Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 13 (1922)

Heft: 7

Artikel: Das Ausschalten von Gleichstrom und Wechselstrom bei induktiven Stromkreisen [Fortsetzung und Schluss]

Autor: Rüdenberg, Reinhold

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058302

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: 22.08.2025

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

Das Ausschalten von Gleichstrom und Wechselstrom bei induktiven Stromkreisen.

Von *Reinhold Rüdenberg,* Charlottenburg.

(Fortsetzung und Schluss.)

Der Verfasser behandelte im ersten Teil (siehe Bulletin 1922, No. 6, Seite 248 u. ff.) das Ausschalten von Gleichstrom mittels Widerstandsschalter und Lichtbogenschalter, indem er auf analytischem und graphischem Wege den zeitlichen Verlauf von Ausschaltstrom und Ausschaltspannung ableitete und auch Beziehungen für die Schalterarbeit angab. Die analytischen Ergebnisse sind auch anhand von Ausschaltoszillogrammen diskutiert worden.

In der vorliegenden Fortsetzung der Arbeit wird das Ausschalten von Wechselstrom behandelt, wobei die Untersuchung in ähnlicher Weise wie im ersten Teile durchgeführt wird. zunächst wird das Verhalten von Luftschaltern untersucht und darauf auf die besonderen Verhältnisse der Oelschalter eingegangen.

Dans la première partie de son article (Bulletin 1922, No. 6, pages 248 et suivantes) l'auteur traite de l'interruption d'un courant continu dans un circuit contenant de l'inductance il détermine analytiquement et graphiquement les valeurs du courant et de la tension pendant l'interruption et pour divers genres de contacts. Il compare les résultats de ses calculs avec les mesures prises à l'oscillographe et calcule l'énergie dépensée pendant l'interruption.

Dans la seconde partie il examine de manière analogue ce qui se passe lors de l'interruption d'un courant alternatif dans un circuit contenant de l'inductance. Il examine d'abord le phénomène de l'interruption dans l'air puis l'interruption dans l'huile.

2. Ausschalten von Wechselstrom.

Wechselstrom lässt sich im Prinzip wesentlich leichter ausschalten als Gleichstrom, weil er in seinem regulären Verlauf sowieso nach jeder Halbperiode durch Null hindurchgeht. Wenn es gelänge, den Schalter mit solcher Präzision zu betätigen, dass er den Stromkreis im Augenblick des natürlichen Nulldurchganges des Stromes unterbricht, so bliebe der Kreis von da ab stromlos, ohne dass irgendwelche Ueberspannungs- oder Erwärmungserscheinungen an der Schaltstelle aufträten. Praktisch ist ein solches Präzisionsschalten bisher nicht möglich, weil die Massenwirkung der Schaltkontakte und ihrer Antriebsorgane keine so genaue Einstellung und so hohe Schaltgeschwindigkeit erlaubt. Bei 50periodigem Wechselstrom müsste die Genauigkeit Zeiten von der Grössenordnung einiger zehntausendstel Sekunden erreichen. Bei den heute üblichen Schaltern erstreckt sich die Ausschaltdauer dagegen über einen wesentlich längeren Zeitraum, der grössere Bruchteile oder Vielfache der Periodendauer beträgt.

Bei Widerstandsschaltern, die das Ausschalten durch allmähliche Zunahme des Kontaktwiderstandes bewirken, sind die Erscheinungen ähnlich wie bei Gleichstrom. Dieser Fall ist jedoch nicht sehr wichtig, da die hohen in Wechselstromkreisen üblichen Spannungen fast stets eine Lichtbogenbildung zwischen den Schaltkontakten bewirken. Hierbei treten wesentlich andere Erscheinungen als bei Gleichstromschaltern auf, da sich bei Wechselstrom die treibende Spannung der Stromquelle dauernd verändert und ein wiederholtes Löschen und Zünden des Lichtbogens bewirken kann.

Da die Vorgänge am Lichtbogen in Luft bereits in vieler Hinsicht untersucht sind, so behandeln wir zunächst das Ausschalten durch Luftschalter. Ueber die elektrischen Erscheinungen an Lichtbögen unter Oel liegen merkwürdigerweise fast keine Untersuchungen vor, obgleich die Oelschalter eine wichtige Rolle in der Starkstromtechnik spielen. Wir müssen daher die an Luftschaltern gewonnenen Erkenntnisse sinngemäss auf Oelschalter übertragen und werden noch eine Reihe von Eigenarten besprechen, durch die die Erscheinungen an Oelschaltern verwickelt werden.

a) Luftschalter.

Die einfachsten Verhältnisse liegen vor, wenn der über einen Lichtbogen B nach Fig. 23 abzuschaltende Stromkreis nur sehr geringe Selbstinduktion L und überwiegenden Widerstand R besitzt. Es mögen z. B. Glühlampen von einem Netz

konstanter Wechselspannung e abgeschaltet werden. Dann geht der Strom i gleichzeitig mit der Spannung e durch Null, und hierbei erlischt der Lichtbogen zwischen den Schaltkontakten jedesmal. Unmittelbar nach dem Löschen sinkt die Temperatur der Kontakte, und die Zündspannung e_z steigt sehr schnell an nach einer Kurve,

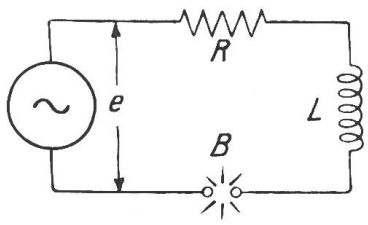

Fig. 23

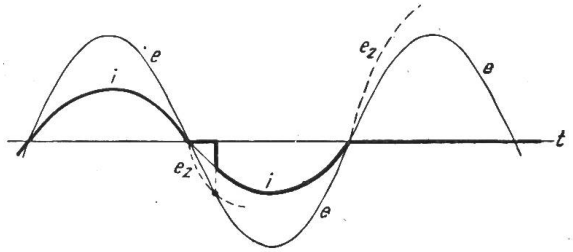

Fig. 24

die in Fig. 24 gestrichelt eingetragen ist. Bei sehr kleinem Lichtbogen wird sie bald von der ebenfalls ansteigenden Wechselspannung eingeholt, so dass der Strom unter Neuzündung des Bogens schnell auf seinen stationären Wert springt. *Ist die Kontaktentfernung beim nächsten Nulldurchgang von Strom und Spannung ausreichend gross. um die Zündspannung und ihren Anstieg derart zu vergrössern, dass sie dauernd über der Wechselspannung der Stromquelle bleibt, so zündet der Bogen nicht wieder, sondern bleibt erloschen.* Der Strom bleibt dann nach Erreichen des Nullwertes dauernd Null.

Bei Metallkontakten mit guter Wärmeleitung, vor allem bei Kupferkontakten, tritt die Löschwirkung sehr schnell ein, so dass nur geringe Kontaktwege erforderlich sind. Bei höheren Spannungen, die entsprechend der zweiten Halbwelle in Fig. 24 leichter einen Ueberschlag der Kontakte bewirken können, empfiehlt es sich, dies durch Verwendung mehrerer in Serie liegender Unterbrechungsstellen zu verhindern. Da es sich demnach bei Wechselstrom weniger darum handelt, den Strom zu unterbrechen als vielmehr ein Neuzünden des Lichtbogens zu verhindern, so kann man durch relativ kleine Schalter ganz erhebliche induktionsfreie Leistungen beherrschen. Noch leichter liessen sich Maschinen mit selbständiger Gegenspannung wie Synchronmotoren und Einankerumformer abschalten, wenn ihre Leitungen vorwiegend ohmschen Widerstand besitzen würden, weil dieser nur unter der Wirkung der geringen Differenz der Spannungen steht. Tatsächlich ist ihre Streuinduktion aber zu beachten.

