Bei der bisher allgemein gebräuchlichen Rückkopplung haben wir eine Mischung aller drei Gittererregungen mit allen daraus entstehenden Störungen (Ziehen, Springen, Oberwellen, Schwebungen).

Von den drei möglichen Gittererregungen läßt sich allein die Huthsche rein darstellen. Beim Zwischenkreis-Sender mit Huthscher Erregung muß der Gitterkreis mit einer der beiden Koppelwellen übereinstimmen.

Die beiden anderen Erregungen sind zwar unter sich, nicht aber von der Huthschen Erregung zu trennen.

Wenn man von den Modifikationen durch die Huthsche Erregung absieht, ist bei reiner Primär-Rückkopplung nur das Springen der Frequenz vorhanden, bei reiner Sekundär-Rückkopplung ist das Springen der Frequenz vermieden und nur eine der beiden Koppelschwingungen vorhanden. Durch die Einwirkung der Huthschen Erregung sind Störungen vorhanden, die bei Übereinstimmung des Gitterkreises mit einer der beiden Koppelwellen verschwinden (Kombination der Sekundär-Rückkopplung mit Huthscher Abstimmung des Gitterkreises).

Zum Schluß sei uns noch gestattet Herrn Geheimrat Wien und Herrn Prof. Rogowski für ihr förderndes Interesse und die liebenswürdige Unterstützung durch Überlassung der Mittel zu dieser Arbeit unseren besten Dank auszusprechen.

Über Ausgleichsvorgänge beim Abschalten von Induktivitäten (insbesondere vermitteltst Ölschalter).

Von

Paul Hammerschmidt, Achern.

Beim Abschalten größerer Asynchronmotoren mit offenem Läuferkreis und leerlaufender Transformatoren treten oft Überspannungen von beträchtlicher Höhe auf, die die Wicklungen gefährden. Da sich in technischen Betrieben die Durchschläge der Wicklungen in der Regel erst beim Wiedereinschalten bemerkbar machen, war man versucht, die Schuld dem Einschaltvorgange zuzuschreiben. Solange dieser funkenfrei vor sich geht, also bei entsprechend niederen Spannungen ist diese Anschauung nicht richtig. Nähere Untersuchungen zeigen vielmehr, daß die Zerstörung der Isolation bereits beim Ausschalten eintritt. Ist die Betriebsspannung jedoch so hoch, daß das Einschalten über Funkenbildung vor sich geht, so findet auch hier eine Gefährdung statt, allerdings ist die Dauer derselben infolge des kürzeren Ausgleichsvorganges entsprechend geringer. Eingehende Arbeiten über diese Fragen sind in der Literatur wenig vorhanden. Rüdénberg stellt in der ETZ. 1915, S. 159 ff. rechnerische und experimentelle Untersuchungen über „Überspannungen beim Abschalten von Asynchronmotoren“ an und ermittelt die Abhängigkeit der Unterbrechungsspannung vom Läuferwiderstand. Leider vernachlässigt er aber den Einfluß der Parallelkapazitäten der Wicklung und Zuleitung und die durch sie bedingten hochfrequenten Ausgleichsvorgänge.

Eine zweite sehr beachtenswerte Arbeit ist die Abhandlung Rogowskis im Archiv 1916 S. 345 ff. über „Kondensatoren als Schutz gegen Ausschaltüberspannungen bei Gleichstrommaschinen hoher Spannung und bei Drosselspulen“. Rogowski berechnet darin die Größe der Überspannung in Abhängigkeit von dem Verhältnis zwischen Ausschaltzeit und Schwingungszeit von Spule und Parallelkapazität. Außerdem erwähnt er zum ersten Male die Gefährlichkeit zu klein bemessener Schutzkonden-

satoren. Seine rein mathematischen Betrachtungen vermögen jedoch die durch die Ausschaltfunken bedingten Vorgänge nicht wiederzugeben.

Die physikalische Erforschung der letzteren soll das Ziel der folgenden Arbeit sein die auf Veranlassung von Prof. Dr. W. Petersen im Hochspannungslaboratorium der technischen Hochschule zu Darmstadt ausgeführt wurde. Das Hauptgewicht der Versuche wird dabei besonders auf den hochfrequenten Ausgleichsvorgang bei kleinen und kleinsten Parallelkapazitäten und auf die Verwendung von Ölschaltern gelegt.

A. Orientierende Versuche mit Gleichstrom.

Um einen Einblick in die verschiedenen Arten des Ausgleichsvorganges zu erhalten, wurden zunächst einige Versuche an einer Drosselspule mit offenem Eisenkern angeführt. Als Schalter diente ein durch einen Bajonettverschluß gehaltener Kupferkontakt, der zunächst in Quecksilber tauchte, das später durch einen

Bild 1.

Bild 2.

Gegenkontakt aus Kupfer ersetzt wurde. Durch Verstellung bzw. Austausch der Spannfeder konnte die Schaltgeschwindigkeit geändert werden. Das Auslösen des Schalters erfolgte elektromagnetisch. Strom- und Spannungskurven wurden oszillographisch aufgenommen, die dabei benutzte Schaltung ist in Bild 1 wieder gegeben. Die Daten der Versuchsspule waren:

Bild 3.

Bild 4.

Windungszahl 2060
Spule innen $\varnothing$ 60 mm
Länge 335 „

Eisenkern $\varnothing$ 60 mm
Draht blank $\varnothing$ 1,2 „
Draht isoliert $\varnothing$ 1,7 „

Je nach der Größe der gewählten Kapazität ergaben sich die verschiedensten Arten des Ausgleichsvorganges, die an Hand der Oszillogramme einer näheren Betrachtung unterzogen werden sollen. In den Bildern 2 bis 6 sind Strom- und Spannungsverlauf am Schalter bei der Unterbrechung eines Stromes von 3,5 Amp. und einer Betriebsspannung von 220 Volt dargestellt. Bild 2 wurde bei obiger Schaltung oszillographisch aufgenommen, bei 3 wurde die Schutzdrossel Dr und bei 4 außerdem noch die Kapazität C_s weggelassen. Abgesehen von geringen Spannungsunterschieden zeigen diese Aufnahmen keine wesentlichen Abweichungen. C_s und Dr haben demnach keinen nennenswerten Einfluß auf den Verlauf des Ausgleiches. Während der Stromverlauf kontinuierlich ist, zeigt die Spannungskurve starke Zackenbildung, die durch unregelmäßige Änderung des Lichtbogens bedingt ist. Diese drei Aufnahmen

wurden mit Luftschalter (Hg. gegen Cu) ausgeführt, bei 5 standen die Kontakte in Alkohol und bei 6 in Öl. Außerdem lag hier die Meßschleife nicht am Schalter, sondern an der zu untersuchenden Induktivität. Unter Öl treten wesentlich höhere Überspannungen auf, die bei Verwendung von zwei Kupferelektroden noch weiter erhöht werden, wie Bild 7 zeigt.

In Bild 8 liegt ein Fall rein schwingender Unterbrechung vor. Parallel zur Spule lag hierbei eine Kapazität von 10 MF., während Schutzkapazität C_s und Drossel D_r fehlten. Die Lösung der Kontakte erfolgte völlig funkenfrei in Luft. An der Spule lag eine Spannung von 36 Volt, der Strom betrug 4,5 Amp.

Die bisherigen Versuche stellen die beiden Grenzfälle des rein aperiodischen und des rein schwingenden Ausgleiches dar und bieten nichts Neues.

Bild 5.

Bild 6.

Bild 7.

Um nun in den für die Praxis weit wichtigeren Bereich zwischen diesen Grenzen zu kommen, wurde die Parallelkapazität sprunghaft verkleinert und außerdem die Betriebsspannung auf 220 Volt erhöht. Bei einer Kapazität von $C_n = 1 \cdot 10^{-6}$ Fd und einem Ausschaltstrom von 5 Ampere ergab sich der Verlauf nach Bild 9. Aus dem

Bild 8.

Bild 9.

Bild 10.

Strombild ist bereits die Neigung zum Schwingen vor der endgültigen Unterbrechung zu erkennen. Wurde die Kapazität C_n noch weiter verringert, so traten kräftige Funkenentladungen auf, die aus den Bildern 10 und 11 bei $C_n = 0,4 \cdot 10^{-6}$ Fd bzw. $0,5 \cdot 10^{-6}$ Fd deutlich zu ersehen sind. Bei letzterem ist die Funkenfolge bereits so groß, daß die Schleifen nicht mehr zu folgen vermögen. Die Kurven geben in diesem Falle kein Maß für die Höhe der Spannungen. Während bei Bild 10 die Kondensatorentladung über den Funken aperiodisch zu erfolgen scheint, treten bei 11 sehr wahrscheinlich hochfrequente Oszillationen auf. Genauere Angaben können leider nicht gegeben werden, da während dieser Versuche letztere noch nicht klar erkannt waren und daher andere Nachweismittel nicht angewandt wurden. Strom und Spannung konnten in sehr großen Grenzen verändert werden, ohne daß sich die Erscheinungen wesentlich

änderten. Ebenso zeigten beide Oszillogramme, die aus einer größeren Versuchsreihe herausgegriffen sind, daß sich bei verschiedenen Schalterarten dieselben Vorgänge erzielen lassen. In 11 scheinen beträchtliche Überströme aufgetreten zu sein, die das Bild zum Verschwinden brachten.

Bild 11.

Bild 12.

Sehr gut ist das wiederholte Löschen und Zünden des Ausschaltlichtbogens aus Bild 12 und 13 zu erkennen. Besonders letzteres zeigt deutlich die Neigung des abzuschaltenden Kreises zum Schwingen.

Außer diesen rein orientierenden Versuchen wurde noch mit derselben Induktivität und einem Schalter mit Kupferelektroden in Öl eine Versuchsreihe bei einer

Bild 13.

