

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 8 (1917)
Heft: 9

Artikel: Vierter Bericht der Kommission für Hochspannungsapparate und Brandschutz
Autor: [s.n.]
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059592>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 03.04.2025

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Erscheint monatlich mit den Jahres-Beilagen „Statistik der Starkstromanlagen der Schweiz“ sowie „Jahresheft“ und wird unter Mitwirkung einer vom Vorstand des S. E. V. ernannten Redaktionskommission herausgegeben.

Alle den Inhalt des „Bulletin“ betreffenden Zuschriften sind zu richten an das

Generalsekretariat

des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins,
Neumühlequai 12, Zürich 1 - Telephon: Hottingen 37.08

Alle Zuschriften betreffend Abonnement, Expedition und Inserate sind zu richten an den Verlag:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.,
Hirschengraben 80/82 Zürich 1 Telephon Hottingen 36.40

Publié sous la direction d'une Commission de Rédaction nommée par le Comité de l'A. S. E.

Ce bulletin paraît mensuellement et comporte comme annexes annuelles la „Statistique des installations électriques à fort courant de la Suisse“, ainsi que l'„Annuaire“.

Prière d'adresser toutes les communications concernant la matière du „Bulletin“ au

Secrétariat général

de l'Association Suisse des Electriciens
Neumühlequai 12, Zurich 1 - Telephon: Hottingen 37.08

Toutes les correspondances concernant les abonnements, l'expédition et les annonces, doivent être adressées à l'éditeur:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A.
Hirschengraben 80/82 Zurich 1 Téléphone Hottingen 36.40

Abonnementspreis
für Nichtmitglieder inklusive Jahresheft und Statistik:
Schweiz Fr. 15.—, Ausland Fr. 25.—.
Einzelne Nummern vom Verlage Fr. 1.50 plus Porto.

Prix de l'abonnement annuel (gratuit pour les membres de l'A. S. E.), y compris l'Annuaire et la Statistique, Fr. 15.— pour la Suisse, Fr. 25.— pour l'étranger.
L'éditeur fournit des numéros isolés à Fr. 1.50, port en plus.

VIII. Jahrgang
VIII^e Année

Bulletin No. 9

September 1917
Septembre

Vierter Bericht*)

der Kommission für Hochspannungsapparate und Brandschutz

erstattet vom Generalsekretariat.

Vorwort.

Die Untersuchungen, die Gegenstand des vorliegenden vierten Berichtes der Kommission bilden, sind schon vor Jahresfrist abgeschlossen worden. Dringlichere Aufgaben wirtschaftlicher Natur, die das Generalsekretariat in Anspruch nahmen, liessen aber die Veröffentlichung bis heute hinausschieben. Die Aktualität des Gegenstandes hat dadurch keine Einbusse erlitten, vielmehr ermöglichte die gewonnene Zeit noch einige bemerkenswerte Neukonstruktionen im Oelschalterbau in die Betrachtung einzubeziehen, die eine Ergänzung unserer Studien nach der praktischen Seite hin bedeuten.

Die bereits veröffentlichten Berichte unserer Untersuchungen¹⁾ behandeln die Frage nach der elektrischen Energie des Abschaltlichtbogens, die wir Schalterarbeit nannten, und nach den Mitteln zu deren Verringerung. Das Studium des elektrischen Einflusses von Reaktanzen und Widerständen im oder vor dem Oelschalter ist in einer besonderen Arbeit als dritter Bericht behandelt worden. Es ist bekannt, dass die gefundenen Resultate und Ueberlegungen nicht die volle Zustimmung aller Fachkreise gefunden haben. Im besonderen scheinen Abschaltversuche mit grosser Leistung, die von der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft Berlin vorgenommen worden sind, bezüglich der Bedeutung der Phasenverschiebung ein etwas abweichendes Bild zu ergeben. Wir haben das hierüber in der Elektro-

*) Wir beginnen in dieser Nummer mit der Veröffentlichung des Berichtes über die weitere Folge der Oelschalterversuche der Kommission, müssen aber den grösseren Teil der Arbeit auf das nächste Heft verlegen, um die vorliegende Nummer der Generalversammlung wegen rechtzeitig herausgeben zu können. Die Red.

¹⁾ Siehe Bulletin 1915, Seite 137 u. fg. und 289 u. fg., Bulletin 1916, Seite 85.

technischen Zeitschrift ²⁾ veröffentlichte Zahlenmaterial bearbeitet und hieraus gegenteils die Uebereinstimmung mit unseren eigenen Resultaten und der darauf basierenden Ueberlegungen erkannt. Gleicherweise reihen sich auch die Resultate der von der Firma Brown Boveri & Cie. Baden im Jahre 1914 vorgenommenen Kurzschlussversuche im Löntschwerk in schöner Uebereinstimmung in diesen Zusammenhang ein. Unsere früheren Berichte erfahren also durch diese Versuchsergebnisse eine wertvolle Ergänzung in bestätigendem Sinne. Es soll hierüber demnächst eine besondere Mitteilung erscheinen; der Gang der weiteren Bearbeitung unserer Aufgabe bleibt davon unbeeinflusst.

Der II. Teil der Oelschalterversuche unserer Kommission bezweckte das Studium der thermodynamischen und chemischen Vorgänge beim Abschaltprozess; d. h. der Wirkungen der durch den Lichtbogen erzeugten Wärme im Oelschalter sowie die Untersuchung der Mittel zur Verhütung der hieraus folgenden gefährlichen Druckerscheinungen. Die Versuche sind z. T. an einem besondern Versuchschalter für hohen Druck im *Kraftwerk Beznau der Nordostschweizerischen Kraftwerke* vorgenommen worden, z. T. verfolgten wir die Untersuchungen an einem kleinen Versuchsmodell, das auf ungefährliche Weise alle möglichen Druck- und Explosionserscheinungen beobachten liess. Die diesbezüglichen Versuche fanden in den *Technischen Prüfanstalten des S. E. V.* statt. Die Vornahme der chemischen Analyse des Oels und der Abschaltgase ist der *Eidg. Prüfanstalt für Brennstoffe* übertragen worden, die nach gemeinsam aufgestelltem Programm die ihr zugefallene Arbeit in steter Fühlung mit unseren eigenen Versuchen in ausserordentlich sorgfältiger und ausführlicher Weise zu Ende führte. Die Analyse ist vom jetzigen Leiter der Anstalt, Herrn *Dr. Schläpfer*, vorgenommen worden.

Die Leitung und Bearbeitung des II. Teils der Oelschalterversuche wurde wie die ersten Untersuchungen dem Bearbeiter des folgenden Berichtes übertragen unter Assistenz durch Herrn Ing. *Torche* für die Versuche in der Beznau, und durch Herrn Ing. *Lüscher* vom Generalsekretariat für die Arbeiten in den Technischen Prüfanstalten des S. E. V., deren Obering. Herr *X. Remy* uns in vielen Fragen wertvolle Unterstützung angedeihen liess. Die Prüfanstalten stellten uns für die Vornahme der Versuche ihren Mechaniker, Herrn *Rickenbach*, zur Verfügung, dem wir die geschickte Herstellung des kleinen Versuchschalters verdanken. Im Kraftwerk Beznau genossen wir nach wie vor das uneigennützigste Entgegenkommen der *Betriebsleitung der Nordostschweizerischen Kraftwerke* und des *Betriebchefs* der Zentrale, für das wir auch hier besten Dank sagen.

Die Kosten für die Durchführung der Versuche waren auch für deren II. Teil namhafte. Neben den Sonderbeiträgen des S. E. V. und V. S. E. stand uns ein bedeutender Beitrag der schweizerischen Firmen *Brown Boveri & Cie.*, Baden, *Maschinenfabrik Oerlikon, Sprecher & Schuh A.-G.*, Aarau und *Carl Maier*, Schaffhausen, zur Verfügung, für den wir auch an dieser Stelle unseren Dank aussprechen. Wir danken auch für die Anregungen und Ratschläge, die uns die Leiter, Ingenieure und Konstrukteure dieser Firmen in gelegentlicher Aussprache über Fortgang und Ziel der Versuche zukommen liessen.

Das Generalsekretariat.

Die Untersuchungen an Oelschaltern II. Teil.

Bearbeitet von Dr. *Bruno Bauer*, Ing.