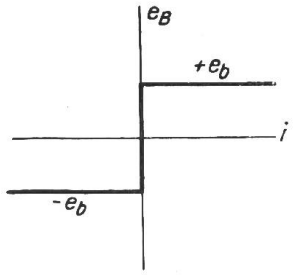

Fig. 25

Ungünstiger werden die Erscheinungen beim Ausschalten von induktiven Wechselstromkreisen, von Transformatoren, Asynchronmotoren und ähnlichen Maschinen und vor allem in dem gefährlichen Falle des Abschaltens von Kurzschlussströmen. Der Widerstand R des Stromkreises ist dann meist gering gegenüber der Induktanz, so dass die Phasenverschiebung des Stromes gegenüber der Spannung erheblich wird. Der Nulldurchgang des Stromes findet dann nicht mehr, wie in Fig. 24, bei geringer Spannung statt, diese ist vielmehr beim Löschen des Lichtbogens so gross, dass sie ihn sofort wieder zünden kann und den Strom in entgegengesetzter Richtung durchtreibt.

In jedem Fall ist der Stromverlauf im induktiven Kreise durch die Beziehung bestimmt

$$e = L\frac{di}{dt} + Ri + e_B \tag{41}$$

die durch die Lichtbogenspannung e_B ihr charakteristisches Gepräge erhält. Wir wollen die Vorgänge, die beim Brennen des Wechselstromlichtbogens in konstanter Länge auftreten, zunächst unter der einfachen Annahme verfolgen, dass der Licht-

bogen eine rechteckige Charakteristik besitzt, dass seine Spannung daher nach Fig. 25

$$e_B = \pm e_b \tag{42}$$

ist, wobei das positive Vorzeichen für positive Ströme und das negative Vorzeichen für negative Ströme gilt. Vom Einfluss der Zünd- und Löschspannung am Lichtbogen, der nur für sehr kleine Ströme erheblich ist, und vom Einfluss des ohmschen Spannungsabfalles, der für praktische Wechselstromkreise gering ist, sehen wir vorläufig ab. Dann können wir in Gleichung (41) die Spannung Ri vernachlässigen und können sie integrieren, wenn wir für die Wechselspannung schreiben

$$e = E \sin(\omega t + \varphi) \tag{43}$$

wobei φ der Phasenwinkel der Spannung im Augenblick des Nulldurchganges des Stromes, also zur Zeit $t = 0$ sein soll. Für die positive Halbwelle des Stromes erhalten wir dann aus Gleichung (41)

$$i = \frac{1}{L}\int_0^t (e - e_B)\,dt = \frac{E}{L}\int_0^t \sin(\omega t + \varphi)\,dt - \frac{e_b}{L}\int_0^t dt \tag{44}$$

oder integriert

$$i = -\frac{E}{\omega L}\cos(\omega t + \varphi) + \frac{E}{\omega L}\cos\varphi - \frac{e_b}{\omega L}\omega t \tag{45}$$

Nach Ablauf einer Halbperiode $\frac{\vartheta}{2}$, also für

$$\omega t = \pi, \quad \frac{\vartheta}{2} = \frac{\pi}{\omega} \tag{46}$$

muss der Strom bei stationärem Verlauf wieder durch Null gehen. Es ist daher nach Gleichung (45)

$$-E(\cos(\pi + \varphi) - \cos\varphi) = e_b \pi \tag{47}$$

und daraus ergibt sich

$$\cos\varphi = \frac{\pi}{2}\frac{e_b}{E} \tag{48}$$

Die Phasenverschiebung in einem rein induktiven Kreise, in dem ein Lichtbogen brennt, ist also keineswegs Null, sondern sie ist nach Gleichung (48) durch das Verhältnis von Lichtbogenspannung zur Spannungsamplitude der Stromquelle gegeben. Sie nähert sich mit grösser werdender Lichtbogenspannung, also mit zunehmender Entfernung der Schaltkontakte, immer mehr dem Werte 0.

Führt man den Wert von $\cos\varphi$ in Gleichung (45) ein, so erhält man für den Verlauf des Stromes den übersichtlicheren Ausdruck

$$i = -\frac{E}{\omega L}\cos(\omega t + \varphi) + \frac{e_b}{\omega L}\left(\frac{\pi}{2} - \omega t\right) \tag{49}$$

Der Strom besteht also aus zwei Komponenten, von denen die erste den stationären Blindstrom bei ganz geschlossenem Schalter darstellt, der 90° Phasenverschiebung gegenüber der Spannung nach Gleichung (43) besitzt. Die zweite Komponente stellt einen zeitlich geradlinigen Strom dar, dessen Bedeutung mit wachsender Lichtbogenspannung zunimmt. Fig. 26a stellt diese Teilströme und auch den Gesamtstrom für geringe, Fig. 27a für grosse Lichtbogenspannung e_B im Vergleich zur treibenden Spannung E dar. Die Stromkurven sind für beide Halbperioden gezeichnet, sie

setzen sich stets aus einer Cosinuslinie und einer Dreieckslinie zusammen, so dass sich mit zunehmender Lichtbogenspannung stark verzerrte Kurvenformen ergeben. In Fig. 26b und Fig. 27b ist zu diesem Stromverlauf auch *die Spannung am Lichtbogen und die für den Aussenstromkreis übrig bleibende Spannung* $e - e_B$ *dargestellt, die*

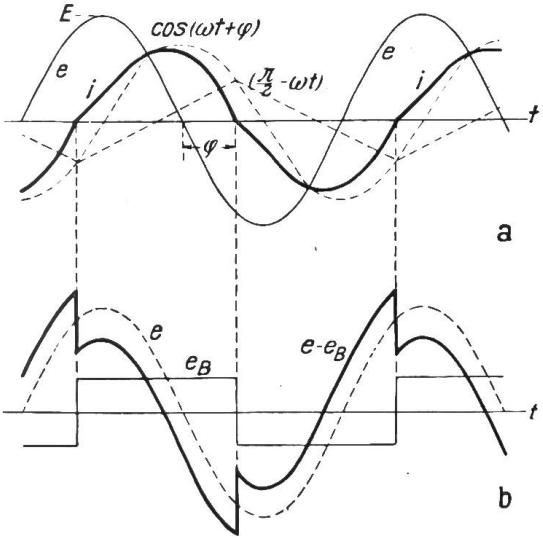

Fig. 26

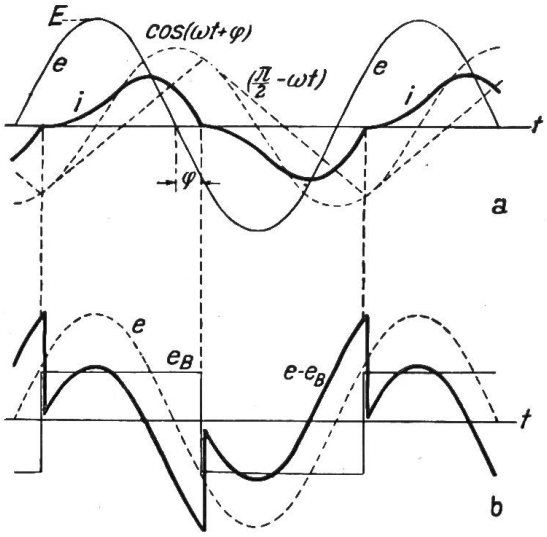

Fig. 27

mit zunehmender Lichtbogenlänge einen immer verzerrteren Verlauf mit immer grösseren Spannungssprüngen erhält.