Bild 14.

Betriebsspannung von 240 Volt und einer gleichbleibenden Stromstärke von 4 Ampere ausgeführt. Es sollte dabei einerseits gezeigt werden, bei welchen Größen der Parallelkapazität die verschiedenen Formen des Ausgleiches eintreten, und andererseits, wie groß die dabei auftretenden Höchstwerte der Spannung an der Induktivität sein würden. Aus 20 aufgenommenen Oszillogrammen ergab sich folgendes:

Bild 15.

Bild 16.

Parallelkapazität C_n in 10^{-6} Fd	Spulenüberspannung Betriebsspannung	Art des Ausgleiches
$0 \div \sim 0,4$	$2,2 \div 8,0$	rein aperiodisch Bild 14
$0,4 \div 0,8$	nicht feststellbar	teils aperiodisch, teils Funken- bzw. Lichtbogenentladungen, Bild 15—17
$0,8 \div 2,0$	$7,5 \div 8,0$	meist einzelne Funkenentladungen, Bild 18
$3,0 \div 8,0$	$6 \div 5$	gemischt aperiodisch-periodisch teils noch Funkenentladungen
> 10	< 5	meist reine Oszillation

Die Spulenspannung betrug dabei 30 Volt. Einige der bemerkenswertesten Oszillogramme sind in Bild 14 bis 18 wiedergegeben.

Bild 17.

Bild 18.

Einige weitere Versuche wurden bis zu einer Stromstärke von 10 Amp. durchgeführt und zeigten, daß die Häufigkeit von Funkenentladungen sich noch vermehrte und auf einen weiteren Bereich der Parallelkapazität erstreckte. Da der Schalter für diese Stromstärken zu klein war und der Oszillograph als Beweismittel versagte, wurden diese Versuche zunächst unterbrochen.

Die Tatsache des natürlichen Schutzes durch den Ausschaltlichtbogen legte die Frage nahe, in welcher Abhängigkeit vom Strome die Ausschaltspannung unter sonst gleichen Verhältnissen stehen würde. Maßgebend für die Höhe der Spannung ist nach der bekannten Gleichung $v_L = L \cdot \frac{di}{dt}$ die Änderungsgeschwindigkeit des Stromes

Bild 19.

Bild 20.

$\frac{di}{dt}$, sofern L eine Konstante ist, was nur für eisenlose Spulen zutrifft. Für Spulen mit Eisenkern ist auch die Änderung von L , also $\frac{d(L \cdot i)}{dt}$ in Betracht zu ziehen. Da aber die Stromänderung durch die Widerstandsänderung im Lichtbogen gesteuert wird, ist die mathematische Behandlung der Aufgabe äußerst erschwert. Es wurde daher durch den Versuch die Gesetzmäßigkeit des Spannungsverlaufs bei einigen Spulen unter Verwendung verschiedener Schalter festgestellt. Eine der

Versuchsreihen sei hier wiedergegeben. Die Daten der als Induktivität benutzten Drosselspule waren folgende: Windungszahl 2622, Drahtdurchmesser blank 3 mm, Widerstand kalt $2,13 \Omega$. Als Schalter diente ein Luftschalter mit Kupferelektroden, magnetischer Auslösung, einer Schaltgeschwindigkeit von im Mittel 2,4 m/sec und im Maximum 3,65 m/sec. bei einfacher Unterbrechung. Das Schaltbild blieb unverändert. Um einen absoluten Vergleich für die Ausschaltspannung zu haben wurde diese mit dem Oszillographen gemessen. Außerdem wurde die Spule ohne jede Parallelkapazität verwendet. In Bild 19 sind die dabei erzielten Versuchsergebnisse graphisch dargestellt. Die Betriebsspannung betrug 268 Volt. Wie die Kurve zeigt, ergibt sich für 10 Ampere ein Höchstwert der Spannung, die bei der doppelten Stromstärke bereits auf den halben Betrag herabsinkt.

Auch die Ausschaltzeit wurde oszillographisch aufgenommen und zeichnerisch eingetragen. Man ersieht daraus, daß sie im Geltungsbereich des Versuches mit dem Strome stetig wächst.

Bei Verwendung eines Ölschalters ergeben sich bis zu den erreichbaren Stromstärken von 40 Amp. steigende Werte für die Ausschaltspannung, die bei gleichen Strömen die obigen Werte wesentlich übertreffen. Da bei der vorhandenen Spule größere Stromstärken nicht benutzt werden konnten und andere Drosseln nicht zugänglich waren, wurden die Versuche abgebrochen. Aus den obigen Versuchsreihen wurden noch die sich für die verschiedenen Ausschaltstromstärken ergebenden statischen Lichtbogencharakteristiken abgeleitet. Sie sind in Bild 20 wiedergegeben und bestätigen die Vermutung, daß mit wachsender Stromstärke die Kennlinien immer flacher werden, womit bekanntlich auch die Schwingungsfähigkeit des Lichtbogens abnimmt.

B. Versuche im Bereiche des hochfrequenten Ausgleiches.

a) Mit Gleichstrom.

Bevor eine neue Versuchsanordnung getroffen wurde, wurden nochmals einige orientierende Versuche mit der obigen Drossel ausgeführt. Es zeigte sich, daß bei Verwendung eines Luftschalters auch bei kleinen Kapazitäten keine Funkenentladungen stattfanden. Wurden jedoch bei $C_n = (0,5 \div 1,5) \cdot 10^{-6}$ Fd die Schalterkontakte leicht geölt, so waren Ausgleicherscheinungen dieser Art stets festzustellen, die Überspannungen bis über 5000 Volt_{eff.} bei einer Betriebsspannung von 268 Volt zur Folge hatten. Das Ausschalten erfolgte dabei stets unter lautem Knall, dem Kennzeichen des aktiven Funkens. Versuche, die Vorgänge oszillographisch festzuhalten, mißglückten, da die Aufnahmen während des kritischen Augenblickes auf etwa 1 cm Bildbreite, entsprechend einer Zeit von $\frac{1}{300}$ Sekunde lediglich ein leeres Feld zeigten, nach welchem die niederfrequente Oszillation aber immer noch mit beträchtlicher Spannung erfolgte. Diese Erscheinungen traten bei Stromstärken bis zu etwa 10 Amp. regelmäßig auf, darüber hinaus wurden hochfrequente Schwingungen seltener und verschwanden bei etwa 20 Amp. Gleichzeitig nahm die Überspannung stark ab. Bei ganz unter Öl stehenden Kontakten traten Zündungen nur bei Stromstärken bis etwa 6 Amp. und bei $C_n = 0,5$ bis $1 \cdot 10^{-6}$ Fd auf. Es wurden jedoch hierüber nur wenige, rohe Versuche angestellt, die nicht als maßgebend bezeichnet werden können.

Mit der bisher benutzten Spule und den niederen Spannungen waren brauchbare Resultate nicht zu erreichen, denn einerseits versagte im kritischen Augenblick der Oszillograph und andererseits waren die auftretenden Überspannungen mit der Funkenstrecke nur in wenigen Fällen meßbar. Letztere stellte schließlich das einzige Nachweismittel für Unterbrechungsspannungen dar. Das Streben ging also dahin, mit durch die Funkenstrecke meßbaren Spannungen zu arbeiten. Gleichzeitig sollten die Verhältnisse den Forderungen der Praxis, wie sie beim Ausschalten von Asynchronmotoren und Transformatoren vorliegen, näher gebracht werden.

Diesen Überlegungen gemäß wurde für die weiteren Untersuchungen die Oberspannungsseite eines 3000 Volt, 1,8 KVA-Manteltransformators als Induktivität benutzt. Sein Eisenquerschnitt betrug $7,8 \cdot 18,8 = \sim 148 \text{ cm}^2$ mit und 132 cm^2 ohne Isolation, der mittlere Kraftlinienweg in Eisen $4 \cdot 121 = 48,4 \text{ cm}$ und die sekundäre Windungszahl 1900. Um bei den späteren Wechselstromversuchen und der zulässigen Spannung genügend hohe Stromstärken und größere Kraftflußänderungen zu bekommen, wurde ein Luftspalt von insgesamt 5 mm eingestellt. Das Schalten erfolgte zunächst von Hand, und zwar vermitteltst Ölschalter mit Kupferkontakten.

Bild 21.

Bild 22.

Die angewandte Schaltung ist in Bild 21 wiedergegeben. C_s wurde gegen C_n groß gewählt, so daß die höchste Spannung am Transformator auftreten mußte.

Durch Vorversuche wurde der Kapazitätsbereich ermittelt, in dem die höchsten Unterbrechungsspannungen erfolgten. Dann wurde für zwei verschiedene Kapazitäten dieser Größenordnung die Abhängigkeit der Ausschaltüberspannung vom Strome ermittelt. Trotzdem von Hand geschaltet wurde, die Schaltgeschwindigkeit also nie

Bild 23.

gleichmäßig war, ergaben sich sehr konstante Werte, die in Bild 22 zeichnerisch dargestellt sind. Wie die Kurven zeigen, steigt die Spannung mit zunehmender Stromstärke an, jedoch nicht proportional, sondern nach einer Exponentialfunktion. Über 5 Amp. konnte der Strom nicht gesteigert werden. Da aber bereits bei diesem Wert eine Induktion von rund 14500 Gauß vorhanden war, hätte bei noch höherem Strome die Überspannung schon wegen der Eisensättigung wohl bald eine Grenze erreicht.