I. Die thermodynamischen und chemischen Vorgänge beim Abschaltprozess.

Es darf nicht erwartet werden, dass über diese überaus komplizierten Vorgänge, die sich beim Abschalten im Oelschalter abspielen, gesetzmässige Beziehungen aufzustellen wären, die etwa die Vorausberechnung der Dimensionen heute gebräuchlicher Schaltertypen auf Grund der zu unterbrechenden Leistung ermöglichen. Es spielen gerade bei abnormaler Beanspruchung so viele Nebenerscheinungen und Zufälligkeiten mit, dass deren

²⁾ Siehe E. T. Z. 1916, Seite 617.

Wirkung jede Vorausberechnung illusorisch macht. Das war die erste Erfahrung die wir durch die Versuche gewannen. Der Oelschalter ist eben in seinem heutigen Stadium konstruktiver Durchbildung grundsätzlich ein unvollkommener Schutzapparat, weil er als solcher selbst noch zu viele Gefahrenquellen in sich birgt. Der anscheinend berechtigte Einwurf, dass z. B. auf 1000 betriebsmässige Abschaltungen heute doch ein sehr kleiner Bruchteil „Versager“ entfalle, ist für den Betrieb nicht stichhaltig, weil sich darunter immer einige befanden, die z. T. sehr schwere Folgen für Anlage und Betrieb nach sich zogen.

Wir erachteten daher vorerst als wichtigste Aufgabe die genaue Beobachtung des Abschaltvorgangs und seiner Begleiterscheinungen, um alle jene Bedingungen zu erkennen, die einen gefährlichen Verlauf der Unterbrechung verursachen können. Hiefür waren besondere Versuchsschalter nötig, die ohne Gefahr für den Beobachter auch abnormal verlaufende Unterbrechungen verfolgen lassen. Die Abb. a, b und c in der beiliegenden Tafel II zeigen den äusseren Aufbau und Antrieb des einpoligen *grossen Versuchsschalters*. Dieser besteht im Wesentlichen aus einem vollständig geschlossenen druckfesten Kessel in Zylinderform (700 cm Länge und 384 cm innerer Durchmesser) mit zwei in der Zylinderaxe senkrecht übereinander angeordneten Einführungsisolatoren, die in die aufgeschraubten Flanschen eingesetzt sind. Die Isolatoren tragen innen die Kontaktteile in Form der sog. Normalelektrode, wie sie auf Tafel X des ersten Berichtes³⁾ abgebildet ist. Die bewegliche Kontaktstange (Piston) wird durch den unteren Isolator eingeführt, eine isolierte Querstange, die durch Gegengewichte ausbalanciert ist, überträgt die Schaltbewegung. Die Einschaltung erfolgt durch Heben der Querstange, die Ausschaltung kann vermittels des Klinken- und Gestängewerks, das nicht näher beschrieben werden soll, entweder durch Handrad oder automatisch ausgelöst werden. Je nach der Grösse der Gegengewichte können Ausschaltgeschwindigkeiten zwischen 30 und 100 cm/Sek. erreicht werden. Der Schalterweg wurde vermittelt einer ähnlichen Vorrichtung wie im ersten Bericht beschrieben, durch den Oscillographen aufgezeichnet. In der Wandung des Zylinders sind druckfeste Schauöffnungen angebracht. Die zur Bewegungsaxe vollkommen symmetrische Form der Normalelektrode und deren zentrische Anordnung im Kessel sollen eine möglichst störungsfreie Ausbildung des Lichtbogens und der ihn umgebenden Gassphäre ermöglichen. Aus diesem Grund ist auch die Antriebsvorrichtung ausserhalb des Kessels angeordnet worden; der einzig bewegliche Teil im Innern ist der Piston, der beim Abschalten eine sehr geringe Oelbewegung veranlasst. Der Schalter ist elektrisch für 200 A und 35 000 V dimensioniert, mechanisch für einen Betriebsdruck von 20 kg/cm²; wir konnten diesen Grenzwert allerdings wegen der Oelverluste im unteren Einführungsisolator nur durch ständiges Oelpumpen aufrechterhalten. Die Versuchseinrichtung vervollständigten Oelpumpen, Thermometer, Zeiger-Manometer, graphisches und elektrisches Manometer, das in der Folge noch näher beschrieben ist, sowie diverse Ventile und Hahnen.

Im Verlauf der Versuche mit dem beschriebenen Schalter ergab sich, dass gewisse Untersuchungen nicht ohne Gefahr für Beobachter und Apparatur durchzuführen waren, es ist daher ein *kleiner Versuchsschalter* gebaut worden, der durch die Abb. a und b auf Tafel I illustriert ist. Der Apparat ist hauptsächlich für die Untersuchungen über Zündungs- und Explosionserscheinungen bestimmt, das Hauptgewicht wurde deshalb auf Beobachtung der Vorgänge im Oel gelegt. Das eigentliche Oelgefäss besteht aus einem Glaszylinder von 10 cm innerem Durchmesser, in dessen Grund sich der Lichtbogen zwischen horizontal sich bewegenden Kontakten ausbildet. Die kleinen Berührungsflächen der Kontakte liegen in der Zylinderaxe. Der totale Schalterweg wurde sehr klein gewählt (die maximale Lichtbogenlänge beträgt bei der grössten Belastung des Apparates ca. 1 cm), um wiederum eine symmetrische Ausbildung der Gassphäre zu ermöglichen. Um trotz der kleinen Lichtbogenlänge relativ grosse Werte der Schalterarbeit zu erzielen, sind extrem kleine Schaltgeschwindigkeiten gewählt worden. Die Versuche sind aus gleichem Grunde gewöhnlich mit Gleichstrom vorgenommen worden. Der Glaszylinder blieb je nach dem Zweck der Versuche ganz offen, teilweise oder ganz geschlossen, eine einfache verstellbare Abschlussvorrichtung durch frei aufliegenden Deckel ermöglicht die Einstellung aller wünschbaren Verhältnisse von Oelhöhe und Luftraum unter dem Schalterdeckel. Der kleine Versuchsschalter ist für 100 A und

³⁾ Bulletin 1915, Seite 210.

250 V gebaut, die kleine Leistung reichte schon hin, um unter ungünstigen Verhältnissen durch eine einzige Abschaltung „Schalterexplosionen“ von unerwünschter Heftigkeit zu veranlassen. Der Apparat diente auch für die Gasanalysen der Eidg. Prüfanstalt für Brennstoffe. Wir haben an diesem Apparat hauptsächlich „beobachtet“ und wenig „gemessen“, weil sich solche Laboratoriumsmessungen, der absichtlich vereinfachten Verhältnisse wegen, nicht ohne weiteres auf den praktischen Betrieb umrechnen lassen. Wenn daher die zahlenmässige Ausbeute dieser besonderen Versuche nicht gross ist, haben wir dennoch die Erkenntnis der Vorgänge im Oel damit erweitern und eigene und früher schon ausgesprochene Anschauungen bestätigen können.

