache zu bringen, da sie zu der eigentlichen Untersuchung des Abschaltvorganges gemäss Kommissionsprogramm nichts wesentliches beitragen werden, vielmehr eine Folgerung aus den gewonnenen Beziehungen bedeuten. Es war uns im vorliegenden Abschnitt darum zu tun, deren Anwendungsmöglichkeit zu illustrieren, die weiteren Folgerungen im obigen Sinne sei einem Spezialbericht vorbehalten.

IV. Untersuchungen über den Einfluss der Schalterkonstruktion auf die Verhältnisse des Abschaltvorgangs.

Die vorliegenden Untersuchungen haben nicht den Zweck, die marktgängigen Oelschalterkonstruktionen einer vergleichenden Studie zu unterziehen; vielmehr ist vorerst die Frage zu lösen, welchen Einfluss irgend eine prinzipielle Aenderung im Betrieb oder in der Konstruktion des Schalters auf die Grösse der Schalterarbeit ausübt. Die in Frage kommenden zu verändernden Bedingungen sind durch die vorangegangenen Studien bereits näher umschrieben. Wir haben erkannt, dass für die gegebene Abschaltleistung der Vorgang im Wesentlichen durch die charakteristischen Daten der Elektroden und ihres Mediums bestimmt ist; sodass im gegebenen Stromkreis der Verlauf der Schalterarbeit (bezw. der Grössen C und t_e) als ein Charakteristikum der Kontakte angesprochen werden kann. Unsere Aufgabe beschränkt sich daher auf die Untersuchung über den Einfluss der etwa veränderlichen Betriebsbedingungen im Schalter bei gegebener Kontaktform sowie auf die vergleichende Gegenüberstellung typischer Elektrodenanordnungen bezüglich des Verlaufs der Schalterarbeit. Wenn wir in der Folge die zweite Frage voranstellen, so liegt dies darin begründet, dass unsere Untersuchungen über den ersten Punkt, die veränderlichen Betriebsbedingungen im Schalter, z. Zt. noch nicht abgeschlossen sind. Die Aufgabe umfasst ein weitläufiges Gebiet, das versuchstechnisch schwierig zu behandeln ist. Der vorliegende Bericht wird daher nur die zwei ersten erledigten Abschnitte (die Versuche mit veränderlicher Schaltgeschwindigkeit, die Untersuchungen mit mehrfacher Unterbrechung) zur Sprache bringen können, während das Resultat der Versuche an unserem Druckschalter einem Sonderbericht vorbehalten ist.

A. Vergleichende Untersuchungen über die Grösse der Schalterarbeit an typischen Kontaktformen.

Im Abschnitt über die physikalischen Bedingungen zur Lichtbogenbildung ist gezeigt worden, dass der Verlauf des Abschaltvorgangs bei gegebener Abschaltleistung durch die Charakteristiken der Elektroden gekennzeichnet ist; es ergab sich, dass für die maximale Lichtbogenlänge die Wärmeeffekt-Charakteristik massgebend ist. In unserer graphischen Darstellung in Fig. 4 tritt diese als Gerade in der Form auf:

$$\frac{\gamma + \delta \cdot s}{r_a}$$

wobei wir mit δ den pro Längeneinheit erforderlichen Mehrbetrag des Wärmeeffekts bezeichneten. Die Berücksichtigung des Wärmeverlustes der Elektroden zur Nullzeit des Stromes lässt für den Wärmeeffekt den Ansatz schreiben: $b_{(s)} = \gamma + \delta s + \varepsilon s^2$, womit die Charakteristik, wie s. Zt. angegeben, parabolisch nach oben verläuft, gemäss der Form:

$$\frac{\gamma + \delta s + \varepsilon \cdot s^2}{r_a}$$

Für gegebene elektrische Verhältnisse im Stromkreis sind die Konstanten γ, δ und ε nur noch abhängig von den Elektroden und dem sie umgebenden Oel; *sie charakterisieren den Wärmeaustausch der Elektroden.* In Berücksichtigung der Bedeutung der einzelnen Konstanten lassen sich hieraus schon einige Gesichtspunkte über den Einfluss von Grösse und Form der Kontakte herauslesen. Allgemein werden die Konstanten umso grösser ausfallen, je grösser sich der Wärmeentzug pro Zeiteinheit im negativen Krater einstellt, d. h. je grösser die spezifische Wärme-Leitfähigkeit der Elektroden ist. Bei gegebenem Elektroden-Material kann die Vergrösserung des Wärmeentzugs z. B. durch Vergrösserung der „Heizfläche" erzielt werden. Ein solcher Fall tritt beim Uebergang von einfacher zu mehrfacher Unterbrechung ein, indem alsdann vom gleichen Strom mehrere Krater gespeist werden müssen. Tatsächlich ist die Vergrösserung von γ auf den auf Tafel VIII niedergelegten Versuchskurven deutlich ersichtlich. Gleicherweise müssen hierbei auch die Konstanten δ und ε grösser werden, was gleichbedeutend mit einer Verkleinerung der Lichtbogenlänge ist. Diese ist andererseits bei gleichem γ umso kleiner, je rascher in Fig. 4 die Charakteristik nach oben biegt, d. h. je grösser der mit der Zeit wachsende Mehrbetrag des Wärmeverlustes wird. In diesem Sinne müsste z. B. eine Verkleinerung der Abreisskontakte wirken. Indessen ist gerade bei kleineren Abschaltleistungen die maximale Lichtbogenlänge, wie Fig. 4 zeigt, auf grössere oder kleinere Krümmung der Wärmecharakteristik weniger empfindlich, als der Endwert der inneren Schalterspannung, für die die Grösse C bei gegebener Elektrode ein Mass darstellt. In den nachfolgenden Versuchswerten tritt dies deutlich zu Tage. Im gleichen Sinne wird sich selbst ein grosser Abreisskontakt mit spitzer Ansatzfläche des Lichtbogens verhalten, indem bei der äusserst kurzen Zeit des Abschaltvorgangs die fragliche Spitze oder Kante wie eine Elektrode geringer Masse wirkt. Zusammenfassend lässt sich aus den theoretischen Betrachtungen herleiten, dass allgemein die Verwendung guter Wärmeleiter als Elektroden im Sinne einer Verkleinerung der Lichtbogenexistenz wirkt. Eine weitere Steigerung des sekundlichen Wärmeentzugs kann durch Serieschaltung mehrerer Lichtbogen (mehrfache Unterbrechung) erreicht werden. Die Reduktion der Elektrodenmasse hat prinzipiell eine Vergrösserung des Wärmeentzugs zur Folge, dieser wird sich durch eine Steigerung der inneren Schalterspannung kundgeben.

Diese allgemeinen Richtlinien über den mutmasslichen Einfluss der Elektroden dienten uns als Wegleitung für die experimentellen Untersuchungen verschiedener typischer Kontakt-Konstruktionen, die im nachfolgenden näher beschrieben sind.

Die Mehrzahl der marktgängigen Schalterkonstruktionen lässt bekanntlich den Abschaltlichtbogen zwischen einem besondern Kontaktpaar, den Abreisskontakten bilden, während die Hauptkontakte in geschlossenem Zustand die dauernde Stromleitung übernehmen. Unsere Versuche, sowie Umfragen an geeignetem Ort haben ergeben, dass selbst bei schwersten Abschaltungen keine Lichtbogenbildung zwischen letzteren auftritt, solange die Abreisskontakte gebrauchsfähig bleiben. Wir konnten uns daher auf die Untersuchung der Abreisskontakte beschränken. Andererseits haben wir auch Konstruktionen herangezogen, die überhaupt von deren Verwendung absehen. Es sei vorweggenommen, dass sich die diesbezüglichen Resultate nicht wesentlich von den übrigen unterschieden, sodass damit unsere Schlüsse allgemeine Bedeutung gewinnen. Um die Untersuchungen nicht allzusehr auszudehnen, berücksichtigten wir, den praktischen Ausführungen folgend, nur Anordnungen mit vertikaler Schalterbewegung.

Die Kommission für Hochspannungsapparate und Brandschutz hat nachfolgend beschriebene typische Konstruktionen zur Untersuchung herangezogen:

1. *Zylindrischer Kontakt* (Normal-Elektrode). Konstruktion: Maschinenfabrik Oerlikon. Der Kontakt ist in Form einer vorn kugelförmig abgerundeten Kontaktstange als beweglicher Teil und eines durch vier Segmente gebildeten Zylinders als fester Teil durchgebildet. Die Segmente sind unter sich leicht beweglich angeordnet, um einer eventuellen exzentrischen Lage der Kontaktstange Rechnung zu tragen. Der Kontaktdruck wird durch eine, die vier Segmente umfassende, zylindrisch gewickelte Feder aufrechterhalten. Die Stromführung besorgen flexible Kupferbänder, die die Segmente mit dem Sockel verbinden. Die Anordnung ist Haupt- und Abreisskontakt in einer Form; der Lichtbogen bildet sich

zwischen dem halbkugeligen Stangenkopf und den wohlabgerundeten Enden der Segmente. Die Skizze auf Tafel X lässt alle weiteren Details erkennen. Als Material kam Kupfer für die Kontaktstange und Bronze für die Segmente in Anwendung. Der Kontakt ist für eine dauernde Strombelastung von 300 A vorgesehen.

2. Schleifender Fingerkontakt. Konstruktion: Karl Maier, Schaffhausen. Der feste Kontaktteil besteht aus einer Reihe von 6 parallelen Fingerkontakten, die Haupt- und Abreisskontakte in einer Form bedeuten. Der bewegliche Teil ist in Form einer rechtwinklig umgebogenen Kontaktplatte ausgebildet; beide Teile sind in Kupfer ausgeführt. Die Kontaktfinger liegen über einen Teil ihrer Oberfläche auf ebener Fläche auf, die die eigentliche Stromführung übernimmt. Der Lichtbogen bildet sich zwischen dem Kontaktfinger und dem abgerundeten Winkel der Kontaktplatte aus. Die Konstruktion ist auf Tafel XI dargestellt. Das untersuchte Modell ist für 200 A vorgesehen.

3. Schleifender Bürstenkontakt. Konstruktion: Maschinenfabrik Oerlikon (altes Modell). Der bewegliche Teil ist als quadratische abgestumpfte Pyramide ausgebildet, an deren Fläche die federnden Bürstenkontakte anliegen. Die Anordnung dient zugleich als Haupt- und Abreisskontakt. Der Lichtbogen brennt zwischen der abgerundeten Pyramidenkante und dem unteren scharfen Rand des Bürstenkontaktes. Letzterer ist in Kupfer hergestellt, die bewegliche Pyramide in Bronze. Die verwendete Konstruktion, auf Tafel X im Detail dargestellt, genügt einer dauernden Strombelastung von 200 A.

4. Bürstenabhebekontakt mit Abreiss-Fingerkontakt. Konstruktion: Sprecher & Schuh, Aarau. Der Hauptkontakt besteht aus einem Bronzeklotz mit horizontaler Kontaktfläche, an die sich die federnde Kontaktbürste (Kupferlamellen) kräftig anpresst. Der Abreisskontakt ist schleifend und ähnlich der oben unter 2 angeführten Konstruktion angeordnet; nur ist der Gleitfinger entsprechend seiner kurzzeitigen Inanspruchnahme leichter gebaut; er liegt infolge der starken Krümmung nur auf sehr kleiner Fläche auf. Beide Stücke bestehen aus Kupfer. Das untersuchte Modell ist für 200 A gebaut; Details siehe Tafel XI.

5. Klotz-Abhebekontakt. Konstruktion: Brown, Boveri & Co. Bei dieser Konstruktion sind Haupt- und Abreisskontakt in ihrer Ausführung identisch. Die Kontaktflächen liegen horizontal aufeinander, sodass bei der vertikalen Schaltbewegung der tote Anlaufweg äusserst klein ausfällt. Die beweglichen Teile sitzen auf einer durch zwei Führungen geleiteten Traverse, die durch eingebaute Spiralfedern die Pressung auf die Kontaktstücke überträgt. Auf Tafel XII sind nur die Hauptkontakte dargestellt, die Abreisskontakte sind in 10 mm Abstand parallel auf gleiche Fassung montiert. Die Kontaktstücke bestehen aus Kupfer. Das verwendete Modell ist für 200 A vorgesehen.

6. Versuchskontakte. Konstruktion nach: Sprecher & Schuh, Aarau, und Carl Maier, Schaffhausen. Zum Studium des Einflusses der Abreisskontaktmasse sind Fingerkontakte verschiedener Breite von 2,0 bis 0,5 mm eingebaut worden, als beweglicher Kontaktteil wurde die oben beschriebene Kontaktplatte beibehalten.

Nachdem sich im Verlauf der Versuche ein verschiedenes Verhalten des *Elektrodenmaterials* herausstellte, erweiterten wir die Untersuchungen durch Heranziehung von Kontaktpaaren aus Messing und Eisen und deren Kombinationen untereinander sowie mit Kupferkontakten. Die Anordnung ist gleicherweise nach der oben beschriebenen Konstruktion von Carl Maier durchgeführt mit einer Kontaktfingerbreite von 20 mm.

Die Untersuchungen sind i. a. je nur mit einem von mehreren Parallel-Kontakten durchgeführt worden, um störende Zufälligkeiten im verschiedenen Ansprechen der einzelnen Kontakte zu vermeiden. Der Schluss auf die vollständige Kontaktanordnung wird dadurch nicht beeinflusst, da alle Versuche zeigten, *dass von mehreren Parallelkontakten stets nur einer die Lichtbogenbildung übernimmt.* Zum Schluss sei noch bemerkt, dass sich die nachfolgenden Messungen auf einfache, einpolige Unterbrechung beziehen.

Die Versuchsresultate.

Bevor wir an die Diskussion der erhaltenen Werte für die untersuchten marktgängigen Konstruktionen gehen, soll das Resultat der Messungen an den Versuchsausführungen genannt sein, weil dieses zur Erläuterung der übrigen Versuche beiträgt. Die Werte sind in den nachfolgenden Tabellen zusammengestellt.

I. Einfluss der Elektrodengrösse.

Einfache Unterbrechung mit Maschine 11, Fingerkontakt, gekrümmte Form nach Sprecher & Schuh. Kupfer auf Kupfer. Carl Maier-Schalter, $v = 55$ cm/Sek. Oel: Druck und Temperatur normal.

(Mittelwerte aus je 5 Abschaltungen.)