Eine weitere Messung erstreckte sich auf die Prüfung der Abhängigkeit der Unterbrechungsüberspannung von der Parallelkapazität bei gleichbleibender Stromstärke. Hier zeigten sich insofern Unregelmäßigkeiten, als bei kleineren Kapazitäten die Häufigkeit der Überschläge an der Meßfunkenstrecke geringer wurde. Als Ursache ergab sich mangelhafte Isolation des Regelwiderstandes gegen Erde, so daß eine Ableitung der hochfrequenten Ströme stattfand, und zwar derart, daß Funken zwischen Widerstand und Erde übersprangen. Bild 23 stellt die Meßergebnisse dar. Das Messen der Spannung allein konnte keine weitere Aufklärung über die Art des Energieaustausches geben. Daher sollte abermals der Vorgang durch den Oszillographen festgehalten werden. Strom- und Spannungsverlauf ohne zusätzliche Parallelkapazität zeigt Bild 24. Der Bogen brennt hier während rund $\frac{3}{100}$ Sekunde sehr ruhig und reißt dann plötzlich ab, wodurch die Spannung am Transformator zu einem Höchstwerte von 5500 Volt emporschnellt.

Bild 24.

Bild 25.

Hierauf wurden einige Aufnahmen mit $C_n = 0,08 \cdot 10^{-6}$ Fd gemacht, von denen eine in Bild 25 wiedergegeben ist. Während mit dem Abreißen des Lichtbogens das Bild der Stromschleife etwa 0,003 Sekunden lang verschwindet, zeigt die Spannungskurve in dieser Zeit nur ein sehr verschwommenes Bild, aus dem nur zu ersehen ist, daß mit dem ersten Löschen des Bogens Schwingungen von sehr hoher Frequenz auftreten, nach deren Verlauf noch einzelne, vielleicht aperiodische Funkenentladungen folgen, bis schließlich nach endgültiger Unterbrechung die noch vorhandene Kondensatorspannung sich über den Transformator ausgleicht. Ein Maß für die Höhe der

Bild 26.

Spannung vermag das Oszillogramm auch hier nicht zu geben. Die Schwingungen des Schalterstromes konnten außerdem noch am Stromzeiger beobachtet werden, der beim Ausschalten zunächst wachsende Werte zeigte. Diese Erscheinung war bei früheren Versuchen nicht zu bemerken, da dort ein Drehspulinstrument verwendet worden war, das hier durch einen Hitzdraht-Strommesser ersetzt wurde. Auch bei diesen Versuchen traten an dem inzwischen ausgewechselten Widerstand, der auf Porzellanrohr gewickelt war, Überschläge zwischen den Windungen auf. Desgleichen erfolgten Überschläge zwischen Batteriezuleitung und Erde.

Da kein Zweifel mehr bestand, daß hochfrequente Schwingungen die eigentlichen Überspannungserreger waren, wurde die bisherige Schaltung nach Bild 26 abgeändert. Das Entstehen derartiger Schwingungen war nur in dem Kreise F, H, E, D möglich, der aus der Reihenschaltung von C_n , C_s , der Leitungsinduktivität L_n und dem Lichtbogen gebildet wurde. Um die Schwingungen in ungeschwächter

Form zu erhalten, wurde der Regelwiderstand R vor den Kondensator C_n gelegt. Der übrige Teil der Schaltung wurde peinlich isoliert und die Zuleitung noch durch Erden des Punktes E geschützt. Zum Schalter wurde der bereits erwähnte Ölschalter mit magnetischer Auslösung verwendet. Das Ziel der nächsten Untersuchung war nun, festzustellen, ob die aus den Oszillogrammen und den früheren Beobachtungen gewonnene Anschauung die richtige war.

In die Leitung $E-H$ wurde zu diesem Zweck eine kleine Spule mit $L_z = 0,195 \cdot 10^{-3}$ Henry gelegt. Die an dieser gemessene Spannung betrug je nach der Größe von C_n beim Ausschalten $6000 \div 8000$ Volt, Werte, die nur durch hochfrequente Schwingungen erreicht werden konnten. Weiterhin wurde mit L_z ein Wellenmesser gekoppelt und abzustimmen versucht. Das als Wellenanzeiger benutzte Heliumröhrchen sprach jedoch auf einen sehr breiten Bereich an. Es schien zunächst, als ob jeder Schwingungskreis angestoßen würde, doch ergaben weitere Messungen mit einem empfindlicheren Heliumröhrchen und ganz loser Kopplung genügend scharfe Abstimmung. Ganz einwandfrei konnte bei festgehaltenem Lichtbogen abgeglichen werden. Die Abstimmung änderte sich mit zunehmender Lichtbogenlänge nur unbedeutend.

Bild 27.

Bild 28.

Bild 29.

$$C_n = a \cdot 10^{-9} \text{ Fd}$$

$$C_n = b \cdot 10^{-9} \text{ Fd}$$

Um auch den Einfluß der Zahl der Unterbrechungsstellen bei verschiedenen Parallelkapazitäten festzustellen, wurden die in Bild 27 bis 29 wiedergegebenen Kurven aufgenommen. Die Messungen gestalteten sich sehr langwierig, da gerade bei kleinen Kapazitäten Unregelmäßigkeiten eintreten und infolge sehr starker Verrußung des Schalteröles die Versuche mehrfach unterbrochen und wiederholt werden mußten. Außerhalb der allen Kurven charakteristischen Spitze blieben jedoch die Werte hinreichend konstant. Letztere ist auf Resonanz der Schwingung des Kreises F, H, E, D mit einer Eigenschwingung des Transformators zurückzuführen. Daß deren Lage sich mit der Zahl der Unterbrechungen ändert, muß wohl darauf zurückgeführt werden, daß das Abreißen des Lichtbogens bei verschiedenen Stromstärken erfolgt. Da aber die wirksame Induktivität der Wicklung von dem jeweiligen quasistationären Magnetisierungszustand des Eisenkernes abhängt, muß L sich mit der Stromstärke ändern.

Drei weitere Beobachtungsreihen, die in Bild 30 zusammengestellt sind, veranschaulichen die Abhängigkeit der Unterbrechungsüberspannung von der Stromstärke bei gleichbleibender Kapazität. Die Schaltgeschwindigkeit war dieselbe wie auf Seite 3. Als Parallelkapazität wurde jeweils die gewählt, bei der in den obigen Versuchen der Höchstwert der Spannung aufgetreten war. Über 5 bzw.

4 Amp. konnte die Stromstärke nicht gesteigert werden, da bei diesen Werten bereits Überschlüge zwischen den Wicklungshälften des Transformators erfolgten. Gegenüber den Versuchen mit Handschaltung auf Seite 4 ergaben sich hier wesentlich höhere Spannungswerte, die hauptsächlich durch die kleineren Kapazitäten und erst in zweiter Linie durch die erhöhte Schaltgeschwindigkeit bedingt sind.

Bild 30.

Den Einfluß der Vergrößerung der Induktivität des Kreises F, H, E, D auf die Ausschaltspannung für $C_n = 0,005 \cdot 10^{-6}$ Fd und $i = 4$ Amp. zeigt Bild 31. Auch sie ergibt den typischen Verlauf der Resonanzkurven und bestätigt die frühere Behauptung.

Bild 31.

Um einen Einblick in den Verlauf der Schwingungen zu erhalten, wurde schließlich zu dem aus der Hochfrequenztechnik hinreichend bekannten Schwingungsprüfer, einem umlaufenden Heliumröhrchen, gegriffen. Dieses besaß kapazitive Kopplung und wurde mit einer Spule verbunden, die durch die Induktivität L_z (Bild 20) induziert wurde. Bei verschiedenen C_n wurden nunmehr die Schwingungsbilder beobachtet, die völlige Übereinstimmung mit den bisherigen Vermutungen ergaben. Da Vorversuche zeigten, daß die Art der Schwingung durch die Zahl der Unterbrechungen nicht wesentlich beeinflusst wurde, so erfolgte das Schalten

Bild 32.

Bild 33.

nur doppelpolig mit zweifacher Unterbrechung. Als zweckmäßigste Parallelkapazitäten wurden $C_n = 0,0012 \cdot 10^{-6}$ Fd bzw. $= 0,04 \cdot 10^{-6}$ Fd gewählt. Die Schwingungsbilder wurden photographisch festgehalten und sind in Bild 32 und 33 wiedergegeben.

Aus ihnen ist leicht zu ersehen, daß bei $C_n = 0,0012 \cdot 10^{-6}$ Fd Lichtbogen-schwingungen oder Funkenentladungen von außerordentlich-schneller Funkenfolge auftreten, während bei $C_n = 0,04 \cdot 10^{-6}$ Fd Funkenentladungen von wesentlich langsamerer Funkenfolge vorkommen. Der Schalter wurde dabei selbsttätig ausgelöst. Wurde von Hand geschaltet, so ergaben sich entsprechend längere Bildstreifen, aber von geringerer Intensität. Bei einer Kapazität von $0,0012 \cdot 10^{-6}$ Fd

konnte der Lichtbogen bei festgehaltenem Schalter zum Stehen gebracht werden. Je nach der Größe des Elektrodenabstandes ergaben sich dabei die verschiedenen aus der Hochfrequenztechnik bekannten Bilder für Lichtbogen- bzw. gedämpfte Schwingungen. Für $C_n = 0,01 \cdot 10^{-6}$ Fd begann das Schwingungsbild mit einem Streifen wie bei $C_n = 0,0012 \cdot 10^{-6}$ Fd und endigte in einem ähnlichen Funkenbild wie bei $0,04 \cdot 10^{-6}$ Fd.

Bei größeren Kapazitäten konnten Dauerschwingungen nicht erhalten werden, da die Löschwirkung der Kapazität zu groß war.