Ueber die üblichen elektrischen Messungen und oscillographischen Aufnahmen sind keine neuen Mitteilungen zu machen, wir verweisen auf die diesbezüglichen Erläuterungen im ersten Bericht. Hingegen ist vielleicht die von uns angewendete *Methode zur Bestimmung des Druckverlaufs während der Abschaltung* der Erwähnung wert. Es sind schon mehrfach in der Literatur Messresultate über den beim Abschalten im Oelschalter auftretenden Druck bekannt gegeben worden, wobei es sich meistens um die Ermittlung des maximalen Druckstosses handelt. Die Schwierigkeit besteht hiebei in der Registrierung des Druckes, da sich der Vorgang innerhalb weniger hundertstel Sekunden abspielt. Die Unzulänglichkeit rein mechanischer Vorrichtungen gab denn auch meist Anlass zu Diskussionen über die Genauigkeit der Messungen. Wir verwendeten für die Versuche am grossen Versuchsschalter ebenfalls eines der gewöhnlichen registrierenden Manometer, lediglich zum Zweck der Markierung des Druckstosses. Die Nachprüfung theoretischer Ueberlegungen, von denen noch die Rede ist, machte aber die Aufzeichnung des Drucks während des ganzen Abschaltvorgangs erforderlich. Wir zogen zu diesem Zweck die Eigenschaft eines aus Kohlenplättchen aufgeschichteten Stabes heran, mit anwachsendem Druck in Richtung der Axe eine Abnahme des Widerstandes aufzuweisen. Bei geeigneter Wahl von Anzahl und Grösse der Plättchen kann über ein gewisses Druckbereich nahezu proportionaler Anstieg des Stroms mit dem Druck erzielt werden, wenn an den Stab eine passend eingestellte konstante Spannung gelegt wird. Das von uns auf diesem Prinzip aufgebaute Manometer besteht aus einer kreisrunden Stahlmembran, die in einen festen Ring eingespannt ist. Auf diese ist senkrecht zur Membranebene ein Stift aufgesetzt, der den Druck der Membran auf den Kohlenstab in seiner Axenrichtung weiter gibt. Der Kohlenstab ist aus 15 Scheiben von ca. 4 mm Dicke und 15 mm Durchmesser (aus Bogenlampenkohle geschnitten) aufgeschichtet und von einem Glasrohr umgeben. Die beiden kräftigeren Endstücke tragen Klemmen zur Einschaltung des Widerstandes in den Stromkreis. Der Druck der Membran wird am anderen Stabende durch eine regulierbare zylindrische Feder aufgenommen, sodass der Anfangsdruck des Kohlenstabs beliebig eingestellt werden kann. Der Ring, auf den die ganze Einrichtung fest montiert ist, wurde in die Kesselwandung eingebaut. Der Apparat ist in Fig. d auf Tafel II dargestellt. Für die Aufzeichnung der Stromschwankungen diente der Oscillograph. Unmittelbar vor jedem Versuch ist der Apparat bzw. das Oscillogramm durch Veränderung des statischen Kesseldrucks geeicht worden. Wir arbeiteten bei unseren Versuchen mit $3 \div 5$ V Spannung am Kohlenwiderstand. Auf diese Weise sind die Oscillogramme in den Fig. 3*) und 4*) entstanden, zur Einzeichnung der Zeit wurde jeweilen zugleich die Spannung e_i zwischen den Kontakten aufgenommen. Der Apparat ist bei richtiger Einstellung ausserordentlich empfindlich, trotzdem die von uns verwendete Ausführung mit etwas primitiven Mitteln zusammengestellt ist. Besondere Beachtung benötigte die Wahl der Gegenfeder, die zusammen mit der Membran die Eigenschwingungsdauer des Apparates bestimmt. Wir ersahen durch besondere Versuche, dass diese wesentlich kleiner ist als die Dauer der aufgezeichneten Druckschwankungen.

Die Umwandlung der Schalterarbeit in Wärme und deren Wirkungen im Oelschalter.

Während in den vorangegangenen Berichten die Rede von der Schalterarbeit war, d. h. der Grösse der durch den Lichtbogen eingeführten elektrischen Energie, muss uns nun heute deren Wärmeäquivalent beschäftigen. Es handelt sich vorerst um die Frage

*) Siehe Fortsetzung in der folgenden Nummer des „Bulletin“.

nach welcher Richtung hin die durch den Lichtbogen eingeführte Wärmemenge in ihrer Wirkung zu Tage tritt⁴⁾. Beobachtet man einen Oelschalter während und unmittelbar nach einer Abschaltung, so folgt aus den zu konstatierenden Erscheinungen unmittelbar die Antwort hierauf. Wesentlich sind folgende bekannte Merkmale. Die Abreisskontakte weisen an den Ansatzstellen des Lichtbogens Brandstellen auf, das Material ist teilweise weggeschmolzen. Das Oel zeigt in unmittelbarer Umgebung der Lichtbogenbahn starke Trübung, die auf ausgeschiedenen Kohlenstoff zurück zu führen ist. Unter dem Schalterdeckel hat sich Gas angesammelt als weiteres Produkt der Oelzersetzung. Während der Unterbrechung ist eine schlagartige Erschütterung der Oelmasse zu beobachten als Folge eines Ueberdrucks in deren Innern. Der Ueberdruck tritt unter Umständen durch ein Herausschleudern von Oel zu Tage. Eine Erwärmung der Oelmasse ist erst nach vielen sich unmittelbar folgenden Unterbrechungen zu konstatieren, sodass anzunehmen ist, dass die an die nicht aktive Oelmasse abgegebene Wärmemenge pro einmalige Abschaltung einen kleinen Betrag erreicht. Wir können daher sagen, dass die der Schalterarbeit äquivalente Wärmemenge in der Hauptsache nach folgenden drei Richtungen verbraucht wird.

1. ein erster Teil Q_c wird zur Erwärmung und lokalen Schmelzung und Verdampfung des Elektrodenmaterials aufgewendet;
2. ein Betrag Q_i entspricht der Bildungswärme der Zersetzungsprodukte des Oels;
3. ein dritter Teil endlich tritt in der äusseren Arbeitsleistung der Gase zu Tage. Wir bezeichnen diese mit $A \cdot L$, wobei A das Wärmeäquivalent der Arbeitseinheit bedeutet.

Diese letzte, rein mechanische Arbeit des Lichtbogens findet ihren Ausdruck in der Bewegung der ruhenden Oelmasse. Bezeichnet p und v spezifischer Druck bzw. Volumen der den Lichtbogen umgebenden Gassphäre, so kann an Stelle von $A \cdot L$ gesetzt werden $A \cdot \int p \cdot dv$. Die totale der Schalterarbeit äquivalente Wärmemenge zerlegen wir daher in die drei Teile

$$Q = Q_c + Q_i + A \cdot \int p \cdot dv \quad (1)$$

Die naheliegende Frage nach der *Grösse der drei Energiemengen* können wir bis heute noch nicht beantworten, weil deren experimentelle Ermittlung mit sehr grossen Schwierigkeiten verbunden ist. Die theoretischen Berechnungen hierüber sind z. T. auch sehr hypothetischer Natur, so dass wir uns vorläufig darauf beschränkten, die *Wirkungen* näher zu untersuchen. Betrachten wir zuerst

die Wärmewirkungen an den Elektroden.

Die ausserordentlich kurze Zeit, in der sich der Abschaltvorgang abspielt, lässt vermuten, dass sich trotz der grossen Wärmeleitfähigkeit des Elektrodenmaterials (Kupfer, Bronze, event. Eisen) die Wärmewirkung hauptsächlich auf die nächste Umgebung der Lichtbogenansatzstelle beschränkt, dass also eine nennenswerte Ableitung der Wärme nach den bezüglich der Lichtbogenansatzstelle seitwärts- und rückwärtsliegenden Metallmassen des Kontakts während der Lichtbogendauer nicht zu erwarten ist. Diese Anschauung findet durch unsere Versuche über den Einfluss der Kontaktfingerbreite⁵⁾ eine Bestätigung, indem die Schmelzstelle im Lichtbogenansatz für Breiten der Kontaktfläche des untersuchten Modells zwischen 5 mm und 25 mm keinen Unterschied im Angriff aufweist. Es handelt sich um einpolige Abschaltungen von ca. 800 kW bei 8000 Volt mit 55 cm/Sek. Schaltgeschwindigkeit. Der Kontaktfinger von 0,5 mm Breite der Kontaktfläche zeigte hingegen eine sehr rasche Zerstörung. Die mangelnde Wärmeableitung liess hier also bereits eine stark erhöhte Beanspruchung der Kontaktfläche auftreten. Diese Verhältnisse sind natürlich relativ, es ist zu beobachten, dass grössere Stromstärken im Lichtbogen im allgemeinen auch grössere Ansatzstellen des letzteren an den Elektroden aufweisen, woraus auch auf eine gesteigerte Wärmewirkung zu schliessen ist. Es könnte also jeder Abschalt-

⁴⁾ Siehe hierüber auch „Bulletin“ 1910, Seite 73 „Ueber Oelschalter für grosse Leistungen“ von K. P. Täuber.