No.	Blatt No.	Fingerbr. in mm	J_0 Amp.	Vg Volt	t in Sek. auf $v=55$ cm/Sek. umgerechnet	p %	q %	C %	$C \cdot t_e \cdot 10^{-3}$	Bemerkungen
1	45	20	75	8115	0,0388	3,85	98,0	1,94	7,54	gerade Form nach Carl Maier.
2	39	20	89	7920	0,0390	3,5	98,0	1,7	6,63	Mittelwert: 7,27 gekrümmte Form nach Sprecher & Schuh
3	40	20	86	8075	0,0440	3,3	98,0	1,8	7,92	
4	39	10	90	7880	0,0490	5,0	98,0	2,5	12,25	
5	39	10	88	7880	0,0494	5,5	98,0	2,7	13,31	
6	39	5	88	8000	0,0480	4,0	98,0	2,0	9,60	Mittelwert: 10,42, leichte Schmelzperlen a/d. Kontaktkante.
7	40	5	86	8101	0,0512	4,4	98,0	2,2	11,25	
8	41	0,5	84	8040	0,0400	3,8	98,0	1,9	7,5	gerade Form wie Carl Maier, starke Schmelzerscheinung.
9	41	0,5	85	8070	0,0467	4,1	98,0	2,0	9,35	gekrümmte Form wie Sprecher & Schuh, starke Schmelzerscheinungen.

Aus der Zusammenstellung geht hervor, dass mit abnehmender Fingerbreite das für die Schalterarbeit massgebende Produkt $C \cdot t_e$ bis zu 10 mm Breite tatsächlich ansteigt und zwar hauptsächlich als Folge der anwachsenden Grösse C, die Vergrösserung der Lichtbogenlänge ist unsicher zu konstatieren. Die weitere Verringerung der Kontaktmasse auf 5 bis 0,5 mm führt merkwürdigerweise wieder zu günstigeren Werten der Schalterarbeit; dies kommt hauptsächlich in der Grösse C zum Ausdruck. Die Erklärung liegt in der bei 5 mm Kontaktbreite einsetzenden Zerstörung der Elektrode. Die als konstant anzusehende Temperatur des Kraters teilt sich hier infolge der kleinen Massen einer grösseren Umgebung mit, sodass relativ grosse Kupfermengen verdampft werden. Die entstehenden Metalldämpfe verändern die Lichtbogenkonstanten im Sinne einer grösseren Leitfähigkeit des Bogens, was einem flachen Verlauf der Charakteristiken gleichkommt (kleines e_i bezw. C). Wenn trotzdem die Lichtbogenlänge nicht wesentlich grösser geworden ist, so liegt der Grund in dem zur Nullzeit des Stromes stark einsetzenden Wärmeverlust der Elektroden (grosses ε). Jedenfalls kommen diese schmalen Kontaktfinger praktisch nicht in Betracht, da selbst bei den hier verwendeten kleinen Abschaltleistungen der Abbrand viel zu gross ausfällt. Andererseits ist zu konstatieren, dass die Veränderung von C mit veränderlicher Masse des Abreisskontaktes nicht bedeutend ist. Eine weitere Vergrösserung über 20 mm hinaus ist nicht mehr von Einfluss; dies gibt schon der Vergleich zwischen Punkt 1 und 2, indem die für 1 verwendete Elektrode der geraden, vollen Form wegen rund 45 % grössere Masse aufweist.

II. Einfluss des Elektroden-Materials.

Einfache Unterbrechung mit Maschine 11, Fingerkontakt 20 mm gerade Form nach Carl Maier. Carl Maier-Schalter $v = 55$ cm/Sek. Oel: Druck und Temperatur normal. (Mittelwerte aus je 10 Abschaltungen.)

No.	Blatt No.	J_0 Amp.	Vg Volt	Elektroden-Material	t_e in Sek.	p %	q %	C %	$C \cdot t_e \cdot 10^{-3}$	Bemerkungen
1	45	75	8115	Kupfer auf Kupfer	0,0388	3,85	98	1,94	7,54	geringe Brandstellen
2	46	79	8110	Messing auf Kupfer	0,0390	4,25	98	2,14	8,35	starke Brandstellen
3	47	78	8050	Eisen auf Kupfer	0,0356	4,24	98	2,13	7,58	starke Brandstellen auf Eisen
4	48	77,5	8020	Eisen auf Eisen	0,0445	4,26	98	2,14	9,52	starke Brandstellen
5	49	80	8040	Eisen auf Messing	0,0410	3,80	98	1,90	7,80	
6	50	80	8000	Messing auf Messing	0,0509	4,14	98	2,05	10,42	

Das vorliegende Material ist zu wenig umfangreich, um aus dem merkwürdigen Verhalten der verschiedenen Metalle eine Gesetzmässigkeit herleiten zu lassen. Die Vermutung liegt nahe, dass hier der Schmelzpunkt der Metalle eine Rolle spielt; dem steht indessen das Verhalten des Eisens (verwendet wurde Schmiedeisen) gegenüber, das bereits durch die zehnmalige Abschaltung starken Abbrand aufwies. Jedenfalls ist die für uns wichtige Erscheinung zu bemerken, dass die Verwendung von Kupferelektroden die günstigsten Resultate liefert, und dass umgekehrt Messing (und Bronze) nicht zu empfehlen ist; schon des konstatierten relativ grossen Abbrandes wegen.

III. Vergleichende Messungen an den gegebenen Kontakt-Konstruktionen.

Einfache Unterbrechung mit Carl Maier-Schalter $v = 55$ cm/Sek. Oel: Druck und Temperatur normal. (Mittelwerte aus je 20 – 25 Abschaltungen.)

a. Induktionsloser Stromkreis (beide Werke auf Wasserwiderstand) Abschalten von 800 kW bei 8000 Volt.

No.	Blatt No.	Konstruktion	t_e in Sek.	p %	q % za.	C · %	$C \cdot t_e \cdot 10^{-3}$	Bemerkungen	$C \cdot t_e \cdot 10^{-3}$ in %
1	12	Normalkontakt (M.F.O.)	0,036	2,9	99	1,4	5,04	Mittelwert: 5,76 =	100 %
2	13	do.	0,036	4,7	99	2,3	8,28		
3	17	do.	0,036	2,1	98	1,1	3,95		
4	27	Abreisskontakt (C. M.)	0,019	1,9	99	1,0	1,9		33 %
5	29	Abreisskontakt (Spr. & Sch.)	0,020	2,0	99	1,0	2,0		34,7 %
6	44	Klotzkontakt (BBC)	0,024	1,8	99	0,9	2,16		37,5 %

b. Abschaltung mit Maschine 11 auf Wasserwiderstand 800 kW bei 8000 Volt.									
1 2	4 8	Normalkontakt (M.F.O.) do.	0,0685 0,0685	5,2 6,2	98 98	2,6 3,1	17,8 21,2	Mittelwert: 18,5 =	100 %
3	26	Abreisskontakt (C. M.)	0,0460	5,6	98	2,7	12,4		67 %
4	28	Abreisskontakt (Spr. & Sch.)	0,0565	5,3	98	2,6	14,7		79,5 %
5	43	Klotzkontakt (BBC)	0,0515	3,5	98	1,8	9,2		51,4 %
c. Abschaltung mit Maschine 11 (nicht sinusförmige EMK) 360 kW bei 6000 Volt.									
1	18	Normalkontakt (M. F. O.)	0,065	6,7	98	3,3	21,5		100 %
2	—	Bürstenkontakt (M. F. O.)	0,055	9,93	95	4,79	26,3	(altes Schalter-Modell)	122,2 %

Wie oben angedeutet, sind die angegebenen C-Werte das Mittel aus den Messungen an je 20—25 Abschaltungen. Es sind die Mittelwerte der aufgenommenen Versuchs-Serien mit konstanter Spannung und veränderlicher Abschaltleistung. Das Protokoll auf Seite 166 lässt erkennen, dass der Wert für C allerdings nicht ganz konstant ist, sondern mit wachsender Leistung steigt. Zur gegenseitigen Abwägung der einzelnen Kontakte kann indessen mit dem aus der entsprechenden Serie gewonnenen Mittel gerechnet werden, zumal dieses für die verschiedenen von uns untersuchten Betriebsspannungen nur unbedeutend vom obigen Wert abweicht. Da die Konstante C kein endgültiges Kriterium für das Verhalten einer gegebenen Kontaktform abgibt, sind in den Tabellen, die für eine bestimmte Abschaltleistung sich ergebenden Lichtbogenzeiten aus den Versuchskurven beigezogen, um das Produkt $C \cdot t_e$ zu bilden. Dieses variiert natürlich gemäss dem Verlauf von t_e mit der Abschaltleistung, lässt aber für ein und denselben Wert der letzteren eine Vergleichung der Kontakte durchführen. Vorerst erkennen wir, dass alle Kontakte, die im vorangegangenen Kapitel behandelte Veränderlichkeit der t_e- und C-Werte mit der Induktivität im Stromkreis aufweisen; erstere sind übrigens auf den Kurven auf Tafel III in ihrem Verlauf für jede Elektrode aufgezeichnet. Der Zuwachs ist aber bei den einzelnen Ausführungen verschieden, sodass wiederum nur das Produkt $C \cdot t_e$ einen Schluss auf den Anstieg der Schalterarbeit zulässt. Es ist nun auffallend, wie relativ ungünstig sich die Normalelektrode verhält; trotz der grossen Kontaktmasse sind die Lichtbogenlängen um 20—50%, die Schalterarbeit um 30—60% grösser als die entsprechenden Werte der übrigen Elektrodenformen. Diese ungünstigen Verhältnisse sind nach den Erfahrungen mit den Versuchskontakten in der Hauptsache der Verwendung von Bronze für den festen Elektrodenteil zuzuschreiben. Dies kommt auch beim alten Modell des M. F. O.-Bürstenkontaktes zum Ausdruck, bei dem, wie oben erläutert, die bewegliche Kontaktpyramide in Bronze ausgeführt ist. Wir haben mit dieser Anordnung die Schalterarbeit zu 122% des entsprechenden Wertes der Normalelektrode ermittelt. Damit erreicht erstere einen zwei- bis dreifach höheren Betrag als die übrigen Kontaktkonstruktionen. Indessen dürfte in diesem Falle auch die Formgebung des Bürstenabreisskontaktes eine Rolle spielen. Wir haben in den theoretischen Ueberlegungen schon die Vermutung ausgesprochen, dass eine kleine Kontaktfläche, bezw. Ansatzstelle des Lichtbogens, eine Vergrösserung des Wärmeentzugs zur Folge haben muss. Dieser Fall scheint hier tatsächlich einzutreffen, indem der Lichtbogen beim vorliegenden Abreisskontakt sich an der scharfen Kante anzusetzen pflegt. Der daraus resultierende rasche Anstieg der Wärmecharakteristik kommt hier hauptsächlich durch die Vergrösserung von e_i, bezw. der

Grösse C, zum Ausdruck.*) Von den übrigen Konstruktionen dürften alle drei Ausführungen bezüglich der Grösse der Schalterarbeit als ungefähr gleichwertig angesehen werden; auffallend niedrige Werte haben wir bei induktiver Belastung mit den Klotzkontakten erhalten. Die Fingerkontakte mit ebener Kontaktfläche (Konstruktion Carl Maier) stellen sich auch in Tafel II etwas günstiger, als die nahezu gleichen Fingerkontakte von Sprecher & Schuh mit stark gekrümmter Kontaktfläche. Indessen ist das vorliegende Versuchsmaterial nicht hinreichend, um eine bestimmte Kontaktkonstruktion bezüglich der Schalterarbeit als günstigste Lösung bezeichnen zu können, immerhin lassen sich doch folgende Schlüsse daraus ziehen:

Abreisskontakte sollen im Sinne kleinster Schalterarbeit in beiden Teilen in Kupfer ausgeführt sein. Bronze, Messing und Eisen führen zu wesentlich ungünstigeren Werten, ganz abgesehen vom Nachteil grösseren Abbrandes. Die gebräuchlichen Formen der Schleif- und Abhebekontakte zeigen in ihren marktgängigen Ausführungen keine grosse Verschiedenheit bezüglich der Grösse der Schalterarbeit. Die Verkleinerung der Elektrodenmasse innerhalb zulässiger Grenzen hat zu einer Vergrösserung der Schalterarbeit geführt; eine Vergrösserung der Kontakte über die marktgängige Ausführung zeigte indessen keine nennenswerte Verringerung des normalen Wertes. Bezüglich der Formgebung fordert die Bedingung kleinster Schalterarbeit nicht zu kleine Auflagefläche. Die Ansatzstellen des Lichtbogens sollen gut abgerundet sein. Spitzen und Kanten als Sitz des negativen Kraters erhöhen infolge des grösseren Wärmeentzugs die innere Schalterspannung.

Wir vermuten, dass diese allgemeinen Gesichtspunkte auch für grössere Belastungen als solche, die uns zur Verfügung standen, Gültigkeit haben; es wäre indessen empfehlenswert, die Untersuchungen bezüglich der Elektrodenform auf Kurzschlussleistungen auszudehnen.