Während dieser Versuche wurden nochmals genauere Wellenlängenmessungen angestellt, die eine hinreichend scharfe Abstimmung ergaben. Die dabei gemessenen Werte sind folgende:

Gesamtkapazität des Schwingungskreises	$C_g = 9200$ cm	34 100 cm
Induktivität	$L_n = 0,0148 \cdot 10^6$ cm	$0,0148 \cdot 10^6$ cm
Gemessene Wellenlänge	$\lambda = \sim 750$ m	1450 m
Berechnete	$\lambda = 735$ m	1415 m

Zwischen gemessenen und berechneten Werten ergibt sich demnach eine gute Übereinstimmung.

b) Versuche mit Wechselstrom.

Die mit Gleichstrom gewonnenen Ergebnisse wurden auch mit Wechselstrom nachgeprüft. Abgesehen von der Stromquelle blieb die Schaltung unverändert. Als normale Betriebsspannung wurde ~ 3000 Volt gewählt. Dabei ergab sich eine effektive Stromstärke von 1,91 Amp. Eine den früheren Gleichstromversuchen

Bild 34.

Bild 35.

entsprechende Stromstärke von $\frac{4}{\sqrt{2}} = 2,83$ Amp. konnte bei dem eingestellten Luft-

spalt nicht erreicht werden. Aber auch bei 1,91 Amp. gelangen die Versuche so gut, daß es nicht nötig war, höhere Stromstärken heranzuziehen. Es zeigte sich vielmehr, daß trotzdem die Erscheinungen deutlicher zutage treten als bei Gleichstrom. Der Grund hierfür ist in der beträchtlich höheren Wechselfspannung zu suchen, die den Lichtbogen besser zu unterhalten vermag, als die verhältnismäßig kleine Gleichspannung. Auch die Intensität der Schwingungen war gegenüber Gleichstrom größer.

Zunächst wurde nun wieder festgestellt, wie sich die Ausschaltüberspannung in Abhängigkeit von der Größe der Parallelkapazität verhält. Die in Bild 34 und 35 wiedergegebenen Meßergebnisse zeigen den Gleichstrombildern ähnliche Formen.

Als Neuerscheinung tritt hier die Bildung eines zweiten Maximums hinzu, dessen Lage in beiden Fällen allerdings sehr verschieden ist, während die Spannung die gleiche Höhe erreicht. Auffallend ist die gute Übereinstimmung der Höchstspannungen bei Gleich- und Wechselstrom. Aus dem Bild 30 ergibt sich für einen Ausschaltstrom von $1,91 \cdot \sqrt{2} = 2,7$ Amp. im ersten Fall 10 KV, im zweiten ~ 13 KV

Bild 36.

Bild 37.

Bild 38.

Bild 39.

Bild 40.

Bild 41.

Bild 42.

Bild 43.

Bild 44.

gegenüber 10 und 12,3 KV bei Wechselstrom, ebenso liegen dieselben bei den nahezu gleichen Kapazitätswerten.

Versuche über den Einfluß der Größe der Leitungsinduktivität auf die Höhe der Überspannung ergaben dasselbe Bild wie bei Gleichstrombetrieb.

Auch hier wurden Oszillogramme und Schwingungsbilder aufgenommen. Erstere sind zum Teil in den Bildern 36 bis 40 wiedergegeben. Die Spannungsschleife lag über einem Spannungswandler mit einem Übersetzungsverhältnis 15000/110 und einem Vorschaltwiderstand von 2000 Ω am Transformator. Auf die Aufnahme der Stromkurve mußte verzichtet werden, da sich bei gleichzeitiger Verwendung beider Schleifen Isolationsschwierigkeiten ergaben. Unter Verwendung eines Stromwandlers mit Widerstandsüberbrückung wären diese zwar behoben, der Nachweis der Schwingungen aber auch nichtig gewesen.

Bild 36, das bei $C_n = 0$ aufgenommen wurde, verläuft aperiodisch und zeigt zum Schlusse ein kurzes oscillatorisches Ausklingen der Energie. Daß auch hier bereits hochfrequente Schwingungen auftreten können, zeigte mehrmals der Schwingungsprüfer. Doch ist die Zeitdauer derselben außerordentlich kurz. Auf den Oszillographen können sie kaum einwirken, da sie einen bequemeren Weg über die Eigenkapazität des Spannungswandlers finden. Trotzdem läßt sich ihr Vorhandensein an den feinen Zacken der Spannungskurven erkennen. Bild 37 und 38 zeigen den Ausgleichsvorgang bei $C_n = 0,001 \cdot 10^{-6}$ Fd. Im ersteren fehlt scheinbar die Lichtbogenschwingung, die sich im zweiten leicht erkennen läßt. Noch deutlicher sind sie aus Bild 39 und 40 bei $C_n = 0,01 \cdot 10^{-6}$ Fd zu ersehen.

Bild 45.

Bild 47.

Bild 46.

Bild 48.

Bild 49.

Die Bilder 41 bis 44 zeigen die Spannungskurven des Transformators bei in verschiedenen Stellungen festgehaltenem Schalter und einer Parallelkapazität von $C_n = 0,03 \cdot 10^{-6}$ Fd. Bei einer Betriebsstromstärke von 1,97 Amp. ergaben sich dabei Ausgleichsströme von $\sim 3, 5, 7$ und 11 Amp.

In den Bildern 45 bis 49 sind einige Schwingungsbilder bei verschiedenen Kapazitäten und Schaltgeschwindigkeiten wiedergegeben.

Bild 45 stellt den Vorgang bei konzentrischer Kapazität $C_n = \sim 0,01 \cdot 10^{-6}$ Fd, Bild 46 bei $C_n = \sim 0,03 \cdot 10^{-6}$ Fd und einer mittleren Schaltgeschwindigkeit von

2,4 m/sec dar, während Bild 47 bei $C_n = \sim 0,01 \cdot 10^{-6}$ Fd und Bild 48 bei $C_n = 0,0012 \cdot 10^{-6}$ Fd, und zwar mit festgehaltenem Schalter und lang ausgezogenem Lichtbogen aufgenommen wurden. Das in 45 und 46 auftretende Aufblitzen des Röhrchens rührt von Überschlügen der Koppelkondensatoren her.

Um die Wirkung von verteilter Kapazität und Induktivität zwischen Schalter und Transformator kennen zu lernen, wurde bei Bild 48 an Stelle des Kondensators eine Freileitung von $2 \cdot 181,7$ m Länge gelegt. Die mit der Brücke gemessenen Werte der statischen Kapazität und Induktivität betragen $C_n = 0,82 \cdot 10^{-11}$ Fd und $L_n = 0,49 \cdot 10^{-3}$ Hy. Wie das Bild zeigt, ergaben sich reine Lichtbogenschwingungen. Am Wellenmesser konnte auf 3 Wellen abgestimmt werden. Es ergab sich $\lambda_1 \sim 800 \div 860$ m; $\lambda_2 \sim 275 \div 285$ m und $\lambda_3 = 165 \div 180$ m. Dabei zeigte das zur Abstimmung benutzte Hitzdrahtinstrument bei gleicher Kopplung Ausschläge im Verhältnis von 0,3:0,09:0,02. Der Wellenmesser läßt sich also hier gleichzeitig als Kurvenanalysator benutzen. Genauere Messungen wurden jedoch nicht angestellt. Auf der Freileitung ergibt sich nichtstationäre Strom- und Spannungsverteilung, und zwar derart, daß der Spannungsknoten im Schalter und der Spannungsbauch am Transformator liegt. Die Spannungsverteilung auf der Wick-

Bild 50.

Bild 51.

Bild 52.

lung des letzteren ist natürlich ebenfalls nichtstationär. Da während der Versuche häufiger Überschlüge zwischen den beiden Wicklungshälften des Transformators erfolgten, und zwar auf eine Entfernung von 1 bis 1,5 cm in Luft, so läßt sich daraus entnehmen, daß die Höchstspannungen innerhalb der Wicklungshälften, aber nicht an den Klemmen auftraten. Eingehendere Versuche konnten wegen der Unzugänglichkeit der Windungen nicht angestellt werden. Ein angenähertes Bild im Resonanzfall und bei reinen sinus-Spannungen mag Bild 50 geben, das durch Über-einanderlagerung der freien und erzwungenen Schwingung, die der Transformator stets ausführt, erhalten wird.

Für die Spannungsverteilung auf der Freileitung läßt sich mit Hilfe der obigen Messung ein genaueres Bild entwerfen, das in Bild 51 wiedergegeben ist. Da die errechnete Wellenlänge einen Wert von $\lambda = 1195$ m ergibt, so beträgt der aus der Hochfrequenztechnik bekannte „Formfaktor“ der Leitung $f = \frac{855}{1195} = 0,715$. Im

Falle sinusförmiger Verteilung ist $f = \frac{2}{\pi} = 0,636$, dementsprechend muß im vorliegenden Falle die Verteilung nach einer stumpfen Kurve erfolgen.

Bei konzentrierten Kapazitäten und Induktivitäten vorgenommene Wellenlängenmessungen ergaben gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten.

Auch die beim Einschalten auftretenden Schwingungsbilder wurden dauernd beobachtet. Sie waren von wesentlich kürzerer Dauer als die beim Öffnen des Schalters, ebenso waren die Überspannungen geringer.

Mathematisch-physikalische Betrachtungen über die Versuchsergebnisse.**a) Aperiodischer Ausgleich.**

Wie die Versuche zeigen, findet in keinem Falle ein plötzliches, d. h. zeitloses Verschwinden des Stromes statt. Es ergibt sich vielmehr, daß je nach der Größe der Eigenkapazität und des Widerstandes des abzuschaltenden induktiven Kreises der Energieausgleich in verschiedenen Formen erfolgt.