⁵⁾ Siehe Erster Bericht Bulletin 1916, Seite 191.

leistung ein minimaler Grenzwert der Masse des Abreisskontakts zugeordnet werden, bei dem die Schmelzwirkung noch innerhalb zulässiger Grenzen bleibt. Diese Frage ist indessen durch die praktischen Erfahrungen des Konstrukteurs im Schalterbau schon längst gelöst; mit Ausnahme der Hochstromschalter verlangen übrigens konstruktive Gründe meist eine Dimensionierung der lichtbogentragenden Kontaktteile, welche die obige Forderung ohnehin erfüllen lässt. Wir erwähnen noch, dass sich die Resultate unserer Versuche mit verschiedenen Formen und Materialien der Abreisskontakte z. T. mit den praktischen Erfahrungen im Apparatenbau decken. Wir konstatierten, dass eine gute Abrundung des lichtbogentragenden Teils des Kontaktes eine geringere Abnützung durch den Schmelzvorgang zur Folge hat, indem sich die Lichtbogenansatzstellen im Verlauf einer bestimmten Anzahl von Abschaltungen gleichmässiger auf die Kontaktfläche verteilen. Spitzen und Kanten bleiben bevorzugte Ansatzstellen. Dies trifft auch für bereits ausgeschmolzene Stellen der Kontaktfläche zu. Zur Erschwerung des Lichtbogenansatzes hat Ing. *Torche*, lediglich zu Versuchszwecken, eine originelle Anordnung angegeben, bei der der Abreisskontakt in Form einer Rolle ausgebildet ist, die durch die Schalterbewegung in Rotation versetzt wird. Der „Kontakt Torche“ hat bezüglich der Wärmeentwicklung günstige Resultate ergeben. Ueber den Einfluss des Elektrodenmaterials⁶⁾ ergaben die Versuche, dass bei Verwendung von Kupfer auf Kupfer die kleinste Schmelzwirkung auftritt, Messing, Bronze und Eisen zeigten wesentlich grössere Abnützung. Es scheint, dass sich nach anderen Erfahrungen Bronze nicht wesentlich ungünstiger verhalten soll als Kupfer.

Wir widmeten im übrigen der Ermittlung der Wärmemenge Q_c , die an den Kontakten auftritt, keine besonderen Untersuchungen. Es liessen sich allerdings auf theoretischem Wege noch gewisse Ausblicke finden, unsere Rechnungen hierüber sind aber noch zu ungewiss, als dass wir sie hier schon festlegen wollten. Die Frage, ob die Wärmemenge Q_c etwa proportional mit der Schalterarbeit anwachse, wäre noch der Untersuchung wert, ein solcher Zusammenhang scheint uns fraglich, indem zu vermuten ist, dass bei ein und derselben Schalterarbeit Hochstromschalter eine höhere Beanspruchung der lichtbogentragenden Kontaktteile aufweisen als Hochspannungsschalter.

Die Bildung der Zersetzungsprodukte des Oels.

Die hierfür erforderliche Wärmemenge entzieht sich ebenfalls einer auch nur angeäherten Bestimmung. Im besonderen sind über die Bildungswärmen der entstehenden Gase, über deren Analyse im Nachfolgenden berichtet wird, noch keine zuverlässigen Angaben vorliegend, man darf nur annehmen, dass nach überschläglichen Berechnungen der gesamte in Gleichung (1) unter Q_i zusammengefasste Wärmebetrag klein ist im Vergleich zu der an die Kontakte abgegebenen Wärmemenge Q_c . Umso grösseres Interesse bilden die aus ihr folgenden Zersetzungsprodukte des Oels. Im Besonderen beschäftigte uns Menge und Natur der Schaltergase. Wir haben durch eine Serie von Versuchen am grossen Versuchsschalter unter Anwendung verschiedener Abschaltbedingungen *die entstehenden Gasmen-gen* bestimmt. Die nachstehende Tabelle zeigt das Resultat der Messungen. Die angegebenen Werte der Schalterarbeit sind aus der Gleichung berechnet $A = J_o \cdot E \cdot c \cdot t_c$. Ueber die Ableitung dieses Ausdruckes und die Bedeutung der Grössen c und t_c , die oscillographisch ermittelt wurden, sei auf den Ersten Bericht verwiesen. Da die später zu beschreibenden Untersuchungen über die Abschaltung unter Druck eine wesentliche Steigerung der Schalterarbeit mit dem Oeldruck zeigten, sind die Versuche zur Gasbestimmung nach dieser Richtung variiert worden.

Die in einer besonderen Apparatur durch Ausmessung der verdrängten Oelmenge ermittelten Gasvolumina $Vol_{[T]}$ sind nur auf etwa 3% genau bestimmt, da das Auffangen der Gase am Versuchsschalter ziemlich umständlich war. Immerhin zeigt die Zusammenstellung, *dass die erzeugte Gasmenge ungefähr proportional mit der Schalterarbeit anwächst*. Nach den Messungen am Versuchsschalter entstehen *pro 1 kW Sek. Schalterarbeit rund 46,5 cm³ Gas*. Verwendet wurde ein normalflüssiges Oel der Oil Comp., das bereits schon

⁶⁾ Die Messungen sind im Ersten Bericht im Abschnitt über den Einfluss des Elektrodenmaterials, Seite 192, angeführt.

Ermittlung der Gasmenge im Oelschalter.

Druckschalter, einpolige Abschaltung mit 55 cm/Sek. Normalelektroden. Betriebsspannung 8000 Volt. (Mittelwerte aus je 6 Versuchen.)

No.	P kW	$J_0 \cdot E$ kVA	t_e sek.	$p^0/\%$	$q^0/\%$	C	A kWs	p_i kg/cm ² absolut	Vol (T) cm ³	T ⁰ absolut	Vol (T ₀) (1 at. u. 25° C) cm ³	Vol [T ₀] A
1	715	821	0.118	16.5	95	0.0797	7.75	7.5	408	283	416	53.6
2	695	800	0.1275	15.4	95	0.0745	7.60	7.4	332	293	326	42.8
3	710	816	0.1370	15.4	95	0.0745	8.31	7.12	382	288	382	46.0
4	695	800	0.102	17.0	94	0.081	6.60	6.4	227	283	231	35.0
5	708	815	0.0895	11.4	95	0.0559	4.08	5.1	190	296	185	45.2
6	695	800	0.0976	10.55	95	0.0517	4.04	5.13	221	290	220	54.5
7	739	850	0.0803	8.7	97	0.0429	2.93	4.3	163	286	164	56.0
8	715	822	0.0776	7.92	97	0.0390	2.49	3.6	113	289	112.5	45.2
9	735	845	0.0704	5.5	98	0.0277	1.65	3.06	83.4	291	82.0	49.6
10	740	852	0.0518	3.85	99	0.0191	0.843	2.25	28.4	292	28	33.2
11	740	852	0.0830	3.1	99	0.0154	1.1	1.0	55.0	293	54	49.2

längere Zeit im Gebrauch stand, die chemischen Eigenschaften werden indessen dadurch nicht verändert, wie später gezeigt wird. Hingegen ist wahrscheinlich, dass die Gasausbeute je nach der Provenienz des Oels etwas ändert, wie auch die chemische Analyse nach dieser Richtung gewisse Schwankungen zeigt.

Von praktischem Interesse ist die Gasproduktion pro Einheit der unterbrochenen Leistung. Hierzu ist die Kenntnis des Zusammenhangs der Schalterarbeit mit der unterbrochenen Leistung erforderlich, worüber die früheren Berichte der Kommission handeln. Eine Anschauung gibt die Ermittlung der Gasmenge für die Kurzschlussleistung, d. h. für die maximale Beanspruchung des Schalters. In diesem Fall ist nach früheren Ueberlegungen, die inzwischen durch Versuche bestätigt worden sind, die Lichtbogendauer für grosse Leistungen ($J_0 \cdot E > 5000$ kVA) in der Hauptsache unabhängig von der unterbrochenen Leistung und nur noch durch Spannung und Phasenverschiebung regiert. Die folgende Tabelle enthält die näherungsweise berechneten Werte von Schalterarbeit und Gasproduktion pro 1000 kVA, durch ein einfaches einpoliges Kontaktpaar unterbrochen. Die Schaltgeschwindigkeit ist zu 100 cm/Sek. angenommen. Die Schalterarbeit ist nach dem Ausdruck berechnet $A = J_0 \cdot E \cdot c \cdot t_e$, wobei $J_0 \cdot E$ zu 1000 kVA gesetzt ist. Die ermittelten Näherungswerte haben ferner zur Voraussetzung, dass der Schalter mit dem direkten Kurzschluss beansprucht werde, ohne Vorschaltung von Widerständen.

Schalterarbeit und Gasmenge pro 1000 kVA auf einen Abreisskontakt bei grosser Kurzschlussleistung.

100 cm Schaltgeschwindigkeit (angenäherte Werte).