B. Der Einfluss der Schaltgeschwindigkeit auf den Abschaltvorgang.

Unseren theoretischen Betrachtungen liegt das Gesetz zu Grunde: $s = v \cdot t$, wobei wir unter v die mittlere Schaltgeschwindigkeit über den Abschaltvorgang verstehen. Für ein und dieselbe Abschaltleistung ist die Lichtbogenlänge s bei gegebenen Konstanten des Stromkreises und des Schalters eine nach angegebenem Weg zu ermittelnde Grösse; die zugehörige Lichtbogendauer bei gegebenem v folgt aus obiger Beziehung. *Für konstante Abschaltleistung muss demnach die Zeitdauer t nach einer gleichseitigen Hyperbel mit der Schaltgeschwindigkeit v variieren,* derart, dass sich t für sehr grosse Geschwindigkeiten dem Werte Null nähert, bezw. für $v = 0$ unendlich gross wird. Die Berücksichtigung des Wärmeaustausches an den Elektroden lässt jedoch vermuten, dass der pro Zeiteinheit erfolgte Wärmeverlust mit steigender Schaltgeschwindigkeit kleiner wird, sodass sich die Konstanten im Sinne einer grösseren Lichtbogenlänge verändern. Tatsächlich lässt sich dies bei allen Versuchskurven nachweisen. Fig. 33 gibt ein Beispiel einer Aufnahme mit dem Versuchsschalter und Normalelektroden; auf den Tafeln VI und VII sind diesbezüglich weitere Graphiken aufgezeichnet. Die Versuchsresultate werden mit steigender Geschwindigkeit ungenauer, dies tritt besonders in der Ermittlung der Grösse s zu Tage; dazu kommt, dass auf unseren Kurvenblättern der Masstab der Bogenlängen zu

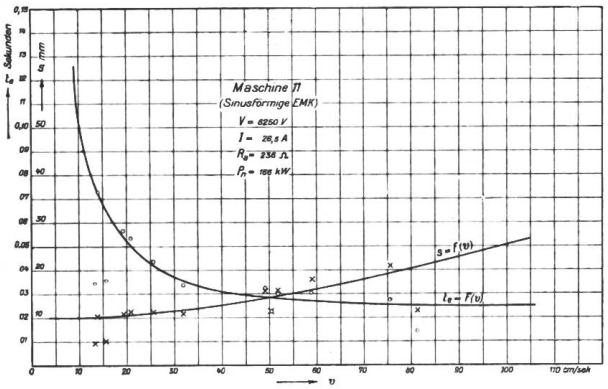


Fig. 33

*) Die neuen Modelle der MFO-Schalter verwenden für den Abreisskontakt eine ähnliche Konstruktion, wie wir sie in den Ausführungen von Carl Maier und Sprecher & Schuh untersucht haben, sodass deren Resultate mit jenen identisch sein dürften. Wir hatten aus diesem Grunde das Modell nicht in unsere Untersuchungen einbezogen.

gross gewählt worden ist. Indessen lässt sich doch aus dem vorliegenden Material eine gute Uebereinstimmung mit den obigen Ueberlegungen herauslesen. Wir entnehmen z. B. den Messungen am Versuchsschalter mit Normal-Elektroden:

Abschaltleistung 747 kW bei 8000 Volt, ohmsche Belastung, einpolige Unterbrechung.
Mittlere normale Abschaltgeschwindigkeit ca. 80 cm/Sek. (mittlere Versuchswerte).

v	v	t	t in	Bogenlänge		
cm/Sek.	% der Normalen	Sek.	% der Normalen	cm	% der Normalen	Bemerkungen
16,5	20,6	0,210	456	3,4	92	höchster Versuchswert, starke Rauch-
20	25	0,170	370	3,4	92	entwicklung im Schalter.
28	35	0,121	263	3,4	92	
40	50	0,085	185	3,4	92	
60	75	0,058	126	3,5	94,6	
80	**100**	**0,046**	**100**	**3,7**	**100**	
100	125	0,041	89	4,05	109,5	
120	150	0,039	84,8	4,55	121,5	
140	175	0,028	80,5	5,25	142,0	extrapoliert.

Wir sehen: *dass die Lichtbogendauer und damit die Schalterarbeit für eine gegebene Abschaltleistung nach einer hyperbolischen Kurve mit wachsender Schaltgeschwindigkeit abnimmt, gemäss dem Gesetz* $t = \frac{s}{v}$. *Die Lichtbogenlänge s wächst von einer bestimmten Geschwindigkeit an langsam mit dieser, sodass eine weitere Steigerung der letzteren wenig mehr zur Verkleinerung der Bogendauer beiträgt.* Dieser nützliche Grenzwert hat sich für den Versuchsschalter, Konstruktion Carl Maier, unabhängig von Abschaltleistung und Betriebsspannung zu etwa 100 cm/Sek. ergeben, beim untersuchten M. F. O.-Schalter (altes Modell für 200 A, 10 000 V), für rund 60 cm/Sek. Schaltgeschwindigkeit gebaut, liegt der Grenzwert bei 60—80 cm/Sek. Wir können daraus den Schluss ziehen, *dass für betriebsmässige Abschaltleistungen eine Steigerung der Schaltgeschwindigkeit über den für moderne Konstruktionen gebräuchlichen Wert hinaus nicht mehr von grossem Einfluss auf die Grösse der Schalterarbeit ist.* Es wäre zu empfehlen, diese Verhältnisse für Kurzschlussleistungen zu überprüfen. Als Ergänzung zum Bericht über die experimentellen Aufnahmen sei hier erwähnt, dass uns diese Beziehungen erlaubten, die im Verlauf einer Versuchserie stets veränderliche Schaltgeschwindigkeit in ihrem Resultat auf konstante Geschwindigkeit $v = 55$ cm/Sek. umzurechnen. Wir gingen so vor, dass wir mit Hilfe obiger Gleichung t_e vorerst für s = konstant ermittelten und alsdann dem Anstieg von s mit der Schaltgeschwindigkeit durch Anfügung eines Korrektionsgliedes Rechnung trugen.

Der wirkliche Verlauf der Schaltgeschwindigkeit während des Abschaltvorgangs ist bei unserem Versuchsschalter nicht geradlinig, wie in den theoretischen Erörterungen vorausgesetzt. Fig. 34 illustriert die oszillographisch aufgenommenen Verhältnisse bei einer etwas kleineren Geschwindigkeit als der Normalen. Wir regulieren allgemein die Schaltgeschwindigkeit durch Veränderung des an der Antriebswelle über eine Scheibe angebrachten Gegengewichtes. Dieses betrug im Fall beiliegender Kurve 11,4 kg. Als Folge des grossen Leerlaufs der Normalelektrode (ca. 5.55 cm) beginnt der Schaltvorgang übereinstimmend mit den übrigen Wegdiagrammen mit rund 80 cm/Sek. Geschwindigkeit, die sich mit Ausnahme einer Unstetigkeit bis ca. 60 mm Elektrodendistanz erstreckt, eine Länge, die wir mit unseren Abschaltleistungen nie überschritten, die wirkliche Schaltgeschwindigkeit würde also nur wenig vom Mittelwert abweichen. Indessen zeigt sich im Schalterverlauf eine stets an gleicher Stelle eintretende starke Verzögerung und darauffolgende Beschleunigung der Schalterbewegung, die die Geschwindigkeit kurzzeitig bis auf 30 cm/Sek. und mehr sinken lässt.

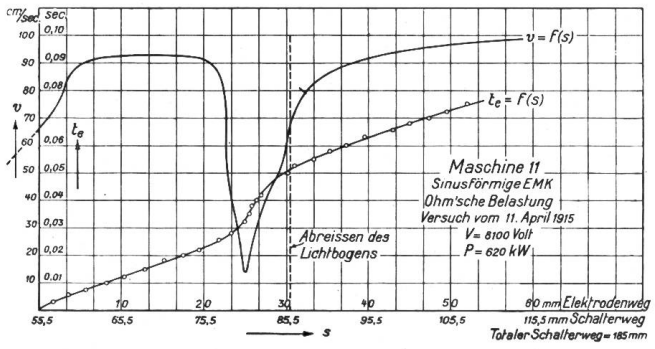


Fig. 34.

Es erklären sich daraus die oft grossen Abweichungen gewisser Messresultate aus der wohlgeordneten Schar der übrigen Punkte. Wir haben die Ursache dieser Erscheinung nie ganz aufdecken können; aller Wahrscheinlichkeit nach liegt diese im Schalter als lokale Klemmung in den Führungen der Kontaktbrücke. Wir haben konstatiert, dass bei gewisser Abschaltleistung die Bogenlänge, die gesetzmässig in das Bereich des Geschwindigkeitssprungs fällt, durch ausserordentliche Neuzündungen um eine Halbperiode und mehr verlängert wurde. Wir erwähnen diese Störungserscheinung lediglich, um darzutun, welch hohe Anforderungen an den konstruktiven Aufbau der Schalter zu stellen wären, wollte man mit Gewissheit jede unkontrollierbare Störung im Abschaltvorgang vermeiden. Im übrigen sind von uns keine weiteren Schalterkonstruktionen nach dieser Hinsicht untersucht worden, da dieser Punkt nicht Gegenstand unseres Programms ist.

C. Der Einfluss der mehrfachen Unterbrechung auf den Abschaltvorgang.

Bei der mehrfachen Unterbrechung sind im Oelschalter zwei oder mehrere Lichtbogen in Serie geschaltet, deren Elektroden gleichzeitig um den gleichen Betrag von einander entfernt werden. Bezeichnen wir wie früher die Spannung eines Bogens mit e_i, so ist der Betrag der an den Klemmen gemessenen inneren Schalterspannung $n \cdot e_i$, wenn n die Zahl der Serien-Bogen bedeutet. Die Gleichung des Stromkreises lautet dann z. B. im Fall des induktionslosen Stromkreises:

$$V_m \sin \omega t = i \cdot r_a + n \cdot e_i$$

nach Division mit n und Einsetzen in die Bedingungsgleichung (7) erhält man in diesem Fall, wenn wir gleich mit den Effektivwerten rechnen:

$$\left\{\frac{V}{n} - (g + \alpha \cdot v \cdot t)\right\}^2 = \frac{4\, r_a}{n} (\gamma + \delta \cdot v \cdot t)$$

oder umgeformt:

$$\{V - (n \cdot g + n \cdot \alpha \cdot v \cdot t\}^2 = 4\, r_a (n \cdot \gamma + n \cdot \delta \cdot v \cdot t) \quad . \; . \; . \qquad (22)$$

Der Abschaltvorgang verhält sich demnach bei mehrfacher Unterbrechung wie der Fall der einfachen Abschaltung mit n-fachen Lichtbogenkonstanten. Wir haben dies durch Betrachtung der Verhältnisse des Wärmeaustausches schon an anderer Stelle festgelegt. Unter e_i verstehen wir daher wieder wie früher die totale innere Schalterspannung, unter s den Schalterweg an den Elektroden gemessen und unter t die hiezu erforderliche Zeitdauer bei der Schaltgeschwindigkeit v; s ist identisch mit der Bogenlänge eines Einzelbogens.

Damit kann, gestützt auf die früheren Untersuchungen, ohne weitere Rechnungen das Verhalten des Schalters bei mehrfacher Unterbrechung gekennzeichnet werden.

Der Verlauf der Lichtbogendauer mit den elektrischen Daten.

Der Aufbau der Formel (22) lässt erkennen, dass der qualitative Verlauf der Lichtbogendauer mit den elektrischen Grössen des Stromkreises der gleiche bleibt, wie wir ihn für einfache Unterbrechung im vorausgegangenen Kapitel behandelt haben. Die Abhängigkeit der Lichtbogenlänge mit der Abschaltleistung bei konstanter Betriebsspannung ist für den *induktionslosen Kreis* durch Gleichung (16) gegeben, welche in unserem Fall lautet:

$$P\,\{(V - n \cdot g) - n \cdot \alpha \cdot s\}^2 = 4\,(V - n \cdot g)^2 \cdot (n \cdot \delta \cdot s + n \cdot \gamma)$$

für $s = o$ wird die Grenzleistung: $P = 4 \cdot n \cdot \gamma$. Die Grenzleistung für Lichtbogenfreiheit wird also bei mehrfacher Unterbrechung um den n-fachen Betrag erhöht. Für $P = \infty$ gelangen wir zur maximalen Bogenlänge, die sich nun schreibt:

$$s_{max} = \frac{V - n \cdot g}{n \cdot \alpha}$$

Wird g gegenüber V vernachlässigt, so zeigt sich, dass die maximal mögliche Lichtbogenlänge auf den n-ten Teil des Maximalwertes bei einfacher Unterbrechung zurückgeht. Die (P, t) Kurve muss daher über ihren ganzen Verlauf um einen entsprechenden Betrag tiefer liegen als die zugehörige Kurve der einfachen Unterbrechung. Wir gelangen zum gleichen Resultat für die Beziehung zwischen t_e und V bei gegebener Abschaltleistung, was ohne weiteres aus der Betrachtung von Gleichung (17) Seite 169 folgt. Die Schar der Kurven konstanter Lichtbogenlänge auf Fig. 20 bleibt in ihrem Verlauf annähernd unverändert, nur reduzieren sich die angegebenen Bogenlängen auf den n-ten Teil. Die Herbeiziehung der *Induktivität* in den Stromkreis wird gemäss früherem im Ansatz berücksichtigt:

$$t_{r,L} = t_r (1 + K_1 \operatorname{tg} \varphi + K_2 \operatorname{tg} \varphi^2 + \ldots)$$

Unsere diesbezüglichen Ueberlegungen lassen es nicht als wahrscheinlich erscheinen, dass die Grössen K_1, $K_2 \ldots$ im wesentlichen durch die Lichtbogenkonstanten beeinflusst sind; es ist daher anzunehmen, dass erstere unabhängig von der Zahl der Unterbrechungen bleiben. Damit kommen wir zum Schluss, dass die Bogenlänge, bezw. die Dauer des Abschaltvorgangs im induktiven Kreis bei mehrfacher Unterbrechung eine dem Werte t_r proportionale Verminderung erfährt, d. h. ebenfalls indirekt proportional mit der Zahl der Unterbrechungen kleiner wird.

Wir haben hierüber mit Maschine 11 an verschiedenen Elektroden eine grosse Anzahl von Versuchen durchgeführt, deren Resultat auf den Tafeln VIII und IX niedergelegt ist. Fig. 35 gibt eine Zusammenfassung über die Messwerte mit den Kontakten von Sprecher & Schuh. Das vorliegende Material lässt erkennen, dass unsere Ueberlegungen in der Hauptsache bestätigt werden. Es zeigt sich indessen, dass die Proportionalität nicht überall gewahrt ist, indem mit steigender Unterbrechungszahl die Lichtbogendauer nicht mehr auf den n-ten Teil heruntergeht. Die nachfolgende Tabelle mag dies näher illustrieren.

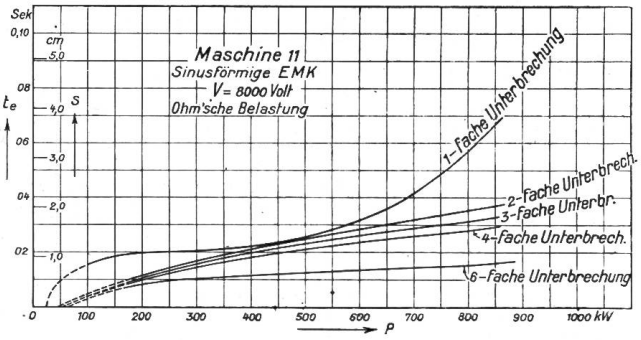


Fig. 35.

Einpolige Abschaltung 8000 Volt, 750 kW, ohmsche Belastung, Maschine 11, Abreisskontakt Sprecher & Schuh. $v = 55$ cm/Sek.