Vollzieht sich die Zustandsänderung rein aperiodisch und ist das Zeitgesetz der Stromänderung bekannt, so läßt sich der Augenblickswert der Spannung an den Spulenenden leicht aus dem vereinfachten Energiegesetz ableiten. Aus diesem erhält man für den Stromkreis in Bild 52 bei Vernachlässigung der Wärmeverluste in der Spule und an der Unterbrechungsstelle, und wenn L deren Induktivität, C die Eigenkapazität, v_L die Klemmenspannung und i den Strom bezeichnen, durch Differentiation die Gleichung:

$$C \cdot v_L \cdot dv_L = L \cdot i_L \cdot di_L. \quad (1)$$

Da außerdem zwischen den in der Zeit dt umgesetzten Elektrizitätsmengen Gleichgewicht bestehen muß, ist

Bild 53.

Bild 54.

$$i_L dt = C \cdot dv_L, \quad (2)$$

und infolgedessen

$$v_L = L \cdot \frac{di_L}{dt}. \quad (3)$$

Ist e der Augenblickswert der dem Kreise aufgedrückten EMK, so herrscht am Schalter die Spannung:

$$v_u = e - L \cdot \frac{di_L}{dt}. \quad (4)$$

Der allgemeine Verlauf der rein nichtschwingenden Unterbrechung bei Gleich- und Wechselstrom ist in Bild 53 und 54 dargestellt. Bei dem Wechselstrombild ist dabei willkürlich angenommen, daß sich der Ausschaltvorgang in 3 Halbperioden abspielt.

b) Schwingender Ausgleich.**α) Reine nieder- oder mittelfrequente Oszillation.**

Ist die Kapazität des abzuschaltenden induktiven Gebildes nicht vernachlässigbar, so wird stets, wenn es die Dämpfung des Kreises gestattet, ein schwingender Ausgleich der freiwerdenden magnetischen Feldenergie erfolgen. Die Art und Frequenz der Unterbrechungsschwingung wird in ausschlaggebender Weise durch die Größe der Kapazität und ihre Lage zur Schaltstelle bestimmt. Dementsprechend lassen sich zwei Hauptfälle unterscheiden, die durch die Schaltbilder 55 und 56 wiedergegeben sind.

Am einfachsten liegen die Verhältnisse in Bild 55. Je nach der Größe der Kapazität C_n wird das Ausschalten rein oszillatorisch verlaufen oder aperiodisch beginnen und in einer Schwingung enden. Auch die Höhe der Überspannung wird durch die Größe von C_n gesteuert. Zur genauen rechnerischen Ermittlung der Vorgänge müßte das Gesetz der Widerstandsänderung in der Unterbrechungsstelle bekannt sein. In verschiedenen Abhandlungen über ähnliche Vorgänge hat man ein ideales Zeitgesetz aufgestellt, das zwar dem Anfangs- und Endzustand Genüge leistet, den Verlauf zwischen diesen Zeiten aber nicht wiederzugeben vermag. Da die Zustandsänderungen im Schalter von vielen äußeren Einflüssen abhängen, die sich schwer gesetzmäßig fassen lassen, so soll von dieser Art der Behandlung abgesehen und der Unterbrechungswiderstand R_u zeitweilig als konstant angenommen werden. Es interessiert hier in erster Linie die Frage, bei welcher Größe von R_u das Gebilde aus L , R und C_n überhaupt schwingungsfähig wird. Kennt man erst diesen Wert von R_u , dann läßt sich einigermaßen schätzen, ob und in welcher Größenordnung Überspannungen zu erwarten sind.

Bild 55.

Bild 56.

Es sei L die gesamte Induktivität, R der Verlustwiderstand und C_n die konzentriert gedachte Nebenschlußkapazität der Spule und Leitung. Ferner seien i , v und e die Augenblickswerte des Stromes, der Spannung und der EMK.

Dann gelten nach den beiden Kirchhoffschen Gesetzen für den in Bild 55 dargestellten Ersatzkreis die Gleichungen:

$$i = i_L + i_c, \quad (5)$$

$$e = v_L + v_R + v_u, \quad (6)$$

$$e = v_C + v_u \quad (7)$$

Bei Gleichstrombetrieb ist e eine Konstante, andernfalls ist $e = F(t)$. Führt man für die verschiedenen Spannungen die bekannten Gleichungen:

$$v_L = L \cdot \frac{di_L}{dt}$$

$$v_R = R i_L$$

$$v_u = R_u \cdot i$$

und
$$v_C = \frac{1}{C_n} \int i_c dt$$

ein und differenziert Gleichung (7), so erhält man die beiden Differentialgleichungen

$$e = L \cdot \frac{di_L}{dt} + R i_L + R_u \cdot i \quad (8)$$

und
$$\frac{de}{dt} = R_u \cdot \frac{di}{dt} + \frac{i_c}{C_n} \quad (9)$$

Das allgemeine Integral dieser Gleichungen setzt sich aus dem Ausgleichsstrom i_a und dem Dauerstrom i_d zusammen. Ersterer ergibt sich bekanntlich, wenn die Störungsfunktion $e = 0$ gesetzt wird, oder physikalisch ausgedrückt, wenn die magnetische Feldenergie der Spule sich frei über die Kapazität und den Lichtbogen entlädt. In diesem Falle lassen sich die beiden Gleichungen unter Berücksichtigung der Gleichung (5) in eine homogene Differentialgleichung II. Ordnung umformen. Sie lautet:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{R_u \cdot C_n} \right) \frac{di}{dt} + \frac{R + R_u}{L \cdot C_n \cdot R_u} \cdot i = 0. \quad (10)$$

Die allgemeine Lösung dieser Gleichung lautet

$$i_a = a_1 \cdot e^{-w_1 \cdot t} + a_2 \cdot e^{-w_2 \cdot t}, \quad (11)$$

worin a_1 und a_2 noch willkürliche Konstanten und

$$w_{1,2} = - \left(\frac{R}{2L} + \frac{1}{2R_u \cdot C_n} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L} + \frac{1}{2R_u \cdot C_n} \right)^2 - \frac{R + R_u}{L \cdot C_n \cdot R_u}}. \quad (12)$$

Hierin stellt

$$\alpha = \frac{R}{2L} + \frac{1}{2R_u \cdot C_n} \quad (13)$$

den Dämpfungsfaktor des Kreises dar.

Wird

$$\alpha^2 < \frac{R + R_u}{L \cdot C_n \cdot R_u},$$

so erfolgt der Ausgleich periodisch, während er bei

$$\alpha^2 > \frac{R + R_u}{L \cdot C_n \cdot R_u}$$

aperiodisch verläuft.

$$\alpha = \frac{R + R_u}{L \cdot C_n \cdot R_u} \quad (14)$$

liefert den kritischen Schwingungswiderstand:

$$R_u = \frac{R}{R^2 \cdot C_n - 4L} \pm \sqrt{\frac{R \cdot C_n - L^2}{C(R^2 \cdot C_n - 4L)}}. \quad (15)$$

Ist der Eigenwiderstand R des Kreises gegen R_u vernachlässigbar, so erhält man für R_u die einfache Beziehung:

$$R_u = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{L}{C_n}}. \quad (16)$$

Solange der Lichtbogenwiderstand unterhalb dieses Wertes bleibt, ist das System aus Induktivität und Kapazität schwingungsunfähig.

Für den Fall, daß die Wurzel imaginär wird, formt man die Gleichung für den Ausgleichsstrom zweckmäßig um. Man bringt die Wurzeln der quadratischen Gleichung auf die Form:

$$w_{1,2} = -\alpha \pm j \cdot m \quad (17)$$

worin

$$j = \sqrt{-1}$$

und

$$m = \sqrt{\frac{R + R_u}{L \cdot C_n \cdot R_u} - \left(\frac{R}{2L} + \frac{1}{2R_u \cdot C_n} \right)^2}. \quad (18)$$

Setzt man ferner

$$A = j(a_1 - a_2) \\ B = a_1 + a_2$$

so ergibt sich:

$$i_a = (A \cdot \sin mt + B \cdot \cos mt) e^{-\alpha t} \quad (19)$$

Gleichung (19) gilt ganz allgemein für i_a , i_L und i_C .

Zur Bestimmung der Konstanten A und B setzt man die für den Zeitpunkt $t = 0$ allgemein geltenden Bedingungen ein. Die Induktivität wird in diesem Augenblick einen Strom $i_{L,0}$ führen, während die aufgedrückte EMK den Wert e_0 besitzt, und der Widerstand R_u des Schalters noch Null ist.

Demgemäß gilt nach Gleichung (19) die Beziehung:

$$B = i_{L,0} \quad (20)$$

und nach (8)

$$e_0 = L \cdot \frac{di_{L,0}}{dt} + R \cdot i_{L,0}. \quad (21)$$

Durch Differentiation der Gleichung (19) ergibt sich nach Einsetzen obiger Werte für t und B

$$\frac{d i_L}{dt} = m \cdot A - \alpha \cdot i_0. \quad (22)$$

Aus (21) und (22) folgt demnach

$$A = \frac{e_0 + (L \cdot \alpha - R) i_{L,0}}{m \cdot L}$$

Nach vollendeter Unterbrechung des Schalterstromes wird $R_u = \infty$, und da dann $\alpha = \frac{R}{2L}$ ist, wird

$$A = \frac{e_0}{m \cdot L} - \frac{\alpha}{m} \cdot i_{L,0}. \quad (23)$$

Strom und Spannung der Parallelschaltung befolgen demnach nach dem Erlöschen des Lichtbogens die Gleichungen:

$$i_L = \left[\frac{e_0}{m \cdot L} \cdot \sin mt + i_{L,0} \cdot \left(\cos mt - \frac{\alpha}{m} \cdot \sin mt \right) \right] \cdot e^{-\alpha t} \quad (24)$$

$$\text{und } v_L = v_C = \left[e_0 \left(\cos mt + \frac{\alpha}{m} \cdot \sin mt \right) - i_{L,0} \left(m L + \frac{R^2}{4 \cdot m L} \right) \cdot \sin mt \right] e^{-\alpha t}. \quad (25)$$