Aus Gleichung (48) ergibt sich, dass die Phasenverschiebung des verzerrten Stromes für einen bestimmten Wert der Lichtbogenspannung, nämlich für das $\frac{2}{\pi}$ fache der Netzspannung, zu Null wird. Dies tritt jedoch in Wirklichkeit nicht ein, denn schon vorher wird nach Fig. 28 die Lichtbogenspannung beim Nulldurchgang des

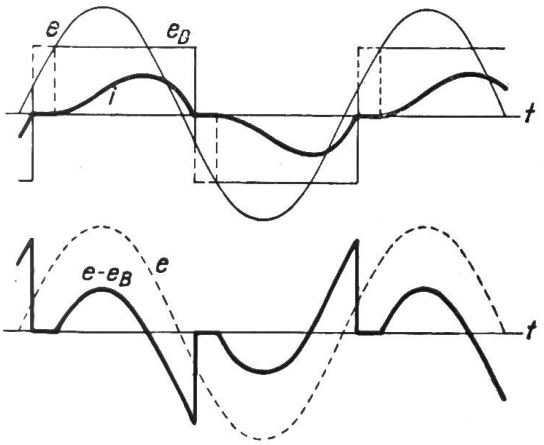

Fig. 28

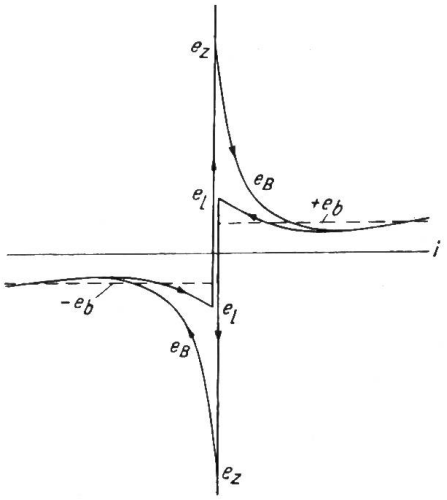

Fig. 29

Stromes gleich oder grösser als der Augenblickswert der Netzspannung, so dass der Lichtbogen nach dem Erlöschen nicht sofort neu zündet. Es tritt vielmehr eine stromlose Pause ein, die solange dauert, bis die Netzspannung e die Lichtbogenspannung e_B wieder erreicht hat. Auch die Spannung im Aussenkreis verschwindet während dieser Pause. Sie besitzt ausserordentlich verzerrten Verlauf, der in Fig. 28 ebenfalls dargestellt ist.

In Wirklichkeit tritt diese stromlose Pause nur selten auf, weil die Lichtbogencharakteristik fast stets ausgeprägte Zündspitzen besitzt, die wir nunmehr mitberücksichtigen wollen. In Fig. 29 ist der tatsächliche Verlauf der Charakteristik dargestellt. Bei abnehmendem Strom wächst die Lichtbogenspannung bis zur Löschspannung e_b an, steigt bei Umkehrung der Stromrichtung auf den höheren Wert der Zündspannung e_z, um mit zunehmendem, entgegengerichtetem Strom schnell geringer zu werden. Dasselbe Spiel wiederholt sich dann beim nochmaligen Richtungswechsel des Stromes. Enthält der Stromkreis erheblichen ohm'schen Widerstand R, so kann man dessen Spannungsabfall zur Lichtbogenspannung addieren, so dass Fig. 29 die gemeinsame Spannungscharakteristik des Stromkreises darstellt. Da die Lichtbogenspannung bei grossen Strömen etwas sinkt, die Widerstandsspannung dagegen zunimmt, so erhält man für grössere Ströme einen schwach gekrümmten Verlauf der Charakteristik. Wir können in Fig. 29 die mittlere Lichtbogenspannung e_b eintragen und daraus nach Gleichung (48) mit ausreichender Genauigkeit die Phasenverschiebung des Stromes berechnen. Die Stromstärke ist dann in der Nähe des Nulldurchganges ein wenig kleiner, in der Nähe des Maximums ein wenig grösser als es Gleichung (49) und die Fig. 26 und 27 angeben. Ihren genaueren Verlauf könnte man durch schrittweise graphische Integration des ersten Ausdrucks der Gleichung (44) auswerten, im allgemeinen lohnt sich das aber nicht, solange die Charakteristik nicht sehr genau bekannt ist.

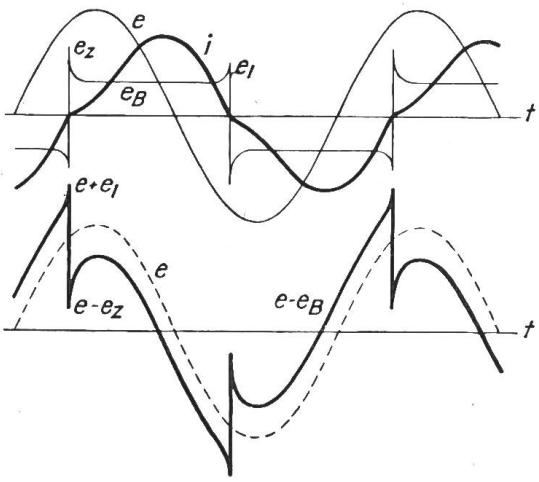

Fig. 30

Fig. 30 stellt den tatsächlichen Verlauf des Stromes und der Lichtbogenspannung dar. Die Zündspitze verändert den Verlauf der Erscheinungen nur wenig, solange sie unterhalb der speisenden Spannung bleibt. Sie wird jedoch bei zunehmender Kontaktentfernung schon bei recht geringen mittleren Lichtbogenspannungen und daher bei einer Phasenverschiebung φ die sich von 90^0 noch nicht weit entfernt hat gleich oder grösser als die Netzspannung. Im allgemeinen überschreitet sie die Netzspannung bereits, während der Stromwechsel noch fast bei deren Scheitel stattfindet und verhindert dadurch von einem bestimmten Kontaktabstand an vollständig das Wiederzünden des Lichtbogens.

Die Selbstinduktion L umfasst nicht nur die im äusseren, abzuschaltenden Stromkreis liegenden magnetischen Felder, sondern auch die Streufelder der speisenden Wechselstromquelle. Infolgedessen tritt an den Klemmen des Generators eine Spannung auf, die sich aus der treibenden Spannung e und einem Teil der Selbstinduktionsspannung $e - e_B$ zusammensetzt. Besonders bei Kurzschlüssen wird die Selbstinduktion zum grossen Teil im Generator liegen, während die der äusseren Leitungen nur geringfügig ist. Nennt man S die Streuinduktion der Stromquelle, so ist ihre Klemmenspannung

$$e_G = e - \frac{S}{L}(e - e_B) = \left(1 - \frac{S}{L}\right)e + \frac{S}{L}e_B \tag{50}$$

Sie wird also von einem Teil der elektromotorischen Kraft und einem anderen Teil der Lichtbogenspannung aufgebaut. Dagegen ist die Spannung am Aussenkreis

$$e_K = (L - S)\frac{di}{dt} = \left(1 - \frac{S}{L}\right)(e - e_B) \tag{51}$$

Sie wird also durch die Generatorstreuung lediglich in ihrer Grösse vermindert. Fig. 31 stellt die Spannungen nach dem in Fig. 30 gezeichneten Verlauf für Generatorklemmen und Aussenkreis dar, wenn die Streuinduktion des Generators gleich der Hälfte der ganzen Selbstinduktion des Kreises angenommen wird.