Spannung E V	Lichtbogen- dauer t_e Sek.	Konstante c	Schalterarbeit A pro 1000 kVA kW Sek.	Gasvolumen pro 1000 kVA cm ³
10 000	0.120	0.07	8.4	390
15 000	0.175	0.07	12.2	570
20 000	0.211	0.07	14.8	690
30 000	0.332	0.07	23.1	1080

Die Gasproduktion pro Abschaltung ist nach unseren Versuchen, wie die Tabelle zeigt, nicht sehr bedeutend. Doch kann sie immerhin genügen, um unter Umständen mit der unter dem Schalterdeckel sich befindenden Luft ein explosionsfähiges Gasgemisch zu bilden. Wir verweisen hierüber auf ein späteres Kapitel, wo diese Verhältnisse ausführlich dargelegt sind.

Die chemische Natur der Schaltergase.

Die mehrfach aufgetretenen Explosionen von Oelschaltern beim Unterbrechen grosser Belastungen werfen die Frage auf, welche Rolle hierbei die Schaltergase spielen. Es ist schon die Vermutung ausgesprochen worden, dass diese an sich explosibel seien, wogegen allerdings auf erstes Zusehen hin die Herkunft der Gase spricht. Ganz im Unklaren waren wir aber über die theoretischen Grenzen des Mischungsverhältnisses mit Luft, innerhalb welcher eine eigentliche explosionsartige Verbrennung eintritt, wie wir solche durch unsere Versuche (siehe später) beobachteten. Die Kommission erachtete es daher als nützlich und zur Klärung der Frage beitragend, die Schaltergase einer eingehenden chemischen Analyse zu unterziehen. Die analytischen Untersuchungen sind, wie im Vorwort erwähnt, durch *Dr. Schlaepfer*, Direktor der Eidgen. Prüfanstalt für Brennstoffe, parallel zu unseren Versuchen durchgeführt worden. Wir berichten nachfolgend z. T. an Hand seines ausführlichen Rapportes.

Werden Schalteröle, wofür im allgemeinen hochsiedende Mineralöle in Frage kommen, durch rotglühende Röhren geleitet, so bestehen die entstehenden Gase der Hauptsache nach aus Kohlenwasserstoffen. Daneben enthalten sie Wasserstoff, Kohlensäure, Kohlenoxyd, u. s. w. Es lag nahe, anzunehmen, dass auch die Schaltergase aus denselben Oelen eine ähnliche Zusammensetzung aufweisen würden. Die Prüfung erstreckte sich darum zunächst auf die Ermittlung der im Gase enthaltenen, dampfförmigen Kohlenwasserstoffe und nachher auf die Bestimmung der permanenten Gase.

Dampfförmige Kohlenwasserstoffe können aus Gasproben entfernt werden durch Abkühlen des Gases auf tiefe Temperaturen, wobei die höheren Paraffinkohlenwasserstoffe Propan, Butan etc.), die ungesättigten Kohlenwasserstoffe (Propylen, Butylen etc.) und die aromatischen Kohlenwasserstoffe (Benzol und dessen Homologe) sich flüssig abscheiden. Die im Versuchsschalter gewonnenen Schaltergase wurden zuerst nach dieser Richtung hin geprüft. Hierbei ergab die Untersuchung, *dass in den Schaltergasen bei Zimmertemperatur (ca. 20 C°) weder Oeldämpfe noch andere dampfförmige Kohlenwasserstoffe vorhanden sind.*

Die Schaltergase zeigen in dieser Hinsicht einen charakteristischen Unterschied gegenüber den Leucht- und Oelgasen, die ihrerseits stets kondensierbare, dampfförmige Bestandteile enthalten. Da die Bildungsbedingungen für die Entstehung der Schaltergase stets ähnliche sind, kann angenommen werden, dass dieses Ergebnis für alle Schaltergase, die aus schweren Mineralölen bei Abschaltungen entstehen, gültig sei; bei den späteren Versuchen wurden darum die Gase nicht mehr auf ihren Gehalt an dampfförmigen Kohlenwasserstoffen geprüft.

Zur Bestimmung der quantitativen Zusammensetzung der Gase wurden diese bei allen Analysen über Quecksilber abgemessen und mit einem Spezialapparat für exakte Gasanalyse in der Eidgen. Prüfanstalt für Brennstoffe untersucht. Der Analysengang war der folgende:

1. Absorption der Kohlensäure mit Kalilauge;
2. Absorption der schweren Kohlenwasserstoffe (Aethylen) mit rauchender Schwefelsäure;
3. Absorption des Sauerstoffs mit alkalischem Pyrogallol;
4. Ermittlung des Wasserstoff- und Kohlenoxydgehalts durch Verbrennen des Gases bei 285° C über Kupferoxyd;
5. Ermittlung des Methan- und Aethangehalts durch Verbrennen des Gases bei Rotglut über Kupferoxyd;
6. Ermittlung des Stickstoffgehaltes aus dem Gasrest. Es stellte sich heraus, dass Aethan und Kohlenoxyd nicht vorhanden waren, daher wurde in einzelnen Fällen der

Wasserstoff- und Methangehalt durch gemeinsame Verbrennung dieser beiden Einzelbestandteile ermittelt.

Bei der Durchführung der Versuche wurden alle Vorsichtsmassregeln, die für die exakte Gasanalyse erforderlich sind, beobachtet.

Zuerst gelangte ein mehrfach für Versuchszwecke verwendetes Mineralöl, Bezeichnung A zur Untersuchung. Die Gase sind im kleinen Versuchsschalter durch eine besondere Apparatur, die wir nicht weiter erläutern, aufgefangen worden. Die Anordnung bedingte, dass sich der vor dem Auffangen zur Luftverdrängung verwendete Stickstoff in einem kleinen Restbetrag mit den Schaltergasen mischte. Das direkte Resultat der Analyse wurde auf die brennbaren Gasbestandteile umgerechnet und ergab damit folgende Zusammensetzung:

Schaltergas A, brennbare Bestandteile.

Zusammensetzung	Gas aus Gefäss No. 1 und 2	Gas aus Gefäss No. 3
	Vol. %	Vol. %
Wasserstoff	79,7	66,6
Methan	0,6	4,7
Schwere Kohlenwasserstoffe (Aethylen) . .	19,7	28,7
Totales Volumen	100,0	100,0

Die beiden analysierten Gasproben zeigen aber verschiedene quantitative Zusammensetzung. Da die brennbaren Gase mit Stickstoff gemischt aufgefangen worden waren, konnte man auf Grund dieser Versuche noch nicht entscheiden, ob bei gleichartigen Abschaltungen aus einem bestimmten Oel Wasserstoff, Aethylen und Methan in wechselnder Menge entstehen oder nicht. Im Uebrigen zeigte das Oel durch die vorangegangene Beanspruchung bereits eine ausserordentliche Trübung. Da die Frage noch nicht geprüft worden war, in welcher Weise das Schalteröl durch den Abschaltvorgang chemisch und physikalisch verändert wird, wurde für die folgenden Versuchsserien ein anderes Oel, Bezeichnung B zur Untersuchung herangezogen, das vorher noch keinen Abschaltungen ausgesetzt war. Zugleich gelangte eine neue Gasauffangvorrichtung in Anwendung, die gestattete, die Gase so aufzufangen, dass sie weder mit Luft noch Stickstoff vermischt wurden. Wir verwendeten zu diesem Zwecke den offenen Oelzylinder des kleinen Versuchsschalters, in welchen eine Glashaube eingeführt wurde (siehe Fig. a auf Tafel II). Die entstehenden Gase stiegen im Glockenraum hoch und verdrängten das Oel. Aus der Glashaube wurden die Gase in die Gasgefässe gesaugt. Das Versuchsöl B war ein hochsiedendes Mineralöl vom spez. Gewichte 0,887, dessen hauptsächlichsten Eigenschaften weiter unten zusammengestellt sind. Es wurden mit diesem Oel zur Gewinnung der Gase ca. 530 Schaltungen vorgenommen (Spannung ca. 280 Volt Gleichstrom, Stromstärke 34—38 Amp.) und 6 Gasproben gesammelt. Für jede Probe genügten ca. 30 Abschaltungen. Die Gasprobe No. 6 entstammt Versuchen am gleichen Oel mit Wechselstromabschaltung 250 V und 35 A.