(Versuchswerte)

Zahl der Unterbrechungen	Bogen-Dauer		Bogen-Länge		$\frac{s}{2} \cdot t_e$ in
	t_e in Sek.	in % der Normalen	Einzelbogen cm	total cm	% der Normalen
1	0,048	**100**	2,640	2,640	**100**
2	0,034	70,8	1,870	3,740	100,5
3	0,030	62,5	1,650	4,950	116,5
4	0,027	56,2	1,482	5,928	125,5
6	0,015	31,2	0,825	4,950	58,5

Als Folge des langsamen Zurückgehens der Werte für die Lichtbogendauer vergrössert sich die totale, für die Karbonisierung in Betracht kommende Länge des Bogens. Die Beeinflussung des Oels durch die Lichtbogenwirkung ist durch das Produkt $\frac{s}{2} \cdot t$ gekennzeichnet, die letzte Kolonne umstehender Tabelle zeigt dessen Veränderlichkeit. Man sieht, dass diese indessen nur um einen relativ kleinen Betrag angewachsen ist, bei sechsfacher Unterbrechung ist sie sogar auf nahezu die Hälfte des normalen Betrages zurückgegangen.

Wir lesen aus den Versuchsresultaten das Ergebnis: *Die mehrfache Unterbrechung des Lichtbogens einer gegebenen Abschaltleistung verkürzt dessen Existenzbereich im Sinne einer mit der Unterbrechungszahl steigenden Verkleinerung der Lichtbogendauer. Diese geht jedoch langsamer zurück, als die ansteigende Unterbrechungszahl, sodass daraus eine stete Vergrösserung der totalen Bogenlänge resultiert. Als Folge hievon kann eine Vergrösserung der Oel-Karbonisierung eintreten. Für die untersuchte Elektrode ist dieser Nachteil nicht ins Gewicht fallend.*

Der Einfluss mehrfacher Unterbrechung auf die Grösse C.

Wir haben früher schon erörtert, dass die Serieschaltung mehrerer Lichtbogen infolge der vergrösserten totaten Kraterfläche einen gesteigerten Wärmeentzug an den Elektroden zur Folge haben muss. Dies ist im Vorangegangenen analytisch durch die n-fache Vergrösserung der Konstanten zutage getreten. Es darf daher angenommen werden, dass die für die gegebene Elektrode typische Form der Charakteristiken durch die mehrfache Unterbrechung weniger beeinflusst wird, als deren relative Lage zum Axenkreuz unserer Fig. 4. Dies besagt, dass eine Reduktion der Bogenlängen gleichsinnig den Endbetrag der inneren Schalterspannung bezw. die Grösse C beeinflusst. So ergaben denn auch unsere Messungen folgendes Bild:

Einpolige Abschaltungen an Maschine 11.

Spannung in Volt	*Normal-Elektroden*			*Abreisskontakt Sprecher & Schuh.*				
	Grösse C in % bei:			Grösse C in % bei:				
	n = 1	n = 2	n = 4	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 6
3000	3,1	2,0	1,6	—	—	—	—	—
6000	3,0	1,9	1,3	—	—	—	—	—
8000	2,7	1,5	1,2	2,6	2,0	1,5	1,1	1,0

Die beidseitige Reduktion in den Werten t_e und C lässt nun einen namhaften Vorteil der mehrfachen Unterbrechung bezüglich der *Schalterarbeit* herausblicken. Wir bringen nachfolgend eine Zusammenstellung der Veränderlichkeit der Schalterarbeit für eine bestimmte Abschaltleistung bei gegebener Elektrodenform. Die Werte für die Lichtbogendauer sind obiger Zahlen-Tafel entnommen.

Einpolige Abschaltung 8000 Volt, 740 kW, ohmsche Belastung, Maschine 11. Abreisskontakt Sprecher & Schuh. $v = 55$ cm/Sek.

(Versuchswerte.)

Zahl der Unterbrechungen	t_e in Sek.	C in %	$A = c \cdot t_e \cdot J \cdot E$ in kW Sek.	A in % der Normalen
1	0,048	2,6	$1{,}09_5$	**100**
2	0,034	2,0	$0{,}59_6$	54,5
3	0,030	1,5	$0{,}39_4$	36,0
4	0,027	1,1	$0{,}25_7$	23,5
6	0,015	1,0	$0{,}13_1$	12,0

Die Würdigung des nahezu indirekt proportionalen Rückgangs der Schalterarbeit mit der Unterbrechungszahl lässt den konstatierten Nachteil etwelcher Vergrösserung der Oel-Karbonisierung gering erscheinen, wir kommen daher zum Schluss, *dass die Anwendung mehrfacher Unterbrechung innerhalb nützlicher Grenzen im Interesse einer Verminderung der Schalterarbeit zu empfehlen ist.*

Zusammenfassung der Resultate aus den Untersuchungen an Oelschaltern, 1. Teil.

Wie in der Einleitung schon dargetan, soll diese Zusammenfassung noch nicht die Form der Leitsätze wiedergeben; für deren Formulierung wollen wir das gesamte Versuchsmaterial berücksichtigen, das jedoch zur Stunde noch nicht in allen Punkten bearbeitet ist. Immerhin lässt sich aus den heute bekannt gegebenen Ergebnissen, wie der Bericht gezeigt haben dürfte, die theoretische Bestätigung mancher praktisch bereits angewendeten Regel, vielleicht auch diese und jene neue Erkenntnis herauslesen, sodass wir jetzt schon mit Sicherheit einige für die Praxis wichtige Folgerungen ziehen können.

Die Untersuchung über *die physikalischen Bedingungen zur Lichtbogenbildung* haben gezeigt, dass im Oelschalter der Abschaltvorgang nicht unter allen Bedingungen eine Lichtbogenerscheinung nach sich zieht. Es gibt endliche Grenzwerte der Betriebspannung und der Abschaltleistung, unterhalb derer kein Lichtbogen entsteht; indessen sind diese Grenzwerte sehr klein im Vergleich zu den im praktischen Betrieb auftretenden elektrischen Grössen. Es ist deshalb i. a. stets mit Lichtbogenbildung zu rechnen. Die maximale Länge des Abreissbogens zeigt sich unter gleichen Voraussetzungen im elektrischen Stromkreis als hauptsächlich bedingt durch die Grösse des Wärmeentzugs an den Elektroden, welcher für die gegebene Konstruktion charakteristisch ist. Für ein und denselben Schalter hängt anderseits die Bogenlänge bei gegebener Abschaltleistung von den elektrischen Konstanten des Stromkreises ab, wobei die Phasenverschiebung zwischen Strom- und Leerlaufspannung von wesentlichem Einfluss ist. Versuch und Ueberlegung führen zum Schluss, dass die Bogenlänge mit der Nacheilung des Stromes anwächst und theoretisch für 90^0 Phasenverschiebung unendlich gross werden müsste; durch Ueberlegung ist der Schluss gezogen worden, dass umgekehrt die Phasenvoreilung des Stromes eine Verkürzung der Lichtbogendauer zur Folge hat.

Für die Wärmeentwicklung im Schalter ist indessen nicht die Lichtbogenlänge allein massgebend, sondern die Schalterarbeit, welche berechnet wurde aus dem Produkt: Unterbrochene kVA-Leistung $\times$ Lichtbogendauer $\times$ eine Konstante des Schalters. Die Versuche ergaben, dass die Konstante, welche ein Mass der relativen Wärmeentwicklung des Schalters darstellt, praktisch als unabhängig von Strom, Spannung und den elektrischen Konstanten angesehen werden darf, sodass für gleiche unterbrochene Leistungen (Abschaltstrom $\times$ Leerlaufspannung) die Schalterarbeit proportional der Lichtbogenlänge ist.

Die Untersuchungen über *die Veränderlichkeit der Schalterarbeit mit den Betriebsdaten des Schalters* führten naturgemäss zum Schluss, dass diese mit ansteigendem Strom bezw. ansteigender Spannung grösser wird. Es ist hiefür die Gesetzmässigkeit angegeben worden. Die Berücksichtigung des Einflusses der Phasenverschiebung liess aber die wichtige Erkenntnis folgern, dass die Grösse der Schalterarbeit durch die abgeschaltete Leistung und ihren Leistungsfaktor allein noch nicht gegeben ist, sondern noch von der Art der generatorischen Anlage abhängt. Es ist hierbei die „hinter dem Schalter liegende Induktanz" von wesentlichem Einfluss. Die theoretisch abgeleitete und durch die Versuche bekräftigte Formulierung der Gesetzmässigkeit dieser Erscheinung führt zu einer Fülle interessanter Beziehungen, von denen einige im Abschnitt über das Verhalten des „Generatorschalters" behandelt wurden. Es ergibt sich z. B., dass die Abschaltung einer gegebenen Netzbelastung eine umso grössere Schalterarbeit hervorruft, je kleiner die Zahl der Maschineneinheiten ist, die die Last übernommen haben. Im gleichen Sinne wirkt die Vergrösserung der Spannungsänderung bei gegebener totaler Maschinengrösse; was weiterhin den Schluss ziehen

liess, dass der Verwendung vorgeschalteter Reaktanzspulen in diesem Sinne eine Verschlechterung der Abschaltbedingungen gleichkommt.

Die aufgestellten theoretischen Beziehungen lassen in einfacher Weise die Verhältnisse der Abschaltung einer Generatorüberlastung bis zum Kurzschluss verfolgen. Es zeigt sich, dass der Abschaltvorgang in der Nähe des absoluten Kurzschlusses unstabil wird, indem die Lichtbogenlänge in diesem Bereich einem unendlich grossen Wert zustrebt. Dieses, für den Schalter naturgemäss gefährliche Arbeitsgebiet kann durch den Einbau eines passend dimensionierten Vorschaltwiderstandes abgeschnitten werden. Weitere Untersuchungen über die Kurzschluss-Verhältnisse des Schalters zeitigten die mehr theoretisch bemerkenswerte Tatsache, dass die Lichtbogenlänge im angenäherten Kurzschluss nahezu unabhängig ist von der Grösse des Generators oder der Zahl der Maschineneinheiten, dass daher die Schalterarbeit angenähert proportional mit der unterbrochenen Kurzschluss-Leistung anwächst. Daraus folgt, dass im Interesse der Verminderung der Kurzschlussleistung die Verwendung von Maschinen relativ grosser Spannungsänderung zu empfehlen ist. Wir stellen uns damit scheinbar in Widerspruch mit dem oben Gesagten; indessen beziehen sich unsere vorangegangenen Erörterungen auf die Abschaltung einer absoluten Belastung, während wir hier eine relative Belastung der Maschine im Auge haben. Die endgültige Stellungsnahme benötigt die Heranziehung der Verhältnisse der automat. Schalterauslösungen, indem diese davon abhängt, ob das Relais bei einer kurzschlussähnlichen Ueberlastung den Schalter mit der fixierten, als zulässig erachteten Stromgrenze (als Vielfaches des normalen Stromes) auszulösen vermag (z. B. als blockiertes Relais) oder ob der Kurzschluss-Strom eher erreicht ist und bei diesem ausgeschaltet wird. Die diesbezüglichen Bedingungen sind im Bericht diskutiert. Die Frage soll im vollen Umfang unter Berücksichtigung der verschiedenen Auslösevorrichtungen der Schalter in einem Sonderbericht behandelt werden.

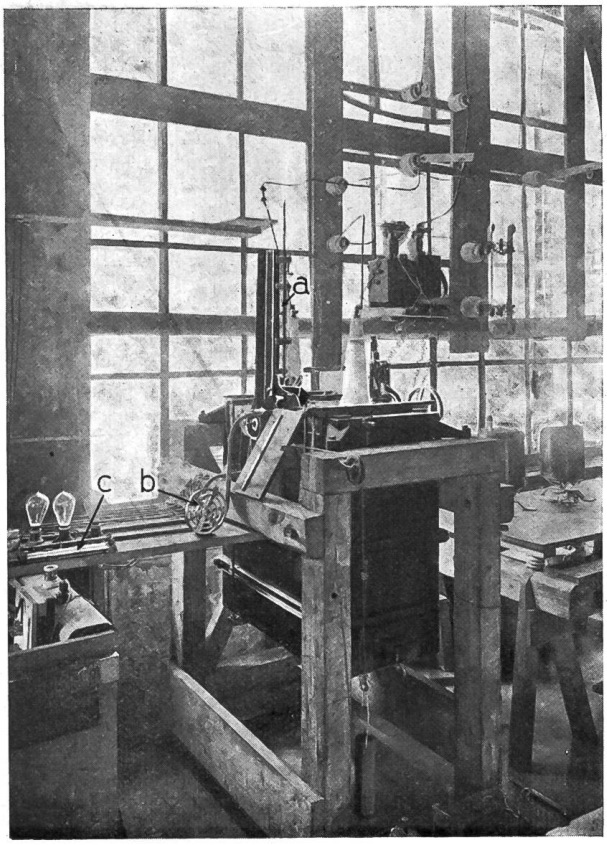
Nachdem bis hieher die Veränderlichkeit der Schalterarbeit mit den Betriebsbedingungen im unterbrochenen Stromkreis erörtert worden ist, also Fragen, die hauptsächlich den *Betrieb des Oelschalters* berühren, sind im letzten Kapitel des vorliegenden Berichtes die Untersuchungen über den Einfluss der *Schalterkonstruktion* in Angriff genommen worden. Die Vergleichung der verschiedenen typischen Kontaktkonstruktionen hinsichtlich der Bedingung kleinstmöglicher Schalterarbeit hat zu keinem positiven Resultat geführt, indem sich die heute gebräuchlichen Formen der Schleif- und Abhebekontakte in obigem Sinne als annähernd gleichwertig herausstellten. Bezüglich der Formgebung der Abreisskontakte liessen die Versuche die möglichst gute Abrundung der Ansatzstellen für den Lichtbogen als empfehlenswert erscheinen. Als Material für die Abreisskontakte soll beidseitig Kupfer Verwendung finden; die untersuchten Ausführungen mit Bronze- und Messing-Gegenkontakten haben bedeutend ungünstigere Werte der Schalterarbeit ergeben, abgesehen vom bedeutenderen Abbrand am Metallstück. Der Einfluss der Schaltgeschwindigkeit äussert sich im Sinne einer Verkleinerung der Schalterarbeit mit deren Steigerung. Der Zusammenhang folgt einer hyperbolischen Kurve, sodass die Schalterarbeit mit wachsender Geschwindigkeit im Bereich kleiner Werte rasch abnehmend bei grösseren Geschwindigkeiten nur noch um kleine Beträge zurückgeht. Bei den zwei untersuchten Schaltertypen liegen die normalen Schaltgeschwindigkeiten für betriebsmässige Abschaltungen beide bereits auf dem flach verlaufenden Ast, sodass eine weitere Steigerung wenig mehr zur Verkleinerung der Schalterarbeit beitragen wird. Es ist wahrscheinlich, dass für grosse Kurzschluss-Leistungen in diesem Sinne noch etwas zu erreichen ist. Die Unterteilung des Abschaltlichtbogens durch die mehrfache Unterbrechung kommt, wie Theorie und Versuch eindeutig zeigen, einer mit der Unterbrechungszahl nahezu proportionalen Verkleinerung der Schalterarbeit gleich. Die totalen Lichtbogenlängen wachsen hierbei allerdings an, doch ist, wie gezeigt wird, der daraus resultierende Mehr-Betrag der Karbonisierung des Schalteroels unwesentlich.