Aus den Gleichungen (50) und (51) folgt, dass sich die Höhe der plötzlichen Spannungssprünge, die durch die Lichtbogenspannung e_B gegeben sind, auf den Generator- und den Aussenkreis nach Massgabe der Streuinduktion und der äusseren Selbstinduktion aufteilt. *Die Summe der Spannungssprünge im ganzen Stromkreise ist nach Fig. 30 stets gleich der Summe von Zünd- und Löschspannung des Lichtbogens, die im ungünstigsten Falle, wenn die Löschspannung nahezu gleich der Zündspannung ist, gleich der doppelten Amplitude der Generatorspannung nach dem Abschalten werden kann.* Der Absolutwert der Spannung im ganzen Stromkreis kann sich, wie man an Fig. 30 ebenfalls verfolgen kann, im ungünstigsten Falle bis auf den doppelten Wert der treibenden Spannung der Stromquelle erheben.

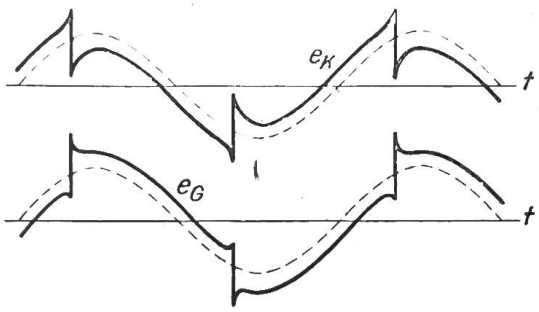

Fig. 31

Wenn viel Widerstand R im auszuschaltenden Stromkreise enthalten ist, wird die Phasenverschiebung von Strom und Spannung geringer als nach Gleichung (48). Die Zündspitze e_z durchschneidet nach Fig. 30 die Spannung e dann schon früher, der Lichtbogen löscht schon bei kleinerem Kontaktabstand. Die Spannungssprünge sowohl wie die Ueberspannungen werden geringer und zwar, wie man aus Fig. 30 ersieht, proportional dem Sinus der tatsächlichen Phasenverschiebung. Es können dann aber stromlose Pausen und darauf Rückzündungen mit höherer Spannung eintreten, wenn die Zündspannung nach dem erstmaligen Löschen noch unterhalb der treibenden Spannungsamplitude des Generators liegt. Es liegt also auch beim Abschalten induktionsfreier Belastung die Möglichkeit stärkerer Spannungssprünge vor, besonders wenn man den Schalter nur sehr langsam öffnet.

Man erkennt aus alledem, dass der Ausschaltvorgang bei Wechselstrom wesentlich verschieden von dem bei Gleichstrom ist. Während dort der Ausschaltlichtbogen in einem Zuge verlöscht und dabei Ueberspannungen erzeugen kann, die durch die Höhe der Löschspitze gegeben sind, löscht und zündet der Ausschaltlichtbogen bei Wechselstrom während der Bewegung der Schaltkontakte im dauernden Wechsel bei jedem Nulldurchgang des Stromes. Die Lösch- und Zündspannungen werden immer grösser, die Zündspannung erreicht schliesslich bei zunehmender Kontaktentfernung und Lichtbogenlänge als Grenzwert die Grösse der Spannungsamplitude E, dann zündet der Lichtbogen nicht mehr von neuem, und dadurch wird die völlige Ausschaltung bewirkt. In Fig. 32 ist der Verlauf der Spannung am Lichtbogen, am Generator und am Aussenkreise während des Ausschaltens durch zunehmende Lichtbogenlänge entsprechend Gleichung (50)

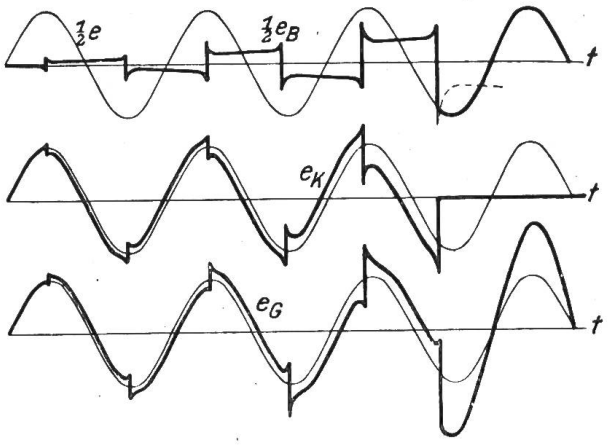

Fig. 32

Fig. 33

und (51) dargestellt. Fig. 33 zeigt ein Oszillogramm der Ausschaltspannung an einem induktiven Stromkreis, der durch einen Luftschalter von der Stromquelle getrennt wurde. Die Uebereinstimmung der Kurven ist bemerkenswert.

Wir wollen die während einer Halbperiode des Stromes am Lichtbogen frei werdende Arbeit berechnen, die im Schalter in Wärme umgesetzt wird. Sie ist

$$A_{\frac{\vartheta}{2}} = \int_0^{\pi/\omega} e_B \, i \, dt \tag{52}$$

Setzt man hierin e_B nach Gleichung (41) ein, so entsteht

$$A_{\frac{\vartheta}{2}} = \int_0^{\pi/\omega} (e - Ri) \, i \, dt - L \int_0^{0} i \, di = \int_0^{\pi/\omega} e \, i \, dt - \int_0^{\pi/\omega} R i^2 \, dt \tag{53}$$

Dabei ist in dem Gliede mit L sowohl die untere, als die obere Integrationsgrenze mit Null einzusetzen, weil der Strom i, nach dem integriert wird, sowohl bei Beginn wie beim Ende der betrachteten Halbwelle verschwindet. Dies Integral ist daher Null. *Die magnetische Energie des Stromkreises, die beim Ausschalten von Gleichstrom den Hauptbetrag der frei werdenden Arbeit darstellte, liefert also beim Wechselstromausschalten keinen Beitrag zur Schaltarbeit. Die in der Selbstinduktion aufgespeicherte Arbeit wird vielmehr vollständig an die Stromquelle zurückgeliefert* und braucht nicht am Schalter in Wärme umgesetzt zu werden. Es bleibt nur die Differenz der von der Stromquelle gelieferten und im sonstigen Stromkreise verbrauchten Arbeitsmengen für den Schalter übrig. Das Ausschalten von Wechselstrom ist daher viel leichter als das von Gleichstrom derselben Leistung.