Für kleine Werte von α , d. h. also bei geringer Dämpfung, lassen sich i_L und v_L in wesentlich einfachere Näherungsgleichungen fassen, die ein praktisch hinreichend genaues Bild von dem Ausgleichsvorgang geben. Da in diesem Falle angenähert gilt:

$$m = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_n}},$$

so lauten nunmehr die beiden Gleichungen

$$i_L = \left[\frac{e_0}{\sqrt{L \cdot C_n}} \cdot \sin mt + i_{L,0} \cdot \cos mt \right] e^{-\alpha t} \quad (24a)$$

$$\text{und } v_L = v_C = \left[e_0 \cdot \cos mt - i_{L,0} \cdot \sqrt{\frac{L}{C_n}} \cdot \sin mt \right] e^{-\alpha t}. \quad (25a)$$

Führt die Spule Wechselstrom und erfolgt das Ausschalten in dem Augenblick, in dem der Strom i_L durch Null geht, so verschwinden in den beiden Gleichungen die Glieder mit $i_{L,0}$. Die Unterbrechungsspannung kann dann keinen höheren Wert als e_0 erreichen, das Abschalten erfolgt überspannungsfrei. Der Ausgleich erfolgt in der bekannten Form der „Kirchhoff-Thomson'schen Entladeschwingung“, die in der Hochfrequenztechnik die führende Rolle spielt. In Niederfrequenzkreisen tritt sie stets da auf, wo es zum Ausgleich überwiegend kapazitiver Belastungen kommt, so z. B. beim Ausschalten von Transformatoren mit daran hängenden unbelasteten Netzen, deren Ladestrom den gesamten Magnetisierungsstrom der Transformatoren überwiegt. Noch häufiger wird sie durch Erd- und Kurzschlüsse ausgelöst.

Strom- und Spannungsverlauf der freien Ausgleichsschwingung ergeben sich obiger Bedingung gemäß aus Gleichung 24a und 25a zu:

$$i_L = \frac{e_0}{m L} \cdot \sin mt e^{-\alpha t}$$

$$\text{und } v_L = e_0 \cdot \cos mt e^{-\alpha t}.$$

Sie vermögen jedoch nur ein rohes Bild wiederzugeben, da in technischen Fällen, außer in Hochfrequenzkreisen, wohl stets eisenhaltige Spulen in Frage kommen. Hierbei tritt dann eine Verzerrung der sinus-Kurven ein.

Erfolgt das Ausschalten im Nullwert der Spannung, so erhält man

$$i_L = i_{L,0} \cdot \sin mt$$

und
$$v_L = v_C = -i_{L,0} \cdot \sqrt{\frac{L}{C_n}} \cdot \sin mt e^{-\alpha t}.$$

Bei großer Eigenfrequenz m und geringer Dämpfung α ist der erste Scheitelwert dieser Gleichung sehr nahe:

$$v_m = -i_{L,0} \cdot \sqrt{\frac{L}{C_n}}, \quad (26)$$

der sich auch ohne weiteres aus der Energiegleichung für den Teilkreis aus L und C herleiten läßt. Da in den meisten Fällen weder die Größe von $i_{L,0}$, noch die von L bekannt ist, ist das Rechnen mit dieser Formel sehr erschwert. Unter Einführung von Mittelwerten läßt sich immerhin die Größenordnung der zu erwartenden Überspannung damit ermitteln.

Ausgleiche dieser Art sind stets dann zu erwarten, wenn der Magnetisierungsstrom der abzuschaltenden Maschinen oder Apparate größer als der kapazitive Lade-
strom der zu- und abgehenden Leitungen ist. Wie die Gleichung leicht erkennen läßt, treten hierbei beträchtliche Überspannungen auf. Ein funkenfreies Abschalten ist in diesem Falle nicht möglich. Während im ersten Sonderfall mit Beginn der Unterbrechung die Spannung am Schalter

$$v_u = e - v_L$$

gleich Null sein muß, springt sie im zweiten sofort auf den vollen Betrag der induktiven EMK, die durch Lichtbogenbildung den Kontakt mit der Stromquelle noch weiter aufrecht erhält. Der Vorgang wird demnach aperiodisch beginnen

und erst nach Überschreiten des kritischen Widerstandes $R_u = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{L}{C_n}}$ in einer Schwingung enden.

Während bei Wechselstrombetrieb beide Grenzfälle möglich sind, ist der erste bei Gleichstrom ausgeschlossen.

Von größter Bedeutung ist ein weiterer Sonderfall, der weitaus die günstigsten Bedingungen für einen funken- und überspannungsfreien Ausgleich gewährt. Er tritt dann ein, wenn die wattlos nacheilende Stromkomponente der Induktivität gleich der wattlos voreilenden der Kapazität wird. Man bezeichnet ihn allgemein als „Stromresonanz“. Die Eigenfrequenz des abzutrennenden Schwingungsgebildes stimmt dann mit der Betriebsfrequenz der aufgedrückten Spannung überein. Es ist mithin:

$$m = m_0$$

und
$$i_L \cdot m_0 \cdot L = \frac{i_c}{m_0 \cdot C}.$$

Im Schalter fließt dann nur noch der Verluststrom des Kreises, also ein reiner Wattstrom, der beim Durchgang durch Null abgeschnitten wird. Hierbei entspricht die auftretende Höchstspannung wie im Fall I dem Augenblickswert der aufgedrückten EMK beim Öffnen des Schalters. Das überspannungsfreie Abschalten dieser Art läßt sich bei technischen Transformatoren mit angeschlossenem leerlaufendem Netz schon bei sehr geringer Ausdehnung des letzteren bewerkstelligen. Die hervorragendste Anwendung dieses Sonderfalles in Hochspannungsnetzen wurde durch Einbau von Erdschlußdrosselpulen¹⁾ zur Verhinderung von Erdschlußlichtbögen vollzogen.

Bisher wurde die Kapazität immer an einer Stelle zusammengedrängt angenommen. Das darf stets dann geschehen, wenn die Kapazität durch ein Sekundärnetz eines Transformators oder durch ein Sammelschienen-system dargestellt wird. Handelt es sich jedoch um das Abtrennen induktiv belasteter Leitungen, so ist die Kapazität gleichmäßig auf die Leitungslänge verteilt. Es tritt dann eine starke Ver-

¹⁾ Petersen ETZ 1919 S. 5.

zerrung der Strom- und Spannungskurven ein, die bereits mehrfach¹⁾ untersucht wurden. Sie sind für die Kabeltelegraphie von besonderer Bedeutung.

β) Gemischt nichtschwingender-schwingender Energieaustausch mit einzelnen Funkenentladungen.

Bei den bisherigen Betrachtungen war vorausgesetzt, daß nach erfolgtem Verlöschen des Ausschaltlichtbogens der Schalterstrom dauernd unterbrochen bleiben sollte. Diese Voraussetzung trifft aber in vielen Fällen nicht zu. Es kann vielmehr nach erfolgter Unterbrechung bei genügend hoher Schalterspannung zu erneuter Zündung kommen, wodurch der Vorgang wesentlich verwickelter wird. Man bezeichnet dieses selbsttätige Wiedereinschalten des Kreises in der Hochspannungstechnik allgemein als „Rückzündung“, ein Ausdruck, der bereits in der Hochfrequenztechnik für das Wiederezünden eines Lichtbogens bei einem dem aufgedrückten entgegengesetzten Potential gebraucht wird. Es wäre demnach wohl angebracht, an Stelle obiger Bezeichnung den allgemeinen Ausdruck „Kondensatorentladung“ zu setzen. Tatsächlich sind die Vorgänge, wie sie beim Wiederezünden der Schaltstrecke eintreten, nichts anderes als Entladungen der Kapazitäten über Funken- bzw. Lichtbogenbildung.

Bild 57.

Bild 58.

Maßgebend für die Möglichkeit derartiger Entladungen ist die Entwicklung der Spannung an den Schaltkontakten nach dem erstmaligen Löschen des Lichtbogens. Gemäß der früheren Ableitung war:

$$v_u = e - v_c.$$

Handelt es sich um das Ausschalten von Wechselstrom, so lautet die Gleichung unter Berücksichtigung der Gleichung (25 a)

$$v_u = E_m \cdot \sin m_0 \cdot (T_0 + t) - \left[E_m \cdot \sin m_0 \cdot T_0 \cdot \cos mt + i_{L,0} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \sin mt \right] e^{-\alpha t} \quad (27)$$

Den früheren Betrachtungen entsprechend, ist es auch hier angebracht, zwei Grenzfälle zu unterscheiden, je nachdem der Gesamtstrom des abzutrennenden Kreises vor- oder nacheilt. Da im ersten Fall das Glied $i_{L,0} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$ von untergeordneter Bedeutung ist, so ist die Höhe von e im Augenblick des Ausschaltens maßgebend für das Auftreten von Kondensatorentladungen. Bild 57 gibt den Verlauf der Spannungen für eine der zahlreichen Möglichkeiten dieser Art wieder.

Der Einfluß des Unterbrechungslichtbogens ist dabei unberücksichtigt geblieben. Bei der Annahme des Bildes 57 ist nach dem ersten Unterbrechen des Stromes eine Aufrechterhaltung des Lichtbogens nicht möglich, wohl aber kann eine Neu-

¹⁾ K. W. Wagner ETZ 1911, S. s. 899 ff. Elektromagn. Ausgleichsvorgänge.

zündung erfolgen, da bei dem rasch erfolgenden Spannungsanstieg v_u Werte von sehr nahe $2 \cdot E_m$ erreicht. Lage des Unterbrechungspunktes, Schaltgeschwindigkeit und Frequenz der Entladeschwingung sind demnach außer der Höhe der Betriebsspannung mitbestimmend für die Möglichkeit von Kondensatorentladungen.