* * *

Soweit der Gegenstand unseres heutigen Berichtes. Wie schon angedeutet, ist in seinem letzten Abschnitt das grosse Gebiet der Untersuchungen über die Schalterkonstruktion erst angeschnitten; es verbleiben noch der, den Konstrukteur vor allem interessierende

Einfluss von Oeldruck und Temperatur auf die Schalterarbeit, sowie Erfahrungen mit künstlichen Mitteln zur Begrenzung der Lichtbogendauer. Die diesbezüglichen Untersuchungen sind heute bereits in Angriff genommen, sodass wir hoffen, in Bälde hierüber referieren zu können. Damit betrachten wir den I. Teil unseres engeren Programms als abgeschlossen; nach Beendigung unserer Versuche über den chemischen und thermodynamischen Vorgang im Abschaltprozess dürfte alsdann auch der II. Teil erledigt sein, womit wir hoffen, das uns in der Einleitung gesteckte Ziel erreicht zu haben.

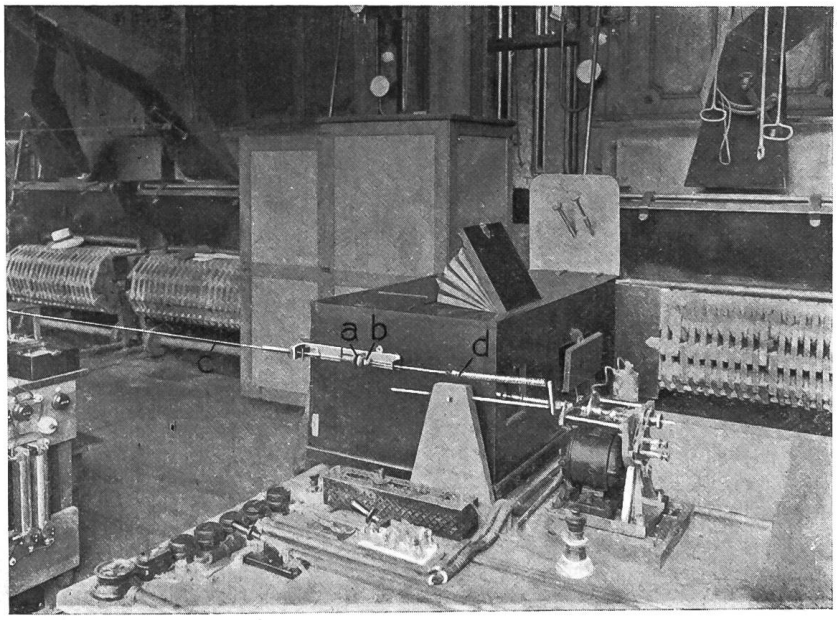
Tafel I.



Ansicht der Versuchsanlage im Kesselhaus des Kraftwerks Beznau.

Hochspannungsanlage mit Versuchsschalter (Carl Maier, Schaffhausen)

a: Kontakt-System, auf dem Schalter aufgebaut.
b: Uebersetzungs-Scheibe für die Schalterbewegung.
c: Schlittenführung.



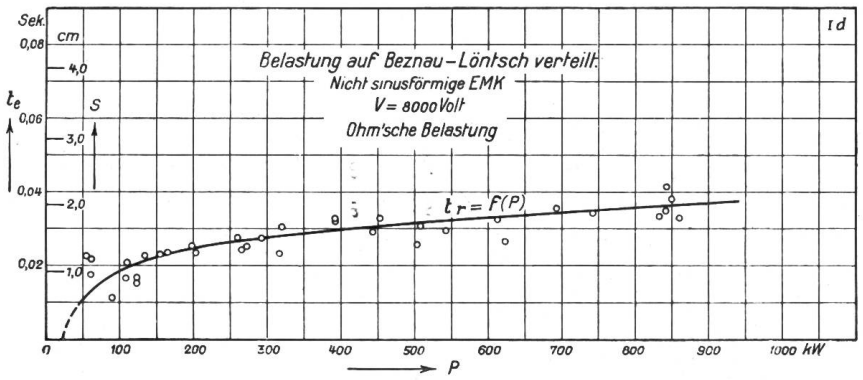
Oszillographen-Tisch

a: Endstück des Messschleifenhebels.
b: Anschlag (Mitnehmer) am Transportdraht.
c: Transportdraht.
d: Spannfeder zum Transportdraht.

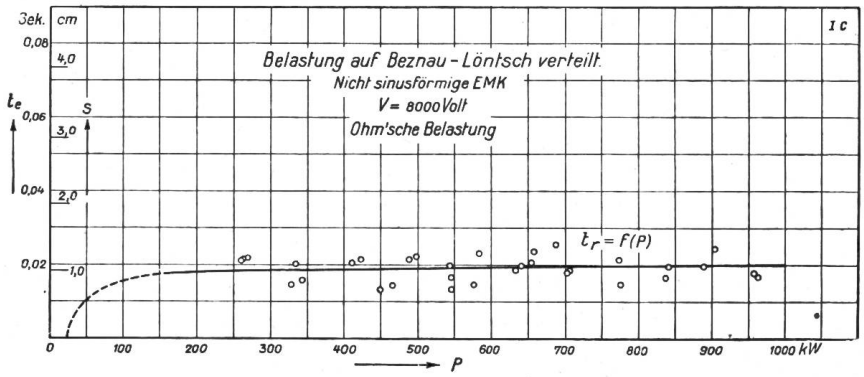
Tafel II.

Verlauf der Lichtbogenlängen mit der Abschaltleistung im nahezu induktionslosen Stromkreis.

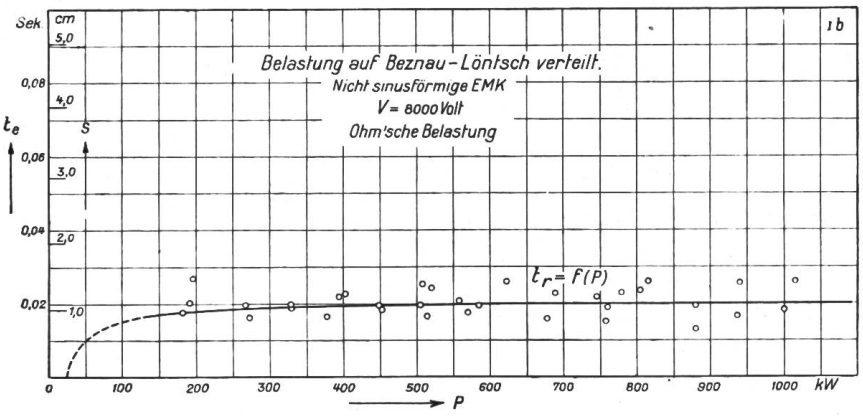
Kraftwerke Beznau-Löntsch. Einpolige Abschaltung, einfache Unterbrechung.



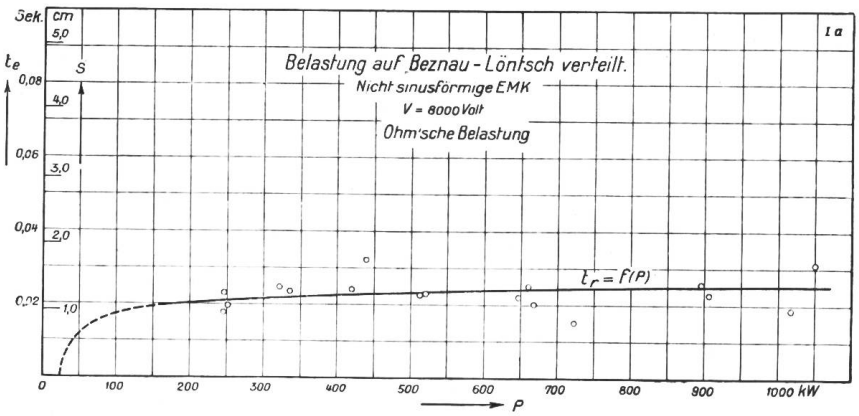
Normal-Elektroden.



Carl Maier-Elektroden.



Sprecher & Schuh-Elektroden

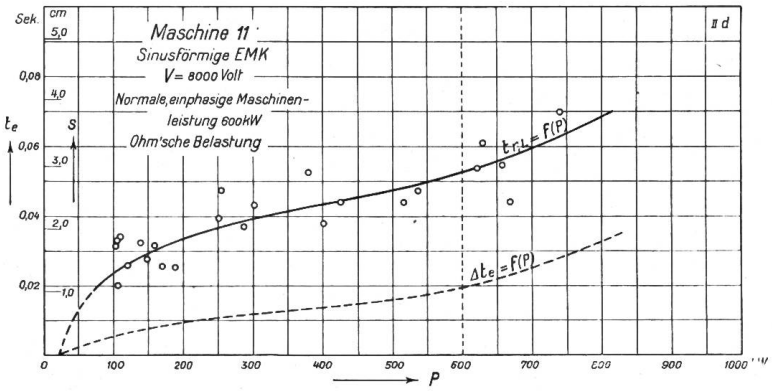


Brown Boveri-Elektroden.

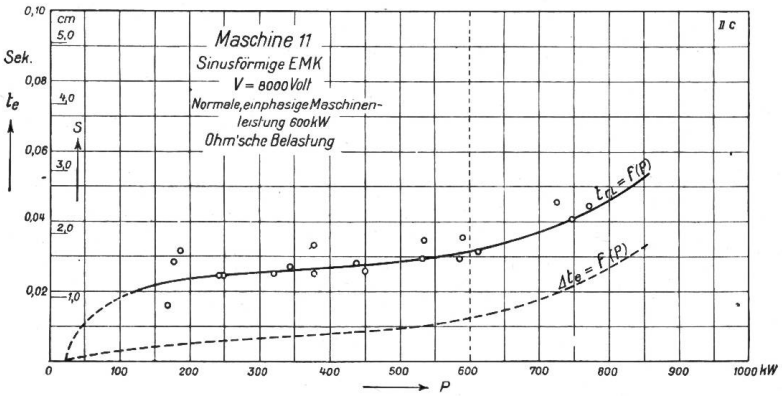
Tafel III.

Verlauf der Lichtbogenlängen mit der Abschaltleistung im induktiven Stromkreis. (Maschine 11.)

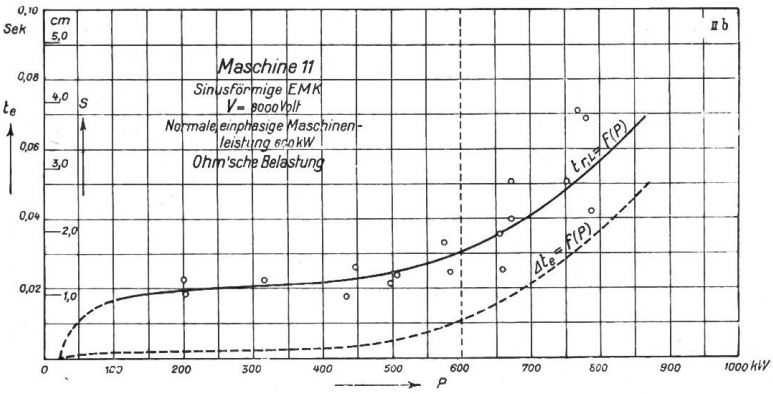
Einpolige Abschaltung, einfache Unterbrechung. Die Δt_e-Kurven zeigen die Differenz zwischen der Lichtbogenlänge bei Abschaltung *einer* Maschine bezw. der ganzen Zentrale.



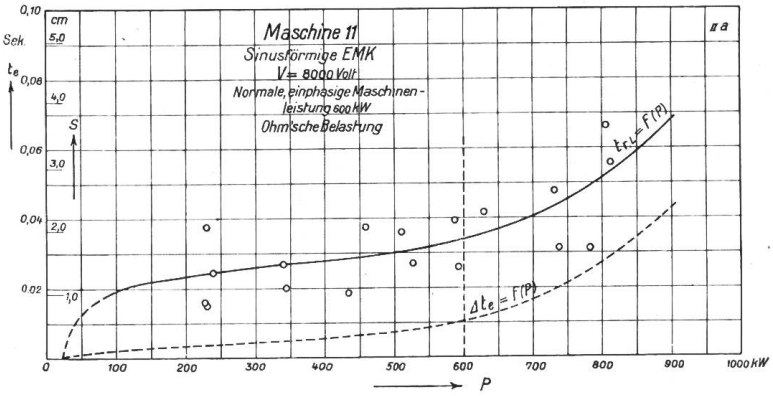
Normal-Elektroden.



Carl Maier-Elektroden.



Sprecher & Schuh-Elektroden.

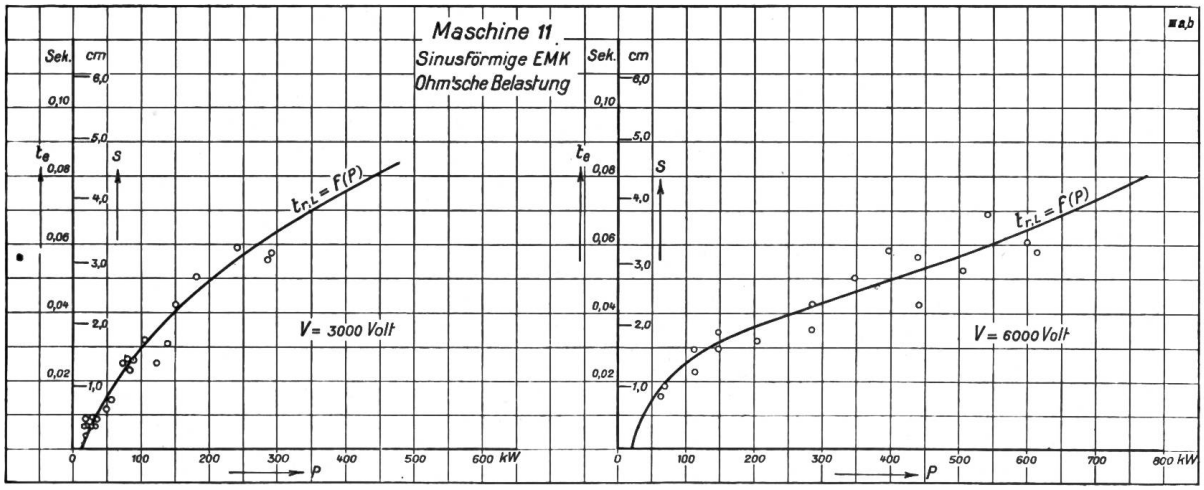


Brown Boveri-Elektroden.