Die Analysenzahlen, die auf der folgenden Seite zusammengestellt sind, zeigen uns, dass alle Gase etwas Sauerstoff und Stickstoff enthalten; Dr. Schlaepfer führt dies darauf zurück, dass bei der Zertrümmerung des Oelmoleküls der darin enthaltene Sauerstoff und Stickstoff in elementarer Form frei werden. Die Mineralöle bestehen nämlich nicht ausschliesslich aus Kohlenstoff und Wasserstoff, sondern sie enthalten auch noch Sauerstoff und Stickstoff, event. Schwefel (siehe Analyse des Oeles).

Schaltergas B.

Zahlen in Vol. ‰.

Gasprobe No.:	1	2*)	3	4	5	6
Wasserstoff	64,7	50,4	63,1	62,4	65,7	53,0
Methan	3,2	5,9	4,0	4,5	3,7	4,9
Schwere Kohlenwasserstoffe (Aethylen)	23,3	26,0	26,3	25,6	25,0	34,4
Kohlensäure	1,5	0,6	0,3	0,6	0,6	0,6
Sauerstoff	2,4	3,3	1,2	1,2	1,0	1,2
Stickstoff	4,9	13,8	5,1	5,7	4,0	5,9
Totales Volumen	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

*) Die Probe No. 2 war infolge einer Undichtheit etwas lufthaltig.

Stellt man wiederum nur die brennbaren Anteile der Schaltergase zusammen, so erhält man die in der folgenden Tabelle aufgeführten Werte.

Schaltergase B. Brennbare Bestandteile

Zahlen in Vol. ‰.

Gasprobe No.:	1	2	3	4	5	6
Wasserstoff	71,0	61,2	67,6	67,4	69,6	57,4
Methan	3,5	7,2	4,2	4,9	3,9	5,3
Schwere Kohlenwasserstoffe (Aethylen)	25,5	31,6	28,2	27,7	26,5	37,3
Totales Volumen	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Die Versuchsreihe zeigt deutlich, dass man *aus demselben Oel bei praktisch gleichen Bedingungen des Abschaltvorgangs auch praktisch gleich zusammengesetzte Schaltergase erhält*. Die Zertrümmerung des Oelmoleküls erfolgt also stets in gleicher Weise. Dieses Ergebnis stützt die durch unsere Gasmessungen gefundene Regel, dass die, beim Abschaltvorgang produzierte Gasmenge proportional der Schalterarbeit ist. Es ist ohne weiteres einleuchtend, dass auch bei Parallelversuchen kleine Abweichungen in Bezug auf Gasausbeute und Gaszusammensetzung auftreten müssen, weil die Verhältnisse beim Abschaltvorgang nie genau die gleichen sind. Bei der Abschaltung mit Wechselstrom war das Gas bei unsern Versuchsbedingungen etwas ärmer an Wasserstoff, dagegen reicher an Aethylen.

Endlich wurde noch eine Schaltergasprobe, herrührend von Versuchen mit dem grossen Versuchsschalter (8000 Volt und 200 Amp.) im Kraftwerk Beznau in unsere Untersuchung miteinbezogen. Die Gasprobe war ein Jahr lang in einer Syphonflasche unter Druck aufbewahrt gewesen, was Zweifel über ihre ursprüngliche Zusammensetzung nicht ausschliesst.

Die Analyse ergab folgende Zahlen:

Schaltergas vom Druckschalter Beznau, Oel C.

Zusammensetzung	Rohgas	Brennbare Bestandteile
	Vol. %	Vol. %
Wasserstoff	57,3	77,3
Methan	14,0	18,9
Schwere Kohlenwasserstoffe (Aethylen). .	2,8	3,8
Kohlensäure	0,8	—
Sauerstoff	5,3	—
Stickstoff	19,8	—
Totales Volumen	100,0	100,0

Die Gasprobe enthielt also ziemlich viel Luft. Bei den brennbaren Bestandteilen fällt der geringe Gehalt an Aethylen in die Augen. Der Wasserstoffgehalt ist dagegen sehr hoch.

Als Vergleich zu diesen Messungen der Eidgen. Prüfanstalt für Brennstoffe sei die einzige uns bekannte veröffentlichte Analyse über Schaltergas von *W. Polard-Digby*⁷⁾ angeführt, diese ergab

Wasserstoff	62,0 Vol. %
Kohlenwasserstoff, als Methan berechnet.	4,2 „
Gasrest, als Stickstoff angenommen	33,8 „
	<u>100,0 Vol. %</u>

Die Analyse erscheint uns nicht einwandfrei.

Aus der *Vergleichung der gewonnenen Resultate* folgt vorerst, dass im Schaltergas der Wasserstoff vorherrscht, dagegen treten die Kohlenwasserstoffe in geringeren Mengen auf und bestehen aus ungesättigten Kohlenwasserstoffen und Methan. Da es nicht gelang, bei 70° C kondensierbare Anteile abzuscheiden, ist anzunehmen, dass die ungesättigten Kohlenwasserstoffe aus Aethylen bestehen.

Bei unsern Versuchen enthielt das Gas aus den Wechselstromabschaltungen (Gasprobe No. 6 in der Tabelle Seite 234) das bei gleicher Abschaltleistung aber geringerer Schalterarbeit entstanden ist als die übrigen Gasmengen, am meisten Aethylen und am wenigsten Wasserstoff. Die unter gleichen Abschaltbedingungen mit Gleichstrom (etwa 20-mal grössere Schalterarbeit) erzeugten Schaltergase enthalten etwa 10% Aethylen weniger und dafür 10% Wasserstoff mehr als die ersteren. Bei dem, mit Wechselstrom von 8000 Volt und 200 Amp. erhaltenen Gas aus dem grossen Versuchsschalter ist der Wasserstoffgehalt am höchsten und der Aethylengehalt sehr klein. Der mittlere Lichtbogeneffekt wie auch die Lichtbogendauer waren hiebei naturgemäss ganz bedeutend grösser, als bei den Versuchen mit dem kleinen Schalter. Wir glauben hieraus schliessen zu dürfen, dass die Schalterarbeit vermutlich von Einfluss auf die quantitative chemische Zusammensetzung der gebildeten Schaltergase ist, indem zu schliessen wäre, dass *der Wasserstoffgehalt der Schaltergase mit der Schalterarbeit nach einem noch unbekanntem Gesetz anwächst*. Qualitativ ist hingegen die Zusammensetzung dieser Gase stets dieselbe.

Wir teilen diese Annahme unter allem Vorbehalte mit, weil uns noch zu wenig Analysenmaterial zur Verfügung steht. Um auch in dieser Richtung völlige Klarheit zu erhalten, müssten noch weitere Schaltergase aus Schaltern, welche mit verschiedenen Spannungen und Stromstärken betrieben werden, zur Untersuchung kommen.

Durch unsere Versuche ist erwiesen, dass *bei gleichen Abschaltungsbedingungen auch gleichzusammengesetzte Gase entstehen*. Es scheint, dass dabei die Natur des Oels

⁷⁾ The Journal of the Institution of Electrical Engineers Vol. 53, 1914, Seite 155.

keinen sehr grossen Einfluss ausübt; so ergab z. B. das Oel A, welches verhältnismässig reich an ungesättigten Verbindungen ist (Jodzahl 10), ganz ähnlich zusammengesetzte Gase wie das Oel B (Jodzahl 1,3). Auch nach dieser Richtung hin müssten noch weitere Untersuchungen angestellt werden, um allgemein gültige Regeln angeben zu können. *Einwandfrei nachgewiesen ist aber die Tatsache, dass die Schaltergase aus Mineralölen immer sehr wasserstoffreich sind. Je mehr der Wasserstoffgehalt derselben anwächst, um so grösser ist übrigens die Menge des im Oele abgeschiedenen Kohlenstoffs und um so mehr treten die Kohlenwasserstoffe im Gase zurück.*

Währenddem beim Zersetzen von Mineralölen bei Temperaturen von 600 — 800° C eine Wasserstoffverschiebung eintritt, also kohlenwasserstoffreiche Gase und teerartige Produkte auftreten, findet bei Flammenbogentemperatur, die zwischen 2000 und 4000° C liegen wird, eine vollständige Sprengung der Oelmoleküle statt unter reichlicher Kohlenstoff- und Wasserstoffbildung. Im Gase treten dann als kleinere Sprengstücke noch Aethylen und Methan auf, deren Menge um so mehr zurückzutreten scheint, je höhere Spannungen und Stromstärken bei der Abschaltung herrschen.

Die Veränderungen im Oel durch den Abschaltlichtbogen.