Für die wirkliche Ausrechnung der Schaltarbeit ist es bequemer, die Gleichung (52) direkt zu integrieren, besonders, da wir den geringen Einfluss der Lösch- und Zündspitzen bei der Integration vernachlässigen wollen. Sie bewirken zwar, dass während der sehr kleinen Lösch- und Zündzeit die Spannung e_B am Bogen sehr gross ist, jedoch ist gleichzeitig der Strom i sehr gering, so dass ihr Produkt unter dem Integral nicht erheblich in Betracht kommt. Wir dürfen demnach in Gleichung (52) die konstante Lichtbogenspannung nach Gleichung (42) und den daraus bestimmten Strom nach Gleichung (49) einsetzen und erhalten

$$A_{\frac{\vartheta}{2}} = - \frac{E \, e_b}{\omega L} \int_0^{\pi/\omega} \cos(\omega t + \varphi) \, dt + \frac{e_b^2}{\omega L} \int_0^{\pi/\omega} \left(\frac{\pi}{2} - \omega t \right) dt \tag{54}$$

Nun ist

$$\left.\begin{aligned} &\int_0^{\pi/\omega} \cos(\omega t + \varphi) \, dt = - \frac{2}{\omega} \sin \varphi \cong - \frac{2}{\omega} \\ &\int_0^{\pi/\omega} \left(\frac{\pi}{2} - \omega t \right) dt = 0 \end{aligned}\right\} \tag{55}$$

Der Beitrag des zweiten Integrales verschwindet daher.

Dagegen können wir im ersten Ausdruck den Sinus des Phasenwinkels für induktive Stromkreise unbedenklich gleich 1 setzen, weil sein Cosinus nach Gleichung (48) stets eine kleine Zahl ist. Denn die konstante Lichtbogenspannung e_b ist stets erheblich kleiner als die Zündspannung e_z, die ja höchstens gleich der Generatoren-

spannung werden kann. Somit wird die Schaltarbeit während einer Halbperiode

$$A_{\frac{\vartheta}{2}} = 2\,\frac{E\,e_b}{\omega^2 L} = \frac{2}{\omega}\,J\,e_b \tag{56}$$

wobei die Amplitude J des noch nicht unterbrochenen Wechselstromes als Quotient von Spannung und Induktanz entsprechend dem ersten Gliede von Gleichung (49) eingeführt ist.

Die Lichtbogenspannung e_b ändert sich nun mit zunehmender Kontaktentfernung während der Ausschaltdauer τ und zwar für längere Lichtbögen nach Gleichung (20)[1]) proportional der Lichtbogenlänge. Um einen Näherungswert für die gesamte Schaltarbeit zu erhalten, wollen wir annehmen, dass die Lichtbogenspannung e_b stets proportional der Zündspannung e_z bleibt, so dass diese während des Ausschaltens mit wachsender Zeit linear bis zum Endwert E ansteigt. Dann ist

$$E_b = \frac{t}{\tau}\,E\,\frac{e_b}{e_z} \tag{57}$$

wobei der Quotient $\frac{e_b}{e_z}$ einen Wert darstellt, der bei Metallkontakten in der Grössenordnung einiger Prozente liegt. Da die Zeit einer Halbperiode nach Gleichung (46) gleich $\frac{\pi}{\omega}$ ist, so wird während der Ausschaltdauer τ eine Zahl von $\frac{\tau \cdot \omega}{\pi}$ Halbwellen durchlaufen. Wenn wir dann noch zur Bestimmung der mittleren Lichtbogenspannung in Gleichung (57) für $\frac{t}{\tau}$ den Wert $\frac{1}{2}$ einsetzen, so erhalten wir die gesamte Schaltarbeit nach Gleichung (56) zu

$$A = \frac{1}{\pi}\,\frac{e_b}{e_z}\,\tau\,E\,J \tag{58}$$

Die Schaltarbeit wird daher bestimmt durch die unterbrochene Leistung, berechnet aus den Amplituden des Stromes vor der Unterbrechung und der Spannung nach der Unterbrechung, durch die Schaltdauer τ und durch das Verhältnis der Lichtbogenspannung beim vollen Strom zur Zündspannung beim Stromdurchgang durch Null. Geringe Schaltarbeit erhält man vor allem, wenn man die Schaltkontakte so baut, dass sie durch eine möglichst hohe Zündspannung e_z eine kurze Ausschaltdauer τ ergeben. Dies führt auf Kontakte mit hoher spezifischer Wärme und guter Wärmeleitfähigkeit, die eine so grosse gesamte Wärmekapazität besitzen müssen, dass sie die auf die Elektroden entfallende Schaltarbeit aufnehmen können, ohne sich stark zu erhitzen. Dann verlieren sie beim Stromdurchgang durch Null schnell die Fähigkeit zur Emission von Elektronen und erzeugen hohe Zündspannungen.

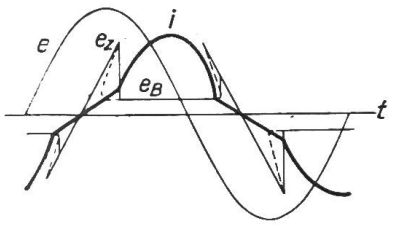

Fig. 34

Auch bei Wechselstromschaltern wirkt ein Parallelwiderstand zum Lichtbogen oder zur Selbstinduktion günstig auf den Schaltvorgang ein. Er verändert die Form der wirksamen Charakteristik des Schalterlichtbogens ebenso wie bei Gleichstrom nach Fig. 19 und 21[2]) und verursacht, dass die Lichtbogenspannung beim Stromwechsel nicht unstetig durch Null geht, sondern geradlinig, so wie es in der Fig. 34 dargestellt ist. Dadurch wird der Spannungssprung von der Löschspitze bis zur Zündspitze vermieden und durch einen allmählichen Uebergang ersetzt. Nach Erreichen der Zündspannung e_z

[1]) Bulletin 1922, No. 6, Seite 254.
[2]) Bulletin No. 6, 1922, Seiten 262 und 263.

fällt die Spannung am Bogen allerdings unstetig bis auf die kleine Lichtbogenspannung e_b herab, jedoch ist dieser steile Spannungsfall erheblich geringer als die ohne Widerstand auftretenden Sprünge. Der Strom springt dabei vom Schutzwiderstand plötzlich auf den Lichtbogen über.

Auch beim Löschen bewirkt das Ueberspringen des Stromes vom Lichtbogen auf den Schutzwiderstand einen steilen Spannungsanstieg, jedoch auch hier von geringer Höhe, wie Fig. 34 zeigt. Dort ist auch die jetzt auftretende Form der Stromkurve eingetragen. Die Sprunghöhe der Spannung ist selbst unter ungünstigsten Umständen immer kleiner als E, das ist die Hälfte des ohne Schutzwiderstand auftretenden Betrages. Verwendet man einen sehr kleinen Schutzwiderstand parallel zum Lichtbogen, so kann man die Zündspitze so stark von ihrer ursprünglichen Lage abbiegen, dass sie ganz ausserhalb der Spannungskurve e fällt, so dass ein Neuzünden unmöglich ist.

Schutzwiderstände am Lichtbogen vermindern also nicht nur die Sprungspannungen, sondern sie beschleunigen auch die Löschwirkung des Lichtbogens beim Richtungswechsel des Stromes, und schliesslich nehmen sie sogar einen Teil der Schaltarbeit auf und entlasten dadurch die Kontakte. Ebenso günstig wirken natürlich auch Belastungskreise parallel zur abzuschaltenden Selbstinduktion, wenn sie hauptsächlich ohm'sche Widerstände von geeigneter Grösse enthalten.