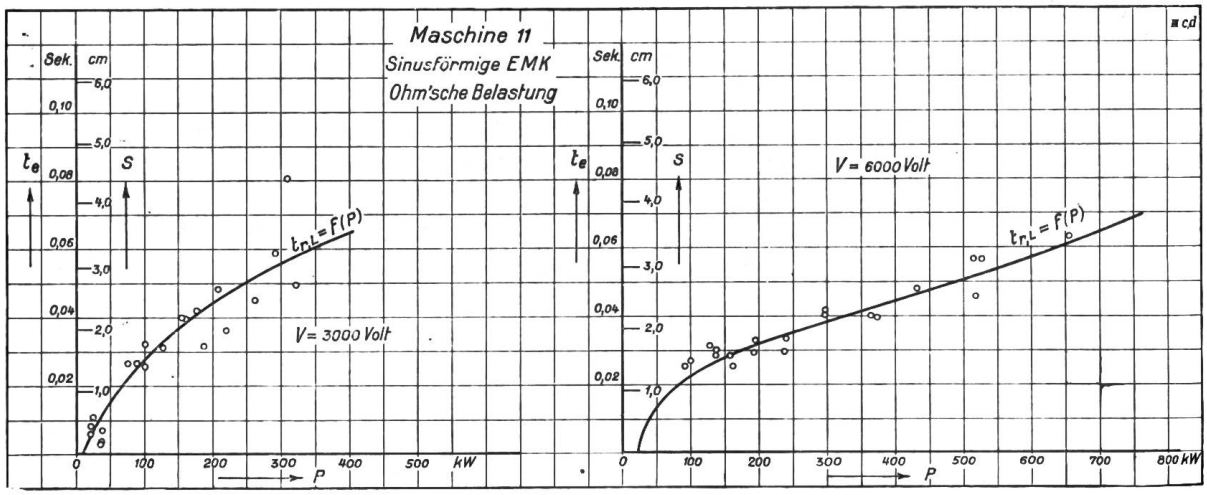
Tafel IV.

Einfluss der Betriebspannung auf den Verlauf der Lichtbogenlänge im induktiven Stromkreis. (Maschine 11.)

Einpolige Abschaltung, einfache Unterbrechung.



Versuche mit Normal-Elektroden.

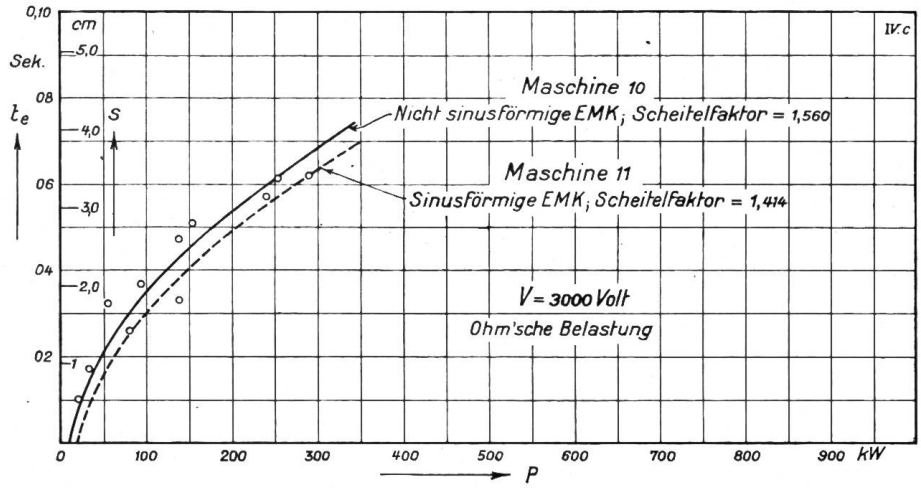


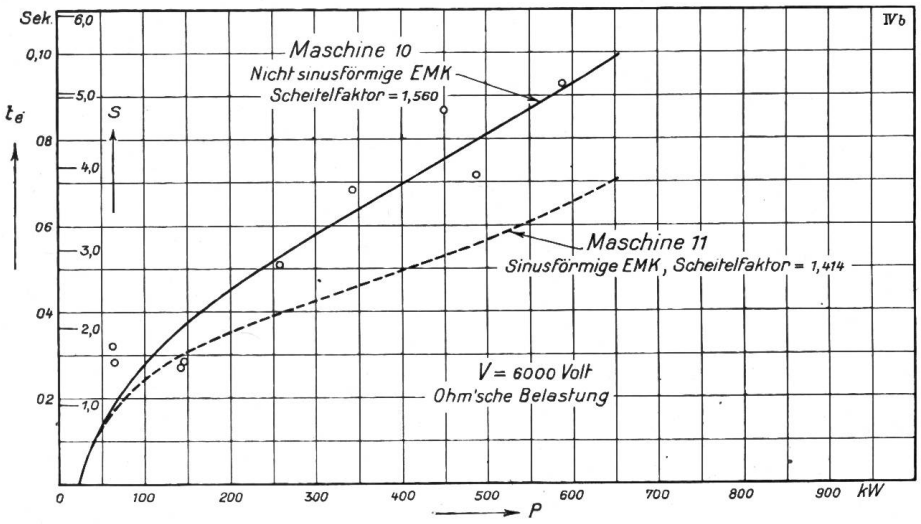
Versuche mit Abreisskontakt, Konstruktion Carl Maier.

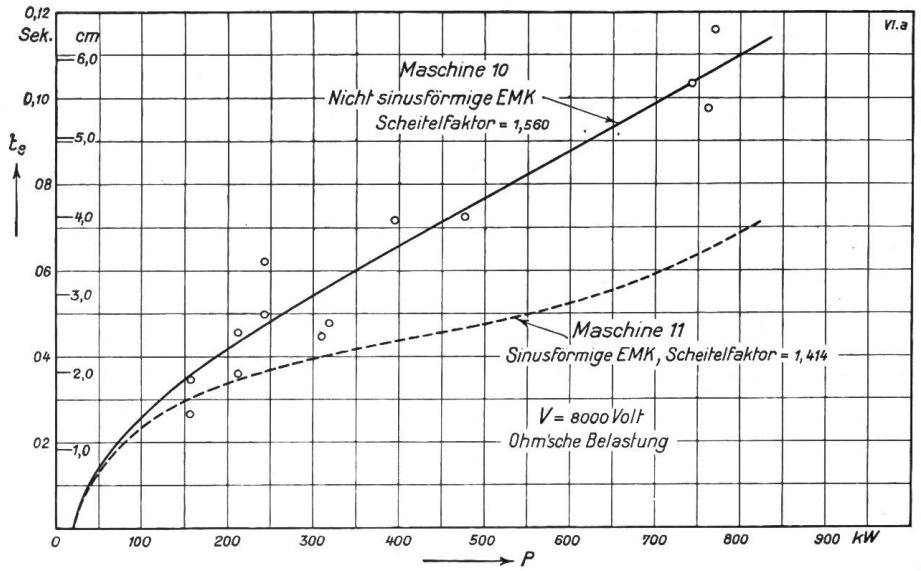
Tafel V.

Einfluss der Kurvenform des Generators auf die Lichtbogenlänge.

Einpolige Abschaltungen mit Normal-Elektrode.



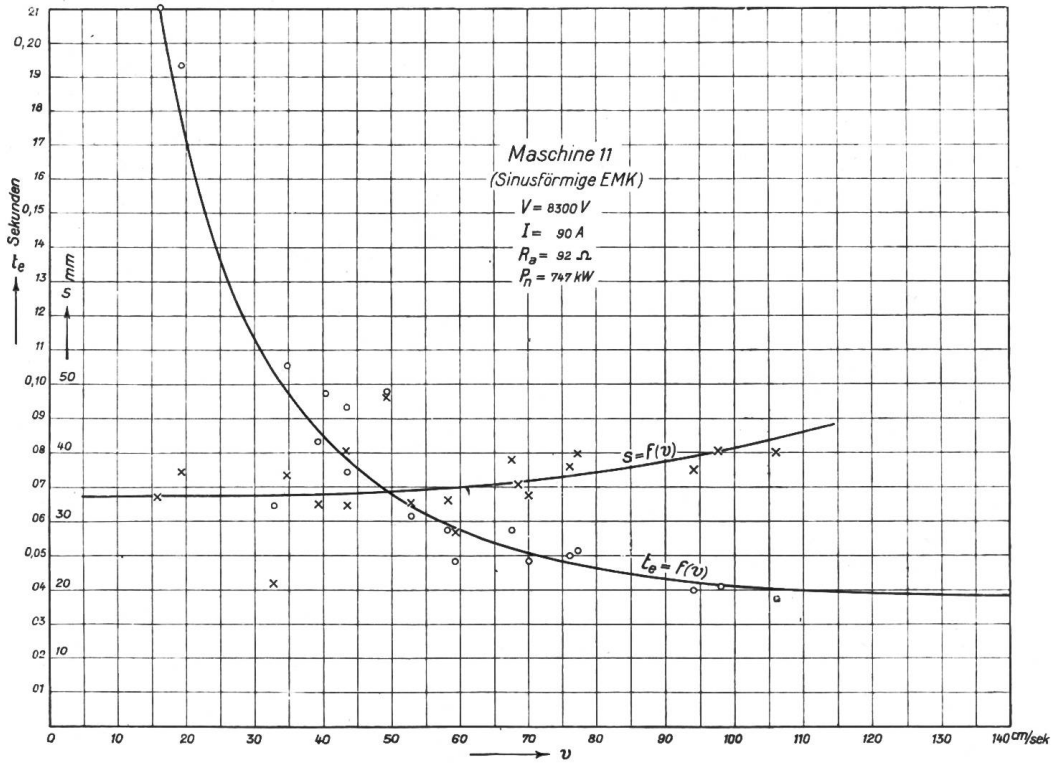


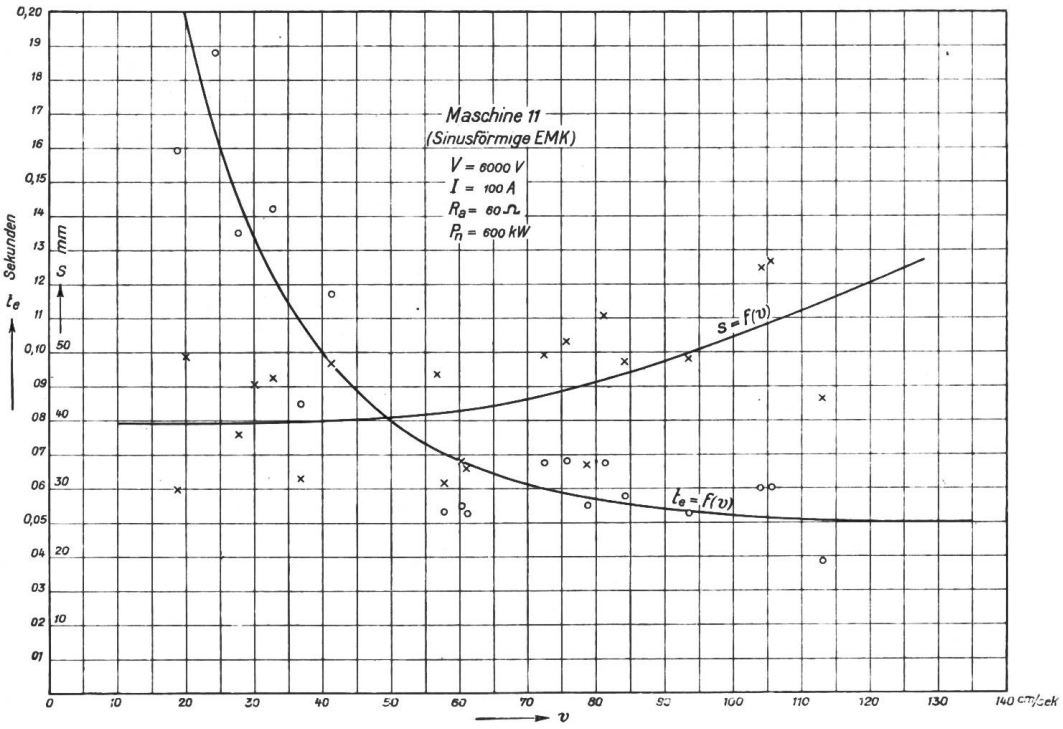


Tafel VI.

Einfluss der Schaltgeschwindigkeit auf die Lichtbogendauer bei konstanter Abschaltleistung.

Einpolige Abschaltungen mit *Normal-Elektrode.* Versuchschalter Carl Maier, Schaffhausen.
Oel: Oil Company, Druck und Temperatur normal.

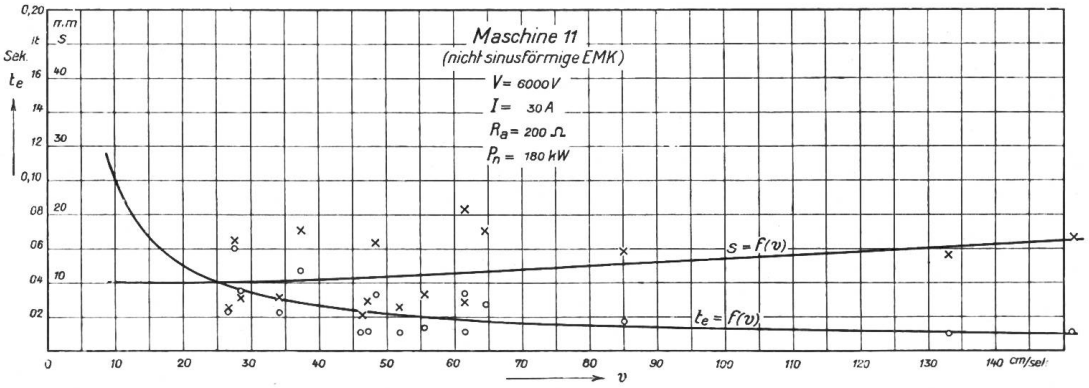




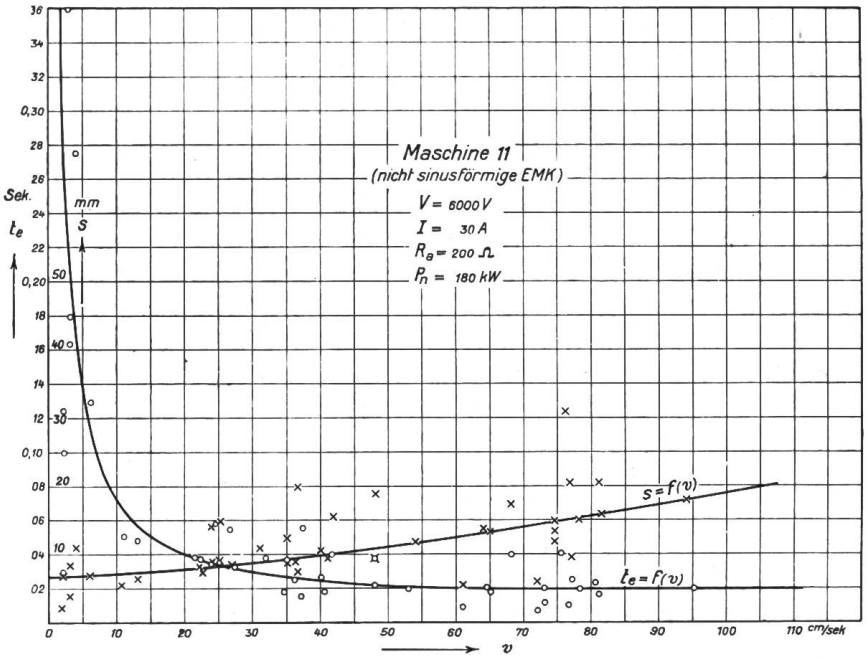
Tafel VII.