Bekannt ist die Dunkelfärbung des Oels beim Funken- oder Lichtbogendurchgang. Dass diese auf eine Ausscheidung von Kohlenstoff in amorpher Form zurückzuführen ist beweisen die Filtrationsrückstände von „verbrauchten“ Schalterölen. Solche Oele lassen sich bekanntlich durch sorgfältige Filtration, also durch eine rein mechanische Reinigung wieder gebrauchsfähig machen, indem dabei sowohl die helle Färbung als bei geeigneter Behandlung (Auskochen oder Filtration mittelst Filter aus Faserstoffen⁸⁾ auch die normale Durchschlagsfestigkeit zurückgewonnen werden kann. Die Tatsache lässt vermuten, dass die Beanspruchung des Oels durch den Lichtbogen seine wesentliche Zusammensetzung unverändert lässt. Es schien uns aber trotzdem angezeigt, die Frage auf wissenschaftliche Weise zu prüfen, weil sie praktisch von grosser Bedeutung ist. Wir legten dabei weniger Gewicht auf die quantitative Ermittlung des ausgeschiedenen Kohlenstoffes etwa in Abhängigkeit der Schalterarbeit, sondern auf die Untersuchung des physikalisch-chemischen Verhaltens des Oels nach erlittener Beanspruchung. Zu diesem Zweck wurde das Oel, Bezeichnung B, durch die Eidg. Prüfanstalt für Brennstoffe einer eingehenden Analyse unterworfen. Zur Untersuchung kamen folgende Oelproben:

1. eine grössere Probe Schalteröl vor Beginn der auf Seite 234 genannten Abschaltversuche,
2. eine kleinere Probe, entnommen nach 100 Abschaltungen,
3. eine kleinere Probe, entnommen nach 400 Abschaltungen,
4. eine grössere Probe, entnommen nach 530 Abschaltungen.

Bei den Schaltversuchen wurden am Oele folgende Veränderungen beobachtet:

Das ursprünglich hellgelbe, klare Oel dunkelte schon nach wenigen Abschaltungen und zeigte eine starke blaue Fluoreszenz. Es war bald mit freien Kohlenstoffteilchen durchsetzt. Nach und nach wurde das Oel ganz dunkel und zeigte einen feinen, schlammartigen, schwarzen Bodensatz. Selbst bei langandauerndem Stehen blieb das Oel undurchsichtig.

Die Proben 1 und 4 wurden im Laboratorium ziemlich eingehend untersucht; bei den Proben 2 und 3 konnte dagegen nur das spezifische Gewicht und die Jodzahl bestimmt werden.

Zunächst versuchten wir, den, dem Oel mechanisch beigemengten Kohlenstoff, der während der Abschaltung entstanden war, zu entfernen. Dies geschah durch sorgfältiges Filtrieren. Es resultierte ein ganz klares Oel, das nur wenig dunkler gefärbt war, als das ursprüngliche Ausgangsmaterial. Schon dieser Befund wies darauf hin, dass durch den Lichtbogen nur eine lokale, aber sehr weitgehende Zersetzung des Oels eintritt.

Die Proben 1 und 2 wurden geprüft auf Aussehen, auf das Verhalten beim Durchleiten von Sauerstoff bei 120° C, auf das spezifische Gewicht, Verhalten in der Kälte, Flammpunkt, Selbstzündpunkt, Gehalt an freien Mineralsäuren, Verhalten beim Sieden, Jodzahl, Teerzahl und Viskosität.

Wir führen die erhaltenen Analysenergebnisse nachstehend auf.

⁸⁾ Siehe die Notiz über die Filterpresse von Brown, Boveri & Cie., Bulletin 1917, Seite 207.

Veränderung von Schalteröl durch den Abschaltlichtbogen.

Untersuchung	Ursprüngliches Oel B. Probe No. 1	Oel B nach 500 Abschaltungen. Probe No. 4
Aussehen	hellgelb, klar, dickflüssig	dunkel, durch Kohlentelchen getrübt. Nach der Filtration klar, dunkelgelb, dickflüssig
Aussehen nach 70stündigem Durchleiten von Sauerstoff bei 120° C	braungelb, klar	dunkelbraun, klar, geringer Bodensatz
Spez. Gewicht bei 15° C	0,887	0,890
Verhalten in der Kälte bei 0° C bei -15° C	flüssig schwerflüssig	flüssig schwerflüssig
Flammpunkt im Pensky-Martens Apparat	156° C	110° C
Selbstzündpunkt	400° C	400° C
Prüfung auf freie Mineralsäuren .	säurefrei	säurefrei
Siedeanalyse: im Englerkolben kontinuierlich destilliert gehen über von 0—300° C = „ 300—350° C = „ 350—370° C = Rückstand =	1,6 Gew. % 28,0 „ % 27,4 „ % *) 43,0 „ % <hr/> 100,0 Gew. %	} 31,5 Gew. % 21,1 „ % **) 47,4 „ % <hr/> 100,0 Gew. %
Jodzahl	1,4	1,5
Teerzahl	0,151	0,209
Viskosität in Englergraden: bei 20° C „ 28° C „ 65° C	8,74 5,51 1,88	7,47 — 1,85
Elementarzusammensetzung: Kohlenstoff Wasserstoff Sauerstoff und Stickstoff . . Schwefel	85,93 % 12,70 % 1,33 % 0,04 % <hr/> 100,00 %	— — — —

*) Bei 370° C Beginn der Zersetzung.

**) Bei 365° C „ „ „

Die Oelproben No. 2 und 3 hatten ein spezifisches Gewicht von 0,887 und eine Jodzahl von 1,6 resp. 1,3.

Der auf dem Filter zurückgebliebene, durch die 500 Abschaltungen erzeugte Kohlenstoff wog nach dem Trocknen noch 0,106 gr. Er war sammetartig, mattschwarz und amorph.

Beim Kochen mit Benzol färbte sich letzteres kaum braun, was beweist, dass durch den Abschaltvorgang Kohlenstoff und nicht etwa ein asphaltartiger Körper aus dem Oel ausgeschieden wird.

Bei einer kleinen Oelprobe, die von Versuchen im Elektrizitätswerk Beznau herrührte, hatte sich im Verlauf von 6 Monaten der ausgeschiedene Kohlenstoff so vollständig gesetzt, dass das Oel wieder vollkommen klar und hellgelb aussah.

Aus den angeführten Zahlenwerten kann man erkennen, dass durch die Abschaltungen das Oel hauptsächlich mechanisch verunreinigt wird und zwar durch den ausgeschiedenen Kohlenstoff. Nach sorgfältiger Filtration resultiert ein Oel, das gegenüber der ursprünglich verwendeten Probe nur wenig verändert ist. Es ist etwas dunkler in der Farbe, wird durch Sauerstoff bei höherer Temperatur etwas stärker angegriffen und weist demzufolge auch eine etwas grössere Teerzahl auf. Die Jodzahl des Oels nimmt nicht zu. Es ist dies ein Beweis dafür, dass keine ungesättigten, flüssigen Körper durch den Spaltungsvorgang entstehen. Selbst bei Oelen, die ursprünglich eine höhere Jodzahl aufweisen, steigt dieselbe beim Durchgang des Lichtbogens nicht an. Das erst erwähnte Oel A wies z. B. vor und nach den Abschaltungsversuchen die Jodzahl 10 auf.

Diese Analysen benötigten der Vollständigkeit halber noch die Prüfung der dielektrischen Eigenschaften. Wir haben solche Messungen an anderen Versuchsserien mehrfach vorgenommen und nur die wohlbekannt und durch eine grössere Zahl sehr eingehender Spezialuntersuchungen von anderer Seite gewonnene Tatsache konstatiert, dass die dielektrische Festigkeit der Oele nach erfolgter Reinigung und Trocknung unverändert geblieben ist. Für die Verhältnisse des Abschaltvorgangs spielen übrigens selbst grosse Aenderungen in der Durchschlagsfestigkeit des Oels keine Rolle, weil dieses durch die Lichtbogenspannung nur äusserst gering beansprucht wird. Wir verweisen hierüber auf den folgenden Abschnitt.

Nach diesen Versuchen darf in der Tat angenommen werden, dass die Beanspruchung der gebräuchlichen Mineralöle durch den Abschaltlichtbogen nur einen, wenn auch äusserst geringen Verbrauch, aber nach erfolgter mechanischer Reinigung keine Beeinträchtigung ihrer wesentlichen Eigenschaften zur Folge hat. Wie wir später nachweisen, trifft dies für die sog. unverbrennlichen Schalteröle nicht zu.