Bisher haben wir den Ausschaltvorgang von Wechselstrom so behandelt, als ob der Kontaktabstand für jede Halbwelle des Stromes nahezu konstant bleibt und sich nur allmählich von Halbperiode zu Halbperiode vergrössert, bis die Zündspannung des Lichtbogens die dem Stromkreis aufgedrückte Spannung überschreitet. Da nun Gleichung (58) zeigt, dass die gesamte Schaltarbeit um so geringer wird, je kürzer die Ausschaltdauer ist, so wird man versuchen, die Ausschaltgeschwindigkeit so hoch als möglich zu steigern. *Am günstigsten ist es, wenn man die Ausschaltdauer ungefähr gleich der Dauer einer Halbperiode macht.* Geht man noch weiter und schaltet so schnell aus, dass der Lichtbogen in geringerer Zeit als einer halben Periode verschwindet, so treten zusätzliche Ueberspannungen im Stromkreise auf. Gleichung (58) verliert dann ihre Gültigkeit, weil e_B bei der Integration nicht mehr als konstant angesehen werden darf. Fig. 35 stellt diese Verhältnisse dar, wobei die Ausschaltdauer τ zu zwei Dritteln der Halbperiode angenommen ist. Der Strom verschwindet vor seinem natürlichen Nulldurchgang unter der Wirkung der schnell wachsenden Lichtbogenspannung e_B, die bis zur Löschspitze e_l ansteigt.

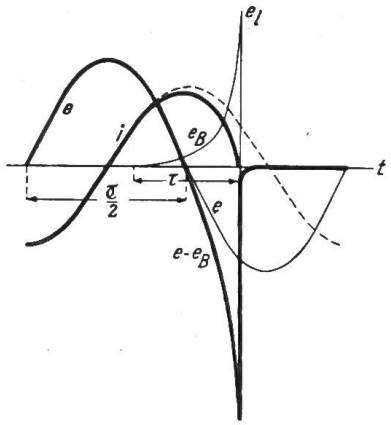

Fig. 35

Der Vorgang ist jetzt ähnlich wie beim Ausschalten von Gleichstrom. Dort war jedoch die eingeprägte Spannung e konstant, hier ist sie veränderlich und wechselt während der Ausschaltdauer ihr Vorzeichen, so dass die höchste Spannung im Stromkreise, die bei Gleichstrom durch die Differenz $e - e_B$ gegeben war, hier als absolute Summe beider Grössen in Erscheinung tritt und eine hohe Ueberspannungsspitze erzeugt. Man kann durch überschnelles Schalten auf Spannungsspitzen vom vielfachen Betrage der normalen Spannungsamplitude kommen. Fig. 36 gibt ein Oszillogramm von Spannung und Strom beim Schnellausschalten eines induktiven Wechselstromkreises wieder.

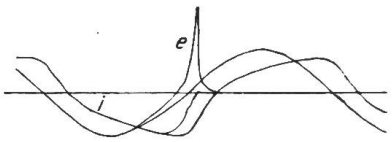

Fig. 36

Derartige Löschspitzen der Spannung können auch bei Schaltern auftreten, deren Schaltdauer mehrere Halbperioden beträgt, wenn die Schaltgeschwindigkeit zunächst gering ist und in der letzten Halbperiode so gross wird, dass durch die

schnell zunehmende Kontaktentfernung die Löschspannung wesentlich grösser wird, als die vorhergehende Zündspannung. Bei solchen Schaltmechanismen wäre die Verwendung von Kontaktmaterial mit schlechter Wärmeleitung zweckmässig, um geringe Löschspannung zu erhalten. Zweckmässiger ist es aber, man verwendet Kupferkontakte mit guter Wärmeleitung zur Erzielung hoher Zündspannung und regelt die Kontaktgeschwindigkeit so, dass die endgültige Stromunterbrechung stets durch das Ausbleiben der Zündung des Lichtbogens erfolgt.

b) Oelschalter.

Durch Eintauchen der Schaltkontakte in Oel kann man die Entstehung eines Lichtbogens zwischen ihnen beim Ausschalten zwar nicht völlig verhindern, jedoch kühlt das Oel die Kontakte und den Bogen selbst so stark ab, dass er bei gleicher Länge wesentlich höhere Spannung als beim Brennen in Luft entwickelt. Sowohl die Löschspannung, besonders aber die Zündspannung, lässt sich durch Einbetten in Oel auf ein hohes Vielfaches der entsprechenden Spannung in Luft steigern, so dass Oelschalter vor allem geeignet sind, Wechselstromkreise hoher Spannung zu unterbrechen. Sie werden denn auch hierbei fast ausschliesslich angewandt.

Alle Einzelheiten, die wir für den Ausschaltevorgang von Luftschaltern hergeleitet haben, lassen sich ausnahmslos auf den Schaltvorgang in Oelschaltern übertragen. Es treten jedoch noch einige Erscheinungen hinzu, die für Oelschalter besonders charakteristisch sind und ihre Wirksamkeit in Frage stellen können, wenn sie nicht genügend beachtet werden. Da von der gesamten Schalterspannung nur ein gewisser Teil auf den Lichtbogen selbst entfällt, und ein anderer beträchtlicher Teil an den Fusspunkten des Lichtbogens auftritt, so pflegt man bei sehr hohen Spannungen mehrere Unterbrechungsstellen in Serie zu verwenden. Man erzielt dadurch den weiteren Vorteil einer stärkeren Kühlung des gesamten Bogens durch die Kontaktmassen, und man erhält kürzere Einzel-Lichtbögen, die sich räumlich weniger deformieren, als ein einziger sehr langer Lichtbogen und daher leichter in vorgeschriebenen Bahnen zu erhalten sind.

Die höchste Beanspruchung erleiden die Oelschalter nicht im normalen Betriebe, sondern dann, wenn sie einen Kurzschluss abschalten müssen. Vor allem können Stosskurzschlussströme verderblich wirken, da ihre Stromstärke auf ein hohes Vielfaches des Normalstromes anschnellt und die Schaltarbeit, die die Kontakte und das Oel aufnehmen müssen, nach Gleichung (58) entsprechend vergrössert. Dabei wirkt nicht nur der hohe Strom, sondern auch die durch den heisseren Lichtbogen verkleinerte Zündspannung und dadurch verlängerte Schaltdauer ungünstig auf die Schaltarbeit ein. Man pflegt deshalb die Stosskurzschlussströme nicht sofort nach ihrem Entstehen auszuschalten, sondern einige Sekunden zu warten, bis die Ausgleichströme zum grössten Teil abgeklungen sind und nur noch der Dauerkurzschlusstrom fliesst. Dadurch wird nicht nur der abzuschaltende Strom wesentlich kleiner, sondern gleichzeitig ist auch die treibende Spannung des Generators durch die Rückwirkung des Kurzschlussstromes nahezu bis auf seine Streuspannung herabgesunken, so dass das Produkt $E \cdot J$ beim Dauerkurzschlusstrom nur einen geringen Bruchteil des Wertes beim Stosskurzschlusstrom beträgt.

Zum leichteren Ausschalten versieht man Oelschalter für schwere Betriebe, in denen häufig Kurzschlüsse auftreten, mit Schutzwiderständen, die für die erste Schaltstufe als Parallelwiderstand zum Lichtbogen, für die zweite Schaltstufe als Serienwiderstand dienen und in beiden Fällen den Strom im Lichtbogen herabdrücken und die früher beschriebene günstige Wirkung auf den Unterbrechungsvorgang äussern.