Einfluss der Schaltgeschwindigkeit auf die Lichtbogendauer bei konstanter Abschaltleistung.

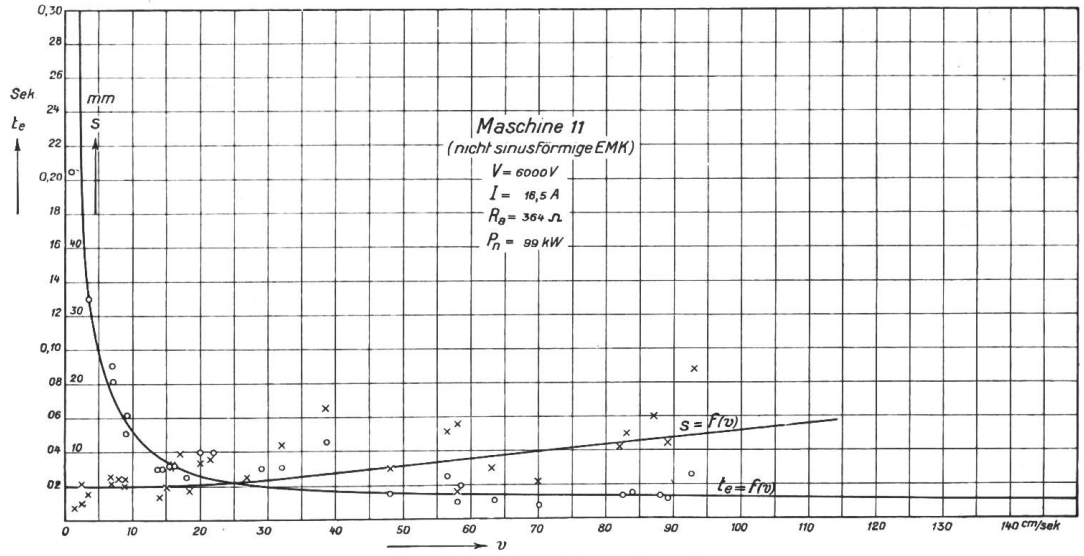
Einpolige Abschaltungen, Oel: Oil Comp., Druck und Temperatur normal.



M. F. O.-Schalter, Finger-Kontakt.



M. F. O.-Schalter, Bürsten-Kontakt.

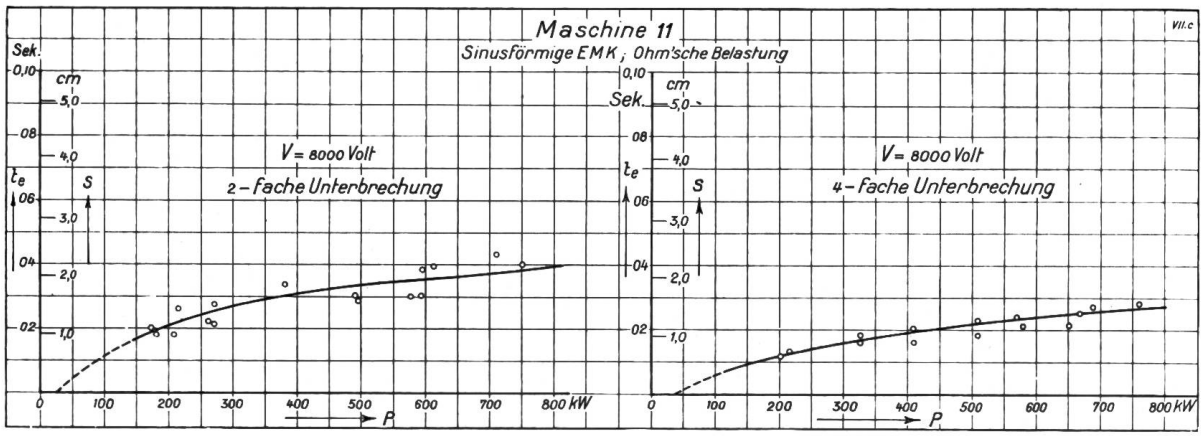


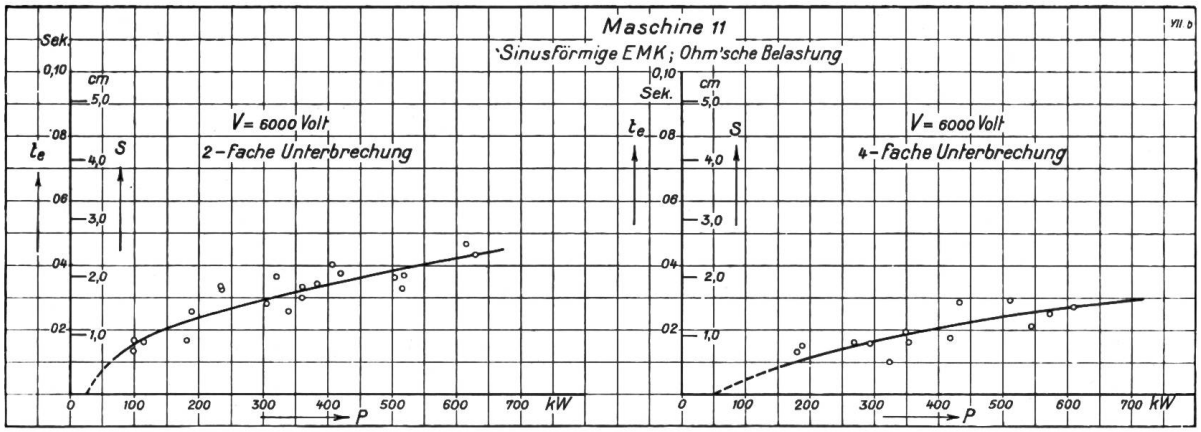
M. F. O-Schalter, Bürsten-Kontakt.

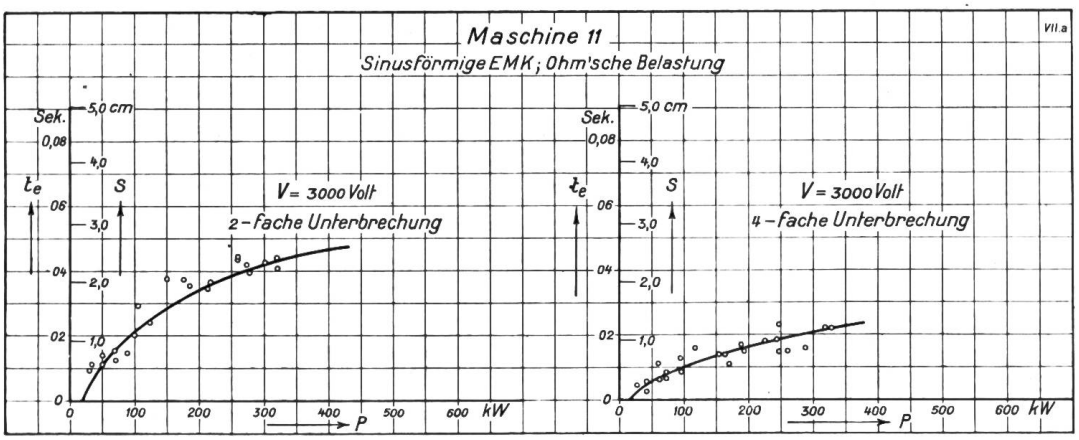
Tafel VIII.

Einfluss mehrfacher Unterbrechung auf die Lichtbogenlänge.

Einpolige Abschaltungen mit *Normal-Elektrode.*



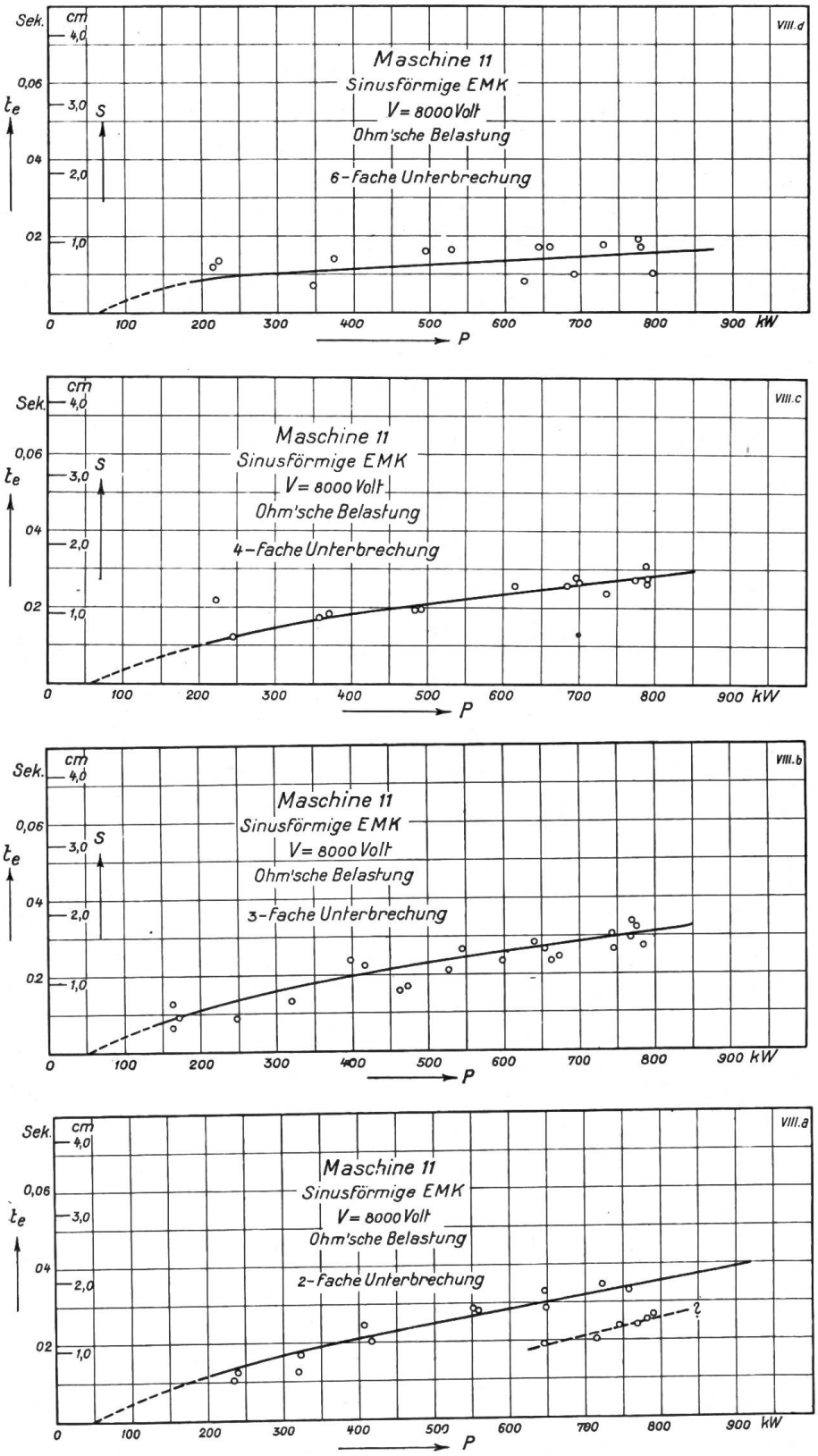




Tafel IX.

Einfluss mehrfacher Unterbrechung auf die Lichtbogenlänge.

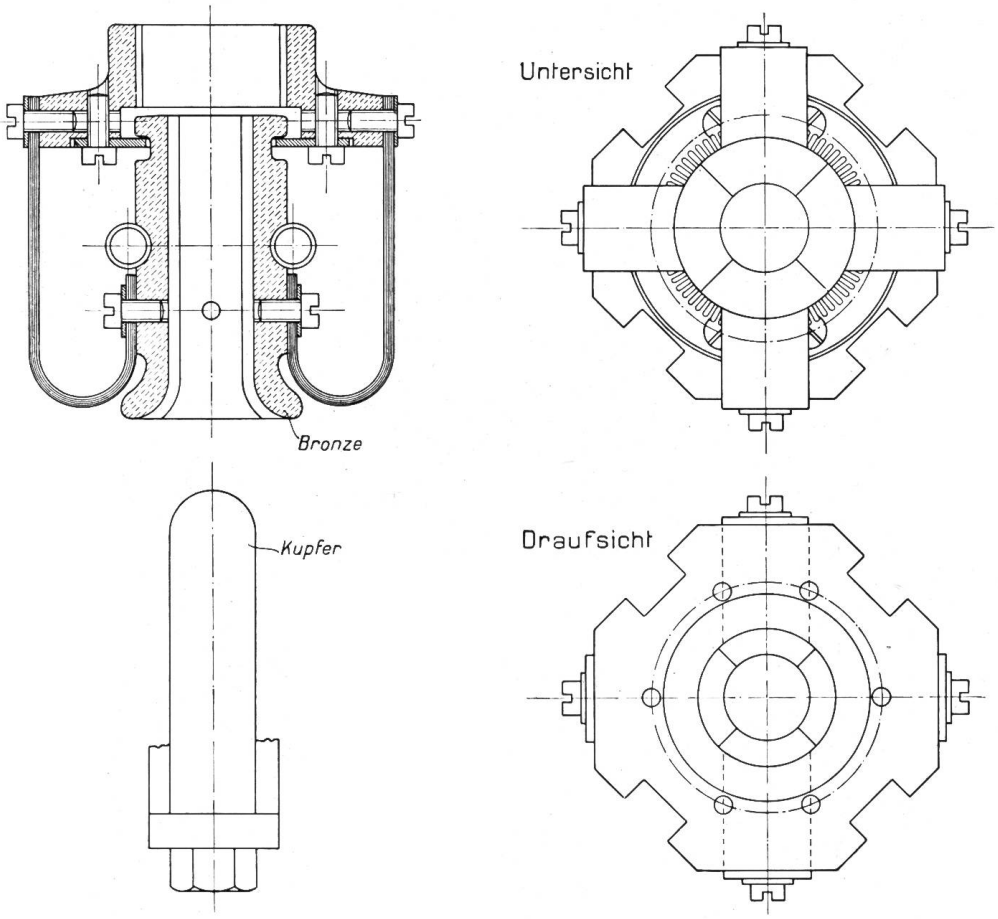
Einpolige Abschaltungen mit *Abreisskontakt*, Konstruktion Sprecher & Schuh.