Noch viel höhere Überspannungen sind im zweiten Fall zu erwarten, in dem die induktive Ausschaltspannung $i_{L,0} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \sin mt e^{-\alpha t}$ beträchtliche Werte erreichen kann. Von Wichtigkeit ist hier, daß der Bogen zunächst erlischt und die Schaltstrecke genügend entjonisiert wird, damit die unmittelbare Aufrechterhaltung des Bogens nicht möglich ist. In Bild 58 ist ein solcher Fall wiedergegeben. Der Entladevorgang kann sowohl aperiodisch als auch periodisch erfolgen und sich mehrfach wiederholen. Eine genaue zeichnerische Darstellung des Vorganges ist wegen der Unkenntnis der Vorgänge im Lichtbogen sehr erschwert. Es sei daher auf die oszillographischen Aufnahmen im experimentellen Teil verwiesen. Der Versuch unter Bedingungen, wie sie die Praxis stellt, gibt hier die besten Anhaltspunkte.

Für Gleichstrom gelten ähnliche Betrachtungen wie im vorliegenden Fall. Die Schalterspannung verläuft hierbei nach der Gleichung:

$$v_u = E - \left(E \cdot \cos mt - i_{L,0} \cdot \sqrt{\frac{L}{C_n}} \cdot \sin mt \right) e^{-\alpha t}.$$

γ) Hochfrequente Oszillation mit nachfolgendem mittelfrequenten Ausklingen der Energie.

In dem bisher behandelten Kreise waren nur Schwingungen von der durch L und C_n bedingten Eigenfrequenz möglich. Die gegebenenfalls eintretenden Kondensatorentladungen waren aperiodisch angenommen worden. Es kann nun aber auch der Fall eintreten, daß letztere oszillierend verlaufen. Zum Unterschiede gegen oben müssen diese Schwingungen von sehr hoher Frequenz sein, die entsprechend dem Schaltbild 55 durch die Reihenschaltung von C_n und der Summe von Maschinen- und Leitungsinduktivität bestimmt wird. Je kleiner diese Frequenz und je größer die Dämpfung des Funkenkreises ist, um so größer ist die Wahrscheinlichkeit einer aperiodischen Entladung. Wird dagegen, wie in Bild 56, die Maschineninduktivität durch eine Kapazität C_s — Sammelschienen, Netz, Kabel — überbrückt, so wird nicht nur die Frequenz erhöht, sondern gleichzeitig auch die Dämpfung verringert. Dann sind hochfrequente Oszillationen um so sicherer zu erwarten. Von größter Bedeutung ist hier noch die Tatsache, daß selbst außerordentlich kleine Kapazitäten von C_n zur Wirkung gelangen können, vorausgesetzt, daß dabei $C'_s > C_n$ ist.

Auch bei dieser Anordnung der Kapazitäten tritt die größte Gefährdung der Induktivität L dann ein, wenn der Schalterstrom wattlos nacheilend ist, also bei $m_0 \cdot L > \frac{1}{m_0 C}$. Die Unterbrechung beginnt hierbei wie oben mit einem Lichtbogen, der jedoch infolge des Endladestromes von C_n über C_s sehr rasch erlischt. Nach dem Löschen lädt sich die Kapazität im Tempo der Eigenschwingung von L und C_n bis zur Zündspannung auf, der Bogen zündet wieder und C_n entlädt sich von neuem. Das Spiel wiederholt sich so lange, bis die Schaltkontakte sich so weit entfernt haben, daß ein Wiederzünden nicht mehr möglich ist. Mit dem letzten Löschen des Bogens klingt die noch vorhandene Feldenergie der Spule nach Maßgabe der Dämpfung des Kreises aus L und C_n in diesem aus.

Bei genügend kleinen Kapazitäten, die eine entsprechend kurze Löschzeit des Bogens bedingen, treten hier ähnliche Schwingungen auf, wie sie bereits in den

Arbeiten von Simon, Barkhausen, K. W. Wagner, Poulsen usw. unter dem Namen Lichtbogenschwingungen ausführlich behandelt worden sind.

Die Bedingungen, unter welchen der Bogen schwingungsfähig wird, sind naturgemäß dieselben, wie sie aus der Hochfrequenztechnik hinreichend bekannt sind. Eine der wichtigsten ist eine stark fallende statische Charakteristik des Bogens, die insbesondere bei Ölschaltern infolge guter Kühlung der Elektroden fast stets gegeben ist. Außerdem ist eine möglichst geringe Lichtbogenhysteresis von Bedeutung. Auch diese Bedingung wird gerade in Ölschaltern dadurch erfüllt, daß durch die infolge Zersetzung des Öles beim Brennen des Lichtbogens entstehenden Gase eine rasche Entjonisation der Schaltstrecke eintritt.

Größe der abzuschaltenden Stromstärke, Zahl der Unterbrechungsstellen und Schaltgeschwindigkeit bedingen weiterhin Möglichkeit und Dauer der Schwingungen. Gerade sie beeinflussen, abgesehen von der Kühlung, die Steilheit der Lichtbogencharakteristik. Diesem Umstande mag es wohl auch zuzuschreiben sein, daß, wie die Beobachtungen der Praxis¹⁾ lehren, größere Stromstärken sich häufig überspannungsfrei abschalten lassen, während gerade kleinere beim Unterbrechen in der Regel beträchtliche Überspannungen zeigen. Die experimentellen Untersuchungen konnten aus Mangel an Mitteln in dieser Richtung leider nicht verfolgt werden.

Ob außer bei Ölschaltern auch bei der Unterbrechung in Luft Lichtbogenschwingungen auftreten, wurde nicht untersucht, da in erster Linie die Vorgänge beim Schalten unter Öl interessierten. Doch erwähnt K. W. Wagner in seiner vorzüglichen Arbeit über den elektrischen Lichtbogen bereits einen Fall, in dem es sich allerdings nicht um einen normalen Schalter, sondern um einen Hörnerableiter handelt, bei welchem ebenfalls hochfrequente Lichtbogenschwingungen auftreten können.

Über die Form der Schwingungen lassen sich schwer genaue Angaben machen. Der streng mathematischen Behandlung sind sie kaum zugänglich. Aufnahmen mit der Braunschen Röhre sind wohl möglich; aber der Vorgang ist von so kurzer Dauer, daß er sich nicht ohne weiteres photographisch festhalten läßt. Man müßte also periodisch mehrere Ein- und Ausschaltungen vornehmen, um das Bild aufnehmen zu können. Davon wurde jedoch mangels geeigneter Vorrichtungen bei den Versuchen abgesehen. Ganz allgemein kann gesagt werden, daß infolge der steten Verlängerung des Lichtbogens der zweite Teil der Periode der Schwingung sich ändert. Von einer rein periodischen Oszillation kann also keine Rede sein. Trotzdem kommen die Eigenschwingungen des aus L_n , C_n , C_s gebildeten Hochfrequenzkreises voll zur Entwicklung. Mit zunehmender Löscheriode geht die Lichtbogenschwingung in gedämpfte Wellenzüge (Funkenentladung) über. Die Eigenfrequenzen lassen sich leicht mit einem Resonanzwellenmesser nachweisen und messen. Zur Kennzeichnung der Art der Schwingungen läßt sich das umlaufende Heliumröhrchen mit Erfolg verwenden.

Einen guten Anhalt betreffs des Verlaufs der Schwingungen vermag ein Vergleich mit den Vorgängen im Mittelfrequenzkreise, allerdings unter Verwendung einer etwas anderen Schaltung, zu geben. H. Th. Simon, der Altmeister der Lichtbogentheorie, bringt in seiner hervorragenden Arbeit: „Zur Theorie des selbsttönenden Lichtbogens“²⁾ in Bild 15 und 16 zwei Oszillogramme, die zur Vorstellung der Vorgänge in Hochfrequenzkreisen sehr wohl geeignet sind. Auch seine theoretischen Betrachtungen über das Auftreten von Schwingungen bei abnehmender Stromstärke bzw. zunehmender Lichtbogenlänge lassen sich ohne weiteres auf die beim Schalten eintretenden Erscheinungen übertragen. Die Abweichung seiner Versuchsschaltung von der hier gebrauchten Anordnung hat dabei keine nennenswerte Bedeutung.

¹⁾ Petersen, Hochspannungstechnik, II. Aufl. im Ersch.

²⁾ Phys. Zeitschr., 7. Jahrg., Nr. 13, S. 444.

Die obigen Betrachtungen gelten allgemein für das Schalten bei Gleich- und Wechselstrom. Es scheint sogar, daß die Bedingungen für das Schwingen bei letzterem günstiger liegen als bei ersterem, da dort das Einsetzen der Entladung infolge des natürlichen Durchgangs des Stromes durch Null noch erleichtert wird.

Über die Höhe der bei Lichtbogen- oder Funkenentladungen auftretenden Spannungen ist zu bemerken, daß sie außerordentlich hohe Werte erreichen können. Denn da C_n sehr klein und die Unterbrechungsgeschwindigkeit des Stromes groß ist, wird auch $v_{s,c} = \sim \sqrt{\frac{L}{C_n}}$ hoch.

Außer der Induktivität selbst sind vor allem Stromwandler und ähnliche Apparate stark gefährdet, wenn sie in den Leitungen zwischen Schalter und Induktivität liegen. Abgesehen von beträchtlichen Überspannungen können hier noch besonders hohe Überströme auftreten.

Die höchste Überspannung an der Wicklung tritt dann ein, wenn die Eigenschwingung des Kreises $C_n L_n C_s$ in Resonanz mit derjenigen der Induktivität L kommt. Bei eisenhaltigen Spulen spielt der Eisenkern für die hochfrequenten Schwingungen eine ganz untergeordnete Rolle, da die durch sie hervorgerufenen Induktionen sehr gering sind. Infolge der Vormagnetisierung ändert sich lediglich etwas die Höhe der Eigenfrequenz.