Bei Oelschaltern ist es besonders erstrebenswert, mit einem Minimum an Schaltarbeit nach Gleichung (58) auszukommen, da die frei werdende Wärme eine starke Zersetzung und Verkohlung des Oeles bewirkt. Man bemüht sich daher, durch Verwendung von Schnellschaltern die Ausschaltdauer τ auf die Zeit einer halben

Periode herabzudrücken. Bei längerer Lichtbogendauer flackert der Lichtbogen durch den Auftrieb seiner heissen Gase sehr stark, die durch das Oel nach oben steigen.

Brennt der Lichtbogen nicht tief genug im Oel, so kühlen sich die Gase beim Hochsteigen nicht ausreichend ab und können die Oeloberfläche in Brand setzen. Selbst bei grosser Oelhöhe über dem Lichtbogen kann eine Explosion der Lichtbogengase, die sich über dem Oelspiegel ansammeln, erfolgen, wenn sie durch herumspritzende Metallperlen oder durch Spannungsüberschläge über dem Oelraum entzündet werden. Diese Störungen können vor allem eintreten, wenn Bauart und Abmessungen des Schalters seiner Schaltarbeit nicht entsprechen.

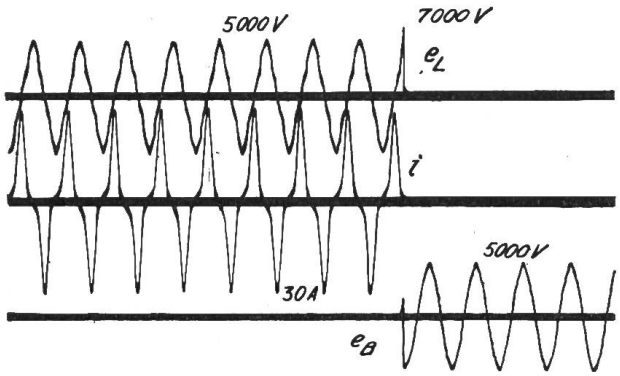

Fig. 37

Die heissen Gase, welche zum Brennen des Lichtbogens dienen, entstehen innerhalb eines Bruchteils einer Halbperiode, also bei 50periodigem Wechselstrom in viel weniger als einer hundertstel Sekunde. Die plötzliche Verdampfung und Zersetzung des Oeles wirkt daher wie eine Explosion und entwickelt einen hohen Gasdruck im Lichtbogen, der bis zu einigen hundert Atmosphären beträgt. Dieser Druck eilt als Kugelwelle im Oel nach aussen. Er vermindert sich zwar entsprechend der Zunahme der kugelförmigen Wellenfläche, jedoch kann er beim Erreichen der Wandung des Oelgefässes noch so gross sein, dass er starke Ausbauchungen oder Risse hervorruft. Beim Eintreffen an der Oeloberfläche schleudert die Druckwelle eine Oelfontäne heraus, was sich bei schwerer Beanspruchung des Schalters jede Halbperiode wiederholen kann und zu unerwünschten Nebenerscheinungen führt.

Will man die Ausschaltvorgänge in einem Kurzschluss-Lichtbogen unter Oel zahlenmässig vorausbestimmen, so darf man die auftretenden Spannungen nicht aus Versuchen mit geringen Strömen entnehmen. *Die Spannungen am Lichtbogen werden vielmehr durch den im Bogen auftretenden Druck sehr vergrössert und können daher nur durch einen wirklichen Kurzschlussversuch festgestellt werden.* Für das Ausschalten ist es günstig, dass mit zunehmendem Strom und zunehmender Schaltarbeit auch der Druck und damit die Lichtbogenspannung anwächst. Jedoch kann dieser Druck wegen der nur periodisch freiwerdenden Schaltarbeit beim Uebergang auf die nächste Halbperiode schon verschwunden sein, *so dass die Zündspannung und damit die Dauer des ganzen Ausschaltvorganges sich doch nur nach den normalen Druckverhältnissen richten.*

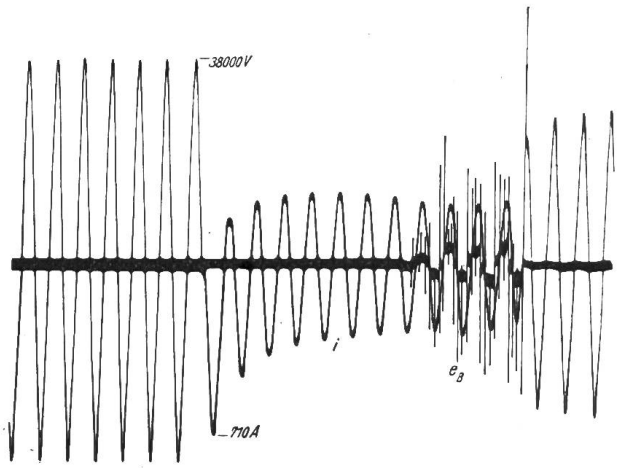

Fig. 38

Fig. 37 stellt Oszillogramme von Spannung und Strom beim Abschalten geringer Leistung durch einen Oelschalter dar. Fig. 38 gibt dagegen Oszillogramme des Einsetzens und Ausschaltens eines Kurzschlusses wieder. Während die Normallast von den Schaltern im allgemeinen innerhalb einer einzigen Halbperiode bewältigt wird, brennt der Lichtbogen beim Ausschalten von Kurzschlüssen oft während einer ganzen Reihe von Perioden.

Kurzschlusslichtbögen unter Oel zeigen oft eine eigentümliche Schwingungserscheinung der Gasblase, die den Lichtbogen bildet. Bei Uebertragung des gewaltigen Gasdruckes auf das umgebende Oel dehnt sich die heisse Lichtbogenblase aus. Ihr Druck wird dadurch geringer und wird schliesslich vom Aussendruck des Oels überwunden, das zurückflutet. Die Gasblase wird dadurch komprimiert, ihr Innendruck steigt wieder, bis er so gross geworden ist, dass er den Druck der zuströmenden Oelmassen überwindet und sie wieder nach aussen schleudert. Da Druck und Volumen der Lichtbogenblase den thermodynamischen Gasgesetzen gehorchen, so wächst der Druck mit abnehmendem Volumen rapide an. Es entstehen bei der elastischen Schwingung der Oelmasse gegen die Lichtbogengasblase starke Druckspitzen p im Innern, die in Fig. 39a abhängig von der Zeit dargestellt sind. Gleichzeitig ist auch das pendelnde Volumen v der Gasblase eingetragen. Diese elastischen Eigenschwingungen sind im allgemeinen schnell gegenüber der Wechselstromfrequenz. Ihre Schwingungsdauer ist bestimmt durch die Oelmasse im Schalter über dem Lichtbogen und durch die Grösse der Gasblase.