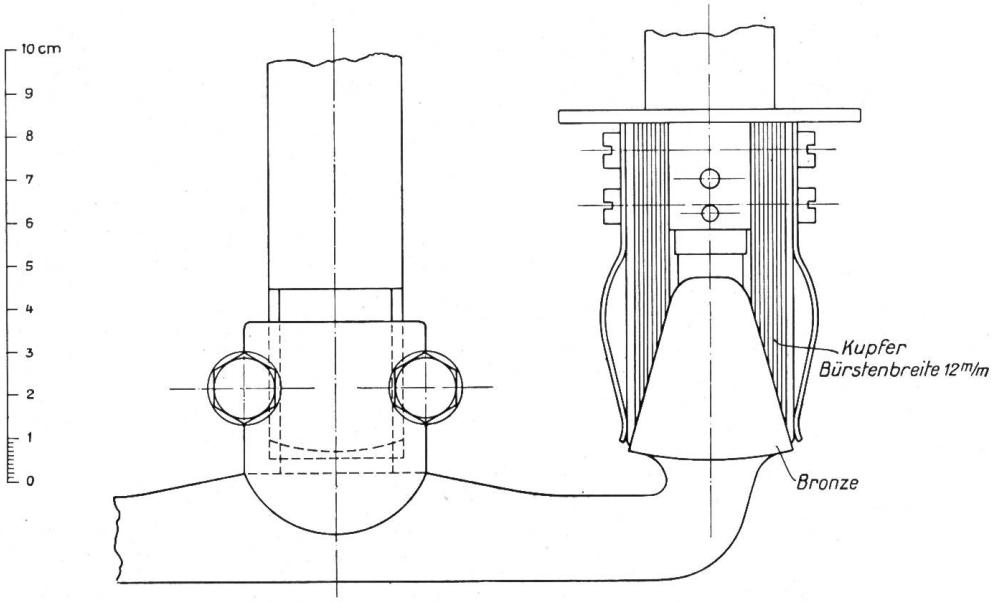
Tafel X.

Normal-Kontakt, Konstruktion Maschinenfabrik Oerlikon

Haupt- & Abreisskontakt in einer Form.



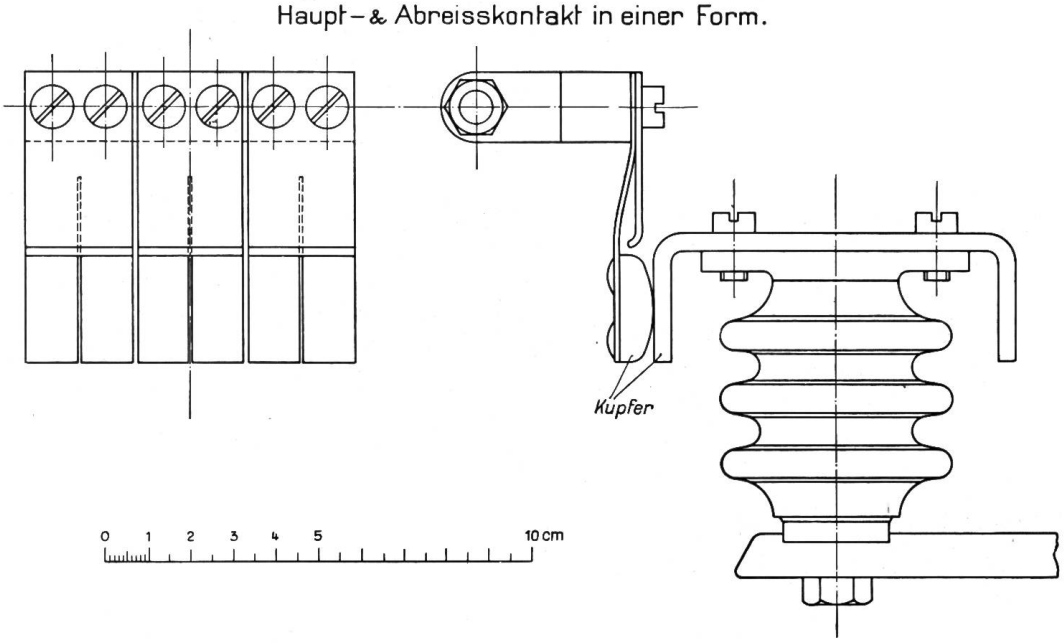
Bürsten-Abreisskontakt, altes Modell Maschinenfabrik Oerlikon



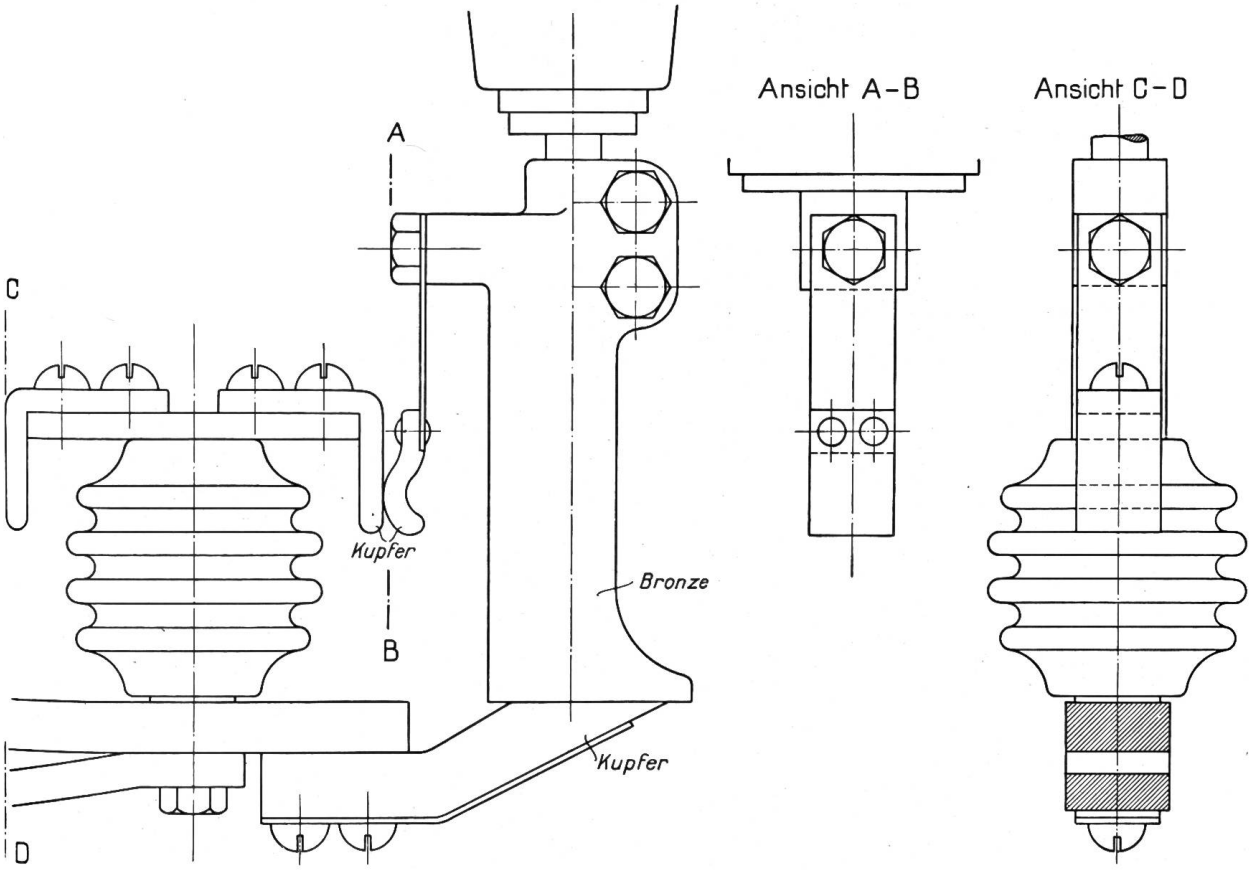
Tafel XI.

Konstruktion Carl Maier, Schaffhausen.

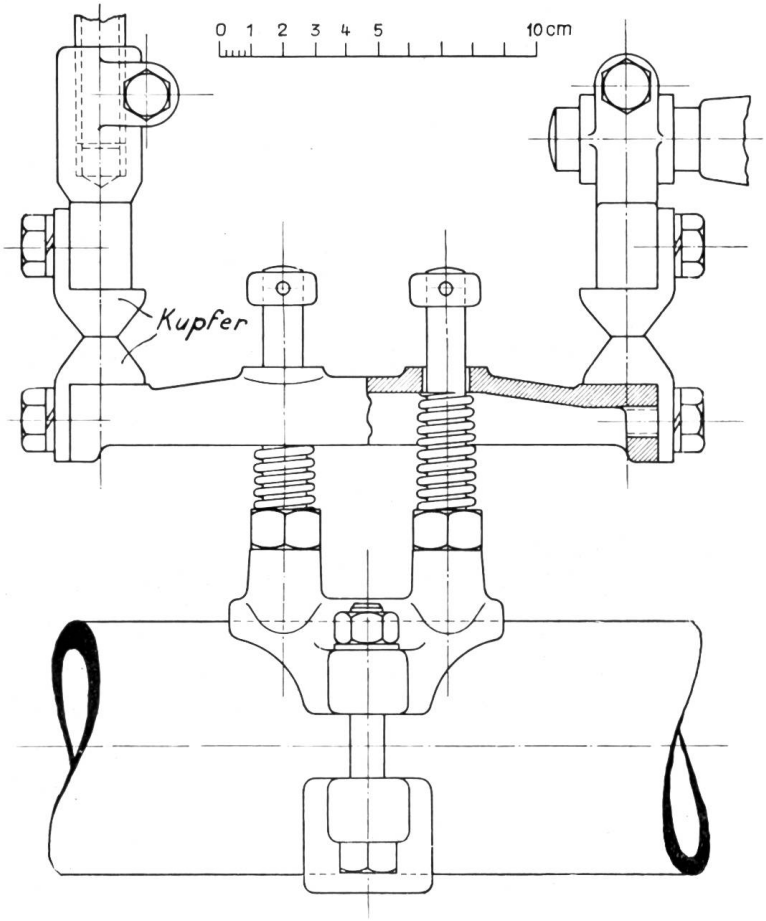
Haupt- & Abreisskontakt in einer Form.



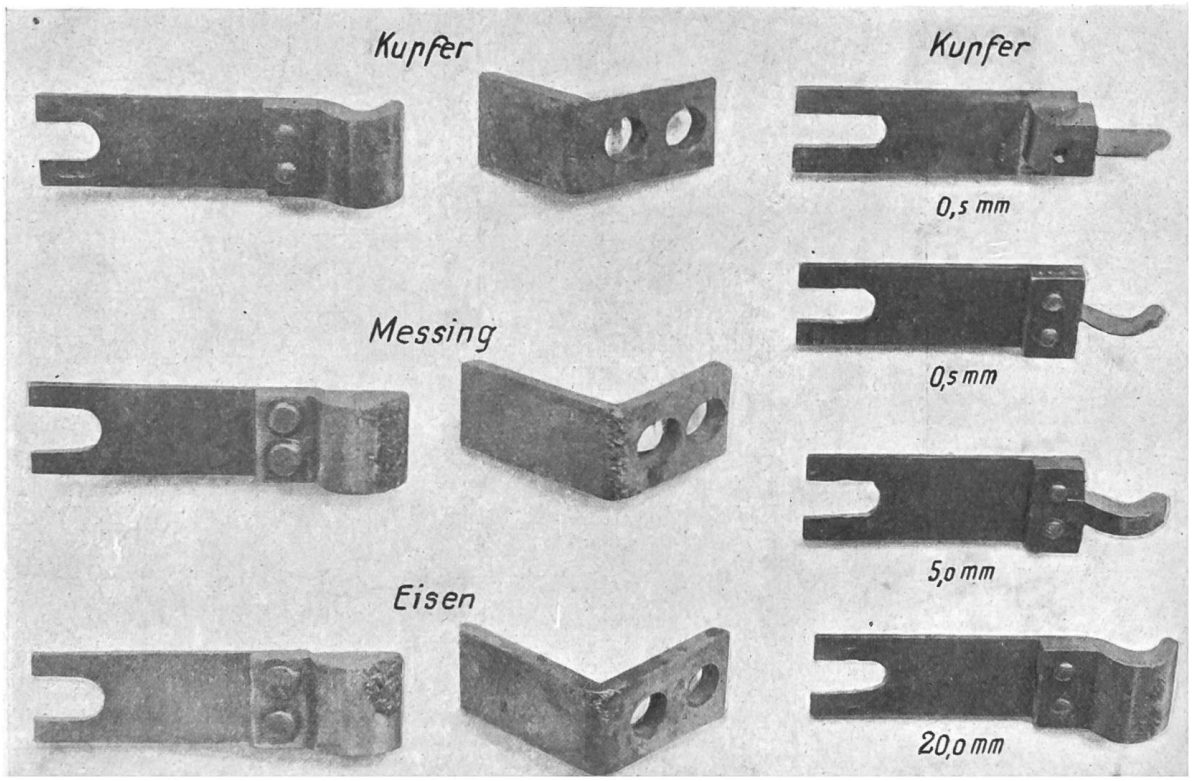
Konstruktion Sprecher & Schuh, Aarau.



Tafel XII.



Konstruktion der Klotz-Kontakte von Brown, Boveri & Co.

Haupt- und Abreisskontakte, identische Konstruktion

Versuchs-Kontakte.