(Fortsetzung folgt in nächster Nummer.)

Tafel I.

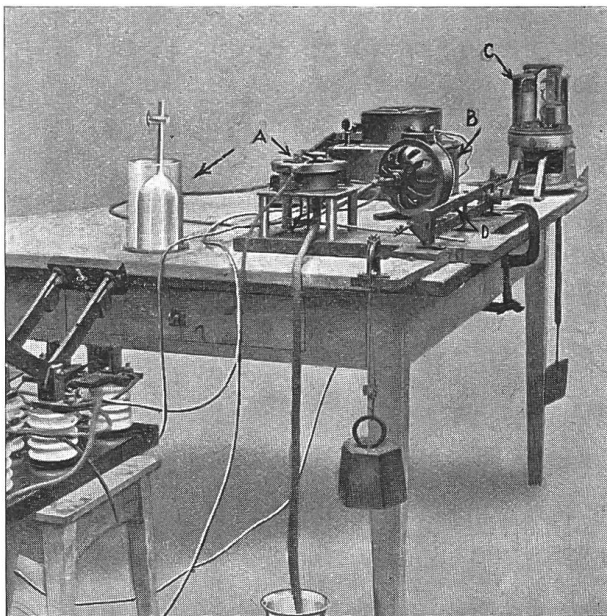


Fig. a

Kleiner Versuchsschalter 250 V, 100 A

für die Versuche in den Techn. Prüfanstalten des S.E.V. benutzt.

A Schalter mit Oelzylinder und Gasauffangglocke. B Rührmotor. C Steuerapparat. D Kontaktsystem für den Oscillographen.

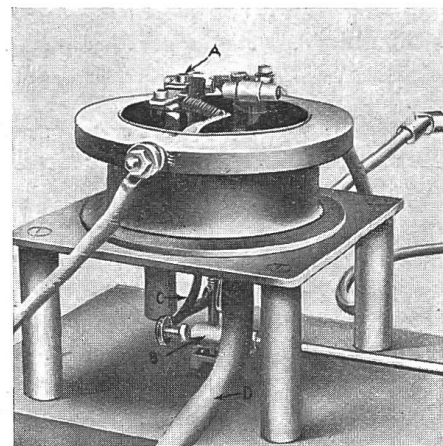


Fig. b

Kontaktanordnung des kleinen Versuchsschalters.

A Kontakthalter.
B Antrieb.
C Spindel zum Rührflügel.
D Oelablauf.

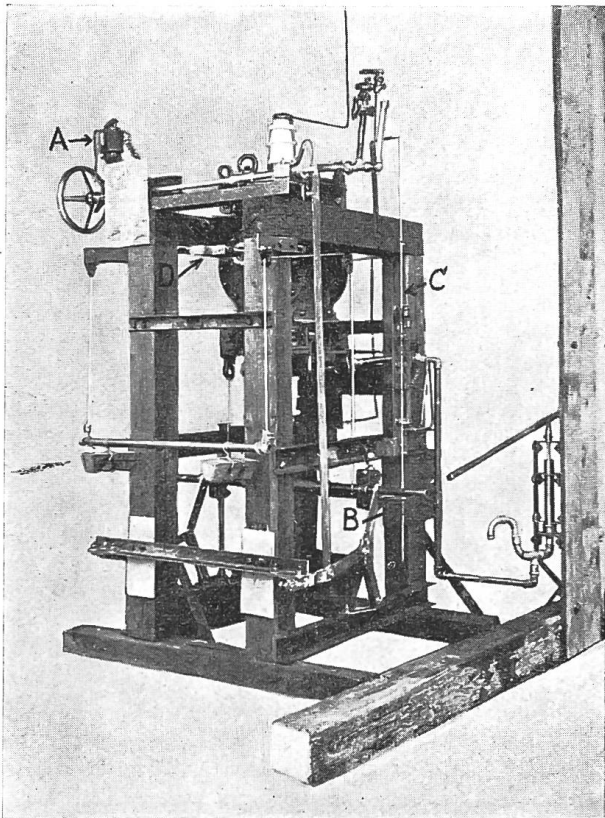
Tafel II.

Fig. a

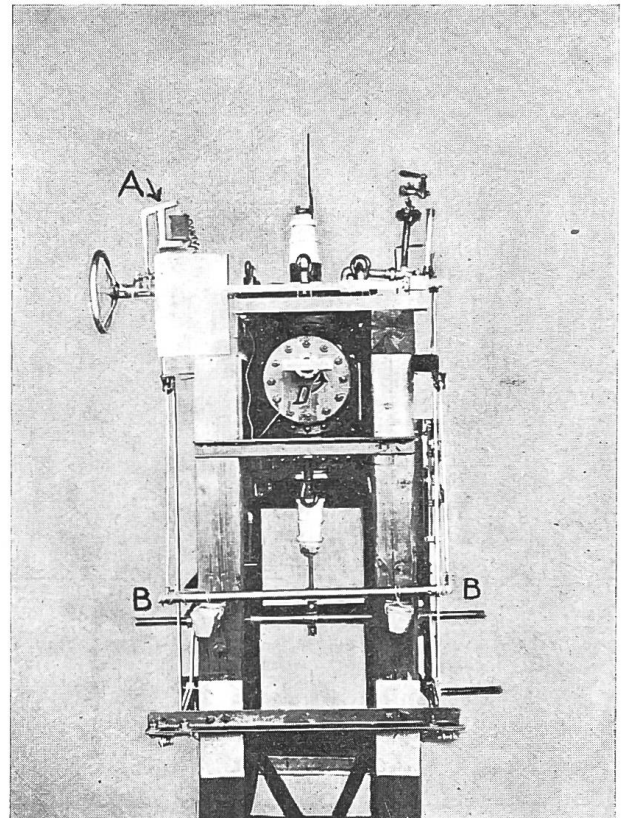


Fig. b

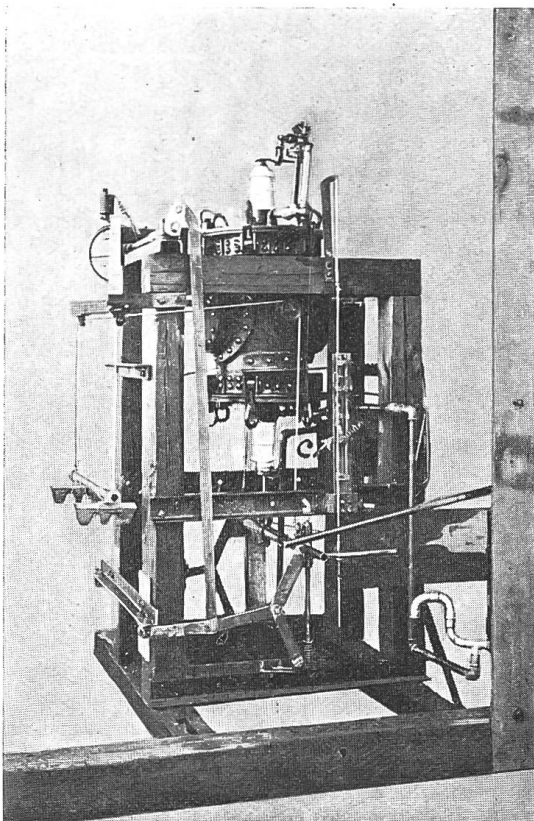


Fig. c

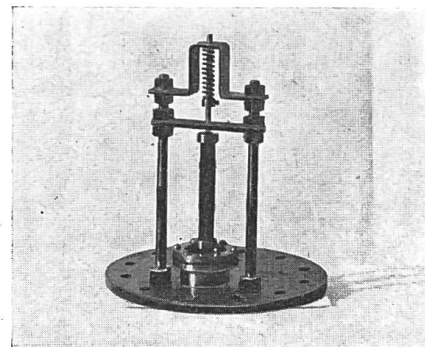


Fig. d

Elektrisches Manometer**Ansicht des grossen Versuchsschalters
im Kraftwerk Beznau.**

35 000 V, 200 A, 20 Atm.

- A Automat. Auslösung des Schalters.
 B Isolierte Traverse zum Einschalten von Hand.
 C Kontaktsystem für die Steuerung des Oscillographen.
 D Elektrisches Manometer.