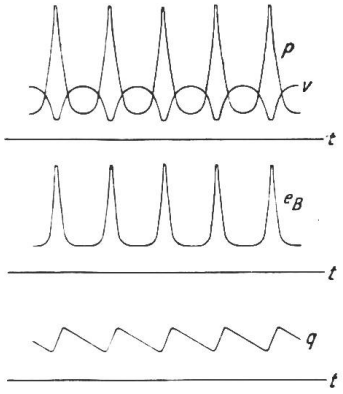

Fig. 39

Der Strom bleibt während dieser Schwingungen nahezu konstant, dagegen steigt die Lichtbogenspannung l mit zunehmendem Druck stark an, etwa so, wie es in Fig. 39b dargestellt ist. Die im Lichtbogen auftretende Wärme q ist daher nicht konstant, sondern pulsiert ebenfalls mit der Eigenschwingungsdauer des Lichtbogens. Sie steigt durch die Spannungsspitzen schnell an und fällt während der Zwischenzeit durch die Wärmeableitung nach aussen wieder ab. Wie man aus Fig. 39c erkennt, hat sie eine solche Phase, dass sie das Volumen des Lichtbogens genau in seinem Eigentakte zu vergrössern und zu verkleinern strebt. *Die mechanischen Eigenschwingungen können sich hierdurch selbst erregen und auf hohe Beträge heraufarbeiten, so dass starke Druckstösse und scharfe Spannungsspitzen im Lichtbogen entstehen.* Diese Spannungsspitzen während der Brenndauer des Kurzschlusslichtbogens sind im Oszillogramm Fig. 38 durch photographische Verstärkung herausgeholt und daher deutlich zu erkennen. Die Druckstösse können leicht zu Beschädigungen der Schaltkontakte und ihrer Antriebsorgane führen.

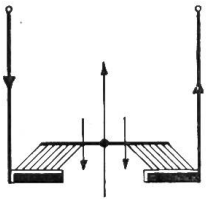
Fig. 40

Ausser den Kräften, die durch den Gasdruck im Lichtbogen und durch das Hin- und Herschleudern der Oelmassen bewirkt werden, treten bei Kurzschlüssen starke elektrodynamische Kräfte sowohl auf den Lichtbogen wie auf alle stromführenden Teile auf. Sie suchen die durch den Strom im Schalter gebildete Schleife zu vergrössern und können bei plötzlichen Kurzschlüssen so stark werden, dass sie die Schaltkontakte auseinandertrennen. Man verwendet hiergegen Anordnungen, bei denen nach dem Schema der Fig. 40 die Bewegung beim Oeffnen des Schalters entgegen den Stromkräften erfolgt. Dann pressen die Kurzschlusskräfte die Kontakte stets fest aufeinander und können kein ungewolltes Ausschalten bewirken.

Literaturverzeichnis.

L. Arons. Ann. d. Physik, Band 63, 1897, S. 177, „Extrastrom beim Unterbrechen eines elektrischen Stromkreises".

P. Girault. Industrie électrique 1898, S. 153, „Commutation dans les dynamos à courant continu".

E. Arnold und *G. Mie.* E. T. Z. 1899, S. 97, „Kurzschluss der Spulen und Kommutation des Stromes von Gleichstromankern."

H. Th. Simon. Physikalische Zeitschrift, Band 6, 1905, S. 297, „Dynamik der Lichtbogenvorgänge".

E. Philippi. Dissertation, Berlin 1909, „Ueber Ausschaltvorgänge und magnetische Funkenlöscher".
F. Marguerre. E. T. Z. 1912, S. 709, „Versuche mit Oelschaltern".
H. Th. Simon. Handwörterbuch der Naturwissenschaften, Band 6, 1912, „Lichtbogenentladung".
B. Bauer. Bulletin des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins, 1915, S. 141, „Untersuchungen an Oelschaltern".
G. Stern und *J. Biermanns.* E. T. Z. 1916, S. 617, „Oelschalterversuche".
W. Höpp. E. T. Z. 1920, S. 748, „Lichtbogenfreie Schalter für Wechselstrom".

Die Hinterrheinkraftwerke und die Energieausfuhr.

Mitgeteilt aus Kreisen der *Rhätischen Werke für Elektrizität, Thusis.*

Der vorliegende Aufsatz bringt allgemein orientierende Angaben über die projektierten Hinterrheinkraftwerke, deren Konzession in Händen der Rhätischen Werke für Elektrizität ist. Diese Projekte sehen die Schaffung von grossen künstlichen Staubecken vor, durch welche bedeutende Energiemengen im Winter verfügbar werden. An diese Angaben sind Betrachtungen über die Frage des Energieexportes angeschlossen.

L'article donne une orientation sur les concessions des „Rhätische Werke für Elektrizität" et les travaux projetés par cette société, particulièrement les réservoirs artificiels permettant de créer pour l'hiver une importante réserve d'énergie. Il termine par des considérations générales sur l'exportation de l'énergie.

Das Ausfuhrgesuch der Rhätischen Werke für Elektrizität in Thusis betr. die künftig in den projektierten Hinterrhein-Kraftwerken zu erzeugende elektrische Energie hat die Aufmerksamkeit weiter Kreise auf jenes Wirtschaftsgebiet gelenkt. Es mag deshalb eine kurze Orientierung über diese Projekte und ihre Auswertung am Platze sein, zu welchem Zwecke dem Bulletin aus Kreisen der Rhätischen Werke folgendes mitgeteilt wird:

Die Konzessionen der Rhätischen Werke für Elektrizität erstrecken sich über das Gebiet des Hinter- und Averserrheins, von der Einmündung der Albula in den Hinterrhein an aufwärts. Der nutzbare Flächeninhalt des hydrologischen Einzugsgebietes beträgt rund 550 km^2 und weist mit seinen grossen Wäldern und Gletschern einerseits eine bedeutende Retentionsfähigkeit auf, welche auch in ganz trockenen Jahren die Niederschlagsausfälle in bedeutendem Umfange zu decken vermag, während anderseits gewisse Teile des Einzugsgebietes die natürlichen Niederschläge rasch zum Abfluss gelangen lassen. Diese Eigenschaften sind namentlich im Jahre 1921 mit aller Deutlichkeit zutage getreten und durch fortlaufende Wassermessungen genau überprüft worden. Die Vereinigung beider Faktoren zu einer möglichst günstigen Gesamtwirkung wird ganz besonders vorteilhafte Ausnützungsmöglichkeiten ergeben.

An den Wasserfassungsstellen der zukünftigen Kraftwerke befinden sich seit dem Jahre 1918 mit Limnigraphen ausgerüstete Wassermesstationen von welchen heute die Ergebnisse von vier Beobachtungsjahren vorliegen. Letztere umfassen ein ziemlich niederschlagsreiches und ein ganz ausserordentlich niederschlagsarmes Jahr neben zwei Mitteljahren, so dass das Gesamtergebnis nicht nur als ein sehr sicheres, sondern auch als ein eher zu ungünstiges bewertet werden darf. Aus den bisherigen Beobachtungen ergibt sich die mittlere jährliche Abflussmenge des nutzbaren Einzugsgebietes zu ca. 800 Millionen m^3.

Die günstigen topographischen und die sicheren geologischen Verhältnisse gestatten die Anlage künstlicher Staubecken mit einem nutzbaren Gesamtinhalt von 300 Millionen m^3. Die Ausnützung des grössten Teiles der erzeugbaren Energie erfolgt in nur zwei Hauptstufen, denen zwei kleinere Zusatzwerke zur Vervollständigung beigegeben werden können. Die beiden Hauptwerke, welche bei Andeer und bei Sils im Domleschg projektiert sind, erzeugen bei vollem Ausbau zusammen jährlich 1,2 Milliarden kWh, während die Gesamterzeugung auf 1,35 Milliarden kWh