Treten an Stelle der konzentrierten Kapazitäten verteilte, so ändert das auch hier an den angestellten Betrachtungen wenig. Nur die Kurvenform erscheint infolge auftretender Ober- oder Koppelschwingungen verzerrt. Auf den Leitungen muß dann meist mit nichtstationärer Strom- oder Spannungsverteilung gerechnet werden. Letzteres ist für die Lage von Meßwandlern oder dergleichen zu beachten.

Zum Schlusse dieser Betrachtungen sei noch erwähnt, daß auch der Fall eintreten kann, daß $C_n > C_s$ wird und C_s sehr klein ist. Dann liegt die größte Spannung, die jedoch stets niedriger sein muß als im vorhergehenden Fall, an C_s . Es kann dann zu Überschlügen am Sammelschienensystem oder an einem Generator kommen. Zweigen von demselben Sammelschienensystem unbelastete oder schwach belastete Leitungen ab, so können auch diese durch Mitschwingen (gegebenenfalls Resonanz) gefährdet werden.

Wird dagegen C_n wirkungslos, so wird, wie groß auch C_s sein mag, der Ausgleich meist aperiodisch oder mittelfrequent, d. h. mit der durch L und C_s bedingten Periode erfolgen.

C. Schutzmaßnahmen gegen die beim Ausgleich auftretenden Überspannungen.

Im Wechselstrombetriebe kommen hauptsächlich zwei Fälle vor, in denen das Abschalten großer Induktivitäten, insbesondere mittels Ölschalter, in Frage kommt; einmal beim Ausschalten leerlaufender Transformatoren, das andere Mal beim Unterbrechen des Ständerstromes in stillstehenden Asynchronmotoren. Das zuverlässigste Mittel ist stets, zu verhüten, daß überhaupt Überspannungen entstehen können. Dies wird in erster Linie dadurch erreicht, daß man zwischen Strom und Spannung eine möglichst geringe Phasenverschiebung herstellt. Es sind dann beim natürlichen Nullwert des Stromes nur niedere Spannungswerte vorhanden, die ein Wiederzünden des Unterbrechungslichtbogens verhindern, sofern die Schaltgeschwindigkeit genügend groß ist. Man wird also Transformatoren tunlichst unter Last abschalten. Läßt sich das nicht bewerkstelligen, so bietet der Vorkontaktschalter den besten technischen Schutz. Abgesehen von der Senkung des Stromes und der Verschiebung der Phasenlage werden hochfrequente Schwingungen entweder ganz unterdrückt oder stark gedämpft. Gerade sie bilden eine weitaus größere Gefahr als die eigentlichen induktiven Unterbrechungsspannungen.

Beim Einschalten des Vorkontaktwiderstandes können natürlich ebenfalls Überspannungen auftreten, so daß dadurch der Größe der erstmaligen Absenkung des Stromes eine bestimmte Grenze gesetzt wird. Der Höchstwert dieser Überspannung läßt sich leicht ermitteln, wenn man berücksichtigt, daß jede Induktivität den ursprünglichen Beharrungszustand aufrecht zu erhalten sucht. Infolgedessen wird im ersten Augenblick nach dem Einschalten des Schutzwiderstandes R_v derselbe Strom fließen wie vorher. Am Widerstand erscheint demnach eine Spannung von $v_v = i_L \cdot R_v$, die nur durch eine entsprechende Spannungserhöhung an der Spule (L) aufgebracht werden kann. Da für technische Transformatoren die zulässige Überspannung den 1,5 bis 2fachen Betrag der Betriebsspannung erreichen darf, so wäre damit

$$R_v = (1,5 \div 2) \cdot m_0 \cdot L_0,$$

worin $m_0 \cdot L_0$ den Scheinwiderstand des leerlaufenden Transformators bedeutet. Bei größeren Leistungen ist die Unterteilung des Vorkontaktwiderstandes in mehrere Stufen Voraussetzung für sicheres Schalten. Die erste Stufe wird hierbei zweckmäßig nicht über $R_{v,1} = m_0 \cdot L_0$ gewählt.

Nach Angaben von W. Petersen¹⁾ haben sich Schutzwiderstände von der Größe

$$R_v = (0,8 \div 2) m_0 \cdot L_0$$

in der Praxis gut bewährt. Die kleinen Werte gelten dabei für hochgesättigte Transformatoren mit sehr spitzer Magnetisierungskurve und infolgedessen hohen Scheitelwerten. Erreicht R_v den kritischen Wert von $2 \cdot \sqrt{\frac{L_n}{C_n}}$, so verhindert er das Entstehen jeder Schwingung im Kreise $C_n L_n C_s$ (Bild 55).

Bei Asynchronmotoren kann der Vorkontaktwiderstand in Wegfall kommen, wenn der Läufer beim Abschalten des Ständers über einen Ohmschen Widerstand geschlossen bleibt. Die Größe des letzteren kann nach einer von Rüdenberg ermittelten Formel berechnet werden. Sie läßt sich aber auch aus der für die Parallelschaltung von L und R_v geltenden Differentialgleichung ersehen. Es gilt bekanntlich die Beziehung:

$$L \cdot \frac{di}{dt} + iR = 0.$$

Die Lösung dieser Gleichung ergibt für den Fall, daß der Strom im Augenblick der Unterbrechung die Größe i_0 besitzt, die Klemmenspannung zu

$$v_k = i_0 \cdot R_v \cdot e^{-\frac{R_v}{L} \cdot t}.$$

Da nun

$$J_{0,m} = \frac{E_m}{m_0 \cdot L_0}$$

wird der Höchstwert:

$$v_{k,m} = \frac{E_m}{m_0 \cdot L_0} \cdot R_v$$

Erreicht also R_v den Betrag von $m_0 L_0$, so ist $v_k = E_m$, d. h. es tritt keine Spannungserhöhung auf. Liegt mithin im Läuferkreis des Motors ein Widerstand, der die Leerlaufscheinleistung desselben aufzunehmen vermag, so erfolgt das Ausschalten überspannungsfrei.

Das Gesagte gilt jedoch nur unter der Voraussetzung, daß das Schalten funkenfrei vor sich geht, oder besser gesagt, daß kein Wiedertzünden des Funkens eintritt, was praktisch nicht immer der Fall ist. Die Rüdenbergschen Oszillogramme (l. c.) zeigen gerade bei kleineren Läuferwiderständen „eine merkbare schnelle Zackenbildung“, d. h. es traten hier zweifellos hochfrequente Schwingungen auf. Der Oszillograph mußte hier selbstverständlich versagen. Über die Höhe der hoch-

¹⁾ l. c.

frequenten Spannungen läßt sich daraus nichts entnehmen, ebensowenig über die Höhe der Frequenz. Da aber höhere induktive Unterbrechungsspannungen nicht mehr in Frage kommen, so ist auch die Gefahr für den Motor selbst gering, dagegen bleiben Stromwandler und Apparate, die in den Zuleitungen liegen, immer noch gefährdet. Jedenfalls ist auch hier die Anwendung von Kontaktschaltern sehr zu empfehlen.

Im Gleichstrombetriebe ist man seit langem zu anderen Hilfsmitteln übergegangen. Hier sind vor allem zwei Fälle zu beachten, in denen Überspannungen die Wicklungen von Maschinen gefährden können: Einmal beim Ausschalten von Erregerwicklungen, das andere Mal beim plötzlichen Unterbrechen des Stromes in Hochspannungsmaschinen. Für den ersten Fall hat sich das „funkenfreie“ Abschalten, wobei die Wicklung mit dem Ausschalten in sich oder über einen Widerstand geschlossen wird, am besten bewährt. Im anderen sucht man die Ankerwicklung durch Parallelkondensatoren zu schützen, deren Schutzwert sich leicht aus der Formel

$$e_{ii} = i \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$$
 ersehen läßt. Doch ist sehr wohl darauf zu achten, daß die gewählte Kapazität tatsächlich dieser Gleichung genügt¹⁾.

Zusammenfassung.

Die vorliegende Arbeit verfolgt den Zweck, die Ursachen der beim Ausschalten von leerlaufenden Asynchronmotoren und Transformatoren auftretenden Überspannungen zu erforschen. Da die streng mathematische Behandlung der Frage ohne genaue Kenntnisse der physikalischen Vorgänge nicht durchführbar ist, wird zum Versuch gegriffen. Rein physikalische Überlegungen zeigen, daß die parallel zur abzuschaltenden Induktivität liegende Kapazität die führende Rolle in bezug auf die Art des Energieausgleiches spielt. Je nach der Größe der Parallelkapazität verläuft dieser:

1. rein aperiodisch,
2. unter hochfrequenten Schwingungen, die meist in mittelfrequenten enden,
3. gemischt nichtschwingend-schwingend, häufig mit einzelnen Funkenentladungen beim Übergang,
4. rein oszillatorisch, und zwar mittel- oder niederfrequent.

Im zweiten und dritten Falle treten die höchsten Überspannungen und Gefährdungen der Wicklungen auf. Dagegen bietet der vierte Fall die Möglichkeit völlig überspannungsfreien Abschaltens, sofern „Stromresonanz“ vorliegt. Den weitaus besten technischen Schutz gegen Überspannungen bei Schaltvorgängen gewährt der Vorkontaktschalter, der eine Dämpfung bzw. völlige Unterdrückung der hochfrequenten Schwingungen gestattet.

¹⁾ Siehe auch Rogowski l. c.

Berichtigung.

In der Arbeit M. Toepler: „Die Grundgesetze der elektrischen Gleiterscheinungen“ hat Bild 13 auf Seite 180 die Zeit t als Abszisse und die Gleitlänge f (nicht aber die Polspannung p) als Ordinate.